

Magnetlager

Prinzip und Berechnungsgrundlagen



Revolve Magnetic Bearings Inc.

von

Roland Steffen, 3387259

rolandsteffen@gmx.de
<http://www.rolandsteffen.de>

Inhaltsverzeichnis

Begründungen.....	3
Kurzer Überblick	3
Was sind Magnetlager	3
Technische Entwicklungsgeschichte.....	5
Magnetlagerarten	5
Vor- und Nachteile von Magnetlagern.....	7
Magnetische Lagerung eines einfachen starren Körpers.....	8
Magnetkraft und wichtige Größen	11
Resümee	13
Quellen	13

Begründungen

Dieser Text dient als Vorlage für meinen Vortrag über Magnetlager im Rahmen der Vorlesung Feinwerktechnische Fertigung. Ich habe mir das Thema Magnetlager ausgesucht, weil dies ein Paradebeispiel für ein mechatronisches System ist. Es ist natürlich klar, dass dieser Text keinesfalls umfassend ist. Ich habe mich hauptsächlich auf die Grundlagen und allgemeines zu Magnetlagern beschränken. Diese Einschränkung hat zwei Gründe. Der Erste währ, dass man natürlich zuerst die Grundlagen verstanden haben muss, bevor man sich daran wagt, sich in dieses komplexe Thema zu vertiefen. Das eine ausführliche Abhandlung des Themas natürlich mein Zeitbudget sprengen würde ist der zweite Grund.

Kurzer Überblick

Damit sich jeder etwas unter dem Begriff Magnetlager (eng. magnetic bearings) vorstellen kann, werde ich zunächst einen kleinen Überblick geben, was Magnetlager eigentlich sind. Anschließend beschreibe ich die geschichtliche Entwicklung dieser hervorragenden Möglichkeit der berührungslosen Aufhängung und Lagerung. Darauf folgt ein Überblick über die verschiedenen Lagerarten und -typen. Dabei beschränke ich mich stark auf die grundlegenden Prinzipien der Lagertechniken. Die Vor- und Nachteile der Magnetlagerung gegenüber herkömmlichen Lagern werden dann im folgenden Abschnitt beschreiben. Um einen kleinen Einblick in die Komplexität der Berechnungen und Auslegung der Regler zu vermitteln, zeige ich dies an einem einfachen Lagerbeispiel mit einem Freiheitsgrad. Der nächste Abschnitt soll nun, wie gerade erwähnt, erklären was Magnetlager sind.

Was sind Magnetlager

Ein Magnetlager realisiert die berührungslose Aufhängung eines Systems. Dies wird durch einen komplexen mechatronischen Aufbau aus Sensor, Regler, Leistungsverstärker und Elektromagnet ermöglicht. Die Aufhängung kann auch permanentmagnetisch realisiert werden, ist dann aber nicht so dynamisch in ihrem Verhalten und in ihren Freiheitsgraden eingeschränkt.

Die Funktionsweise eines Magnetlagers lässt sich am einfachsten wie folgt beschreiben. (Abb. 1) Ein Sensor misst ständig den Abstand zwischen Welle und Lager. Über einen Regler, dieser kann sowohl analog als auch digital arbeiten, und einen Leistungsverstärker wird der Spulenstrom so geregelt, und damit auch das Magnetfeld, dass die Welle in ihrer Sollposition gehalten wird.

