

NEUARTIGE VERFAHREN FÜR DIE MODELLIERUNG UND DIGITALE REGELUNG AKTIV MAGNETGELAGERTER SYSTEME

H. Stegemann, R. Hampel

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik

Hochschule Zittau/Görlitz (FH)

Theodor-Körner-Allee 16

02763 Zittau, Germany

Tel.: +493583611383, Fax: +493583611288

Email: H.Stegemann@HS-ZiGr.de, R.Hampel@HS-ZiGr.de

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund eines breiter werdenden Anwendungsspektrums für hochdynamische magnetgelagerte Maschinen spielt die effektive und kostengünstige Entwicklung der magnetischen Lagerung eine wesentliche Rolle. Hierbei ist vorrangig die Beherrschung der auftretenden Prozeßkräfte sicherzustellen.

Die Nichtlinearitäten in der Regelstrecke und deren Strukturinstabilität, stochastische Belastungen sowie die Echtzeitfähigkeit der Regelung erfordern den Einsatz innovativer Verfahren der Regelungstechnik. Durch die hier vorgestellte simulationsgestützte Methode wird der Entwurf optimaler Regelungen für Magnetlager erreicht. Als Regelungsverfahren kommen insbesondere eine Verbindung aus Fuzzy-Control und adaptiver Regelung sowie Linearisierungsverfahren zur Anwendung, die durch die modellgestützte Optimierung unter Verwendung des Simulationsprogramms *MLDyn* parametrisiert werden.

Zur technischen Realisierung der Regelverfahren bei gleichzeitiger Erfüllung der Geschwindigkeitsanforderungen an die digitale Regelung wird der neu entwickelte *High Speed Matrix Controller* eingesetzt. Dieser auf der Basis von Kennfeldern aufgebaute Regler ermöglicht die minimal mögliche Abarbeitungsgeschwindigkeit der Algorithmen und eine Kostensenkung gegenüber konventionellen DSP-Systemen.

Durch den Vergleich von Simulationsrechnungen und an Versuchsständen durchgeführten Experimenten wurden das Simulationsprogramm *MLDyn* verifiziert und die Einsatzfähigkeit der untersuchten Regelverfahren anhand der simulationsgestützten Entwurfsmethode nachgewiesen.

1 Einleitung

Aktive Magnetlager stellen aufgrund der Nichtlinearitäten sowie der Instabilität der Regelstrecke hohe Anforderungen an die Regelung der Rotorposition innerhalb der elektromagnetischen Spulen. Eine Erhöhung der Regelgüte wird nur über den Einsatz verbesserter, neuartiger Regelverfahren erreicht. Ziel ist es dabei, die Eigenschaften des Magnetlagersystems bei Lasttransienten, unterschiedlichen Drehzahlen und kritischen Betriebszuständen zu verbessern und Möglichkeiten zu finden, um den Entwicklungsaufwand zu minimieren.

Da der Reglerentwurf nur im Zusammenhang mit der Modellierung des Gesamtsystems erfolgen kann sind hierzu

theoretische Arbeiten zur Modellierung des Magnetlagerregelkreises,

die Entwicklung und Anwendung auf die Magnetlagerregelung abgestimmter Verfahren zur Regelauslegung,

Simulationsrechnungen zur Optimierung und zum Test der Algorithmen sowie

Experimente unter Betriebs- und Störbedingungen an Versuchsanlagen zur Validierung erforderlich.

2 Simulationsgestützte Methode zum Entwurf optimaler Regelungen für aktive Magnetlager

Die simulationsgestützte Methode zum Entwurf optimaler Regelungen für Magnetlager wird als iterativer Prozeß durch den in Bild 1 dargestellten Ablaufplan repräsentiert.

Ausgangspunkt für die Simulation des Magnetlagersystems ist die Modellierung der Regelkreiskomponenten. Diese Modelle sind in modularer Form im Simulationsprogramm *MLDyn* integriert, das eine Voraussetzung für den Off-line Test der Regelkreiskomponenten ist.

Mit Hilfe der Methode der modellgestützten Optimierung erfolgt die Einstellung der Reglerparameter für das ausgewählte Regelverfahren entsprechend dem zu erzielenden Prozeßverhalten (Führungs- und Störgrößenverhalten). Die Optimierung erfolgt unter Nutzung des an bestehenden Anlagen verifizierten Simulationsprogrammes *MLDyn*, das für die konkrete Applikation parametrisiert wird. Als Auswertekriterien zur Einschätzung und zum Vergleich der Regelgüte werden Standardkriterien verwendet.

Zum Nachweis der Einsatzfähigkeit der Algorithmen unter Betriebs- und Störsituationen sind die angewendeten Regelverfahren auf Hardwareplattformen zu implementieren und an Versuchsständen zu testen. Die technische Realisierung der Regelverfahren erfolgt mit dem neu entwickelten *High Speed Matrix Controller (HSMC)* - sh. Abschnitt 5.2 - oder mit Signalprozessorsystemen (DSP).

Der Vergleich von Simulation und Experiment dient zur Verifikation des Simulationssystems *MLDyn* und zum Nachweis der optimalen Regelung des Magnetlagers entsprechend den aufgestellten Gütekriterien.

