

Hochintegrierte Magnetlager- Systeme

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

PHILIPP BÜHLER

Dipl. El.-Ing. ETH

geboren am 27. Januar 1967

von Alt St. Johann

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. G.Schweitzer, Referent

Prof. Dr. H. Stemmler, Korreferent

Zürich 1995

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent von Professor Dr. G. Schweitzer am Institut für Robotik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, wo ich am 'International Center for Magnetic Bearings' an verschiedenen Magnetlager-Problemen arbeitete.

Ich danke meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. G. Schweitzer für seine Unterstützung und sein Interesse an dieser Arbeit.

Ich danke Herrn Prof. Dr. H. Stemmler, dass er sich bereit erklärt hat, das Korreferat zu übernehmen.

Der Firma Mecos Traxler AG in Winterthur und deren Mitarbeitern danke ich für die gute Zusammenarbeit und für die Finanzierung. Sie haben das Projekt 'hochintegriertes Magnetlager' erst ermöglicht.

Ein ganz besonderer Dank gilt schliesslich all meinen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Robotik und der Magnetlager-Gruppe für das gute Arbeitsklima und für das Interesse, welches sie meiner Arbeit entgegengebracht haben.

Philipp Bühler

Inhalt

Kurzfassung	IV
Abstract	V
1. Einleitung	1
1.1 Übersicht	1
1.2 Funktionsprinzip	3
1.3 Stand der Technik	9
1.4 Motivation und Ziel	13
1.5 Vorgehensweise, Aufbau der Arbeit.....	15
2. Einzelkomponenten.....	17
2.1 Regler	17
2.2 Verstärker.....	18
2.3 Sensoren	27
2.4 Magnete	30
2.5 Fazit.....	34
3. Gesamtsystem	35
3.1 Aufteilen des Systems in Funktionsblöcke	35
3.2 Analoge Signalübertragung	36
3.3 Digitale Signalübertragung	37
3.4 Randprobleme	39
3.5 Fazit.....	40
4. Minimal-Magnetlager-System.....	41
4.1 Konzept	41
4.2 Elektronik.....	42
4.2 Vormagnetisierung.....	43
4.3 Fazit.....	46

5. Entwurf eines hochintegrierten Magnetlagers am Beispiel einer Textilspindel.....	48
5.1 Anforderungen	48
5.2 Konzept	50
5.3 Dimensionierung	59
5.4 Fazit.....	65
6. Aufgaben des Rechners.....	67
6.1 Modellbildung.....	67
6.2 Messung	71
6.3 Reglerauslegung.....	77
6.4 Implementierung	80
6.5 Unwuchtkompensation	82
6.6 Überwachung (Sicherheit)	83
6.7 Energiebilanz	89
6.8 Fazit.....	93
7. Anlage mit mehreren Rotoren	95
7.1 Speisung	95
7.2 Antrieb	96
7.3 Kommunikation	96
7.4 Fazit.....	96
8. Ausblick.....	97
9. Zusammenfassung.....	99
9.1 Gelöste Probleme	99
9.2 Fazit.....	100
Anhang	101
1. Vorfilter für die Frequenzgangkompensation bei einem geschalteten Verstärker	101
2. Elektrisches Modell.....	105
Literaturverzeichnis.....	107
Lebenslauf	112

Kurzfassung

Elektromagnetische Lager ermöglichen die berührungsfreie Lagerung von Rotoren. Gegenüber konventionellen Lagerungsmethoden haben sie wesentliche Vorteile. Sie arbeiten vollständig verschleiss-, wartungs- und schmiermittelfrei bei hohen Temperaturen, im Hochvakuum und bei hohen Drehzahlen. Magnetische Lagerungen haben dank ihrer nahezu idealen Eigenschaften Einzug in viele neue Anwendungsgebiete gefunden und ihre Leistungsfähigkeit bewiesen. Den Vorteilen dieser Lager stehen die hohen Kosten gegenüber. Für den Einsatz in Massenprodukten sind Magnetlager noch zu aufwendig.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, neue Realisierungsmöglichkeiten zu finden. Es werden Konzepte gesucht, die sich besser integrieren lassen, um dadurch den Aufwand zu reduzieren.

Im ersten Teil der Arbeit werden verschiedene Konzepte für magnetische Lagerungen betrachtet und Ideen gesammelt. Dies führt zu einem neuen Konzept mit spezialisiertem Leistungsverstärker, welches mit kleinem elektronischen Aufwand umgesetzt werden kann.

Im zweiten Teil der Arbeit wird eine spezielle magnetgelagerte hoctourige Spindel für 60'000 upm entworfen. Der Rotor wird in allen fünf Achsen aktiv magnetisch gelagert. Die Forderungen bezüglich Kosten, Energieverbrauch und Eignung zur Massenproduktion können dank dem neuen Konzept eingehalten werden.

Ein Mikrokontroller mit dem Reglerprogramm ergibt zusammen mit dem optimierten Sensorsystem und dem spezialisierten Leistungsverstärker eine sehr kompakte Magnetlagerelektronik. Der Prototyp erreicht die geforderte Drehzahl bei minimalen Lagerverlusten. Besondere Aufmerksamkeit wird der Programmierung des Mikrokontrollers geschenkt. Neben dem eigentlichen Regler besteht die Software unter anderem aus der Schnittstelle zum Entwicklungssystem, einer automatischen Unwuchtkompensation und einem aufwendigen Überwachungsteil.

Die Arbeit zeigt, wie eng das Zusammenspiel von Mechanik, Elektronik und Software in einem mechatronischen Produkt sein kann, und welche Schwierigkeiten bei der Entwicklung eines solchen Systems gelöst werden müssen.

Abstract

Active Magnetic Bearings (AMBs) provide a means for contact free suspension of rotors. They have many advantages compared to other types of bearing, since they don't suffer from wear and require no maintenance or lubrication. AMBs are independent of their environmental conditions, thus they can operate at high temperatures, in a vacuum, and at high rotational speeds. In recent years, they have been applied in many new fields and their superior performance has been proved.

For many applications, however, AMBs are still too expensive and too complicated. The aim of this thesis is to find new concepts for the realisation of highly integrated, low cost AMBs.

The first part of this thesis addresses different concepts of magnetic bearings and combines new ideas. This leads to a new design using a specialised power amplifier which enables a system realisation with a minimum of electronics.

The second part of this work presents a new magnetically suspended high speed spindle built to run at 60'000 rpm. The rotor is controlled with respect to all five axes by active magnetic bearings. The requirements, namely the low costs; low energy losses and the possibility of mass production, can be met using the new concept.

The compact AMB electronics consists of a micro controller with control software, an optimised sensor system and a specialised power amplifier. The prototype rotor reaches the desired speed with a minimum of bearing losses. Special attention is given to the programming of the micro controller. This incorporates not only the position control for the rotor, but also routines for communication with the development system, an automated unbalance compensator and a sophisticated supervisory system.

This work demonstrates the strong interaction between mechanics, electronics and software in a mechatronic product and shows the difficulties which arise and how they can be solved.

1. Einleitung

1.1 Übersicht

Magnetlager sind Vorrichtungen, die einen Körper berührungsfrei schweben lassen. Sie bestehen aus Elektromagneten, die mit einer Elektronik so angesteuert werden, dass die Magnetkräfte den Körper frei im Raum in der Schwebelage halten. Bekanntestes Beispiel ist die Magnetschwebbahn.

Ein wichtiges Anwendungsfeld für Magnetlager ist die Lagerung von Rotoren. Im Gegensatz zum Kugellager gibt es keinen Verschleiß und es braucht keine Schmierung. Dadurch ist der Einsatz unter extremen Bedingungen wie Hochvakuum, hohen Temperaturen und hohen Drehzahlen möglich. Magnetlager sind auch sehr tolerant gegenüber Unwucht und Verschmutzung des Rotors. Die Steifigkeit und die Dämpfung des Lagers können mit der Elektronik in weiten Bereichen eingestellt werden. So kann man z.B. Rotoren von Turbomolekularpumpen oder Spindeln von Hochgeschwindigkeits-Fräsmaschinen schneller und vibrationsärmer rotieren lassen.

Magnetische Lagerungen haben dank ihren nahezu idealen Eigenschaften Einzug in viele neue Anwendungsgebiete gefunden und ihre Leistungsfähigkeit bewiesen. Sie beginnen sich in der Industrie durchzusetzen. Das Entwicklungspotential dieser neuen Technologie ist groß. Manche Maschinen werden erst durch den Einsatz von Magnetlagern realisierbar.

Den Vorteilen dieser Lager stehen die hohen Kosten gegenüber. Magnetlager sind für viele Anwendungen noch zu aufwendig.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, neue Realisierungsmöglichkeiten, die sich besser integrieren lassen, zu finden, um dadurch den Aufwand zu reduzieren. Damit können neue Anwendungsgebiete erschlossen werden.

1.1.1 Gedanken zur Entwicklung komplexer Systeme

Warum befasst sich die Hochschule mit der Optimierung von Magnetlagern? Weshalb sind neue Erkenntnisse zu erwarten, obwohl am Funktionsprinzip festgehalten wird?

Die Antwort liegt in der Komplexität dieser Systeme.

Viele Maschinen haben einen relativ geringen Komplexitätsgrad und sind

einfach zu verstehen, obwohl die dahinter stehenden Ideen oft genial sind. Bei solchen Maschinen ist in der Forschung oft nur der Bau von Funktionsmustern interessant. Die Weiterentwicklung bis zur Serienreife ist die Aufgabe von spezialisierten Berufsleuten.

Dies wird in Zukunft immer seltener der Fall sein, weil die Systeme immer komplexer werden und die Weiterentwicklung entsprechend schwieriger wird. Durch die stetige Erhöhung der Zuverlässigkeit und die Reduzierung der Baugrösse von Bauteilen wird die Konstruktion von immer komplizierteren Systemen möglich. Dadurch können mehr verschiedene Funktionen gleichzeitig in einem System bewältigt werden. Insbesondere bei den integrierten Schaltungen geht diese Entwicklung sehr schnell voran.

Der Zuwachs an Komplexität äussert sich nicht nur in der Kompliziertheit der Systeme, sondern auch in der Vielzahl ausgenutzter physikalischer Effekte¹.

Die Mechatronik² ist ein typisches Beispiel für die Kombination verschiedenster physikalischer Effekte und mathematischer Methoden. Bei Magnetlagern ist die Komplexität gross und die Vernetzung von Mechanik, Elektronik und Software besonders eng. Die einzelnen Komponenten hängen in extremer Weise voneinander ab. Es ist ein guter theoretischer Hintergrund für das Verständnis notwendig. Erfahrung allein reicht nicht aus, da sich Magnetlager oft anders verhalten, als man es von anderen Systemen her gewohnt ist. Ein gutes Vorstellungsvermögen für die diversen Effekte ist von grossem Nutzen.

Es ist sehr schwierig, ein komplexes System in all seinen Eigenschaften gleichzeitig zu erfassen und darauf basierend bessere Lösungen zu finden. Dazu sind breite, fundierte Kenntnisse der Grundlagen und aller Effekte notwendig, die das Systemverhalten beeinflussen können. Auch wenn im System nur eine spezifische Komponente optimiert werden soll, muss immer das Verhalten des ganzen Systems im Auge behalten werden. Wer nur einen Teilbereich kennt und diesen optimiert, kann das Verhalten des Gesamtsystems nicht gezielt verbessern. Auch eine Fehlersuche ist unter diesen Umständen sehr schwierig³.

-
- 1 Physikalische Effekte sind elementare Phänomene, die physikalisch erklärt werden. Beispiele: Piezoeffekt von Quarz, Peltiereffekt bei Thermoelementen...
 - 2 Mechatronik ist die Kombination von Mechanik, Elektronik und Informatik. Die Entwicklung von mechatronischen Produkten erfordert interdisziplinäre Zusammenarbeit und stellt hohe Anforderungen an die Gruppendynamik.
 - 3 Ein deutliches Anzeichen für diese Problematik: Oft wird die Komplexität bewusst tief gehalten, obwohl die Produktionskosten dadurch steigen, einfach weil die Entwicklungs- und Serviceleute sonst das System nicht mehr im Griff haben.

Bei solchen Optimierungsprozessen treten immer wieder neue wissenschaftlich interessante Phänomene auf. In einer industriellen Umgebung werden solche Phänomene oft nicht verstanden, da das nötige Interesse oder die Zeit für eine fundierte Untersuchung fehlt. Ein besseres Verständnis führt vor allem bei komplexen Produkten oft dazu, dass bisher ungenutzte zusätzliche Effekte (sog. Dreckeffekte) vorteilhaft verwertet werden können.

Die Weiterentwicklung solcher Systeme ist daher auch eine Herausforderung an die Forschung in der Hochschule und gewinnt deshalb bei den Ingenieurwissenschaften immer mehr an Bedeutung. vgl. [Berlin 94].

1.2 Funktionsprinzip

Dieser Abschnitt will keine ausführliche Einführung in die Magnetlagertechnik vermitteln. In diesem Abschnitt wird deshalb nur eine Übersicht gegeben. Detaillierte Einführungen und die entsprechenden Herleitungen der Grundgleichungen sind z.B. in [Schweitzer 93] zu finden.

Zuerst werden anhand der 'Schwebekugel' das Funktionsprinzip und die wichtigsten Zusammenhänge erklärt. Anschliessend wird das System so erweitert, dass ein vollständiges Magnetlager für einen Rotor entsteht.

Bei der Schwebekugel handelt es sich um ein sehr einfaches Magnetlager-system. Aufgabe ist es, eine ferromagnetische Kugel mittels Magnetfeldern berührungsfrei schweben zu lassen. Wenn zu diesem Zweck ein Permanentmagnet über der Kugel befestigt würde, könnte sich kein stabiles Gleichgewicht der Kräfte einstellen und es wäre kein Schweben möglich.

Damit die Kugel schweben kann, muss das Magnetfeld – abhängig von der Kugelposition – verändert werden. Der dazu notwendige Regelkreis besteht aus einem Sensor, einem Regler, einem Verstärker, einem Elektromagneten (Aktor) und einem mechanischen System. (In diesem Fall ist es die weichmagnetische Kugel, siehe Fig. 1.1).

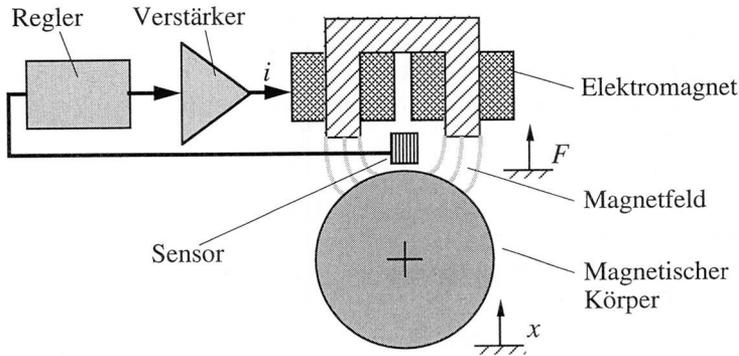


Fig. 1.1 Funktionsprinzip des Magnetlagers. Ein Regelkreis steuert den Elektromagneten so an, dass der magnetische Körper berührungsfrei schwebt.

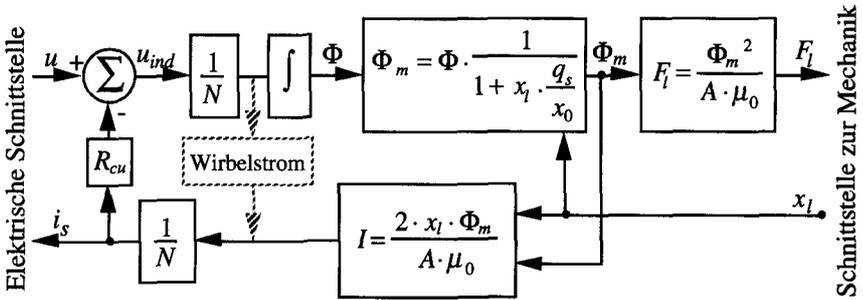
Mit einem Sensor wird die Position der Kugel gemessen. Sobald die Kugel ihre Sollposition durch äussere Krafteinwirkung verlässt, ändert der Regler sofort das Magnetfeld so, dass die Kugel wieder in die Ausgangslage zurückkehrt. Sie wird vom Magnetfeld in der Schwebe gehalten.

Es hat sich gezeigt, dass ein solches Magnetlager in den meisten Fällen als lineares System betrachtet werden darf [Vischer 88] und die lineare Regelungstechnik angewendet werden kann. Für die Reglerauslegung muss zuerst das Übertragungsverhalten der offenen Regelstrecke bekannt sein. Diese Übertragungsfunktion kann aber nicht gemessen werden, solange sich das System ausserhalb des Arbeitspunkts befindet. Da die Regelstrecke instabil ist, kann der Arbeitspunkt nur mit einem stabilisierenden Regler erreicht werden. Die Übertragungsfunktion muss daher aufgrund eines Modells der Regelstrecke bestimmt werden.

1.2.1 Regelstrecke

Das Modell der Regelstrecke besteht im wesentlichen aus der Krafterzeugung mit dem Elektromagneten und dem mechanischen System (schwebender Körper).

Die Krafterzeugung mit dem Magneten basiert auf dem Reluktanzprinzip (Maxwellkraft, Kraft bei Materialübergängen unterschiedlicher Permeabilität im Magnetfeld). Die entstehende Kraft kann mit dem Prinzip der virtuellen Leistung berechnet werden. Die Energie im Magnetfeld nimmt ab, wenn sich ein Material hoher Permeabilität dem Magnetfeld nähert. Diese Energie wird in Form mechanischer Leistung frei. Daraus kann die Anziehungskraft berechnet werden. Das Modell für den Elektromagneten ergibt sich direkt aus den Maxwell-Gleichungen (Fig. 1.2).



u : Angelegte Spulenspannung [V]
 u_{ind} : Induzierte Spulenspannung [V]
 N : Windungszahl
 Φ_m : Magnetischer Fluss im Luftspalt [Vs]
 Φ : Magnetischer Fluss durch die Spule [Vs]

q_s : Streufluss - Koeffizient
 x_0 : Ruheluftspalt im Arbeitspunkt [m]
 x_l : Luftspalt [m]

A : Polschuhfläche [m²]
 F_l : Kraft der beiden Polschuhe [N]
 R_{cu} : Elektrischer Widerstand der Spule [Ω]
 i_s : Spulenstrom [A]

$B = \frac{\Phi_m}{A}$: Flussdichte im Luftspalt [Tesla]

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$

Fig. 1.2 Modell des Elektromagneten mit Streufluss, Spulenwiderstand und Wirbelstrom.

In diesem Modell sind Streufluss, Spulenwiderstand und Wirbelströme berücksichtigt. Die Permeabilität des Eisens wird als unendlich angenommen. Die Feldverteilung im Luftspalt ist homogen. Sättigung und Hysterese werden vernachlässigt. Berechnungsgrundlagen für Wirbelströme sind in [Stoll 74] zu finden.

Es kann nun die entstehende Kraft F_l abhängig vom Spulenstrom i_s und vom Luftspalt x_l angegeben werden:

$$F_l = \frac{K}{4} \cdot \left(\frac{i_s}{x_l} \right)^2, \text{ wobei } K = N^2 \cdot A \cdot \mu_0 \quad (1), (2)$$

Diese Kraft kann im Arbeitspunkt linearisiert werden. Die Position x der Kugel und der Spulenstrom i sind jeweils als Abweichungen vom Arbeitspunkt x_0 und i_0 aufzufassen:

$$x = x_0 - x_l \quad (3)$$

$$i = i_s - i_0 \quad (4)$$

Für die linearisierte Magnetkraft F ergibt sich eine Beziehung mit den zwei systemspezifischen Konstanten k_i und k_s :

$$(1) \quad F = \frac{\partial F_l}{\partial i} \cdot i - \frac{\partial F_l}{\partial x_l} \cdot x$$

$$F = \frac{K}{2} \cdot \left(i \cdot \frac{i_0}{x_0^2} + x \cdot \frac{i_0^2}{x_0^3} \right)$$

$$F = k_s \cdot x + k_i \cdot i \quad (5)$$

$$k_s = \frac{K \cdot i_0^2}{2 \cdot x_0^3} \quad (6)$$

$$k_i = \frac{K \cdot i_0}{2 \cdot x_0^2} = \frac{x_0}{i_0} \cdot k_s \quad \rightarrow \quad \frac{k_s}{k_i} = \frac{i_0}{x_0} \quad (7)$$

Aus der Massenträgheit der Kugel

$$\ddot{x} = F/m \quad (m: \text{Masse der Kugel}) \quad (8)$$

ergibt sich die Übertragungsfunktion der Regelstrecke für das einseitige Lager:

$$(5, 8) \quad \frac{x}{i} = \frac{k_i/m}{s^2 - k_s/m}, \quad (s = j \omega) \quad (9)$$

Die Strecke hat die Ordnung 2, ist instabil und lässt sich mit einem PD-Regler stabilisieren.

Die Konstanten k_i und k_s sind vom Luftspalt x_0 und vom Arbeitspunkt des Stromes, dem sog. **Vormagnetisierungsstrom** i_0 abhängig. Im Beispiel der Schwebekugel stellt sich dieser so ein, dass die Magnetkraft F_0 im Arbeitspunkt das Gewicht der Kugel exakt kompensiert.

$$(1) \quad m \cdot g = F_0 = \frac{K}{4} \cdot \left(\frac{i_0}{x_0} \right)^2, \quad F_0: \text{Arbeitspunkt der Kraft} \quad (10)$$

$$(6, 10) \quad k_s = \frac{2 \cdot m \cdot g}{x_0}, \quad g = 9.81 \text{ m/s} \quad (\text{Erddanziehung}) \quad (11)$$

$$(9, 11) \quad \frac{x}{i} = \frac{k_i}{m \cdot (s^2 - 2 \cdot g/x_0)} \quad (12)$$

Mit einer derartigen Lagerung sind keine schnellen Positionsregler realisierbar. Für die Lagerung von Rotoren muss die Dynamik besser sein. (Mit der Dynamik ist das Verhalten des Lagers bei sich schnell ändernder äusserer Krafteinwirkung gemeint. Sie kann mit einer frequenzabhängigen Nachgiebigkeit beschrieben werden. Regelungstechnisch betrachtet ist dies die Störübertragungsfunktion.)

Durch den Einsatz von zwei gegenüberliegenden Elektromagneten kann die Vormagnetisierung erhöht werden, da sich die entstehenden Zusatzkräfte gegenseitig aufheben (Fig. 1.3). Dadurch wird eine viel grössere Systemdynamik erreicht. Ausserdem wird die Linearität deutlich besser. Das Reglerausgangssignal i wird zusammen mit der Vormagnetisierung i_0 auf die beiden Magnetspulen L1 und L2 verteilt. Die Summe der Spulenströme wird dabei konstant gehalten.

$$\text{Strom in Spule } L_1: i_1 = i_0 + i \quad (13)$$

$$\text{Strom in Spule } L_2: i_2 = i_0 - i \quad (14)$$

Pro Regelkreis sind jetzt zwei stromgesteuerte Verstärker notwendig. Sie müssen die Spulenströme i_1 und i_2 steuern. Wegen der Verwendung von zwei Magneten ändern die Gleichungen (8) und (9) um den Faktor zwei. Für das zweiseitige Lager gilt somit:

$$\ddot{x} = 2 \cdot F/m \quad (15)$$

Die Übertragungsfunktion der Regelstrecke für das zweiseitige Lager ist nun:

$$(5, 15) \quad \frac{x}{i} = \frac{2 \cdot k_i/m}{s^2 - 2 \cdot k_s/m} \quad (16)$$

Die linearisierten Gleichungen (5, 6 und 7) bleiben unverändert.

Es ist möglich, anstelle des Stromes die Spulenspannung zu steuern. Bei einer solchen Spannungssteuerung erhöht sich die Ordnung der Regelstrecke um eins [Vischer 88].

1.2.2 Lagerung von Rotoren

Ein starrer Körper hat sechs Freiheitsgrade im Raum (3 translatorische und 3 rotatorische). Bei der Lagerung von Rotoren müssen fünf Freiheitsgrade stabilisiert werden, sodass nur noch die Rotation um die geometrische Längsachse möglich ist.

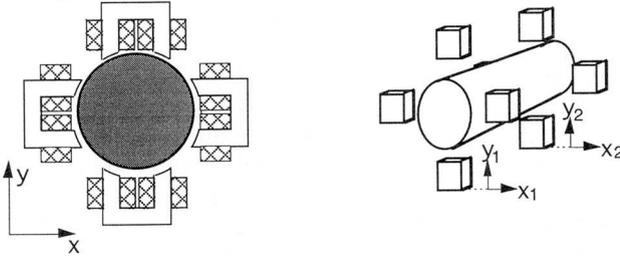


Fig. 1.3 Radiallager für die Regelung der Rotorposition in x- und y- Richtung
 Fig. 1.4 Radiale Stabilisierung eines Rotors in zwei Lagerebenen

Bei den meisten magnetgelagerten Rotoren werden zwei Radiallager mit je zwei geregelten Achsen (Fig. 1.3 und 1.4) und ein Axiallager für die axiale Positionierung verwendet. Da ein Magnet nur anziehende Kräfte erzeugen kann, wird für jede Achse ein zweiter, gegenüberliegender Magnet benötigt. Auf diese Weise können Kräfte in allen Richtungen ausgeübt werden, und mit der Vormagnetisierung ist eine gute Systemdynamik erreichbar. Es sind somit acht Magnete für die Radiallager und zwei Magnete für das Axiallager nötig.

1.2.3 Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften

Für die Lagerung eines starren Rotors müssen fünf Achsen stabilisiert werden. Da eine vollständige passive Lagerung mit Permanentmagneten nicht möglich ist [Braunbek 39], wird mindestens eine Achse aktiv stabilisiert. Um eine gute Dynamik erreichen zu können, werden die Lager mit einer Vormagnetisierung betrieben. Auf diese Weise wird gleichzeitig die Linearität der Regelstrecke verbessert.

Der Regler bestimmt die Steifigkeit und das dynamische Verhalten. Die Präzision (Laufruhe, Rundlauf) von Magnetlagern hängt stark von der Sensorik ab. Sie ist nur wenig von den Lagermagneten abhängig.

Die Regelstrecke eines Magnetlagers ist instabil und hat sehr kurze Zeitkonstanten. Es sind schnelle Sensoren, Regler und Verstärker erforderlich, um das System zu stabilisieren. Zur Veranschaulichung (Fig. 1.5): Die regelungstechnische Aufgabe entspricht dem Balancieren eines Stabes von

wenigen μm Länge ⁴.

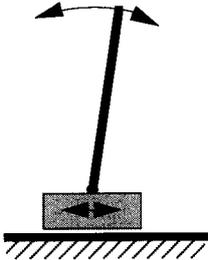


Fig. 1.5

1.3 Stand der Technik

Magnetlager werden für verschiedenste Aufgaben eingesetzt. In [Allaire 92] [Schweitzer 94] sind diverse Konfigurationen solcher Lager beschrieben. Einige interessante Lösungen können jedoch nicht wirtschaftlich umgesetzt werden, weil der technische Aufwand der aktiven magnetischen Lagerung recht hoch ist. Es gibt deshalb viele Arbeiten mit dem Ziel, den Aufwand, die Baugröße oder den Energieverbrauch zu reduzieren.

1.3.1 Anderes Funktionsprinzip zur Krafterzeugung

Im Abschnitt 1.2 wurde gezeigt, dass die Magnetlager eine instabile Übertragungsfunktion haben und deshalb eine aufwendige Regelung benötigen. Die Ursache dieser Instabilität liegt in der Verwendung des Reluktanzprinzips für die Krafterzeugung. Wenn ein anderes Prinzip der Krafterzeugung verwendet wird, kann die Instabilität der Regelstrecke reduziert werden (Fig. 1.6). Dadurch sinkt die erforderliche Verstärkerleistung. Bei einer stabilen Regelstrecke könnte sogar ganz auf den Verstärker und den Regelkreis verzichtet werden.

In [Sandercock 87], [Fenn 91] und [Bichsel 90] werden Lorentzkräfte verwendet. Die Regelstrecke ist dann im Idealfall grenzstabil, real bleibt sie leicht instabil. Die erreichbaren Kräfte sind im allgemeinen geringer⁵ als

-
- 4 Bei minimaler Vormagnetisierung ist die 'äquivalente Pendellänge' etwa halb so gross wie der Luftspalt zwischen Magnet und Rotor (Gleichung (12)). Bei zweiseitigen Lagern mit Vormagnetisierung wird die Pendellänge noch um einiges kürzer.
 - 5 Ein direkter Vergleich ist schwierig, da die Kräfte von der gewählten Konstruktion abhängen. Der Vergleich muss spezifisch für eine Anwendung gemacht werden. In [Chiba 94] wird die maximale radiale Kraft für den lagerlosen Motor berechnet. Bei genauer Betrachtung kann eigentlich nicht mehr klar zwischen Lorentz- und Reluktanzprinzip unterschieden werden. Es handelt sich letztlich nur um zwei

beim Reluktanz-Lager, und auch der Aufbau des Rotors ist komplizierter.

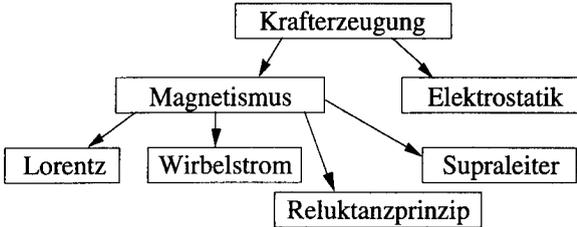


Fig. 1.6 Verschiedene Prinzipien zur Krafterzeugung

Wirbelströme können auch zur Krafterzeugung herangezogen werden. Mit ihnen kann ein stabiles Schweben ohne Regelung erreicht werden. Die erreichbaren Kräfte sind jedoch sehr klein, bzw. der Rotor wird sehr heiss, und ausserdem ist die Lagerdämpfung klein. Dieses Prinzip eignet sich nur für sehr kleine Rotoren von wenigen Millimetern Länge, wo die Wärme gut abgeführt werden kann [Siegwart 94].

Ähnlich wie beim Wirbelstromlager kann auch mit Supraleitern ein eigenstabiles System aufgebaut werden [Moon 94]. Im Gegensatz zum Wirbelstromlager kann das Wärmeproblem mit Supraleitern umgangen werden. Das Lager wird so aufgebaut, dass es im Betrieb gar keine Stromzufuhr mehr braucht. Leider ist der Aufwand für die Kühlung auch bei Hochtemperatursupraleitern noch gross. Da kein Regelkreis vorhanden ist, gehen die regelungstechnischen Möglichkeiten verloren. Die erreichbare Lagerdämpfung ist sehr klein. Dadurch steigen bei Rotoren die Anforderungen an den Wuchtzustand.

Supraleiter können auch in konventionellen Magnetlagern (Reluktanzprinzip) anstelle der Kupferwicklung eingesetzt werden. Dabei werden viel grössere Luftspalte erreichbar. Der Elektronikaufwand bleibt erhalten.

Neben den magnetischen Kräften könnten auch elektrostatische Kräfte eingesetzt werden. Im makroskopischen Bereich sind die erreichbaren Kräfte jedoch viel zu klein.

1.3.2 Kombination mit passiven Magnetlagern

Durch die Kombination von aktiven Lagern mit Permanentmagnetlagern kann ebenfalls ein stabiles, berührungsfreies Schweben erreicht werden [Boden 88]. Dabei kann die Anzahl aktiver Lager reduziert werden (Fig. 1.7). Es ist immer mindestens ein aktives Lager notwendig [Braunbek 39].

verschiedene Berechnungsmethoden für magnetische Kräfte gemäss Maxwell-Gleichungen. Es handelt sich keineswegs um verschiedene physikalische Prinzipien.

Eine passive Stabilisierung einzelner Achsen kann auch ohne Permanentmagnete mit dem Reluktanzprinzip erreicht werden. Da die passiven Magnetlager praktisch keine Dämpfung haben, muss oft mehr als nur eine Achse aktiv stabilisiert werden.

Die Kombination mit Passivlagern ist ein Kompromiss bezüglich Dämpfung und Steifigkeit. Der Elektronikaufwand sinkt, dafür steigt der Aufwand bei der Konstruktion und bei der Regelung. Auch beim Energieverbrauch sind die Vorteile klein, da die restlichen Aktivlager grösser dimensioniert werden müssen.

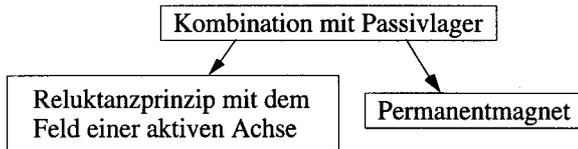


Fig. 1.7 Aktive Lager können mit passiven Lagern kombiniert werden

1.3.3 Kombination mit dem Motor

Die Magnete in einem Magnetlager können so ausgebildet werden, dass sie neben den radialen und axialen Kräften auch ein Antriebsmoment auf den Rotor ausüben. Auf diese Weise kann der Aufwand für das Magnetlager mit dem Motor geteilt werden. Der Gesamtaufwand reduziert sich.

Mit dem Reluktanzprinzip lassen sich Schrittmotoren und Magnetlager kombinieren [Higuchi 88]. Bei [Bichsel 90] wird das Magnetlager mit einer Synchronmaschine kombiniert. [Schöb 93] hat gezeigt, dass auch bei Asynchronmaschinen eine solche Kombination möglich ist und sich gute Eigenschaften ergeben, und [Chiba 94] berechnet die maximalen radialen Kräfte (Fig. 1.8).

Diese Verfahren verkürzen die Baulänge des Rotors, was konstruktiv grosse Vorteile mit sich bringen kann. Die Leistungselektronik wird jedoch kaum einfacher, und eine aufwendige Regelung ist notwendig.

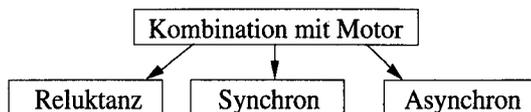


Fig. 1.8 Magnetlager können mit dem Antriebsmotor kombiniert werden

1.3.4 Die aktive Lagerung optimieren

Einige Arbeiten suchen nicht nach neuen Funktionsprinzipien, sondern

befassen sich mit der Optimierung des 'Standard'-Magnetlagers nach dem Reluktanzprinzip. Sie beschränken sich meistens auf einzelne Komponenten.

Bei der Sensorik kann der Positionssensor ersetzt werden. Anstelle der Position (Luftspalt) wird der Strom und das Magnetfeld (B-Feld) mit Hall-Sensoren gemessen. Daraus wird die Rotorposition rekonstruiert [Zlatnik 90]. Ein stabiles Schweben ist auch möglich, wenn nur die Spannung und der Strom der Magnetspule gemessen werden. Dieses "sensorlose" Prinzip stellt hohe Anforderungen an die Regelung und die Verstärker [Vischer 88]. Der Grund dafür liegt in der Übertragungsfunktion der Regelstrecke. Es gibt dort eine Übertragungsnulstelle, die sehr nahe beim instabilen Pol in der rechten Halbebene liegt. Eine stabile Regelung ist nur mit sehr guter Modellkenntnis möglich. Dies bedingt auch, dass der Verstärker die Spannungs- und Stromwerte an den Spulen sehr exakt einhalten kann.

