

# **Neuartige Verfahren für die Überwachung und Diagnose von aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen**

Dissertation zur

Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

im Fachbereich Elektrotechnik/Informatik (FB16)

der Universität Kassel

vorgelegt von: Dipl.-Ing. Steffen Gärtner

geboren am 15.01.1962 in Zittau

Kassel / Witzenhausen im Februar 2007

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Weidemann

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Hampel

Tag der Disputation: 05. 10. 2007



## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Promotionsstudent und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM) an der Hochschule Zittau/Görlitz (FH). Die Arbeit wurde durch ein Promotionsstipendium im Rahmen der BMWi-Initiative „Kompetenzerhaltung in der Kerntechnik“ gefördert.

An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank meinem 1. Gutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Weidemann für das Interesse und die Unterstützung, welche er der Arbeit entgegengebracht hat und diese damit ermöglichte.

Meinem Betreuer und 2. Gutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Hampel danke ich für die Initiierung der Arbeit, die wissenschaftliche Förderung, die fachliche und persönliche Betreuung sowie die Ratschläge bei der Anfertigung des Manuskriptes.

Mein Dank richtet sich auch an die Kollegen des Fachgebietes „Mechatronische Systeme“ am IPM, speziell Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Worlitz für seine Anregungen und die konstruktive Zusammenarbeit über einen langen Zeitraum.

Weiterhin danke ich den Mitarbeitern der Firma Vattenfall Europe für die Unterstützung bei der technischen Realisierung des Aufbaus und der Inbetriebnahme der magnetgelagerten Pumpe im Kraftwerk Boxberg.

Bei meiner Frau Daniela Gärtner bedanke ich mich für das Korrekturlesen und die Hinweise zur Gestaltung und Formatierung der Endfassung der Arbeit.

Zittau, im März 2008

Steffen Gärtner



## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Einordnung der Arbeit .....	1
1.2 Stand der Technik .....	3
1.2.1 Technische Diagnose .....	3
1.2.2 Diagnose an rotierenden Maschinen und aktiven Magnetlagern.....	6
1.3 Zielstellung .....	8
<b>2 Aufbau einer Wissensbasis für die Diagnose an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen.....</b>	<b>10</b>
2.1 Einführung .....	10
2.2 Analyse von Fehlern an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen .....	11
2.3 Diagnosesignale .....	14
2.4 Merkmalsgewinnung .....	17
2.4.1 Signalgestützte Verfahren der Merkmalsgewinnung .....	17
2.4.2 Modellgestützte Verfahren der Merkmalsgewinnung .....	20
2.4.2.1 Parameteridentifikation .....	20
2.4.2.2 Parallelmodelle und Beobachter .....	22
2.5 Simulationsrechnungen.....	23
2.5.1 Simulationswerkzeuge.....	23
2.5.2 Modelle für die Simulation von Fehlern.....	24
2.5.3 Simulationsergebnisse .....	25
2.6 Experimentelle Untersuchungen.....	33
2.6.1 Versuchsstände .....	33
2.6.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	34
<b>3 Überwachung aktiv magnetgelagerter rotierender Maschinen.....</b>	<b>42</b>
3.1 Zielstellung .....	42
3.2 Grenzwertüberwachung .....	43
3.3 Trendüberwachung .....	47

<b>4</b>	<b>Diagnose an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen.....</b>	<b>50</b>
4.1	Anforderungen und Auswahl des Verfahrens.....	50
4.2	Fehlerdiagnose mit regelbasierter Fuzzy-Logik .....	51
4.3	Erstellung von Fehlerdiagnosemodellen mit regelbasierter Fuzzy-Logik.....	52
4.3.1	Definition der Fuzzy-Sets und Operatoren .....	52
4.3.2	Generierung der Fuzzy-Regelbasis.....	55
4.3.3	Verifikation.....	58
4.4	Erweiterte Diagnosemodelle.....	62
4.4.1	Fuzzy-Logik-Module.....	62
4.4.2	Diagnose statischer Radialkräfte .....	63
4.4.3	Diagnose von Unwuchten.....	69
4.4.4	Verifikation der erweiterten Diagnosemodelle.....	74
4.5	Optimierung der Diagnosemodelle.....	80
4.5.1	Eingrenzung der Diagnose im Magnetlagerkreis .....	80
4.5.2	Einbeziehung zusätzlicher Symptome.....	81
4.5.3	Einführung eines Verstärkungsoperators.....	82
4.5.4	Ausblenden und Abschwächen von Diagnoseergebnissen.....	84
<b>5</b>	<b>Technische Realisierung.....</b>	<b>86</b>
5.1	Diagnosesystem MLDia .....	86
5.2	Einsatzerfahrungen an einer aktiv magnetgelagerten Pumpe im Kraftwerk Boxberg..	90
5.2.1	Umbau einer konventionellen Kühlwasserpumpe auf aktive magnetische Lagerung .....	90
5.2.2	Überwachung des Betriebsverhaltens der magnetgelagerten Pumpe.....	92
5.2.3	Modifikation der Grenzwertüberwachung.....	101
5.2.4	Diagnosemodelle für aufgetretene Störfälle.....	102
5.2.4.1	Diagnose der Drehrichtung der Welle.....	102
5.2.4.2	Diagnose von Resonanzen bei losen Wellenteilen.....	105
5.2.4.3	Diagnose von Druckschwankungen im Prozess.....	107
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>110</b>
	<b>Darstellungsverzeichnis.....</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>118</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>125</b>

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Formelzeichen

$a$	Variable
$A$	Verhältnis der Effektivwerte der Reglerausgangssignale zu den Stellstromeffektivwerten der Achse
$b$	Variable
$b$	Lagerabstand
$c$	Modellparameter
$c$	Abstand des Fußpunktes des Rotors zum Lager B
$C$	Crestfaktor
$d$	Modellparameter
$DT$	Teilkreisdurchmesser
$DW$	Wälzkörperdurchmesser
$\underline{e}$	Fehlervektor
$e$	Exzentrizität
$e(m)$	Gleichungsfehlers
$e(z)$	zeitdiskretes Fehlersignal
$F$	Kraft
$f_a$	Abtastfrequenz
$f_{AR}$	Überrollfrequenz des Außenringes
$f_{IR}$	Überrollfrequenz des Innenringes
$f_{KA}$	Rotationsfrequenz des Käfigs
$f_{kin1}$	1. kinetische Frequenz
$f_{kin2}$	2. kinetische Frequenz
$f_n$	relative Rotationsfrequenz zwischen Innen- und Außenring des Wälzlagers
$F_{stör}$	Störkraft
$FT_q(f)$	diskrete Fourier-Transformation
$f_W$	Überrollfrequenz
$f_{WA}$	Wälzkörperrotationsfrequenz
$g$	Stellung bzw. Ventilöffnungsgrad des Regelventils
$G(z)$	zeitdiskrete z-Übertragungsfunktion
$i$	Strom
$I_G$	Grunderregerstrom
$i_S$	Steuerstrom
$k$	zeitlichen Verschiebung
$KI$	Spulenkonstante
$K_p$	Übertragungsfaktor des PT1-Gliedes
$K_R$	Verstärkung des Reglers, Reglerverstärkung
$l$	Position des Kraftangriffspunktes

$m$	Masse
$M$	Anzahl der Messungen
$MAX$	Maximum
$MIN$	Minimum
$n$	Rotordrehzahl, Störsignal
$p$	Druck
$q(t)$	Signalverlauf
$\bar{q}$	(arithmetischer) Mittelwert
$\tilde{q}$	Standardabweichung, Effektivwert
$q_{Min}$	minimaler Spitzenwert
$q_{Max}$	maximaler Spitzenwert
$q_{Sp}$	Spannweite
$r$	Betrag des Vektors
$R$	Verhältnis der Wellenlageeffektivwerte zu den Effektivwerten der Reglerausgangssignale einer Achse
$r(t)$	Signalverlauf
$s$	Weg, Wellenlage, Luftspalt
$s_{nom}$	nominaler Luftspalt
$t$	Zeitpunkt, Zeit
$T_a$	Abtastzeit
$T_l$	Zeitkonstante des PT1-Gliedes
$T_m$	Dauer der Messung, Messzeit
$T_N$	Nachstellzeit
$T_V$	Vorhaltezeit
$v$	Verstärkungsfaktor
$V$	Verhältnis der Stellstromeffektivwerte der jeweils gegenüberliegenden Magnetlagerspulen
$V1$	von Permeabilität und Spulenkonstruktion abhängige Variable
$V2$	von Permeabilität und Spulenkonstruktion abhängige Variable
$w$	Glättungsfaktor
$W$	Verhältnis der Stellstromeffektivwerte zu den Wellenlageeffektivwerten einer Achse
$x$	in x-Richtung
$x$	Eingangssignal
$x(t)$	Eingangssignalverlauf
$x(z)$	zeitdiskretes Eingangssignal
$y$	in y-Richtung
$y$	Ausgangssignal
$y(t)$	Ausgangssignalverlauf
$y(z)$	zeitdiskretes Ausgangssignal
$z$	in z-Richtung
$z$	Anzahl der Wälzkörper



$\alpha$	lagerspezifische Konstante
$\Delta\varphi$	Phasenverschiebung
$\varphi$	Phasenwinkel
$g$	Stellung bzw. Ventilöffnungsgrad des Regelventils
$\Gamma$	Formfaktor
$\gamma$	Rotordrehwinkel
$\gamma_U$	Winkel des Unwuchtkraftvektors
$\mu$	Erfüllungsgrad, Zugehörigkeitswert
$\mu_{VER}$	Verstärkungsoperator
$\omega$	Kreisfrequenz
$\underline{\Psi}$	Messmatrix der Ein- und Ausgangssignale
$\delta_r$	relativer mittleren Fehler
$\tau_{qr}$	Laufzeit
$\underline{\Theta}$	Parametervektor

### Indizes

+	positiv
-	negativ
$a$	Ebene A
$b$	Ebene B
$const$	konstant
$max$	Maximum
$min$	Minimum
$M$	Modell
$m$	Zählindex
$n$	Zählindex
$rad$	Radial
$R$	Regler
$U$	Unwucht
$y$	y-Achse
$z$	z-Achse (Axiallager)
$z$	z-Transformierte

### Abkürzungen

AND	logische UND-Verknüpfung
$B$	Fuzzy-Set BIG
DSP	Digitaler Signalprozessor
FA	Aktorfehler

FC	Controllerfehler
FLM	Fuzzy-Logik-Module
FLP	Fanglagerprüfstand
FS	Sensorfehler
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
<i>M</i>	Fuzzy-Set MINUS
<i>N</i>	Fuzzy-Set NORMAL
NOT	logische NICHT-Verknüpfung (Negation)
OR	logische ODER-Verknüpfung
ODER	logische ODER-Verknüpfung
<i>P</i>	Fuzzy-Set PLUS
PC	Personalcomputer
PPHI	Druckmessung hinter der Pumpe
<i>RaL</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Radialkraft außerhalb der Lagerebenen“
<i>RiLa</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Radialkraft in Lagerebene A“
<i>RiLb</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Radialkraft in Lagerebene B“
<i>RzL</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Radialkraft zwischen den Lagerebenen“
<i>Rück</i>	Fuzzy-Set für „Rückwärtslauf“
RVH2	Regelventil H2
<i>S</i>	Fuzzy-Set SMALL
<i>UaL</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Unwucht außerhalb der Lagerebenen“
<i>UiLa</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Unwucht in Lagerebene A“
<i>UiLb</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Unwucht in Lagerebene B“
UND	logische UND-Verknüpfung
<i>Uw</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Unwucht windschief“
<i>UzL</i>	Fuzzy-Set für Fehler „Unwucht zwischen den Lagerebenen“
<i>Vor</i>	Fuzzy-Set für „normale Drehrichtung“

## **1 Einleitung**

### **1.1 Einordnung der Arbeit**

Der Einsatz aktiver Magnetlager für rotierende Maschinen findet weltweit wachsendes Interesse [HAM97]. Dies ist begründet durch die ökonomischen und technologischen Vorteile, die Magnetlagerungen gegenüber konventionellen Lösungen attraktiv erscheinen lassen wie beispielsweise

- hohe zulässige Drehzahlen,
- keine mechanischen Reibungsmomente,
- mechanische Verschleißfreiheit,
- Reduzierung des anlagen- und bautechnischen Aufwandes,
- verbesserte Laufeigenschaften der Maschinen (hohe Laufruhe),
- geringerer Instandhaltungsaufwand und höhere Lebensdauer,
- geringer Energiebedarf (Senkung der Lagerverlustleistung),
- Einsatz unter extremen Umweltbedingungen.

Neben den wirtschaftlichen Vorteilen von Magnetlagerungen gibt es für den Einsatz in sicherheitsrelevanten Systemen, wie z. B. beim Betrieb kerntechnischer Anlagen, potenziell vorhandene sicherheitstechnische Vorteile. Die wichtigsten Gründe hierfür sind der Wegfall von Schmierstoffen, die mechanische Verschleißfreiheit und eine hohe Lebensdauer der Anlage. Mit der Eliminierung von Ölen und Fetten wird eine erhebliche Reduzierung der Brand- bzw. Kontaminationsmasse und damit die Senkung des Gefahrenpotenzials und die Reduzierung nuklearen Abfalls erreicht. Die Verschleißfreiheit führt über eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der Maschine zur Erhöhung der Sicherheit der Gesamtanlage. Durch den Einsatz von Magnetlagern können eine Reihe von derzeit notwendigen mechanischen Hilfsystemen (für Ölhaltung, Pumpenkühlung, Sperrwasser und Lagerdruckwasser) eingespart werden, was über die damit verbundene Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeiten weiterhin zu einer Verbesserung der Sicherheit beiträgt. Als weitere sicherheitsrelevante Vorteile sind zu nennen:

- keine Schadensskalation durch zusätzliche Lagerbelastung,
- problemlose redundante Ausführung der Magnetlager,
- geringer Wartungsaufwand über die gesamte Lebensdauer.

Aktive Magnetlagerungen haben aber auch Nachteile. Der höhere Aufwand für die notwendigen Sensoren, Regler und Leistungsverstärker ist ein wesentlicher Hinderungsgrund für den Einsatz von aktiven Magnetlagerungen. Dies lässt sich allerdings durch zusätzliche Funktionalität kompensieren, dazu bietet sich vor allem die Integration von Diagnosefunktionen in das System an. Bedingt durch das Funktionsprinzip ergeben sich für die Diagnose an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen folgende Vorteile:

- Die systembedingt erfassten Informationen über die Rotorposition (Wellenlagesignale) und die Stellsignale können direkt für die Diagnose genutzt werden.
- Die kontinuierliche Verfügbarkeit dieser Signale ermöglicht es, Störungen sofort zu erkennen.
- Aus der Rotorposition und den Magnetlagerströmen lassen sich die Stellkräfte, die auf den Rotor wirken, berechnen.
- Durch Anregung des Rotors mit Testsignalen ist eine Online-Identifikation der Rotor- und Maschinenparameter möglich.
- Auf den Rotor geprägte Kräfte wirken bei abgeschalteter Magnetlagerregelung auf die Fanglager und sind zur Identifikation des Fanglagerzustandes einsetzbar.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum effektiven und kostengünstigen Einsatz von aktiv magnetgelagerten Systemen durch Nutzung der systemtypischen Vorteile für Diagnosefunktionen. Sie ordnet sich ein in die Forschungsarbeiten zum Einsatz neuer, innovativer Verfahren der Diagnose aktiv magnetgelagerter Maschinen. Die Anwendung des entwickelten Diagnosekonzeptes ermöglicht eine Erhöhung der Funktionalität, Sicherheit und Zuverlässigkeit der Maschine, die bisher aufgrund fehlender Diagnosemöglichkeiten nur eingeschränkt oder mit erhöhtem zusätzlichen Aufwand realisierbar ist.

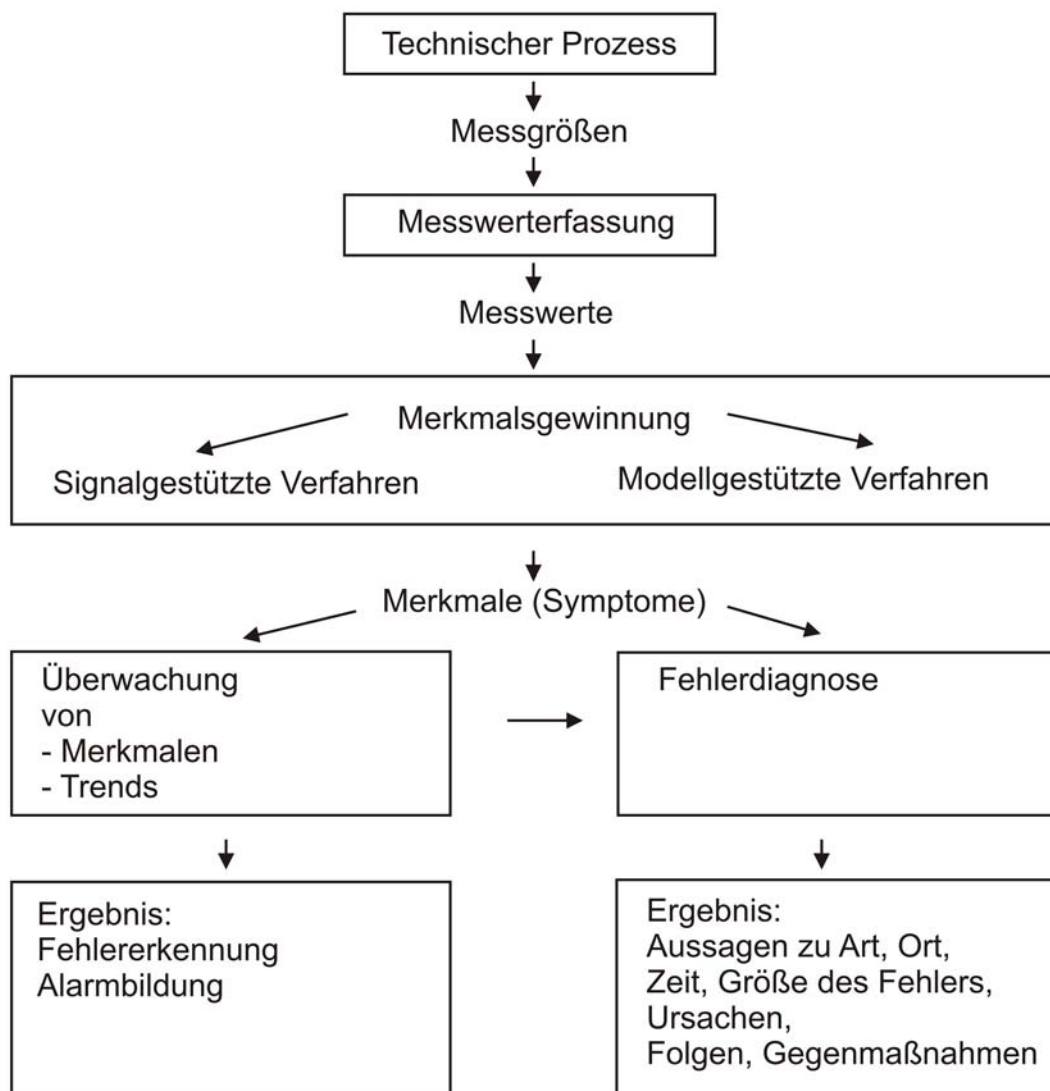
Mit dem Einsatz des Diagnosekonzeptes für sicherheitsrelevante Systeme in Kernkraftwerken wird ein Beitrag zur Kompetenzerhaltung und zur Erweiterung des wissenschaftlich-technischen Sachverstandes auf dem Gebiet der Kerntechnik geleistet sowie die Erhöhung der Sicherheit in Kernkraftwerken durch den Einsatz zukunftsweisender Technologien unterstützt.

## 1.2 Stand der Technik

### 1.2.1 Technische Diagnose

Ziel der technischen Diagnose ist es, auftretende Fehler rechtzeitig und möglichst ursächlich zu erkennen, daraus Aussagen über Verschleiß, Schädigung, Betriebszustand und Restlebensdauer zu treffen, geeignete Gegenmaßnahmen vorzuschlagen bzw. einzuleiten und somit sowohl die Anlagensicherheit, Verfügbarkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu erhöhen als auch den Instandhaltungsaufwand und die Betriebskosten zu minimieren. Als Fehler werden dabei sowohl betriebsbedingte als auch durch Störungen, Ausfälle oder Defekte verursachte Abweichungen vom normalen Prozesszustand bezeichnet.

Das Grundprinzip der technischen Diagnose ist in Bild 1-1 dargestellt [ISE94].



**Bild 1-1:** Grundprinzip der technischen Diagnose

Aus den mit Messeinrichtungen (Sensoren) im technischen Prozess aufgenommenen Prozessmessgrößen erfolgt in der **Messwerterfassung** die Gewinnung der Messwerte (Signale) zur Bestimmung des Ist-Zustandes. Aus der Vielzahl der anfallenden Messwerte werden in der Stufe der Merkmalsgewinnung relevante Merkmale für die Fehlererkennung extrahiert. Dabei geht man davon aus, dass sich Änderungen des Prozesszustandes (Fehler) in Veränderungen der Ausprägungen der Merkmale widerspiegeln. Zur **Merkmalsgewinnung** sind signal- und modellgestützte Verfahren einsetzbar. **Signalgestützte Verfahren** berechnen mit Methoden der Signalanalyse aus den Messwerten die Merkmale. Beim Einsatz **modellgestützter Verfahren** werden unter Verwendung von mathematischen Prozessmodellen die im Prozess vorhandenen Abhängigkeiten der messbaren Signale untereinander, d. h. die analytische Redundanz, genutzt. Damit sind messtechnisch nicht oder nur sehr schlecht erfassbare Prozessgrößen und Parameter ermittelbar. Modellgestützte Verfahren der Parameteridentifikation ermöglichen es, anhand der Ein- und Ausgangssignale des Prozesses die aktuellen Prozessparameter zu bestimmen. Geeignet sind diese Verfahren hauptsächlich zur Erkennung von multiplikativen Fehlern bei dynamischen Prozessen. Modellgestützte Verfahren auf der Basis von Parallelmodellen, Paritätsmodellen (Paritätsraum-Methoden) und Verfahren der Zustandsgrößenschätzung mit Zustandsbeobachtern sind einsetzbar zur Erkennung und Lokalisierung von additiven Fehlern.

Die mit signal- bzw. modellgestützten Verfahren berechneten Ausprägungen der Merkmale und deren Trends werden bei der **Überwachung** des Prozesses auf das Verlassen von Toleranzbereichen überprüft und somit eine Erkennung des Auftretens von Fehlern realisiert.

Anhand der als Symptome genutzten Abweichungen der Merkmalsausprägungen vom nominalen Zustand ist bei der **Fehlerdiagnose** eine Isolierung und Identifikation der Fehler durchzuführen. Hier handelt es sich um ein Klassifikationsproblem. Den Symptomen sind einzelne Fehlerklassen zuzuordnen. Für die Klassifikation sind z. B. klassische Verfahren der statistischen oder geometrischen Mustererkennung sowie wissensbasierte Verfahren auf Basis der Fuzzy-Logik oder neuronaler Netze einsetzbar. Mit der Diagnose des Fehlers werden Aussagen über Art, Ort, Zeit des Auftretens, Größe, Ursachen und Folgen sowie Prognosen über die weitere Entwicklung der Abweichung getroffen und geeignete Gegenmaßnahmen (Therapien) vorgeschlagen.

Einen Überblick über Verfahren der Merkmalsgewinnung und Fehlererkennung gibt [ISE94]. Es werden Methoden der Kontrolle direkt messbarer Signale, der Analyse von Signal- und Prozessmodellen mit Parameterschätzverfahren, Paritätsmodellen und Zustandsbeobachtern

erläutert und Anwendungsbeispiele vorgestellt. Grundlagen und Anwendungen von Parameter- und Zustandsgrößenschätzverfahren sind in [FOE90], [ISE92], [UNB85] und [BUE91] erörtert. Mit Methoden der analytischen Redundanz beschäftigten sich [FRA94] und [PRO89]. In [PRO89] wird ein prozessunabhängiges Konzept zur rechnergestützten Messfehlererkennung beschrieben, welches bestehende Anwendungen im Hinblick auf Sensitivität und Zuverlässigkeit bei geringem Rechenaufwand (Echtzeitfähigkeit) übertrifft. Es erfolgt dabei eine Kombination von mehreren einfachen modellgestützten Fehlererkennungsverfahren. Eine Fehlerdiagnosestrategie, die signalgestützte Verfahren und Zustandsbeobachter kombiniert, stellt [DIN98] vor. Extrahierte Merkmale in Form von Residuen werden zur Aktualisierung und Adaption von Grenzwerten genutzt und somit ein sensitives Diagnoseverfahren bei gleichzeitiger Minimierung von Fehlalarmen entwickelt.

Die Anwendung wissensbasierter Verfahren erfolgt in zunehmendem Maße zur Fehlerdiagnose. [FRE93] stellt ein Konzept vor, das analytische Verfahren mit wissensbasierten zu einem hybriden Diagnosesystem verknüpft. In [ZIM95] wird der Einsatz von Fuzzy-Technologien sowie Neuronalen Netzen und deren Kombination zur Datenanalyse und Diagnose gezeigt. Der Lösungsansatz mit Fuzzy-Logik findet Verwendung bei der Diagnose von Gleichstrommotoren.

Mit Methoden der Fuzzy-Logik in der Prozessüberwachung beschäftigt sich [FRA96], diese werden hier bei der Generierung und Auswertung von Residuen und zur Grenzwertadaption angewandt. Ein weiteres Verfahren zur Überwachung und Diagnose von Maschinen ist die Fuzzy-Pattern-Classification [BOC98]. Vorteilhaft ist die hohe Abarbeitungsgeschwindigkeit beim Einsatz in der Online-Diagnose. Praktische Einsatzbeispiele wissensbasierter Fuzzy-Methoden sind in [BOC92] angegeben.

Einen Einblick in Expertensysteme für die Diagnose bieten [HAR87] und [PUP87]. Die Anwendungen liegen vorrangig im Bereich medizinischer Diagnostik. Unterschieden wird zwischen fall- bzw. modellbasierten und heuristischen (assoziative) Verfahren, wobei für die Diagnose hauptsächlich letztgenannte Verwendung finden. Anwendungen von Expertensystemen im industriellen Einsatz sind in [PUP93] zusammengestellt, genutzt werden diese bei der Diagnose schiffstechnischer Anlagen sowie von Raketentriebwerksprüfständen. Ein funktionsfähiges wissensbasiertes Expertensystem zur Diagnose an Turbogeneratoren auf der Basis der Fuzzy-Logik stellt [MUE96] vor.

Umfangreiche Untersuchungen zur Methodik sowie der Kombination modell- und fuzzy-basierter Algorithmen werden in [HAM99] durchgeführt. Ziel ist es, eine kontinuierliche Prozessbeobachtung in sicherheitsrelevanten Anlagen zu gewährleisten. Entwurf, Test und Nachweis der Funktionsfähigkeit erfolgen am Beispiel der Bestimmung des Füllstandes in Druckbehältern mit Wasser-Dampf-Gemisch.

### **1.2.2 Diagnose an rotierenden Maschinen und aktiven Magnetlagern**

Die Überwachung und Diagnose von konventionellen rotierenden Maschinen erfolgt hauptsächlich durch die Anwendung von Schwingungsüberwachungssystemen unter Nutzung signalgestützter Verfahren. Überwacht werden die Wellen- und Gehäuseschwingungen bezüglich Veränderungen des Schwingverhaltens und der radialen Spiele sowie der kinetischen Überbeanspruchung. Die VDI-Richtlinie 2059 [VDI2059] gibt in Abhängigkeit von Maschinengröße und Drehzahl die Schutz- und Betriebskriterien vor.

Die Anwendung vibroakustischer Maschinendiagnostik ist in [CEM90] beschrieben. Es werden Parameter und Merkmale bestimmt, die direkte Verschleißerscheinungen kennzeichnen und mit Mustern intakter Maschinen verglichen. Angegeben sind die Ursachen von Schwingungen sowie die Abnutzungsarten von Maschinen und die dabei entstehenden vibroakustischen Erscheinungen.

Speziell mit der Diagnose von Wälzlagern beschäftigt sich [STU86]. Die Zustandsermittlung erfolgt durch Schädigungsbilder und Lebensdauerberechnungen. Wichtige Kenngrößen dafür sind die kinetischen Frequenzen der Wälzlager. Weitere untersuchte Merkmale sind Signalkenngrößen, Signalkennfunktionen sowie Kennfunktionen zur Beschreibung von Einzelsignalen und des Systemübertragungsverhaltens. Als Auswerteverfahren werden Impulsanalyse, Hüllkurvenextraktion, Averaging und Cepstrumanalyse bei der Geräusch- und Schwingungsüberwachung eingesetzt.

Methoden der Signalanalyse zur Überwachung von Wellen- und Lagerschwingungen finden Anwendung in [KOL86]. Als Verfahren wird hauptsächlich die Frequenzanalyse eingesetzt. Für auftretende Fehler sind typische Erscheinungsbilder angegeben.

Einen Überblick über den Stand der Normung bei der Messung und Beurteilung von Maschinenschwingungen gibt [SCH90].



Die Erfahrungen aus der klassischen Maschinendiagnostik können nach entsprechender Modifizierung auch für aktiv magnetgelagerte Maschinen angewendet werden. Die Nutzung der Gehäuseschwingungen als Abbild der wirkenden Störkräfte ist dabei aber ungeeignet, da aufgrund der geringeren dynamischen Steifigkeit und der berührungsfreien Lagerung kaum eine Schwingungsübertragung erfolgt. Dafür bietet sich aber bei aktiven Magnetlagerungen die direkte Berechnung der wirkenden Kräfte auf der Basis der Wellenlage- und Magnetlagerstromsignale an. Neben der einfachen Grenzwertüberwachung der Wellenlage- und Stromsignale ist daher die Bestimmung der wirkenden Kräfte das hauptsächlichste Diagnosegebiet an aktiven Magnetlagerungen. Wesentlich ist dabei die Genauigkeit, mit der die wirkenden Kräfte berechenbar sind. Untersuchungen zu Möglichkeiten der Erhöhung der Genauigkeit der Kraftbestimmung werden in [NOR97] und [AEN00] durchgeführt.

[AXO99] nutzt an einer magnetgelagerten Spindel für Präzisionsdreharbeiten die gemessenen Wellenlage- und Lagerstromsignale zur Bestimmung von Verschiebungen, Neigungen, Neigungswinkeln und mechanischen Kräften, [MUE00] erzielt eine Erkennung von Werkzeugzerstörungen und -verschleiß für Werkzeugspindeln. Die aus den Magnetlagersignalen berechneten tangentialen und radialen Prozesskräfte werden in [STR00] für die Optimierung und Diagnose des Schleifprozesses einer Hochgeschwindigkeitsspindel eingesetzt.

Experimentelle und theoretische Untersuchungen an einer 5-MW-Speisewasserpumpe, insbesondere zur Rotordynamik und der Ermittlung interaktiver Kräfte zwischen Medium und Pumpeneinbauten, sind in [VER92] beschrieben. Zwecks Identifikation der Rotorparameter wurden dabei aktive Magnetlager gleichzeitig auch zur Aufprägung definierter Kräfte auf den Rotor genutzt.

Die Anwendung von modellgestützten Messverfahren zur Bestimmung nicht messbarer Zustandsgrößen an aktiven Magnetlagern behandelt [STO95]. Eingesetzt werden dabei reduzierte und vollständige Zustandsbeobachter mit Rückführung. Theoretische Arbeiten zum Einsatz von Zustandsbeobachtern zur Bestimmung physikalischer Parameter für die Diagnose von aktiven Magnetlagern sind [GOS00] dargestellt.

### 1.3 Zielstellung

Die Komplexität der magnetgelagerten Maschine in Verbindung mit dem technologischen Prozess in energetischen Anlagen, insbesondere unter Störfallbedingungen, stellt hohe Anforderungen an die Funktionssicherheit der Teilsysteme. Diese ist unter anderem durch ein leistungsfähiges System der Maschinendiagnose zu gewährleisten.

Für ein solches Diagnosesystem lassen sich folgende Aufgaben formulieren:

- Überwachung des Betriebsverhaltens magnetgelagerter Maschinen (Magnetlager, Antrieb, Arbeitsmaschine) unter Einbeziehung des momentanen Betriebsregimes,
- Lebensdauerüberwachung für die eingesetzten Fanglager,
- Erkennung und Identifikation von Instrumentenfehlern,
- Störungsbeherrschung durch prozessabhängige Adaption der Reglerparameter für die Magnetlager,
- Sicherung des Weiterbetriebs der Anlage ohne Sicherheitseinschränkungen bei auftretenden Störungen.

Ausgehend vom Stand der Technik ist festzustellen, dass die Möglichkeiten der Diagnose an aktiven Magnetlagern bisher nur wenig zum Einsatz kommen. Größtenteils beschränkt man sich auf die Überwachung der Grenzwerte und/oder die Berechnung wirkender Kräfte. Erweiterte Diagnosekonzepte nutzen entweder signal- oder modellbasierte Verfahren für die Identifikation der Rotorparameter oder einzelner, definierter Fehler. Die vorliegende Arbeit geht darüber hinaus und kombiniert signal- und modellgestützte Verfahren der Merkmalsgewinnung mit wissensbasierten Methoden der Fehlerdiagnose zu einem hybrid aufgebauten Diagnosesystem. Ermitteltes Expertenwissen wird dabei mit einbezogen.

Übergeordnetes Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen Diagnosekonzeptes für aktiv magnetgelagerte rotierende Maschinen unter Nutzung der funktionsbedingt vorhandenen (inhärenten) Signale. Die Entwicklung erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Anpassungsfähigkeit an verschiedene Magnetlagerregelkonzepte und Anwendungsfälle. Diagnoseobjekt ist die aktiv magnetgelagerte rotierende Maschine in ihrer Gesamtheit, bestehend aus der aktiven Magnetlagerung (Wellenlagesensoren, Regler, Leistungsverstärker und Magnetlagerspulen) als auch den Komponenten Arbeitsmaschine, Antrieb, Fanglager und dem Prozess, in dem die Maschine arbeitet.

Zur Umsetzung dieses Diagnosekonzeptes werden folgenden Einzelzielsetzungen abgearbeitet.

### **1. Aufbau einer Wissensbasis zum Verhalten von aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen bei charakteristischen Fehlern**

Hierzu erfolgt im Kapitel 2 die

- Analyse charakteristischer Fehler für die Komponenten aktiv magnetgelagerter Maschinen,
- Analyse der verfügbaren Signale und Auswahl signifikanter Signale für die Überwachung und Diagnose,
- Analyse und Auswahl von Verfahren der Merkmalsgewinnung,
- Entwicklung von Modellen zur Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens der Komponenten bei Fehlern,
- Aufnahme der Signal- und Merkmalsverläufe im fehlerfreien Referenzzustand und beim Auftreten von Fehlern mit Simulationsrechnungen und Experimenten.

### **2. Analyse und Auswahl der Verfahren für die Überwachung und Fehlerdiagnose unter Nutzung der erstellten Wissensbasis**

Ausgehend von der erstellten Wissensbasis erfolgt im Kapitel 3 die Anwendung der Überwachung mit Grenzwerten und im Kapitel 4 die Entwicklung und Verifikation von wissensbasierten Modellen für die Fehlerdiagnose, welche anhand der extrahierten Symptome entsprechende Diagnoseaussagen bilden.

### **3. Technische Umsetzung und Verifikation der Verfahren**

Kapitel 5 beschreibt die technische Realisierung der gewonnenen Erkenntnisse in Form eines Diagnosesystems für PC. Optimierung, Test und Verifikation des entwickelten Diagnosesystems finden anhand von Simulationen und durch den Einsatz an realen Maschinen statt.

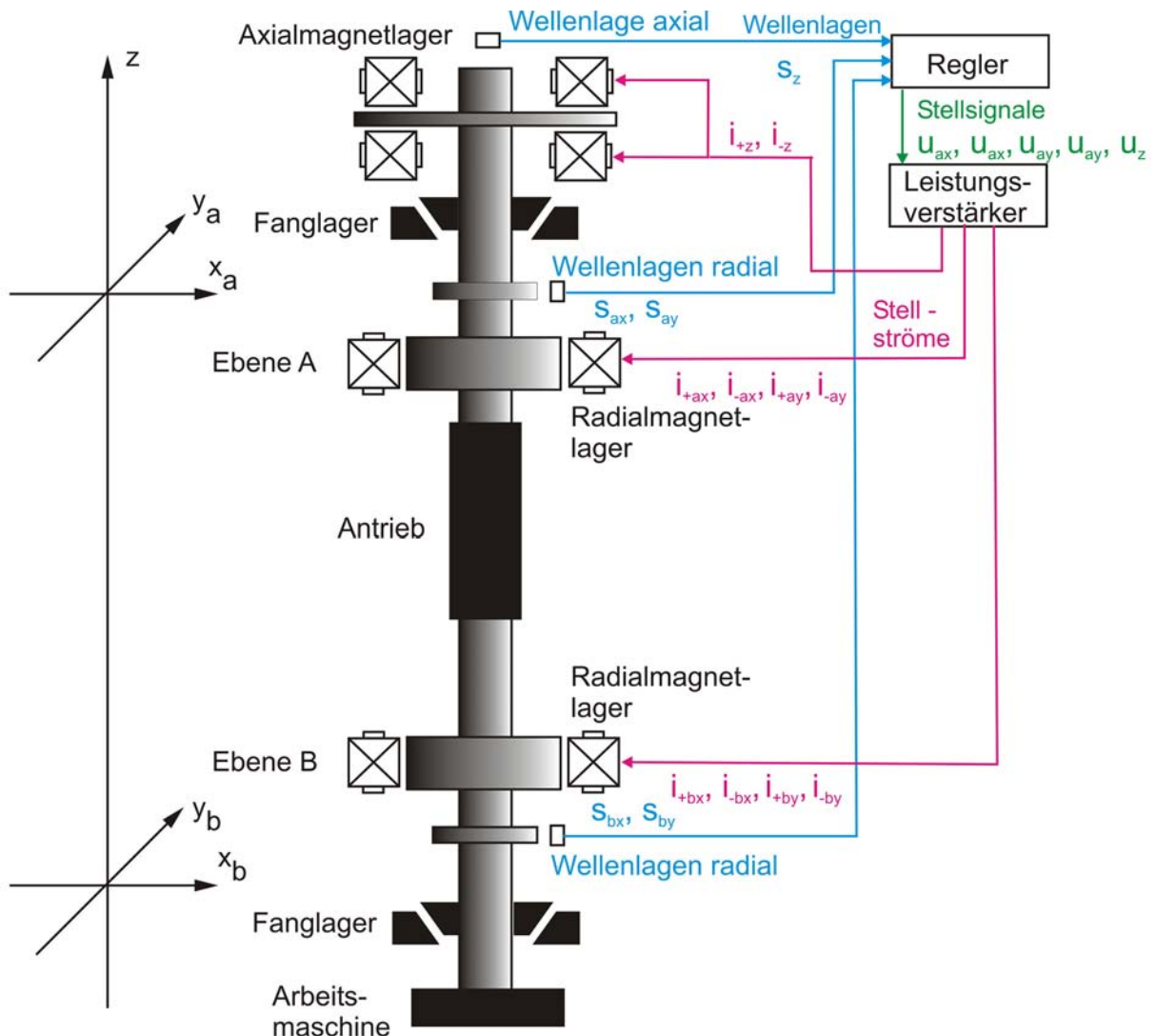
## **2 Aufbau einer Wissensbasis für die Diagnose an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen**

### **2.1 Einführung**

Unter Nutzung der an aktiven Magnetlagern verfügbaren Signale wurden Experimente und Simulationsrechnungen zur Anwendung signal- und modellgestützter Verfahren der Merkmalsgewinnung durchgeführt mit dem Ziel der Erstellung einer Wissensbasis über das Verhalten von relevanten Merkmalen bei Normalbetrieb und beim Auftreten von Fehlern. Die Wissensbasis dient als Grundlage für die Konzeption der Überwachung und Fehlerdiagnose, sie enthält Angaben über die untersuchten Fehler, denkbare Ursachen, die festgestellten charakteristischen Merkmalsverläufe, mögliche Auswirkungen und Hinweise zu Gemeinsamkeiten der Merkmalsausprägungen bei unterschiedlichen Fehlern.

In Bild 2-1 ist das Prinzip einer vollständig aktiven Magnetlagerung am Beispiel einer Maschine mit vertikalem Rotor dargestellt. Die Welle (Rotor), auf dem der Antrieb (Motor) und die Arbeitsmaschine angeordnet sind, wird durch magnetische Kräfte, welche mittels radialer und axialer Magnetlager erzeugt werden, berührungsfrei gelagert. Dazu ist eine Positionsregelung notwendig. Die Regelgröße Rotorposition wird durch Wellenlagesensoren (Abstandsmessung) für fünf Freiheitsgrade erfasst und mit den Sollwerten verglichen. Die aus der Regelabweichung vom Regler gebildeten Stellsignale wandeln Leistungsverstärker in entsprechende Stellströme um, welche durch die Magnetlagerspulen fließen und als Stellgröße anziehende Kräfte auf den Rotor prägen. Dadurch wird er in die gewünschte Sollposition geführt. Für eine vollständig aktive Lagerung ist es notwendig, radiale Magnetlager jeweils für die x- und y-Achsen der oberen (Ebene A) sowie unteren Lagerebene (Ebene B) und ein axiales Magnetlager (z-Achse) einzusetzen. Die Ströme der diametral gegenüberliegenden Spulensysteme jeder Achse werden mittels Differenzansteuerung erzeugt. Um den Rotor bei abgeschalteten Magnetlagern zu lagern bzw. bei Ausfall der Magnetlager abzufangen, sind zusätzlich axiale und radiale Fanglager angebracht. Im Normalbetrieb schwebt der Rotor reibungsfrei im Magnetlager. Auftretende Störkräfte lassen sich durch Erzeugen einer Gegenkraft mittels der Magnetlagerströme ausregeln, ohne dass dabei ein mechanischer Kontakt zum Stator auftritt. Steifigkeit und Dämpfung sind über die Regelung in weiten Grenzen einstellbar.

Dieses Funktionsprinzip mit dezentraler Regelung (separate Positionsregelung für jedes Magnetlager) und Stromsteuerung soll als Basis für die durchgeführten Untersuchungen dienen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch auf andere Funktionsprinzipien und Konstruktionen anwenden.



**Bild 2-1:** Prinzip der aktiven Magnetlagerung eines vertikalen Rotors

## 2.2 Analyse von Fehlern an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen

Für die Auswahl geeigneter Überwachungs- und Diagnoseverfahren erfolgte eine Analyse typischer Fehler. Angaben dazu lieferten folgende Quellen [AUT89, ELL91, KLE99, KOL86, MUE85, SIE96, SUN06, STU86, TRA93]:

- Datenblätter und Wartungsunterlagen,
- Untersuchungen des Betriebsverhaltens,
- Einsatz von Modellen,
- Erfahrungen bei konventionell gelagerten Maschinen.

### Magnetlagerregelkreis

Fehler im Magnetlagerregelkreis, bestehend aus Wellenlagesensor, Signalkonditionierung, Regler, Leistungsverstärker und Magnetlagerspule (Aktor) sind zum einen Verstärkungs- (multiplikative Fehler), Offset- (additive Fehler) und Linearitätsfehler der elektrischen und elektronischen Komponenten, verursacht durch Alterung, Drift und äußere Störeinflüsse (Temperatur o. ä.). Zum anderen sind grobe Fehler infolge von Defekten an Einzelkomponenten, wie z. B. Leitungsbrüche, Kurzschlüsse oder mechanische Beschädigung zu betrachten. Weitere Ursachen sind Verschiebungen der Sensor- bzw. Aktorachse und Veränderung der Luftspalte durch mechanische oder thermische Einflüsse.

### Arbeitsmaschine/Arbeitsprozess

Als Arbeitsmaschine versteht man den Rotor und die daran angeschlossenen Maschinenteile, auf die auch Störungen vom Arbeitsprozess eingekoppelt werden. Abweichungen vom normalen Betriebszustand entstehen durch:

- statische und dynamische Unwuchten infolge mechanischer oder thermischer Einflussfaktoren (z. B. durch Wellenriss, Wellenbiegung, Schaufelverlust, Dehnung, Erosion, Deformationen, Anbackungen, Werkzeugbruch);
- Fluchtfehler bei angekoppelten Maschinenteilen (z. B. Motorankopplung);
- Belastungen der Arbeitsmaschine durch den Prozess wie
  - axiale und radiale Prozesskräfte bei Werkzeugmaschinen,
  - Interaktionen von Strömungskräften mit dem Rotor,
  - Bewegungen des Arbeitsmediums,
  - Druckänderungen (Kavitation) und Turbulenzen im Arbeitsmedium,
  - erhöhte Turbulenzen durch Schaufel- und Flügelpassierfrequenzen,
  - Fundamentalschwingungen;
- mechanische Lockerungen rotierender Maschinenteile;
- Anstreibvorgänge am Fanglager bzw. Stator;
- elektromagnetische und mechanische Einflüsse durch den Antrieb;
- Eigenschwingungen (Nutationen, Präzessionen, Pendelschwingungen);
- Resonanzen beim Durchfahren kritischer Drehzahlen.

### Antrieb

Fehler am Antrieb (Motor und Antriebssteuerung) können mit den inhärenten Signalen nur erkannt werden, wenn sie auf diese zurückwirken. Dabei spielen vor allem elektromagnetische Zugkräfte eine Rolle, die durch

- Dejustierungen des Stators durch mechanische oder thermische Einflüsse,
- Wicklungsschäden am Motor,
- Käfig-, Läufer-, Statorschäden,
- ungleiche Luftspalte

verursacht werden können. Weiterhin werden Fehler verursacht durch Beschleunigungskräfte bei betriebsbedingter Änderung der Rotordrehzahl oder bei Drehzahländerungen aufgrund von Defekten an der Antriebssteuerung (Strom-, Spannungs-, Frequenzschwankungen) bzw. Netzspannungs- und Netzfrequenzschwankungen.

Bei konventioneller Lagerung des Motors sind die bei herkömmlichen Lagern auftretenden Fehler mit zu berücksichtigen, welche über die Ankupplung des Motors auf den magnetgelagerten Rotor übertragen werden (siehe Fanglager).

### Fanglager

Für die Fanglager sind überwiegend Wälzlager im Einsatz, eine Schädigung dieser tritt hauptsächlich infolge störungsbedingten Abwurfs des Rotors und des An- und Abfahrens der Maschine auf. Daraus resultierender Verschleiß, Verschmutzungen und Überlastungen führen bei Wälzlagern zu Schäden an Wälzkörpern, des Käfigs und der inneren bzw. äußeren Rollbahn, welche sich in veränderten Lagerspielen und erhöhter Schwingungsemission äußern. Bei Gleitlagern sind Ölfilmwirbel (Oil-Whirl, Oil-Whip) und Veränderungen des Schmierfilms, die im ungünstigsten Fall zu Anstreichungen im Gleitlager führen, als Schäden zu betrachten [ELL91].

Bei der Diagnose der Fanglager sind die Magnetlager auch zur Erzeugung von Kräften auf die Fanglager einsetzbar, es lässt sich so das Verhalten bei definierten Belastungen untersuchen.

### Betriebsregime

Abweichungen vom normalen Betriebsregime entstehen während des Ein- und Ausschaltens der Magnetlager, beim Hochfahren auf Nenndrehzahl und beim Abfahren zum Rotorstillstand bzw. bei betriebsbedingten Drehzahländerungen.

### 2.3 Diagnosesignale

Für die Diagnose aktiv magnetgelagerter Maschinen sind entsprechend Bild 2-1 die nachfolgend angegebenen Signale nutzbar.

- Die funktionsbedingt gemessenen Wellenlagesignale der x-, y- und z-Achse (Auslenkung des Wellenmittelpunktes des Rotors aus der Sollposition):

x- und y-Achse oberes Radiallager  $s_{ax}, s_{ay}$

x- und y-Achse unteres Radiallager  $s_{bx}, s_{by}$

z-Achse (Axiallager)  $s_z$

- Die funktionsbedingt für die Stromsteuerung gemessenen Stellströme  $i$  (Stellsignale) durch die pro Achse paarweise gegenüberliegend angeordneten Magnetlagerspulen:

x- und y-Achse oberes Radiallager  $i_{+ax}, i_{-ax}, i_{+ay}, i_{+ay}$

x- und y-Achse unteres Radiallager  $i_{+bx}, i_{-bx}, i_{+by}, i_{+by}$

z-Achse (Axiallager)  $i_{+z}, i_{-z}$

Bei der eingesetzten Differenzansteuerung der paarweise gegenüber angeordneten Magnetlagerspulen ergeben sich die Spulenströme (Magnetlagerströme) aus einem Grunderregerstrom  $I_G$  und einem variablen Steuerstrom  $i_S$ . In einem Spulensystem fließt der Strom  $i_+ = I_G + i_S$ , im entgegengesetzten Spulensystem der Strom  $i_- = I_G - i_S$ . Die Differenzbildung kann in den Leistungsverstärkern oder schon im Regler erfolgen.

Die Steuer- und Grunderregerströme lassen sich aus den gemessenen Magnetlagerströmen  $i_+$  und  $i_-$  für jede Achse berechnen:

$$\text{Steuerstrom} \quad i_S = (i_+ - i_-)/2 \quad (\text{z. B. } i_{Sax}) \quad (2-1)$$

$$\text{Grunderregerstrom} \quad I_G = (i_+ + i_-)/2 \quad (\text{z. B. } I_{Gax}) \quad (2-2)$$

Erfolgt die Grunderregung über separate Grunderregerwicklungen und die Differenzbildung über entsprechend gegeneinander geschaltete Spulen, dann stehen anstatt der Differenzströme  $i_+$  und  $i_-$  die jeweiligen Steuerströme und Grunderregerströme direkt als Messwerte zur Verfügung.



Sind die Ausgangssignale des Reglers messtechnisch erfassbar, können auch diese für die Diagnose verwendet werden:

x- und y-Achse oberes Radiallager	$u_{Sax}, u_{Say}$ bzw. $u_{+ax}, u_{-ax}, u_{+ay}, u_{-ay}$
x- und y-Achse unteres Radiallager	$u_{Sbx}, u_{Sby}$ bzw. $u_{+bx}, u_{-bx}, u_{+by}, u_{-by}$
z-Achse (Axiallager)	$u_{Sz}$ bzw. $u_{+z}, u_{-z}$

Aus den Wellenlagesignalen (Luftspalten) und den Lagerströmen werden die von den Magnetlagern pro Achse und Ebene erzeugten Kräfte  $F_{ax}, F_{ay}, F_{bx}, F_{by}$  und  $F_z$  nach Gleichung (2-3) berechnet [STE03].

$$F = K_1 \left( \frac{i_+^2}{(V_1 + 2(s_{nom} - s))^2} - \frac{i_-^2}{(V_2 + 2(s_{nom} + s))^2} \right) \quad (2-3)$$

$F$	resultierende Gesamtkraft der zwei gegenüberliegenden Spulensysteme
$s_{nom}$	nominaler Luftspalt
$s$	Wellenlage (Abweichung von nominaler Position)
$i_+, i_-$	Magnetlagerspulenströme
$K_1$	Spulenkonstante
$V_1, V_2$	von Permeabilität und Spulenkonstruktion abhängige Variablen

In Gleichung (2-3) sind Verluste durch Streufluss, Wirbelströme, Sättigungseffekte, Hysterese sowie ohmsche Verluste nicht berücksichtigt. Die berechnete Kraft ist höher als die tatsächlich wirkende. Diese Abweichung bei der Kraftberechnung lässt sich empirisch mittels eines Korrekturfaktors oder durch Einsatz modellgestützter Verfahren korrigieren [NOR97, BAU95]. Der funktionelle Zusammenhang zwischen Lagerstrom, Luftspalt und Kraft kann auch experimentell ermittelt und in Kennfeldern abgelegt werden. Die Verwendung von Kennfeldern bietet zudem den Vorteil einer schnellen Bestimmung der Kräfte bei umfangreichen Berechnungsgleichungen. Für die Kraftermittlung wird anhand der aktuellen Strom- und Luftspaltwerte das Feldelement mit der zugehörigen Kraft ausgelesen.

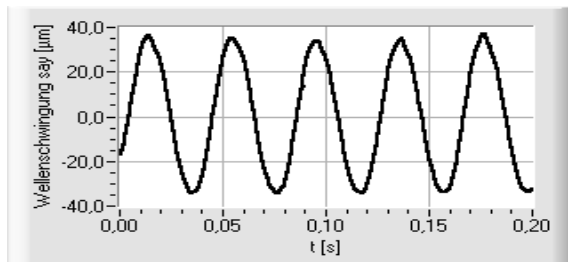
Aus den Zeitverläufen der Signale  $q$  der x- und y-Achse des jeweiligen Radiallagers erfolgt die Berechnung des Phasenwinkels  $\varphi$  (Richtung) und des Betrages  $r$  des Signalvektors.

Betrag des Vektors (Ausschlag aus der Sollposition)	$r q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$	(z. B. $r s_a$ )	(2-4)
--	------------------------------	------------------	-------

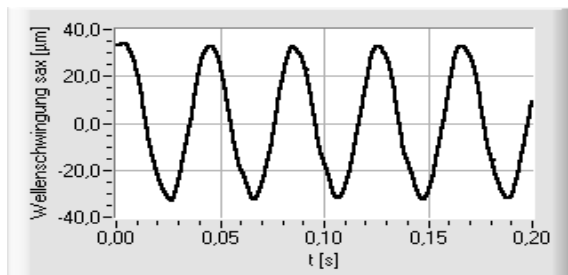
Phasenwinkel (Phase) des Vektors	$\varphi q = \arctan\left(\frac{q_y}{q_x}\right)$	(z. B. $\varphi s_a$ )	(2-5)
----------------------------------	---	------------------------	-------

Die erfassten Signale lassen sich grafisch darstellen als

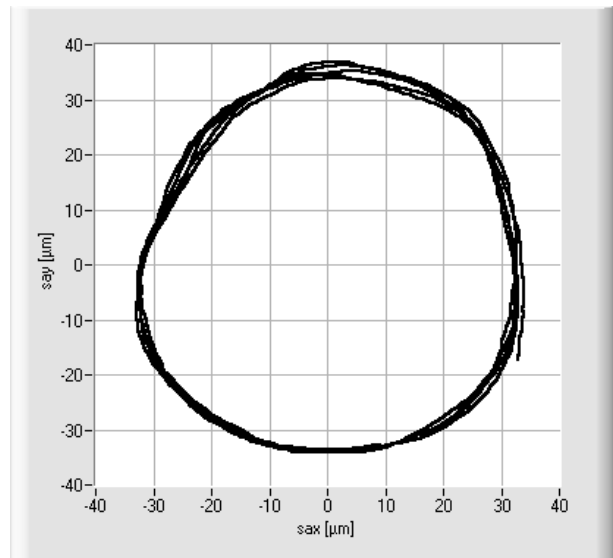
- Schwingung über der Zeit in den einzelnen Achsen und Ebenen (Bild 2-2 und Bild 2-3),
- Kinetische Wellenmittelpunktbahn (Orbit) in der Darstellung der Signale der y-Achse über denen der x-Achse der jeweiligen Ebene (Bild 2-4),
- Betrag des Vektors über der Zeit in Form des Ausschlages (Bild 2-5),
- Phasenwinkel über der Zeit (Bild 2-6).



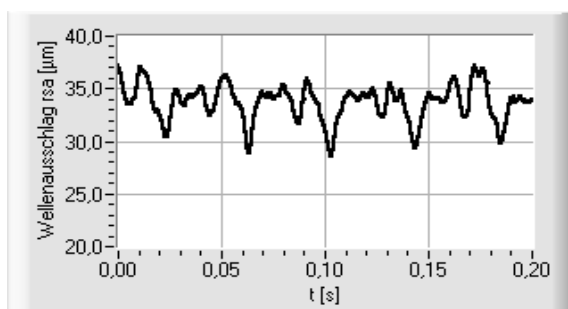
**Bild 2-2:** Wellenschwingung  $s_{ay}=f(t)$



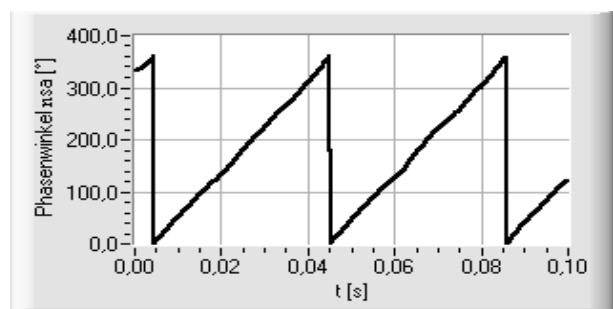
**Bild 2-3:** Wellenschwingung  $s_{ax}=f(t)$



**Bild 2-4:** Wellenmittelpunktbahn (Orbit)  $s_{ay}$  über  $s_{ax}$



**Bild 2-5:** Wellenausschlag  $r_{s_a}=f(t)$



**Bild 2-6:** Phasenwinkel  $\varphi_{s_a}=f(t)$

Neben diesen systeminhärenten Signalen sind gegebenenfalls zusätzlich aus dem Prozess verfügbare Informationen für die Diagnose nutzbar, z. B.

