

Drehmomentprüfstand für magnetgelagerte Scheibenläufermotoren

Dipl.-Ing. Thomas Schneeberger, Dr. Thomas Nussbaumer, Prof. Dr. Johann W. Kolar

*Ein Beitrag zur VDE/VDI-Tagung „Elektrisch-mechanische Antriebssysteme“ zum Schwerpunktthema Nr. 1. Innovative Motorentechnik (magnetgelagerte Antriebe).
Neuheitsgrad: Aktuell*

Autor (Korrespondenzadresse):

Thomas Schneeberger
ETH Zürich LEM-AMT
Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich, Schweiz

Tel.: +41 44 63 37776
Fax: +41 44 63 31569
schneeberger@eek.ee.ethz.ch

Zusätzliche Autoren:

Thomas Nussbaumer
Levitronix GmbH
Technoparkstrasse 1
CH-8005 Zürich, Schweiz

Tel.: +41 44 63 37775
nussbaumer@levitronix.com

Johann W. Kolar
ETH Zürich
Power Electronic Systems Laboratory
ETL H23, Physikstrasse 3
CH-8092 Zürich

Tel.: +41 44 63 22834
kolar@lem.ee.ethz.ch



Lebenslauf von Thomas Schneeberger

Thomas Schneeberger wurde am 14. Juni 1977 in Olten (SO), Schweiz, geboren. Er studierte Elektrotechnik an der ETH Zürich und schloss das Diplomstudium im Oktober 2003 ab. Während des Fachstudiums beschäftigte er sich hauptsächlich mit mechatronischen Systemen und Leistungselektronik. Seit Januar 2004 ist er Doktoratsstudent an der Professur für Leistungselektronik und Messtechnik, Fachgruppe Antriebs- und Magnetlagertechnik. Seine Forschungstätigkeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines magnetgelagerten Wafer Chucks für die Halbleiterindustrie. Er ist studentisches Mitglied bei IEEE.

Drehmomentprüfstand für magnetgelagerte Scheibenläufermotoren

T. Schneeberger, ETH Zürich, Power Electronic Systems Laboratory, Zürich, Schweiz
Dr. T. Nussbaumer, Levitronix GmbH, Zürich, Schweiz
Prof. Dr. J.W. Kolar, ETH Zürich, Power Electronic Systems Laboratory, Zürich, Schweiz

Kurzfassung

Aufgrund des breiten Anwendungsfeldes magnetisch gelagerter Scheibenläufermotoren in der Halbleiter-, Pharma-, Medizin- und Biotechnologiebranche besteht das Bedürfnis, das Verhalten des Motors unabhängig von seinem Einsatzzweck an einem Prüfstand untersuchen und optimieren zu können. Um das Magnetlager durch das Lastmoment nicht zu beeinflussen, kann dieses berührungsfrei mit einer Wirbelstrombremse erzeugt werden. Im Sinne eines Design-Leitfadens werden in diesem Artikel Entwurfsrichtlinien für einen Drehmomentprüfstand für magnetgelagerte Scheibenläufermotoren präsentiert und an einem praktischen Beispiel verifiziert. Der Auslegung der Wirbelstrombremse wird dabei besondere Beachtung geschenkt.

1 Einleitung

In zahlreichen Industrieanwendungen (wie z.B. in der Halbleiter-, Pharma-, Medizin-, und Biotechnologiebranche) werden kritische Bearbeitungsschritte in der Produktion zunehmend in geschlossenen Prozesskammern durchgeführt, da so Prozessrahmenbedingungen wie Umgebungsmedium, Temperatur oder Druck einfacher gesteuert und kontrolliert werden können. Ausserdem verhindert eine Prozesskammer das Entweichen gesundheitsgefährdender Stoffe in die Umgebung sowie die Kontamination des Prozessobjekts mit sich in der Umgebung befindlichen Partikeln. Soll nun das zu bearbeitende Objekt innerhalb der Prozesskammer gedreht werden, ohne dass eine

Antriebseinrichtung inwendig installiert wird, ist eine aufwändige Dichtung der Drehachse am Durchtrittspunkt durch die Kammerwand notwendig.

Durch den Einsatz von magnetgelagerten Antrieben werden solche störanfällige und niemals perfekte Dichtungen überflüssig. Der Rotor kann dank der kontaktlosen Lagerung von aussen durch die Prozesskammerwand in Schwebelage gehalten und auch gedreht werden. Sämtliche aktiven Komponenten von Lager und Antrieb (Spulen, Sensoren, Leistungselektronik) können ausserhalb der Kammer platziert werden.

