

Anwendungsbeispiele und Erfahrungen beim Einsatz magnetischer Lager

M. Paditz, A. Nickel, N. Hübner

Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik EAAT GmbH Chemnitz

Annaberger Str. 231

09120 Chemnitz, Germany

Tel.: +49371 530 1911, Fax: +49371 530 1913

Email: m.paditz@eaat.de

a.nickel@eaat.de

n.huebner@eaat.de

Kurzfassung

Seit mehr als 20 Jahren werden bei EAAT magnetische Lager und magnetgelagerte Antriebe, individuell angepasst an die Kundenanforderungen, entwickelt und gebaut. Zum Einsatz kamen diese Lager in zahlreichen Gebieten z. B. in der Kernforschung, der Medizintechnik, Textiltechnik und in Bearbeitungsmaschinen zum Fräsen und Bohren. Weiterhin finden Magnetlager Anwendung in der Prüftechnik z. B. zur Prüfung von Gleit- und Wälzlager oder in der Materialprüftechnik. Auch für verschiedene Schwungrad- und Drallradanwendungen wurden bei EAAT schon Magnetlager entwickelt.

In diesem Beitrag sollen einige Anwendungsbeispiele für magnetische Lager vorgestellt sowie auf Erkenntnisse und Erfahrungen beim Einsatz solcher Lager eingegangen werden.

1 Einleitung

Magnetische Lager sind verschleißfrei, reibungsfrei und schmiermittelfrei. Sie eignen sich daher für den Einsatz bei höchsten Drehzahlen, wenn keine geeigneten Wälz- oder Gleitlagerlösungen mehr zur Verfügung stehen. EAAT hat z. B. Antriebe für Turboladerprüfstände mit Drehzahlen bis zu 140.000 U/min entwickelt und geliefert.

Auch für den Betrieb im Vakuum oder in Reinraumanwendungen sind Magnetlager aufgrund der Schmiermittelfreiheit prädestiniert. Magnetlagersysteme von EAAT werden z. B. in der Kernforschung in Choppern für Neutronenstrahlen oder für verschiedene Schwungradanwendungen eingesetzt.

2 Magnetisch gelagerte Durchlaufzentrifuge

Gemeinsam mit dem Institut für mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik des KIT (Karlsruher Institut für Technologie) und Ceba (Carl Padberg Zentrifugenbau GmbH) wurde bei EAAT der Prototyp einer magnetisch gelagerten, kontinuierlich arbeitenden Röhrenzentrifuge entwickelt und aufgebaut.

Bei kontinuierlich arbeitenden Röhrenzentrifugen wird ständig die zu separierende Flüssigkeit zugeführt. Die abgeschiedenen Partikel setzen sich im Inneren des Rotors ab und die geklärte Flüssigkeit (Zentrat) verlässt den Zylinder am anderen Ende wieder.

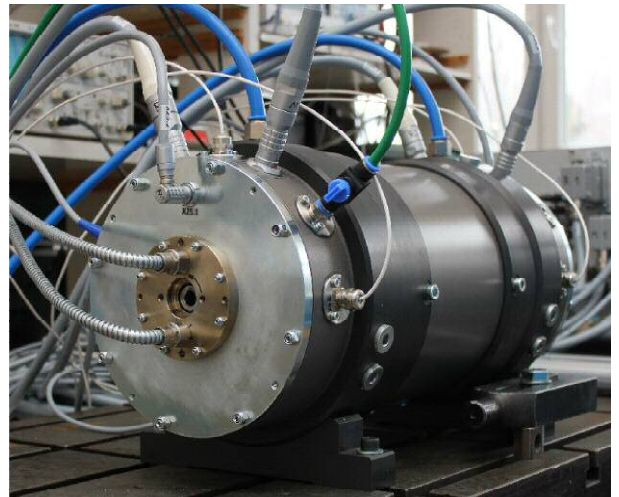


Fig. 1: Magnetisch gelagerte Röhrenzentrifuge

Ziel der Entwicklung war es, die Drehzahl und damit auch die Schleuderrate (Beschleunigung als Vielfaches der Erdbeschleunigung g) zu erhöhen. Somit können selbst schwer absehbare Partikel mit geringen Dichteunterschieden separiert werden.

