

BETRACHTUNGEN ZUR THEORIE UND ANWENDUNG MAGNETISCHER LAGER

Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. Peter- Klaus Budig

EAAT GmbH Chemnitz,
Annaberger Str. 231, D – 09120 Chemnitz

Abstrakt

Es wird eine Einführung in einige theoretische Grundlagen magnetischer Lager gegeben wie: Verluste, Dynamisches Betriebsverhalten, Ausführungsformen magnetischer Lager. Einige Anwendungen werden beschrieben, wie: Drehmomenten Messgerät für 140000 min^{-1} , Ventilator Teststand, Kühlwasserpumpe in einem Kraftwerk, Lager für extrem große Lagerkräfte im Bereich der Lagerkräfte von 16000 bis 50000 Newton, Schwungradspeicher im Hochvakuum mit 45000 min^{-1} mit permanentmagnetischen Radiallagern.

Stichwort – Magnetlager.

1 Einführung

Es zeichnet sich eine Tendenz ab im Maschinenbau immer höhere Drehzahlen anzuwenden. Damit werden die klassischen Drehzahlen der Drehstrommaschinen von 3000 bzw. 3600 min^{-1} verlassen zu Gunsten höherer Werte bei gleichzeitiger Einsparung mechanischer Getriebe. Das trifft z.B. auf solche Antriebe zu, wie: Kühlwasserpumpen, Ventilatoren, Verdichter, Schwungradspeicher, Drehmomenten-Prüfstände.

Darüber hinaus bedeutet höhere Drehzahl von Gleit- oder Wälzlager die Vergrößerung der Lagerverluste. Das reduziert die Lagerlebensdauer deutlich.

Die Anwendung von Luftlagern erfordert sehr kleine Lagerluftspalten im Bereich von Mikrometern. Hier treten erhebliche Schwierigkeiten bei der Einhaltung der Fertigungsgenauigkeiten auf.

Statische oder Dynamische Öldruckpresslager bedingen höhere Lagerverluste wodurch der Wirkungsgrad des Antriebes verringert wird. Magnetlagern haben den Vorteil geringerer Verluste zu haben und die Möglichkeit der Regelung des statischen dynamischen Betriebsverhaltens der rotierenden Systems. Darüber hinaus kann die kritische Motordrehzahl

zur Beeinflussung der Resonanz verwendet werden. Magnetlager sind bekannt als Lösungen für die Aufhängung der Wellen mit elektromagnetischen oder permanentmagnetischen Systemen. Diese Lager sollen radiale und axiale Kräfte auf die Welle ausüben.

2 Elektromagnetische Lager

2.1 Prinzip der elektromagnetischen Lager

Prinzip des elektromagnetischen Lagers zeigt Abb. 1.

Durch die mit Gleichstrom erregte Spule entsteht eine Anziehungskraft zwischen der Spule, ihrem Eisenkern und der Welle. Es gibt zwei Zustände:

- Die Welle ist zu nahe am erregten Eisenkern es entsteht eine Anziehungskraft.
- Abstand zwischen Welle und Eisenkern ist zu groß und die Welle fällt herunter. Das System ist instabil.

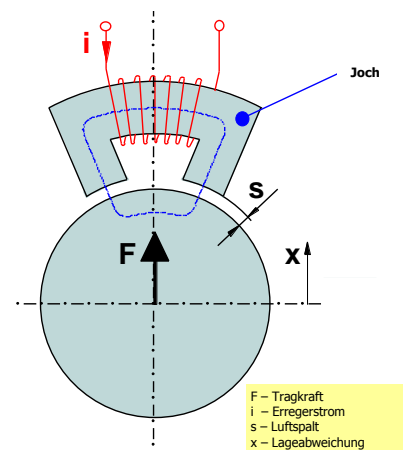


Abb. 1: Tragkraft eines Magnetlagers

Um Stabilität zu erreichen ist es erforderlich einen Beobachter zu verwenden, der den Luftspalt s misst und in Abhängigkeit davon den Erregerstrom regelt (Abb. 2.)

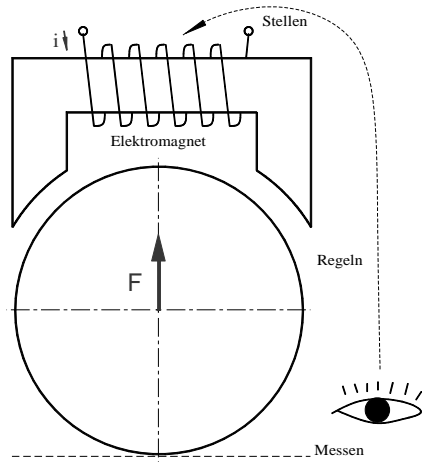


Abb. 2: Geregelt magnetische Aufhängung

Es liegt nun ein geregeltes System vor. Das Gesamtsystem einer Magnetlagerachse zeigt Abb. 3. Die Anordnung aller Spulen in einer Achse zeigt Abb. 4.