In [Traxler 85] wird gezeigt, wie die Magnetspulen optimal dimensioniert, und wie die Verstärkerleistung und die Magnete aufeinander abgestimmt werden können.

Durch spezielle Anordnung der Elektromagnete kann, ohne Verwendung passiver Lager, die Anzahl der Magnete reduziert werden. Es werden immer noch alle fünf Achsen aktiv geregelt. [Fukata 92] und [Jeong 94] zeigen die Kombination von axialen und radialen Lagermagneten. Es können auch Radiallager mit drei anstelle der sonst üblichen vier Magnete aufgebaut werden. Mit sechs Magneten lassen sich dann fünf Achsen aktiv stabilisieren [Fukata 94].

Magnetlager können gut als lineare Systeme modelliert werden. Es wird deshalb vorzugsweise lineare Regelungstechnik eingesetzt. Es sind jedoch auch nichtlineare Ansätze denkbar wie beispielsweise das 'sliding-mode' Verfahren. Fig. 1.9 gibt eine kurze Übersicht.

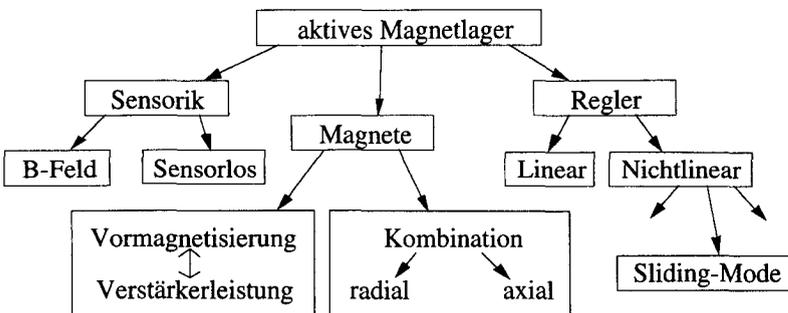


Fig. 1.9 Komponenten des Magnetlagers mit möglichen Verbesserungen und Vereinfachungen.

In vielen anderen Bereichen wurde bezüglich Systemoptimierung schon einiges mehr erreicht. In der Umrichtertechnik beispielsweise ist die Integration viel weiter fortgeschritten als bei der Magnetlagertechnik. Dies ist nicht allein das Verdienst der Halbleiterhersteller; wesentliche Voraussetzung waren auch Forschungsarbeiten auf den Gebieten wie optimierte Pulsmuster und feldorientierte Regelung. z.B. [Svensson 88].

1.4 Motivation und Ziel

1.4.1 Motivation

Es gibt viele Arbeiten, die sich mit der Reduktion des Aufwands von Magnetlagersystemen befassen. Oft werden die Einzelkomponenten Sensor, Regler, Verstärker und Lagermagnete neu kombiniert und teilweise neu entwickelt. Keine dieser Massnahmen konnte den Aufwand der aktiven magnetischen Lagerung wesentlich reduzieren. Die Optimierung der einen Systemkomponente führt meistens zur Erhöhung der Ansprüche an die anderen Komponenten. Der Aufwand wurde jeweils lediglich verlagert.

1.4.2 Ziel

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, neue Konzepte für hochintegrierte aktive magnetische Lagerungen zu finden. Dazu wird das System als Ganzes optimiert. Diese Konzepte sollen es ermöglichen, den Integrationsgrad der einzelnen Komponenten stark zu erhöhen.

Mit solchen hochintegrierten Magnetlagern können neue Anwendungsgebiete erschlossen werden.

Das Optimierungspotential auf Konzeptebene ist gross, da aktive Magnetlager bisher noch nicht in grossen Serien zum Einsatz kamen. Beim Bau von Magnetlagern wird meist von bestehenden Standardkomponenten ausgegangen, um eine grosse Modularität und Flexibilität zu erreichen. Wegen den kleinen Stückzahlen ist der Spielraum für neue Konzepte sehr eng.

In dieser Arbeit führt die Optimierung in Richtung Integration und weg von der Modularität. Das Magnetlager wird 'japanisiert'. Es wird ein Lager für die Massenproduktion entworfen. Dadurch ist der Weg zu neuen Konzepten offen. Die Zuverlässigkeit des Systems muss dabei erhalten bleiben.

Neben der konzeptionellen Ebene beschäftigt sich diese Arbeit auch mit der Komponentenebene, da auch dort einiges erreicht werden kann. Die Einzelkomponenten können besser den spezifischen Anforderungen der Magnet-

lagertechnik angepasst werden. Dadurch werden die Teile einfacher und leistungsfähiger, es wird Platz gespart und der Energieverbrauch gesenkt.

1.4.3 Benchmark

Bei der Lagerung von Rotoren in Spinnmaschinen stösst man an die Drehzahlgrenze von Gleit- und Wälzlagern. Luftlager haben eine zu geringe Dämpfung und sind anfällig für Verschmutzungen. Magnetlager sind dank der Verschleissfreiheit, der einstellbaren Dämpfung und den geringen Lagerverlusten bei hoher Drehzahl gut für diese Aufgabe geeignet.

Untersuchungen haben ergeben, dass die Drehzahl mit Magnetlagern um ein Vielfaches gesteigert werden kann. Die Produktivität der Spinnmaschine steigt entsprechend. Um konkurrenzfähig zu sein, dürfen die Herstellungskosten magnetgelagerter Spindeln im Vergleich zu den konventionell gelagerten höchstens dreimal so hoch liegen.

Dies kann nur erreicht werden, wenn die Kosten des Magnetlagers um den Faktor 10 bis 100 fallen. Diese Herausforderung verlangt:

- ein neues hochintegriertes Konzept
- optimierte Hardware, spezialisierte Komponenten
- eine kompakte Bauweise - weniger Gehäuse, Stecker und Verdrahtung
- die Senkung der Betriebskosten
 - a) Wartungsfreiheit, gute Fehlerdiagnose, Servicefreundlichkeit
 - b) Minimaler Stromverbrauch. Da die Anlage für 10 Jahre Dauerbetrieb bestimmt ist, fallen die Energiekosten ins Gewicht.
- Massenproduktion - wenig Handarbeit, einfacher Abgleich

Das Ziel ist, eine magnetische Lagerung für einen Rotor mit einer Masse von ca. 1kg, 50mm Durchmesser und 60'000 U/min Drehzahl zu konstruieren. Dabei müssen die Aussenmasse der Lager klein gehalten werden, da in einer Maschine mehrere hundert solcher Spindeln eng nebeneinander montiert werden sollen.

Obwohl die technischen Anforderungen bei dieser Anwendung nicht ungewöhnlich hoch sind, muss eine völlig neue Lagerung entwickelt werden. Bestehende Magnetlagerkonzepte genügen den Forderungen bezüglich Kosten und Eignung zur Massenproduktion nicht.

1.4.4 Beschränkungen

In dieser Arbeit wird ausschliesslich die aktive magnetische Lagerung von Rotoren basierend auf dem Reluktanzprinzip (Kraft am Übergang zwischen Materialien unterschiedlicher Permeabilität) betrachtet⁶. Zumindest für Rotormassen im Bereich von Kilogrammen sind keine sinnvollen Alternativen zum Reluktanzprinzip in Sicht.

Kombinationen mit dem Antrieb oder mit passiven Lagern werden in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Die Zielsetzung der Benchmark muss noch klar umrissen werden:

Es geht um eine erste Kleinserie. Die Optimierung geht noch nicht sehr weit ins Detail. Der Bau von kundenspezifischen integrierten Schaltungen (ASICs) beispielsweise wäre verfrüht. Auch die Konstruktion der mechanischen und magnetischen Komponenten wird im Rahmen dieser Arbeit nicht optimiert, da sie keinerlei Einfluss auf das Magnetlagerkonzept haben.

Da die Spinnmaschine später in grossen Stückzahlen hergestellt werden soll, muss das Produkt hinsichtlich Fertigungstechnik optimiert werden. Aspekte der Fertigungs- und Produktionstechnik werden im Rahmen dieser Arbeit nur soweit einbezogen, wie es für das Konzept relevant ist.

In der Spinnmaschine können von der Magnetlagerelektronik auch prozesstechnische Aufgaben wahrgenommen werden, die gar nichts mit der Lagerung zu tun haben. Derartige Betrachtungen beziehen sich auf den speziellen Einsatz und sind für allgemeine Anwendungen nicht von Interesse. Es wird daher nicht näher auf die Integration des magnetgelagerten Rotors in die Spinnmaschine eingegangen, es werden lediglich Schnittstellen definiert.

1.5 Vorgehensweise, Aufbau der Arbeit

Wie bereits erwähnt, muss das System als Ganzes betrachtet werden. Die Optimierungskriterien für den Bau der Einzelkomponenten (Sensor, Regler, Verstärker, Lagermagnete) beziehen sich auf das Verhalten des ganzen Systems; dadurch ist alles gegenseitig voneinander abhängig. Die Einzelkomponenten können im allgemeinen nicht gesondert optimiert werden.

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Teilen.

6 Es werden nur Rotoren betrachtet. Die meisten Resultate sind aber auch auf andere magnetische Lagerungen übertragbar (z.B. Linearführungen).

Im ersten Teil (Kapitel 2, 3 und 4) wird das Magnetlager als mechatronisches System analysiert und verschiedene neue Varianten für den Bau von Magnetlagern aufgezeigt. Dabei werden zuerst die Einzelkomponenten und dann das Gesamtsystem betrachtet.

In Kapitel 2 (Einzelkomponenten) werden die verschiedenen Realisierungsmöglichkeiten für die Einzelkomponenten gesammelt. Ideen aus der Literatur und eigene Ideen werden zusammengetragen und analysiert.

In Kapitel 3 (Gesamtsystem) werden Lösungen für das Gesamtsystem erarbeitet. Die Schnittstellen zwischen den Einzelkomponenten stehen dabei im Zentrum der Betrachtungen. Es werden sinnvolle Konzepte aufgezeigt.

In Kapitel 4 (Minimal-Magnetlager-System) geht es um ein neues Konzept, welches zu minimalem Schaltungsaufwand führt.

Im zweiten Teil (Kapitel 5 bis 7) liegen Anforderungen an ein konkretes System vor. Am Beispiel einer Spindel für eine Textilmaschine wird gezeigt, wie ein hochintegriertes Magnetlagersystem aufgebaut werden kann.

Kapitel 5 (Entwurf) zeigt, wie weit die Optimierung getrieben werden kann.

In Kapitel 6 (Aufgaben des Rechners) werden die Konsequenzen behandelt, die sich daraus ergeben. Es wird gezeigt, wie die auftretenden Probleme gelöst werden können.

In Kapitel 7 (Anlage mit mehreren Spindeln) wird schliesslich auf Aspekte eingegangen, die beim Einsatz mehrerer Magnetlager zusammen in einer Anlage von Bedeutung sind.

2. Einzelkomponenten

Um neue Konzepte finden zu können, müssen wir vorerst Abstand zu bestehenden Lösungen bekommen. Wir müssen neue, unbekannte Wege einschlagen, die vorerst wenig vorteilhaft scheinen. So wird es möglich, eine Übersicht über neue Varianten zu erlangen.

In diesem Kapitel werden die Komponenten Regler, Verstärker, Sensoren und Magnete einzeln betrachtet. Es wird aufgezeigt, welche Anpassungen dank den speziellen Anforderungen vorgenommen werden können. Die Einzelkomponenten werden im Hinblick auf das Verhalten des ganzen Systems optimiert. Es werden viele verschiedene Konstruktionen diskutiert. Unter anderem wird das in dieser Arbeit entstandene Wegmesssystem ECS6 vorgestellt.

2.1 Regler

Der Regler bestimmt das Verhalten des Magnetlagersystems. Mit ihm wird die Steifigkeit und die Dämpfung eingestellt. Die Pole des geschlossenen Regelkreises liegen oft weit über 100Hz. Der Regler muss deshalb recht schnell sein. Im Regelkreis müssen die Totzeiten minimal gehalten werden, um eine robuste Regelung der instabilen Regelstrecke zu gewährleisten.

In der Vergangenheit wurden oft analoge Regler eingesetzt. Sie sind schneller als digitale Regler und können sehr einfach aufgebaut werden, solange die Reglerordnung klein ist.

In den letzten Jahren setzten sich digitale Regler immer mehr durch. Die Reglerparameter können viel exakter und schneller abgeglichen werden, und es treten keine Probleme mit Temperaturdriften auf. Die Überwachungsfunktionen und auch die Fehlerdiagnose können per Software erledigt werden. Die digitale Regelung mit einem Mikroprozessor (μP) ist daher nicht nur flexibler, sondern benötigt auch weniger Bauteile.

Moderne Reglerauslegungsmethoden führen, zusammen mit genaueren Modellen der Regelstrecke, meistens zu einer hohen Reglerordnung. Solche Regler können in analoger Technik gar nicht mehr realisiert werden, weil die Streuung der Reglerparameter durch Bauteiltoleranzen zu gross ist.

Durch die enorme Steigerung der Rechenleistung der μPs ist auch der erforderliche Reglertakt kein Problem mehr. Bei der Regelung von fünf

Achsen mit einem Signalprozessor wird eine Abtastfrequenz von über 10kHz erreicht.

Diese Frequenz ist ausreichend hoch, um die analogen Regler zu verdrängen. Bei extremen Anforderungen können die Regler auch auf mehrere Prozessoren verteilt werden, um die Abtastfrequenz noch weiter zu steigern.

Wenn durch neue Materialien in Zukunft die magnetgelagerten Rotoren immer höhere Drehzahlen erreichen und immer kompliziertere und schnellere Regler erforderlich sind, so wird diese Entwicklung sicher nicht schneller voranschreiten als die Leistungssteigerung der μ Ps. Es ist daher zu erwarten, dass die analogen Regler vollständig durch digitale Regler abgelöst werden. (Dies gilt nur für makroskopische Strukturen.)

Für einfache Systeme können die Signalprozessoren durch preiswerte Mikrokontroller (μ C) ersetzt werden. Dies reduziert den schaltungstechnischen Aufwand, weil die Peripheriefunktionen (Analog-Digital-Wandler, Kommunikation mit der Umwelt) im μ C integriert sind.

2.2 Verstärker

Um die Regelung des Magnetlagers nicht unnötig zu erschweren, muss der Verstärker sehr schnell sein. Da die Induktivität der Lagermagnete meistens recht gross ist, sind hohe Verstärkerleistungen notwendig, um die geforderte Bandbreite zu erreichen.

Es gibt lineare und geschaltete Verstärker. Die geschalteten Verstärker werden hier eingehend untersucht.

2.2.1 Linearverstärker

Linearverstärker (analoge Arbeitsweise) haben den Vorteil, dass sie ein sehr sauberes Ausgangssignal erzeugen, praktisch keine Störstrahlung erzeugen und einfach aufgebaut sind. Der Wirkungsgrad ist aber derart schlecht, dass sie höchstens für sehr kleine Lager in Frage kommen¹.

¹ Der Wirkungsgrad ist tief, weil der Strom in der Speisung stets gleich gross ist wie der Ausgangsstrom. Nehmen wir beispielsweise an, eine magnetgelagerte Frässpindel, wie sie in [Siegwart 89] beschrieben ist, würde mit einem analogen Verstärker betrieben. Bei 300V Zwischenkreisspannung (Speisespannung des Verstärkers) und 4A Vormagnetisierung (mittlerer Ausgangsstrom) ergibt sich eine Verlustleistung von insgesamt 12kW für zehn Kanäle. Bei einem Wicklungswiderstand von 1Ω werden 160W der 12kW in den zehn Lagermagneten umgesetzt. Der Rest (11.84 kW) fällt als Wärme im Verstärker an.

Es gibt spezielle Linearverstärker mit stufenweise umschaltbarer Speisespannung. Sie schalten die Speisespannung immer so tief herunter wie möglich [Cerruti 94]. Dadurch wird der Wirkungsgrad deutlich besser, allerdings steigt dann auch der Aufwand. Die Entwicklung und der Einsatz solcher Verstärker ist nur für experimentelle Zwecke sinnvoll. In industriellen Anwendungen werden mit Vorteil geschaltete Verstärker eingesetzt.

2.2.2 Geschaltete Verstärker

Geschaltete Verstärker sind kleiner und arbeiten wirtschaftlicher. Sie sind zwar komplizierter und schwieriger zu bauen als Linearverstärker, haben aber einen höheren Wirkungsgrad. Dadurch können kleinere Leistungshalbleiter eingesetzt werden, und die Kühlung wird einfacher.

Der hohe Wirkungsgrad des geschalteten Verstärkers rührt von den Schaltern her. Bei offenem Schalter gibt es keine Verluste, weil (fast) kein Strom fließt und bei geschlossenem Schalter, wenn Strom fließt, kann der Spannungsabfall im Schalter sehr gering gehalten werden. Nur während des Schaltvorgangs selbst liegt gleichzeitig die hohe Spannung und der Strom am Schalter an. Wenn schnelle Schalter verwendet werden, beträgt die durchschnittliche Verlustleistung im Halbleiterschalter nur wenige Prozent der Ausgangsleistung.

Fig.2.1 zeigt das Funktionsprinzip eines solchen Verstärkers. Es entspricht der Standardschaltung (H-Brücke) wie sie auch für Gleichstrommotoren verwendet wird. Da die Stromrichtung bei Magnetlagern nicht umkehrbar sein muss, können zwei der vier Schalter als Dioden ausgeführt werden.

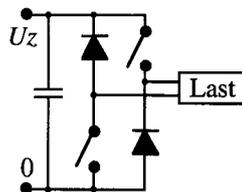


Fig. 2.1 Geschalteter Verstärker für Magnetlager. Es sind nur zwei Leistungsschalter notwendig, da die Stromrichtung nicht umkehrbar sein muss.

Wenn die Schalter geschlossen sind, bezieht der Verstärker Energie aus einem Gleichspannungs-Zwischenkreis U_z (Stromversorgung) und schickt sie ins Lager, wo ein Magnetfeld aufgebaut wird. Wenn die Schalter öffnen, wird das Feld abgebaut und die Energie fließt wieder in den Gleichspannungs-Zwischenkreis zurück.

In [Schweitzer 94] wurden Alternativen zu diesem Prinzip vorgestellt. Diese Schaltungsvorschläge bieten jedoch keine verbesserten Integrationsmöglichkeiten.

2.2.3 Ansteuerung der Schalter

Die Schalter müssen mit einer hohen Taktfrequenz betrieben werden, damit der Strom durch die Lastinduktivität ausreichend geglättet wird. Meistens werden Pulsweitenmodulatoren eingesetzt.

Es gibt auch andere Modulatoren. Closed-Loop-Verfahren wie beispielsweise Hystereseverstärker sind weit verbreitet. J. Holtz gibt einen Überblick zu den verschiedenen Verfahren [Holtz 92].

Aus der Umrichtertechnik für Drehfeldmotoren sind verschiedene optimierte Methoden zur Ansteuerung der Leistungsschalter bekannt, z.B. [Svensson 88]. [Lotzkat 91] beschäftigt sich mit aufwandarmen und netzausfallsicheren Frequenzumrichtern. Die optimierten Ansteuerungsmethoden finden erst breiten Einsatz, seitdem die Umrichter mit leistungsfähigen Prozessoren ausgerüstet und die Leistungshalbleiter direkt digital angesteuert werden. Diese Verfahren führen zu einem höheren Wirkungsgrad, grösserer Leistungsdichte im Umrichter und im Motor, zu weniger Oberwellen im Netz und zu einer Kostensenkung.

Das alles ist für Magnetlager auch denkbar. Es gibt aber ein paar wesentliche Unterschiede, die es verunmöglichen, diese Methoden direkt zu übernehmen:

Magnetlager haben im Gegensatz zu Drehstromantrieben

- eine Vormagnetisierung (die Summe der Ströme ist nicht null.)
- keinen dreiphasigen Anschluss (ausser bei [Bichsel 90], [Schöb 93])
- eine instabile Regelstrecke
- keine vorausberechenbaren Spulenspannungen (bzw. -ströme)

Beim Magnetlager ist der Spielraum bei den Modulationsarten stark eingeschränkt, weil die Totzeit der Regelstrecke minimiert werden muss. Die Pulsmuster können nicht im voraus ('offline') optimiert werden. Auch Ansätze wie die Raumzeiger-Methoden finden keine Verwendung, weil gar kein Drehfeld gefragt ist. Für Magnetlager ist die Pulsweitenmodulation (PWM) eine gute Lösung.

Closed-Loop-Modulatoren wie Hystereseverstärker haben auch ein gutes oder sogar besseres Verhalten bezüglich Schrittantwort. Das Frequenzspektrum der Ausgangsspannung reicht bei diesen Verfahren jedoch bis zu

tiefen Frequenzen herunter, sie haben keine untere Grenze. Diese tiefen Frequenzkomponenten können die Positionsregelung des Magnetlagers stören.

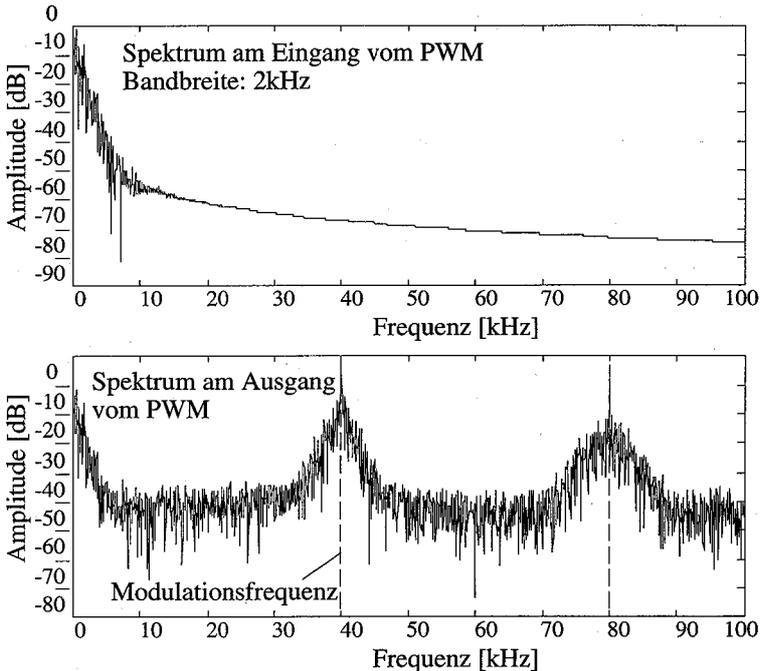


Fig. 2.2 Spektrum der PWM.

Oben: Bandbegrenztes Reglersignal von ca. 2kHz am Verstärkereingang.

Unten: Pulsweitenmoduliertes Signal, 40kHz Träger und 1. Harmonische bei 80kHz

Bei der Pulsweitenmodulation (PWM) hingegen ist gemäss Abtasttheorem unterhalb der halben Modulationsfrequenz nur noch das Nutzsignal vorhanden (Fig. 2.2). Ausserdem verhält sich die PWM fast linear, d.h. die Übertragungsfunktion des Verstärkers ist praktisch unabhängig von der Amplitude². Sie kann beim Reglerentwurf berücksichtigt werden. Ein weiterer Vorteil der Pulsweitenmodulation ist, dass im Spektrum auch bei hohen Frequenzen Lücken mit geringen Störungen vorhanden sind. In Fig. 2.2 sieht man sehr gut, wie die harmonischen Frequenzen des 40kHz Pulsweiten-signals (alle ganzen Vielfachen der Modulationsfrequenz) durch die

2 Die PWM ist fast linear, weil die Pulsweitenmodulation einer Abtastung mit der Taktfrequenz entspricht. Da der Schaltzeitpunkt am Modulatorausgang vom Steuersignal abhängt, ist diese Abtastung phasenmoduliert. Diese Nichtlinearität darf im allgemeinen vernachlässigt werden.

Modulation 'verschmiert' werden. Bei einem Eingangssignal am Verstärker mit begrenzter Bandbreite bleiben zwischen diesen Vielfachen der Modulationsfrequenz Frequenzbänder mit sehr geringer Energie übrig. Bei diesen Frequenzen können Sensorsysteme betrieben werden, ohne dass sie vom Verstärker gestört werden. (Sensoren mit Trägerfrequenz siehe Abschnitt 2.3.1)

2.2.4 Optimierte Pulsweitenmodulation

Die gepulste Spannung erzeugt im Lagermagneten einen Stromrippel und somit pulsierende Magnetkräfte. Dieser Stromrippel kann klein gehalten werden, indem eine hohe Schaltfrequenz gewählt wird. Dabei steigen jedoch die Schaltverluste im Verstärker.

Eine andere Massnahme ist, gegenüberliegende Magnete so zu synchronisieren, dass sich der Krafftrippel gegenseitig aufhebt. Der Stromrippel und die damit verbundenen Wirbelstromverluste in den Lagermagneten werden dadurch jedoch nicht reduziert.

Eine gute Methode, den Stromrippel und den Krafftrippel gleichzeitig zu reduzieren, ist die 3-Punkt-Taktung. Die beiden Schalter in der H-Brücke werden separat angesteuert. Die Spannung über der Last hat so drei mögliche Werte ($-U_z$, $0V$, $+U_z$). Es schaltet jeweils nur einer der beiden Schalter, die Schaltverluste halbieren sich und der Stromrippel wird sehr klein. Derselbe Effekt kann auch mit einer versetzten Taktung erreicht werden, indem die Pulsweitsignale für die beiden Seiten der H-Brücke gegeneinander 180° phasenverschoben werden [Stemmler 64], [Zhang 95].

Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von mehreren Spannungsniveaus ist, dass auch der Gleichspannungs-Zwischenkreis mit weniger Stromrippel belastet wird. Diese Belastung lässt sich noch weiter reduzieren, indem alle Verstärkerkanäle zueinander phasenverschoben synchronisiert werden. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Lebensdauer der Glättungskondensatoren im Zwischenkreis aus.

Bei Antrieben hoher Leistung und grosser Drehzahl werden oft Frequenzumrichter mit fünf (oder mehr) Spannungsniveaus am Ausgang verwendet. (U_z , $U_z/2$, 0 , $-U_z/2$, $-U_z$). Dadurch kann der Stromrippel weiter reduziert werden. Bei Magnetlagern ist die Induktivität ausreichend gross, sodass solche aufwendigen Massnahmen meistens nicht notwendig sind.

Bei hohen Zwischenkreisspannungen und langen Zuleitungskabeln zur Magnetspule bieten solche Schaltungen jedoch Vorteile. Der steile Spannungsanstieg der Halbleiterschalter zusammen mit der Kabelkapazität führt zu sehr grossen Stromspitzen. (Überlastung der Halbleiter, EMV-Probleme).

Für die steilen Spannungsflanken ist nur der Wellenwiderstand des Kabels wirksam. Diese Stromspitzen können mit kostspieligen Filtern zwischen Verstärker und Kabel bekämpft werden. Eine gute Alternative dazu ist, die Höhe der Spannungssprünge zu reduzieren, was durch die Verwendung mehrerer Spannungsniveaus erreicht werden kann. Das Prinzip mit den fünf Spannungsniveaus ist auch für Magnetlager realisierbar, es lohnt sich aber erst bei hohen Verstärkerleistungen und langen Kabeln oder bei Problemen mit Wirbelströmen im Magnetkern.

2.2.5 Stromregelkreis und Vorfilter

Die meisten Magnetlager sind stromgesteuert. Der Positionsregler gibt einen Sollstrom an den Verstärker weiter. Im Verstärker wird dann der Pulsweitenmodulator so eingestellt, dass der Sollstrom erreicht wird. Dazu ist ein Stromregelkreis notwendig. (Als Stromregler werden meistens einfache analoge P, PI, PID und Lead-Lag-Regler verwendet.) Bei solchen Magnetlagern handelt es sich um eine Kaskadenregelung.

Meistens wird versucht, den unterlagerten Stromregler viel schneller als die überlagerte Positionsregelung zu machen. Dies kollidiert mit der Forderung nach geringen Verlusten und tiefer Schaltfrequenz im Verstärker. Es ist ein Kompromiss nötig. Im folgenden wird diese Problematik genauer analysiert.

Mit einem Vorfilter kann die Übertragungsfunktion des Verstärkers verbessert werden. Ein solches Filter wird in der Praxis direkt im Positionsregler integriert, z.B. indem der Verstärker (ohne Vorfilter) im Modell der Regelstrecke berücksichtigt wird. Bei der modellbasierten Reglerauslegung ergibt sich dann die entsprechende Kompensation von selbst.

Es stellt sich nun die Frage, wie schnell der Stromregler mindestens sein muss und wieviel mit einem Vorfilter am Verstärkereingang erreicht werden kann. Dazu betrachten wir den Verstärker bestehend aus dem Vorfilter G_v , dem Stromregler G_r und dem Pulsweitenmodulator mit dem Lagermagneten G_p (Fig. 2.3).

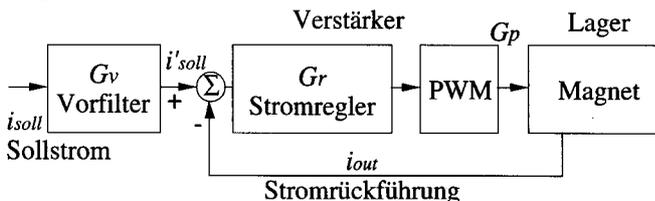


Fig. 2.3 Geschalteter Verstärker mit Stromregelkreis und Vorfilter

Die Übertragungsfunktion des Verstärkers ohne Vorfilter ist:

$$G'_{verst} = \frac{i_{out}}{i'_{soll}} = \frac{G_r \cdot G_p}{1 + G_r \cdot G_p} \quad (17)$$

Mit dem Vorfilter kann der minimalphasige Anteil dieser Übertragungsfunktion (UTF) kompensiert werden. Für die UTF des ganzen Verstärkers inklusive Vorfilter bleibt nur der nichtminimalphasige Anteil übrig. Eine solche Kompensation ist technisch möglich, wenn keine schlecht gedämpften Pole auftreten (Herleitung siehe Anhang 1.1). Es gibt auch keine Probleme mit der Signalamplitude am PWM, da der Verstärker mit dieser Massnahme nicht schneller gemacht wird. Es geht darum, den Stromregler langsamer zu machen, ohne dass die Signale am Verstärkerausgang ändern.

Es hat sich gezeigt, dass der **Stromregler keinen Einfluss auf das Führungsverhalten der Regelstrecke** hat, solange der Stromregler selbst minimalphasig ist und ein entsprechendes Vorfilter eingesetzt wird! (siehe Anhang)

Da das Vorfilter vom Lagermagneten und vom Rotor abhängt, kann es nicht beliebig genau bestimmt werden. Der Stromregler darf daher nicht zu langsam sein. Es ist aber nicht notwendig, ihn schneller als den Lageregler zu machen³.

Beim Vergleich verschiedener Verstärker für Magnetlager ist deshalb der nichtminimalphasige Anteil der Übertragungsfunktion wesentlich. Der Amplitudengang ist nicht aussagekräftig, der Phasengang zählt!

Neben dem Führungsverhalten des Verstärkers muss auch das Verhalten des Rotors gegenüber einer äusseren Störkraft untersucht werden. Interessanterweise beeinflusst der Verstärker diese Störungsübertragungsfunktion schon im offenen Regelkreis (ohne Positionsregelung). Um diesen Effekt zu sehen, muss der Verstärker zusammen mit dem Rotor betrachtet werden. Fig. 2.4 zeigt den Verstärker mit Vorfilter G_v , Stromregler G_r , und Magnetspulen G_f (inkl. Pulsweitenmodulator mit Leistungsschaltern) und Rotorsystem G_m .

³ Am Beispiel der digitalen Regelung ist dies leicht ersichtlich: Die Abtastrate des Positionsreglers muss einiges schneller als die Zeitkonstanten des Rotors gewählt werden. Wenn der Stromregelkreis gleich schnell wie der Positionsregler ist, korrigiert das Vorfilter den Frequenzgang vorwiegend bei den hohen Frequenzen nahe der Abtastrate. Dieser obere Frequenzbereich wird vom Rotor nicht mehr beeinflusst. Das Vorfilter ist dann weitgehend unabhängig vom Rotor. Es muss im Wesentlichen nur die Lagerinduktivität berücksichtigt werden, was leicht möglich ist.

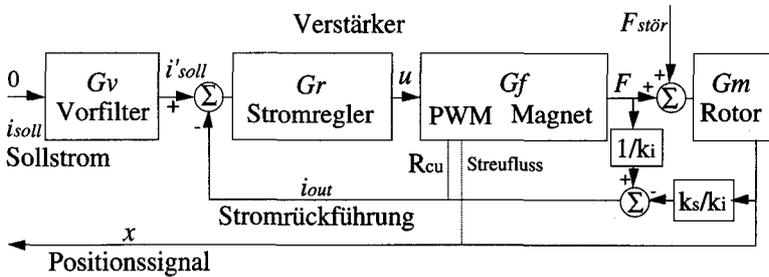


Fig. 2.4 offene Regelstrecke des Magnetlagers (Herleitung im Anhang 1.2): Stromgesteuerter Verstärker mit Vorfilter G_v , Stromregler G_r , und Magnetspulen G_f (inkl. Pulsweitenmodulator mit Leistungsschaltern) und Rotorsystem G_m .

Für die Störungsübertragungsfunktion gemäss Fig. 2.4 ergibt sich: (Herleitung im Anhang 1.2)

$$G_{stör} = \frac{G_m}{1 - G'_{verst} \cdot G_m \cdot k_s} \quad (18)$$

$$\text{wobei: } G'_{verst} = \frac{G_r \cdot G_f \cdot \frac{1}{k_i}}{1 + G_r \cdot G_f \cdot \frac{1}{k_i}} = \left. \frac{i_{out}}{i'_{soll}} \right|_{x=0} \quad (19)$$

Wenn die Verstärkerbandbreite sehr gross ist (schneller Stromregler, $G'_{verst} \rightarrow 1$), erhält man die bekannte instabile Störungsübertragungsfunktion des Magnetlagers. Die vereinfachte Gleichung für die Schwebekugel ergibt sich aus $G_m = 1/m \cdot s^2$:

$$(18) \quad \text{Allgemein: } G_{stör} = \frac{G_m}{1 - G_m \cdot k_s} \quad (20)$$

$$\text{Schwebekugel: } G_{stör} = \frac{1}{s^2 \cdot m - k_s} \quad (21)$$

Für reale Verstärker mit begrenzter Bandbreite kann geschrieben werden:

$$(18) \quad G_{stör} = \frac{G_m}{1 - G_m \cdot \tilde{k}_s} \quad , \quad \text{wobei} \quad \tilde{k}_s = k_s \cdot G'_{verst} \quad (22)$$

Die Störungsübertragungsfunktion verhält sich so, als ob die Lagerkonstante k_s ändern würde. Oberhalb der Grenzfrequenz des Verstärkers ($G'_{verst} \rightarrow 0$) verschwindet das k_s !

