Ein Beitrag zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von
Dipl.-Ing. Joachim Hirschmann
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h. c. E. Westkämper
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bertsche

Tag der Einreichung: 24. Mai 2006
Tag der mündlichen Prüfung: 27. Oktober 2006

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung Stuttgart, 2007

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Universität Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb

Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung

Joachim Hirschmann

Ein Beitrag zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik

Nr. 461

JOST-JETTER VERLAG
Fachverlag · 71296 Heimsheim

Dr.-Ing. Joachim Hirschmann
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
ord. Professor an der Universität Stuttgart
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath
ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-16-2, ISBN (13) 978-3-939890-16-4
Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.
© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2007.
Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart. Zu Dank verpflichtet bin ich dem Institut und allen, die mir bei meinem Promotionsvorhaben halfen.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Westkämper danke ich für die Betreuung der Arbeit. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Bertsche für die sorgfältige Durchsicht sowie die Übernahme des Mitberichts und Herrn Prof. Klemm für den Prüfungsvorsitz.

Allen Mitarbeitern des IPA, deren Einsatz- und Hilfsbereitschaft mir bei dieser Arbeit zugute kam, danke ich vielmals. Besonders hervorheben möchte ich Dr. Siegfried Stender, Dr. Rüdiger Proksch, Dr. Frank Heeren, Dr. Marcus Engels-Lindemann, Frank Gölt, Michael Wesoly und Jürgen Mauch.

Den grössten Dank schulde ich allerdings meiner Frau Katrin sowie meinen beiden Kindern Alina und Adrian, die an zahlreichen Wochenenden und Urlaubstagen auf ihren Papa verzichten mussten. Meinen Eltern Ursula und Karl-Heinz Hirschmann danke ich für die Förderung und die mir immer selbstlos entgegengebrachte Hilfsbereitschaft in meinem bisherigen Leben. Ihnen widme ich deshalb diese Arbeit.

Stuttgart, im Mai 2007 Joachim Hirschmann

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen 11

Abbildungsverzeichnis 17

1 Einleitung 19

2 Ausgangssituation und Ziel der Arbeit 20
- 2.1 Problembeschreibung 20
- 2.2 Ziele 21
- 2.3 Grundidee der Arbeit 22

3 Stand der Forschung und Technik 25
- 3.1 Überwachung und Diagnose als Elemente der Instandhaltungsstrategie 25
- 3.2 Schädigungen an elektromechanischen Antriebseinheiten - Ursache der Instandhaltung 27
- 3.3 Prinzipien und Verfahren zur zustandsabhängigen Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose 31
  - 3.3.1 Verfahren der Merkmalsextraktion und Symptomgenerierung 32
  - 3.3.2 Verfahren der Merkmalsinterpretation und Diagnosefindung 37
- 3.4 Methoden und Verfahren zur Überwachung und Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten 47

4 Anforderungen und Lösungsansatz 51
- 4.1 Anforderungen an die Überwachung und Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten 51
- 4.2 Prinzipien des neuen Lösungsansatzes 53

5 Physikalisch-technische Grundlagen des Diagnosemodells 56
- 5.1 Physikalische Grundlagen tribologischer Systeme 56
- 5.2 Minimalmodelle zur Beschreibung des Zeitverhaltens von tribologischen Systemen 64
  - 5.2.1 Trennung der coulomb´schen und viskosen Reibung mit dem Superpositionsverfahren 67
  - 5.2.2 Trennung des viskosen und coulomb´schen Reibanteils durch Auslaufversuch 68
- 5.3 Minimal- und Relativmodell zur Beschreibung des Temperaturverhaltens von tribologischen Systemen 71
  - 5.3.1 Modellbildung 71
  - 5.3.2 Kompensation von Temperatureinflüssen und Berücksichtigung von Belastungen 68
- 5.4 Ermittlung des Spiels 76
- 5.5 Detektion periodisch auftretender Fehler 77

6 Merkmalsaufbereitung und Symptomgenerierung 78
6.1 Gewinnung von Merkmalen mit Minimalmodellen 78
6.2 Statistische Auswertung der Merkmale 79
6.3 Verwendung von Gradienten zur Fehlerfrühdiagnose 81
6.4 Symptomgenerierung 82
7 Interpretation der Messwerte und extrahierten Merkmale 84
7.1 Darstellung des Diagnosemodells 85
7.1.1 Beschreibung der tribologischen Systeme 87
7.1.2 Auswirkungen von Veränderungen am tribologischen System 93
7.1.3 Konstant und periodisch auftretende Leicht- und Schwergängigkeit 95
7.1.4 Spiel 97
7.2 Modellbasierte Interpretation der Symptome 99
8 Verifizierung der Methoden mittels einer Versuchseinrichtung 103
8.1 Beschreibung der Versuchseinrichtung 103
8.2 Instandhaltungsbedingte Auslegung der Versuchseinrichtung 106
8.3 Darstellung der Messergebnisse 109
8.4 Verifizierung der Modelle 112
8.5 Fehlerfrühdiagnose anhand der beobachteten Temperaturen und des Stromes 115
9 Bewertung und Diskussion weiterer Anwendungen 117
10 Zusammenfassung 119
11 Summary 120
Literatur 125

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen mit deutschen Buchstaben

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
a		Koeffizient des Motoröls
A_R	[mm^2]	Reibfläche
b		Koeffizient des Motoröls
B	[m]	Breite einer zylindrischen Fläche
c		Koeffizient des Motoröls
C_0	[N]	statische Tragzahl
c_ϑ	[kcal/°C],[Ws/°C]	Wärmekapazität
C_{Lim}		Intervall des Temperaturverhältnisses
c_M	[VS/rad], [Nm/A]	Motorkonstante
C_{max}		obere Grenze des Temperaturverhältnisses
C_{min}		untere Grenze des Temperaturverhältnisses
d	[m]	Innendurchmesser des Lagers
D	[m]	Aussendurchmesser des Lagers
d_{ges}	[Ns/m], [Nm s/rad]	Dämpfungskonstante der gesamten Antriebseinheit
d_L	[Ns/m], [Nm s/rad]	Dämpfungskonstante lastseitig
d_m	[m]	mittlerer Lagerdurchmesser
d_M	[Ns/m], [Nm s/rad]	Dämpfungskonstante motorseitig
d_{Sp}	[m]	Spindeldurchmesser
d_v	[Ns/m], [Nm s/rad]	viskose Dämpfungskonstante
F	[N]	Kraft
f_0		Beiwert der Lagerbauform
f_1		Beiwert der Lasthöhe und Lastrichtung
F_a	[N]	Axiale Lagerkraft
F_N	[N]	Normalkraft
F_r	[N]	Radiale Lagerkraft
F_R	[N]	Reibkraft
F_{RC}	[N]	Coulomb´sche Reibkraft
h	[m]	Schmierspalthöhe
h_{min}	[m]	wirksame Schmierfilmdicke
h_{Sp}	[m]	Spindelsteigung
i		Getriebeübersetzung: Antriebsdrehzahl/ Abtriebsdrehzahl
$I(\varphi_M)$	[A]	Strom in Abhängigkeit von der Winkelposition des Motors

