

# Linearmotoren sicher positioniert

## Reduzierung der Kraftwelligkeit synchroner Linearmotoren

CHRISTOF RÖHRIG

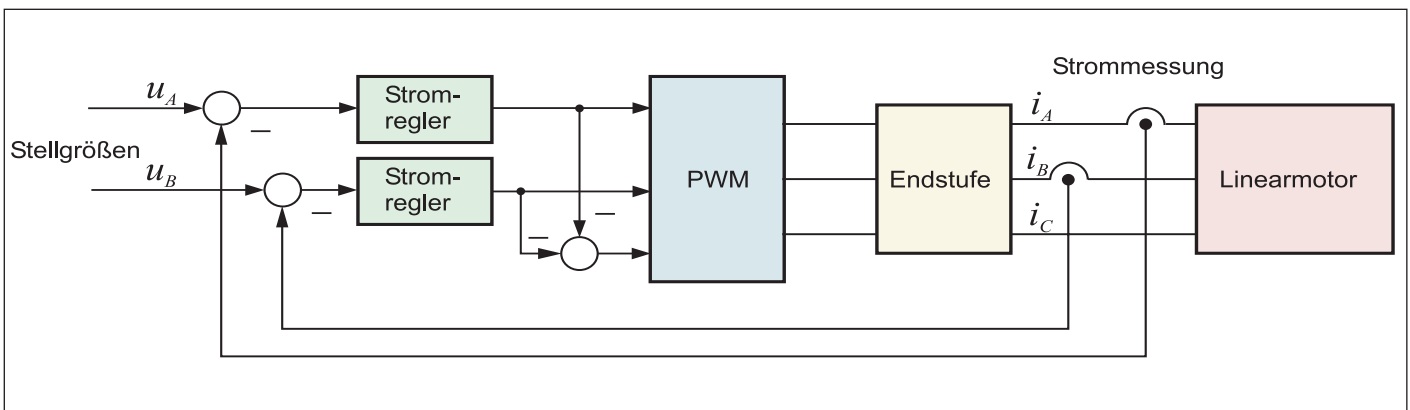
**Synchrone Linearmotoren kommen oftmals dann zum Einsatz, wenn Linearbewegungen mit hohen Geschwindigkeiten und hohen Beschleunigungen realisiert werden sollen. Ein wesentlicher Nachteil dieser Motoren ist aber deren Kraftwelligkeit, da diese die Positioniergenauigkeit mindert. Der Beitrag stellt nun ein Verfahren vor, mit dem durch Optimierung der Kommutierung der Phasenströme sowohl eine Reduzierung der Kraftwelligkeit als auch eine Verringerung der Wicklungsverluste ermöglicht wird. Hierbei werden beliebige Formen der Gegen-EMK (induzierte Spannung) des Motors sowie Unsymmetrien von Motor und Ansteuerlektronik berücksichtigt.**

### 1 Direkte Kraftumwandlung

Linearmotoren setzen die Vorschubkraft direkt ohne Bewegungswandler um und vermeiden so die Limitierungen von elektromechanischen Antriebssystemen. Sie werden vermehrt eingesetzt, wenn bei Linearbewegungen hohe Geschwindigkeiten in Kombination mit hohen Beschleunigungen gefordert sind. Ein wesentlicher Nachteil von den heutzutage überwiegend eingesetzten synchronen Linearmotoren ist aber das Auftreten von Kraftwelligkeit. Die Kraftwelligkeit reduziert die Positioniergenauigkeit und damit die Fertigungsqualität von Anlagen, die mit synchronen Linearmotoren ausgerüstet sind, falls nicht Maßnahmen zur Reduzierung der Kraftwelligkeit unternommen werden.

Die Kraftwelligkeit ist ein elektromagnetischer Effekt, der eine periodische Variation der Kraftkonstante verursacht. Die Kraftwelligkeit führt zu periodischen Kraftschwankungen über der Position, die sich negativ auf die Positioniergenauigkeit auswirken. Die Ursachen der Kraftwelligkeit sind sowohl in der Konstruktion der Motoren als auch in den Fertigungstoleranzen von Motoren und Ansteuerlektronik begründet. Bei synchronen Linearmoto-

*Prof. Dr.-Ing. Christof Röhrig lehrt an der FH Dortmund, Fachbereich Informatik in 44227 Dortmund*



1: Softwarekommutierter Servoverstärker

ren müssen beispielsweise die Phasenströme in Abhängigkeit der Relativposition von Primär- zu Sekundärteil kommutiert werden. Nur wenn die Bestromung der Motorwicklungen exakt an den Motor angepasst ist, wird von diesem ein gleichmäßiger Kraftverlauf über der Position erzeugt.

Die Kraftwelligkeit kann mittels regelungstechnischer Verfahren kompensiert werden. Dabei wird die Kraftwelligkeit identifiziert und mittels Linearisierung kompensiert, wodurch eine Verbesserung des Positionierverhaltens erreicht wird [1]. Nachteilig an regelungstechnischen Kompensationsverfahren ist die durch die Bestromung des Motors entstehende zusätzliche Verlustleistung. Gerade eisenlose Linearmotoren reagieren empfindlich auf Überhitzung. Deshalb setzt das hier vorgestellte Verfahren direkt bei den Ursachen der Kraftwelligkeit an und optimiert die Bestromung des Motors. Voraussetzung dafür ist der Einsatz von softwarekommutierten Servoverstärkern mit frei programmierbarer Kommutierungsfunktion. Der zusätzliche Freiheitsgrad dieser Verstärker wird zur Optimierung der Krafterzeugung des Motors genutzt, wobei neben der Kompensation der Kraftwelligkeit auch eine Minimierung der Wicklungsverluste erreicht wird. Die Wirksamkeit des Verfahrens wurde exemplarisch durch verschiedene Untersuchungen an mehreren Linearmotoren und Servoverstärkern nachgewiesen [2].

### 2 Ursachen der Kraftwelligkeit

Zwei Arten von periodischen Kraftschwankungen müssen bei permanentmagneterregten synchronen Motoren unterschieden werden: magnetische Rastkraft und elektromagnetische Kraftwelligkeit. Beide Kraftschwankungen sind periodische Funktionen der Relativposition zwischen Primär- und Sekundärteil.

Die Rastkraft ist eine magnetische Störkraft, die durch die Anziehung zwischen den Permanentmagneten des Sekundärteils und dem Eisen des Primärteils entsteht. Die Kraft hängt von der relativen Position des Primärteils zu den Magneten des Sekundärteils ab; sie ist unabhängig vom Motorstrom. In eisenlosen Motoren kann die Rastkraft vernachlässigt werden. In [3] wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Rastkraft von eisenbehafteten synchronen Linearmotoren identifiziert und kompensiert werden kann.

