



Veröffentlichungen am IKFF



**Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben  
Erschließung neuer Anwendungsfelder durch  
Flussdichtedetektion**

C. Clauß, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zur

**Tagung  
Mechatronik 2005**

1. – 2. Juni 2005

Wiesloch

© 2005 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

# **Integrierte Wegmessung in Lineardirektantrieben – Erschließung neuer Anwendungsfelder durch Flussdichtedetektion**

## **Sensorless position control in linear direct drives – Application range expansion by means of flux density detection**

**C. Clauß, W. Schinköthe, Stuttgart**

### **Kurzfassung**

Herkömmliche elektrodynamische Lineardirektantriebe besitzen prinzipbedingt 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. Neben einer Zusammenfassung bereits bekannter Verfahren, deren Vor- und Nachteilen sowie Potenzialen und Grenzen liegt der Schwerpunkt auf der Vorstellung eines neuen Verfahrens, bei dem Flussdichteunterschiede im Motor als interne sensorische Eigenschaft genutzt werden. Dadurch werden auch Antriebe mit Kurzspulsystemen, die bisher nicht zur sensorlosen Läuferpositionsmessung genutzt werden konnten, einer integrierten Wegmessung zugänglich gemacht.

### **1 Elektrodynamische Lineardirektantriebe**

Die Klassifizierung elektrodynamischer Lineardirektantriebe kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. Bild 1 zeigt eine für die hier vorgestellten Untersuchungen vorteilhafte Klassifizierung der gängigen Bauformen und die wesentlichen Unterschiede zwischen ihnen.

Nicht für alle Linearmotorbauformen sind Verfahren zur sensorlosen Läuferpositionserkennung bekannt. Bisher wurden ausschließlich Antriebe mit flussführendem Kern untersucht. Ob dieser Kern Teil des Stators ist oder ob er den Läufer bildet, ist dabei gleichgültig. Zur integrierten Wegmessung geeignet sind also prinzipiell alle Systeme mit einem Aufbau nach Bild 2.

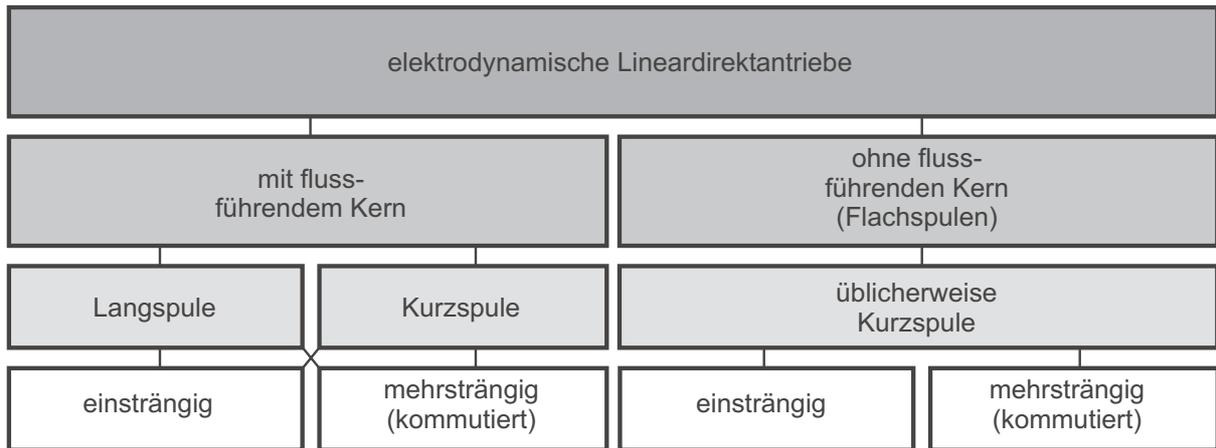


Bild 1: Klassifizierung elektrodynamischer Linearantriebe

Neben den dargestellten einsträngigen, homopolaren Antrieben ist auch in mehrsträngigen, kommutierten Antrieben eine integrierte Wegmessung möglich.

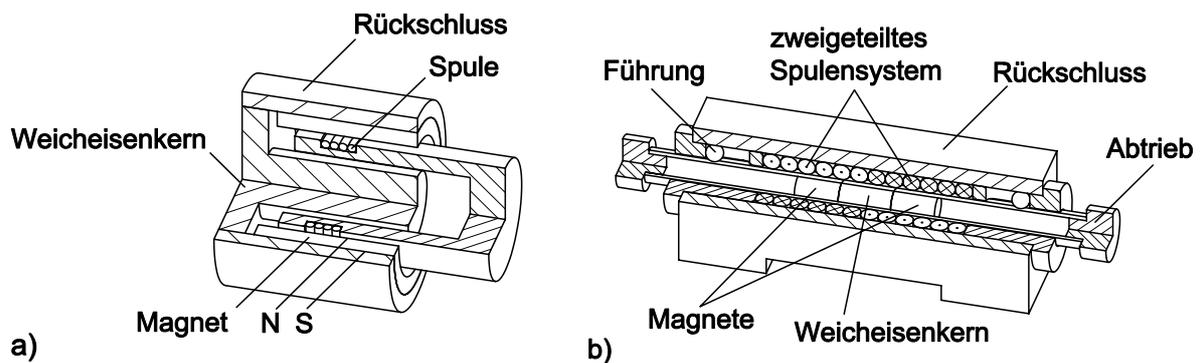


Bild 2: Zur integrierten Wegmessung geeignete Antriebe

a) mit bewegter Spule (Kurzspulensystem)

b) mit bewegtem Magnetsystem (Langspulensystem)

Die bisher bekannten und bereits mehrfach vorgestellten Verfahren zur integrierten Wegmessung erfordern zwingend den Einsatz von Langspulensystemen [1]. Mit dem hier vorgestellten Verfahren der Flussdichtedetektion werden jetzt auch Kurzspulensysteme einer integrierten Wegmessung zugänglich gemacht [2].

## 2 Interne sensorische Eigenschaften von Langspulensystemen

Zur Erläuterung der internen sensorischen Eigenschaften von Langspulensystemen soll zunächst ein einsträngiger Antrieb betrachtet werden, Bild 2 b. Das elektrische Ersatzschaltbild des Antriebs ist in Bild 3 dargestellt. Das Spulensystem besteht aus einer einsträngigen Wicklung, die allerdings in zwei Teilstränge mit unterschiedlichem

Wicklungssinn unterteilt ist. Über einen zusätzlichen elektrischen Mittenabgriff zwischen den Teilsträngen kann für jede der beiden Spulen getrennt die Induktivität und der ohmsche Widerstand bestimmt werden.