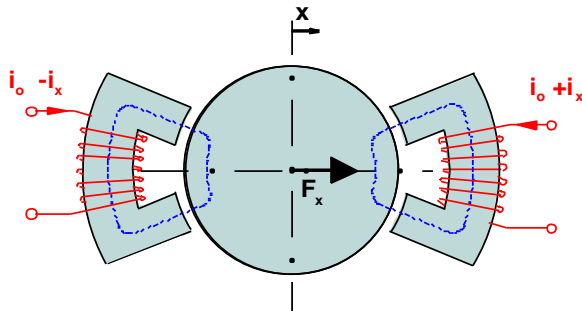


Abb. 3: Magnetlager in der x- Achse

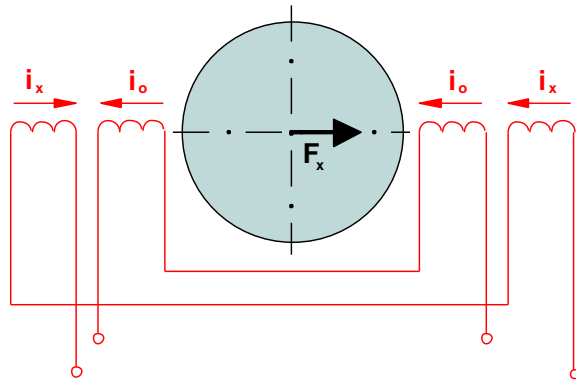


Abb. 4: Magnetlager mit Grund- und Steuerwicklung / Steuerstrom

Die Anziehungskraft ist mit (1) gegeben:

$$F = 1/2\mu_0 \cdot A \cdot B^2 \quad (1)$$

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \text{ Vs/Am}$
 B - Induktion
 A - ferromagnetische Oberfläche

Die Tragkraft des Magnetlagers hängt sowohl von der Länge des Luftspaltes als auch vom Erregerstrom ab. Mit i_0 für den Grunderreger-

strom und i_x für den Steuerstrom folgt für die Tragkraft Abb. 5.

$$F = k \cdot \left\{ (i_0 + i_x) / (s - x) \right\}^2 - k \cdot \left\{ (i_0 - i_x) / (s - x) \right\}^2 \quad (2)$$

$$F = k_i i_x + k_s x \quad (3)$$

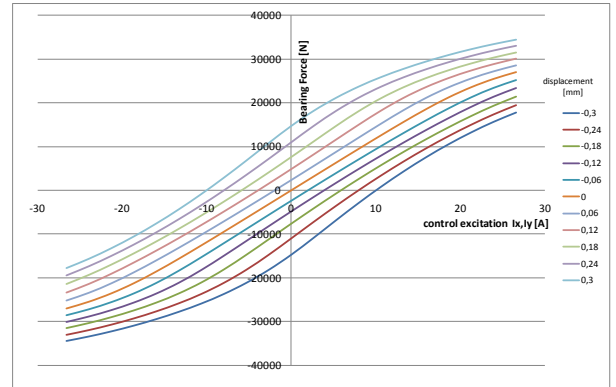


Abb. 5: Tragkraft in Abhängigkeit vom Strom

Es gibt zwei Ströme, den Grunderregerstrom der zeitunabhängig ist und den Steuerstrom der von der Rotorlage bestimmt ist.

Beim Entwurf des magnetischen Lagers sind von Interesse: der Magnetkreis mit seinen mechanischen Abmessungen, das ferromagnetische Material, die Verluste in den Spulen und im Magnetkreis. Letztere treten sowohl im Stator als auch im Rotor auf.

Das Rotoreisen hat für die Blechung eine Dicke von 0,2 mm. Der Rotor hat einen massiven Stahlkern. Das Rotorblechpaket ist eine Komponente des magnetischen Radiallagers die auf die Welle geschraubt wird, Um Kurzschlüsse zwischen den Blechen zu vermeiden darf die Oberfläche nicht geschliffen werden.

Das Statorblechpaket ist ebenfalls geblecht. Hier wir eine Blechdicke von 0.35 mm verwendet.

2.2 Ausführungsformen magnetischer Lager Bekannt sind das heteropolare Lager, das unipolare Lager und das homopolare Lager. Siehe Abb. 6.

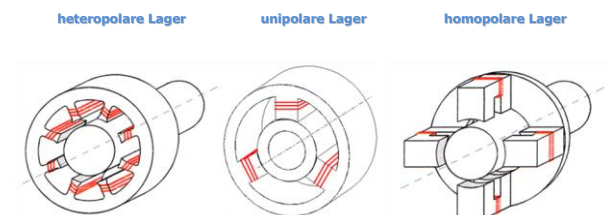


Abb. 6: Ausführungsformen magnetischer Lager

Für den heteropolaren Typ zeigt Abb. 7 die Polfolgen NNSS und NSNS.

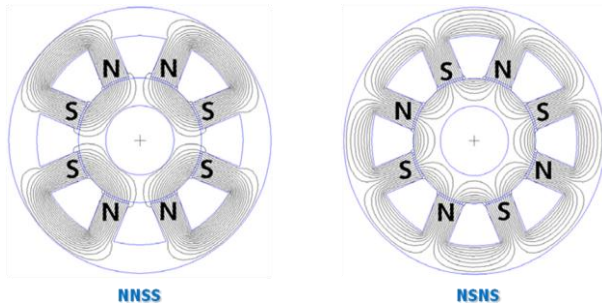


Abb. 7: Zwei Varianten der Pol-Folge NNSS oder NSNS

Die Variante NNSS zeigt Richtungswechsel für das Magnetfeld im Rotor. Daher ist die Frequenz im Rotor geringer und damit sind auch die Ummagnetisierungsverluste kleiner. Diese sind abhängig von:

$$P_{fe} = (v_h \cdot f + v_e \cdot f^2) m \quad (4)$$

f - Frequenz
 v_h - spezifische Hysterese Verluste
 v_e - spezifische Wirbelstromverluste
 m - Eisenmasse

Vergleicht man die Wirbelstromverluste der beiden heteropolaren Varianten so folgt: NNSS = 100 %, NSNS = 110 %.

