

# Ergebnisse bei der Anwendung magnetisch gelagerter Systeme

Prof. Dr. sc. techn. Dr.h.c. P.-K. Budig  
Dr.-Ing. R. Werner  
EAAT GmbH Chemnitz  
Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik  
Annaberger Str. 231  
D-09120 Chemnitz  
Tel.: (0371)5301911  
Fax.: (0371)5301913  
e-mail: [eaatgmbh@t-online.de](mailto:eaatgmbh@t-online.de)  
Internet: [www.eaat.de](http://www.eaat.de)

## Kurzfassung:

Gegenwärtig ist in den verschiedensten Industriezweigen ein Trend nach höheren Drehzahlen erkennbar. Die geforderten hohen Drehzahlen führen zu Umfangsgeschwindigkeiten, welche mit herkömmlichen Wälz- und Gleitlagern nicht mehr beherrschbar sind. Magnetlager stellen daher für viele Anwendungen eine technisch und ökonomisch sinnvolle Alternative zu den konventionellen Lagerprinzipien dar. Bedingt durch die berührungslose Arbeitsweise der Magnetlager können Schmiersysteme entfallen, womit auch den ökologischen Erfordernissen Rechnung getragen wird.

Bei magnetgelagerten Werkzeugspindeln eröffnet sich durch die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC) die Möglichkeit, Werkstücke in kürzerer Zeit, in besserer Qualität und höherer technologischer Flexibilität herzustellen. Im Vortrag werden Anwendungen magnetgelagerter Bearbeitungsspindeln für das Fräsen, Bohren, Innenrund-Schleifen, Wafer-Schleifen und Polieren erläutert. Dabei stellt jede Bearbeitungsaufgabe spezifische Anforderungen an das dynamische Verhalten der magnetischen Spindellagerung. Die wesentlichen Bearbeitungsergebnisse werden vorgestellt.

Bei Pumpen und Verdichtern können durch höhere Drehzahlen energetisch günstigere Arbeitspunkte realisiert werden. Die Baugrößen der Aggregate lassen sich durch Anwendung der Monoblockbauweise reduzieren. Die verschleißfreie Arbeitsweise der Magnetlager führt zu langen Wartungsintervallen.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet für Magnetlager ist die Nukleartechnik, wobei die Lager für sehr hohe Zuverlässigkeit, den Einsatz im Hochvakuum und radioaktiver Umgebung zu dimensionieren sind. Die Anwendung von Magnetlagern in Choppern und Selektoren für Neutronenstrahlen wird im Vortrag unter dem Aspekt der rotordynamischen Gegebenheiten dargestellt.

## 1. Einleitung

Die Applikationsbeispiele magnetischer Lager lassen sich im wesentlichen in drei Hauptanwendungsgebiete:

- Bearbeitungsspindeln
- Pumpen und Verdichter
- nukleartechnische Geräte

einordnen. Für jedes Anwendungsgebiet werden spezielle Eigenschaften der magnetischen Lagerungen gefordert.

Es werden in diesem Beitrag ausschließlich aktive Magnetlager betrachtet. Das Grundprinzip aktiver Magnetlager läßt sich wie folgt beschreiben:

Ein Sensor mißt die Abweichung des Rotors von seiner Referenzlage. Aus diesem Meßwert leitet ein Regler ein Stellsignal ab, welches dem Eingang eines Leistungsverstärkers zugeführt wird. Der Leistungsverstärker speist einen solchen Strom in den Elektromagneten ein, daß dessen Magnetkräfte den Rotor in der Schwebe halten.