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
$I(n_M)$	[A]	Strom in Abhängigkeit von der Motordrehzahl
$I(x)$	[A]	Strom in Abhängigkeit von der Lage
I_0	[A]	Strom vor Auslaufverhalten
I_A	[A]	Ankerstrom
i_G		Übersetzung Getriebe
I_M	[A]	Motorstrom
$I_{M\ ist}$	[A]	Ist-Strom des Motors
$I_{M\ Nenn}$	[A]	Nennstrom des Motors
I_{M1ist}	[A]	Ist-Strom des Motors bei Eilganggeschwindigkeit 1
I_{M2ist}	[A]	Ist-Strom des Motors bei Eilganggeschwindigkeit 2
I_{Ref}	[A]	Strom des Motors bei der Referenzfahrt
i_{Sp}		Getriebeübersetzung in der Spindel
J_1	[kg m^2]	Trägheitsmoment vom Motor bis zur ersten Spielstelle
J_2	[kg m^2]	Trägheitsmoment vom Motor bis zur zweiten Spielstelle
J_L	[kg m^2]	Trägheitsmoment lastseitig
J_M	[kg m^2]	Trägheitsmoment motorseitig
J_n	[kg m^2]	Trägheitsmoment vom Motor bis zur n-ten Spielstelle
J_{red}	[kg m^2]	reduziertes Trägheitsmoment der Antriebseinheit
J_{Sub1}	[min^{-1}]	Trägheitsmoment des Subsystems 1
J_{Sub2}	[min^{-1}]	Trägheitsmoment des Subsystems 2
J_{Sub3}	[min^{-1}]	Trägheitsmoment des Subsystems 3
m	[kg]	Masse
m_1	[kg]	Masse vom Motor bis zur ersten Spielstelle
m_2	[kg]	Masse vom Motor bis zur zweiten Spielstelle
M_0	[Nm]	Reibmomentanteil des unbelasteten Wälzlagers
M_1	[Nm]	Lastabhängiger Reibmomentanteil eines Wälzlagers
M_{Cges}	[Nm]	Coulomb´scher Reibanteil der gesamten Antriebseinheit
M_{CL}	[Nm]	Coulomb´scher Reibanteil lastseitig
M_{CM}	[Nm]	Coulomb´scher Reibanteil motorseitig
M_L	[Nm]	Drehmoment lastseitig
M_M	[Nm]	Antriebs-/ Motormoment
$M_{M\ ist}$	[Nm]	Ist-Moment des Motors
$M_{M\ Nenn}$	[Nm]	Nennmoment des Motors
m_n	[kg]	Masse vom Motor bis zur n-ten Spielstelle

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
M_R	[Nm]	Reibungsmoment des gesamten Antriebsstrangs
M_{R1}	[Nm]	Reibmoment der Antriebseinheit bei Eilgang 1
M_{R2}	[Nm]	Reibmoment der Antriebseinheit bei Eilgang 2
M_{RC}	[Nm]	Coulomb´sches Reibmoment des Antriebsstrangs
M_{RL}	[Nm]	Reibmoment lastseitig
M_{RM}	[Nm]	Reibmoment motorseitig
M_{RV}	[Nm]	Viskoses Reibmoment des Antriebsstrangs
M_{RVkorr}	[Nm]	temperaturabhängig korrigiertes viskoses Reibmoment des Antriebsstrangs
M_{V1}	[Nm]	viskoses Reibmoment bei Eilgang 1
M_{V2}	[Nm]	viskoses Reibmoment bei Eilgang 2
M_{VL}	[Nm]	Viskoser Reibanteil lastseitig
M_{VM}	[Nm]	Viskoser Reibanteil motorseitig
M_W	[Nm]	Drehmoment der Welle
n_{eil1}	[s^{-1}]	Drehzahl bei Eilganggeschwindigkeit 1
n_{eil2}	[s^{-1}]	Drehzahl bei Eilganggeschwindigkeit 2
n_L	[s^{-1}]	Drehzahl lastseitig
n_M	[s^{-1}]	Motordrehzahl
P_0	[N]	äquivalente statische Belastung des Lagers
P_1	[N]	für das Reibmoment massgebende Belastung eines Lagers
P_R	[W], [J]	Reibleistung
$P_V(t)$	[W],[J]	Wärmeverlustleistung
$\hat{P}_V$	[J]	sprungförmige Wärmezufuhr
R_ϑ	[°C s/kcal],[°C/W]	Wärmewiderstand
s		Bohrreibungsanteil des Lagers
S_o		Sommerfeldzahl
T_A		Zeitkonstante beim Auslaufversuch
T_H		Haftzeit
T_ϑ	[s]	Wärmezeitkonstante
v	[m/s]	Geschwindigkeit
w_i		Gewichtungsfaktor eines KNN
x_0		Druckwinkel eines Schrägkugellagers
x_i		Eingangsgrößen eines KNN

Griechische Buchstaben für physikalische Größen

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
β	°	Lastwinkel
$\Delta\varphi_1$	°	Drehwinkelveränderung an der Spielstelle 1
$\Delta\varphi_2$	°	Drehwinkelveränderung an der Spielstelle 2
Φ	[Vms]	Magnetischer Fluss
γ	[mm²/s]	Viskosität des Schmierstoffes bei Betriebstemperatur
γ_1	[mm²/s]	Bezugsviskosität
η	[Ns/m²]	Dynamische Viskosität
ϑ	[°C]	Temperatur des Körpers
ϑ_0	[°C]	Referenztemperatur
ϑ_x	[°C]	gemessene Temperatur im Betrieb
ϑ_B	[°C]	Betriebstemperatur
ϑ_∞	[°C]	Beharrungstemperatur
φ_G	°	Verdrehwinkel des Getriebes
φ_G	°	Verdrehwinkel lastseitig
$\vartheta_{n,t}$	[°C]	Temperatur an der Reibstelle n zum Zeitpunkt t
ϑ_U	[°C]	Umgebungstemperatur
κ		Verhältnis des Schmierstoffs bei Betriebstemperatur zur Viskosität des Schmierstoffs bei Bezugstemperatur
λ	[m]	spezifische Schmierfilmdicke
μ		Reibkoeffizient
μ_G		Gleitreibungskoeffizient
μ_R		Rollreibungskoeffizient
μ_W		Wälzreibungskoeffizient
ν	[mm²/s]	kinematische Viskosität des Öls bzw. des Fett-Grundöls
ν_{40}, ν_{100}	[mm²/s]	kinematische Viskosität bei 40°C oder 100°C
θ	[°C]	Temperatur
σ_R	[µm]	Rauhheitskennwert
σ_1	[µm]	Rauhheitskennwert der Fläche 1

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
σ_2	[µm]	Rauhheitskennwert der Fläche 2
τ	[Pa]	Schubspannung
ω	[min^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit
ω_0	[min^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit beim Abschalten der Einheit
ω_L	[min^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit lastseitig
ω_M	[min^{-1}]	Winkelgeschwindigkeit motorseitig
ψ	[m]	relatives Lagerspiel

Statistische Formelzeichen

Abkürzung	Bezeichnung
$\bar{\mu}_i$	Mittelwertsvektor
t	Abtastzeitpunkt
0	Referenzindex
1	Überwachungsindex
$\Delta\Delta\mu$	1. Ableitung des Gradienten des Mittelwertes
$\Delta\mu$	Gradient des Mittelwertes
$\delta_{\mu i}(k)^{(1)}$	Distanzfunktion 1. Ordnung
$\delta_{\mu i}(k)^{(2)}$	Distanzfunktion 2. Ordnung
E{}	Erwartungswert
i	Laufvariable der Merkmale
k	Laufvariable der Lernstichprobe
μ	Mittelwert
m	Fensterbreite
M	Merkmalswert
N	Lernstichprobenumfang
σ	Standardabweichung
V	Variationskoeffizient

Sonstige Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
D	Dichtung
A	Antrieb
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
E	Endeffektor
EHD	Elastohydrodynamik
EMA	Elektomechanische Antriebseinheit
etc.	et cetera
F	Führung
G	Übersetzungsgetriebe
GfT	Gesellschaft für Tribologie
I	Strommessung
ISO	International Standard Organisation
KNN	Künstliche Neuronale Netze
L	Lager
LA	Lagegeber am Motor
LE	Lagegeber am Endeffektor
lin.	lineare Bewegung
LS	Lagegeber an der Spindel
NNFC	NeuronalNetworkFuzzyControl
PT1-Verhalten	Verzögerungsglied erster Ordnung
Q	Temperaturmessung
Q_0	Umgebungstemperatur
rot.	rotatorische Bewegung
S	Lagegeber im Tisch
SISO	Single-Input-Single-Output
T	Tisch
W	Drehwinkelgeber an der Spindel
X	Lageistwert indirekt gemessen mit Lagegeber am Motor
Y	Lageistwert indirekt gemessen mit Lagegeber an der Gewindespindel oder nach dem Getriebe
z	Zahnrad
Z	Lageistwert direkt gemessen mit Lagegeber am Endeffektor
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Lösungsansatz des neuen Überwachungs- und Diagnosesystems 24