Im Vergleich zur unipolaren Variante ergibt sich: 30 %.

Die Ummagnetisierungsverluste verhalten sich zueinander wie: heteropolar / homopolar / unipolar = 5 / 1 / 1.

3 Dynamisches Betriebsverhalten beim Magnetlager

Die Abb. 8 zeigt das Prinzip des Aufbaues eines magnetgelagerten Antriebes.

Im System sind die folgenden Trägheitsmomente vorhanden:

Θ_{px} - Trägheitsmoment in der x- Achse
 Θ_{py} - Trägheitsmoment in der y-Achse
 Θ_a - axiales Trägheitsmoment

Die Abb. 9 zeigt das Schwingungsverhalten einer hochtourigen Welle. Das bezeichnet man als „Rotor-Dynamik“. Im Bereich kleiner Drehzahlen (172 Hz und 222 Hz) sind die Schwingungen von der Steifigkeit und Dämpfung der Welle abhängig.

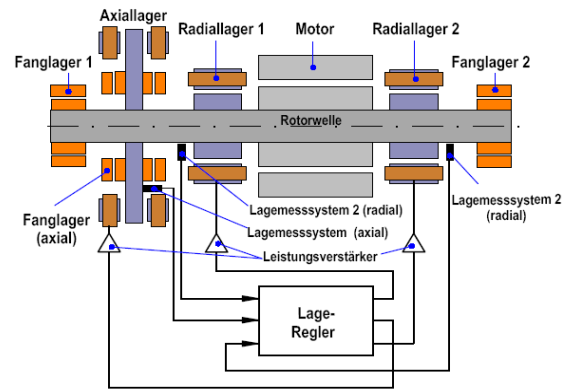


Abb. 8: Antriebssystem mit aktiven Magnetlagern.

Wellenmaterial und Wellengeometrie üben ebenfalls Einfluss auf das dynamische Verhalten der Welle aus.

Mit steigender Drehzahl treten mechanische Deformationen auf: V- Mode, S- Mode und doppel S- Mode. Im Allgemeinen versucht man das System unterkritisch zu betreiben.

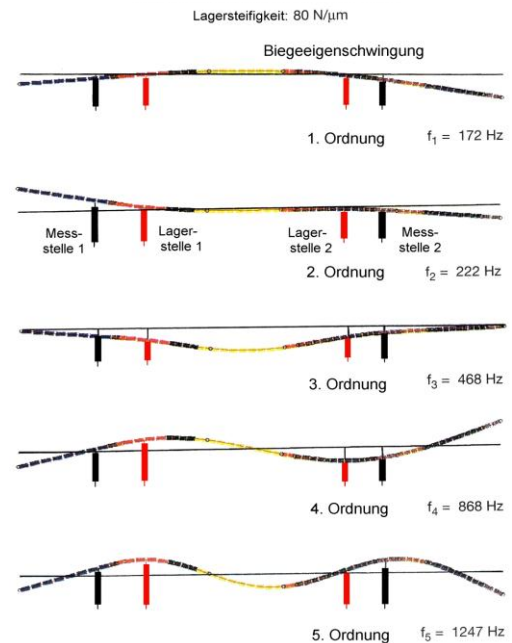


Abb. 9: Rotordynamik

Für die Resonanzdrehzahl gilt:

$$\Omega_r = \omega \times \sqrt{[(\Theta_{px} \times \Theta_{py}) / \Theta_a^2]} \quad (5)$$

Ω - aktuelle Drehzahl

Daraus kann abgeleitet werden, dass es drei Rotortypen gibt:

Zylindrischer Rotor: $\Theta_{px} = \Theta_{py}$ sehr verschieden von Θ_a

Scheibenähnlicher Rotor: $\Theta_{px} = \Theta_{py}$ verschieden von Θ_a

Kugelförmiger Rotor. $\Theta_{px} = \Theta_{py} = \Theta_a$

Für den kugelförmigen Rotor gilt, dass die Resonanzdrehzahl immer gleich der aktuellen Drehzahl ist. Das bedeutet, dass sich der Rotor ständig in der Resonanzfrequenz befindet.

Für den Scheibenläufer sollte immer gelten:

$$\Theta_{px} = \Theta_{py} < (0,7 \dots 0,9) \Theta_a$$

4 Scheibenläufer

Den konstruktiven Aufbau zeigt Abb. 10. Für die weiteren Überlegungen werden die folgenden Annahmen für die Lagersteifigkeit gemacht:

C = 20000 N/mm	bei f = 472 Hz;
40000 N/mm	= 547 Hz;
120000 N/mm	= 805 Hz.