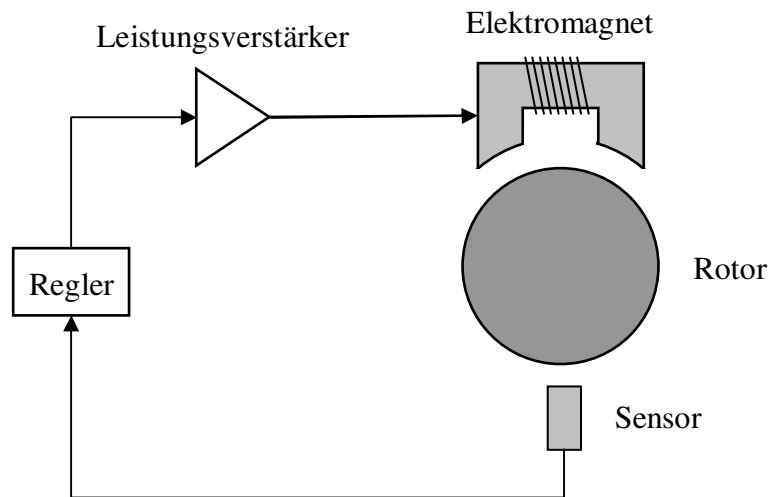


Abb. 1: Funktionsprinzip der aktiven elektromagnetischen Lagerung

Natürlich sind für die Lagerung einer Welle mehrere Magnetlager erforderlich. Um eine Welle in allen Freiheitsgraden festzuhalten benötigt man zwei Radiallager und ein Axiallager. Auch Linearlager lassen sich realisieren. Damit kann ein berührungsloses Gleiten auf einer Schiene oder Ebene ermöglicht werden.

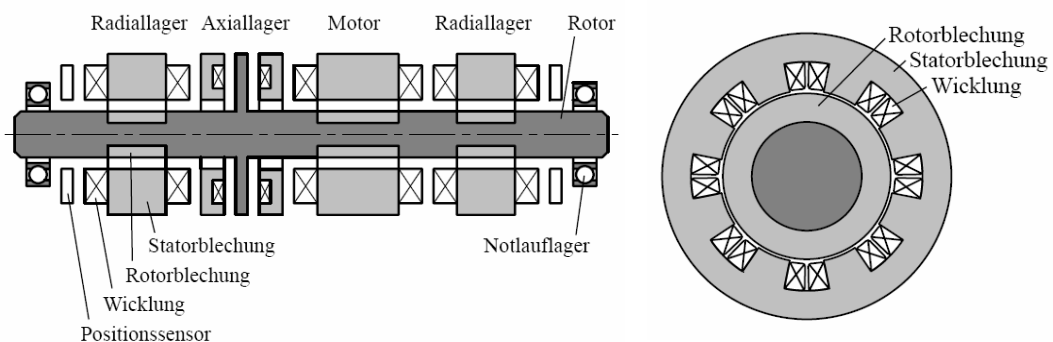


Abb. 2: Magnetgelagerter Rotor (links) und Radiallager mit 8 Polen.

Quelle: Zur sensorlosen Magnetlagerung, Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der technischen Wissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich von Ladislav Kučera

Magnetlager werden dort eingesetzt, wo herkömmliche Lagerarten, wie hydrodynamische Gleitlager und Kugellager, versagen. Sie sind dann angesagt, wenn es um hohe Drehzahlen, Verschleiß- und Schmiermittelfreiheit, Sauberkeit oder eine aktive Dämpfung geht. Die Hauptanwendungsgebiete liegen in der Vakuumtechnik, bei Werkzeugmaschinen und bei Turbomaschinen.

Technische Entwicklungsgeschichte

Die Idee, der berührungslosen Aufhängung eines Körpers durch magnetische Kräfte, ist schon sehr alt. Eine technische Umsetzung wurde allerdings erst Ende der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts möglich, als die zur Regelung notwendige Elektronik und Mathematik dazu bereit stand.

H. Kemper beantragte 1937 ein Patent für eine „schwebende Aufhängung“. Dabei beschrieb er einen Versuch, in dem ein Elektromagnet mit einer Polfläche von 30 x 15 cm bei 0,25 Tesla und bei einer Leistung von 250 W eine Last von 210 kg im Abstand von 15 mm trägt. Für die Regelung verwendete er induktive oder kapazitive Sensoren und Röhrenverstärker. Dieser Versuch war der Vorgänger der späteren Magnetschwebefahrzeuge.

Die Magnetschwebefahrzeuge wurden in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts vor allem in England, Japan und Deutschland in verschiedenen Bauformen entwickelt. Die KOMET der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm erreichte auf einer Versuchstrecke 1977 eine Geschwindigkeit von 360 km/h.

