Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 1

Artikel: Magnetlager und ihre Anwendungen

Autor: Schweitzer, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903622

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Magnetlager und ihre Anwendungen

G. Schweitzer

Magnetische Lager können einen Rotor berührungsfrei tragen. Dabei hängen die elektromagnetischen Lagerkräfte über einen Regelkreis vom gemessenen Bewegungszustand des Rotors ab. Ziel des Beitrages ist, die Verknüpfung von Mechanik, Elektronik und Informatik an einem typischen Produkt der Mechatronik zu zeigen. Anwendungsbeispiele zeigen schliesslich, welcher Nutzen von diesen neuartigen Lagern zu erwarten ist.

Les paliers magnétiques peuvent supporter un rotor sans aucun contact. Les forces électromagnétiques exercées par le palier dépendent par l'intermédiaire d'une boucle d'asservissement de l'état de mouvement mesuré du rotor. Le but de cette contribution est de montrer, par ce produit type de la mécatronique, les liens qui existent entre la mécanique, l'électronique et l'informatique. Des exemples d'application montrent finalement l'utilité des nouveaux paliers.

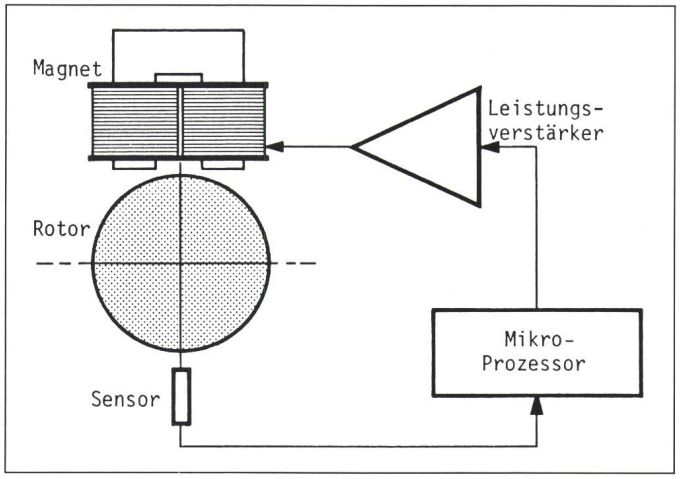
Adresse des Autors
Prof. Dr. *G. Schweitzer*, Institut für Mechanik und Arbeitsgruppe Mechatronik, ETH Zürich, 8092 Zürich.

Magnetlager sind ein typisches Produkt der Mechatronik. Neben mechanischen Komponenten enthalten sie elektronische Bauteile wie Sensoren und Leistungsverstärker, einen Regler, z.B. in Form eines Mikroprozessors, sowie einen zunehmenden Anteil an Software, der letztlich ihren «intelligenten» Einsatz bestimmt. Die immer besser werdende Verfügbarkeit und Integrationsfähigkeit dieser «Bauelemente» macht die Magnetlager zunehmend attraktiv zur Lösung klassischer Lagerungsprobleme in der Maschinendynamik. Einen Überblick über die derzeitige Anwendungsbreite bot das mit fast 200 Teilnehmern - davon etwa 50 aus Japan - sehr gut besuchte First International Symposium on Magnetic Bearings an der ETH Zürich im Juni 1988 [1].