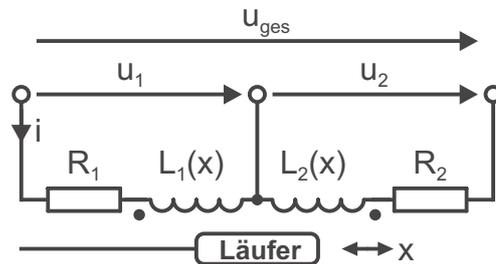


Bild 3: Elektrisches Ersatzschaltbild des homopolaren Antriebs

Bei dem hier vorgestellten Antrieb ist das Magnetsystem beweglich als Teil des Läufers ausgeführt. Entweder handelt es sich um radial oder diametral magnetisierte Segmente, die auf einen weichmagnetischen Kern aufgeklebt werden, oder um einen axial magnetisierten Zylindermagneten. Zum Einsatz kommen entweder Magnete aus AlNiCo oder NdFeB, wobei letztere üblicherweise mit Flussführungsteilen aus Weicheisen kombiniert werden. Optimale Verhältnisse für eine integrierte Wegmessung ergeben sich, wenn die Länge des detektierbaren Eisens bzw. der AlNiCo-Magneten genau der Hälfte der Spulenlänge entspricht. Bei Verschiebung des Läufers kommt es dann zu symmetrischen Induktivitäts- bzw. Impedanzänderungen in den Teilspulen des Antriebs. Diese können als interne sensorische Eigenschaft genutzt werden. Bild 4 zeigt den theoretischen (berechneten) Verlauf der Impedanz für den in Bild 2 b dargestellten Antrieb.

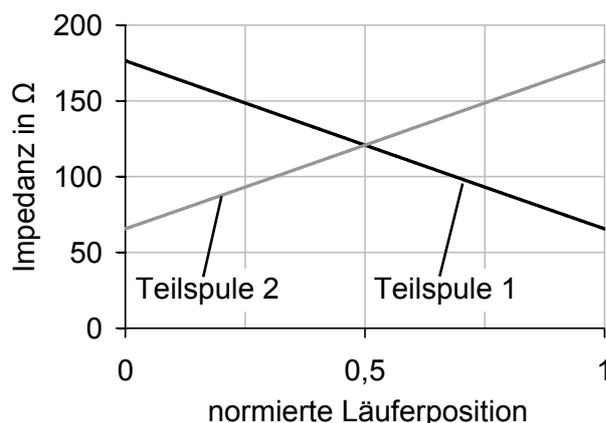


Bild 4: Theoretischer Verlauf der Teilspulimpedanzen über dem Läuferweg

Ein ähnliches Verhalten der Spuleninduktivität bzw. Impedanz kann auch bei mehrsträngigen Antrieben erreicht werden. Allerdings ist auch hier eine Unterteilung jedes Antriebsstranges

in zwei Teilstränge erforderlich. Bild 5 zeigt dies beispielhaft für einen zweisträngigen Antrieb.

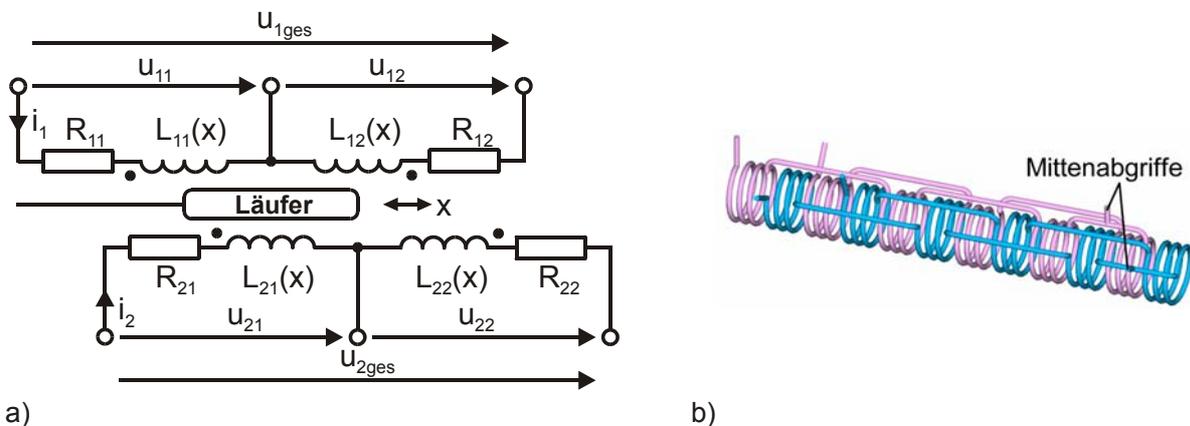


Bild 5: Spulensystemaufbau bei zweisträngigen Antrieben mit integrierter Wegmessung

a) elektrisches Ersatzschaltbild

b) praktische Umsetzung (vgl. auch Bild 11)

Der Aufbau des Magnetsystems erfolgt auch hier mit Hilfe von diametral magnetisierten Schalensegmenten, die auf einen weichmagnetischen Kern aufgeklebt werden und den Läufer des Systems bilden. Spulen- und Magnetsystem müssen in ihrer axialen Ausdehnung aufeinander abgestimmt werden, so dass der Läufer bei Bewegung immer aus dem einen Teilstrang ausfährt und in gleichem Maße in den anderen Teilstrang des gleichen Antriebsstranges einfährt. Dies führt zu einer Induktivitätsdifferenz zwischen den beiden Teilsträngen, die als interne sensorische Eigenschaft genutzt werden kann, Bild 6.

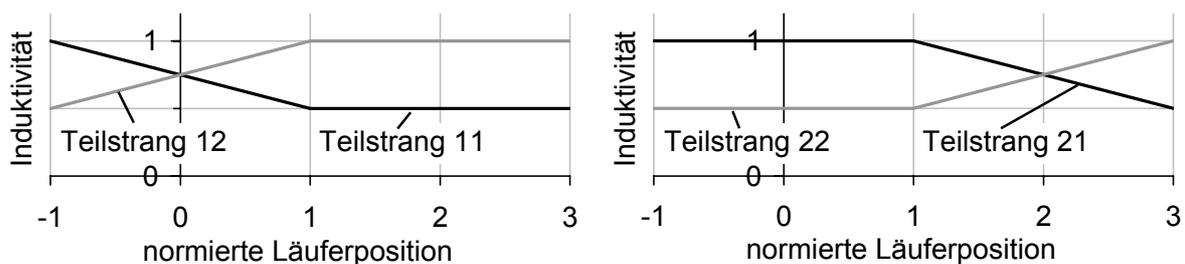


Bild 6: Theoretischer Verlauf der Induktivität in zweisträngigen Antrieben mit Mittenabgriff

### 3 Integrierte Wegmessung in Langpulsystemen

Bei der praktischen Umsetzung der integrierten Wegmessung in Langpulsystemen ist zwischen zwei Verfahren zu unterscheiden:

- Integrierte Wegmessung bei analoger Ansteuerung,
- Integrierte Wegmessung bei getakteter Ansteuerung.

### 3.1 Integrierte Wegmessung bei analoger Ansteuerung

Als Beispiel dient hier weiterhin der in Bild 2 b dargestellte Miniaturmotor. Die integrierte Wegmessung nutzt in diesem Fall Impedanzänderungen in den Teilspulen des Antriebs als interne sensorische Eigenschaft. Damit diese detektiert werden können, muss dem von der Endstufe erzeugten Gleichsignal (Gleichspannung oder –strom) ein Wechselsignal überlagert werden. Bild 6 zeigt dies für den Fall einer spannungsgeregelten Endstufe.