Im Jahr 1937 arbeitet Beams und Holmes an der University of Virginia an elektromagnetischen Aufhängungen für spezielle Rotoren. Unter anderem waren es kleine Stahlkugeln, die Beams auf sehr hohe Drehzahlen brachte, um ihre Festigkeit zu prüfen. Dabei wurde die spektakuläre Drehzahl von 18 Millionen min^{-1} (300 kHz) erreicht, um die Stahlkugeln in einem Zentrifugalfeld von 20 Millionen g zum Bersten zu bringen (1946).

Ein Gebiet, das einige interessante Magnetlagerkonstruktionen hervorgebracht hat, ist die Raumfahrttechnik. Eine der Untersuchungen zielte darauf, einen Drehgeschwindigkeitsmesskreis magnetisch zu lagern, und aus den Regelsignalen der Magnetlagerung direkt auf das Messsignal Winkelgeschwindigkeit zu schließen. Gebaut wurden Drallräder zur Lageregelung von Satelliten. Auch zur schwingungsfreien Lagerung empfindlicher Komponente, z. B. für optische Anlagen in Satelliten oder für Mikro-g-Versuche sind Magnetlagerungen vorgeschlagen worden.

Der Einsatz von Magnetlagern hat in technischen Anwendungen in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Ursache dafür ist die bessere Verfügbarkeit von Komponenten für die Leistungselektronik und die Datenverarbeitung (Mikrocontroller). Außerdem gab es große Fortschritte beim Reglerentwurf und der Berechnung des dynamischen Verhaltens von Rotoren.

Magnetlagerarten

Gemeinsam ist allen Magnetlagern, das sie den Schwebezustand stabil halten müssen, was aber nicht immer in allen Freiheitsgraden möglich ist. Grundsätzlich lassen sich die Magnetlager in zwei Hauptgruppen einteilen.

Die erste Gruppe arbeitet nach dem Prinzip des magnetischen Widerstands (Reluktanz). Dabei wirkten die Kräfte immer so, dass sie versuchen den magnetischen Widerstand zu verkleinern. Eine magnetische Kraft dieser Art entsteht immer an der Oberfläche zweier Materialien mit unterschiedlicher magnetischer Permeabilität μ_r , z. B. Eisen und Luft. Sie wirkt senkrecht zur

Oberfläche und ist stark von der Differenz der Permeabilitäten abhängig. Der magnetische Widerstand ist umgekehrt proportional zu μ_r .

Die erste Untergruppe stellen die aktiven Magnetlager da. Hier wird über einen Elektromagnet die entsprechende Magnetkraft erzeugt. Der Spulenstrom wird dabei über einen Regelkreis ständig angepasst. Dabei gibt es unterschiede in der Art und Weise der Regelung und Signalerfassung.

Die nächste Untergruppe sind die LC-Resonanz-Magnetlager. Dies ist ein passiver Lagertyp bei dem das Lager als leicht verstimmt LC-Kreis ausgelegt wird. Durch eine Spaltänderung ändert sich die Induktivität des LC-Kreises so, dass dieser in Resonanz gerät. Wodurch der Spulenstrom erhöht wird, welcher der Spaltänderung entgegenwirkt. Die Systembedingte geringe Dämpfung dieser Regelung ist ein Nachteil. Von Vorteil ist allerdings der einfache Aufbau.

Permanentmagnete können allein einen ferromagnetischen Körper nicht frei in der Schwebelage halten. Es ist nachgewiesen (S. Earnshaw), dass ein Pol in einem statischen Kraftfeld kein stabiles Gleichgewicht haben kann, wenn die auftretenden Kräfte umgekehrt proportional zum Quadrat der Abstände wirken, wie das bei einer statischen magnetischen Aufhängung mit $\mu_r > 1$ der Fall ist. Ein Permanentmagnet kann jedoch als Entlastung eingesetzt werden. In Verbindung mit aktiven elektromagnetischen Lagern entstehen dann hybride Lösungen.

Eine letzte Untergruppe entsteht durch die Nutzung von diamagnetischen Materialien ($\mu_r < 1$). Durch Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) wird ein stabiles Schweben mit Hilfe von Permanentmagneten möglich. Die Supraleitung ist dadurch gekennzeichnet, dass bei tiefen Temperaturen der elektrische Widerstand vollständig fehlt. Ein Strom in der supraleitenden Spule wird weiter fließen, auch wenn keine Spannung mehr anliegt, Alle magnetischen Feldlinien werden aus dem Supraleiter durch den so genannten Meißner-Ochsenfeld Effekt herausgedrängt.