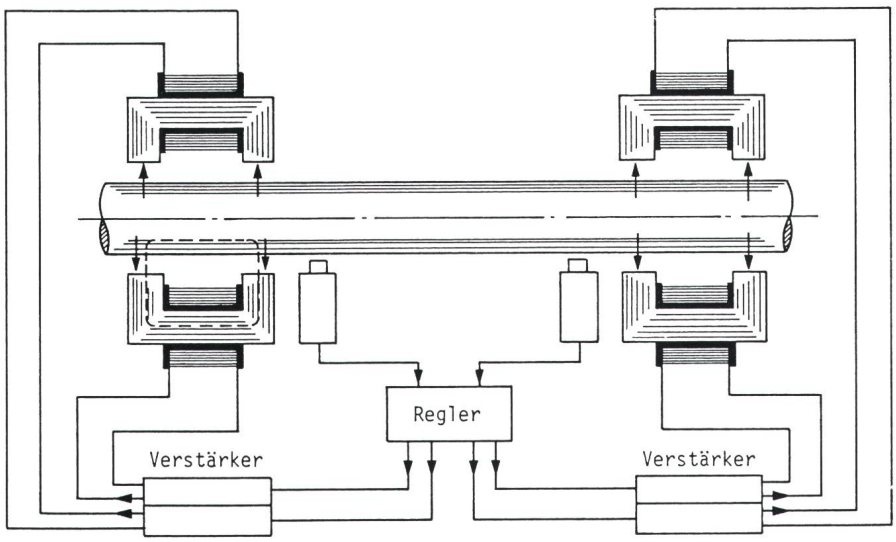
Neben der Berührungsfreiheit zeichnen sich Magnetlager vor allem dadurch aus, dass ihre dynamischen Eigenschaften von der Auslegung der Regelung abhängen und dass sie sich dadurch auch leicht den unterschiedlichsten Anforderungen anpassen lassen. Der Beitrag zeigt, welche technischen Anforderungen sich an Magnetlager stellen lassen und wie eine Realisierung in konkreten Beispielen aussieht. Beispiele sind ein elektromagnetischer Aktuator zur berührungsfreien Erzeugung von Testkräften an einem Rotor oder zur Dämpfung von Rotorschwingungen, die magnetische Aufhängung eines hochelastischen Rotors zum Durchfahren mehrerer kritischer Drehzahlen, eine Frässpindel für das Hochgeschwindigkeitsfräsen und eine Epitaxiezentrifuge. Die folgenden beiden Abschnitte gehen zunächst kurz auf das Funktionsprinzip und auf das wesentliche Bauelement der Magnetlagerung, vor allem den Aktuator an sich, ein.

Funktionsprinzip

Ein Sensor (Fig. 1) misst die Abweichung des Rotors von seiner Referenzlage, ein Mikroprozessor als Regler leitet aus der Messung ein Regelsignal ab, dieses erzeugt über einen Leistungsverstärker einen Steuerstrom durch den Stellmagneten und erzeugt damit Magnetkräfte derart, dass der Rotor gerade in der Schwebe bleibt. Das Regelgesetz lässt sich innerhalb



Figur 1
Funktionsprinzip der elektromagnetischen, berührungsfreien Lagerung



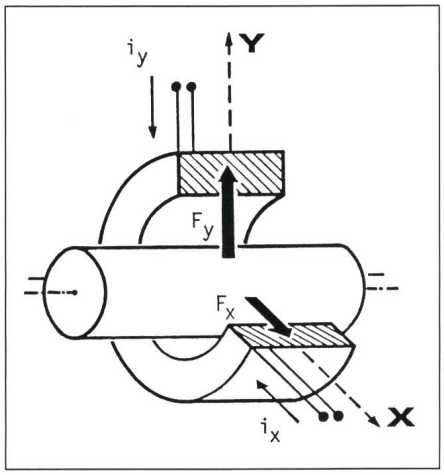
Figur 2 Elektromagnetisch gelagerter Rotor
Gezeigt ist nur die radiale Lagerung in einer Ebene. Die axiale Lagerung lässt sich ganz entsprechend realisieren.

physikalischer Grenzen den technischen Anforderungen anpassen und bewirkt die dynamische Steifigkeit der Aufhängung sowie die Stabilität und die Dämpfung des Schwebezustandes. Ein realer Rotor braucht natürlich mehrere solcher Tragelemente, die durch eine Mehrgrössenregelung miteinander verknüpft sind (Fig. 2).

Im folgenden werden zunächst die Bauelemente des Regelkreises, insbesondere der magnetische Aktuator, vorgestellt.

