

# Hybridmagnete für einen magnetisch gelagerten Rundtisch

O. Petzold

*In vielen Bereichen der Technik haben Magnetlager ihren festen Platz eingenommen. Der Einsatz umfasst rotatorische als auch translatorische Bewegung. Ein Hauptmerkmal von Magnetlagern sind die Magnete selber, durch welche eine berührungslose und somit verschleißfreie Lagerung überhaupt erst ermöglicht werden kann. Diese magnetischen Aktoren sind überwiegend als Elektromagnete ausgeführt. In der vorliegenden Arbeit werden Hybridmagnete vorgestellt, welche in einem magnetisch gelagerten Rundtisch zum Einsatz kommen. Die Hybridmagnete sind durch den Einsatz von Permanentmagneten sowie einer Spule zur Erzeugung und Modulation der Durchflutung gekennzeichnet und werden mit ihren Vor- und Nachteilen erörtert und mit dem Elektromagneten statisch, dynamisch und energetisch verglichen.*

## 1 Einleitung

Bei den Elektromagneten für Magnetlager erfolgt im Allgemeinen eine Unterteilung in eine Grunderregerwicklung und in eine Steuerwicklung mit einer vergleichsweise geringen Induktivität. Während die Grunderregerwicklung mit einem konstanten Strom betrieben wird und die statischen Kräfte erzeugt, wird die Steuerwicklung zur Aufbringung dynamischer Kräfte benutzt. Eine weiter entwickelte Bauart verwendet Hybridmagnete, bei denen anstelle der Grunderregerwicklung Permanentmagnete eingesetzt werden, Schweitzer et al. (1993); Kallenbach et al. (1994).

In Rödder (1994) wurde an der RWTH Aachen ein Förderfahrzeug entwickelt, welches zur Lagerung Hybridmagnete verwendet. Ziel war es vor allem, den Energieverbrauch zu minimieren. Zur Führung wurden die Seitenkräfte der Hybridmagnete ausgenutzt, die durch eine Nutzung des Rückschlussjoches noch weiter vergrößert wurden.

Der Vorteil von den Hybridmagneten liegt in einem kleineren Kupfervolumen der Steuerwicklung, wodurch kleinere Zeitkonstanten als bei herkömmlichen Elektromagneten erreichbar sind. Die permanentmagnetisch erregten Hybridmagneten besitzen aufgrund der Dicke der Permanentmagneten einen größeren effektiven Luftspalt als Elektromagnete, welcher sich auf die Kraft-Luftspalt Kennlinie linearisierend auswirkt. Dieses Prinzip der Luftspaltvergrößerung wird bei Drosseln zur Realisierung einer linearen Übertragungskennlinie eingesetzt. Ein weiterer Vorteil ist der geringere Energieverbrauch eines Hybridmagneten im Vergleich zu den herkömmlichen Lösungen.

Aus diesem Grund wurde für den Prototypen des magnetisch gelagerten Rundtisches Hybridmagnete eingesetzt, Abbildung 1 und 2. Der Rundtisch selbst besitzt einen Durchmesser von ca. 1,5 m. Er ist als 8-Punkt Lager ausgeführt, wobei sich die axialen und radialen Aktoren jeweils in einer Differentialanordnung befinden. Somit enthält der Rundtisch jeweils 16 axiale und radiale Aktoren, die als Hybridmagnete ausgeführt sind. Die radialen Aktoren befinden sich aus konstruktiven Gründen in einer ringförmigen Baugruppe. Die Regelung und Modellbildung des Rundtisches ist in Petzold et al. (2003) beschrieben.

## 2 Kraft eines Hybridmagneten

In Abbildung 3 ist der magnetische Kreis für einen EI Hybridmagneten dargestellt. Zur Berechnung der Reluktanzkraft für ein Polpaar geht man von der im Luftspalt  $\delta_A$  gespeicherten magnetischen Energie  $W_L$  aus. Für ein angenommenes, homogenes Feld im Luftspalt mit dem Volumen  $V_L$  ist die Luftspaltenergie definiert als