Die zweite Gruppe kennzeichnet die Lorentzkraft. Die Lorentzkraft wird über das Kreuzprodukt $F = I \times B$ beschrieben. Die Kraft wirkt hierbei senkrecht zum Strom und zum B-Feld. Innerhalb dieser Gruppe wird unterschieden zwischen den verschiedenen Arten den Strom zu erzeugen. Der Strom kann induziert werden, durch ein bewegtes permanentmagnetisches Feld, oder durch ein Wechselfeld eines Elektromagneten. Der Strom kann auch aktiv geregelt sein und mit einem Permanentmagnetfeld zusammenwirken.

Elektrodynamisches Schweben ohne aktive Regelung mit Permanentmagnetfeld stellte eine erste Untergruppe der auf der Lorentzkraft basierenden Magnetlager da. Das Elektrodynamische Schweben wird erreicht, wenn starke Wirbelströme induziert werden. Dies kann durch hochfrequenten Strom oder durch eine schnelle relative Bewegung von Rotor gegen Stator geschehen. Die abstoßenden Kräfte sind bei schneller Bewegung groß genug, den bewegten Körper zu tragen. Dieses System ist wegen seiner hohen Verluste aber nur mit Supraleitern realisierbar.

Die Interaktion von Wechselstrom und induziertem Strom führt auch zu einem passiven Schweben. Gegenüber dem vorhergehenden Fall ist die Relativgeschwindigkeit ersetzt durch ein Wechselfeld. Auch hier ist bei normaler Leitfähigkeit die Schwebekraft relativ klein und der Wirkungsgrad gering.

Außerdem haben diese so genannten Wechselstromlager schlechte Dämpfungseigenschaften.

Auch ein aktives System ist bei der Interaktion von Wechselstrom und induziertem Strom möglich. Der Hauptunterschied zwischen einem Induktionsmotor und dem vorher genannten Typ ist der, dass die den Motor antreibenden Kräfte tangential wirken und nicht radial. Es ist nun möglich, solche tangentialen Kräfte zur Lagerung zu verwenden, doch müssen dann zur Stabilisierung die Statorströme aktiv geregelt werden. In diesem Fall weist der Stator z. B. verschiedene Wicklungsanordnungen auf. Die erste Wicklung entspricht der eines Asynchronmotors, und sie erzeugt ein Drehmoment zum Antrieb des Ankers. Der Strom durch die zweite Wicklung erzeugt eine resultierende Kraft in radialer Richtung, wobei der Strom in Abhängigkeit vom Luftspalt zwischen Anker und Stator und synchron mit der Drehzahl so geregelt wird, dass der Anker berührungsfrei schwebt.

Eine letzte Untergruppe entsteht, wenn man die Feldwicklungen des induzierten Stroms des vorigen Typs durch einen Permanentmagneten ersetzt. Dies ist dann eine Kombination von Synchronmotor mit aktiver magnetischer Lagerung.

Vor- und Nachteile von Magnetlagern

Durch die berührungsfreie Lagerung wird der Einsatz von Schmierstoffen überflüssig und es entsteht kein kontaminierender Abrieb. Dies erlaubt den Einsatz in der Vakuumtechnik, in Reinst- und Sterilräumen und das Fördern von aggressiven oder besonders reinen Medien. Der Luftspalt im Magnetlager beträgt typischerweise wenige zehntel Millimeter, kann jedoch bei speziellen Anwendungen auch 20mm erreichen, wodurch allerdings die Lagerkräfte geringer werden.

Im Lager können höhere Umfangsgeschwindigkeiten erreicht werden. Die Umfangsgeschwindigkeit wird eigentlich nur noch durch die Festigkeit des Rotors bestimmt. Der Lagerdurchmesser der Welle kann somit größer gestaltet werden, was sich positiv auf die Steifigkeit und die Schwingungsempfindlichkeit auswirkt.

