

Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben

Potenziale und Grenzen

Ch. Clauß, W. Schinköthe, Ch. Welk (IKFF)

Beitrag zur

Tagung
Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik

17. - 18. März 2004

Darmstadt

© 2004 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben – Potenziale und Grenzen

Dipl.-Ing. Christin Clauß, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Dipl.-Ing. Christian Welk, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF), BRD

Kurzfassung

Herkömmliche elektrodynamische Lineardirektantriebe besitzen Prinzip bedingt keine interne Maßverkörperung und benötigen deshalb externe Wegmesssysteme zum Betrieb im geschlossenen Regelkreis. Die damit verbundenen Nachteile bezüglich Kosten, Bauraum und Systemkomplexität lassen sich vermeiden, wenn es gelingt, die dem Motor inhärenten sensorischen Eigenschaften zur Wegmessung auszunutzen. Dies ist bei Beachtung einiger konstruktiver Randbedingungen für die Motorgeometrie ohne zusätzliche mechanische Bauelemente möglich. Verfahren, Potenziale aber auch Grenzen durch verschiedene Störeinflüsse und Maßnahmen zu deren Kompensation werden beispielhaft für feinwerktechnische elektrodynamische Lineardirektantriebe aufgezeigt.

1 Einleitung

Für lineare Bewegungen setzt man in der Fein- und Mikrotechnik zunehmend auch elektrodynamische Lineardirektantriebe statt rotatorischer Antriebe mit nachgeschalteten Rotations-/Translations-Umformern ein. Dies resultiert aus der höheren Dynamik, dem einfacheren und damit kostengünstigen Aufbau, dem hohen Miniaturisierungspotenzial, dem Wegfall von Getrieben und damit einer Steigerung der Stellgenauigkeit. **Bild 1** zeigt beispielhaft einen solchen, für den Einsatz als Fokussierantrieb einer Endoskopoptik optimierten Aktor, der den Ausgangspunkt der hier vorgestellten Untersuchungen bildete [3, 4].



Bild 1 Fokussierantrieb für eine Endoskopoptik, Durchmesser 7 mm

Da solche Motoren keine interne Maßverkörperung besitzen, erfordert die Anwendung für Positionieraufgaben ein zusätzliches externes Wegmesssystem, um einen geschlossenen Regelkreis zu realisieren. Durch geringfügig modifizierte Motorkonstruktionen können dem Motor aber auch geeignete sensorische Eigenschaften eingepreßt und für eine integrierte Weg-

messung ausgenutzt werden, was Aufwand und Kosten spart. Am Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF) der Universität Stuttgart wurden deshalb in den letzten Jahren auch mit Unterstützung der DFG [12] umfangreiche Untersuchungen vorgenommen, um durch duale Nutzung der Motorspulen als Antriebs- und Messwicklung wegproportionale Signale für die Läuferstellung in feinwerktechnischen Gleichstrom-Linearmotoren abzuleiten und damit zusätzliche Wegmesssysteme zu umgehen [1-13].

2 Motor- und Messprinzip

Kerngedanke des Messverfahrens ist die Erfassung einer Induktivitätsänderung in Teilspulen des Motors bei Verschiebung eines eisenbehafteten Läufers. **Bild 2** zeigt die Motorwicklung o. g. Motors als Ersatzschaltung, **Bild 3** die Abhängigkeit der Teilspul-Induktivitäten von der Läuferposition. Die Wicklung muss wegen der verschiedenen Polung an den Enden des axial magnetisierten Läufers (hier AlNiCo-Hohlläufer als Ringmagnet mit Polschuhen) mit einer Wicklungssinnumkehr in der Mitte ausgestattet sein. Hier wurde diese über zwei hintereinander geschaltete Teilspulen mit unterschiedlichem Wicklungssinn und

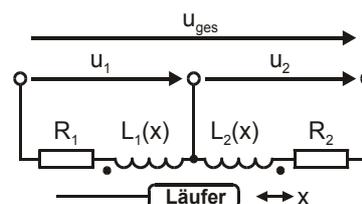


Bild 2 Ersatzschaltung der Motorwicklung

einer zusätzlich herausgeführten Mittelanzapfung realisiert. Ist der Motorläufer eisenhaltig, so ändern sich die Induktivitäten positionsabhängig.