Abbildung 3.1 Begriffe zur Maschinenzustandsbeschreibung nach DIN 31051 26

Abbildung 3.2 Gliederung der Instandhaltungsmaßnahmen nach DIN 31051 29

Abbildung 3.3 Generelle Vorgehensweise bei der Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose 31

Abbildung 3.4 Kennzeichen der Signalanalyse [Krü99], [Reu01], [Büt96] 34

Abbildung 3.5 Grundsätzliche Strategien und Verfahren der Merkmalsinterpretation 35

Abbildung 3.6 Systematik der Musterklassifikationsverfahren 41

Abbildung 3.7 Aufbau eines Künstlichen Neuronalen Netzes [Suw99] 43

Abbildung 3.8 Modellgestützte Verfahren für elektromechanische Antriebseinheiten 49

Abbildung 4.1 Schematische Abbildung einer elektromechanischen Antriebseinheit in einer Werkzeugmaschine 51

Abbildung 5.1 Charakterisierung der Reibung von tribologischen Systemen 56

Abbildung 5.2 a) Darstellung der Stribekkurve [Stri1902], b) Abhängigkeit der Reibungszahl μ, der Rauhigkeit R, der Schmierspalthöhe h und des Verschleißwiderstands von der spezifischen Schmierfilmdicke λ (Gl. 5.9) 57

Abbildung 5.3 Traganteil des Schmierfilms bei der elastohydrodynamischen Schmierung von Wälzlagern in Abhängigkeit von der spezifischen Schmierfilmdicke nach Anderson [And80] 61

Abbildung 5.4 Reibungsarten und deren Reibungszahlen [Bar99],[CzHa92] 62

Abbildung 5.5 Wirkplan einer elektromechanischen Antriebseinheit 65

Abbildung 5.6 Auslaufverhalten der elektromechanischen Antriebseinheit 70

Abbildung 5.7 Erwärmungsmodell [Schr00] 71

Abbildung 5.8 Erwärmung idealer Systeme 73

Abbildung 6.1 Merkmalsextraktion und Symptomgenerierung 78

Abbildung 6.2 Charakteristische Merkmalsverläufe 79

Abbildung 6.3 Trend- und Ereignisspeicher 83

Abbildung 7.1 Ablaufstruktur der Fehlerdiagnose bei elektromechanischen Antriebseinheiten 84

Abbildung 7.2 Maschinenelemente mit reibungs- und spielbehafteten Wirkpaarungen der elektromechanischen Antriebseinheit einschließlich Messstellen 85

Abbildung 7.3 Diagnostizierbare Fehler 86

Abbildung 7.4 Maschinenelemente und ihre tribologischen Systeme 87

Abbildung 7.5 a) Bezugsviskosität abhängig vom mittleren Lagerdurchmesser und der Drehzahl, b) V-T-Diagramm für Mineralöle [GfT84] 88

Abbildung 7.6 Prinzipieller Verlauf des Reibmoments und Reibwerts in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis P/C 90

Abbildung 7.7 Reibmoment von Wälzlagern [GfT84] 91

Abbildung 7.8 Prinzipieller Aufbau einer elektromechanischen Antriebseinheit mit Lagemesssystemen 94

Abbildung 7.9 Bestimmen periodisch bedingter Leicht- oder Schwergängigkeit 96

Abbildung 7.10 Modell für das Spiel 97

Abbildung 7.11 Bestimmen des Spiels in elektromechanischen Antriebseinheiten mit dem Inkrementalgeber am Motor 98

Abbildung 7.12 Regelklassen zur Messwert- und Merkmalsinterpretation 101

Abbildung 8.1 Aufbau der Versuchseinrichtung 103

Abbildung 8.2 Gesamtansicht der Versuchseinrichtung 105

Abbildung 8.3 Lagerstellen mit Thermoelementen 105

Abbildung 8.4 Kenndaten der Versuchseinrichtung 106

Abbildung 8.5 Typischer Strom- und Temperaturverlauf beim neuen Lager 110

Abbildung 8.6 Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Lagertemperaturen 112

Abbildung 8.7 Zusammenhang zwischen Motorstrom und Drehzahl 113

Abbildung 8.8 Strom- und Temperaturverlauf an den Lagern bei einem Ausfall des Lagers L3 115

1 Einleitung

Unerwartete Stillstände von verketteten Maschinen und Anlagen in der automatisierten Produktion führen zu kritischen Produktionsausfällen. Um diese zu vermeiden, müssen geeignete Maßnahmen zum frühzeitigen Erkennen sich anbahnender Störungen und Ausfälle getroffen und während einer geplanten Instandhaltung die Fehler schnell behoben werden. Für die Planung und Durchführung der Instandhaltung geeignete Strategien und Methoden werden unter dem Begriff zustandsorientierte Instandhaltung zusammengefasst. Ziel der zustandsorientierten Instandhaltung ist es, bei optimaler Ausnutzung der Verschleißreserven die Verfügbarkeit zu erhöhen sowie die geforderte Sicherheit und Produktqualität sicherzustellen. Gemäß DIN 40042 ist die Verfügbarkeit, die Wahrscheinlichkeit, ein System zu einem gegebenen Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen.

Die Umsetzung dieser Anforderungen in die Praxis erfordert eine Fehlererkennung und Diagnose, die bestimmten Kriterien genügt. Sie muss während des Betriebs und ohne Demontage der zu diagnostizierenden Maschinen kostengünstig durchführbar sein. Die dafür notwendigen Messgrößen müssen möglichst ohne zusätzliche Sensorik erfasst werden können und aussagefähige Informationen über den momentanen Zustand jedes einzelnen Maschinenelements liefern.

Anlagen und Maschinen in der Automatisierungstechnik haben als wichtigste Baugruppe elektromechanische Antriebseinheiten zum Positionieren und Bewegen von Objekten. Versagt eine Antriebseinheit, so kommt es zum Ausfall der gesamten Maschine oder Anlage. Deshalb ist bereits mit der Inbetriebnahme eine Fehlererkennung und Diagnose sicherzustellen. Die im Feld gewonnenen Erkenntnisse an einem oder mehreren identischen Antriebssträngen müssen zur Validierung, Verifizierung und Konkretisierung des vorhandenen Diagnosewissens genutzt und dafür als Wissensbasis gespeichert werden.

Schäden von Maschinenelementen in elektromechanischen Antriebssträngen kündigen sich oft durch ein geändertes Zeit- und Temperaturverhalten an. Ursache ist ein verändertes Reibverhalten oder Spiel, z.B. als Folge von Schmierstoffmangel bzw. Verschleiß. Eine Interpretation des reibungsbedingten Verhaltens im Sinne einer Fehlererkennung und Diagnose ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Fehlererkennung und Diagnose durch eine kombinierte Auswertung der Veränderungen im Zeit- und Temperaturverhalten entwickelt. Zur Auswertung werden Minimalmodelle definiert, die analog zum Vorgehen des Instandhaltungsexperten das für bestimmte Betriebszustände typische Zeit- und Temperaturverhalten abbilden. Die Interpretation der mit den Minimalmodellen extrahierten Merkmale erfolgt anhand von Regeln, die die Veränderungen des Zeit- und Temperaturverhaltens der Antriebseinheit beschreiben.

2 Ausgangssituation und Ziel der Arbeit

2.1 Problembeschreibung

Ausfälle von elektromechanischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik führen zu hohen Instandhaltungskosten. Insbesondere die indirekten Instandhaltungskosten durch Produktionsausfall, Nacharbeit und Ausschuss machen eine zustandsorientierte Instandhaltung im Sinne einer schnellen Fehlerdiagnose bei Ausfällen immer wichtiger. Die Fehlerfrühdiagnose sollte dem Instandhalter vor Ort, frühestmöglich und nachvollziehbar, sich anbahnende Fehler oder fehlerhafte Teile bzw. Baugruppen ankündigen. Bei bereits eingetretenen Störungen und Ausfällen muss die Fehlererkennung und Fehlerdiagnose in kurzer Zeit treffsicher die Ursache feststellen.