Die Lagerverluste liegen bei hohen Drehzahlen um den Faktor 5 bis 20 tiefer als bei konventionellen Lagern, was die Betriebskosten senkt.

Durch den fehlenden mechanischen Lagerverschleißes verringert sich der Wartungsaufwand und die Lebensdauer wird erhöht.

Die spezifische Tagfähigkeit des Lagers hängt von dem verwendeten ferromagnetischen Werkstoff und der Auslegung der Lagermagnete ab und kann bis zu 40 N/cm^2 betragen.

Die Steifigkeit und die Dämpfung wird weitgehend vom verwendeten Regler bestimmt und kann innerhalb physikalischer Grenzen der Aufgabe, dem jeweiligen Betriebszustand und der Rotordrehzahl angepasst werden. Das erlaubt es z. B., die Lager zur Schwingungsisolierung zu verwenden, kritische Drehzahlen ohne starke Amplitudenüberhöhungen zu durchfahren oder die Rotorbewegungen bei auftreten von äußeren Störungen zu stabilisieren.

Die Genauigkeit der Regelung, z. B. das genaue Drehen um eine vorgegebene Achse, wird fast nur durch die Qualität des Messsignals bestimmt.

Aus den auflaufenden Messsignalen kann eine Onlinediagnose für eine Betriebsüberwachung realisiert werden, was zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit führt.

Über das Magnetlager können nicht nur Schwingungen gedämpft sondern auch erzeugt werden. Die erzeugten Schwingungen können zum Auffinden von Rotorkennwerten dienen.

Die bisher genannten Vorteile werden allerdings durch ein paar Nachteile getrübt. Die Lager sind aufgrund ihres komplexen Aufbaus sehr teuer. Des Weiteren wird die Akzeptanz der Lager erschwert, weil die nötigen Kenntnisse darüber fehlen. Manche Gesichtspunkte, wie Sicherheits- und Zuverlässigkeitsaspekte, Energieverbrauch oder optimale Konstruktionsvarianten, zu denen es in Einzahlbeispielen durchaus überzeugende Antworten gibt, bedürfen für allgemeine Aussagen noch einer genaueren Prüfung.

Magnetische Lagerung eines einfachen starren Körpers

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den Berechnungsgrundlagen für die magnetische Lagerung. Dabei beschränke ich mich auf die aktive elektromagnetische Lagerung eines einfachen starren Körpers. Die aktive elektromagnetische Lagerung soll aus einem Elektromagnet bestehen, dessen Kraft über ein Regelkreis geregelt wird. Der Rotor soll ein einfacher nicht rotierender Körper sein. Auf rotordynamische Fragen gehe ich nicht ein.

Die Abbildung 3 zeigt den Regelkreis, der jetzt betrachtet werden soll. Ziel ist es, den Körper in einem bestimmten Abstand x_s zum Magneten frei schweben zu lassen. Die Regelung soll dafür verantwortlich sein, den Körper in dieser Gleichgewichtslage festzuhalten. Im Gleichgewicht ist der Körper dann, wenn die Summe aller auf den Körper einwirkenden Kräfte gleich Null ist. In diesem einfachen Fall sind das nur zwei Kräfte, die nach unten wirkende Gewichtskraft mg und die nach oben wirkende Magnetkraft F_m .

$$F_{ges} = F_m - mg$$

Die Auslenkung aus der Gleichgewichtslage wird über einen Sensor gemessen. Mit Hilfe des Sensorsignals steuert der Regler den Strom im Elektromagnet über den Leistungsverstärker so, dass die Gleichgewichtslage des Körpers stabilisiert wird. Ohne aktive Regelung ist kein stabiler Schwebezustand zu erreichen, das System wäre instabil. Damit die Magnetkraft überhaupt am Körper angreifen kann, muss dieser natürlich ferromagnetisch ($\mu_r \gg 1$) sein.