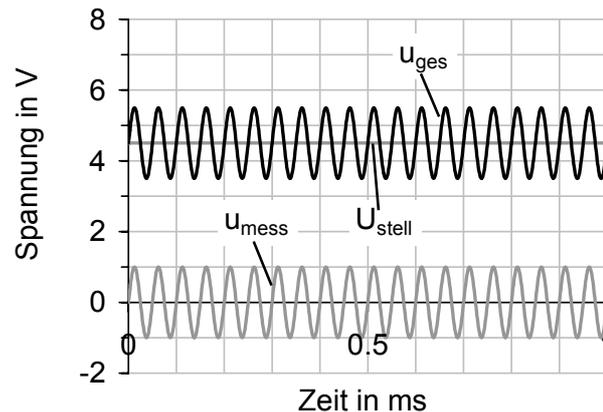


Bild 6: Erzeugung der Motorspannung aus Stellspannung und Messwechselfspannung

Periode und Amplitude des Wechselsignals sind dem jeweiligen Antrieb anzupassen. Als Messsignal dient die Spannung am Mittenabgriff, deren Amplitude von der Läuferposition abhängt, Bild 7.

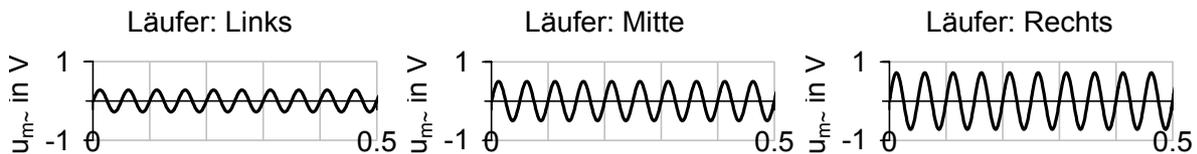


Bild 7: Amplitude des Messwechselfsignals am Mittenabgriff für drei Läuferpositionen

Zur Auswertung wird dieses Signal zunächst gleichspannungsmäßig entkoppelt, anschließend kann die Amplitude des reinen Wechselsignals auf verschiedene Arten messtechnisch ermittelt werden. Die Signalauswertung kann rein analog erfolgen, es ist aber auch eine digitale Weiterverarbeitung mittels Mikrocontroller möglich.

Bild 8 zeigt die Kennlinie der integrierten Wegmessung für den hier vorgestellten Miniaturmotor.

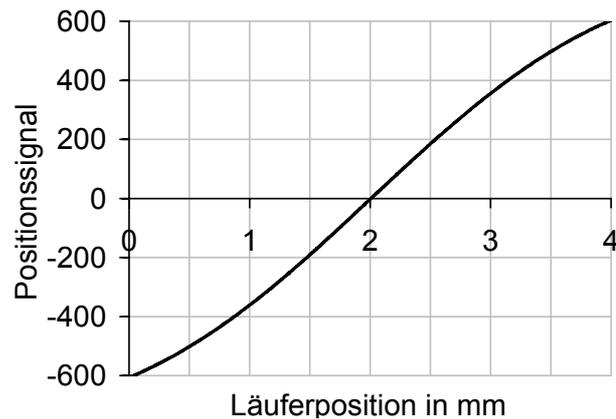


Bild 8: Kennlinie der integrierten Wegmessung im Miniaturmotor

Die erreichbare Genauigkeit bei integrierter Wegmessung ist in Bild 9 dargestellt.

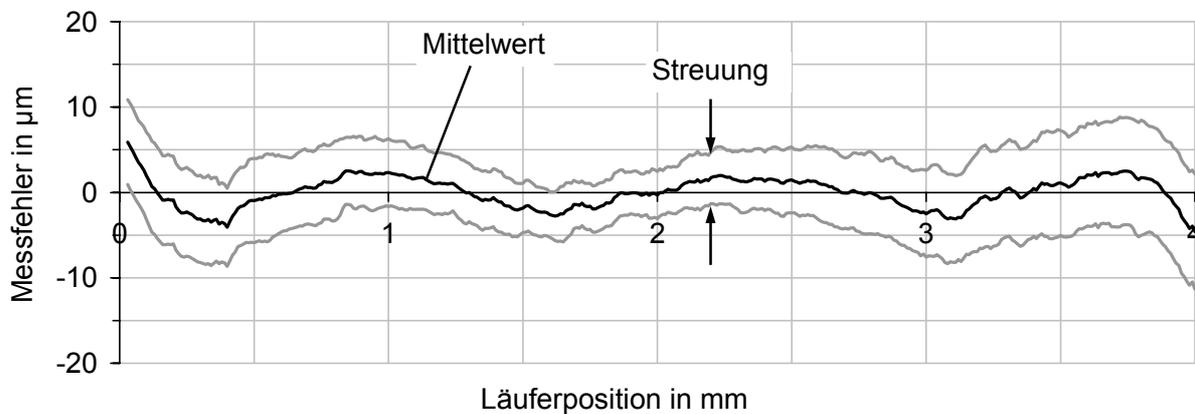


Bild 9: Grundgenauigkeit der integrierten Wegmessung mit analogem Stellglied

Allerdings treten beim Betrieb des Motors verschiedene Störgrößen auf, die schaltungstechnisch oder in Software kompensiert werden müssen. Im Wesentlichen sind dies:

- thermische Einflüsse durch Stromfluss in den Antriebsspulen,
- bewegungsinduzierte Gegenspannungen,
- transformatorische Kopplungen zwischen Antriebsspulen, Läufer und Rückschluss,
- Motorstromabhängigkeit, im Wesentlichen Ankerrückwirkung.

### Einsatzgebiete und -grenzen

Vorrangiges Einsatzgebiet analoger Stellglieder sind homopolare Antriebe mit vergleichsweise geringem Hub von 2 mm bis 50 mm. In diesem Bereich kann die integrierte Wegmessung sinnvoll zum Einsatz kommen, wenn eine Messgenauigkeit von 0,02 mm bis

0,1 mm für den Einsatzfall ausreichend ist. Vorteile ergeben sich insbesondere beim Einsatz in stark miniaturisierten Antrieben, bei denen kein Bauraum für zusätzliche externe Messsysteme vorhanden ist.

### 3.2 Integrierte Wegmessung bei getakteter Ansteuerung

Die Ansteuerung mehrsträngiger, heteropolarer Antriebe erfolgt im Allgemeinen über getaktete Leistungssteller. Zur Umsetzung einer integrierten Wegmessung ist hier keine zusätzliche Messwechselspannung notwendig, statt dessen können die Flanken der getakteten Motorbetriebsspannung direkt genutzt werden. Bild 10 zeigt beispielhaft den Verlauf von pulswidenmodulierter Betriebsspannung und daraus resultierendem Spulenstrom.