Die Kraftwelligkeit ist ein elektromagnetischer Effekt, der eine periodische Variation der Kraftkonstanten  $K_M$  verursacht. Kraft-

| Variable    | Erläuterung                                |
|-------------|--|
| $x$         | Position                                   |
| $\dot{x}$   | Geschwindigkeit                            |
| $F_{el}$    | Vorschubkraft                              |
| $\tau_p$    | Polteilung                                 |
| $u_{EMK,p}$ | Gegen-EMK der Phase $p$                    |
| $p$         | Phasenindex $p \in \{A,B,C\}$              |
| $i_p$       | Strom in der Phase $p$                     |
| $\vartheta$ | Elektrischer Winkel                        |
| $u$         | Stellgröße (Sollkraft)                     |
| $u_A, u_B$  | Stellgrößen der Phasenströme               |
| $K_{M,p}$   | Kraftfunktion der Phase $p$                |
| $K_A, K_B$  | Kraftfunktionen der Stellgrößen $u_A, u_B$ |
| $x_0$       | Elektrische Nulllage                       |
| $K_F$       | Kraftkonstante der Stellgröße $u$          |
| $o_A, o_B$  | Gleichanteile der Kommutierungsfunktionen  |
| $k$         | Index                                      |
| $\theta$    | Vektor mit geschätzten Parametern          |

**Tabelle: Erläuterung der verwendeten Formelzeichen**

welligkeit entsteht nur, wenn der Motorstrom ungleich null ist. Der Absolutwert hängt von der Vorschubkraft des Motors und der relativen Position zwischen Primär- und Sekundärteil ab.

Die Kraft in jeder einzelnen Phase entsteht durch das Zusammenwirken von permanentem magnetischen Feld des Sekundärteils und elektromagnetischem Feld der Phase des Primärteils. Die Kraft, die von einer Phase erzeugt wird, ist proportional zum magnetischen Feld und zum Strom in der jeweiligen Phase. Die Gegen-EMK ( $u_{EMK}$ ), die in jede Phase induziert wird, ist wiederum proportional zum magnetischen Feld und zur Geschwindigkeit des Motors  $\dot{x}$ . Die Gesamtkraft eines dreiphasigen Motors ergibt sich damit aus der Summe der durch jede einzelne Phase generierten Kraft zu (Erläuterung der Formelzeichen siehe **Tabelle**):

$$\dot{x} F_{el} = u_{EMK,A} i_A + u_{EMK,B} i_B + u_{EMK,C} i_C \quad (1)$$

Die induzierten Spannungen  $u_{EMK,p}, p \in \{A,B,C\}$  sind dabei periodische Funktionen der Position und  $i_A, i_B, i_C$  die Ströme in den einzelnen Phasen. Auf der linken Seite der Gleichung ist die abgegebene mechanische Leistung und auf der rechten Seite die aufgenommene elektrische Leistung beim motorischen Betrieb zu finden, wobei die Wicklungsverluste nicht berücksichtigt werden.

Die normierte Kurvenform der Spannung über der Position  $x$

$$K_{M,p}(x) = \frac{u_{EMK,p}(x)}{\dot{x}} \quad (1a)$$

kann auch als „Kraftkonstante“ der einzelnen Phasen betrachtet werden. Sie wird im Folgenden als Kraftfunktion bezeichnet. Die Kraftwelligkeit kann unterschiedliche Ursachen haben. Eine Ursache der Kraftwelligkeit liegt in einer nicht angepassten Kommutierung der Phasenströme. Nur wenn die Kurvenform der Phasenströme exakt auf die Kraftfunktionen  $K_{M,p}(x)$  abgestimmt ist, ist die entstehende Kraft positionsunabhängig und es entsteht keine Kraftwelligkeit.

Bei sinusförmiger Kommutierung ist die resultierende Kraft nur dann positionsunabhängig, wenn auch die Gegen-EMK des Motors exakt sinusförmig ist. Bei einer Oberwelle der Gegen-EMK der Ordnung  $k$  ergeben sich nach Gleichung 1 bei sinusförmiger Bestromung der Phasen Oberwellen der Ordnungen  $k - 1$  und  $k + 1$  in der Kraft, die durch diese Phase gebildet wird. Bei einem exakt symmetrischen dreiphasigen Motor werden jedoch nur Oberwellen der Ordnung  $3k, k \in \mathbb{N}$  in der Gesamtkraft erzeugt, da alle an-

deren Oberwellen durch die Überlagerung der Kräfte kompensiert werden. Die Amplitude der Oberwellen ist auf Grund von Gleichung 1 linear vom Strom abhängig. Um einen weitgehend gleichmäßigen Kraftverlauf bei einer sinusförmigen Kommutierung zu erreichen, wird durch konstruktive Maßnahmen versucht, die Gegen-EMK des Motors möglichst genau sinusförmig auszubilden. Konstruktive Maßnahmen zur Verringerung der Kraftwelligkeit sind oftmals nicht hinreichend und haben in der Regel eine Herabsetzung der Vorschubkraft und des Wirkungsgrads zur Folge. Hinzu kommt, dass konstruktive Maßnahmen die Fertigungskosten der Motoren erhöhen und die erreichbare Vorschubkraft reduzieren können. Aus diesem Grund weisen die am Markt erhältlichen Linearmotoren bei sinusförmiger Kommutierung der Phasenströme eine zum Teil erhebliche, konstruktiv bedingte Kraftwelligkeit auf.

Neben den konstruktiv bedingten Ursachen können auch Toleranzen bei der Motorfertigung Kraftwelligkeiten erzeugen. Weist ein Motor einen Amplituden- oder Phasenfehler in der Gegen-EMK auf, so wird eine Kraftwelligkeit mit der halben Kommutierungsperiode (Oberwelle der 2. Ordnung) erzeugt, die linear von der erzeugten Kraft abhängt. Durch diese Unsymmetrie des Motors können dann Oberwellen der Gegen-EMK zusätzliche Oberwellen in der Kraftwelligkeit erzeugen, die bei exakt symmetrischem Motor kompensiert würden.

Neben den Ursachen der Kraftwelligkeit des Motors können Offsets sowie Amplituden- und Phasenfehler bei der Bestromung durch den Servoverstärker entstehen. Die Offsets führen zu einer Nullpunktverschiebung der einzelnen Phasenströme, welche in der analogen Elektronik oder auch auf Grund der analogen Strommessung auftreten können. Durch die Nullpunktverschiebung wird den Phasenströmen ein Gleichstrom überlagert, der zu einer Kraftwelligkeit führt, die unabhängig von der Vorschubkraft ist. Aus Gleichung 1 wird ersichtlich, dass die durch den Gleichstrom erzeugte periodische Kraft lastunabhängig ist sowie Form und Periode der Gegen-EMK hat.