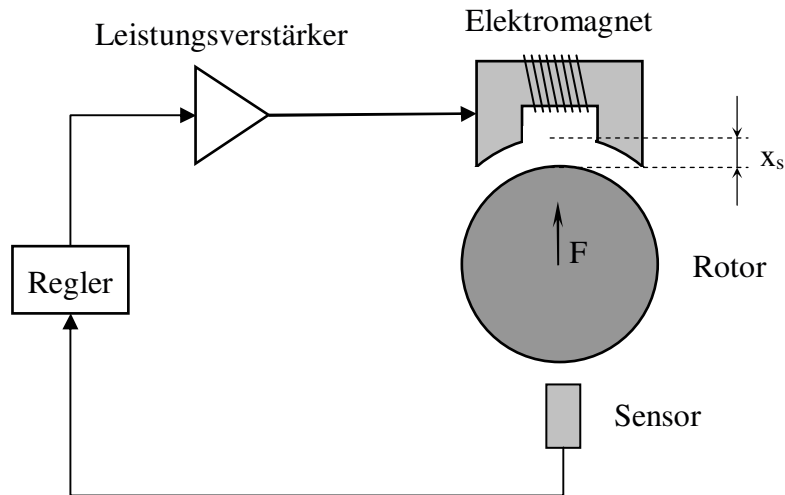
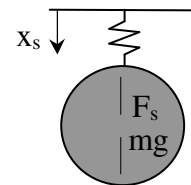
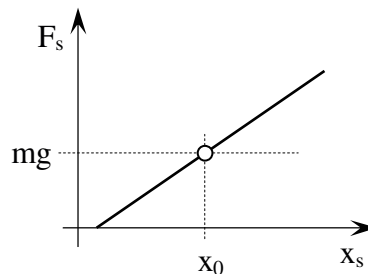


Abb. 3: Geschlossener Regelkreis einer einfachen Magnetlagerung mit einem Freiheitsgrad, der Vertikal-Auslenkung x_s

Um den Regler auslegen zu können ist es wichtig das Übertragungsverhalten der Regelstrecke zu kenn. Dazu möchte ich zuerst das Magnetlager mit einem Feder-Masse-System vergleichen. Wie aus Abbildung 4a ersichtlich, nimmt die Federkraft mit zunehmender Auslenkung zu. D. h. die Federkraft wirkt der Auslenkung entgegen. Beim Magnetlager, siehe Abbildung 4b, ist dies genau umgekehrt. Ohne Regelung kann sich keine stabile Gleichgewichtslage einstellen.

a) Federkraft als Funktion der Auslenkung



b) Magnetkraft als Funktion der Auslenkung, bei konstantem Strom

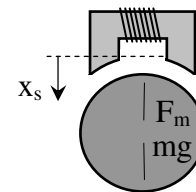
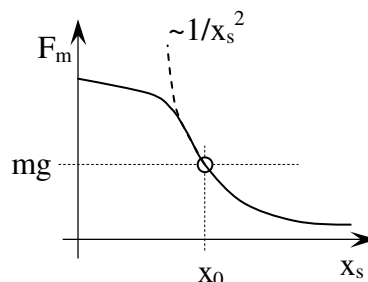


Abb. 4: Vergleich der Wegabhängigkeit von Federkraft und Magnetkraft bei konstantem Wicklungsstrom I_0 . Die Gleichgewichtslage $x = x_0$ ist durch $F_s = mg$ beziehungsweise $F_m = mg$ definiert.

Das Vorzeichen der Steigung der Kraft-Weg-Funktion (positiv bei dem Feder-Masse-System, negativ beim Magnetlager) entscheidet also über die Stabilität des

Systems. Die Steigung wird dabei allgemein als Steifigkeit bezeichnet, man spricht bei einem unregulierten Magneten von einer „negativen Steifigkeit“. Ziel der Regelung wird es nun sein, ein System mit positiver Steifigkeit zu erzeugen.

Die Magnetkraft wird dazu über den Strom gesteuert. Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen Strom und Magnetkraft. Dabei nimmt der Strom quadratisch zur Magnetkraft zu, solange keine magnetische Sättigung erreicht ist.