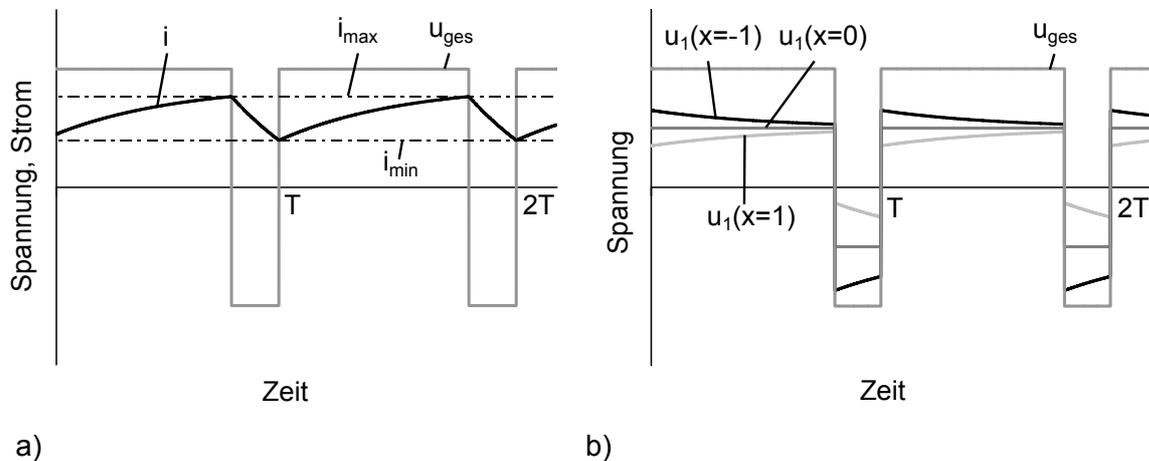


Bild 10: Verlauf von Motorspannung, Spulenstrom (a) und Mittenabgriffspannung (b) bei pulswidenmodulierter Ansteuerung

Bild 10 b zeigt den Verlauf der Spannung am Mittenabgriff. Diese Spannung dient als läuferpositionsabhängiges Signal und wird zu zwei Zeitpunkten nach dem Flankenwechsel abgetastet. Zur Minimierung von Fehlereinflüssen findet die Abtastung nicht während des normalen PWM-Betriebs sondern in periodisch auftretenden Messzyklen statt. Gleichzeitig mit der Mittenspannung wird auch der Strangstrom gemessen. Dadurch können Temperatureinflüsse rechnerisch weitgehend eliminiert werden.

Die gemessenen Ströme und Spannungen werden verstärkt, gefiltert, in Digitalwerte gewandelt und anschließend in einem Mikrocontroller weiterverarbeitet.

Für den in Bild 11 dargestellten zweisträngigen Antrieb ergeben sich die in Bild 12 dargestellten Positionssignale.

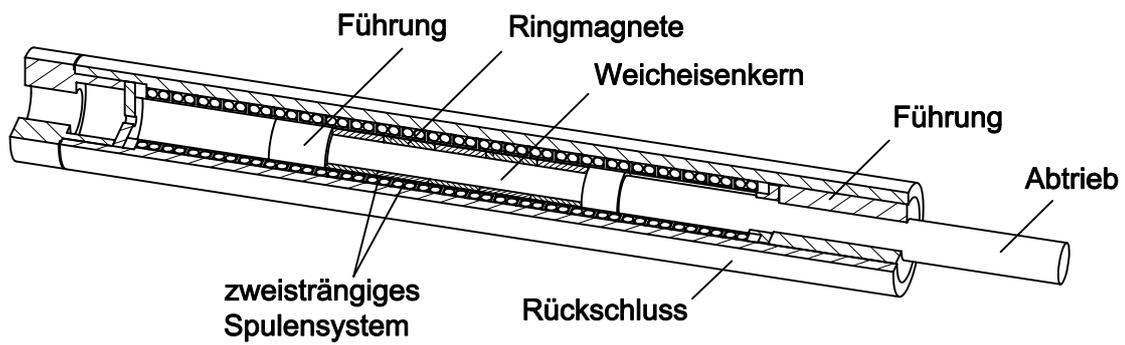


Bild 11: Zweisträngiger Antrieb, geeignet zur integrierten Wegmessung

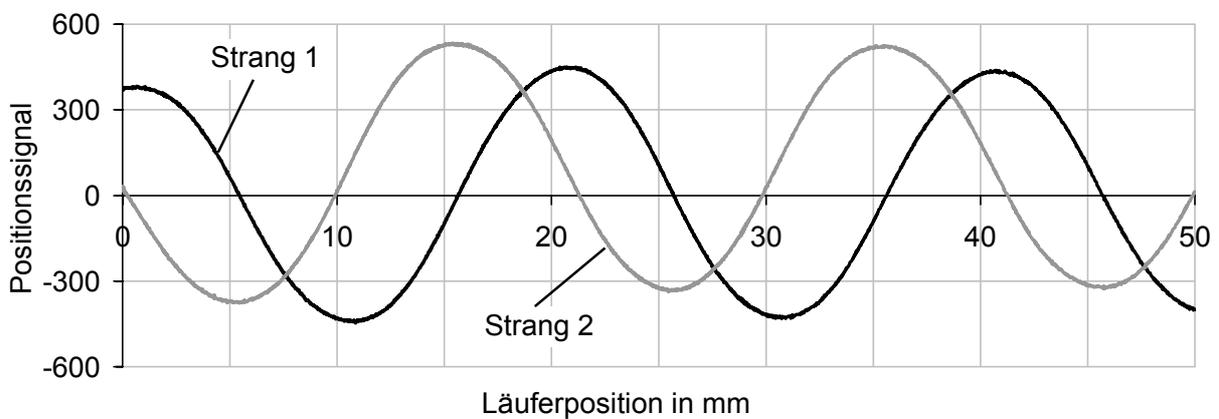


Bild 12: Positionssignale der beiden Stränge

Der Signalverlauf macht deutlich, dass nur ein inkrementell arbeitendes Messsystem realisiert werden kann. Dies hat aber keine Nachteile für die Genauigkeit des Systems, die in Bild 13 dargestellt ist.

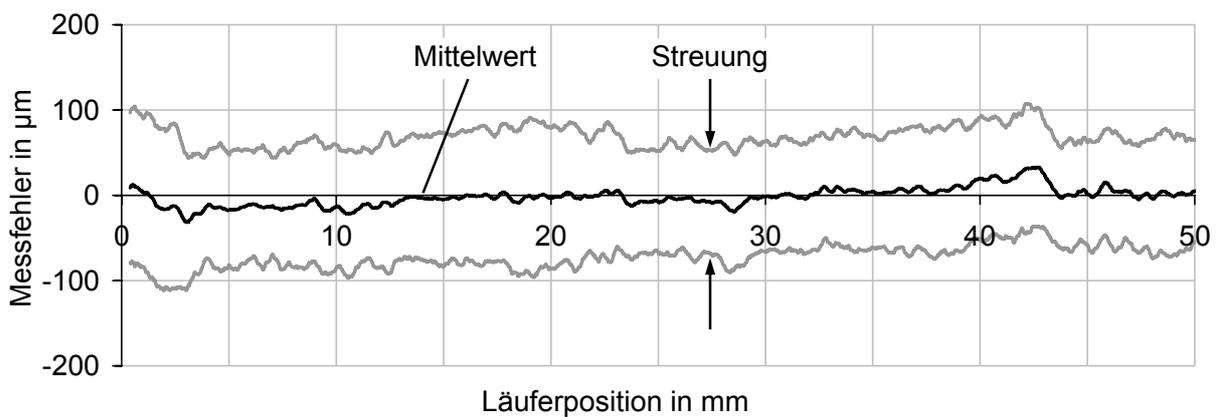


Bild 13: Grundgenauigkeit der integrierten Wegmessung bei getakteter Ansteuerung

Allerdings treten auch bei mehrsträngigen Systemen Fehlereinflüsse auf, die durch zusätzliche Maßnahmen korrigiert werden müssen:

- transformatorische Kopplungen zwischen den Antriebssträngen,
- verlangsamer Feldabbau durch Wirbelströme,
- bewegungsinduzierte Gegenspannungen.

