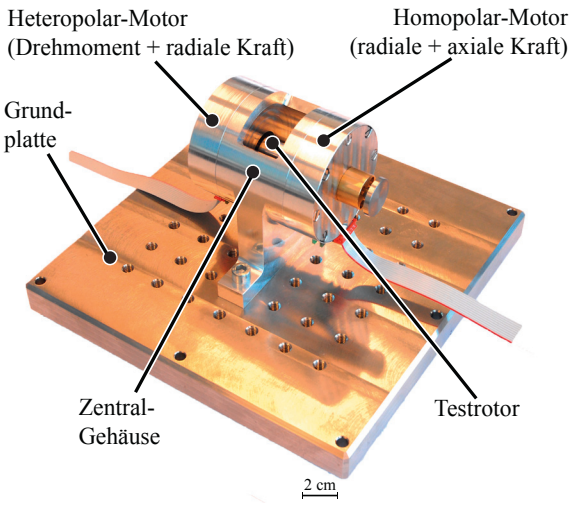
Weltrekord für Magnetlager – 500 000 min^{-1} und mehr

Höchste Drehzahlen dank Magnetlagerung

Anwendungen mit hohen Drehzahlen verlangen herausragende Lagerlösungen. Neben Kugellagern setzt man vermehrt Gas- und Magnetlager ein. Vor allem bei Betrieb im Vakuum bieten Magnetlager grosse Vorteile. Ein neues Konzept für Drehzahlen von über 500 000 min^{-1} dient nun als Basis für optische Systeme und Drallräder für Satelliten.

» *Dr. Christof Zwyssig, Geschäftsführer, Celeroton AG*



Ein Demonstrator für ein magnetgelagertes Drallrad mit einer Drehzahl von über 200 000 min^{-1}

Welches Lager für welche Anwendung? Diese Frage stellt sich besonders im Zusammenhang mit extrem hochdrehenden Antriebssystemen. Einerseits stellen Geschwindigkeit, Lebensdauer, Beschleunigung, Temperatur und Bauraum die Entwickler grundsätzlich vor grosse Herausforderungen, andererseits könnten die Anforderungen kaum unterschiedlicher sein: Start/Stopp-Sequenzen oder Dauerlauf, Betrieb im Vakuum versus Kompressoren für Gas oder Fluid, Kälte in Kryogenanwendungen oder Umgebungstemperatur bei Lüftern, starke Vibrationseinwirkung auf das Lager versus minimal durch das Lager erlaubte Vibrationen wie in Satelliten.

Ab 100 000 min^{-1} braucht es massgeschneiderte Lager

Bei der Lagerwahl spielen auch die erwarteten Stückzahlen und Herstellkosten eine Rolle. Bei Anwendungen ab 100 000 min^{-1} braucht es im Prinzip ein massgeschneidertes Lager. Die Grafik zeigt die Vor- und Nachteile verschiedener Lagerungsarten auf.

Kugellager

Die Kugellagerung bietet Vorteile bezüglich Steifigkeit und Lagerkraft, zudem ist sie günstig und kompakt. Dagegen sind die Lebensdauer und die Drehzahl aufgrund hoher mechanischer Abnutzung und Verluste beschränkt. Zudem eignet sich ein Kugellager für hohe Drehzahlen nicht für den Einsatz im Vakuum, da das Schmiermittel verdampfen kann.

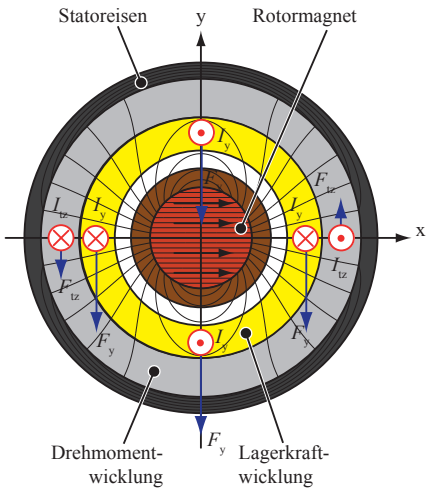
Gaslager

Es gibt diverse Ausführungsarten von Gaslagern, wobei man grundsätzlich zwischen statischen und dynamischen Gaslagern unterscheidet. Statische Gaslager haben eine externe Druckluftversorgung, bei dynamischen baut sich das Luftkissen durch die eigene Rotation auf. In diesem Artikel sind nur letztere berücksichtigt, da statische Gaslager nur bei stationären Anwendungen in Frage kommen.