$$W_L = \frac{1}{2} B_L H_L V_L. \quad (1)$$

Mit  $B_L = \mu_0 H_L$  gilt

$$W_L = \int_0^{\delta_A} \frac{B^2}{2\mu_0} A ds. \quad (2)$$

Die auf den ferromagnetischen Körper ( $\mu_r \gg 1$ ) wirkende Kraft entsteht durch die Änderung der Feldenergie im Luftspalt, z. B. durch Lageänderung des Ankers. Der magnetische Fluss  $\Phi = BA_{Fe}$  ist für kleine Verschiebungen  $d\delta_A$  konstant. Vergrößert sich der Luftspalt um  $d\delta_A$ , so vergrößert sich auch das Luftspaltvolumen  $A_{Fe} \delta_A$ . Die Energie im Feld nimmt um  $dW$  zu, welche über die mechanische Arbeit eingebracht wurde. Es muss also eine anziehende Kraft überwunden werden. Die Kraft ist gleich der partiellen Ableitung der Feldenergie nach der interessierenden Koordinate - hier dem Luftspalt (Prinzip der virtuellen Verschiebung). Bei zeitlich konstanter Luftspaltenergie gilt somit

$$F_N = \frac{\partial W_L}{\partial \delta_A}. \quad (3)$$

Die Bestimmung der Flussdichte  $B_L$  in Gleichung (2) erfolgt mit Hilfe des Durchflutungsgesetzes

$$\Theta_{Ges} = \oint_l H dl. \quad (4)$$

Entsprechend Abbildung 3 berechnet sich für das Polpaar eines Hybridmagneten die Durchflutung  $\Theta_{Ges}$  zu

$$\Theta_{Ges} = 2H_L \delta_A + H_{Fe} l_{Fe} + H_{Pm} l_{Pm}. \quad (5)$$

Hierin beschreibt  $l_{Fe}$  die mittlere Länge der Feldlinien im Eisenkern und  $l_{Pm}$  die Stärke des Permanentmagneten.

Mit der Materialgleichung  $B = \mu_0 \mu_r H$  kann das Durchflutungsgesetz geschrieben werden als

$$\Theta_{Ges} = \frac{B_L}{\mu_0} 2\delta_A + \frac{B_L}{\mu_0 \mu_{Fe}} l_{Fe} + \frac{B_{Pm}}{\mu_0 \mu_{Pm}} l_{Pm}. \quad (6)$$



Abbildung 1: Rundtisch Prototyp

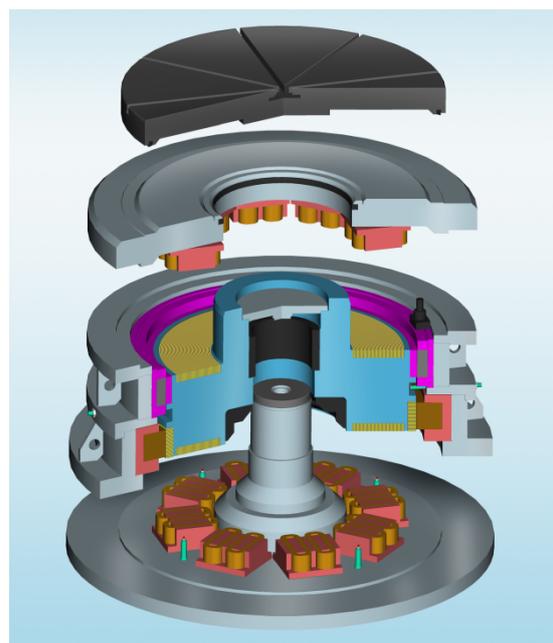


Abbildung 2: Explosionsansicht

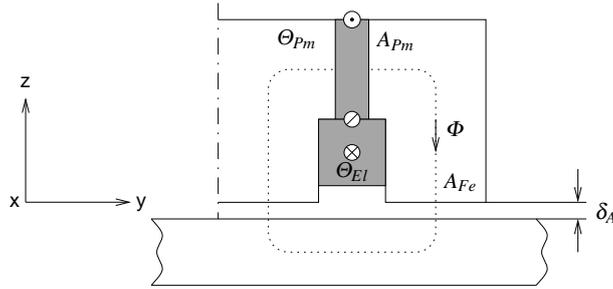


Abbildung 3: Magnetischer Kreis eines Hybridmagneten (EI-Kern Halbschnitt)