Einfache Verfahren zur Fehlererkennung und Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik reagieren auf das Überschreiten von einem oder wenigen Grenzwerten. Diese Verfahren arbeiten signalgestützt. In der Literatur findet man außerdem zahlreiche Vorschläge für modellgestützte Verfahren. Signalgestützte Verfahren erlauben wegen der Überlagerung mehrerer Signale am Messort, z.B. bei einer Körperschallmessung am Maschinengestell nur selten einen eindeutigen Rückschluss auf das geschädigte Maschinenelement. Bessere Ergebnisse liefert die Signalanalyse, wenn direkt am Maschinenelement gemessen und das Fehlersignal deutlich höher als das Umfeldgeräusch ist. Im laufenden Betrieb sind die Maschinenelemente von elektromechanischen Antriebseinheiten aber nur schwer zugänglich. Die Signalanalyse scheidet daher in der Automatisierungstechnik häufig aus. Die modellgestützten Verfahren werden wegen des hohen Modellierungsaufwands und der bisher unzureichenden Treffsicherheit nur selten eingesetzt.

Es fehlt ein Verfahren, das

- mit wenig zusätzlicher Hardware und Sensorik eine treffsichere Erkennung und Interpretation der Fehlermerkmale erlaubt,
- mit einer Messwerterfassung im laufenden Betrieb ohne Abschalten oder gar Demontage der Maschine auskommt,
- Fehler bzw. sich anbahnende Störungen und Ausfälle zum frühestmöglichen Zeitpunkt erkennt, um die erforderlichen Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen so planen zu können, dass ein Produktionsausfall vermieden wird,
- eine nachvollziehbare Interpretation ermöglicht, d.h. sich am Wissen und der Vorgehensweise des Instandhalters orientiert,

- einfach auf die vielen Varianten von elektromechanischen Antriebseinheiten angepasst werden kann, um mit der Erstinbetriebnahme aussagefähige Diagnosen treffen zu können,
- aus diskreten Ereignissen lernt und somit die Qualität der Interpretation mit der Zeit steigt.

Wegen der in der Automatisierungstechnik in hoher Stückzahl eingesetzten elektromechanischen Antriebseinheiten lohnt sich der Aufwand, der für die Entwicklung einer umfassenden Lösung notwendig ist.

2.2 Ziele

Ziel der Arbeit ist es, ein Verfahren zur Fehlererkennung und Diagnose zu entwickeln, das bei elektromechanischen Antriebseinheiten für die Automatisierungstechnik eingesetzt werden kann. Unter einer elektromechanischen Antriebseinheit versteht man eine Anordnung bei der ein Elektromotor einen Endeffektor bewegt. Zur Erzeugung der geforderten Bewegungen, Kräfte und Momente sind neben dem Elektromotor Getriebe, Gewinde-, Zahnstangen-, Zahnriementriebe sowie Lager oder Führungen notwendig.

Das zu entwickelnde Verfahren muss sich an der Vorgehensweise des Instandhaltungsexperten bei der Fehlersuche orientieren, der aufgrund seiner Erfahrung in Gedanken individuelle Partialmodelle - sogenannte Minimalmodelle - verwendet, die bei bestimmten Betriebszuständen das physikalische Verhalten mit ausreichender Genauigkeit nachbilden und es ihm erlauben, einzelne charakteristische Merkmale isoliert zu betrachten. Merkmalswerte mehrerer Minimalmodelle sind Grundlage für eine Gesamtbewertung, die schließlich zu Art, Ursache, Ort und Auswirkung des Fehlers führen.

Folglich muss ein Überwachungs- und Diagnosesystem, aus den bei bestimmten Betriebszuständen erfassten und vorverarbeiteten Messwerten, mit Hilfe von Minimalmodellen die fehlercharakterisierenden Merkmale extrahieren. Die Merkmalswerte werden einem Regelinterpreter zugeführt, der das Fehlerverhalten der gesamten elektromechanischen Antriebseinheit enthält und damit auf einen sich anbahnenden oder vorhandenen Fehler an einem Maschinenelement schließt. Damit keine fehlerrelevanten Informationen verloren gehen, muss die Fehlerentwicklung längerfristig als Trend registriert sowie diskrete Ereignisse gespeichert und in ihrer Häufigkeit und Intensität in den Diagnoseprozess einbezogen werden.

Als weitere Anforderungen muss das Überwachungs- und Diagnosesystem

- leicht an unterschiedliche elektromechanische Antriebseinheiten adaptierbar sein,
- bereits mit der Inbetriebnahme der ersten Antriebseinheit eingesetzt werden können,

- eine für den Instandhalter nachvollziehbare Interpretation durch überschaubare Minimalmodelle sowie die Verwendung von Regeln liefern,
- nicht nur die mechanischen, sondern auch die thermischen Effekte als Fehlerindikatoren nutzen,
- aus Erfahrungen lernen und so Modelle höherer Ordnung implizieren,
- mit wenig Sensoren ein Maximum an Aussagekraft erzielen.

Benötigt wird ein Überwachungs- und Diagnosesystem, das mit Hilfe von Minimalmodellen und einem Regelinterpreter auf sich anbahnende Fehler oder fehlerhafte Maschinenelemente schließt.

2.3 Grundidee der Arbeit

Die Grundidee ist, analog zum Vorgehen des Instandhaltungsexperten bestimmte Betriebszustände der Maschine zu nutzen, um aus Abweichungen vom hierfür typischen Verhalten auf den Zustand der Maschine zu schließen. Die Komplexität beherrscht der Instandhaltungsexperte durch eine Segmentierung der gesamten Antriebseinheit in überschaubare Substrukturen und Prozesse. Er bevorzugt Betriebszustände bei denen nur einige oder wenige Parameter einen Einfluss haben. Die vom Instandhaltungsexperten gespeicherten einfachen Erfahrungsmodelle dienen dann zur Interpretation und zum Schließen auf den Fehler. Diese Vorgehensweise wird auf die bei der Diagnose üblichen Prozessschritte abgebildet.

Bei der Merkmalsdefinition wird zwischen dauerfesten und betriebsfesten Maschinenelementen der elektromechanischen Antriebseinheiten unterschieden. Dauerfeste Maschinenelemente werden aus der Betrachtung weitgehend ausgeschlossen. Bei den betriebsfesten Maschinenelementen treten Schäden vor allem an den relativ zueinander bewegten, meist geschmierten Kontaktstellen von Maschinenelementen auf, das sind z.B. Lager, Getriebe und Führungen.

Als Merkmalswerte für die Beurteilung des Reibzustandes sind die viskosen und coulomb´schen Reibanteile geeignet. Eine Grundidee der Arbeit ist diese empfindlichen Merkmale isoliert bei ausgewählten Betriebszuständen zu erfassen. Für die Ermittlung des viskosen Anteils der Reibung ist der stromlose Auslauf des Antriebsmotors geeignet, für die Ermittlung des coulomb´schen Anteils eine sehr langsame Vorschubgeschwindigkeit, z.B. während der Referenzfahrt zur Nullpunktbestimmung. Die dabei auftretende Reibung wirkt der Bewegung entgegen und belastet den Elektromotor. Wenn das Antriebssystem, wie in der Automatisierungstechnik üblich, starr aufgebaut ist oder im ausgewählten Betriebszustand als starr betrachtet werden kann, reagiert der Motor unmittelbar auf Veränderungen, bei ungeregelten Antriebsein-

heiten durch einen Drehzahlabfall, bei geregelten durch eine höhere Stromaufnahme, die in modernen Antriebsreglern drehwinkel- bzw. wegabhängig erfasst zur Verfügung stehen. Der fließende Strom ist proportional zu den auftretenden Widerstandsmomenten.