Bauelemente der Magnetlagerung

Der *elektromagnetische Aktuator* ist dasjenige Element im Regelkreis, das aus einer elektrischen Eingangsgrösse die mechanische Ausgangsgrösse *Lagerkraft* erzeugt und deshalb vereinfacht oft schon als Magnetlager bezeichnet wird. Figur 3 zeigt den Aktuator als ein solches Eingangs-/Ausgangselement, während Figur 4 bereits konstruktive Details angibt. Die Kenngrössen eines Aktuators sind aus geometrischen und elektrischen Daten zu berechnen, oder sie sind experimentell zu bestimmen [2]. Eine wichtige Beziehung ist die Kraft-Strom-Kennlinie von Figur 5, die nichtlinear ist. Für den Einbezug des Magneten in den Regelkreis ist dagegen eine lineare Kennlinie sehr erwünscht. Eine Linearisierung lässt sich auf zwei verschiedene Weisen erreichen: softwareseitig durch einen entsprechenden Algorithmus im Mikroprozessor oder hardwareseitig durch eine Differentialwicklung des Magneten und eine Verschiebung des Arbeitspunktes durch Vormagnetisierung. Die maximale Kraft des Aktuators hängt von seiner Grösse und Geometrie, dem Magnetmaterial und der Kühlleistung ab. Seine spezifische Kraft, bezogen auf die Querschnittfläche des Lagers, beträgt bis zu 50 N/cm² bei gewöhnlichem Si-Transformatorenblech und lässt sich durch die Verwendung von Co-Legierungen um 50% steigern. Dieses Leistungspotential des Aktuators lässt sich natürlich nur dann sinnvoll ausnützen, wenn der Magnet als Teil des ganzen Lagersystems geeignet angesteuert und geregelt ist.



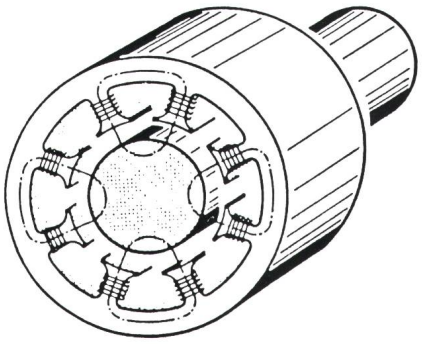
Figur 3 Radiales Magnetlager
Das Lager wird als Eingangs-Ausgangs-Element betrachtet. Eingangsgrösse ist der Steuerstrom durch die Spulen.

Die *Leistungverstärker* haben die Regelsignale zu verstärken und damit die Aktuatoren zu speisen. Die Magnetspulen stellen im wesentlichen eine induktive Last dar. Als Tiefpass begrenzt sie den Frequenzgang und damit die Dynamik der ganzen Lagerung. Zudem unterscheidet man Gleichstromverstärker und getaktete Verstärker, wobei sich die ersteren für kleinere Leistungen unter 0,5 kVA (Tab. 1) eignen. Hohe Verstärkerleistungen werden vor allem für ein gutes dynamisches Verhalten (Fig. 6) benötigt. Die tatsächlich verbrauchte Energie dagegen ist gering und bei hohen Drehzahlen um eine Grössenordnung kleiner als bei konventionellen Lagern.

Regelung

Die Regelung erfordert Informationen über die Rotorbewegung, die hier über Wegsensoren vermessen wird. Die Geschwindigkeitswerte werden daraus im Rechner abgeleitet. Für die hier benötigte Mehrgrössenregelung eignet sich eine vollständige Zustandsrückführung nur beschränkt. Es werden zu viele, oft zu wenig genau bekannte Parameter benötigt und die Systemordnung und damit die geforderte Rechenleistung nimmt, wenn auch noch ein Beobachter realisiert werden soll, zu stark zu. Wir verwenden eine dezentrale Regelung, deren Struktur aus Vorüberlegungen sinnvoll zu wählen ist. Infolge der vereinfachten Reglerstruktur ist es jetzt möglich, eine digitale Regelung zu realisieren [3]. Für die gesamte radiale Aufhängung eines elastischen Rotors lassen sich so mit Mikroprozessoren der Motorola-68 000-Familie Zykluszeiten von 0,4 ms erreichen, mit dem Signalprozessor TMS 320 bis zu 0,08 ms [4].