Durch das große Abscheidevolumen von 0,4 l wird eine wirtschaftliche, im industriellen

Rahmen erfolgende, Gewinnung von Nanopartikeln ermöglicht. Durch eine größere Rotorlänge, im Vergleich zu bisher verfügbaren Zentrifugenlösungen, erhöht sich außerdem die Verweilzeit der Partikel im Rotor und es kommt zu einem besseren Trenngrad und geringerem Produktverlust.

Parameter	
Max. Drehzahl	68.000 U/min
Schleuderziffer	118.900 g
Abscheidevolumen	400 cm ³
Durchlauf	60 l/min

Tab. 1: Technische Daten der magn. gelagerten Röhrenzentrifuge

2.1 Helium für eine geringere Erwärmung des Rotors

Um möglichst viel Partikel/Feststoff im Rotor abscheiden zu können ist ein entsprechend langer Rotor notwendig. Dies hat allerdings auch eine größere Rotoroberfläche zur Folge. Die große Rotoroberfläche in Verbindung mit der hohen Rotationsgeschwindigkeit von bis zu 68.000 U/min (Umfangsgeschwindigkeit $v_u=280$ m/s) führt zu enorm hohen Luftreibungsverlusten an der Rotoroberfläche. Über die in den Rotor zugeführte Flüssigkeit kann nur ein geringer Anteil der Wärme abgeführt werden, da sich im Inneren des Rotors noch eine Kunststoffkartusche befindet, welche ein schnelles Entleeren der Röhrenzentrifuge ermöglichen soll. Zudem wird der Übergangswiderstand mit zunehmender abgeschiedener Feststoffmenge immer schlechter. Daher musste eine Methode zur Reduzierung der Verluste und zur besseren Wärmeabgabe ermittelt werden.

Helium hat unter den Gasen die zweitgrößte thermische Leitfähigkeit (ca. achtmal höher als die der Luft). Durch den Austausch der Luft im Luftspalt mit Helium kann somit die Wärmeabgabe vom Rotor zum Stator deutlich verbessert werden.

Ein leichter Überdruck im Gehäuse verhindert dabei die Kontaminierung des Heliums im Inneren des Gehäuses mit der Außenluft.

Parameter (25°C)	Luft	Helium
Dynamische Viskosität [Pa·s]	18,6	19,6
Universelle Gaskonstante RS [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	287	2077
Dichte [kg/m ³]	1,168	0,1673
Spez. Wärmeleitfähigkeit λ [W·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,026	0,154

Tab. 2: Vergleich der physikalischen Eigenschaften von Luft und Helium

Durch den Austausch der Luft im Gehäuseinneren mit Helium lassen sich aber auch die Reibungsverluste beachtlich senken.

In einem Versuch an einem magnetisch gelagerten Schwungradsystem mit einem vakuumdichten Gehäuse konnte der Einfluss des den Rotor umgebenden Mediums gezeigt werden. Es wurden mit dem Schwungradsystem Auslaufversuche im Vakuum, in Luft und in Ballongas (mind. 90% Helium) durchgeführt.

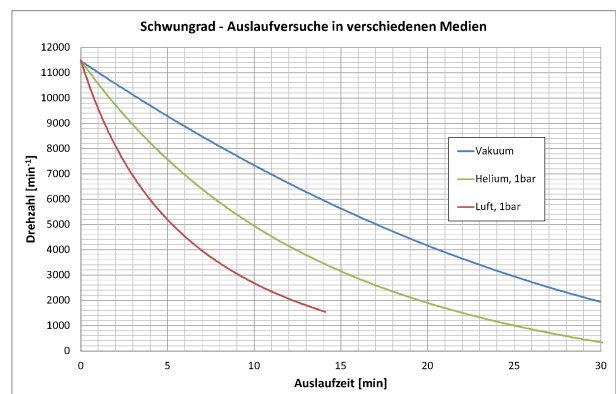


Fig. 2: Auslaufversuch an einem Schwungrad in verschiedenen Medien

Auf diese Weise konnte abgeschätzt werden, um wieviel geringer die „Luftreibungsverluste“ in Helium im Vergleich zur Luft ausfallen. Mit dem Referenzwert im Vakuum können die sonstigen Verluste wie z. B. Wirbelstromverluste bestimmt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Rotorgeometrie zwischen dem Schwungrad und der Zentrifuge lassen sich die Ergebnisse jedoch nicht eins zu eins aufeinander übertragen.

