

EINSATZ VON FUZZY-LOGIK FÜR DIE DIAGNOSE VON AKTIV MAGNETGELAGERTEN MASCHINEN AM BEISPIEL DES ZITTAUER MAGNETLAGERS ZMB 120

Steffen Gärtner; Rainer Hampel

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik
Hochschule Zittau/Görlitz (FH) Theodor-Körner-Allee 16
02763 Zittau

Tel: + 49-(0)3583-61-1383, Fax: + 49-(0)3583-61-1288

Email: {s.gaertner,r.hampel}@hs-zigr.de

Abstrakt

Beim Versuchsstand Zittauer Magnetlager ZMB 120 wird eine horizontal angeordnete Welle mittels eines kombinierten Axial-/Radialmagnetlagers und eines Radialmagnetlagers vollständig aktiv magnetgelagert. Durch die Konstruktion des kombinierten Axial-/Radialmagnetlagers ergibt sich eine kompakte Bauweise. Die Magnetlager sind als homopolare Lager gefertigt, dadurch entstehen auch bei hohen Drehzahlen nur geringe Eisenverluste.

Der Vortrag stellt am Beispiel des Zittauer Magnetlagers ein Diagnosekonzept für aktiv magnetgelagerte rotierende Maschinen unter Verwendung der inhärent vorhandenen Signale vor.

Für die Gewinnung der Diagnosemerkmale werden signal- und modellgestützte Verfahren eingesetzt. Die Wissensakquisition für die Erstellung einer Wissensbasis über charakteristische Merkmalsverläufe bei Fehlern im Magnetlagerregelkreis und bei Fehlern an Maschinenkomponenten erfolgt mittels Simulationsrechnungen und Experimenten.

Über die bisher bei aktiven Magnetlagern übliche Überwachung von Grenzwerten hinaus wird bei der Fehlerdiagnose eine Verknüpfung der extrahierten Merkmale zur Identifizierung und Lokalisierung auftretender Fehler realisiert. Dazu werden wissensbasierte Verfahren unter Anwendung regelbasierter Methoden der Fuzzy-Logik eingesetzt.

Ergebnisse von Simulationsrechnungen und Experimenten und die wissensbasierte Generierung von Diagnoseaussagen mittels Fuzzy-Logik werden im Vortrag beispielhaft dargestellt.

1 Einführung

In vielen Einsatzfällen von aktiv magnetisch gelagerten rotierenden Maschinen ist es notwendig, den axialen Platzbedarf des Magnetlagers (ML) zu minimieren. Mit kurzen Rotoren wird das Verhalten des starren Rotors angestrebt. Ziel beim Aufbau des Versuchstandes ZMB 120 war daher die Minimierung der Lagerlänge. Entwickelt wurde ein Design mit einer gegenüber dem konventionellen Lagerdesign auf $2/3$ verkürzten Lagerlänge. Es besteht aus einem kombinierten Axial-/Radialmagnetlager, einem Radialmagnetlager und integrierten Fanglagern (Bild 1).

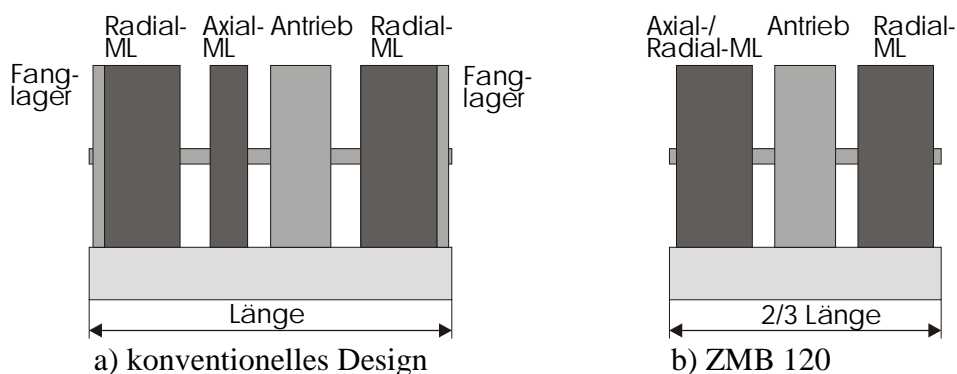


Bild 1: Vergleich zwischen dem konventionellen Design und dem Design des ZMB 120

Für die Diagnose an aktiv magnetgelagerten Maschinen wurde ausgehend von Erfahrungen bei der Überwachung und Diagnose konventioneller Lager ein Diagnosekonzept entwickelt und für den Einsatz am Versuchsstand ZMB 120 angepaßt. Diagnoseobjekt ist die rotierende Maschine in ihrer Gesamtheit von aktivem Magnetlager, Fanglager, Antrieb und Arbeitsmaschine.

Ziele der Diagnose sind die

- rechtzeitige und ursächliche Erkennung auftretender Abweichungen vom normalen Betriebszustand (Fehler),
- Empfehlung geeigneter Gegenmaßnahmen,
- Ursachenfindung,

zur Erhöhung der Anlagensicherheit und Lebensdauer sowie der Minimierung des Instandhaltungsaufwandes.