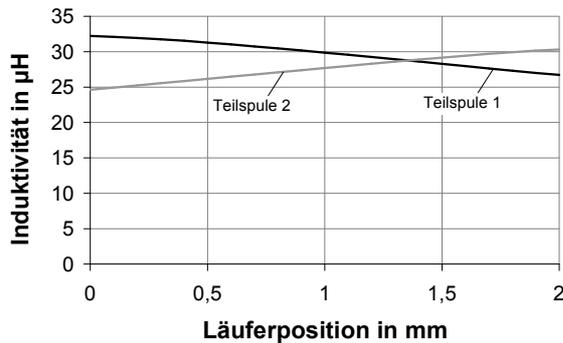


Bild 3 Wegabhängigkeit der beiden Teilspul-Induktivitäten des Fokussierantriebs

2.1 Anforderungen an den Motoraufbau (Läufer- und Spulensystem)

Das Verfahren wurde zunächst an Motoren mit bewegten Magneten bzw. bewegtem Magnetsystem realisiert [1]. Bewegliche und feststehende Komponenten können aber auch vertauscht werden. Das Prinzip der integrierten Wegmessung basiert auf der Funktion eines Differentialdrossel-Wegaufnehmers. Die Induktivität einer Teilspule sollte sich bei Läuferbewegung möglichst stark erhöhen und im gleichen Maß die Induktivität der anderen Teilspule vermindern. Eine Induktivitätsänderung kann dabei durch das Einschleiben bzw. Ausfahren eines hochpermeablen Materials in die Spulen erfolgen [11].

Bei Permanentmagnetläufern wie im **Bild 1** besitzen diese jedoch meist nur eine geringe Permeabilität und eine dadurch bedingte geringe Induktivitätsänderung. Die typischen permanenten Permeabilitäten von Magnetwerkstoffen betragen $\mu_p = 1,05 \dots 1,1$ für Ferrite, $\mu_p = 5 \dots 7,5$ für AlNiCo und $\mu_p = 1,02 \dots 1,1$ für Seltene-Erden-Magnete. Nur AlNiCo-Magnete im Läufer lassen sich folglich direkt detektieren. **Bild 4** verdeutlicht nochmals einen solchen Aufbau mit axial magnetisiertem AlNiCo-Läufer und Polschuhen. Der Motor hat einen einsträngigen homopolaren Aufbau.