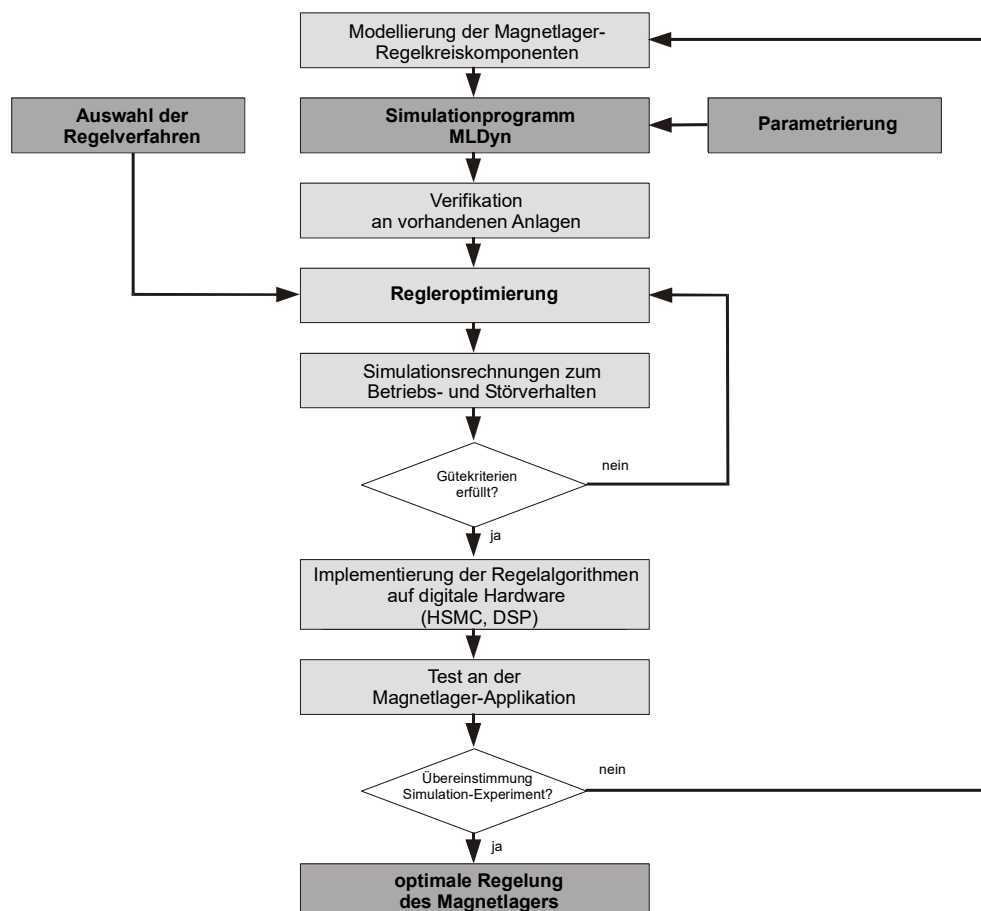


Bild 1: Methode zum Entwurf optimaler Regelungen für Magnetlager

3 Regelverfahren

3.1 Anforderungen an den Regler

Zur sicheren Beherrschung der Belastungen bei Normalbetrieb und gestörtem Betrieb ist es erforderlich robuste Regler für die Positionsregelung der Welle zu entwickeln. Dazu werden moderne Regelalgorithmen analysiert und den spezifischen Bedingungen der Magnetlager angepaßt.

Die Regelung der Rotorposition in Abhängigkeit von äußeren und inneren Störungen stellt hohe Anforderungen an die Regelalgorithmen. Ursachen dafür sind [1]:

die Strukturinstabilität der Regelstrecke

die nichtlineare Abhängigkeit der Magnetkraft vom Spulenstrom und der Rotorposition, besonders bei energiesparender Absenkung von Vormagnetisierungsströmen

die veränderliche Scherung der Magnetisierungskennlinie infolge der Rotorbewegung im Luftspalt

hohe Grenzfrequenzen

Daraus leiten sich folgende primäre Aufgaben des Reglers ab:

Lagestabilisierung des Rotors

Realisierung der Positioniergenauigkeit

schnelle Reaktion auf Störungen durch äußere Kräfte und Unwuchten sowie auf Führungsgrößenänderungen

Beeinflussung von Steifigkeit und Dämpfung der Lagerung

Abhängig von der Applikation können weitere Anforderungen an den Regler gestellt werden, z.B.

Robustheit gegenüber Parameterschwankungen,

Energieoptimierung - minimale Stellenergie,

"kräftefreier" Lauf (Rotation der Welle um die Hauptträgheitsachse),

automatische Unwuchtkompensation.

Aufgrund der Nichtlinearitäten und der elektromagnetischen Lagerverluste im Regelkreis sind für die Lageregelung sowohl Verfahren unter Einsatz der Fuzzy-Logik als auch Kompensationsverfahren zur Linearisierung vorteilhaft einsetzbar [2,3]. Die weiterentwickelten, neuartigen Verfahren sind:

der Fuzzy-Controller

der Fuzzy adaptierte PID-Regler

der PID-Regler mit Kompensation der nichtlinearen Magnetkraft-Charakteristik

Folgende spezielle Anforderungen werden an die Regler gestellt:

Beherrschung der Nichtlinearitäten bei äußeren Störungen, Unwuchten und Einschaltvorgängen mit dem Ziel

- kleiner Amplituden der Rotorschwingung,
- geringer Überschwingweiten,
- kurzer An- und Ausregelzeiten,

durch Anpassung von Steifigkeit und Dämpfung des Magnetlagers

Einhaltung der Abarbeitungsgeschwindigkeiten der digitalen Regelung bei komplexen Algorithmen durch Einsatz von Kennfeldern

3.2 Verfahren zur Magnetlagerregelung

Bild 2 zeigt einen Überblick zur Einordnung der im Abschnitt 3.1 genannten Verfahren.