Bedingt durch das Funktionsprinzip ergeben sich für die Diagnose an aktiv magnetgelagerten Maschinen folgende Vorteile:

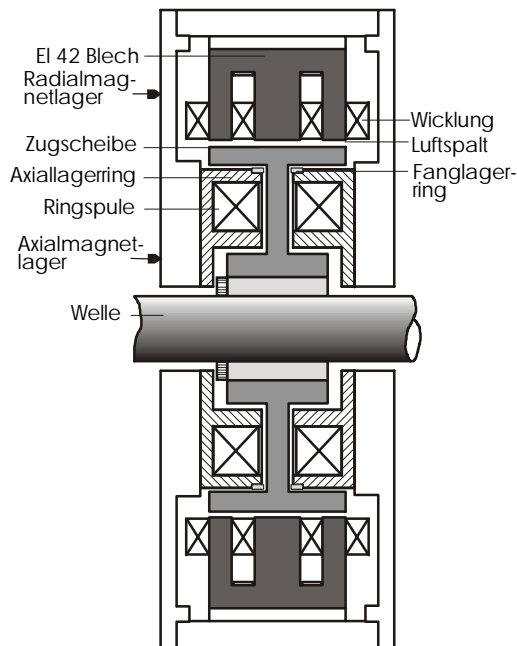
- Die systembedingt erfaßten Informationen über die Wellenlage und die Stellsignale können direkt für die Diagnose verwendet werden. Somit sind im Gegensatz zu konventionellen Lagern wesentliche Diagnoseinformationen ohne zusätzlichen Aufwand an Meßtechnik verfügbar.
- Aus der Wellenlage und den Magnetlagerströmen lassen sich die Stellkräfte auf den Rotor berechnen.
- Durch Anregung des Rotors mit Testsignalen ist eine Online-Identifikation der Wellen- und Maschinenparameter möglich.
- Auf den Rotor geprägte Kräfte wirken bei abgeschalteter Magnetlagerregelung auf die Fanglager und können zur Identifikation des Fanglagerzustandes eingesetzt werden.

Zur Umsetzung des Diagnosekonzeptes wird nach folgenden Arbeitsschritten vorgegangen:

1. Analyse und Auswahl von Verfahren der Merkmalsextraktion
2. Aufbau einer Wissensbasis mittels Simulation und Experiment
3. Entwicklung, Test und Verifikation von wissensbasierten Modellen für die Fehlerdiagnose

2 Mechanisches Design und Eigenschaften des ZMB 120

Beim Versuchsstand ZMB 120 wird der Rotor mittels eines kombinierten Axial-/Radialmagnetlagers A und eines Radialmagnetlagers B frei schwebend gelagert. Bild 2 zeigt die mechanische Konstruktion des neuartigen Designs des Axial-/Radiallagers. Axiallager und Radiallager sind in einer Einheit untergebracht. Die T-förmige Axiallager-Zugscheibe ist so aufgebaut, daß deren äußere Mantelfläche als Rotorbahn des Radialmagnetlagers genutzt wird. Die Lager sind als homopolare Lager ausgeführt, auf die Lamination des Rotors konnte verzichtet werden. In die Magnetlager integrierte Messingringe dienen als Fanglager.



a) Axial-/Radiallager



b) Axial-/Radiallager (links)
und Radiallager (rechts)

Bild 2: Mechanische Konstruktion der Magnetlager

Es ergeben sich folgende Vorteile des Designs:

- kürzere axiale Ausdehnung der gesamten Anordnung durch die Kombination von Axial- und Radiallager
- geringere Verluste gegenüber heteropolaren Lagern
- geringe Herstellungskosten durch Verzicht auf Lamination des Rotors

Für jedes Magnetlager und jede Achse existiert ein separater Regelkreis. Die Rotorposition wird mittels Wirbelstromsensoren gemessen. Ein digitaler Regler (DSP) berechnet aus der Abweichung von der Sollposition den Stellwert. Aus dem Stellwert werden die für die Differenzansteuerung der gegenüberliegenden Magnetlagerspulen notwendigen Stellsignale gebildet und mit einem Grunderregeranteil überlagert. Leistungsverstärker wandeln diese Stellsignale in Stellströme, welche durch die Magnetlagerspulen fließen und die benötigten Stellkräfte erzeugen.

Wesentliche technische Daten des Versuchstandes sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Charakteristische technische Daten des Versuchstandes

Rotorgewicht	2,6 kg
Rotorlänge	250 mm
Luftspalt	1 mm
Tragkraft Axial-/Radiallager, radial	60 N
Tragkraft Axial-/Radiallager, axial	120 N
Tragkraft Radiallager	30 N
Maximaler Strom	3 A

3 Merkmalsextraktion

Die Extraktion von Merkmalen für die Diagnose erfolgt mittels signalgestützten und modellgestützten Verfahren.