Es können folgende Schlüsse gezogen werden:

Die Störungsübertragungsfunktion im offenen Regelkreis verliert durch den langsamen Stromregler bei höheren Frequenzen an Instabilität. Die Regelstrecke (x/i_{soll}) ändert sich dabei nicht, wenn ein entsprechendes Vorfilter eingesetzt wird. Ein langsamer Stromregler ist folglich bezüglich Störverhalten vorteilhaft. Dies gilt insbesondere bei elastischen Rotoren, wo hohe Eigenfrequenzen die Stabilität gefährden können.

Wie bei der Führungsübertragungsfunktion ist es auch bei der Betrachtung der Störungsübertragungsfunktion sinnvoll, den Stromregler im Verstärker etwa gleich schnell wie den Positionsregelkreis zu machen. Die negative Steifigkeit des Magnetlagers tritt dann nur noch im unteren Frequenzbereich auf, wo der Positionsregler den Rotor stabilisiert. Diese Eigenschaft ermöglicht den Bau eines passiven Systems, wie es in [Herzog 91] behandelt wird. Die Passivität kann jetzt auch oberhalb der Bandbreite des Positionsreglers gewährleistet werden!

Für den Bau von Verstärkern bedeutet dies, dass der Stromregler durchaus langsam sein darf, solange der Verstärker linear modelliert werden kann (und der Stromregler selbst minimalphasig ist, was meistens der Fall ist). Die Signalpegel im Verstärker müssen so skaliert sein, dass der Ausgang des Vorfilters nicht begrenzt wird. Einzig die maximale Spannung und der maximale Strom am Verstärkerausgang sind begrenzend.

Der Stromregler darf langsam sein, die minimale Totzeit ist jedoch nach wie vor wichtig. Die hohe Taktfrequenz von Magnetlagerverstärkern ist nötig, um eine kleine Totzeit zu erreichen, nicht aber, um eine schnelle Stromregelung zu ermöglichen!

2.3 Sensoren

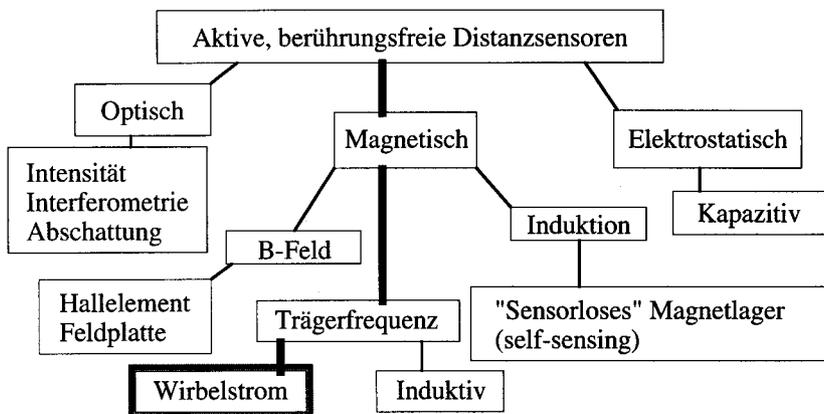


Fig. 2.5 Sensoren zur berührungsfreien Positionsmessung

Ein weiteres Schlüsselement sind die Sensoren. Sie geben dem Regler die nötigen Informationen über den Rotor. Meistens werden dazu berührungsfreie Positionssensoren verwendet. Fig. 2.5 gibt eine Übersicht über verschiedene Sensortypen.

Die Anforderungen an die Bandbreite und das Rauschen der Sensoren sind hoch, denn der Rotor kann nur so präzise und ruhig schweben, wie die Sensorsignale dies zulassen. Für magnetgelagerte Schleifspindeln muss die Auflösung besser als $1\mu\text{m}$ und die Bandbreite mehrere kHz betragen.

Auch bei weniger anspruchsvollen Einsatzgebieten muss den Sensoren besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die Sensoren werden meist direkt neben den Lagermagneten eingebaut und sind daher starken Magnetfeldern ausgesetzt. Bei der Verwendung von geschalteten Verstärkern kommt eine beträchtliche Störstrahlung hinzu.

Auch die Leitungen zwischen Magnetlager und Steuerelektronik führen zu Problemen, weil Sensor- und Leistungskabel oft über mehrere Meter parallel verlaufen.

Manche Sensortypen beeinflussen sich gegenseitig, wenn sie eng zusammen eingebaut werden oder wenn die Sensorkabel untereinander nicht sauber abgeschirmt werden. Bei nicht synchronisierten Induktions- und Wirbelstromsensoren treten dann Schwebungseffekte auf, und das Magnetlager 'singt' abhängig von der Rotorposition auf verschiedenen Frequenzen.

Unter den verschiedenen Messprinzipien (Übersicht Fig. 2.5) haben sich die magnetischen Positionssensoren mit Trägerfrequenz (Induktiv und Wirbel-

strom) bewährt. Sie sind unempfindlich gegen Verschmutzung, sind mechanisch einfach und robust aufgebaut, haben eine hohe Auflösung, wenig Temperaturdrift und sind dank der Trägerfrequenz auch unempfindlich gegen die grossen Störfelder. Sie haben den Nachteil, dass die Signalverarbeitungselektronik aufwendig ist. Aus Platzgründen wird sie nicht im Sensorkopf integriert. Sensorkopf und Signalverarbeitungselektronik werden meistens mit einem Koaxialkabel verbunden, was einen erheblichen Verdrahtungsaufwand bedeutet. Diese Nachteile konnten weitgehend behoben werden (siehe 2.3.1). In dieser Arbeit wurden deshalb ausschliesslich Wirbelstromsensoren eingesetzt.

Neben den Positionssensoren gibt es auch andere Sensor-Varianten. Mit einer Magnetfeldmessung im Luftspalt der Lagermagnete kann die Position indirekt bestimmt werden [Zlatnik 90]. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass die Sensoren direkt am Angriffspunkt der Kräfte messen. Bei den Positionssensoren ist das nicht so – sie werden meistens neben den Lagermagneten montiert, was bei elastischen Rotoren zu Stabilitätsproblemen führen kann.

Es ist sogar möglich, 'sensorlos' d.h. ohne eigentlichen Sensor zu arbeiten und die notwendige Information aus den Spannungen und Strömen an den Magnetspulen zu ziehen, um einen Körper schweben zu lassen [Vischer 88]. Das funktioniert dann allerdings nur mit Kompromissen bezüglich Steifigkeit und Robustheit. Bei industriellen Systemen mit Wirbelströmen und Ummagnetisierungsverlusten im Rotor, bei langen Verbindungskabeln, bei elastischen Rotoren, bei schnell drehenden Rotoren und zusammen mit geschalteten Verstärkern dürfte die Reglerauslegung Schwierigkeiten bereiten. Anstelle des Sensors ist eine sehr exakte Strom- und Spannungsmessung nötig, was beim heutigen Stand der Technik den Elektronikaufwand erhöht. Das sensorlose Prinzip ist deshalb vor allem für Anwendungen geeignet, wo der Platz für die Sensoren und deren Zuleitungen fehlt.

Meistens kann das Fundament (Gehäuse, Lagerbock) als starr vorausgesetzt werden. Ist das nicht der Fall, muss dies im Regler berücksichtigt werden. Es kann ein Beobachter für das Fundament implementiert werden. Wenn die Anregungskräfte oder das Fundament unbekannt sind, funktioniert ein Beobachter nicht. Die Gehäuseschwingung muss direkt mit zusätzlichen Sensoren gemessen werden. Mit kombinierten Beschleunigungs-Distanz-Sensoren könnten die Gehäusevibrationen erfasst und daraus die Position des Rotors in einem (starrten) Bezugssystem bestimmt werden. Es wäre dann möglich, den Rotor unabhängig vom Gehäuse zu regeln. So könnten beispielsweise bei Werkzeugmaschinen Vibrationen und Ungenauigkeiten in den Führungen kompensiert werden. Eine solche Einrichtung wäre regelungstechnisch sicher sehr interessant (Ausblick).

2.3.1 Wirbelstromsensor ECS6

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein mehrkanaliger Distanzsensor für den Einsatz in Magnetlagern entwickelt. Es wurde besonderer Wert auf eine hohe Störfestigkeit bei gleichzeitig hoher Bandbreite gelegt [Bühler 93]. Das Sensorsystem besteht aus einer Auswertelektronik für sechs Sensorkanäle. Es können somit mit einer Karte alle fünf Achsen eines Rotors und die Drehzahl⁴ gemessen werden.

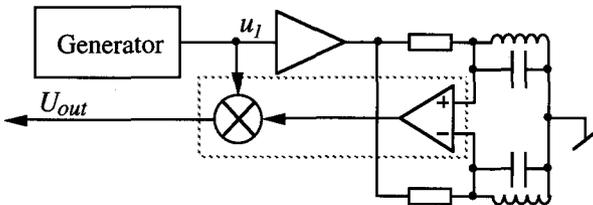


Fig. 2.6 Blockschaltbild ECS6, ein Sensorkanal mit zwei Spulen.

Fig. 2.6 zeigt das Blockschaltbild eines Senorkanals. Für jeden Kanal werden zwei gegenüberliegende Sensorspulen eingesetzt. Über Widerstände wird das Generatorsignal den beiden Sensorspulen zugeführt. Dabei werden die Schwingkreise mit Sensorspule und Kondensator in Schwingung versetzt. Sobald sich der Rotor einer Spule nähert, dringt das Magnetfeld der Spule in den Rotor ein. Die dabei entstehenden Wirbelstromverluste führen zu einer Dämpfung im Sensorschwingkreis. Dadurch sinkt die Spannungsamplitude. In der Sensorelektronik wird die Differenz der Spannungsamplituden der zwei gegenüberliegenden Sensorspulen gemessen und mit dem Generatorsignal u_1 multipliziert. Diese synchrone Gleichrichtung entspricht einer Abbildung der Schwingungsfrequenz auf Gleichspannung (Fig. 2.7). Die wegabhängige Modulation der Schwingungsamplitude erscheint direkt als Spannungssignal U_{out} am Ausgang des Multiplizierers.

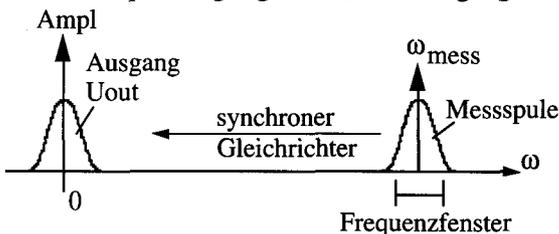


Fig. 2.7 Frequenzspektren der Spannung an den Sensorspulen und am Ausgang

4 Für die Drehzahlerfassung wäre kein analoger Sensor nötig, es reicht auch ein digitaler Pulsgeber. Das Magnetlager ist jedoch wartungsfreundlicher und einfacher zu verdrahten, wenn alle Sensoren einheitlich gestaltet sind.

Anschliessend werden mit einem Tiefpassfilter die hohen Frequenzkomponenten herausgefiltert. Dies führt gleichzeitig zu einer guten Selektivität der Frequenzen bei der Messspule (schmales Frequenzfenster). Einstreuungen des Leistungsverstärkers über die Kabel und die Sensorspule werden wirksam weggefiltert, solange sie nicht die gleiche Frequenz wie die Generatorspannung u_I haben.

Durch die Verwendung von zwei Sensorspulen wird eine gute Linearisierung erreicht und Sensordriften durch Temperaturschwankungen heben sich auf. Die Verbindungsleitungen zwischen Sensorspulen und Auswertelektronik können, paarweise verdreht, alle parallel in einem Kabel geführt werden. Da die Sensoren alle mit der gleichen quartzstabilisierten Frequenz betrieben werden, müssen die Leitungen untereinander nicht abgeschirmt werden.

Die Messfrequenz kann in weiten Bereichen eingestellt werden. Dadurch wird eine hohe Flexibilität erreicht. Für einen kleinen Luftspalt wird beispielsweise eine Frequenz von 1MHz gewählt. Die Bandbreite des Sensorsystems ist dann grösser als 20kHz und weitgehend minimalphasig. Die Auflösung ist besser als $1\mu\text{m}$ und die kleinen Sensorspulen haben unter den Wickelköpfen der Lagermagnete Platz. Dadurch kann die Baulänge des Rotors kurz gehalten werden. Bei grossen Sensorspulen, langem Sensorkabel ($>20\text{m}$) oder wenn durch eine dünne Stahlwand hindurch gemessen werden muss, wird eine tiefere Messfrequenz gewählt. Dabei reduziert sich die Bandbreite entsprechend.

2.4 Magnete

Die Elektromagnete sind die Aktoren des Magnetlagers. Sie werden so angeordnet, dass Kräfte in den gewünschten Angriffspunkten in die entsprechenden Richtungen ausgeübt werden. Meistens werden pro Achse zwei gegenüberliegende Magnete eingebaut. Die Magnete können aber auch beliebig verschoben und gedreht werden. Wichtig ist nur, dass dabei die Steuerbarkeit des Systems erhalten bleibt.

2.4.1 Kraftrichtung

Ein Radiallager kann mit drei anstelle von vier Magneten aufgebaut werden. Bei der Ansteuerung ist dann eine Koordinatentransformation nötig. Auf die gleiche Art und Weise können auch Radial- und Axiallager kombiniert werden. Im folgenden werden die resultierenden Kräfte eines einzelnen Magneten in einer solchen Kombination berechnet (Fig.2.8).

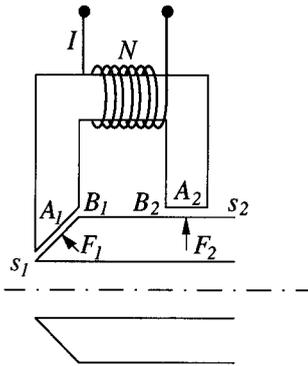


Fig. 2.8 Magnet mit Kräften F_1 und F_2 in verschiedenen Richtungen.

Da die beiden Polschuhflächen A_1 und A_2 verschieden sind, sind auch die Flussdichten B_1 und B_2 unterschiedlich. Das Magnetlagermodell aus Kapitel 1 (Fig. 1.2) ändert leicht. Unter Vernachlässigung vom Streufluss ist der magnetische Fluss Φ in beiden Polschuhen derselbe (Fig. 2.9). Bei homogenem Feld gilt:

$$\Phi = B_1 \cdot A_1 = B_2 \cdot A_2 \quad , \text{(homogenes Feld, kein Streufluss)} \quad (23)$$

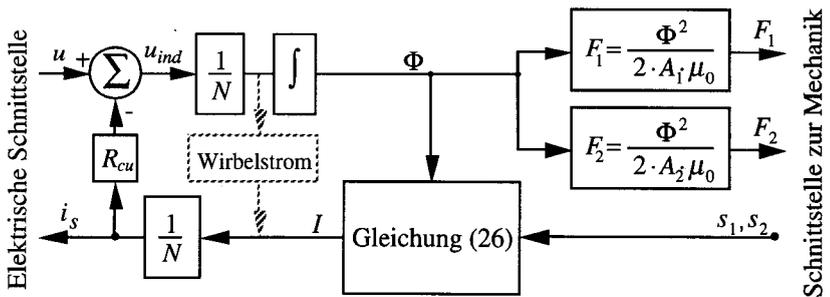


Fig. 2.9 Modell des Magnetlagers mit den Kräften F_1 und F_2 der Polschuhe. (ohne Streufluss)

Die beiden Kräfte sind:

$$F_1 = \frac{\Phi^2}{2 \cdot A_1 \cdot \mu_0} \quad , \quad F_2 = \frac{\Phi^2}{2 \cdot A_2 \cdot \mu_0} \quad (24)$$

somit gilt:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (25)$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, dass die **Kraft** bei der **kleinen Fläche grösser** ist, weil dort das Feld stärker ist – das stärkere Feld wirkt sich quadratisch auf die Kraft aus, die kleinere Fläche jedoch nur linear.

Da der Fluss in beiden Polschuhen immer gleich gross ist, ist auch das Verhältnis der beiden Kräfte konstant. Somit ist die **Richtung** der resultierenden Kraft **unabhängig** von den beiden Luftspalten s_1, s_2 .

2.4.2 Lagerkonstanten k_i und k_s

Für die Modellierung ist nicht nur die Richtung der Kraft wichtig, sondern selbstverständlich auch deren Betrag. Im linearisierten Modell wird dies mit den beiden Lagerkonstanten k_i und k_s beschrieben. Wie verhalten sich diese Lagerkonstanten in den beiden Luftspalten?

Unter Vernachlässigung der Nichtidealitäten des magnetischen Materials (Permeabilität, Wirbelströme, Remanenz und Ummagnetisierungsverluste) ergibt sich für k_i und k_s im linken Luftspalt von Fig. 2.8:

$$N \cdot i = H_1 \cdot s_1 + H_2 \cdot s_2 = \frac{\Phi \cdot s_1}{A_1 \cdot \mu_0} + \frac{\Phi \cdot s_2}{A_2 \cdot \mu_0} \Rightarrow \Phi = \frac{i_s \cdot \mu_0 \cdot N}{\frac{s_1}{A_1} + \frac{s_2}{A_2}} \quad (26)$$

$$(24) \quad k_{i_1} = \left. \frac{\partial F_1}{\partial i_1} \right|_{\Phi=\Phi_0} = \frac{\Phi_0}{A_1 \cdot \mu_0} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial i_1} = \frac{\Phi_0}{A_1} \cdot \frac{N}{\frac{s_1}{A_1} + \frac{s_2}{A_2}} \quad (27)$$

$$(24) \quad k_{s_1} = \left. \frac{\partial F_1}{-\partial s_1} \right|_{\Phi=\Phi_0} = \frac{-\Phi_0}{A_1 \cdot \mu_0} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial s_1} = \frac{\Phi_0}{A_1^2} \cdot \frac{i_s \cdot N}{\left(\frac{s_1}{A_1} + \frac{s_2}{A_2} \right)^2} \quad (28)$$

Die Lagerkonstanten k_i und k_s sind von s_1 und s_2 abhängig. Die UTF in einer Richtung ist von der Rotorposition in der anderen Richtung abhängig. Es handelt sich also nicht nur um eine Kopplung der Achsen, sondern um eine Nichtlinearität des Systems.

Dieses unerwünschte Verhalten tritt nur bei Stromsteuerung auf. Bei Spannungssteuerung kann der Rotor axial und radial verschoben werden, ohne dass sich die Übertragungsfunktionen ändern, weil die Kräfte F_1 und F_2 unabhängig von den Luftspalten s_1 und s_2 sind.

$$\dot{\Phi} = \frac{u}{N} \quad (29)$$

$$(24) \quad F_1 = \frac{\Phi_0}{A_1 \cdot \mu_0 \cdot N} \int u \, dt, \quad F_2 = \frac{\Phi_0}{A_2 \cdot \mu_0 \cdot N} \int u \, dt \quad (30)$$

Es ergibt sich eine vollständige Entkopplung von axialer und radialer Richtung, solange der Vormagnetisierungsfluss Φ_0 konstant gehalten wird, und wenn der Streufluss und der Wicklungswiderstand vernachlässigbar sind.

Die Anordnung gemäss Fig. 2.10 ist eine Kombination von Axial- und Radiallager. Es handelt sich um eine homopolare Anordnung der Magnete, d.h. die Feldlinien verlaufen so, dass der Rotor beim Drehen nicht ummagnetisiert wird. Die drei Magnete an beiden Enden des Rotors erzeugen Kräfte in x-, y- und z-Richtung. Mit sechs Magneten sind so fünf Freiheitsgrade steuerbar. (Der sechste Freiheitsgrad des starren Rotors im Raum ist die Rotation um seine Drehachse.)

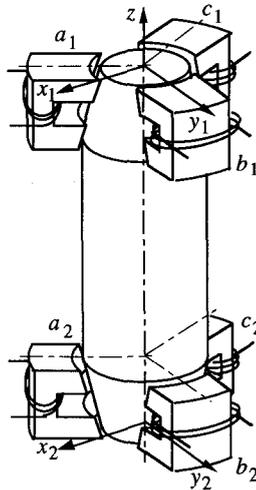


Fig. 2.10 Anordnung mit sechs Magneten ($a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$) zur aktiven Lagerung eines Rotors in allen fünf Freiheitsgraden (oben: x_1, y_1 unten: x_2, y_2 axial: z).

Da die Richtungen der Magnetkräfte unabhängig vom Luftspalt sind (Gleichung (25)), kann eine lineare Koordinatentransformation verwendet werden, um die x-, y- und z-Achsen zu entkoppeln. Eine solche Transformation ist leicht bestimmbar und benötigt nur wenig Rechenleistung im Regler.

Mit der Magnetgeometrie kann das Verhältnis zwischen Radial- und Axialkraft frei gewählt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich die

sechs Wirkungslinien der resultierenden Magnetkräfte nicht in einem Punkt schneiden, sonst können keine Momente auf den Rotor ausgeübt werden (Verlust der Steuerbarkeit).

Für die aktive Stabilisierung von Rotoren in fünf Achsen sind sechs Magnete das Minimum. Es ist grundsätzlich ein Magnet mehr erforderlich als die Anzahl zu regelnder Freiheitsgrade, weil sonst keine Vormagnetisierung mehr möglich ist⁵.

Anders betrachtet kann auch gesagt werden, dass die Höhe der Vormagnetisierung eigentlich auch ein Freiheitsgrad ist. Dieser elektrische Freiheitsgrad ergibt mit den fünf mechanischen zusammen exakt die sechs Spulen. Diese Betrachtungsweise gilt immer, auch bei der Standardanordnung mit zehn Magneten. Dort kann die Vormagnetisierung für alle fünf Achsen unabhängig gewählt werden, es sind also fünf elektrische Freiheitsgrade vorhanden. Zusammen mit den fünf mechanischen Freiheitsgraden ergeben sich wieder die zehn Spulen.

2.5 Fazit

In diesem Kapitel wurden viele verschiedene Aspekte, Probleme und Konstruktionsvarianten betrachtet.

Zuerst wurde gezeigt, dass eine analoge Regelung oft gar nicht einfacher ist als eine digitale Regelung. Bei den geschalteten Verstärkern wurden die Pulsweitenmodulatoren genauer betrachtet und der Stromregler untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Stromregelkreis durchaus langsam sein darf.

Für die Sensorik steht das in dieser Arbeit entwickelte Wegmesssystem ECS6 zu Verfügung.

Bei der Anordnung der Magnete wurde gezeigt, dass mehrere Achsen miteinander kombiniert werden können. Dabei ist eine Entkopplung der Achsen mit geringem Aufwand erzielbar, weil die Richtungen der Magnetkräfte praktisch unabhängig von der Rotorposition sind.

Aus dieser bunten Ideensammlung werden im nächsten Kapitel Vorschläge für hochintegrierte Magnetlager zusammengestellt.

⁵ Es sei denn, die Schwerkraft wird ausgenutzt oder ein Permanentmagnet wird eingesetzt, um den Arbeitspunkt einzustellen. Bei einer 'Schwebekugel' mit einem einzigen Magneten und einem geregelten Freiheitsgrad ist das der Fall. Dort stellt sich ein konstanter Strom ein, um das Eigengewicht der Kugel zu tragen, diese Arbeitspunktverschiebung wirkt als Vormagnetisierung.

3. Gesamtsystem

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie die Einzelkomponenten sinnvoll kombiniert werden können. Dabei steht die Frage nach den Schnittstellen zwischen den Funktionsblöcken im Zentrum.

3.1 Aufteilen des Systems in Funktionsblöcke

Bisher wurde das Magnetlager in die Funktionsblöcke Sensor, Regler, Verstärker und Rotor aufgeteilt. Bevor nun das Zusammenspiel dieser Funktionsblöcke im Gesamtsystem analysiert wird, ist zu überlegen, ob diese Aufteilung sinnvoll ist. Sind andere Strukturen denkbar?

Die Aufteilung in Lager und Rotor macht sicher Sinn. Beim Sensor trifft das schon nicht mehr für alle Magnetlager zu. Das 'Sensorlose Magnetlager' [Vischer 88] hat z.B. gar keinen eigentlichen Sensor; man könnte sagen, die Sensorelektronik ist im Verstärker integriert.

Auch beim Regler gibt es eine interessante Möglichkeit, diese Aufteilung in Sensor, Regler und Verstärker in Frage zu stellen. Bei einem System mit Sliding-Mode-Regler kann das Sensorsignal x direkt in den Verstärker geführt werden (Fig. 3.1). Ein solcher Regler entscheidet aufgrund des aktuellen Zustandvektors (Beobachter), bei welcher Sensorspannung x der Ausgang (Spulenspannung) ein- oder ausgeschaltet werden soll. Es gibt dann einen direkten Pfad vom Sensor über einen Komparator direkt auf die Leistungsschalter. Es ist kein Pulsweitenmodulator notwendig. Ein Teil des Reglers befindet sich im Verstärker. Der Regler bildet also keinen eigenständigen Funktionsblock mehr.

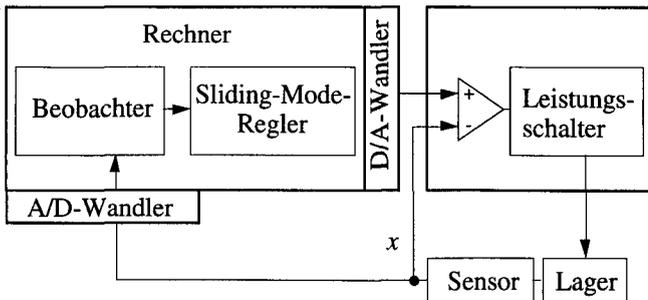


Fig. 3.1 Sliding-Mode-Regler

Beim Sliding-Mode-Konzept wird die kleinste Totzeit und der schnellste aller möglichen Regler erreicht (zeitoptimal). Das setzt eine sehr gute Modellkenntnis voraus. Die Regelstrecke müsste bis zu einer Frequenz von 20kHz exakt modelliert werden, sonst treten Grenzyklen im Hörbereich auf. Da die Regelstrecke bei Spannungssteuerung einen Tiefpass dritter Ordnung darstellt, werden Frequenzen von 20kHz bei praktisch allen Magnetlagersystemen gar nicht mehr übertragen, sie gehen im Sensorrauschen unter. Dies könnte nur mit speziellen Zusatzmassnahmen vermieden werden. Die Gefahr ist daher gross, dass ein Sliding-Mode-Regler am Rauschen scheitert. Das Sensorrauschen dürfte zudem eher gross ausfallen, weil der Verstärker ein sehr breitbandiges Störspektrum aussenden würde. (Es gibt keine definierten, regelmässigen Schaltzyklen wie bei Pulsweitenmodulatoren.)

Es ist nicht zu erwarten, dass ein solches Sliding-Mode-Konzept zu einfacheren und besseren Lösungen führt. Nur wenn sehr spezielle Anforderungen vorliegen, könnte ein Sliding-Mode-Regler Vorteile bringen.

Abschliessend kann gesagt werden, dass die Aufteilung des Systems in Sensor, Regler, Verstärker und Rotor bis auf wenige Ausnahmen sinnvoll scheint. Im weiteren wenden wir uns nun den Schnittstellen zwischen diesen Funktionsblöcken zu.

3.2 Analoge Signalübertragung

Zwischen den Komponenten Sensor, Regler und Leistungsverstärker müssen Informationen übertragen werden. Meistens werden dazu analoge Spannungen (typisch 10V-Pegel) oder Ströme verwendet. Sie können differentiell geführt werden, um die Einstreuung von Störsignalen zu unterdrücken.

Bei den Sensorsignalen kann die Störfestigkeit durch eine Modulation mit einer Trägerfrequenz wirksam erhöht werden. (Amplituden-, Frequenz- oder Phasenmodulation). Solche Signale werden zwischen Sensorkopf und nachgeschalteter Auswertelektronik bei Wirbelstrom- und Induktionssensoren verwendet (siehe 2.3.1, ECS6).

Auch zwischen Regler und stromgesteuertem Verstärker wird das Sollstrom-Signal meistens als analoge Spannung übertragen. Was passiert, wenn der unterlagerte Stromregler zusammen mit dem Positionsregler im Rechner (digitaler Regler) realisiert wird? Im Abschnitt (2.2.5) wurde gezeigt, dass der Stromregler nicht besonders schnell zu sein braucht, er kann ohne weiteres mit der selben Taktrate wie der Positionsregler laufen. Auch die

Zusatzbelastung des Rechners ist vertretbar, da der Stromregler viel weniger rechenintensiv ist als der Positionsregler.

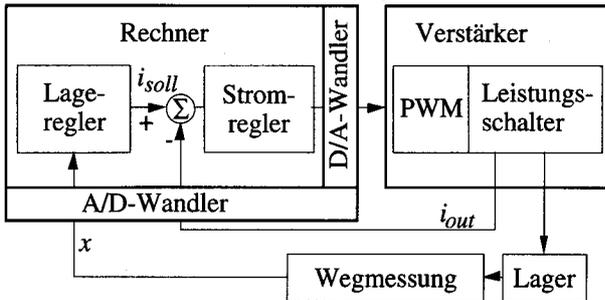


Fig. 3.2 Blockschaltbild: digitaler Stromregler mit analogem PWM.

In Fig. 3.2 steuert der Rechner den PWM mit einem Analogausgang direkt an. Die Strommessung wird in den Rechner zurückgeführt. Der analoge Stromregler entfällt. Der Verstärker wird dadurch zwar nicht wesentlich vereinfacht, da Strommessung, Überstrom- und andere Überwachungsfunktionen weiterhin erforderlich bleiben, aber die dynamische Verstärkersättigung (Spannungsbegrenzung) kann leichter erkannt und allenfalls in der Regelung berücksichtigt werden. Die Auslegung des unterlagerten Stromreglers kann per Software erledigt werden, was die Inbetriebnahme vereinfacht.

Da nun der Rechner direkt die Pulsweite ausgibt, kann anstelle der Kaskadenregelung mit unterlagertem Stromregler jetzt auch ein MISO-Regler entworfen werden. Dieser hat am Eingang die Rotorposition und den Spulenstrom und am Ausgang die Pulsweite. Die Pulsweite entspricht direkt der Spannung am Lagermagneten. Es kann daher auch die Spannungssteuerung (ohne Schaltungsänderungen) realisiert werden. Dann wird die Strommessung gar nicht mehr für die eigentliche Lageregelung verwendet. Sie ist nur noch notwendig, um die Vormagnetisierung zu erfassen und zu regeln.

Die Realisierung dieses Konzepts zieht einige Änderungen der Komponenten nach sich. Am Rechner braucht es zehn zusätzliche Analog-Eingänge (Je zwei für fünf geregelte Achsen.) und es braucht spannungsgesteuerte Verstärker.

3.3 Digitale Signalübertragung

Bei der Stromregelung im Rechner drängt sich auf, auch den PWM in den Rechner zu verlagern. Der Rechner erzeugt das PWM-Signal und steuert damit die Leistungsschalter direkt an (Fig. 3.3). Die Linearität des digitalen

PWMs ist besser als bei einem analogen PWM, und eine 3-Punkt-Taktung ist einfacher realisierbar.

Der Lageregler gibt in einem festen Takt neue Sollwerte an den PWM weiter. Wenn die Phasenlage zwischen diesem Takt und dem PWM so eingestellt wird, dass der PWM immer unmittelbar nach dem Takt schaltet, ergibt sich eine sehr kleine Totzeit zwischen Lageregler und Verstärker. Oder umgekehrt, bei gleicher Totzeit kann die Verstärkertaktfrequenz stark reduziert und der Wirkungsgrad erhöht werden.

Ein weiterer Vorteil des digitalen PWMs sind die guten Möglichkeiten zur Fehlerdiagnose. Fehler im Verstärker und in den Lagermagneten können per Software sehr einfach lokalisiert werden, weil der Rechner die Leistungsschalter einzeln ansteuern kann.

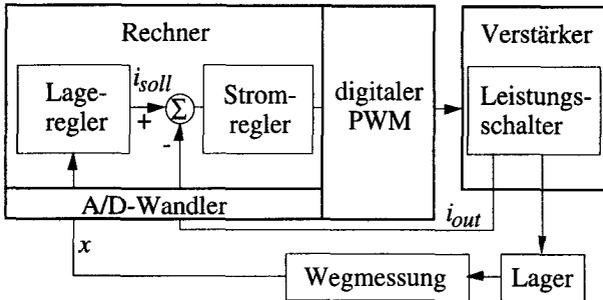


Fig. 3.3 Regelkreis mit digitalem PWM. Der Verstärker besteht nur noch aus den Leistungsschaltern und der Strommessung

Es gibt praktisch keine Verstärker mit einem Eingang für PWM-Signale auf dem Markt. Solche Verstärker müssen daher selbst entwickelt werden. Sie können beispielsweise aus fertigen Schaltermodulen aufgebaut werden.

Auch auf der anderen Seite der Regelstrecke, zwischen Sensor und Regler ist eine digitale Signalübertragung möglich. Sie ist sinnvoll, wenn sonst die Störungen zu gross sind oder wenn die Signale über grössere Distanzen übertragen werden müssen. Feldbussysteme haben teilweise ausreichend hohe Übertragungsraten, weisen aber zu grosse Totzeiten auf. Es müssen deshalb spezielle Übertragungssysteme entwickelt werden. Mit einem synchronen seriellen Bus ist es möglich, die Daten gleichzeitig mit der Analog-Digital-Wandlung zu übertragen sodass die zusätzliche Totzeit vernachlässigbar ist [Truffer/Schenkel 94]. Es werden Wandler mit dem Prinzip der sukzessiven Approximation eingesetzt. Diese liefern schon während der Wandlung serielle Daten an ihrem Ausgang. In den meisten Fällen können die Sensorsignale jedoch direkt eingelesen werden, sodass sich der zusätzliche Aufwand einer solchen Übertragung nicht lohnt.

3.4 Randprobleme

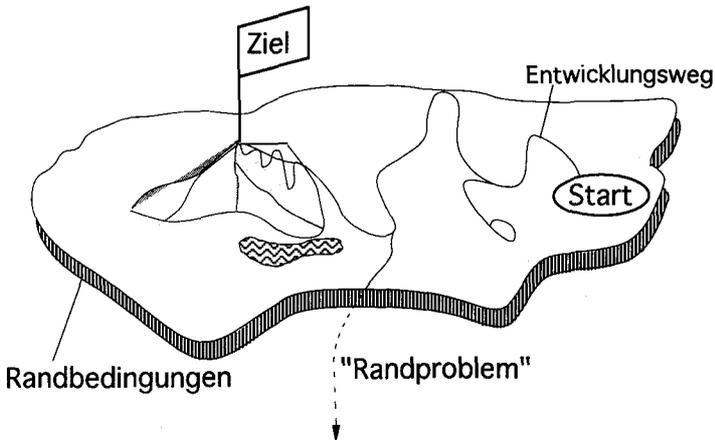


Fig. 3.4 Randprobleme: Am Rand sind die Probleme oft sehr 'tiefgründig'. Das ganze Projekt kann dort abstürzen...

Die Schlüsselfunktionen Regler, Verstärker, Magnete und Sensoren wurden soeben behandelt. Es gibt aber noch viele andere Aspekte des Magnetlagers, die oft vergessen werden. Wir Menschen haben die Eigenschaft, dass wir unangenehme Dinge gerne ignorieren, in der Hoffnung, dass sie sich von selbst lösen. Diese Strategie versagt natürlich meistens, und man glaubt sich vom Pech verfolgt. Die 'unangenehmen Dinge' definieren oft den Rand des Machbaren. Sie können zum 'Absturz' des Projektes führen - im wahrsten Sinn des Wortes.