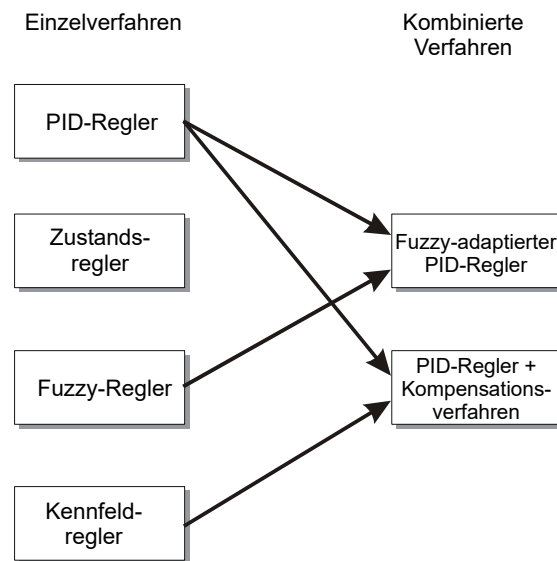


Bild 2: Regelverfahren für aktive Magnetlager

Die Bilder 3 bis 5 zeigen den Aufbau des Magnetlager-Regelkreises unter Einsatz der genannten Regelalgorithmen.

Der Fuzzy-Controller bietet die Möglichkeit, Nichtlinearitäten und Unsicherheiten bei der Modellierung (z.B. Verluste im Magnetkreis, Abweichungen vom idealisierten Magnetkraft-Kennfeld) zu berücksichtigen. Hierbei wird das Expertenwissen in die durch "WENN-DANN"-Regeln beschriebene Regelbasis einbezogen.

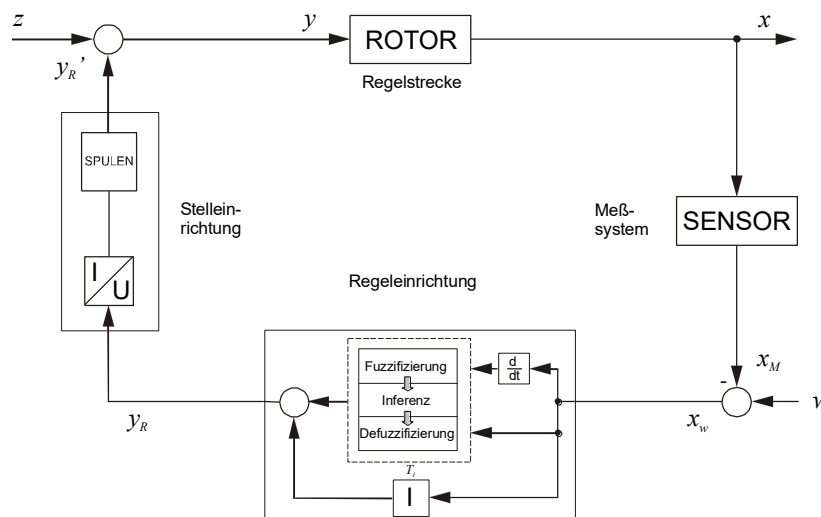


Bild 3: Struktur des Magnetlagerregelkreises mit Fuzzy-Controller

Der Fuzzy-adaptierte PID-Regler vereint die Vorteile von PID-Regelung und Fuzzy-Logik. Der PID-Regler als einfacher, wenig rechenzeitintensiver Algorithmus arbeitet als

Hauptregler, während die Fuzzy-Adaption die Reglerverstärkung in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Amplitude der Rotorposition angepaßt. Die Zykluszeit der Fuzzy-Adaption kann um Vielfaches größer gegenüber dem Hauptregler-Algorithmus sein. Für die Adaption ist eine zusätzliche Hardware erforderlich.