Ursachen für Amplitudenfehler können unterschiedliche Verstärkungsfaktoren in der Stromregelung und in der Strommessung sein. In diesen Fällen werden die Phasenströme mit unterschiedlichen Amplituden bestromt. Aus Gleichung 1 kann ermittelt werden, dass die durch Amplitudenfehler entstehende Kraftwelligkeit linear von der Vorschubkraft abhängt und die halbe Kommutierungsperiode aufweist. Wird auf Grund einer fehlerhaften Erfassung der Relativposition zwischen Primär- und Sekundärteil ein Motor mit phasenverschobenen Strömen angesteuert, entsteht auch hier eine Kraftwelligkeit, die die halbe Kommutierungsperiode aufweist

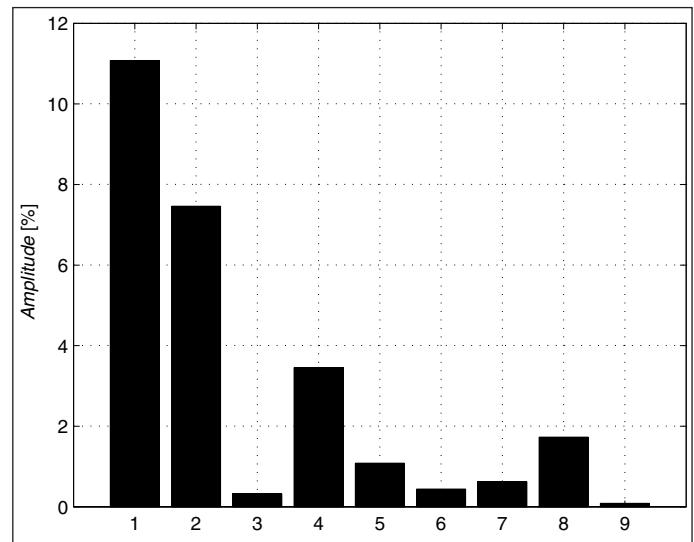
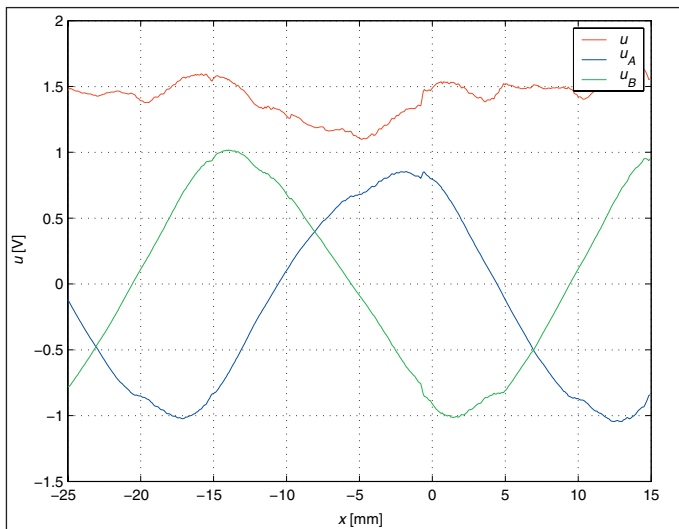
### 3 Kommutierung der Phasenströme von synchronen Linearmotoren

Die Kommutierung der Phasenströme von synchronen Linearmotoren kann auf zwei Wegen erfolgen: mittels einer speziellen Sensorik oder mittels Software.

#### 3.1 Elektronische Kommutierung mittels spezieller Sensorik

Zu Beginn der Entwicklung der Linearmotoren wurden die Phasenströme ausschließlich elektronisch mit Hilfe von Sensorik kommutiert. Zuerst wurden hierfür digital arbeitende Hallsensoren verwendet, um in Abhängigkeit vom Magnetfeld die Phasenströme umzuschalten. Diese Kommutierungsart wird auch als Blockkommutierung bezeichnet. Um bei einer Blockkommutierung einen gleichmäßigen Kraftverlauf zu erreichen, muss die Gegen-EMK der Phasen trapezförmig ausgeführt werden. Da dies nicht exakt möglich ist, ist bei blockförmiger Kommutierung immer mit einer erhöhten Kraftwelligkeit zu rechnen. Ein weiteres Problem der Blockkommutierung ist das Umschalten der Phasenströme und damit die unendlich große Stromanstiegsgeschwindigkeit der Phasenstromströme. Die Zeitkonstante der Stromregelkreise, verbunden mit der endlichen Zwischenkreisspannung, begrenzt die Stromanstiegsgeschwindigkeit, was zu einer zusätzlichen Kraftwelligkeit führt, die zudem von der Geschwindigkeit des Motors abhängt.

Durch die Weiterentwicklung der Elektronik und der Sensorik können analog arbeitende Hallsensoren zur Kommutierung einge-



**2: Stellgrößen bei konstanter Lastkraft**

setzt werden. Mithilfe dieser Sensoren können die Phasenströme proportional zum Magnetfeld kontinuierlich kommutiert werden. Um bei dieser Kommutierungsart einen gleichmäßigen Kraftverlauf zu erhalten, muss sowohl die Form des Magnetfeldes als auch die der Gegen-EMK sinusförmig ausgebildet sein. Diese Kommutierung wird auch als Sinushallkommutierung bezeichnet. Durch konstruktive Maßnahmen wird versucht, die Gegen-EMK des Motors sinusförmig auszubilden. Die Leistungsdichte von permanentmagneterregten Motoren mit sinusförmiger Gegen-EMK ist jedoch in der Regel geringer als von Motoren mit trapezförmiger Gegen-EMK, da die Anordnung der Magnete und Wicklung angepasst werden muss, um die Sinusform zu erreichen.

Elektronisch kommutierte Motoren müssen entsprechend der Kommutierungsart konstruiert und gefertigt werden. Dabei muss sowohl das Wicklungssystem als auch die Anordnung der Magneten angepasst werden. Bei der Fertigung der auf diese Weise konstruierten Motoren entstehen zusätzliche Kosten bei der Erzeugung des geforderten Magnetfeldes (z. B. durch speziell geformte Permanentmagneten).

**3.2 Kommutierung mittels Software**

Bei der Kommutierung mittels Software wird aus der gemessenen Position und einer Kommutierungsfunktion die Bestromung der Phasenströme gesteuert. Die Ermittlung der Phasenströme geschieht durch einen Algorithmus, der in die Software implementiert ist, weshalb auch von einer Softwarekommutierung gesprochen wird.

Durch die Softwarekommutierung wird eine freie Programmierung der Stromform ermöglicht. Diese kann an den Motor angepasst werden, um eine optimale Krafterzeugung zu ermöglichen. Die kommerziell verfügbaren, digital arbeitenden Servoverstärker nutzen diese Möglichkeit jedoch in der Regel nicht, sondern kommutieren die Ströme mit reiner Sinusform. Um Kraftwelligkeit zu vermeiden, müssen die mit diesen Servoverstärkern eingesetzten Motoren deshalb auch eine sinusförmige Gegen-EMK besitzen. Hauptvorteil einer rein sinusförmigen Softwarekommutierung gegenüber der elektronischen Kommutierung ist neben den eingesparten Kosten für die Sensorik eine von Fehlern der Elektronik und Sensorik unbeeinflusste Stromform.