Als Anregung wird hier eine Auswahl allfälliger Probleme aufgeführt:

Mit einer digitalen Signalübertragung kann das Rauschen verringert werden, weil Störungen auf der Leitung keine Fehler verursachen. Im Gegensatz zur analogen Variante kann es aber geschehen, dass bei hoher Drehzahl und grossen Positionsabweichungen der Störabstand nicht mehr ausreicht und die Signalübertragung vollständig zusammenbricht. Das System erholt sich dann nicht mehr, auch wenn der Rotor wieder still steht. Erklärung: Der Zusammenhang zwischen Rauschen und Übertragungsfehlern ist nichtlinear. Nichtlinearitäten können dazu führen, dass sich der Stabilitätsbereich nicht über den ganzen Arbeitsbereich erstreckt. Bei der analogen Variante, bei welcher das System als linear betrachtet werden kann, ist die Stabilität grundsätzlich im ganzen Arbeitsbereich gewährleistet.

Nicht modellierte Teile der Regelstrecke können das System so beeinflussen, dass deterministisches Chaos auftritt. Solange der Lorentzattraktor klein bleibt, verhält sich das System so, wie erwartet. Nur das Rauschen der

Signale im System ist unerwartet gross. Solche chaotischen Effekte können meistens einfach bekämpft werden, wenn der Mechanismus dahinter erkannt wird. Oft wird die Ursache für das Rauschen jedoch nicht erkannt. Um das Rauschen zu bekämpfen, werden dann nach Belieben Leitungen abgeschirmt, Filter eingesetzt und galvanische Trennungen eingeführt. Irgendwann wird dabei das System zufällig so verändert, dass der Lorentz-attraktor kleiner wird oder ganz verschwindet. Das Rauschen ist weg, ohne dass verstanden wird, weshalb.

[Knight 94] hat gezeigt, dass bei Magnetlagern im Luftspalt Bifurkationen auftreten können. D.h. bei der Kraftberechnung gibt es unter Umständen keine eindeutige Lösung.

Manchmal kommt es im Verstärker zu chaotischen Prozessen, weil dort der Reglertakt, die Streckendynamik und der Pulsweitenmodulator interagieren.

Neben dem Regelkreis kann auch die Überwachung des Systems unerwartete Probleme bereiten. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, sind verschiedene zusätzliche Funktionen nötig, wie z.B. eine unterbrechungsfreie Stromversorgung oder allenfalls eine Rückspeisung der Bremsenergie vom Motor. Ausserdem braucht es noch Entwicklungswerkzeuge für die Inbetriebnahme und die Fehlersuche. Der Aufwand für die Koordinierung und Überwachung all dieser Funktionen wird oft unterschätzt – es ergibt sich ein unbegrenztes Feld für Konstruktions- und Überlegungsfehler. Insbesondere Magnetlager für Hochgeschwindigkeitsrotoren reagieren auf solche Fehler oft ziemlich eindrücklich... Man sollte sich daher sehr genau überlegen, wie solche Fehlerquellen vermieden werden können.

3.5 Fazit

Es wurden einige neue Wege gezeigt. Das Optimierungspotential auf konzeptioneller Ebene ist noch lange nicht erschöpft. Welcher Weg beim Entwurf eines hochintegrierten Magnetlagers eingeschlagen werden soll, hängt von den Anforderungen der Anwendung ab und kann nicht allgemein beantwortet werden.

Bei der Benchmark steht die Reduktion des Aufwands im Vordergrund. Die Stückzahlen sind so gross, dass sich der Entwicklungsaufwand für ein neues Konzept lohnt. Dadurch wird der Bau des Minimal-Magnetlager-Systems ermöglicht, welches im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

4. Minimal-Magnetlager-System

Das in diesem Kapitel vorgestellte Minimal-Magnetlager-System eignet sich besonders für kleine Rotoren (kg-Bereich). Es führt zur Reduzierung des Hardwareaufwands um ca. 80%. Durch die geringere Anzahl Baugruppen können Verbindungskabel, Stecker und Gehäuse eingespart werden. Die kompaktere Bauweise führt letztlich zu einer enormen Kostensenkung und zu einer höheren Zuverlässigkeit [Pat 94].

4.1 Konzept

Ein Mikrokontroller (μC) mit integriertem A/D-Wandler bildet den Kern des Minimal-Magnetlager-Systems. Dieser μC erledigt nicht nur die Regelung, sondern auch die Systemüberwachung und die Kommunikation nach aussen. Die Kommunikation ist notwendig für die Entwicklung der Regelung, für die Fehlerdiagnose und als Bedienungsfläche.

Das Magnetlager wird mit sechs Spulen aufgebaut (gemäss Fig. 2.10). Damit lassen sich alle fünf Freiheitsgrade aktiv stabilisieren und dämpfen. Es wird die minimale Anzahl von sechs Verstärkerkanälen benötigt, und der Verdrahtungsaufwand sinkt. Dadurch steigt auch die Zuverlässigkeit des Systems. Die spezielle Anordnung der Magnete führt zu einer komplizierteren Regelung. Es müssen Koordinatentransformationen eingesetzt werden, um die einzelnen Achsen zu entkoppeln¹. Bei Stromsteuerung ist eine solche Entkopplung aufwendig, da die Lagerparameter k_i und k_s der einen Rotorachse von der Position des Rotors in den anderen Achsen abhängen (siehe Abschnitt 2.4). Es wird deshalb mit Vorteil Spannungssteuerung verwendet.

Durch die Spannungssteuerung ist es auch möglich, im magnetischen Kreis massives Eisen zu verwenden, ohne dass Wirbelströme die Bandbreite der Positionsregelung einschränken². Dies vereinfacht die mechanische

-
- 1 Die verwendete Magnetanordnung entspricht der Konfiguration, wie sie in [Fukata 94] realisiert wurde. In der Ansteuerung der Spulen gibt es jedoch wesentliche Unterschiede: Es wird Spannungssteuerung verwendet, die ganze Regelung wird digital im μC erledigt und es werden alle sechs Magnete geregelt (kein unregelter Vormagnetisierungs-Magnet).
 - 2 In (Fig. 1.2) ist zu erkennen, dass sich Wirbelströme unter Vernachlässigung des Spulenwiderstands R_{cu} nur auf den Spulenstrom auswirken. Bei Spannungssteuerung beeinflussen die Wirbelströme den Regelkreis nicht, sie führen jedoch nach wie vor zu einer zusätzlichen Erwärmung der Magnete. Um diese Erwärmung klein zu

Konstruktion und erlaubt höhere Drehzahlen, da ein massiver Rotor ohne Blechpakete eingesetzt werden kann.

4.2 Elektronik

Es wird ein geschalteter Leistungsverstärker verwendet, damit der Stromverbrauch minimal gehalten werden kann und keine aufwendige Kühlung der Elektronik nötig ist. Wegen der Spannungssteuerung können die Schalter des Leistungsverstärkers direkt mit den Pulsweiten-Ausgängen des μC s angesteuert werden. Es ist keine unterlagerte Stromregelung notwendig. Die gesamte Magnetlagerelektronik wird dadurch sehr einfach und kompakt. Neben dem μC gibt es nur noch die Sensorik (Wirbelstromsensor ECS6) und die Leistungsschalter mit minimaler Ansteuerelektronik. Fig. 4.1 zeigt das Blockschaltbild der Elektronik des Minimal-Magnetlager-Systems im Vergleich zu einer konventionellen Anordnung. Die digitalen Ein- und Ausgänge (Dig I/O) werden über ein synchrones paralleles Interface (SPI) am μC angeschlossen. Der Verdrahtungsaufwand kann so trotz der engen Vernetzung zwischen μC und Verstärker reduziert werden.

halten, müssen Wirbelströme und Hysterese bei der Materialwahl weiterhin berücksichtigt werden.

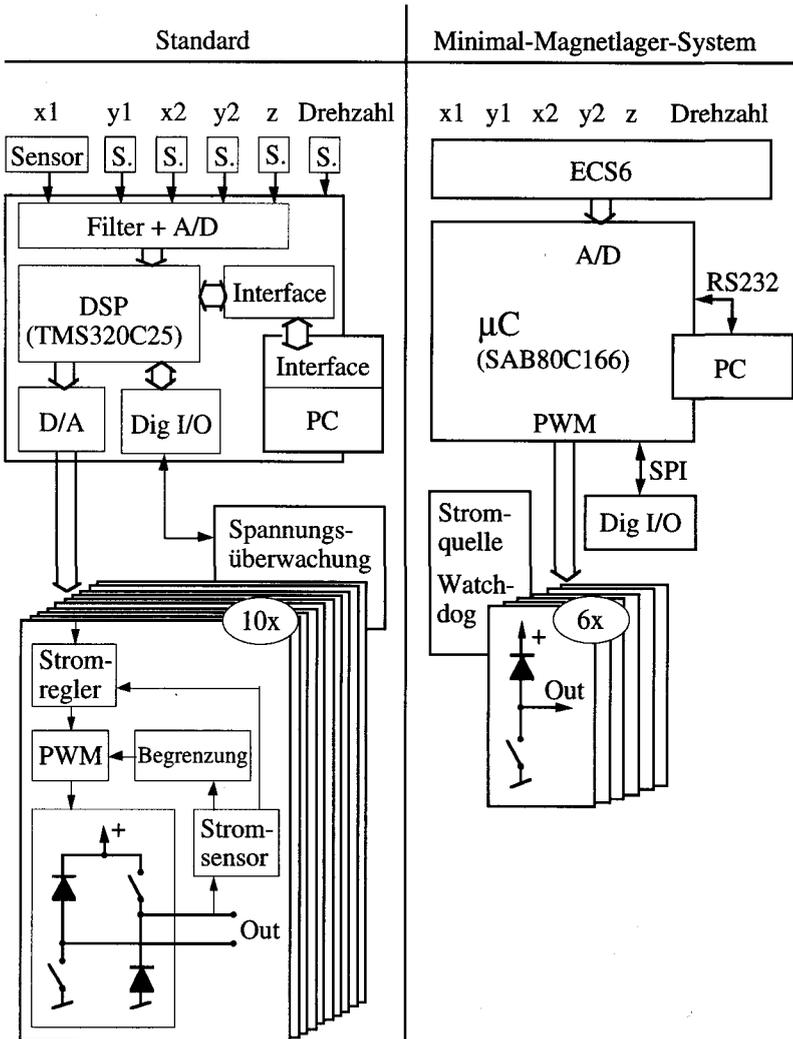


Fig. 4.1 Blockschnittbild des Minimal-Magnetlager-Systems verglichen mit einer Standardvariante

4.2 Vormagnetisierung

Bis jetzt ist das hier vorgestellte Konzept naheliegend und auch vielversprechend. Es ergibt sich aber ein Problem mit der Vormagnetisierung. Bei Spannungssteuerung kann die Vormagnetisierung nicht mehr wie bei der

Stromsteuerung zu den Steuersignalen addiert werden. Es ist entweder ein zusätzlicher Regelkreis notwendig [Vischer 88], oder es werden separate Zusatzwicklungen für den Vormagnetisierungsstrom eingebaut, in Serie geschaltet und mit einer Stromquelle gespeist. Diese zweite Möglichkeit ist aufwendig und bezüglich der Wicklungsverluste schlecht. Es werden daher keine Zusatzwicklungen, sondern es wird ein Regelkreis für die Vormagnetisierung eingesetzt.

Da hier mit sechs Spulen fünf Freiheitsgrade geregelt werden, ist nur ein einziger Vormagnetisierungsregler nötig. Dieser Regler hält die Summe aller sechs Spulenströme konstant. Dazu müssen die sechs Einzelströme gemessen, summiert und in den Rechner eingelesen werden. Im Rechner (μC) sorgt der Vormagnetisierungsregler für die entsprechende Ansteuerung der Pulsweitenmodulatoren (Fig. 4.2). Der Aufwand für einen solchen Vormagnetisierungsregler ist so gross, dass das ganze Konzept in Frage gestellt werden muss.

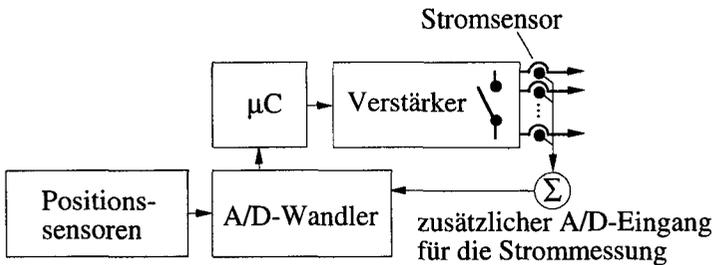


Fig. 4.2 neues Konzept mit aufwendigem Vormagnetisierungsregler

Es hat sich nun aber gezeigt, dass dieser grosse Aufwand vermieden werden kann, wenn der Leistungsverstärker anders aufgebaut wird:

Im folgenden wird, ausgehend von einer konventionellen H-Brücke, das neue Verstärkerkonzept abgeleitet.

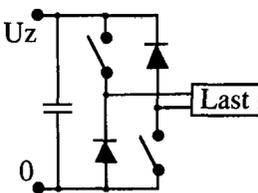


Fig. 4.3

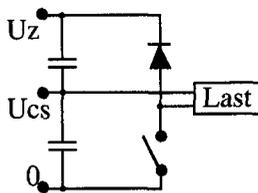


Fig. 4.4

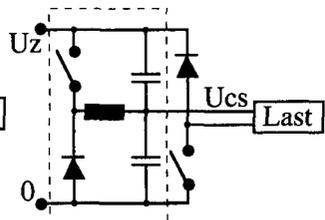


Fig. 4.5

1. Schritt: Wenn für den Verstärker eine zusätzliche Speisespannung $U_{cs} = U_z/2$ zur Verfügung steht, kann anstelle der H-Brücke (Fig. 4.3) eine Halbbrücke mit nur einem Schalter verwendet werden (Fig. 4.4).

2. Schritt: Die zusätzliche Spannung U_{CS} wird mit Vorteil in einem Gleichspannungswandler erzeugt (Fig. 4.5). Der Aufwand für diese Variante ist relativ gering, da der Gleichspannungswandler nur einmal für alle sechs Verstärkerkanäle gemeinsam gebaut werden muss.

3. Schritt: Der Strom der sechs Magnete fließt nun in einem gemeinsamen Sternpunkt am Gleichspannungswandler zusammen. Die Vormagnetisierung kann jetzt am Ausgang des Gleichspannungswandlers mit einer einzigen Strommessung erfasst werden! (Fig. 4.6)

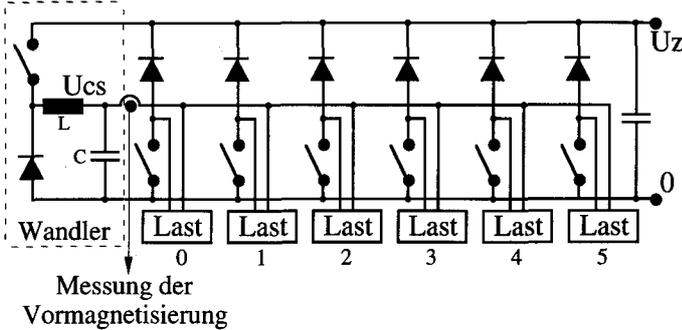


Fig. 4.6 gemeinsamer Gleichspannungswandler mit vereinfachter Messung der Vormagnetisierung

4. Schritt: Es ist nun sogar möglich, die Vormagnetisierungs-Regelung aus dem Rechner auszulagern.

Die Spulenspannung U_{Spule} ist die Differenz zwischen dem Reglerausgang (Pulsweite pw) und der Spannung U_{CS} .

$$U_{Spule} = U_z \cdot pw - U_{cs} \quad (31)$$

Um die Vormagnetisierung zu regeln, kann anstelle der Pulsweite pw auch die Spannung U_{CS} verwendet werden. Die Ausgangsspannung des Gleichspannungswandlers U_{CS} wird so geregelt, dass sich der gewünschte Vormagnetisierungsstrom einstellt. Einfacher gesagt: Der Wandler wird als Stromquelle betrieben. Dadurch entfällt der zusätzliche Analog-Eingang für die Strommessung. Ein weiterer Vorteil beim Einsatz dieser Stromquelle ist, dass der Spulenstrom begrenzt ist, auch wenn der μC abstürzt. Es wird somit keine separate Überstrombegrenzung benötigt, da sie schon im System inhärent vorhanden ist.

5. Schritt: Da die Magnetspulen über eine ausreichend hohe Induktivität verfügen, ist das Ausgangsfilter (LC-Kreis) des Gleichspannungswandlers überflüssig (Fig. 4.7). Der Vormagnetisierungsregler kann lokal direkt bei der Strommessung und dem Leistungsschalter plaziert werden. Die

restlichen sechs Leistungsschalter liegen alle auf 0V-Potential, dadurch ist eine direkte Ansteuerung mit dem μC ohne Potentialanpassung möglich.

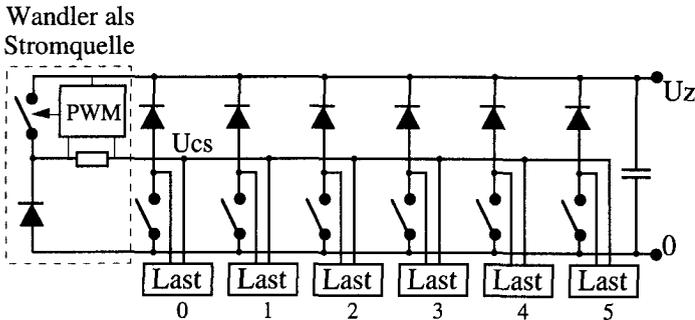


Fig. 4.7 Die Stromquelle kann ohne zusätzliche Induktivität realisiert werden.

Dieselbe Konfiguration der Schalter und Dioden wurde von T. Miller für Reluktanzmotoren vorgeschlagen [Miller 87]. Die Schalter werden dort so angesteuert, dass die Pole des Motors zyklisch magnetisiert und entmagnetisiert werden. Es ist jeweils immer nur eine Wicklung unter Strom. Beim Magnetlager hingegen führen immer alle Wicklungen gleichzeitig Strom. Es ist daher erstaunlich, dass die selbe Schaltungstopologie für Reluktanzmotoren und Magnetlager vorteilhaft eingesetzt werden kann. Der Unterschied liegt in der anderen Ansteuerung. Die Schaltung wird auf eine ganz andere Art betrieben.

4.3 Fazit

Das Minimal-Magnetlager-System erlaubt den Bau von einfachen und kompakten Magnetlagern. Durch die Spannungssteuerung und den speziellen Verstärker ergeben sich folgende Vorteile:

- Die Reglerachsen sind besser entkoppelt
- Wirbelströme, verursacht durch die Verwendung von massivem Eisen, stören die Regelung nicht
- Die Leistungsschalter können mit dem μC direkt angesteuert werden. Dadurch wird die Totzeit im Regelkreis minimal. Es gibt keinen unterlagerten Stromregler, der die Bandbreite begrenzt
- Es werden insgesamt nur sieben Leistungsschalter verwendet (anstelle von zwanzig Schaltern bei der H-Brücke mit zehn Kanälen)

- Es braucht nur noch ein siebenpoliges Kabel zwischen Lagermagnet und Leistungsverstärker (anstelle von zwanzig Polen bei der Verwendung von H-Brücken)

Nachteile:

- Die Spulenspannung kann nur bis zur halben Speisespannung angesteuert werden. Um die gleiche Verstärkerdynamik wie bei der H-Brücke zu erreichen, muss mit der doppelten Zwischenkreisspannung gearbeitet werden
- Im Fehlerfall kann der Strom in einer Spule kurzzeitig bis auf das Sechsfache des durchschnittlichen Stromes ansteigen. Die Leistungsschalter müssen grösser dimensioniert werden als bei einer vergleichbaren H-Brücke. Die Schaltung ist daher für grössere Leistungen ungeeignet

Die Regelstrecke dieses Systems ist recht kompliziert. Die Inbetriebnahme gestaltet sich schwierig, da das spannungsgesteuerte System aus fünf instabilen Übertragungsfunktionen *dritter* Ordnung besteht. Durch die Kopplung der Achsen bei den Magneten ist es praktisch unmöglich, die fünf Achsen einzeln in Betrieb zu nehmen. Auch bei der Testbarkeit ergeben sich Probleme, da das System nicht mehr modular aufgebaut ist. Regler und Verstärker bilden eine untrennbare Einheit und können kaum separat getestet werden.

Bei kleinen Verstärkerleistungen überwiegt der Aufwand der Steuer-elektronik (Strommessung, Überwachung, Pulsweitenmodulatoren) gegen-über den Leistungsschaltern. Das hier vorgeschlagene Konzept für das Minimal-Magnetlager-System bringt dann deutliche Vorteile im Vergleich zur konventionellen H-Brücke.

5. Entwurf eines hochintegrierten Magnetlagers am Beispiel einer Textilspindel

In den nun folgenden Kapiteln wird anhand eines konkreten Projekts gezeigt, wie die besprochenen Ideen umgesetzt werden können.

Die Aufgabe ist, eine Spindel für eine Textilmaschine magnetisch zu lagern. Wegen der grossen Stückzahlen lohnt sich der Entwicklungsaufwand für ein neuartiges System. Es wird ein Konzept mit minimalem Hardwareaufwand angestrebt, ohne Rücksichtnahme auf im Markt erhältliche Magnetlagerkomponenten. Dadurch wird der Bau des Minimal-Magnetlager-Systems (Kapitel 4) ermöglicht.

Ausgehend von den Anforderungen an die Textilspindel wird das Konzept der Lagerung besprochen. Anschliessend werden die einzelnen Komponenten den Anforderungen entsprechend dimensioniert.

5.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die Spinnmaschine werden hier nur kurz wiedergegeben. Es geht darum, das Umfeld dieser Arbeit zu skizzieren.

5.1.1 Benennung

Das Projekt ROHRSPINDEL wurde im Rahmen dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit einer Magnetlager-Firma¹ gebaut. Das Ziel war, die Machbarkeit von hochintegrierten Magnetlagern zu zeigen und erste Erfahrungen beim Einsatz in Spinnmaschinen zu machen.

Die hier aufgeführten Spezifikationen sind nicht endgültig. Sie beziehen sich auf den Prototypen und können ändern. Ein weiteres Ziel dieses Prototyps ist daher, genauere Vorstellungen zu erhalten, welche Forderungen realistisch sind.

1 MECOS Traxler AG, Winterthur

5.1.2 Anwendung

Bei Spinnmaschinen werden sehr hohe Drehzahlen angestrebt. Die Anforderungen an die Lager sind dementsprechend hoch. Durch den Einsatz einer magnetischen Lagerung beim Topfspinnverfahren kann die Drehzahl auf das Fünffache und mehr gesteigert werden, verglichen mit dem Ringspinnen. Gleichzeitig sinkt die Lärmbelastung.

5.1.3 Mechanische Schnittstellen

Eine Spinnmaschine besteht aus über hundert Spindeln, die gleichzeitig nebeneinander laufen. Eine Spinnstelle soll im Betrieb ausgewechselt werden können, ohne dass die ganze Anlage heruntergefahren werden muss. Eine Spinnstelle ist 120mm breit. Das Magnetlager muss in dieses Raster passen. Höhe und Tiefe sind unkritisch.

5.1.4 Elektrische Schnittstellen

Für die Steuerung der einzelnen Spindeln in der Anlage ist ein serieller Bus vorgesehen (Start/Stop, Drehzahlvorgabe). Über diesen Bus werden auch Diagnosemöglichkeiten und Entwicklungswerkzeuge zur Verfügung gestellt.

5.1.5 Benutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle wird auf das Minimum beschränkt. Eine Lampe zeigt, ob die Spinnstelle in Betrieb ist. Störungen werden durch Blinken signalisiert. Mit einem Schalter kann die Spinnstelle stillgelegt werden.

5.1.6 Rotor

Der Rotor hat einen Durchmesser von 50mm und ist 250mm lang (Fig. 5.1). Die Rotorachse ist vertikal. Jede Spinnstelle wird einzeln mit einem Elektromotor angetrieben. Es ist eine Drehzahl von 60'000 U/min gefordert.

Bedingt durch das Spinnverfahren muss der rohrförmige Rotor aussen gelagert werden. Im Innern wird der Faden gesponnen. Die Lagerung muss somit am Aussendurchmesser von 50mm der geforderten Drehzahl standhalten können. Die Umfangsgeschwindigkeit ist dort beinahe 160 m/s.

5.1.7 Umgebungsbedingungen

Die Anlage steht in einer Fabrikhalle. Die Umgebungstemperatur der magnetischen Lagerung kann 70 Grad erreichen. Es ist Faser- und Staubflug

vorhanden. Textilfasern können sich überall ablagern. In dieser Umgebung sollte wartungsfreier Dauerbetrieb über mindestens 5 Jahre möglich sein. Da Stromausfälle auftreten können, muss ein Notstromkonzept mit eingeplant werden.

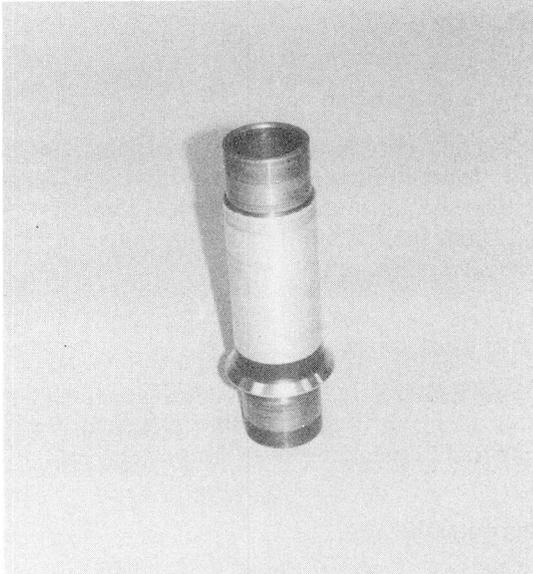


Fig. 5.1 Rotor für die Spinnspindel.

Beim Spinnen kommen 50g Garn auf den Rotor. Der Spinnprozess übt dabei nur sehr geringe Kräfte auf den Rotor aus, die Magnetlager werden nicht gestört.²

5.2 Konzept

Es wird eine vollständig aktive magnetische Lagerung entworfen³. Dadurch wird auch ein Auswuchten des Rotors überflüssig, weil die Unwucht mit der aktiven Lagerung vollständig kompensiert werden kann.

-
- 2 Es hat sich herausgestellt, dass anhand der Reglersignale nicht einmal festgestellt werden kann, ob der Spinnprozess in Gang ist oder nicht. Auch die Massenänderung durch das Garn kann kaum festgestellt werden.
 - 3 Eine Kombination mit passiven magnetischen Lagerungen ergibt keine wesentliche Kostensenkung. Ausserdem wirft der Einsatz von permanentmagnetischen Werkstoffen in der Produktion zusätzliche Probleme auf.

Um eine gute Übersicht zu gewährleisten, wird zuerst anhand des Blockschaltbilds gezeigt, wie das System aufgebaut, und wie gross der schaltungstechnische Aufwand ist. Anschliessend werden die einzelnen Komponenten genauer betrachtet.

5.2.1 Blockschaltbild

Das System besteht aus der Sensorik (ECS6), aus der Regelung (μC), dem Leistungsverstärker und dem Wechselrichter für den Antrieb (Fig. 5.2). Ferner braucht es eine Speisung und digitale Ein- und Ausgänge (Dig I/O) für die Bedienelemente (Lampen, Tasten). Für die Verbindung zum Entwicklungssystem ist eine serielle Schnittstelle vorgesehen. Diese Schnittstelle wird später für die Kommunikation mit der Anlagensteuerung verwendet.

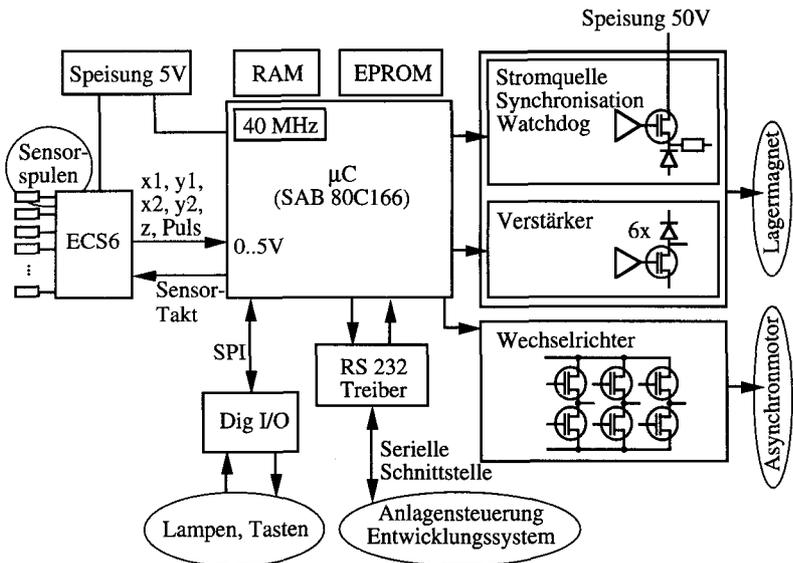


Fig. 5.2 Blockschaltbild des neuen Konzepts.

Links: Sensoren, Mitte: Regler, Rechts: Verstärker und Wechselrichter

Als Grundlage für das Konzept dient das in Kapitel 4 gezeigte Minimal-Magnetlager-System. Die Verwendung der Spannungssteuerung ermöglicht eine einfache Bauweise des Verstärkers. Der Einsatz eines Mikrokontrollers (μC) führt zu einem sehr kompakten Aufbau der Elektronik. Die gesamte Elektronik für die Lagerung und den Wechselrichter füllt etwa zwei Leiterplatten im langen Europaformat (100*220mm). Dieser Platzbedarf kann stark reduziert werden, wenn Bauteile für Oberflächenmontage (SMD) eingesetzt werden. Auch die Leistungshalbleiter könnten in einem Baustein

integriert werden (z.B. in Hybridtechnik). Beim heutigen Stand der Technik ist die Integration der ganzen Elektronik in einem einzigen Chip zwar denkbar, aber noch nicht sinnvoll.

Dank dem kompakten Aufbau kann die Elektronik direkt beim Magnetlager montiert werden. Die langen, vieladrigen Verbindungskabel mit den entsprechenden Steckern entfallen. Auch die sonst nötigen Steuer und Signalleitungen für den Antrieb werden unnötig, da der Wechselrichter in der Elektronik integriert ist.

5.2.2 Regler

Im Mittelpunkt des Konzepts steht ein Mikrokontroller (μC). Dieser Single-Chip-Computer bewältigt nicht nur die Regelung, sondern auch die Überwachung des Systems und die gesamte übrige Signalverarbeitung. Deshalb kann die Elektronik so kompakt aufgebaut werden.

Es wurde der Mikrokontroller SAB 80C166 eingesetzt⁴. Dieser Chip verfügt über eine ausreichend hohe Rechenleistung und über alle nötigen Peripheriefunktionen (16 Timer-Ein/Ausgänge, Spezialtimer für Drehzahl- und Drehwinkelerfassung, 10 Analogeingänge und serielle Schnittstellen). Beim Prototyp wurden zusätzliche externe Speicher (RAM und EPROM) vorgesehen. Diese sind für Entwicklungszwecke nützlich, werden sonst aber nicht benötigt.

5.2.3 Magnete

Um den Energieverbrauch des Systems klein zu halten, muss die Magnetanordnung so gewählt werden, dass die Rotation des Rotors keine Ummagnetisierungsverluste verursacht. Die Magnete werden deshalb so angeordnet, dass die Feldlinien im Rotor parallel zur Drehachse verlaufen (Fig. 5.3).

Wenn die Polschuhe den Rotor ganz umschliessen, ergibt sich eine homogene Feldverteilung am Rotorumfang. Es entstehen dann keinerlei Ummagnetisierungsverluste durch die Rotation, und das Magnetlager ist 'reibungsfrei'. Eine Voraussetzung für die homogene Feldverteilung ist, dass keine Radiallast vorhanden ist. Die Rotorachse muss deshalb senkrecht stehen und die Unwucht muss so kompensiert werden, dass keine Radialkräfte auf den Rotor wirken (kräftefreier Lauf). Nullpunktfehler der Sensorik hingegen sind unkritisch. Sie verursachen nur eine radiale Verschiebung der Rotorachse. Die Feldverteilung ändert dadurch nur wenig.

4 16-Bit μC der Firma Siemens.

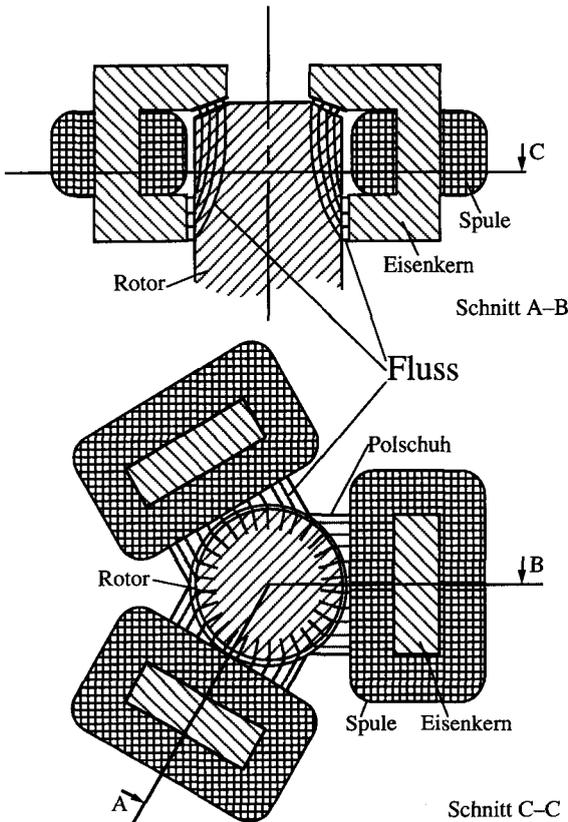


Fig. 5.3 Anordnung der Magnete und Feldverlauf. Keine Ummagnetisierungsverluste, da die Polschuhe den Rotor vollständig umschliessen.

5.2.4 Sensor

Für die Messung der Rotorposition werden Wirbelstromsensoren eingesetzt, weil sie auch unter schwierigen Bedingungen störungsfrei messen können. Die Sensorspule ist robust und die Messung ist unempfindlich gegen Staub- und Faserflug. Die Elektronik für sechs Kanäle (fünf Achsen und Drehzahlpuls) kann in einem analogen ASIC untergebracht werden, sobald die Stückzahlen gross genug sind. Dadurch würde der Platzbedarf der Elektronik nochmals stark reduziert. Optische Sensoren wären zwar einfacher, sind aber zu empfindlich gegen Verschmutzungen.

Um den Verdrahtungsaufwand zu reduzieren, werden pro Lagerebene nur noch drei anstelle von vier Sensorspulen eingesetzt (Fig. 5.4). Im Rechner

müssen die Sensorwerte transformiert werden, um die kartesischen Koordinaten in x und y zu erhalten⁵.