Um eine kompakte Bauweise der Prozesskammer zu erreichen, ist der Einsatz von magnetgelagerten Scheibenläufermotoren besonders vorteilhaft, welche schon industriell in Pumpen und Mixern eingesetzt

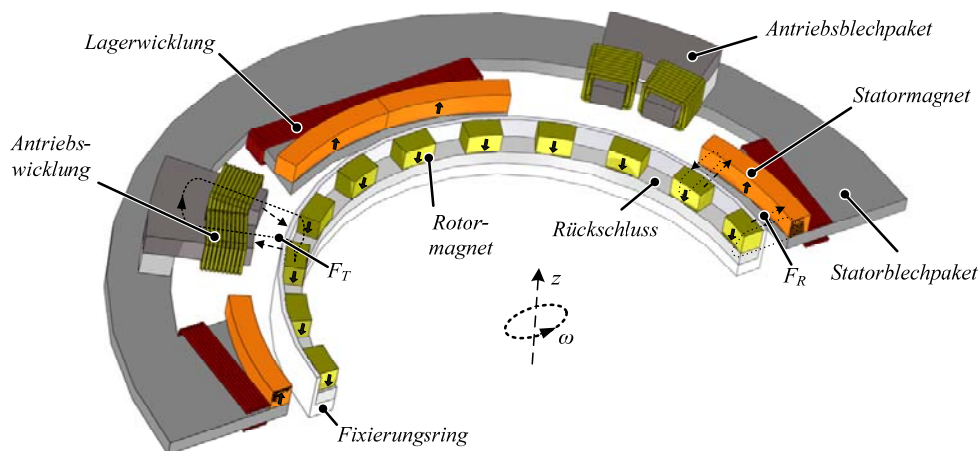


Bild 1 Schematisches Schnittbild mit den Komponenten des magnetgelagerten Scheibenläufermotors mit ringförmigem Rotor aus [2]. Die magnetischen Flüsse, die zur Bildung der radial gerichteten Lagerkraft F_R und der tangential gerichteten Antriebskraft F_T führen, sind punktiert eingetragen.

werden [1]. Für Rotoren grösserer Durchmesser eignet sich hier besonders der in [2] vorgestellte magnetgelagerte Scheibenläufermotor (siehe **Bild 1**) mit ringförmigem Rotor, da dessen unipolares Magnetlager einen vielpoligen Antrieb zulässt und einen Gleichlauf bei tiefen Drehzahlen sowie Stabilität bei hohen Drehzahlen garantiert. Um eine kompakte Bauform mit nur einer Lagerebene zu erreichen, werden die Rotormagnete einerseits zur magnetischen Vorspannung des Lagers und andererseits auch für den Antrieb (nach dem Prinzip einer permanentmagnet-erregten Synchronmaschine) eingesetzt.

Abhängig vom Einsatzzweck wird der Antrieb nur kurzzeitig zur Beschleunigung und Verzögerung des Rotors benutzt oder aber im Dauerbetrieb mit einem konstanten Drehmoment belastet. Neben der Antriebsauslegung ist bei magnetgelagerten Scheibenläufermotoren insbesondere auch das Verhalten der magnetischen Lagerung während der Belastung von Interesse. Damit der Motor nun unabhängig vom Einsatzumfeld charakterisiert und optimiert werden kann, ist ein Motorprüfstand unabdingbar.

Auf einem Prüfstand wird ein Motor durch eine Belastungsmaschine mit einem einstellbaren, konstanten Lastmoment gebremst, bzw. angetrieben. In konventionellen Prüfständen wird diese Belastungsmaschine drehbar gelagert (Pendelmaschine) und das Maschinengehäuse über einen definierten Hebelarm auf eine Kraftmessdose abgestützt. Die Bestimmung des Lastmoments ist aus der Messung der Abstützkraft (Reaktionsmoment) heraus möglich. Eine genaue Kenntnis des Wirkungsgrades der Belastungsmaschine ist nicht notwendig, da automatisch immer das effektiv auftretende Drehmoment angezeigt wird.

Damit das Magnetlager nicht beeinflusst wird, muss bei magnetgelagerten Antrieben die Bremswirkung berührungsfrei erfolgen. Als berührungsfreie Belastungsmaschine mit ausreichendem Bremsmoment bietet sich der Einsatz einer Wirbelstrombremse an. Im Gegensatz zu einer gewöhnlichen Belastungsmaschine gestattet die Wirbelstrombremse, sofern sie nicht zusätzlich durch einen weiteren Motor angetrieben wird, allerdings nur den Betrieb in zwei Quadranten, d.h. der Prüfling treibt an, die Belastungsmaschine bremst, und dies in beide Drehrichtungen. Ein Betrieb des Prüflings als Generator ist aber bei magnetgelagerten Antrieben auch nicht üblich.