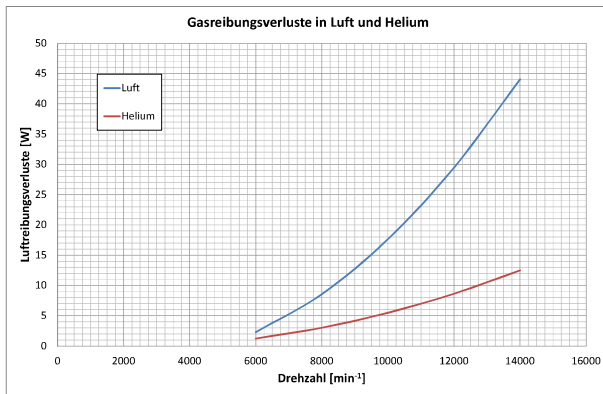


Fig. 3: Gasreibungsverluste an einem Schwungrad

Infolge der hohen Fluchtgeschwindigkeit entsteht beim Auftreffen des Zentrates in der Auffangtasche ein feiner Wassernebel. Hierbei kommt ein weiterer Vorteil von Helium zum Tragen, es dient gleichzeitig als „Sperrluft“ und verhindert, dass sich Wasser im Luftspalt ansammelt.

2.2 Korrektur eines Gefügefehlers in der Messspur

Aufgrund eines Absturzes und thermischer Schädigung der Permanentmagnete auf dem Rotor musste der Rotor zum Teil neu aufgebaut werden. Dazu mussten jedoch die beiden Axiallagerscheiben, welche auf den Rotor aufgeschraubt waren, wieder entfernt werden. Durch einen leichtsinnigen Einsatz eines Schweißbrenners bei der Demontage wurde vom Fertiger allerdings sehr viel Wärme in den Rotor eingebracht, was zu Materialgefügeveränderungen im Bereich der Mess-Spur führte.

Die Wirbelstromsensoren, die zur Lageerfassung eingesetzt wurden, zeigten daher einen Rundlauffehler von ca. 0,1mm an, obwohl mit einer Messuhr nahezu keine Rundlaufabweichung festzustellen war.

Im Betrieb wird diese scheinbare Regelabweichung versucht vom Regler auszugleichen. Das führt zu erhöhten Lagerströmen, höheren Verlusten und das Magnetlager weist einen deutlich höheren Geräuschpegel auf.

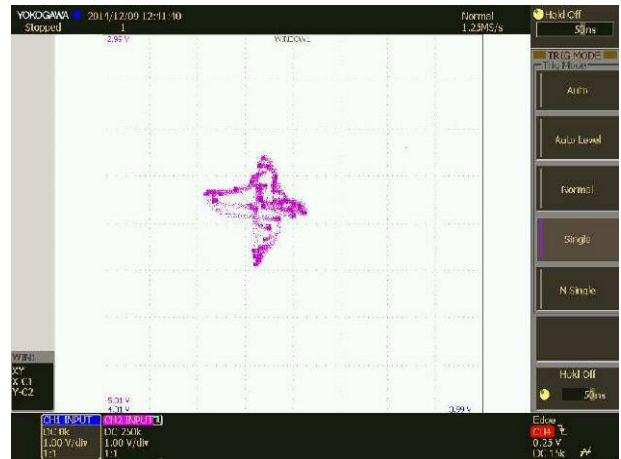


Fig. 4: Lagesignal (X-Y-Darstellung) vom Wirbelstromsensor

Das Bedenkliche ist, dass es aufgrund des D-Anteils des Lagereglers bei höheren Drehzahlen zum Erreichen der Stromgrenze kommt und eine stabile Regelung nicht mehr möglich ist. Dies führte letztendlich zum Absturz der Welle.