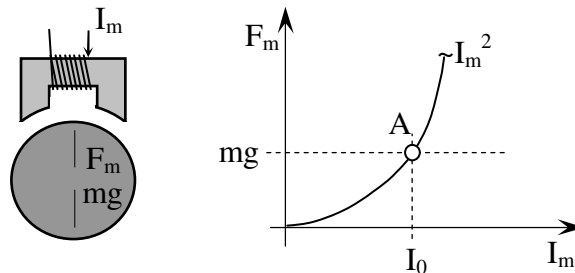


Abb. 5: Magnetkraft in Abhängigkeit vom Spulenstrom I_m bei konstantem Abstand $x_s = x_0$

Zur Auslegung des Reglers wird die Kraft-Weg- und die Kraft-Strom-Funktion um den Arbeitspunkt linearisiert. Diese Linearisierung reicht für die Reglerauslegung vollkommen aus. Im Arbeitspunkt kompensiert die Magnetkraft F_m gerade die Gewichtskraft mg . Dabei fließt der Strom I_0 und der Körper hat einen Abstand x_0 . Der Ursprung des Koordinatensystems wird dann durch den Arbeitspunkt definiert.

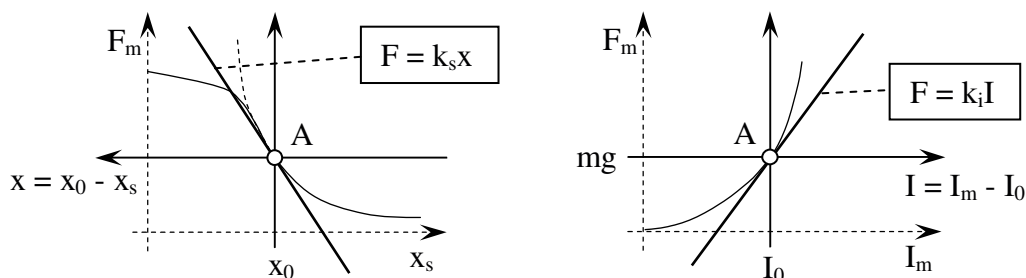


Abb. 6: Linearisierung durch den Arbeitspunkt.

Die Abweichung vom Arbeitspunkt wird durch zwei neue Variablen charakterisiert.

$$I = I_m - I_0$$

$$x = x_0 - x_s$$

Als Steigung der Geraden wird die Steigung der Ausgangsfunktion im Arbeitspunkt verwendet, für die Kraft-Strom-Funktion sei dies der Faktor k_I und für die Kraft-Weg-Funktion der Faktor k_s . So ergeben sich die beiden Geradengleichungen für die Kraft F .

$$F = k_I \cdot I$$

$$F = k_s \cdot x$$

Aus diesen Definitionen lässt sich die Gesamtkraft F als Funktion von Weg und Strom in einer um den Arbeitspunkt linearisierten Formel angeben. Die Kraft im Arbeitspunkt ist dabei Null, da dies als die Gleichgewichtslage definiert wurde.

$$F(x, i) = k_s x + k_I I$$

Die Magnetlagerung soll die Eigenschaften eines Feder-Dämpfer-Systems aufweisen. Dabei soll die Steifigkeit der Aufhängung k sein und Dämpfung der Anordnung d. Die Gleichung für ein solches Feder-Dämpfer-System, mit der zeitlichen Ableitung $\dot{x} = dx/dt$, sieht dann wie folgt aus.

$$F = -kx - d\dot{x}$$

Durch Gleichsetzen der beiden Funktionen und Auflösen nach dem Strom I erhält man die gewünschte Reglerfunktion.

$$I(x) = -\frac{(k + k_s)x + d\dot{x}}{k_I}$$

Diese Regelfunktion wird durch einen PD-Regler realisiert, wobei durch die Wahl der Parameter k und d die Steifigkeit bzw. die Dämpfung eingestellt wird.

Weiter möchte ich nun nicht auf die Reglerauslegung eingehen. Der eben betrachtete Fall entspricht wohl der einfachsten Auslegung eines Magnetlagers. Es soll natürlich klar sein, dass die Berechnung eines komplexeren Magnetlagers, was eigentlich sonst immer der Fall ist, wesentlich schwieriger und umfangreicher ist.