Die Vorteile von aktiven Magnetlagern gegenüber der konventionellen Lagertechnik resultieren im wesentlichen aus folgenden Aspekten:

- An Magnetlagern tritt kein Verschleiß auf. Dadurch ist eine hohe Präzision über lange Zeiträume gesichert. Auch nach dem Auftreten eventueller Überlastungen ist diese Präzision nicht beeinträchtigt.
- Durch eine Sollwertvorgabe im Lageregelkreis ist auch bei rotierender Welle eine gezielte Veränderung der Wellenposition mikrometergenau möglich. Damit bietet sich z. B. bei Werkzeugmaschinen die Möglichkeit, eine vom kreisförmigen Querschnitt abweichende Form ohne zusätzlichen Aufwand mikrometergenau zu bearbeiten.
- Die Wegmeßsysteme liefern dem Regelkreis ständig Signale über die augenblickliche Position und die Bewegungen bzw. Schwingungen der Welle in allen Achsen. Dadurch ist eine kontinuierliche Betriebsüberwachung und eine Diagnose des mechanischen Zustandes ohne zusätzlichen Aufwand gegeben
- Der Rotor kann im eingebauten Zustand bis zur Maximaldrehzahl gewuchtet werden.
- Es können die Bearbeitungskräfte ohne zusätzliche Geber erfaßt und so z.B. der Verschleiß der Schneiden während des Bearbeitungsvorganges gemessen werden.
- Durch die berührungslose Lagerung lassen sich Maschinen für höchste Drehzahlbereiche realisieren. Damit ist es möglich, z. B. Verdichter in ihrem energetisch günstigsten Arbeitspunkt zu betreiben.

## 2. Magnetgelagerte Bearbeitungsspindeln

### 2.1. Vorteile hoher Schnittgeschwindigkeiten

Der Einsatz magnetgelagerter Spindeln in der Bearbeitungstechnik zielt auf eine Erhöhung der Produktivität und die Sicherung der Qualität der Werkstücke, wobei magnetgelagerte

Bearbeitungsspindeln aufgrund ihrer hohen Drehzahlen besonders für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC) geeignet sind. Durch die HSC-Bearbeitung lassen sich eine Reihe von Vorteilen gegenüber der klassischen Zerspanungstechnik erreichen.

Durch die hohen Drehzahlen werden hohe Schnittgeschwindigkeiten erreicht. Es lassen sich bei kleinen Spandicken große Vorschübe realisieren. Dadurch werden große Spanvolumina pro Zeiteinheit erzielt. Wegen der hohen Schnittgeschwindigkeit sind die Zerspankräfte klein. Daher treten nur geringe Deformationen an Werkstück und Werkzeug auf. Die Oberflächenqualität wird verbessert. Bedingt durch die hohen Schnittgeschwindigkeiten wird nahezu die gesamte Wärme mit den Spänen abgeführt. Werkstück und Werkzeug bleiben kalt. Die Wärmedehnung der Werkstücke bleibt gering. Es läßt sich eine hohe Präzision erreichen.

Bei klassischen Zerspanungstechniken betragen die Schnittgeschwindigkeiten bei der Bearbeitung von Stahl ca. 250... 300 m/min. Beim Einsatz von HSC-Spindeln in Verbindung mit den geeigneten Werkzeugen sind Schnittgeschwindigkeiten von. bis zu 450 m/min erreichbar, wobei die maximalen Schnittgeschwindigkeiten meist durch die Werkzeuge begrenzt werden.

Bei der klassischen Aluminiumzerspanung werden Schnittgeschwindigkeiten von ca. 700 m/min angewendet. Beim Einsatz von HSC-Spindeln und den entsprechenden Werkzeugen sind derzeit Schnittgeschwindigkeiten bis zu 5.000 m/min im Aluminium möglich.

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele geben einen Einblick in die technologischen Möglichkeiten und die erreichten Ergebnisse beim Einsatz magnetgelagerter Spindeln für die verschiedensten Bearbeitungsaufgaben.