In diesem Artikel soll stellvertretend für magnetgelagerte Scheibenläufermotoren ein Prüfstand für den Motor aus [2] dimensioniert und dessen Verhalten für verschiedene Lastfälle dargestellt werden.

Der Auslegung der Wirbelstrombremse unter Ausnutzung der schon für das Magnetlager vorhandenen Magnete wird besondere Beachtung geschenkt. Insbesondere sollen dem Leser aus den zahlreich vorhandenen Veröffentlichungen zum Thema Wirbelstrombremsen (z.B. [3]-[11]) einfache Formeln zur näherungsweise Dimensionierung der Bremse präsentiert werden.

2 Wirbelstrombremse

2.1 Ausführungsform

Wirbelstrombremsen können einerseits als Topfbremse mit einer topfförmigen Bremstrommel oder andererseits als Flachbremse mit einer ebenen Bremscheibe ausgeführt werden (vgl. **Bild 2**). Topfbremsen können grössere Belastungen aufnehmen, sind aber schwieriger in der Handhabung, da nur ein begrenzter Fluchtungsfehler zwischen Bremstrommel und Magnettopf auftreten darf. Ausserdem kann in der Regel bei Flachbremsen ein Wechsel des Prüflings schneller erfolgen als bei Topfbremsen, da keine axiale Zustellbewegung notwendig ist.

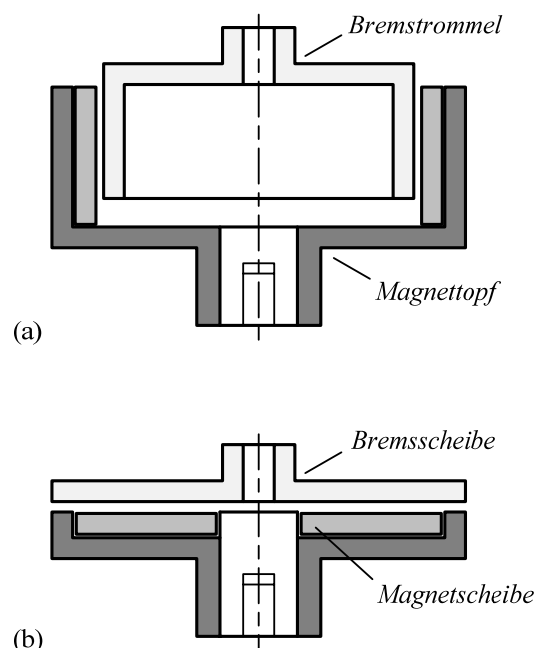


Bild 2 Bauformen rotierender Wirbelstrombremsen: (a) Topfbremse mit topfförmiger Bremstrommel und (b) Flachbremse mit ebener Bremscheibe [12].

Prinzipiell sind für lagerlose Motoren beide Ausführungsformen denkbar, für den magnetgelagerten Scheibenläufermotor aus [2] jedoch wird die Wirbelstrombremse vorteilhaft als Flachbremse ausgeführt. Wegen der begrenzten Platzverhältnisse im Luftspalt und um Antrieb und Lagerung nicht zu beeinflussen, kann hier keine Bremstrommel über den Rotor gestülpt werden. Auch ist ein Aufsetzen einer Bremstrommel bzw. eines Magnettopfes auf den Rotor nicht sinnvoll, da einer Verkippung des Rotors bei Scheibenläufermotoren nur mit einer passiven magnetischen Stabilisierung entgegengewirkt wird.