Für die Diagnose am Beispiel des ZMB 120 mit horizontal gelagertem Rotor und Differenzansteuerung sind folgende Signale nutzbar:

- die systembedingt gemessenen Wellenlagesignale s (Auslenkung des Rotors aus der Sollposition)
- die Stellwerte u (Reglerausgangssignale)
- die Stellströme i durch die pro Achse paarweise gegenüberliegend angeordneten Magnetlagerspulen

in

- der x -, y - und z -Achse des kombinierten Axial-/Radiallagers A
- der x - und y -Achse des Radiallagers B

Der Grunderregerstrom bei Differenzansteuerung der Lager läßt sich anhand der gemessenen Stellströme berechnen:

$$I_o = (i_+ + i_-)/2 \quad (1)$$

Aus den Wellenlagesignalen und den Lagerströmen werden die von den Magnetlagern pro Achse und Ebene erzeugten Kräfte zur Kompensation von Störungen nach Gleichung (2) berechnet.

$$f = C_1 \cdot \left(\frac{i_+^2}{(C_2 + 2(s_{nom} - s))^2} - \frac{i_-^2}{(C_2 + 2(s_{nom} + s))^2} \right) \quad (2)$$

f ... Gesamtkraft in einer Lagerachse s_{nom} ... nominaler Luftspalt
 i_+, i_- ... Spulenströme s ... Wellenlage
 C_1, C_2 ... Konstanten

Aus den Zeitverläufen der Signale der x - und y -Achse des jeweiligen Radiallagers erfolgt die Berechnung des Phasenwinkels φ (Richtung) und des Betrages r des Signalvektors.

Durch Einsatz signalgestützter Verfahren der Merkmalsextraktion werden folgende Merkmale in Form von Kenngrößen und Kennfunktionen bestimmt:

- (arithmetischer) Mittelwert $\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i \quad (3)$

- Effektivwert $\tilde{q} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2} \quad (4)$

- maximaler Spitzenwert $q_{max} = MAX(q(t)) \quad (5)$

- minimaler Spitzenwert $q_{min} = MIN(q(t)) \quad (6)$

- Spannweite $q_{sp} = q_{max} - q_{min} \quad (7)$

- Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(q)$ und Wahrscheinlichkeitsdichte $p(q)$
- Autokorrelationsfunktion $R(qq)$ und Kreuzkorrelationsfunktion $R(qr)$

- Amplitudenspektren und charakteristische Frequenzen

Mittels dieser primären Merkmalen werden weitere kombinierte Merkmale gebildet:

- Verhältnis R der Wellenlageeffektivwerte zu den Effektivwerten der Reglerausgangssignale der Achse

$$R = \frac{\tilde{s}}{\tilde{u}} \quad (8)$$

- Verhältnis A der Effektivwerte der Reglerausgangssignale zu den Stellstromeffektivwerten der Achse

$$A = \frac{\tilde{u}}{\tilde{i}} \quad (9)$$

- Verhältnis V der Stellstromeffektivwerte der jeweiligen gegenüberliegenden Magnetlagerspulen

$$V = \frac{\tilde{i}_+}{\tilde{i}_-} \quad (10)$$

- Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen den Richtungen der Signalvektoren φ_{\max} der beiden Radiallager

Zur Erkennung von Parameteränderungen der Regler und der Stellglieder (Leistungsverstärker, Magnetlagerspulen) werden modellgestützte Verfahren der Parameterschätzung nach [2] eingesetzt. Die Meßwerte werden dazu zeitdiskret erfaßt. Für die zu untersuchenden Übertragungsglieder wird die z-Übertragungsfunktion $G(z)$ in die Differenzgleichung

$$y(k) + c_1 y(k-1) + \dots + c_n y(k-n) = d_0 x(k) + d_1 x(k-1) + \dots + d_n x(k-n) \quad (11)$$

$y(k-n)$... Ausgangssignale des Übertragungsgliedes

$x(k-n)$... Eingangssignale des Übertragungsgliedes

c_n, d_n ... Parameter

umgeformt [3]. Aus der Differenzgleichung werden anhand der gemessenen Eingangssignale $x(k)$ und Ausgangssignale $y(k)$ sowie der Fehler $e(k)$ zwischen Modell und realem Verhalten des Übertragungsgliedes durch Minimieren des quadratischen Fehlers mit der Least-Squares-Methode die Parameter des Übertragungsgliedes bestimmt. Änderungen dieser Parameter dienen als Merkmale für Fehlerdiagnose.

4 Aufbau einer Wissensbasis

Durch Simulation und Experiment erfolgte die Ermittlung von typischen Merkmalsausprägungen bei Normalbetrieb und bei Auftreten von Fehlern. Die Ergebnisse wurden in einer Wissensbasis abgelegt. Sie dient als Ausgangsbasis für die Überwachung und Fehlerdiagnose. Folgende Fehler und Effekte wurden untersucht:

- Drehzahlabhängigkeit der Signale
- Offset-, Verstärkungs-, Linearitätsfehler der Meßeinrichtungen und Stellglieder
- Parameterveränderungen der Regler
- Sollwertänderungen
- Verschiebung der Lager- und Sensorachse
- auftretende Radial- und Unwuchtkräfte
- Störkräfte, verursacht durch den elektrischen Antrieb

- Lauf des Rotors in den Fanglagern

Für Simulationsrechnungen wird das Simulationssystem MLDyn [4] genutzt. Dieses System ist modular aufgebaut und besteht aus einem Modul mit dem mathematischen Modell des Rotors auf der Grundlage eines mechanischen Ersatzmodells und aus Modulen mit Modellen des Meßsystems, des Reglers sowie der Stellglieder. Alle für die Simulation erforderlichen Parameter des Regelkreises (Verstärkung, Zeitkonstanten, mechanische Größen des Rotors usw.) können auf die jeweilige Applikation angepaßt werden.