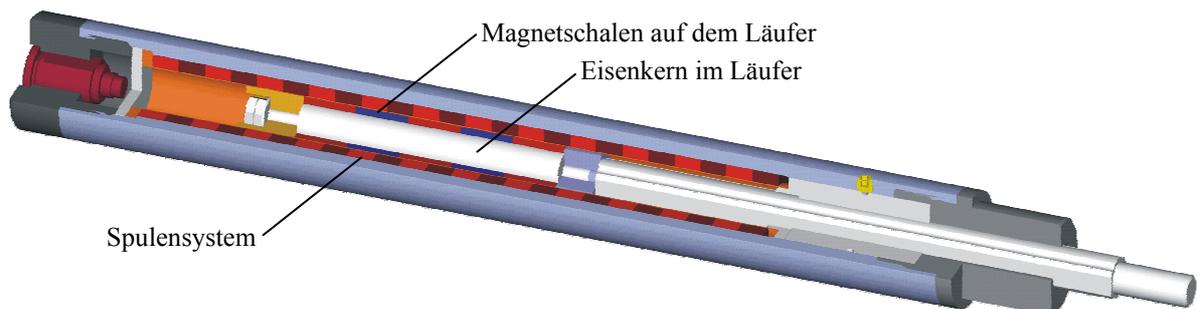


Bild 5 Heteropolarer zweisträngiger Motor mit radial magnetisierten Magneten

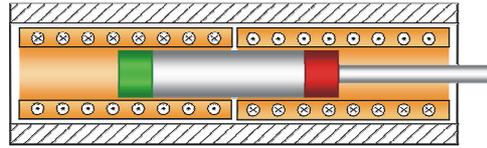


Bild 4 Einsträngiger homopolarer Motor

Zusätzliche hochpermeable Flussführungen (Eisen), welche in die Läuferkonstruktion integriert sind, können bei anderen Magnetwerkstoffen jedoch ebenfalls eine integrierte Wegmessung ermöglichen. **Bild 5** zeigt dies für Bauformen mit radial bzw. diametral magnetisierten Magnetschalen [1, 2]. Hier wird der massive Eisenkern im Läuferinneren detektiert. Eine Sättigung ist dabei durch eine geeignete Dimensionierung zu vermeiden. Dieser Motor hat ein heteropolares Magnetsystem mit mehrsträngiger Wicklung und elektronischer Kommutierung und ist somit im Gegensatz zu den homopolaren Motoren auch für große Hübe geeignet.

Anforderungen aus der integrierten Wegmessung an diesen Motoraufbau ergeben sich für die Segmentlänge der Einzelspulen jeden Stranges in Bezug auf die detektierbare Läuferlänge. Sinngemäß muss wiederum gewährleistet sein, dass der eisenbehaftete Läuferkern bei Bewegung in einzelne Spulenabschnitte einfährt bzw. aus diesen ausfährt und dadurch eine charakteristische Induktivitätsänderung bewirkt. Diese beiden Spulenabschnitte müssen in getrennten Halbsträngen des gleichen Stranges liegen. Dies wird durch eine ungeradzahlige Magnetanzahl und eine geradzahlige Spulenanzahl jedes Teilstranges im Gesamtstrang erreicht. Die Teilstränge sind mit einer Mittelanzapfung zu verschalten, **Bild 6**.

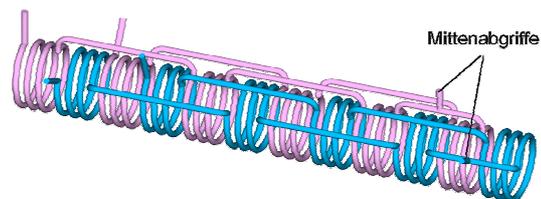


Bild 6 Zweisträngige Wicklung mit Mittenabgriff

2.2 Integrierte Wegmessung bei analoger Ansteuerung

Üblich und allgemein bekannt sind zwei Methoden, um derartige Motoren zu bestromen: Das Einspeisen eines reinen Gleichstroms über ein analoges Stellglied und eine getaktete Ansteuerung meist durch Pulsweitenmodulation. Es existieren dementsprechend auch zwei verschiedene Konzepte zur Erzeugung eines Wegsignals aus den Spannungsabfällen über den Teilspulen. Hier soll zunächst die integrierte Wegmessung im Zusammenhang mit einer analogen Ansteuerung grundsätzlich beschrieben werden. Analoge Stellglieder werden meist für kurzhubige, homopolare Motoren kleiner Leistung eingesetzt.

Das Stellglied speist für die Bewegungsaufgabe einen Gleichstrom in den Motor, dessen Betrag und Vorzeichen mit guter Näherung linear zur Läuferkraft ist. Zur integrierten Wegmessung wird hier eine Messwechselspannung der eigentlichen, zur Krafterzeugung notwendigen Motorspannung überlagert. Wie von Differentialdrossel-Messsystemen her bekannt, lässt sich mit Hilfe dieses Wechselanteils eine Änderung des Induktivitätsverhältnisses beider Motor-teilspulen erfassen [3, 4, 12, 13].