Das hier vorgestellte Verfahren nutzt die Softwarekommutierung, um die Kommutierungsfunktion an beliebige Motorkonstruktionen optimal anzupassen. Die Konstruktion der Motoren ist nicht mehr auf eine sinusförmige Gegen-EMK festgelegt. Dadurch können Fertigungskosten verringert und Motoren mit höherer Kraftdichte produziert werden.

**4 Kompensation der Kraftwelligkeit**

Ziel des hier vorgestellten Verfahrens zur Kompensation der Kraftwelligkeit ist die Optimierung der Kommutierung der Phasenströme, um so die Kraftwelligkeit und Wicklungsverluste zu

**3: Spektrum der Stellgröße u**

verringern. Voraussetzung für die Optimierung der Kommutierung ist die Kenntnis der Kraftfunktion der einzelnen Phasen. Im Folgenden wird zuerst eine Analyse der Kraftwelligkeit eines Linearmotors bei sinusförmiger Bestromung durchgeführt. Danach wird die Identifikation der Kraftfunktionen vorgestellt, worauf die Optimierung der Kommutierung aufbaut.

**4.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus**

Die Untersuchungen wurden mit verschiedenen eisenlosen Linearmotoren durchgeführt. Die Motoren wurden mit softwarekommutierten Servoverstärker mit Drehstrombrückenschaltung gespeist. Bild 1 zeigt das Blockschaltbild eines derartigen Servoverstärkers. Die Sollwerte von zwei der drei Phasenströme werden mittels der analogen Eingänge  $u_A$  und  $u_B$  vorgegeben. Die Stromregelung erfolgt mittels Analogtechnik, wobei sich der dritte Phasenstrom auf Grund der Sternschaltung aus den beiden anderen ergibt:

$$i_C = -i_A - i_B \tag{2}$$

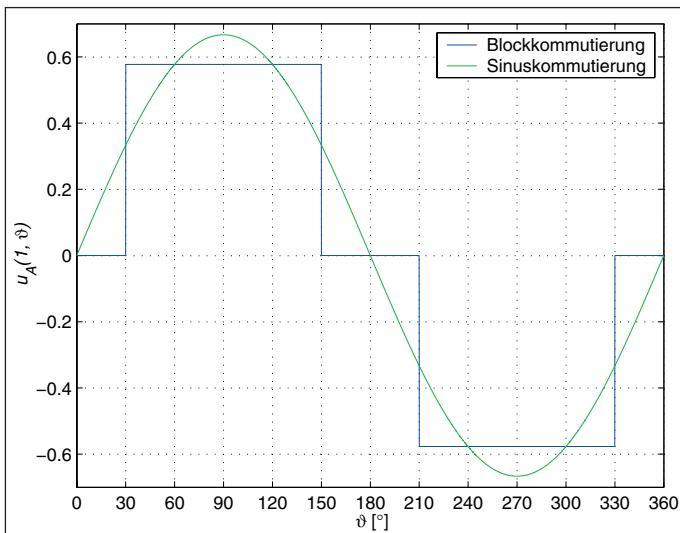
Durch die Ansteuerung mit Drehstrombrückenschaltung lassen sich nur zwei der drei Phasenströme unabhängig regeln. Eine Ansteuerung mit Drehstrombrückenschaltung wird deshalb in der Servotechnik üblicherweise gewählt, da hierbei die Anzahl der Transistoren in der Endstufe mit sechs minimal ist. Bei der Bestromung eines zweiphasigen Motors mittels H-Brücken werden z. B. acht Transistoren benötigt. Die Motorwicklungen werden üblicherweise im Stern geschaltet, um die Bestromung der einzelnen Phasenwicklungen direkt regeln zu können. Bei den verwendeten Motoren ist der Sternpunkt nicht nach außen geführt. Durch den softwarekommutierten Servoverstärker können beliebige Stromformen vorgegeben werden. Die Berechnung der Stromform erfolgt in einer übergeordneten Steuerung, die als Industrie-PC ausgeführt ist.

Der Versuchsaufbau ergibt sich aus den Anforderungen bei den Untersuchungen. Er limitiert nicht die Anwendbarkeit des Verfahrens. Die Berechnung der Kommutierung kann genauso gut in einem digitalen Servoregler implementiert werden. Auch ist das Verfahren nicht auf eisenlose Linearmotoren beschränkt. Es kann prinzipiell auf alle dreiphasigen permanentmagneterregten Synchronmotoren angewandt werden, die mittels Drehstrombrückenschaltung bestromt werden.

**4.2 Analyse der Kraftwelligkeit bei sinusförmiger Bestromung**

Zur Analyse der Kraftwelligkeit wird eine sinusförmige Bestromung gewählt:

$$u_A(u, \vartheta) = u \frac{2}{3} \sin(\vartheta(x)) + o_A \tag{3a}$$



4: Sinus- und Blockkommutierung

$$u_B(u, \vartheta) = u \frac{2}{3} \sin\left(\vartheta(x) + \frac{2\pi}{3}\right) + o_B \quad (3b)$$

mit

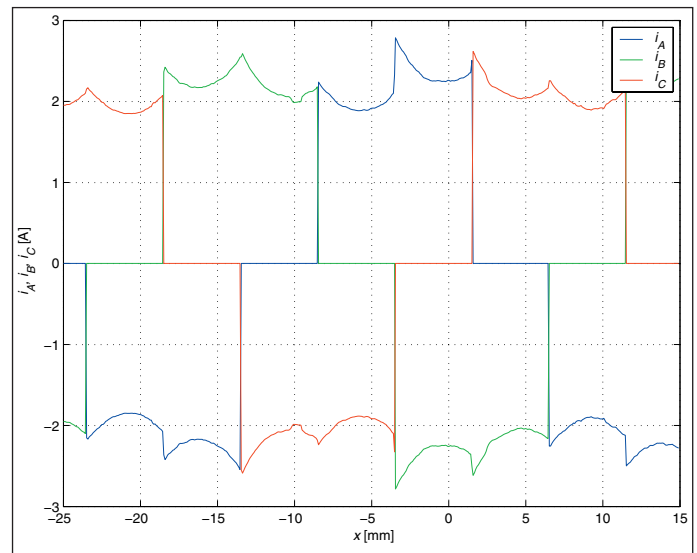
$$\vartheta(x) = \frac{\pi}{\tau_p} (x - x_0) \quad (3c)$$