Beispielhaft sind nachfolgend Ergebnisse der Simulationsrechnungen und Experimente dargestellt.

Einfluß von Sensorfehlern (Sensoroffset)

Die Bilder 3 und 4 zeigen den Verlauf des Wellenlagesignals s_{xa} und des Lagerstromes i_{-xa} bei Auftreten eines Sensoroffsets. Charakteristische Diagnosemerkmale sind die dauerhaft veränderten Mittelwerte der Lagerströme und der Verlauf des Mittelwertes der Wellenlage sowie die maximalen und minimalen Spitzenwerte von Strom und Wellenlage unmittelbar nach Auftreten der Störung.

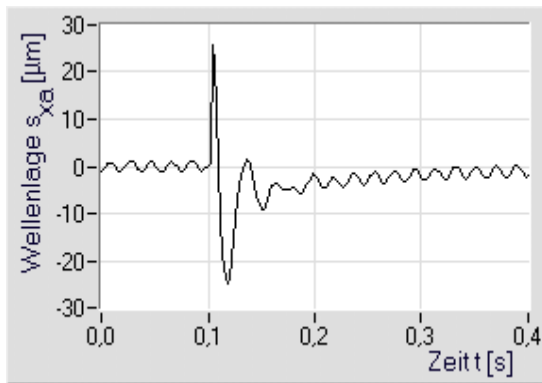


Bild 3: Wellenlage s_{xa} bei Sensoroffset

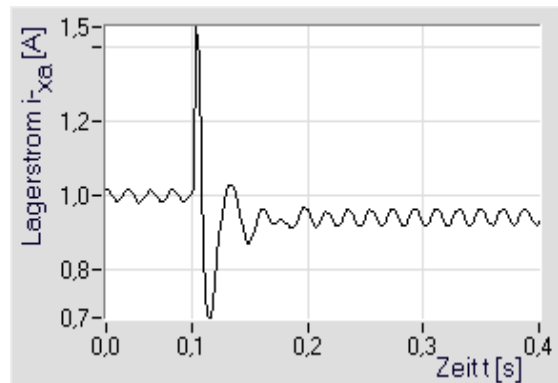
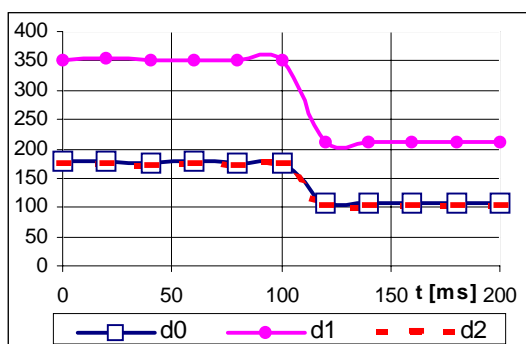


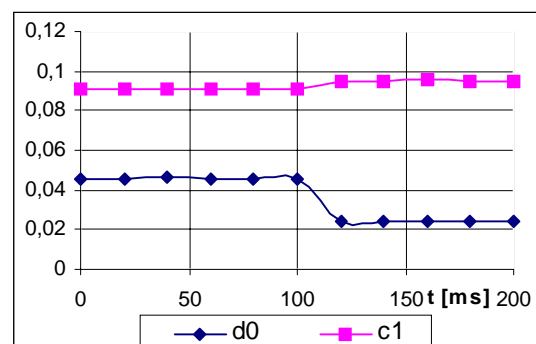
Bild 4: Lagerstrom i_{-xa} bei Sensoroffset

Parameterveränderungen im Magnetlagerregelkreis

Versuche zum Einsatz von Parameterschätzverfahren bei Anregung des Systems durch Restunwuchten erfolgten an den Komponenten Regler und Stellglied.



a) PID-Regler



b) Stellglied (PT1)

Bild 5: Verlauf der geschätzten Parameter

Den zeitlichen Verlauf der geschätzten Parameter bei Veränderung des Reglerparameters Vorhaltezeit von 0,005 auf 0,003 s beim PID-Regler zeigt Bild 5a, den Verlauf bei Veränderung der Zeitkonstante des Stellgliedes mit PT1-Verhalten von 0,001 auf 0,002 s zeigt Bild 5b. Die Störung (Veränderung der Prozeßparameter) erfolgte jeweils

zum Zeitpunkt $t = 100$ ms. Anhand der geschätzten Parameter sind die simulierten Störungen gut erkennbar, die Prozeßparameter lassen sich daraus zurückrechnen.