## **2.2. Bearbeitungsspindel für Fräs- und Bohrbearbeitung**

$n = 32.000 \text{ U/min}$

$P = 30 \text{ kW}$

$F = 600 \text{ N (radial)}$

$F = 1200 \text{ N (axial)}$

$D = 190 \text{ mm}$

$l = 700 \text{ mm}$

### Planfräsen:

Werkstück: Al Mg Si O, Fräslänge: 100 mm

Werkzeug: Vollhartmetall-Zylinderschaftfräser, Durchmesser 10 mm, 2-schneidig

Ergebnis: - Oberflächenrauheit RzD < 5,7  $\mu\text{m}$

Anmerkung: Die periodisch örtlich wiederkehrenden Spitzen mit ca. 3  $\mu\text{m}$  Höhe werden durch den Wechsel der Vorschubrichtung beim Planfräsen verursacht. Der Fräser arbeitet abwechselnd im Gleich- und Gegenlauf, wodurch sich an den jeweiligen Schnittkanten Unterschiede in der Spangeometrie ergeben.

### Zirkularfräsen:

Werkstück: Al Mg Si O, Durchmesser der Ausfräsung: 39,94 mm

Werkzeug: Vollhartmetall-Zylinderschaftfräser, Durchmesser 10 mm, 2-schneidig

Ergebnis: - Kreisformabweichung < 7,2  $\mu\text{m}$

Anmerkung: Die Kreisformabweichungen von 7,2  $\mu\text{m}$  in der Nähe der Koordinatenachsen werden durch die Umkehrspanne der Vorschubantriebe an der Maschine verursacht.

## Bohren

Werkstück: Al Mg Si O

Werkzeug: PKD-Aufbohrwerkzeug, 1-schneidig, Durchmesser 50 mm  
Drehzahl: 30.000 U/min, Schnittgeschwindigkeit: 4.700 m/min

Ergebnis: - Max. Abweichung von der idealen Kreisform: 1,6  $\mu\text{m}$

### **2.3. Polierspindel für optische Oberflächen**

$n = 1000 \text{ U/min}$

$P = 50 \text{ W}$

$F = 80 \text{ N}$  (radial und axial)

$D = 160 \text{ mm}$

$l = 400 \text{ mm}$

#### Besonderheiten:

- Bewegung der Spindelwelle von +/- 1,5 mm um ihre geometrische Achse im Magnetlager
- Realisierung einer Planetenbewegung des Schleifkörpers durch die Magnetlager

### **2.4. Schleifspindel für Wafer-Oberflächen**

$n = 8000 \text{ U/min}$

$P = 4,8 \text{ kW}$

$F = 300 \text{ N}$  (radial und axial)

$D = 210 \text{ mm}$

$l = 600 \text{ mm}$

#### Besonderheiten:

- Verstellung des Neigungswinkels der Spindelwelle um +/- 0,1 mm in den Magnetlagern
- elektronische Vorgabe des Neigungswinkels mit einer Auflösung von kleiner als 0,1  $\mu\text{m}$

#### Ergebnis:

- TTV - Werte von  $\leq 2 \mu\text{m}$   
(TTV: total thickness variation)

### **2.5. Schleifspindel für das Innenrund-Schleifen**

$n = 38.000 \text{ U/min}$

$P = 12 \text{ kW}$

$F = 400 \text{ N}$  (radial und axial)

$D = 170 \text{ mm}$

$l = 600 \text{ mm}$

#### Ergebnis:

- Kreisformfehler kleiner 0,2  $\mu\text{m}$

Derzeit wird eine Bearbeitungsspindel für die Fräsbearbeitung mit folgenden Daten erprobt:

$$n = 50.000 \text{ U/min}$$

$$P = 50 \text{ kW}$$

$$F = 1000 \text{ N (radial und axial)}$$

$$D = 240 \text{ mm}$$

$$l = 600 \text{ mm.}$$

### 3. Verdichter

Folgende Verdichter wurden mit Magnetlagerungen ausgerüstet:

1. magnetgelagerter Verdichter zur Belüftung von Kläranlagen

$$n = 22.000 \text{ U/min}$$

$$P = 80 \text{ kW}$$

$$m = 80 \text{ kg (rotierende Masse)}$$

2. magnetgelagerter Verdichter für Einsatz in neuartigen Klimaanlage

$$n = 11.000 \text{ U/min}$$

$$P = 100 \text{ kW}$$

$$m = 120 \text{ kg (rotierende Masse)}$$

Betrieb im Vakuum (5 ... 20 Torr)