Magnetkraft und wichtige Größen

Für eine Anordnung, wie sie in Abbildung 6 dargestellt ist, gilt die folgende Formel für die Magnetkraft F.

$$F = \frac{\cos \alpha}{(1 + \Delta)^2} \frac{N^2 \cdot A \cdot \mu_0}{4} \left(\frac{i}{s - x} \right)^2 = k \left(\frac{i}{s - x} \right)^2 = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot A} \cos \alpha$$

Dabei ist i der Spulenstrom, Φ der magnetische Fluss, N die Windungszahl des Elektromagneten, A der Durchflutungsquerschnitt im Luftspalt, μ_0 die Permeabilität von Luft und x die Verschiebung des Rotors vom Luftspalts aus gegen das Joch. Der Korrekturfaktor Δ beschreibt den Einfluss des Eisens auf die Lagerkraft.

$$\Delta = \frac{l_{fe} \cdot A}{2\mu_r (s - x) A_{fe}} \approx \frac{l_{fe} \cdot A}{2\mu_r \cdot s \cdot A_{fe}}$$

Dabei ist A_{fe} der Durchflutungsquerschnitt im Eisen, l_{fe} die Länge des magnetischen Kreises im Eisen und μ_r die relative Permeabilität des Eisens.

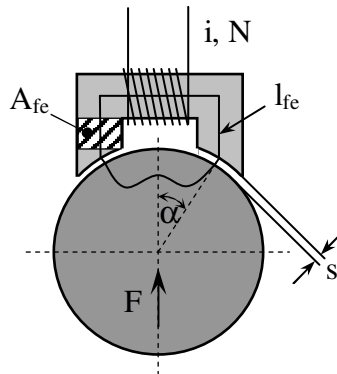


Abb. 7: Schematische Darstellung eines Elektromagneten. Mit Lagerkraft F , Durchflutungsquerschnitt im Eisen A_{fe} , Länge des magnetischen Kreises im Eisen l_{fe} , Spulenstrom i , Wicklungszahl N , Spaltabstand s und Eintrittswinkel α .

Mit der Maxwell-Gleichung zwischen dem magnetischen Fluss Φ und der Spannung u über der Wicklung, sowie den Gleichungen für die Magnetkraft ergibt sich die folgende Gleichung für die Spannung u .

$$u = N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Rightarrow u = N \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{N^2 \cdot A \cdot \mu_0}{2(1+\Delta)} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{i}{s-x} \right) = s \frac{(1+\Delta)}{\cos \alpha} \cdot k \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{i}{s-x} \right)$$

In dieser Gleichung werden die Sättigungseffekte des Eisens und die Einflüsse durch Streufelder vernachlässigt. Die Eisenverluste, die durch den Korrekturfaktor Δ berücksichtigt werden, sind oft sehr klein und können vor allem bei großen Luftspalten vernachlässigt werden.

Für die vom Luftspalt s abhängige Induktivität L gilt die nachfolgende Gleichung.

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{i} = \frac{N^2 \cdot A \cdot \mu_0}{2(1+\Delta)} \frac{1}{(s-x)} = 2 \cdot k \cdot \frac{(1+\Delta)}{\cos \alpha} \frac{1}{(s-x)}$$

Resümee

Die berührungsfreie Lagerung mit aktiven Magnetlagern ergibt in verschiedenartigen Anwendungen wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Lagerungen. Sie ist verschleiß-, wartungs- und schmiermittelfrei. Die maximal zulässige Drehzahl wird nur durch die Fliehkraftbeanspruchung des Rotors begrenzt. Die Lagercharakteristik kann über den elektronischen Regler vorgegeben werden und ermöglicht die Dämpfung elastischer Rotoren. Außerdem ist die aktuelle Position des Rotors in den Lagerstellen bekannt, so dass diese zur Prozesskontrolle herangezogen werden kann.

Quellen

Als Grundlage für diese Ausarbeitung dienten hauptsächlich zwei Bücher. Das erste Buch heißt „Magnetlager – Grundlagen, Eigenschaften und Anwendungen berührungsfreier, elektromagnetischer Lager“ von G. Schweitzer, A. Traxler, H. Bleuler und ist im Springer-Verlag erschienen. Das zweite Buch heißt „Einführung in die Mechatronik“ von Werner Roddeck und ist im Teubner-Verlag erschienen. Aus diesen beiden Büchern stammen auch die Graphiken und schematischen Zeichnungen.