- Drehzahl und Drehwinkel des Rotors,
- Gehäuseschwingungen,
- Temperaturen in den Fanglagern und Magnetlagern,
- die Belastung der Fanglager beim Abwurf durch Messung der Kraftwirkung,

- Strom, Spannung, Frequenz am Frequenzumrichter der Motorsteuerung,
- Prozessdrücke (bei Pumpen und Verdichtern),
- Magnetflüsse in den Lagerspulen.

## 2.4 Merkmalsgewinnung

### 2.4.1 Signalgestützte Verfahren der Merkmalsgewinnung

Die in 2.3 benannten Signale werden mit einer vorgegebenen Abtastrate erfasst und stehen als Messwerte zur Verfügung. Die notwendige Abtastrate ist abhängig von der Drehzahl des Rotors, es sollten jeweils mindestens 10 Messwerte pro Rotorumdrehung aufgenommen werden. Daraus erfolgt durch den Einsatz signalgestützter Verfahren die Berechnung der Merkmale über mindestens je eine Rotorumdrehung. Aus der Vielzahl der möglichen Merkmale werden die nachfolgend angegebenen genutzt und für den Diagnoseeinsatz untersucht:

- (arithmetischer) Mittelwert  $\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i$  (z. B.  $\bar{s}_{ax}$ ) (2-6)

- (offsetfreier) Effektivwert (Standardabweichung)  $\tilde{q} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2}$  (z. B.  $\tilde{s}_{ax}$ ) (2-7)

- maximaler Spitzenwert  $q_{Max} = MAX \{q(t)\}$  (z. B.  $s_{axMax}$ ) (2-8)

- minimaler Spitzenwert  $q_{Min} = MIN \{q(t)\}$  (z. B.  $s_{axMin}$ ) (2-9)

- Spannweite  $q_{Sp} = q_{Max} - q_{Min}$  (z. B.  $s_{axSp}$ ) (2-10)

Aus diesen primären lassen sich weitere kombinierte Merkmale bilden:

- Phasenwinkel  $\varphi_{q_{Max}}$  beim Maximalwert des Betrages des Vektors  $rq_{Max}$  (z. B.  $\varphi_{s_{aMax}}$ )
- Phasenverschiebung  $\Delta\varphi_{Max}$  zwischen den Phasenwinkeln  $\varphi_{q_{Max}}$  der Signalvektoren der Ebenen A und B

$$\Delta\varphi_{Max} = \varphi_{q_{aMax}} - \varphi_{q_{bMax}} \quad (\text{z. B. } \Delta\varphi_{s_{Max}}) \quad (2-11)$$

- Crestfaktor C (Maß für die Spitzenhaltigkeit im Signalverlauf)

$$C = \frac{q_{Max}}{\tilde{q}} \quad (\text{z. B. } C_{s_{ax}}) \quad (2-12)$$

- Formfaktor  $\Gamma$  (Maß für schadensspezifische nichtharmonische Signalkomponenten)

$$\Gamma = \frac{q_{Max}}{\bar{q}} \quad (\text{z. B. } \Gamma_{s_{ax}}) \quad (2-13)$$

- Verhältnis  $W$  der Stellstromeffektivwerte zu den Wellenlageeffektivwerten der Achse

$$W = \frac{\tilde{i}}{\tilde{s}} \quad (\text{z. B. } W_{ax}) \quad (2-14)$$

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

$$R = \frac{\tilde{s}}{\tilde{u}} \quad (\text{z. B. } R_{ax}) \quad (2-15)$$

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

$$A = \frac{\tilde{u}}{\tilde{i}} \quad (\text{z. B. } A_{ax}) \quad (2-16)$$

- Verhältnis  $V$  der Stellstromeffektivwerte der jeweils gegenüberliegenden Magnetlager-  
spulen

$$V = \frac{\tilde{i}_+}{\tilde{i}_-} \quad (\text{z. B. } V_{ax}) \quad (2-17)$$

Neben diesen Merkmalen in Form von Kenngrößen werden auch die Signalkennfunktionen

- Kreuzkorrelationsfunktion und
- Fourier-Transformation

berechnet [STU86, SCHR90] und für die Diagnose genutzt.

Die diskrete Kreuzkorrelationsfunktion KKF

$$KKF_{qr}(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N q(m) \cdot r(m+k) \quad (2-18)$$

gibt den Zusammenhang (Korrelation) zweier diskret abgetasteter Signalverläufe  $q(t)$  und  $r(t)$  in Abhängigkeit der zwischen ihrem Auftreten liegenden zeitlichen Verschiebung  $k$  an. Ist  $q(t)$

der Verlauf des Eingangssignals eines Übertragungsgliedes und  $r(t)$  des korrelierten Ausgangssignals, ergibt sich bei einer Verschiebung um  $k$  ein Maximum der Funktion. Daraus lässt sich die Laufzeit des Signals im Übertragungsglied  $\tau_{qr}$

$$\tau_{qr} = k \cdot T_a \quad (2-19)$$

$T_a$  Abtastzeit

als Merkmal bestimmen.

Die diskrete Fourier-Transformation

$$FT_q(f) = \sum_{k=1}^N q(k) \{ \cos(2\pi f k) - j \sin(2\pi f k) \} \quad (2-20)$$

stellt die in einem Zeitsignal enthaltenen Frequenzanteile dar. Der Betrag von  $FT_q(f)$  liefert das Amplitudenspektrum. Die Ausschläge der Frequenzen im Amplitudenspektrum (Linien) entsprechen den Effektivwerten der jeweiligen Frequenzen im Zeitsignal. Charakteristische Frequenzen eines Zeitsignals erscheinen im Amplitudenspektrum als Spitzen, so genannte Peaks.

Eine wichtige Information für die Diagnose rotierender Maschinen ist die Rotordrehzahl  $n$ . Diese lässt sich über das Amplitudenspektrum ermitteln, wenn keine separate Drehzahlmessung über Sensoren möglich ist. Unter der zumeist gegebenen Voraussetzung, dass die (Rest-) Unwuchten des Rotors den Hauptanteil der periodischen Schwingungen bei der Drehfrequenz bilden, kann die Frequenz des ersten Peaks im Amplitudenspektrum als Maß für die Rotordrehzahl verwendet werden.

Neben der Rotordrehzahl  $n$  ist auch der Rotordrehwinkel  $\gamma$  ein wesentliches Diagnosemerkmal. Wird bei der Drehzahlmessung mit zusätzlichem Sensor ein Signal beim periodischen Durchlauf einer am Rotorumfang angebrachten Marke gebildet (Keyphasor), lässt sich der Rotordrehwinkel zu diesem Zeitpunkt als absoluter Referenzpunkt für  $\gamma = 0$  nutzen. Ist ein solcher nicht verfügbar, kann ein Scheitelpunkt der durch (Rest-) Unwuchten verursachten Schwingung oder deren Nulldurchgang, abgeleitet von einem festgelegten radialen Wellenlagesignal, als relativer Referenzpunkt eingesetzt werden.

Der Rotordrehwinkel  $\gamma$  zum Zeitpunkt  $t$  berechnet sich dann nach Gleichung (2-21).

$$\gamma = (t - t_{\gamma 0}) \cdot n \cdot 360^\circ \quad (2-21)$$

$t$  aktueller Zeitpunkt

$t_{\gamma 0}$  Zeitpunkt bei Rotordrehwinkel  $\gamma = 0$

$n$  Rotordrehzahl [ $s^{-1}$ ]

Der Phasenwinkel  $\gamma_U$ , welcher ein Merkmal für die Lokalisation von Unwuchten ist, ergibt sich aus dem Phasenwinkel  $\varphi$  beim Rotordrehwinkel  $\gamma = 0$ . Die Phasenverschiebung  $\Delta\gamma$  zwischen den Phasenwinkeln  $\gamma_U$  der Radiallagerebenen berechnet man mit Gleichung (2-22).

$$\Delta\gamma = \gamma_{Ua} - \gamma_{Ub} \quad (2-22)$$

## 2.4.2 Modellgestützte Verfahren der Merkmalsgewinnung

### 2.4.2.1 Parameteridentifikation

Bei der Anwendung von Parameteridentifikationsverfahren wird der zu untersuchende Prozess durch ein Modell mit Modellparametern beschrieben. Unter Nutzung der Ein- und Ausgangssignale des Prozesses werden mit einer geeigneten Methode (z. B. Methode der kleinsten Fehlerquadrate) die Modellparameter ermittelt, bei denen der Fehler zwischen den Signalen von Modell und Prozess minimal wird.

Damit lassen sich die Parameter des Prozesses identifizieren und Abweichungen dieser in Form von Residuen bilden. Geeignet ist dieses Verfahren hauptsächlich zur Erkennung von multiplikativen Fehlern bei linearen dynamischen Prozessen, es kann auch im geschlossenen Regelkreis eingesetzt werden. Eine Anwendungsmöglichkeit bei aktiven Magnetlagern ist die Erkennung von Parameteränderungen der Übertragungsglieder des Magnetlagerregelkreises.

Da die Messwerte aufgrund der digitalen Messwerterfassung als zeitdiskrete Werte der Eingangssignale  $x(z)$  und der Ausgangssignale  $y(z)$  erfasst werden, ist für den zu untersuchenden Prozess von der zeitdiskreten  $z$ -Übertragungsfunktion [ISE88, BÜT91]

$$G(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (2-23)$$

auszugehen.

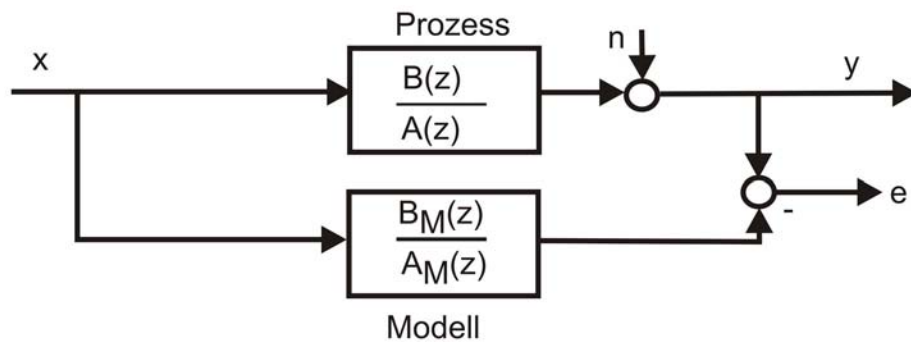
Als Fehlersignale  $e(z)$  sind der Ausgangsfehler (Bild 2-7)

$$e(z) = y(z) - \frac{B_M(z)}{A_M(z)} x(z) \quad (2-24)$$

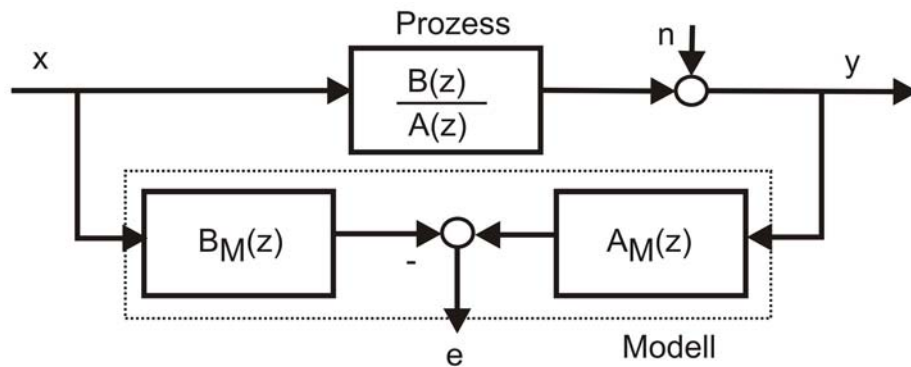
oder der Gleichungsfehler (Bild 2-8)

$$e(z) = A_M(z)y(z) - B_M(z)x(z) \quad (2-25)$$

nutzbar [ISE94]. Die Störsignale  $n(z)$  müssen stationär und im Mittelwert = 0 sein.



**Bild 2-7:** Bildung des Ausgangsfehlers



**Bild 2-8:** Bildung des Gleichungsfehlers

Für die numerische Berechnung wird von der Differenzgleichung des zu untersuchenden Prozesses mit den bis zum Zeitpunkt  $k$  gemessenen Eingangs-  $x(k)$  bzw. Ausgangssignalwerten  $y(k)$  sowie den Modellparametern  $c_n$  und  $d_n$

$$y(k) = -c_1 y(k-1) - \dots - c_n y(k-n) + d_0 x(k) + d_1 x(k-1) + \dots + d_n x(k-n) \quad (2-26)$$

ausgegangen.

Bei Verwendung der mit  $M$  Messungen ermittelten Eingangssignale  $x(m)$  und Ausgangssignale  $y(m)$  sowie des Gleichungsfehlers  $e(m)$  ergibt sich mit dem Messvektor der Ausgangssignale  $\underline{y}^T$

$$\underline{y}^T = y(k) + y(k+1) + \dots + y(k+M-1),$$

der Messmatrix der Ein- und Ausgangssignale  $\underline{\Psi}$

$$\underline{\Psi} = \begin{bmatrix} -y(k-1) & \dots & -y(k-n) & x(k) & \dots & x(k-n) \\ -y(k) & \dots & -y(k-n+1) & x(k+1) & \dots & x(k-n+1) \\ \dots & & & \dots & & \\ -y(k+M-2) & \dots & -y(k-n+M-2) & x(k+M-1) & \dots & x(k-n+M-1) \end{bmatrix},$$

dem Parametervektor  $\underline{\Theta}^T$

$$\underline{\Theta}^T = [c_1 \dots c_n \quad d_0 \dots d_n],$$

und dem Fehlervektor  $\underline{e}^T$

$$\underline{e}^T = [e(k) \quad e(k+1) \quad \dots \quad e(k+M-1)]$$

ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem.

$$\underline{y} = \underline{\Psi} \cdot \underline{\Theta} + \underline{e} \tag{2-27}$$

Durch Minimieren des quadratischen Fehlers  $\underline{e}^T \cdot \underline{e}$  mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate [ISE94] erhält man den geschätzten Parametervektor  $\underline{\Theta}$

$$\underline{\Theta} = [\underline{\Psi}^T \cdot \underline{\Psi}]^{-1} \cdot \underline{\Psi}^T \cdot \underline{y} \tag{2-28}$$

#### 2.4.2.2 Parallelmodelle und Beobachter

Sind die Eingangsgrößen eines Prozesses messbar und ist dessen Übertragungsverhalten bekannt, lassen sich Parallelmodelle ohne Rückführung zur Bestimmung nicht messbarer Prozessgrößen einsetzen. Um bleibende Fehler zwischen den Zustandsgrößen von Prozess und Modell zu minimieren, muss das Modell den Prozess exakt widerspiegeln. Bei auftretenden Anfangsfehlern ergeben sich in Abhängigkeit von der Prozessdynamik lange Konver-



genzzeiten bis zur Übereinstimmung der Zustandsgrößen. Zur Verringerung dieser Konvergenzzeit und zur Minimierung der Abweichungen zwischen Prozess und Modell ist eine Rückführung in Form einer Rückkopplung des Rekonstruktionsfehlers möglich [HAM93]. Parallelmodelle mit Rückführung werden meist im Zustandsraum als Zustandsbeobachter dargestellt. Verfahren der Zustandsschätzung mittels Zustandsbeobachtern lassen sich einsetzen zur Erkennung von additiven Fehlern, z. B. Offsetfehlern bei Sensoren und Aktoren. Sie bieten den Vorteil einer schnellen Fehlererkennung und sind auch für stationären Prozessbetrieb geeignet. Abweichungen zwischen Prozess- und Modellverhalten werden durch so genannte Residuen angezeigt. Eine geeignete Strukturierung dieser und die Wahl geeigneter Koeffizienten der Rückführmatrix führt zu erhöhten Auslenkungen der Residuen bei zugeordneten Fehlern [ISE94]. Durch Nutzung mehrerer, jeweils auf definierte Fehler optimierter Beobachter (Beobachterbänke) ist eine Fehlerisolation möglich.

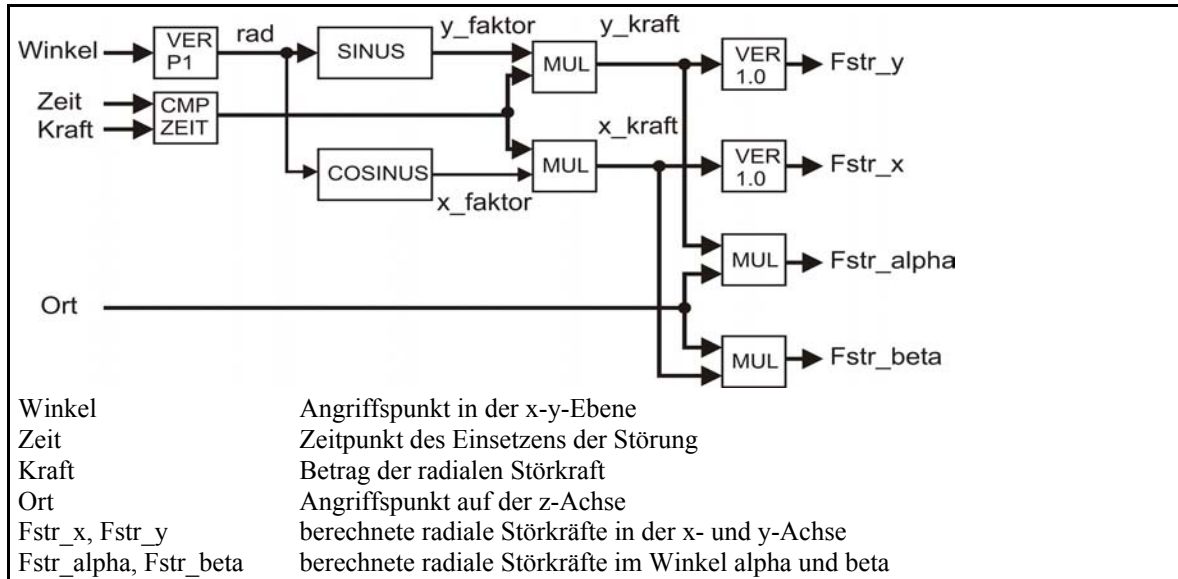
## **2.5 Simulationsrechnungen**

### **2.5.1 Simulationswerkzeuge**

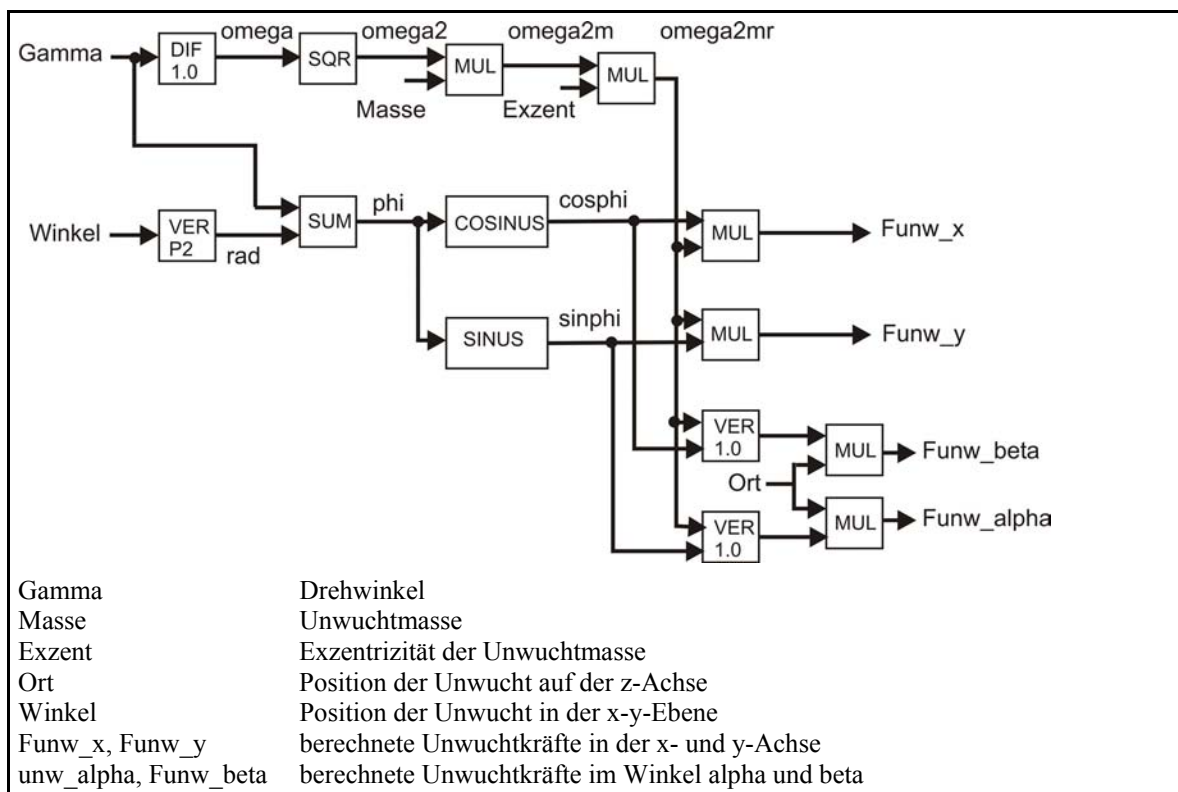
Die Erstellung der Modelle und Programme zur Realisierung der Simulationsrechnungen geschieht unter Nutzung des Simulationssystems für Magnetlager MLDyn [STE95] sowie der Programmiersprachen Matlab/Simulink [MAL05] und LabVIEW [NIN05]. MLDyn ist modular aufgebaut, es besteht aus einem Modul mit dem mathematischen 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. Für die MLDyn-Module erfolgt eine Portierung auf Simulink, um die Vorteile dieser Programmierumgebung auf Basis der vorhandenen Modellstrukturen zu nutzen. Simulink und LabVIEW ermöglichen die grafische Programmierung technisch-wissenschaftlicher Probleme. Die Untersuchungen zum Einsatz von Parameteridentifikationsverfahren und die Darstellung der Simulationsergebnisse werden auf der Basis von LabVIEW-Programmen durchgeführt. Eine tabellarische Übersicht über die erstellten Programme und deren Funktionen gibt Anhang C.

## 2.5.2 Modelle für die Simulation von Fehlern

Zur Simulation von Störungen durch Radialkräfte und Unwuchten wurden für das Simulationssystem MLDyn die Module "Stoer\_r" (Bild 2-9) und "Stoer\_uw" (Bild 2-10) erstellt und in das Gesamtmodell des Magnetlagerregelkreises implementiert.



**Bild 2-9:** Koppelplan des MLDyn-Moduls "Stoer\_r" (statische Radialkraft)



**Bild 2-10:** Koppelplan des MLDyn-Moduls "Stoer\_uw" (Unwucht)

Die Simulation von Offset-, Verstärkungs- und Linearitätsfehlern erfolgt durch Veränderung der Parameter bzw. der Übertragungsfunktionen.

### 2.5.3 Simulationsergebnisse

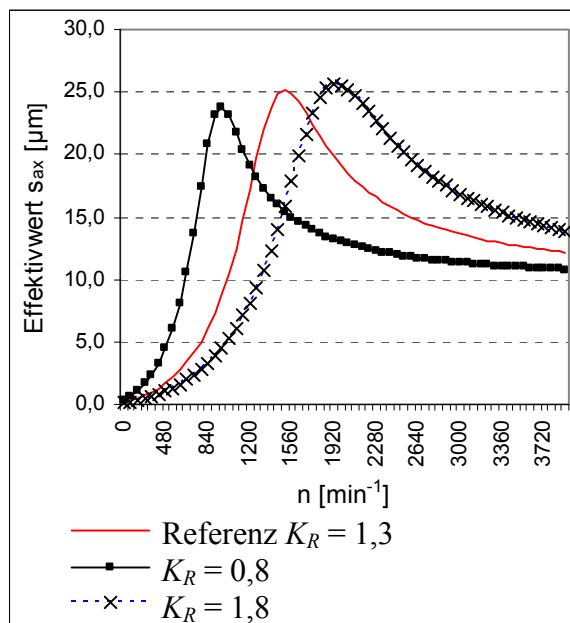
Folgende Fehler und Effekte wurden simuliert und untersucht:

- Drehzahlabhängigkeit der Signale,
- Offset-, Verstärkungs-, Linearitätsfehler der Messeinrichtungen,
- Dejustierungen der Sensorsysteme,
- Parameterveränderungen der Regler,
- Offset-, Verstärkungs-, Linearitätsfehler und Asymmetrien der Stellglieder,
- Verschiebung der Lager- und Sensorachsen,
- statische Radialkräfte,
- Unwuchten.

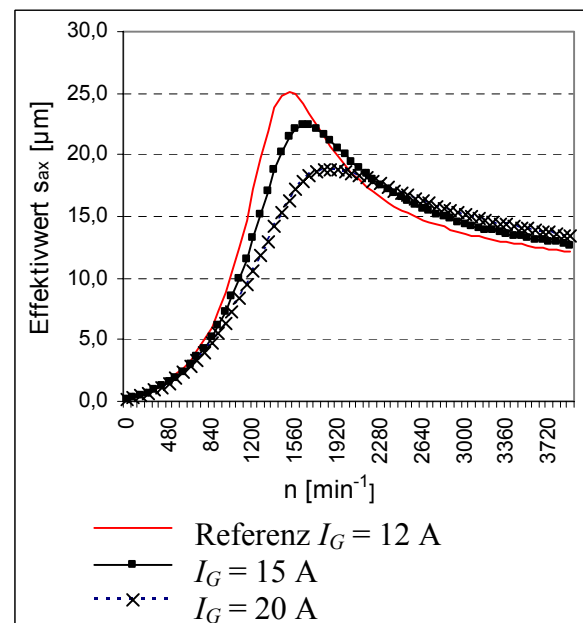
Beispielhaft sind nachfolgend Resultate der Simulationsrechnungen dargestellt. Eine Übersicht zu den durchgeführten Simulationsrechnungen liefert Anhang B.

#### Einfluss von Regelkreisparametern auf Wellenschwingungen und Stellströme

Der Einfluss der Regelkreisparameter Grunderregerstrom  $I_G$  der Leistungsverstärker und Verstärkung  $K_R$  des Reglers auf das Verhalten der Effektivwerte der Wellenlagesignale im geschlossenen Magnetlagerregelkreis und deren Drehzahlabhängigkeit sind in den Bildern 2-11 und 2-12 dargestellt.



**Bild 2-11:** Effektivwerte der Wellenschwingung  $\tilde{s}_{ax}$  bei Variation der Reglerverstärkung  $K_R$



**Bild 2-12:** Effektivwerte der Wellenschwingung  $\tilde{s}_{ax}$  bei Variation des Grunderregerstromes  $I_G$

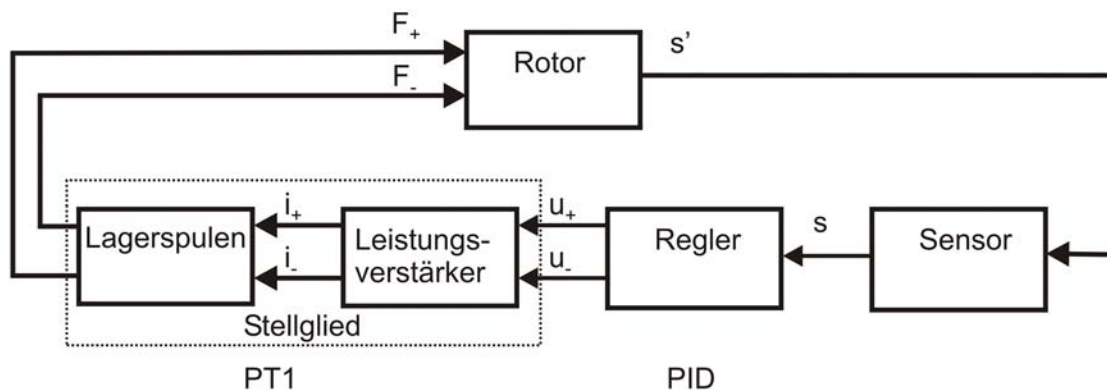
Die Referenzeinstellungen sind  $I_G = 12 \text{ A}$  und  $K_R = 1,3$ , die Exzentrizität  $e$  des Rotors ist auf  $10 \text{ }\mu\text{m}$  gesetzt. Simuliert wird eine Erhöhung von  $I_G$  auf  $15 \text{ A}$  und  $20 \text{ A}$  sowie eine Veränderung von  $K_R$  auf  $0,8$  bzw.  $1,8$ , jeweils im Regelkreis der oberen x-Achse. Die kritische Drehzahl, bei der das Maximum der Effektivwerte auftritt, wird hauptsächlich durch  $K_R$  beeinflusst.  $I_G$  bestimmt die Höhe der Effektivwerte bei dieser Drehzahl. Der Anstieg der Werte beim Erreichen kritischer Drehzahlen ist in der Grenzwertüberwachung und beim Entwurf der Diagnosemodelle zu berücksichtigen.

Die Regelkreisparameter haben entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems, ihre Kenntnis ist für die Diagnose wesentlich.

### Detektion von Parameterveränderungen im Magnetlagerregelkreis

Zur Bestimmung der Regelkreisparameter wurde der Einsatz von Verfahren der Parameteridentifikation am Regler und Stellglied (Aktor) untersucht. Die Simulation erfolgt mit praxisrelevanten Parametern für den Versuchsstand FLP 500. Vorhandene Restunwuchten des Rotors sorgen mit einem sinusförmigen Signal für die notwendige Anregung des Systems. Die maximalen Amplituden der durch Restunwuchten erregten Auslenkung der Wellenlagen liegen bei  $20,3 \text{ }\mu\text{m}$ . Die Messwerte werden bei einer Drehzahl  $n = 878 \text{ min}^{-1}$  mit einer Abtastfrequenz  $f_a = 10 \text{ kHz}$  bzw. einer Abtastzeit  $T_a = 0,1 \text{ ms}$  erfasst.

Die Signale  $s$  der Wellenlagesensoren dienen als Eingangssignale des Reglermodells, die Reglerausgangssignale  $u_+$  und  $u_-$  als Modellausgangssignale (Bild 2-13). Der untersuchte Regler hat PID-Verhalten. Das System Stellglied, bestehend aus Magnetlagerspule und Leistungsverstärker, wird mit PT1-Verhalten modelliert. Die Totzeit des Leistungsverstärkers (Pulsweitenmodulation) wird vernachlässigt, da sie unterhalb der Abtastzeit der Messung liegt.



**Bild 2-13:** Signalfluss im Magnetlagerregelkreis

Beim Stellgliedmodell werden die Reglerausgangsspannungen als Modelleingangssignale und die von den Leistungsverstärkern in den Magnetlagerspulen erzeugten Ströme  $i_+$  und  $i_-$  als Modellausgangssignale genutzt.

Die Differentialgleichung des PID-Reglers [WEN02]

$$y(t) = K_R \left[ x(t) + \frac{I}{T_N} \int x(t) dt + T_V \frac{dx(t)}{dt} \right] \quad (2-29)$$

$K_R$  Reglerverstärkung

$T_V$  Vorhaltezeit

$T_N$  Nachstellzeit

wird nach einfacher Differentiation über die Rückwärtsdifferenz in die Differenzgleichung (2-30) überführt:

$$y(k) = K_R \left[ \left( 1 + \frac{T_a}{T_N} + \frac{T_V}{T_a} \right) x(k) - \left( 1 + \frac{2T_V}{T_a} \right) x(k-1) + \frac{T_V}{T_a} x(k-2) \right] + y(k-1) \quad (2-30)$$

$T_a$  Abtastzeit

Mit zusammengefassten Modellparametern ergibt sich die Gleichung (2-31).

$$y(k) = d_0 x(k) + d_1 x(k-1) + d_2 x(k-2) + y(k-1) \quad (2-31)$$

Die Rückrechnung der Modellparameter  $d_0$ ,  $d_1$  und  $d_2$  in die Reglerparameter der Differentialgleichung (Prozessparameter) erfolgt mit den Gleichungen (2-32), (2-23) und (2-34).

$$K_R = d_0 - d_2 \quad \text{Reglerverstärkung} \quad (2-32)$$

$$T_N = \frac{d_0 - d_2}{d_0 + d_1 + d_2} \cdot T_a \quad \text{Nachstellzeit} \quad (2-33)$$

$$T_V = \frac{d_2}{d_0 - d_2} \cdot T_a \quad \text{Vorhaltezeit} \quad (2-34)$$

$T_a$  Abtastzeit

Für das Stellglied mit der Differentialgleichung

$$T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_p \cdot x(t) \quad (2-35)$$

$T_1$  Zeitkonstante des PT1-Gliedes

$K_p$  Übertragungsfaktor des PT1-Gliedes

ergibt sich die Differenzengleichung (2-36).

$$y(k) = d_0 x(k) + c_1 y(k-1) \quad (2-36)$$

Die Rückrechnung in die Parameter der Differentialgleichung (Prozessparameter) geschieht mit den Gleichungen (2-37) und (2-38).

$$T_1 = \frac{c_1 \cdot T_a}{1 - c_1} \quad \text{Zeitkonstante} \quad (2-37)$$

$$K_p = \frac{d_0}{1 - c_1} \quad \text{Übertragungsfaktor} \quad (2-38)$$

$T_a$  Abtastzeit

Die Qualität der Parameteridentifikation ist abhängig von der Anzahl der in die Berechnung einbezogenen Messwerte  $M$  bzw. der Messzeit pro Messzyklus. Tabelle 2-1 zeigt die Mittelwerte  $\bar{q}$  (Gleichung (2-6)) und relativen mittleren Fehler  $\delta_r$  der berechneten Prozessparameter  $q$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Messwerte bzw. der Messzeit bei der Parameteridentifikation am PID-Regler. Die Berechnung erfolgt über eine Gesamtdauer von 1 s, es ergeben sich je nach Messzeit 10 bis 100 Messzyklen. Der relative mittlere Fehler  $\delta_r$  (relative Standardabweichung) als Maß für die Streuung der Werte wird aus der Division der Standardabweichung (Gleichung (2-7)) der einzelnen Parameter durch den vorgegebenen Referenzwert  $q_P$  ( $K_R = 3,5$ ;  $T_V = 5$  ms;  $T_N = 10$  s) berechnet.

$$\delta_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2}}{q_P} \cdot 100\% \quad \text{relativer mittlerer Fehler} \quad (2-39)$$

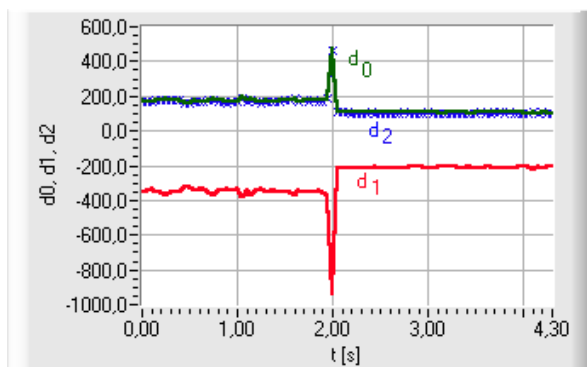
Bei der Berechnung von  $K_R$  liegt der relative mittlere Fehler ab 100 Messwerten unter 1 %, bei  $T_V$  sind mindestens 300 Messwerte einzubeziehen, um diesen Prozentsatz zu erreichen. Die Abweichung des berechneten Mittelwerts der Ergebnisse vom Wert des Prozessparame-

ters ist bei  $K_R$  und  $T_V$  ebenfalls kleiner 1 %. Für die Ermittlung des Reglerparameters  $T_N = 10$  s ist die Anregung nicht ausreichend, um ein verwertbares Identifikationsergebnis zu erhalten. Die Verringerung von  $T_N$  ergibt tendenziell bessere Resultate, ab einem Wert von  $T_N = 1$  s wird der Reglerkreis aber instabil. Eine weitere, wesentliche Vergrößerung der Messwertanzahl führt zu sehr hohem Rechenaufwand.

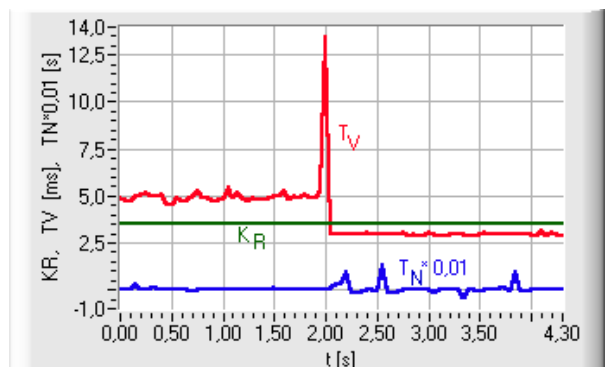
Messwerte $M$	Messzeit $t$	$K_R$		$T_V$		$T_N$	
		Mittelwert	rel. mittl. Fehler	Mittelwert	rel. mittl. Fehler	Mittelwert	rel. mittl. Fehler
100	10 ms	3,495	0,42 %	3,850 ms	91,45 %	0,21 s	54,32 %
200	20 ms	3,495	0,09 %	4,799 ms	14,63 %	1,58 s	226,06 %
300	30 ms	3,495	0,01 %	4,957 ms	0,93 %	-7,82 s	375,85 %
400	40 ms	3,495	<0,01 %	4,976 ms	0,35 %	-0,75 s	317,45 %
500	50 ms	3,495	<0,01 %	4,982 ms	0,19 %	11,62 s	1526,30 %
1000	100 ms	3,495	<0,01 %	4,983 ms	0,16 %	48,39 s	1220,00 %

**Tabelle 2-1:** Abhängigkeit der Qualität der Parameteridentifikation am PID-Regler von der Anzahl der Messwerte

Den zeitlichen Verlauf der berechneten Modellparameter des PID-Reglers bei Veränderung des Reglerparameters Vorhaltezeit  $T_V$  von 5 ms auf 3 ms zeigt Bild 2-14. Für die Berechnung werden 500 Messwerte je Messzyklus genutzt, die Messzeit pro Zyklus ergibt sich somit zu 20 ms. Die Störung (Veränderung des Prozessparameters  $T_V$ ) tritt zum Zeitpunkt  $t = 2$  s auf. Dies ist anhand des Verlaufs der ermittelten Modellparameter gut erkennbar. In Bild 2-15 ist der aus den Modellparametern zurückgerechnete Verlauf der Prozessparameter ersichtlich. Für die Darstellung in einem Diagramm erfolgt eine Skalierung von  $T_N$  mit dem Faktor 0,01.



**Bild 2-14:** Verlauf der berechneten Modellparameter PID-Regler



**Bild 2-15:** Verlauf der berechneten Prozessparameter PID-Regler

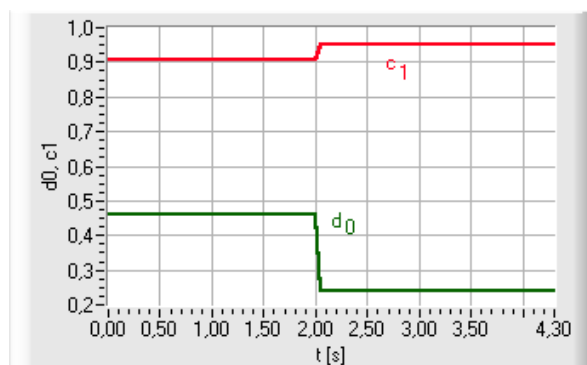
Die Parameter bzw. Parameteränderungen für  $K_R$  und  $T_V$  sind innerhalb eines mittleren relativen Fehlers von unter 1 % identifizierbar, der veränderte Prozessparameter ist nach einem kurzen Überschwingvorgang von 50 ms auf den geänderten Wert eingeschwungen.

In Tabelle 2-2 ist die Abhängigkeit des Ergebnisses von der Anzahl der Messwerte bei der Parameteridentifikation am Stellglied angegeben. Die zu bestimmenden Prozessparameter  $T_I$  und  $K_p$  werden schon ab 15 Messwerten mit einem relativen mittleren Fehler von unter 1 % identifiziert, die Abweichung des berechneten Mittelwertes der Ergebnisse vom Wert des Prozessparameters liegt ebenfalls unter 1 %.

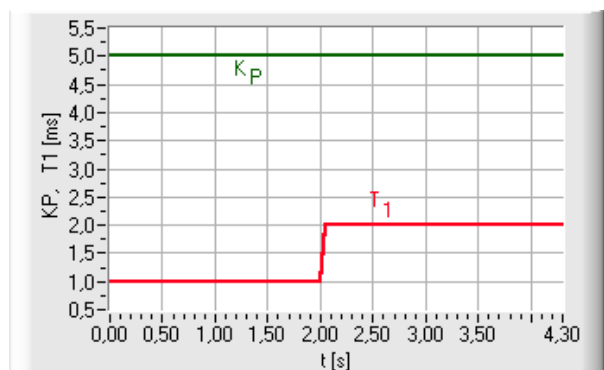
Messwerte $M$	Messzeit $t$	$K_p$		$T_I$	
		Mittelwert	rel. mittl. Fehler	Mittelwert	rel. mittl. Fehler
5	0,5 ms	5,002	0,17 %	0,991 ms	2,43 %
10	1 ms	5,002	0,09 %	0,990 ms	1,00 %
15	1,5 ms	5,002	0,08 %	0,990 ms	0,88 %
100	10 ms	5,002	0,08 %	0,990 ms	0,87 %
500	50 ms	5,002	0,06 %	0,990 ms	0,71 %
1000	100 ms	5,002	0,03 %	0,991 ms	0,34 %

**Tabelle 2-2:** Abhängigkeit der Qualität der Parameterschätzung am Stellglied von der Anzahl der Messwerte

Den zeitlichen Verlauf der berechneten Modellparameter des Stellgiedes bei Veränderung des Parameters Zeitkonstante  $T_I$  von 1 ms auf 2 ms zeigt Bild 2-16. Für die Berechnung wurden 500 Messwerte je Messzyklus genutzt. Die Störung (Veränderung des Prozessparameters) erfolgte zum Zeitpunkt  $t = 2$  s.



**Bild 2-16:** Verlauf der berechneten Modellparameter für das Stellglied



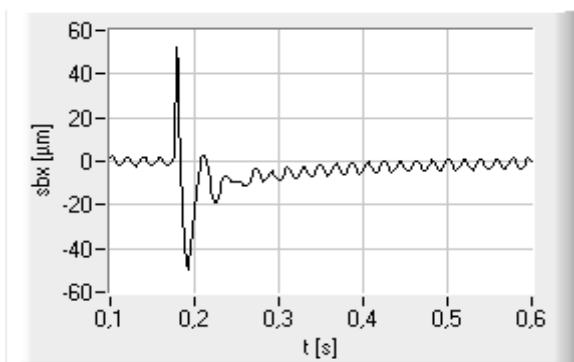
**Bild 2-17:** Verlauf der berechneten Prozessparameter für das Stellglied



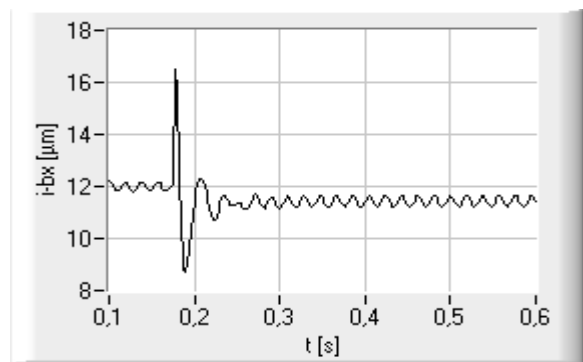
Anhand des Verlaufs der ermittelten Modellparameter ist auch hier die simulierte Störung gut erkennbar. Der aus den Modellparametern zurückgerechnete Verlauf der Prozessparameter ist in Bild 2-17 ersichtlich. Die Parameter bzw. Änderungen für  $K_P$  und  $T_I$  sind innerhalb eines relativen mittleren Fehlers von kleiner 1 % identifizierbar.

### Auftreten von Sensorfehlern (Sensor-Offset)

Die Bilder 2-18 und 2-19 veranschaulichen den Verlauf der Wellenlage  $s_{bx}$  und des Stellstromes  $i_{bx}$  beim Auftreten eines Sensor-Offsets von 50  $\mu\text{m}$ , welcher z. B. durch Störspannungen auf den Zuleitungen oder durch falsche Justierung des Sensors entstehen kann. Die Welle wird, bedingt durch das fehlerhafte Sensorsignal, aus der Sollposition herausgeregelt und unsymmetrisch zwischen den gegenüberliegenden Magnetlagerspulen positioniert. Entsprechend der Weg-Strom-Kennlinie des Lagers ergibt sich eine Verschiebung der Ströme in den Spulen, welche hier anhand  $i_{-bx}$  dargestellt wird. Charakteristische Diagnosemerkmale (Tabelle 2-3) sind die dauerhaft veränderten Mittelwerte der Stellströme, der Verlauf des Mittelwertes der Wellenlage sowie die maximalen und minimalen Spitzenwerte von Strom und Wellenlage unmittelbar nach Auftreten der Störung. Der Wellenlagemittelwert wird durch den I-Anteil des Reglers auf den Ausgangswert zurückgeregelt.



**Bild 2-18:** Wellenlage  $s_{bx}$  bei Sensor-Offset



**Bild 2-19:** Stellstrom  $i_{-bx}$  bei Sensor-Offset

Merkmal	Ausprägung vor Störung	Ausprägung mit Störung
$\bar{i}_{+bx}$	12 A	12,53 A
$\bar{i}_{-bx}$	12 A	11,47 A
$\bar{i}_{Sbx}$	0 A	0,53 A

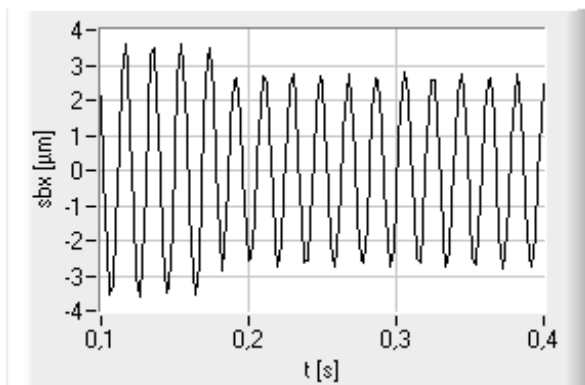
**Tabelle 2-3:** Charakteristische Merkmale bei Sensor-Offset

### Veränderung des Grunderregerstromes

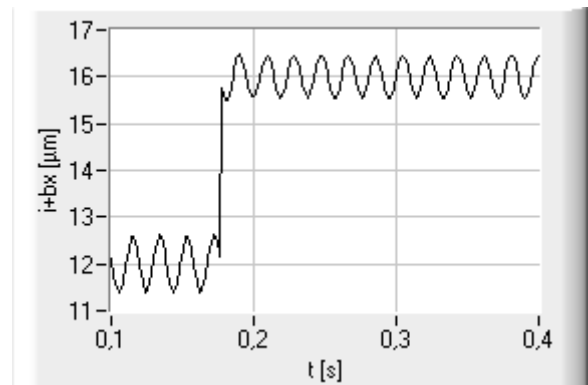
Der Verlauf der Wellenlage  $s_{bx}$  und des Stellstromes  $i_{+bx}$  bei Veränderung des Grunderregerstromes  $I_{Gbx}$  von 12 A auf 16 A zum Zeitpunkt  $t = 0,18$  s ist in den Bildern 2-20 und 2-21 dargestellt. Charakteristische Merkmale (siehe Tabelle 2-4) sind die Mittelwerte der Stellströme, welche sich um den gleichen Betrag ändern. Daraus kann direkt die Grunderregerstromänderung berechnet werden. Es ist ebenfalls eine Verringerung der Spannweiten und Effektivwerte von Strömen und Wellenlagen erkennbar, verursacht durch die Vergrößerung der Lagersteifigkeit bei Erhöhung von  $I_G$ .

Merkmal	Ausprägung vor Störung	Ausprägung mit Störung
$\bar{i}_{+bx}$	12 A	16 A
$\tilde{i}_{+bx}$	0,44 A	0,34 A
$\tilde{s}_{bx}$	2,5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
$I_{Gbx}$	12 A	16 A

**Tabelle 2-4:** Charakteristische Merkmale bei Veränderung des Grunderregerstromes



**Bild 2-20:** Wellenlage  $s_{bx}$  bei Veränderung von  $I_{Gbx}$



**Bild 2-21:** Stellstrom  $i_{+bx}$  bei Veränderung von  $I_{Gbx}$

### Auftreten von Unwuchten

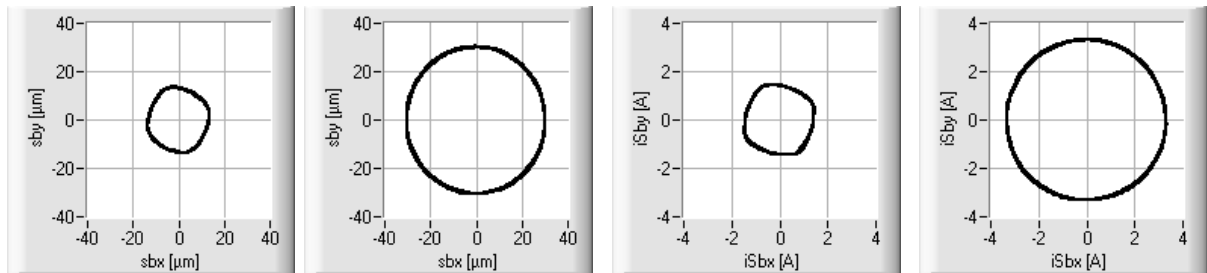
Der Einfluss von Unwuchten auf die Wellenlagen und die Stellströme ist am Beispiel der Wellenmittelpunktbahn  $s_{by}$  über  $s_{bx}$  in Bild 2-22 und der Stellströme  $i_{sby}$  über  $i_{sbx}$  in Bild 2-23 verdeutlicht. Verglichen wird der Referenzzustand mit der Simulation einer zusätzlich aufgeprägten Unwucht von 0,1 kgm in Höhe des unteren Magnetlagers. Bei einer Drehzahl  $n$  von  $876 \text{ min}^{-1}$  ( $\omega = 2 \pi n = 92 \text{ s}^{-1}$ ) wirkt im Referenzzustand durch die Exzentrizität des Massenschwerpunktes des Rotors eine Kraft  $F_E$  von 694 N. Durch die simulierte Unwucht ergibt sich eine zusätzliche Störkraft  $F_U$  von

$$F_U = m \cdot e \cdot \omega^2 = 846 \text{ N} \quad (2-40)$$

$m$  Masse der Unwucht = 10 kg

$e$  Exzentrizität = 0,01 m

$\omega$  Kreisfrequenz = 92 s<sup>-1</sup>



a) Referenzzustand    b) Unwucht

**Bild 2-22:** Wellenorbit  $s_{by}$  über  $s_{bx}$

a) Referenzzustand    b) Unwucht

**Bild 2-23:** Stellstrom  $i_{Sby}$  über  $i_{Sbx}$

Der aus den dargestellten Signalverläufen berechnete Effektivwert der Wellenschwingung  $\tilde{s}_{bx}$  ändert sich von 9,5  $\mu\text{m}$  auf 21,5  $\mu\text{m}$ , der Effektivwert des Stellstromes  $\tilde{i}_{Sbx}$  von 1,01 A auf 2,33 A. Die Mittelwerte von Wellenlagen und Stellströmen bleiben konstant. Beim Auftreten der Unwucht steigt die von dem Magnetlager aufgebrauchte Kraft auf 1683 N. Die Kraftdifferenz zum Referenzzustand beinhaltet die Unwuchtkraft  $F_U$  und eine durch den vergrößerten Wellenorbit verursachte Störkraft von 143 N. Anhand des Verhältnisses der im oberen und unteren Radialmagnetlager wirkenden Unwuchtkräfte und der ermittelten Phasenwinkel  $\gamma_U$  des mit Rotordrehzahl umlaufenden Unwuchtkraftvektors ist die Unwucht lokalisierbar.

## 2.6 Experimentelle Untersuchungen

### 2.6.1 Versuchsstände

Zur Durchführung der Experimente wird vorwiegend der Versuchsstand FLP 500 (Anhang A1) genutzt. Es handelt sich dabei um einen 1,3 t schweren, vertikal angeordneten Rotor, welcher vollständig magnetisch gelagert ist und von einem 241 kW Asynchronmotor über Frequenzumrichter angetrieben wird. Die Magnetlagerluftspalte betragen beim Axiallager 1,0 mm (oben) bzw. 1,2 mm (unten) und bei den Radiallagern 1,0 mm. Für die Regelungen kommen analoge und digitale Regler (DSP) zum Einsatz. Die Magnetlager werden mit einer Spannung von 160 V und einem maximalen Strom von 50 A betrieben. Die maximale Drehzahl des Rotors beträgt 7200 min<sup>-1</sup>, in diesem Drehzahlbereich kann er als starrer Rotor be-

trachtet werden. Mittels einer magnetischen Belastungseinrichtung [IPM99] besteht die Möglichkeit, statische und dynamische Belastungen an rotierenden Maschinen nachzubilden. Die Messwerterfassung am Versuchsstand erfolgt mit einem 16-kanaligen PC-gestützten Messwerterfassungssystem, dessen maximale Summenabtastrate 500 kHz beträgt. Das System wurde durch zusätzliche Sensoren für die Erfassung von Schwingungen am Lagergehäuse (Beschleunigungsgeber), Drehzahlmessung und einen Keyphasor ergänzt.

Untersuchungen mit sehr hohen Drehzahlen geschehen am Versuchsstand miniVS (Anhang A3). Die mit zwei radialen und einem axialen Magnetlager gelagerte Welle hat eine Masse von 1 kg und kann bis auf Drehzahlen von  $30.000 \text{ min}^{-1}$  beschleunigt werden. Die Luftspalte betragen 0,5 mm (axial) bzw. 0,4 mm (radial), die über digitale Controller geregelten Kräfte liegen bei 135 N (axial) und 100 N (radial).

Als weiterer digital geregelter Versuchsstand findet der ZMB 120 (Anhang A2) mit homopolarem Axial-/Radial-Kompaktlager (Kombilager) und homopolarem Radiallager Einsatz. Die Luftspalte sind mit 1 mm dimensioniert. Die Masse des starren Rotors, welcher Drehzahlen bis  $6000 \text{ min}^{-1}$  erreicht, liegt bei 2,6 kg. Die Tragkraft des Kombilagere beträgt 120 N (axial) bzw. 60 N (radial), das Radiallager erzeugt Kräfte bis 30 N.

## 2.6.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

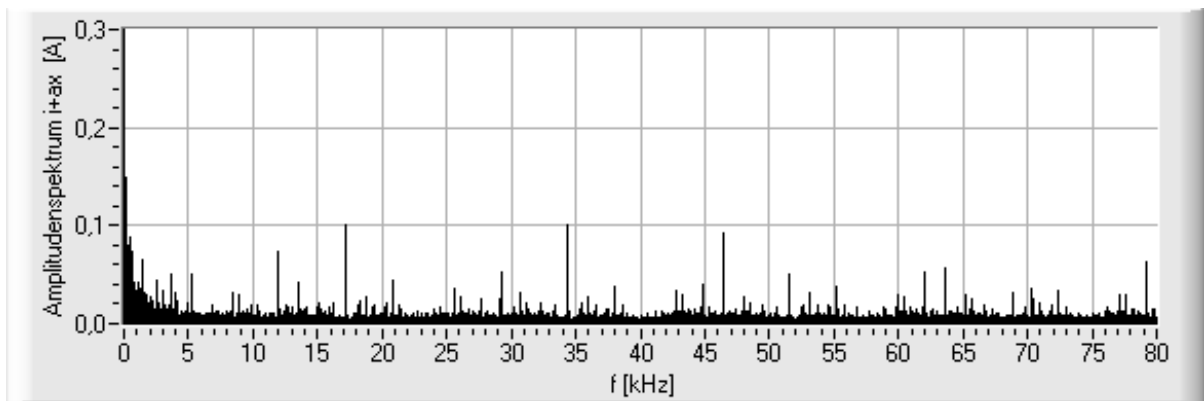
Folgende Fehler und Effekte wurden untersucht:

- Spektren der Signale,
- Drehzahlabhängigkeit der Signale,
- Zu-/Abschaltung der Magnetlager,
- An-/Abfahrvorgänge,
- Verhalten im Referenzzustand,
- Parameterveränderungen der Regler,
- Asymmetrien der Stellglieder,
- Verhalten bei Verringerung des Grunderregerstromes,
- auftretende Radial- und Unwuchtkräfte,
- Störkräfte, verursacht durch den elektrischen Antrieb,
- Verhalten beim Auslauf mit ausgeschaltetem Antrieb,
- Lauf des Rotors in den Fanglagern,
- Anstreifvorgänge des schwebenden Rotors mit den Fanglagern.