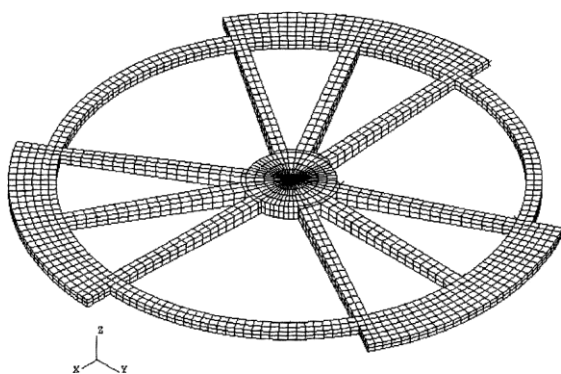


Abb. 10: Scheibenläufer

Im Resultat ist festzustellen, dass mit steigender Steifigkeit die Resonanzfrequenz größer wird.

Abb. 11 zeigt die Resonanzfrequenz für verschiedene Schwingungsmoden des Rotors.

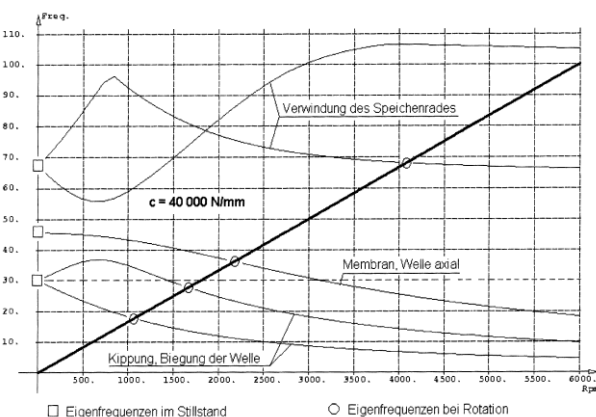


Abb. 11: Campbeldiagramm

Bei Rotation treten die folgenden Effekte: Neigung, Verwindung und Schrägung auf (Abb. 12). Die dazugehörigen Resonanzstellen treten bei verschiedenen Werten der Drehzahl zwischen 1000 und 4000 min^{-1} auf.

Den Einfluss der Materialeigenschaften zeigen deutlich die Abb. 13 und 14.

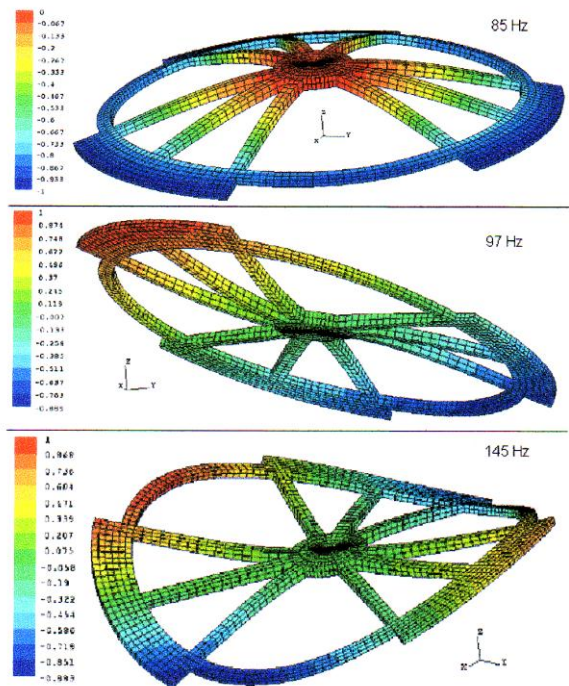


Abb. 12: Schwingungsformen der Scheibe

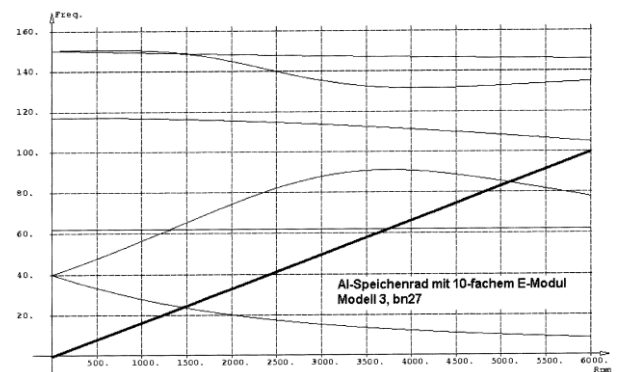


Abb. 13: Einfluss der Materialeigenschaften des Rotors bei c = 40000 N/mm.

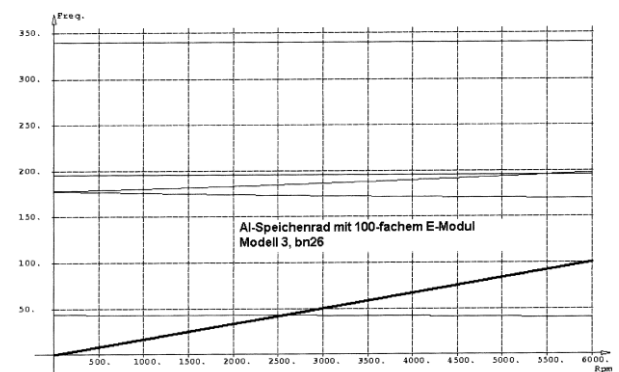


Abb. 14: Einfluss der Materialeigenschaften bei c = 40000 N/mm

Die Abb. 15 gibt eine Übersicht über den Einfluss von Steifigkeit des Rotors, Steifigkeit der Magnetlager und polares Trägheitsmoment.