5 Grenzwertüberwachung

Die extrahierten Merkmalsausprägungen werden auf Bereichsüberschreitungen und Trends überwacht. Die Überschreitung vorgegebener Grenzwerte kennzeichnet das Auftreten eines Fehlers und führt zur Auslösung von Alarmen.

Durch Berechnung der Trends der Merkmalsausprägungen wird unter Verwendung linearer Regression der Zeitpunkt der zu erwartenden Grenzwertüberschreitung bei sich langsam anbahnenden Fehlern vorausberechnet (Fehlerprognose).

6 Fehlerdiagnose

Bei der Fehlerdiagnose ist anhand der Merkmalsausprägungen die Identifizierung und Lokalisierung des aufgetretenen Fehlers vorzunehmen. Tabelle 2 zeigt beispielhaft charakteristische Merkmalsausprägungen bei ausgewählten Fehlern im Magnetlagerregelkreis.

Tabelle 2:

Merkmalsausprägungen bei ausgewählten Fehlern, normiert auf den Bereich $-/+5$

Fehler	Erklärung	Merkmalsausprägung									
		\tilde{s}	\bar{s}	\tilde{u}	\bar{u}	I_o	R	A	V	\tilde{f}	\bar{f}
FS1+	Sensoroffset, positiv	-1	0	-1	4	0	0	0	0	0	5
FS1-	Sensoroffset, negativ	-1	0	-1	-4	0	0	0	0	0	-5
FS2+	Sensorverstärkung, erhöht	-5	0	-5	0	0	0	0	0	-5	0
FS2-	Sensorverstärkung, verringert	5	0	5	0	0	0	0	0	5	0
FC2+	Reglerverstärkung, erhöht	-5	0	-5	0	0	-5	0	0	-5	0
FC2-	Reglerverstärkung, verringert	5	0	5	0	0	5	0	0	5	0
FA1+	Stellwertoffset, positiv	0	0	0	-5	0	0	0	0	0	0
FA1-	Stellwertoffset, negativ	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
FA2+	Offset Grunderregung, positiv	-4	0	-2	0	5	0	0	0	0	0
FA2-	Offset Grunderregung, negativ	4	0	2	0	-5	0	0	0	0	0
FA6+	Stellwertverstärkung, erhöht	-5	0	-5	0	0	0	-4	0	-5	0
FA6-	Stellwertverstärkung, verringert	5	0	5	0	0	0	4	0	5	0

Die Zuordnung dieser Vektoren der Merkmalsausprägungen zu den Fehlern ist ein Klassifikationsproblem. Zur Klassifikation sind z. B. statistische Verfahren, Mustererkennungsverfahren, wissensbasierte Verfahren oder neuronale Netze einsetzbar. Für das Diagnosekonzept an aktiven Magnetlagern wird ein wissensbasiertes Verfahren unter Anwendung regelbasierter Methoden der Fuzzy-Logik eingesetzt.

Die Fuzzy-Logik bietet die Möglichkeit, Unsicherheiten bei der Modellierung und Zuordnung der Merkmale zu Diagnosen und Unsicherheiten bzw. Unbestimmtheiten im Prozeß und der Meßwerterfassung mit zu berücksichtigen. Die in der Wissensbasis enthaltenen Informationen über Fehler-Merkmal-Beziehungen lassen sich einfach in Fuzzy-Regeln umsetzen.

Erster Schritt bei der Anwendung des Verfahrens ist die Fuzzifizierung der Eingangsinformationen (Merkmalsausprägungen). Die Merkmale werden als linguistische Eingangsvariablen mit Zugehörigkeitsfunktionen (Fuzzy-Sets) definiert. Entsprechend den aktuellen Ausprägungen wird bei der Fuzzifizierung für jedes Fuzzy-Set ein Zugehörigkeitswert berechnet. Dieser Zugehörigkeitswert dient als Symptom für die Diagnose.

Die Klassifizierung der Fehler anhand der Symptome erfolgt mittels Produktionsregeln der Form

WENN Symptom s_1 UND Symptom s_2 ... UND Symptom s_n DANN Fehlerklasse f_n .

Die Symptome repräsentieren die Prämissen der Regel, die Fehlerklassen die entsprechenden Schlußfolgerungen. Im Schlußfolgerungsprozeß der Fuzzy-Inferenz werden anhand dieser aufgestellten Fuzzy-Regelbasis aus den Zugehörigkeitswerten der Fuzzy-Sets der Eingangsvariablen die Erfüllungsgrade der definierten Fuzzy-Sets der Ausgangsvariablen berechnet. Die Fuzzy-Sets der Ausgangsvariablen repräsentieren die zu diagnostizierenden Fehlerklassen. Nach Abarbeiten aller Regeln steht für jede Fehlerklasse ein Erfüllungsgrad zur Verfügung. Dabei ist keine Defuzzifizierung in scharfe Ausgangswerte notwendig. Die Fehlerklassen werden nach dem Grad der Erfüllung sortiert und die Fehlerklasse mit dem höchsten Erfüllungsgrad als Diagnoseergebnis ausgegeben. Entsprechend der diagnostizierten Fehlerklasse werden aus der Wissensbasis Informationen, z. B. Ursachen, Folgen, Maßnahmeempfehlungen oder Meldungen, entnommen und das Berechnungsmodell zur Lokalisierung des Fehlers ausgewählt.