Beispielhaft sind nachfolgend Ergebnisse der Versuche am FLP 500 dargestellt. Eine Übersicht zu den durchgeführten Experimenten enthält Anhang B.

### Amplitudenspektren der Signale

Bild 2-24 zeigt das Amplitudenspektrum des Lagerstromes  $i_{+ax}$  mit schwebendem Rotor und einer Drehzahl  $n = 0 \text{ min}^{-1}$  bei einer Abtastfrequenz von 160 kHz. Deutlich erkennbar sind die Vielfachen der Taktfrequenz der Leistungsverstärker (17 kHz). Die Peaks liegen bei einem Maximum von 0,1 A. Oberhalb 51 kHz sind keine relevanten Signalanteile mehr vertreten. Abweichungen in der Taktung der Leistungsverstärker (z. B. Frequenzdrift, Verformung des Taktsignals) können über Veränderungen der Frequenzanteile im Spektrum erkannt werden.



**Bild 2-24:** Amplitudenspektrum des Lagerstromes  $i_{+ax}$

Die maximal darstellbare Frequenz  $f_{max}$  ergibt sich nach dem Abtasttheorem mit

$$f_{max} < \frac{f_a}{2} \quad (2-41)$$

$f_a$  Abtastfrequenz

und die Auflösung der einzelnen Frequenzlinien nach Gleichung (2-42).

$$\Delta f > \frac{1}{T_m} \quad (2-42)$$

$T_m$  Dauer der Messung, Messzeit

Die minimal notwendige Abtastfrequenz für die Erkennung von Störungen der Leistungsverstärker liegt somit bei 102 kHz, für eine hinreichende Frequenzauflösung von 1 Hz ist mindestens eine Messzeit von 1 s erforderlich.

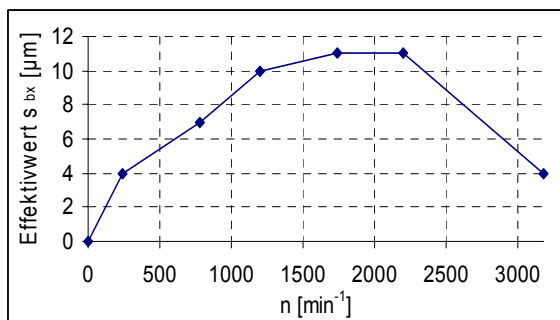
Bei Drehzahlen  $n > 0 \text{ min}^{-1}$  werden die in Bild 2-24 dargestellten Frequenzanteile von den Stellstromanteilen, welche für die Ausregelung der Restunwuchten und anderen Störungen notwendig sind, überlagert. Für die Spektralanalyse ist bei maximalen kinetischen Frequenzen vom 10-fachen der maximalen Rotordrehzahl (120 Hz) eine Abtastfrequenz von 2400 Hz bei einer Messzeit von 1 s hinreichend. Bei den durchgeführten Versuchen am FLP 500 wurde mit Abtastfrequenzen von 10 kHz und Messzeiten von 1 s gearbeitet. Unter diesen Messbedingungen entstehen dem Nutzsignal überlagerte Störsignale nach Tabelle 2-5.

Messsignal	Messbereich	Effektivwert Störsignal	Spannweite Störsignal
Wellenlage	$\pm 600 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$8 \mu\text{m}$
Reglerausgangssignal	$\pm 10 \text{ V}$	$0,05 \text{ V}$	$0,2 \text{ V}$
Stromsignal	$0 - 50 \text{ A}$	$0,15 \text{ A}$	$0,8 \text{ A}$

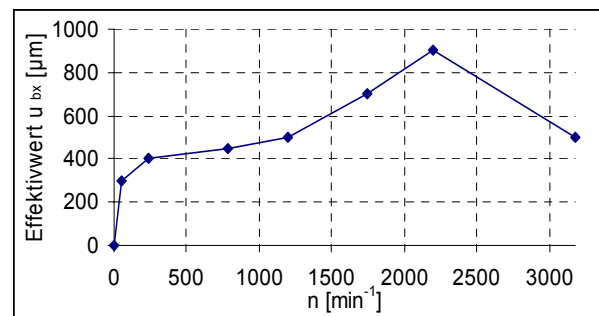
**Tabelle 2-5:** Störsignalanteile bei der Messwerterfassung

### Drehzahlabhängigkeit

Zur Feststellung der Abweichungen vom Normalzustand wurden die Referenzwerte der untersuchten Merkmale im Normalbetrieb (Motor eingeschaltet, Rotor schwebt berührungsfrei im Lager, optimale Reglerparameter) aufgenommen und die Abhängigkeit dieser Referenzwerte von der Drehzahl des Rotors untersucht. In den Bildern 2-25 bis 2-28 sind die Verläufe ausgewählter Merkmale dargestellt. Sowohl bei den Effektivwerten als auch bei den Amplitudenspektren der Wellenlage- (Bild 2-25) und der Reglerausgangssignale (Bild 2-26) ergibt sich bei einer kritischen Drehzahl von  $2200 \text{ min}^{-1}$  ein Ansteigen der Werte (Wellenlage auf einen maximalen Wert von  $11 \mu\text{m}$  bzw. Reglerausgangssignal auf  $900 \text{ mV}$ ), bei Drehzahlen über  $2200 \text{ min}^{-1}$  fallen diese wieder ab.



**Bild 2-25:** Effektivwert Wellenlage  $\tilde{s}_{bx} = f(n)$

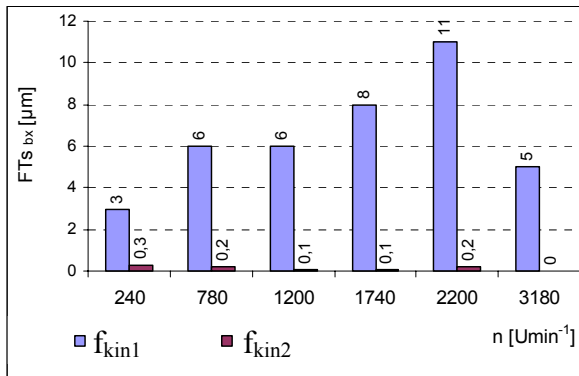


**Bild 2-26:** Effektivwert Reglerausgangssignal

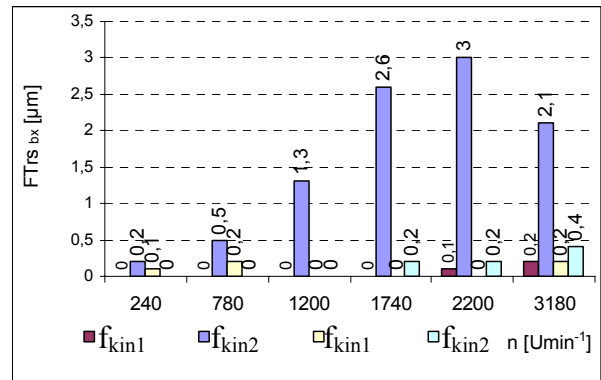
$$\tilde{u}_{bx} = f(n)$$

Unter Berücksichtigung der überlagerten stochastischen Störungen der Messwerterfassung von ca.  $\pm 4 \mu\text{m}$  für die Wellenlagesignale und ca.  $\pm 100 \text{ mV}$  bei den Reglerausgangssignalen und vorhandener Restunwuchten des Rotors sind die drehzahlabhängigen Einflüsse als gering einzuschätzen.

An den Amplitudenpektren ist zu erkennen, dass sich die Unwuchten des Rotors bei der Untersuchung der Wellenschwingung der einzelnen Achsen (Bild 2-27) in einem Ansteigen der Werte bei der Drehfrequenz des Rotors (1. kinetische Frequenz  $f_{kin1}$ ) bemerkbar machen. Beim Wellenausschlag (Bild 2-28) hingegen wirken sich Unwuchten mit konstantem Betrag nicht aus. Angezeigt werden dafür die Abweichungen von der idealen Kreisbahn, welche hier vor allem in der Doppelten der Drehfrequenz ( $f_{kin2}$ ) erkennbar sind. Andere Frequenzanteile sind gering und können vernachlässigt werden.



**Bild 2-27:** Spektrum der kinetischen Frequenzen der Wellenschwingung  
 $\tilde{s}_{bx} = f(n)$

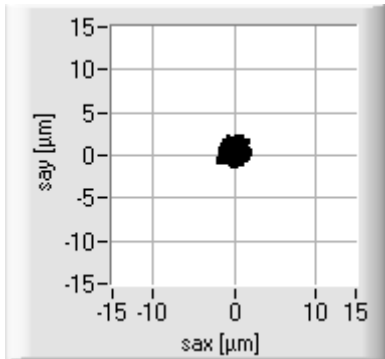


**Bild 2-28:** Spektrum der kinetischen Frequenzen des Wellenausschlags  
 $\tilde{r}s_{bx} = f(n)$

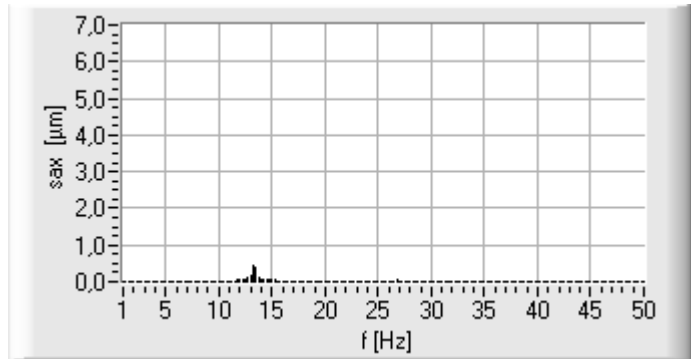
### Einfluss des Antriebes

Die Verläufe der Wellenorbits in der oberen Radialmagnetlagerebene und die Amplitudenpektren der Wellenschwingung von  $s_{ax}$  bei verschiedenen Betriebszuständen und einer Drehzahl von  $780 \text{ min}^{-1}$  (Drehfrequenz 13 Hz) stellen die folgenden Bilder dar. Es ist deutlich der Einfluss der vom Antrieb erzeugten Störungen erkennbar. Bei abgeschaltetem Motor (Bilder 2-29 und 2-30) liegen die Werte für die Spannweite bei ca.  $5 \mu\text{m}$ , die Effektivwerte bei ca.  $1 \mu\text{m}$ . Hierbei handelt sich um Störungen aufgrund der Oberflächenrauigkeit des Rotors, Einstreuungen über die Messleitungen und andere stochastische Störeinflüsse.

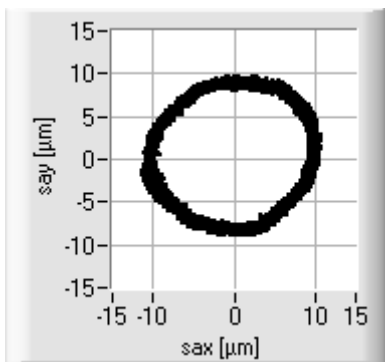
Bei zugeschaltetem Motor (Bilder 2-31 und 2-32) tritt eine Unwucht auf, welche zu einer kreisförmigen Wellenbahn mit einer Spannweite von ca. 20  $\mu\text{m}$  und den entsprechend auf 6  $\mu\text{m}$  angestiegenen Effektivwerten führt.



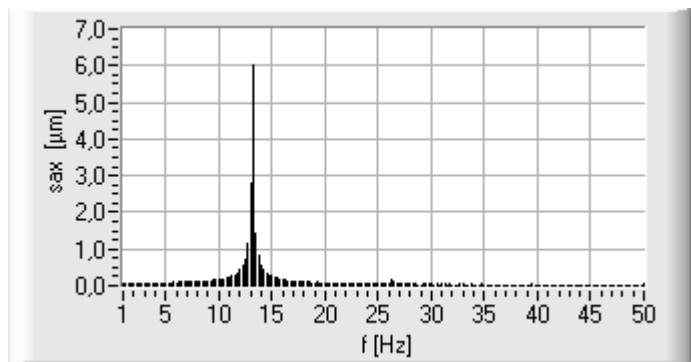
**Bild 2-29:** Wellenorbit  $s_{ay}$  über  $s_{ax}$  bei  $780 \text{ min}^{-1}$ , Motor aus



**Bild 2-30:** Amplitudenspektrum der Wellenlage  $s_{ax}$  bei  $780 \text{ min}^{-1}$  ( $13 \text{ s}^{-1}$ ), Motor aus



**Bild 2-31:** Wellenorbit  $s_{ay}$  über  $s_{ax}$  bei  $780 \text{ min}^{-1}$ , Motor ein

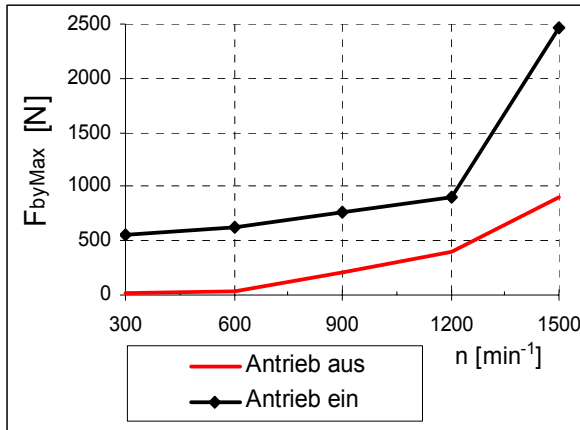


**Bild 2-32:** Amplitudenspektrum der Wellenlage  $s_{ax}$  bei  $780 \text{ min}^{-1}$  ( $13 \text{ s}^{-1}$ ), Motor ein

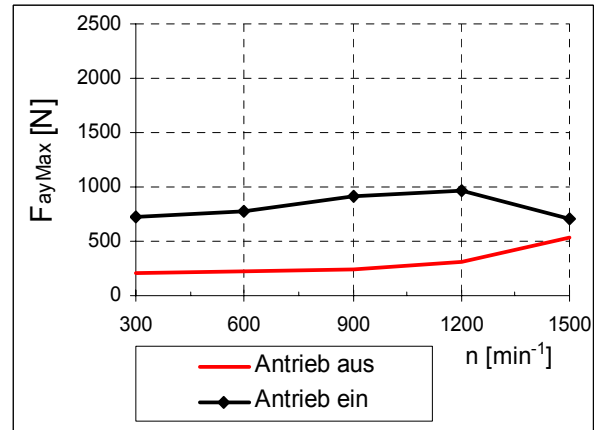
Diese Unwucht ist als markante Frequenz (1. kinetische Frequenz) im Amplitudenspektrum erkennbar, im Wellenausschlag macht sich diese Unwucht als Anstieg des Mittelwertes bemerkbar.

Der Antrieb erzeugt zusätzliche umlaufende Kräfte. Den berechneten Verlauf der maximalen Kräfte in der oberen y-Achse  $F_{ayMax}$  und der unteren y-Achse  $F_{byMax}$  in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl  $n$  zeigen die Bilder 2-33 und 2-34. Die vom Antrieb erzeugte Störkraft beträgt 500 N. Bei steigender Drehzahl wächst der Anteil der Störkräfte durch Restunwuchten quadratisch (Gleichung (2-40)). Durch vektorielle Addition dieser Kräfte ergibt sich je nach Phasenlage der Kraftvektoren der Einzelkräfte eine Vergrößerung (im unteren Lager) oder eine Verringerung (im oberen Lager) der resultierenden Störkraft.





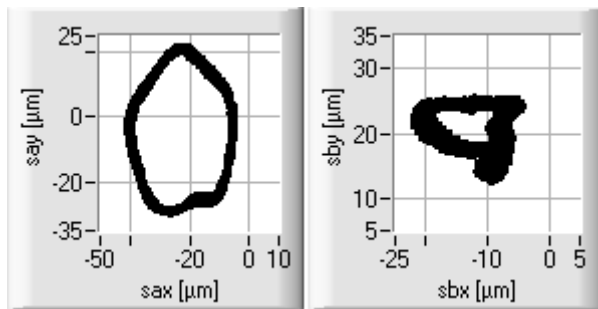
**Bild 2-33:** Lagerkraft  $F_{byMax} = f(n)$  bei ein- und ausgeschaltetem Antrieb



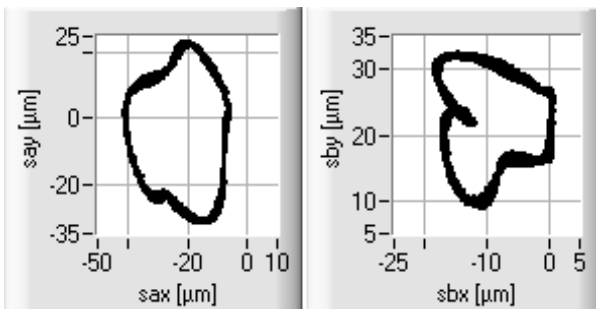
**Bild 2-34:** Lagerkraft  $F_{ayMax} = f(n)$  bei ein- und ausgeschaltetem Antrieb

**Betrieb bei ausgeschaltetem Magnetlager, Lauf der Welle in den Fanglagern**

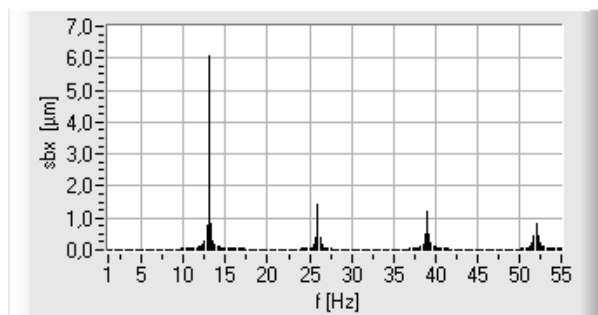
Dreht die Welle in den Fanglagern (Magnetlager ausgeschaltet), ergeben sich die in den Bildern 2-35 und 2-36 dargestellten charakteristischen Bahnkurven. Es fällt auf, dass bei zugeschaltetem Antrieb (Motor ein) die durch unrunder Lauf in den Fanglagern erzeugten Deformationen der Wellenbahn stark verschliffen werden.



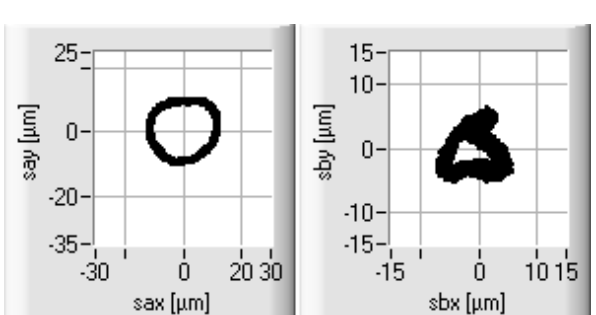
a)  $s_{ay}$  über  $s_{ax}$       b)  $s_{by}$  über  $s_{bx}$   
**Bild 2-35:** Wellenorbits bei  $780 \text{ min}^{-1}$ , Welle im Fanglager, **Motor ein**



a)  $s_{ay}$  über  $s_{ax}$       b)  $s_{by}$  über  $s_{bx}$   
**Bild 2-36:** Wellenorbits bei  $780 \text{ min}^{-1}$ , Welle im Fanglager, **Motor aus**



**Bild 2-37:** Spektrum der Wellenlage  $s_{bx}$  bei  $780 \text{ min}^{-1}$ , Welle im Fanglager, Motor aus



a)  $s_{ay}$  über  $s_{ax}$       b)  $s_{by}$  über  $s_{bx}$   
**Bild 2-38:** Wellenorbits beim Anstreifen Fanglager

Zur Diagnose der Fanglager ist es daher sinnvoll, das Auslaufverhalten des Rotors im Fanglager bei abgeschaltetem Motor aufzunehmen. Die im Spektrum (Bild 2-37) erkennbaren Peaks entsprechen den kinetischen Frequenzen des Wälzlagers. Nach [STU86] können anhand deren Höhe und Frequenzen sowie der Verformung des Orbits Rückschlüsse auf den Fanglagerzustand gezogen werden.

### Anstreifen des Rotors am Fanglager

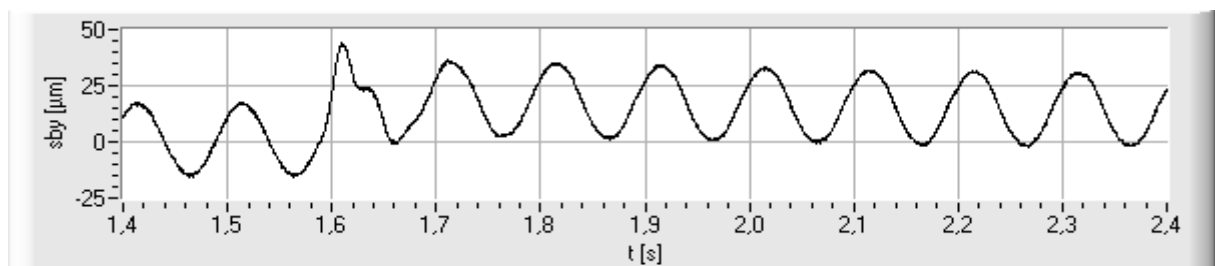
Beim Absenken der unteren Fanglager (mittels eines eingebauten Hubmagnetes) kommt es zu Anstreifungen des Rotors am Fanglager. Dies führt zu einer Verringerung des Wellenauschlages im unteren Bereich und Deformationen der unteren Wellenbahn (Bild 2-38), welche sich im Amplitudenspektrum als markante Frequenzen widerspiegeln. Anhand der Amplituden dieser Frequenzen sind die Deformationen quantifizierbar.

### Einfluss von statischen Radialkräften

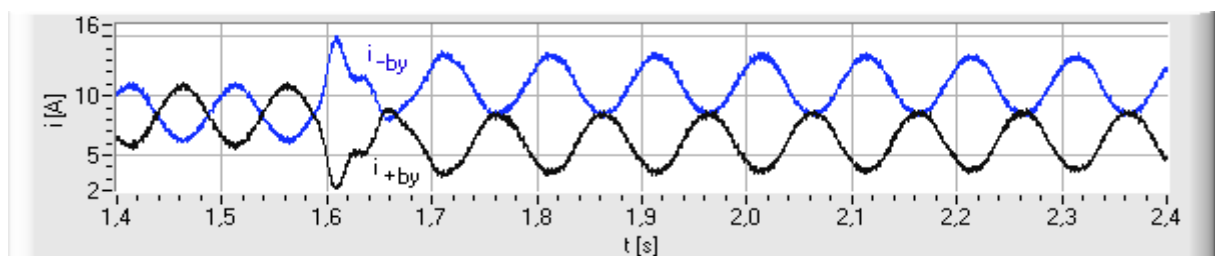
Den Einfluss von statischen Radialkräften zeigen die Bilder 2-39 und 2-40. Es wird mit der Belastungseinrichtung zum Zeitpunkt  $t = 1,6$  s eine Kraft von 530 N in y-Richtung auf das untere Wellenende aufgebracht.

Merkmal	Ausprägung vor Störung	Ausprägung mit Störung
$\bar{i}_{+by}$	8,307 A	6,669 A
$\bar{i}_{-by}$	8,505 A	10,249 A
$\bar{i}_{Sby}$	-0,1 A	-1,79 A

**Tabelle 2-6:** Charakteristische Merkmale beim Wirken von statischen Radialkräften



**Bild 2-39:** Wellenschwingung  $s_{by}$  bei statischer Radialkraft (530 N),  $n = 600 \text{ min}^{-1}$

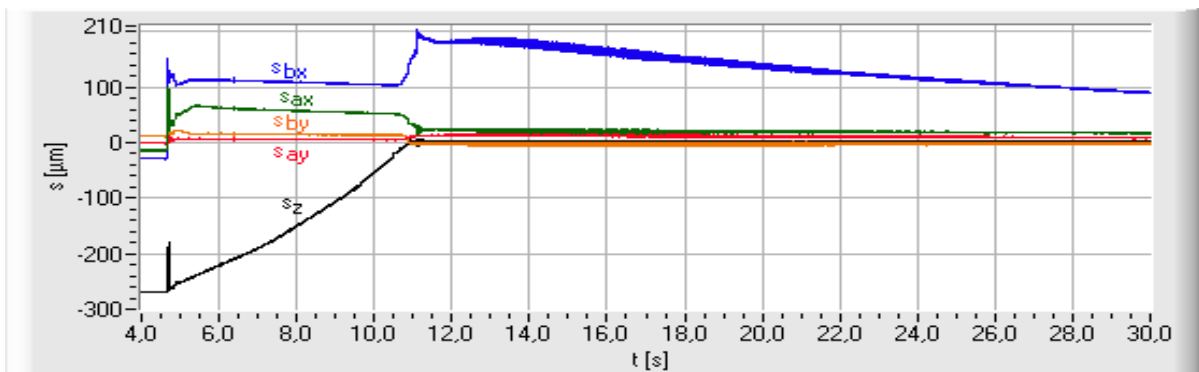


**Bild 2-40:** Lagerströme  $i_{+by}$  und  $i_{-by}$  bei statischer Radialkraft (530 N),  $n = 600 \text{ min}^{-1}$

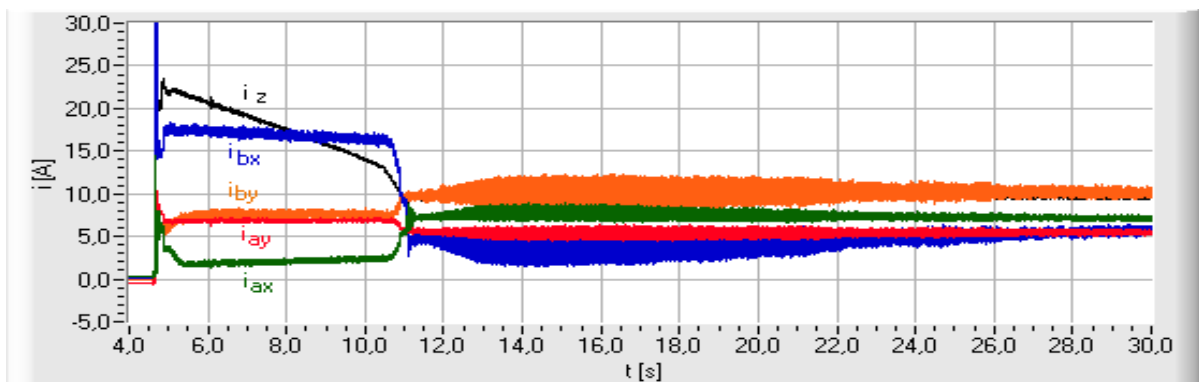
Beim Aufprägen der statischen Radialkraft steigt der Mittelwert des Wellenlagesignals an, wird aber durch den I-Anteil der Regelung wieder auf den Ausgangswert zurückgeregelt. Die Effektivwerte und Spannweiten von Wellenlage und Lagerstrom bleiben nahezu konstant. Charakteristische Diagnosemerkmale (Tabelle 2-6) sind die Mittelwerte der Lagerströme  $\bar{i}_{+by}$  und  $\bar{i}_{-by}$  bzw. der daraus berechnete Stellstrom  $\bar{i}_{sby}$ . Bei bekannter Kraft-Strom-Kennlinie der Magnetlager ist der Störkraftvektor berechenbar. Anhand der Kraftverteilung auf die einzelnen Achsen und Ebenen kann daraus die radiale Störkraft identifiziert und lokalisiert werden.

### Aktivieren der Magnetlager, Anheben des Rotors

Den Verlauf der Wellenlage- und Stromsignale beim Aktivieren der Magnetlagerung zeigen die Bilder 2-41 und 2-42. Mit dem Zuschalten wird der Rotor durch Erhöhen des Axiallagerstroms in die axiale Sollposition gebracht. Die radiale Position des Rotors ist zu Beginn durch die Fanglager begrenzt. Nach dem Anheben des Rotors hängt dieser frei und die Radiallagerströme zwingen ihn in die radiale Sollposition. Bedingt durch den I-Anteil des Reglers (Nachstellzeit  $T_N = 10$  s) erfolgt das Anfahren der radialen und axialen Sollpositionen über einen Zeitraum von ca. 60 s.



**Bild 2-41:** Zuschaltung der Magnetlager am FLP 500, Verlauf der Wellenlagen



**Bild 2-42:** Zuschaltung der Magnetlager am FLP 500, Verlauf der Lagerströme

### 3 Überwachung aktiv magnetgelagerter rotierender Maschinen

#### 3.1 Zielstellung

Ziel ist die Erkennung von Fehlern sowie die Gewinnung von Informationen über den gegenwärtigen Prozesszustand anhand der erfassten Signale und extrahierten Merkmale. Unerwünschte oder unerlaubte Prozesszustände sollen vermieden und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden, um die Verfügbarkeit hoch zu halten und Schäden zu verhindern. Im Zuge der Überwachung ist eine Darstellung und Abspeicherung der Signal- und Merkmalsverläufe möglich, bei der dabei anfallenden Informationsflut ist es notwendig, auch für Nichtexperten verständliche Aussagen zum Betriebszustand zu bilden, sowie beim Erreichen kritischer Zustände Alarm auszulösen. Daraus kann eine Schaltung in den sicheren Zustand oder eine Umschaltung auf redundante Komponenten vom Operator des Prozesses abgeleitet werden.

Mit einer Überwachung der extrahierten Merkmale auf Über- bzw. Unterschreitung von Grenzwerten ist die Fehlererkennung möglich. Das Verlassen des durch die Grenzwerte vorgegebenen zulässigen Bereiches kennzeichnet das Auftreten eines Fehlers. Diese Form der Grenzwertüberwachung kann durch einen statischen und dynamischen Bereichstest realisiert werden. Beim statischen Bereichstest werden die Merkmalausprägungen direkt überwacht, der dynamische zieht die Änderungsgeschwindigkeiten der Merkmalausprägungen (Gradienten) heran. Vorteile der Grenzwertüberwachung sind die einfache Umsetzung und die schnelle Erkennung kritischer Änderungen im stationären Zustand.

Bei der Festlegung der Grenzwerte ist ein Kompromiss zu schließen zwischen der Erkennung fehlerbedingter Abweichungen und Fehlalarmen aufgrund normaler regelloser Änderungen. Wird der zulässige Bereich zu groß gewählt, ergibt sich eine Unempfindlichkeit bei der Fehlererkennung, bei zu engem Bereich eine Auslösung von Fehlalarmen. Eine sichere Fehlererkennung ist nur bei relativ großen plötzlichen oder lang anhaltenden allmählichen Merkmalsänderungen gegeben. Probleme ergeben sich zudem bei mehreren normalen Betriebszuständen mit jeweils unterschiedlichen Merkmalausprägungen und bei Schwankungen der Ausprägungen auch im fehlerfreien Zustand. Erschwerend kommt hinzu, dass bei der Grenzwertüberwachung an Regelkreisen kleine Störungen vom System selbständig geregelt werden und damit eine Überwachung der Regelgrößen nicht anwendbar ist, solange die Stellgrößen der Regelstrecke im normalen Stellbereich liegen [ISE95].

### 3.2 Grenzwertüberwachung

Wichtigstes Merkmal für die Grenzwertüberwachung an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen ist der maximale Wellenausschlag. Durch die Auslösung von Alarmen bei der Überschreitung dieses Grenzwertes und daraus abgeleiteter Umschaltung in einen sicheren Betriebszustand soll eine Schädigung der Sensoren und Aktoren, verursacht durch das Anstreifen des Rotors, vermieden werden. Die Grenzwertüberwachung der Lagerströme liefert Informationen zu Übersteuerungen der Lagerspulen, über Sättigungseffekte sowie zu starke thermische Belastungen. Die Plausibilität der Sensorsignale wird durch Überwachung der Signalanstiegsgeschwindigkeiten (Gradienten) und festgelegter Maximal- und Minimalwerte überprüft und damit festgestellt, ob der Messwert in einem durch den Prozess technologisch und physikalisch begründeten Wertebereich liegt [HAM93]. Grobe Fehler in Form von Defekten der Messeinrichtung können damit erkannt werden. Durch Zusammenfassung von einzelnen Bereichsüberschreitungen mittels boolescher Algebra sind Informationen über wesentliche Betriebszustände ableitbar.

Für die Realisierung der Grenzwertüberwachung am Beispiel einer vertikalen Lagerung werden die Merkmale entsprechend den Tabellen 3-1 und 3-2 auf das Über- bzw. Unterschreiten vorgegebener Grenzwerte überwacht. Die Berechnung der Gradienten für den dynamischen Bereichstest geschieht anhand der Differenz der Mittelwerte zweier aufeinander folgender Messzyklen. Die Rotordrehzahl  $n$  wird, wenn keine separate Erfassung der Drehzahl verfügbar ist, mittels Fouriertransformation aus dem Amplitudenspektrum eines Wellenlagesignals berechnet. Als geeignete Wellenlagesignale bieten sich die Signale der Antriebs- bzw. Arbeitsmaschinenebene an, da hier größere Restunwuchten zu erwarten sind.

Jedem überwachten Bereich ist ein Grenzwertflag zugeordnet. Diese Flags sind boolesche Elemente, beim Verlassen des vorgegebenen Bereiches wird das Flag von FALSE auf TRUE gesetzt, gegebenenfalls eine Anzeige in Textform oder als Alarmentext ausgegeben sowie der Flagname mit Datum und Uhrzeit in einer Logdatei abgespeichert. Bei einem erkannten Ausfall oder Defekt von Komponenten ist eine Umschaltung auf redundante Komponenten bzw. die Schaltung in den sicheren Zustand aktivierbar. Für die Flags der Wellenlagen und Lagerströme ergeben sich Flagname und Diagnosetext aus der Bezeichnung in der Tabelle und dem jeweiligen Messstellenort (z. B. "gw\_sMax\_ax", "Sensorsignal gestört\_ax").

Grenzwertflag	Merkmal	Diagnosetext	Aktivierung bei	Kommentar
gw_rsKrit	$r_{SMax}$	Gefahr Anstreifen	Überschreiten	maximaler Wellenausschlag radial, nur für radiale Achsen
gw_sKrit+	$s_{Max}$	Gefahr Anstreifen	Überschreiten	maximaler Wellenausschlag axial
gw_sKrit-	$s_{zMin}$	Gefahr Anstreifen	Unterschreiten	maximaler Wellenausschlag axial
gw_sMax	$s_{Max}$	Sensorsignal gestört	Überschreiten	Messbereichsüberschreitung
gw_sMin	$s_{Min}$	Sensorsignal gestört	Unterschreiten	Messbereichsüberschreitung
gw_sMeanFl	$\bar{s}_z$		Unterschreiten	nur für z-Achse
gw_sMeanNorm	$ \bar{s} $		Unterschreiten	Betrag
gw_sMeanMax	$ \bar{s} $	Sensorsignal gestört	Überschreiten	Betrag
gw_sEff0	$\tilde{s}$		Unterschreiten	
gw_i+MinMean	$\bar{i}_+$		Unterschreiten	
gw_i+MaxMean	$\bar{i}_+$	Überlast/Kurzschluss	Überschreiten	
gw_i-MinMean	$\bar{i}_-$		Unterschreiten	
gw_i-MaxMean	$\bar{i}_-$	Überlast/Kurzschluss	Überschreiten	
gw_iMax	$i_{sMax}$	Lagerstrom/Last zu hoch	Überschreiten	
gw_iMin	$i_{sMin}$	Lagerstrom/Last zu hoch	Überschreiten	
gw_iEff0	$\tilde{i}$		Unterschreiten	
gw_n>	n	Drehzahl zu hoch	Überschreiten	
gw_n<	n	Drehzahl zu niedrig	Unterschreiten	
gw_n0	n	Drehzahl = 0	Unterschreiten	

**Tabelle 3-1:** Merkmale und Grenzwertflags für den statischen Bereichstest

Name des Flags	Merkmal	Diagnosetext	Aktivierung bei	Kommentar
gr_n+	$\Delta n$	Drehzahlerhöhung	Überschreiten	
gr_n-	$\Delta n$	Drehzahlverringering	Unterschreiten	
gr_sKrit	$ \Delta \bar{s} $	Ausschlagsgradient hoch	Überschreiten	zu schnell für Regler
gr_sMax	$ \Delta \bar{s} $	Sensorsignal gestört	Überschreiten	

**Tabelle 3-2:** Merkmale und Grenzwertflags für den dynamischen Bereichstest

Durch boolesche UND-Verknüpfung (AND), ODER-Verknüpfung (OR) und Negation (NOT) der Grenzwertflags lassen sich weitere Aussagen über den Betriebszustand bilden. Für die schnelle und übersichtliche Berechnung werden dazu die Grenzwertflags gw\_sMeanNorm, gw\_sEff0, gw\_iEff0, gw\_i+MinMean und gw\_i-MinMean der einzelnen Achsen über UND-Verknüpfungen zu je einem Summenflag zusammengefasst, deren Bezeichnung sich aus dem Namen des Flags und der Endung "\_all" ableitet, z. B.

$$\begin{aligned} \text{gw\_sEff0\_all} &:= \\ &\text{gw\_sEff0\_ax AND gw\_sEff0\_ay AND gw\_sEff0\_bx AND gw\_sEff0\_by} \\ &\text{AND gw\_sEff0\_z.} \end{aligned}$$

Das Summenflag für den maximalen Wellenausschlag ergibt sich durch ODER-Verknüpfung mit

$$\begin{aligned} \text{gw\_rsKrit} &:= \\ &\text{gw\_rsKrit\_ax OR gw\_rsKrit\_ay OR gw\_rsKrit\_bx OR gw\_rsKrit\_by} \\ &\text{OR gw\_sKrit+_z OR gw\_sKrit-_z.} \end{aligned}$$

Die Summenflags für den maximalen (gw\_iMax) und minimalen (gw\_iMin) Lagerstellstrom erhält man durch ODER-Verknüpfung z. B.:

$$\begin{aligned} \text{gw\_iMax\_all} &:= \\ &\text{gw\_iMax\_ax OR gw\_iMax\_ay OR gw\_iMax\_bx OR gw\_iMax\_by} \\ &\text{OR gw\_iMax\_z.} \end{aligned}$$

Folgende Betriebszustände werden durch boolesche Verknüpfungen ermittelt, mit der Zeit des Auftretens abgespeichert und durch Flags als Bedienerinformationen dargestellt.

### **"Welle im Fanglager"**

Die Welle liegt im Fanglager, kann aber bei Auslauf mit Abwurf noch drehen, die Magnetlager sind abgeschaltet.

$$\begin{aligned} \text{Welle\_im\_Fanglager} &:= \\ &\text{gw\_sMeanFl\_z} \\ &\text{AND gw\_i+MinMean\_all AND gw\_i-MinMean\_all AND gw\_iEff0\_all} \\ &\text{AND NOT(Welle\_ruht\_im\_Fanglager)} \end{aligned}$$

### **"Welle ruht im Fanglager"**

Die Welle ruht im Fanglager und dreht sich nicht, die Magnetlager sind abgeschaltet.

Welle\_ruht\_im\_Fanglager :=

gw\_sMeanFl\_z AND gw\_sEff0\_all  
 AND gw\_i+MinMean\_all AND gw\_i-MinMean\_all AND gw\_iEff0\_all  
 AND gw\_n0

### **"Welle schwebt"**

Die Welle schwebt innerhalb des Toleranzfeldes für den Wellenausschlag.

Welle\_schwebt :=

gw\_sMeanNorm\_all AND NOT(gw\_rsKrit\_all) AND NOT(Normalbetrieb)  
 AND NOT(Welle\_schwebt\_Standby)

### **"Welle schwebt (Standby)"**

Die Welle schwebt schwingungsfrei innerhalb des Toleranzfeldes für den Wellenausschlag und dreht sich nicht (Bereitschaftszustand), die Ströme sind nicht überhöht (keine Störkraft).

Welle\_schwebt\_Standby :=

gw\_sMeanNorm\_all AND gw\_sEff0\_all AND gw\_iEff0\_all  
 AND NOT(gw\_iMax\_all) AND NOT(gw\_iMin\_all) AND gw\_n0

### **"Normalbetrieb"**

Die Welle schwebt innerhalb des Toleranzfeldes und dreht mit Nenndrehzahl, die Ströme sind nicht überhöht (keine Störkraft).

Normalbetrieb :=

gw\_sMeanNorm\_all AND NOT(gw\_rsKrit\_all)  
 AND NOT(gw\_iMax\_all) AND NOT(gw\_iMin\_all)  
 AND NOT(gw\_n>) AND NOT(gw\_n<)

### **"Hochlauf"**

Hochlauf der Motordrehzahl bis zur Nenndrehzahl

Hochlauf := gr\_n+ AND gw\_n<

### **"Auslauf"**

Abschaltung des Motors und Auslauf bis  $n = 0$

Auslauf := gr\_n- AND NOT(gw\_n>)



### **"Sensorfehler in Achse "**

Das Sensorsignal oder der Signalgradient liegen außerhalb des plausiblen Bereichs. Die Berechnung erfolgt für jede Achse separat.

Sensorfehler\_in\_Achse\_q :=  
 (gw\_sMax\_q OR gw\_sMin\_q OR gr\_sMax\_q) AND gw\_sEff0\_q

### **"Aktorfehler in Achse "**

Aufgrund defekter Leistungsverstärker oder Lagerspulen bzw. Leitungsbruch fließt kein Strom durch die Magnetlagerspule. Jede Achse wird extra berechnet.

Aktorfehler\_in\_Achse\_q :=  
 gw\_i+MinMean\_q AND i-MinMean\_q  
 AND NOT(gw\_sMeanNorm\_q)  
 AND NOT(i+MinMean\_all) AND NOT(i-MinMean\_all)

## **3.3 Trendüberwachung**

Zur Vermeidung von Fehlalarmen bei kurzzeitigen betriebsbedingten Schwankungen der Merkmalsausprägungen ist die Überwachung von Langzeittrendverläufen anwendbar. Hierbei werden über längere, auf das Systemverhalten angepasste Zeiträume die Mittelwerte der interessierenden Merkmale und deren Anstiege berechnet. Kurzzeitige Schwankungen lassen sich somit ausblenden. Untersucht wird, ob sich die Langzeitmittelwerte auf einen Grenzwert hin entwickeln, zusätzlich können sie auch zur dynamischen Adaption der für die Grenzwertüberwachung festgelegten Bereiche benutzt werden. Die Bereichsgrenzen sind dazu entsprechend der Änderung des Langzeitmittelwertes des jeweiligen Merkmals zu verschieben.

Durch Berechnen der Entwicklung (Trend) der Langzeitmittelwerte für zukünftige Werte mittels Regressionsanalyse ist eine Prognose des Fehlerverlaufes und des Zeitpunktes der zu erwartenden Bereichsüberschreitung möglich.

Diese Form der Trendüberwachung findet Einsatz bei der Erkennung sich langsam entwickelnder Fehler. Bevorzugter Anwendungsbereich ist die Überwachung der Wellenschwingungen beim Lauf der Welle in den Fanglagern zur Erkennung von Verschleißerscheinungen der Fanglager (Wälzlager). Diese äußern sich im Anwachsen markanter Frequenzanteile (kinetische Frequenzen) der Lagerschwingungen, welche bei Vielfachen der Rotordrehzahl liegen. Wesentliche charakteristische Frequenzen konventioneller Wälzlager sind im Folgen-

den angegeben. Die Randbedingungen bei deren Ermittlung erläutert [STU86].

- Rotationsfrequenz  $f_{KA}$  des Käfigs, deren Stärke bei Schäden am Lagerkäfig zunimmt:

$$f_{KA} = \frac{1}{2} f_n \cdot \left(1 - \frac{DW}{DT} \cdot \cos \alpha\right) \quad (3-1)$$

- Überrollfrequenz  $f_{AR}$  des Außenringes, deren Stärke bei Schäden des Lageraußenringes zunimmt:

$$f_{AR} = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left(1 - \frac{DW}{DT} \cdot \cos \alpha\right) \quad (3-2)$$

- Überrollfrequenz  $f_{IR}$  des Innenringes, deren Stärke bei Schäden des Lagerinnenringes zunimmt:

$$f_{IR} = \frac{1}{2} f_n \cdot z \cdot \left(1 + \frac{DW}{DT} \cdot \cos \alpha\right) \quad (3-3)$$

- Wälzkörperrotationsfrequenz  $f_{WA}$ , deren Stärke bei Schäden der Wälzkörper zunimmt:

$$f_{WA} = \frac{1}{2} f_n \cdot \frac{DW}{DT} \cdot \left(1 - \frac{DW}{DT} (\cos \alpha)^2\right) \quad (3-4)$$

- Überrollfrequenz  $f_W$  einer Kugelunregelmäßigkeit auf beiden Wälzbahnen:

$$f_W = 2 \cdot f_{WA} \quad (3-5)$$

Die für die Berechnung erforderlichen Parameter

- $z$  Anzahl der Wälzkörper,
- $DW$  Wälzkörperdurchmesser,
- $DT$  Teilkreisdurchmesser,
- $f_n$  relative Rotationsfrequenz zwischen Innen- und Außenring des Wälzlagers,
- $\alpha$  lagerspezifische Konstante

sind aus den Datenblättern der eingesetzten Wälzlager zu entnehmen oder entsprechend den Einsatzbedingungen des Lagers zu ermitteln.

Für die charakteristischen Frequenzen erfolgt beim Lauf bzw. Auslauf der Welle im Fanglager die Bestimmung der Höhe der jeweiligen aktuellen Frequenzanteile durch Berechnung der

Amplitudenspektren der Wellenlagesignale. Da die auftretenden Frequenzen aufgrund von Drehzahlinstabilitäten und unterschiedlichen Rotationsfrequenzen der Innen- und Außenringe Schwankungen unterworfen sind, ist es zweckmäßig, auch die Anteile um den interessierenden Bereich mit einzubeziehen und das Maximum der Frequenzlinien über diesen Bereich zu ermitteln.

Als allgemeiner Verschleißindikator für die Fanglager kann der Trend des Effektivwertes der Wellenschwingung genutzt werden, da in ihm alle Frequenzanteile zusammengefasst sind und sich durch Lagerverschleiß verursachte Vergrößerungen des radialen Lagerspiels in einem erhöhten Effektivwert der Wellenschwingung äußern.

Die den Merkmalen zugeordneten Grenzwertflags und die bei zu erwartender Überschreitung des Grenzwertes mit der jeweiligen Achsenangabe ausgegebenen Diagnosetexte sind aus Tabelle 3-3 zu entnehmen.

<b>Grenzwertflag</b>	<b>Merkmal</b>	<b>Diagnosetext</b>
trnd_fKA	$f_{KA}$	Lagerkäfigschaden
trnd_fAR	$f_{AR}$	Lageraußenringschaden
trnd_fIR	$f_{IR}$	Lagerinnenringschaden
trnd_fWA	$f_{WA}$	Wälzkörperschaden
trnd_fW	$f_W$	Kugelschaden
trnd_eff	$\tilde{s}$	Lagerverschleiß

**Tabelle 3-3:** Merkmale und Grenzwertflags für Fanglagerschäden

Neben der Untersuchung des Verhaltens beim normalen Auslauf der Welle im Fanglager ist mit den Magnetlagern eine zusätzliche Aufbringung definierter rotierender Kräfte auf die Fanglager und somit die Analyse des Fanglagerverhaltens unter vorgegebener Belastung bei annähernd gleichen Randbedingungen möglich.

## 4 Diagnose an aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen

### 4.1 Anforderungen und Auswahl des Verfahrens

Bei der Fehlerdiagnose sind anhand der als Symptome genutzten Abweichungen der Merkmalsausprägungen vom nominalen Zustand Schlussfolgerungen über aufgetretene Fehler zu ziehen. Die Gesamtheit der einzelnen Merkmalsausprägungen bildet einen Merkmalsvektor. Nun besteht die Aufgabe darin, jedes Muster des Merkmalsvektors einer der möglichen Fehlerklassen oder dem fehlerfreien Fall zuzuordnen. Dabei sind Fehlentscheidungen zu vermeiden, andererseits aber eine hohe Empfindlichkeit und Trennschärfe zu erreichen. Die Isolation und Identifikation des Fehlers sollte frühzeitig geschehen und möglichst detaillierte Angaben über die Art und Größe, die Stelle im Prozess (Ort), in der der Fehler aufgetreten ist, über Ursachen sowie voraussichtliche Folgen enthalten. Dabei handelt es sich um ein Klassifikationsproblem, zu dessen Lösung z. B. klassische Verfahren der statistischen oder geometrischen Mustererkennung, wissensbasierte Verfahren unter Einsatz der Fuzzy-Logik oder neuronaler Netze anwendbar sind [TIL93]. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile möglicher Verfahren.

Die mit Simulationsrechnungen und Experimenten an aktiv magnetgelagerten Systemen erstellte Wissensbasis enthält Informationen über Ursache-Wirkung-Beziehungen. Die aufgetretenen Fehler sind die Ursachen und die beobachteten Symptome die Wirkungen. Dieses Wissen lässt sich sehr gut in Form von Produktionsregeln darstellen [MER90]. Heuristisches Wissen wird dabei in Regeln der Form "WENN <Bedingung> DANN <Schlussfolgerung>" verarbeitet. Der Bedingungsteil enthält als Fakten (Wirkungen) die beobachteten Symptome, der Schlussfolgerungsteil gibt Fehler als logische Ursachen der Fakten an. Die Verkettung dieser Regeln stellt dann die kausalen Abhängigkeiten zwischen Symptomen und Fehlern dar [ISE95]. Da Aussagen über Ursache-Wirkung-Beziehungen bei technischen Prozessen meist nicht exakt mathematisch formulierbar sind, sondern oft nur heuristisches Expertenwissen in Form von linguistischen Aussagen vorliegt, bietet sich bei der technischen Fehlerdiagnose für die Bildung von Schlussfolgerungen (Diagnoseaussagen) der Einsatz von Fuzzy-Logik-Systemen mit unscharfer Formulierung auf Basis linguistischer Variablen an. Die Fuzzy-Logik bietet die Möglichkeit, Unsicherheiten bei der Modellierung und bei der Zuordnung der Symptome zu Fehlern und Unsicherheiten bzw. Unbestimmtheiten im Prozess und der Messwert-erfassung mit zu berücksichtigen. Für die Fehlerdiagnose an aktiv magnetgelagerten Systeme-

men wurde daher ein regelbasiertes Verfahren unter Einsatz der Fuzzy-Logik als am besten geeignet ausgewählt.

Verfahren	Vor- /Nachteile
klassische Verfahren der statistischen Mustererkennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diagnosebewertung mit unsicheren Daten problematisch</li> <li>- Erklärungsfähigkeit gering</li> <li>- Angabe von a priori Wahrscheinlichkeiten schwierig</li> </ul>
klassische Verfahren der geometrischen Mustererkennung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- komplexe Darstellung bei mehr als 2 Dimensionen</li> <li>- hoher Berechnungsaufwand</li> </ul>
regelbasierte Fuzzy-Systeme	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ effizient und kompakt implementierbar</li> <li>+ transparent</li> <li>+ gute Herleitung aus Expertenwissen</li> <li>+ kein mathematisches Modell notwendig</li> <li>+ Verarbeitung ungenauer (unscharfer) Informationen</li> <li>+ einfache Interpretation der internen Abläufe und Ergebnisse</li> <li>- nicht lernfähig</li> <li>- keine formalen Methoden zur Optimierung</li> </ul>
Neuronale Netze	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr flexibel</li> <li>+ sehr komplexe Zusammenhänge lernbar</li> <li>- Entscheidungsfindung nicht nachvollziehbar</li> <li>- sehr viele Trainingsdaten notwendig</li> <li>- lange Lernphasen</li> <li>- sehr rechenintensiv</li> <li>- Übertragung von vorhandenem Wissen schwierig</li> </ul>

**Tabelle 4-1:** Vergleich von Klassifikationsverfahren [TIL93], [ZIM95], [MER90]

#### 4.2 Fehlerdiagnose mit regelbasierter Fuzzy-Logik [FRA94]

Erster Schritt bei der Anwendung des ausgewählten Diagnoseverfahrens ist die Fuzzyifizierung der scharfen Eingangsinformationen (Merkmale). Die Merkmale werden als linguistische Eingangsvariablen und deren Ausprägungen als unscharfe Fuzzy-Sets mit entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen definiert. Entsprechend den aktuellen Merkmalsausprägungen werden bei der Fuzzyifizierung für jedes Merkmal die Zugehörigkeitswerte zu den Fuzzy-Sets im Bereich  $[0,1]$  berechnet, welche als Symptome dienen. Damit erfolgt gleichzeitig eine Normierung der Merkmalsausprägungen.

Die Klassifizierung des Fehlers anhand der Symptome geschieht im Schlussfolgerungsprozess der Fuzzy-Inferenz durch Basisregeln der Form

WENN *Symptom\_1* UND *Symptom\_2* ... ODER *Symptom\_n* DANN *Fehlerklasse*

Die Symptome repräsentieren die Prämissen der Regel, die Fehlerklassen die entsprechenden Schlussfolgerungen. Die Auswertung der Prämisse (Wenn-Teil) liefert durch UND- bzw. ODER-Verknüpfung den Erfüllungsgrad der Regel. Die Konklusion (Dann-Teil) ergibt die Aussage, mit welchem Erfüllungsgrad die Fehlerklasse aufgetreten ist.

Nach Abarbeitung aller Regeln und Akkumulation der Einzelresultate steht für jede Fehlerklasse ein Erfüllungsgrad  $\mu$  im Bereich  $[0,1]$  zur Verfügung, welcher den Grad der Übereinstimmung der Merkmalsausprägungen mit der jeweiligen Fehlerklasse kennzeichnet. Dabei ist keine Defuzzifizierung in scharfe Ausgangswerte notwendig. Die Fehlerklassen werden nach dem Erfüllungsgrad sortiert. Für die Ausgabe bzw. Registrierung der Diagnosen ist es sinnvoll, einen Schwellwert des Erfüllungsgrades festzulegen, ab dem eine Diagnoseaussage erfolgen soll. Die jeweilige erkannte Fehlerklasse bildet anhand der Wissensbasis die Diagnoseaussage mit Angaben über Größe (Erfüllungsgrad), Art und Ort des Fehlers. Sie wird mit der Zeit des Auftretens erfasst und gegebenenfalls in Textform als Information für den Operator des Prozesses dargestellt. Zusätzlich können mit der diagnostizierten Fehlerklasse verknüpfte Maßnahmeempfehlungen aus der Wissensbasis entnommen und das Berechnungsmodell zur weiteren Lokalisierung des Fehlers aktiviert werden.

### **4.3 Erstellung von Fehlerdiagnosemodellen mit regelbasierter Fuzzy-Logik**

#### **4.3.1 Definition der Fuzzy-Sets und Operatoren**

Aufgrund der hohen Anzahl der Ein- und Ausgangsvariablen muss ein Konzept eingesetzt werden, bei dem der Berechnungsaufwand auch online beherrschbar ist. Die Anzahl der notwendigen Fuzzy-Sets und Regeln ist auf die minimal notwendige Größe zu optimieren, als Operatoren sind Funktionen auszuwählen, welche eine schnelle Verarbeitung realisieren.

Als Symptome werden die ermittelten Merkmalsausprägungen direkt oder aus der Differenz zwischen aktuellen Merkmalsausprägungen und Referenzwerten gebildete Residuen genutzt. Die Verwendung von Residuen bietet den Vorteil, dass durch Variieren der Referenzwerte

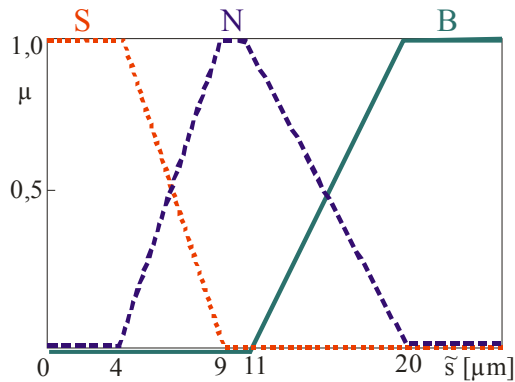
eine einfache Anpassung an unterschiedliche Betriebszustände und bereits aufgetretene Fehler möglich ist.