Der Strom in den Phasenwicklungen wird in Abhängigkeit des elektrischen Winkels  $\vartheta$  sinusförmig eingepreßt. Der elektrische Winkel  $\vartheta$  ist eine Funktion der Position  $x$  und wird mit Hilfe der elektrischen Nulllage  $x_0$  und der Polteilung  $\tau_p$  bestimmt. Die Stromsollwerte  $u_A$  und  $u_B$  sind voneinander um  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ) versetzt, das Vorzeichen der Verschiebung wird durch den Motor vorgegeben. Die Gleichanteile  $o_A$  und  $o_B$  dienen zur Kompensation der Offsets im Servoverstärker. Die Amplitude der Phasenströme wird durch die Stellgröße (Sollkraft)  $u$  eingestellt. Die Stellgröße  $u$  entspricht bei der sinusförmigen Bestromung nach Gleichung 3 dem Betrag des Stromzeigers, der durch die Phasenstromsollwerte  $u_A$  und  $u_B$  gebildet wird. Die hier vorgestellten Messungen wurden an einer Servoachse durchgeführt, die vertikal angeordnet ist, und deren Motor durch die Schwerkraft permanent mit zrika 15 N belastet wird. **Bild 2** zeigt die Stellgröße  $u$  sowie die daraus ermittelten Stromsollwerte  $u_A$  und  $u_B$  über der Position  $x$ . Auf Grund der gleichmäßigen Lastkraft über der Position muss der Motor eine von der Position unabhängige Vorschubkraft aufbringen. Die Stellgröße zeigt jedoch einen stark schwankenden Verlauf, der periodisch von der Position abhängig ist. Diese Schwankungen werden durch die Kraftwelligkeit hervorgerufen. Der Regler verändert die Stellgröße über der Position, um die erforderliche konstante Vorschubkraft zu generieren. Als Lageregler wurde für diese Untersuchungen ein PID-Regler gewählt. Bei langsamen Vorschubbewegungen kann der I-Anteil des Reglers die Regelabweichung kompensieren, die durch die Kraftwelligkeit hervorgerufen wird. Wird der Motor jedoch mit seiner normalen Geschwindigkeit bewegt, führt die Kraftwelligkeit zu einem erhöhten Schleppfehler. **Bild 3** zeigt das Spektrum der Stellgröße, welches mit der Methode der "Kleinsten Quadrate" ermittelt wird. Als Modellfunktion dient nachstehende Funktion:

$$f(x, \theta) = \theta_1 + \theta_2 x + \sum_{k=1}^N \left( \theta_{2k+1} \sin\left(k\pi \frac{x}{\tau_p}\right) + \theta_{2k+2} \cos\left(k\pi \frac{x}{\tau_p}\right) \right) \quad (4)$$

Der Vektor  $\theta$  enthält die geschätzten Parameter. Der Parameter  $\theta_1$  enthält den Mittelwert der Stellgröße, der Parameter  $\theta_2$  den Anstieg der Stellgröße mit der Position (dies wird durch die Kabelkette verursacht). Aus den restlichen Parametern des Vektors lässt sich das Spektrum der Stellgröße ermitteln, wobei die Amplitude einer Welle der Ordnung  $k$  sich durch

$$\sqrt{\theta_{2k+1}^2 + \theta_{2k+2}^2} \quad (4a)$$



5: Phasenströme bei der Blockkommutierung

ermitteln lässt.

Die Fundamentalwelle (Ordnung 1) hat die Periode der Kommutierungsperiode (doppelte Polteilung des Motors). Die größte Welligkeit ist bei der Fundamentalwelle zu verzeichnen. Diese Welligkeit wird durch Offsets im Servoverstärker verursacht. Durch Anpassung der Gleichanteile in der Kommutierungsfunktion (Gleichungen 3a und 3b) kann diese Welligkeit kompensiert werden. Zur Berechnung kann die Fundamentalwelle aus Gleichung 4 herangezogen werden:

$$o_A = \frac{a}{\sqrt{3}} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{a}{3} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \quad (5a)$$

$$o_B = \frac{2a}{3} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6}\right) \quad (5b)$$

mit

$$\alpha = \sqrt{\theta_3^2 + \theta_4^2} \quad (5c)$$

und

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\theta_4}{\theta_3}\right) \quad (5d)$$

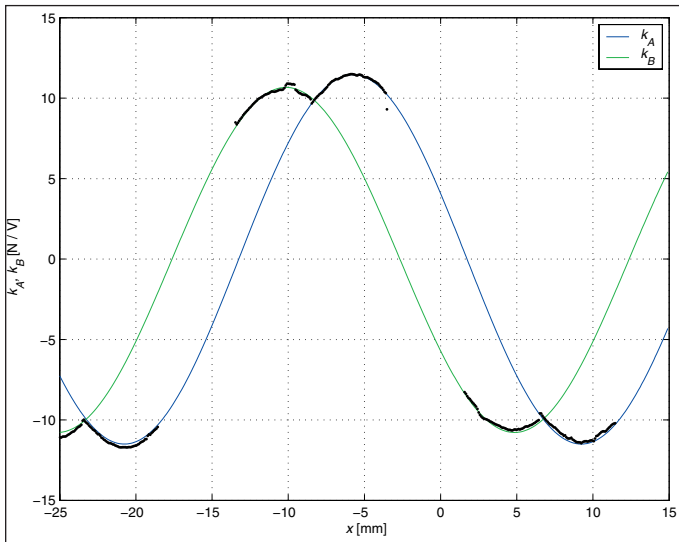
Für die weiteren Schritte wird die lastunabhängige Stromwelligkeit kompensiert. Bei einem eisenbehafteten synchronen Linearmotor kann der Gleichanteil  $o_A$ ,  $o_B$  auch zur Kompensation der Rastkraft verwendet werden. Der Gleichstrom in den Wicklungen erzeugt dann eine Kraft mit der Form der Gegen-EMK, die der Rastkraft entgegengesetzt ist und diese reduziert. Die Kompensation der Rastkraft ist umso wirksamer, je stärker die Form der Gegen-EMK mit der der Rastkraft übereinstimmt.

Die Oberwellen der 2. Ordnung (siehe Bild 3) werden durch Unsymmetrien von Motor und/oder Verstärker verursacht. Eine Kompensation dieser Welligkeit ist durch Anpassung der Amplitude und Lage der Kommutierungsfunktion an die Kraftfunktionen der Motorphasen möglich. Dazu ist eine genaue Kenntnis der Kraftfunktionen notwendig.

### 4.3 Identifikation der Kraftfunktionen

Zur Identifikation der Kraftfunktion wird die Blockkommutierung herangezogen





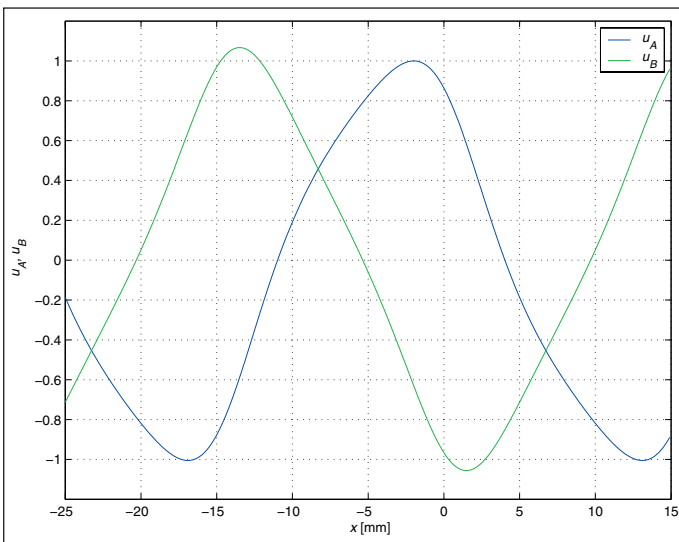
6: Identifizierte Kraftfunktionen

$$u_A(u, \vartheta) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \vartheta < \frac{\pi}{6} \\ \frac{u}{\sqrt{3}} & \frac{\pi}{6} \leq \vartheta < \frac{5\pi}{6} \\ 0 & \frac{5\pi}{6} \leq \vartheta < \frac{7\pi}{6} \\ -\frac{u}{\sqrt{3}} & \frac{7\pi}{6} \leq \vartheta < \frac{11\pi}{6} \\ 0 & \frac{11\pi}{6} \leq \vartheta < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