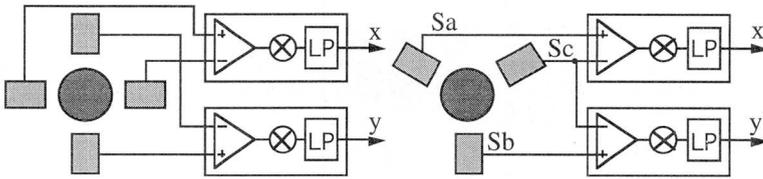


Fig. 5.4 Anordnung der Sensorspulen. Links: konventionell. Rechts: neu mit drei Sensoren.

Um Schwebungseffekte zwischen Sensorik und Regler- oder Verstärkertakt zu verhindern, wird die Messfrequenz für die Sensorik im Prozessor erzeugt.

5.2.5 Verstärker

Der Verstärker besteht aus sechs MOSFET-Leistungsschaltern⁶ mit Freilaufdioden und Gate-Ansteuerungen (Fig. 5.5). Die Stromquelle für die Vormagnetisierung wird über eine Synchronisationsleitung vom Prozessor her mit dem Verstärker synchronisiert, damit keine Schwebungseffekte auftreten. Die Synchronisationsleitung dient gleichzeitig auch als 'Watchdog'. Falls der Prozessor ausfällt, und diese Leitung keine Pulse mehr liefert, schaltet die Stromquelle sofort ab. Die Synchronisationsleitung wird auch als Freigabesignal verwendet, um die Stromquelle ein- und auszuschalten.

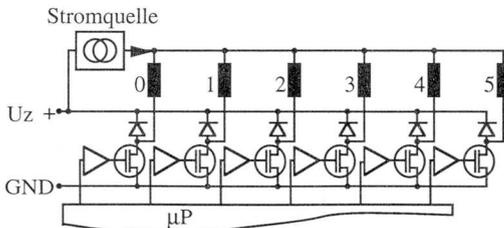


Fig. 5.5 Blockschaltbild des Verstärkers

- 5 Der Rechenaufwand dazu ist minimal. Es könnte auch ohne Transformationen in einem schiefwinkligen Koordinatensystem geregelt werden. Das hätte jedoch Auswirkungen auf die Reglerauslegung bei hoher Drehzahl (gyroskopische Effekte). Es ist daher einfacher, mit kartesischen Koordinaten zu arbeiten.
- 6 MOSFET (Metal-Oxide-Silicon-Field-Effect-Transistor): Da das hier behandelte Magnetlager recht klein ist (8A, 50V), ist dieser Transistortyp gut geeignet. Die Leitverluste sind sehr gering, und die Schaltverluste bleiben auch bei hohen Schaltfrequenzen klein.

Die getaktete Stromquelle kann mit einer integrierten Schaltung (PWM-Chip für Schaltnetzteile) realisiert werden (Fig. 5.6). Das Bezugspotential der Schaltung liegt am Ausgang der Stromquelle, wo sich der Strommesswiderstand befindet. Dadurch kann der Spannungsabfall über diesem Widerstand problemlos gemessen werden, obwohl dort das Spannungspotential immer auf und ab springt. Es ist kein Stromwandler oder Trennverstärker nötig.

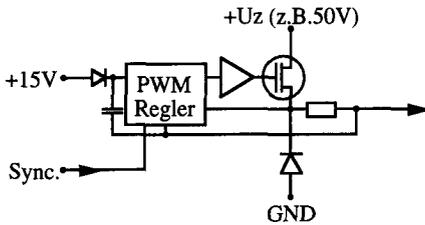


Fig. 5.6 Blockschaltbild der Stromquelle

Für die Speisung der integrierten PWM-Schaltung kann eine einfache 'Bootstrap'-Diode verwendet werden, da die Pulsweite der Stromquelle im Betrieb nie über 80% gehen wird. Der Verstärker und die Stromquelle können somit aus wenigen, preiswerten Bauteilen aufgebaut werden.

5.2.6 Antrieb

Für den Antrieb des Rotors wird ein Asynchronmotor eingesetzt. Der Wechselrichter für die Ansteuerung des Motors kann in die Magnetlagerelektronik integriert werden. Der Aufwand dazu ist gering, weil der Prozessor über ausreichend Rechenleistung und Pulsweitenausgänge verfügt, um die Dreiphasenbrücke des Wechselrichters direkt anzusteuern (Fig. 5.7). Die nötige Software kann einfach gehalten werden, da ein Drehzahlsignal zur Verfügung steht. Es kann somit eine Schlupfregelung realisiert und direkt das Antriebsmoment geregelt werden. Es sind keine Rampen für die Beschleunigungs- und Bremsphasen nötig.

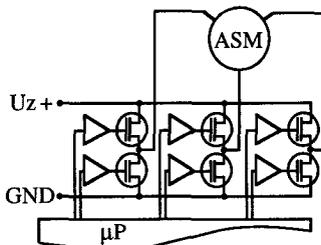


Fig. 5.7 Dreiphasenbrücke für die Ansteuerung des Asynchronmotors.

Der Prozessor hat die volle Kontrolle über das ganze System, wenn der Wechselrichter in die Lagerelektronik integriert wird. Bei einem Stromausfall kann er sofort den Rotor bremsen und mit der Bremsenergie die Versorgung des Magnetlagers sicherstellen. Die Notstromversorgung ist somit gewährleistet. Sie ist viel zuverlässiger und einfacher als eine Batterieversorgung. In Abschnitt 5.3.3 (Notstrom) wird näher darauf eingegangen.

5.2.7 Kommunikation

Für die Kommunikation mit dem Bediener ist im Endprodukt nur eine Lampe und ein Schalter vorgesehen. Beim Prototyp ist es jedoch von grossem Vorteil, wenn der Maschinenstatus detailliert angezeigt wird. Die Bedienelemente werden über einen synchronen seriellen Bus (SPI-Bus) am Rechner angekoppelt. Eine solche Schnittstelle bringt bei der Wahl der Bedienelemente ein hohes Mass an Flexibilität, ohne dass dabei der Hardwareaufwand wächst.

Für die Kommunikation mit der Anlagensteuerung und für das Entwicklungssystem wird die im μC integrierte serielle Schnittstelle verwendet. Sie erlaubt eine Baudrate von 625kBit/s bei asynchroner Übertragung. Dies ist bei weitem schnell genug.

Da die meisten PCs (Personal Computer) standardmässig nur über eine langsame RS-232-Schnittstelle verfügen, werden entsprechende RS-232-Schnittstellen-Treiber in die Lagerelektronik integriert. Dadurch kann man das Magnetlager-System an jedem PC anschliessen. Die Datenübertragungsgeschwindigkeit ist dabei allerdings recht bescheiden (Bei IBM-kompatiblen PCs: 9600 Bit/s oder 19.2kBit/s). Für die Entwicklungsumgebung muss die Datenrate höher eingestellt werden können, da für die Identifikation der Regelstrecke sehr grosse Datenmengen transferiert werden müssen. Bei den meisten PCs ist dies ohne Zusatzhardware möglich. Mit einer entsprechenden Software werden 57.6 kBit/s oder 115.2 kBit/s erreicht.

5.2.6 Sicherheitskonzept

Wie in Abschnitt 5.2.2 schon erwähnt, bewältigt der Mikroprozessor nicht nur die Regelung, sondern auch die Überwachung des Systems und die gesamte übrige Signalverarbeitung. Dadurch ist der Mikroprozessor in der Lage, einen Ausfall zu erkennen und zu lokalisieren. Mit geeigneten Massnahmen kann er das System vor grösserem Schaden bewahren.

Das Sicherheitskonzept legt fest, nach welchen Kriterien ein möglicher Ausfall beurteilt werden soll und wie das System reagieren muss. In Abschnitt 6.6 wird auf die Umsetzung dieses Konzepts eingegangen.

Ziel: Absturz vermeiden

Das Ziel des Sicherheitskonzepts ist in erster Linie, einen Absturz des Rotors zu vermeiden. Dies kann erreicht werden durch eine

- hohe Zuverlässigkeit: Hochwertige Bauteile können aus Kostengründen nur begrenzt verwendet werden. Die Zuverlässigkeit des Systems ist aber trotzdem hoch, weil durch den kompakten Aufbau viel weniger Stecker, Kabel und elektronische Komponenten eingesetzt werden müssen.
- Redundanz: Teile des Systems könnten doppelt aufgebaut werden, damit bei einem Ausfall das Reservesystem einspringen kann. Mit einer anderen Sensorelektronik beispielsweise, die nur eine Sensorspule pro Kanal benötigt, könnten aus den drei Sensorspulen einer Lagerebene drei Positionssignale erzeugt werden. Wenn eines davon ausfällt, kann die Rotorposition aus den beiden noch intakten Positionssignalen bestimmt werden [Diez 93]. Solche Systeme sind schwierig zu bauen und für 'Low-Cost'-Anwendungen ungeeignet.
- Früherkennung: Dies ist nun die Aufgabe des Rechners. Viele sich anbahnende Probleme können frühzeitig erkannt werden, bevor der Rotor abstürzt. Der Rotor kann oft mit einer Notbremsung noch rechtzeitig zum Stillstand gebracht werden. Der Rechner überwacht hierzu die Speisenspannung, die Unwucht des Rotors, die Abweichung von der Sollposition, die Drehzahlmessung und die Konvergenz der Unwuchtkompensation. Mit einem Zustandsdiagramm können die Reaktionen des Rechners dargestellt werden. Bei Fig. 5.8. handelt es sich nur um die grobe Struktur jenes Teils, der die Fehler behandelt. Ein vollständiges Zustandsdiagramm wäre zu unübersichtlich. Die Entwicklung eines Zustandsautomaten, der auf Fehler 'richtig' reagiert, ist anspruchsvoll. Insbesondere ist es schwierig, den Zustandsautomaten zu testen. Es können nicht alle Ausnahmesituationen in allen möglichen Kombinationen und in allen Betriebsbedingungen getestet werden (siehe Abschnitt 6.6.3).

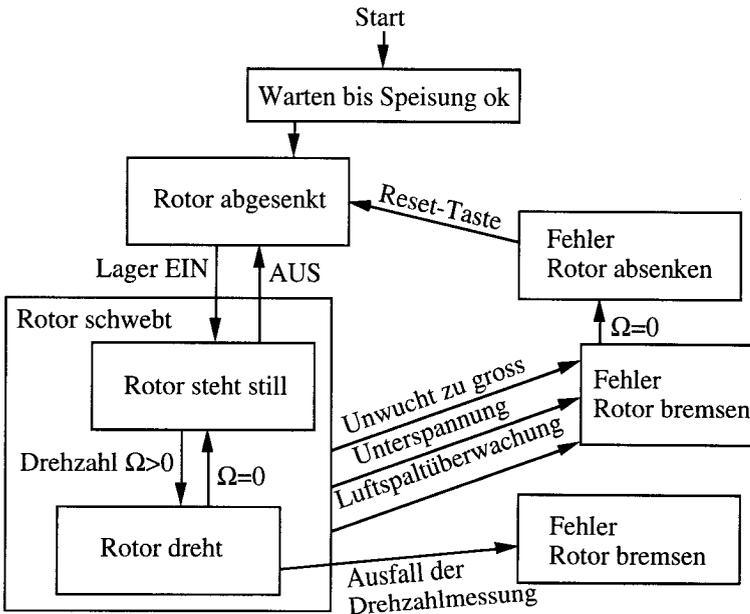


Fig. 5.8 Zustandsdiagramm der Fehlerbehandlung (Grobstruktur)

Folgeschäden verhindern

Wenn eine zu grosse Störkraft auf den Rotor wirkt oder wenn ein Teil der Elektronik des Magnetlagers ausfällt, kann ein Absturz des Rotors natürlich nicht verhindert werden. Es muss dann sofort ein geeignetes Bremsprogramm⁷ eingeleitet werden. Um den Schaden minimal zu halten, müssen die Fanglager richtig dimensioniert werden. Versuche haben ergeben, dass der Regler den Rotor manchmal wieder einfangen kann. Der Regler bleibt deshalb mit Vorteil auch nach einem Absturz eingeschaltet, solange dies möglich ist.

Falls der Rechner ausfällt, ist der Rotor auf sich allein gestellt. Auf der elektrischen Seite geht es dann nur noch darum, die Elektronik zu schützen. Beim Konzept der zentralen Stromquelle ist das kein Problem. Auch wenn

⁷ Abhängig von der mechanischen Konstruktion kann zu scharfes Bremsen nachteilig sein. Der erhöhte magnetische Zug des Motors kann eine zusätzliche destabilisierende Wirkung haben.

alle Schalter des Leistungsverstärkers eingeschaltet sind, bleibt der Strom begrenzt, da er von der Stromquelle her vorgegeben wird⁸.

5.3 Dimensionierung

Nachdem jetzt das Konzept feststeht, müssen die Komponenten richtig dimensioniert werden. Eine Auflistung aller dabei anfallenden Berechnungen wäre nicht besonders interessant und würde zum Verständnis dieser Arbeit nichts beitragen. Es werden daher nur jene Teile besprochen, welche direkt mit dem neuen Konzept zusammenhängen.

5.3.1 Frequenzen

Die Sensorelektronik und die Stromquelle des Verstärkers sind über Synchronisationsleitungen mit dem Prozessor verbunden. Es können daher alle im System auftretenden Frequenzen vom Prozessor aus gesteuert werden. Die einzige Ausnahme ist die Drehfrequenz des Rotors. Diese ist vom Spinnprozess her gegeben. Sie ändert während der Beschleunigungs- und Bremsphase.

Bei der Festlegung der Frequenzen muss darauf geachtet werden, dass keine unerwünschten Kopplungen zwischen Regler, Sensor und Verstärker auftreten. Schon schwache Einstreuungen können zu unangenehmen Schwebungseffekten führen.

Die wichtigste Frequenz im System ist der **Reglertakt**⁹. Bei digitalen Regelungen wird dieser meistens etwa zehnmals schneller als die Reglerbandbreite gewählt. Da die Anforderungen bezüglich Dynamik und Steifigkeit gering sind, genügen 100Hz Bandbreite. Ein Reglertakt von 1kHz wäre demnach ausreichend. Sobald der Rotor nun aber dreht, verursachen die Unrundheiten der Sensorringe Störfrequenzen (Vielfache der Drehfrequenz). Durch die Abtastung des Reglers entstehen 'Aliasing'-Effekte: Die Störungen werden auf tiefere Frequenzen herunter gefaltet. Besonders schlimm ist dieser Effekt, wenn der Reglertakt nahe der Rotordrehzahl oder einem ganzen Vielfachen davon liegt. Mit einem Tiefpassfilter am Reglereingang könnten

8 Dieser Fall ist sehr unwahrscheinlich, da bei einem Ausfall des Rechners im allgemeinen auch das Synchronisationssignal zur Stromquelle wegfällt. Die Stromquelle schaltet dann sofort ganz ab (siehe 5.2.5).

9 Es werden Frequenzen anstelle von Abtastzeiten angegeben, da dies bei den hier gemachten Betrachtungen sinnvoller ist. Beim Vergleich von Abtastraten ist es vorteilhaft, die Begriffe 'schneller' und 'langsamer' zu verwenden anstelle von 'gross' und 'klein', da es sonst oft zu Missverständnissen kommt, je nachdem, ob jemand gerade an Zeiten oder an Frequenzen denkt.

diese Störungen weggefiltert werden. Gemäss Abtasttheorem müsste dieses Filter alles oberhalb der halben Abtastfrequenz (500Hz) abschneiden. Dies würde den Phasengang der Regelstrecke ruinieren und eine gute Regelung verunmöglichen.

Der Reglertakt wird deshalb so hoch wie möglich gewählt. Mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung werden über 5kHz erreicht. Um bei der Betriebsdrehzahl von 60'000 U/min (=1kHz) die Störungen gering zu halten, darf der Reglertakt nicht exakt auf der fünffachen Drehfrequenz liegen. Er wird auf 5.123 kHz festgelegt¹⁰.

Der **Verstärker und die Stromquelle** werden mit einem ganzen Vielfachen des Reglertaktes betrieben. Die Störspitzen der Leistungsschalter stehen dann in einer konstanten zeitlichen Position relativ zum Reglertakt¹¹. Dadurch können die Abtastzeitpunkte der A/D-Kanäle so eingestellt werden, dass die Einstreuung vom Verstärker zu den A/D-Wandlereingängen minimal ist.

In Abschnitt 2.2.5 wurde gezeigt, dass von der Regelung her betrachtet die Pulsweitenmodulatoren nicht viel schneller als der Regler betrieben werden müssen. Die Pulsweitenmodulatoren werden deshalb mit dem vierfachen Reglertakt betrieben (20.492 kHz), dies liegt gerade noch über dem Hörbereich.

Durch die geschalteten Spannungen entstehen im Betrieb erhebliche Wirbelstromverluste im Rotor, weil dieser aus massivem Stahl besteht. Eine Erhöhung der PWM-Frequenz hilft da nur wenig, da die Wirbelströme proportional zur induzierten Spannung sind und diese Spannung unabhängig von der Frequenz ist.

¹⁰ In der Natur tritt ein ähnliches Problem auf: Die Äste bei einem Baum müssen so angeordnet sein, dass die oberen Äste den Unteren möglichst wenig Licht wegnehmen. Der Winkelversatz von zwei aufeinanderfolgenden Ästen am Baumstamm muss in einem 'möglichst irrationalen' Verhältnis zu 360 Grad stehen. Eine sehr gute Wahl ist das Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Zahlen der Fibonacci-Reihe (.3,5,8,13,21...). Tatsächlich sind diese Verhältnisse in der Natur weit verbreitet (z.B. die Anordnung der Schuppen von Tannenzapfen, die Blätter der Palmen...) [Kappraff 91]. Das Verhältnis bei grossen Zahlen der Fibonacci-Reihe entspricht dem goldenen Schnitt. Wahrscheinlich ist es kein Zufall, dass viele Menschen dieses Verhältnis als schön empfinden. Es gibt auch eine Verbindung zur Chaos-Theorie: Systeme mit diesen Verhältnissen haben eine geringere Neigung, chaotisch zu werden als Systeme mit ganzzahligen Verhältnissen – extreme Ordnung stürzt leichter ins Chaos.

¹¹ Da es sich um PWM-Signale handelt, stimmt diese Aussage nicht exakt. Die Störspitzen verschieben sich abhängig von den Pulsweiten im Verstärker. Im Normalbetrieb jedoch, wenn der Verstärker nicht voll angesteuert wird, ändern die Pulsweiten nur wenig und es gibt zwischendurch immer Zeiträume, wo kein Leistungsschalter schaltet.

Das Problem kann einfach umgangen werden: Wenn die Stromquelle einen halben Takt phasenverschoben zum Verstärker synchronisiert wird, löschen sich die Spannungsrippel von Stromquelle und Verstärker gegenseitig fast aus. Der Effektivwert der Spulenspannung wird sehr klein. Die Wirbelstromverluste verschwinden fast vollständig, da diese quadratisch mit der Spannung sinken. Auch der Stromrippel wird sehr klein. Durch diese Massnahme sinkt der Stromverbrauch des Lagers um etwa 40%. Dies entspricht einer versetzten Taktung [Stemmler 64].

Für die Wahl der Messfrequenz der **Wirbelstromsensoren** ist die spektrale Verteilung der Störungen im Rotorbereich massgebend. Die Störungen werden fast ausschliesslich vom Leistungsverstärker erzeugt. (Dies kann nicht verhindert werden, da die Sensoren nahe bei den Lagermagneten liegen müssen.) Das Frequenzspektrum der pulsweitenmodulierten Signale besteht aus den Vielfachen des Verstärkertaktes ($n \cdot 20.492 \text{ kHz}$), wobei diese Frequenzlinien durch die Modulation verschmiert werden (siehe Kap 2.2.3).

Die Messfrequenz kann sehr hoch gewählt werden, ohne dass Probleme mit Kabelkapazitäten auftreten, da die Verbindungskabel zur Elektronik kurz sind. Die Messfrequenz wird zwischen der 29. und der 30. Harmonischen des Verstärkers (614.75 kHz und 635.25 kHz) auf 625 kHz festgelegt.

5.3.2 Auflösung

Welche Auflösung braucht es für die A/D-Wandler und die Pulsweitenmodulatoren?

Die Sensorsignale werden mit dem A/D-Wandler in zeit- und amplitudendiskrete Signale umgewandelt und dann in den Rechner eingelesen. Die Diskretisierung in der Zeit ist durch den Reglertakt bereits vorgegeben. In jedem Reglertakt müssen alle Analogeingänge gewandelt werden. Beim Reglertakt von 5.123 kHz stehen pro Kanal über $20\mu\text{s}$ Wandlungszeit zur Verfügung.

Die notwendige Auflösung in der Amplitude ist schwieriger zu bestimmen. Sie hängt vom ganzen System ab. Es zeigt sich, dass die Auflösung des Pulsweitenmodulators kleiner sein darf als jene des A/D-Wandlers. Das wird bei der Betrachtung des Regelkreises deutlich (Fig. 5.9).

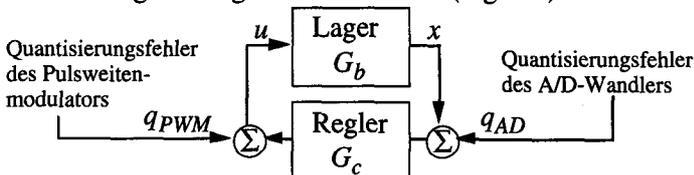


Fig. 5.9 Regelkreis mit Einspeisung der Quantisierungsfehler des A/D-Wandlers und des PWMs.

Die Sensitivität gegenüber Quantisierungsfehlern (q_{PWM} , q_{AD}) ist abhängig vom Regler G_c und von der Strecke G_b . Die Übertragungsfunktionen der Quantisierungsfehler zur Auslenkung x sind:

$$\frac{x}{q_{PWM}} = \frac{G_b}{1 - G_b \cdot G_c} \quad (32)$$

$$\frac{x}{q_{AD}} = \frac{G_b \cdot G_c}{1 - G_b \cdot G_c} = \text{komplementäre Sensitivitätsfunktion} \quad (33)$$

Es kann nun abgeschätzt werden, wie gross das Positionsrauschen des Magnetlagers sein wird. Wenn der Regler 'vernünftig' ausgelegt wird, so bleibt die komplementäre Sensitivität des Magnetlagers im ganzen Frequenzbereich klein. Ihr Betrag ist sicher kleiner zehn. Wenn das Quantisierungsrauschen des A/D-Wandlers beispielsweise 1/100 beträgt, so wird das Positionsrauschen kleiner als ein Zehntel des Luftspalts sein.

Neben dem Quantisierungsrauschen gibt es noch andere Störquellen. Die Wichtigsten sind das Rauschen der Sensoren und die eingestreuten Störungen des Verstärkers. Sie begrenzen die erreichbare Positionsgenauigkeit. Diese Effekte können nur schlecht modelliert werden, es ist eine Messung nötig. Fig. 5.10 zeigt, wie das Rauschen mit wachsender Auflösung des A/D-Wandlers sinkt, bis es bei 11 Bit das Minimum erreicht. Eine weitere Steigerung der Auflösung bringt keine Verbesserung mehr, da die anderen Störquellen dominieren.

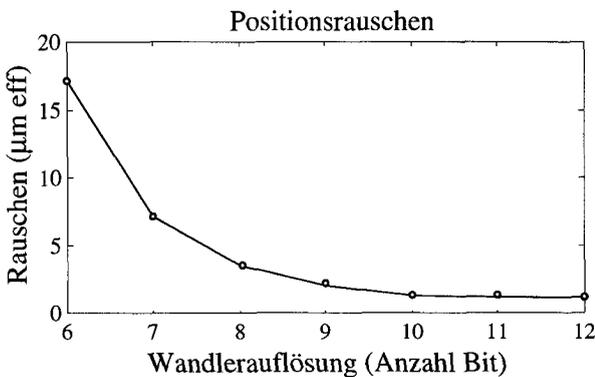


Fig 5.10: Positionsrauschen abhängig von der A/D-Wandlerrauflösung. Messung an der Spindel im schwebenden Zustand. (Regelung mit Signalprozessor TMS320C25, 12 Bit A/D- und D/A-Wandler.)

Es kann somit der interne 10 Bit-Wandler des μC s verwendet werden, ohne dass das Rauschen nennenswert ansteigt.

Die Auflösung des Pulsweitenmodulators wird so gewählt, dass sein Beitrag zum Positionsrauschen verschwindet:

$$(32,33) \quad \frac{G_b}{1 - G_b \cdot G_c} \cdot q_{PWM} \ll \frac{G_b \cdot G_c}{1 - G_b \cdot G_c} \cdot q_{AD} \quad (34)$$

$$(34) \quad q_{PWM} \ll G_c \cdot q_{AD} \quad (35)$$

Der Regler G_c hat im allgemeinen einen PDD²-Charakter, er verstärkt hohe Frequenzen erheblich mehr als tiefe Frequenzen. Deshalb dürfen die Quantisierungsfehler des Pulsweitenmodulators bei hohen Frequenzen gross sein; die bescheidene Auflösung der Pulsweitenmodulatoren im μC von 6 Bit ist ausreichend (Gleichung 35). Im tiefen Frequenzbereich ist das anders. Hier ist die Auflösung des PWMs entscheidend. Da dem Rechner die Fehler q_{PWM} des PWMs exakt bekannt sind, kann er sie mit einer zusätzlichen Rückführung korrigieren. Dadurch wird im tiefen Frequenzbereich ein erheblicher Auflösungsgewinn erzielt. Dieses Prinzip wird teilweise auch bei hochgenauen D/A-Wandlern eingesetzt ('Noise-Shaping').

5.3.3 Notstrom

Bei einem Stromausfall muss die Funktion der magnetischen Lagerung aufrecht erhalten werden, solange der Rotor noch dreht. Dazu muss eine zuverlässige Notspeisung zur Verfügung stehen. Wie schon erwähnt, kann beim verwendeten Konzept die kinetische Energie des Rotors herangezogen werden. Der Antriebsmotor bremst den Rotor und speist die freiwerdende Energie in die Lagerelektronik zurück. Dieser Vorgang wird nun genauer betrachtet.

Sobald die Speisung ausfällt, beginnt die Spannung im Zwischenkreis abzusinken. Der μC merkt das und beginnt, über den Wechselrichter, den Rotor zu bremsen. Die dabei freiwerdende Energie fliesst in den Zwischenkreis zurück und hebt dort die Spannung an. Mit einem Regelkreis wird der Rotor genau so stark gebremst, dass der Energieverbrauch von Verstärker und μC gedeckt ist. Wenn schneller gebremst werden soll, muss ein Abtaktwiderstand eingebaut werden, um die überschüssige Energie loszuwerden.

Die Notversorgung mit der Bremsenergie geht gut, solange der Wechselrichter genügend Leistung zurückspeisen kann. Bei tiefen Drehzahlen kann er das nicht mehr. Das Notstromkonzept funktioniert deshalb erst ab einer

bestimmten Drehzahl. Diese Minimaldrehzahl ist abhängig vom Verhältnis zwischen Motorenleistung und Energieverbrauch der Lagerung:

Das maximale Motorenmoment ist im Wesentlichen drehzahlunabhängig. Die maximale Bremsleistung ist daher proportional zur Drehzahl. Wenn der Wechselrichter bei 60'000 U/min 400W rückspeisen kann und die Lagerung 40W benötigt, so funktioniert die Notstromversorgung solange, bis die Drehzahl unter 6'000 U/min gesunken ist. Dann bricht die Speisung vom μC zusammen und das Magnetlager schaltet ab. Die Fanglager müssen so ausgelegt sein, dass sie Abstürze unterhalb dieser 6'000 U/min schadlos überstehen. Leider kann bei einem Absturz mit höherer Drehzahl ein Schaden nicht ausgeschlossen werden. In einem solchen Fall müssen die Fanglager ersetzt werden. Es gibt keine Wälzlager mit dem erforderlichen Durchmesser, die das überstehen.

5.3.4 Mechanische Konstruktion

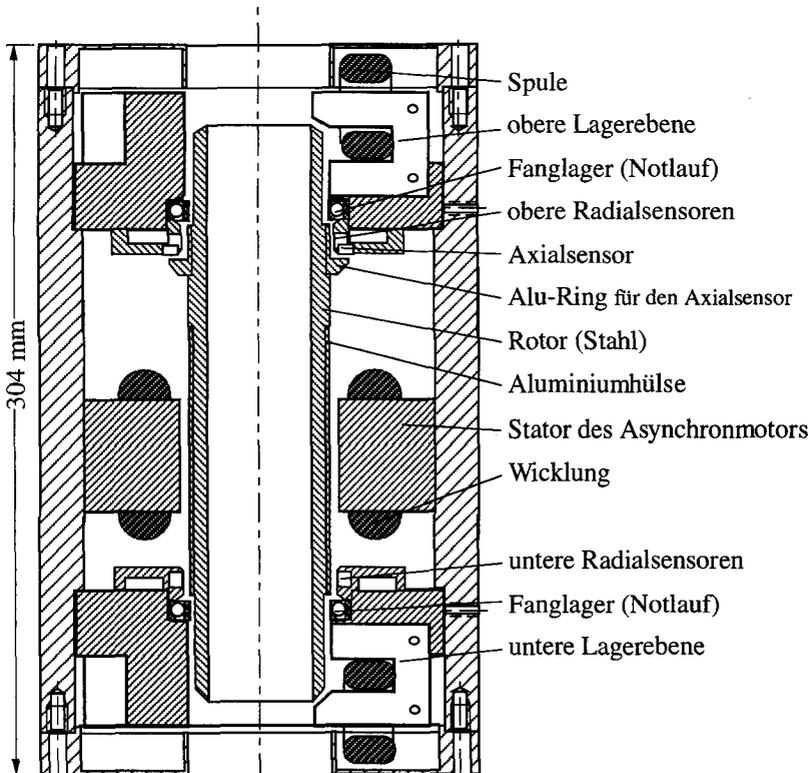


Fig. 5.11 Schnitt durch die magnetgelagerte Spindel

Fig. 5.11 zeigt die magnetgelagerte Spindel im Gehäuse. Der Luftspalt bei den Lagermagneten beträgt 0.3mm und 0.15mm bei den Fanglagern. Die beiden Lagererebenen sind als Kassetten mit Magneten, Sensoren und Fanglager aufgebaut. Sie werden von oben bzw. unten in das Gehäuse eingeschoben. Fig. 5.12 zeigt Teile der Spindel vor der Montage.

Bei der Enddrehzahl von 60 000 U/min wird eine Umfangsgeschwindigkeit von 157m/s und eine Zentripetalbeschleunigung von 10^5g erreicht.



Fig. 5.12 Teile der magnetgelagerten Spindel vor der Montage: Gehäuse, Motorenstator, Rotor, Fanglager und Magnete einer Lagerebene (von links nach rechts).

5.4 Fazit

Das in diesem Kapitel vorgestellte Konzept erlaubt einen sehr kompakten Aufbau der Magnetlagerelektronik. Selbst ohne kundenspezifische integrierte Schaltungen (ASICs) kann ein System mit geringem Platzbedarf gebaut werden. Neben der Elektronik kann auch bei der Verdrahtung und den Steckern viel eingespart werden. Mit dem Konzept des Minimal-Magnetlager-Systems sind nur noch sieben Adern zwischen der Elektronik und den Lagermagneten notwendig. Auch bei der Sensorik wird der Aufwand geringer, da mit der Verwendung der ECS6-Elektronik einfache verdrehte Leitungen anstelle von Koaxialkabeln eingesetzt werden können.

Durch die gezielte Wahl der Frequenzen wird eine gute Entkopplung zwischen Sensorik, Verstärker und Reglerakt erreicht, obwohl alles ohne Abschirmung eng zusammen aufgebaut wird. Mit der phasenverschobenen Synchronisation von Verstärker und Stromquelle können Wirbelstromverluste im massiven Rotor stark verringert werden.

Das ganze System hängt vollständig vom μC ab. Ohne ihn funktioniert weder die Sensorik, noch die Stromquelle und der Verstärker. Die Elektronik wird dadurch sehr einfach, bei der Software gibt es aber um so mehr zu tun. Im folgenden Kapitel wird deshalb ausführlich auf die Aufgaben des Rechners eingegangen.

6. Aufgaben des Rechners

In diesem Kapitel werden die Aufgaben des Rechners behandelt, dabei steht die Regelung im Vordergrund. Zuerst wird ein einfaches Modell der Regelstrecke gebildet. Basierend auf diesem Modell und mit Hilfe von Messungen der Übertragungsfunktion wird ein Regler entworfen. Anschliessend werden die Eigenschaften der Unwuchtkompensation, die Umsetzung des Sicherheitskonzepts und die Energiebilanz des Systems behandelt.

6.1 Modellbildung

6.1.1 Koordinatentransformation

Das Minimal-Magnetlager-System führt zu einer Kopplung der fünf Achsen. Bevor mit der Modellbildung und der Reglerauslegung begonnen werden kann, müssen die Achsen mit Koordinatentransformationen am Streckenein- und -ausgang entkoppelt werden (Fig. 6.1).

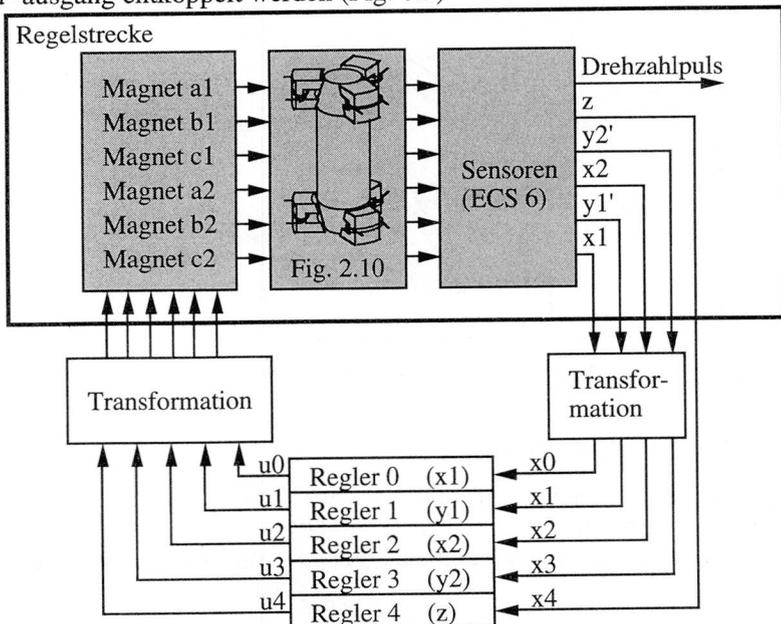


Fig. 6.1 Regelkreis des Minimal-Magnetlager-Systems. Fünf Achsen geregelt.

Auf diese Weise können fünf unabhängige Regler gebaut werden (dezentrale Regelung). Es ergeben sich je zwei Radialregler für die beiden Lagerseiten (x_1, y_1 und x_2, y_2) und ein Axialregler (z -Achse).