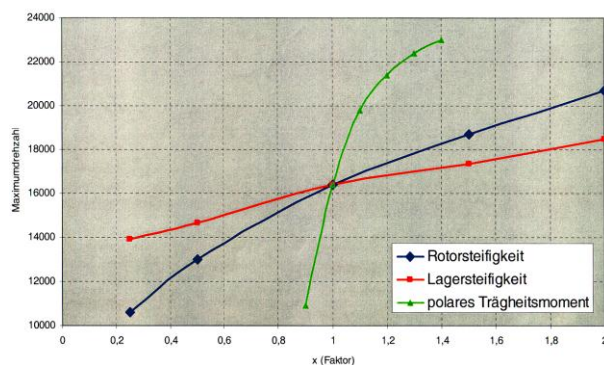


Abb. 15: Einfluss der verschiedenen Steifigkeiten auf das Dynamische Verhalten

5 Ummagnetisierungsverluste bei den magnetischen Lagern

Die B-H Kennlinien ferromagnetischer Werkstoffe hängt von der Frequenz ab (Abb. 16). Magnetische Lager besitzen eine Grund- und eine Steuererregung. Erstere wird durch einen Gleichstrom, letztere durch einen alternierenden Strom realisiert.

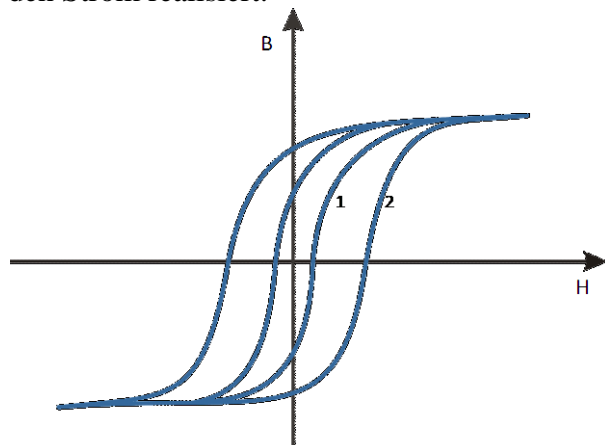


Abb. 16: B-H- Kennlinie für statische (1) und dynamische (2) Magnetisierung

Diese Verluste bestehen aus den Hysterisis-Verlusten und den Wirbelstromverlusten.

5.1 Hysterisis-Verluste

Ursache der Verluste ist der Wechsel der Gitterstruktur wenn eine zeitliche Veränderung der Magnetisierung vorhanden ist. Es treten Bewegungen an den Bloch-Grenzen auf. Dadurch entsteht eine veränderte Orientierung der Elementarmagnet. Das geht solange bis alle Elementarmagnete in gleicher Richtung ausgerichtet sind. Bei weiter vergrößerter Magnetisierung kann das Magnetfeld nur noch

durch den „Luftanteil“ gemäß (6) größer werden.

$$B = \mu_0 \times H \quad (6)$$

Die entsprechenden Verluste pro Zyklus sind bestimmt durch:

$$Ph = \int H dB \quad (7)$$

Bei mehrfachem Durchlaufen der Magnetisierungsschleife ergibt sich:

$$Ph = f \int H dB \approx \epsilon f B^2 \quad (8)$$

Die Wirbelstromverluste bestimmen sich aus:

$$P_{eddy} = \sigma (f \times B)^2 \quad (9)$$

Damit ergibt sich für die Summe aller Verluste:

$$P_{fe} = m B^2 (\sigma \times f + \epsilon f^2) \quad (10)$$

m - Masse des Eisens

Wenn im Magnetkreis zwei Erregungen vorhanden sind, eine mit Gleichstrom und andere Wechselstrom, so ergibt sich das B-H- Diagramm aus Abb. 17.

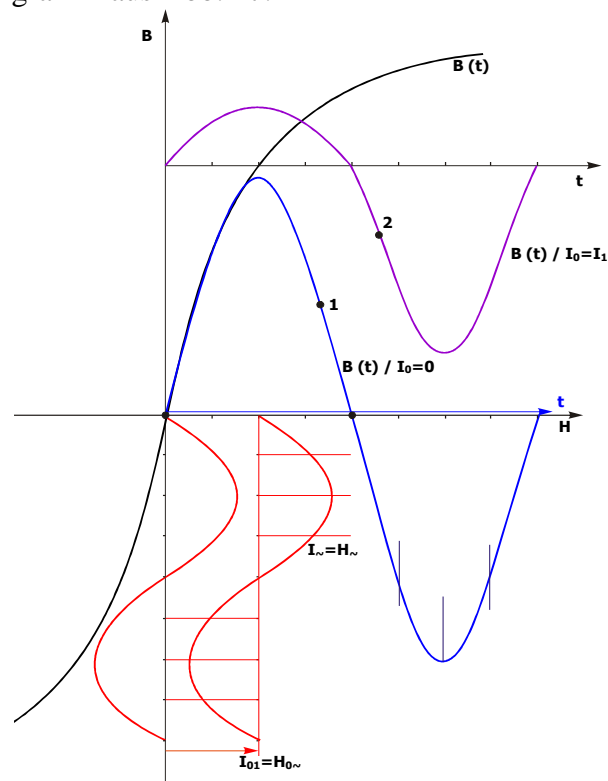


Abb. 17: Modulation einer Magnetisierungskennlinie ohne (1) und mit (2) einer Gleichstrom-Grunderregung.