Beobachtet wird vor allem die zeitliche Änderung des Reibmoments. Da die Reibung in tribologischen Systemen wesentlich vom Schmierzustand abhängig ist, können damit nicht nur die Zustände der Kontaktpartner, sondern auch Veränderungen des Schmierzustands über der Zeit erfasst und beurteilt werden. Die Temperatur des Schmierstoffes wird berücksichtigt, wenn sie über die Viskosität einen signifikanten Einfluss auf die Reibung hat. Eine weitere Grundidee der Arbeit ist die hierfür notwendigen Temperatursensoren auch zur Erfassung der erzeugten Reibenergie zu verwenden. Damit ist es möglich, den Ort und die Ursache der erhöhten Reibung zu identifizieren. Neu ist es, die Temperatur einer Messstelle nicht isoliert zu betrachten, sondern die relative Temperaturänderungen bezogen auf die übrigen Temperaturmessstellen zu verwenden, um damit Einflüsse, wie z.B. die Belastung die gleichermaßen an allen Reibstellen wirkt, zu neutralisieren. Ob die relativen Temperaturänderungen allein für eine Fehlerdiagnose geeignet sind, wird überprüft.

Die hochauflösende Antriebsregelung, die bis zu niedrigsten Drehzahlen stabil arbeitet, wird auch dazu verwendet, um über die Stromaufnahme periodisch winkelabhängig auftretende Fehler sowie Veränderungen des Spiels zwischen den Kontaktflächen unter Beachtung der Übersetzung und Trägheitsmomente zu erfassen und einem Fehlerort zuzuordnen. Eine weitere Verbesserung ergibt sich, wenn zusätzlich die Signale mehrerer Lagegeber ausgewertet werden.

Die extrahierten Merkmale werden durch Regeln verknüpft und interpretiert, wodurch indirekt ein Instandhaltungsmodell der gesamten Einheit entsteht, das auch Einflüsse höherer Ordnung berücksichtigt. Im Gegensatz zu den bekannten modellgestützten Ansätzen ist die Interpretation für den Experten aber durchgehend nachvollziehbar. Die entwickelte Diagnosestrategie wird als ’Divide-et-impera’-Ansatz charakterisiert. Sie ist in Abbildung 2.1 grafisch dargestellt.

Da elektromechanische Antriebseinheiten wenige typische Baustrukturen haben, lässt sich das Verfahren leicht auf Varianten übertragen, wenn das typische Verhalten der einzelnen Maschinenelemente bekannt ist.

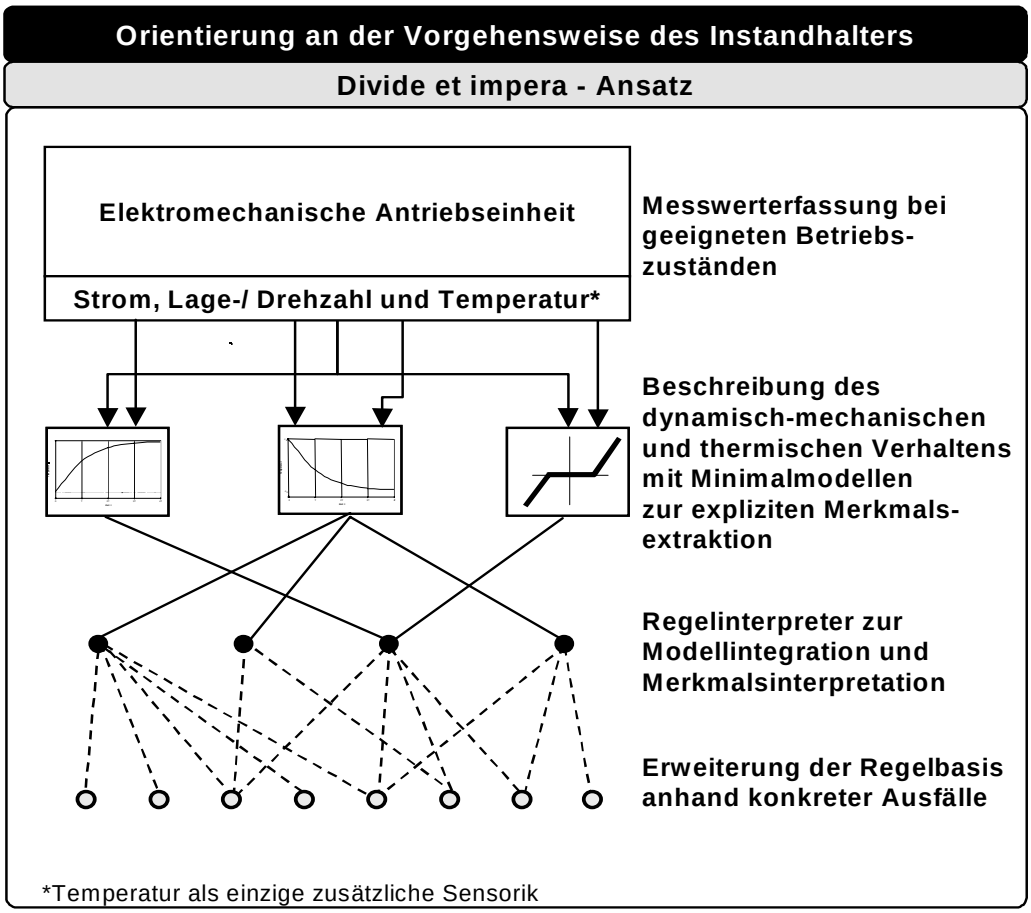


Abbildung 2.1 Lösungsansatz des neuen Überwachungs- und Diagnosesystems

3 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung und Technik zur Überwachung und Diagnose dargestellt. Zunächst werden in Kapitel 3.1 die grundlegenden Begriffe und Definitionen erläutert. Fehler und Schädigungen an elektromechanischen Antriebseinheiten werden in Kapitel 3.2 diskutiert. In Kapitel 3.3 werden die Grundlagen der Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose behandelt, Anwendungen bei elektromechanischen Antriebseinheiten in Kapitel 3.4 speziell dargestellt.

3.1 Überwachung und Diagnose als Elemente der Instandhaltungsstrategie

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit konzentrieren sich auf die Maschinenzustandsüberwachung und Diagnose, als wesentliches Hilfsmittel der Instandhaltung. Ziel der Überwachung und Diagnose ist die Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit von technischen Systemen sowie der geforderten Qualität von Prozessen und Produkten [Din98],[Web96],[Wes94].

Die Aufgabe der Überwachung ist die fortlaufende oder intermittierende Erfassung und Bewertung relevanter Kenngrößen zur Ermittlung des aktuellen Systemzustandes. Die Überwachung wird üblicherweise während des Betriebes ausgeführt. Die Diagnose hat darüber hinaus die Aufgabe, einen Fehler zu Erkennen sowie dessen Ort und die Ursache zu identifizieren. Für die Diagnose sind alle kritischen Merkmalswerte des Systems zu definieren, um sie mit den erfassten, aktuellen Merkmalswerten, d.h. den Prozess- und Maschinenzuständen, vergleichen zu können. Die Interpretation der Merkmalswerte führt zur Entscheidung, ob ein Fehler vorliegt. Ein Fehler ist ein Zustand einer Einheit in dem sie unfähig ist eine geforderte Funktion zu erfüllen, ausgenommen die Unfähigkeit während der Wartung oder anderer geplanter Maßnahmen oder infolge des Fehlens äußerer Mittel. Im Gegensatz zum Fehler charakterisiert eine Störung den Zustand einer Einheit, die aus beliebigem Grund unfähig ist, eine geforderte Funktion zu erfüllen. Mit Ausfall wird das Ereignis bezeichnet, das zur Beendigung der Fähigkeit einer Einheit führt, eine geforderte Funktion zu erfüllen [Vos88],[EN13306]. Der Begriff Schaden wird in der Zuverlässigkeitstheorie verwendet und bezeichnet das Unterschreiten eines bestimmten Grenzwertes des Abnutzungsvorrats (Schadensgrenze), der eine im Hinblick auf die Verwendung unzulässige Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit bedingt [Ber89],[BeLe99],[Schl01]. Den technischen Prozess der zu einem Schaden führt, nennt man Schädigung [DIN31051],[VDI3822]. In Abbildung 3.1 sind die Zusammenhänge mit den Phasen der Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose dargestellt.