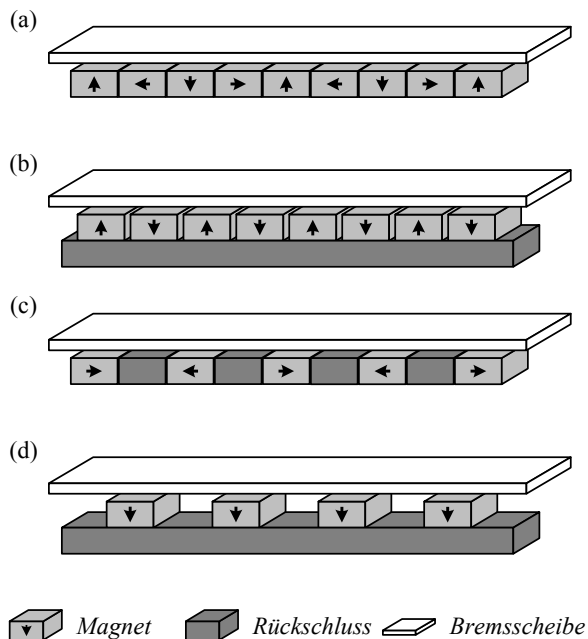


Bild 3 Topologien linearer Wirbelstrombremsen: (a) Halb-Magnetisierung, (b) vertikale Magnetisierung, (c) horizontale Magnetisierung und (d) Anordnung bei Verwendung des Rotors des Scheibenläufermotors als Erregung der Wirbelstrombremse.

Zur Erregung der Wirbelstrombremse können einerseits (Seltenerd-) Permanentmagnete oder Elektromagnete eingesetzt werden. Die Verwendung von Elektromagneten hat den Vorteil, dass das Bremsmoment bei gleichbleibendem Luftspalt stufenlos eingestellt werden kann. Bei Verwendung von Permanentmagneten kann das Bremsmoment hingegen nur durch Verändern des Luftspaltes variiert werden, dafür bedarf die Erregung keiner zusätzlichen Hilfsenergie.

Bild 3 zeigt verschiedene Anordnungen der Erregermagnete für eine Ausführung der Wirbelstrombremse als Flachbremse. Neben den in [6] genauer analysierten Anordnungen (a) – (c) ist insbesondere auch noch die in Bild 3(d) gezeigte Topologie interessant: Ein Vergleich mit Bild 1 zeigt, dass diese Anordnung von Magnete und Rückschluss gerade dem Aufbau des Rotors dieses Motors entspricht.

Bei der Wahl der geeigneten Anordnung der Erregermagnete ist bei der Anwendung im Bereich der magnetgelagerten Motoren insbesondere auch dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die zusätzlichen Komponenten der Wirbelstrombremse, insbesondere die Magnete und Eisenrückschlüsse, die vorhandenen magnetischen Kreise nicht zu stark beeinflussen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auch die Bild 3(a) aufgeführte Topologie mit der Halb-Magnetisierung interessant, da hier nur geringe magnetische Felder nach unten austreten.

Die Bremsplatte wird mit Vorteil aus nicht magnetisierbarem, aber elektrisch gut leitfähigem Material wie Aluminium oder Kupfer gefertigt. Bei der Verwendung von magnetisierbarem Material wird der Rotor durch die auftretenden magnetischen Kräfte angezogen und dadurch wird das Magnetlager belastet. Einen Beitrag zur Bremswirkung hingegen vermag die anziehende Kraft nicht zu leisten, da sie nicht in die Bewegungsrichtung zeigt.

2.2 Bremsmoment

Die Wirbelstrombremse hat die Eigenschaft, dass ihr Bremsmoment bei gleichbleibender Erregung und unveränderten geometrischen Abmessungen zunächst proportional mit der Drehzahl bzw. Geschwindigkeit steigt. Bei weiter gesteigerter Drehzahl erreicht das Bremsmoment bei der sog. kritischen Geschwindigkeit ein Maximum, das sog. kritische Bremsmoment, und nimmt dann für noch grössere Geschwindigkeiten wieder ab. Der Grund für dieses Verhalten liegt darin, dass das ursprüngliche Magnetfeld im Luftspalt bei kleinen Drehzahlen durch die Felder der auftretenden Wirbelströme kaum beeinflusst wird. Bei der kritischen Drehzahl jedoch ist das ursprüngliche Luftspaltfeld schon stark reduziert und nimmt dann zu höheren Drehzahlen hin noch weiter ab [4], [5], [8].

Aufgrund des geringen Bremsmoments bei kleinen Drehzahlen ist demnach die Wirbelstrombremse für Untersuchungen an langsam drehenden Motoren mit kleinen Rotordurchmessern nicht geeignet. Das Anfahrmoment wird auf dem Prüfstand übrigens statisch mit einer Kraftmessdose gemessen.

Für die Berechnung des Bremsmoments werden in der Literatur (z.B. [3], [9], [10]) Anordnungen mit jeweils nur einem Erregermagneten untersucht. Bei einer Anordnung mit p Erregermagneten folgt das Gesamtbremsmoment M_B zu

$$M_B = R \cdot p \cdot F_B, \quad (1)$$

wobei R den Abstand zwischen Erregermagnet und dem Drehpunkt der Kreisscheibe und F_B der Bremskraft eines einzelnen Erregermagneten bezeichnet.