Der Gleichstrom schiebt den O- Punkt des Diagramms in Richtung größerer Feldstärke (H). Dadurch wird die alternierende Komponente des magnetischen Flusses (B) kleiner. Das bedeutet, dass auch die Verluste kleiner werden.

Das ist beim Entwurf eines Magnetlagers zu berücksichtigen.

Die Ummagnetisierungsverluste in Abhängigkeit von der Gleichstromkomponente des Magnetisierungsstromes zeigt die Abb. 18a, b. Das gilt für verschiedene Werte der Gleichstromkomponente.

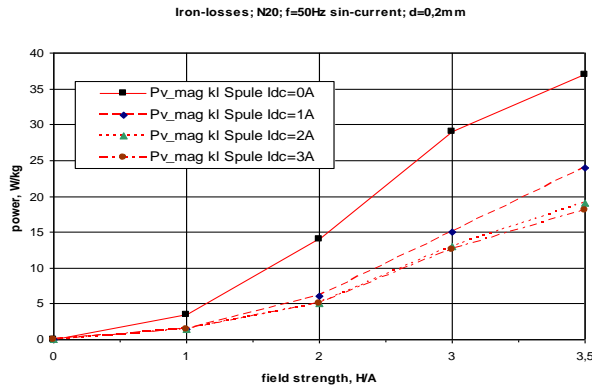


Abb. 18a: Ummagnetisierungsverluste für Dynamo-blech N20 f=50 Hz sinusförmiger Strom und d=0,2 mm

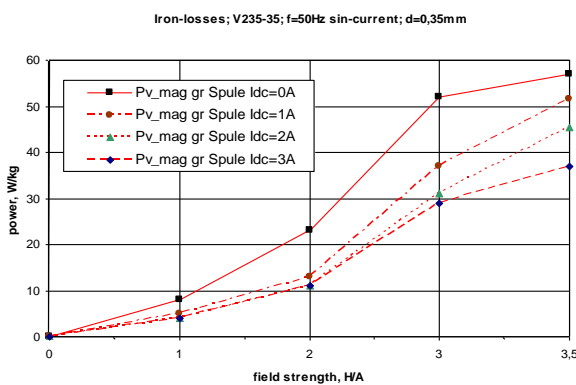


Abb. 18b: Ummagnetisierungsverluste für Dynamo-blech V235-35, f=50 Hz sinusförmiger Strom, d=0,35 mm

6 Magnetische Lager mit Permanentmagneten

Das Prinzip der Wirkungsweise zeigt Abb. 19. Das Radiallager besteht aus 3 vormagnetisierten Ringen. Der mittlere befindet sich auf der Welle und rotiert mit dieser. Die beiden Außenringe sind im Stator angeordnet.

Solange alle drei Ringe in der gleichen geometrischen Lage sich befinden (Abb. 19a) entsteht keine radiale Magnetlager-Kraft. Tritt eine radiale Verschiebungskraft auf (Abb. 19b) so neigen sich im Luftspalt zwischen den Ringen die Magnetfeldlinien, so dass eine radiale Kraftkomponente auftritt. Diese Kraft nimmt sowohl die Massenkraft der Welle als auch die auf die wirkende Zentrifugalkraft auf. Daher bewegt sich der Wellenmittelpunkt auf einer

Kreisbahn um den Lagermittelpunkt. Wichtig ist, dass der Durchmesser dieses Kreises sich vom Durchmesser des Fanglagers deutlich unterscheidet.

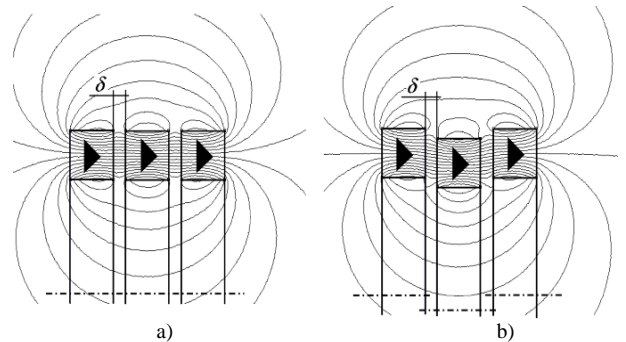


Abb. 19: Magnetlager mit Permanentmagneten

Es wird in dem System noch eine axiale Kraft benötigt. Diese muss eine symmetrische Position der drei Ringe herstellen.

Aus der Gleichung:

$$F = \frac{1}{2} \int B \times H \times \partial A \quad (11)$$

Daraus folgt:

$$F/A = \frac{1}{2} B^2/\mu. \quad (12)$$

Die Steife eines Magnetlagers ist in Abb. 20 für verschiedene Magnetmaterialien in Abhängigkeit vom Luftspalt dargestellt.