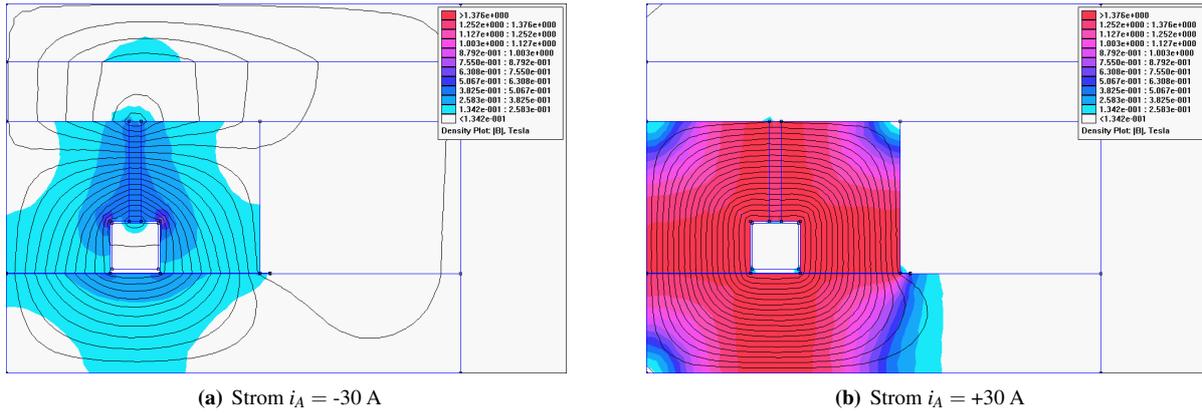


Abbildung 4: Feldverteilung innerhalb des Hybridmagneten bei Umpolung des Erregerstromes

Unter der Annahme, dass keine Streuung auftritt und das magnetische Feld im Luftspalt homogen verteilt ist, gilt aufgrund der Quellenfreiheit der magnetischen Flussdichte

$$B_{Pm} = B_L \frac{A_{Fe}}{A_{Pm}}, \quad (7)$$

d. h. die Luftspaltinduktion kann durch das Verhältnis von Eisen- und Permanentmagnetfläche bestimmt werden. Mit Gleichung (7) und (6) kann die Luftspaltinduktion  $B_L$

$$B_L = \frac{1}{2} \frac{\Theta_{Ges} \mu_0}{\delta_A + \frac{1}{2} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{A_{Fe}}{A_{Pm}} \frac{l_{Pm}}{\mu_{Pm}} \right)} \quad (8)$$

berechnet werden. Entsprechend ergibt sich die Kraft für ein Polpaar eines Hybridmagneten entsprechend Gleichung (2) bzw. (3) zu

$$|F_N| = \frac{1}{4} \frac{\Theta_{Ges}^2 \mu_0 A_{Fe}}{\left( \delta_A + \frac{1}{2} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{A_{Fe}}{A_{Pm}} \frac{l_{Pm}}{\mu_{Pm}} \right) \right)^2}. \quad (9)$$

Praktisch wird in Gleichung (9) die Nichtlinearität des Kernmaterials und somit Sättigungserscheinungen und Hystereseeffekte des Eisens vernachlässigt. Einen analytischen Ansatz zur Lösung enthält Toscher (2003). Die Nichtlinearität  $B(H)$  wird mit Hilfe einer Wurzelfunktion hinreichend genau approximiert. Für die Modellierung insbesondere der Hysteresis in Magnetkreisen wird im Allgemeinen das Preisach bzw. Jiles-Atherton Modell verwendet, Mayergoyz (1991).

Für die praktische Auslegung des Hybridmagneten ist die Überprüfung der analytischen Auslegung mit Hilfe der FEM effektiver, da auch Streuflüsse bestimmt werden können und die gleichmäßige Flussverteilung untersucht werden kann. Abbildung 4 zeigt die Flussdichteverteilung bei zwei verschiedenen Strömen. Weiterhin ist die Modulation des permanentmagnetischen Flusses durch die Steuerspule bzw. den durch sie erzeugte elektrische Durchflutung  $\Theta_{EI}$  erkennbar.