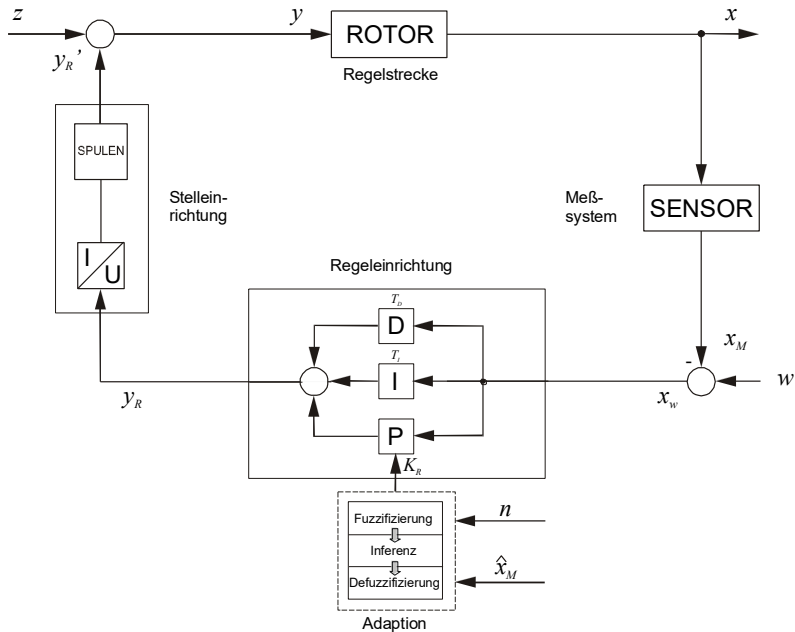


Bild 4: Struktur des Magnetlagerregelkreises mit Fuzzy-adaptiertem PID-Regler

Beim PID-Regler mit Kompensationsverfahren wird durch Invertierung der nichtlinearen Magnetkraft-Charakteristik das Übertragungsverhalten der Regelstrecke linearisiert. Damit ist der PID-Regler als linearer Regler über dem gesamten Arbeitsbereich einsetzbar. Dieses Verfahren erfordert die Messung oder Berechnung des nichtlinearen Verhaltens der Regelstrecke, wobei die Regelgüte entscheidend von der Qualität der Kompensationsmodelle abhängt. Für die Regelung einer Lagerrichtung müssen zwei Regler eingesetzt werden.

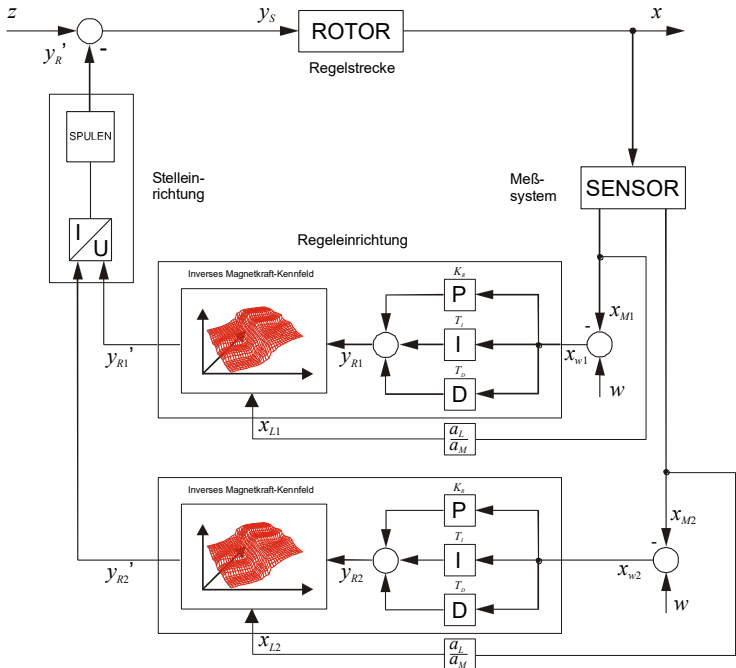


Bild 5: Struktur des Magnetlagerregelkreises mit PID-Regler und Kompensation

4 Modellgestützte Regleroptimierung und Simulation

Bei der modellgestützten Optimierung werden die Reglerparameter entsprechend den Regelungszielen mit Hilfe mathematischer Modelle von Regelstrecke und Regler bzw. mit Simulationsrechnungen angepaßt. Hierzu wird das Simulationsprogramm *MLDyn* mit der Struktur nach Bild 6 genutzt.

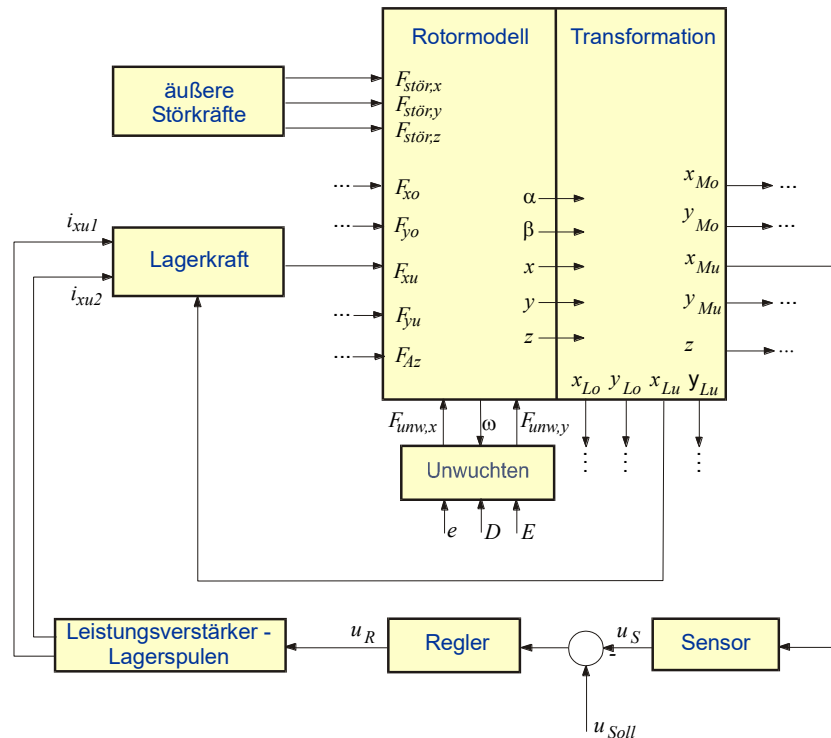


Bild 6: Struktur des Simulationsprogramms *MLDyn*

Das Simulationsprogramm *MLDyn* ist gekennzeichnet durch:

- Modellierung der Magnetlagerregelkreise für vollständig aktiv magnetgelagerte starre Rotoren
- modulare Bauweise, leichter Austausch von Regelkreiskomponenten
- Störeingriff durch Unwuchten bei Drehung mit starrer Welle und äußere Belastungen (Störkräfte)
- Möglichkeit der Konfiguration für beliebige Magnetlagersysteme durch Anpassung applikationsspezifischer Parameter und Strukturen
- Verifikation an mehreren Versuchsständen (Drehzahlen bis 50.000 U/min, Rotormassen bis 1,5 t)

Der Einsatz von *MLDyn* mit der applikationsspezifischen Konfiguration ermöglicht:

- die Unterstützung bei der Auslegung der Magnetlager
- die Untersuchung der Rotordynamik bei verschiedenen Geometrien (starrer Rotor), Sensor- und Lageranordnungen
- den effektiven Entwurf und Test von Steuer- und Regelkonzepten, insbesondere mit der
 - Untersuchung der Rotordynamik bei verschiedenen Geometrien (starrer Rotor),
 - Regelkreisuntersuchungen bei Stör- und Führungsverhalten (Lasttransienten, unterschiedliche Drehzahlen, kritische Betriebsituationen, An- und Abfahrvorgang),
 - Durchführung von Stabilitätsuntersuchungen,
 - Unterstützung beim Reglerentwurf und -parametrierung

die Vorbereitung von Experimenten an den Versuchsständen

Im Gegensatz zu klassischen Verfahren der Reglereinstellung wie Faustformelverfahren (Ziegler/Nichols u.a.) oder Frequenzkennlinienverfahren ist das Verfahren der modellgestützten Optimierung nicht auf den Entwurf linearer Regler beschränkt und damit wesentlich allgemeiner handhabbar. Entscheidend für das Ergebnis der modellgestützten Optimierung ist die Qualität des verwendeten Streckenmodells. Die Optimierung beinhaltet die Formulierung und Minimierung von quantitativen Gütemaßen zur Bewertung des Regelkreisverhaltens. Zwischen der oft gegenläufigen Erfüllung der Gütemaße ist ein Kompromiß zu wählen.

Bei der Reglerauslegung wird entsprechend den Anforderungen an die Magnetlagerregelung nach dem Störgrößenverhalten optimiert und das Führungsgrößenverhalten überprüft, da die angreifenden Störungen einen wesentlichen Einfluß auf den Betrieb des Magnetlagers haben. Die Schritte der modellgestützten Optimierung veranschaulicht Bild 7.

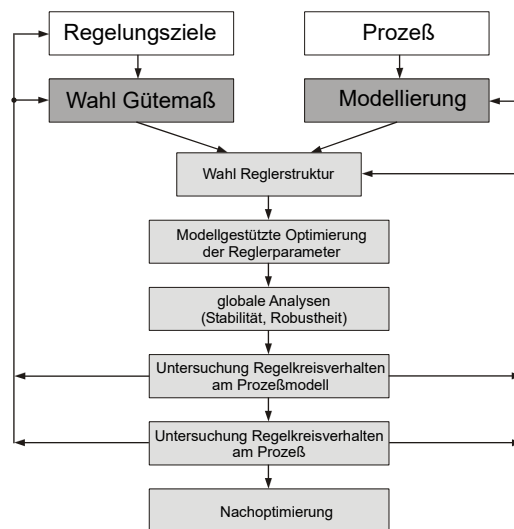


Bild 7: Schritte der modellgestützten Optimierung

Bild 8 zeigt beispielhaft die simulierten Amplitudengänge der Rotorposition für einen Versuchsstand mit PID-Regler, Fuzzy-adaptiertem PID-Regler, Fuzzy-Controller und PID-Regler mit Kompensationsverfahren mit den durch die modellgestützte Optimierung ermittelten Einstellwerten.

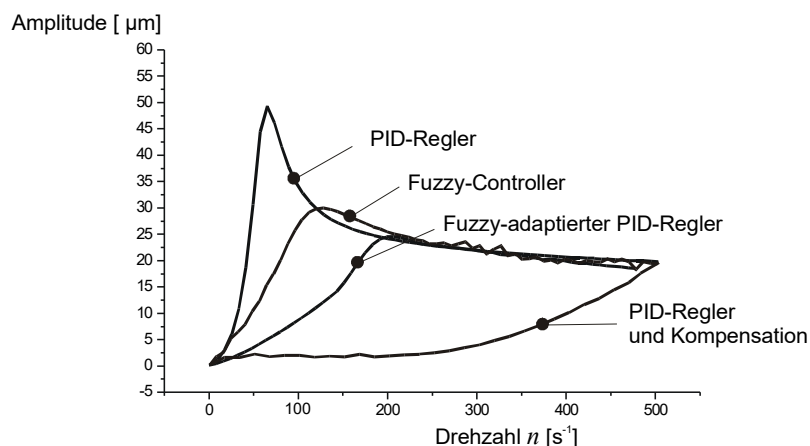


Bild 8: Amplitudengänge der Rotorposition

Resonanzschwingungen treten auf, wenn die Rotationsfrequenz ω ($\omega = 2\pi n$) und die Systemeigenfrequenzen ω_n gleiche Werte annehmen. Die Systemeigenfrequenzen variieren mit dem Regelalgorithmus und den Reglereinstellwerten. Die maximalen Amplituden betragen je nach Algorithmus 20 bis 50 μm . Im Vergleich zum klassischen PID-Regler können die Amplituden wesentlich reduziert werden.