Die Frequenz der Messwechselspannung wird so gewählt, dass der Motor ihr mechanisch nicht folgen kann und keine akustischen Auswirkungen auftreten, üblicherweise 20 kHz. Zur Wegmessung werden die mit dem Läuferweg veränderlichen Induktivitäten der beiden Antriebsteilspulen $L_1(x)$ und $L_2(x)$ ausgewertet. Es entsteht ein komplexer Spannungsteiler, dessen beide komplexe Widerstände sich mit dem Läuferweg ändern. Betrachtet man den Wechselspannungsanteil am Mittenabgriff, so zeigt sich eine Abhängigkeit der Signalamplitude von der Läuferstellung, **Bild 7**.

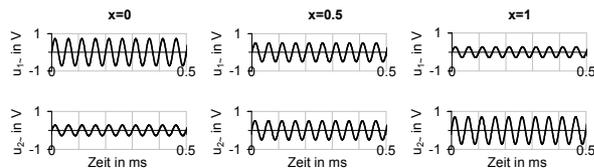


Bild 7 Wechselspannungssignale am Mittenabgriff bei drei verschiedenen Läuferpositionen

Mit der in **Bild 8** gezeigten Elektronik kann diese Wechselspannung ausgewertet und gegebenenfalls einem Mikrocontroller oder einem analogen Regler zugeführt werden, der dann mit geeigneten Algorithmen die Regelung übernimmt und die Leistungsstufe in geeigneter Weise ansteuert [12, 13]. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Einsatz eines Controllers für die integrierte Wegmessung bei analoger Ansteuerung nicht zwingend erforderlich ist.

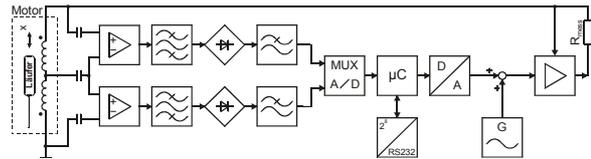


Bild 8 Blockschaltbild zur Auswertelektronik für die integrierte Wegmessung bei analoger Ansteuerung

2.3 Integrierte Wegmessung bei getakteter Ansteuerung

Eine analoge Ansteuerung lässt sich zwar sehr einfach realisieren, hat aber den Nachteil, dass in der Leistungselektronik recht hohe Verlustleistungen anfallen. Eine getaktete Ansteuerung vermeidet dieses Problem weitgehend und kommt deshalb vorzugsweise bei leistungsstärkeren Antrieben und auch bei heteropolaren, elektronisch kommutierten Antrieben zur Anwendung. Der Motor wird hier wechselweise an positive bzw. negative Versorgungsspannung gelegt. Über die Steuerung der Schaltzeiten wird bei ausreichend hoher Ansteuerfrequenz so ein quasikontinuierlicher Motorstrom realisiert, **Bild 9**.

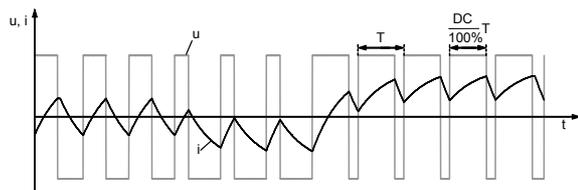


Bild 9 Prinzip der getakteten Ansteuerung mit Pulsweitenmodulation

Für die integrierte Wegmessung wirkt wieder der gleiche komplexe Spannungsteiler, wenn man zunächst jeweils einen Motorstrang mit einer Mittelanzapfung betrachtet. Eine zusätzliche Messwechselspannung ist hier nicht erforderlich, es wird stattdessen die gepulste Wechselspannung des Stellgliedes direkt zur Auswertung genutzt [5, 6, 12, 13]. Bei Läufermittelstellung, nun jedoch bezogen auf eine mittlere Stellung in einem Spulensegment eines Stranges, sind die beiden Teilinduktivitäten im Strang gleich groß und es ergibt sich am Mittenabgriff ein Wechselspannungsanteil von Null. Bei jeder anderen Läuferstellung ergibt sich ein Wechselsignal, aus dessen Verlauf sich die aktuelle Position ableiten lässt, **Bild 10**.

Zur Positionsauswertung wird der Spannungsverlauf zwischen den Flankenwechseln des getakteten Signals analysiert. Zu verschiedenen Zeitpunkten tasten Sample&Hold-Glieder die am Mittenabgriff anliegenden Spannungen eines oder mehrerer Stränge ab, siehe **Bild 11** [12, 13].