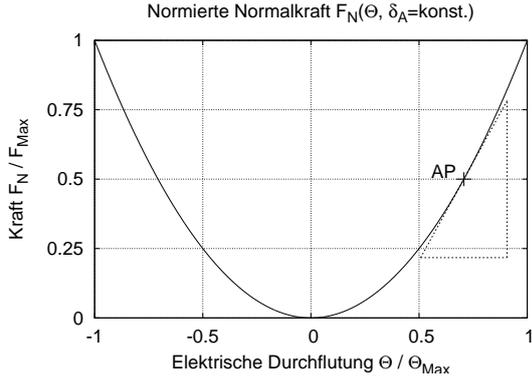


Abbildung 5: Normierte  $\frac{dF}{d\Theta}$  Kennlinie eines Elektromagneten

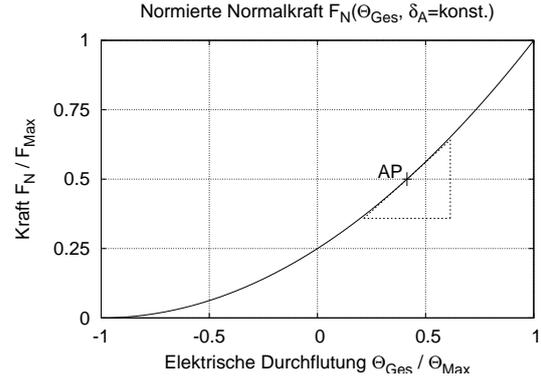


Abbildung 6: Normierte  $\frac{dF}{d\Theta}$  Kennlinie eines Hybridmagneten

### 3 Das Verhalten des Hybridmagneten

Abbildung 5 zeigt das bekannte Verhältnis zwischen Kraft und Durchflutung eines Elektromagneten. Typisch für diesen Magnettypen ist die Unabhängigkeit der Kraft von der Stromrichtung, weshalb nur Stromsteller benötigt werden, die im 1. Quadranten arbeiten. Mit dem gleichen Stellbereich der Durchflutung ist die Kennlinie des Hybridmagneten in Abbildung 6 dargestellt. In Abhängigkeit von der Auslegung beträgt die Kraft bei  $|\Theta_{max}|$  jeweils  $F_A = 0$  bzw.  $F_A = max$ . Typisch für die Hybridmagnete ist eine Kraft  $F_0$  bei einem Aktorstrom von  $i_A = 0$  und die Notwendigkeit von Zwei-Quadranten Stromstellern.

Beide Abbildungen zeigen aber auch, dass für eine Kraft in einem Arbeitspunkt die Hybridmagnete eine geringere Durchflutung im Verhältnis benötigen als Elektromagnete, wodurch die Hybridmagnete energetisch günstiger sind. Zudem ist erkennbar, dass der Kraft-Strom-Faktor  $k_i$  der Hybridmagneten geringer ist als der von Elektromagneten. Die Ursache ist anhand der linearisierten Kraft einfach erklärbar.

Die Linearisierung des Aktorkraft eines Hybridmagneten (9) wird mit Hilfe der TAYLOR-Reihenentwicklung

$$F_N|_{AP} = F_0 + \frac{1}{1!} \left. \frac{\partial F_N}{\partial i_A} \right|_{AP} (i_A - i_0) + \frac{1}{1!} \left. \frac{\partial F_N}{\partial \delta_A} \right|_{AP} (\delta_A - \delta_0) + \dots \quad (10)$$

durchgeführt, wobei nach dem ersten linearen Glied abgebrochen wird. Somit gilt

$$F_{Mgnl}|_{s_0, i_0} = F_N(s_0, i_0) + k_i (i_A - i_0) + k_s (\delta_A - \delta_0). \quad (11)$$

mit der Kraft im Arbeitspunkt

$$F_N = \frac{1}{4} \frac{(i_0 w + \Theta_{Pm})^2 \mu_0 A_{Fe}}{\left( \delta_A + \frac{1}{2} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{A_{Fe}}{A_{Pm}} \frac{l_{Pm}}{\mu_{Pm}} \right) \right)^2}, \quad (12)$$

dem Kraft-Strom-Faktor

$$k_i = \frac{1}{2} \frac{(i_A w + \Theta_{Pm}) \mu_0 A_{Fe} w}{\left( \delta_A + \frac{1}{2} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{A_{Fe}}{A_{Pm}} \frac{l_{Pm}}{\mu_{Pm}} \right) \right)^2} \quad (13)$$

und dem Kraft-Weg-Faktor

$$k_s = -\frac{1}{2} \frac{(i_A w + \Theta_{Pm})^2 \mu_0 A_{Fe}}{\left( \delta_A + \frac{1}{2} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{A_{Fe}}{A_{Pm}} \frac{l_{Pm}}{\mu_{Pm}} \right) \right)^3}. \quad (14)$$