Für niedrige Geschwindigkeiten lässt sich die Bremskraft gemäss [3] über die Verlustleistung, die in einem zylinderförmigen Teil der Bremsplatte über dem Erregerpol entsteht, berechnen:

$$F_B = \frac{\pi}{4\rho} D^2 \cdot d \cdot B_0^2 \cdot c \cdot v, \quad (2)$$

Gleichung (2) zeigt die Proportionalität zwischen Bremskraft und Geschwindigkeit. Für eine kreisförmige Wirbelstrombremse beträgt bei der Drehzahl n_R die Geschwindigkeit v unter dem Erregermagnet:

$$v = \omega \cdot r = 2\pi \frac{n_R}{60} \cdot R \quad (3)$$

Der Korrekturfaktor c in Gleichung (2) berücksichtigt den Einfluss einer nicht unendlich ausgedehnten Bremscheibe und des Widerstands im Rückwärtspfad des induzierten Wirbelstroms (vgl. [8]). Nach [9] folgt für eine kreisförmige Bremscheibe

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{1}{\left(1 + \frac{R}{A}\right)^2 \cdot \left(\frac{A-R}{D}\right)^2} \right] \quad (4)$$

mit den geometrischen Abmessungen nach **Bild 4(a)**. Bei einer unendlich ausgedehnten Bremscheibe ($A-R \gg D/2$) wird $c = 0.5$.

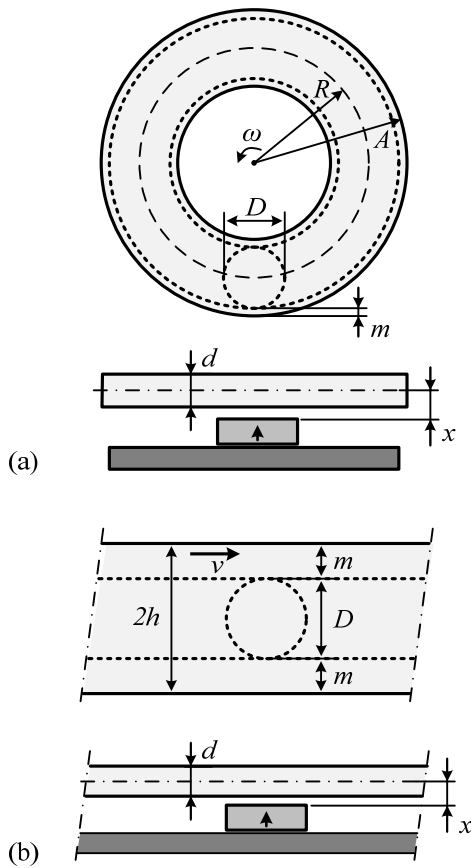


Bild 4 Bezeichnungen der geometrischen Abmessungen einer Wirbelstrombremse mit (a) kreisförmiger Bremscheibe und (b) streifenförmiger Bremschiene.

Wird anstelle einer kreisförmigen Bremscheibe eine streifenförmige Bremschiene nach Bild 4(b) eingesetzt, berechnet sich der Proportionalitätsfaktor c nach [10] zu:

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\pi^2}{24} \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Bei einer unendlich ausgedehnten Bremschiene ($2h \gg D$) gilt wiederum $c = 0.5$. Wird die Bremschiene doppelt so breit wie der Durchmesser D des Erregermagneten ausgeführt ($h = D$), wird $c = 0.45$ und somit schon knapp 90% der möglichen Bremskraft erreicht.

Der lineare Anstieg der Bremskraft gilt wie gesagt nur unter Vernachlässigung der Rückwirkung der Wirbelströme auf das ursprüngliche Luftspaltfeld. Dies ist aber nur deutlich unterhalb der kritischen Drehzahl zulässig. In [3] wird folgende Formel zur Berechnung der Bremskraft F_B hergeleitet, die auch für Geschwindigkeiten v oberhalb der kritischen Geschwindigkeit v_K gilt:

$$F_B(v) = F_{B,K} \cdot \frac{2}{\frac{v_K + v}{v} + \frac{v}{v_K}} \quad (6)$$

mit der kritischen Bremskraft

$$F_{B,K} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \sqrt{c} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot B_0^2 \cdot \sqrt{\frac{2x}{D}}, \quad (7)$$

und der kritischen Geschwindigkeit

$$v_K = \frac{2}{\mu_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{c}} \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \sqrt{\frac{2x}{D}}. \quad (8)$$

Mit Kenntnis dieses Kraftverlaufs kann nun mit Hilfe von (1) auch der Verlauf des Bremsmoments bestimmt werden. **Bild 5** zeigt den berechneten Verlauf des Bremsmoments für die im nächsten Abschnitt dimensionierte Wirbelstrombremse. Es ist ersichtlich, dass die vereinfachte Formel nach (2) nur im untersten Drehzahlbereich bis 400 U/min ähnliche Werte wie (6) ergibt.