Fehler	Erklärung	Höhe der Merkmalsausprägung											
		$\tilde{s}$	$\bar{s}$	$\tilde{u}$	$\bar{u}$	$l_G$	$\bar{i}_S$	$W$	$R$	$A$	$V$	$\tilde{F}$	$\bar{F}$
FS1P	Offset des Sensorsignals, positiv	-1	0	-1	4	0	5	0	0	0	0	0	5
FS1M	Offset des Sensorsignals, negativ	-1	0	-1	-4	0	-5	0	0	0	0	0	-5
FS2P	erhöhte Verstärkung des Sensors	-5	0	-5	0	0	0	0	0	0	0	-5	0
FS2M	verringerte Verstärkung des Sensors	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0
FC1P	erhöhte Verstärkung des Reglers	-5	0	-5	0	0	0	5	-5	0	0	-5	0
FC1M	verringerte Verstärkung de Reglers	5	0	5	0	0	0	-5	5	0	0	5	0
FC2P	erhöhter Sollwert des Reglers	-1	-5	-1	3	0	4	0	0	0	0	1	0
FC2M	verringertes Sollwert des Reglers	-1	5	-1	-3	0	-4	0	0	0	0	1	0
FA1P	Offset des Stellsignals, positiv	0	0	0	-5	0	0	0	0	0	0	0	0
FA1M	Offset des Stellsignals, negativ	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
FA2P	Offset der Grunderregung, positiv	-4	0	-2	0	5	0	0	0	0	0	0	0
FA2M	Offset der Grunderregung, negativ	4	0	2	0	-5	0	0	0	0	0	0	0
FA3P	Offset des positiven Lagerstromes, positiv	-1	0	-2	-5	5	0	0	0	0	0	0	0
FA3M	Offset des positiven Lagerstromes, negativ	1	0	2	5	-5	0	0	0	0	0	0	0
FA4P	Offset des negativen Lagerstromes, positiv	-1	0	-2	5	5	0	0	0	0	0	0	0
FA4M	Offset des negativen Lagerstromes, negativ	1	0	2	-5	-5	0	0	0	0	0	0	0
FA5P	erhöhte Verstärkung des Stellsignals	-5	0	-5	0	0	0	4	0	-4	0	-5	0
FA5M	verringerte Verstärkung des Stell-signals	5	0	5	0	0	0	-4	0	4	0	5	0

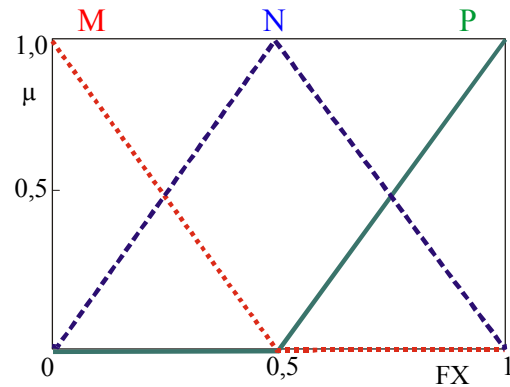
**Tabelle 4-2:** Merkmalsausprägungen bei ausgewählten Fehlern, normiert auf den Bereich  $\pm 5$

Bei der Fuzzyfizierung der Merkmalsausprägungen im Magnetlagerregelkreis werden für jedes Symptom die drei sich überlappenden Fuzzy-Sets  $S$  (small),  $N$  (normal) und  $B$  (big) definiert, wie in Bild 4-1 am Beispiel für die linguistische Variable  $\tilde{s}$  (Effektivwert Wellenlage) dargestellt. Hier ergibt sich z. B. für einen scharfen Eingangswert der Variablen  $\tilde{s}$  von  $14,5 \mu\text{m}$  ein Zugehörigkeitswert  $\mu(S) = 0$  zum Set  $S$  und  $\mu(N) = 0,5$  bzw.  $\mu(B) = 0,5$  zu den Sets  $N$  und  $B$ . Die Konstruktion dieser Sets erfolgt anhand des Expertenwissens über den Prozess, sie sind so zu konstruieren, dass sich für das Set  $N$  im Bereich um den Referenzzustand ein Zugehörigkeitswert von 1 ergibt. Bei Verlassen des Referenzbereiches sinkt der Zugehörigkeitswert ab, bis er im sicher fehlerhaften Zustand den Wert 0 erreicht. Im gleichen

Maße wachsen die Zugehörigkeitswerte zu den Sets  $S$  und  $B$ , welche im Referenzzustand einen Wert von 0 haben und auf ein Maximum von 1 anwachsen, wenn der jeweilige Fehlerzustand sicher erreicht wird. Dreieckige und trapezförmige Sets liefern bei einfachem Design und geringem Berechnungsaufwand die besten Ergebnisse.



**Bild 4-1:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $\tilde{s}$



**Bild 4-2:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $FX$

Bei der Erstellung der Ausgangssets für die Diagnose der Fehler im Magnetlagerregelkreis (siehe Tabelle 4-2) werden die Fehler  $FXP$  und  $FXM$  jeweils zur linguistischen Variablen  $FX$  zusammengefasst und mit den Sets  $M$  (minus),  $N$  (normal),  $P$  (plus) definiert (Bild 4-2).

Eine Aufstellung der Fuzzy-Sets für die Diagnose der Magnetlagerkreise enthält Anhang C2, deren Auslegung gilt für den Referenzzustand bei Nenndrehzahl des Rotors.

Als Operatoren für die Inferenz erwiesen sich für die UND-Verknüpfung das Algebraic Product

$$\text{Algebraic Product} \quad \mu_{AP}(y) = \prod_{i=1}^N \{\mu(y_i)\}, \quad (4-1)$$

für die ODER-Verknüpfung die Algebraic Sum

$$\text{Algebraic Sum} \quad \mu_{AS}(y) = 1 - \prod_{i=1}^N \{1 - \mu(y_i)\} \quad (4-2)$$

und für die Akkumulation der Schlussfolgerungen der Einzelregeln der Maximum-Operator

$$\text{Maximum} \quad \mu_{Max}(y) = \text{MAX}_{i=1}^N \{\mu(y_i)\} \quad (4-3)$$

am geeignetsten [TIL93].



### 4.3.2 Generierung der Fuzzy-Regelbasis

Aus der Auswertung der Wissensbasis ergeben sich bei den untersuchten Fehlern im Magnetlagerregelkreis die in Tabelle 4-2 dargestellten, auf einen Bereich von  $\pm 5$  normierten Merkmalsausprägungen. Untersucht wurde das Auftreten von Nullpunktfehlern durch Offsets (additive Fehler) und Verstärkungsfehlern (multiplikative Fehler) der Komponenten Sensor, Regler (Controller) und Stellglied (Aktor) im Referenzzustand bei Nenndrehzahl. Diese Tabelle ist die Grundlage für die Aufstellung der Fuzzy-Regelbasis. Die Aufstellung der Regeln soll am Beispiel des Fehlers "Offset Grunderregung" (FA2) demonstriert werden.

Die Basisregel bei Verwendung der Merkmale  $\bar{u}$  und  $I_G$  lautet:

WENN  $\bar{u}$  UND  $I_G$  DANN FA2.

Die komplette Regelmatrix dafür zeigt Tabelle 4-3.

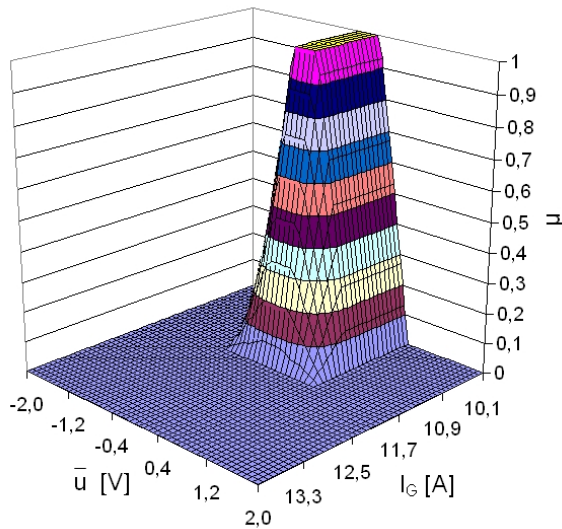
FA2		$\bar{u}$		
		S	N	B
$I_G$	S	N	M	N
	N	N	N	N
	B	N	P	N

**Tabelle 4-3:** Regelmatrix für den Fehler FA2

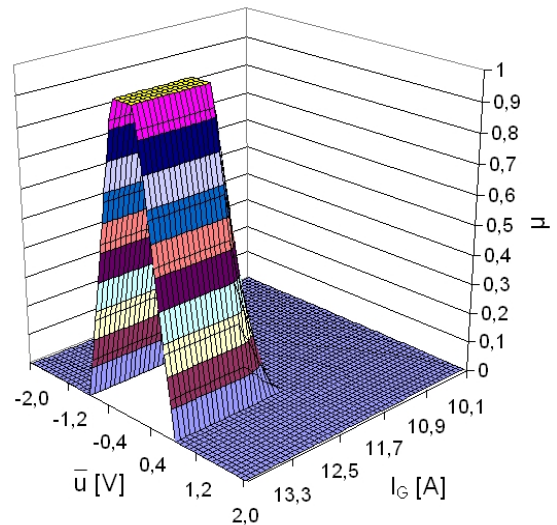
Es ergeben sich bei Variation der Merkmalsausprägungen die in Bild 4-3 und Bild 4-4 dargestellten Kennfelder für die Erfüllungsgrade der Fehlerklassen (Diagnoseaussagen)  $FA2 = M$  und  $FA2 = P$  mit den Einzelregeln

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

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



**Bild 4-3:** Kennfeld der Diagnoseaussage  
 $FA2 = M$



**Bild 4-4:** Kennfeld der Diagnoseaussage  
 $FA2 = P$

Für die Berechnung der Diagnoseaussagen  $FA2=N$  gelten die folgenden Einzelregeln:

WENN  $\bar{u} = S$  UND  $I_G = S$  DANN  $FA2 = N$

WENN  $\bar{u} = S$  UND  $I_G = N$  DANN  $FA2 = N$

WENN  $\bar{u} = S$  UND  $I_G = B$  DANN  $FA2 = N$

WENN  $\bar{u} = N$  UND  $I_G = N$  DANN  $FA2 = N$

WENN  $\bar{u} = S$  UND  $I_G = B$  DANN  $FA2 = N$

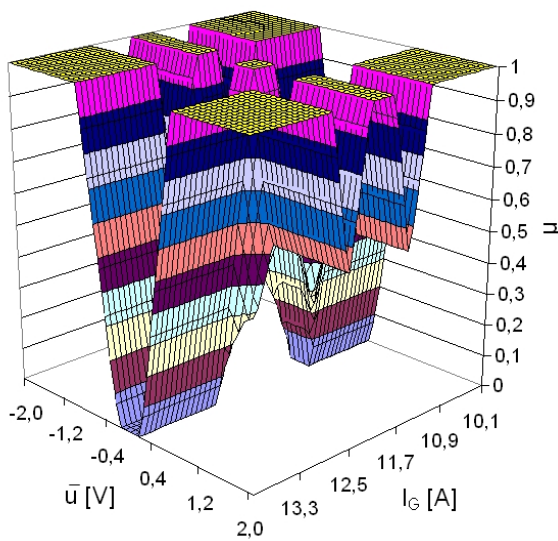
WENN  $\bar{u} = N$  UND  $I_G = B$  DANN  $FA2 = N$

WENN  $\bar{u} = B$  UND  $I_G = B$  DANN  $FA2 = N$

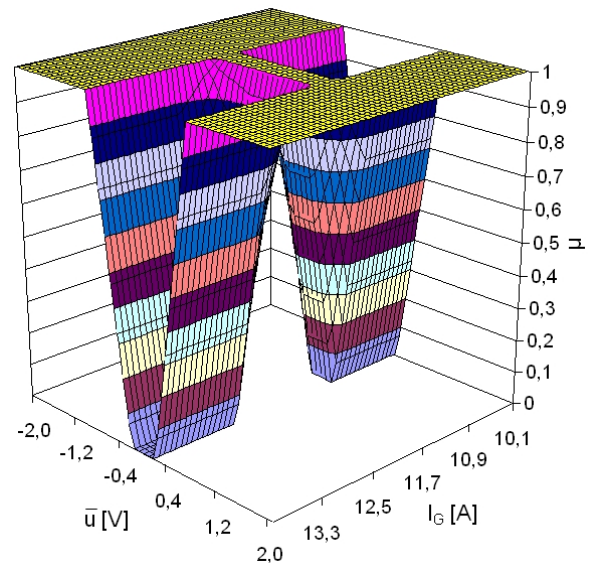
Diese liefern bei Akkumulation mit dem Maximum-Operator ein Kennfeld nach Bild 4-5. Eine Minimierung des Berechnungsaufwandes bei gleichzeitiger Verbesserung der Kennfeldform ist möglich, wenn der Erfüllungsgrad für  $FX = N$  aus den Erfüllungsgraden der Diagnosen  $FX = P$  und  $FX = M$  mit Gleichung (4-4) bestimmt wird.

$$\mu(FXN) = \text{MIN} \{(1 - \mu(FXM)), (1 - \mu(FXP))\} \quad (4-4)$$

Das entsprechende Kennfeld ist in Bild 4-6 dargestellt. Es zeigt weniger Deformationen als das durch Berechnung aller Regeln für  $FA2 = N$  ermittelte.



**Bild 4-5:** Kennfeld der Diagnoseaussage  $FA2 = N$ , berechnet mit Regelbasis (Tabelle 4-3)



**Bild 4-6:** Kennfeld der Diagnoseaussage  $FA2 = N$ , berechnet mit Gleichung (4-4)

Die Erstellung aller Regeln für die Fehler im Magnetlagerregelkreis (siehe Tabelle 4-2) erfolgt auf der Basis der relevanten Symptome, die minimal notwendig sind, um den Fehler eindeutig zu identifizieren. Für die Auswahl dieser Symptome wurde ein Optimierungsalgorithmus in Turbo-Pascal (siehe Anhang C3) entwickelt. Es ergeben sich die folgenden optimierten Sets von Einzelregeln:

#### Regelset FS1

WENN  $\bar{F} = B$  DANN  $FS1 = P$   
 WENN  $\bar{F} = N$  DANN  $FS1 = N$   
 WENN  $\bar{F} = S$  DANN  $FS1 = M$

#### Regelset FS2

WENN  $W = N$  UND  $\bar{i}_s = N$  UND  $\tilde{F} = S$  UND DANN  $FS2 = P$   
 WENN  $\tilde{F} = N$  DANN  $FS2 = N$   
 WENN  $W = N$  UND  $\bar{u} = N$  UND  $\tilde{F} = B$  UND DANN  $FS2 = M$

#### Regelset FC1

WENN  $R = S$  DANN  $FC1 = P$   
 WENN  $R = N$  DANN  $FC1 = N$   
 WENN  $R = B$  DANN  $FC1 = M$

**Regelset FC2**

WENN  $\bar{s} = S$  DANN  $FC2 = P$

WENN  $\bar{s} = N$  DANN  $FC2 = N$

WENN  $\bar{s} = B$  DANN  $FC3 = M$

**Regelset FA1**

WENN  $\bar{u} = S$  UND  $\bar{i}_S = N$  UND  $I_G = N$  UND  $\bar{F} = N$  DANN  $FA1 = P$

WENN  $\bar{u} = N$  DANN  $FA1 = N$

WENN  $\bar{u} = B$  UND  $\bar{i}_S = N$  UND  $I_G = N$  UND  $\bar{F} = N$  DANN  $FA1 = M$

**Regelset FA2**

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

WENN  $I_G = N$  DANN  $FA2 = N$

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

**Regelset FA3**

WENN  $\bar{u} = S$  UND  $I_G = B$  DANN  $FA3 = P$

WENN  $\bar{u} = B$  UND  $I_G = S$  DANN  $FA3 = M$

**Regelset FA4**

WENN  $\bar{u} = B$  UND  $I_G = B$  DANN  $FA4 = P$

WENN  $\bar{u} = S$  UND  $I_G = S$  DANN  $FA4 = M$

**Regelset FA5**

WENN  $I_G = N$  UND  $A = S$  DANN  $FA5 = P$

WENN  $A = N$  DANN  $FA5 = N$

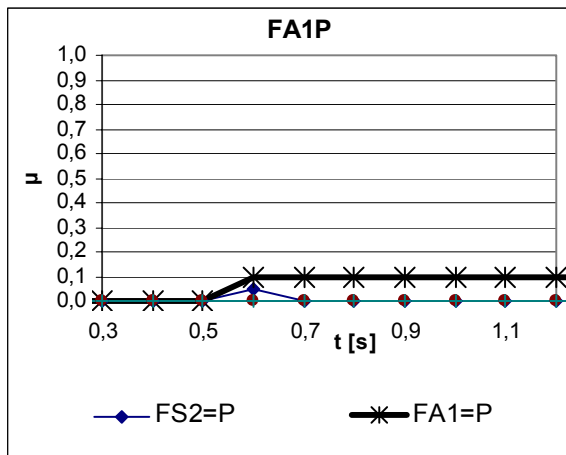
WENN  $I_G = N$  UND  $A = B$  DANN  $FA5 = M$

Ist bei den Regelsets die Regel für  $FX = N$  nicht angegeben, erfolgt die Berechnung nach Gleichung (4-4).

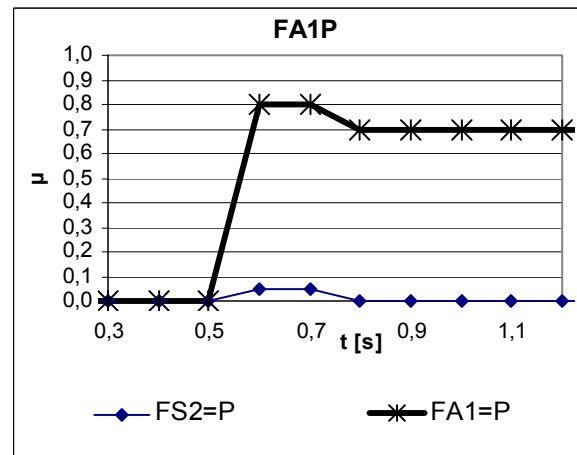
**4.3.3 Verifikation**

Die korrekte Zuordnung der Fehlerklassen mit den aufgestellten Regeln wurde durch Simulation der Fehler bei einer eingestellten Rotordrehzahl von  $1000 \text{ min}^{-1}$  untersucht. Die Merkmalsberechnung erfolgt dabei jeweils über einen Zeitraum von 0,1 s. Der Fehler tritt zum Zeitpunkt  $t = 0,5 \text{ s}$  auf. Die Erfüllungsgrade für die Diagnoseaussagen  $FX = N$  sind nicht angegeben, da bei Anschlägen dieser Aussagen kein Fehler auftritt.

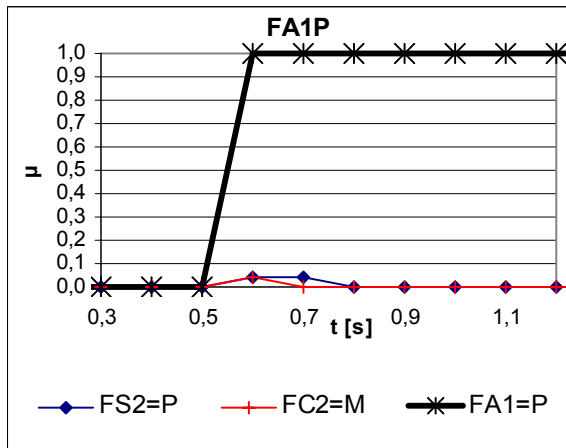
Die Erfüllungsgrade der Diagnosen, welche bei simuliertem Offset des Stellsignals (Fehler FA1) anschlagen, sind in den Bildern 4-7 bis 4-10 dargestellt.



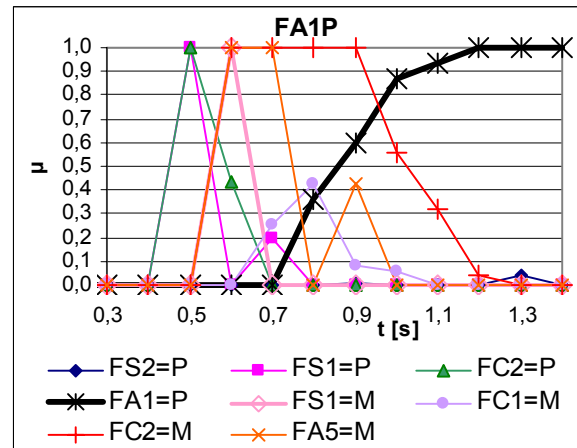
**Bild 4-7:** Offset Stellsignal + 0,06 A



**Bild 4-8:** Offset Stellsignal + 0,12 A



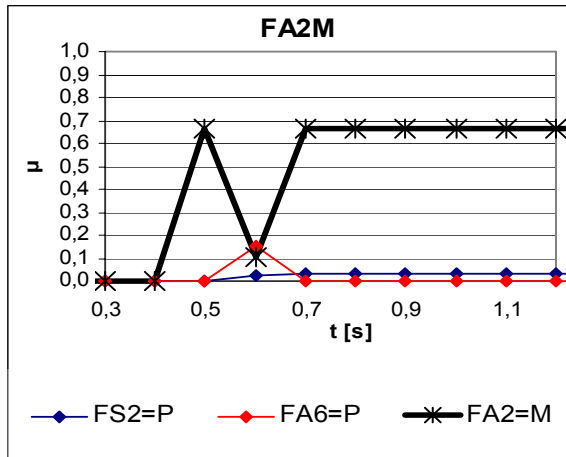
**Bild 4-9:** Offset Stellsignal + 0,15 A



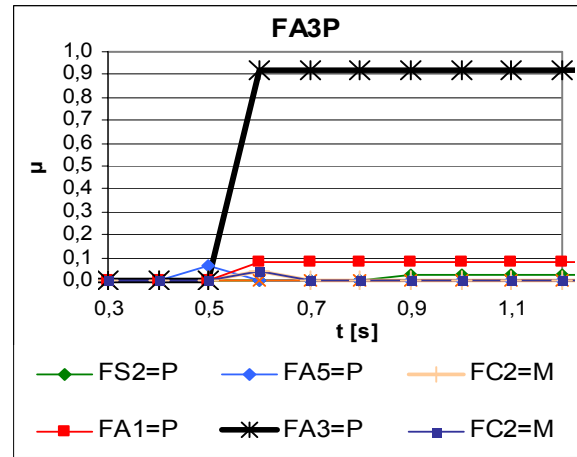
**Bild 4-10:** Offset Stellsignal + 5,00 A

Der Referenzwert für das Stellsignal ist ein Strom von 12 A. Bei einem Offset von 0,06 A (Bild 4-7) beträgt der Erfüllungsgrad der korrekten Diagnose  $\mu = 0,1$ , er erhöht sich auf  $\mu = 0,8$  bei einem Offset von 0,12 A (Bild 4-8). Das Maximum wird bei einem Offsetstrom von 0,15 A erreicht (Bild 4-9). In Bild 4-10 sind die Ergebnisse bei einem sehr hohen Offsetstrom von 5 A zu sehen. Die Fehlerklasse  $FA1 = P$  wird mit einem Erfüllungsgrad  $\mu = 1$  diagnostiziert, andere Diagnosen schlagen auch kurzzeitig an. Zum Zeitpunkt  $t = 1,4$  s, nachdem sich das System stabilisiert hat, feuert nur noch die zutreffende Diagnose.

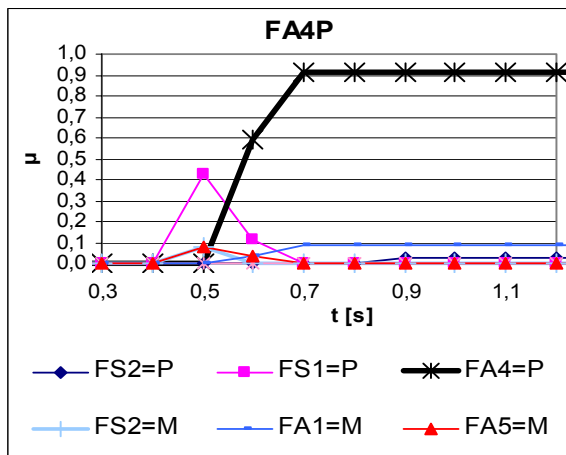
Die Bilder 4-11 bis 4-18 präsentieren weitere Diagnoseergebnisse bei der Simulation der Fehler entsprechend Tabelle 4-2 mit praxisrelevanten Werten. In allen Fällen ist der simulierte Fehler deutlich unterscheidbar von anderen, er wird korrekt identifiziert.



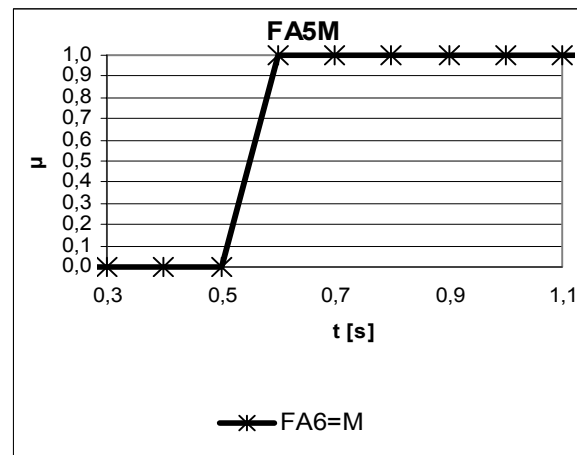
**Bild 4-11:** Offset Grunderregung - 0,6 A



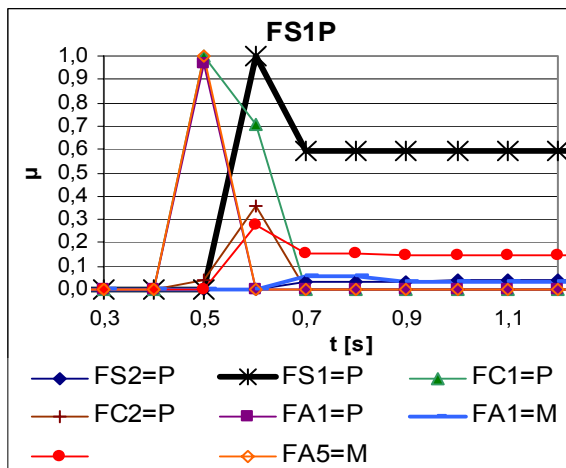
**Bild 4-12:** Offset des positiven Lagerstromes + 1,5 A



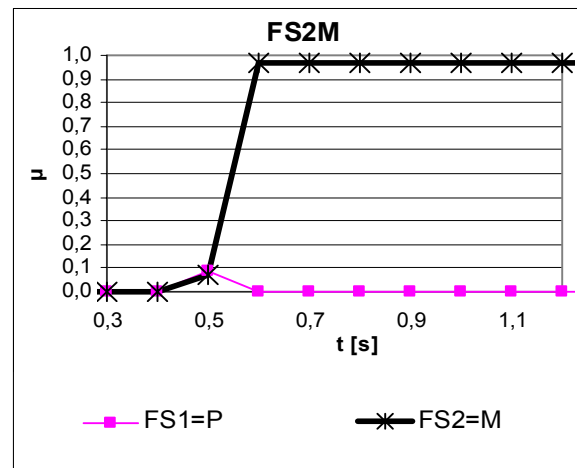
**Bild 4-13:** Offset des negativen Lagerstromes + 1,5 A



**Bild 4-14:** Verstärkung Stellsignal - 20 %



**Bild 4-15:** Offset Sensorsignal + 30  $\mu$ m



**Bild 4-16:** Verstärkung Sensor - 50 %

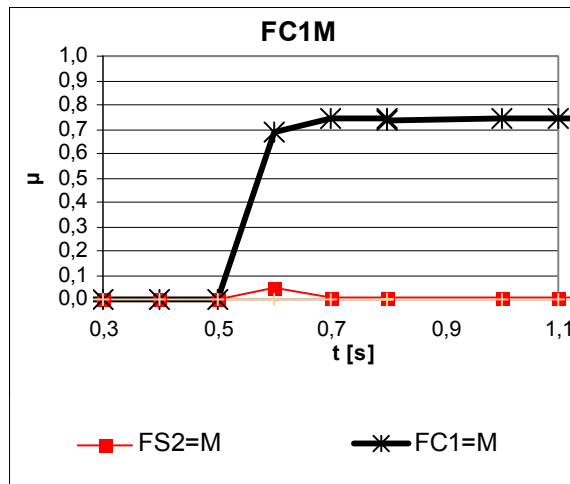


Bild 4-17: Verstärkung Regler - 40 %

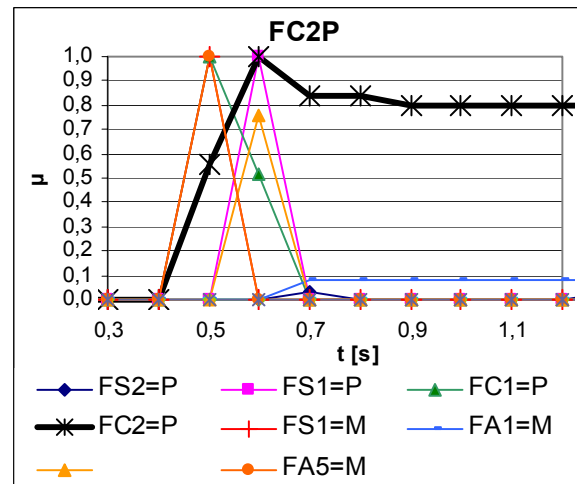


Bild 4-18: Sollwert Regler + 25 μm

Soll eine Diagnoseaussage erst erfolgen, wenn ein Erfüllungsgrad von mindestens  $\mu = 0,2$  für eine Fehlerklasse erreicht wird, ergeben sich die in Tabelle 4-4 angeführten Mindestgrößen der Fehler für die Auslösung der Fehlermeldung.

Fehler	Fehlerklasse	Mindestgröße des Fehlers	
		absolut	relativ
Offset des Sensorsignals	$FS1 = M/P$	- 15 μm / + 15 μm	- 5 % / + 5 %
Verstärkung des Sensors	$FS2 = M/P$	0,65 / 1,2	- 35 % / + 20 %
Verstärkung des Reglers	$FC1 = M/P$	0,8 / 1,16	- 20 % / + 16 %
Sollwert des Reglers	$FC2 = M/P$	- 10 μm / + 10 μm	- 3,3 % / + 3,3 %
Offset des Stellsignals	$FA1 = M/P$	- 0,07 A / + 0,07 A	- 0,6 % / + 0,6 %
Offset der Grunderregung	$FA2 = M/P$	- 0,32 A / + 0,32 A	- 2,7 % / + 2,7 %
Offset der Lagerströme	$FA3$ bzw. $FA4=M/P$	- 1 A / + 1 A	- 8,3 % / + 8,3 %
Verstärkung des Stellsignals	$FA5=M/P$	0,92 / 1,11	- 8 % / + 11 %

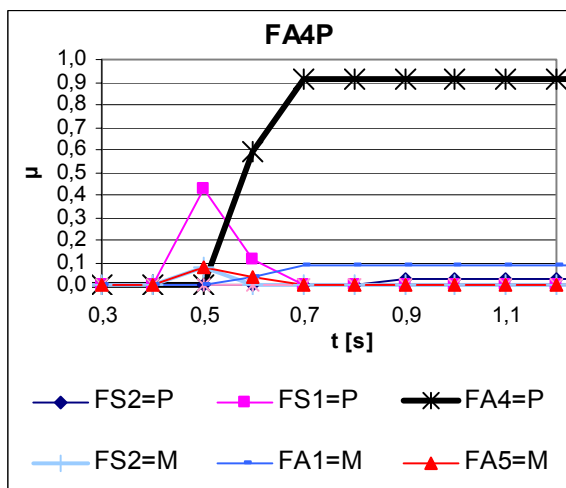
**Tabelle 4-4:** Notwendige Abweichungen vom Referenzwert zur Erreichung eines Erfüllungsgrades  $\mu = 0,2$

Beim plötzlichen Auftreten des Fehlers feuern in einigen Fällen nicht zutreffende Fehlerklassen bis der Regler die Störung ausgeregelt hat. Die dabei kurzzeitig auftretenden Fehldiagnosen lassen sich weitestgehend durch Filterung der berechneten Erfüllungsgrade mittels arithmetischer (Gleichung (2-6)) oder exponentieller Mittelwertbildung (Gleichung (4-5)) ausblenden.

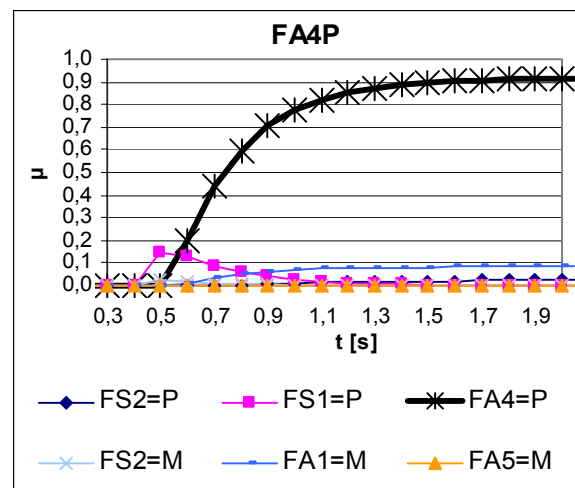
$$y(k) = y(k-1) + \frac{x(k) - y(k-1)}{w} \quad (4-5)$$

$y(k)$  berechneter exponentieller Mittelwert       $x(k)$  aktueller Messwert  
 $y(k-1)$  vorhergehender berechneter Wert       $w$  Glättungsfaktor

Der Glättungsfaktor  $w$  bestimmt die Bedämpfung kurzzeitiger Signalanteile, diese erhöht sich mit steigendem  $w$ . Nachteilig beim Einsatz der Filter ist die auftretende Zeitverzögerung des Ausgangssignals. In Bild 4-19 ist die Ausblendung nicht erwünschter Diagnosen durch exponentielle Mittelwertbildung ( $w = 3$ ) am Beispiel des Fehlers "Offset Lagerstrom" (FA4) im Vergleich zur Diagnose ohne Filterung (Bild 4-20) dargestellt. Die unerwünschte Diagnose  $FS1 = P$  wird unter die Schwelle von  $\mu = 0,2$  gedrückt, für das Erreichen der zutreffenden Diagnose  $FA4 = P$  mit einem Erfüllungsgrad von  $\mu = 0,92$  ergibt sich eine Verzögerung um 1,1 s.



**Bild 4-19:** Verlauf der Erfüllungsgrade beim Fehler "Offset Lagerstrom" ohne Filterung



**Bild 4-20:** Verlauf der Erfüllungsgrade beim Fehler "Offset Lagerstrom" mit Filterung

## 4.4 Erweiterte Diagnosemodelle

### 4.4.1 Fuzzy-Logik-Module

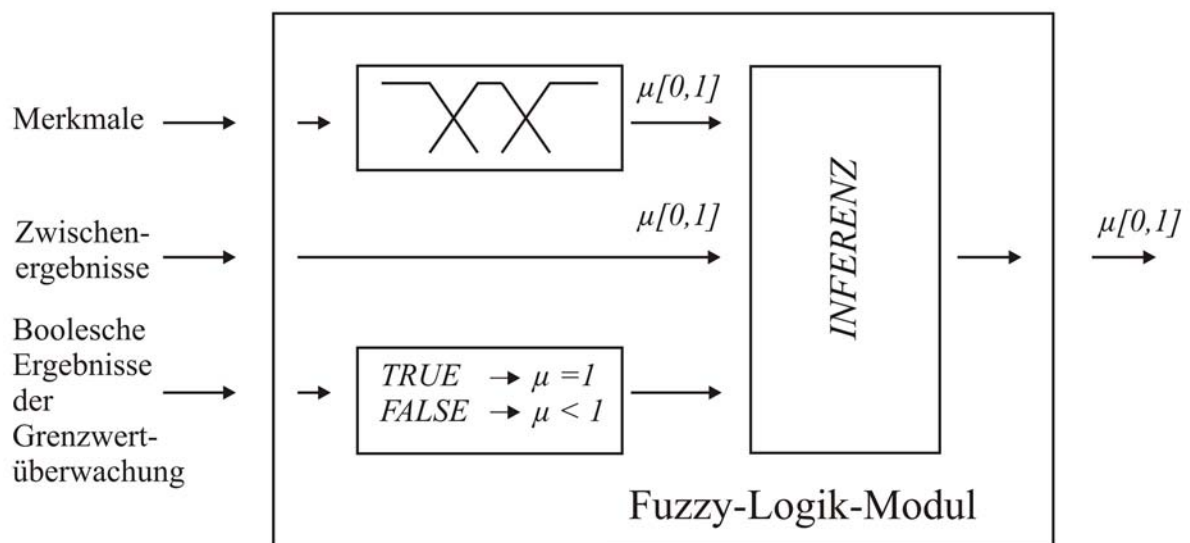
Die Erstellung der Diagnosemodelle im Abschnitt 4.3 erfolgte jeweils für den Magnetlagerregelkreis einer Achse. Zur Identifikation von Fehlern, welche sich auf mehrere Achsen auswirken, sind die Merkmale der anderen Magnetlagerregelkreise hinzuzuziehen bzw. zusätzliche zu verwenden. Bei der Diagnose des gesamten Prozesses ergeben sich dabei umfangreiche Regelbasen, welche schnell unübersichtlich werden. Zur Erhöhung der Transparenz wird daher eine hierarchische Struktur der Regelabarbeitung eingeführt [CHA95]. Die Realisierung



dieser Struktur geschieht durch Kaskadierung sogenannter Fuzzy-Logik-Module (FLM), welche die Inferenzberechnung der Teilregelbasen übernehmen. Bild 4-21 zeigt die Struktur eines Fuzzy-Logik-Moduls. Eingangsgrößen der FLM sind

- Merkmale, welche vom FLM fuzzyfiziert werden,
- von anderen FLM als Zwischenergebnisse berechnete Erfüllungsgrade,
- boolesche Werte aus der Grenzwertüberwachung.

Die von den einzelnen FLM berechneten Zwischenergebnisse in Form von Erfüllungsgraden können wiederum von anderen Diagnoseregeln verwendet werden, damit verringert sich der Rechenaufwand.



**Bild 4-21:** Struktur eines Fuzzy-Logik-Moduls

#### 4.4.2 Diagnose statischer Radialkräfte

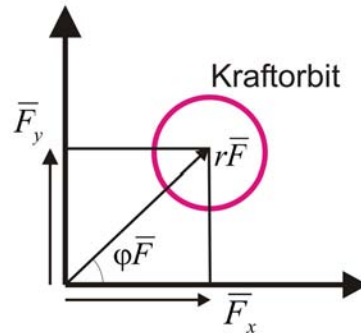
Beim Auftreten von statischen Radialkräften, verursacht z. B. durch Radialschübe bei Kreiselpumpen [HOL89, AUT80], Motorzugkräfte oder Prozesskräfte bei Werkzeugmaschinen, wirkt eine konstante, durch Betrag, Position und Winkel definierte Störkraft auf den Rotor, welche mit den Magnetlagerkräften kompensiert wird. Aus Strom- und Wellenlagesignalen sind die erzeugten Gegenkräfte für jede Lagerachse und -ebene berechenbar. Charakteristisch für auftretende statische Radialkräfte (Bild 4-22) sind die veränderten Beträge  $r\bar{F}$  (Gleichung (4-6)) der durch Mittelwertbildung berechneten radialen Störkraftvektoren bei konstanten Winkeln  $\varphi\bar{F}$  (Gleichung (4-7)).

$$r\bar{F} = \sqrt{\bar{F}_x^2 + \bar{F}_y^2} \quad (4-6)$$

$$\varphi\bar{F} = \arctan\left(\frac{\bar{F}_y}{\bar{F}_x}\right) = const. \quad (4-7)$$

$\bar{F}_x$  Mittelwert der Störkraft in  $x$ -Richtung

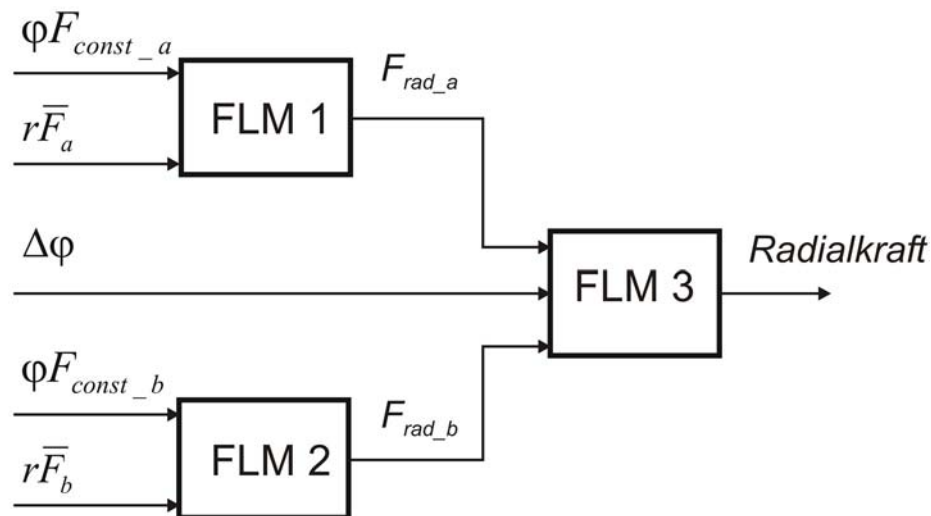
$\bar{F}_y$  Mittelwert der Störkraft in  $y$ -Richtung



**Bild 4-22:** Merkmale beim Wirken einer statischen Radialkraft

Die Mittelwerte werden jeweils über einen Messzyklus (mehrere Umdrehungen des Rotors) berechnet. Die Erkennung eines konstanten Winkels  $\varphi\bar{F}$  erfolgt durch Bildung des Effektivwertes von  $\varphi\bar{F}$  über mehrere Messzyklen für den die linguistische Variable  $\varphi F_{const}$  definiert wird.

Zur wissensbasierten Diagnose von statischen Radialkräften werden mehrere Fuzzy-Logik-Module kaskadiert (Bild 4-23).



**Bild 4-23:** Kaskadierung der Fuzzy-Logik-Module zur Diagnose *Radialkraft*

Eingangsgrößen der FLM 1 und FLM 2 sind jeweils die Mittelwerte der Beträge der Kraftvektoren  $r\bar{F}$  des A-Lagers (oberes Lager) und des B-Lagers (unteres Lager) sowie die als linguistische Variable  $\varphi^F_{const}$  definierten Effektivwerte der Winkel der Kraftvektoren der jeweiligen Lagerebene.

Das Fuzzy-Logik-Modul FLM 1 berechnet unter Anwendung der Basisregel

$$\text{WENN } \varphi^F_{const\_a} \text{ UND } r\bar{F}_a \text{ DANN } F_{rad\_a}$$

und der Regelmatrix in Tabelle 4-6 die Sets der linguistischen Ausgangsvariablen  $F_{rad\_a}$  für die Erkennung einer statischen radialen Störkraft in der Lagerebene A (oben). FLM 2 nimmt analog zu FLM 1 die Berechnung für die Lagerebene B (unten) vor.

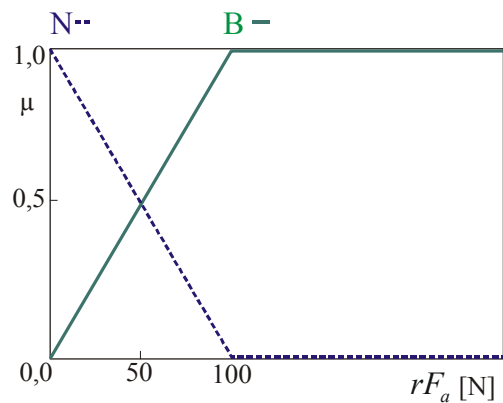
Die verwendeten linguistischen Variablen und die dazugehörigen Fuzzy-Sets sind in Tabelle 4-5 bzw. in den Bildern 4-24 bis 4-26 dargestellt. Es werden jeweils nur 2 Sets  $N$  und  $B$  definiert, da lediglich eine Vergrößerung der Merkmalsausprägungen relevant ist.

Linguistische Variable	Sets	Bemerkung
$F_{rad\_a}, F_{rad\_b}, r\bar{F}_a,$ $r\bar{F}_b, \varphi^F_{const\_a}, \varphi^F_{const\_b}$	$B$	Groß (Big)
	$N$	Normal
$\Delta\varphi$	$0$	$0^\circ$
	$180$	$180^\circ$
	$I$	nicht relevant (don't care)
<i>Radialkraft</i>	$RiLa$	Radialkraft in Lagerebene A
	$RiLb$	Radialkraft in Lagerebene B
	$RzL$	Radialkraft zwischen den Lagerebenen
	$RaL$	Radialkraft außerhalb der Lagerebenen

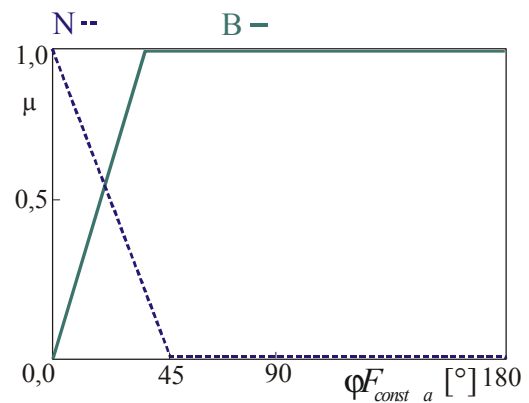
**Tabelle 4-5:** Linguistische Variablen zur Diagnose *Radialkraft*

$F_{rad\_a}$		$\varphi^F_{const\_a}$	
		$N$	$B$
$r\bar{F}_a$	$N$	$N$	$N$
	$B$	$B$	$N$

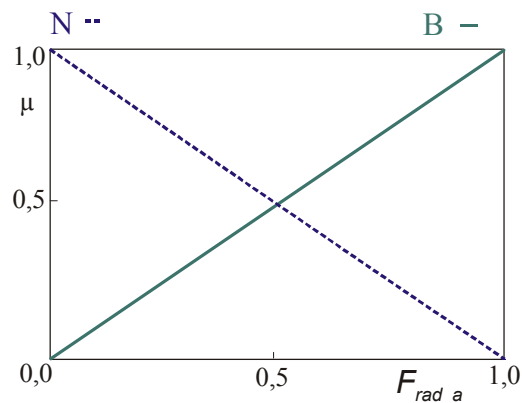
**Tabelle 4-6:** Regelbasis des Fuzzy-Logik-Moduls FLM 1



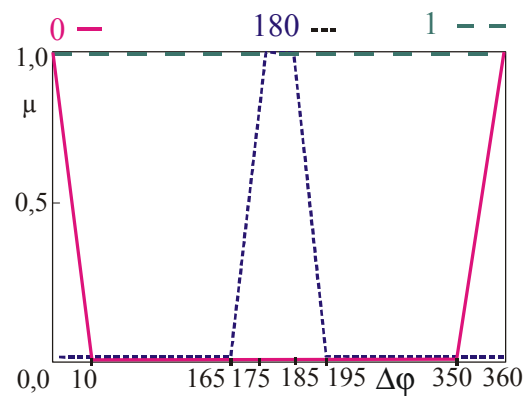
**Bild 4-24:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $r\bar{F}_a$



**Bild 4-25:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $\varphi^{F_{const\_a}}$



**Bild 4-26:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $F_{rad\_a}$



**Bild 4-27:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $\Delta\varphi$

Mit der Basisregel

WENN  $F_{rad\_a}$  UND  $F_{rad\_b}$  UND  $\Delta\varphi$  DANN *Radialkraft*

erfolgt die Identifizierung der radialen Störkraft. FLM 3 berechnet damit und mit der Regelmatrix entsprechend Tabelle 4-7 die Erfüllungsgrade der Fehlerklassen für die Diagnose der radialen Störkraft. Eingangsgrößen sind die mit FLM 1 und FLM 2 ermittelten Erfüllungsgrade der Fuzzy-Sets  $F_{rad\_a}$  und  $F_{rad\_b}$  und der Sets der linguistischen Variablen  $\Delta\varphi$ , welche aus der Differenz  $\Delta\varphi$  der Winkel der Störkraftvektoren (Gleichung (4-8)) gebildet wird.

$$\Delta\varphi = | \varphi_{\bar{F}_a} - \varphi_{\bar{F}_b} | \quad (4-8)$$

$\varphi_{\bar{F}_a}$  Winkel des Störkraftvektors im A-Lager

$\varphi_{\bar{F}_b}$  Winkel des Störkraftvektors im B-Lager

Die verwendeten linguistischen Variablen und deren Sets sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Das Set  $I$  der Variablen  $\Delta\varphi$  dient dem Ausblenden dieser Variablen bei der Berechnung der Störungen  $RiLa$  bzw.  $RiLb$ .

<i>Radialkraft</i>				$\Delta\varphi$		
				$0$	$180$	$1$
$F_{rad\_b}$	$N$	$F_{rad\_a}$	$N$	$N$	$N$	$N$
	$N$		$B$	$N$	$N$	<b><math>RiLa</math></b>
	$B$		$N$	$N$	$N$	<b><math>RiLb</math></b>
	$B$		$B$	<b><math>RzL</math></b>	<b><math>RaL</math></b>	$N$

**Tabelle 4-7:** Regelbasis des Fuzzy-Logik-Moduls FLM 3

Greift die radiale Störkraft nur in der Lagerebene A an, liefert die Regel

$$\text{WENN } F_{rad\_a} = B \text{ UND } F_{rad\_b} = N \text{ UND } \Delta\varphi = 1 \text{ DANN } \textit{Radialkraft} = RiLa$$

den höchsten Erfüllungsgrad, es wird die Diagnoseaussage "Radialkraft in Lagerebene A" ausgegeben.

Mit der Regel

$$\text{WENN } F_{rad\_a} = N \text{ UND } F_{rad\_b} = B \text{ UND } \Delta\varphi = 1 \text{ DANN } \textit{Radialkraft} = RiLb$$

erhält man den höchsten Erfüllungsgrad, wenn die Störkraft nur in der Lagerebene B angreift und die Diagnoseaussage "Radialkraft in Lagerebene B".

In beiden Fällen wird die Radialkraft durch Betrag  $r\bar{F}$  und Richtung  $\varphi\bar{F}$  des berechneten Kraftvektors sowie die Angabe der Lagerebene entsprechend dem Diagnoseergebnis identifiziert.

Wenn die Störkraft zwischen den Radiallagern wirkt, sind die Winkel der Kraftvektoren in Lagerebene A und B gleich, d. h. die Differenz  $\Delta\varphi$  der Winkel ist Null. Es feuert die Regel

$$\text{WENN } F_{rad\_a} = B \text{ UND } F_{rad\_b} = B \text{ UND } \Delta\varphi = 0 \text{ DANN } \textit{Radialkraft} = RzL.$$

Es erfolgt die Ausgabe der Diagnose "Radialkraft zwischen den Lagerebenen".

Die radiale Störkraft  $F_{stör}$  wird mit Gleichung (4-9) aus der Summe der ermittelten Störkraftbeträge in den Ebenen berechnet.

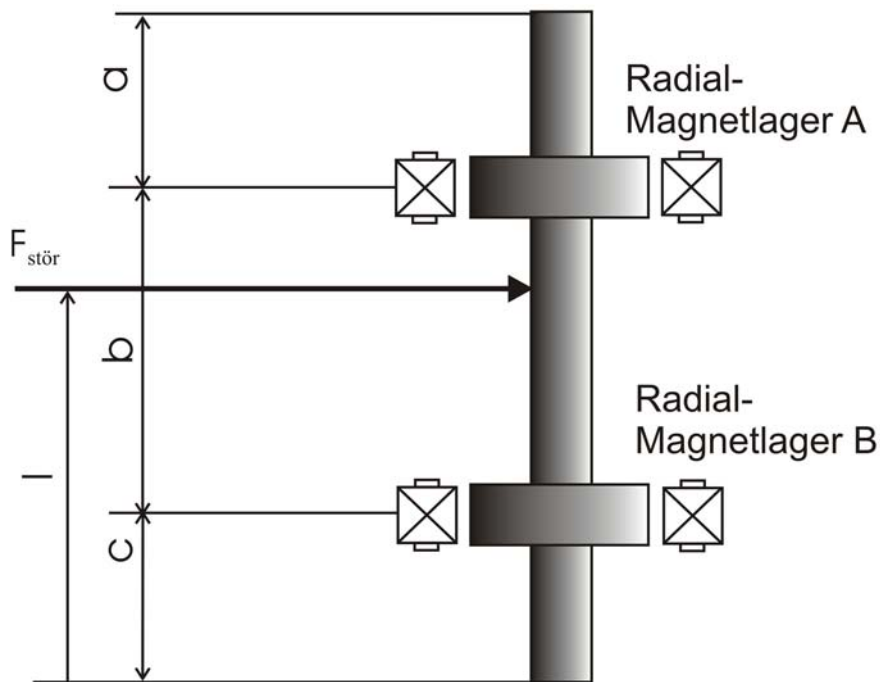
$$F_{stör} = r\bar{F}_a + r\bar{F}_b \quad (4-9)$$

Die Position des Kraftangriffspunktes  $l$ , bezogen auf den Rotorfußpunkt (Bild 4-28), ergibt sich nach Gleichung

$$l = \frac{r\bar{F}_a \cdot b}{F_{stör}} + c \quad (4-10)$$

$b$  Lagerabstand

$c$  Abstand des Fußpunktes des Rotors zum Lager B



**Bild 4-28:** Maßangaben zur Kraftberechnung

Der Fehler wird identifiziert durch den Kraftangriffspunkt  $l$ , die Störkraft  $F_{stör}$  und den ermittelten Winkel  $\varphi\bar{F}$ .

Wirkt die Kraft außerhalb der Radiallagerebenen, beträgt die Differenz der Winkel  $\Delta\varphi = 180^\circ$ .

Es feuert die Regel

$$\text{WENN } F_{rad\_a} = B \text{ UND } F_{rad\_b} = B \text{ UND } \Delta\varphi = 180 \text{ DANN Radialkraft} = RaL.$$

Die Diagnose "Radialkraft außerhalb der Lagerebenen" wird ausgegeben.

Durch Addition der auf die Radiallager wirkenden Störkraftvektoren werden der resultierende Winkel  $\varphi_{F_{stör}}$  und die resultierende Störkraft  $F_{stör}$  bestimmt. Die Berechnung der Position  $l$  des Kraftangriffspunktes (Bild 4-28) erfolgt nach Gleichung (4-11).

$$l = \left( \frac{r\bar{F}_a \cdot b}{F_{stoer}} \right) \cdot (\text{sgn}(r\bar{F}_a - r\bar{F}_b)) + c \quad (4-11)$$

Voraussetzung für o. g. Betrachtungen ist das Wirken einer einzelnen radialen Störkraft an einem Kraftangriffspunkt. Bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Radialkräfte wird die resultierende Störkraft ermittelt. Setzen mehrere Radialkräfte zeitlich verzögert ein, ist die zusätzlich aufgetretene Kraft durch Residuenbildung identifizierbar. Hierbei werden die Merkmalsausprägungen durch Berechnung der Differenz aus den aktuellen Werten und den Referenzwerten vor dem Eintreten der zusätzlichen Kraft gebildet.

Die Angabe des Angriffswinkels der Störkraft bezieht sich auf die vom Magnetlager aufgebrauchte Zugkraft zur Kompensation der Störung. Der Winkel ist identisch mit den berechneten bei einer Wirkung der Störung als Druckkraft, greift die Störung als Zugkraft an, wird sie durch das Komplement des Winkels lokalisiert.

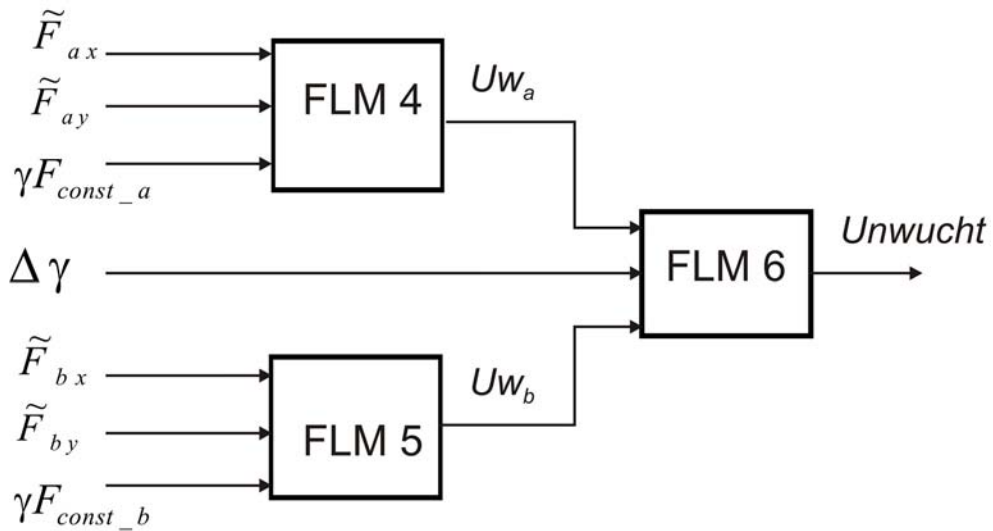
#### 4.4.3 Diagnose von Unwuchten

Beim Fehler "Unwucht", verursacht z. B. durch Schwerpunktverlagerung des Rotors oder umlaufende Motorkräfte, wirkt eine konstante, an die Rotordrehung gebundene, umlaufende Störkraft, welche mit den Magnetlagern ausgeregelt wird. Für die Diagnose von Unwuchten werden die aus Wellenlagen und Lagerströmen pro Messzyklus berechneten Effektivwerte  $\tilde{F}$  der Lagerkräfte genutzt. Unwuchten zeigen sich in einer Vergrößerung dieser Werte in der betroffenen Ebene. Durch das Erzeugen einer Triggermarke beim Rotordrehwinkel  $\gamma = 0^\circ$  kann der Phasenwinkel  $\gamma_U$ , bei dem die Unwuchtkraft in den einzelnen Lagerebenen wirkt, bestimmt werden (siehe Abschnitt 2.4.1). Kennzeichnend für das Auftreten einer Unwucht sind konstante Winkel  $\gamma_U$ . Zur Einbindung dieses zusätzlichen Merkmals wird die linguistische Variable  $\gamma_{const}^F$  für die über mehrere Messzyklen gebildeten Effektivwerte von  $\gamma_U$  eingeführt. Ist die Bestimmung des absoluten Rotordrehwinkels nicht möglich, muss diese Variable aus den Regeln entfernt bzw. deren Wert mit  $0^\circ$  belegt werden.