Aufgrund der großen Anzahl von Eingangs- und Ausgangsvariablen wurde das Diagnosekonzept auf minimale Abarbeitungszeit ausgelegt. Für die Fuzzifizierung der Merkmalsausprägungen werden für jedes Merkmal die sich überlappenden Fuzzy-Sets S (small), N (normal) and B (big) definiert, wie in Bild 7 am Beispiel der Sets für linguistische Variable \tilde{s} (Effektivwert Wellenlänge) dargestellt.

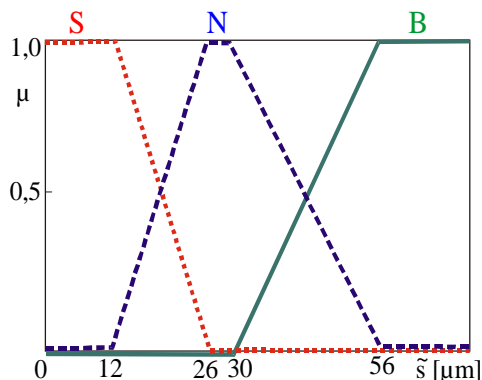


Bild 7: Fuzzy Sets der linguistischen Variable \tilde{s}

Tabelle 3: Regelmatrix für den Fehler $FA2$

$FA2$		\bar{u}		
		S	N	B
Io	S	N	M	N
	N	N	N	N
	B	N	P	N

Für die Definition der Fehlerklassen wurden zwei Varianten untersucht. Die erste Variante verwendet linguistische Variablen für die Fehlerklasse $FX+$ und $FX-$ mit den Sets N (normal) und B (big). Zur Minimierung der Rechenzeiten wird eine optimierte Variante verwendet, bei der die Fehler $FX+$ und $FX-$ zur Fehlerklasse FX zusammengefaßt und mit den Sets M (minus), N (normal), P (plus) definiert werden. Als Operatoren für die Inferenz erwiesen sich für die UND-Verknüpfung das Algebraic Product, für die ODER-Verknüpfung die Algebraic Sum und für die Akkumulation der Schlußfolgerungen der Einzelregeln der Maximum-Operator am geeignetsten. Um den Berechnungsaufwand zu begrenzen, werden nur die für den jeweiligen Fehler relevanten Merkmale und Regeln in die Berechnung einbezogen.

Die Aufstellung der Regeln soll am Beispiel des Fehlers "Offset Grunderregung" ($FA2$) in einem Magnetlagerregelkreis dargestellt werden.

Die Basisregel unter Verwendung der Merkmale \bar{u} und Io lautet:

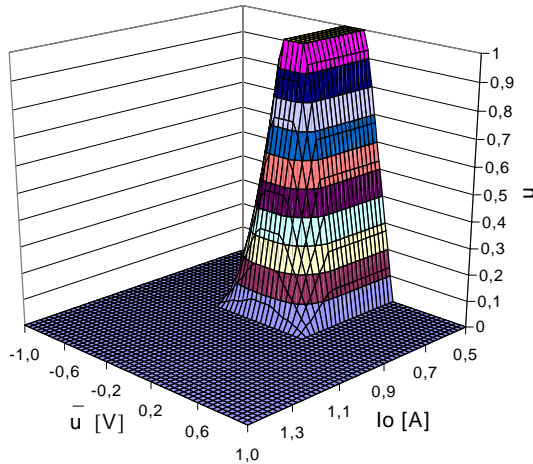
WENN \bar{u} UND Io DANN $FA2$

Die komplette Regelmatrix dafür zeigt Tabelle 3.

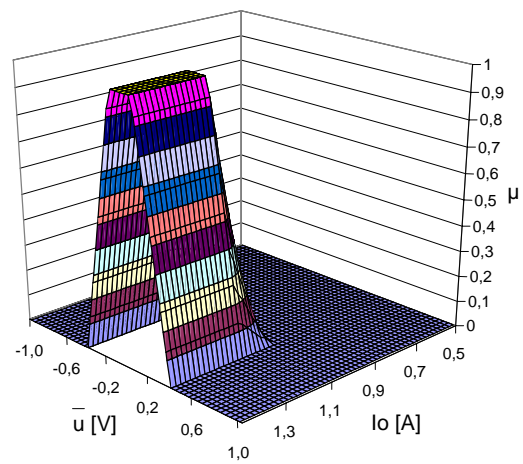
Es ergeben sich bei Variation der Merkmalsausprägungen die in Bild 8 dargestellten Kennfelder für die Diagnoseaussagen „ $FA = M$ “ und „ $FA = P$ “ mit den relevanten Einzelregeln