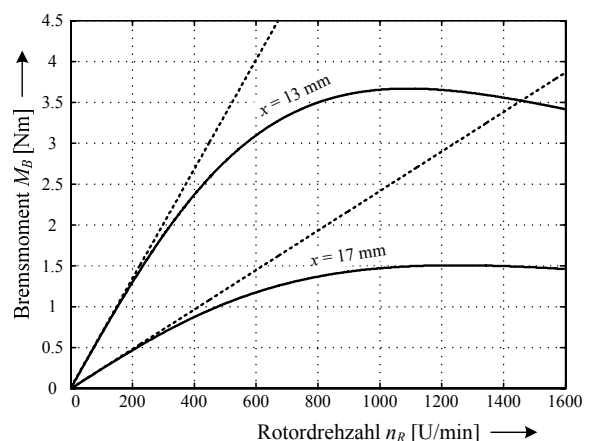


Bild 5 Berechnetes Bremsmoment M_B der Wirbelstrombremse nach Abschnitt 3. Die vereinfachte Formel (2) zur Berechnung von M_B für tiefe Drehzahlen (gestrichelte Linie) liefert nur im untersten Drehzahlbereich brauchbare Werte.

3 Aufbau des Prüfstands und Messergebnisse

In der Folge werden die vorangehenden Ausführungen beispielhaft an einem Prüfstand für den magnetgelagerten Scheibenläufermotor nach Bild 1 verifiziert. Als Erregung der Wirbelstrombremse werden die bereits vorhandenen Permanentmagnete des Rotors verwendet, was der Topologie gemäss Bild 3 (d) entspricht. Dadurch wird die magnetische Lagerung durch die Bremsvorrichtung nur minimal beeinflusst.

Damit die Bremscheibe, ohne mit den Antriebsblechpaketen zu kollidieren, möglichst nah an den Rotor geführt und dadurch ein grosses Bremsmoment erzeugt werden kann, wird der Aussendurchmesser A der Bremscheibe nur wenig grösser als der Rotordurchmesser gewählt (vgl. **Tabelle 1**). Entsprechend dem schon recht grossen Scheibendurchmesser liefern beide Berechnungsgleichungen für den Korrekturfaktor c annähernd die gleichen Werte. Nach Gleichung (4) folgt für eine runde Bremschiene $c = 0.41$ und nach (5) für eine äquivalente gerade Bremschiene $c = 0.36$.

Da bei der gewählten Anordnung die Flussdichte B_0 im Luftspalt nicht konstant ist, wird für B_0 der quadratische Mittelwert der innerhalb der Bremscheibe auftretenden Flussdichte eingesetzt. Insbesondere bei kleinen Luftspalten entsprechen die tatsächlich erreichbaren Bremsmomente gut den mit (6) berechneten (siehe **Bild 6**).

Der mögliche Arbeitsbereich einer Maschine wird durch das maximale Antriebsmoment, die maximale Leistung und die maximale Drehzahl begrenzt. Daher muss die Wirbelstrombremse so dimensioniert werden, dass durch Variation des Abstandes zwischen Bremscheibe und Rotor alle Punkte des Arbeitsbereichs des Prüflings angefahren werden können.

In **Bild 7** sind die mit dem Prüfstand gemessenen Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien in Abhängigkeit vom Antriebsstrom dargestellt. Die Werte des Anlauf-

Dicke der Bremscheibe d	10 mm
Aussenradius der Bremscheibe A	207 mm
Mittlerer Ringradius R	194 mm
Breite einer äquivalenten Bremschiene $2h$	26 mm
Polpaarzahl p	22
Spezifischer Widerstand ρ_{Alu} (70°C)	$3.4 \cdot 10^{-8} \Omega m$
Durchmesser der Erregermagnete D	21.5 mm
Proportionalitätsfaktor c	0.41
Luftspaltinduktion B_0 ($v = 0, x = 13$ mm)	101 mT
Kritische Bremskraft $F_{B,K}$ ($x = 13$ mm)	3.7 Nm
Kritische Drehzahl ($x = 13$ mm) v_K	1093 U/min

Tabelle 1 Eckdaten der Wirbelstrombremse.