Transformation der Sensorsignale:

Die Sensorkarte (ECS6) verarbeitet die Signale der Sensoren S_a, S_b und S_c und liefert die Differenzen $a = S_a - S_c$ und $b = S_b - S_c$ (Fig. 6.2). Die Richtung dieser beiden Messungen in Reglerkoordinaten (x, y) sind:

$$\begin{aligned} a: & (1, 0) \\ b: & (1/2, \sqrt{3}/2) \end{aligned} \quad (36)$$

Daraus ergibt sich die Transformationsgleichung zur Bestimmung der Rotorposition:

$$(36) \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/\sqrt{3} & 2/\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (37)$$

Die Position in der z -Achse wird mit einem separaten Sensor bestimmt.

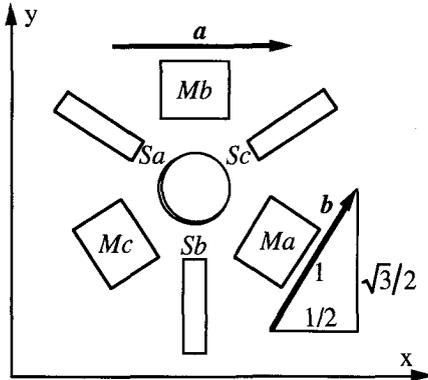


Fig. 6.2 Anordnung der Magnete und Sensoren in einer Lagerebene

Transformation für die Magnete:

Bei den Magneten ist neben den radialen x/y -Komponenten auch die axiale Komponente (z) und die Vormagnetisierung (V) beteiligt. Der geometrische Zusammenhang zwischen den Magneten (M) und den Reglerkoordinaten ist:

$$\begin{bmatrix} x1 \\ y1 \\ x2 \\ y2 \\ z \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & 0 & -\sqrt{3}/2 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & 1 & -1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & 0 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & 0 & 0 & -1/2 & 1 & -1/2 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Ma1 \\ Mb1 \\ Mc1 \\ Ma2 \\ Mb2 \\ Mc2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

wobei die Vormagnetisierung null gesetzt werden kann ($V=0$), da beim verwendeten Konzept die Vormagnetisierung mit der Stromquelle geregelt wird. Durch Invertieren dieser Matrix ergibt sich die Transformation der Regelkoordinaten zu den Magneten:

$$\begin{bmatrix} Ma1 \\ Mb1 \\ Mc1 \\ Ma2 \\ Mb2 \\ Mc2 \end{bmatrix} = \frac{3}{4} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{3} & -1 & 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1/2 \\ -\sqrt{3} & -1 & 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & -1 & -1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1/2 \\ 0 & 0 & -\sqrt{3} & -1 & -1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x1 \\ y1 \\ x2 \\ y2 \\ z \end{bmatrix} \quad (39)$$

Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, werden diese Transformationen in den folgenden Betrachtungen nicht mehr erwähnt.

6.1.2 Mechanisches Modell

Das Modell der Regelstrecke kann in zwei Teile zerlegt werden. Im mechanischen Teil wird der Rotor modelliert, im elektrischen Teil werden die Magnete mit der Krafterzeugung modelliert.

Das mechanische Modell des Rotors kann genau berechnet werden, weil der Rotor sehr einfach aufgebaut ist (Fig. 6.3). Die Berechnung der Eigenfrequenzen ergibt 4.6 kHz und 10.5 kHz (erste und zweite Biegelinie). Sie liegen somit deutlich über der maximalen Drehfrequenz und müssen nicht berücksichtigt werden. Der Rotor kann als starrer Körper behandelt werden.

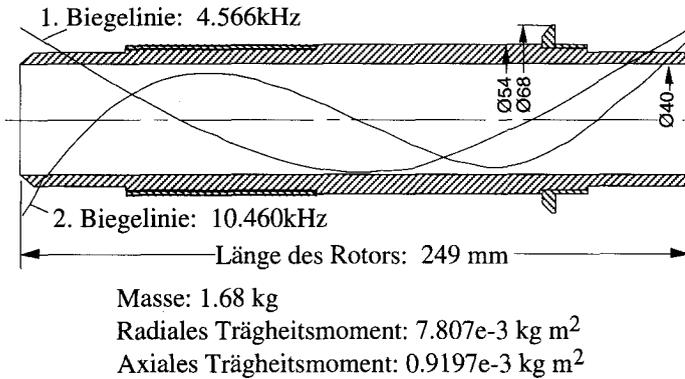


Fig. 6.3 Rotor mit eingezeichneter 1. und 2. Biegelinie (frei schwebender Rotor)

6.1.3 Elektrisches Modell

Wegen der speziellen Anordnung der Magnete ist es schwierig, ein exaktes elektrisches Modell zu bestimmen. Die Feldverteilung ist nicht genau bekannt, und im massiven Rotor sind erhebliche Einflüsse durch Wirbelströme und Remanenz zu erwarten. Das System muss daher ausgemessen werden.

Ein lineares Modell ist für die Reglerauslegung ausreichend, das System darf im Arbeitspunkt linearisiert werden. Für die Messung wird der Rotor in einer Drehbank eingespannt und so im Arbeitspunkt gehalten. Dies ist nötig, weil die Regelstrecke instabil ist und der Rotor bei einer freien oder elastischen Aufhängung den Arbeitspunkt in der Mitte des Lagers verlassen würde. Mit Piezosensoren wird die Kraft der Magnete abhängig vom Strom und vom Luftspalt gemessen. Die Lagercharakteristik kann auf diese Weise nur statisch bestimmt werden, weil die Eigenfrequenzen der Drehbank zu tief liegen [Traxler 84].

Mit einer solchen statischen Messung der Lagercharakteristik (Anhang 2) können Wirbelströme und die dadurch hervorgerufenen Veränderungen des Streufelds nicht erfasst werden. Es kann deshalb nur ein vereinfachtes Modell erstellt werden. Wirbelströme, Hysterese, Eisensättigung und Positions- bzw. Stromabhängigkeiten des Streufelds und der Kopplungen zwischen den Achsen werden vernachlässigt.

Leider hat sich herausgestellt, dass dieses vereinfachte Modell nicht gut genug ist. Es ist nicht gelungen, aufgrund dieses Modells einen stabilisierenden Regler zu finden. Der Hauptgrund liegt darin, dass alle fünf Reglerachsen über die Magnete gekoppelt sind. Es ist daher unmöglich, die einzelnen Achsen nacheinander in Betrieb zu nehmen. Die Entkopplung in

den Transformationen funktioniert erst, wenn alle fünf Regler gleichzeitig stabil sind und der Rotor in allen Achsen frei schwebt.

Bei Stromsteuerung mit PD-Regelung wäre es möglich, die richtigen Reglerparameter experimentell zu bestimmen. Bei der hier verwendeten Spannungssteuerung hingegen ist eine höhere Reglerordnung notwendig. Es sind zu viele unbekannte Parameter, die von Hand eingestellt werden müssten.

6.2 Messung

Um für die Spannungssteuerung einen stabilisierenden Regler finden zu können, muss ein besseres Modell gesucht werden. Dazu wird die Regelstrecke dynamisch ausgemessen.

Das Problem der instabilen Strecke kann mit dem Umweg über eine Stromsteuerung gelöst werden. Die Regelstrecke wird mit einem stromgesteuerten Verstärker angesteuert und mit einem PD-Regler zum Schweben gebracht (Fig. 6.4). Nun können die Spulenspannung u und die Rotorposition x gemessen werden. Daraus kann die Übertragungsmatrix G der ganzen Regelstrecke für Spannungssteuerung ($x = G \cdot u$) bestimmt werden.

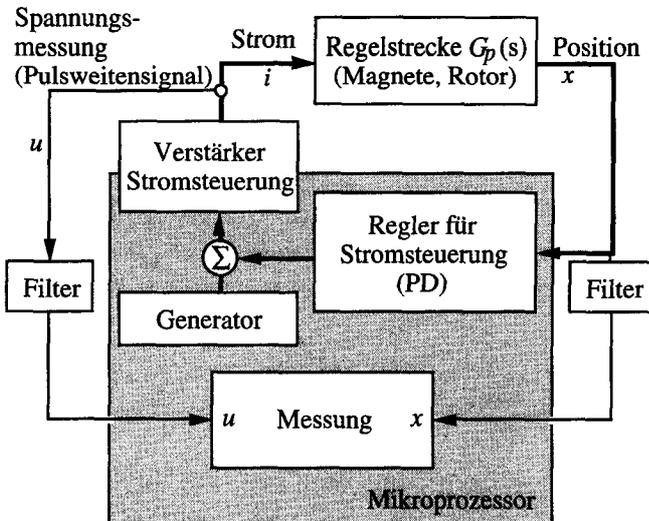


Fig. 6.4 Messaufbau mit Stromsteuerung. Gemessen wird die Übertragungsfunktion bei Spannungssteuerung. Es sind dazu für jede Reglerachse zwei zusätzliche A/D-Eingänge und ein stromgesteuerter Verstärker notwendig.

Da geschaltete Verstärker eingesetzt werden, muss für die Spannungsmessung die Spulenspannung mit einem Filter geglättet werden, bevor sie vom Mikroprozessor eingelesen wird. Das Positionssignal x wird über ein gleiches Filter geführt; dadurch kürzt sich die Filtercharakteristik aus der Messung heraus.

Die Anregung der Strecke erfolgt mit einem Sinusgenerator am Reglerausgang. Für die Messung der Übertragungsmatrix (eine Matrix mit 5×5 Übertragungsfunktionen für die fünf Ein- und Ausgänge der Strecke) werden nacheinander für jeden Messpunkt die entsprechenden Frequenzen an den fünf Streckeneingängen eingespiessen. Daraus ergeben sich die 25 Übertragungsfunktionen der Übertragungsmatrix (Fig. 6.5):

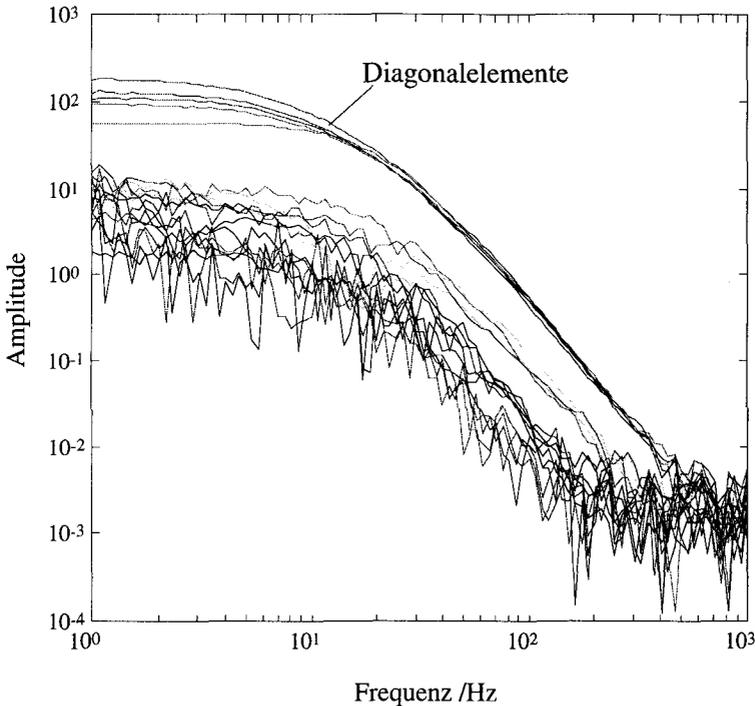


Fig. 6.5 Messung der Übertragungsmatrix der Regelstrecke für Spannungssteuerung. Die 5 dominierenden Diagonalelemente sind gut sichtbar. Weitere Messungen haben ergeben, dass der Regler und die Anregungsamplitude keinen Einfluss auf die gemessene Übertragungsmatrix haben – das System verhält sich linear.

Die Ausserdiagonalelemente der Übertragungsmatrix sind etwa zehnmal kleiner sind als die Diagonalelemente, d.h. die in Abschnitt 6.1 behandelten Transformationen können die fünf Reglerachsen nicht vollständig ent-

koppeln. Die Ursachen dafür sind in den Ungenauigkeiten der Sensorik, im frequenzabhängigen Streufluss und in Fertigungstoleranzen zu suchen. Die erreichte Entkopplung ist jedoch ausreichend¹.

Eine weitere Eigenschaft des Systems ist der grosse Dynamikbereich. Im für die Regelung relevanten Frequenzbereich (0..1000Hz) ändert die Verstärkung der Strecke (Diagonalelemente) um den Faktor 100000 (=100dB) !

Für das Modell werden nur die Diagonalelemente berücksichtigt. Mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Squares-Fit) können fünf Übertragungsfunktionen dritter Ordnung approximiert werden (Fig. 6.6).

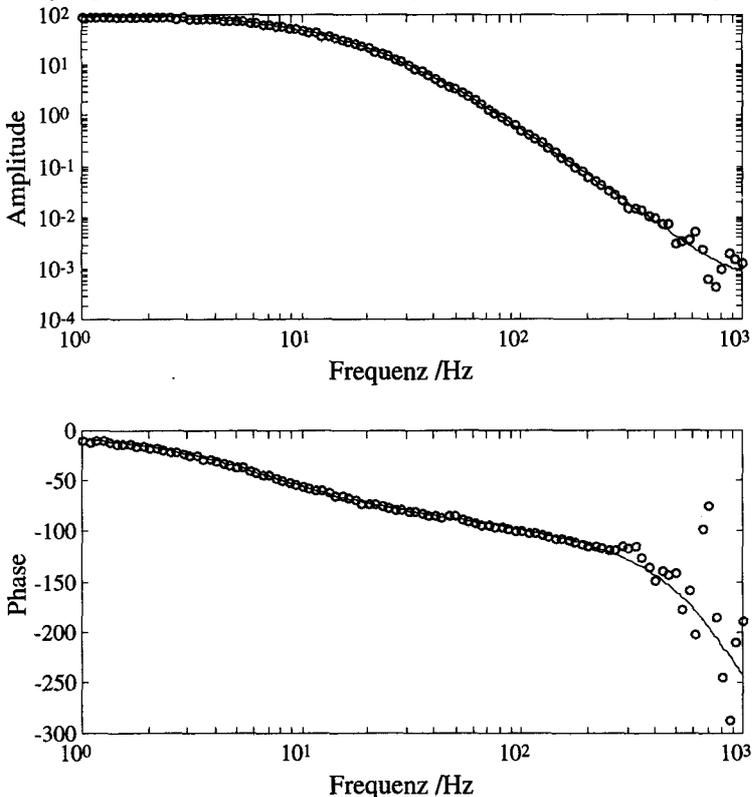


Fig. 6.6 Ein Diagonalelement der Strecken-Übertragungsmatrix für Spannungssteuerung. Messung ('o') und Approximation mit einer zeitdiskreten Übertragungsfunktion dritter Ordnung ('-').

1 Wenn die Anforderungen an die Entkopplung höher wären, müsste entweder jede Spindel einzeln identifiziert werden, oder die Fertigungstoleranz enger sein. Letzteres wäre bei einer Serienproduktion besser möglich als beim Prototypen.

Wegen des grossen Dynamikbereichs muss dabei nicht der absolute, sondern der relative Fehler minimiert werden.

Basierend auf diesem Modell kann nun ein stabilisierender Regler ausgelegt werden (dezentrale Zustandsregelung mit Beobachter). Der Rotor schwebt mit Spannungssteuerung.

Von nun an können alle Messungen mit Spannungssteuerung durchgeführt werden. Es ist keine spezielle Messeinrichtung mehr nötig (Fig. 6.7).

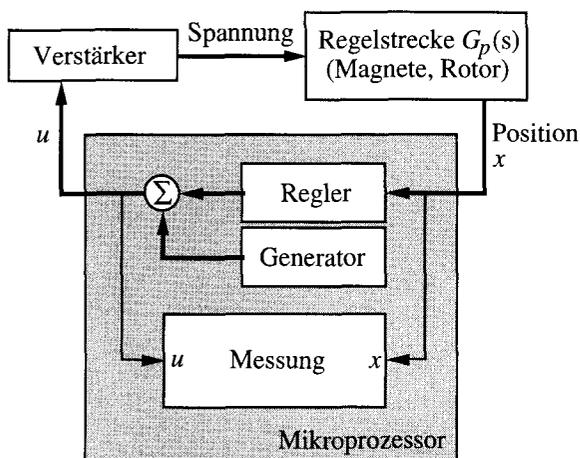


Fig. 6.7 Messaufbau bei Spannungssteuerung. Es braucht keine zusätzlichen Messeinrichtungen mehr. Generator und Messung bestehen ausschliesslich aus Software. Vorteil dieser Methode: Es wird exakt das gemessen, was der Regler 'sieht'. Es werden alle Totzeiten, Verstärkungsfehler und Ungenauigkeiten der Wandler erfasst.

Was geschieht nun, wenn der Rotor in Drehung versetzt wird? Es hat sich gezeigt, dass die Regelung schon bei der halben Betriebsdrehzahl von 30'000 U/min (500Hz) instabil wird und der Rotor abstürzt. Offenbar ändert das Übertragungsverhalten der Strecke so stark, dass der Beobachter versagt.

Dies mag erstaunen, weil passiv² gelagerte Rotoren durch die Kreiseffekte nicht destabilisiert werden können. Ein stromgesteuertes Magnetlager mit PD-Regelung bleibt daher stabil. Magnetlager mit anderen Reglern oder mit Spannungssteuerung verhalten sich oft nicht passiv und können durchaus instabil werden.

2 Passive Lagerung heisst: Die Lagerung gibt im Mittel keine Energie an den Rotor ab. Beispiel: Feder mit Dämpfer. Siehe Abschnitt 6.3.1.

Beim Vergleich der Regelstrecke im Stillstand und bei 250Hz Drehzahl (= 15'000 U/min) ist die gyroskopische Kopplung zwischen der x- und der y-Achse schon zu erkennen (Fig. 6.5 und 6.8).

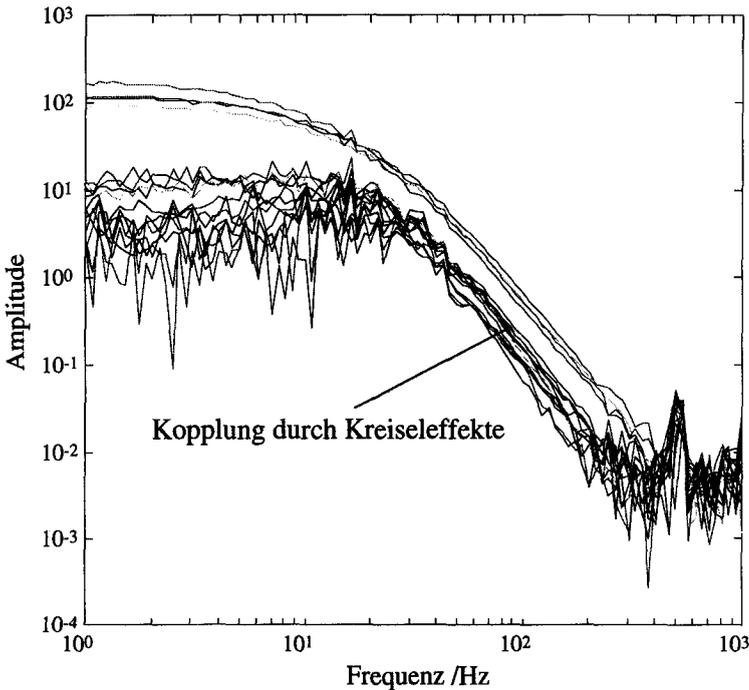


Fig. 6.8 Messung der Übertragungsmatrix bei 250Hz Drehzahl. Die Kopplung der Achsen ist im Bereich um 100Hz grösser als im Stillstand. (Beim Magnetlager sind Messungen am drehenden Rotor möglich. Wenn länger gemessen wird, sinkt das Rauschen in der Messung.)

Um einen Regler zu entwerfen, der den Rotor im ganzen Drehzahlbereich stabilisieren kann, muss die Drehzahlabhängigkeit im Modell berücksichtigt werden. Mit Messungen kann ein solches Modell kaum ermittelt werden, weil kein Regler zur Verfügung steht, der im ganzen Drehzahlbereich stabil ist. Es könnte wieder der Umweg über die Stromsteuerung gemacht werden; es gibt aber auch eine andere Möglichkeit:

Das drehzahlabhängige mechanische Modell des Rotors mit den Kreiseffekten lässt sich aus der Rotorgeometrie hinreichend genau berechnen. Wenn das Modell des elektrischen Teils (Lagermagnete) bekannt ist, kann das drehzahlabhängige Modell der ganzen Regelstrecke berechnet werden. Unter der Annahme, dass ausschliesslich die Kreiseffekte für die

Drehzahlabhängigkeit der Regelstrecke verantwortlich sind, kann aus der Messung der Regelstrecke im Stillstand das elektrische Modell bestimmt werden. Dabei werden die Lagermagnete als Systeme erster Ordnung approximiert [Bühler 95]. Diese Approximation ist recht grob. Das so erhaltene Modell zeigt die Instabilität der Nutation erst bei 800Hz (Fig. 6.9). Es ist gut genug, um das Verhalten des Systems besser zu verstehen und den Einfluss verschiedener Parameter zu untersuchen.

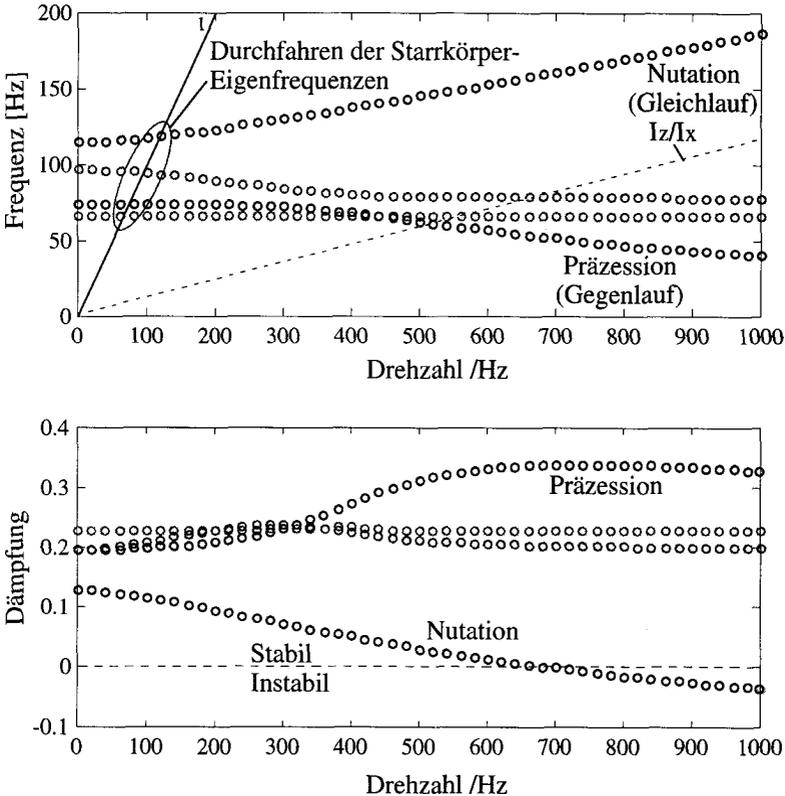


Fig. 6.9 Berechnete Eigenfrequenzen des Rotors bei Spannungssteuerung: Es sind die gleichen Effekte wie bei Stromsteuerung sichtbar, obwohl das Feder-Dämpfer-Modell bei Spannungssteuerung nicht direkt anwendbar ist.

Mit dem verwendeten Regler ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Starrkörper-Eigenfrequenzen wie bei stromgesteuerten Magnetlagern, obwohl das Feder-Dämpfer-Modell bei Spannungssteuerung nicht anwendbar ist. Die Frequenzen der beiden Eigenbewegungen des Rotors (Kipp- und Translationsbewegung) spalten sich schon im Stillstand auf, weil die Entkopplung der Achsen mit den Transformationen fehlerbehaftet ist. Die

Eigenfrequenzen werden im Drehzahlbereich von 70 bis 120 Hz durchfahren. Die Nutationsfrequenz steigt im Verhältnis I_z/I_x mit der Drehzahl, die Präzessionsfrequenz fällt unter 50Hz. Dies stimmt mit den Beobachtungen am realen System überein.

6.3 Reglerauslegung

Die Regelung muss so ausgelegt werden, dass der Rotor im ganzen Drehzahlbereich stabil schwebt. Da die Kreiseffekte das Übertragungsverhalten der Strecke nachhaltig verändern, muss der Regler gegenüber einer Drehzahländerung sehr robust sein. Es werden drei verschiedene Ansätze betrachtet.

6.3.1 Passivitätsbetrachtung

Durch die Verwendung positiv reeller Funktionen kann ein Regler entworfen werden, der im ganzen Drehzahlbereich funktioniert.

Der Regelkreis wird in zwei Teile zerlegt (Fig. 6.10). Der Rotor-Teil hat die Kraft F als Eingang und die Geschwindigkeit v als Ausgang. Das Produkt $F \cdot v$ ist die mechanische Leistung, die von der Lagerung zum Rotor gelangt. Der Rotor ist ein passives mechanisches System, d.h. die zugeführte Leistung $F \cdot v$ abzüglich der zeitlichen Änderung der gespeicherten Energie V (kinetisch und potentiell) ist stets positiv (Energiekriterium). Dies ist gleichbedeutend damit, dass der Nyquistplot der Übertragungsfunktion des Rotors in der rechten Halbebene liegt. Dies gilt auch für den drehenden Rotor, wenn die Kreiseffekte zu Kopplungen zwischen den Lagerebenen führen.

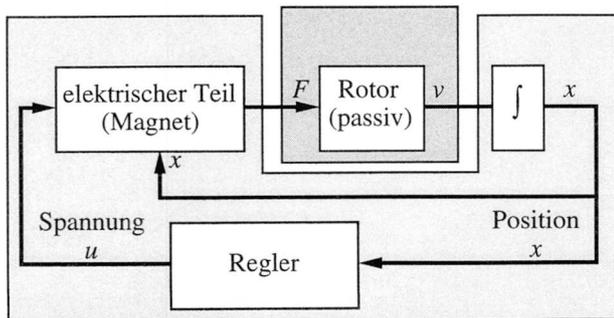


Fig. 6.10 Betrachtung des Systems in zwei Teilen. Der Rotor verhält sich passiv. Wenn der andere Teil auch passiv ist, kann die Stabilität über den ganzen Drehzahlbereich garantiert werden.

Wenn es nun gelingt, den Rest des Systems auch passiv zu gestalten, ist die Stabilität im ganzen Drehzahlbereich garantiert. [Herzog 91][Anderson 73]

Bei der Stromsteuerung mit PD-Regler wird diese Passivitätsbedingung im Idealfall erfüllt. Bei Spannungssteuerung kann die Passivität mit einem PDD²-Regler erreicht werden. Der Regler muss dazu auch die Phasenverschiebungen (verursacht durch die Totzeiten) im System kompensieren. Dies führt im Regler zu einer sehr grossen Verstärkung der hohen Frequenzanteile und ist im vorliegenden Fall nicht mehr realisierbar (Die Verstärkung wäre grösser 1000!). Die Passivität kann somit nicht im ganzen Frequenzbereich eingehalten werden.

Es muss daher ein Kompromiss gesucht werden. Eine Möglichkeit ist die Betrachtung der Kreisverstärkung des Systems. Wegen dem Tiefpasscharakter der Regelstrecke nimmt die Kreisverstärkung oberhalb der Starrkörperfrequenzen ab und bleibt ab einer bestimmten Frequenz ω_x kleiner Eins. Die Stabilitätsbetrachtung kann in zwei Frequenzbereiche unterteilt werden. Oberhalb von ω_x ist Instabilität unmöglich, weil die Kreisverstärkung kleiner eins bleibt – im Nyquistdiagramm kann der kritische Punkt (-1) nicht mehr umrundet werden. Unterhalb von ω_x ist die Situation wie bisher. Stabilität kann hier garantiert werden, indem die Passivitätsbedingung eingehalten wird. Die Passivitätsbedingung muss also *nur im unteren Frequenzbereich* erfüllt werden. Dieser Frequenzbereich richtet sich nach dem Frequenzbereich der Starrkörper-Modi.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde der folgende dezentrale Regler für die radialen Richtungen entworfen (Fig. 6.11):

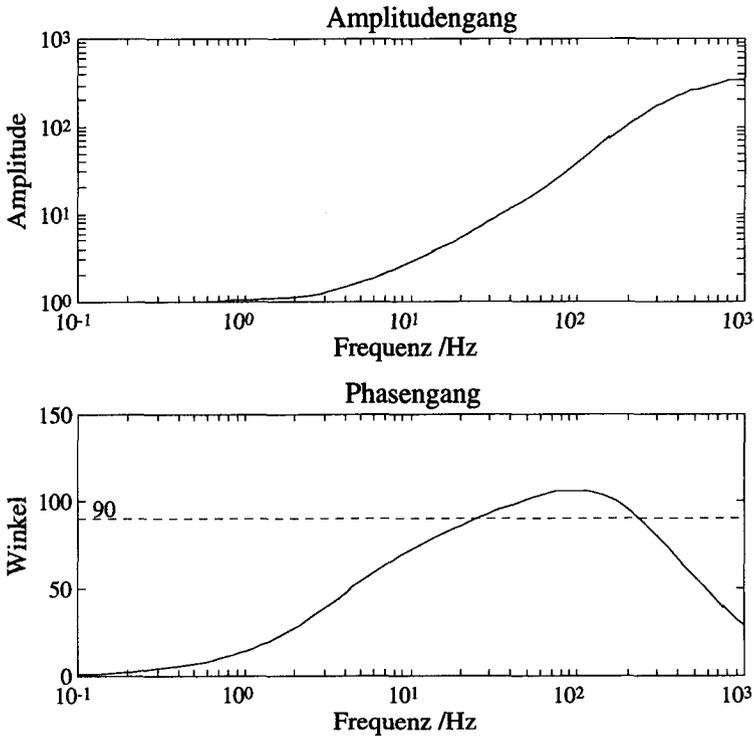


Fig. 6.11 Übertragungsfunktion des Reglers für die radialen Richtungen. Er hat die Ordnung drei.

Der Regler hat die Ordnung drei und hebt die Phase im Frequenzbereich der Starrkörperfrequenzen (siehe Fig. 6.9) zwischen 30 und 200Hz so weit an, dass dort Passivität gewährleistet ist. (Die Phase muss grösser als 90° sein).

Dieses Vorgehen für die Reglerauslegung ist zwar plausibel, als Auslegungsmethode jedoch eher unbefriedigend. Es sind viele Experimente nötig, um auf diese Weise einen guten Regler zu finden. Der Entwurf von passiven Reglern ist zur Zeit noch Forschungsgegenstand [Herzog 94].

Der so erhaltene Regler hat eine grosse Verstärkung bei hohen Frequenzen. Die Dämpfung der Starrkörperfrequenzen ist nicht besonders hoch (10..20% – mit der Passivität kann nur die Stabilität garantiert werden, nicht aber die Reglergüte). Der Regler kann den Rotor bis zu einer Drehzahl von ca. 800Hz stabilisieren. Dort wird die Phasenverschiebung der Totzeiten zu gross. Es wäre eine zu grosse Reglerverstärkung erforderlich.

6.3.2 Robuste Regelung

Mit den Methoden der robusten Regelung (H_∞ , strukturierte Singularwerte) kann ein Regler für einen weiten Drehzahlbereich ausgelegt werden, dabei wird auf die Passivität verzichtet. Mit diesen Methoden entstehen zwar bessere Regler, die Problematik bleibt aber unverändert. Aus der Arbeit von [Brandenberger/ Kaiser 94] geht hervor, dass die Verstärkungen zwar geringer werden, die Ordnung des Reglers aber sehr hoch ausfällt. Es wurde auch gezeigt, dass ein funktionierender MIMO-Regler entworfen werden kann, wenn die Drehrichtung bekannt ist. (Bei unbekannter Drehrichtung erzeugt der MIMO-Entwurf eine dezentrale Regelung³). Die Ordnung eines solchen Reglers ist sehr hoch. Sie kann zwar reduziert werden (auf die Ordnung sechs), der resultierende Regler benötigt aber trotzdem noch zu viel Rechenleistung – der Reglertakt müsste reduziert werden, wodurch die ganze Regelung noch schwieriger würde.

6.3.3 Kreuzkopplung

Es hat sich herausgestellt, dass die geforderte Drehzahl erreicht werden kann, ohne dass die erforderliche Rechnerleistung stark ansteigt. Beim dezentralen Regler aus 6.3.1 wird der Reglerausgang mit einer Koordinatendrehung um einen bestimmten Winkel in der x/y-Ebene gedreht. Dies bedeutet, dass die x- und y-Ebene im Rechner gekoppelt werden. Diese Kreuzkopplung kann die in Fig. 6.8 beobachtete gyroskopische Kopplung teilweise kompensieren. Dies erfordert nur wenig zusätzliche Rechenleistung. Der Drehwinkel wird abhängig von der Drehzahl eingestellt. Der so entstandene drehzahlabhängige Regler dritter Ordnung vermag den Rotor im ganzen Drehzahlbereich zu stabilisieren und erlaubt trotz begrenzter Rechenleistung einen hohen Reglertakt.

Die Kreuzkopplung ist eine tiefgreifende Abkehr von der anfangs angestrebten Passivität und kann zu Stabilitätsproblemen führen [Müller 77]. Im vorliegenden Fall bewirkt die Kopplung eine bessere Dämpfung der Nutation (mit der Drehrichtung). Dabei sinkt die Dämpfung der Präzession, da diese Bewegung entgegen der Drehrichtung verläuft.

6.4 Implementierung

Die Umsetzung der ganzen Regelung mit den Transformationen in ein lauffähiges Regler-Programm erfordert noch ein paar zusätzliche Funktionsblöcke (Fig. 6.12). Im oberen Teil sitzt der eigentliche Regelungs Pfad mit

3 Translations- und Kippmode wurden entkoppelt betrachtet.

den Transformationen und dem Regler. Mit x_0 kann der Nullpunktfehler der Hardware abgeglichen und Anregungssignale für Messzwecke eingespielt werden.

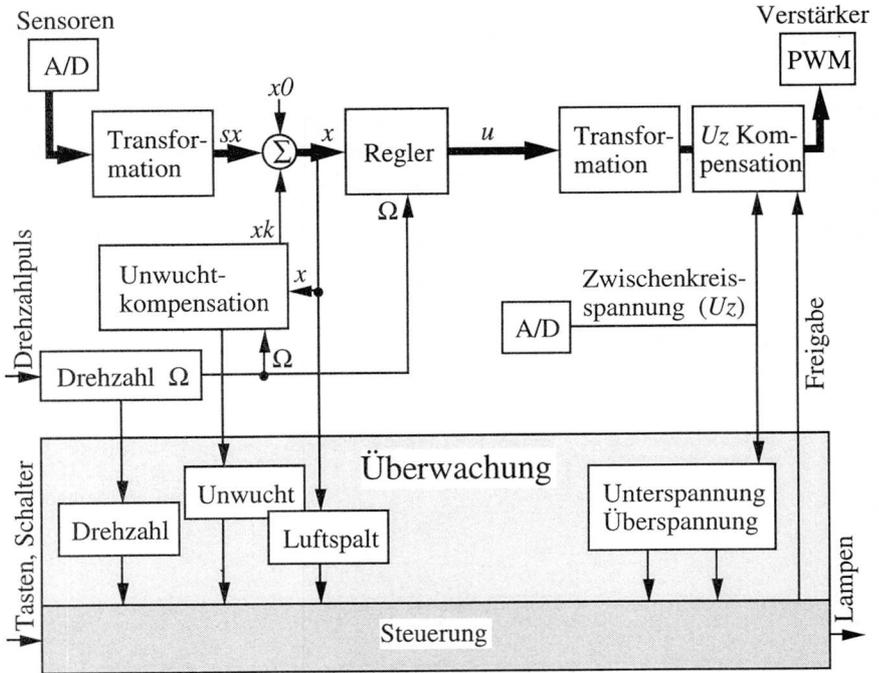


Fig. 6.12 Regler-Topologie mit den wichtigsten Funktionsblöcken (ohne Entwicklungssystem).