Eine Kompensation dieser Einflüsse ist oftmals nur mit Hilfe von Korrekturtabellen möglich.

### **Einsatzgebiete und –grenzen**

Vorrangiges Einsatzgebiet der integrierten Wegmessung werden mehrsträngige, kommutierte Systeme mit vergleichsweise großem Hub sein. Diese Antriebe benötigen zur Kommutierung in jedem Fall ein Messsystem. Dieses kann integriert ausgeführt werden, ohne zusätzlichen Bauraum zu benötigen und mit einem vergleichsweise geringen schaltungstechnischem Aufwand. Die Genauigkeit der Wegmessung wird dann im Bereich von 0,1 mm bis 0,2 mm liegen. Soll eine Genauigkeit bis 0,05 mm erreicht werden, sind umfangreiche Fehlerkorrektur- und Kompensationsmaßnahmen erforderlich.

Aufgrund des inkrementellen Aufbaus des Systems ist die Genauigkeit unabhängig vom Hub des Antriebs.

### **4 Interne sensorische Eigenschaften von Kurzspulsystemen**

Langspulsysteme weisen eine vergleichsweise große Verlustleistung auf, da immer auch Spulenteile bestromt werden, die nicht zur Krafterzeugung beitragen. Einen besseren Wirkungsgrad erreicht man mit Kurzspulsystemen, wobei das Spulensystem hier gleichzeitig den Abtrieb bildet. Dies hat zwar den Nachteil, dass eine Stromzufuhr zu bewegten Teilen erforderlich wird, im Allgemeinen weisen die Spulen aber nur eine vergleichsweise geringe Masse auf, was zu einer höheren Dynamik des Antriebs führt.

Auch diese Antriebe verfügen über interne sensorische Eigenschaften, die zur Umsetzung einer integrierten Wegmessung genutzt werden können. Zur Erläuterung sei zunächst ein möglichst einfacher Aufbau betrachtet, wie der in Bild 14 dargestellte Tauchspulantrieb.

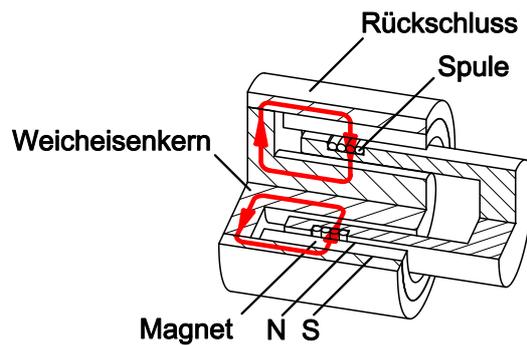


Bild 14: Tauchspulantrieb

Die einsträngige Wicklung ist als Kurzspulensystem ohne zusätzlichen Mittenabgriff ausgeführt, das Feld wird durch einen radial magnetisierten Magnetring erzeugt. Bedingt durch diesen Aufbau weist der weichmagnetische Kern des Antriebs keine konstante Flussdichte auf, wie Bild 15 verdeutlicht.

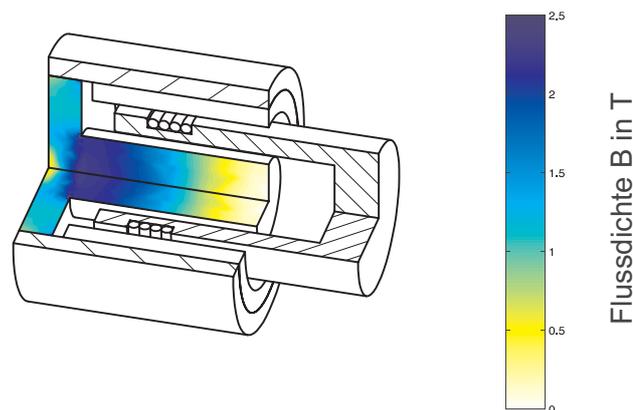


Bild 15: Flussdichte im Kern des Tauchspulmotors (Simulation)

Die Messung der Flussdichte zur Läuferpositionsbestimmung ist bereits Stand der Technik. Allerdings kommen zusätzliche Bauelemente wie Hall-Sensoren oder magnetoresistive Sensoren zum Einsatz. Dies soll durch die integrierte Wegmessung vermieden werden.

Allein mit Hilfe der Antriebsspulen besteht aber keine Möglichkeit der direkten Flussdichtemessung. Daher muss auf abgeleitete Größen ausgewichen werden. Obwohl sie von der Feldstärke und der Vorgeschichte des Materials abhängig ist, bietet sich die Permeabilität  $\mu = \mu_0 \mu_r$  hier besonders an. Um sie als positionsabhängige Messgröße nutzen zu können, muss sie allerdings über dem gesamten Läuferweg einen monotonen Verlauf aufweisen. Da die Permeabilität weichmagnetischer Werkstoffe ein ausgeprägtes Maximum bei einer Flussdichte von 0,5 T bis 0,75 T aufweist, ist es nicht ausreichend, die Feldverteilung im magnetischen Kreis des Motors dahingehend zu optimieren, dass sich ein

monotoner Flussdichteverlauf ohne nennenswerte Sättigung über dem Läuferweg ergibt. Es ist vielmehr auch notwendig, Zonen geringer Flussdichte zu vermeiden, da hier die maximale Permeabilität wieder unterschritten wird und kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Permeabilität und Flussdichte mehr gegeben ist. Abhilfe ist hier durch zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. kegelförmige Senkungen im Kern, möglich.

Für den oben dargestellten Tauchspulantrieb ergibt sich über der Kernlänge die in Bild 16 dargestellte Permeabilität.

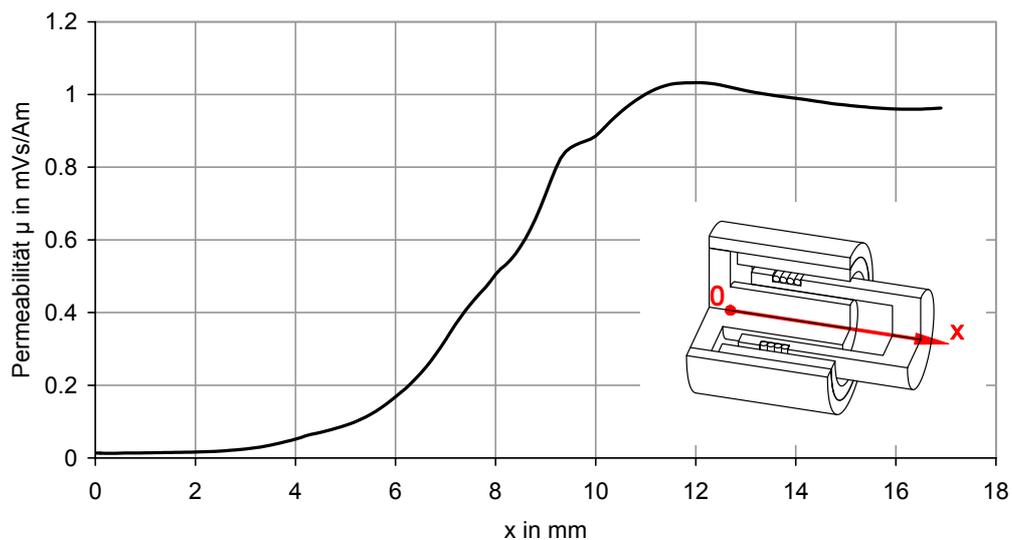


Bild 16: Permeabilität im Kern (Simulation; Kernlänge 17 mm)

Eine eindeutige Zuordnung von Läuferposition und Permeabilität ist nur bis zu einem Hub von 12 mm gegeben. Ab diesem Punkt sinkt die Flussdichte im Kern unter 0,5 T (siehe Bild 15).