#### Besonderheiten:

- hohe Zuverlässigkeit
- lange Wartungsintervalle
- geringe Lagerverluste im Vergleich zu konventionellen Lagern
- hoher Wirkungsgrad

Bild 1: Schematische Darstellung des Rotors

Bild 2: Eigenschwingformen und Eigenfrequenzen des Rotors

Bild 1 zeigt die schematische Darstellung des Rotors des erstgenannten Verdichters. Mit  $X_{L1}$  und  $X_{L2}$  wurden die Lagerebenen der Radiallager bezeichnet.  $X_{M1}$ ,  $X_{M2}$  und  $X_{M3}$  kennzeichnen die Ebenen der Wegmeßsensoren. Aus Gründen der Festigkeit und der elektromagnetischen Auslegung des Antriebsmotors darf dessen Achsloch einen bestimmten Durchmesser nicht überschreiten, so daß die Biegeeigenfrequenz des Rotors sehr nahe bei der maximalen Drehfrequenz liegt. Der Rotor darf nicht als starrer Körper angesehen werden. Wegen konstruktiver Gegebenheiten sind die Einbauebenen von Magnetlagern und Wegmeßsensoren nicht frei wählbar. Deshalb sind die Biegeeigenformen des Rotors zu berücksichtigen.

Bild 2 zeigt die ersten fünf Eigenschwingformen des Rotors. Die beiden ersten Eigenschwingformen sind Starrkörpermodi, wobei der Rotor ohne sich zu verformen in seiner elastischen magnetischen Aufhängung schwingt. Diese Eigenschwingformen sind mit Magnetlagern in der Regel gut zu beherrschen, da die Auslenkung in den Lagerstellen L1 bzw. L2 stets phasenrichtig zu den Auslenkungen in den dazugehörigen Meßstellen M1 bzw. M2 erfolgt.

Bei den Biegeeigenformen lassen sich 3 Fälle unterscheiden:

a) Die Lagerstelle befindet sich in einem Schwingungsknoten. Das Lager kann die betreffende Eigenschwingung nicht beeinflussen. Das System ist nicht steuerbar.

b) Die Meßstelle befindet sich in einem Schwingungsknoten. Der Regelkreis des Magnetlagers kann nicht auf die Schwingung reagieren, da sie vom Meßsystem nicht erfaßt wird. Das System ist nicht beobachtbar.

c) Der Schwingungsknoten befindet sich zwischen Meßstelle und Lagerstelle. Die Auslenkung in der Meßstelle erfolgt entgegengesetzt zur Auslenkung in der Lagerstelle. Das Magnetlager ist bei dieser Schwingfrequenz instabil, da der Regelkreis eine Lageabweichung der Welle zu vergrößern versucht (Mitskopplungseffekt).

Es ist erkennbar, daß bei der 3. Eigenschwingform (1. Biegeeigenfrequenz, V-Schlag) das Lager 2 destabilisierend wirkt, da der Schwingungsknoten zwischen Meßstelle M2 und Lagerstelle L2 liegt. Durch das Lager 1 wird keine wesentliche Stabilisierung erreicht, da sich diese Lagerstelle sehr nahe am Schwingungsknoten befindet. Die Folge ist eine Schwingneigung auf der 1. Biegeeigenfrequenz.

Bei der 4. Eigenschwingform (2. Biegeeigenfrequenz, S-Schlag) sind die Verhältnisse ähnlich, wobei hier ein Schwingungsknoten zwischen Lagerstelle L1 und Meßstelle M1 liegt.

Die 5. Eigenform wurde durch die Magnetlager gut gedämpft, da hier im Lager 2 relativ große und gleichphasige Auslenkungen in Lagerstelle L2 und Meßstelle M2 auftreten.