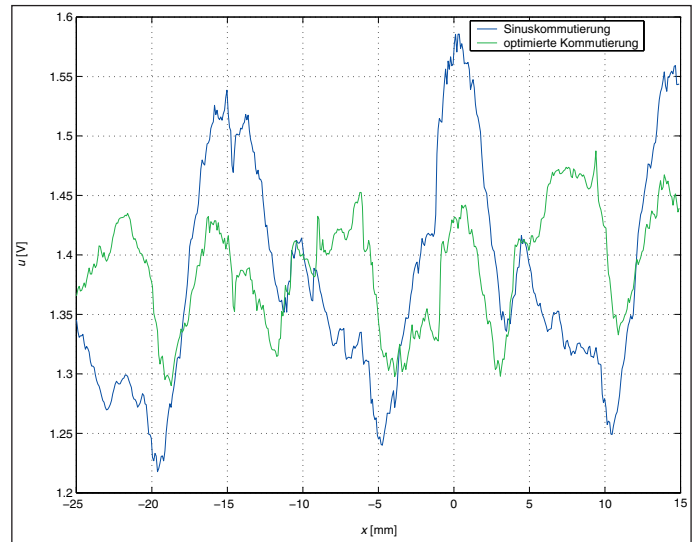
Bild 4 vergleicht den Verlauf der Blockkommutierung mit der Sinuskommütierung. Die zweite Phase ist wie bei der Sinuskommütierung um  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ) verschoben:

$$u_B(u, \vartheta) = u_A\left(u, \vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (7)$$

Bei der Blockkommutierung werden immer zwei Phasen vom gleichen Strom durchflossen. Auf diese Weise ist es möglich, die Kraftfunktionen stückweise zu identifizieren. Bild 5 zeigt den Verlauf der Ströme über der Position bei Blockkommutierung. Auch hier wird der Motor auf Grund der Schwerkraft mit einer konstanten Kraft belastet. Der Verlauf der Ströme unterscheidet sich deutlich von der Sinuskommütierung. Der Regler moduliert auch hier die Stellgröße, so dass ein über der Position konstanter Kraftverlauf erreicht wird. Die Verlustleistung des Motors wird jedoch auf Grund der ungünstigeren Bestromung gegenüber der Sinuskommütierung stark erhöht. Insbesondere an den Umschaltpunkten erkennt man deutlich erhöhte Phasenströme mit da-



7: Optimierte Kommutierungsfunktionen



8: Stellgrößen bei Sinuskommütierung und optimierter Stromform

durch stark erhöhter Verlustleistung. Die Blockkommutierung ist deshalb zum Betrieb des Motors ungeeignet und wird nur zur Identifikation der Kraftfunktionen genutzt.

Die lokalen Minima der Phasenströme korrespondieren mit den lokalen Maxima der Kraftfunktionen. An diesen Stellen wird die Verlustleistung minimal und damit die Motoreffizienz maximal. Da die erzeugte Vorschubkraft über der Position konstant ist, können die Phasenströme direkt genutzt werden, um die Kraftfunktionen zu identifizieren. In einem dreiphasigen Motor mit Sternschaltung werden nur zwei Phasen unabhängig voneinander bestromt, deshalb sind auch nur zwei Kraftfunktionen identifizierbar:

$$F_{el} = K_A(\vartheta)u_A + K_B(\vartheta)u_B \quad (8)$$

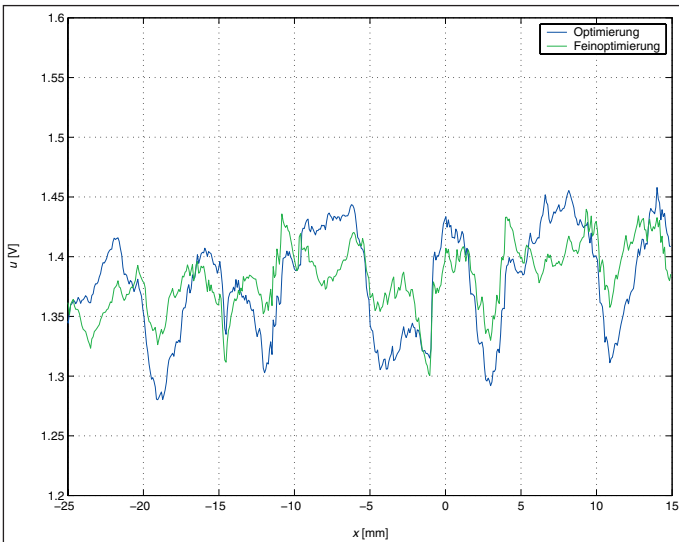
Die Kraftfunktionen beschreiben das Verhalten des Servosystems bestehend aus Servoverstärker und Motor. Es wird das Ein-/Ausgangsverhalten des Systems von den Stromsollwerten bis zur erzeugten Vorschubkraft identifiziert. Es werden somit alle Einflüsse von Motor und Servoverstärker auf die Krafterzeugung berücksichtigt. Bild 6 zeigt den Verlauf der identifizierten Kraftfunktionen  $K_A$  und  $K_B$  über der Position  $x$ . Die punktierten Werte sind die aus den Phasenstromwerten ermittelten Kraftfunktionswerte. Die Kraftfunktionen werden hier mittels Sinusfunktion approximiert, da der untersuchte Motor annähernd eine sinusförmige Gegen-EMK besitzt. Für den Fall einer nicht sinusförmigen Gegen-EMK kann durch Messung der Gegen-EMK an einem Motorprüfstand die geeignete Kurvenform zur Approximation ermittelt werden. Die Kurvenform hängt in erster Linie von der Konstruktion des Motors ab und muss deshalb für jeden Motortyp nur einmal ermittelt werden.