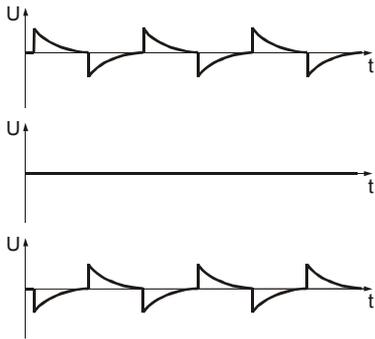


Bild 10 Wechselspannungssignale am Mittenabgriff bei drei verschiedenen Läuferpositionen

Über Analog-Digital-Wandler können diese Werte dann in einen Mikrocontroller eingelesen werden, der daraus über geeignete Algorithmen die aktuelle Läuferposition auf Basis der Induktivitätsänderung errechnet. Zur Kompensation von Motorstrom- und Temperaturabhängigkeiten wird auch der Motorstrom gemessen.

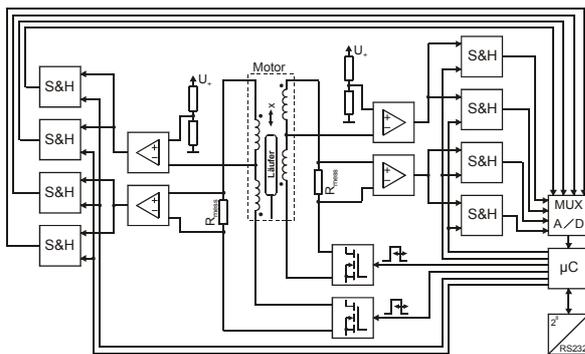


Bild 11 Blockschaltbild für die integrierte Wegmessung bei getakteter Ansteuerung

Die Positionsmessung kann dabei während der Nutzbestromung des Motors oder in einer zusätzlich eingefügten Messpause erfolgen, **Bild 12**.

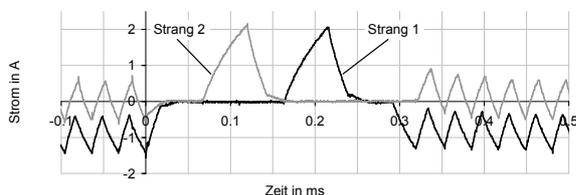


Bild 12 Messpause im PWM-Signal zur Positionsmessung

Es ergibt sich schließlich ein innerhalb der axialen Länge eines Spulensegmentes proportionaler Wegsignalverlauf. Bezogen auf den Gesamtverfahrweg ist das Messverfahren dann jedoch inkremental mit einem Inkrement entsprechend dem Raster der Spulen-

segmente. Damit steht eine analog-inkrementale Positionsinformation zur Verfügung. Aus diesem Grund muss vom Motor bei Betriebsbeginn einmal eine bekannte Referenzposition angefahren werden, wie dies auch bei anderen inkremental arbeitenden Messsystemen üblich ist.

Durch geeignete Programmierung lassen sich schließlich noch verschiedene Fehlereinflüsse eliminieren, Kennlinien linearisieren oder Regelvorschriften realisieren. Ebenso ist eine Rechner- oder Feldbusanbindung möglich. Auch die elektronische Kommutierung wird vom Mikrocontroller berechnet. Die erforderliche Kommutierung wirft zwar zusätzliche Probleme für die integrierte Wegmessung auf, diese lassen sich aber beherrschen.

Grundsätzlich lässt sich eine integrierte Wegmessung zwar in kommutierten mehrsträngigen heteropolaren Antrieben auch mit beiden Stellgliedkonzepten verwirklichen, praktisch wird jedoch meistens ein Pulssteller als Stellglied zum Einsatz kommen.