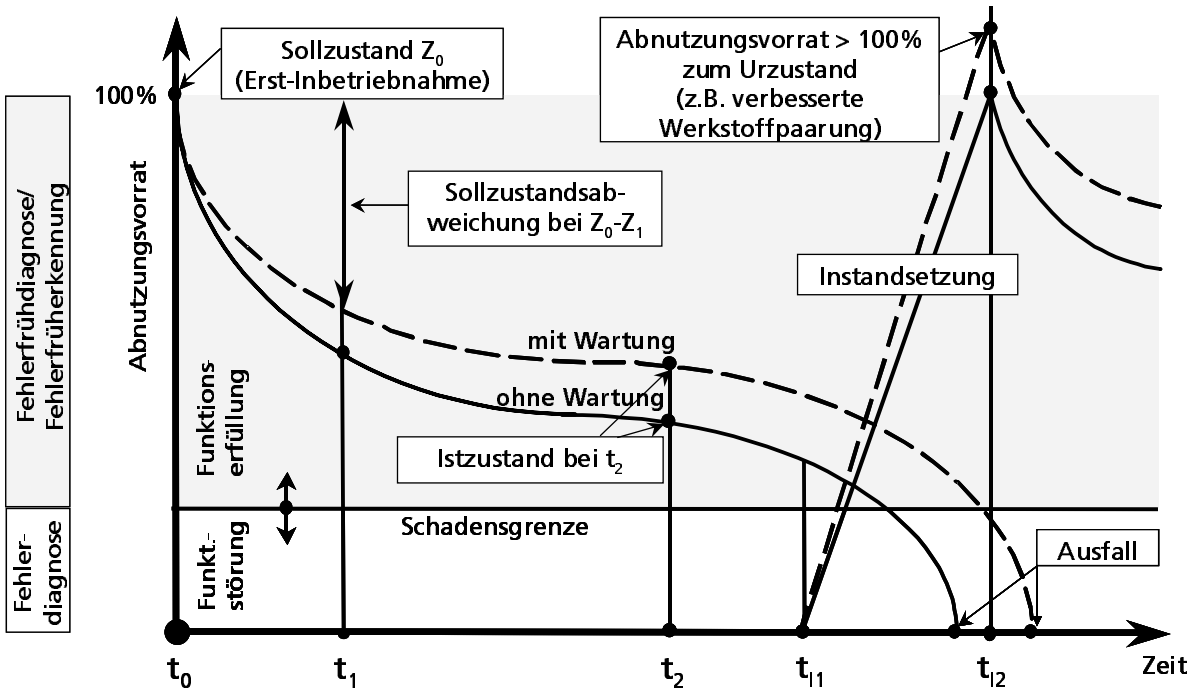


Abbildung 3.1 Begriffe zur Maschinenzustandsbeschreibung nach DIN 31051

Bei der Überwachung und Diagnose von technischen Systemen wird zwischen Produkt-, Prozeß- und Maschinenzuständen unterschieden [Web96]. Bei der Produktüberwachung und -diagnose wird das Werkstück bzw. das montierte Bauteil auf Merkmalsabweichungen überprüft und durch Interpretation der Merkmale auf Produktfehler geschlossen. Die Prozeßüberwachung und -diagnose betrachtet den Produktionsprozess aus technologischer Sicht und führt auf Grund von Abweichungen der Prozeßmerkmale eine Interpretation durch [West94]. Die Maschinenzustandsüberwachung und -diagnose [Wec01] überwacht und diagnostiziert das Betriebsmittel und dessen Komponenten. Aufgrund der logischen Wirkungskette von System-Prozess-Produkt können sich Auswirkungen von Störungen in der Produktion, am Produktionssystem, am Produktionsprozess oder am Produkt selbst bemerkbar machen [Wes94],[WeSi99].

Die Fehlerfrühdiagnose versucht, sich anbahnende Fehler bereits im Frühstadium zu diagnostizieren. Die Fehlerfrühdiagnose gehört zur Strategie der zustandsabhängigen Instandhaltung nach DIN 31051. Bei der Fehlerdiagnose wird nach einer bereits eingetretenen Störung oder einem Ausfall auf den Ort und die Ursache des Fehlers geschlossen.

Grundsätzlich unterscheidet man heute drei Strategien bei der Instandhaltung [WeSi99],[Jac92],[Kel97]:

- Die **Präventivstrategie** oder **zeitorientierte Instandhaltung**, bei der ausfallgefährdete Komponenten und Bauteile in regelmässigen Intervallen ausgetauscht und somit oft nur ungenügend genutzt werden. Neben einem hohen Wartungsaufwand ergeben sich infolge häufiger Montagevorgänge zusätzliche Fehlerquellen.
- Die **zustandsabhängige Strategie** gilt als "Idealkonzept", da die Maschinen und Komponenten nicht früher und nicht später instandgesetzt werden, als ihr Zustand es tatsächlich verlangt. Durch Erfassen des Ist-Zustands mit anschließendem Soll-Ist-Vergleich versucht man den Abnutzungsvorrat, die Restnutzungsdauer und den Ausfallzeitpunkt zu bestimmen.
- Die **ausfallbedingte Strategie** oder **schadensorientierte Instandhaltung**, die meistens zu kostenintensiven und z.T. riskanten "Feuerwehraktionen" führt, da die Maschine bis zum Ausfall betrieben wird.

Um eine hohe Verfügbarkeit sicherzustellen, müssen Störungen oder Ausfälle vermieden oder schnell behoben werden. Die Fehlerfrühdiagnose muss sich anbahnende Fehler so frühzeitig erkennen, dass rechtzeitig Instandhaltungsmaßnahmen eingeleitet und durchgeführt werden können. Die Fehlerdiagnose muss schnell und treffsicher Fehlerort und Ursache feststellen, um Störungen oder Ausfälle rasch beseitigen zu können. Leistungsfähige Verfahren zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose können einen wichtigen Beitrag zur Minimierung der direkten und indirekten Instandhaltungskosten leisten [Pro02],[BeMa87].

3.2 Schädigungen an elektromechanischen Antriebseinheiten - Ursache der Instandhaltung

Zu den wichtigsten Baugruppen in Maschinen und Anlagen in der Automatisierungstechnik zählen elektromechanische Antriebseinheiten, die aus vorgegebenen Bewegungsanweisungen entsprechende Bewegungen erzeugen. Die Bewegungsanweisungen werden in der Steuerungseinheit ausgewertet und gehen über den Interpolator als Führungsgröße an die Regelung der elektromechanische Antriebseinheit. Aus der Führungsgröße wird vom Motor eine Drehwinkeländerung erzeugt, die durch die mechanischen Übertragungselemente in eine entsprechende Lageänderung des zu bewegenden Maschinenteils umgesetzt wird [Wec01]. Alternativ werden Linearantriebe eingesetzt.

Dabei werden hohe Anforderungen an die Maschinengenauigkeit der Antriebseinheit gestellt [Spu96]. Elektromechanische Antriebseinheiten müssen so beschaffen sein, dass

- die Änderungen der Führungsgröße mit geringer Verzögerung vom zu bewegenden Maschinenteil exakt ausgeführt werden und
- der Übergang von einer Position in eine andere, bei den hohen dynamischen Anforderungen ohne Schwingungen erfolgt.