Dynamische Gaslager weisen einige Gemeinsamkeiten mit Kugellagern auf – die hohe Steifigkeit und Lagerkraft sowie die kompakte Grösse. Ein Nachteil liegt auch hier beim Betrieb im Vakuum – dieser ist nicht möglich, da sich in diesem Zustand kein Gaskissen aufbauen kann auf dem der Rotor schwebt. Im Gegensatz zu Kugellagern ist aber die Lebensdauer bei einem Gaslager im Dauerlauf theoretisch unbegrenzt, es eignet sich aber schlecht bei vielen Start/Stopp-Zyklen. Bei der Gaslagerung muss sich nämlich bei jedem Start ein neues Gas-/Luftkissen aufbauen, so dass unter einer gewissen Minimaldrehzahl mechanische Reibung auftritt. Des Weiteren zeigen sich grosse Herausforderungen bei den Produktionstoleranzen und der Auslegung für ausreichende Stabilität und tiefe Verluste.

Magnetlager

Ähnlich wie das Gaslager erhöht die Magnetlagerung die Lebensdauer des Antriebs auf theoretisch unbegrenzte Zeit. Als einzige Lagerungsart erlaubt es den Betrieb im Vakuum, da es die Lagerkräfte unabhängig von einer Atmosphäre rein elektromagnetisch generiert und kein Schmiermittel nötig ist. Nachteile bestehen hier bezüglich Komplexität und Grösse. Daneben bestehen bis anhin bloss Lösungen für limitierte Drehzahlen bis etwa 120 000 min^{-1}.



Das Funktionsprinzip der Generierung von Kräften (F_x, F_y) und Drehmoment (F_{tz}) eines lagerlosen Motors mit Luftspaltwicklung

Anwendungsbeispiele für Magnetlager

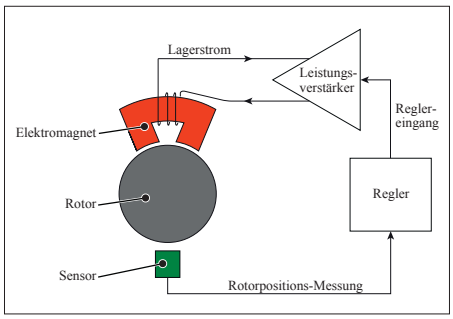
- Optische Systeme mit hohen Drehzahlen wie Beam Chopper: Diese Anwendungen laufen im Vakuum oder unter einer Heliumatmosphäre, um Luftreibungsverluste zu minimieren und die Optik vor Verschmutzung zu schützen. Die Nachteile des Magnetlagers bezüglich Platzbedarf und Komplexität fallen hier kaum ins Gewicht, da die gesamte optische Einrichtung um ein Vielfaches grösser und komplexer ist als das Lager selbst.
- Drallräder für Satelliten: Bei Satelliten setzt man Drallräder ein, um die Fluglage im Weltraum zu kontrollieren und stabilisieren. Mittels Drehzahländerungen lassen sie sich in die gewünschte Richtung drehen. Weil Satelliten auf leichte Komponenten angewiesen sind, strebt man bei Drallrädern oft eine Gewichtsersparnis mittels Drehzahlsteigerung an. Zudem sollten sie möglichst geringe Vibrationen generieren und für den Betrieb im Voll- oder Teil-Vakuum geeignet sein. Somit erweist sich das Magnetlager als die optimale Lösung dafür.
- Spezielle Zentrifugen und weitere physikalische Testeinrichtungen wie beispielsweise für die mechanische Beschleunigung von Partikel.