5 Technische Realisierung der Regelalgorithmen

5.1 Anforderungen an digitale Regler

Die Anforderungen an die digitalen Reglerkomponenten sind im Zusammenhang mit den Eigenschaften der gesamten Signalverarbeitungskette nach Bild 9 zu betrachten. Über die Wegmeßsensoren und nachgeschaltete Meßverstärker werden die Rotorlagegrößen in axialer und radialer Richtung erfaßt. Diese Signale werden gefiltert (Rauschen) und dem A/D-Wandler zugeführt. Bei einer begrenzt zur Verfügung stehenden Anzahl der Eingabekanäle werden Multiplexer verwendet. Die digitalisierten Signale werden zu einem Mikroprozessor, in dem der Regelalgorithmus abgearbeitet wird, übertragen. Die berechneten digitalen Reglerausgangssignale werden über einen D/A-Wandler in analoge Signale umgesetzt. Über Leistungsverstärker werden diese Signale in entsprechende Stellströme der jeweiligen Lagerspulen umgeformt.

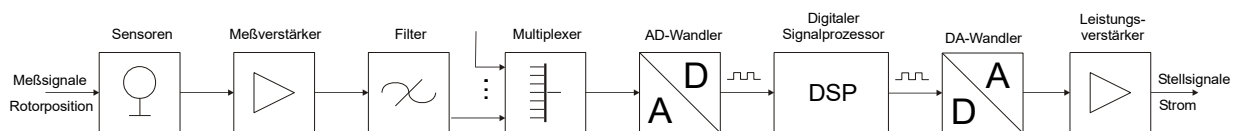


Bild 9: Signalverarbeitung am Magnetlager-Regler

Wichtigste Voraussetzung für die digitale Positionsregelung am Magnetlager ist, daß die Hardware den Anforderungen an die Abarbeitungsgeschwindigkeit der Regelalgorithmen genügt. In Magnetlagersystemen sind die erforderlichen Abarbeitungszeiten der Regelalgorithmen stark von der Rotordynamik abhängig. Die Stabilisierung des Gesamtsystems ist nur über die Realisierung hoher Abarbeitungsgeschwindigkeiten möglich. Dazu wird eine zulässige Zykluszeit festgelegt, die sich aus den Streckenzeitkonstanten der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises ergibt und mindestens um den Faktor 10 kleiner als die kleinste Zeitkonstante sein muß. Die digitalen Reglerkomponenten müssen so ausgelegt sein, daß die Signallaufzeiten zusammen mit der Abarbeitungszeit der Algorithmen die zulässige Zykluszeit nicht überschreiten. Die Ermittlung der zulässigen Zykluszeit erfolgt wiederum mit Hilfe der Simulation des gesamten Magnetlagersystems.

Für die digitale Regelung werden zur Zeit Mikroprozessorsysteme (z.B. digitale Signalprozessoren DSP) oder Kennfeldregler (z.B. High Speed Matrix Controller) verwendet.

5.2 High Speed Matrix Controller

Mit Hilfe von DSP-Systemen sind komplexe Regelalgorithmen innerhalb der für die Magnetlager-Regelung erforderlichen Zykluszeit meist nicht realisierbar. Außerdem sind Mikroprozessorsysteme relativ kostenintensiv. Aus diesen Gründen wurde eine neue Reglerhardware - der *High Speed Matrix Controller (HSMC)* - unter Nutzung von Kennfeldern entwickelt und realisiert [4].

Folgende Ziele wurden mit der Umsetzung komplexer Regelalgorithmen für zeitkritische, nichtlineare Systeme auf dem HSMC verfolgt:

Realisierung beliebiger, durch Kennfelder beschreibbarer Regler

Erhöhung der Abarbeitungsgeschwindigkeit der Algorithmen und Erreichung der notwendigen Zykluszeit für die digitale Magnetlager-Regelung

Erhöhung der Zuverlässigkeit und Funktionssicherheit

Kostensenkung gegenüber DSP-Systemen

Die Implementierung des HSMC untergliedert sich in einen Off-line und einen On-line Prozeß entsprechend Bild 10. Folgende Schritte werden in diesem Prozeß durchlaufen:

OFF-LINE PROZESS

1. Reglerentwicklung und -optimierung im Simulationsprogramm *MLDyn*

2. Konvertierung des Regelalgorithmus mit optimierten Parametern in ein Kennfeld durch

- Variation der Eingangsgrößen des Reglers innerhalb ihrer Definitionsbereiche und Berechnung der Ausgangsgröße entsprechend der geforderten Auflösung.
- Abspeicherung der Ausgangsgröße als Matrix in einer Datei.