In der Praxis wirkt sich die veränderte Permeabilität auf den Verlauf des Stromes nach einem Flankenwechsel im pulsweitenmodulierten Ansteuersignal aus. Bestimmt wird dieser Verlauf durch den komplexen Widerstand  $Z$  der Spule, für den gilt [3]:

$$Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + (\omega L)^2} \quad (4.1)$$

wobei mit  $L$  die Induktivität der Spule, mit  $\omega$  die Kreisfrequenz des Anregungssignals und mit  $R_{\Sigma}$  der Verlustwiderstand der Spule bezeichnet wird. Für die Induktivität gilt allgemein:

$$L = n^2 \mu_0 \mu_r \frac{A}{l} \quad (4.1)$$

Sie ist also direkt von der Permeabilität des umfassten Kernmaterials abhängig. Aber auch der Verlustwiderstand, der sich aus dem Gleichstromwiderstand der Wicklung und dem

Ersatzwiderstand der Kernverluste zusammensetzt, zeigt läuferpositionsabhängige Änderungen. Die Ursache hierfür liegt in den Hystereseverlusten, die zusammen mit Wirbelstrom- und Nachwirkungsverlusten die Kernverluste bilden. Als Hystereseverlust wird die während einer Periode des Ansteuersignals in Wärme umgewandelte Energie bezeichnet. Die Größe der Verluste ist abhängig von der Fläche der dabei durchlaufenen Hystereseschleife. Maßgebend für die Fläche dieser Hystereseschleife ist die reversible Permeabilität  $\mu_{rev}$  für die nach [4] gilt:

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (4.3)$$

Im Gegensatz zur normalen Permeabilität eines Stoffes ist die reversible Permeabilität nicht von der Feldstärke, sondern allein von der Flussdichte abhängig. Ihr Maximum liegt bei  $B = 0$ . Auch die Wirbelstrom- und Nachwirkungsverluste haben einen Einfluss auf die Größe des Verlustwiderstandes, allerdings zeigen sie keine Abhängigkeit von der Flussdichte.

Damit lässt sich für die integrierte Wegmessung durch Detektion der Flussdichte zusammenfassen:

- Eine direkte Detektion der Flussdichte ist nicht möglich, statt dessen können aber abhängige Größen wie die Permeabilität indirekt über eine Bestimmung der Spuleninduktivität ermittelt werden.
- Diese Messmethode erfordert nicht zwangsweise einen monotonen Verlauf der Flussdichte über dem Läuferweg, wohl aber einen monotonen Verlauf der Permeabilität. Bei mehrsträngigen Antrieben ist auch ein periodischer Verlauf der Permeabilität möglich, sofern zwischen den von den einzelnen Strängen detektierten Permeabilitäten eine ausreichend große Phasenverschiebung herrscht.
- Die technische Umsetzung der Induktivitätsmessung kann durch das Messen des Spulenstromes zu zwei Zeitpunkten nach einem Flankenwechsel im Ansteuersignal geschehen.
- Auch der Realteil des dabei ermittelten Wechselstromwiderstandes zeigt läuferpositionsabhängige Änderungen, welche im Wesentlichen auf die Hystereseverluste im Kern zurückgeführt werden können. Der Realteil kann also auch zur Positionsbestimmung herangezogen werden, allerdings zeigen Widerstände eine deutlich höhere Temperaturabhängigkeit als Induktivitäten, so dass hier zusätzliche Korrekturmaßnahmen notwendig werden.

## 5 Integrierte Wegmessung in Kurzspulsystemen (Praxisbeispiele)

Zur praktischen Umsetzung der integrierten Wegmessung wird der Motor mit einer pulsweitenmodulierten Spannung angesteuert. Ohne Betrachtung bewegungsinduzierter Gegenspannungen gilt für den Verlauf des Stroms die Differentialgleichung

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt} = u(t) \quad (5.1)$$

Für den Fall eines Spannungssprungs zum Zeitpunkt  $t=0$  von  $u(0)=0$  auf  $u(t)=u_m$  für  $t > 0$  und unter Berücksichtigung der Randbedingung  $i(0)=i_0$  lässt sich Gl. 5.1 lösen:

$$i(t) = i_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{u_m}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (5.2)$$

Wird der Motorstrom zu zwei Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  nach dem Flankenwechsel abgetastet, so lassen sich unter der Bedingung, dass  $t_2 = 2t_1$  die Induktivität und der ohmsche Widerstand berechnen:

$$R = \frac{u_m (2 \cdot i(t_1) - i(t_2) - i_0)}{i(t_1)^2 - i_0 \cdot i(t_2)} \quad (5.3)$$

$$L = -\frac{R \cdot t_1}{\ln \left( \frac{R \cdot i(t_1) - u_m}{R \cdot i_0 - u_m} \right)} \quad (5.4)$$

Zur umfassenden messtechnischen Untersuchung wurden am IKFF mehrere Antriebe aufgebaut. Bild 17 zeigt einen homopolaren Antrieb in Kastenspulenbauweise mit einem einsträngigen Spulensystem, das allerdings in zwei räumlich getrennte Teilspulen gegliedert ist.



Bild 17: Einsträngiger, homopolarer Antrieb in Kastenspulenbauweise [5]

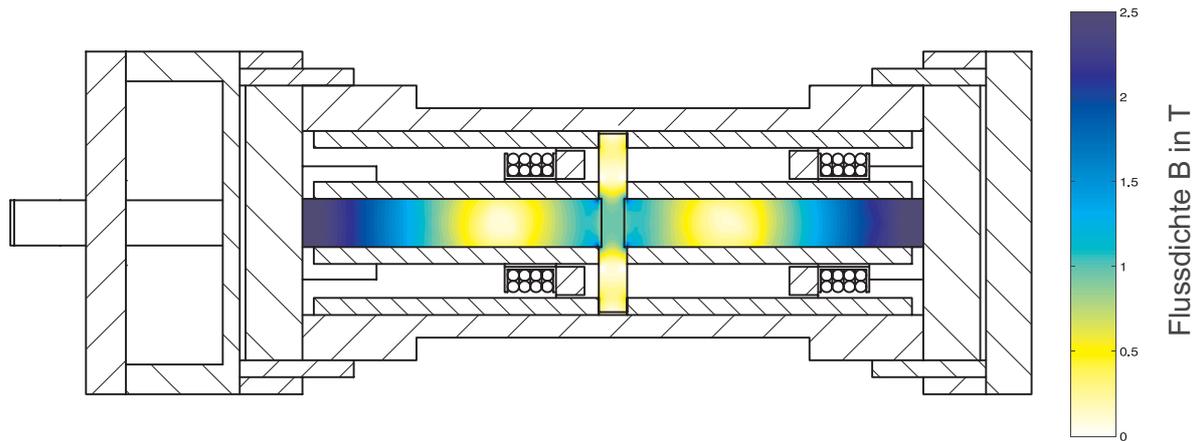


Bild 18: Flussdichteverteilung (Simulation)

Die Verteilung der Flussdichte im Kern des Antriebs ist in Bild 18 dargestellt. Hier zeigt sich bereits, dass ähnlich wie bei Tauchspulantrieben nicht der gesamte Läuferwegsbereich durch eine integrierte Wegmessung erfasst werden kann, da die Permeabilität keinen monotonen Verlauf aufweist. Aufgrund der Gestaltung des Magnetkreises ergibt sich für den gesamten Antriebsstrang eine symmetrische Permeabilitätsverteilung. Dies führt zu einem Stromverlauf mit einem Minimum im mittleren Läuferwegsbereich, Bild 19.