Um dennoch einen stabilen Betrieb zu gewährleisten muss daher der Messwert um den Lagefehler korrigiert werden.

Aufgrund der enormen Rechengeschwindigkeit des FPGA ist neben der Berechnung der Regelgrößen eine Aufzeichnung des Lagemesssignals mit 470 kHz möglich.

Hierzu wird in Verbindung mit einem absoluten Drehwinkelsignal während eines Umlaufs das Lagesignal in X- und Y-Richtung in einem Ringspeicher geschrieben.

Bei einer Drehzahl von beispielsweise 60.000 U/min ist es noch möglich, die Messspur mit ca. 470 Messpunkten abzubilden.

Beim nächsten Umlauf werden die über mehrere Drehvorgänge gemittelten Werte vom aktuellen Lagemesswert abgezogen und das Resultat an den Lageregler weitergegeben. Dadurch können neben dem Unwuchtkreis sogar komplexere Formen aus dem Lagesignal gefiltert werden. Durch die Regelung auf den Wellenschwerpunkt verringern sich entscheidend die Stromaufnahme und auch die Geräuschbildung.

3 Umlaufbiegeprüfstand mit Magnetlagern

Zur Untersuchung von Welle-Nabe-Verbindungen wurde gemeinsam mit dem Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik (IKAT) der TU-Chemnitz ein Umlaufbiegeprüfstand entwickelt und aufgebaut.

Bei klassischen Umlaufbiegeprüfständen wird die Biegung entweder mechanisch über ein Wälzlager auf den Prüfling übertragen oder durch eine Unwucht erzeugt. Dabei ist die umlaufende Kraft, die auf die Probe wirkt, in alle Richtungen gleich groß. Bei Prüfständen, die mit einer Unwucht arbeiten, besteht zudem noch eine Abhängigkeit zwischen der Frequenz und der Kraft.

Bei dem Umlaufbiegeprüfstand mit Magnetlagern sind im Gegensatz dazu nahezu beliebige Biegeformen innerhalb des Fanglagerspiels möglich, d. h. man ist nicht auf kreisrunde Umlaufbiegevorgänge beschränkt. Die Amplitude und die Frequenz können zusätzlich während eines Prüfvorgangs variiert werden.

Beim Umlaufbiegeprüfstand werden die Magnetlager nicht zur Lagerung einer Welle, sondern zum Verbiegen eines Prüflings verwendet.

Der Prüfstand besteht aus zwei identisch aufgebauten Teilwellen, welche jeweils auf einer Seite mechanisch gelagert sind. Zwischen den beiden Teilwellen wird der Prüfling eingespannt.

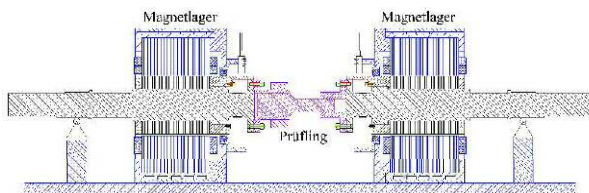


Fig. 5: Schnittdarstellung Umlaufbiegeprüfstand

Auf den beiden Wellen befindet sich jeweils ein Blechpaket, über welches mit einem Magnetlager eine Kraft auf die Welle ausgeübt werden kann. Sind die beiden Wellen mit dem Prüfling verbunden, kann mittels der beiden Magnetlager eine Biegung des Prüflings (z. B. eine Welle-Nabe-Verbindung) durchgeführt werden.