Bevor die Signale an den PWM ausgegeben werden, muss noch die Zwischenkreisspannung kompensiert werden (U_z -Kompensation):

Beim verwendeten Konzept mit Spannungssteuerung ist die mittlere Spulenspannung das Produkt der Speisespannung mit der Pulsweite. Spannungsschwankungen im Zwischenkreis wirken sich ohne U_z -Kompensation direkt auf die Kreisverstärkung der Regelstrecke aus.

Die Pulsweite muss daher abhängig von der Zwischenkreisspannung korrigiert werden. Dazu liest der Rechner die Zwischenkreisspannung (U_z) über einen Analogeingang ein und bestimmt die erforderliche Pulsweite. Das System bleibt so in einem weiten Spannungsbereich (von 20V bis 60V) funktionstüchtig. Dies ist insbesondere bei einem Stromausfall wichtig, bevor die Notstromversorgung einspringt.

Im folgenden werden die Unwuchtkompensation und die Überwachung behandelt.

6.5 Unwuchtkompensation

Die Unwuchtkompensation verhält sich ähnlich wie ein Notch-Filter (=Bandsperre). Sie erzeugt ein sinusförmiges Kompensationssignal (x_k), welches die drehzahlsynchrone Frequenzkomponente am Reglereingang (x) kompensiert. Für den Regler wird die Unwucht somit unsichtbar, und es werden keine Kompensationskräfte mehr erzeugt. Dadurch werden keine Vibrationen auf das Gehäuse übertragen, der Rotor läuft praktisch kräftefrei und die Lagerreibung wird minimal.

6.5.1 Funktionsprinzip

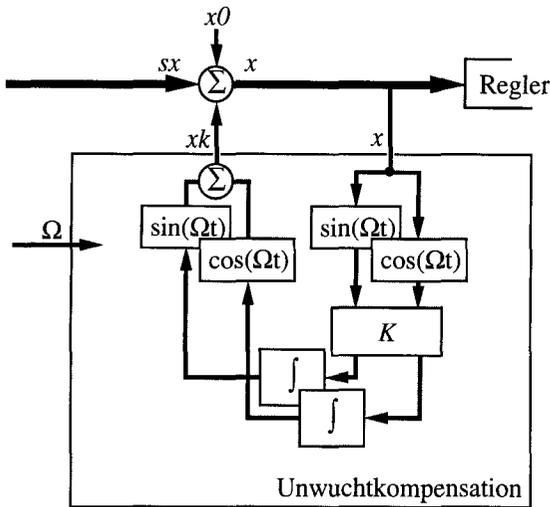


Fig. 6.13 Unwuchtkompensation für kräftefreien Lauf.

Die Unwuchtkompensation besteht aus einem Detektor und einem Generator (Fig. 6.13). Im Detektorteil (rechts) wird die drehzahlsynchrone Frequenzkomponente von x detektiert. Dazu wird das Signal mit dem Sinus (bzw. Cosinus) multipliziert. Dieses 'Unwuchtsignal' wird dann über eine Adaptionsmatrix K den Integratoren zugeführt (unten). Der Ausgang der Integratoren wird durch eine weitere Multiplikation mit dem Sinus (bzw. Cosinus) in ein drehzahlsynchrones sinusförmiges Kompensationssignal (x_k) umgeformt (links).

Wenn die Adaptionmatrix K richtig gewählt wird, konvergiert das System. Die drehzahlsynchrone Frequenzkomponente der Sensorik (sx) wird exakt kompensiert und am Reglereingang (x) verschwindet das 'Unwuchtsignal'. Die Integratorausgänge bleiben auf einem konstanten Wert stehen. Dieser Wert ist der 'Kompensationsvektor'. Er entspricht der unwuchtbedingten Abweichung der Hauptträgheitsachse von der geometrischen Achse des Rotors.

In [Larsonneur 94] wird das Übertragungsverhalten einer solchen Kompensation analysiert und gezeigt, für welche Werte der Adaptionmatrix K die Unwuchtkompensation konvergiert. Die Konvergenz dieser Kompensation und die Stabilität des ganzen Lagersystems ist allgemein beweisbar.

Im Vergleich zu einem gewöhnlichen Notch-Filter hat dieses Verfahren folgende Vorteile:

- Wenn die Adaptionmatrix K null gesetzt wird, bleiben die Integratoren stehen. Der Kompensationsvektor ist 'eingefroren'. Die Unwucht wird weiterhin kompensiert, aber nicht mehr adaptiert. In diesem Zustand hat die Kompensation keinen Einfluss auf die Lagercharakteristik, sie beeinflusst die Stabilität des Systems nicht. Dies ist interessant für das Durchfahren von elastischen Eigenfrequenzen.
- Die Adaptiongeschwindigkeit kann auch sehr langsam eingestellt werden. Dann ändert die Lagercharakteristik nur unmerklich. Die Kompensation verhält sich dann wie ein sehr schmalbandiges Notch-Filter. Die Filterfrequenz stimmt immer exakt mit der Drehzahl überein, da die Drehzahlmessung direkt in die Kompensation miteinbezogen wird.
- Für jede Drehzahl existiert ein passendes K . Nur in den elastischen Eigenfrequenzen gibt es Probleme. Mit einer drehzahlabhängigen K -Matrix kann beim starren Rotor im ganzen Drehzahlbereich adaptiert werden, auch in den Starrkörperfrequenzen. Bei stark gyroskopischen Systemen muss die Adaptionmatrix K auch die Kopplungen zwischen den Achsen berücksichtigen [Herzog 95].

6.6 Überwachung (Sicherheit)

Im unteren Teil von Fig. 6.12 ist die Systemüberwachung und -steuerung eingezeichnet. Diese beinhalten zwar viele Funktionen, benötigen aber nur wenig Rechenleistung, weil sie mit einem langsameren Takt als der Regler arbeiten. Die Schwierigkeit liegt hier nicht in der Geschwindigkeit, sondern in der Zuverlässigkeit. In [Diez 93] wird ein Betriebssystem für mechatronische Produkte vorgestellt, welches auch die Sicherheitsaspekte

berücksichtigt. Für die vorliegende Arbeit stand leider kein derartiges Betriebssystem zur Verfügung. Es konnte auch nicht auf erprobte Software für Magnetlager zurückgegriffen werden. (Der verwendete μC war neu auf dem Markt.)

Die Überwachung und Steuerung kontrolliert alle wichtigen Funktionen im System und stellt den erforderlichen Betriebszustand ein. Dabei müssen die Forderungen des Sicherheitskonzepts eingehalten werden (Kap 5.2.6). Dies führt zu einer komplizierten Verarbeitung von Ausnahmesituationen in der Software. Die Zuverlässigkeit dieser Software muss genauer betrachtet werden. Es wird zwischen Programmabsturz und Programmierfehler unterschieden.

6.6.1 Programmabsturz

Ein Programmabsturz bedeutet, dass das ganze Programm oder Teile davon nicht mehr arbeiten. Jeder der parallelen Prozesse im Rechner wird mit einem 'Watchdog' überwacht. Wenn davon einer anspricht, wird dieser Fehler im Speicher abgelegt und der Prozessor neu aufgestartet, ohne den Speicher zu löschen. Falls das Programm dann wieder läuft, schwebt der Rotor weiter und wird abgebremst⁴. Dieser Vorgang geht so schnell, dass der Rotor in der Zwischenzeit nicht abstürzt!

6.6.2 Programmierfehler

Ein Programmierfehler führt dazu, dass das Programm nicht macht, was es sollte. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass solche Fehler im Reglerteil unentdeckt bleiben – der Rotor würde gar nicht schweben. Beim Überwachungsteil jedoch ist diese Gefahr gross, weil es praktisch unmöglich ist, alle möglichen Betriebs- und Fehlerzustände zu testen. Das Problem ist, dass in einer Ausnahmesituation (z.B. Stromausfall) das Programm weiter laufen und das Beste aus der Situation machen sollte (z.B. Rotor abbremesen).

Jene Programmierfehler, welche nur selten zu einem Fehlverhalten führen, sind die gefährlichsten. (Die anderen werden schnell gefunden.) Solche Fehler treten oft im Zusammenhang mit parallelen⁵ Prozessen auf, weil die Abfolge der Programmteile variabel ist.

4 Falls das Programm nach dem Neustart nicht wieder anläuft, dann ist von der Software her nichts mehr zu machen und es ist eine Reparatur nötig.

5 Es sind quasiparallele Prozesse gemeint. Echte Parallelität ist mit einem Prozessor allein nicht möglich. Nur die A/D-Wandler, die Pulsweitenmodulatoren, die Drehzahlmessung und die serielle Schnittstelle laufen echt parallel zum Prozessor.

Um die Übersicht zu behalten, werden so wenig parallele Prozesse wie möglich verwendet. Es gibt daher nur deren vier: Der Regler, die Überwachung, die Ansteuerung des Wechselrichters und die Bedienung der seriellen Schnittstelle mit dem entsprechenden Protokoll für die Kommunikation (Fig. 6.14).

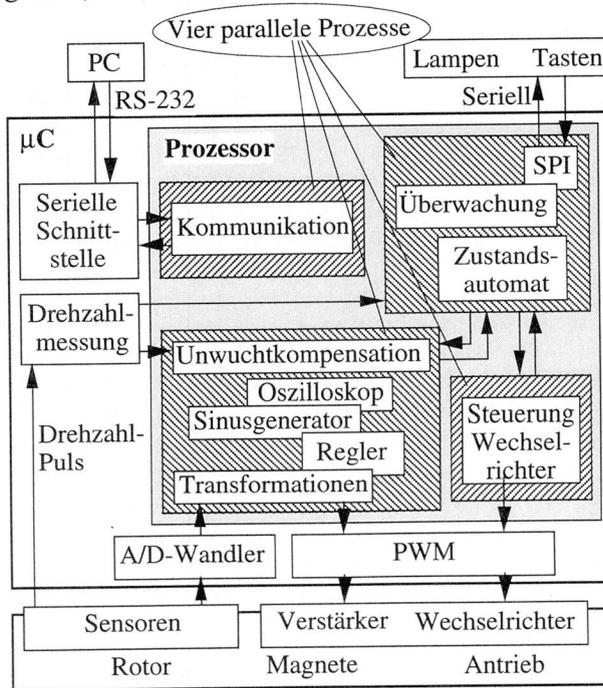


Fig. 6.14 Programmstruktur mit vier quasiparallelen Prozessen

Alle Prozesse sind immer aktiv, auch wenn sie im momentanen Betriebszustand nicht nötig sind. Es gibt auch keine Prozesse, die auf andere warten müssen, und es werden keine neuen Prozesse gestartet oder abgebrochen. Dadurch arbeitet der Prozessor immer unter den gleichen Bedingungen, und ein Programmierfehler wirkt sich fast immer in mehreren Betriebszuständen aus. Beim Testen wird eine bessere Abdeckung der möglichen Fehler erreicht, auch wenn nicht alle Betriebsfälle getestet werden können.

Die Testbarkeit und Übersichtlichkeit kann wesentlich gesteigert werden, wenn der Datenaustausch zwischen den Prozessen ausschliesslich über den Überwachungsprozess abläuft. Diese Lösung ist langsam, aber zulässig, weil die zeitkritischen Pfade alle innerhalb des Reglerprozesses liegen und nicht betroffen sind.

6.6.3 Überwachungsprozess

Wie erwähnt, ist es beim Überwachungsprozess besonders wichtig, allfällige Programmierfehler zu finden. Da es bei einem Programm im allgemeinen sehr schwierig oder gar unmöglich ist, Fehlerfreiheit zu beweisen, wird der Überwachungsprozess als Zustandsautomat implementiert. Dabei werden ausschliesslich boolesche Variablen verwendet und es werden keine Schleifen programmiert. Ein solcher Zustandsautomat kann mit kleinem Aufwand formal beschrieben werden. Dadurch sind die Testmöglichkeiten wesentlich besser als bei einem allgemeinen Programm [Holzmann 91]. Der Programmcode kann aufgrund der formalen Beschreibung automatisch erzeugt werden. Wenn der dazu verwendete Kodegenerator zuverlässig arbeitet, entspricht das Programm immer exakt der formalen Beschreibung. Wir können uns daher auf die Verifikation der formalen Beschreibung beschränken.

Wie kann nun getestet werden, ob diese Beschreibung (Spezifikation) fehlerfrei ist? Der Zustandsautomat hat viele Ein- und Ausgänge, weil alle Meldungen und Steuersignale dort durchlaufen. Zusammen mit den Fehler-signalen sind es über 16 binäre Signale, die in verschiedenen Kombinationen auftreten können. Es ergeben sich somit über 65000 verschiedene Zustände. Der Zustandsautomat ist zu gross, um in einem einzigen Zustandsdiagramm dargestellt werden zu können. Die Zustände werden daher in Gruppen und Untergruppen unterteilt, damit übersichtliche Zustandsdiagramme entstehen. Dadurch erscheinen in den Zustandsdiagrammen immer nur Teilaspekte des Systems, und die Gefahr ist gross, dass etwas vergessen geht.

Es sind daher systematische Testmethoden notwendig. Mit solchen Methoden kann die Fehlerfreiheit zwar letztlich auch nicht bewiesen werden, sie haben aber eine gute Fehlerabdeckung. Im folgenden werden zwei Methoden betrachtet:

Methode 1:

Diese Methode ist nur anwendbar, wenn ein Modell des Magnetlagers zur Verfügung steht. Sie ermöglicht einen gründlichen Test aller Funktionen des Überwachungsprozesses. Es wird ein zweiter Zustandsautomat konstruiert, der das Verhalten des Magnetlagers ohne den Überwachungsprozess simuliert (Modellbildung). Das ganze System besteht, so betrachtet, aus zwei Zustandsautomaten die miteinander kommunizieren. An diesem System können nun verschiedene Tests durchgeführt werden. Es kann überprüft werden, ob verbotene Zustände auftreten, (z.B. ob der Regler bei drehendem Rotor ausschaltet oder ob der Antrieb freigegeben wird, wenn der Rotor nicht schwebt.) In [Holzmann 91] werden kommunizierende Zustands-

automaten und diverse Testmethoden behandelt, und es wird auch ein Softwarewerkzeug vorgestellt, welches die Tests automatisch ausführt.

Der bei dieser Methode benötigte zweite Zustandsautomat für das Modell muss fehlerfrei sein. Diese Forderung kann jedoch nicht garantiert werden. Trotzdem wird eine hohe Fehlerabdeckung erreicht – es ist sehr unwahrscheinlich, dass sich ein Fehler im Überwachungsprozess zusammen mit einem fehlerhaften Modell genau so auswirkt, dass sich das ganze System wieder wie das fehlerfreie System verhält ⁶.

Der Aufwand dieser Methode ist recht hoch, weil ein zweiter Zustandsautomat als Modell für das Magnetlagersystem erstellt werden muss.

Methode 2:

Es ist auch möglich, auf den zweiten Zustandsautomaten zu verzichten. Es steht dann kein Modell für das Magnetlager zur Verfügung. Ein gründlicher Test des Überwachungsprozesses ist in diesem Fall unmöglich, aber auch nicht notwendig.

Unser Ziel hier ist, eine hohe Sicherheit zu erreichen. Wir sind gar nicht zwingend auf Fehlerfreiheit angewiesen. Solange die Fehler keine Schäden verursachen, kann die Software im Betrieb ausgetestet und optimiert werden. Es genügt daher, nur jene verbotenen Zustände zu überprüfen, welche zu einem Absturz führen würden oder andere schwerwiegende Folgen nach sich ziehen würden. Im Allgemeinen können diese verbotenen Zustände auch ohne Modell des Magnetlagers erfasst werden, indem im Überwachungsprozess Nebenbedingungen formuliert werden. Diese Nebenbedingungen werden so gewählt, dass sie immer erfüllt sind, ausser wenn sich das System in einem 'schwerwiegenden' verbotenen Zustand befindet. Der Überwachungsprozess besteht nun aus dem Zustandsautomaten und den Nebenbedingungen. Sie bilden zusammen einen Satz redundanter Zustandsgleichungen. Den einzelnen Gleichungen werden Prioritäten vergeben, sodass bei einem allfälligen Widerspruch zwischen den Gleichungen immer ein sichere, 'konservative' Lösung gewählt wird ⁷. Es kann so beispielsweise garantiert werden, dass die Regelung bei drehendem Rotor nicht unverhofft abschaltet, auch wenn Fehler im Zustandsautomaten nicht ausgeschlossen werden können.

6 Dies gilt nur, wenn das Modell des Magnetlagers durch eine andere, unabhängige Person erstellt wird.

7 Mit einem entsprechenden Softwarewerkzeug wäre es auch möglich, die Gleichungen auf Widerspruchsfreiheit zu überprüfen. Im Betrieb wären dann Widersprüche ausgeschlossen.

Die Gleichungen des Zustandsautomaten werden in Form von Programmzeilen (z.B.: 'IF (a AND b) THEN .ELSE. .END') festgehalten. Diese Darstellung des Zustandsautomaten ist kompakt und übersichtlich. Die Bedeutung der einzelnen Zeilen kann leicht erfasst werden. Petri-Netze sind im Vergleich dazu sehr umständlich und gross – sie sind für die Darstellung von Systemen mit vielen Zuständen nicht geeignet.

6.6.4 Entwicklungsphase

Während der Entwicklungsphase wird das Programm mehrmals verändert und optimiert. Für gewisse Tests werden einzelne Überwachungsfunktionen vorübergehend ausser Betrieb gesetzt. Die Redundanzen im Zustandsautomaten stellen dann sicher, dass die 'lebenswichtigen' Funktionen erhalten bleiben.

Um die Regelstrecke auszumessen und den Regler zu entwerfen, ist eine spezialisierte Entwicklungsumgebung nötig. Für Systeme mit Signalprozessor sind auf Regelkreise spezialisierte Umgebungen erhältlich. Es ist zweckmässig, eine solche Entwicklungsumgebung auf den verwendeten μC zu portieren. Bei den meisten dieser Systeme wird der PC-Bus direkt mit dem Signalprozessor verbunden, damit ein schneller Zugriff auf alle Daten gewährleistet ist. Beim hochintegrierten Magnetlager sollte die Verbindung zum PC mit minimalem zusätzlichem Hardwareaufwand realisiert werden. Der Datenaustausch wird deshalb über eine serielle Schnittstelle mit 57.6 kBit/s realisiert. Diese Übertragungsgeschwindigkeit ist ausreichend und benötigt PC-seitig keine zusätzliche Hardware. Das verwendete Protokoll erkennt allfällige Übertragungsfehler.

Die verwendete Entwicklungsumgebung baut auf MATLAB⁸ auf [Mecos 92]. MATLAB bietet hervorragende Möglichkeiten zur Identifikation und zur Reglerauslegung und ist einfach zu bedienen. Durch die direkte Verbindung zum Magnetlagersystem erscheinen Messdaten direkt in MATLAB als Matrix. Auf alle Variablen und Parameter ist ein direkter Zugriff möglich. In der Software des Magnetlagers ist ein Funktionsgenerator und ein mehrkanaliges Oszilloskop mit diversen Triggermöglichkeiten vorhanden. Diese können von MATLAB aus bedient werden. Somit kann eine Messung an der Regelstrecke (Kapitel 6.2) sehr einfach und schnell durchgeführt werden. Die entwickelten Programme für diese Verbindung erlauben auch einen Betrieb über das Telephonnetz mittels Modem. Die Übertragungsgeschwindigkeit ist auch bei einer solchen Modemverbindung noch ausreichend hoch, um bequem arbeiten zu können. Dies ist insbesondere für die Ferndiagnose interessant.

8 MATLAB ist ein Trade Mark der MathWorks, Inc.

Die Verwendung dieser Entwicklungsumgebung erhöht die Sicherheit:

- Die einfache, bewährte Entwicklungsumgebung führt zu weniger Fehlmanipulationen.
- Die Reglerparameter werden in einem separaten Parameterfile gespeichert und nicht im Programmcode eingebaut. Während der Regleroptimierung wird somit das Programm nicht verändert und es können sich keine Fehler ins Programm einschleichen.
- Die schnellen und komfortablen Möglichkeiten der Datenerfassung und Datenauswertung führen dazu, dass sehr viele Messungen gemacht werden. Dadurch werden unerwartete Fehler leichter entdeckt.

6.7 Energiebilanz

Die Energiebilanz der Anlage ist von zentraler Bedeutung. Um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen, muss der Energieverbrauch minimal gehalten werden.

Der Energieverbrauch teilt sich auf in elektrische Verluste, Reibungsverluste und Antriebsverluste (Fig. 6.15).

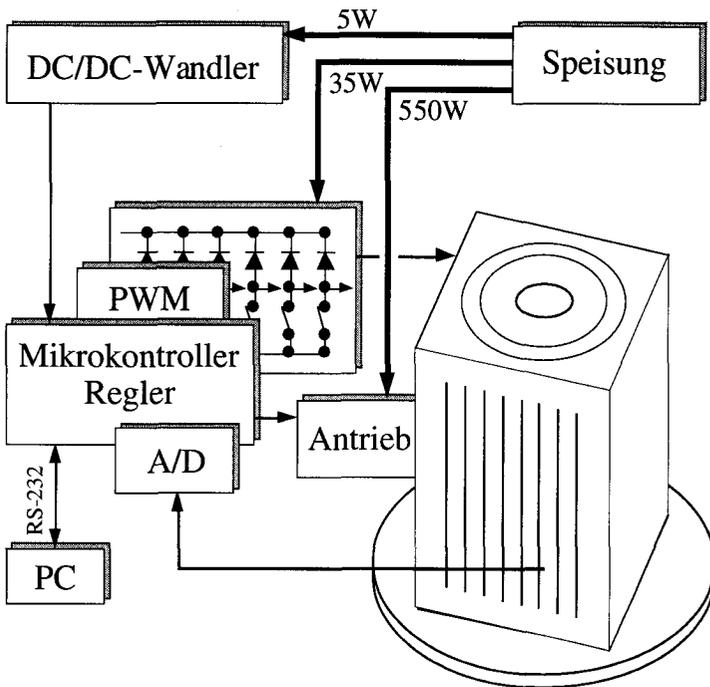


Fig. 6.15 Energieverteilung im System

6.7.1 Elektrische Verluste

Die Elektronik benötigt für die Signalverarbeitung (Sensorik und μC) ca. 5W. Durch die phasenverschobene Synchronisation zwischen Stromquelle und Verstärker liegen die Verluste im Verstärker, in der Stromquelle und in den Lagermagneten zusammen bei nur 35W mit 7.2A Vormagnetisierung (1.2A pro Magnet). Diese Verluste sind von der Umgebungstemperatur und der Länge der Zuleitungskabel abhängig.

Im Vergleich zu einem Wälzlager ist der Energieverbrauch sehr gering. Ein Wälzlager benötigt zwar selbst keine Energie, hat aber bei den hohen Drehzahlen grosse Reibungsverluste. Bei 60000 U/min wäre mit mindestens 1kW Verlustwärme zu rechnen [Dubbel 90]. Das Lager würde sich schon bei einem Viertel dieser Drehzahl überhitzen. Auch mit einer aufwendigen Schmierung und Kühlung könnte die Enddrehzahl nicht erreicht werden. Mit einer Öl-Luft-Schmierung und einem inneren Lagerdurchmesser von 50 mm liegt die Drehzahlgrenze bei etwa 30'000 U/min, unter der Voraussetzung, dass der Rotor frei von Unwucht ist.

6.7.2 Reibungsverluste

Die Reibungsverluste des Magnetlagers können mit Hilfe von Auslaufversuchen ermittelt werden. Dabei wird die Drehzahlabnahme des Rotors gemessen, nachdem der Antrieb bei Maximaldrehzahl abgeschaltet wurde. Da das Trägheitsmoment des Rotors bekannt ist, kann das wirkende Bremsmoment bestimmt werden.

Es hat sich gezeigt, dass das Bremsmoment völlig unabhängig vom verwendeten Regler ist. Einzig die Unwuchtkompensation hat erwartungsgemäß einen Einfluss. Insbesondere bei Drehzahlen im Bereich der Starrkörperfrequenzen entsteht ohne Unwuchtkompensation ein erhebliches zusätzliches Bremsmoment.

Bei tiefer Drehzahl ist die Lagerreibung extrem gering. Wenn der Rotor mit nur 1 Hz dreht, bleibt er erst nach einigen Minuten stehen. Mit steigender Drehzahl nimmt das Bremsmoment stark zu (Fig. 6.16).

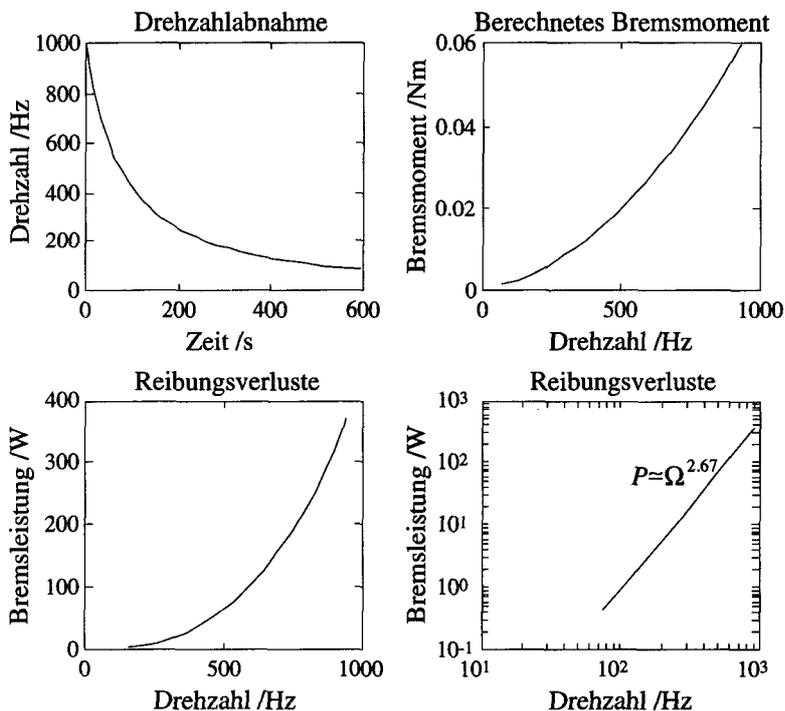


Fig. 6.16 Auslaufversuch des magnetgelagerten Rotors

Das Bremsmoment der Reibung kann in einen konstanten, einen proportionalen und einen quadratischen Anteil aufgespalten werden. Der quadratisch

mit der Drehzahl wachsende Anteil muss der Luftreibung zugeordnet werden, weil die Lagerreibung höchstens proportional mit der Drehzahl wachsen kann. (Hystereseverluste erzeugen ein drehzahlunabhängiges Bremsmoment, Wirbelströme nehmen proportional mit der Drehzahl zu [Traxler 85] ⁹.) Bei 60'000 U/min ist die Luftreibung dominierend und erzeugt 440W Reibungsverluste. Ein Vergleich mit der Literatur [Mack 67] bestätigt, dass beim verwendeten Rotor so hohe Luftreibungsverluste zu erwarten sind. Eine genaue Berechnung dieser Verluste ist schwierig. Sie steigen nicht exakt quadratisch mit der Drehzahl, sondern etwas weniger, abhängig von verschiedenen Parametern. Aus dem Auslaufversuch kann abgelesen werden, dass die Verluste etwa proportional mit $\Omega^{2.67}$ ansteigen. Das Bremsmoment steigt somit mit $\Omega^{1.67}$ an, d.h. deutlich weniger als quadratisch.

Bei tiefen Drehzahlen werden die Luftreibungsverluste sehr klein. Bei Magnetlagern ohne homopolare Magnetanordnung sind dann die Ummagnetisierungsverluste (Hysteresese und Wirbelströme) des Lagers sichtbar [Traxler 85]. Diese Verluste sind im Auslaufversuch von Fig. 6.16 nicht erkennbar. Sie sind zu klein und verschwinden neben der Luftreibung. Um diese Verluste zu bestimmen wäre ein Auslaufversuch im Vakuum nötig .

6.7.3 Antriebsverluste

Der Antrieb überwindet das Reibungsmoment des Rotors. Bei 60'000 U/min muss er 440W mechanische Leistung abgeben. Dazu benötigt der Wechselrichter 550W elektrische Leistung. (Der Wirkungsgrad könnte noch optimiert werden.) Für den Antrieb des Rotors wird ein Asynchronmotor eingesetzt. Der Kurzschlussläufer wird mit einer auf den Rotor aufgeschraubten Aluminiumhülse realisiert. Auf diese Weise wird die notwendige Festigkeit für die hohe Drehzahl erreicht.

Anstelle des Asynchronmotors könnte auch ein Synchronmotor eingesetzt werden. Dann müssten Permanentmagnete auf dem Rotor befestigt werden, was einen zusätzlichen Aufwand bedeutet. Ausserdem wäre der Wirkungsgrad nicht höher, weil der Antrieb für das Beschleunigen über eine grosse Leistungsreserve verfügen muss. Beim Asynchronmotor kann die Rotordurchflutung nach der Beschleunigungsphase reduziert werden, beim Synchronmotor hingegen ist die Rotordurchflutung konstant und die Ummagnetisierungsverluste im Stator wären gross.

⁹ Wenn berücksichtigt wird, dass durch die Wirbelströme bei hohen Drehzahlen die Feldverteilung ändert, ergeben sich geringere Wirbelstromverluste. Das Bremsmoment der Wirbelstromverluste steigt dann sogar weniger als proportional mit der Drehzahl.

Das ganze System braucht mit der Lagerung etwa 600W elektrische Leistung. Diese Leistung wird vollständig in Wärme umgesetzt, wobei die Luftreibung den grössten Anteil ausmacht. Während der Beschleunigungsphase ist der Stromverbrauch deutlich höher. Die in der Rotordrehung gespeicherte kinetische Energie wird beim Abbremsen wieder frei und steht als elektrische Energie zur Verfügung.

Die kinetische Energie im Rotor beträgt $E = I_z \cdot \Omega^2 / 2$. Bei 60'000 U/min ergibt das 18 kW. Wenn der Antrieb den Rotor mit durchschnittlich 1 kW beschleunigen kann, dauert die Beschleunigungsphase 18 Sekunden.

6.8 Fazit

Der Rotor ist sehr steif und wird als starrer Körper behandelt. Für die Reglerauslegung muss zuerst ein gutes Modell bestimmt werden. Dies wird mit einer Messung der Übertragungsmatrix erreicht.

Der entworfene Regler verwendet eine drehzahlabhängige Koordinatendrehung, um die Kreiseffekte zu kompensieren.

Die Softwarestruktur (Regler-Programm mit Überwachung usw.) ist auf hohe Betriebssicherheit optimiert, und es wird eine geeignete Entwicklungsumgebung aufgebaut.

Die Unwuchtkompensation lässt die Unwuchtkräfte verschwinden. Am Gehäuse sind deshalb keine Vibrationen spürbar. Es sind nur die Luftwirbel hörbar. Diese Luft wird wegen der Luftreibung sehr heiss und muss mit einer geeigneten Belüftung abgeführt werden. Die anderen Verluste sind gering.

7. Anlage mit mehreren Rotoren

Bisher wurde nur eine einzige Spinnstelle betrachtet (Fig. 7.1). In einer Spinnmaschine arbeiten jedoch über hundert Rotoren nebeneinander. Jeder dieser Rotoren muss mit einer Magnetlagerung ausgestattet werden. Das Zusammenspiel dieser Lager in der Anlage wirft zusätzliche Fragen auf.

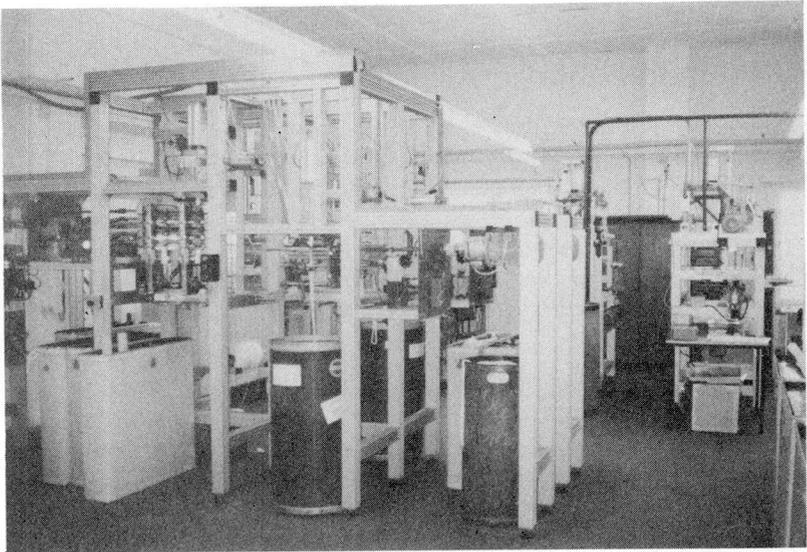


Fig. 7.1 Versuchsanlage mit magnetgelagerter Spindel bei der Firma CSM in Chemnitz, Deutschland

7.1 Speisung

Die einzelnen Spinnstellen werden mit einem 50V Gleichstrombus gespeist. Um das Notstromkonzept nicht zu gefährden, wird die 5V-Speisung für den μC lokal mit einem DC-DC-Wandler aus den 50V gewonnen. Somit ist jede Spinnstelle bei einem Stromausfall autonom und kann die benötigten Speisespannungen selbst erzeugen.

7.2 Antrieb

Es werden nicht alle Rotoren gleichzeitig beschleunigt, weil sonst der Stromverbrauch der ganzen Anlage zu hohe Spitzenwerte erreichen würde. Das Beschleunigen und Bremsen der Rotoren wird gestaffelt durchgeführt. Die freiwerdende Energie beim Abbremsen einer einzelnen Spindel wird über den Gleichstrombus an die anderen Spindeln verteilt und kann zum Beschleunigen eines anderen Rotors verwendet werden.

Für den Fall, dass alle Rotoren gleichzeitig abgebremst werden sollen, muss ein gemeinsamer Bremswiderstand eingebaut werden. Bei den einzelnen Spinnstellen sind keine lokalen Bremswiderstände nötig.