3 Potenziale und Grenzen der integrierten Wegmessung

Das grundsätzliche Funktionsprinzip des vorgestellten Messverfahrens ähnelt bekannten Differentialdrosselwegaufnehmern. Durch die duale Nutzung des Motors als Messwertgeber und Aktor ergeben sich aber eine ganze Reihe spezifischer Probleme, die zu Messfehlern führen können. In der Reihenfolge ihrer Bedeutung sind dies Motorstromeinflüsse, Erwärmung, bewegungsinduzierte Gegenspannungen und transformatorische Kopplung der Antriebsstränge.

Beide Auswertekonzepte sind zunächst unabhängig von den Bestromungsverhältnissen im Antrieb. Durch den Auswertalgorithmus ist unter idealisierten Bedingungen, also so lange die Rückwirkungen auf den magnetischen Kreis vernachlässigt werden, sichergestellt, dass der fließende Motorstrom zu keiner Beeinflussung des Messsignals führt. Gleiches trifft auf die Widerstandserhöhung der Spulen durch Erwärmung zu. Nähere Ausführungen zum Algorithmus würden den Umfang dieses Beitrags sprengen, dazu wird auf [12, 13] verwiesen.

In realen Systemen führt wegen der Ankerrückwirkung der Antriebsspulen auf den magnetischen Kreis der zur Krafterzeugung notwendige Strom aber prinzipiell zu Messfehlern, die nicht vermeidbar sind. Dies resultiert aus dem Gleich- bzw. Gegenfeldeinfluss der Antriebsspulen und dem realen magnetischen Verhalten von Läufer- und Statormaterial. Bei Bestromung treten dadurch unterschiedliche Sättigungen in den Kernabschnitten unter den jeweiligen Teilspulen auf.

In analogen Systemen sind die Stromabhängigkeiten wegen des kontinuierlich fließenden Motorstroms

nicht zu vermeiden. Nach einer Messung der Stromstärke können sie aber Dank eines annähernd linearen Zusammenhangs durch den Controller oder eine einfache Analogschaltung kompensiert werden.

In getakteten Systemen erfolgt die Messung vorzugsweise in Messpausen oder bei einem Duty Cycle von 50 %, also fließt während der Messung kein Nutzstrom. Damit entfallen theoretisch auch stromabhängige Messfehler. Allerdings müssen diese Messpausen sehr kurz gehalten werden. Falls die Stromeinflüsse aufgrund langer Zeitkonstanten während der Messpause nicht abklingen, ist auch hier eine Kompensation mittels Korrekturtabellen im Mikrocontroller notwendig.

Eine zusätzliche Verbesserung der Messgenauigkeit ist zumindest in controllergestützten Systemen möglich, wenn auch die verbleibenden Nichtlinearitäten berücksichtigt werden.

Durch Läuferbewegungen werden in den Motorwicklungen auch geschwindigkeitsabhängige Spannungen induziert. Bei der integrierten Wegmessung mit analogen Stellgliedern werden niederfrequente Signalanteile und damit auch solche Induktionsspannungen herausgefiltert und führen damit zu keiner Beeinflussung des Messergebnisses. Dies gilt allerdings nicht bei getakteten Stellgliedern. Auch wenn hier eine Reduktion des geschwindigkeitsabhängigen Messfehlers mittels Korrekturtabellen möglich ist, bleibt die erreichbare Bahnfolgegenauigkeit dieser Systeme doch hinter der analog angesteuerten zurück.

In mehrsträngigen Motoren sind beide Spulensysteme transformatorisch verkoppelt. Dies muss bei der Wegsignalgewinnung berücksichtigt werden und erhöht den Verfahrensaufwand. Da in solchen Motoren in aller Regel zusätzlich eine Kommutierung erforderlich wird, gestalten sich mehrsträngige Antriebssysteme wesentlich aufwändiger als einsträngige.

Aufgrund der oben genannten Fehlereinflüsse kann mit der integrierten Wegmessung in Lineardirektantrieben nicht eine Genauigkeit identisch derer externer Differentialdrossel-Wegaufnehmer erreicht werden. Welche Positioniergenauigkeit bei Antriebssystemen mit integrierter Wegmessung tatsächlich erwartet werden kann, soll im Folgenden aufgezeigt werden. Vorgestellt werden die Messergebnisse zweier Demonstratorsysteme in denen die integrierte Wegmessung in einen geschlossenen Regelkreis eingebunden ist.