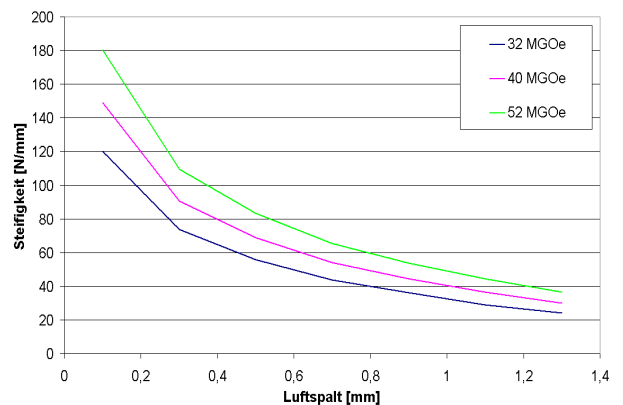


Abb. 20: Die Steife eines Magnetlagers in Abhängigkeit vom Luftspalt.

6.1 Wirbelstromdämpfer

Magnetische Lager mit Permanentmagneten neigen zu Schwingungen. Daher wird ein magnetischer Dämpfer erforderlich s. Abb. 21.

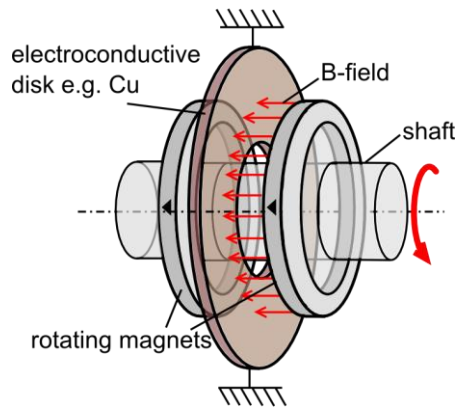


Abb. 21: Prinzip eines Wirbelstromdämpfers

7 Anwendungsbeispiele magnetischer Lager

Hier sind einige neue Magnetlager-Applikationen beschrieben.

7.1 Drehmomenten-Messeinrichtung Abb. 22
Die Welle rotiert nicht. Die Maschine besitzt zwei radiale Magnetlager und ein axiales Magnetlager. Erstere erzeugen je eine Lagerkraft von 4000 N, letzte eine Kraft von 12000 N.

An einem Wellenende befindet sich der mechanisch Anschluss für das zu prüfende Wälzlager dessen Reibungskraft zu bestimmen ist. Es dürfen im System keine Rippelkräfte auftreten. Daher wird der magnetische Kreis aus einem Material mit extrem kleiner Remanenz hergestellt.

Die Rippelkräfte liegen in der Größenordnung von Ncm und weniger.

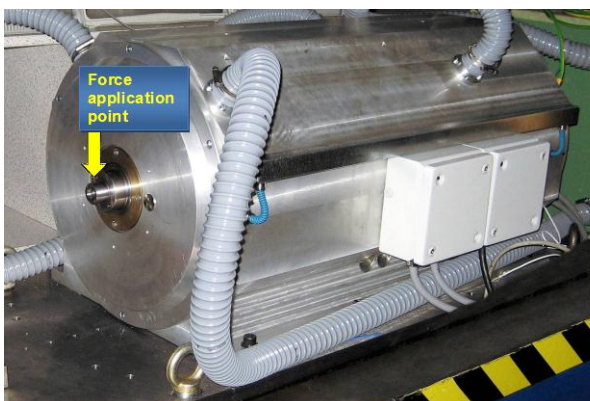


Abb. 22: Drehmomenten-Messeinrichtung

7.2 Prüfeinrichtung zur Messung von Ventilatorverlusten. Abb. 23

Die Welle besitzt zwei radiale und ein axiales Magnetlager. An einem Wellenende befindet sich der Antriebsmotor des zu messenden Ventilators, am anderen Wellenende befindet sich der Ventilator. Zwischen den beiden Radiallagern befindet sich der Sensor zur Messung von Drehzahl und Drehmoment. Um die Luftströmung des Ventilators möglichst frei strömen zu lassen, muss der mechanische Abstand von Ventilator und rechtem Radiallager hinreichend groß sein.



Abb. 23: Ventilator-Teststand

7.2 Kraftwerkskühlwasserpumpe Abb. 24

Die Motorleistung 1800 kW, die Lagerradialkraft 4000 N, die Lageraxialkraft 12000 N, die Drehzahl 1500 min^{-1} .



Abb. 24: Kühlwasserpumpe

7.3 Prüfeinrichtung zur Bestimmung von Strömungsverlusten von Verdichtern Abb. 25

Die Prüfeinrichtung besitzt zwei radiale und ein axiales Magnetlager. Nenndrehzahl – 140000 min^{-1} , Radialkraft pro Lager – 40 N, Axialkraft – 300 N.

An der Messseite der Welle befindet sich der Sensor zur Messung der Drehzahl und des Drehmomentes. Dieser ist mit dem Prüfling

verbunden, dessen Rundlauf von einem Zusatzmesssystem überwacht wird. Die Wuchtqualität beträgt 2,5.

Nicht dargestellt ist der Antriebsmotor zwischen rechtem Radiallager und Axiallager.