Neuentwicklung für hohe Drehzahlen

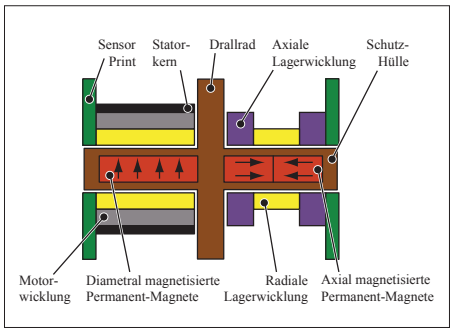
Die meisten Magnetlager basieren auf Reluktanzkräften. Ein magnetischer Fluss im Luftspalt zwischen dem Stator und dem Rotor generiert diese Kräfte, wobei Statorströme den Fluss regeln. Bei diesem Magnetlager-Typ ist die Drehzahl durch steigende Wirbelstromverluste im Rotor und Statoreisen, eine limitierte Aktor-Bandbreite und einen hohen Blindleistungsbedarf begrenzt. So waren bisher mit Magnetlagern maximale Drehzahlen von etwa 120 000 min^{-1} realisierbar.

Zur Überwindung dieser Drehzahllimitierungen haben die Professur für Leistungselektronik (PES) der ETH Zürich und Celeroton gemeinsam ein neues Magnetlagerkonzept erforscht. Es erlaubt Drehzahlen von 500 000 min^{-1} und mehr, was nach Kenntnisstand des Autors den Weltrekord für ein magnetgelagertes Antriebssystem darstellt.

Das Lager basiert auf Lorentz- statt Reluktanzkräften. Eine Wicklung, die im Luftspalt zwischen den Rotormagneten und dem Statoreisen liegt, erzeugt diese Kräfte – Ströme in der Wicklung regeln sie. Das Magnetfeld des Permanentmagneten lässt sich zugleich für die Generierung des Drehmoments verwenden, was eine kurze Bauweise als so genannt lagerlosen Motor erlaubt.



Das Funktionsprinzip eines aktiven Magnetlagers



Querschnitt durch den Demonstrator für ein magnetgelagertes Drallrad

Anwendungsbeispiel Drallrad

Bei den oben beschriebenen Drallrädern für Satelliten griff man bisher meist auf Kugellager zurück. Zwar gibt es auch schon einige magnetgelagerte Modelle, aber wegen der vergleichsweise tiefen Maximaldrehzahlen kommen sie bisher vorwiegend in grösseren Satelliten zum Einsatz. Für kompakte Satelliten ist man auf Drallräder mit höheren Drehzahlen angewiesen, um die Kennziffer des Drallrads – den Drehimpuls – im Verhältnis zum Gewicht zu erhöhen.

Bis anhin konnte man Drallräder entweder aufgrund der benötigten Lebensdauer oder der Maximaldrehzahl typischerweise nur mit 5000 bis 10000 min^{-1} betreiben. Mit dem neuen Magnetlager ist theoretisch auch eine Drehzahlsteigerung auf über 200 000 min^{-1} und damit eine starke Minimierung des Gewichts möglich. Weiter lassen sich dank dieser Technologie auch höchste Drehzahlen im Voll- und Teil-Vakuum realisieren. «

Lagerart	*Vorteile*	*Nachteile*
Kugellager	• Steifigkeit/Lagerkraft • Verfügbarkeit • Kompaktheit • Start/Stopp-Zyklen • Kosten	• Vakuum nicht möglich (für hohe Drehzahlen) • Lebensdauerlimitierung (besonders bei sehr hohen Drehzahlen)
Gaslager	• Lebensdauer (vor allem im Dauerlauf) • Steifigkeit/Lagerkraft • Kompaktheit	• Vakuum nicht möglich • Limitierte Anzahl Start/Stopp-Zyklen • Drehzahllimitierung durch Produktionstoleranzen, Instabilität und Verluste
Magnetlager	• Lebensdauer • Vakuum möglich • Aktive Kontrolle von Rotordynamik und Vibrationen	• Komplexität/Grösse • Geschwindigkeitslimitierung durch Blindleistung und Verluste • Kosten

Eine Übersicht über Lagerungsarten für hohe Drehzahlen

Infoservice
Celeroton AG
Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich
Tel. 044 250 52 20, Fax 044 250 52 29
info@celeroton.com, www.celeroton.com