Das analog angesteuerte Antriebssystem besteht aus einem einsträngigen Kleinstmotor mit 4 mm Hub und der in **Bild 13** gezeigten controllergestützten Elektronik. Signalverarbeitung und PI-Positionsregler sind so programmiert, dass auch eine problemlose Umsetzung in eine rein analoge Schaltungslösung möglich ist. **Bild 14** verdeutlicht die stationäre Positioniergenauigkeit an sechs Läuferpositionen. Der Abfall der Ge-

nauigkeit in den Randbereichen rührt von Streufeldern an den Enden der Antriebsspulen her.

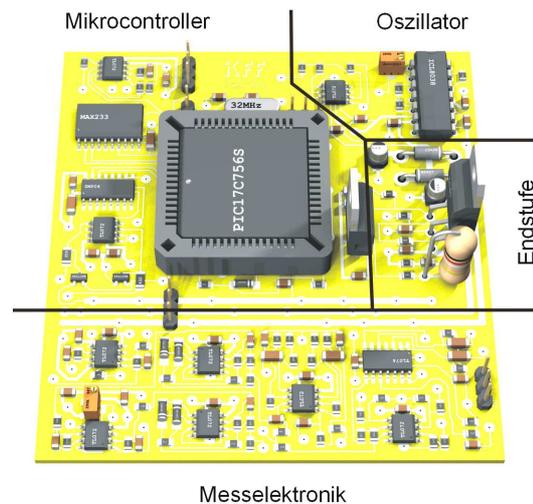


Bild 13 Servoregler mit analogem Stellglied und integrierter Wegmessung

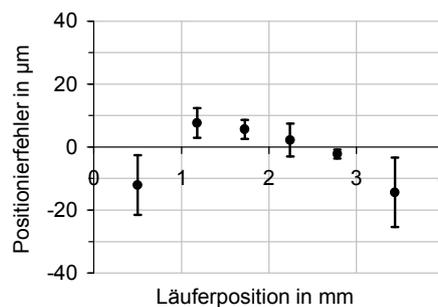


Bild 14 Mittelwerte und 95 %-Streuung der stationären Positioniergenauigkeit des analogen Systems

Der in Bild 5 dargestellte zweisträngige heteropolare Linearmotor bildet zusammen mit einer ebenfalls controllergestützten Ansteuerung das getaktete Demonstratorsystem. Als Regler dient ein PID-Positionsregler mit unterlagertem P-Geschwindigkeitsregler. Damit kann eine stationäre Positioniergenauigkeit wie in **Bild 15** erreicht werden.

Allgemein, auch unter Berücksichtigung ungünstiger Rahmenbedingungen, lässt sich bei analoger Ansteuerung eine Messgenauigkeit von deutlich unter 0,1 mm, bei Beschränkung auf kleine Motorhübe auch unter 0,02 mm erzielen. In getakteten Systemen bewegt sich die erreichbare Genauigkeit je nach Aufwand bei 0,2 mm bis 0,05 mm. Die getaktete Variante eignet sich beim derzeitigen Entwicklungsstand vorrangig für Positionieraufgaben, hohe Bahnfolgegenauigkeiten können noch nicht erreicht werden. Hervorzuheben ist, dass die Messgenauigkeit in mehrsträngigen Motoren wegen der Segmentierung vom Läuferhub unabhängig ist. Die Messgenauigkeit bezieht sich hier auf die Weglänge zwischen zwei

Kommutierungspunkten und wird nicht vom Gesamthub beeinflusst. Diese Segmentierungslänge ist aber vergleichsweise gering, typischerweise 10 mm bis 20 mm.