Ein Betrieb des Verdichters mit Drehzahlen bis in die Nähe der ersten Biegeeigenfrequenz ist wegen der Probleme bei der 3. und 4. Eigenschwingform nicht möglich. Daher wurde eine 3. Meßstelle M3 am Wellenende angeordnet. Dort treten sowohl bei der 3. als auch bei der 4. Eigenschwingform die größten Auslenkungen auf, so daß eine gute Beobachtbarkeit des Systems gegeben ist. Aus dem Meßsignal der Meßstelle M3 wird über Bandpaßfilter die Frequenz der 3. Eigenschwingform dem Lager L2 und die Frequenz der 4. Eigenschwingform

dem Lager L1 zugeführt. Damit war eine wirksame Dämpfung des Rotors im gesamten Frequenzbereich gegeben.

Im folgenden werden die berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen gegenübergestellt:

Ordnung der Rotor-eigenfrequenz	gemessen	berechnet	Bemerkung
1.	48 Hz	49,6 Hz	Starrkörperschwingung
2.	80 Hz	80,6 Hz	Starrkörperschwingung
	160 Hz	-----	Schwingung des Stators
3.	420 Hz	402,9 Hz	V-Schlag
4.	850 Hz	850,3 Hz	S-Schlag
5.	-----	1483 Hz	meßtechnisch nicht nachweisbar

Die Resonanzfrequenz von 160 Hz wurde durch die Rotordynamikberechnung nicht erfaßt, da es sich hierbei um Schwingungen der Statorteile auf dem Grundrahmen handelte. Bei der 5. Eigenfrequenz war die mechanische Dämpfung des Rotors bereits so groß, daß diese Resonanzstelle meßtechnisch nicht exakt bestimmt werden konnte.

Ein wesentliches Problem bei der Berechnung der Rotordynamik ist die Frage, in welcher Weise die Blechpakete von Motoren oder Magnetlagern die Welle versteifen. Hierbei ist unter anderem die axiale Verspannung des Blechpaketes und das Schrumpfmaß des Rotorinnendurchmessers bezüglich des Wellensitzes maßgebend.

#### 4. Neutronenstrahltechnologie

Es wurden bisher folgende Geräte mit Magnetlagern ausgerüstet:

1. Neutronenstrahl-Selektor:  $n = 15.000 \text{ U/min}$   
 $P = 120 \text{ W}$   
 $m = 12 \text{ kg}$  (rotierende Masse)
2. Neutronenstrahl-Chopper:  $n = 30.000 \text{ U/min}$   
 $P = 1 \text{ kW}$   
 $m = 4 \text{ kg}$  (rotierende Masse)

##### Besonderheiten:

- Betrieb im Vakuum ( $10^{-3} \text{ Torr} \dots 10^{-2} \text{ Torr}$ )
- hohe Zuverlässigkeit
- Unterbrechungsfreie Stromversorgung
- lange Wartungsintervalle

Bei Choppern und Selektoren dürfen die Kreiseffekte des rotierenden Rotors nicht vernachlässigt werden, da die Trägheitsmomente derartiger Rotoren bezüglich der Drehachse die gleiche Größenordnung wie die Trägheitsmomente bezüglich der beiden anderen Hauptträgheitsachsen haben.

Erstens tritt eine Präzessionskreisfrequenz  $\omega_p$  auf. Es gilt:



$$\omega_p = M_S / D$$

mit:  $M_S$  ... Störmoment am Rotor und  
 $D$  ... Drehimpuls des Rotors

Setzt man in die obige Gleichung die technisch relevanten Werte für  $M_S$  und  $D$  der aufgebauten Rotoren ein, erhält man Präzessionskreisfrequenzen von einigen Hertz. Diese niedrigen Frequenzen können in der Regel vom Magnetlager gut ausgeregelt werden und bereiten daher keine Probleme.