An die mechanischen Komponenten sind daher neben einer hohen Herstellungsgenauigkeit, d.h. Konstruktions-, Fertigungs- und Montagegenauigkeit auch hohe Anforderungen an die Steifigkeit, Dämpfung sowie Spiel- und Verschleißfreiheit zu stellen. Dennoch sind Schädigungen selbst bei günstiger Konstruktion sowie optimalen Betriebsbedingungen kaum zu vermeiden. Es ist also sinnvoll die Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose an den elektromechanischen Antriebseinheiten einzusetzen.

Schädigungen verändern durch physikalische und chemische Wirkungen die Struktur, die Abmessung und die Zuordnung der Einheit. Bei den Schädigungsarten (=Erscheinungsformen des schädigenden Einflusses) wird zwischen Abnutzung, Überlastung und sonstigen Schädigungen (z.B. Brand, Hochwasser) unterschieden [Eic90]. Die Abnutzung bestehend aus Verschleiß, Korrosion, Ermüdung und Alterung ist die bedeutendste Schädigungsart und lässt sich selbst bei Normalbetrieb kaum vermeiden. Die Überlastung hat ihre Ursache dagegen in einem fehlerhaften Einsatz und/oder fortgeschrittener Abnutzung, und kann zu einer beschleunigten und/oder höheren Schädigung sowie zum sofortigen Ausfall der Einheit führen.

Bei elektromechanischen Antriebseinheiten treten vor allem Schädigungen an den tribologischen Systemen auf. Unter einem tribologischen System versteht man ein System aus zwei Reibkörpern, einem Umgebungsmedium und einem Zwischenstoff, das durch die Einleitung von Kräften Relativbewegungen zwischen den Reibkörpern ausführt. Reibung entsteht sowohl beim Einleiten (Haft- oder Ruhereibung) als auch beim Aufrechterhalten der Bewegung (Gleit- oder Bewegungsreibung). Die Reibkraft wirkt entgegen der Bewegungsrichtung. Das tribologische System kann als Black-Box dargestellt werden, wobei Kräfte und Relativbewegungen den Energie-Input darstellen. Als Ergebnis des Prozesses sind der Informations-Output (Geräusche, Körperschall), der Energie-Output (freiwerdende Wärme) sowie der Stoff-Output (Verschleißprodukte, Leckage) festzustellen [Eic90].

Zur Beurteilung von tribologischen Systemen wurden daher zahlreiche Verfahren entwickelt, die die Veränderungen der Input- und/ oder Output-Größen an tribologischen Systemen erfassen und bewerten. So wurden verschiedene mathematisch-physikalische Modelle zur direkten Bestimmung der Größen entwickelt, d.h. es wird mit Hilfe von Modellen aus den gemessenen Größen der Antriebseinheit direkt auf Veränderungen der Kräfte und Relativbewegungen im Tribosystem geschlossen. Man spricht hier von modellgestützten Verfahren, die aufgrund ihrer

Bedeutung für die sensorlose Diagnose in Kapitel 3.3.1 ausführlicher behandelt werden. Zur Beurteilung der Output-Größen ist meist ein zusätzlicher Aufwand an Sensorik erforderlich. Für die Diagnose der Output-Größen werden bevorzugt Schmierstoffanalysen, thermische Methoden sowie Schwingungs- und Schallanalysen eingesetzt [Hil94]. Neben Verschleiß treten in tribologischen Systemen noch Schädigungen als Folge von Ermüdung (z.B. Pitting, Risse und Brüche) durch mechanische Beanspruchung sowie Alterung bei Dichtungen und Schmierstoff auf.

Für die Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose werden vor allem thermische Methoden sowie die Schwingungs- und Schallanalyse eingesetzt, da sie bei laufendem Betrieb der Anlage eingesetzt werden können [Kol95]. In Forschung und Praxis gibt es zahlreiche Untersuchungen und Anwendungen der Schwingungs- und Schallanalyse, die zu den signalgestützten Verfahren zählen und in Kapitel 3.3.1 gesondert betrachtet werden.

Ermüdungsschäden wie z.B. Risse, Dauerbruch oder Bruch können auch an Maschinenelementen ohne Tribokontakt (z.B. Wellen) als Folge von mechanischer Beanspruchung und/oder Konstruktions-, Fertigungs- und Montagefehler auftreten. Neben den Verfahren der Oberflächen- und Werkstoffprüfung kommen hier bevorzugt signalgestützte Verfahren zum Einsatz. Da diese Maschinenelemente bei elektromechanischen Antriebseinheiten aber meist dauerfest ausgelegt werden, sind sie aus der Sicht der Instandhaltung unkritisch [StRö96],[Wec01].

An elektromechanischen Antriebseinheiten müssen daher primär Instandhaltungsmaßnahmen an Maschinenelementen mit tribologischer Beanspruchung durchgeführt werden. Die Maßnahmen der Instandhaltung umfassen nach DIN 31051 die Funktionen Wartung, Inspektion und Instandsetzung, siehe Abbildung 3.2.

Abbildung 3.2 Gliederung der Instandhaltungsmaßnahmen nach DIN 31051

Im folgenden werden die wichtigsten Instandhaltungsmaßnahmen für den mechanischen Teil der elektromechanischen Antriebseinheit kurz vorgestellt:

- Besondere Bedeutung kommt dem Erkennen und Bewerten des Schmierstoffs (Zwischenstoff) bei Maschinenelementen im tribologischen System zu, da er bei gegebener Konstruktion meist die einzige Möglichkeit für den Instandhalter ist, den Verschleißprozess positiv zu beeinflussen (Wartung). Durch entsprechende Maßnahmen wie z.B. die Wahl des richtigen Schmierstoffs, Nachschmieren bei Schmierstoffmangel oder Schmierstoffwechsel bei Verunreinigungen kann nicht nur ein Schaden vermieden, sondern auch die Lebensdauer des Maschinenelements deutlich verlängert werden.
- Neben dem Schmierstoff sind die Ist-Zustände an den Kontaktflächen zu beurteilen, da Schädigungen infolge von Verschleiß oder Ermüdung (z.B. Pitting) zu unzulässigen mechanischen Schwingungen führen. Bei zu großen Schädigungen kann der Soll-Zustand meist nur durch Aufarbeiten der Kontaktflächen oder Teiletausch wieder hergestellt werden.
- Das Erkennen und Bewerten von unzulässigen Spielzuständen infolge zu hohen Verschleißes oder thermischer Effekte ist eine weitere Aufgabe der Instandhaltung. Bei unzulässigem Spiel besteht meist die Möglichkeit, durch Veränderung der Vorspannung den Soll-Zustand wieder herzustellen. Ansonsten muss der Soll-Zustand durch Aufarbeitung des Bauteils oder Teiletausch wieder hergestellt werden. Dies gilt auch für Welle-Nabe-Verbindungen (z.B. Passfedern) und formschlüssige Bauteile (z.B. Zahnriemen) ohne tribologische Beanspruchung.
- Frühzeitiges Erkennen und Bewerten von Veränderungen der Steifigkeit und Dämpfung als Folge von Ermüdung und Alterung des Werkstoffes an allen mechanischen Komponenten, um vor einer ausfallrelevanten Schädigung des Maschinenelements, Maßnahmen zur Wiederherstellung des Soll-Zustandes einleiten zu können.

Bei der Instandhaltung des Elektromotors geht es vor allem um die Beurteilung der Motorlager und die Alterung der Wicklungsisolation. Die Bewahrung und Wiederherstellung des Soll-Zustandes bedeutet mit Ausnahme der Motorlager meist einen Austausch des kompletten Motors. Die Instandhaltungsmaßnahmen bei den Motorlagern sind identisch mit denen bei Lagern des mechanischen Teils der Antriebseinheit.

Für die Instandhaltung von elektromechanischen Antriebseinheiten sind daher vor allem Verfahren zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose bei mechanischen Baugruppen zu entwickeln, mit dem Ziel Fehler und Schädigungen an den mechanischen Bauteilen frühzeitig zu erkennen, um den Schädigungsverlauf positiv beeinflussen, Störungen, Ausfälle und Schäden vermeiden sowie die geforderte Verfügbarkeit und die Fertigungsqualität der Maschine oder Anlage sicherzustellen zu können.