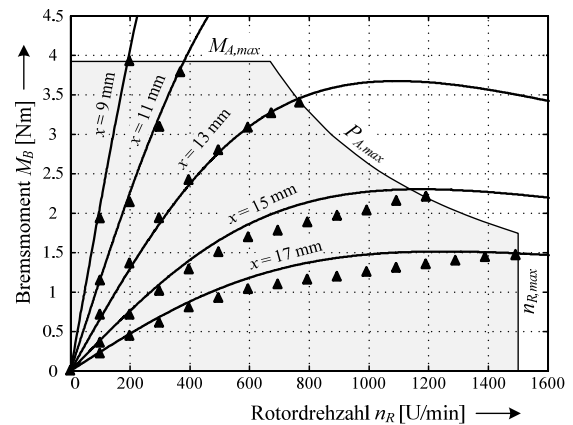


Bild 6 Gemessenes Bremsmoment M_B der Wirbelstrombremse in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl n_R und dem Abstand x zwischen Bremscheibe und Rotor. Durch Variation von x können alle möglichen Betriebspunkte des Prüflings angefahren werden. Die Messpunkte sind den analytischen Berechnungen nach (6) – (8) gegenübergestellt.

moments sind statisch mit einer Federwaage bestimmt worden. Demnach weist der Prüfling bei Antriebsströmen im Bereich von 0 A bis 10 A Effektivwert pro Phase eine Drehmomentkonstante von $k_M = 0.375$ Nm/A auf. Bei höheren Strömen treten erste Sättigungserscheinungen in den Antriebsklauen auf, was zu einer Verringerung von k_M führt.

Bild 8 zeigt den realisierten Drehmomentprüfstand mit der drehbar gelagerten Wirbelstrombremse und dem Kraftsensor für die Drehmomentmessung. Zur Erhöhung der Sensitivität (nicht aber des Messbereichs!) kann ein weiterer Kraftsensor auf dem Anschlagpunkt auf dem Rotor angebracht werden.

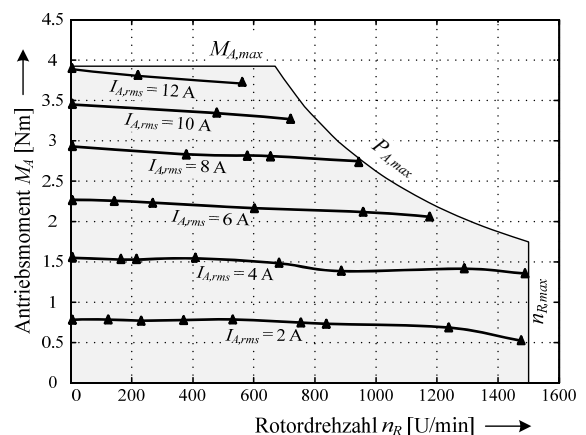


Bild 7 Auf dem Prüfstand gemessene Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie des magnetgelagerten Motors in Abhängigkeit des Antriebsstroms (Effektivwert pro Phase).