Der Verlauf der Kraftfunktionen in Bild 6 zeigt eine deutliche Unsymmetrie in der Amplitude der Kraftfunktionen. Messungen haben gezeigt, dass die Ursache dieser Unsymmetrie sowohl im Motor als auch im Verstärker begründet ist. Für den Spezialfall von unsymmetrischen sinusförmigen Kraftfunktionen kann eine Kompensation der Kraftwelligkeit durch Anpassung der Amplitude und der Phasenlage der Kommutierungsfunktion erreicht werden:

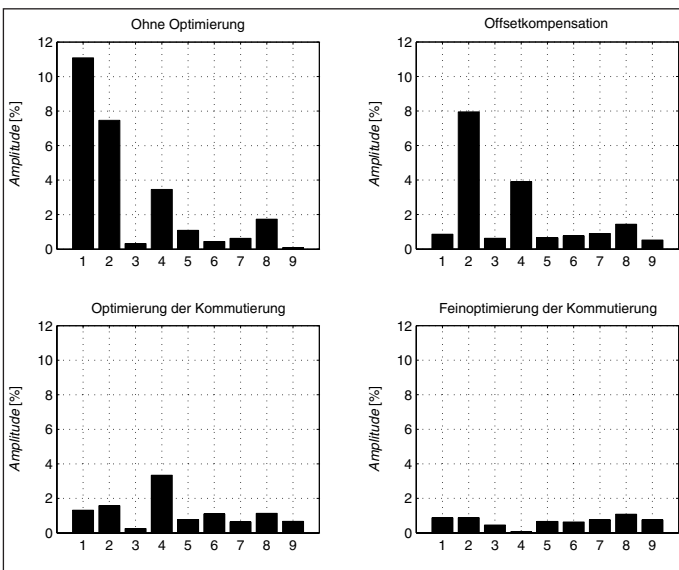
$$u_A(u, \vartheta) = u a_u \sin(\vartheta + \alpha_u) + o_A \quad (9a)$$

$$u_B(u, \vartheta) = u b_u \sin(\vartheta + \beta_u) + o_B \quad (9b)$$

Die Parameter  $a_u$ ,  $b_u$ ,  $\alpha_u$  und  $\beta_u$  können direkt aus der Amplitude und der Phasenlage der identifizierten Kraftfunktionen  $K_A$  und  $K_B$  ermittelt werden. Für die Berechnung der Parameter wird auf [2] verwiesen. Diese Maßnahme ist jedoch nur bei sinusförmiger Gegen-EMK anwendbar. Im Vergleich zur Anpassung der Amplitude und der Phasenlage der Kommutierungsfunktionen kann



**9: Stellgrößen mit und ohne Feinoptimierung**



**10: Spektren der einzelnen Optimierungsschritte**

durch Anpassung der Kurvenform der Kommutierungsfunktionen die Effizienz des Motors gesteigert werden.

**4.4 Optimierung der Kommutierungsfunktionen**

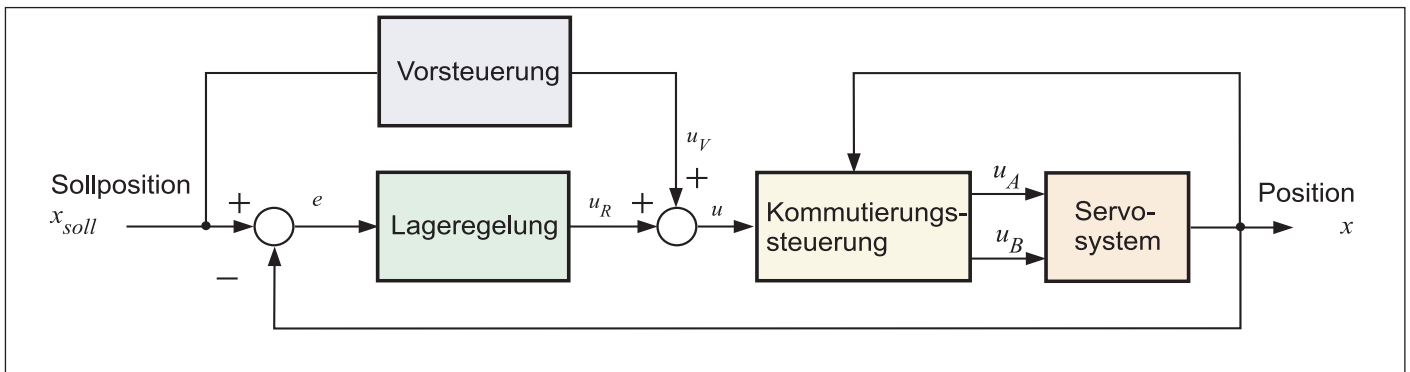
Ziel der Optimierung ist die Berechnung von Kurvenformen der Kommutierungsfunktionen, welche eine von der Position unabhängige gleichmäßige Vorschubkraft erzeugen. Die Vorschubkraft  $F_{el}$  soll nur noch von der Stellgröße  $u$  und nicht von der Position  $x$  abhängen ( $F_{el} \neq f(x)$ ). Als Hauptkriterium für die Optimierung wird eine vom elektrischen Winkel unabhängige Kraft für Gleichung 8 festgelegt ( $F_{el}(u) = K_F u$ ). Wobei  $K_F$  als Kraftverstärkung zwischen Stellgröße und Vorschubkraft frei vorgegeben werden kann.

Aus Gleichung 8 ist ersichtlich, dass eine gleichmäßige Kraft-erzeugung mit verschiedenen Kommutierungsfunktionen erreicht werden kann. Es müssen also weitere Nebenbedingungen hinzugezogen werden. Als Optimierungskriterium wird hier die Verlustleistung in der Wicklung herangezogen:

$$P_{cu} = R_A i_A^2 + R_B i_B^2 + R_C i_C^2 \tag{10}$$

Durch einsetzen von Gleichung 2 in Gleichung 10 und Annahme eines symmetrischen Widerstandes in den Wicklungen und gleicher Verstärkung der Phasen im Servoverstärker kann nachstehende Gleichung zur Minimierung herangezogen werden:

$$\min_{u_A, u_B} f(u_A, u_B) = u_A^2 + u_B^2 + u_A u_B \tag{11}$$



**11: Strukturbild der Regelung**

Sind die Wicklungswiderstände oder die Verstärkungsfaktoren unsymmetrisch und bekannt, kann Gleichung 11 entsprechend angepasst werden. Aber auch bei geringen Unsymmetrien der Strangwiderstände oder des Servoverstärkers kann in erster Näherung eine Minimierung der Wicklungsverluste durch minimieren von  $f(u_A, u_B)$  aus Gleichung 11 erreicht werden. Durch Einsetzen von Gleichung 8 in Gleichung 11 und anschließender Bildung der Minima sowie Berücksichtigung der zuvor ermittelten Gleichanteile  $o_A$  und  $o_B$  erhält man nachstehende Kommutierungsfunktionen:

$$u_A(u, \vartheta) = \frac{K_A(\vartheta) - \frac{1}{2}K_B(\vartheta)}{K_A^2(\vartheta) + K_B^2(\vartheta) - K_A(\vartheta)K_B(\vartheta)} K_F u + o_A \quad (12a)$$

$$u_B(u, \vartheta) = \frac{K_B(\vartheta) - \frac{1}{2}K_A(\vartheta)}{K_A^2(\vartheta) + K_B^2(\vartheta) - K_A(\vartheta)K_B(\vartheta)} K_F u + o_B \quad (12b)$$