Vom besonderem theoretischem und praktischem Interesse ist die Regelung elastischer Rotoren. Natürlich sollte das der Regelung zugrunde lie-



Figur 4 Bauform eines Radiallagers

Aktuator		Zur Erzeugung von Testsignalen und zur Dämpfung	Zur Lagerung eines hochelastischen Rotors	Für Radiallager einer Hochgeschwindigkeits-Frässpindel
Max. Lagerkraft	N	1300	140	1800
Lagerdurchmesser	mm	190	58	96
Lagerspalt	mm	1	1	0,35
Taktfrequenz	kHz	50	ungetaktet	max. 100
Spannung	V	310	± 54	310
Leistung	kVA	1	Dauer 0,16	2,4

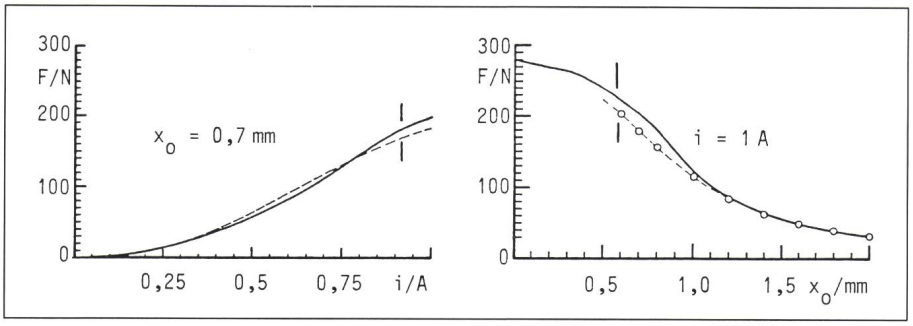
Tabelle I Übersicht über Aktuator-Verstärker-Kombinationen

Technische Ziele

- Berührungsfreies und stabiles Lagern eines Rotors
- Schwingungsdämpfung, erreichbar durch Reglerauslegung nach Polvorgabe oder LQG
- Hohe Positionsgenauigkeit, erreichbar durch integrierende Rückführung oder Unwuchtkompensation
- Stabilisierung selbsterregter Schwingungen bei nichtkonservativen Anregungen
- Reduktion der Schwingungskräfte auf die Lager, erreichbar durch Drehenlassen des starren Rotors um seine Hauptträgheitsachse
- Reduktion der Resonanzamplituden eines elastischen Rotors beim Durchgang durch kritische Drehzahlen
- Verbessern der Sicherheit (Redundanz, Diagnose, ...)
- Einbinden des Lagers in die Steuerung des Gesamtprozesses (Überwachen von Grenzwerten, Betriebsabläufe)

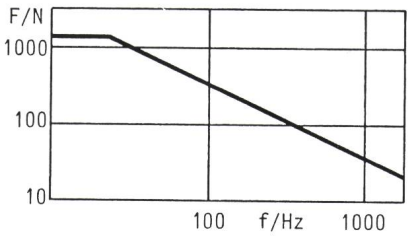
Diese Eigenschaften lassen sich über die Programmierung des Mikroprozessors erreichen

Tabelle II



Figur 5 Kennlinien für die Lagerkraft eines Radiallagers

F Kraft — Innendurchmesser 80 mm — – gerechnet
i Strom — Breite 40 mm — o gemessen
x_0 Spalt



Figur 6 Frequenzgang

Die Aktuator-Verstärker-Einheit von Tabelle I (max. Lagerkraft 1300 N) kann z.B. bei 400 Hz noch eine sinusförmige Kraft von etwa 100 N erzeugen.

gende mechanische Rotormodell so einfach wie möglich, also von niederer Ordnung sein. Der Reglerentwurf hat dann aber so zu erfolgen, dass die Regelung robust wird in bezug auf ungenaue Parameter und vor allem in bezug auf Fehler in der Modellierung der Ordnung des elastischen Systems [5]. Sonst besteht die Gefahr, dass die Regelung durch sogenannte Spillover-Effekte nichtmodellierte Eigenschwingungen des Rotors anregt statt sie zu dämpfen.