Da die relative Permeabilität des Permanentmagneten  $\mu_{Pm} \approx 1$  ist, geht die Stärke des Permanentmagneten direkt in den gesamten Luftspalt ein und verringert entsprechend die jeweiligen Anstiege. Da diese Faktoren jedoch konstant und folglich statisch sind werden sie, im Vergleich zu den Elektromagneten, in der zu realisierenden Regelung entsprechend als Proportionalfaktor gewichtet. Folglich stellen die geringen Anstiege kein gravierenden Nachteil der Hybridmagnete dar.

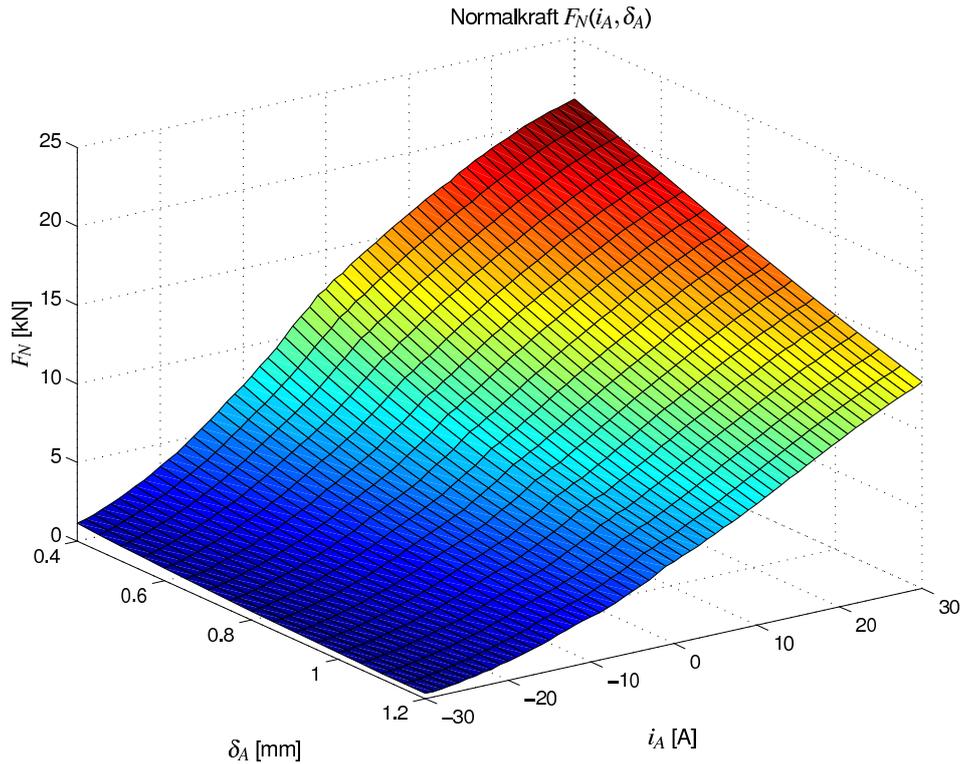


Abbildung 7: Gemessene und gemittelte Kennlinie eines Hybridmagneten

Speziell für den Einsatz im Werkzeugmaschinenbau sind die dynamischen Eigenschaften wesentlich wichtiger. Eine Kenngröße ist die Induktivität. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der Spannungsgleichung

$$u_{KI}(t) = R_A i_A(t) + \dot{\Psi}(t) \quad (15)$$

mit der Klemmspannung  $u_{KI}$  an und dem ohmschen Widerstand  $R_A$  der Spule sowie der zeitlichen Änderung des verketteten Flusses  $\dot{\Psi}$ . Dieser wird mit Hilfe der partiellen Ableitung nach den zeitlich veränderlichen Größen des magnetischen Flusses berechnet

$$\dot{\Psi}(t) = \frac{\partial}{\partial i_A} \Psi(i_A, \delta_A) + \frac{\partial}{\partial \delta_A} \Psi(i_A, \delta_A), \quad (16)$$