ON-LINE PROZESS

1. Download der Datei auf die Hardware (Speicher)

2. Verbindung des HSMC mit dem Magnetlager-Regelkreis (Strecke)

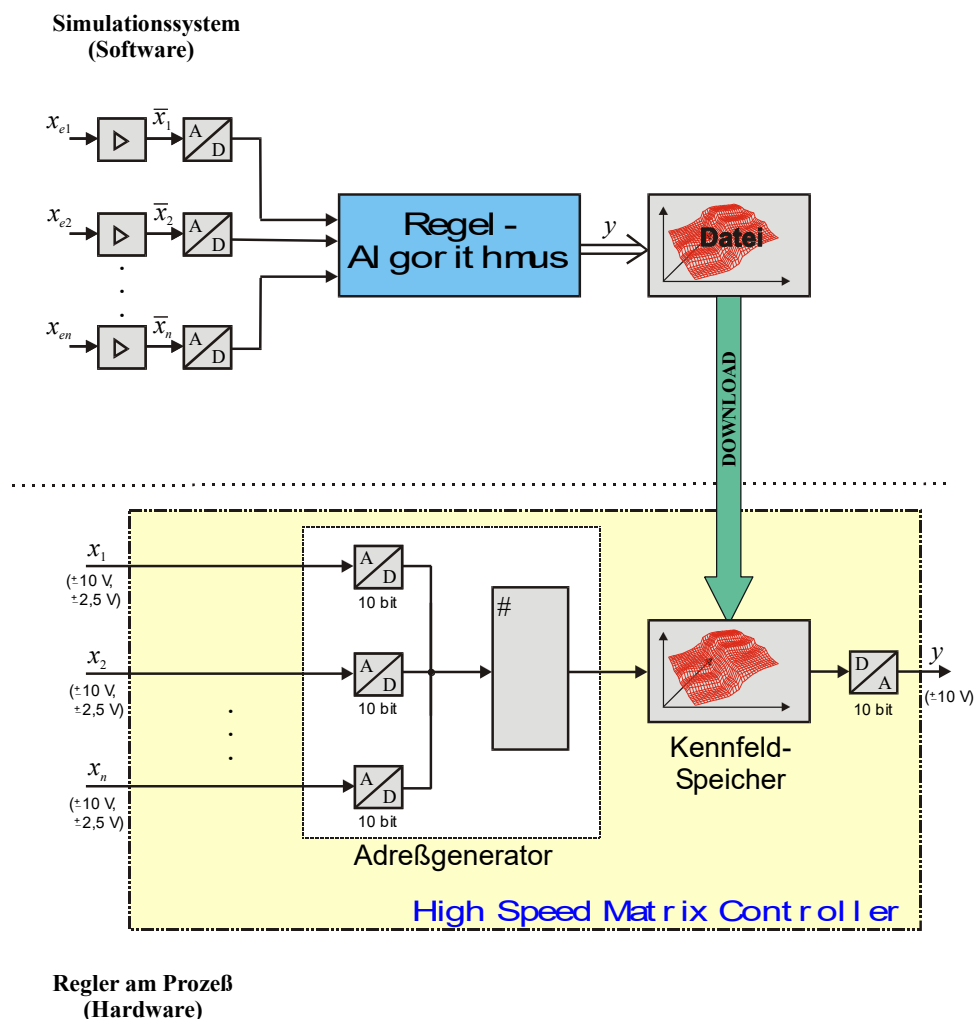


Bild 10: Struktur des High Speed Matrix Controllers

Eigenschaften des HSMC

Durch die Nutzung von Kennfeldern und die spezielle Ansteuerung des Speichers wird die Zykluszeit zur Abarbeitung der Regelalgorithmen wesentlich reduziert. In der derzeit entwickelten Konfiguration des HSMC werden Zykluszeiten von 200 ns erreicht.

Die Abarbeitungsgeschwindigkeit ist unabhängig von Umfang und Art des Algorithmus sowie von der Auflösung des Kennfeldes (Anzahl der Matrixpunkte). Sie wird nur noch durch die verwendete Hardware bestimmt.

Der Hardwareaufwand für den Regler wird durch den Einsatz des HSMC verringert, da im wesentlichen nur Speicherbaugruppen Verwendung finden und ein Prozessor nicht mehr erforderlich ist. Durch die Nutzung von Standard-Baugruppen werden die Kosten für die Anwendung komplexer Echtzeitregelungen weiter gesenkt. Selbst bei der hier entwickelten Kleinserie wird schon eine Einsparung von ca. 50% der Kosten gegenüber Standard-DSP-Systemen (ohne Software) erreicht.

Die Zuverlässigkeit und die Funktionssicherheit steigen, da im Speicher keine Berechnung des Algorithmus notwendig ist, die numerischen und Softwarefehlern unterliegen kann. Die Validierung des Algorithmus ist somit gegeben.

Weitere Einsatzmöglichkeiten des neu entwickelten HSMC bestehen für:

- Nutzung von On-line Diagnosealgorithmen in zeitkritischen Prozessen
- Kaskadierung mehrerer HSMC für Multi-Input-Single-Output Systeme (MISO-Systeme)

6 Vergleich von Simulation und Experiment

Zur Verifikation der durchgeführten Simulationsrechnungen und zum Test der ausgewählten Regelalgorithmen wurden folgende Einflußgrößen an Versuchsständen experimentell untersucht:

Unwuchten bei verschiedenen Drehzahlen auf das Betriebsverhalten
äußere sprungförmige Störkräfte
Einschaltvorgänge

Bild 11 zeigt beispielhaft den Verlauf der Amplitude der Rotorposition bei Einsatz des Fuzzy-Controllers am Versuchsstand.