Anwendungen und technische Regelziele

Die verschiedenen Vorteile der magnetischen Lagerung führen zur Verwendung der Lager in drei hauptsächlichen Anwendungsbereichen:

- Vakuum- und Reinstraumtechnik (Berührungsfreiheit der Lager)
- Werkzeugmaschinen (Präzision, grosse Last, hohe Geschwindigkeit)
- Turbomaschinen, Zentrifugen (Regelung und Dämpfung von Schwingungen, gute dynamische Eigenschaften).

Die Anforderungen an die Magnetlager in diesen drei Bereichen sind verschieden, speziell was das dynamische Verhalten angeht. Viele Eigenschaften lassen sich über den Mikroprozessor beeinflussen (Tab. 2). Diese Eingriffsmöglichkeiten über die Software erlauben es, das Lager «intelligent» zu machen. In den nächsten beiden Abschnitten werden einige konkrete Beispiele vorgestellt.

Aktuator zum Erzeugen von Testkräften und zum Dämpfen

Der Aktuator von Figur 7 kann grosse Kräfte über einen weiten Frequenzbereich erzeugen. Er wird nicht nur als Lager verwendet, sondern auch zum berührungsfreien Erzeugen von Testkräften für die Parameteridentifizierung und ausserdem als aktiver Dämpfer [6]. Der Rotor selbst ist 2,3 m lang, aus Stahl, 100 mm im Durchmesser, gelagert in zwei Ölgleitlagern. Die überhängenden Wellenenden tragen je eine Scheibe von 93 kg. Der Aktuator übt zuerst sequentielle Testkräfte in x- und y-Richtung auf den drehenden Rotor aus. Die resultierenden Rotorauslenkungen werden als Testsignale gemessen. Sie dienen in einem Algorithmus dazu, Steuerkräfte zu berechnen, die anschliessend vom sel' ·n Aktuator drehzahlsynchron auf den Rotor ausgeübt werden. Dieser Vorgang wiederholt sich, während der Rotor von der Ruhe bis zur Betriebsdrehzahl hochläuft. Der Algorithmus bestimmt also die Steuerkräfte zur Minimierung der synchronen Rotorschwingungen, ohne dass zuvor die Eigenschaften der Gleitlager oder die Unwuchtverteilung entlang dem Rotor bekannt sein müssen. Die skizzierte Vorgehensweise zur automatischen Anpassung des Aktua-

tors im Betrieb ist deshalb von besonderem Interesse, da im allgemeinen die Gleitlagerkennwerte nicht exakt aus theoretischen Modellen vorhersagbar sind.

Magnetische Lagerung eines hochelastischen Rotors

Der elastische Rotor von Figur 8 wird von den beiden Magnetlagern berührungsfrei getragen, und gleichzeitig dämpfen diese Lager die Rotorschwingungen. Die Regelung ist so ausgelegt, dass sie robust ist bezüglich Parameter- und Modellreduktionsfehlern und auch das geregelte, reale System unendlicher Ordnung stabil ist. Als Regler wurde ein Signalprozessor TMS 320 verwendet, die Zykluszeit für die vollständige Regelung könnte mit besseren AD-Wandlern sogar noch auf weniger als die jetzt erreichten 0,08 ms reduziert werden. Die hier erarbeitete Technik wird derzeit für die Lagerung verschiedener industrieller Hochgeschwindigkeitsrotoren übernommen.

Figur 7 Elektromagnetischer Aktuator ETH-190/50/1 zur Erzeugung von Tastsignalen und zur Dämpfung

Die wesentlichen Daten und Abmessungen sind in Tabelle I, der Frequenzgang in Figur 6 angegeben.