Diese Kommutierungsfunktionen erzeugen aus den identifizierten Kraftfunktionen eine positionsunabhängige Kraft bei gleichzeitig minimalen Wicklungsverlusten. **Bild 7** zeigt die optimierten Kommutierungsfunktionen. Deutlich ist eine Abweichung von der reinen Sinusform zu erkennen. Werden nun die optimierten Kommutierungsfunktionen eingesetzt, verringert sich die Welligkeit der Stellgröße, wie in **Bild 8** deutlich gezeigt wird. Der Stellgröße ist jedoch weiterhin eine Welligkeit der 4. Ordnung überlagert. Diese Welligkeit beruht auf nicht modellierten Oberwellen der Kraftfunktionen. Eine Reduzierung dieser Restwelligkeit kann erreicht werden, indem die Kommutierungsfunktionen aus Gleichung 12a und 12b mit der Stellgröße modelliert werden. Die resultierenden Kommutierungsfunktionen können dann mittels Fourier-Reihen approximiert werden. Für eine genaue Beschreibung dieser Feinoptimierung wird auf [2] verwiesen. In **Bild 9** wird die Stellgröße der Feinoptimierung mit der Stellgröße der Optimierung nach Gleichung 12a und 12b verglichen. Die Stellgröße der Feinoptimierung enthält keine ausgeprägte Welligkeit mehr. **Bild 10** zeigt die Spektren der einzelnen Optimierungsschritte. In jedem einzelnen Schritt werden Welligkeiten verschiedener Ordnung reduziert. Die Offsetkompensation reduziert die Fundamentalwelle, welche unabhängig von der Vorschubkraft ist. Durch die optimierten Kommutierungsfunktionen wird die Welligkeit der 2. Ordnung stark reduziert. Die Feinoptimierung reduziert die Welligkeit der 4. Ordnung. Nach der Feinoptimierung ist die Welligkeit der Stellgröße gleichmäßig über das Spektrum verteilt, so dass keine weitere Optimierung durch angepasste Kommutierungsfunktionen mehr möglich ist.

In **Bild 11** ist das Strukturbild einer Lageregelung mit angepassten Kommutierungsfunktionen zu sehen. Es besteht aus einer Vorsteuerung zur Kompensation der Reibung und Berechnung der zur Beschleunigung notwendigen Stellgröße sowie der eigentlichen Regelung, die die Stabilität gewährleistet sowie Störungen und Modellungenauigkeiten ausregelt. Die Kommutierungssteuerung berechnet aus der Sollkraft  $u$  die Stellgrößen der Phasen  $u_A$  und  $u_B$ . Bei Anwendung der optimierten Kommutierungsfunktionen wird der Schleppfehler gegenüber einer reinen Sinuskommütierung signifikant verringert. Für den quantitativen Vergleich wird auf [2] verwiesen.

## 5 Zusammenfassung

Eine wesentliche Ursache der Kraftwelligkeit ist die fehlerhafte Anpassung der Kommutierung der Phasenströme an die Gegen-EMK des Motors. Bei der heutzutage üblicherweise eingesetzten sinusförmigen Bestromung kann die Kraftwelligkeit durch konstruktive Mittel dadurch verringert werden, dass die Gegen-EMK durch Anordnung von Wicklung und Magneten möglichst genau sinusförmig ausgebildet wird. Nachteil der konstruktiven Maßnahmen ist eine Verringerung der Vorschubkraft bei gleichzeitiger Erhöhung der Fertigungskosten des Motors.

Weitere Ursachen der Kraftwelligkeit sind Unsymmetrien des Motors sowie Offsets und Unsymmetrien der Stromregelung und der Kommutierungssteuerung des Servoverstärkers. Bei den derzeit verfügbaren synchronen Linearmotoren ist mit einer nicht vernachlässigbaren Kraftwelligkeit zu rechnen.

Das im Beitrag vorgestellte Verfahren besteht aus drei Stufen, wobei in jeder Stufe unterschiedliche Anteile der Kraftwelligkeit reduziert werden. In der ersten Stufe wird die lastunabhängige Kraftwelligkeit direkt aus der Stellgröße identifiziert und mittels Offsetkompensation reduziert. In der zweiten Stufe wird aufbauend auf der Identifikation der Kraftfunktion der Motorphasen die Kommutierung optimiert. Dabei werden als Optimierungskriterium die Wicklungsverluste minimiert. In der dritten Stufe werden die ermittelten Kommutierungsfunktionen feinoptimiert. Die feinoptimierten Kommutierungsfunktionen reduzieren nochmals die Kraftwelligkeit insbesondere in den höherfrequenten Anteilen. Die ermittelten Kommutierungsfunktionen skalieren linear mit der Stellgröße und sind so für jede Sollkraft und beliebige Geschwindigkeiten gültig. Durch die Identifikation der Kraftfunktionen an einem Servosystem bestehend aus Motor und Verstärker, wird die Kommutierungsfunktion an eine individuelle Motor-Verstärkerkombination angepasst. Auf diese Weise werden die Einflüsse von Motor und Servoverstärker auf die Krafterzeugung berücksichtigt.

Die Kommutierungsfunktionen können mit dem vorgestellten Verfahren an beliebige Motorkonstruktionen angepasst werden. Die Konstruktion der Motoren ist nicht mehr auf eine sinusförmige Gegen-EMK festgelegt. Durch die gewonnene Freiheit in der Motorkonstruktion können Fertigungskosten verringert und Motoren mit höherer Kraftdichte produziert werden.

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wurde an verschiedenen synchronen Linearmotoren nachgewiesen. Das Verfahren ist jedoch nicht auf Linearmotoren beschränkt, es kann prinzipiell auf alle dreiphasigen Synchronmotoren angewandt werden, die über eine Drehstrombrückenschaltung gespeist werden. Die Implementierung der Lageregelung und Kommutierungsfunktion erfolgte in einer Maschinensteuerung mittels Industrie-PC. Für den Serieneinsatz ist eine Implementierung direkt in einem digitalen Servoregler denkbar.

### Literaturhinweise:

- [1] Röhrig, C.; Mickel, J.: Kompensation der Kraftwelligkeit von lagegeregelten synchronen Linearmotoren. *antriebstechnik* 41 (2001), Nr. 5, S. 51-55
- [2] Röhrig, C.: Zur Lageregelung synchroner Linearmotoren für hochdynamische Anwendungen unter besonderer Berücksichtigung der Kraftwelligkeit. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 1016*, VDI Verlag, Düsseldorf 2003
- [3] Tönshoff, H. K.; Brahms, U.: Verbesserte Regelung für Lineardirektantriebe in Werkzeugmaschinen. *antriebstechnik* 37 (1998), Nr. 8, S. 47-49