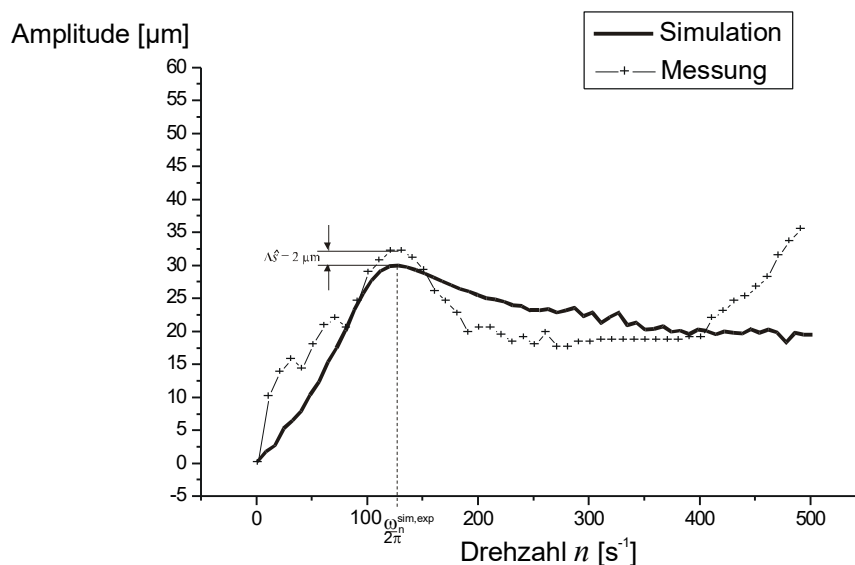


Bild 11: Amplitudengang der Rotorposition unter Einsatz des Fuzzy-Controllers

Die Eigenfrequenz von Messung und Simulation stimmen überein. Die Abweichung in der Amplitude der Rotorposition beträgt 2 μm . Die größte Abweichung (10 μm) tritt im Bereich kleiner Drehzahlen auf (40 s^{-1}).

Mit Hilfe der durchgeführten Experimente sind die Resultate der Simulationsrechnungen und die damit verbundene Einschätzung der Regelgüte validiert.

7 Zusammenfassung

Aktive Magnetlager stellen aufgrund der Nichtlinearitäten und der Instabilität der Regelstrecke sowie der geforderten Echtzeitfähigkeit hohe Anforderungen an die Regelung der Rotorposition innerhalb der elektromagnetischen Spulen. Eine Verbesserung der Regelgüte wird nur über den Einsatz verbesserter, neuartiger Regelverfahren erreicht. Ziel war es dabei, die Eigenschaften des Magnetlagersystems bei Lasttransienten, unterschiedlichen Drehzahlen und kritischen Betriebszuständen zu verbessern und Möglichkeiten zu erforschen, um den Entwicklungsaufwand zu minimieren.

Durch die hier vorgestellte simulationsgestützte Methode wird der Entwurf optimaler Regelungen für Magnetlager erreicht. Als Regelungsverfahren kommen insbesondere eine Verbindung aus Fuzzy-Control und adaptiver Regelung sowie Linearisierungsverfahren zur Anwendung, die durch die modellgestützte Optimierung unter Verwendung des Simulationsprogramms *MLDyn* parametrisiert werden.

Zur technischen Realisierung der Regelverfahren bei gleichzeitiger Erfüllung der Geschwindigkeitsanforderungen an die digitale Regelung wird der neu entwickelte *High Speed Matrix Controller* eingesetzt. Dieser auf der Basis von Kennfeldern aufgebaute Regler ermöglicht die minimal mögliche Abarbeitungsgeschwindigkeit der Algorithmen und eine Kostensenkung gegenüber konventionellen DSP-Systemen.

Durch den Vergleich von Simulationsrechnungen und an Versuchsständen durchgeführten Experimenten wurden das Simulationsprogramm *MLDyn* verifiziert und die Einsatzfähigkeit der untersuchten Regelverfahren anhand der simulationsgestützten Entwurfsmethode nachgewiesen.

Literatur

- [1] Schweitzer, G.; Traxler, A.; Bleuler, H.: Magnetlager, Springer Verlag Berlin-Heidelberg, 1993
- [2] Stegemann, H., Worlitz, F., Hampel, R.: Fuzzy logic application for magnetic bearings. Proceedings of the East West Fuzzy Colloquium 2000 (8th Zittau Fuzzy Colloquium), Zittau 2000
- [3] Hoffmann, K.-J.; Laier, D.; Markert, R.: Non-Linear Control of Magnetically Supported Rotors, Proceedings of MAG97, Alexandria, VA, 1997
- [4] Europäische Patentanmeldung EP 1063 575 A1: Verfahren zur Regelung zeitkritischer Prozesse durch einen High Speed Matrix Controller (Control of Time-critical Processes by a High Speed Matrix Controller), Institute of Process Technique, Automation and Measuring Technique Zittau, Germany, 1999/06/23