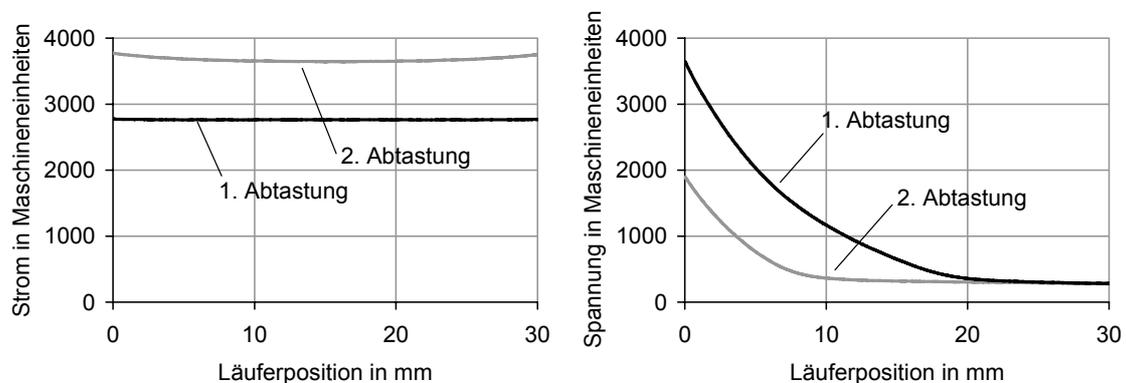


Bild 19: Verlauf von Motorstrom (links) und Spannung am Mittenabgriff (rechts) über dem Läuferweg

Allein mit Hilfe der Strommessung ist in diesem Fall also keine integrierte Wegmessung möglich. Die Permeabilität bei Betrachtung des gesamten Antriebsstrangs ist symmetrisch. Aus diesem Grund wurde auch hier ein elektrischer Mittenabgriff zwischen den beiden Teilspulen eingeführt. Dies ermöglicht es, für beide Teilspulen getrennt die Spuleneigenschaften zu ermitteln. Dazu dient die Messung der an diesem Mittenabgriff anliegenden Spannung. Die Abtastung der Spannung findet zeitgleich mit der Abtastung des

Stromes statt. Der Verlauf der Mittenspannung über dem Läuferweg ist in Bild 19 rechts dargestellt. Mit Hilfe von Gl. 5.5 – 5.8 lässt sich aus diesen Messwerten auf die Induktivität und den Verlustwiderstand der Teilspulen zurückschließen:

$$R_1 = \frac{i_2 \cdot (-u_1 + u_2) + i_1 \cdot (u_1 + u_2)}{i_1^2 + i_2^2} \quad (5.5)$$

$$L_1 = \frac{2i_1 t_1 \cdot (-i_2 u_1 + i_1 u_2)}{(i_1 - i_2) \cdot (i_1^2 + i_2^2) \cdot \ln\left(\frac{i_1 + i_2}{-i_1 + i_2}\right)} \quad (5.6)$$

$$R_2 = \frac{i_2 \cdot (u_1 - u_2) - i_1 \cdot (u_1 + u_2) + 2 \cdot i_1 \cdot u_m}{i_1^2 + i_2^2} \quad (5.7)$$

$$L_2 = -\frac{2i_1 t_1 \cdot (-i_2 \cdot u_1 + i_1 \cdot u_2 + (-i_1 + i_2) \cdot u_m)}{(i_1 - i_2) \cdot (i_1^2 + i_2^2) \cdot \ln\left(\frac{i_1 + i_2}{-i_1 + i_2}\right)} \quad (5.8)$$

mit  $i_1 = i(t_1)$ ,  $i_2 = i(t_2)$ ,  $u_1 = u(t_1)$ ,  $u_2 = u(t_2)$ . Zur Auswertung als Positionssignal bietet sich der Quotient der beiden Teilstranginduktivitäten an:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{-i_1 + i_2}{i_2 \cdot u_1 - i_1 \cdot u_2} \cdot u_m - 1 \quad (5.9)$$

Damit erhält man zur Auswertung eine einfache Gleichung, die sich auch mit 8-Bit Mikrocontrollern und vergleichsweise geringer Rechenleistung auswerten lässt.

Bild 20 zeigt den Verlauf des Quotienten über dem Läuferwegsbereich des Kastenspulenmotors.

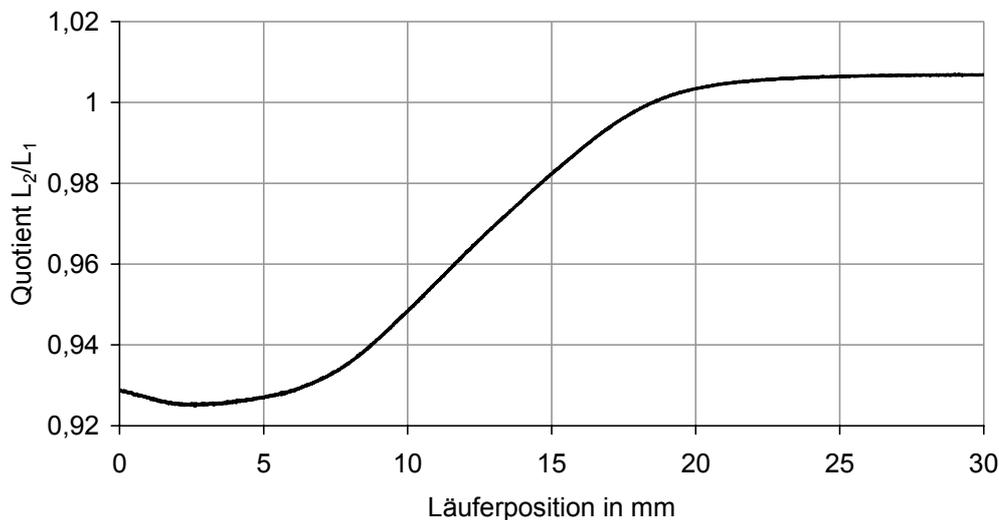


Bild 20: Verlauf des Quotienten der Teilstranginduktivitäten über dem Läuferweg

In den Randbereichen ist aufgrund geringer Steigungen bzw. nichtmonotonen Verhaltens keine integrierte Wegmessung möglich. Wird der Hub des Motors aber mechanisch auf den

monotonen Bereich der Wegmess-Kennlinie begrenzt, ist eine integrierte Wegmessung möglich.