Fig. 6: Umlaufbiegeprüfstand mit Magnetlagern als Aktuator

Parameter	
Lagerkraft	8000 N
Luftspalt	3,5 mm
Max. Auslenkung (Fanglagerspalt)	±2,7 mm
Max. Biegefrequenz	30 Hz

Tab. 3: Techn. Daten Umlaufbiegeprüfstand

Mit Hilfe von Dehnmessstreifen (DMS) auf den beiden Teilwellen kann die Biegespannung, die im Prüfling vorliegt, ermittelt werden. Die Regelung der im Prüfling auftretenden Biegespannung erfolgt auf einem FPGA-basierten CompactRIO-System von National Instruments. Als Eingangsgrößen dienen die Messwerte der DMS auf den beiden Teilwellen. Aus diesen Messwerten wird die Biegespannung im Prüfling berechnet. Der PID-Regler ermittelt anschließend die Stromsollwerte für beide Magnetlager und übergibt diese an die Magnetlagerleistungselektronik.

Zusätzlich zu den Dehnmessstreifen sind auch Abstandssensoren im Prüfstand verbaut. Diese detektieren eine Auslenkung über den zulässigen Bereich hinaus, was wiederum zur Abschaltung des Systems führt, z. B. beim Bruch der Probe.

Die Vorgabe des Belastungsprofils erfolgt an einem PC über eine LabVIEW-Oberfläche.



Fig. 7: LabVIEW-Oberfläche zum Programmieren des Belastungsprofils und zur Datenaufzeichnung

Über diese Oberfläche können sowohl die Belastungsprofile erstellt und geladen, als auch die Regler parametrisiert und Daten, wie z.B. Schwingweg und Biegespannungen, aufgezeichnet und dargestellt werden.

4 Magnetisch gelagerter Zwirning

In einem Projekt, welches gemeinsam mit dem Cetex Institut für Textil- und Verarbeitungsmaschinen gGmbH bearbeitet wurde, bestand u. a. die Aufgabe, einen Zwirring magnetisch zu lagern.

Eine Welle wird üblicherweise mit zwei Radiallagern und einem Axiallager gelagert. Das Axiallager positioniert die Welle in axialer Richtung (ein Freiheitsgrad z), während die Radiallager die Welle in radialer Richtung führen (zwei Freiheitsgrade x, y) und ein Kippen der Welle (Rotation um x und y = zwei Freiheitsgrade) verhindern.

Bei der Lagerung eines Ringes wird nur ein Radiallager verwendet. Das Verkippen (Rotation um X - oder Y -Achse) muss nun vom Axiallager verhindert werden.

Mit einem klassischen aktiven magnetischen Axiallager in einer Ausführung als Topfmagnet ist das nicht möglich. Vielmehr sind für eine aktive Lagerung mindestens drei unabhängig ansteuerbare Elektromagnetanordnungen notwendig.

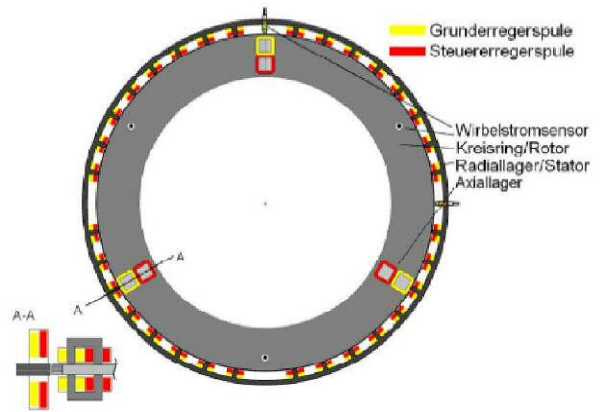


Fig. 8: Magnetische Lagerung eines Ringes mit aktivem Axiallager

Der Nachteil einer aktiven axialen Lagerung wie in Fig.7 dargestellt, ist eine höhere Masse des Rotors, da dieser zu großen Teilen aus Stahl hergestellt werden muss. Außerdem treten im Bereich der Kraftangriffspunkte (Lagerstellen) hohe Wirbelstromverluste auf. Bei hohen Drehzahlen kann aufgrund der Feldverdrängung die Lagerkraft abnehmen.

Die Aufgabe der axialen Lagerung wurde deshalb mit einer passiven Magnetlagerung gelöst. Dazu wurde im Gehäuse jeweils oberhalb und unterhalb des zu lagernden Ringes ein Band aus Permanentmagnetsegment angebracht. Diese bilden zusammen je einen Magnetring.