7.3 Kommunikation

Die Anlage besitzt einen zentralen Steuerrechner. Diese Anlagensteuerung überwacht die Spinnstellen, gibt die Drehzahlen vor und liest bei einem allfälligen Defekt einer Spinnstelle die Fehlermeldungen aus. Dazu wird der serielle Bus verwendet. In diesem Bussystem kommunizieren alle Spinnstellen ausschliesslich mit der Anlagensteuerung. Die Anlagensteuerung ist der 'Master', die Spinnstellen sind die 'Slaves'. Es wird dieselbe Schnittstelle wie für das Entwicklungssystem verwendet. Dadurch kann auch vom Entwicklungssystem aus über den Bus auf jede Spinnstelle zugegriffen werden.

Das Übertragungsprotokoll für den seriellen Bus kann einfach gehalten werden, weil kein 'Multi-Master'-Protokoll notwendig ist. Es gibt somit auch keine Probleme mit Kollisionen auf dem Bus, und es können kurze Antwortzeiten garantiert werden.

Das Bussystem wird von den Spindeln überwacht. Jede Spinnstelle hat einen 'Watchdog', der von der Anlagensteuerung zyklisch bedient wird. Wenn der Bus oder die Anlagensteuerung ausfallen, werden die Rotoren abgebremst.

7.4 Fazit

Jede Spindel hat ihre eigene Notstromversorgung. Die Regelung, die Überwachung und der Antrieb sind dezentral. Die Spindeln werden über einen seriellen Bus mit der Anlagensteuerung verbunden. Dadurch kann der Verdrahtungsaufwand klein gehalten werden.

8. Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden viele Ideen aus den verschiedensten Bereichen zusammengetragen. Dabei sind einige Fragen offen geblieben, die noch weiter untersucht werden könnten.

In Kapitel 2 Abschnitt 3 wird die Kombination von Beschleunigungs- und Positionssensoren vorgeschlagen. Mit dem Beschleunigungssensor werden die Gehäusevibrationen erfasst und daraus die Position des Rotors in einem raumfesten Bezugssystem bestimmt. Es wäre dann möglich, den Rotor unabhängig vom Gehäuse zu regeln oder Gehäusevibrationen zu dämpfen. Es ist zu untersuchen, in welchen Fällen sich dieser zusätzliche Aufwand lohnt und welche neuen regelungstechnischen Möglichkeiten eine solche Anordnung ergibt.

In Kapitel 3 Abschnitt 2 wird im Zusammenhang mit der Spannungssteuerung die Möglichkeit erwähnt, die Regelstrecke als SIMO-System zu betrachten, d.h. der Eingang der Strecke ist die Spulenspannung, und die Ausgänge sind der Spulenstrom und die Rotorposition. Auf diese Weise werden bessere Regelungen möglich, weil zwei Zustandsgrößen der Regelstrecke direkt gemessen werden. Auch hier stellt sich die Frage, ob sich der zusätzliche Aufwand lohnen würde. Wie viel besser würde das Regelverhalten und wie soll ein entsprechender Regler ausgelegt werden? ¹

Ein weiterer offener Punkt in Bezug auf die Regelung von Magnetlagern ist das in Kapitel 6 aufgetauchte Problem der passiven Regelung bei Spannungssteuerung. Mit welcher Methode kann ein digitaler Regler gefunden werden, der zu einer passiven Lagerung führt? Der Rotor könnte dann durch die gyroskopischen Kräfte nicht mehr destabilisiert werden.

Das in dieser Arbeit gefundene neue Konzept für hochintegrierte Magnetlager ermöglicht den Bau von sehr kompakten Lagern. Es stellt sich die Frage, wie weit die Integration der Magnetlagerelektronik getrieben werden kann. Mit kundenspezifischen integrierten Schaltungen (ASICs) kann die Integration sehr weitgehend sein: Da zwischen Sensorik, Rechner und Verstärker nur wenig Verbindungsleitungen nötig sind, ist eine Lösung mit

¹ Es gibt diverse Varianten. Es kann eine Zustandsregelung mit Beobachter oder mit reduziertem Beobachter verwendet werden. Die optimale Auslegung eines Beobachters ist schwierig, weil meistens kein gutes Modell für die Störungen und die Parametervariationen verfügbar ist. Vielleicht gibt es auch gute Lösungen mit Kaskadenregelung, die von der sonst üblichen Kaskadenregelung mit unterlagertem Stromregler (Stromsteuerung) abweichen.

drei Bausteinen sinnvoll. Für die Sensorelektronik kann ein analoges ASIC hergestellt werden, und die Leistungsverstärker können beispielsweise als Hybridschaltung aufgebaut werden. Die Integration der ganzen Elektronik auf einem einzigen Chip ist beim heutigen Stand der Technik kaum möglich. Es müssten die analoge Schaltung der Sensorik, der Rechner und der Leistungsverstärker mit dem gleichen Herstellungsprozess realisiert werden, was sehr problematisch ist. Die Chipfläche würde zu gross, und die Ausbeute bei der Herstellung wäre zu gering.

Im Zusammenhang mit der Integration der Elektronik ist auch der Abgleich der Sensorik ein wichtiger Punkt. Entweder müssen die Potentiometer² in der Produktion mit einem Automaten mechanisch abgeglichen werden, oder es werden digitale Potentiometer eingesetzt, die direkt vom μC selbst eingestellt werden können. Es ist ein analoges ASIC in Entwicklung, welches die gesamte Sensorsignalverarbeitung und die digitalen Potentiometer (D/A-Wandler) enthält.

Fragen zu Produktionstechnik treten natürlich nicht nur beim Abgleich auf, sondern hauptsächlich bei der mechanischen Konstruktion. Wie muss das Lager aufgebaut werden, damit die Produktion einfach wird, sich Toleranzen wenig auswirken und später, bei der Entsorgung, die Auftrennung in die verschiedenen Rohstoffe einfach möglich ist.

Die Energiebilanz (Abschnitt 6.8) zeigt, dass die Luftreibungsverluste dominierend sind. Diese Verluste hängen von der Rotorgeometrie ab und könnten reduziert werden. Eine wesentliche Reduktion der Luftreibungsverluste lässt sich jedoch nur erreichen, wenn der Rotor unter Vakuum gesetzt wird.

Das Konzept der Speisung mit 50V (Kapitel 7) führt zu recht hohen Strömen in der Versorgung. Mit einer höheren Speisespannung könnte dieses Problem behoben werden.

² Potentiometer = verstellbarer Widerstand. Alternativ könnten auch Chipwiderstände eingesetzt werden, welche mit einem Laser abgeglichen werden.

9. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden zuerst verschiedene Konzepte für aktive Magnetlager gesucht. Dabei wurde insbesondere nach Varianten Ausschau gehalten, welche einen einfachen Aufbau der Elektronik zulassen und für den Bau eines hochintegrierten Magnetlagers gut geeignet sind. Dies führte zum Konzept mit der gemeinsamen Stromquelle (Kapitel 4). Es wurden aber auch einige Varianten gezeigt, welche für andere Anforderungen interessant sind.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde eine spezielle magnetgelagerte hochtourige Spindel für 60'000 U/min gebaut. Der Rotor wird in allen fünf Achsen aktiv magnetisch gelagert. Die technischen Anforderungen (Kapitel 5), insbesondere die Forderungen bezüglich Kosten, Energieverbrauch und Eignung zur Massenproduktion können dank dem in dieser Arbeit gefundenen Konzept eingehalten werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein auf Magnetlager spezialisiertes Sensorsystem entwickelt (ECS6, Kap. 2.3.1). Neben dieser Sensor-Karte wurde auch eine Rechnerkarte mit dem Mikrokontroller (μC) und eine Karte für die Leistungsverstärker aufgebaut.

Besondere Aufmerksamkeit wurde der Programmierung des Mikrokontrollers geschenkt (Kapitel 6). Neben dem eigentlichen Regler wurde unter anderem eine Entwicklungsumgebung mit direkter Verbindung zu MATLAB aufgebaut. Dies ermöglichte die Identifikation der Regelstrecke (Modellbildung). Im weiteren besteht die Software aus einem aufwendigen Überwachungsteil und aus der automatischen Unwuchtkompensation. Dank dieser Unwuchtkompensation ist ein mechanisches Auswuchten des Rotors nicht nötig.

9.1 Gelöste Probleme

Da im gewählten μC die A/D-Wandler für die Sensorsignale und die Pulsweitenmodulatoren für die Leistungsschalter enthalten sind, werden nur wenige zusätzliche Bauteile für das komplette Magnetlager gebraucht. Der Grund für die Einfachheit des gefundenen Konzepts liegt in der direkten Ansteuerung der Leistungsschalter vom μC aus. Der Leistungsverstärker besteht praktisch nur noch aus den Leistungsschaltern. Dadurch sind einige Probleme entstanden, die gelöst werden mussten.

Das erste Problem war die Vormagnetisierung. Sie muss auf einen konstanten Wert eingestellt werden können. Bei Spannungssteuerung wird

dies üblicherweise mit Vormagnetisierungsreglern erreicht, was einen erheblichen zusätzlichen Aufwand bedeutet.

Mit der Verwendung von sechs anstelle der sonst üblichen zehn Spulen gibt es nur noch eine einzige Vormagnetisierung, die konstant gehalten werden muss. Die restlichen fünf der sechs elektrischen Freiheitsgrade werden für die Positionsregelung des Rotors in seinen fünf Achsen verwendet. (Der sechste Freiheitsgrad des starren Rotors ist die Rotation, welche vom Antrieb geregelt wird.) Die Vormagnetisierung konnte daher mit der gemeinsamen Stromquelle eingestellt werden. Es ergab sich eine Einsparung von vier Spulen. Es werden jetzt weniger Verbindungsleitungen zur Elektronik benötigt, und der Leistungsverstärker braucht nur sechs Kanäle.

Die Leistungsschalter können direkt mit dem μC angesteuert werden. Aufgrund der gemessenen Spannung im Zwischenkreis bestimmt der μC die nötige Pulsweite, um die vom Positionsregler geforderte Spulenspannung einzuhalten. Auf diese Weise kann auf die Strommessung verzichtet werden. Die gemeinsame Stromquelle sorgt für die Strombegrenzung für den Fall, dass der Rotor abstürzt¹. Um die Wirbelstromverluste im magnetischen Kreis und um den Stromrippel in den Spulen gering zu halten, werden Stromquelle und Verstärker 180° phasenversetzt synchronisiert.

Durch die Verwendung der Spannungssteuerung ergaben sich regelungstechnische Probleme, weil die Ordnung der Regelstrecke ansteigt. Dadurch war die Inbetriebnahme mit einigem Aufwand verbunden (6.1 und 6.2). Bei hohen Drehzahlen wirken sich die gyroskopischen Effekte stärker und qualitativ anders aus als bei stromgesteuerten Magnetlagern, weil sich spannungsgesteuerte Lager im allgemeinen nicht passiv verhalten; sie lassen sich nicht als Feder-Dämpfer Kombination behandeln. Dies musste in der Regelung berücksichtigt werden.

9.2 Fazit

Das gewählte Konzept für das hochintegrierte Magnetlagersystem eignet sich besonders für kleine Rotoren, wo die Kosten der Elektronik überwiegen. Der Energieverbrauch für die magnetische Lagerung kann tief gehalten werden und die Lagerreibung ist dank der homopolaren Anordnung der Magnete vernachlässigbar.

¹ Solange der Rotor schwebt, arbeitet der Positionsregelkreis und die Ströme bewegen sich im vorgesehenen Bereich. Die Strombegrenzung ist nur dann nötig, wenn der Rotor nicht schwebt.

Anhang

1. Vorfilter für die Frequenzgangkompensation bei einem geschalteten Verstärker.

Wenn bei einem stromgesteuerten Verstärker die interne Stromregelung langsam ist, wird das Übertragungsverhalten des Verstärkers langsamer. Hier wird gezeigt, welchen Einfluss der Stromregler auf das Magnetlager hat.

1.1 Das Führungsverhalten

Es wird hier gezeigt, dass der Einfluss des unterlagerten Stromreglers auf das Führungsverhalten mit einem Vorfilter am Verstärkereingang kompensiert werden kann. Es wird ein lineares Modell mit einem Eingang und einem Ausgang verwendet (SISO-Modell). Das Modell wird sehr allgemein gehalten, sodass es auch bei Lagern mit Wirbelströmen, Wicklungswiderstand, Streufluss, endlicher Permeabilität des Eisens und bei elastischen Rotoren gilt.

Voraussetzungen:

Die Übertragungsfunktion des Verstärkers ohne Vorfilter ist stabil (siehe Fig. 2.3)

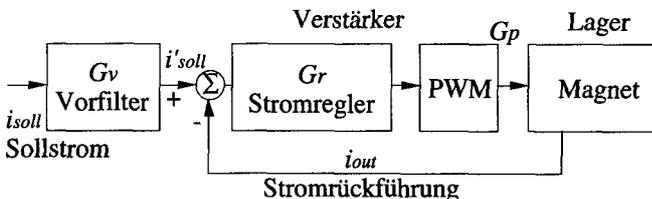


Fig. 2.3 Geschalteter Verstärker mit Stromregelkreis und Vorfilter

$$G'_{verst} = \frac{i_{out}}{i'_{soll}} = \frac{G_r \cdot G_p}{1 + G_r \cdot G_p} \quad , \text{ stabil} \quad (40)$$

Der Stromregler G_r hat keine Nullstellen in der rechten Halbebene, d.h. er ist minimalphasig.

Herleitung:

Zuerst werden die Übertragungsfunktionen als Polynombrüche geschrieben.

$$G_r = \frac{B}{A}, \text{ Nullstellen von } B \text{ in der linken Halbebene} \quad (41)$$

$$G_p = \frac{D}{C} = \frac{D_n \cdot D_p}{C} \quad (42)$$

Die Übertragungsfunktion G_p (Pulsweitenmodulator, Leistungsschalter und Lagermagnet) beinhaltet Totzeiten und ist deshalb nicht minimalphasig. Das Zählerpolynom D wird nun in zwei Polynome aufgeteilt. D_n beinhaltet alle Nullstellen mit negativem Realteil (minimalphasige Komponente) und D_p beinhaltet alle Nullstellen mit positiven Realteil (nicht minimalphasige Komponente).

Daraus ergibt sich für die Übertragungsfunktion des Verstärkers ohne Vorfilter:

$$(40, 41, 42) \quad G'_{verst} = \frac{i_{out}}{i'_{soll}} = \frac{B \cdot D_n \cdot D_p}{A \cdot C + B \cdot D} \quad (43)$$

Mit einem Hilfspolynom H kann diese Übertragungsfunktion in einen minimalphasigen und einen nichtminimalphasigen Teil aufgespalten werden.

$$(43) \quad G'_{verst} = \frac{i_{out}}{i'_{soll}} = G_{vn} \cdot G_{vp} \quad (44)$$

$$G_{vn} = \frac{B \cdot D_n \cdot H}{A \cdot C + B \cdot D} \quad (45)$$

$$G_{vp} = \frac{D_p}{H} \quad (46)$$

Die Nullstellen des Hilfspolynoms H werden in der linken Halbebene so gewählt, dass G_{vp} ein reiner Allpass mit flachem Amplitudengang ist. G_{vn} ist dann eine stabile, minimalphasige Übertragungsfunktion.

Mit dem Vorfilter G_v kann nun dieser minimalphasige Anteil kompensiert werden, indem

$$G_v = \frac{i'_{soll}}{i_{soll}} = \frac{1}{G_{vn}} \quad (47)$$

eingesetzt wird. Die resultierende Übertragungsfunktion des Verstärkers (mit Vorfilter) ist nun:

$$(44, 47, 46) \quad G_{verst} = G'_{verst} \cdot G_v = G_{vp} = \frac{D_p}{H}. \quad (48)$$

Die Übertragungsfunktion des Verstärkers hängt somit nur von D_p bzw. G_p ab. Sie ist vom Stromregler unabhängig, solange der Stromregler selbst minimalphasig ist und ein entsprechendes Vorfilter eingesetzt wird!

1.2 Das Störverhalten

Das Führungsverhalten des Verstärkers ist unabhängig vom Stromregler, weil ein entsprechendes Vorfilter eingesetzt wird. Das Verhalten des Systems gegenüber einer äusseren Störkraft ist jedoch trotz Vorfilter abhängig vom unterlagerten Stromregler. Um diesen Effekt zu berechnen, wird ein lineares Modell der Regelstrecke mit einem Eingang und einem Ausgang verwendet (SISO-Modell). Der Wicklungswiderstand und der Streufluss werden nicht berücksichtigt. Das Modell gilt für Lager mit Wirbelströmen und endlicher Permeabilität des Eisens. Elastische Rotoren werden ebenfalls berücksichtigt.

Da die Bewegung des Rotors in den Lagermagneten eine Spannung induziert, gibt es Rückwirkungen vom Rotor auf den Verstärker. Es wird untersucht, wie sich die Störungsübertragungsfunktion (Störkraft zu Rotorposition) ändert, wenn ein Verstärker mit Vorfilter und langsamem Stromregler eingesetzt wird. Dazu wird die Regelstrecke des Magnetlagers gemäss (Fig. 2.4) betrachtet.

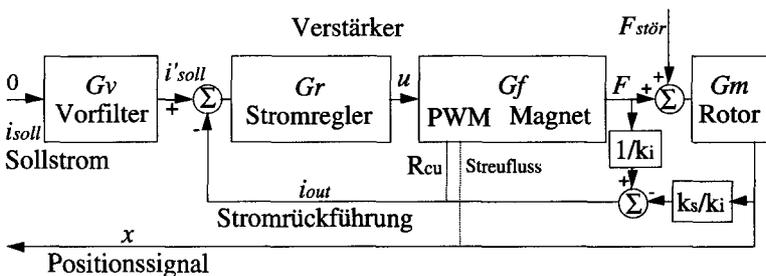


Fig. 2.4 offene Regelstrecke des Magnetlagers (siehe Kapitel 2.2.5): Stromgesteuerter Verstärker mit Vorfilter G_v , Stromregler G_r und Last bestehend aus Magnet und Rotorsystem G_m .

Diese linearisierte Darstellung ergibt sich aus folgenden Zusammenhängen:

$$(1) \quad F = k_s \cdot x + k_i \cdot i_{out} \Rightarrow i_{out} = F \cdot \frac{1}{k_i} - x \cdot \frac{k_s}{k_i} \quad (49)$$

$$(2) \quad x = (F + F_{stör}) \cdot G_m \quad (50)$$

Wenn der Innenwiderstand des Lagermagneten (Wicklungswiderstand R_{cu}) und der Streufluss vernachlässigt werden, ist die Kraft F ausschliesslich von der Pulsweite des Modulators abhängig.

$$F = \frac{\Phi^2}{A \cdot \mu_0} \quad \text{Annahme: Feld im Luftspalt homogen.} \quad (51)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{u}{N} \quad (52)$$

Die Magnetkraft hängt deshalb nur vom Ausgang des Stromreglers G_r ab. Mit der entsprechenden Übertragungsfunktion G_f kann diese Kraft bestimmt werden.

Für die Störungsübertragungsfunktion gemäss (Fig. 2.4) ergibt sich nacheinander:

$$G_{stör} = \frac{x}{F_{stör}} \Big|_{i_{soll}=0} = \frac{G_m \cdot \left(1 + \frac{1}{k_i} \cdot G_r \cdot G_f \right)}{1 + G_r \cdot G_f \cdot \left(\frac{1}{k_i} - G_m \cdot \frac{k_s}{k_i} \right)} \quad (53)$$

$$G_{stör} = \frac{G_m}{G_r \cdot G_f \cdot \frac{1}{k_i} - \frac{1}{1 + G_r \cdot G_f \cdot \frac{1}{k_i}} \cdot G_m \cdot k_s} \quad (54)$$

$$G_{stör} = \frac{G_m}{1 - G'_{verst} \cdot G_m \cdot k_s}, \quad (55)$$

$$\text{wobei} \quad G'_{verst} = \frac{G_r \cdot G_f \cdot \frac{1}{k_i}}{1 + G_r \cdot G_f \cdot \frac{1}{k_i}} = \frac{i_{out}}{i'_{soll}} \Big|_{x=0} \quad (56)$$

Die Störungsübertragungsfunktion hängt von G'_{verst} und somit vom Stromregler ab. Das Störverhalten kann mit dem Stromregler vorteilhaft beeinflusst werden. Am Beispiel des langsamen Stromreglers ($G_r \rightarrow 0$) kann das leicht gezeigt werden: Für $G_r \rightarrow 0$ geht $G_{stör} \rightarrow G_m$ (Gleichungen 56, 55). Die destabilisierende Wirkung des Magnetlagers (k_s) verschwindet!

Jeder Stromregler hat eine obere Grenzfrequenz. Oberhalb dieser Frequenz geht seine Verstärkung gegen Null zurück ($G_r \rightarrow 0$), d.h. die negative Steifigkeit k_s nimmt oberhalb dieser Grenzfrequenz ab. In Bezug auf die

Regelung (Abschnitt 6.3) bedeutet dies, dass Passivität im Fall der Stromsteuerung mit einem realen, bandbegrenzten PD-Regler erreichbar ist, wenn der Stromregler entsprechend ausgelegt wird.

2. Elektrisches Modell

Das Modell für einen Lagermagneten (elektrisches Modell) kann mit Hilfe von statischen Kraftmessungen bestimmt werden. Wenn die Kopplung der Lagerebenen vernachlässigt wird, können die Lagerkonstanten k_i und k_s für jede Achse separat ausgemessen und angegeben werden (Fig. 10.1).

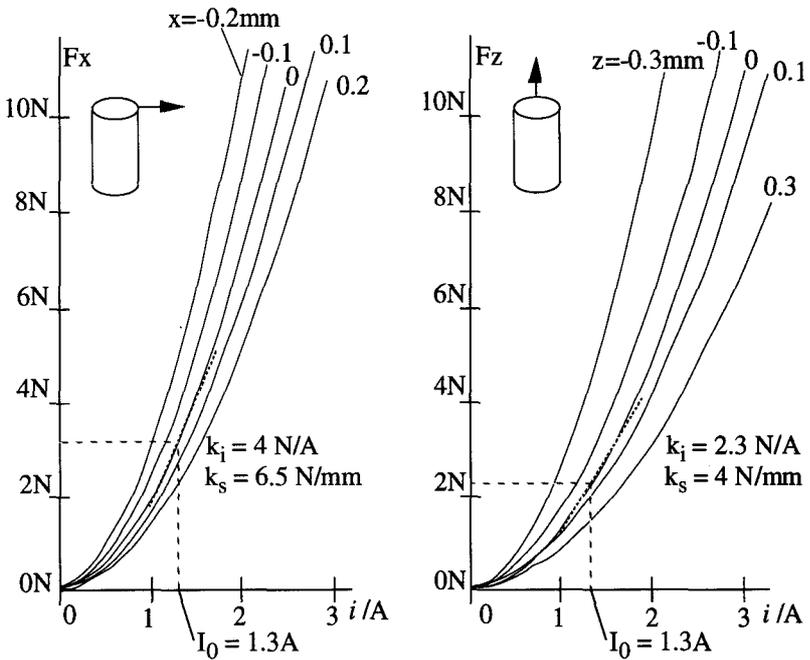


Fig. 10.1 Links: Statische Kraftmessung in radialer Richtung bei verschiedenen radialen Verschiebungen ohne axiale Verschiebung.
Rechts: Statische Kraftmessung in axialer Richtung bei verschiedenen axialen Verschiebungen ohne radiale Verschiebung.

Allerdings können bei diesem Vorgehen Wirbelströme nicht erfasst werden. Bei einem Lager ohne Blechung (massiv) sind grobe Modellfehler zu erwarten. Ausserdem müsste die Hysterese im magnetischen Kreis berücksichtigt werden (Fig. 10.2).

Auch die Kopplungen zwischen den Achsen sind recht gross (Fig. 10.3). Eine weitere Schwierigkeit ist, dass bei Spannungssteuerung die beiden Parameter k_i und k_s für die Modellbildung nicht ausreichen.

Es ist deshalb nicht gelungen, aufgrund dieses Modells einen stabilisierenden Regler für Spannungssteuerung zu finden. Für eine stromgesteuerte Regelung hingegen ist das Modell ausreichend.

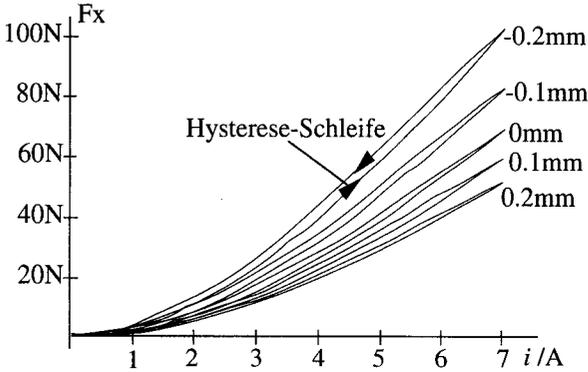


Fig. 10.2 Hysteresis-Schleife, radiale Richtung

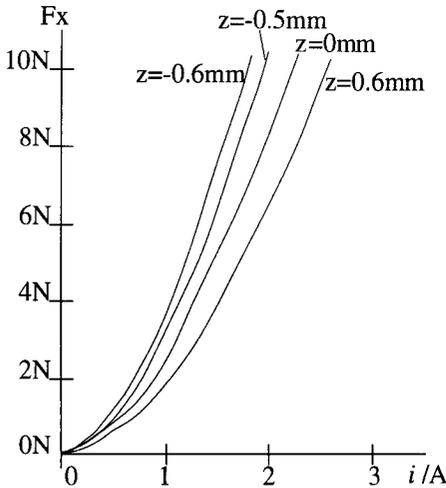


Fig. 10.3 Kopplungen zwischen den Achsen. Die Kraft-Stromkennlinie in radialer Richtung (x) ist abhängig von der Position in axialer Richtung (z).

Literaturverzeichnis

- [Allaire 92] P. Allaire (ed.): Proc. 3rd Internat. Symposium on Magnetic Bearings, University of Virginia, 1992
- [Anderson 73] B. Anderson, S. Vongpanitlerd: Network Analysis and Synthesis. A Modern Systems Theory Approach. Prentice-Hall, 1973
- [Berlin 94] Berliner Kreis: Aktionsprogramm zur Initialisierung des Veränderungsprozesses. Wissenschaftliches Forum für Produktentwicklung, Technische Universität Berlin, Mai 1994
- [Bichsel 90] J. Bichsel: Beiträge zum lagerlosen Elektromotor. Diss. Nr. 9303, ETH Zürich, 1990
- [Boden 88] K. Boden: Wide-Gap, Electro-Permanentmagnetic Bearing System with Radial Transmission of Radial and Axial Forces. Proc. First International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zürich 1988
- [Brandenberger/Kaiser 94] M. Brandenberger, Th. Kaiser: Robustheit von magnetgelagerten Rotoren bezüglich gyroskopischen Effekten. Diplomarbeit, ICMB, ETH Zürich, 1994
- [Braunbek 39] W. Braunbek: Frei schwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld. Zeitschrift für Physik, Band 112, ss. 735-763, 1939
- [Bühler 93] P. Bühler: Wirbelstromsensor für Magnetlager. Interner Bericht, ICMB, ETH Zürich, 1993
- [Bühler 94] P. Bühler, R. Siegwart, A. Traxler: Magnetlager. Patentanmeldung Schweiz Nr. 01 615/94-0, Mai 1994
- [Bühler 95] P. Bühler: Identifikation eines Magnetlagers für drehende Rotoren. Interner Bericht, ICMB, ETH Zürich, 1995
- [Cerruti 94] F. Cerruti, C. Delprete, G. Gent, S. Carabelli: High Efficiency and Low Cost Power Amplifiers and Transducers for Magnetic Bearings. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich 1994

- [Chiba 94] A. Chiba, T. Fukao: The Maximum Radial Force of Induction Machine Type Bearingless Motor Using Finite Element Analysis. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich 1994
- [Diez 93] D. Diez: Entwurfs-Software für Mechatronikprodukte mit Sicherheitsanforderungen – Beispiel Magnetlager-system. Diss. Nr. 10029, ETH Zürich, 1993
- [Dubbel 90] Hrsg. von W. Beiz und K.-H. Küttner: Taschenbuch für den Maschinenbau / Dubbel. 17. Auflage, Springer Verlag, 1990
- [Fenn 91] R.C. Fenn: A Six Degree-of-Freedom Lorentz Force Vibration Isolator with Nonlinear Controls. Int. Symp. on Magnetic Suspension Technology, Nasa, 1992
- [Fukata 92] S. Fukata, Y. Kouya: Dynamics of Active Magnetic Bearings with Magnet Cores in the Shape of a Cone. Proc. 3th International Symposium on Magnetic Bearings, Virginia 1992
- [Fukata 94] S. Fukata, S. Matsuoka: Control Systems and Dynamics of Cone-Shaped Magnetic Bearings Actuated by Five Electromagnets. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich 1994
- [Herzog 91] R. Herzog: Ein Beitrag zur Regelung von magnet-gelagerten Systemen mittels positiv reeller Funktionen und H^∞ -Optimierung. Diss. Nr. 9399, ETH Zürich, 1991
- [Herzog 94] R. Herzog: Active Versus Passive Vibration Absorbers. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 116, pp. 367-371, Sept 1994
- [Herzog 95] R. Herzog, P. Bühler, C. Gähler, R. Larsonneur: Unbalance Compensation using Generalized Notch Filters in the Multivariable Feedback of Magnetic Bearings. erscheint demnächst
- [Higuchi 88] T. Higuchi: Applications of Magnetic Bearings in Robotics. Proc. First International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zürich 1988
- [Holtz 92] J. Holtz: Pulsewidth Modulation - A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 5, december 1992

- [Holzmann 91] G. Holzmann: Design and Validation of Computer Protocols. Prentice-Hall Internat., 1991
- [Jeong 94] H. Jeong, C. Kim, C. Lee: Modeling and Control of Cone-Shaped Active Magnetic Bearing System. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich 1994
- [Kappraff 91] J. Kappraff: Connections: the geometric bridge between art and science, McGraw-Hill Inc., New Jersey Institute of Technology, 1991
- [Knight 94] J. Knight, Th. Walsh, L. Virgin: Dynamic Analysis of a Magnetic Bearing System with Flux Control. Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Duke University, Durham, NC, 1994
- [Larsonneur 94] R. Larsonneur, R. Herzog: Feedforward Compensation of Unbalance: New Results and Application Experiences. IUTAM Symposium On the Active Control of Vibration, Bath UK, 1994
- [Lotzkat 91] W. Lotzkat: Aufwandarme und netzausfallsichere Frequenzumrichter zur parameterunempfindlichen Regelung von Asynchronmaschinen für industrielle Standardantriebe. Diss. Bergische Universität-GH Wuppertal, 1991
- [Mack 67] M. Mack: Luftreibungsverluste bei elektrischen Maschinen kleiner Baugröße, Diss. TH Stuttgart, 1967
- [Mecos 92] Matlab-Interface für TMS 320C25. Mecos Traxler AG, Winterthur, 1992
- [Miller 87] T.J.E. Miller: Brushless Reluctance Motor Drives. IEE Power Engineering Journal, Vol. 1, pp.325-331, Nov 1987
- [Moon 94] F.C. Moon: Progress in Superconducting Magnetic Bearings. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich 1994
- [Müller 77] P.C. Müller: Stabilität und Matrizen. Matrizenverfahren in der Stabilitätstheorie linearer dynamischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1977

- [Sandercock 87] J. R. Sandercock: A Dynamic Antivibration System, RCA, SPIE Vol. 732 Vibration Control in Optics and Metrology, 1987
- [Schöb 93] R. Schöb: Beiträge zur lagerlosen Asynchronmaschine. Diss. Nr. 10417, ETH Zürich, 1993
- [Schweitzer 93] G. Schweitzer, A. Traxler, H. Bleuler: Magnetlager. Grundlagen, Eigenschaften und Anwendungen berührungsfreier, elektromagnetischer Lager. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1993
- [Schweitzer 94] G. Schweitzer, R. Siegwart, R. Herzog (eds.): Proc. Fourth Internat. Symposium on Magnetic Bearings, vdf, ETH Zürich, 1994
- [Siegwart 89] R. Siegwart: Aktive magnetische Lagerung einer Hochleistungs-Frässpindel mit digitaler Regelung. Diss. Nr. 8962, ETH Zürich, 1989
- [Siegwart 94] R. Siegwart, P. Bühler, D. Baumann, R. Neubauer: Eddy Current Bearings for Micro-Structure Levitation. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich 1994
- [Stemmler 64] A. Schönung, H. Stemmler: Frequenzumformung. Brown Boveri Mitteilungen, Nr. 8/9, Baden, 1964
- [Stoll 74] R. L. Stoll: The analysis of eddy currents. Clarendon Press, Oxford 1974
- [Svensson 88] T. Svensson: On Modulation and Control of Electronic Power Convertors. Diss., Chalmers University of Technology, Göteborg, 1988
- [Traxler 84] A. Traxler, G. Schweitzer: Measurement of the Force Characteristics of a Contactless Electromagnetic Rotor Bearing. 4th Symposium of the IMEKO Technical Committee on Measurement-Theory – TC 7, Bressanone, Italy, May 1984
- [Traxler 85] A. Traxler: Eigenschaften und Auslegung von berührungsfreien elektromagnetischen Lagern. Diss. ETH Nr. 7851, ETH Zürich, 1985
- [Truffer/Schenkel 94] P. Truffer, M. Schenkel: Datenübertragung für Magnetlager. Diplomarbeit, ICMB, ETH Zürich, 1994

- [Vischer 88] D. Vischer: Sensorlose und spannungsgesteuerte Magnetlager. Diss. Nr. 8665, ETH Zürich, 1988
- [Zhang 95] J. Zhang: IGBT Power Amplifiers for Active Magnetic Bearings of High Speed Milling Spindles, IECON'95, Orlando, Florida, Nov. 6-11, 1995
- [Zlatnik 90] D. Zlatnik, A. Traxler: Cost-Effective Implementation of AMB. Proc. 2nd Internat. Symposium on Magnetic Bearings, Tokyo, 1990

Lebenslauf

Ich wurde am 27. Januar 1967 in Affoltern am Albis geboren. Die Primarschule besuchte ich in Schlieren und Balzers (FL). Im Herbst 1986 schloss ich die Mittelschule in Sargans mit der Maturitätsprüfung Typus C ab.

Anschliessend studierte ich an der Abteilung für Elektrotechnik der ETH Zürich und wählte Schaltungstechnik und Elektronik als Vertiefungsfächer. Im Frühling 1991 schloss ich das Studium mit einer Diplomarbeit in Magnetlagertechnik ab.

Seither arbeite ich als Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter am International Center for Magnetic Bearings von Prof. G. Schweitzer, wo ich Studienarbeiten im Gebiet der Robotik, der Nanotechnik und der Magnetlagertechnik betreue und bei der Vorlesung "Wettbewerb beim Bau intelligenter Mechatronikprodukte" mithelfe. Seit Frühling 1992 beschäftige ich mich im Rahmen eines Industrieprojekts mit hochintegrierten Magnetlagern. Während dieser Zeit entstand die vorliegende Arbeit.