Auch in mehrsträngigen, heteropolaren Systemen kann eine integrierte Wegmessung nach dem Verfahren der Flussdichtedetektion realisiert werden. Dazu wurde am IKFF ein dreisträngiger Antrieb in rotationssymmetrischer Bauweise konstruiert und aufgebaut, Bild 21.

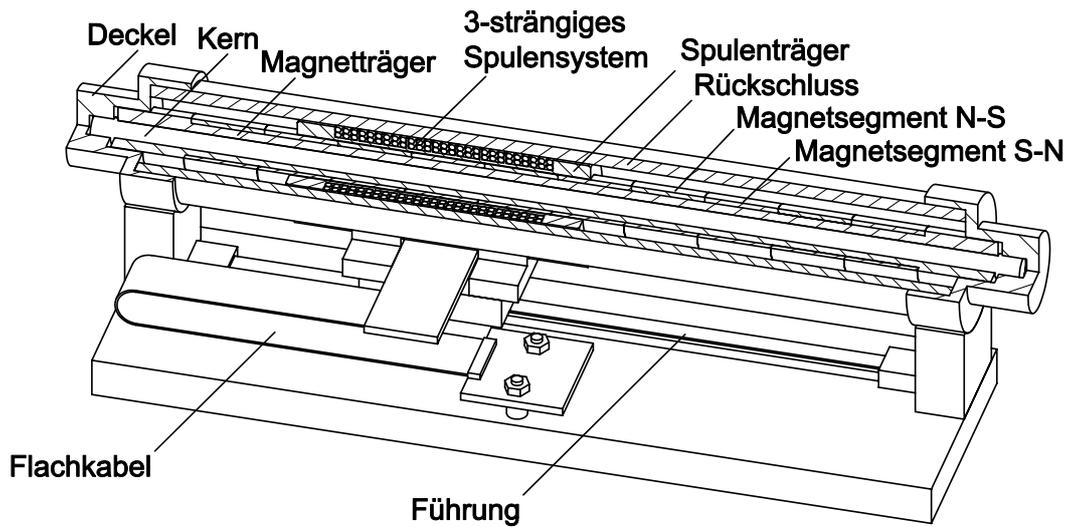


Bild 21: Dreisträngiger, rotationssymmetrischer Antrieb

Kern und Magnetträger bestehen aus Automatenstahl (9SMn28k), auf den Magnetträger sind die Magnete in Form von diametral magnetisierten Viertelsegmenten aufgeklebt. In diesem Kern ergibt sich ein periodischer Flussdichteverlauf mit lokalen Maxima an den Fügstellen der Magnete. Eine Messung der Spuleneigenschaften mit einem Impedanzanalysator ergab die in Bild 22 dargestellten Ergebnisse.

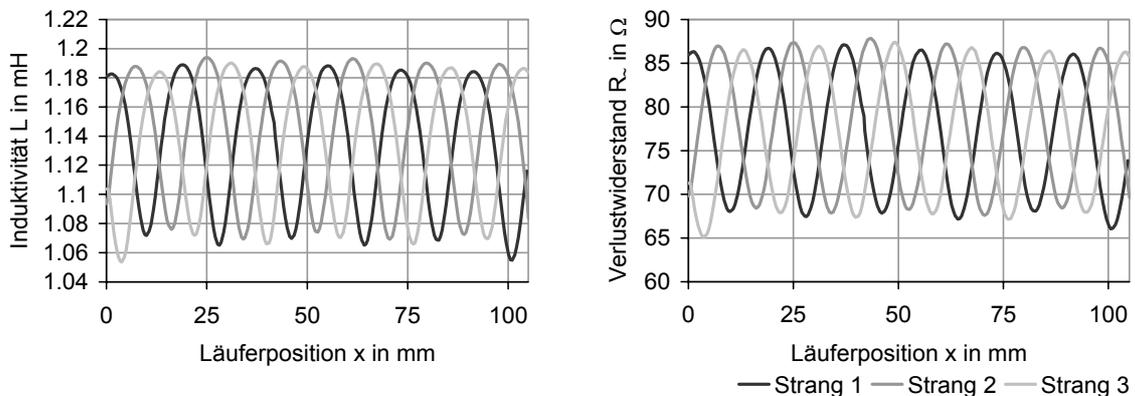


Bild 22: Verlauf von Induktivität und Verlustwiderstand über dem Läuferweg

Jeder Antriebsstrang zeigt einen periodischen Verlauf sowohl der Induktivität als auch des Verlustwiderstandes. Dabei ist die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Strängen so groß, dass ein inkrementelles Messsystem aufgebaut werden kann.

Allerdings ist auch bei der integrierten Wegmessung durch Detektion der Flussdichte mit erheblichen Fehlereinflüssen durch Temperaturänderungen, Wirbelströme, Strangverkopplung und bewegungsinduzierte Gegenspannungen zu rechnen. Diese werden derzeit vertieft untersucht.

## **6 Zusammenfassung**

Bisher waren nur Antriebe mit Langspulsystemen einer integrierten Wegmessung zugänglich. Durch Detektion der Flussdichte können jetzt auch Lineardirektantriebe mit Kurzspulsystemen mit einer sensorlosen Läuferpositionserkennung ausgerüstet werden. Damit erweitert sich das Anwendungsspektrum zum einen auf Tauchspulantriebe und zum anderen auch auf hochdynamische Antriebe mit bewegten Spulen. In vielen Fällen, wie z.B. bei Tauchspulmotoren oder bei dreisträngigen Antrieben können Standardbauformen ohne zusätzliche konstruktive Maßnahmen mit einer integrierten Wegmessung ausgerüstet werden. Dabei lässt sich das untersuchte Verfahren auch auf Langspulsysteme anwenden. Allerdings wird dann nicht mehr die Änderung der Permeabilität innerhalb des Kerns durch die unterschiedliche Aussteuerung detektiert, sondern das Einschubverhältnis des Kerns in die Antriebswicklung, ähnlich den bisher bekannten Verfahren zur integrierten Wegmessung. In den meisten Fällen sind auch dann keine konstruktiven Änderungen am Motor nötig, unter Umständen kann die Anbringung eines elektrischen Mittenabgriffs zwischen Teilsträngen notwendig werden.

Eine prinzipielle Eignung des Verfahrens konnte messtechnisch nachgewiesen werden. Der Schwerpunkt aktueller Arbeiten liegt in der Untersuchung der Fehlereinflüsse und der Entwicklung von Verfahren zur Fehlerkompensation.

## **7 Literaturangaben**

- [1] Welk, C.: Detektion interner sensorischer Eigenschaften von elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation. Universität Stuttgart 2004
- [2] Clauß, C., Schinköthe, W.: Integrierte Wegmessung in feinwerktechnischen Lineardirektantrieben durch Detektion der Flussdichte im flussführenden Eisen.

Zwischenbericht zum DFG-Projekt SCHI457/8-1. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik 2004

- [3] Stöcker, H.: Taschenbuch der Physik. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch 2000
- [4] Boll, R.: Weichmagnetische Werkstoffe. Berlin, München: Siemens AG 1990
- [5] Gundelsweiler, B.: Dimensionierung und Konstruktion von feinwerktechnischen elektrodynamischen Lineardirektantrieben. Dissertation. Universität Stuttgart 2003

**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**