Für die wissensbasierte Unwuchtdiagnose wird die in Bild 4-29 dargestellte Kaskadierung von mehreren Fuzzy-Logik-Modulen eingesetzt. FLM 4 berechnet mit den linguistischen Variablen  $\tilde{F}_{ax}$ ,  $\tilde{F}_{ay}$  und  $\gamma F_{const\_a}$  unter Anwendung der Basisregel

$$\text{WENN } \gamma F_{const\_a} \text{ UND } \tilde{F}_{ax} \text{ UND } \tilde{F}_{ay} \text{ DANN } U_{w_a}$$

und der Regelbasis in Tabelle 4-8 die Sets der linguistischen Ausgangsvariablen  $U_{w_a}$  für die Unwuchterkennung im A-Lager (oberes Lager) . FLM 5 nimmt analog zu FLM 4 die Berechnung für das B-Lager (unteres Lager) vor.



**Bild 4-29:** Kaskadierung von Fuzzy-Logik-Modulen zur Diagnose *Unwucht*

Die verwendeten linguistischen Variablen und Fuzzy-Sets sind in Tabelle 4-10 bzw. in den Bildern 4-30 bis 4-33 dargestellt, die Sets der Variablen  $U_{w_a}$  und  $U_{w_b}$  werden analog zu  $F_{rad\_a}$  und  $F_{rad\_b}$  (siehe Abschnitt 4.4.2) definiert.

$U_{w_a}$				$\gamma F_{const\_a}$	
				$N$	$B$
$\tilde{F}_{ax}$	$N$	$\tilde{F}_{ay}$	$N$	$N$	$N$
	$N$		$B$	$N$	$N$
	$B$		$N$	$N$	$N$
	$B$		$B$	$B$	$N$

**Tabelle 4-8:** Regelbasis für das Fuzzy-Logik-Modul FLM 4



FLM 6 berechnet mit der Basisregel

WENN  $U_{w_a}$  UND  $U_{w_b}$  UND  $\Delta\gamma$  DANN *Unwucht*

und der Regelmatrix entsprechend Tabelle 4-9 die Erfüllungsgrade der Fehlerklassen für die Unwuchtdiagnose. Eingangsgrößen sind die von FLM 4 und FLM 5 bestimmten Erfüllungsgrade und die linguistische Variable  $\Delta\gamma$ , deren Werte man mit Gleichung (4-12) berechnet.

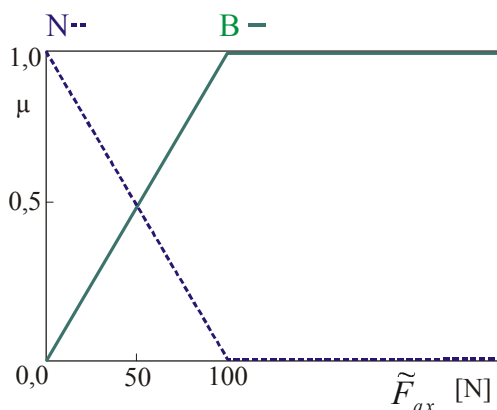
$$\Delta\gamma = | \gamma_{Ua} - \gamma_{Ub} | \tag{4-12}$$

- $\gamma_{Ua}$     Phasenwinkel des Unwuchtkraftvektors in der Lagerebene A
- $\gamma_{Ub}$     Phasenwinkel des Unwuchtkraftvektors in der Lagerebene B

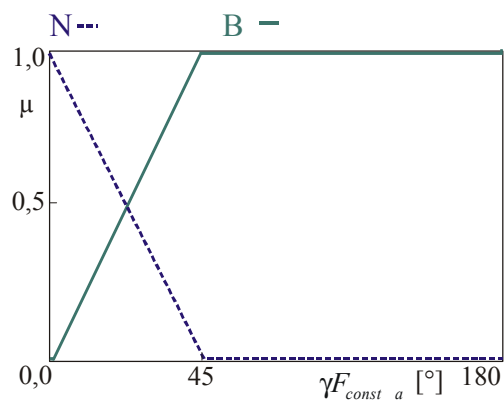
Die Ermittlung von  $\gamma_{Ua}$  und  $\gamma_{Ub}$  kann anhand eines Wellenlagesignals über einen relativen Referenzpunkt erfolgen, falls kein Keyphasor vorhanden ist (siehe Abschnitt 2.4.1).

<i>Unwucht</i>				$\Delta\gamma$			
				<i>0</i>	<i>180</i>	<i>W</i>	<i>I</i>
<i>Unw<sub>b</sub></i>	<i>N</i>	<i>Unw<sub>a</sub></i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	
	<i>N</i>		<i>B</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>UiLa</i>
	<i>B</i>		<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>UiLb</i>
	<i>B</i>		<i>B</i>	<i>UzL</i>	<i>UaL</i>	<i>Uw</i>	<i>N</i>

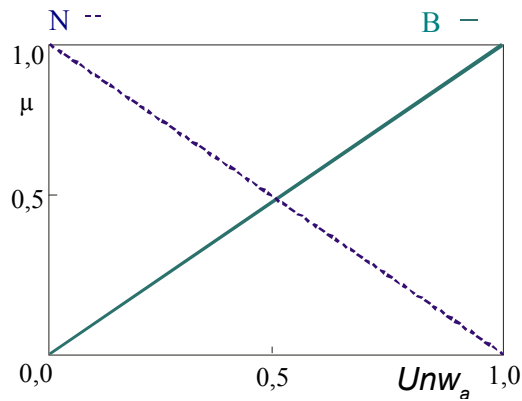
**Tabelle 4-9:** Regelbasis für das Fuzzy-Logik-Modul FLM 6



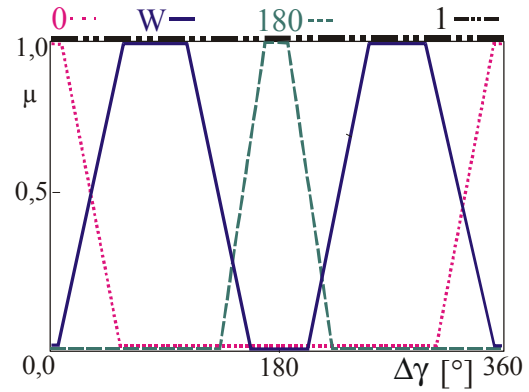
**Bild 4-30:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $\tilde{F}_{ax}$



**Bild 4-31:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $\gamma^F_{const\_a}$



**Bild 4-32:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $Unw_a$



**Bild 4-33:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $\Delta\gamma$

Linguistische Variable	Wert	Bemerkung
$Uw_a, Uw_b, \tilde{F}_{ax}, \tilde{F}_{ay},$ $\mathcal{F}_{const\_a}, \mathcal{F}_{const\_b}$	$B$	Groß (Big)
	$N$	Normal
$\Delta\gamma$	$0$	$0^\circ$
	$180$	$180^\circ$
	$W$	windschief
	$I$	nicht relevant (don't care)
$Unwucht$	$UiLa$	Unwucht in Lagerebene A
	$UiLb$	Unwucht in Lagerebene B
	$UzL$	Unwucht zwischen den Lagerebenen
	$UaL$	Unwucht außerhalb der Lagerebenen
	$Uw$	Unwucht windschief

**Tabelle 4-10:** Linguistische Variablen zur Diagnose  $Unwucht$

Wirkt die Unwucht nur in der Lagerebene A, liefert die Regel

$$\text{WENN } Uw_a = B \text{ UND } Uw_b = N \text{ UND } \Delta\gamma = I \text{ DANN } Unwucht = UiLa$$

den höchsten Erfüllungsgrad, es wird die Diagnoseaussage "Unwucht in Lagerebene A" ausgegeben.

Bei einer Wirkung der Unwucht in der Lagerebene B erhält man mit der Regel

$$\text{WENN } Uw_a = N \text{ UND } Uw_b = B \text{ UND } \Delta\gamma = I \text{ DANN } Unwucht = UiLb$$

den höchsten Erfüllungsgrad und die Ausgabe der Aussage "Unwucht in Lagerebene B".

Die Unwuchten werden in beiden Fällen identifiziert durch den berechneten Effektivwert der Lagerkraft, den ermittelten Phasenwinkel der Unwuchtkraft  $\gamma_U$  (soweit verfügbar) und die Angabe der Lagerebene entsprechend dem Diagnoseergebnis.

Mit der Diagnoseaussage "Unwucht zwischen den Lagerebenen" bei Feuern der Regel

$$\text{WENN } U_{W_a} = B \quad \text{UND} \quad U_{W_b} = B \quad \text{UND} \quad \Delta\gamma = 0 \quad \text{DANN } \textit{Unwucht} = U_{zL}$$

werden statische Unwuchten zwischen den Radiallagern erkannt. Diese führen zu gleichphasigen Kräften ( $0^\circ$  Phasenverschiebung) in den Radiallagerebenen, d. h. die Hauptträgheits- und die Symmetrieachse schneiden sich nicht zwischen den Radiallagern. Die Unwuchten lassen sich durch den berechneten Effektivwert der Lagerkraft, den ermittelten Phasenwinkel  $\gamma_U$  (soweit verfügbar) und den Angriffspunkt  $l$  der Unwuchtkraft (Bild 4-28) identifizieren.

$$l = \frac{\tilde{F}_a \cdot b}{\tilde{F}_a + \tilde{F}_b} + c \quad (4-13)$$

$b$  Lagerabstand

$c$  Abstand des Fußpunktes des Rotors zum Lager B

Mit der Diagnoseaussage "Unwucht außerhalb der Lagerebenen" bei Feuern der Regel

$$\text{WENN } U_{W_a} = B \quad \text{UND} \quad U_{W_b} = B \quad \text{UND} \quad \Delta\gamma = 180 \quad \text{DANN } \textit{Unwucht} = U_{aL}$$

werden erkannt:

- statische Unwuchten außerhalb der Radiallager,
- rein dynamische Unwuchten (Momentenunwuchten), welche zu gegenphasigen Kräften ( $180^\circ$  Phasenverschiebung) in den Radiallagerebenen führen, d. h. die Hauptträgheits- und die Symmetrieachse schneiden sich zwischen den Radiallagern.

Eine Unterscheidung der beiden Arten ist nicht möglich, die Identifizierung geschieht durch Angabe der Effektivwerte der Kräfte in jeder Lagerebene und der Phasenwinkel der Unwuchtkräfte  $\gamma_U$  (soweit verfügbar) in beiden Lagern.

Führt das Wirken von dynamischen Unwuchten dazu, dass die Hauptträgheits- und die Symmetrieachse zwei windschiefe Geraden bilden, dann ergibt sich die Diagnoseaussage "Unwucht windschief" durch Feuern der Regel

$$\text{WENN } U_{W_a} = B \quad \text{UND} \quad U_{W_b} = B \quad \text{UND} \quad \Delta\gamma = W \quad \text{DANN } \textit{Unwucht} = U_w.$$

Die Phasenverschiebung der Unwuchtvektoren ist in diesem Fall ein Wert zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$ . Die Identifizierung erfolgt wie bei der Diagnose "Unwucht außerhalb der Lagerebenen".

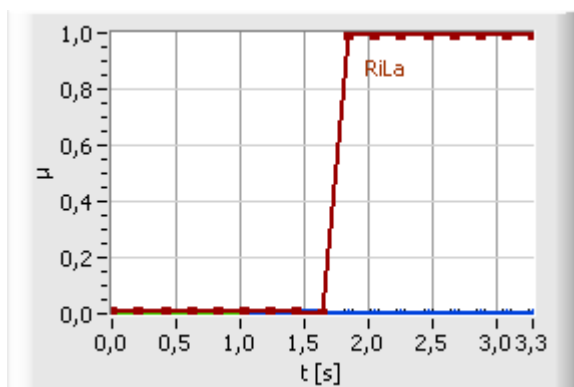
Bei der Erkennung zeitlich verzögert einsetzender Unwuchtveränderungen ist analog zum Verfahren bei entsprechenden statischen Radialkräften (siehe Abschnitt 4.3.2) vorzugehen.

#### 4.4.4 Verifikation der erweiterten Diagnosemodelle

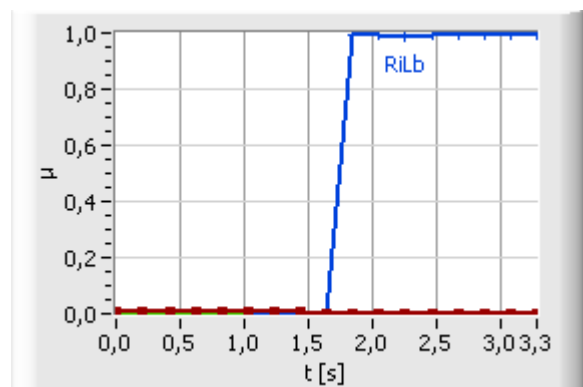
Die Verifikation der Diagnosemodelle erfolgt durch Berechnungen mit dem Simulationsprogramm MLDyn und Experimente am Versuchsstand FLP 500 (Anhang A1) mit für die Anlage relevanten Störungen. Der dabei vertikal gelagerte Rotor hat eine Gesamtlänge von 2,53 m bei einer Masse von 1,3 t. Lager B befindet sich 0,9785 m und Lager A 2,2185 m vom Fußpunkt des Rotors entfernt. Die maximalen radialen Magnetlagerkräfte betragen 10 kN.

Bei der Verifikation der Radialkraftdiagnose wird eine statische radiale Störkraft von 500 N mit einem Angriffswinkel von  $45^\circ$  an verschiedenen Angriffspunkten erzeugt.

Bild 4-34 zeigt die berechneten Erfüllungsgrade  $\mu$  der Fehlerklassen für die Diagnosen nach Tabelle 4-5 beim Angriff der radialen Störkraft in Höhe des Lagers A. Die Kraft wirkt ab dem Zeitpunkt  $t = 1,5$  s. Der Erfüllungsgrad der Diagnoseaussage "Radialkraft im Lager" (*RiLa*) steigt innerhalb von 0,3 s auf 0,99 an, die anderen Erfüllungsgrade der Radialkraftdiagnose bleiben unter 0,01. Der Störkraftvektor mit Betrag und Winkel wird korrekt mit 500 N und  $45^\circ$  berechnet. Damit ist der Fehler sicher identifiziert. Bild 4-35 demonstriert die Diagnoseergebnisse beim Wirken der radialen Störkraft im Lager B (*RiLb*), auch hier erfolgt eine sichere Erkennung und Lokalisation des Fehlers.

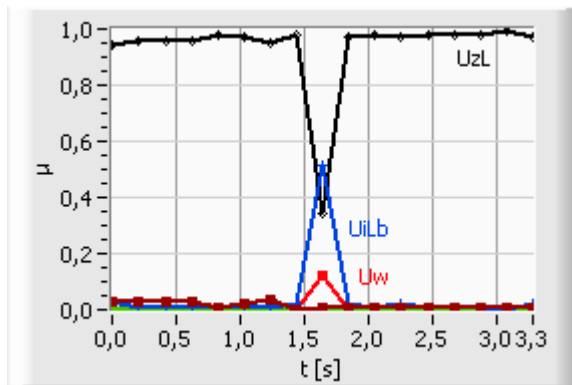


**Bild 4-34:** Diagnose *Radialkraft* bei radialer Störkraft im Lager A

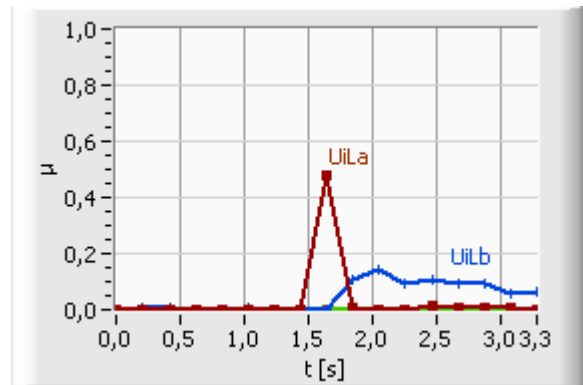


**Bild 4-35:** Diagnose *Radialkraft* bei radialer Störkraft im Lager B

Bei der Unwuchtdiagnose (Bild 4-36) wird beim Wirken der radialen Störkraft die Fehlerklasse "Unwucht zwischen den Lagerebenen" ( $UzL$ , vgl. Tabelle 4-10) ermittelt, dies entspricht der wirkenden Restunwucht. Bei Ausblendung der Restunwucht durch Residuenbildung ergibt sich ein Verlauf der Erfüllungsgrade der Unwuchtdiagnose nach Bild 4-37. Im eingeschwungenen Zustand ( $t = 1,8$  s) sind nun alle Unwuchtdiagnosen mit einem Erfüllungsgrad von unter 0,07 repräsentiert.

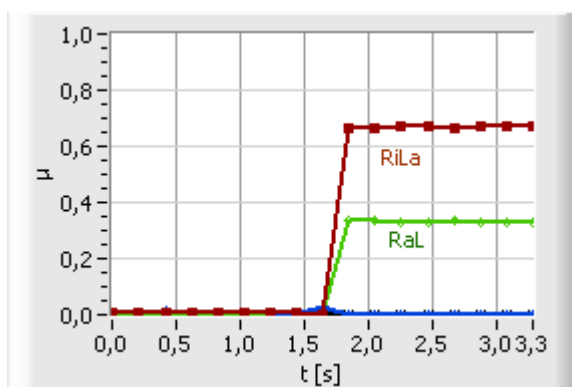


**Bild 4-36:** Diagnose *Unwucht* bei radialer Störkraft im Lager A

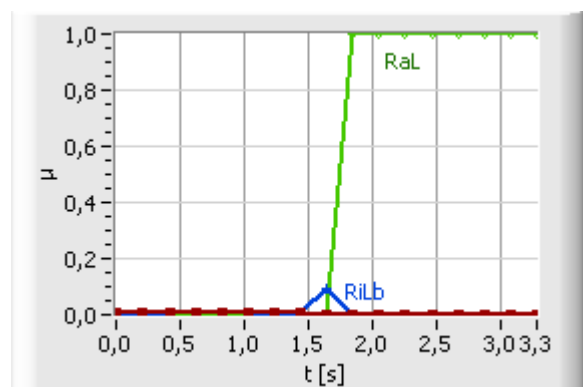


**Bild 4-37:** Diagnose *Unwucht* bei radialer Störkraft im Lager A mit Residuenberechnung

Verschiebt sich die Störkraft aus der Lagerebene, ist ein gleitender Übergang bei der Diagnose der Fehlerklassen zu erkennen. Bild 4-38 zeigt die Diagnoseergebnisse beim Wirken der Störkraft außerhalb der Lagerebenen ( $RaL$ ) an der Position  $l = 2,3$  m (ca. 0,08 m oberhalb des Lagers A). Der Erfüllungsgrad von  $RiLa$  sinkt auf 0,67, die Diagnose "Radialkraft außerhalb der Lagerebene" ( $RaL$ ) wird mit  $\mu = 0,33$  ausgegeben. Als Kraftangriffspunkt  $l$  wird der korrekte Wert 2,3 m bei einem Winkel  $-\varphi\bar{F}_a$  von  $45^\circ$  mit einer Störkraft von 499 N berechnet.

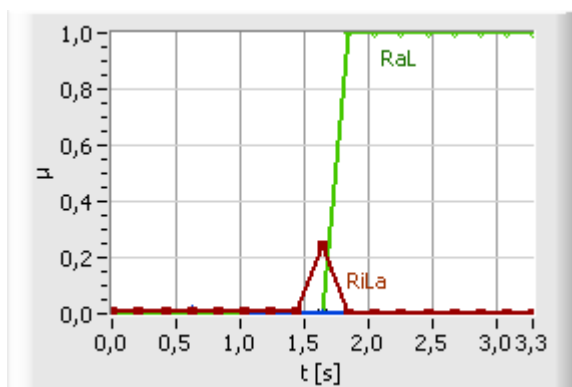


**Bild 4-38:** Diagnose *Radialkraft* bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen ( $l = 2,3$  m)

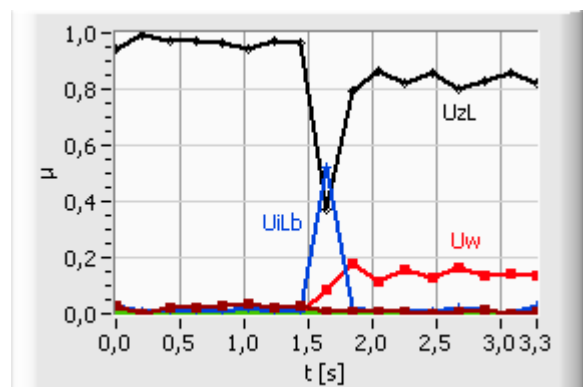


**Bild 4-39:** Diagnose *Radialkraft* bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen ( $l = 2,5$  m)

Die Erfüllungsgrade bei einem Wirken der Störkraft an der Position  $l = 2,5$  m (ca. 0,28 m oberhalb des Lagers A bzw. am 0,5 m (ca. 0,48 m unterhalb des Lagers B) sind in Bild 4-39 bzw. Bild 4-40 dargestellt. Die Diagnose "Radialkraft außerhalb der Lagerebene" feuert jeweils mit Werten von 1, der Winkel in der jeweiligen Ebene und der Kraftangriffspunkt werden ebenfalls korrekt bestimmt. Bei der Kraftberechnung ergibt sich mit 498 N ein relativer Fehler von 0,5 %, der vernachlässigbar ist. In der Praxis treten durch überlagerte Störanteile im Wellenlage- und Lagerstromsignal und in Abhängigkeit von der eingesetzten Messtechnik größere Fehler bei der Kraftberechnung auf. Die Unwuchtdiagnose (Bild 4-41) ermittelt wieder das korrekte Ergebnis  $UzL$ , allerdings ist der Erfüllungsgrad auf ca. 0,82 abgesunken, dafür wird die Diagnose  $Uw$  mit ca. 0,14 mit angezeigt. Dies wird verursacht durch die Verschiebung des Winkels aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Ermittlung des Rotordrehwinkels  $\gamma$ . Eine Verbesserung ist durch eine Erhöhung der Auflösung der Winkelberechnung mit einer Verringerung der Abtastzeit zu erreichen.

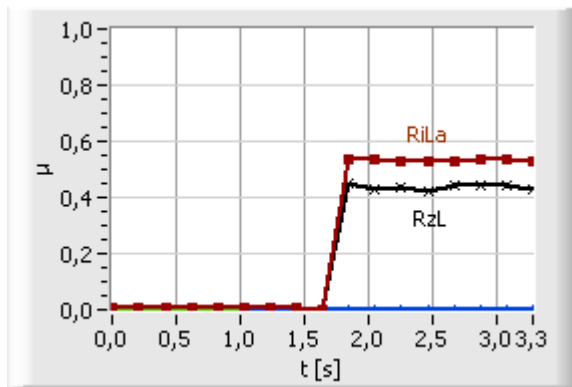


**Bild 4-40:** Diagnose *Radialkraft* bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen ( $l = 0,5$  m)

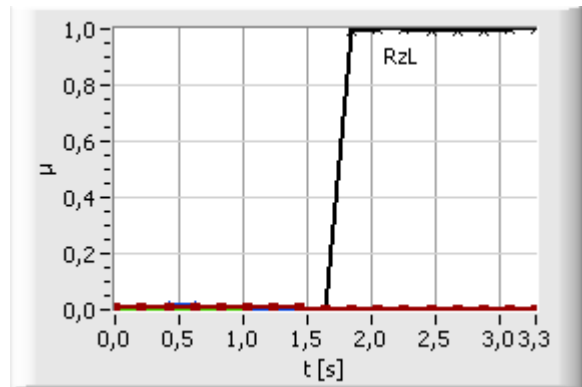


**Bild 4-41:** Diagnose *Unwucht* bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen ( $l = 2,5$  m)

Verschiebt sich die Radialkraft aus dem Lager A in Richtung Lager B, erfolgt der gleitende Übergang zur Diagnose "Radialkraft zwischen den Lagerebenen" ( $RzL$ ). Bild 4-42 zeigt die Diagnoseergebnisse beim Wirken der Kraft an der Position  $l = 2,1$  m (ca. 0,11 unterhalb Lager A). Die Diagnose  $RiLa$  feuert mit 0,53 und  $RzL$  mit 0,43. Wird die Radialkraft weiter zwischen die Lager verschoben ergibt sich beim Kraftangriffspunkt  $l = 1,598$  (Mitte zwischen den Lagerebenen) die Diagnose  $RzL$  mit 1 (Bild 4-43). Für beide Fälle werden Angriffswinkel und Angriffspunkt mit einem relativen Fehler unter 1 % korrekt berechnet.

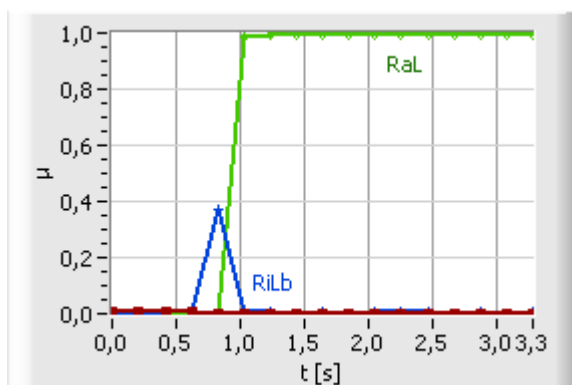


**Bild 4-42:** Diagnose *Radialkraft* bei radialer Störkraft zwischen den Lagerebenen ( $l = 2,1$  m)



**Bild 4-43:** Diagnose *Radialkraft* bei radialer Störkraft zwischen den Lagerebenen ( $l = 1,6$  m)

Das Diagnoseergebnis analoger Experimente am FLP 500 ist in Bild 4-44 zu sehen. Die Radialkraft wirkt ab dem Zeitpunkt  $t = 0,7$  s am unteren Wellenende. Auch hier wird der Fehler richtig diagnostiziert. Der Erfüllungsgrad für die Diagnoseaussage "Radialkraft außerhalb der Lagerebenen" ( $RaL$ ) ist 0,99, die anderen Erfüllungsgrade feuern nach dem Einschwingvorgang mit maximal 0,01.

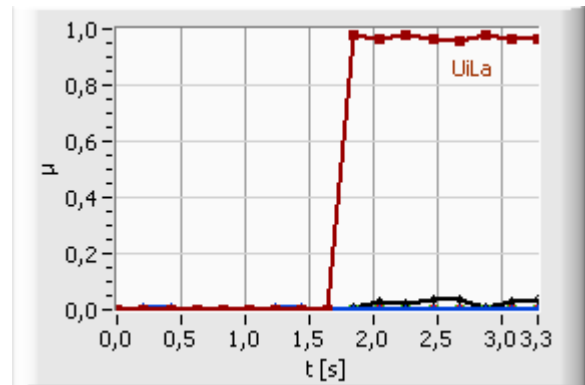
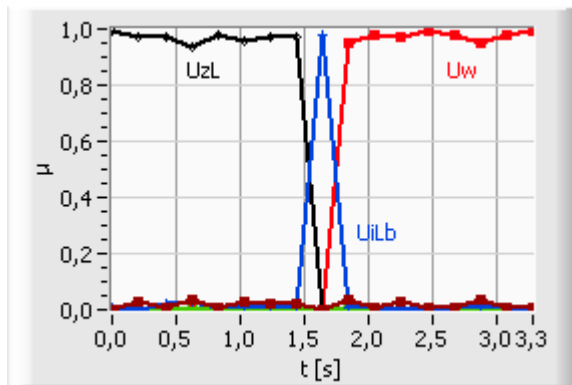


**Bild 4-44:** Diagnose *Radialkraft* am FLP 500 bei radialer Störkraft am unteren Wellenende

Bei der Verifikation der Unwuchtdiagnose wird eine Unwucht von 0,15 kgm beim Rotordrehwinkel  $\gamma_w = 90^\circ$  erzeugt. Bei einer Drehzahl von  $15 \text{ s}^{-1}$  ergibt sich dabei eine Unwuchtkraft von 1270 N (siehe Gleichung 2-40).

Bild 4-45 demonstriert die Diagnoseergebnisse beim Auftreten einer Unwuchtstörung im Lager A und gleichzeitigem Wirken einer Restunwucht innerhalb der Lagerebenen. Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Unwuchtkraftvektoren beträgt  $90^\circ$ . Bis zum Einsetzen der Störung zum Zeitpunkt  $t = 1,5$  s wird die Restunwucht mit der Diagnose "Unwucht zwischen den Lagerebenen" ( $UzL$ , siehe Tabelle 4-10) mit einem Erfüllungsgrad  $\mu = 0,97$  diag-

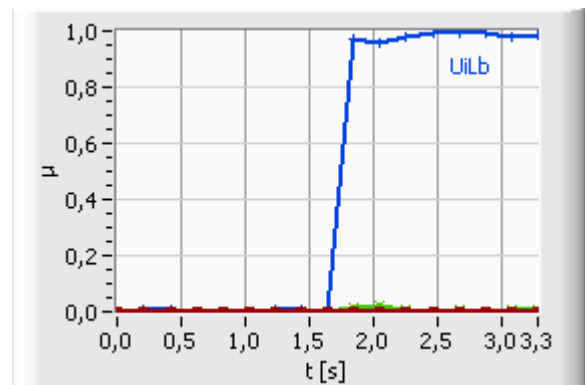
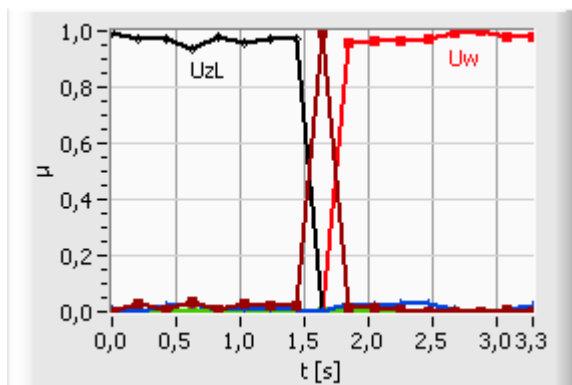
nostiziert. Nach dem Einsetzen der Unwuchtstörung wird der Fehler "Unwucht windschief" ( $U_w$ ) mit einem Erfüllungsgrad von 0,98 erkannt. Dies entspricht der aus Restunwucht und zusätzlicher Unwuchtstörung resultierenden Unwucht. Durch Bildung der Diagnosemerkmale aus der Berechnung der Residuen (Differenz zwischen aktuellen Werten und Referenzwerten vor dem Eintreten der zusätzlichen Störung) ergibt sich das korrekte Diagnoseergebnis "Unwucht in Lagerebene A" ( $U_{iLa}$ ) mit einem Erfüllungsgrad  $\mu$  um 0,96 (Bild 4-46). Die Fehlerklassen für die Radialkraftdiagnose zeigen im eingeschwungenen Zustand keinen Ausschlag ( $\mu < 0,02$ ).



**Bild 4-45:** Diagnose der Unwucht im Lager A ohne Residuenberechnung

**Bild 4-46:** Diagnose der Unwucht im Lager A mit Residuenberechnung

Analoge Ergebnisse erhält man beim Auftreten einer Unwucht im unteren Lager ( $U_{iLb}$  in Bild 4-47 ohne und Bild 4-48 mit Residuenberechnung).



**Bild 4-47:** Diagnose der Unwucht im Lager B ohne Residuenberechnung

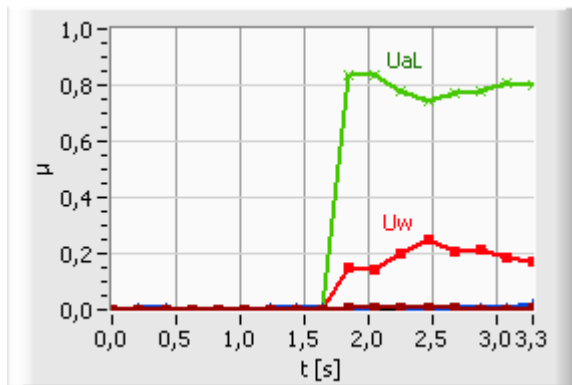
**Bild 4-48:** Diagnose der Unwucht im Lager B mit Residuenberechnung

Bei einer Verschiebung der Unwucht in eine Position außerhalb der Lagerebenen wird auch für die Unwuchtstörung das korrekte Diagnoseergebnis ermittelt. Bild 4-49 zeigt das Anschlagen von  $U_{aL}$  bei Wirken der Unwucht an der Position  $l = 2,5$  m (ca 0,28 m über dem Lager A) mit Residuenberechnung. Die korrekte Diagnose  $U_{aL}$  feuert mit  $\mu = 0,8$ , die Diagnose  $U_w$  wird mit  $\mu = 0,17$  berechnet. Hier treten wieder Abweichungen aufgrund von Unge-

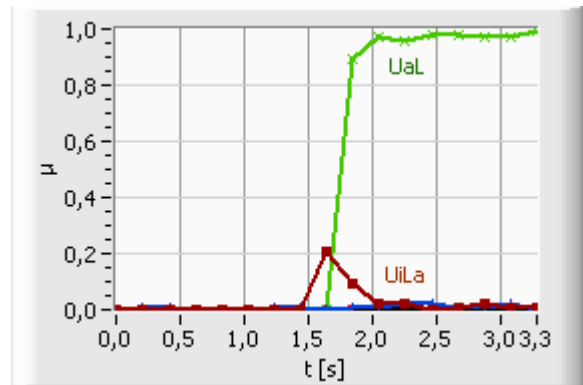


naugigkeiten bei der Ermittlung des Rotordrehwinkels  $\gamma$  auf. Eine Verbesserung ist durch Erhöhung der Auflösung der Winkelberechnung über eine Verringerung der Abtastzeit erreichbar.

Beim Wirken der Unwucht außerhalb der Lagerebenen an der Position  $l = 0,5$  m (ca. 0,48 m unterhalb des Lagers B) feuert die Diagnose  $UaL$  mit 0,99, andere Fehler bleiben (nach dem Einschwingvorgang) unter 0,01 (siehe Bild 4-50).

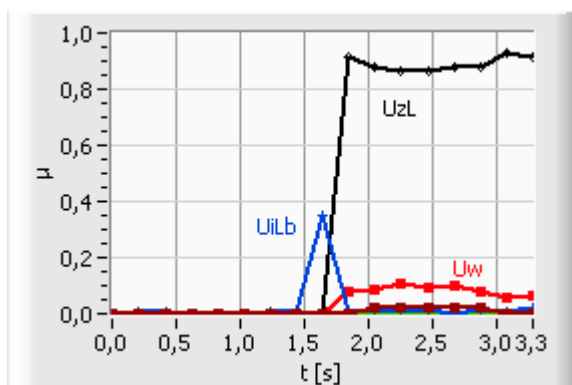


**Bild 4-49:** Diagnose der Unwucht oberhalb Lager A mit Residuenberechnung

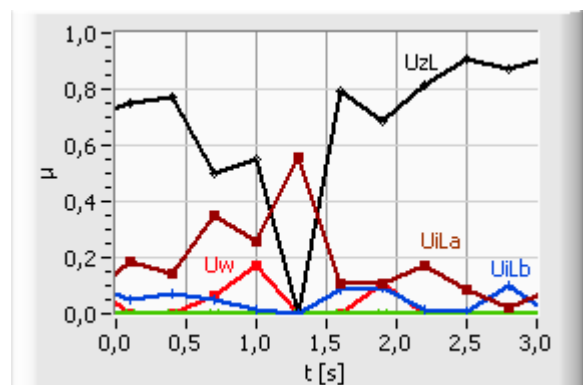


**Bild 4-50:** Diagnose der Unwucht unterhalb Lager B mit Residuenberechnung

Ergebnisse einer Simulation der Unwuchtstörung zwischen den Lagerebenen am Punkt 1,598 m sind in Bild 4-51 dargestellt, die zutreffende Diagnose  $UzL$  feuert mit 0,91, alle anderen Erfüllungsgrade liegen bei Werten unter 0,07.



**Bild 4-51:** Diagnose der Unwucht zwischen den Lagerebenen mit Residuenberechnung



**Bild 4-52:** Diagnose der Unwucht am FLP 500

Der experimentelle Test des Diagnosemodells erfolgt basierend auf den Daten von der Verifikation des Radialkraftdiagnosemodells. Es wirken eine statische Radialkraft am unteren Wellenende und eine Restunwucht zwischen den Lagerebenen. Ziel ist die Erkennung der Restunwuchten. Bild 4-52 zeigt die Erfüllungsgrade der Fehlerklassen der Unwuchtdiagnose.

Die Unwucht zwischen den Lagerebenen (*UzL*) wird korrekt mit einem Erfüllungsgrad  $\mu = 0,92$  erkannt. Aufgrund überlagerter Störsignale schwanken die Ergebnisse geringfügig, es ergibt sich ein leichtes Ansteigen des Erfüllungsgrads der anderen Diagnoseaussage bis maximal 0,2.

Bei allen Unwuchtdiagnosen entstehen bei der Identifizierung von Größe, Angriffswinkel und Angriffspunkt der Unwucht Fehler bis maximal 5 %, verursacht durch Ungenauigkeiten bei der Kraftberechnung und der Bestimmung des Rotordrehwinkels.

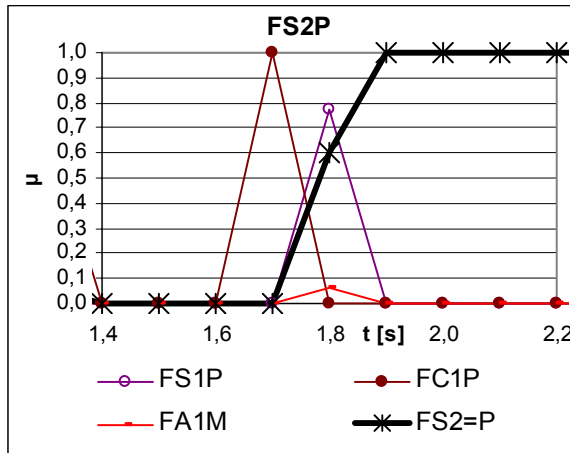
## 4.5 Optimierung der Diagnosemodelle

### 4.5.1 Eingrenzung der Diagnose im Magnetlagerkreis

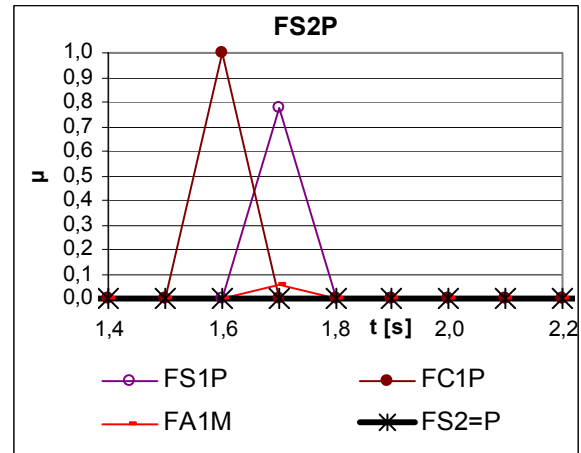
Ein Auftreten von Unwuchten (Abschnitt 4.4.3) führt auch zum Feuern der Diagnose "erhöhte Verstärkung des Sensors" ( $FS2 = P$ , siehe Abschnitt 4.3.2), da ebenfalls die Effektivwerte der Kraft als Symptome eingehen. Im Gegensatz dazu feuern die Diagnoseregeln zur Unwuchtbestimmung aufgrund der UND-Verknüpfung der Kräfte in den einzelnen Achsen nicht, wenn der Fehler  $FS2 = P$  in nur einem Magnetlagerkreis auftritt. Da bei Unwuchten die Symptome sowohl in der y-Achse als auch in der x-Achse auftreten, kann durch Erweiterung der Regeln mit den Fuzzy-Sets der Kräfteffektivwerte der jeweils anderen Achse für die Fehlerklasse  $FS2 = P$  jedes Magnetlagerregelkreises eine eindeutige Trennung erzielt werden. Die erweiterte Regel am Beispiel des Regelkreises der x-Achse der Lagerebene B lautet dann

$$\text{WENN } W_{bx} = N \quad \text{UND} \quad \bar{i}_{sbx} = N \quad \text{UND} \quad \tilde{F}_{bx} = S \quad \text{UND} \quad \tilde{F}_{by} = N \quad \text{DANN } FS2 = P.$$

Die Diagnoseergebnisse mit optimiertem Regelset beim Auftreten einer Unwucht außerhalb der Lagerebenen (siehe Abschnitt 4.4.3) zum Zeitpunkt  $t = 1,5$  s sind in Bild 4-54 dargestellt. Die Randbedingungen entsprechen den in Abschnitt 4.4.4 angegebenen. Nach einem kurzen Feuern anderer Fehlerklassen bis zur Stabilisierung des Systems nach der Störung spricht ab dem Zeitpunkt  $t = 1,8$  s keine Fehlerklasse des Magnetlagerkreises mehr an, ermittelt wird die Diagnoseaussage "Unwucht außerhalb der Lagerebenen" (*UaL*) wie in Bild 4-50 erkennbar. Bild 4-53 zeigt die Ergebnisse ohne Optimierung, hier wird die fehlerhafte Diagnose  $FS2 = P$  mit einem Erfüllungsgrad von 1 ausgegeben.



**Bild 4-53:** Diagnoseergebnis für den Magnetlagerkreis bei Unwucht ohne Optimierung



**Bild 4-54:** Diagnoseergebnis für den Magnetlagerkreis bei Unwucht mit Optimierung

Beim Auftreten des Fehlers "statische Radialkraft" (Abschnitt 4.4.2) erscheint aufgrund der identischen Symptome auch die Diagnose "Offset Sensor" ( $FSI = P$  und  $FSI = M$ , siehe Abschnitt 4.3.2). Hier kann durch Hinzuziehen von Symptomen aus den anderen Magnetlagerregelkreisen eine Eingrenzung der Diagnose erreicht werden. Durch Erweiterung der Regeln mit den Merkmalen Kraftmittelwert  $\bar{F}$  der jeweils anderen Achse und Kraftmittelwert  $\bar{F}$  der gleichen Achse in der anderen Ebene wird das Feuern der Diagnosen  $FSI = P$  und  $FSI = M$  verhindert, wenn die Radialkraft nicht nur auf die Achse eines Magnetlagerregelkreises wirkt, sondern auf mehrere Achsen bzw. Ebenen verteilt ist. Die erweiterten Regeln am Beispiel des Regelkreises der x-Achse der Lagerebene B lauten dann

#### Regelset FS1

WENN  $\bar{F}_{bx} = B$  UND  $\bar{F}_{by} = N$  UND  $\bar{F}_{ax} = N$  DANN  $FSI = P$

WENN  $\bar{F}_{bx} = S$  UND  $\bar{F}_{by} = N$  UND  $\bar{F}_{ax} = N$  DANN  $FSI = M$

Eine Unterdrückung der Diagnose "Radialkraft in Lagerebene X" bei erhöhtem Sensoroffset bzw. der Diagnosen  $FSI = P$  und  $FSI = M$  beim Wirken der Radialkraft auf nur einen Magnetlagerkreis ist nicht möglich.

#### 4.5.2 Einbeziehung zusätzlicher Symptome

Neben den bisher verwendeten Merkmalen stehen für die Diagnose auch die durch Parameteridentifikation (siehe Abschnitt 2.5.3) berechneten als zusätzliche Symptome zur Verfügung. Bei deren Fuzzyifizierung wird analog Abschnitt 4.3.1 vorgegangen und die Merkmale

als linguistische Variablen mit den Fuzzy-Sets  $S$ ,  $N$  und  $B$  entsprechend ihren Ausprägungen im fehlerfreien und fehlerbehafteten Fall definiert. Es ergeben sich die linguistischen Variablen  $T_V$  und  $K_R$  für jeden Regler sowie  $T_I$  und  $K_P$  für jedes Stellglied. Die Zugehörigkeitswerte der Sets  $S$  und  $B$  sind direkt als Erfüllungsgrade der Fehlerklassen einsetzbar, bei Erreichen eines Schwellwertes werden sie mit der Angabe des jeweiligen Regelkreises und der Abweichung vom Referenzwert als Diagnoseaussage ausgegeben.

Ebenfalls verwendbar sind die charakteristischen Frequenzanteile im Amplitudenspektrum, welche bei der Überwachung der Maschine zur Erkennung von Fanglagerfehlern ermittelt werden (siehe Abschnitt 3.3). Die Fuzzyfizierung liefert hier eine Aufweichung der scharfen Grenzwertschwellen in unscharfe, gleichzeitig erfolgt eine Normierung der Ausprägungen auf einen Bereich zwischen 0 und 1. Da hier nur eine Erhöhung der Werte relevant ist, genügt eine Definition der Sets  $N$  und  $B$ . Aus den Grenzwertflags der Fanglagerüberwachung (Tabelle 3.3) ergeben sich die linguistischen Variablen  $trnd\_f_{KA}$ ,  $trnd\_f_{AR}$ ,  $trnd\_f_{IR}$ ,  $trnd\_f_{WA}$ ,  $trnd\_f_W$  und  $trnd\_eff$ . Die Diagnoseaussage wird aus der Angabe der Achse, dem Erfüllungsgrad und dem Diagnostext des Grenzwertflags gebildet.

#### 4.5.3 Einführung eines Verstärkungsoperators

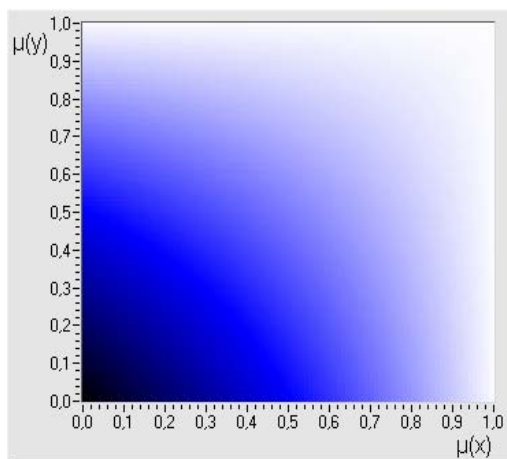
Stehen zusätzlich sekundäre Symptome zur Untermauerung der Diagnoseaussage zur Verfügung, die aber nicht zwangsläufig mit dem Fehler auftreten müssen, ist für die Berechnung des Erfüllungsgrades der Fehlerklassen ein verbesserter Verknüpfungsoperator zu finden, welcher eine Verstärkung des Erfüllungsgrades durch das sekundäre Symptom realisiert. Bei der mittels Algebraic Product (Gleichung (4-1)) realisierten UND-Verknüpfung der Symptome verursachen zusätzlich verknüpfte, sekundäre Symptome mit einem Zugehörigkeitswert von  $\mu < 1$  eine Verringerung des Erfüllungsgrades der Regel. Wird hingegen eine ODER-Verknüpfung eingesetzt, so ergibt sich auch bei niedrigen Zugehörigkeitswerten des primären Symptoms ein hoher Erfüllungsgrad der Regel, wenn das sekundäre Symptom einen hohen Zugehörigkeitswert hat. Die gewünschte Verknüpfung des primären mit dem sekundären Symptom ohne die genannten Nebenwirkungen lässt sich mit einem Verstärkungsoperator nach Gleichung (4-14) realisieren.

$$\text{Verstärkungsoperator VER} \quad \mu_{VER}(x, y) = \text{MIN}\{1, \mu_x + (\mu_x \cdot \mu_y \cdot v)\} \quad (4-14)$$

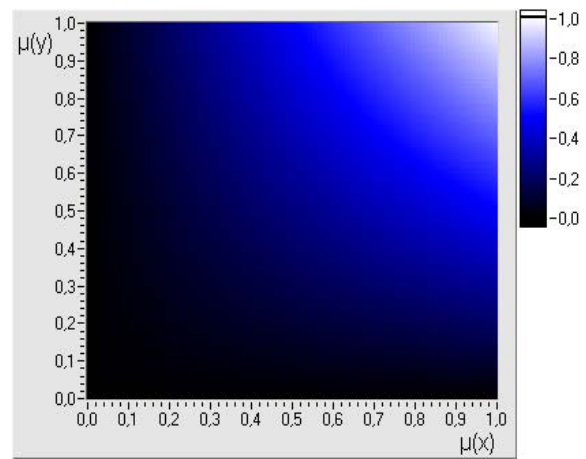
$\mu_x$	primäres Symptom	$v$	Verstärkungsfaktor
$\mu_y$	sekundäres Symptom		

Der Verstärkungsfaktor  $\nu$  legt fest, wie stark der Erfüllungsgrad der Fehlerklasse vom sekundären Symptom erhöht wird.

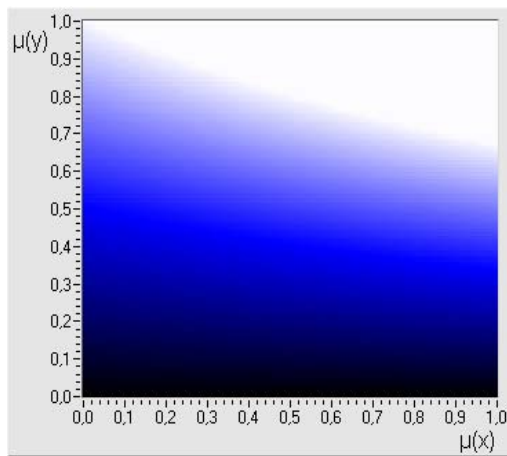
Die Bilder 4-57 und 4-58 zeigen die Kennfelder der Erfüllungsgrade in Abhängigkeit von den Zugehörigkeitswerten des primären ( $\mu(x)$ ) und sekundären Symptoms ( $\mu(y)$ ) bei Anwendung des Verstärkungsoperators mit verschiedenen Verstärkungsfaktoren.



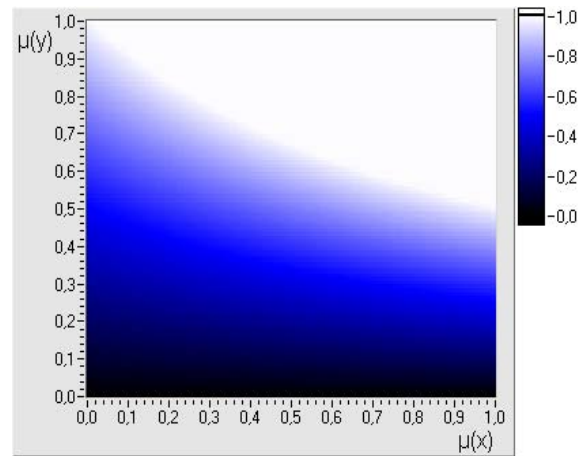
**Bild 4-55:** Kennfeld bei UND-Verknüpfung



**Bild 4-56:** Kennfeld bei ODER-Verknüpfung



**Bild 4-57:** Kennfeld mit Verstärkungsoperator,  $\nu = 0,5$



**Bild 4-58:** Kennfeld mit Verstärkungsoperator,  $\nu = 1$

Als Vergleich zur Funktion des Verstärkungsoperators ist das Kennfeld bei Verwendung der UND-Verknüpfung (Algebraic Product) in Bild 4-55 und der ODER-Verknüpfung (Algebraic Sum) in Bild 4-56 dargestellt. Je nach gewähltem Verstärkungsfaktor  $\nu$  erfolgt eine zusätzliche Wichtung des primären Symptoms mit steigendem Zugehörigkeitswerten des sekundären, niedrige Werte dieses Symptoms beeinflussen das Ergebnis nicht. Einsatzmöglichkeiten für den Verstärkungsoperator sind die Verknüpfungen der Ergebnisse aus der Parameteridentifikation (siehe Abschnitt 2.5.3) mit den Diagnoseaussagen der einzelnen Magnetlagerkreise (siehe Abschnitt 4.3.2). Die durch Parameteridentifikation gebildeten Diagnoseaussagen über

multiplikative Fehler bei Reglern und Stellgliedern werden verstärkt mit den Diagnosen der (multiplikativen) Verstärkungsfehler beim Regler ( $FC = P$  bzw.  $FCI = M$ ) und beim Stellglied ( $FA5 = P$  bzw.  $FA5 = M$ ), welche im gleichen Regelkreis auftreten, wie nachfolgende Regelsets zeigen.

#### **Regelset $K_P$**

WENN  $K_P = B$  VER  $FCI = B$  DANN  $K_P = B$

WENN  $K_P = S$  VER  $FCI = S$  DANN  $K_P = S$

#### **Regelset $K_R$**

WENN  $K_R = B$  VER  $FCI = B$  DANN  $K_R = B$

WENN  $K_R = S$  VER  $FCI = S$  DANN  $K_R = S$

#### **4.5.4 Ausblenden und Abschwächen von Diagnoseergebnissen**

Neben einer Verstärkung durch sekundäre Symptome ist auch eine Abschwächung bzw. Ausblendung (Erfüllungsgrad auf 0 setzen) der Diagnoseergebnisse notwendig, wenn Betriebszustände auftreten, bei denen die Regeln nicht relevant sind bzw. falsche Ergebnisse liefern. Dazu können die booleschen Eingänge der Fuzzy-Logik-Module (siehe Abschnitt 4.4.1) genutzt werden. Dem booleschen TRUE wird ein Zugehörigkeitswert von  $\mu = 1$  zugewiesen, dem FALSE ein Wert  $\mu < 1$ . Die Erfüllungsgrade der Regeln werden dann über UND-Verknüpfungen mit den Zugehörigkeitswerten der booleschen Eingänge verknüpft. Bei TRUE erfolgt keine Beeinflussung des Ergebnisses, bei FALSE eine Abschwächung und Begrenzung entsprechend dem vorgegebenen Zugehörigkeitswert.

Wird dem FALSE-Zustand ein Zugehörigkeitswert von  $\mu = 0$  zugeordnet, kann in Abhängigkeit von der softwaremäßigen Realisierung der Regelabarbeitung auch die Berechnung der Regel entfallen (Rechenzeitverkürzung) und den Ausgängen ein Erfüllungsgrad von  $\mu = 0$  zugewiesen werden.

Die Ausblendungen der Diagnoseergebnisse mittels Zugehörigkeitswert von  $\mu = 0$  für den FALSE-Zustand sind notwendig bei der Diagnose

- von Verstärkungsfehlern im Magnetlagerregelkreis und von Unwuchten, wenn die Referenzdrehzahl nicht erreicht ist (Einbindung des negierten Grenzwertflags  $gw\_n<$ ),

- der Fehler im Magnetlagerregelkreis bei ausgeschalteten Magnetlagern (Einbindung der negierten Verknüpfung "Wellen\_im\_Fanglager ODER Welle\_ruht\_im\_Fanglager"),
- mit Parameteridentifikationsverfahren ohne Anregung bei ruhender Welle (Einbindung des negierten Grenzwertflags gw\_n0),
- des Fanglagerzustandes, wenn die Welle im Magnetlager schwebt bzw. im Fanglager ruht (Einbindung der Betriebszustandsinformation "Welle\_im\_Fanglager")

um falsche Diagnoseaussagen zu unterbinden. Die eingebundenen Flags und Betriebszustandsinformationen werden von der Überwachung der Maschine (siehe Abschnitt 3) bereitgestellt.

## 5 Technische Realisierung

### 5.1 Diagnosesystem MLDia

Für die technische Umsetzung des entwickelten Diagnosekonzeptes wurde das Diagnosesystem MLDia entwickelt und an Versuchsständen und Anlagen getestet, optimiert und verifiziert. Die Programmierung erfolgte mit der Software LabVIEW [NIN05] unter Windows 98 und Windows XP. LabVIEW ist auch als Version für Macintosh PC, Sun Workstations, HP-UX und Linux verfügbar, die erstellten Programme sind somit leicht auf andere Hard- und Softwareumgebungen portierbar. LabVIEW unterstützt die Messwerterfassung mit einer Vielzahl von Hardwarekomponenten und liefert umfangreiche Funktionen der Signalanalyse.

Das Diagnosesystem MLDia ist modular aufgebaut mit Modulen für folgende Funktionen:

- Messwerterfassung,
- signalgestützte Merkmalsgewinnung,
- modellgestützte Merkmalsgewinnung,
- Wellenlagemonitoring,
- Stellsignalmonitoring,
- Lagerstrommonitoring,
- Lagerkraftberechnung und -monitoring,
- Datenspeicherung,
- Langzeittrendaufzeichnung,
- Grenzwertüberwachung,
- Diagnose.