worin der erste Term die gesuchte Induktivität  $\frac{\partial}{\partial i_A} \Psi$  und der zweite die Spannungsinduktion aufgrund des Lenzschen Gesetzes bei Luftspaltänderungen ist. Der verkettete Fluss in Gleichung (16) berechnet sich zu

$$\Psi = w \int B dA_{Fe}. \quad (17)$$

Mit Gleichung (17) und (8) kann die Induktivität eines Hybridmagneten bei gegebenem Luftspalt  $\delta_0$  berechnet werden

$$L = \frac{1}{2} \frac{w^2 \mu_0 A_{Fe}}{\delta_0 + \frac{1}{2} \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{A_{Fe} l_{Pm}}{A_{Pm} \mu_{Pm}} \right)}. \quad (18)$$

In Gleichung (18) geht die Stärke des Permanentmagneten direkt ein und verringert die Induktivität im Vergleich zu einem Elektromagneten. Zudem zeigt (18) den allgemeinen Zusammenhang  $L \sim w^2$  zwischen Induktivität und der Anzahl der Wicklungen. Entsprechend sind bei gleichen Randbedingungen, aufgrund der daraus resultierenden geringeren Induktivität, mit einem Hybridmagneten schnellere Stromanstiege erreichbar als mit einem Elektromagneten.

#### 4 Messungen am Hybridmagneten

Mit Hilfe eines Messstandes wurden die berechneten und hergestellten Magnete bez. ihrer Parameter vermessen. Abbildung 7 zeigt die über 16 Messungen gemittelte Kraft in Abhängigkeit von Luftspalt  $\delta_A$  und Aktor-Strom  $i_A$ .

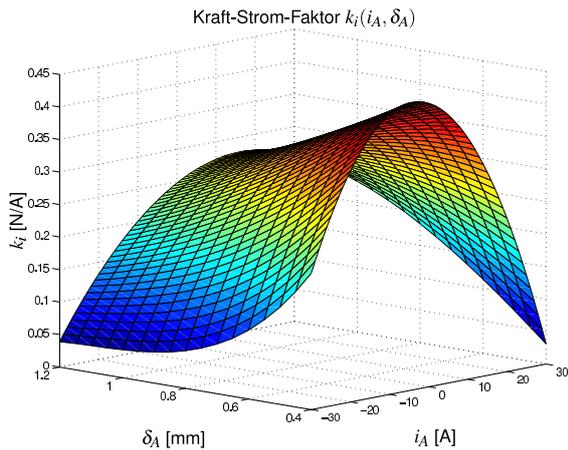


Abbildung 8: Gemessenes Kraft - Strom - Kennlinienfeld

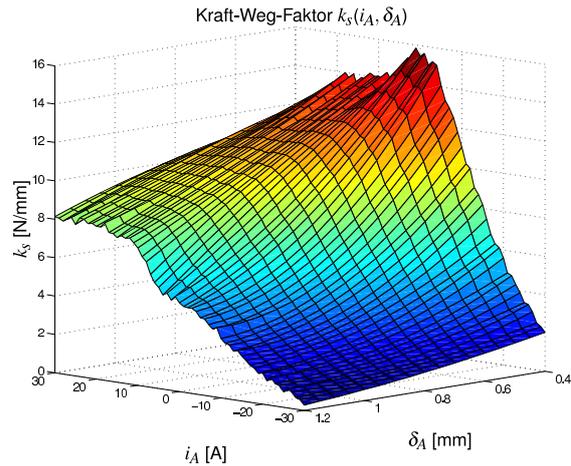


Abbildung 9: Gemessenes Kraft - Weg - Kennlinienfeld

Erkennbar ist die Abflachung der Kraft insbesondere bei kleinen Luftspalten und großen Strömen, wo sich die Sättigung der Eisenkerne bemerkbar macht.

Ebenso zeigt sich der flachere Verlauf im Verhältnis zwischen dem Absolutwert des Stromes und der Aktorkraft, wie in Abschnitt 3 erläutert bzw. in Abbildung 6 dargestellt wurde. Die gleichen Aussagen treffen für das Verhältnis von Kraft und Luftspalt zu.

Abbildung 8 und 9 zeigen die Ergebnisse der Linearisierung bzw. die aus den Messungen berechneten Kraft-Weg und Kraft-Strom Faktoren für die jeweiligen Arbeitspunkte.