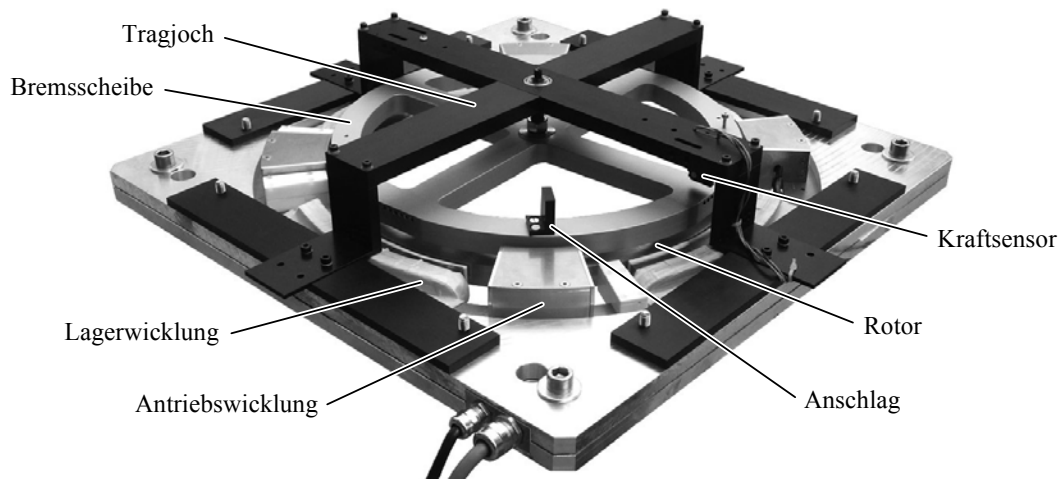


Bild 8 Drehmomentprüfstand für einen magnetgelagerten Scheibenläufermotor. Die Bremsscheibe der Wirbelstrombremse ist mit Hilfe eines Tragjochs über dem Rotor drehbar gelagert. Während der Belastung wird das Antriebsmoment auf die Bremsscheibe und weiter über den Anschlag auf den Kraftsensor übertragen.

4 Zusammenfassung

Auch bei magnetgelagerten Antriebssystemen besteht das Bedürfnis, einen Motor unabhängig vom Einsatzumfeld charakterisieren und optimieren zu können. Bei der Konstruktion eines dafür geeigneten Motorprüfstandes sind magnetlagerspezifische Randbedingungen zu berücksichtigen. So darf beispielsweise die magnetische Lagerung durch ein beaufschlagtes Bremsmoment nicht beeinflusst werden, was praktisch nur mit einer berührungslosen Belastungsmaschine möglich ist. Ausserdem sollten keine zusätzlichen Komponenten des Prüfstandes das Rotorgewicht oder die magnetischen Feldflüsse im Motor beeinflussen.

In diesem Artikel wurde stellvertretend für magnetgelagerte Scheibenläufermotoren ein Prüfstand für einen kompakten Scheibenläufermotor mit ringförmigem Rotor dimensioniert und das Verhalten des Motors für verschiedene Lastfälle dargestellt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Auslegung einer dazu notwendigen Wirbelstrombremse als Belastungsmaschine gelegt. Dabei wurden dem Leser einfache Formeln zur Abschätzung des Bremsvermögens präsentiert und aufgezeigt, wie die bereits vorhandenen Komponenten des Lagers auch für die Konstruktion der Wirbelstrombremse verwendet werden können.

5 Literatur

- [1] www.levitronix.com
- [2] Schneeberger, T.; Kolar, J.W.: Novel Integrated Bearingless Hollow-Shaft Drive. Proceedings of the IEEE Industry Applications Conference 2006. Vol. 1, Oct. 2006, pp. 70-75
- [3] Wouterse, J. H.: Critical Torque of Eddy Current Brake with Widely Separated Soft Iron Poles. Proceedings of IEE Electric Power Applications. Vol. 138, Part B, No. 4, 1991, pp. 153-158
- [4] Zimmermann, W.: Rechnung und Versuch bei der scheibenförmigen Wirbelstrombremse. Archiv für Elektrotechnik. 10. B., 1921, S. 133-156
- [5] Edwards, J.D.; Jayawant, B.V.; Dawson, W.R.C.; Wright, D.T.: Permanent-Magnet Linear Eddy-Current Brake with a Nonmagnetic Reaction Plate. Proceedings of IEE Electric Power Applications. Vol. 146, No. 6, Nov. 1999, pp.627-631
- [6] Jang, S.M.; Lee, S.H.: Comparison of three types of permanent magnet linear eddy-current brakes according to magnetization pattern. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 5, Sept. 2003, pp. 3004-3006
- [7] Lee, K.; Park, K.: Analysis of an Eddy-Current Brake Considering Finite Radius and Induced Magnetic Flux. Journal of Applied Physics. Vol. 92, No. 9, Nov. 2002, pp. 5532-5538
- [8] Smythe, W.R.: On Eddy Currents in a Rotating Disk. Transactions AIEE. Vol. 61, Sept. 1942, pp. 681-684
- [9] Schieber, D.: Braking Torque on Rotating Sheet in Stationary Magnetic Field. Proceedings IEE. Vol. 121, Feb. 1974, pp. 117-122
- [10] Schieber, D.: Unipolar Induction Braking of Thin Metal Sheets. Proceedings IEE. Vol. 119, Oct. 1972, pp. 1499-1503
- [11] Canova, A.; Vusini, B.: Design of Axial Eddy-Current Couplers. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 39, No.3, May/June 2003, pp. 725-733
- [12] Drehmoment-Drehzahl-Messsysteme. MODIA Mess- und Datentechnik GmbH, Neckargemünd