Zweitens besitzt der Rotor eine Nutationskreisfrequenz  $\omega_N$ . Es gilt:

$$\omega_N = ( J_{xx} / \sqrt{J_{yy} \times J_{zz}} ) \times \omega$$

mit  $\omega$  ... aktuelle Drehkreisfrequenz  
 $J_{xx}$  ... Trägheitsmoment bezüglich Drehachse  
 $J_{yy}$ ,  $J_{zz}$  ... Trägheitsmomente in den senkrecht zur Drehachse liegenden Hauptträgheitsachsen

Bei rotationssymmetrischen Körpern gilt:  $J_{yy} = J_{zz}$ . Falls sich außerdem  $J_{xx} = J_{yy} = J_{zz}$  ergibt, so erhält man eine Nutationskreisfrequenz, die immer gleich der aktuellen Drehkreisfrequenz ist. Es stellt sich Dauerresonanz ähnlich wie bei einem Kugelkreisel ein. Solche Rotoren lassen sich äußerst schwer stabilisieren. Durch geeignete Wahl der geometrischen Rotordaten muß immer  $J_{xx}$  ungleich  $J_{yy}$  (bzw.  $J_{zz}$ ) erreicht werden. Ist  $J_{xx} > J_{yy}$ , erhält man rotordynamische Verhältnisse ähnlich einer Scheibe, während bei  $J_{xx} < J_{yy}$  der Rotor einem gestreckten Zylinder ähnelt.

## 5. Zusammenfassung

An Beispielen von Bearbeitungsspindeln für verschiedene Bearbeitungsaufgaben, Verdichtern und nukleartechnischen Geräten wurde gezeigt, daß sich die Vorteile bei der Anwendung aktiver magnetischer Lager durch die nachfolgend aufgeführten Effekte zusammenfassen lassen:

### Ökonomische Effekte:

- Verringerung des Bauvolumens,
- Verringerung Aufstellfläche,
- Erhöhung Wirkungsgrad und Lebensdauer

### Ökologische Effekte:

- Verminderung Lärmemission,
- schmiermittelfreie Technik

### Technologische Effekte:

- Realisierung von Zusatzfunktionen
- Verbesserung der Präzision
- neue technologische Möglichkeiten

Um diese Effekte auch optimal ausnutzen zu können, müssen Magnetlagerung und das gesamte Umfeld des technologischen Prozesses als System betrachtet werden. Beispielsweise müssen bei magnetgelagerten Bearbeitungsspindeln die Komponenten

- Bearbeitungsspindel (Magnetlagerung, Reglerparameter),
- Werkzeug
- Werkstück
- Maschine
- Steuerung

sorgfältig aufeinander abgestimmt sein.

Darüber hinaus müssen bei allen Magnetlageranwendungen die rotordynamischen Gegebenheiten bei biegeelastischen Rotoren und ggf. die Kreiseffekte berücksichtigt werden.

## 6. Literatur

- /1/ Schubert, Th.: Beitrag zur Realisierung eines aktiven radialen Magnetlagers  
1985 Diss. A, TH Karl-Marx-Stadt
- /2/ Jugel, U.: Beitrag zur Realisierung einer aktiven magnetischen Lagerstelle  
1985 Diss. A, TH Karl-Marx-Stadt
- /3/ Traxler, A.: Eigenschaften und Auslegung von Berührungsfreien elektromagnetischen Lagern  
1985 Diss. Nr. 7851, ETH Zürich
- /4/ Budig, P.-K., Timmel, H., Schubert, Th., Jugel, U., Seyfarth, K.: Aktive magnetische Lager - eine Übersicht über theoretische Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise, Entwurf und spezielle Probleme.  
ELEKTRIE Berlin 42 (1988) H. 10 und 11
- /5/ Schweizer, G.: Mechatronics- a concept with examples on active magnetic bearings  
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers  
September 1990, University of Cambridge
- /6/ P.-K. Budig, D. Waldeck, R. Werner: Regelung aktiver Magnetlager für wellenelastische Rotoren  
antriebstechnik 39 (2000) Nr. 5 und 6