## 5 Schlussfolgerung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt werden konnte, besitzen Hybridmagnete gegenüber herkömmlichen Elektromagnete entscheidende Vorteile.

Insbesondere bei grossen Magnetlagern, wie dem realisierten Rundtisch, besitzt die im Vergleich zu Elektromagneten geringere Kraft-Weg Abhängigkeit in der Kraftkennlinie der Hybridmagnete einen positiven Einfluss auf das Systemverhalten insbesondere während der Inbetriebnahme: Durch das Ausmessen der entsprechenden Kennlinien in einem speziellen Messstand erhält man die für die Arbeitspunktbestimmung notwendigen Daten mit entsprechender Genauigkeit. Infolge der Toleranzen bei der mechanischen Fertigung der konstruktiven Teile sind die realen Einbauverhältnisse im Rundtisch andere. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor hinsichtlich der Bestimmung der realen Luftspalte der Magnete sind die Sensoren bzw. deren Einbau und Justage im Rundtisch, da aufgrund des kompakten Aufbaus des Rundtisches eine Überprüfung, z. B. der Sensorspalte, im zusammengebauten Zustand nur schwer bzw. nicht mehr möglich ist. Diese genannten Luftspaltunsicherheiten kumulieren sich und resultieren in einem Unsicherheitsfaktor bez. der realen Luftspalte während des Betriebes. Durch die geringere Kraft-Weg Abhängigkeit der Hybridmagnete vereinfacht sich die Inbetriebnahme, da sich diese Unsicherheitsfaktoren, im Vergleich zu dem mit Elektromagneten ausgestatteten Magnetlager, geringer auswirken.

Aber auch aus energetischer Hinsicht sind Hybridmagnete für Magnetlager dieser Größenordnung vorteilhaft. Größere Durchmesser bedeuten auch eine größere Zuladung, womit die durch das Magnetlager zu tragende Last größer wird. Aus dieser Konsequenz steigt auch die Anzahl der magnetischen Aktoren, um eine effektive Nutzung des Bauraumes zu erreichen bzw. die Abmessungen gering zu halten. Entsprechend steigt aber auch der Energiebedarf. Im vorliegenden Fall des Rundtisches beträgt der Strom für jeden Aktor weniger als 1 A um den 1,5 t schweren Rotor in Schwebelage zu halten.

Aber auch dynamisch bringen Hybridmagnete aufgrund ihrer vergleichsweise geringeren Induktivität Vorteile. Da in der Regel mit Spannungsüberhöhung und Stromeinprägung gearbeitet wird, können die zur Einprägung verwendeten Spannungen geringer gehalten werden, was der Störsicherheit insbesondere der Sensoren zuträglich ist bzw. insgesamt der EMV Konformität zu Gute kommt.

Demgegenüber steht allerdings ein erhöhter technologischer Fertigungsaufwand und erhöhte Kosten durch die eingesetzten Permanentmagnete. Für Magnetlager der Größenordnung wie dem Rundtisch überwiegen die Vorteile der Hybridmagnete.

### Literatur

Kallenbach, E.; Eick, R.; Quendt, P.: *Elektromagnete*. B. G. Teubner Verlag, Leipzig, Berlin (1994).

Mayergoyz, I.: *Mathematical Models of Hysteresis*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (1991).

Petzold, O.; Palis, F.; Schallschmidt, T.: Elektrische aktorik eines magnetisch gelagerten werkzeugmaschinenrundes. In: *6. Magdeburger Maschinenbautage*, pages 215–222, Universität Magdeburg (September 2003).

Rödder, D.: *Berechnung und Auslegung der berührungslosen Lagerung eines Förderfahrzeuges mit Hybridmagneten*. Ph.D. thesis, RWTHA Aachen, Deutschland (Mai 1994).

Schweitzer, G.; Traxler, A.; Bleuler, H.: *Magnetlager: Grundlagen, Eigenschaften und Anwendungen berührungsfreier, elektromagnetischer Lager*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (1993).

Toscher, S.: *Modellierung und Regelung eines magnetischen Werkzeugträgersystems*. Studienarbeit, Universität Magdeburg, Deutschland (2003).

---

Adresse: Dipl.-Ing. Olaf Petzold, ELMO Barleben Service GmbH & Co. KG, Bahnhofstr. 27, 39179 Barleben.  
email: opetzold-ebs@gmx.de .