Durch die Modularität ist eine flexible Anpassung auf unterschiedliche Anforderungen und Anwendungen möglich. Die Module werden einzeln getestet und der Aufgabenstellung angepasst, nicht benötigte Module sind entfernbar. Das mit LabVIEW realisierte Multitasking ermöglicht die Abarbeitung rechenintensiver sekundärer Anwendungen als Hintergrundtasks mit niedriger Priorität, ohne dabei die primären Messwerterfassungs-, Speicher- und Überwachungsfunktionen zu behindern.



### **Modul "Messwerterfassung"**

Als Hardware für die Datenerfassung sind gegenwärtig die von LabVIEW optimal unterstützten Messwerterfassungskarten PCI-MIO 6024 der Firma National Instruments (NI) [NIN05] im Einsatz. Sie ermöglichen eine Erfassung von bis zu 16 analogen Eingangskanälen mit einer maximalen Summenabtastrate von 100 kHz und einer Auflösung von 12 Bit. Abtastfrequenz und Auflösung sind ausreichend für die Diagnoseaufgaben an den untersuchten Anlagen. Höhere Abtastraten und Auflösungen sowie eine Erhöhung der Messkanalanzahl lassen sich mit zusätzlichen bzw. anderen Messwerterfassungskarten realisieren. Für Anwendungen mit starker Einstreuung von Störsignalen ist eine Umprogrammierung der Single-Ended-Eingangskanäle auf differentiellen Betrieb möglich, man erreicht ein verbessertes Signal/Rausch-Verhältnis. Der Eingangsspannungspegel der analogen Messkanäle liegt im Bereich  $\pm 10$  V, eine interne Verstärkung bis zu einem minimalen Messbereich von  $\pm 0,1$  V ist programmierbar, andere Pegel sind mit zusätzlichen Signalkonditionierungsmodulen nutzbar. Die Messwerterfassungskarten bieten außerdem die Möglichkeit der Ein- und Ausgabe von binären TTL-Signalen und der Ausgabe von analogen Signalen im Bereich  $\pm 10$  V.

Messtechnisch erfasst werden standardmäßig jeweils für die vier radialen und den axialen Regelkreis die Signale der Wellenlagen, Reglerausgangsspannungen (Stellsignale) und Lagerströme. Zusätzlich können die Impulse eines Drehzahlgebers und Keyphasors sowie weitere verfügbare Messsignale eingebunden werden. Anhand der Drehzahlmessung über einen Drehzahlgeber oder die Auswertung der FFT-Analyse der Wellenlagesignale ist die Abtastfrequenz auf die Drehzahl der Welle automatisch anpassbar. Die Messwerte stehen allen Modulen zur Verfügung.

### **Modul "Signalgestützte Merkmalsgewinnung"**

Aus den erfassten Messwerten werden pro Messzyklus die Merkmale arithmetischer Mittelwert, Effektivwert, Spannweitenmitte, Spannweite, minimaler und maximaler Spitzenwert gewonnen, für die Radiallagersignale zusätzlich die Beträge und Phasenwinkel der Signalvektoren jeder Ebene. Daraus erfolgt die Berechnung der kombinierten Merkmale sowie der benötigten Signalkennfunktionen (siehe Abschnitt 2.4.1). Alle Module können auf die extrahierten Merkmale zugreifen.

## Modul "Modellgestützte Merkmalsgewinnung"

Als modellgestütztes Verfahren findet die Parameteridentifikation für die Übertragungsglieder Regler und Leistungsverstärker des Magnetlagerregelkreises (siehe Abschnitt 2.5.3) Einsatz. Entsprechend der verwendeten Datenmenge kann hier ein hoher Rechenaufwand auftreten, es besteht daher die Möglichkeit, die Abarbeitung in Zeitintervallen größer 1 s zu starten und als Task mit niedriger Priorität im Hintergrund laufen zu lassen.

## Modul "Langzeittrendaufnahme"

In diesem Modul werden die Mittelwerte und Gradienten von ausgewählten Merkmalen über eine variabel einstellbare Zeit berechnet und als Trendverläufe abgespeichert. Die Module Grenzwertüberwachung und Diagnose nutzen diese Langzeitmittelwerte zur Adaption der Grenz- und Referenzwerte.

## Module "Wellenlagen-, Stellsignal-, Lagerstrommonitoring"

Diese Module realisieren die Anzeige der ausgewählten Signale als Verläufe über der Zeit und als Orbits (x-y-Darstellung) sowie eine Anzeige der wichtigsten Merkmale. Bild 5-1 stellt dies beispielhaft für das Modul "Wellenlagemonitoring" (Displacement) dar. Die Skalierung der Diagramme erfolgt manuell oder automatisch, Grenzwertschranken sind einblendbar.

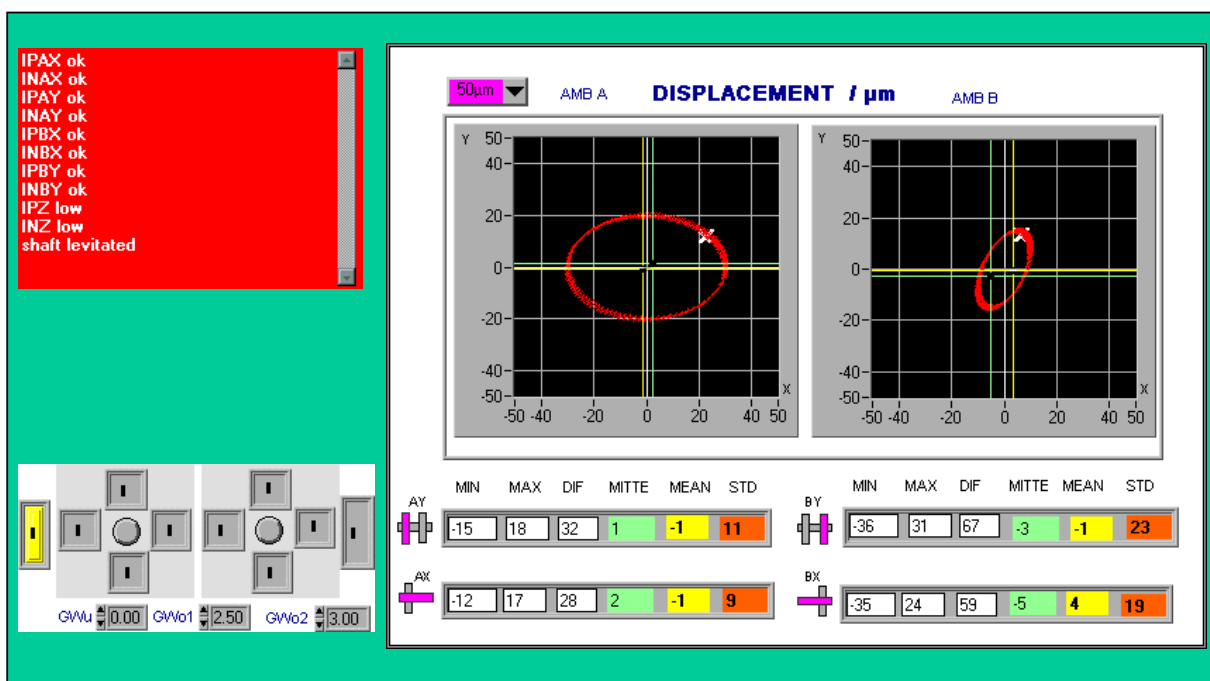


Bild 5-1: Display des Diagnosesystems MLDia

### **Modul "Lagerkraftberechnung und -monitoring "**

Anhand von Kennfeldern oder mittels Formel (siehe Abschnitt 2.3) werden die Kräfte in der jeweiligen Lagerachse aus den erfassten Wellenlagen (Luftspalten) und Lagerströmen berechnet. Die Anzeigemöglichkeiten sind identisch mit den anderen Monitoring-Modulen.

### **Modul "Grenzwertüberwachung"**

Die Grenzwertüberwachung dient der Fehlererkennung und Betriebszustandsermittlung (siehe Abschnitt 3.2). Es ist möglich, die Grenzwerte entsprechend des Betriebszustandes und die Toleranzbereiche anhand der Häufigkeit der Überschreitungen automatisch nachzuführen. Bei Änderung des Betriebsregimes bzw. der Anlagenparameter passt sich das Diagnosesystem damit den neuen Betriebsparametern an. Diese Funktion ist speziell für die unbeaufsichtigte Langzeitüberwachung an experimentellen Anlagen konzipiert. Mit den Alarminformationen der Grenzwertüberwachung sind neben der Anzeige im Display auch externe Alarme über die binären Ausgänge der Messwerterfassungskarte möglich und eine Datenspeicherung auslösbar.

### **Modul "Datenspeicherung"**

Die Speicherung aller berechneten Merkmale erfolgt in einstellbaren Zeitintervallen (vorzugsweise alle 1 s). Bei Auslösung der Datenspeicherung durch die Grenzwertüberwachung werden die Messwerte für vorgegebene Zeiträume vor dem Ereignis und bis zur Stabilisierung des neuen Zustandes bzw. zur Rückkehr in den Normalzustand abgespeichert.

### **Modul "Diagnose"**

Das Modul "Diagnose" nutzt die in Kapitel 4 entwickelten fuzzy-basierten Diagnosemodelle. Die Abarbeitung geschieht in Sub-Modulen. Die verwendeten Fuzzy-Sets sind an verschiedene Betriebszustände anpassbar. Nach der Fuzzyfizierung erfolgt eine hierarchische Abarbeitung der Fuzzy-Regeln. Als Ergebnis werden die relevanten Diagnoseergebnisse in einer Textbox ausgegeben und mit der Zeit des Auftretens abgespeichert.

## **5.2 Einsatzerfahrungen an einer aktiv magnetgelagerten Pumpe im Kraftwerk Boxberg**

Die Entwicklung und erste Nutzung des Diagnosesystems MLDia erfolgte am Versuchstand ZMB 120 sowie zur Untersuchung aufgezeichneter Betriebsvorgänge am Magnetlagergroßversuchsstand FLP 500 (Anhang A1). Eine entsprechend angepasste Variante fand Einsatz bei der Durchführung von Langzeitmessungen und Grenzwertüberwachungen an einer konventionell gelagerten Zwischenkühlwasserpumpe im Kraftwerk Schwarze Pumpe.

Der umfangreichste Praxistest fand bei der Überwachung und Diagnose einer vollständig aktiv magnetgelagerten Kühlwasserdruckerhöhungspumpe im Kraftwerk Boxberg statt. Das Diagnosesystem diente dabei der Überwachung und Aufzeichnung der Signalverläufe bei der Inbetriebnahme, beim Probebetrieb sowie dem Dauerbetrieb der Pumpe und liefert wichtige Informationen für die Optimierung des magnetgelagerten Systems. Anhand der aufgenommenen Daten erfolgte die Verifikation und Erweiterung der Grenzwertüberwachung und der wissensbasierten Modelle. Auf den Einsatz des Diagnosesystems an der magnetgelagerten Pumpe im Kraftwerk Boxberg soll daher im Folgenden näher eingegangen werden.

### **5.2.1 Umbau einer konventionellen Kühlwasserpumpe auf aktive magnetische Lagerung**

Der Einsatz von aktiven Magnetlagern bei Pumpen für Flüssigkeiten ist aufgrund der auftretenden, wesentlich größeren Kräfte problematischer als bei Verdichtern oder Kompressoren. Um nachzuweisen, dass die auftretenden statischen und dynamischen Prozesskräfte durch Magnetlager beherrschbar sind, wurde daher im Rahmen eines Verbundprojektes eine Pumpe von konventioneller auf aktive magnetische Lagerung umgerüstet und in der Anlage eines 500-MW-Blockes im Kraftwerk Boxberg als dritte Betriebspumpe installiert [WOR05]. Ziel war es, eine Demonstrationsanlage zu schaffen, an der unter Betriebsbedingungen im Kraftwerk die Eignung von aktiven Magnetlagern und deren Funktionsfähigkeit für Pumpen nachgewiesen und erste Betriebserfahrungen gesammelt werden konnten.

Die auf Magnetlagerung umgerüstete Pumpe SM 400/400 A ist eine horizontale, einstufige, doppelflutige Kreiselpumpe mit Einfachspiralgehäuse, sie wird im Kraftwerk als Kühlwasserdruckerhöhungspumpe mit einem Nennförderstrom von 1400 m<sup>3</sup>/h und einer Förderhöhe von 32,5 m bei einer Wellenleistung von 180 kW genutzt. Das Laufrad hat vier Laufschaufeln, die doppelflutige Anordnung soll Axialschübe ausgleichen und die axialen Lagerbelastungen

minimieren. Als Antrieb wird ein Asynchronmotor vom Typ AHU 455 6/4 eingesetzt. Der Betrieb der Pumpe erfolgt vorwiegend mit einer Drehzahl von 1475 U/min. Die magnetgelagerte Pumpe ist in die Anlage des Blockes N im Kraftwerk Boxberg eingebaut, sie arbeitet über eine Rückschlagklappe und einen Absperrschieber auf eine gemeinsame Druckleitung. Ein Schema der Pumpe und die technischen Daten von Pumpe und Motor enthält Anhang A4.

Die aktive magnetische Lagerung der horizontal angeordneten Welle der Pumpe ist mit je einem Radiallager für die x- und y-Achse auf der A- und B-Seite realisiert. Das Axiallager ist an der B-Seite angeordnet, der Motor an der A-Seite angekuppelt. Die Krafterzeugung erfolgt über pro Achse gegeneinander geschaltete Steuerspulen, durch die der im Bereich von  $\pm 15$  A liegende Steuerstrom fließt und Grunderregerspulen, welche mit einem konstanten Grunderregestrom von 6 A gespeist werden. Die Tragkraft eines Radiallagers beträgt bei 0,4 mm Nennluftspalt und maximalem Steuerstrom 7500 N, die des Axialmagnetlagers bei 0,8 mm Nennluftspalt 2100 N bzw. mit modifiziertem Axiallager 12000 N. Für die Regelung der radialen Magnetlagerkreise sind digitale Controller eingesetzt, der axiale Kreis wird mit einem analogen Controller geregelt.

Für die Diagnose des Versuchsstandes werden die inhärenten Signale der Magnetlagerung genutzt. Dies sind die fünf Wellenlagen  $s$  (je x- und y-Achse auf der A- und B-Seite und z-Achse) sowie die fünf Lagerstromsignale  $i$  (je ein Spulenstrom pro Achse). Die Signale liegen im Bereich  $\pm 10$  V, eine zusätzliche Signalkonditionierung ist nicht erforderlich. Die Abtastung geschieht pro Kanal mit einer Abtastfrequenz von 5 kHz, im Sekudentakt werden die Messwerte erfasst, abgespeichert und weiterverarbeitet. Hardware-Basis ist ein PC mit Pentium 4-Prozessor (2,4 GHz) und einer Multifunktionskarte PCI-MIO-6024. Eine hardwaremäßige Überwachung der Wellenlagen übernimmt, unabhängig vom Diagnosesystem, die Notabschaltung (Schutz-Aus) des Pumpenmotors und der Magnetlagerung bei Wellenausschlägen größer 200  $\mu\text{m}$ .

Zusätzlich zu den an der Magnetlagerregelung erfassten Messdaten werden vom Betreiber des Kraftwerkes ausgewählte Druckverläufe vor (Saugseite) und nach (Druckseite) der Pumpe und die Stellverläufe des Gaskühlerregelventils aus der Datenbank der Leitwarte zur Verfügung gestellt und diese zur Verifikation der Diagnosemodelle genutzt.

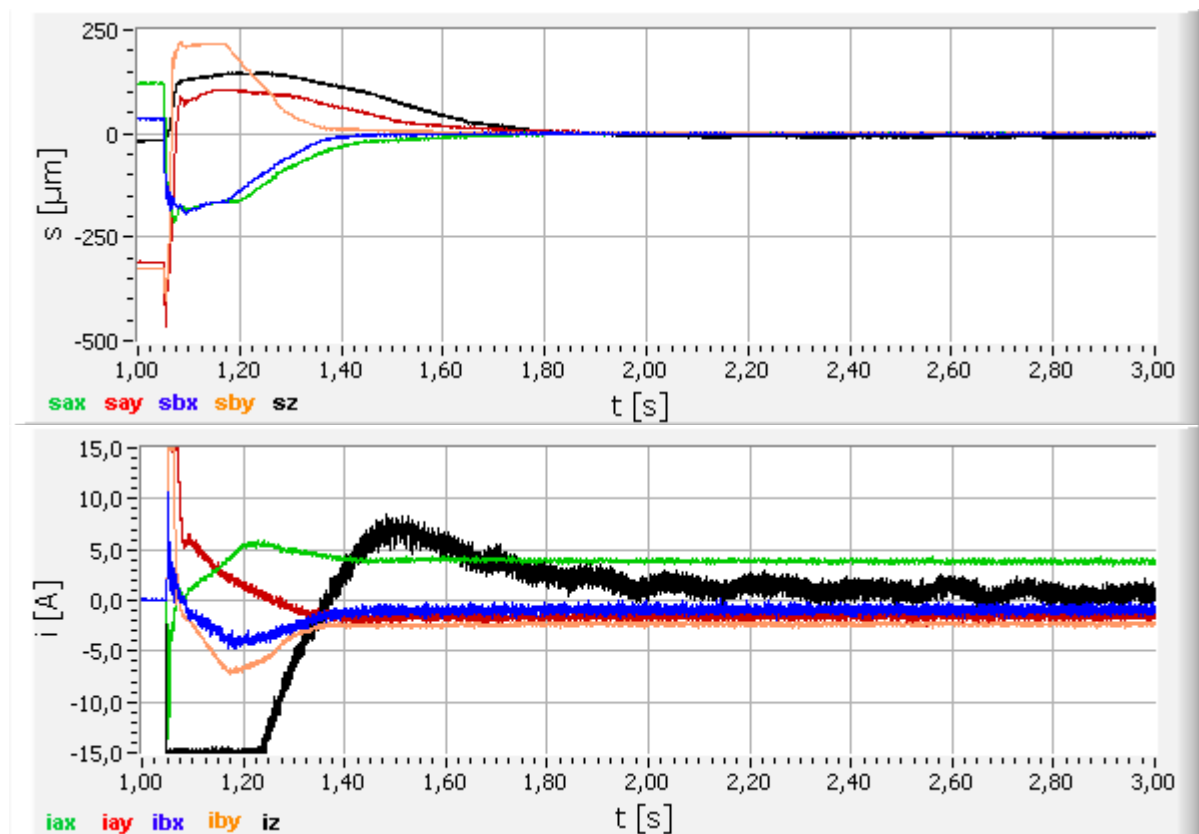
Nach Inbetriebnahme und Testbetrieb läuft die magnetgelagerte Pumpe seit Dezember 2005 erfolgreich über mehrere Monate als Betriebspumpe im Dauerbetrieb.

### 5.2.2 Überwachung des Betriebsverhaltens der magnetgelagerten Pumpe

Bei Inbetriebnahme und Dauerbetrieb der Pumpe im Kraftwerk zeichnete das Diagnosesystem MLDia die Messwerte im Normalbetrieb und bei aufgetretenen Störungen auf. Beispielhaft werden im Folgenden für die Festlegung der Referenzwerte und die Erweiterung der Diagnosesmodelle relevante Ergebnisse vorgestellt.

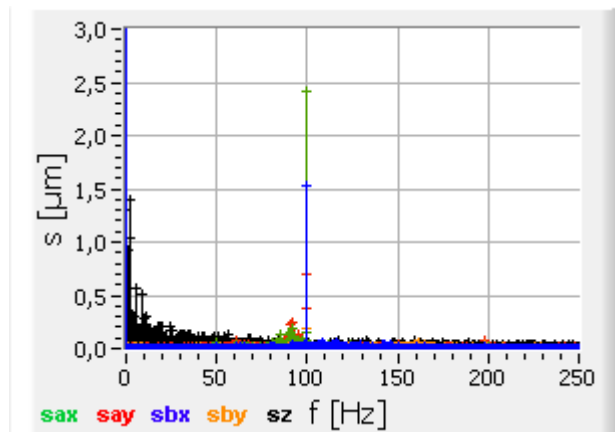
#### Zuschaltung der Magnetlager, Schweben der Welle

Durch das Zuschalten der Leistungsverstärker und Regler des Magnetlagerregelkreises wird die Welle in die Sollposition gehoben und zum Schweben gebracht. Ein typischer Verlauf der Wellenlage- und Stromsignale im fehlerfreien Fall ist in Bild 5-2 dargestellt. Der Vorgang ist nach 0,85 s, zum Zeitpunkt  $t = 1,9$  s abgeschlossen, der Ausregelvorgang für die z-Achse beansprucht dabei die längste Zeit. Dies resultiert daraus, dass die Welle erst in z-Richtung bewegbar ist, nachdem sie radial leicht angehoben wurde und nicht mehr in den Fanglagern klemmt.

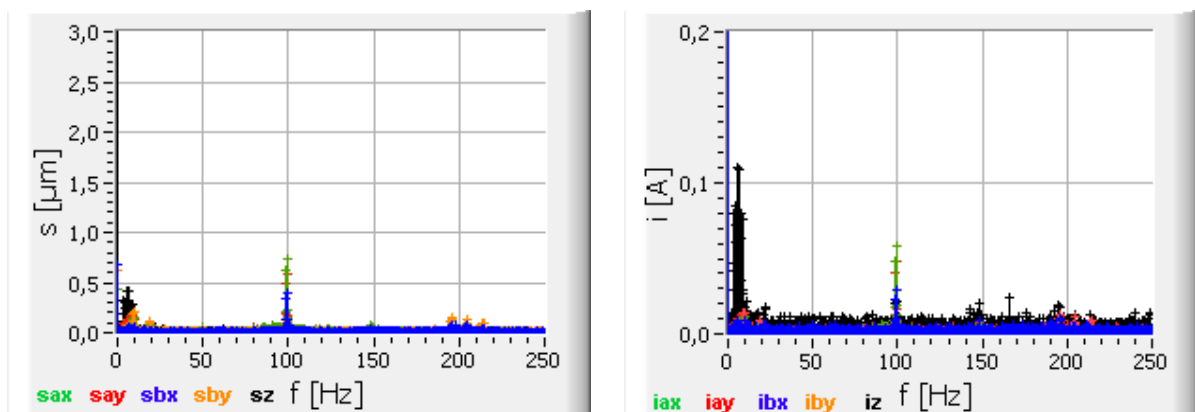


**Bild 5-2:** Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Einschaltvorgang

Ruht die Welle bei ausgeschalteten Magnetlagern in den Fanglagern, ist im Amplitudenspektrum ein Peak bei 100 Hz erkennbar (Bild 5-3), verursacht durch Umgebungsschwingungen. Diese Frequenz ist auch beim Schweben der Welle mit etwas geringerer Amplitude festzustellen (Bild 5-4), hier treten außerdem noch Schwingungsanteile im Bereich 140 Hz - 220 Hz auf.



**Bild 5-3:** Spektren der Wellenlagen bei ausgeschalteten Magnetlagern



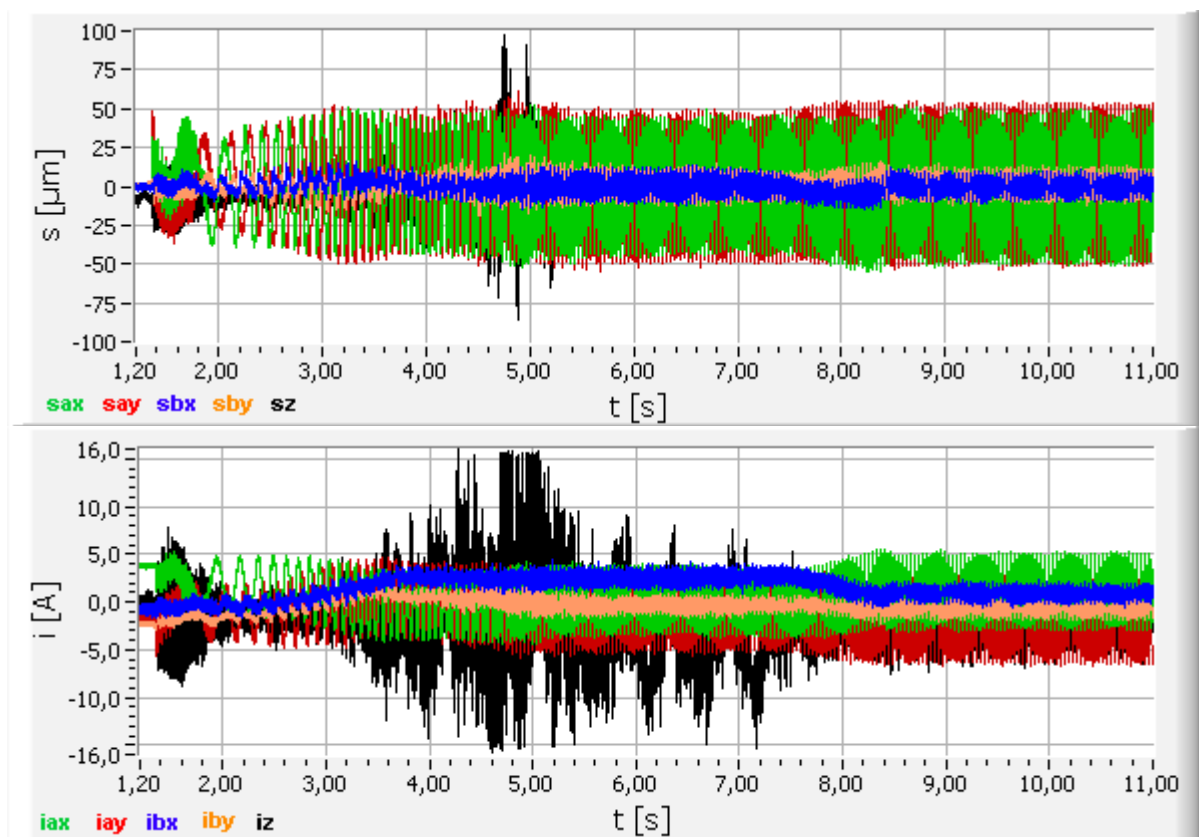
**Bild 5-4:** Spektren der Wellenlagen und Lagerströme beim Schweben der Welle

### Anfahrvorgang auf Nenndrehzahl bei geöffnetem Schieber

Bild 5-4 zeigt typische Verläufe der Wellenlagen und Lagerströme während des gesamten Anfahrvorgangs bei geöffnetem Schieber. Die Pumpe wird zum Zeitpunkt  $t = 1,3$  s zugeschaltet. Bei  $t = 3,5$  s erfolgt ein Druckaufbau an der Rückschlagklappe bis zur Öffnung bei  $t = 4,9$  s, verbunden mit ansteigenden Kräften in der z-Achse in positiver und negativer Richtung, welche durch Erhöhung der Ströme ausgeregelt werden. Dabei gehen die Leistungsverstärker bei 15 A Maximalstrom in die Begrenzung, ein Ausregeln der Störkräfte ist nicht mehr vollständig möglich, die Wellenlagesignale der z-Achse erreichen Amplituden bis 100  $\mu\text{m}$ . Zum Zeitpunkt  $t = 4,9$  s öffnet die Rückschlagklappe und die Pumpe fördert parallel

zur konventionell gelagerten Pumpe. Diese wird bei  $t = 7,5$  s abgeschaltet, die radialen und axialen Belastungen der Magnetlager sinken. Der komplette Anfahrvorgang ist zum Zeitpunkt  $t = 8,5$  s abgeschlossen.

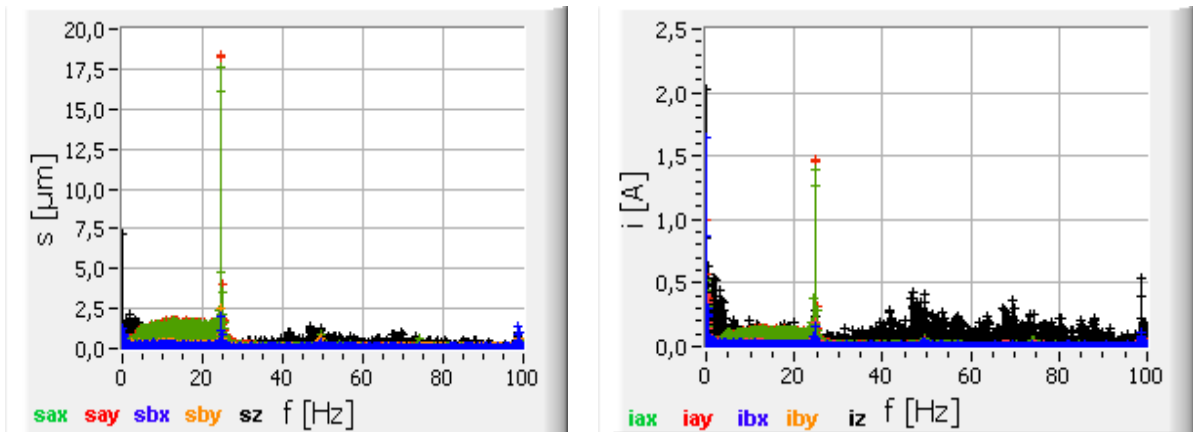
Die radialen Auslenkungen der Wellenlagen beim Anfahrvorgang liegen im unkritischen Bereich bei maximal  $60 \mu\text{m}$  auf der Antriebsseite (A-Seite) kurz vor dem Öffnen der Rückschlagklappe und einer Amplitude von ca.  $50 \mu\text{m}$  auf der A-Seite bzw. ca.  $15 \mu\text{m}$  auf der B-Seite nach Abschluss des Anfahrvorganges. Die höheren Auslenkungen auf der A-Seite werden durch Unwuchten des Motors bzw. Ungenauigkeiten in der Fluchtung zwischen Welle und Motor verursacht.



**Bild 5-5:** Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Anfahrvorgang

Die Spektren der Wellenlagen und Ströme (Bild 5-6), berechnet über den Anfahrvorgang von  $t = 1,8$  s bis 8 s, zeigen für die radialen Signale das Hochlaufen der Frequenz bis zum Peak bei der Nennfrequenz. In den Spektren der z-Achse ist die Drehfrequenz der Welle nicht erkennbar, signifikant sind Frequenzanteile im Bereich 1 Hz - 15 Hz, 40 Hz - 50 Hz und bei den Strömen zusätzliche Anteile bei 98 Hz. Die Störkräfte resultieren hier offenbar nicht aus Motorunwuchten, sondern aus den Strömungs- und Druckverhältnissen in der Pumpe.

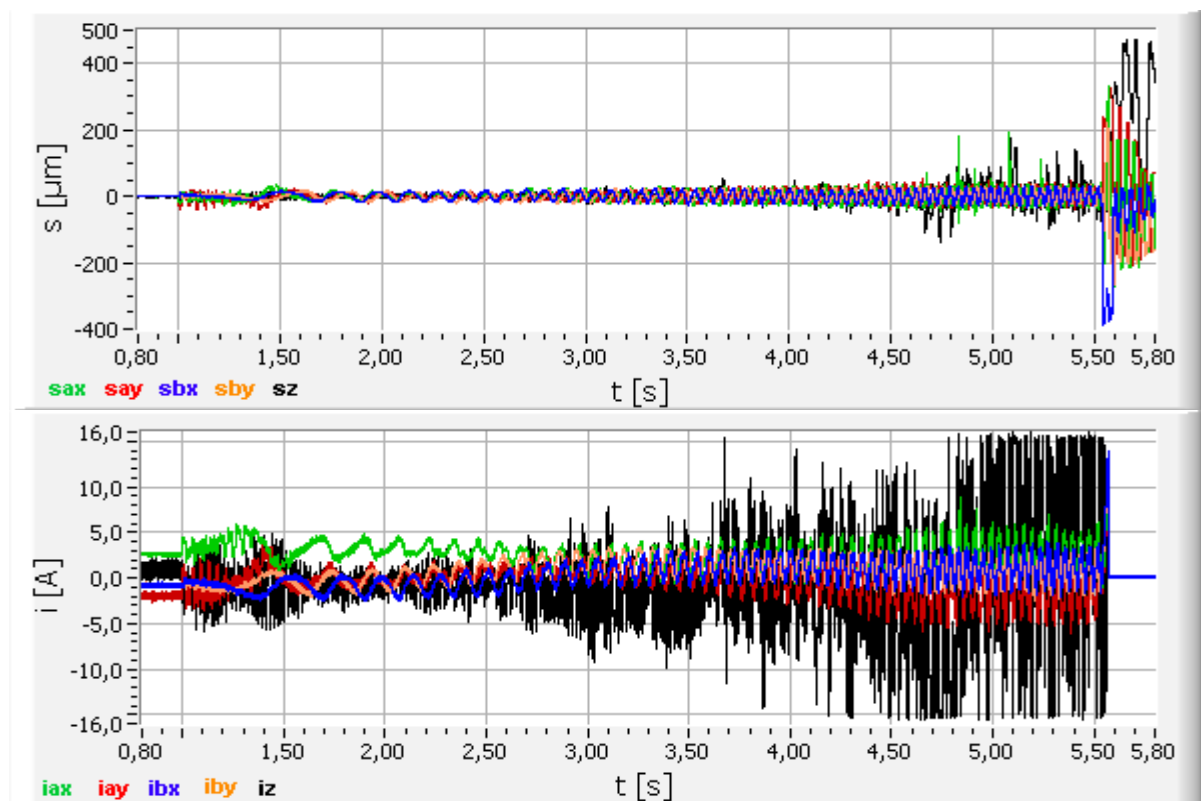




**Bild 5-6:** Spektren von Wellenlagen und Lagerströmen beim Anfahrvorgang

### Anfahrvorgang gegen geschlossenen Schieber

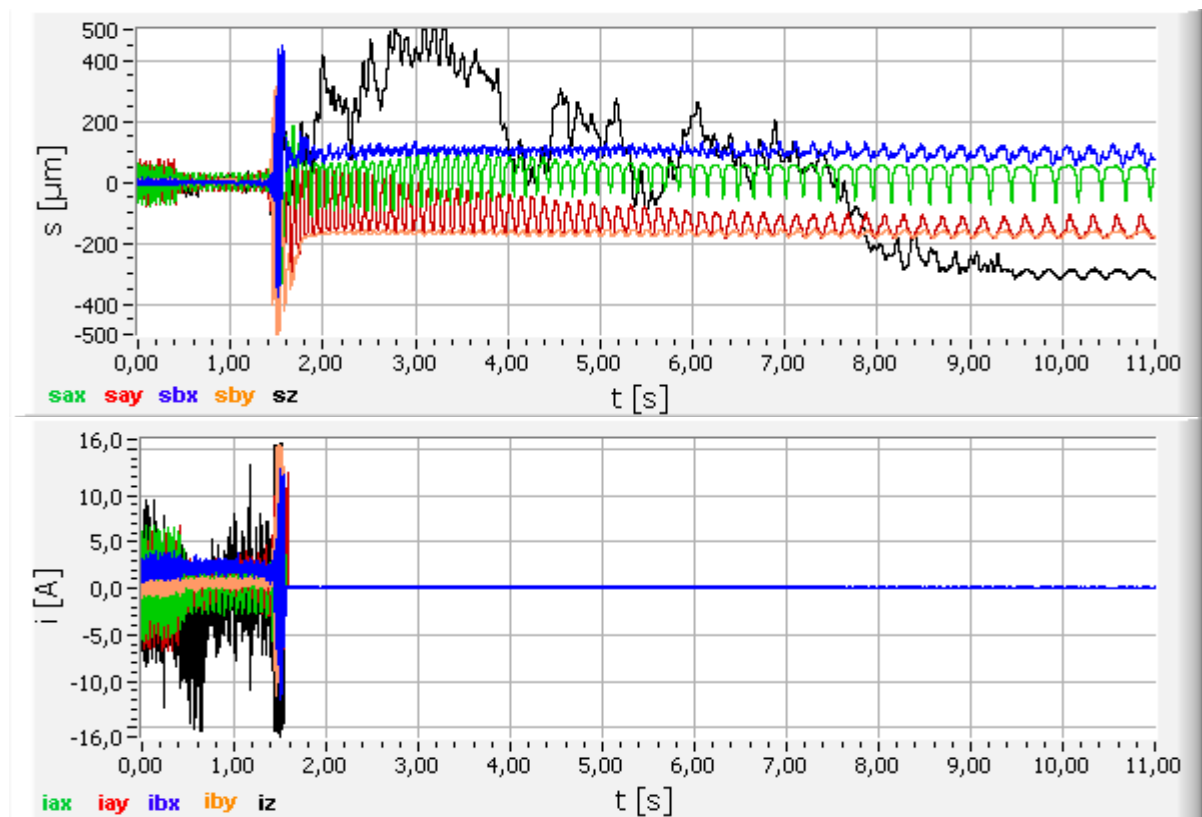
Wellenlagen- und Stromverläufe zeigen bis kurz vor dem Erreichen der Nenndrehzahl zum Zeitpunkt  $t = 4,6$  s den gleichen Verlauf wie beim Anfahren mit geöffnetem Schieber (Bild 5-7). Danach setzt sich aber der Druckaufbau fort, die Kräfte auf der z-Achse steigen weiter an und sind nicht mehr ausregelbar. Der Strom in der z-Achse schwankt zwischen positiver und negativer Begrenzung und die Amplituden der z-Wellenlage erreichen Werte von maximal  $180 \mu\text{m}$ , die Schutz-Aus-Funktion schaltet die Magnetlager und den Motor ab.



**Bild 5-7:** Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Anfahren gegen Schieber

### Gesteuertes Abschalten der Pumpe (mit Schutz-Aus durch Rückschlagklappe)

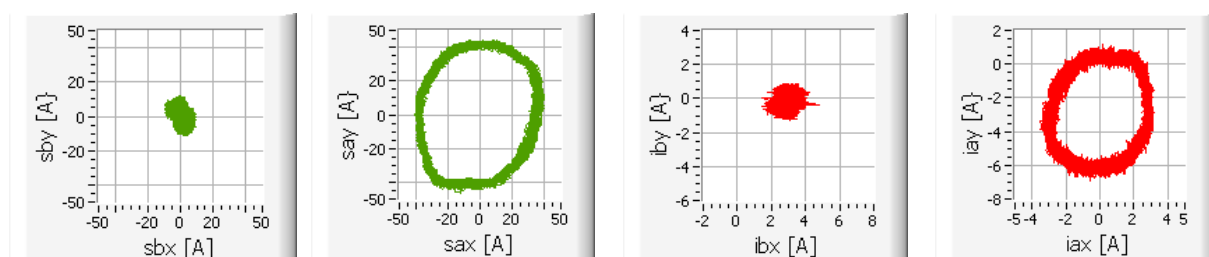
Die Verläufe der Wellenlagen und Lagerströme beim Abschalten der Pumpe sind im Bild 5-8 dargestellt. Zum Zeitpunkt  $t = 0,5$  s wird der Motor abgeschaltet, die Welle dreht aus. Mit der Abnahme der Wasserförderung sinken auch die Amplituden der radialen Signale. Zum Zeitpunkt  $t = 1,5$  s, bei einer Wellendrehzahl von  $14 \text{ s}^{-1}$ , schließt die Rückschlagklappe. Durch den harten Stoß entstehen starke Resonanzen auf der B-Seite mit Amplituden bis  $500 \mu\text{m}$ , welche zur Notabschaltung des Magnetlagers führen.



**Bild 5-8:** Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Abschaltvorgang

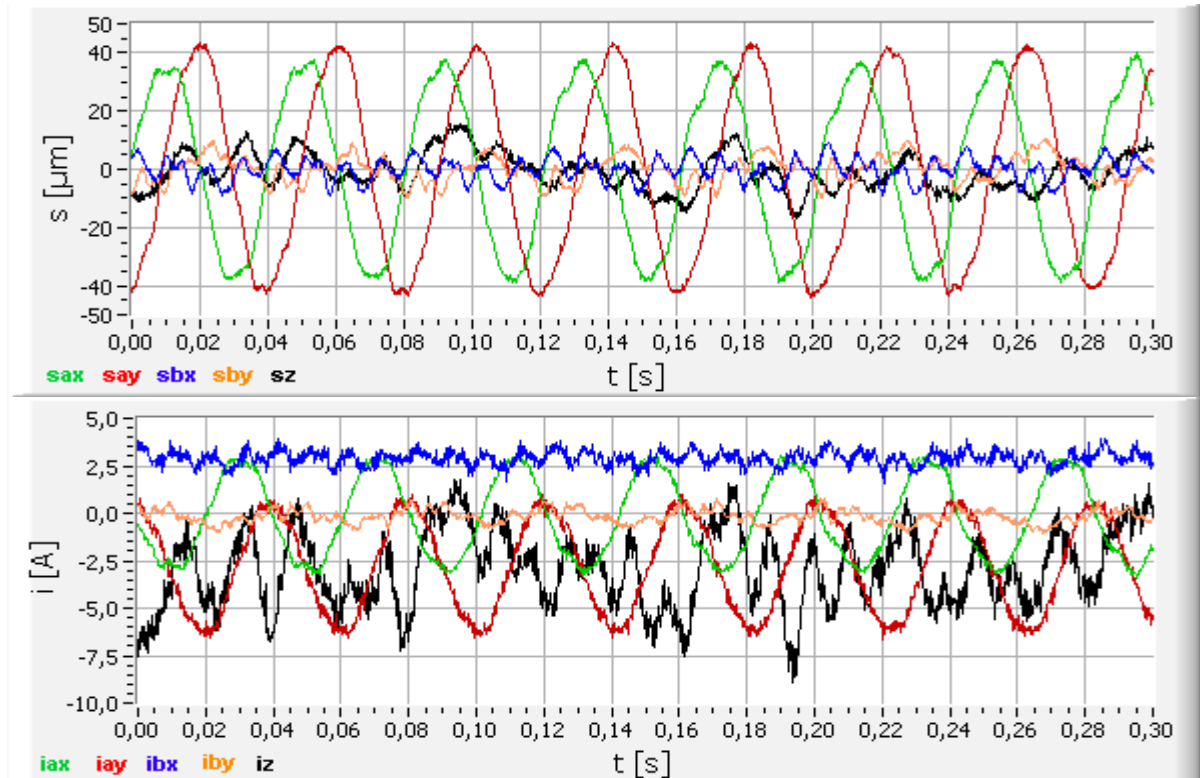
### Dauerbetrieb der magnetgelagerten Pumpe

Die Verläufe der Wellenlagen und Lagerströme sowie die zugehörigen Orbits nach Erreichen des stabilen Betriebszustandes sind in den Bildern 5-9 und 5-10 zu sehen.



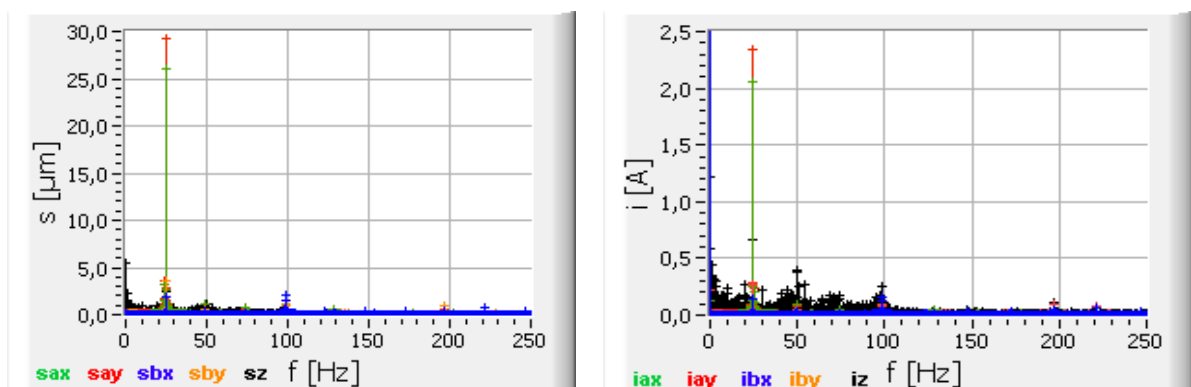
**Bild 5-9:** Orbits der Wellenlagen und Lagerströme, ca. 2 h nach dem Zuschalten

Die Amplituden der radialen Wellenlagen auf der Antriebsseite liegen bei  $40\ \mu\text{m}$ , auf der B-Seite sind die Störungen von Motor und Kupplung und somit die Schwingungen geringer ( $10\ \mu\text{m}$ ). In der z-Achse entstehen Auslenkungen um  $\pm 18\ \mu\text{m}$ . Die Schwingungen der Wellenlagen und Ströme befinden sich im unkritischen Bereich, es bestehen genügend Reserven zur Ausregelung von Störkräften.



**Bild 5-10:** Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen, ca. 2 h nach dem Zuschalten

Die Spektren (Bild 5-11) zeigen Peaks bei der Drehfrequenz und deren Vielfachen. Drehzahl-unabhängige Störungen auf der z-Achse durch unterschiedliche Anströmvorgänge und Druckschwankungen sind im Spektrum des Lagerstromes der z-Achse als Frequenzanteile geringer Stärke (ca. 10 % der Peaks der Drehfrequenz) bis 100 Hz erkennbar.



**Bild 5-11:** Spektren der Wellenlagen und Lagerströme, ca. 2 h nach dem Zuschalten

### Verhalten bei Druckänderungen

Druckunterschiede innerhalb des Pumpengehäuses, verursacht durch den Betriebszustand der Pumpe und den eingestellten Arbeitspunkt, wirken auf das Laufrad parallel zur Rotationsachse und führen zur Veränderung der Axiallagerbelastungen. Bei der Pumpe SM 400/400 erfolgt eine Axial Schubentlastung durch den Einsatz eines zweiflutigen Laufrades. Eine vollständige Kompensation der Einflüsse durch Druckänderungen ist aber nicht möglich.

Während der bisherigen Laufzeit der Pumpe konnte festgestellt werden, dass die Belastungen des Axiallagers großen Schwankungen unterliegen und abhängig von der Stellung *gRVH2* des Regelventils des Gaskühlers sind. Mit diesem Regelventil wird die Temperatur im Gaskühler konstant gehalten, indem je nach Außentemperatur der Förderstrom gestellt wird. Dessen Änderung führt zu Druckänderungen auf der Druckseite und zu unterschiedlichen Strömungsverhältnissen in der Pumpe. Dadurch verändert sich auch die Anströmung des Laufrades, das axiale Magnetlager wird je nach Stellung des Regelventils unterschiedlich belastet.

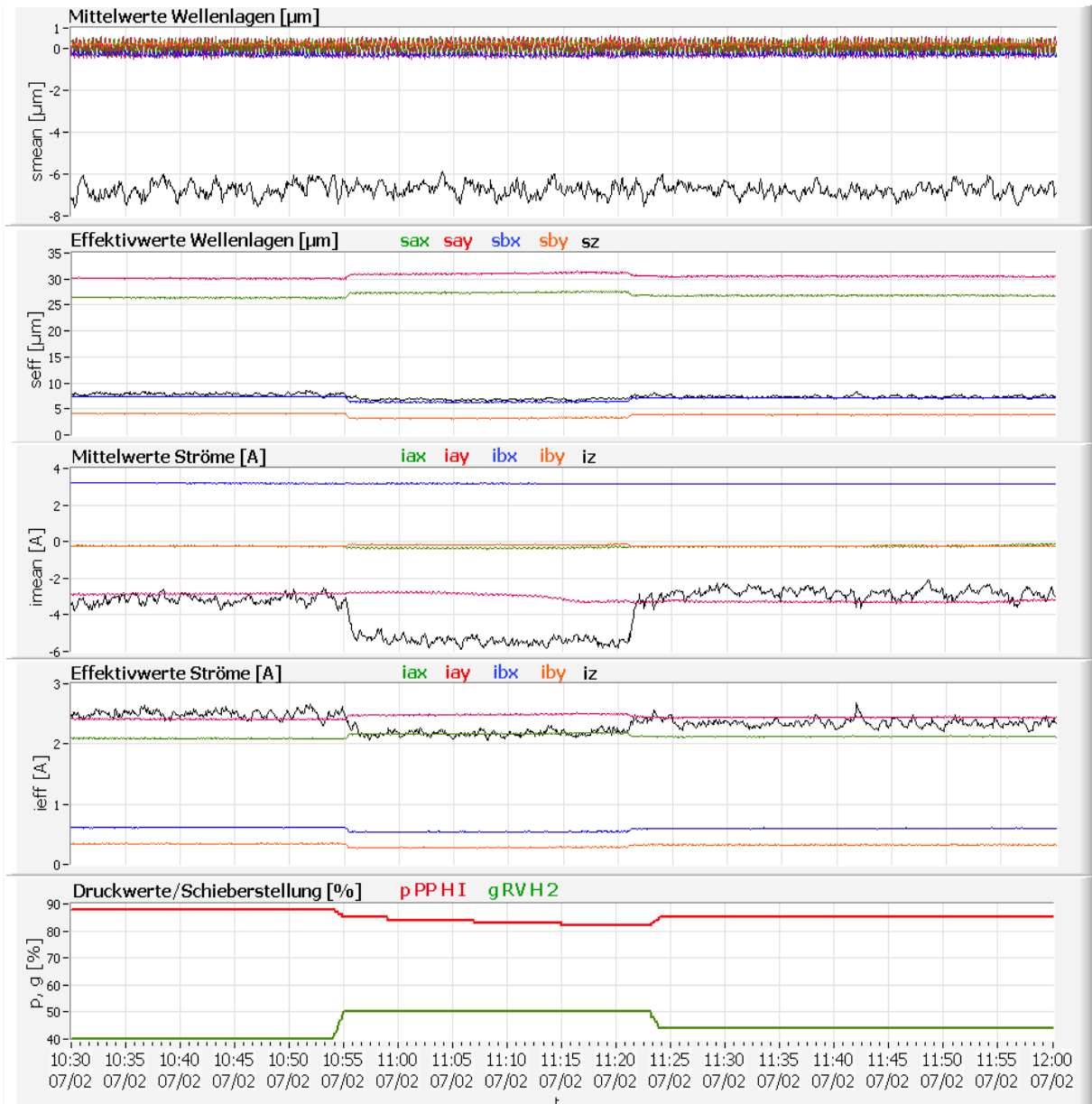
Die Auswirkungen von Druckänderungen auf die erfassten Signale an der magnetgelagerten Pumpe sind im Bild 5-12 erkennbar, welches die Merkmalsverläufe beim Öffnen und Schließen des Regelventils RVH2 zeigt.

Die Öffnung des Regelventils bewirkt eine Senkung des Druckes *pPPHI* hinter der Pumpe (Druckseite) und beeinflusst die Merkmale folgendermaßen:

- geringfügiges Ansteigen der radialen Wellenlage- und Lagerstromeffektivwerte der A-Seite,
- geringfügiges Absinken der radialen Wellenlage- und Lagerstromeffektivwerte der B-Seite und der axialen Wellenlageeffektivwerte,
- Absinken der axialen Wellenlage- und Lagerstromeffektivwerte,
- Absinken des axialen Lagerstrommittelwertes im negativen Bereich, d. h. Ansteigen des Betrages des Stromes.

Die Mittelwerte der Wellenlagesignale bleiben unverändert.

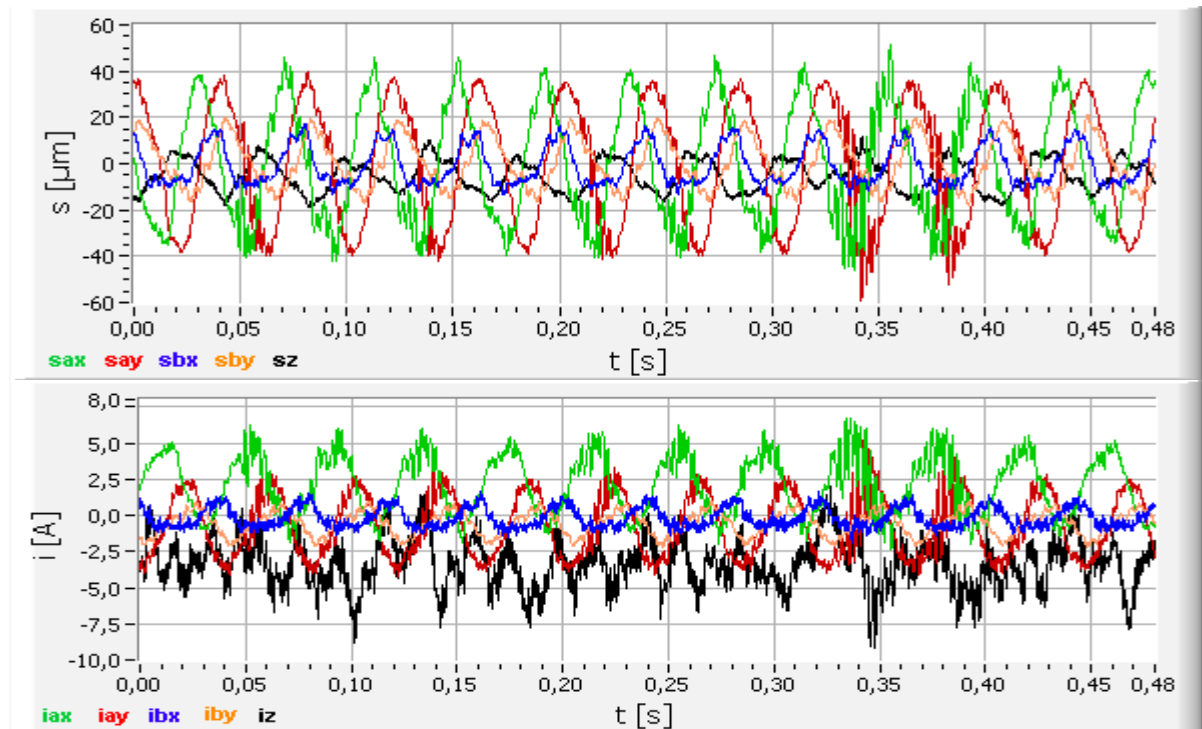
Das Schließen des Regelventils und die damit verbundene Druckerhöhung bewirkt das umgekehrte Verhalten.



**Bild 5-12:** Merkmalsverläufe bei Druckänderungen an der Pumpe

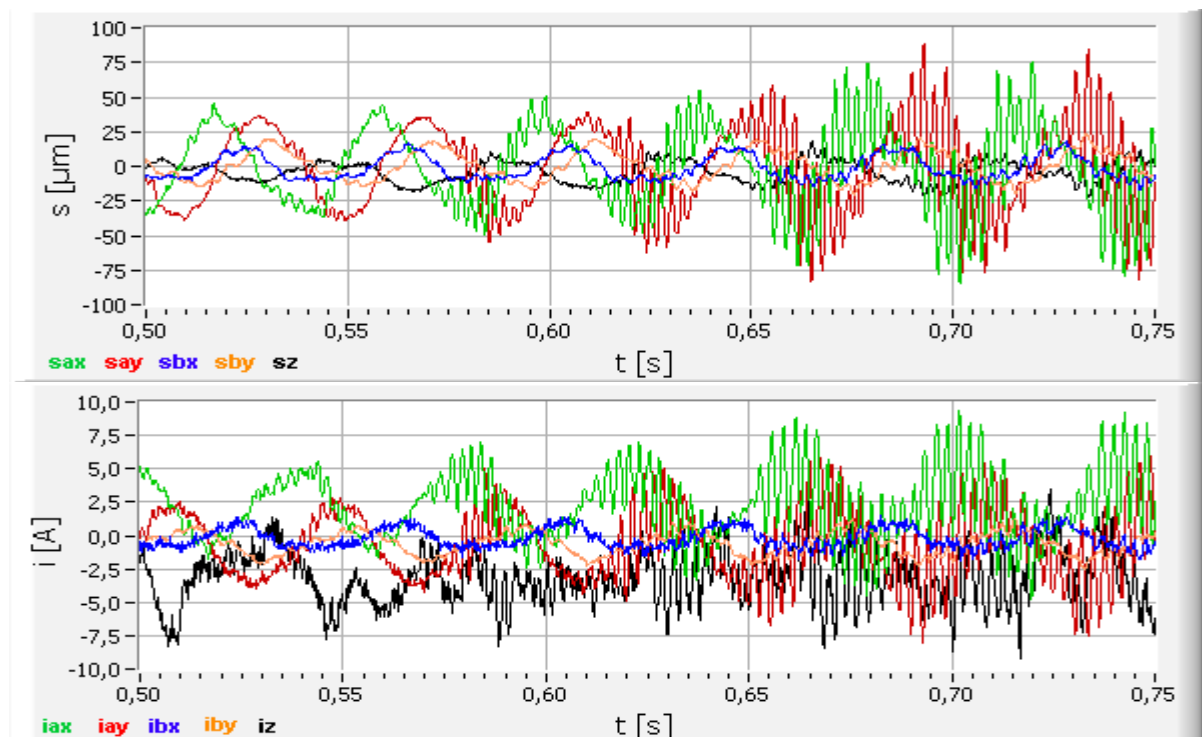
### **Erhöhte Schwingungen durch lose Wellenteile auf der A-Seite**

Während der Inbetriebnahmeversuche löste sich die Wellenmutter auf der A-Seite der Welle. Beim Erreichen der Nenndrehzahl entstanden dadurch der Drehfrequenz überlagerte Schwingungen, welche zu erhöhten Amplituden in den Wellenlagen  $s_{ax}$  und  $s_{ay}$  führten. Die Störung konnte über einen Zeitraum ausgeregelt werden und ebte offenbar aufgrund einer veränderten Position der Wellenmutter selbständig wieder ab. Ein solcher Vorgang mit An- und Abklingen der Störschwingung ist in Bild 5-13 dargestellt. Die überlagerte Schwingung beginnt bei der unteren Halbwelle ( $t = 0,05$  s) und breitet sich auf beide Halbwellen aus ( $t = 0,32$  s). Danach nimmt die Schwingung wieder ab.