a Magneteinheit

b Leistungsverstärker

c Ferromagnetische Hülse auf dem Rotor

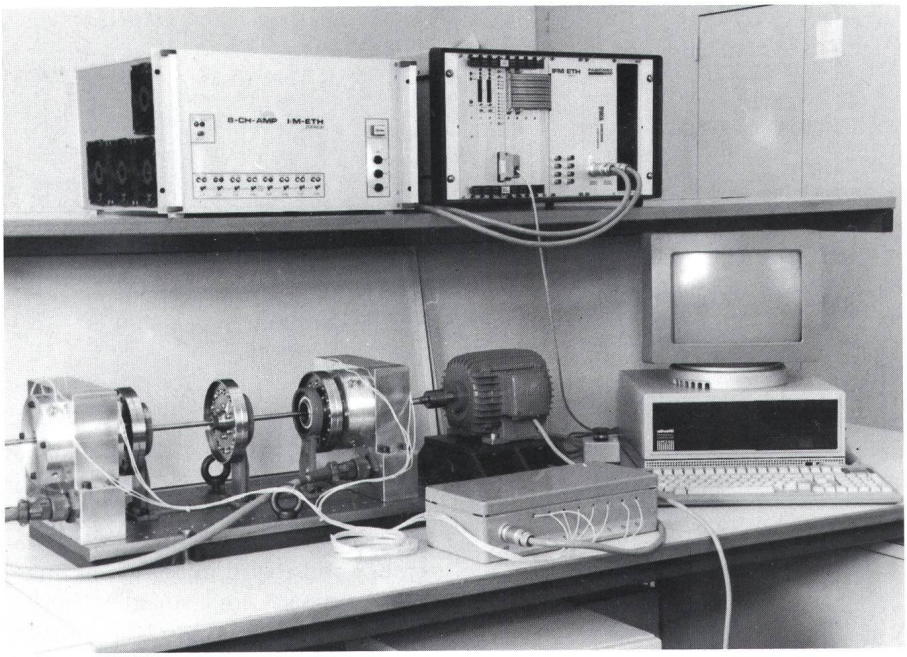
d Sensoren

Spindel für das Hochgeschwindigkeitsfräsen

In Zusammenarbeit mit einer Schweizer Firma wurde an der ETH eine magnetgelagerte Frässpindel gebaut, die derzeit in der Werkstatterprobung ist. Die Schnittleistung liegt bei 35 kW, die Spindel dreht bis 40 000 U/min, es lassen sich Schnittgeschwindigkeiten von 5000 m/min erreichen. Dieses Hochgeschwindigkeitsfräsen bietet zerspanungstechnische Vorteile und ist wirtschaftlicher. Auch Schleifspindeln für spezielle Schleifvorgänge bei Gewinden sind schon mit Magnetlagern ausgestattet, die von der französischen Firma S2M gefertigt wurden [7].

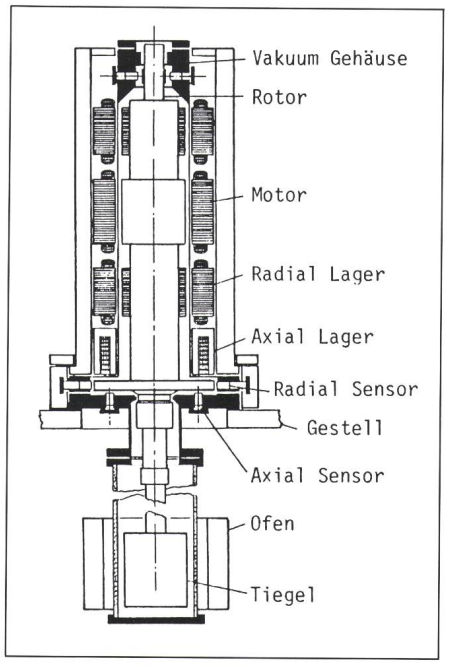
Epitaxiezentrifuge

Für das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung wurde eine spezielle Zentrifuge gebaut, in der Halbleitersubstrate durch Flüssigphasenepitaxie gezielt mit dünnsten Mehrfachschichten versehen werden können [8]. Dazu rotiert ein Tiegel nach einem definierten Drehzahlprogramm in einer Wasserstoffatmosphäre unter Ultra-Hochvakuumbedingungen



Figur 8 Elastischer Rotor in Magnetlagern

Der Rotor kann zwei biegekritische Drehzahlen durchfahren und eine Drehzahl von 10 000 U/min erreichen. Der Rotor ist nicht speziell ausgewuchtet und auch etwas krumm. Trotzdem kann er ohne starke Amplitudenerhöhung sogar in den beiden biegekritischen Drehzahlen selbst drehen. Das Bild zeigt neben dem Rotor den Mikroprozessor (Motorola 68000), die Verstärkereinheit und einen PC für On-line-Änderungen der Reglerparameter und für Diagnosezwecke.