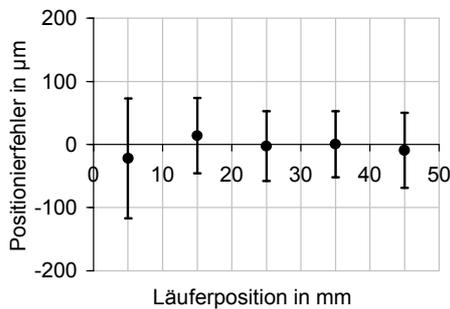


Bild 15 Mittelwerte und 95 %-Streuung der stationären Positioniergenauigkeit des getakteten Systems

4 Ausblick

Die Einsatzgebiete der integrierten Wegmessung sind mit den bisher dargestellten Antrieben, durchweg Gleichstromlinearantriebe, noch lange nicht ausgeschöpft. Am IKFF wurde beispielsweise auch ein Konzept entwickelt, um in Asynchronlinearmotoren eine integrierte Wegmessung zu ermöglichen [7, 8]. Außerdem werden in aktuellen Arbeiten die Ausweitung der Messmethode auf möglichst kostengünstige Lineardirektantriebe, eine Steigerung der Messgenauigkeit und die Nutzung anderer Aspekte, beispielsweise von Sättigungserscheinungen untersucht [9, 10].

5 Literatur

- [1] Hartramph, R.: Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht Nr. 18, 2001.
- [2] Gundelsweiler, B.: Dimensionierung und Konstruktion von feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation, Universität Stuttgart IKFF, Institutsbericht Nr. 22, 2003.
- [3] Schinköthe, W.; Hartramph, R.: Miniaturlinearantriebe mit integriertem Wegmesssystem. F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 104(1997)9, S. 634-636.
- [4] Schinköthe, W.; Voss, M.; Hartramph, R.: Gleichstromlinearmotor mit integriertem Wegmesssystem. Gebrauchsmuster DE 297 05 315.9, 25.01.1997.
- [5] Hartramph, R.; Schinköthe, W.: Elektromagnetisches Antriebssystem mit integrierter Wegsignalzeugung. Patent, DE 197 48 647 C2, 27.09.2001.
- [6] Hartramph, R.; Schinköthe, W.: Electromagnetic drive system with integrated path signal generation. US-Patent, US 6 037 739, 14.03.2000.
- [7] Schinköthe, W.; Welk, C.: Verfahren zur integrierten Wegsignalerzeugung in Asynchronlinearmotoren. Patentanmeldung, Aktenzeichen 100 25 885.9, 25.05.2000.
- [8] Schinköthe, W.; Welk, C.: Verfahren zur integrierten Wegsignalerzeugung in Induktionslinearmotoren nach Elihu Thomson. Patentanmeldung, Aktenzeichen 100 36 260.5, 26.07.2000.
- [9] Gundelsweiler, B.; Schinköthe, W.: Verfahren zur integrierten Wegmessung in Gleichstromlinearmotoren mit alternierender Anordnung von Permanentmagneten und Flussführungsteilen. Patentanmeldung, Aktenzeichen 102 29 689.8, 27.06.2002.
- [10] Gundelsweiler, B.; Schinköthe, W.: Verfahren zur integrierten Wegmessung in Gleichstromlinearmotoren unter Ausnutzung von Flussdichteänderungen im magnetbehafteten Teilsystem. Patentanmeldung, Aktenzeichen 102 29 687.1, 27.06.2002.
- [11] Welk, C.; Gundelsweiler, B.; Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben. Tagung Innovative Klein- und Mikroantriebe, Mainz 15./16. 05. 2001, GMM-Fachberichte 33, S. 33-60.
- [12] Schinköthe, W.; Welk, C.: DFG-Forschungsvorhaben Lineardirektantriebe mit integrierter Wegmessung. Abschlussbericht 2003, Schi 457/6-3.
- [13] Welk, C.: Detektion interner sensorischer Eigenschaften von elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Eingereichte Dissertation, Universität Stuttgart IKFF, 2004.

Neue Telefon- und Telefaxnummer:

Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402

Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356

Neue E-Mail-Adressen:

ikff@ikff.uni-stuttgart.de

linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de

spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de

zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de