**Bild 5-13:** Wellenlagen und Lagerströme beim Auftreten von Resonanzen auf der A-Seite

Wird die lose Wellenmutter durch die Schwingungen in eine ungünstige Position verschoben, kommt es zu weiteren, stark erhöhten Resonanzschwingungen, welche letztendlich die Schutzabschaltung der Pumpe auslösen (Bild 5-14). Diese Resonanzen beeinflussen auch den Lagerstrom der z-Achse.



**Bild 5-14:** Wellenlagen und Lagerströme beim Auftreten von Resonanzen auf der A-Seite

### 5.2.3 Modifikation der Grenzwertüberwachung

Zur Erkennung von Fehlern und Betriebszuständen wurden im Abschnitt 3.2 Grenzwertflags und Regeln definiert. Für die Grenzwertüberwachung an der Pumpe im Kraftwerk Boxberg sind diese aufgrund der veränderten Konstruktion (horizontale Lagerung, Erzeugung der Lagerkräfte mit Steuer- und Grunderregerwicklungen) zu modifizieren. Die Festlegung der Werte erfolgt anhand der ausgewerteten Daten. In der Tabelle 5-1 sind die modifizierten Flags und definierten Grenzwerte für die magnetgelagerte Pumpe angegeben. Zur Auslösung von Speicherrouitinen werden bei den Mittel- und Effektivwerten der Wellenlagen und Lagerströme zusätzliche Toleranzbereiche überwacht, für deren Grenzen eine dynamische Nachführung entsprechend des Betriebszustandes und der Häufigkeit der Überschreitungen erfolgt.

Name des Flags	Merkmal	Grenzwert	Diagnosetext	Kommentar
gw_sMax	$s_{Max}$	$> 490 \mu\text{m}$	Sensorsignal gestört	
gw_sMin	$s_{Min}$	$< - 490 \mu\text{m}$	Sensorsignal gestört	
gw_sHoch+	$s_{Max}$	$> 80 \mu\text{m}$	Wellenlage außer Toleranz	
gw_sHoch-	$s_{Min}$	$< - 80 \mu\text{m}$	Wellenlage außer Toleranz	
gw_sMeanFl	$\bar{s}$	$< - 20 \mu\text{m}$		nur y-Achse
gw_sMeanNorm	$ \bar{s} $	$< 2 \mu\text{m}$		Betrag
gw_sMeanMax	$ \bar{s} $	$> 490 \mu\text{m}$	Sensorsignal gestört	Betrag
gw_sEff0	$\tilde{s}$	$< 2 \mu\text{m}$		
gw_iMax	$i_{Max}$	$> 14,5 \text{ A}$	Lagerstrom/Last zu hoch	
gw_iMin	$i_{Min}$	$< - 14,5 \text{ A}$	Lagerstrom/Last zu hoch	
gw_iMean0	$ \bar{i} $	$< 0,2 \text{ A}$		Betrag
gw_iMeanMax	$ \bar{i} $	$> 14,0 \text{ A}$	Kurzschluss/Blockierung	Betrag
gw_iEff0	$\tilde{i}$	$< 0,5 \text{ A}$		
gw_n2>	n	$> 1500 \text{ U/min}$	Drehzahl 2 zu hoch	
gw_n2<	n	$< 1450 \text{ U/min}$	Drehzahl 2 zu niedrig	
gw_n0	n	$< 2 \text{ U/min}$	Drehzahl = 0	
gr_n+	$\Delta n$	$> 2 \text{ (U/s)/s}$	Drehzahlerhöhung	
gr_n-	$\Delta n$	$< - 2 \text{ (U/s)/s}$	Drehzahlverringern	
gr_sMax	$ \Delta \bar{s} $	$> 70 \text{ mm/s}$	Sensorsignal gestört	

**Tabelle 5-1:** Festlegung der Grenzwerte für die magnetgelagerte Pumpe

Die Bildung der Summenflags (siehe Abschnitt 3.2) aus den Grenzwertflags der einzelnen Achsen  $q$  geschieht für die Flags  $gw\_sMeanNorm\_q$ ,  $gw\_sEff0\_q$ ,  $gw\_iMean0\_q$  und  $gw\_iEff0\_q$  durch AND-Verknüpfungen und für  $gw\_sMax\_q$ ,  $gw\_sMin\_q$ ,  $gw\_sHoch+\_q$ ,  $gw\_sHoch-\_q$ ,  $gw\_iMax\_q$  und  $gw\_iMin\_q$  durch OR-Verknüpfungen.

Folgende logische Verknüpfungen für die Betriebszustandserkennung wurden modifiziert:

Welle\_im\_Fanglager :=

$$gw\_sMeanFl\_ay \text{ AND } gw\_sMeanFl\_by \text{ AND } gw\_iMean0\_all \\ \text{AND } gw\_iEff0\_all \text{ AND NOT}(Welle\_ruht\_im\_Fanglager)$$

Welle\_im\_Fanglager\_OK :=

$$gw\_sMeanFl\_ay \text{ AND } gw\_sMeanFl\_by \text{ AND } gw\_iMean0\_all \\ \text{AND } gw\_iEff0\_all \text{ AND } gw\_sEff0\_all \text{ AND } gw\_n0$$

Welle\_schwebt :=

$$gw\_sMeanNorm\_all \\ \text{AND NOT}(gw\_sHoch+\_all) \text{ AND NOT}(gw\_sHoch-\_all) \\ \text{AND NOT}(Welle\_schwebt\_Standby) \text{ AND NOT}(\text{Normalbetrieb})$$

Welle\_schwebt\_Standby :=

$$gw\_sMeanNorm\_all \text{ AND } gw\_sEff0\_all \\ \text{AND NOT}(gw\_sHoch+\_all) \text{ AND NOT}(gw\_sHoch-\_all) \text{ AND } gw\_iEff0\_all \\ \text{AND NOT}(gw\_iMax\_all) \text{ AND NOT}(gw\_iMin\_all) \text{ AND } n0$$

Normalbetrieb :=

$$gw\_sMeanNorm\_all \text{ AND NOT}(gw\_sHoch+\_all) \text{ AND NOT}(gw\_sHoch-\_all) \text{ AND} \\ \text{NOT}(gw\_iMax\_all) \text{ AND NOT}(gw\_iMin\_all) \text{ AND NOT}(gw\_n2>)$$

Sensorfehler\_in\_Achse :=

$$(gw\_sMax \text{ OR } gw\_sMin \text{ OR } gr\_sMax) \text{ AND } sEff0$$

Aktorfehler\_in\_Achse :=

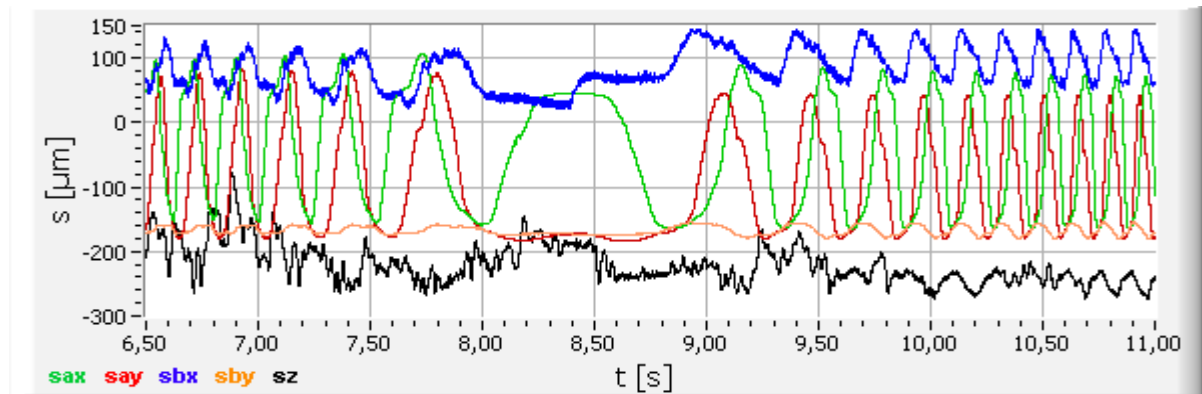
$$gw\_iMean0 \text{ AND NOT}(gw\_sMeanNorm) \text{ AND } gw\_iEff0 \\ \text{AND NOT}(Welle\_im\_Fanglager) \text{ AND NOT}(Welle\_ruht\_im\_Fanglager)$$

## 5.2.4 Diagnosemodelle für aufgetretene Störfälle

### 5.2.4.1 Diagnose der Drehrichtung der Welle

Bei der Abschaltung der Pumpe fällt die Rückschlagklappe normalerweise aufgrund des Druckabfalls in den geschlossenen Zustand zurück. Der Absperrschieber auf der Druckseite wird erst mit einer Verzögerung automatisch zugefahren. Dabei kann es bei Funktionsstörungen der Rückschlagklappe passieren, dass diese nicht vollständig schließt. Der Rückdruck der laufenden auf die magnetgelagerte Pumpe führt dann zu einem umgekehrten Durchströmen des Schaufelrades und damit zum Rückwärtslauf der magnetgelagerten Pumpe.





**Bild 5-15:** Verlauf der Wellenlagesignale bei einer Drehrichtungsumkehr der Welle

Bild 5-15 zeigt den Verlauf der Wellenlagen bei dieser Drehrichtungsumkehr. Die Drehzahl verringert sich zuerst mit dem Auslauf der Pumpe bis zum Zeitpunkt  $t = 8,3$  s. Danach nimmt die Drehzahl wieder zu, allerdings in umgekehrter Drehrichtung. Die dabei auftretenden Kräfte werden vom Fanglager ohne Beschädigung der Pumpe aufgenommen.

Die Erkennung des Rückwärtslaufes der Pumpe liefert Informationen über die korrekte Funktion der Rückschlagklappe, des Absperrschiebers und der Motoransteuerung. Für die Diagnose können nur die Wellenlagesignale eingesetzt werden, da bei einer Notabschaltung der Pumpe die Magnetlager deaktiviert sind und keine Lagerströme fließen. Erkennbar ist der Rückwärtslauf an einer veränderten Phasenverschiebung zwischen den Wellenlagesignalen der x- und y-Achse. Bei korrekter Drehrichtung beträgt die Phasenverschiebung  $90^\circ$ , bei Rückwärtslauf  $270^\circ$ . Die Bestimmung der Phasenverschiebung erfolgt mit der Kreuzkorrelationsfunktion  $KKF_{qr}(k)$  (Gleichung (2-18)) über einen Messzyklus von 1 s, damit sind auch beim Auslauf mehrere Rotorumdrehungen erfasst. Die Verschiebung  $k_{Max}$ , bei der das 1. Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion auftritt, ist ein Maß für die Phasenverschiebung der Signale. Sie wird mit Gleichung (5-1) anhand der Drehzahl  $n$  und der Abtastfrequenz  $f_a$  auf eine Phasenverschiebung  $\Delta\alpha$  zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  normiert.

$$\Delta\alpha = k_{Max} \frac{360^\circ \cdot n}{f_a} \quad (5-1)$$

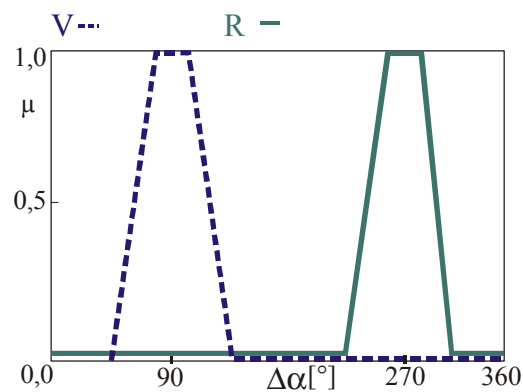
Die Bildung der Diagnoseaussage erfolgt mit den linguistischen Variablen  $\Delta\alpha$  (Bild 5-16) und *Drehrichtung* (Tabelle 5-2) sowie dem negierten Grenzwertflag  $gw\_n0$  (Tabelle 5-1) über die Einzelregeln

WENN  $\Delta\alpha = V$  UND NOT( $gw\_n > 0$ ) DANN *Drehrichtung* = *Vor*  
 WENN  $\Delta\alpha = R$  UND NOT( $gw\_n > 0$ ) DANN *Drehrichtung* = *Rück*.

Die Verknüpfung mit dem Grenzwertflag  $gw\_n > 0$  ist notwendig, um die Diagnose bei nicht drehender Welle auszublenden.

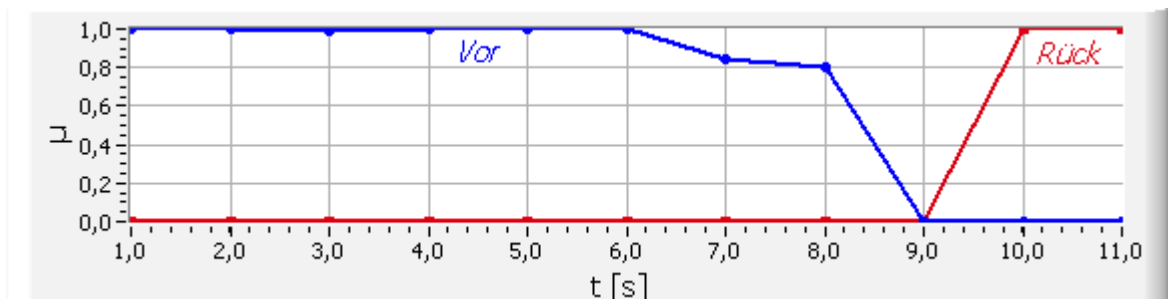
Linguistische Variable	Sets	Bemerkung
<i>Drehrichtung</i>	<i>Vor</i>	normale Drehrichtung
	<i>Rück</i>	Rückwärtslauf

**Tabelle 5-2:** Linguistische Ausgangsvariable und deren Sets zur Diagnose der Drehrichtung



**Bild 5-16:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $\Delta\alpha$

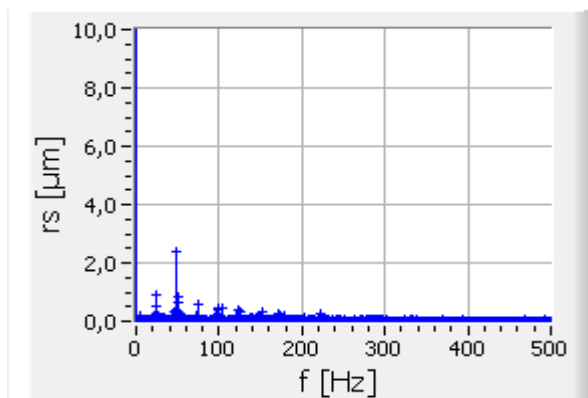
Der Verlauf der Erfüllungsgrade der Sets für die Drehrichtungsdiagnose beim Abfahrvorgang entsprechend Bild 5-15 ist in Bild 5-17 dargestellt. Die Erkennung der Drehrichtung bei normalem Betrieb liefert für die Diagnose der normalen Drehrichtung Erfüllungsgrade um 1, die Drehrichtungsumkehr wird nach einer Verzögerungszeit von 1 s (bedingt durch die Dauer der KKF-Berechnung) ebenfalls korrekt diagnostiziert ( $\mu = 1$ ).



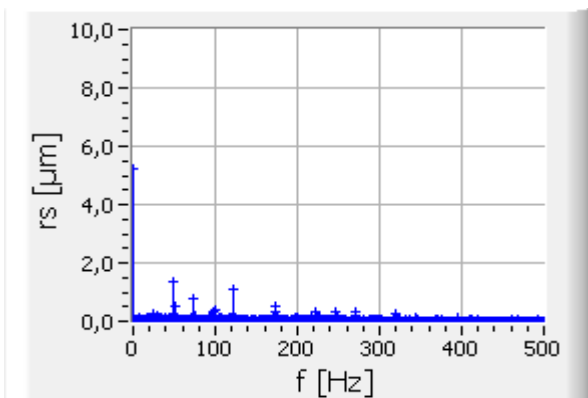
**Bild 5-17:** Diagnose *Drehrichtung* bei Pumpenabschaltung mit Drehrichtungsumkehr

### 5.2.4.2 Diagnose von Resonanzen bei losen Wellenteilen

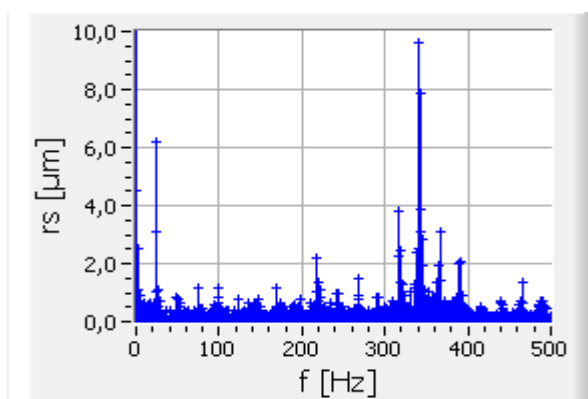
Während der Inbetriebnahmeversuche entstanden durch Loslösen der Wellenmutter auf der A-Seite starke Resonanzschwingungen beim Lauf der Pumpe, welche letztendlich zur Notabschaltung führten (siehe 5.2.2). Die frühzeitige Erkennung loser Wellenteile ist wichtig, um noch vor einer Notabschaltung Eingreifen zu können und Folgeschäden zu verhindern. Erkennbar sind solche Fehler an den erhöhten Schwingungsanteilen im Amplitudenspektrum der Wellenlage- und Stromsignale. Da sich beim Drehen der Welle die Schwingungen primär auf die Wellenlagen der x- und y-Achse auswirken, werden die Schwingungen in den einzelnen Achsen durch Berechnung des Amplitudenspektrums des Wellenausschlages  $FTrs(f)$  über jeweils einen Messzyklus von einer Sekunde zusammengefasst. Die Spektren beim fehlerfreien Lauf der Pumpe sind in Bild 5-18 (A-Seite) und Bild 5-19 (B-Seite) dargestellt. Lockert sich die Wellenmutter auf der A-Seite, steigen die Frequenzanteile im Bereich 300 Hz bis 400 Hz für  $FTrs_a(f)$  an (Bild 5-20). Dies ist im Spektrum schon erkennbar, wenn die Pumpe noch innerhalb der Toleranzen der Wellenschwingung läuft. Die Wellenseite B wird kaum beeinflusst (Bild 5-21).



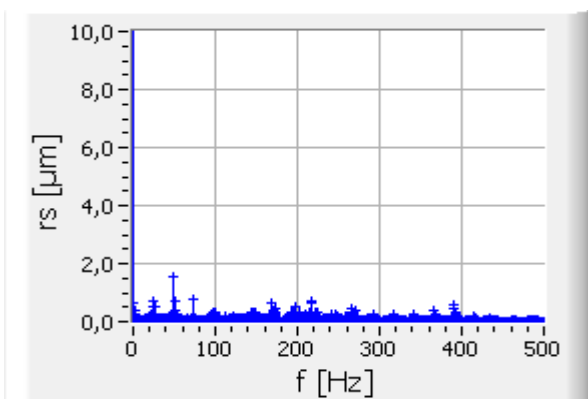
**Bild 5-18:** Spektrum A-Seite ohne Störung



**Bild 5-19:** Spektrum B-Seite ohne Störung



**Bild 5-20:** Spektrum A-Seite bei loser Wellenmutter auf der A-Seite



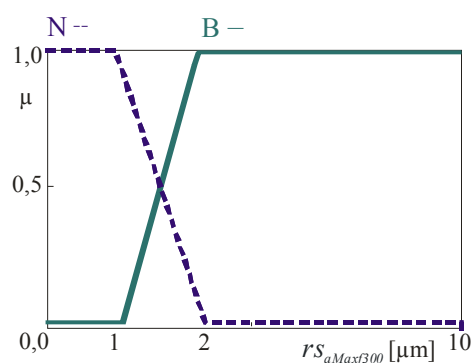
**Bild 5-21:** Spektrum B-Seite bei loser Wellenmutter auf der A-Seite

Zur Diagnose werden aus den Amplitudenspektren der A- und B-Seite jeweils die Maxima der Schwingfrequenzen zwischen 300 Hz und 400 Hz ermittelt, als linguistische Eingangsvariablen  $rs_{aMaxf300}$  und  $rs_{bMaxf300}$  mit den Sets  $N$  bzw.  $B$  (Bild 5-22) definiert und über die Regeln

WENN  $rs_{aMaxf300} = B$  DANN  $Resonanz = A$

WENN  $rs_{bMaxf300} = B$  DANN  $Resonanz = B$

die Erfüllungsgrade der Sets  $A$  und  $B$  der linguistischen Ausgangsvariablen  $Resonanz$  (Tabelle 5-3) berechnet.

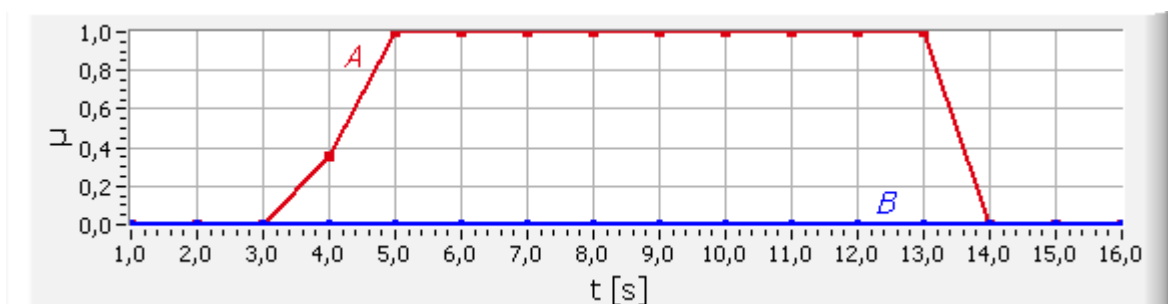


**Bild 5-22:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen  $rs_{aMaxf300}$

Linguistische Variable	Sets	Bemerkung
$Resonanz$	$A$	lose Wellenteile A-Seite
	$B$	lose Wellenteile B-Seite

**Tabelle 5-3:** Linguistische Ausgangsvariable und deren Sets zur Diagnose loser Wellenteile

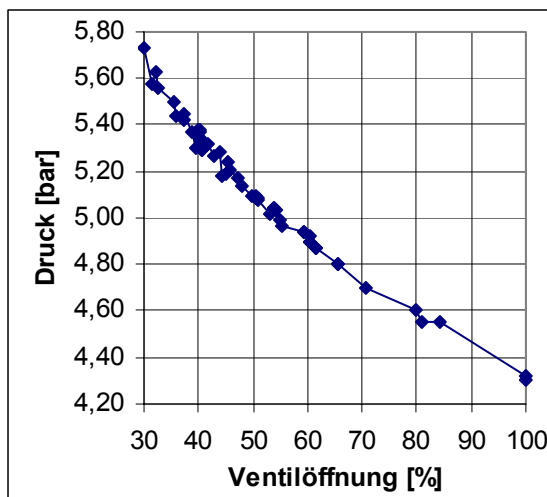
Der Verlauf der Erfüllungsgrade der Sets für die Diagnose von Resonanzen beim kurzzeitigen Auftreten und Abklingen der Schwingung, verursacht durch eine lose Wellenmutter auf der A-Seite der Welle zeigt Bild 5-23. Die Resonanz auf der A-Seite wird mit einem Erfüllungsgrad von 1 erkannt, für die B-Seite wird keine Resonanz diagnostiziert.



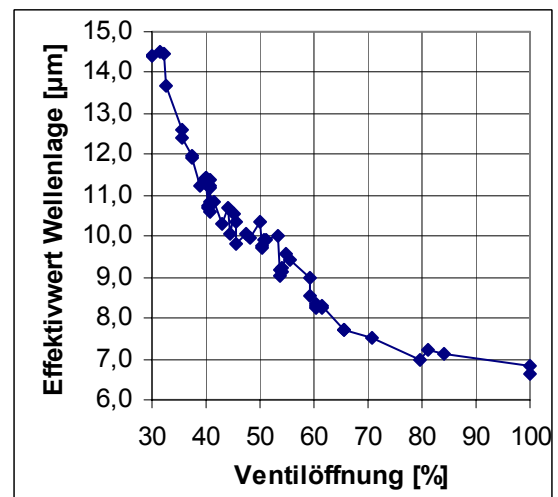
**Bild 5-23:** Diagnose  $Resonanz$  bei Resonanz auf der A-Seite

### 5.2.4.3 Diagnose von Druckschwankungen im Prozess

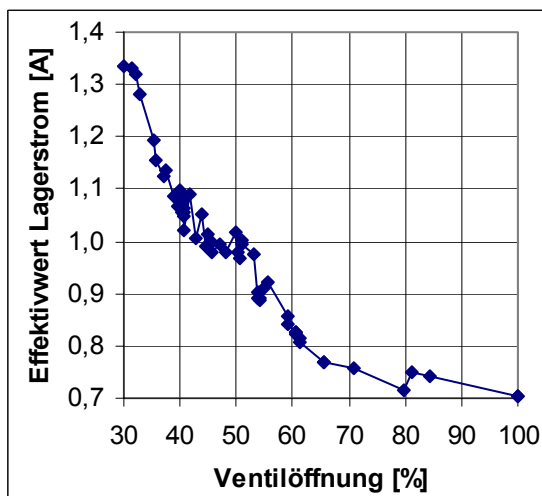
Die erfassten axialen Strom- und Wellenlagesignale bieten die Möglichkeit, Belastungsänderungen durch Druckschwankungen im Prozess zu erkennen. Bild 5-24 zeigt die Abhängigkeit des Druckes hinter der Pumpe vom Öffnungsgrad des Regelventils des Gaskühlers  $gRVH2$  im einstellbaren Bereich 30 % – 100 %. Mit steigendem Öffnungsgrad verringert sich der Druck nahezu linear von 5,7 bar auf 4,3 bar. Die Auswirkungen auf die Effektivwerte der axialen Wellenlage und des axialen Lagerstromes sind in den Bildern 5-25 und 5-26 dargestellt. Die Effektivwerte sinken mit den Druckwerten im Stellbereich des Ventils. Bei Ventilöffnungen um 82 % entstehen, offenbar durch Turbulenzen des Mediums, leicht erhöhte Werte, danach sinken sie wieder ab.



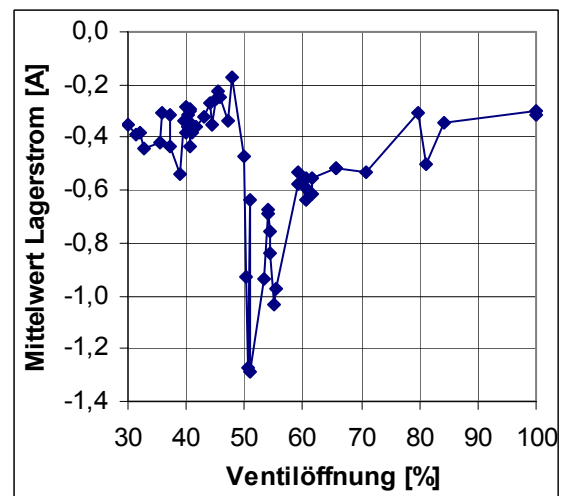
**Bild 5-24:** Druck  $p_{PPI}$  in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad  $gRVH2$



**Bild 5-25:** Axiale Wellenlageeffektivwerte in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad  $gRVH2$



**Bild 5-26:** Axiale Lagerstromeffektivwerte in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad  $gRVH2$



**Bild 5-27:** Axiale Lagerstrommittelwerte in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad  $gRVH2$

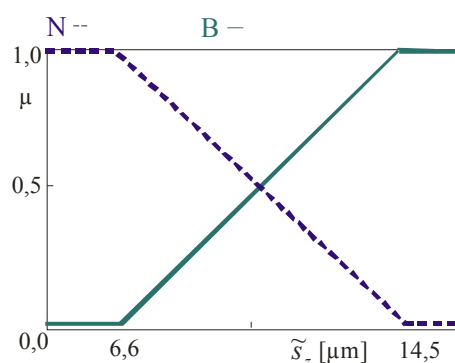
In den Mittelwerten der Lagerströme (Bild 5-27) bewirkt das Schließen des Ventils im Bereich 100 % bis 55 % und die damit verbundene Druckerhöhung ein Ansteigen des Betrages des Stromes. Damit erhöht sich die aufgebrachte axiale Lagerkraft. Bei Ventilöffnungen um 82 % tritt auch hier ein Sprung auf. Bei Öffnungsgraden unter 55 % ist keine eindeutige Tendenz erkennbar.

Anhand der gewonnenen Messdaten lassen sich Ventilöffnungen im Bereich 30 % - 100 % bzw. Druckwerte im Bereich 4,3 bar - 5,7 bar aus den axialen Wellenlage- und Stromeffektivwerten berechnen. Änderungen der Ventilstellung sind ab ca. 10 %, Druckänderungen ab ca. 0,1 bar deutlich erkennbar.

Für die Bildung einer Diagnoseaussage werden die Effektivwerte der axialen Wellenlage als linguistische Variable  $\tilde{s}_z$  mit den Sets  $N$  und  $B$  (Bild 5-28) definiert und diese mit der Negation des booleschen Grenzwertflags  $gw_{n<}$  zur Einzelregel

$$\text{WENN } \tilde{s}_z = B \text{ UND NOT}(gw_{n<}) \text{ DANN } \textit{Druckanstieg} = P$$

verknüpft. Die Einbeziehung des Grenzwertflags  $gw_{n<}$  ist notwendig, um eine Diagnose beim Hoch- bzw. Auslauf und den damit verbundenen Druckschwankungen auszublenden. Der Zugehörigkeitswert des Sets  $P$  der linguistischen Variable *Druckanstieg* gibt direkt die Druckänderung normiert auf den Bereich [0,1] an. Der Referenzzustand ist das voll geöffnete Regelventil.



**Bild 5-28:** Fuzzy-Sets der linguistischen Variable  $\tilde{s}_z$

Beim Feuern der Diagnose mit einem Schwellwert von  $\mu > 0,1$  werden der Druckwert  $p_{PPHI}$  anhand der durch lineare Regression ermittelten Gleichung (5-2) und der Ventilöffnungsgrad  $g_{RVH2}$  mit Gleichung (5-3) berechnet.

$$p_{PPHI} = 0,154 \frac{\text{bar}}{\mu\text{m}} \cdot \tilde{s}_z + 3,567 \text{ bar} \quad (5-2)$$

$p_{PPHI}$             Druck auf der Druckseite [bar]  
 $\tilde{s}_z$                 axialer Wellenlageeffektivwert [ $\mu\text{m}$ ]

$$g_{RVH2} = -7,41 \frac{\%}{\mu\text{m}} \cdot \tilde{s}_z + 125,66 \% \quad (5-3)$$

$g_{RVH2}$             Ventilöffnungsgrad [%]  
 $\tilde{s}_z$                 axialer Wellenlageeffektivwert [ $\mu\text{m}$ ]

Mit der Druckberechnung nach Gleichung (5-2) ergibt sich bei den aufgenommenen Messdaten ein maximaler relativer Fehler (bezogen auf den maximalen Druckwert) von 5,3 % über den gesamten Stellbereich, bei Eingrenzen auf den Hauptstellbereich des Regelventils (33 - 80 %) verringert sich der relative Fehler auf 2,6 %.

Der relative Fehler bei der Berechnung des Ventilöffnungsgrades nach Gleichung (5-3) über den gesamten Stellbereich beträgt 24,7 %, im Hauptstellbereich 8,8 %. Der Fehler ist durch Einsatz anderer Regressionsverfahren minimierbar. Bei Regression mit einem Polynom 2. Ordnung

$$g_{RVH2} = 1,1566 \frac{\%}{\mu\text{m}^2} \cdot \tilde{s}_z^2 - 31,44 \frac{\%}{\mu\text{m}} \cdot \tilde{s}_z + 245,46 \% \quad (5-4)$$

verringert sich der relative Fehler auf 14,4 % (gesamter Stellbereich) bzw. 7,3 % (Hauptstellbereich).

## 6 Zusammenfassung

Aktiv magnetgelagerte Systeme liefern funktionsbedingt Informationen, welche direkt für die Diagnose nutzbar sind. In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept entwickelt, das durch Verwendung dieser systeminhärenten Signale eine Diagnose magnetgelagerter rotierender Maschinen ermöglicht und somit neben einer kontinuierlichen Anlagenüberwachung eine schnelle Bewertung des Anlagenzustandes gestattet. Störungen können rechtzeitig und ursächlich in Art und Größe erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Zum Einsatz kommen dabei moderne Methoden und Verfahren der Prozess- und Parameteridentifikation und der Plausibilitätsanalyse.

Anhand der erfassten Signale geschieht die Gewinnung von Merkmalen mit signal- und modellgestützten Verfahren. Mathematische Modelle sind als analytische Redundanz eine wichtige Komponente moderner Diagnosesysteme. Für den Magnetlagerregelkreis erfolgen Untersuchungen zum Einsatz modellgestützter Parameteridentifikationsverfahren, deren Verwendbarkeit wird bei der Diagnose am Regler und Leistungsverstärker nachgewiesen.

Unter Nutzung von Simulationsmodellen und durch Experimente an Versuchsständen werden die Merkmalsverläufe im normalen Referenzzustand und bei auftretenden Fehlern aufgenommen und die Ergebnisse in einer Wissensbasis abgelegt. Diese dient als Grundlage bei der Festlegung von Grenzwerten, Trends und Regeln für die Überwachung des Systems und bei der Erstellung wissensbasierter Diagnosemodelle.

Bei der Überwachung findet anhand der aktuellen Merkmalsausprägungen die Bildung von Informationen über erkannte Fehler und Betriebszustände und gegebenenfalls das Auslösen von Alarmmeldungen statt.

Über die bisher bei aktiven Magnetlagern übliche Überwachung von Grenzwerten hinaus erfolgt bei der Fehlerdiagnose eine Verknüpfung der extrahierten Merkmale zur Identifizierung und Lokalisierung auftretender Fehler.

Um eine höhere Güte der Widerspiegelung des realen Prozesses zu erreichen sind über die klassischen deterministischen Modellformen hinaus wissensbasierte Modellelemente implementiert. Die Diagnose geschieht mittels regelbasierter Fuzzy-Logik, dies gestattet die Einbeziehung von Unbestimmtheiten und linguistischen Aussagen in Form von Expertenwissen und



ermöglicht damit eine Diagnose komplexer Systeme, insbesondere zur Erkennung ursächlicher Zusammenhänge.

Für Aktor-, Sensor- und Reglerfehler im Magnetlagerregelkreis sowie Fehler durch externe Kräfte und Unwuchten werden Diagnosemodelle erstellt und verifiziert sowie nachgewiesen, dass das entwickelte regelbasierte Diagnosekonzept mit beherrschbarem Rechenaufwand korrekte Diagnoseaussagen liefert. Durch Kaskadierung von Fuzzy-Logik-Modulen wird die Transparenz des Regelwerks gewahrt und die Abarbeitung der Regeln optimiert. Damit ist auch die echtzeitfähige Abarbeitung der Diagnosealgorithmen gewährleistet.

Endresultat ist ein neuartiges hybrides Diagnosekonzept, welches signal- und modellgestützte Verfahren der Merkmalsgewinnung mit wissensbasierten Methoden der Fehlerdiagnose kombiniert.

Das entwickelte Diagnosekonzept ist für die Anpassung an unterschiedliche Anforderungen und Anwendungen bei rotierenden Maschinen konzipiert. Je nach Anforderungsfall kann eine Adaption bzw. Erweiterung durch Ausbau der Wissensbasis und Modifikation des Regelwerks erfolgen. Dabei ist nach folgenden Arbeitsschritten vorzugehen:

- Analyse der verfügbaren Signale,
- Festlegung der zu gewinnenden Merkmale,
- Erstellung von Simulationsmodellen,
- Aufbau einer Wissensbasis über Merkmalsverläufe bei definierten Fehlern durch Simulationsrechnungen am Modell und Experimenten am realen Prozess,
- Definition der Grenzwerte für die Überwachung anhand der Wissensbasis,
- Erstellung bzw. Modifikation des Regelwerks und der Fuzzy-Sets anhand der Wissensbasis,
- Praxistest mit Aufzeichnung der Merkmalsverläufe bei Normalbetrieb und Störungen,
- Optimierung und Verifikation der Diagnosemodelle sowie Einbau neuer Regeln auf der Basis der aufgetretenen Fehler.

Für die technische Realisierung wurde das Diagnosesystem MLDia entwickelt und an realen Prozessen getestet und optimiert, der Einsatz im Kraftwerk Boxberg liefert den Nachweis der Tauglichkeit des Systems und des Diagnosekonzeptes. MLDia arbeitet auf der Basis eines Windows-PC mit interner Messwerterfassung. Dadurch wird eine Trennung zwischen Prozess und Diagnose realisiert, Eingriffe in das Diagnosesystem beeinflussen den Betrieb der Maschine nicht. Nächster Schritt wäre die Implementierung der Diagnoseroutinen in die übli-

cherweise für die Regelung genutzten digitalen Signalprozessoren (DSP), welche auch die Digitalisierung der Signale vornehmen. Dadurch lässt sich die Messwerterfassungshardware einsparen, eine komplexe, integrierte Bauweise ist möglich. Beim gegenwärtigen Stand der Technik würde allerdings die Rechenleistung einer DSP nicht für die gleichzeitige Abarbeitung der Regel- und Diagnosealgorithmen ausreichen. Ein Ausweg bietet sich, indem die digitalen Regler die Erfassung der Messwerte und eventuell die Berechnung der Merkmale übernehmen und diese an eine übergeordnete Diagnose-DSP übertragen.

Als zukünftige Erweiterung für das Diagnosekonzept ist der Einsatz von Künstlichen Neuronalen Netzen geplant. Für deren Training sind die aufgenommenen Datensätze, welche das typische Verhalten der Maschine bei verschiedenen Störungen beschreiben, nutzbar.

Die Ergebnisse der Arbeit unterstützen den Einsatz wissensbasierter Diagnosesysteme und magnetgelagerter Maschinen in sicherheitsrelevanten Systemen. Sie leisten einen Beitrag zur:

- Erhöhung der Anlagensicherheit,
- Minimierung der Ausfallwahrscheinlichkeiten,
- Unterstützung des sicheren Abfahrens der Anlage bei Störfällen,
- Unterstützung von automatischen Notfallabläufen.

Der Einsatz magnetgelagerter Maschinen in Verbindung mit leistungsfähigen Diagnosealgorithmen stellt somit einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit in Kernkraftwerken dar.

## Darstellungsverzeichnis

<b>Bild 1-1:</b> Grundprinzip der technischen Diagnose	3
<b>Bild 2-1:</b> Prinzip der aktiven Magnetlagerung eines vertikalen Rotors	11
<b>Bild 2-2:</b> Wellenschwingung $s_{ay}=f(t)$	16
<b>Bild 2-3:</b> Wellenschwingung $s_{ax}=f(t)$	16
<b>Bild 2-4:</b> Wellenmittelpunktbahn (Orbit) $s_{ay}$ über $s_{ax}$	16
<b>Bild 2-5:</b> Wellenausschlag $rs_a=f(t)$	16
<b>Bild 2-6:</b> Phasenwinkel $\varphi s_a=f(t)$	16
<b>Bild 2-7:</b> Bildung des Ausgangsfehlers	21
<b>Bild 2-8:</b> Bildung des Gleichungsfehlers	21
<b>Bild 2-9:</b> Koppelplan des MLDyn-Moduls "Stoer_r" (statische Radialkraft)	24
<b>Bild 2-10:</b> Koppelplan des MLDyn-Moduls "Stoer_uw" (Unwucht)	24
<b>Bild 2-11:</b> Effektivwerte der Wellenschwingung $\tilde{s}_{ax}$ bei Variation $K_R$	25
<b>Bild 2-12:</b> Effektivwerte der Wellenschwingung $\tilde{s}_{ax}$ bei Variation $I_G$	25
<b>Bild 2-13:</b> Signalfluss im Magnetlagerregelkreis	26
<b>Bild 2-14:</b> Verlauf der berechneten Modellparameter PID-Regler	29
<b>Bild 2-15:</b> Verlauf der berechneten Prozessparameter PID-Regler	29
<b>Bild 2-16:</b> Verlauf der berechneten Modell-parameter für das Stellglied	30
<b>Bild 2-17:</b> Verlauf der berechneten Prozess-parameter für das Stellglied	30
<b>Bild 2-18:</b> Wellenlage $s_{bx}$ bei Sensor-Offset	31
<b>Bild 2-19:</b> Stellstrom $i_{-bx}$ bei Sensor-Offset	31
<b>Bild 2-20:</b> Wellenlage $s_{bx}$ bei Veränderung von $I_{Gbx}$	32
<b>Bild 2-21:</b> Stellstrom $i_{+bx}$ bei Veränderung von $I_{Gbx}$	32
<b>Bild 2-22:</b> Wellenorbit $s_{by}$ über $s_{bx}$	33
<b>Bild 2-23:</b> Stellstrom $i_{Sby}$ über $i_{Sbx}$	33
<b>Bild 2-24:</b> Amplitudenspektrum des Lagerstromes $i_{+ax}$	35
<b>Bild 2-25:</b> Effektivwert Wellenlage $\tilde{s}_{bx}=f(n)$	36
<b>Bild 2-26:</b> Effektivwert Reglerausgangssignal $\tilde{u}_{bx}=f(n)$	36
<b>Bild 2-27:</b> Spektrum der kinetischen Frequenzen der Wellenschwingung $\tilde{s}_{bx}=f(n)$	37
<b>Bild 2-28:</b> Spektrum der kinetischen Frequenzen des Wellenausschlags $\tilde{r}s_{bx}=f(n)$	37
<b>Bild 2-29:</b> Wellenorbit $s_{ay}$ über $s_{ax}$ bei $780 \text{ min}^{-1}$ , Antrieb aus	38

<b>Bild 2-30:</b> Amplitudenspektrum der Wellenlage $s_{ax}$ bei $780 \text{ min}^{-1}$ ( $13 \text{ s}^{-1}$ ), Antrieb aus	38
<b>Bild 2-31:</b> Wellenorbit $s_{ay}$ über $s_{ax}$ bei $780 \text{ min}^{-1}$ , Antrieb ein	38
<b>Bild 2-32:</b> Amplitudenspektrum der Wellenlage $s_a$ bei $780 \text{ min}^{-1}$ ( $13 \text{ s}^{-1}$ ), Antrieb ein	38
<b>Bild 2-33:</b> Lagerkraft $F_{byMax} = f(n)$ bei ein- und ausgeschaltetem Antrieb	39
<b>Bild 2-34:</b> Lagerkraft $F_{ayMax} = f(n)$ bei ein- und ausgeschaltetem Antrieb	39
<b>Bild 2-35:</b> Wellenorbits bei $780 \text{ min}^{-1}$ , Welle im Fanglager, Motor ein	39
<b>Bild 2-36:</b> Wellenorbits bei $780 \text{ min}^{-1}$ , Welle im Fanglager, Motor aus	39
<b>Bild 2-37:</b> Spektrum der Wellenlage $s_{bx}$ bei $780 \text{ min}^{-1}$ , Welle im Fanglager, Motor aus	39
<b>Bild 2-38:</b> Wellenorbits beim Anstreifen Fanglager	39
<b>Bild 2-39:</b> Wellenschwingung $s_{by}$ bei statischer Radialkraft (530 N), $n = 600 \text{ min}^{-1}$	40
<b>Bild 2-40:</b> Lagerströme $i_{+by}$ und $i_{-by}$ bei statischer Radialkraft (530 N), $n = 600 \text{ min}^{-1}$	40
<b>Bild 2-41:</b> Zuschaltung der Magnetlager am FLP 500, Verlauf der Wellenlagen	41
<b>Bild 2-42:</b> Zuschaltung der Magnetlager am FLP 500, Verlauf der Lagerströme	41
<b>Bild 4-1:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\tilde{s}$	54
<b>Bild 4-2:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $FX$	54
<b>Bild 4-3:</b> Kennfeld der Diagnoseaussage $FA2 = M$	56
<b>Bild 4-4:</b> Kennfeld der Diagnoseaussage $FA2 = P$	56
<b>Bild 4-5:</b> Kennfeld der Diagnoseaussage $FA2 = N$ , berechnet mit Regelbasis (Tabelle 4-3)	57
<b>Bild 4-6:</b> Kennfeld der Diagnoseaussage $FA2 = N$ , berechnet mit Gleichung (4-4)	57
<b>Bild 4-7:</b> Offset Stellsignal + 0,06 A	59
<b>Bild 4-8:</b> Offset Stellsignal + 0,12 A	59
<b>Bild 4-9:</b> Offset Stellsignal + 0,15 A	59
<b>Bild 4-10:</b> Offset Stellsignal + 5,00 A	59
<b>Bild 4-11:</b> Offset Grunderregung - 0,6 A	60
<b>Bild 4-12:</b> Offset des positiven Lager-stromes + 1,5 A	60
<b>Bild 4-13:</b> Offset des negativen Lager-stromes + 1,5 A	60
<b>Bild 4-14:</b> Verstärkung Stellsignal - 20 %	60
<b>Bild 4-15:</b> Offset Sensorsignal + 30 $\mu\text{m}$	60
<b>Bild 4-16:</b> Verstärkung Sensor - 50 %	60
<b>Bild 4-17:</b> Verstärkung Regler - 40 %	61
<b>Bild 4-18:</b> Sollwert Regler + 25 $\mu\text{m}$	61
<b>Bild 4-19:</b> Verlauf der Erfüllungsgrade beim Fehler "Offset Lagerstrom" ohne Filterung	62
<b>Bild 4-20:</b> Verlauf der Erfüllungsgrade beim Fehler "Offset Lagerstrom" mit Filterung	62
<b>Bild 4-21:</b> Struktur eines Fuzzy-Logik-Moduls	63

<b>Bild 4-22:</b> Merkmale beim Wirken einer statischen Radialkraft	64
<b>Bild 4-23:</b> Kaskadierung der Fuzzy-Logik-Module zur Diagnose <i>Radialkraft</i>	64
<b>Bild 4-24:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\overline{rF}_a$	66
<b>Bild 4-25:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\varphi_{const\_a}^F$	66
<b>Bild 4-26:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $Frad\_a$	66
<b>Bild 4-27:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\Delta\varphi$	66
<b>Bild 4-28:</b> Maßangaben zur Kraftberechnung	68
<b>Bild 4-29:</b> Kaskadierung von Fuzzy-Logik-Modulen zur Diagnose <i>Unwucht</i>	70
<b>Bild 4-30:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\tilde{F}_{ax}$	71
<b>Bild 4-31:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\gamma_{const\_a}^F$	71
<b>Bild 4-32:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $Unw_a$	72
<b>Bild 4-33:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\Delta\gamma$	72
<b>Bild 4-34:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> bei radialer Störkraft im Lager A	74
<b>Bild 4-35:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> bei radialer Störkraft im Lager B	74
<b>Bild 4-36:</b> Diagnose <i>Unwucht</i> bei radialer Störkraft im Lager A	75
<b>Bild 4-37:</b> Diagnose <i>Unwucht</i> bei radialer Störkraft mit Residuenberechnung	75
<b>Bild 4-38:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen	75
<b>Bild 4-39:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen	75
<b>Bild 4-40:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen	76
<b>Bild 4-41:</b> Diagnose <i>Unwucht</i> bei radialer Störkraft außerhalb der Lagerebenen	76
<b>Bild 4-42:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> bei radialer Störkraft zwischen den Lagerebenen	77
<b>Bild 4-43:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> bei radialer Störkraft zwischen den Lagerebenen	77
<b>Bild 4-44:</b> Diagnose <i>Radialkraft</i> am FLP 500 bei radialer Störkraft am unteren Wellenende	77
<b>Bild 4-45:</b> Diagnose der Unwucht im Lager A ohne Residuenberechnung	78
<b>Bild 4-46:</b> Diagnose der Unwucht im Lager A mit Residuenberechnung	78
<b>Bild 4-47:</b> Diagnose der Unwucht im Lager B ohne Residuenberechnung	78
<b>Bild 4-48:</b> Diagnose der Unwucht im Lager B mit Residuenberechnung	78
<b>Bild 4-49:</b> Diagnose der Unwucht oberhalb Lager A mit Residuenberechnung	79
<b>Bild 4-50:</b> Diagnose der Unwucht unterhalb Lager B mit Residuenberechnung	79
<b>Bild 4-51:</b> Diagnose der Unwucht zwischen den Lagerebenen mit Residuenberechnung	79
<b>Bild 4-52:</b> Diagnose der Unwucht am FLP 500	79
<b>Bild 4-53:</b> Diagnoseergebnis für den Magnetlagerkreis bei Unwucht ohne Optimierung	81
<b>Bild 4-54:</b> Diagnoseergebnis für den Magnetlagerkreis bei Unwucht mit Optimierung	81

<b>Bild 4-55:</b> Kennfeld bei UND-Verknüpfung	83
<b>Bild 4-56:</b> Kennfeld bei ODER-Verknüpfung	83
<b>Bild 4-57:</b> Kennfeld mit Verstärkungsoperator, $\nu = 0,5$	83
<b>Bild 4-58:</b> Kennfeld mit Verstärkungsoperator, $\nu = 1$	83
<b>Bild 5-1:</b> Display des Diagnosesystems MLDia	88
<b>Bild 5-2:</b> Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Einschaltvorgang	92
<b>Bild 5-3:</b> Spektren der Wellenlagen bei ausgeschalteten Magnetlagern	93
<b>Bild 5-4:</b> Spektren der Wellenlagen und Lagerströme beim Schweben der Welle	93
<b>Bild 5-5:</b> Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Anfahrvorgang	94
<b>Bild 5-6:</b> Spektren von Wellenlagen und Lagerströmen beim Anfahrvorgang	95
<b>Bild 5-7:</b> Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Anfahren gegen Schieber	95
<b>Bild 5-8:</b> Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen beim Abschaltvorgang	96
<b>Bild 5-9:</b> Orbits der Wellenlagen und Lagerströme, ca. 2 h nach dem Zuschalten	96
<b>Bild 5-10:</b> Verlauf von Wellenlagen und Lagerströmen, ca. 2 h nach dem Zuschalten	97
<b>Bild 5-11:</b> Spektren der Wellenlagen und Lagerströme, ca. 2 h nach dem Zuschalten	97
<b>Bild 5-12:</b> Merkmalsverläufe bei Druckänderungen an der Pumpe	99
<b>Bild 5-13:</b> Wellenlagen und Lagerströme beim Auftreten von Resonanzen auf der A-Seite	100
<b>Bild 5-14:</b> Wellenlagen und Lagerströme beim Auftreten von Resonanzen auf der A-Seite	100
<b>Bild 5-15:</b> Verlauf der Wellenlagesignale bei einer Drehrichtungsumkehr der Welle	103
<b>Bild 5-16:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $\Delta\alpha$	104
<b>Bild 5-17:</b> Diagnose <i>Drehrichtung</i> bei Pumpenabschaltung mit Drehrichtungsumkehr	104
<b>Bild 5-18:</b> Spektrum A-Seite ohne Störung	105
<b>Bild 5-19:</b> Spektrum B-Seite ohne Störung	105
<b>Bild 5-20:</b> Spektrum A-Seite bei loser Wellenmutter auf der A-Seite	105
<b>Bild 5-21:</b> Spektrum B-Seite bei loser Wellenmutter auf der A-Seite	105
<b>Bild 5-22:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variablen $rS_{aMax300}$	106
<b>Bild 5-23:</b> Diagnose <i>Resonanz</i> bei Resonanz auf der A-Seite	106
<b>Bild 5-24:</b> Druck $p_{PPHI}$ in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad $g_{RVH2}$	107
<b>Bild 5-25:</b> Axiale Wellenlageeffektivwerte in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad	107
<b>Bild 5-26:</b> Axiale Lagerstromeffektivwerte in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad	107
<b>Bild 5-27:</b> Axiale Lagerstrommittelwerte in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad	107
<b>Bild 5-28:</b> Fuzzy-Sets der linguistischen Variable $\tilde{s}_z$	108

<b>Tabelle 2-1:</b> Abhängigkeit der Qualität der Parameteridentifikation am PID-Regler	28
<b>Tabelle 2-2:</b> Abhängigkeit der Parameterschätzung am Stellglied	29
<b>Tabelle 2-3:</b> Charakteristische Merkmale bei Sensor-Offset	31
<b>Tabelle 2-4:</b> Charakteristische Merkmale bei Veränderung des Grunderregerstromes	31
<b>Tabelle 2-5:</b> Störsignalanteile bei der Messwerterfassung	35
<b>Tabelle 2-6:</b> Charakteristische Merkmale beim Wirken von statischen Radialkräften	39
<b>Tabelle 3-1:</b> Merkmale und Grenzwertflags für den statischen Bereichstest	43
<b>Tabelle 3-2:</b> Merkmale und Grenzwertflags für den dynamischen Bereichstest	43
<b>Tabelle 3-3:</b> Merkmale und Grenzwertflags für Fanglagerschäden	48
<b>Tabelle 4-1:</b> Vergleich von Klassifikationsverfahren	50
<b>Tabelle 4-2:</b> Merkmalsausprägungen bei ausgewählten Fehlern	52
<b>Tabelle 4-3:</b> Regelmatrix für den Fehler FA2	54
<b>Tabelle 4-4:</b> Notwendige Abweichungen vom Referenzwert	59
<b>Tabelle 4-5:</b> Linguistische Variablen zur Diagnose „Statische Radialkraft“	63
<b>Tabelle 4-6:</b> Regelbasis des Fuzzy-Logik-Moduls FLM 1	64
<b>Tabelle 4-7:</b> Regelbasis des Fuzzy-Logik-Moduls FLM 3	65
<b>Tabelle 4-8:</b> Regelbasis für das Fuzzy-Logik-Modul FLM 4	68
<b>Tabelle 4-9:</b> Regelbasis für das Fuzzy-Logik-Modul FLM 6	69
<b>Tabelle 4-10:</b> Linguistische Variablen zur Diagnose „Unwucht“	70
<b>Tabelle 5-1:</b> Festlegung der Grenzwerte für die magnetgelagerte Pumpe	95
<b>Tabelle 5-2:</b> Linguistische Ausgangsvariable und Sets zur Diagnose der Drehrichtung	98
<b>Tabelle 5-3:</b> Linguistische Ausgangsvariable und Sets zur Diagnose loser Wellenteile	100

## Literaturverzeichnis

- [AEN00] Aenis, M.; Nordmann, R.: Active Magnetic Bearings for Fault Detection in a centrifugal pump. 7th International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, 2000
- [AUT87] Autorenkollektiv: Technisches Handbuch Pumpen. Verlag Technik, Berlin, 1987
- [AUT89] Autorenkollektiv: Kreiselpumpen Lexikon. KSB AG, 1989
- [AXO99] Firmenschrift AXOMAT GmbH Berggießhübel, 1999
- [BAR97] Baral, A.: Entwicklung, Zustandsidentifikation und Regelung eines magnetisch gelagerten Hochgeschwindigkeitsantriebes. Fortschritts-Ber. VDI Reihe 8, Nr 649, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [BAN93] Bandemer, H.; Gottwald, S.: Einführung in Fuzzy-Methoden: Theorie und Anwendungen unscharfer Mengen. 4. Aufl., Akademie Verlag, Berlin, 1993
- [BAU95] Bau, D.Q.; Fittro, R.L.; Maslen, E.H.: Force versus Current Air Gap Calibration of a Double Acting Magnetic Thrust Bearing. Proceedings MAG'95 Industrial Conference and Exhibition on Magnetic Bearing, 1995
- [BER98] Berger, J.: Technische Mechanik für Ingenieure Band 3: Dynamik. Verlag Vieweg, 1998
- [BFS99] Meldepflichtige Ereignisse in Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland, Atomkraftwerke und Forschungsreaktoren, deren Höchstleistung 50 kW thermische Dauerleistung überschreitet. Jahresberichte des BfS 1995-1999
- [BOC92] Bocklisch, S. F.; Bonfig, K. W.: Fuzzy-Logik in der industriellen Automatisierung. expert-Verlag, 1992
- [BOC98] Bocklisch, S. F.; Sehm J.-O.: Monitoring based on Fuzzy Pattern Classification. INFO 09/98, TU Chemnitz, 1998
- [BOH88] Bohl, W.: Strömungsmaschinen 2. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1988
- [BRU97] Brunet, M.: Actual Experiences of Magnetic Bearing for Compressors and their Drives. Proceedings MAG'97 Industrial Conference and Exhibition on Magnetic Bearing Alexandria, VA, 1997