Figur 9 Epitaxiezentrifuge
Der Rotor mit dem Tiegel ist berührungsfrei durch Magnetlager in dem Vakuumbehälter aufgehängt, wobei sich die Lager völlig ausserhalb des Behälters befinden und die Lagerkräfte durch die Behälterwand hindurch wirken.

(Fig. 9). Es besteht die Absicht, durch dieses Verfahren auch in grösserem Massstab Halbleiter höchster Qualität herzustellen.

Schluss und Ausblick

Magnetische Lager bieten Eigenschaften, mit denen sich einige der klassischen Probleme der Rotordynamik auf eine neue Weise angehen lassen: kein mechanischer Verschleiss, keine Schmierung, geringe Wartungskosten, anpassungsfähiges dynamisches Verhalten. Massgebend hierfür ist die systematische Verbindung von Bauelementen des klassischen Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Informatik zu einem neuen Produkt. Die industrielle Anwendung der Magnetlager befindet sich derzeit an sehr vielen Stellen in der Erprobungs- und Projektphase. So sind z.B. Spindeln für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung derzeit in fortgeschrittener Erprobung und teilweise auch schon im Einsatz. Magnetgelagerte Elektroantriebe für hohe Drehzahlen und hohe Leistungen werden den Direktantrieb schnellaufender Verdichter und Pumpen erlauben und in vielen Anwendungen zum Wegfall der Getriebe und der Ölversorgungen für die Gleitlager führen. Turboverdichter, auch für Leistungen im MW-Bereich, erreichen durch den Wegfall von Dichtungen, durch die Ölfreiheit und durch höhere Drehzahlen neue konstruktive Lösungen und dadurch eine wesentlich verbesserte Funktion. Infolge der Vakuum- und Reinstraumeignung der Magnetlager bieten sich für physikalische Apparate wie Kristallzuchtapparate, Zentrifugen, Transport- und Handhabungsgeräte für die Mikroelektronik völlig neuartige Lösungen an.

Literatur

[1] *G. Schweitzer, ed.:* Magnetic Bearings. Proceedings of the First International Symposium, ETH Zurich, June 6...8, 1988. Berlin a.o., Springer-Verlag, 1989.

[2] *A. Traxler:* Eigenschaften und Auslegung von berührungsfreien elektromagnetischen Lagern. Dissertation der ETH Zürich Nr. 7851, 1985.

[3] *R. Larsonneur* and *R. Herzog:* Optimal design of structure-predefined discrete control for rotors in magnetic bearings (SPOC-D). In: G. Schweitzer: Magnetic Bearings. Proceedings of the First International Symposium, ETH Zurich, June 6...8, 1988. Berlin a.o., Springer-Verlag, 1989.

[4] *H. Bleuler* and *J. Salm:* Control of rotor vibrations with a signal processor. Proceedings of the 4th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery (sponsored by the Institution of Mechanical Engineers) Edinburgh, September 13...15, 1988.

[5] *J. Salm:* Eine aktive magnetische Lagerung eines elastischen Rotors als Beispiel ordnungsreduzierter Regelung grosser elastischer Systeme. Dissertation der ETH Zürich Nr. 8465, 1987.

[6] *C.R. Burrows* a.o.: Design and application of a magnetic bearing for vibration control and stabilization of a flexible rotor. In: G. Schweitzer: Magnetic Bearings. Proceedings of the First International Symposium, ETH Zurich, June 6...8, 1988. Berlin a.o., Springer-Verlag, 1989.

[7] *H. Habermann* and *M. Brunet:* The active magnetic bearing enables optimum control of machine vibrations. ASME-Paper 85-GT-22. Gas Turbine Conference Houston, March 1985.

[8] *E. Bauser* a.o.: Centrifuge for epitaxial growth of semiconductor multilayers. In: G. Schweitzer: Magnetic Bearings. Proceedings of the First International Symposium, ETH Zurich, June 6...8, 1988. Berlin a.o., Springer-Verlag, 1989.