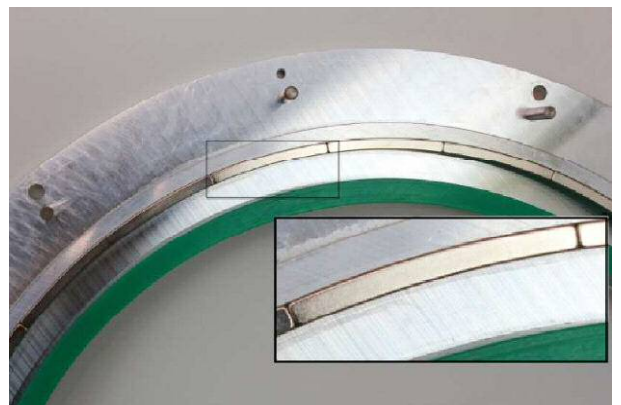


Fig. 9: Permanentmagnete im Stator (Axiallagerung)

Der zu lagernde Ring wurde auf seiner Ober- und Unterseite mit jeweils drei um 120° versetzt angeordneten Permanentmagnetsegmenten versehen (Fig. 10). Die Segmente auf der Unterseite sind dabei etwas größer als die auf

der Oberseite, da diese die Gewichtskraft des Zwirnringes aufnehmen müssen.

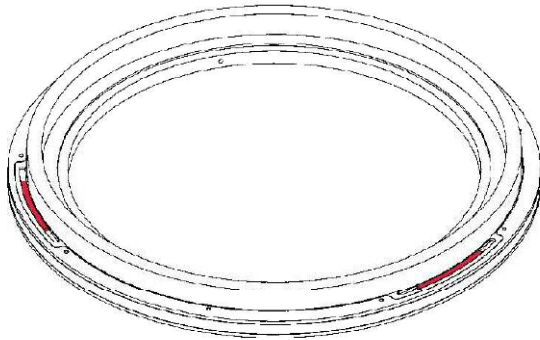


Fig. 10: Permanentmagnetsegmente im Rotor

Parameter	
Max. Drehzahl	3.000 U/min
Axiale Lagersteifigkeit	100 N/mm
Radiallagerkraft	ca. 200 N
Rotordurchmesser	535 mm

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde anhand von drei Anwendungsbeispielen gezeigt, dass magnetische Lager und magnetisch gelagerte Systeme in verschiedensten Anwendungen und Bereichen eingesetzt werden. Entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen unterscheiden sich die Magnetlager in Bauform und -größe oder auch im Lagerprinzip. So können Wellen in allen fünf Achsen aktiv magnetisch gelagert

werden oder es wird eine Kombination aus aktiven und passiven Lagern verwendet. Auch unterschiedliche Anordnungen der Lager sind möglich z. B. Homopolarlager oder Heteropolarlager, Innenläufer oder Außenläufer, Anzahl der Magnetpole usw. Bei manchen Magnetlagern kommt man mit einer passiven Luftkühlung (natürliche Konvektion) aus, andere müssen intensiv mit Wasser gekühlt werden.

Quellen

- [1] Sachbericht KF2395903W00 Magnetgelagerte Röhrenzentrifuge, EAAT, 2013
- [2] Weidenmüller, F.; Lehmann, R.: „Digitale Magnetlagerregelung – Mathematische Grundlagen, Aufbau des digitalen Reglers und praktische Erfahrungen“, 8. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz, Zittau 2011
- [3] VDI-Wärmeatlas, Springer Verlag, 1997
- [4] Sachsenweger, E., „Magnetische Lagerung eines scheibenförmigen ferromagnetischen Läufers“, Diplomarbeit Hochschule Mittweida, 2010
- [5] Paditz M., Budig P.-K., Heinrich H.-J.: „Entwicklung eines magnetisch gelagerten Zwirnrings“, 13. Chemnitzer Textiltechniktagung, Chemnitz 2012