- [BÜT91] Büttner, W.: Digitale Regelungssysteme. Vieweg Verlag, 1991
- [CEM90] Cempel, C.: Vibroakustische Maschinendiagnostik. Verlag Technik, Berlin 1990
- [CHA95] Chaker, N.: Ein Beitrag zur Strukturanalyse und Optimierung von Fuzzy-Controllern am Beispiel einer Turbinenregelung. Dissertation, TH Zittau, 1995
- [DIN98] Ding, X.; Jeinsch, T.; Guo, L.: Empfindlichkeitsanalyse und Optimierung der beobachtergestützten Fehlerdiagnosesysteme. Automatisierungstechnik Nr. 7, 1998
- [ELL91] Ellmer, Gerd.: Anwendung des Kurzzeiteffektivwertes der Schallemission bei der Gleitlagerdiagnose. Dissertation, Hochschule Zittau, 1991
- [ENG91] Engel, J.; Glass, D.: Stand der Magnetlagertechnik im Hinblick auf möglichen Einsatz in der Kraftwerkstechnik. VGB Kraftwerkstechnik, Mannheim 71/7, 1991
- [FOE90] Foellinger, O.: Regelungstechnik. Hüthig Buch Verlag, 1990
- [FRA94] Franck, P.-M.; Seliger, R.: Anwendung analytischer Redundanz zur Fehlerfrüherkennung in Kernkraftwerken. Abschlußbericht BMFT-Projekt 150 0715 A7, 1994
- [FRA96] Franck, P.-M.: Fuzzy-Supervision - Einsatz der Fuzzy-Logik in der Prozeßüberwachung. Proceedings 11. Chemnitzer Kolloquium: Diagnostizieren mit Fuzzy-Methoden, 1996
- [FRE93] Freyermuth, B.: Wissensbasierte Fehlerdiagnose am Beispiel eines Industrieroboters. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8 Nr. 315, VDI-Verlag, 1993
- [GAE98-1] Gärtner, S.; Hampel, R.: Überwachung und Diagnose von aktiven Magnetlagern für rotierende Maschinen. 3. Tagung Technische Diagnostik, Merseburg, 1998
- [GAE98-2] Gärtner, S.: Einsatz wissensbasierter Informationssysteme für die Diagnose und Überwachung von aktiven Magnetlagern in sicherheitsrelevanten Systemen. Arbeitsbericht zum Workshop „Kompetenzerhaltung Kerntechnik“, Jahrestagung Kerntechnik München, 1998
- [GAE99] Gärtner, S.; Hampel, R.: Diagnose von aktiven Magnetlagern für rotierende Maschinen. Proceedings 4. Workshop Magnetlagertechnik, Kassel-Zittau, 1999
- [GAE00-1] Gärtner, S.; Hampel, R.: Diagnose von aktiven Magnetlagern für rotierende Maschinen. 4. Tagung Technische Diagnostik, Merseburg, 2000

- [GAE00-2] Gärtner, S.: Einsatz wissensbasierter Informationssysteme für die Diagnose und Überwachung von aktiven Magnetlagern in sicherheitsrelevanten Systemen. Arbeitsbericht zum Workshop „Kompetenzerhaltung Kerntechnik“, Jahrestagung Kerntechnik Bonn, 2000
- [GAE00-3] Gärtner, S.: Einsatz wissensbasierter Informationssysteme für die Diagnose und Überwachung von aktiven Magnetlagern in sicherheitsrelevanten Systemen. atomwirtschaft - atomtechnik (atw) 12, Dezember 2000, inforum Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH, Bonn, 2000
- [GAE01-1] Gärtner, S.: Einsatz wissensbasierter Informationssysteme für die Diagnose und Überwachung von aktiven Magnetlagern in sicherheitsrelevanten Systemen. Arbeitsbericht zum Workshop „Kompetenzerhaltung Kerntechnik“, Jahrestagung Kerntechnik, Dresden, 2001
- [GAE01-2] Gärtner, S.; Hampel, R.: Application of fuzzy logic for the diagnosis of active magnetic bearings. Proceedings 9<sup>th</sup> Zittau Fuzzy Colloquium, Zittau, 2001
- [GAE01-3] Gärtner, S.; Hampel, R.: Application of knowledge-based information systems for the monitoring and diagnosis of active magnetic bearings. Proceedings 6th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Turin, 2001
- [GAE03] Gärtner, S.; Stegemann, H.; Worlitz, F.: Untersuchungen zur Überwachung und Diagnose von aktiv magnetgelagerten rotierenden Maschinen. Proceedings 6. Workshop Mechatronische Systeme Kassel/Zittau, 2003
- [GAE05-1] Gärtner, S.; Worlitz, F.: Monitoring and diagnosis of active magnetic bearings with the diagnosis system MLDia. Proceedings 8th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Dresden, 2005
- [GAE05-2] Gärtner, S.; Worlitz, F.: Überwachung und Diagnose von aktiven Magnetlagern mit dem Diagnosesystem MLDia. Proceedings 7. Workshop Mechatronische Systeme Kassel/Zittau, 2005
- [GOS00] Gosiewski, Z.; Paszowski, M.: Diagnostics of Magnetic Bearings via Identification of its physical parameters. Proceedings 7th International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, 2000
- [GRA88] Gray, S. T.: Applications for Magnetic Bearings on Electrical Generating Plant Equipment. EPRI-Studie - Final Report, Palo Alto, 1988

- [HAM93] Hampel, R.; Kästner, W.: Messtechnik: Messwertverarbeitung. Fernstudienkurse. Fachbereich Elektro- und Energietechnik der Hochschule Zittau/Görlitz, 1993
- [HAM97] Hampel, R. et al.: Anwendung aktiver Magnetlager für sicherheitsrelevante Antriebe. Forschungsvorhaben BMBF 15 NU 954 – Abschlußbericht IPM 62207/97/1
- [HAM99] Hampel, R.: Meß- und Automatisierungstechnik zur Störfallbeherrschung – Methoden der Signalverarbeitung, Simulation und Verifikation. Abschlussbericht zum BMBF-Projekt 150 10 15, HTWS Zittau/Görlitz (FH), 1999
- [HAM00] Hampel, R; Wagenknecht, M.; Chaker, N.: Fuzzy Control - Theory and Practice. Physica-Verlag Heidelberg - New York, 2000
- [HAR87] Harmon, P.; King, D.: Expertensysteme in der Praxis. Oldenbourg Verlag, 1987
- [HOL89] Holzenberger, Kurt: Kreislumpenlexikon. Klein-Schanzlin-und-Becker-Aktiengesellschaft, Frankenthal, 1989
- [IPM99] IPM, Forschungsgruppe Magnetlager, Technische Dokumentation Magnetische Belastungseinrichtung – Unterlagen zur Auslegung, Berechnung, Konstruktion, Fertigung und Montage. Hochschule Zittau/Görlitz, 1996-1999
- [IPM06] <http://www.hs-zigr.de/ipm/fgms/index.html>, 2005
- [ISE92] Isermann, R.: Identifikation dynamischer Systeme. Band 1 und 2, Springer Verlag, 1992
- [ISE94] Isermann, R.: Überwachung und Fehlerdiagnose. VDI Verlag, 1994
- [ISE95] Isermann, R.: Zur Integration von Fehlererkennungs- und Diagnosemethoden. GMA-Bericht 24, 1995
- [KEI97] Keil, A.: DynStar - Ein Simulationsprogramm für Automatisierungstechniker. IPM Zittau, 1997
- [KIE97] Kiendl, H.: Fuzzy Control methodenorientiert. Oldenbourg Verlag München - Wien, 1997
- [KLE89] Kleinert, H.-J. (ed.): TB Maschinenbau Bd. 5: Kolbenmaschinen/ Strömungsmaschinen. Verlag Technik, Berlin, 1989
- [KLE99] Klein, U.: Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1999

- [KOL86] Kolerus, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen. expert-Verlag, 1986
- [MAL05] <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, 2005
- [MER90] Mertens, Peter: Expertensysteme in der Produktion. Oldenburg Verlag, München, 1990
- [MUE85] Müller, G.: Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen. Verlag Technik, Berlin, 1985
- [MUE96] Müller, H.: Einsatz eines Fuzzy-basierten Expertensystems zur Diagnose an Turbogeneratoren. Proceeding 11. Chemnitzer Kolloquium, 1996
- [MUE00] Müller, K.; Weingartner, W.: Process Monitoring for a Machine Tool Spindle with magnetic bearings. Proceedings 7<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, 2000
- [NIN05] <http://www.ni.com/labview/d/>, 2005
- [NOR97] Nordmann, R.; Matros, M.: A new model based method for the accurate measurement of magnetic bearing forces. Proceedings MAG'97, 1997
- [PFL91] Pfeleiderer, C.; Petermann, H.: Strömungsmaschinen. Springer-Verlag, Berlin, 1991
- [POH77] Pohlentz, W.: Grundlagen für Pumpen. Verlag Technik, Berlin, 1977
- [POH84] Pohlentz, W.: Pumpen für Flüssigkeiten. Verlag Technik, Berlin, 1984
- [PRO89] Prock, J.: Ein prozeßunabhängiges Konzept zur Meßfehlererkennung mit Hilfe analytischer Redundanzmethoden. Abschlußbericht, GRS-A-1620, 1989
- [PUP87] Puppe, F.: Diagnostisches Problemlösen mit Expertensystem. Springer-Verlag, Berlin 1987
- [PUP93] Puppe, F.; Günther, A.: Expertensysteme 93. Springer-Verlag, Berlin 1993
- [REU89] Reuter, K.; Keenan, B. A.: Cryogenic Turboexpanders with Magnetic Bearings. AIChE Symposium Series, Cryogenic Processes and Machinery, 1989
- [SCH90] Schwirzer: Messung und Beurteilung von Maschinenschwingungen - Stand der Normung. Schwingungstagung 1990, VDI-Berichte 846, VDI Verlag, 1990

- [SCH94] Schmitz, H.; Willmroth, G.: Magnetgelagerte Turbogeneratoren (MTG), Ersteinsatz in ein Erdgasübernahmestation der EWV Stolberg. Zeitschrift gwf Gas\*Erdgas, 1994
- [SCHR90] Schrüfer, E.: Signalverarbeitung. Carl Hanser Verlag, München-Wien, 1990
- [SCHR92] Schrüfer, E.: Elektrische Messtechnik, Carl Hanser Verlag, München - Wien, 5. Auflage, 1992
- [SIE96] ZÜS/PÜM-Schulungsunterlagen. Siemens AG, 1996
- [SIE84] Sigloch, H.: Strömungsmaschinen. Carl Hanser Verlag, München-Wien, 1984
- [STE94] Stegemann, H.; Geletzke, O.: Beschreibung der digitalen Regelung von Magnetlagern. IPM Zittau, Interner Bericht, 1994
- [STE95] Stegemann, H.: Entwicklung und Verifikation eines Modells zur Beschreibung der Rotordynamik für magnetgelagerte Antriebe. Diplomarbeit, Technische Hochschule Zittau, 1995
- [STE03] Stegemann, H.: Neuartige Verfahren für die Modellierung und digitale Regelung aktiv magnetgelagerter Systeme, Shaker Verlag, Aachen, 2003
- [STO95] Stoye, Th.: Bestimmung nicht meßbarer Zustandsgrößen an Magnetlagern. Diplomarbeit, Technische Hochschule Zittau, 1995
- [STR00] Straßburger, S.; Nordmann, R.: Diagnosis and optimisation of the internal grinding process by means of an AMB high speed spindle. 7<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, 2000
- [STU86] Sturm, A.: Wälzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen. Verlag TÜV-Rheinland, 1986
- [SUL90] Gebr. Sulzer AG (ed.): Kreiselpumpenhandbuch. Vulkan Verlag, Essen, 1990
- [SUN06] Sunder, R.: ISTEK: Effiziente Diagnoseverfahren zum Einsatz in KKW. Herbsttagung Leittec'96, 1996
- [TIL93] Tilli, Thomas: Mustererkennung mit Fuzzy-Logik. Franzis-Verlag GmbH, München, 1993
- [TRO75] Trokolanski, T.; Lazarkiewicz, S.: Kreiselpumpen – Berechnung und Konstruktion. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1975
- [TRA93] Traxler, A.; Bleuler H.; Schweitzer, G.: Magnetlager. Springer Verlag, 1993

- [ULB79] Ulbrich, H.: Entwurf und Realisierung einer berührungsfreien Magnetlagerung für ein Rotorsystem. Dissertation TU München, 1979
- [UNB94] Unbehauen, H.: Regelungstechnik 3. Vieweg-Verlag, 1994
- [VDI2059] VDI-Richtlinie 2059
- [VER92] Verhoeven, J. J.; Nordmann, R.: Development and operating experiences of a 5.000 kW test boilerfeed pump on active magnetic bearing. Mitteilung ImechE C439/004, 1992
- [WEN02] Wendt, L.: Taschenbuch der Regelungstechnik. 4. korrigierte Auflage. Frankfurt a.M.: Verlag Harri Deutsch, 2002
- [WOR93] Worlitz, F.: Anwendung klassischer Verfahren und Fuzzy-Logik zur Verbesserung der hydrostatischen Höhenstandsmessung. Dissertation, TH Zittau, 1993
- [WOR96] Worlitz, F.; Stegemann, H.: Untersuchungen zum industriellen Einsatz von aktiven Magnetlagern. SMWA-Abschlussbericht, Projekt-Nr. 0784/091, Zittau 1996
- [WOR99] Worlitz, F.; Stegemann, H.; Hampel, R.: Magnetic Supported Rotating Machinery for Applications in Power Plants. VGB PowerTech 6/99, 1999
- [WOR04] Worlitz, F.; Gärtner, St.; Stegemann, H.: Umrüstung und Installation einer magnetgelagerten Kreiselpumpe im Kraftwerk Boxberg. Abschlussbericht zur Inbetriebnahme der magnetgelagerten Pumpe, IPM, Hochschule Zittau/Görlitz (FH), 2004
- [WOR05] Worlitz, F.; Gärtner, St.; Rottenbach, Th.: Completely active magnetic suspended coolant pump for application in power stations. Proceedings 8th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Dresden, 2005
- [YAM97] Yamaishi, K.: Applications and Performance of Magnetic for Water Turbine and Generator. Proceedings MAG'97 Industrial Conference and Exhibition on Magnetic Bearing Alexandria, VA, 1997
- [ZIM95] Zimmermann, H. J.: Datenanalyse. VDI Verlag, 1995

## **Anhänge**

**A    Versuchsstände**

**B    Wissensbasis**

**C    Entwickelte Software**

## A Versuchsstände

### A1 Magnetlagergroßversuchsstand FLP 500 [IPM06]

#### Einsatzgebiete

- Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz magnetgelagerter Maschinen
- Verifikation von Simulationsmodellen
- Einzeleffektuntersuchungen

#### Hauptkomponenten

- Testbehälter mit Rotor, Magnetlagern, Fanglagern, Antrieb, Belastungseinrichtungen und Sensorsystemen
- Messwertverarbeitung, Magnetlagerregelung, Leistungsverstärker und Versuchsstandssteuerung
- Spannungs- und Stromversorgung, Frequenzumrichter

#### Technische Daten

- Testbehälter: Masse 7 t, Durchmesser 1011 mm
- Rotor: Masse 1500 kg, Länge 2500 mm
- Magnetlager: 160 V / 0 ... 50 A (DC)
- Antrieb: Leistung 250 kW, Maximaldrehzahl 7.200 U/min
- Tragkraft Radiallager: maximal 4 kN
- Tragkraft Axiallager: maximal 12 kN
- Luftspalt: 1 mm





## A2 Magnetlagerversuchsstand ZMB 120 [IPM06]

### Hochintegriertes Axial/Radial Magnetlager mit Notlaufeigenschaften

#### Einsatzgebiete

- Untersuchung von Einzeleffekten
- Entwicklung von Regelkonzepten
- Entwicklung von Diagnosekonzepten

#### Hauptkomponenten

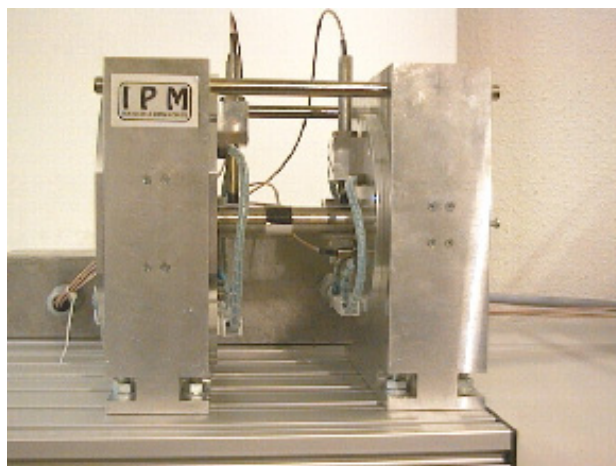
- Homopolares AXIAL/RADIAL-Kompaktlager (Kombilager)
- Homopolares RADIAL – Lager

#### Technische Daten

- Rotormasse: 2,6 kg
- Rotorlänge: 250 mm
- Drehzahl: maximal 12.000 U/min
- Tragkraft Kombilager: 120 N axial, 60 N radial
- Tragkraft Radiallager: 30 N
- Lagerluftspalt: 1 mm

#### Vorteile Kombilager

- geringe Baulänge
- keine Blechung
- geringe Eisenverluste
- geringe Kosten



### **A3 Magnetlagerversuchsstand MB8 (miniVS) [IPM06]**

Hersteller: RMB MECOS

#### **Vollständig magnetgelagerter, elastischer Rotor**

##### **Einsatzgebiete**

- Untersuchung von Einzeleffekten
- Verifikation von Simulationsmodellen
- Lehre

##### **Hauptkomponenten**

- 1 Axiallager
- 2 Radiallager

##### **Technische Daten**

- Länge: 425 mm
- Breite: 160 mm
- Drehzahl: maximal 30.000 U/min
- Tragkraft Axiallager: 135 N
- Tragkraft Radiallager: 100 N
- Lagerluftspalt (axial): 0,5 mm
- Lagerluftspalt (radial): 0,4 mm

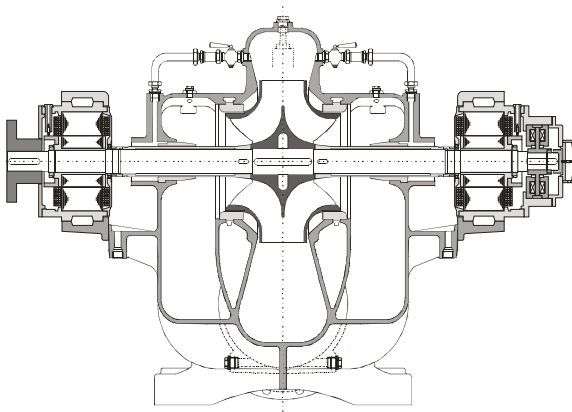
## A4 Magnetgelagerte Pumpe im Kraftwerk Boxberg [WOR04]

### Einsatzgebiet

- Kühlwasserdruckerhöhungspumpe

### Technische Daten

SM 400/400 A Reg.-Nr. 55/43597 Baujahr 1978 VEB Pumpenwerk Halle			
Größe	Formelzeichen	Einheit	Betrag
Nennförderstrom	$Q_n$	m <sup>3</sup> /h	1400
Spezifische Nutzarbeit	$Y$	J/kg	319
Nennförderhöhe	$H_n$	m	32,5
Förderflüssigkeit Dichte	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1000
Förderflüssigkeit Temperatur	$T$	°C	36
Wellenleistung	$P$	kW	180
Drehzahl	$n$	U/min	1450



Schnittdarstellung



Einbau im Kraftwerk Boxberg

## B Wissensbasis

### Übersicht der durchgeführten Simulationen und Experimente

#### Simulationsrechnungen mit MLDyn (Kapitel 2):

Simulation	Datei
Offset Grunderregerstrom	OFF_IO.asc
Offset Sensor	OFF_SENS.asc
Unwucht	UW_0.asc UW_1.asc

#### Simulationsrechnungen mit MLDyn zur Parameteridentifikation (Kapitel 2):

Simulation	Datei
PI-Glied, $T_N = 0,003$ s	PI_tn003.sgl
PI-Glied, $T_N = 0,002$ s	PI_tn005.sgl
PT1-Glied, $T_1 = 0,001$ s	T1_001kh.sgl
PT1-Glied, $T_1 = 0,002$ s	T1_002kh.sgl
PID-Regler, Änderung $T_V$ mit $T_N = 1$ s	TV_0p005zu0p003_bei1s5_TN1s.sgl
PID-Regler, Änderung $T_V$ mit $T_N = 10$ s	TV_0p005zu0p003_bei1s5_TN10s.sgl
PID-Regler, Änderung $T_V$ mit $T_N = 0,1$ s über 5 s	TV_005zu003_2s5_5s_TN0p1s.sgl
PID-Regler, Änderung $T_V$ mit $T_N = 1$ s über 5 s	TV_005zu003_2s5_5s_TN1s.sgl
PID_Regler, Änderung $T_V$ mit $T_N = 10$ s über 5 s	TV_005zu003_2s5_5s_TN10s.sgl
PT1-Glied, Änderung $T_1$	T1_001zu002_2s5_5s.sgl





Experimente am Versuchsstand FLP 500 (Kapitel 2), Teil 1:

Experiment	Datei
Wellenlage $s_{ax}$ , Abtastfrequenz 160 kHz, 450 $\text{min}^{-1}$	V1mlh5.int
Lagerstrom $i_{+z}$ , Abtastfrequenz 160 kHz, 450 $\text{min}^{-1}$	IZ1mlh5.int
Lagerstrom $i_{+ay}$ , Abtastfrequenz 160 kHz, 450 $\text{min}^{-1}$	IW1mlh5.int
Lagerstrom $i_{+ax}$ , Abtastfrequenz 160 kHz, 450 $\text{min}^{-1}$	IV1mlh5.int
Lauf im Magnetlager, 780 $\text{min}^{-1}$ , Anstreifen am Fanglager	M_L13M.int
Lauf im Magnetlager, 780 $\text{min}^{-1}$ , Motor aus	M_L13GH.int
Lauf im Fanglager, 780 $\text{min}^{-1}$ , Motor ein	F_L13M2.int
Lauf im Fanglager, 780 $\text{min}^{-1}$ , Motor aus	F_L13G2.int
Wellenlagen bei 240 $\text{min}^{-1}$ , Magnetlager und Motor ein	M_1_04mh.int
Wellenlagen bei 360 $\text{min}^{-1}$ , Magnetlager und Motor ein	M_1_09mh.int
Wellenlagen bei 780 $\text{min}^{-1}$ , Magnetlager und Motor ein	M_1_13mh.int
Wellenlagen bei 1020 $\text{min}^{-1}$ , Magnetlager und Motor ein	M_1_17mh.int
Wellenlagen und Lagerströme, Magnetlager ein, Umrichter Siemens, bei 5, 10, 13, 15, 20, 25 $\text{s}^{-1}$ (300 - 1500 $\text{min}^{-1}$ )	S_5/10/13/15/20/25.int
Wellenlagen und Lagerströme, Magnetlager ein, Umrichter BBC, bei 5, 10, 13, 15, 20, 25 $\text{s}^{-1}$ (300 - 1500 $\text{min}^{-1}$ )	B_5/10/13/15/20/25.int
Wellenlagen und Stellsignale, Magnetlager und Motor ein, bei 4, 6, 8, 13, 17, 20, 25, 29, 33, 37, 41, 49, 53 $\text{s}^{-1}$ (240 - 3180 $\text{min}^{-1}$ )	ms_104/06/08/13/17/20/25/29/33/37/41/49/53mh.int
Lagerstrom $i_z$ , Abtastfrequenz 500 kHz	IZ2b_mlh.int
Lagerstrom $i_{ay}$ , Abtastfrequenz 500 kHz	IW2_mlh.int
Wellenlage $s_z$ , Abtastfrequenz 500 kHz	Z_mlh.int
Wellenlage $s_{by}$ , Abtastfrequenz 500 kHz	W2_mlh.int
Umrichterstrom, Abtastfrequenz 500 kHz, 66 $\text{min}^{-1}$	I_66.int
Umrichterstrom, Abtastfrequenz 500 kHz, 222 $\text{min}^{-1}$	I_222.int
Umrichtersstrom, Abtastfrequenz 500 kHz, 318 $\text{min}^{-1}$	I_318.int
Umrichterspannung, Abtastfrequenz 500 kHz, 66 $\text{min}^{-1}$	U_66.int
Umrichterspannung, Abtastfrequenz 500 kHz, 222 $\text{min}^{-1}$	U_222.int
Umrichterspannung, Abtastfrequenz 500 kHz, 318 $\text{min}^{-1}$	U_318.int
Anfahrvorgang, Zuschalten der Magnetlager	Anfahren.int
Lagerschwingung, Lauf im Fanglager, Motor ein, 900 $\text{min}^{-1}$	Fl_1.int
Lagerschwingung, Lauf im Fanglager, Motor ein, 1200 $\text{min}^{-1}$	Fl_2.int
Lagerschwingung, Lauf im Fanglager, Motor aus, 900 $\text{min}^{-1}$	Fl_1ua.int
Lagerschwingung, Lauf im Fanglager, Motor aus, 760 $\text{min}^{-1}$	Fl_2ua.int
Lagerschwingung, Lauf im Fanglager, Motor aus, 180 $\text{min}^{-1}$	Fl_3ua.int
Lagerschwingung, Magnetlager und Motor ein, 1200 $\text{min}^{-1}$	MI_1.int
Lagerschwingung, Magnetlager und Motor ein, 818 $\text{min}^{-1}$	MI_2.int
Lagerschwingung, Magnetlager ein, Motor aus, 804 $\text{min}^{-1}$	MI_1ua.int
Lagerschwingung, Magnetlager ein, Motor aus, 700 $\text{min}^{-1}$	MI_2ua.int

Experimente am Versuchsstand FLP 500 (Kapitel 2), Teil 2:

Experiment	Datei
Wellenlagen bei Auslauf im Fanglager, Magnetlager und Motor aus	auslauf.int
Wellenlagen und Lagerströme bei Auslauf, Magnetlager ein, Motor aus, bei 1400 bis 300 $\text{min}^{-1}$	A_1400/1200/1100/1000/900/766/700/600/500/383/300.int
Zuschaltung Radialkraft 600 N bei 0 $\text{min}^{-1}$	ml000_0zu1000.int
Zuschaltung Radialkraft 1000 N bei 0 $\text{min}^{-1}$	ml000_0zu1600.int
Zuschaltung Radialkraft 1200 N bei 0 $\text{min}^{-1}$	ml000_0zu2000.int
Zuschaltung Radialkraft 600 N bei 300 $\text{min}^{-1}$	ml300_0zu1000.int
Zuschaltung Radialkraft 1000 N bei 300 $\text{min}^{-1}$	ml300_0zu1600.int
Zuschaltung Radialkraft 1200 N bei 300 $\text{min}^{-1}$	ml300_0zu2000.int
Zuschaltung Radialkraft 600 N bei 600 $\text{min}^{-1}$	ml600_0u1000.int
Zuschaltung Radialkraft 600 N bei 900 $\text{min}^{-1}$	ml900_0zu1000.int
Zuschaltung Radialkraft 1000 N bei 900 $\text{min}^{-1}$	ml900_0zu1600.int
Zuschaltung Radialkraft 1200 N bei 900 $\text{min}^{-1}$	ml900_0zu2000.int
Verhalten der Merkmale in Abhängigkeit der Drehzahl und des Antriebes, Berechnung der Störkräfte durch den Antrieb	Motorkraft.xls

Experimente am Versuchsstand MB8 (Kapitel 2):

Experiment	Datei
Lauf im Magnetlager, ohne Unwucht bei $n_0 - n_9 = 0, 13, 23, 34, 45, 147, 213, 224, 250, 275 \text{ s}^{-1}$	0_n1.int bis 0_n9.int
Lauf im Magnetlager, Unwucht A-Seite, Masse 1,2 g, bei $n_0 - n_7 = 0, 13, 23, 34, 45, 147, 213, 224 \text{ s}^{-1}$	as_n1.int bis as_n9.int
Lauf im Magnetlager, Unwucht A-Seite, Masse 2 g, bei $n_0 - n_9 = 0, 13, 23, 34, 45, 147, 213, 224, 250, 275 \text{ s}^{-1}$	a_n1.int bis a_n7.int
Lauf im Magnetlager, Unwucht A-Seite, Masse 3 g, bei $n_0 - n_9 = 0, 13, 23, 34, 45, 147, 213, 224, 250, 275 \text{ s}^{-1}$	ass_n1.int bis ass_n9.int
Lauf im Magnetlager, Unwucht B-Seite, Masse 1,2 g, bei $n_0 - n_8 = 0, 13, 23, 34, 45, 147, 213, 224, 250 \text{ s}^{-1}$	bs_n1.int bis bs_n8.int
Lauf im Magnetlager, Unwucht B-Seite, Masse 2 g, bei $n_0 - n_8 = 0, 13, 23, 34, 45, 147, 213, 224, 250 \text{ s}^{-1}$	b_n1.int bis b_n8.int
Lauf im Magnetlager, Unwucht A + B-Seite, Masse je 1,4 g, bei $n_0 - n_7 = 0, 13, 23, 34, 45, 147, 213, 224 \text{ s}^{-1}$	abs_n1.int bis abs_n7.int



Experimente am Versuchsstand ZMB 120 (Kapitel 2):

Experiment	Datei
Welle schwebt, Motor angekoppelt, Standard, $0 \text{ s}^{-1}$	n0_schweb_m.int
Welle schwebt, Motor abgekoppelt, Standard, $20 \text{ s}^{-1}$	n20.int
Welle schwebt, Motor angekoppelt, Standard, $20 \text{ s}^{-1}$	n20_m.int
Welle schwebt, Motor angekoppelt, $K_R = 0,02$ , $30 \text{ s}^{-1}$	n30_m_schweb_k0k02.int
Welle schwebt, Motor angekoppelt, $K_R = 0,05$ , $30 \text{ s}^{-1}$	n30_m_schweb_k0k05.int
Welle schwebt, Motor angekoppelt, $K_R = 0,1$ , $30 \text{ s}^{-1}$	n30_m_schweb_k0k1.int
Welle schwebt, Motor angekoppelt, $T_V = 0,0001$ , $30 \text{ s}^{-1}$	n30_m_schweb_td0k0001.int
Welle schwebt, Motor angekoppelt, $T_V = 0,0006$ , $30 \text{ s}^{-1}$	n30_m_schweb_td0k0006.int
Welle schwebt, Motor abgekoppelt, Standard, $50 \text{ s}^{-1}$	n50.int
Welle schwebt, Motor angekoppelt, Standard, $50 \text{ s}^{-1}$	n50_m.int

Experimente am Versuchsstand FLP 500 zur Parameteridentifikation (Kapitel 2):

Experiment	Datei
Ein- und Ausgangssignale Leistungsverstärker, Standard	PI_all_i
Ein- und Ausgangssignale Regler, Standard	PI_all_s
Ein- und Ausgangssignale Regler $250 \text{ min}^{-1}$ , $K_R$ erhöht	PI_V1_n1
Ein- und Ausgangssignale Regler $420 \text{ min}^{-1}$ , $K_R$ erhöht	PI_V1_n2
Ein- und Ausgangssignale Regler $250 \text{ min}^{-1}$ , $K_R$ verringert	PI_V2_n1
Ein- und Ausgangssignale Regler $420 \text{ min}^{-1}$ , $K_R$ verringert	PI_V2_n2

Verifikation der Diagnosemodelle in MLDyn (Kapitel 4)

Bemerkung	Datei
Diagnosemodelle MLDyn: Fehlerausprägungen	Auswertung.xls

MLDyn: Diagnoseergebnisse (Erfüllungsgrade  $\mu$ ) bei Variation der Fehlerausprägungen

<b>Fehler FS1:</b> Offset Sensor $\mu(\text{FS1P})$ 10 $\mu\text{m}$ 0,09 20 $\mu\text{m}$ 0,28 30 $\mu\text{m}$ 0,60 40 $\mu\text{m}$ 0,97 50 $\mu\text{m}$ 1	<b>Fehler FS2:</b> Verstärkung Sensor $\mu(\text{FS2N})$ 0,75                                      0,11 0,60                                      0,28 0,55                                      0,66 0,50                                      0,96 0,25                                      1
<b>Fehler FC1:</b> Verstärkung Regler $\mu(\text{FC1N})$ 0,90                                      0,04 0,80                                      0,21 0,70                                      0,44 0,60                                      0,75 0,50                                      1	<b>Fehler FC2:</b> Sollwert Regler $\mu(\text{FC2P})$ 10 $\mu\text{m}$ 0,20 15 $\mu\text{m}$ 0,40 20 $\mu\text{m}$ 0,60 25 $\mu\text{m}$ 0,80 30 $\mu\text{m}$ 1
<b>Fehler FA1:</b> Offset Stellsignal $\mu(\text{FA1P})$ 0,06 A                                      0,10 0,08 A                                      0,30 0,10 A                                      0,60 0,12 A                                      0,70 0,15 A                                      1	<b>Fehler FA2:</b> Offset Grunderregerstrom $\mu(\text{FA2P})$ 0,25 A                                      0,08 0,32 A                                      0,20 0,40 A                                      0,33 0,60 A                                      0,66 0,80 A                                      1
<b>Fehler FA3:</b> Offset Lagerstrom+ $\mu(\text{FA3P})$ 0,80 A                                      0,10 1,00 A                                      0,25 1,20 A                                      0,46 1,50 A                                      0,92 2,00 A                                      1	<b>Fehler FA4:</b> Offset Lagerstrom- $\mu(\text{FA4P})$ 0,80 A                                      0,10 1,00 A                                      0,25 1,20 A                                      0,46 1,50 A                                      0,92 2,00 A                                      1
<b>Fehler FA5:</b> Verstärkung Stellsignal $\mu(\text{FA4P})$ 0,95                                      0,05 0,92                                      0,21 0,90                                      0,33 0,85                                      0,64 0,80                                      1	

Verifikation der erweiterten Diagnosemodelle in Labview (Kapitel 4)

Simulation/Experiment	Datei
Wirken einer statischen Radialkraft RzL, MLDyn	F.int
Wirken einer statischen Radialkraft RaL, MLDyn	r_kraft.int
Radialkraft 500 N im Lager A, 45°, MLDyn	RiLa_500N_45.int
Radialkraft 500 N im Lager B, 45°, MLDyn	RiLb_500N_45.int
Radialkraft 500 N bei 0,5 m und 45°, MLDyn	RaLb_0p5_500N_45.int
Radialkraft 500 N bei 1,6 m und 45°, MLDyn	RzL_500N_45.int
Radialkraft 500 N bei 2,1 m und 45°, MLDyn	RiLa_RzL_2p1_500N_45.int
Radialkraft 500 N bei 2,3 m und 45°, MLDyn	RiLa_RaLa_2p3_500N_45.int
Radialkraft 500 N bei 2,5 m und 45°, MLDyn	RaLa_2p5_500N_45.int
Unwucht 0,15 kgm im Lager A, MLDyn	UiLa_0p15_1kg_90.int
Unwucht 0,15 kgm im Lager B, MLDyn	UiLb_0p15_1kg_90.int
Unwucht 0,15 kgm bei 0,5 m, MLDyn	UaLb_0p5_0p15_1kg_90.int
Unwucht 0,10 kgm bei 1,6 m, MLDyn	UzL_0p1_1kg_90.int
Unwucht 0,15 kgm bei 1,6 m, MLDyn	UzL_0p15_1kg_90.int
Unwucht 0,20 kgm bei 1,6 m, MLDyn	UzL_0p1_2kg_90.int
Unwucht 0,15 kgm bei 2,5 m, MLDyn	UaLa_2p5_0p15_1kg_90.int
Zuschaltung Radialkraft 600 N bei 600 min <sup>-1</sup> , FLP 500	ml600_0zu1000_Kraft.int
Abschaltung Radialkraft 600 N bei 600 min <sup>-1</sup> , FLP 500	ml600_1000zu0.int
Zuschaltung Radialkraft 1000 N bei 600 min <sup>-1</sup> , FLP 500	ml600_0zu2000.int
Abschaltung Radialkraft 1000 N bei 600 min <sup>-1</sup> , FLP 500	ml600_2000zu0.int

Daten aus Experimenten mit dem Diagnosesystem MagPu in Boxberg (Kapitel 5)

Ereignis
Gesteuertes Abschalten der Pumpe
Anfahrvorgang auf Nenndrehzahl (Schieber geöffnet)
Anfahren der Pumpe gegen geschlossenen Schieber
Langzeitmessung beim Dauerbetrieb
Zuschaltung der Magnetlager, Schweben
Ausschalten der Magnetlager
Lauf mit gelockerter Wellenmutter auf der A-Seite
Welle schwebt, Motor aus
Verhalten bei verschiedenen Ventilöffnungsgraden
Drehrichtungsumkehr beim Ausschalten des Motors
Auftreten von erhöhten Wellenschwingungen
Merkmale in Abhängigkeit von der Stellventilöffnung

## C Entwickelte Software

### C1 Labview

#### Labview-Programme zu Kapitel 2:

Dateiname	Funktion
Mess.vi	Messwerterfassung am FLP500
Exp_MW_real.vi	Berechnung des exponentiellen Mittelwertes
Print_FLP.vi	Ausdruck der Messdaten vom FLP500
load_mldyn.vi load_mldyn_up1.vi	Laden von Simulationsdaten aus MLDyn
print_MLDyn.vi	Ausdruck von MLDyn-Daten
param_estim_sgl.vi	Parameteridentifikationsprogramm
convert_MLDyn_to_sgl.vi	Konvertierung der MLDyn-Daten in Gleitkommaformat Labview
-PSV_Mean_Loop.vi	Mittelwertbildung

#### Labview-Programme zu Kapitel 4:

Dateiname	Funktion
Verst_OP.vi	Optimierung des Fuzzy-Verstärkungsoperators
Diagn_Frad_UW_DS	Diagnose Unwucht und Radialkraft mit Daten aus MLDyn und Experimenten
fuzzy_fizierung_mm.vi	Fuzzyfizierung der Merkmale
fuzzy_alg_prod_2.vi fuzzy_alg_prod_3.vi	Berechnung des Algebraic Product
fuzzy_complement.vi	Berechnung des Fuzzy-Komplements
vect_add.vi vect_sub.vi	Residuenberechnung
gamma	Berechnung des Winkels gamma
winkel.vi betrag.vi	Berechnung von Betrag und Winkel der Störkraft
Kraftberechnung_aus_~ FLP_Daten.VI	Kraftberechnung und Konvertierung der experimentellen Daten
kennfeld_indiz_frado.vi kennfeld_indiz_fradu.vi	Kraftberechnung FLP500 aus Kennfeld

Definition der Fuzzy-Sets in Labview (Kapitel 4):

Datei (*.set)	deltafi	deltaga	deltagaW	Feffax	Feffay	Feffbx	Feffby
ling.Variable	$\Delta\varphi$	$\Delta\gamma$	Hilfs- variable	$\tilde{F}_{ax}$	$\tilde{F}_{ay}$	$\tilde{F}_{ax}$	$\tilde{F}_{ay}$
Set S	-1000	10	-1000	-100000	-100000	-100000	-100000
	-1000	45	-1000	-100000	-100000	-100000	-100000
	0	140	10	0	0	0	0
	10	165	45	125	125	125	125
Set N	165	195	10	0	0	0	0
	175	220	45	0	0	0	0
	185	315	140	0	0	0	0
	195	350	165	0	0	0	0
Set B	350	1000	195	0	0	0	0
	360	1000	220	125	125	125	125
	1000	-1000	315	100000	100000	100000	100000
	1000	-1000	350	100000	100000	100000	100000

Datei (*.set)	ficoa	ficob	gacoa	gacob	rFa	rFb
ling.Variable	$\varphi_{const\_a}^F$	$\varphi_{const\_b}^F$	$\gamma_{const\_a}^F$	$\gamma_{const\_a}^F$	$r\bar{F}_a$	$r\bar{F}_b$
Set S	-1000	0	0	0	-100000	-100000
	-1000	45	45	45	-100000	-100000
	0	0	0	0	0	0
	45	0	0	0	100	100
Set N	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	45	45	45	0	0
Set B	0	1000	1000	1000	0	0
	45	1000	1000	1000	100	100
	1000	-1000	-1000	-100000	100000	100000
	1000	-1000	-1000	-100000	100000	100000

Labview-Programme MLDia (Kapitel 5):

Dateiname	Funktion
MLDia.vi	Hauptprogramm zur Diagnose Magnetlager
ExpMeanReal_mit0.vi	Exponentielle Mittelwertberechnung mit Startwert
MLDiaMwe.vi	Messwerterfassungsroutine
MLDiaMweGlaettung.vi	Glättung der Messwerte
-MLDiaMwe_i+_input.vi -MLDiaMwe_i-_input.vi -MLDiaMwe_l_input.vi	Berechnung der Ströme und Wellenlagen aus den Rohdaten
--MLDiaMwe_kanal_select.vi	Indizierung der Messwertkanäle
MLDiaReadSglMatlabFile.vi MLDiaReadSglMatlabFile_Step.vi	Einlesen von Matlab-Daten
MLDiaMM1.vi -MLDiaMM1Calc.vi	Signalgestützte Merkmalsgewinnung
MLDiaSb1.vi -MLDiaSb1CalcF.vi -MLDiaSb1CalcI.vi -MLDiaSb1CalcU.vi	Berechnung der Kräfte, Grunderregerströme und Stellspannungen
-MLDiaDisp_GraphGrenze.vi	Anzeige der Bereichsgrenzen im Diagramm
-MLDiaDisp_MarkOrbStart.vi	Anzeige des Startpunktes im Diagramm
-MLDiaDispI_io_cluster.vi	Berechnung für die Darstellung der Strommerkmale
-MLDiaGwI_Case.vi	Grenzwertüberwachung und Alarmerstellung
fuzzy.vi	Fuzzy-Programm
fuzzy_kennwerte_kreis_bx.vi fuzzy_kennwerte_kreis_by.vi	Berechnung der kombinierten Merkmale für die Fuzzyfizierung
fuzzy_disp.vi	Anzeige der Fuzzy-Erfüllungsgrade
fuzzy_kzmw.vi	Trendberechnung
fuzzy_fizierung_mm.vi	Fuzzyfizierung der Merkmale (1. Ebene)
fuzzy_fizierung_kreis.vi	Fuzzyfizierung der Merkmale (2. Ebene)
fuzzy_alg_prod.vi	Berechnung des Algebraic Product
fuzzy_N.vi	Berechnung des Sets N
fuzzy_rules_1_bx.vi fuzzy_rules_1_by.vi	Regelsets der Einzelachsen

Labview-Programme MagPu\_Dia (Kapitel 5):

Dateiname	Funktion
MagPu_Dia.vi	Hauptprogramm für die Messwerterfassung/Diagnose im Kraftwerk Boxberg
-MagpuDia_get_date.vi	Datum/Zeit in String wandeln
-MagpuDia_mw_simulation_stat.vi	Simulation von Messwerten zum Programmtest
-MagpuDia_rms_mean_min_max2string_s.vi -MagpuDia_rms_mean_min_max2string_i.vi	Merkmalsberechnung
-MagpuDia_gw_ueberwachung.vi	Grenzwertüberwachung
-MagpuDia_make_datheader.vi	Erstellung Dateiheder

Labview-Programme für die Auswertung und Diagnosemodelle (Kapitel 5):

Dateiname	Funktion
Print_Dte_File.vi	Auswertung der Trendverläufe
Magpu_Diagnose.vi	Auswertung der Rohdaten von Ereignissen
MagPu_Diagnose_Resonanz.vi	Diagnose von Resonanzen
MagPu_Diagnose_Ruecklauf.vi	Diagnose der Drehrichtung
R_xy.vi	Berechnung Kreuzkorrelation
Exp_MW_real.vi	Mittelwertberechnung
fuzzy_fizierung_mm.vi	Fuzzyfizierung der Merkmale

## Definition der Fuzzy-Sets in Labview (Kapitel 5):

Datei	Rueck.set	Resonanz.set
ling.Variable	Rueck	Resonanz
Set S	-100000	-100000
	-100000	-100000
	0	1
	0	2
Set N	40	0
	70	0
	110	0
	150	0
Set B	220	1
	250	2
	290	1000
	320	1000

## C2 MLDyn

### MLDyn-Programme zu Kapitel 2:

Dateiname	Funktion
FLP500.dyn	Simulationsmodell FLP500
FLP500.par	Parametersatz für FLP500.dyn
STOER_UW.dyn	Simulation Unwucht
STOER_R.dyn	Simulation Radialkraft
FLP_PI.dyn	Simulationsmodell FLP500 für Parameteridentifikation
FLP_PI.par	Parametersatz für FLP_PI.dyn

### MLDyn-Programme zu Kapitel 4:

Dateiname	Funktion
DIA_F.dyn	Simulationsmodell für die Diagnose am FLP500
STOER_UW.dyn	Simulation Unwucht
STOER_R.dyn	Simulation Radialkraft
FP_DIAR.par	Parametersatz für DIA_F.dyn
DIA_KL.set	Fuzzy-Sets für DIA_F.dyn

### Zuordnung der linguistischen Variablen zur Syntax in MLDyn:

Linguistische Variable	MLDyn-Syntax
$\tilde{s}$	se
$\bar{s}$	sm
$\bar{u}$	um
$l_G$	Inull
$W$	i+/s
$R$	s/u
$\bar{l}_s$	ism
$V$	i+/-e
$A$	u/i+
$\tilde{F}$	fe
$\bar{F}_{by}$	fmyu
$\tilde{F}_{by}$	feyu
$\bar{F}$	fm



Definition der Fuzzy-Sets (DIA\_KL.set) für die Diagnose der Magnetlagerkreise mit MLDyn (Syntax entsprechend [KEI97]):

DEFLVAR 1 'se' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -0.1000 14.0000 12.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 12.0000 26.0000 30.0000 26.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 26.0000 56.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 2 'sm' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -100.0000 -30.0000 25.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 25.0000 -5.0000 5.0000 25.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 25.0000 30.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 3 'um' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -100.0000 -15.0000 10.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 10.0000 -5.0000 5.0000 10.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 10.0000 15.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 4 'Inull' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -0.1000 11.2000 0.6000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 0.6000 11.8000 12.2000 0.6000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 0.6000 12.8000 25.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 5 'i+/s' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -1.0000 -0.0500 0.0400 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 0.0400 -0.0100 0.0100 0.0900 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 0.0900 0.1000 5.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 6 's/u' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -1.0000 -0.2000 0.1700 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 0.1700 -0.0300 0.0300 0.3700 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 0.3700 0.4000 5.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 7 'ism' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -20.0000 -1.0000 0.9000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 0.9000 -0.1000 0.1000 0.9000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 0.9000 1.0000 20.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 8 'i+/-e' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -1.0000 -0.2000 0.2000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 0.2000 0 0 0.2000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 0.2000 0.2000 5.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 9 'u/i+' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -20.0000 -5.0000 4.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 4.0000 -1.0000 1.0000 4.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 4.0000 5.0000 20.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 10 'fe' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -0.1000 1000.0000 450.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 450.0000 1450.0000 1600.0000 400.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 400.0000 2000.0000 5000.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 11 'fmyu' 'S1' 1 1 0 0

ADDSET 'S' 0.1000 -5000.0000 -250.0000 200.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'N' 200.0000 -50.0000 50.0000 200.0000 0 1.0000 0 0

ADDSET 'B' 200.0000 250.0000 5000.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 12 'feyu' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'S' 0.1000 -0.1000 1000.0000 450.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 450.0000 1450.0000 1600.0000 400.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'B' 400.0000 2000.0000 5000.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 13 'fm' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'S' 0.1000 -5000.0000 -250.0000 200.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 200.0000 -50.0000 50.0000 200.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'B' 200.0000 250.0000 5000.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 21 'FS1' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 22 'FS2' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 23 'FC1' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 24 'FC2' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 25 'FA1' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 26 'FA2' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 27 'FA3' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 28 'FA4' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0

DEFLVAR 29 'FA5' 'S1' 1 1 0 0  
ADDSET 'M' 0.1000 -0.1000 0 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'N' 50.0000 50.0000 50.0000 50.0000 0 1.0000 0 0  
ADDSET 'P' 50.0000 100.0000 100.0000 0.1000 0 1.0000 0 0



```

(0,0,5,0,9,0,0,0,5,0,9,0,0,9,0,0,0,5,0,9,0,0,0,5,0,9,0,0,0,0,0,4,0,0,4,4,0,0,4,0,0,0,0,5,0,0,0,0,
0,0,0,0,5,0,9,0), {FA5-}
(0,0,0,0,9,0,0,0,0,5,0,0,0,9,0,1,0,0,5,0,0,1,0,0,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,
0,0,1,0,0,5,0,0), {FA6+}
(0,0,0,0,9,0,0,0,0,0,0,5,0,9,0,1,0,0,0,0,5,1,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,
0,0,1,0,0,0,0,5), {FA6-}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,5,0,0,0,0,5,1,0,0,0,0,4,1,0,0,0,0,4,0,0,0,0,5,0,0,2,6,0,0,0,4,0,6,1,0,0,0,0,0,0,0,
0,5,1,0,0,0,8,0), {FA7+}
(0,0,1,0,9,0,0,0,1,0,0,5,5,0,0,0,0,1,4,0,0,0,0,1,4,0,0,0,0,0,0,5,0,6,1,5,0,0,1,6,0,0,0,2,0,0,0,5,
0,0,0,0,1,0,8,0), {FA7-}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,0,0,5,0,0,5,1,0,0,0,0,4,1,0,0,0,0,4,0,0,0,0,6,0,5,0,0,0,6,1,0,0,4,0,0,0,0,0,5,
0,0,1,0,0,0,8,0), {FA8+}
(0,0,1,0,9,0,0,0,1,5,0,0,5,0,0,0,0,1,4,0,0,0,0,1,4,0,0,0,0,0,6,0,0,0,5,1,6,0,5,0,0,0,0,2,0,0,0,0,
0,5,0,0,1,0,8,0), {FA8-}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,0,0,5,0,9,0,2,0,0,0,0,5,2,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,
0,0,2,0,0,0,0,5), {FA9+}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,5,0,0,0,9,0,2,0,0,5,0,0,2,0,0,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,
0,0,2,0,0,5,0,0), {FA9-}
(0,0,1,0,9,0,0,0,1,5,0,0,0,9,0,0,0,1,5,0,0,0,0,1,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,5,0,0,0,
0,0,0,0,1,5,0,0), {FA10+}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,0,0,5,0,9,0,1,0,0,0,0,5,1,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,0,5,0,
0,0,1,0,0,0,0,5), {FA10-}
(0,0,1,0,9,0,0,0,1,0,0,5,0,9,0,0,0,1,0,0,5,0,0,1,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,0,5,0,
0,0,0,0,1,0,0,5), {FA11+}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,5,0,0,0,9,0,1,0,0,5,0,0,1,0,0,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,5,0,0,0,
0,0,1,0,0,5,0,0), {FA11-}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,0,0,5,0,9,0,1,0,0,0,0,5,1,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,
0,0,1,0,0,0,0,5), {FR1+}
(1,0,0,0,9,0,1,0,0,5,0,0,0,9,0,1,0,0,5,0,0,1,0,0,0,0,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,0,0,0,
0,0,1,0,0,5,0,0), {FR1-}
(1,0,1,0,9,0,1,0,1,0,9,0,0,9,0,1,0,1,0,9,0,1,0,1,0,9,0,0,8,0,0,0,0,0,0,0,0,0,8,0,0,8,0,1,0,1,0,0,0,0,
0,0,1,0,1,0,9,0), {FR2}
);

```

```

type m_txt= array[1..max_mm] of string[5];

```

```

const merkmal:m_txt=

```

```

('se ','sm ','ue ','um ','Io ','i+e ','i+m ','i-e ','i-m ','s/u ','u/i+ ','u/i- ','i+/s ','i-/s ',
'fe ','fm ','i+/-e ','ise ','ism ');

```

```

const maske:array[1..max_ms] of byte=

```

```

(0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,
0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0);

```

```

type f_txt= array[1..max_f] of string[5];

```

```

const fehler: f_txt=

```

```

('FS1+ ','FS1- ','FS2+ ','FS2- ','FC1+ ','FC1- ','FC2+ ','FC2- ','FA1+ ','FA1- ','FA2+ ','FA2- ',
'FA3+ ','FA3- ','FA4+ ','FA4- ','FA5+ ','FA5- ','FA6+ ','FA6- ','FA7+ ','FA7- ','FA8+ ','FA8- ',
'FA9+ ','FA9- ','FA10+ ','FA10- ','FA11+ ','FA11- ','FR1+ ','FR1- ','FR2');

```

```

var
r:char;
efile: text;
fileflag:byte;
filename: string[20];
COUNTER:integer;
h:byte; {hitschwelle}
i,j,m,n,s,f:integer;
m_max:byte;
p_feld:array[1..max_n] of integer;
pm_feld:array[1..max_n] of byte;
f_feld:array[1..max_f] of byte;

procedure get_hits;
var
hits:integer;
j,i,k,l,x:integer;

begin
  for i:=1 to max_f do f_feld[i]:=0;
  hits:=0;
  for j:=1 to max_f do begin
    if (f<>j) then begin
      x:=0;
      for i:=1 to m do begin
        k:=p_feld[i];
        l:=pm_feld[k];
        if
          (
            ((m_matrix[j,l] >= empf) AND (m_matrix[j,l] < 6))
            OR
            ((m_matrix[j,l]-5) >= empf)
          )
        then x:=x+1;
      end;

      {alle relevanten merkmale haben Treffer}
      if (x=m) then begin
        hits:=hits+1;
        {fehler merken}
        f_feld[hits]:=j;
      end;
    end; {if}
  end; {for}

  if (hits <= h) then begin
    write(hits,'hits m=',m,' ',fehler[f],' ');
    if (fileflag=1) then write(efile,fehler[f],chr(9),f,chr(9),hits,chr(9),m,chr(9));

    for i:=1 to m do begin
      k:=p_feld[i];
      l:=pm_feld[k];
      write(merkmal[((l-1) DIV s_pro_m)+1], '=');
    end;
  end;
end;

```

```

if (fileflag=1) then write(efile,merkmal[((l-1) DIV s_pro_m)+1],'=');
k:=(l-1) MOD s_pro_m;
  if k=0 then begin write('K');if (fileflag=1) then write(efile,'S');end;
  if k=1 then begin write('N');if (fileflag=1) then write(efile,'N');end;
  if k=2 then begin write('G');if (fileflag=1) then write(efile,'B');end;
write(' ');
  if (fileflag=1) then write(efile,chr(9));
end;

for i:=1 to hits do begin
  write(fehler[f_feld[i]],' ');
  if (fileflag=1) then write(efile,fehler[f_feld[i]],chr(9));
end;

writeln;
if (fileflag=1) then writeln(efile);
end;
end; {procedure}

procedure perm (c:integer);
begin
while NOT ((p_feld[c] > (n-m+c)) AND (c=1)) do begin
  if (p_feld[c] > (n-m+c))
    THEN BEGIN
      p_feld[c-1]:=p_feld[c-1]+1;
      for i:=c to m do p_feld[i]:=p_feld[i-1]+1;
      c:=c-1;
    END
  else
    BEGIN
      if (c=m) then
        begin
          counter:=counter+1;
          p_feld[c]:=p_feld[c]+1;
        end
      else

        begin
          perm(c+1);
          p_feld[c]:=p_feld[c]+1;
        end;
    end;
end;
end;
end; {procedure}

{HAUPTPROGRAMM}
BEGIN
clrscr;
counter:=0;
fileflag:=0;
write('filename:');
readln(filename);
if (filename<>") then begin

```

```

fileflag:=1;
assign(efile,filename);
{$I-}
  reset(efile);
  IF IOresult=0 THEN begin
    writeln('Append, Rewrite (A,R) ?');
    r:=readkey;
    if ((r='R') OR (r='r')) then rewrite(efile)
    else append(efile);
  end
  ELSE rewrite(efile);
{$I+}
end
else begin
  fileflag:=0;
end;
repeat
  write('Fehlernummer, maximale Treffer: ',maximale Merkmale:');
  readln(f,{s,}h,m_max);
  s:=4;
  for i:=1 to max_n do pm_feld[i]:=0;
  j:=1;
  for i:=1 to max_ms do begin {schwelle}
    if (
      ((m_matrix[f,i]>=s) AND (m_matrix[f,i]<6))
      OR
      (((m_matrix[f,i]-4)>=s) AND (maske[i]=1))
    )
    then
      begin
        pm_feld[j]:=i;
        j:=j+1;
      end;
  end;
  n:=j-1;
  writeln(n,f);
until ((max_n>=n) AND (f<=max_f));
writeln ('relevante Merkmale= ',n);
writeln;
if (m_max>n) then m_max:=n;
for m:=1 to m_max do begin
  for i:=1 to max_n do p_feld[i]:=0;
  for i:=1 to m do p_feld[i]:=i;
  perm(1);
  writeln('counter= ', counter,' m= ',m);
  writeln;
  repeat until keypressed;
  readkey;
end;
if (fileflag=1) then close(efile);
END.

```