WENN $\bar{u} = N$ UND $I_o = S$ DANN $FA2 := M$

WENN $\bar{u} = N$ UND $I_o = B$ DANN $FA2 := P$



a) $FA2 = M$

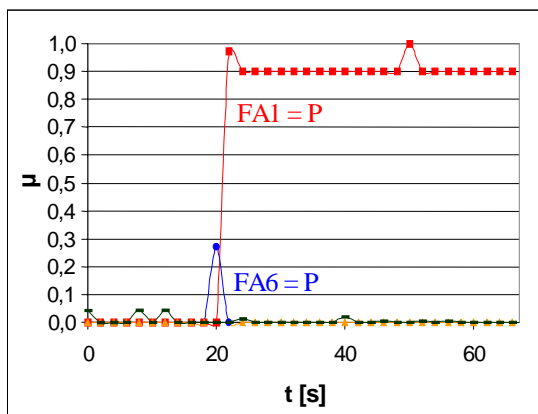


b) $FA2 = P$

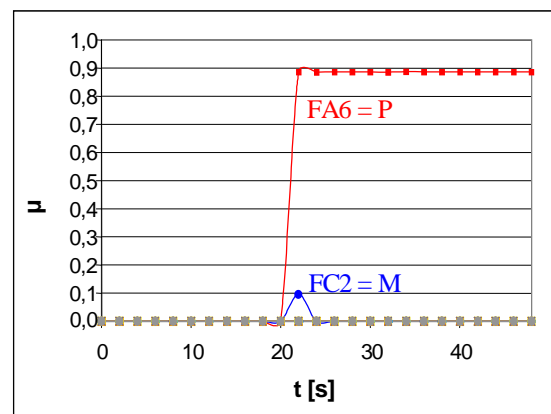
Bild 8: Kennfelder der Diagnoseaussagen " $FA2 = M$ " und " $FA2 = P$ "

Für alle untersuchten Fehler wurden die entsprechenden Basisregeln und Regelmatrizen aufgestellt und das Feuern der jeweiligen Fehlerklasse bei Simulation des Fehlers untersucht.

Beispielhafte Verläufe der Erfüllungsgrade der Fehlerklassen bei Simulation der Fehler $FA1+$ (Stellwertoffset von +140 mV) und $FA6+$ (Stellwertverstärkung erhöht auf 125 %) über der Zeit sind in Bild 9 dargestellt. Die jeweiligen Fehlerklassen feuern mit Erfüllungsgraden von 0,9 und 0,89, andere Fehlerklassen liefern Erfüllungsgrade unter 0,1. Damit sind die Fehler eindeutig identifiziert. Die Verwendung der kombinierten Ausgangsvariablen FX mit den Sets M für $FX-$, P für $FX+$ und N erwies sich als die günstigere Variante.



a) $FA1$



b) $FA6$

Bild 9: Verlauf der Erfüllungsgrade beim Auftreten der Fehler $FA1$ und $FA6$

Beim Verifizieren der Regeln für einen Regelkreis zeigte sich, daß mit den verwendeten Merkmalen nicht alle betrachteten Fehler unterscheidbar sind. Hierzu sind zusätzlich Merkmale aus der modellgestützten Merkmalsextraktion hinzuzuziehen bzw. Merkmale der anderen Regelkreise. Bei der Diagnose des gesamten Prozesses ergeben sich dabei umfangreiche Regelbasen, welche schnell unübersichtlich werden. Daher wurde eine hierarchische Struktur der Regelbearbeitung (Fehlerbäume) eingeführt und Zwischenergebnisse im Regelwerk berechnet. Die Zwischenergebnisse können von anderen Diagnosenregeln verwendet werden, damit verringert sich der Rechenaufwand. Für die hierarchische Struktur werden sogenannte Fuzzy-Logik-Module (FLM) kaskadiert, welche die Inferenzberechnung der Teilregeln realisieren. Eingangsgrößen der FLM sind die linguistischen Eingangsvariablen, welche fuzzifiziert werden oder vorher als Zwischenergebnisse berechnete Zugehörigkeitswerte. Dies sei am Beispiel der Diagnose "Radialkraft" dargestellt. Bild 10 zeigt die Kaskadierung der Module FLM 1-3 für diese Diagnose.

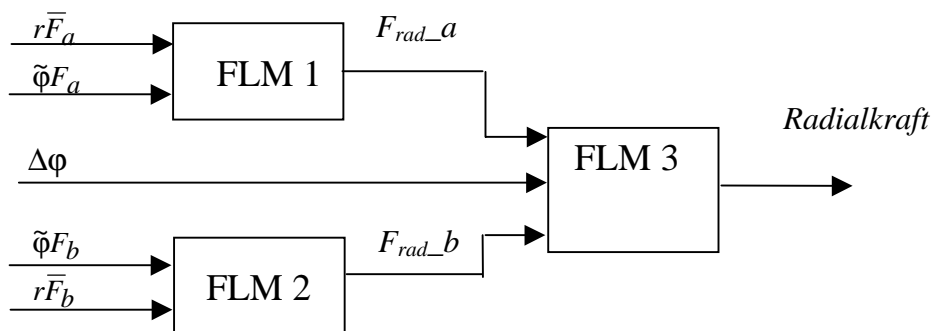


Bild 10: Kaskadierte Fuzzy-Logik-Module zur Diagnose „Radialkraft“

Eingangsgrößen der FLM 1 und FLM 2 sind jeweils für das Magnetlager A und B die Mittelwerte $r\bar{F}$ der Beträge der Kraftvektoren und die Effektivwerte $\tilde{\varphi}F$ der Winkel der Kraftvektoren. Daraus berechnen FLM 1 und 2 die Zwischenergebnisse F_{rad_a} und F_{rad_b} , welche zusammen mit der Winkeldifferenz $\tilde{\varphi}F$ der Kraftvektoren $\Delta\varphi$ der Radiallager die Eingangsgrößen für FLM 3 sind und auch für andere Diagnosenregeln genutzt werden können. FLM berechnet daraus für die Diagnose „Radialkraft“ die Zugehörigkeitswerte der Fehlerklassen:

- $RiLa$: Radialkraft Lagerebene A
- $RiLb$: Radialkraft Lagerebene B
- RzL : Radialkraft zwischen den Lagerebenen
- RaL : Radialkraft außerhalb der Lagerebenen

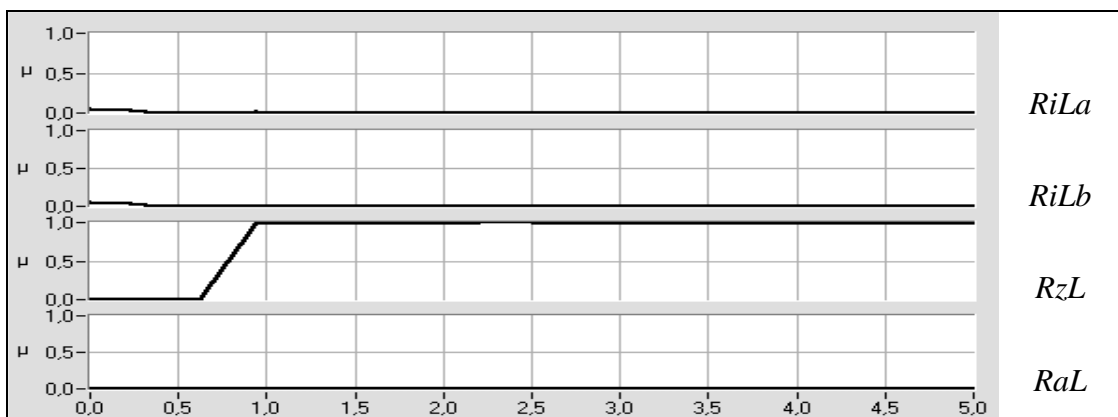


Bild 11: Verlauf der Erfüllungsgrade der Fehlerklassen bei Auftreten einer Radialkraft zwischen den Lagerebenen

Bild 11 zeigt Diagnoseergebnisse beim Wirken einer Radialkraft zwischen den Lagerebenen ab dem Zeitpunkt $t = 0,6$ s. Der Erfüllungsgrad der Fehlerklasse "Radialkraft zwischen den Lagerebenen" feuert mit einem Wert von 0,98 an, die anderen Werte bleiben unter 0,1. Damit ist der Fehler sicher erkannt.

7 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Durch das neuartige Design des ZMB 120 ist eine verkürzte axiale Bauweise möglich, die Eisenverluste und Herstellungskosten können niedrig gehalten werden.
- Es wurde am Beispiel des ZMB 120 ein Diagnosekonzept für AMB entwickelt, welches inhärente Meßinformationen nutzt.
- Im Gegensatz zur üblichen Grenzwertüberwachung ist mittels der wissensbasierten Fehlermodelle eine tiefere Diagnose möglich.
- Durch Auswahl relevanter Merkmale und Regeln läßt sich der Rechenaufwand verringern.
- Die verwendeten Fuzzy-Sets, Operatoren und Regeln liefern gute Ergebnisse bei der Identifizierung der simulierten Fehler.
- Die Kaskadierung von Fuzzy-Logik-Modulen dient der Übersichtlichkeit und minimiert den Rechenaufwand.

Schwerpunkte der weiteren Arbeit sind die Fortsetzung der Wissensakquisition mittels Experimenten und Simulationsrechnungen und damit ein weiterer Ausbau der Wissensbasis. Bei der Anwendung des Fuzzy-Logik-Verfahrens sind zusätzliche Fehlerdiagnosen einzubinden und der Einfluß auf das Diagnoseergebnis bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Fehler zu untersuchen.

8 Literatur

1. Frank, P. M.: Fuzzy Supervision - Einsatz der Fuzzy Logik in der Prozeßüberwachung. Proceeding 11. Chemnitzer Kolloquium, 1996
2. Isermann, R.: Überwachung und Fehlerdiagnose. VDI Verlag, 1994
3. Büttner, W.: Digitale Regelungssysteme. Vieweg Verlag, 1991
4. Hampel, R. et al.: Anwendung aktiver Magnetlager für sicherheitsrelevante Antriebe, Forschungsvorhaben BMBF 15 NU 954 – Abschlußbericht IPM 62207/97/1.
5. Zadeh, L.A.: Fuzzy Algorithms. Information and Control 12, 1968
6. Hampel, R., Chaker, N.: Cascading of Multidimensional Fuzzy Controllers. Proceedings 5. Fuzzy-Colloquium, 1997