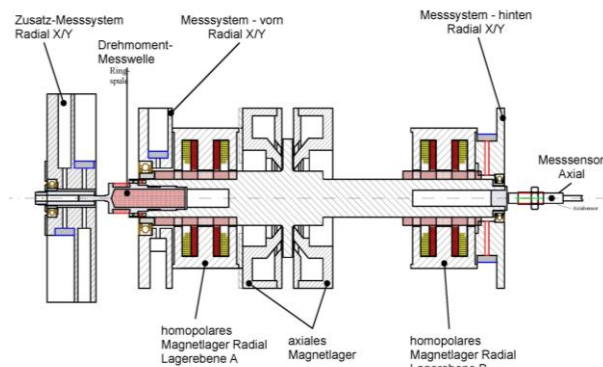


Abb. 25: Versuchsstand zur Bestimmung der Verluste

7.4 Magnetische Großlager

Entwickelt wurden Lager:

für 16000 N und 11000 min⁻¹

für 30000 N und 7000 min⁻¹

für 50000 N und 7000 min⁻¹

7.5 Schwungradspeicher Abb. 26

Das System wurde entwickelt für max. Geschwindigkeit 45000 min⁻¹ als Energiespeicher für 10 Wh, und besteht aus 2 Permanentmagnetlager (radial), 1 axiale elektromagnetisches Lager, 2 permanentmagnetisch Dämpfungerringe, Fanglager aus Kohlenstoff, Synchronmotor, Vakuumgehäuse.

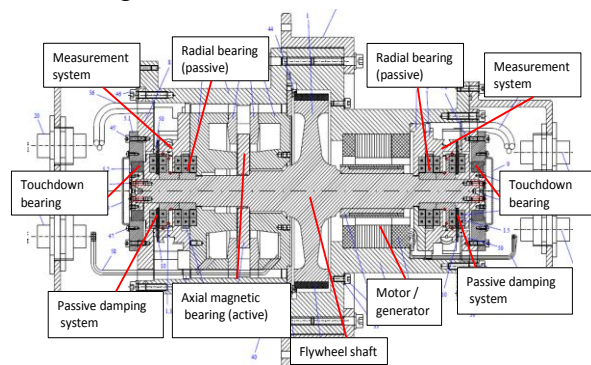


Abb. 26: Schwungradspeicher

Literatur

- [1] "Magnetische Lager – ein Blick in die Zukunft" P.- K. Budig Elektrische 1988,pg. 363 ff
- [2] "Aktive magnetische Lager- eine Übersicht über theoretische Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise, Entwurf und spezielle Probleme" Teil1 und Teil2. P.-K.Budig, H. Timmel, Th. Schubert, U. Jugel, K. Seyfert.

Elektrische 1988, H. 10,pg. 365..369 and 424..428

- [3] "Hochtouriges magnetgelagertes. Turbogebälde in Monoblockbauweise" P.- K. Budig, mR. Werner, F. Otte. Tagung industrielle Automatisierung – automatisierte Antriebe, TU Karl- Marx Stadt 1990
- [4] "High Speed Turbo. Compressor with magnetic Bearings" P.-K. Budig, R. Werner. F. Otte. Procc. Intelligent Motion Conf. 1991
- [5] "Magnetische Lager und ihre Anwendung- Stand der Technik und künftige Tendenzen" P.- K. Budig, Textilmaschinenbau m2003 Chemnitz
- [6] "Application of Magnetic Bearings for High- Speed Drives" P.- K. Budig, R. Werner, 6. European Conf. on Power Electronics And Applications 1995
- [7] "Vergleich von Meßsystemen für magnetische Lager" R. Werner, P. – K Budig, antriebstechnik 36 1977 Nr.9 S. 68..71
- [8] "Regelung aktiver magnetischer Lager für wellenelastische Rotoren" D. Waldeck, R. Werner, P.- K. Budig antriebstechnik 39 (2000) Nr. 5 und 6
- [9] "Berücksichtigung der Kreiselkräfte bei hochtourigen magnetgelagerten Rotoren" R. Werner, P.-K. Budig, Wrkshop Magnetlager, Kassel 1991
- [10] "Dynamisches Verhalten magnetisch gelagerter Systeme für Anordnungen die vom Typ Welle abweichen" P.- K. Budig, Workshop Magnetlager, Zittau 2005
- [11] "Magnetic Bearings with DC- Bias: Design and Optimum Material Choice" P.- K. Budig, Porc.2. Intern. Workshop Magnet and Metallurgy TU Freiberg 2006
- [12] "Vergleich von Magnetlagern in homopolarer und herteropolarer Bauweise" M. Paditz, Diplomarbeit 2007/2008 ZU Chemnitz/EAAT GmbH Chemnitz
- [13] "Vergleich von magnetischen Lagern und Untersuchungen zur Dämpfung magnetisch gelagerter Systeme" J. Rudolph , Hochschule Mittweida 2009
- [14] "Messung der Ummagnetisierungsverluste unter Berücksichtigung der Vormagnetisierung" Ch. Wußling, Belegarbeit 2005/2006 EAAT Chemnitz
- [15] "Ummagnetisierungsverluste bei Gleichstromvormagnetisierung" P.-K. Budig 2008, EAAT Chemnitz