3.3 Prinzipien und Verfahren zur zustandsabhängigen Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose

Bei der Diagnose wird anhand von Messwerten oder menschlichen Beobachtungen auf den aktuellen Zustand des Prozesses oder der Maschine geschlossen. Die Diagnose kann in Anlehnung an STURM [StFö88], [Stu96] in die folgenden prinzipiellen Schritte gegliedert werden, siehe Abbildung 3.3.

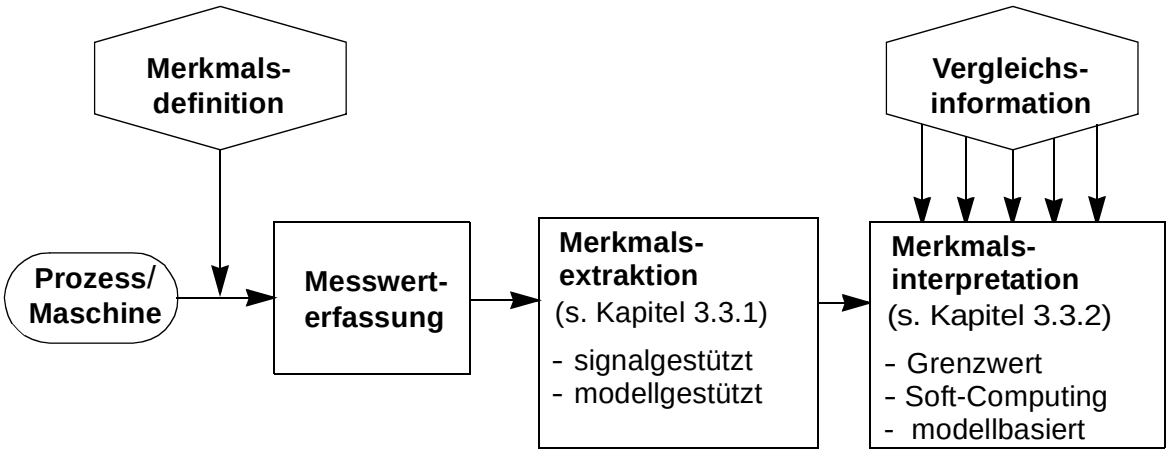


Abbildung 3.3 Generelle Vorgehensweise bei der Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose [StFö88]

1. **Merkmalsdefinition:** Auswahl der relevanten Messwerte und Merkmale für die zu diagnostizierenden Fehler und ihre Erscheinungen sowie Festlegung der hierfür erforderlichen Sensorik. Als Merkmale sind prinzipiell alle physikalischen und chemischen Größen geeignet, mit denen sich Fehler, wie z.B. Schmierstoffmangel, unzulässiges Spiel, Klemmen oder geschädigte Reibflächen in einem technischen System detektieren lassen. Die Merkmalsdefinition steht daher in engem Zusammenhang mit der Merkmalsinterpretation und setzt ein hohes Maß an Erfahrungswissen voraus [Din98].

2. **Meßwerterfassung:** Erfassung, Vorverarbeitung und gegebenenfalls Speicherung der in Schritt 1 definierten Messwerte nach einem festgelegten Schema entweder offline oder online, kontinuierlich, periodisch oder ereignisgesteuert [Pla93].
3. **Merkmalsextraktion:** Die gemessenen Rohdaten sind selten als Eingangsgrößen für die Merkmalsinterpretation geeignet, so dass aus ihnen zunächst die fehlerrelevanten Informationen durch geeignete Verfahren extrahiert werden müssen. Man unterscheidet generell die Kontrolle direkt messbarer Signale (=direkte Verfahren) wie die Grenzwertüberwachung sowie die signal- und modellgestützten Verfahren (indirekten Verfahren) [Bog94],[Col77], [Ise94], [Fre93].
4. **Merkmalsinterpretation:** Die durch den Experten beobachteten bzw. durch die Merkmalsextraktion gewonnenen Merkmalsabweichungen (Symptome) müssen abschließend hinsichtlich Fehlerort und -ursache interpretiert werden. Hierzu benötigt man Fachwissen über die Prozesse, die Maschine, die Maschinenhistorie sowie die Zusammenhänge von Ursache und Wirkung des zu erkennenden/ diagnostizierenden Fehlers, das in Form von Modellen bzw. Expertenregeln (explizites Wissen) oder Fallbeispielen (implizites Wissen) vorliegen kann. Die Kombination dieses Wissens und das kontextabhängige Schlussfolgern des Experten in all seinen Kombinationen lässt sich aus heutiger Sicht nur bedingt auf einen Computer übertragen und ist extrem anwendungsabhängig [Din98].

Aufgrund ihrer Bedeutung für die Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose werden die Verfahren der Merkmalsextraktion in Kapitel 3.3.1 und die Verfahren der Merkmalsinterpretation in Kapitel 3.3.2 ausführlich dargestellt.

3.3.1 Verfahren der Merkmalsextraktion und Symptomgenerierung

Die Aufgabe der Merkmalsextraktion ist die Gewinnung aussagekräftiger Merkmale die direkt oder nach einer Grobbewertung im Sinne von zulässigen/unzulässigen Abweichungen (in diesem Fall spricht man von Symptomgenerierung) als Eingangsgrößen für die Merkmalsinterpretation dienen.

Grundlage für eine sichere und zuverlässige Fehlererkennung sind dabei Merkmale, die signifikant hinsichtlich eines Fehlers und möglichst unbeeinflusst vom regulären Ablauf sind [Reu01]. Da selbst bei störungsfreiem Betrieb die gemessenen Signale durch den Fertigungsprozess, das Maschinenverhalten und die zu fertigenden Produktvarianten beeinflusst werden, ist es in vielen Fällen schwierig, einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Signalen und einem Fehler zu finden. Dies gilt insbesondere für Einzel- und Kleinserienfertigungen mit häufigen Arbeitspunktwechseln [Kon97].

Es gibt daher heute keine anwendungsunabhängigen Verfahren der Merkmalsextraktion, sondern nur problemangepasste Lösungsansätze. Unterschieden wird zwischen signal- und modellgestützten Verfahren die im folgenden näher erläutert werden:

Signalgestützte Verfahren der Merkmalsextraktion

Bekannte Verfahren zur Überwachung und Diagnose von mechanischen Maschinenkomponenten und elektromechanischen Antriebseinheiten basieren überwiegend auf signalgestützten Verfahren. Bei den signalgestützten Verfahren werden, aus den mit zusätzlicher Sensorik gewonnenen Schwingungs- und Körperschallsignalen, mit Methoden der Zeit-, Frequenz- oder Wavelet-Analyse sowie mit statistischen Verfahren die signifikanten Merkmale gewonnenen. Ziel ist es, den im gemessenen Zeitsignal unüberschaubaren Informationsgehalt auf wenige essentielle Kennwerte und Kennfunktionen zu reduzieren. Zur quantitativen Beschreibung von Merkmalen im Zeitbereich werden meist statistische Größen wie Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Kurtosis als Kennwerte aus dem Signalverlauf berechnet [Hil94],[Kol95],[Reu01]. Der Signalauswertung im Zeitbereich kommt vor allem bei zeitkritischen Überwachungsvorgängen besondere Bedeutung zu, da sie ohne rechenintensive Transformationsvorschriften auskommt. Lassen sich im Zeitbereich keine geeigneten Merkmale zur Fehlererkennung extrahieren, gibt es die Möglichkeit die Signale zu transformieren [Reu01],[Rem98],[Suw99], [Rit96],[Jan93],[Kol95], [Nat92].

Die Signalauswertung im Frequenzbereich ist bei Signalen sinnvoll, bei denen sich verschiedene, periodische Signalanteile überlagern. Die Transformation des Signals in den Frequenzbereich erfolgt meist mit Hilfe der Fast-Fourier Transformation, einer Sonderform der Fourier Transformation für diskrete Messwerte. Sie bildet im Frequenzbereich die Intensität und Verteilung der einzelnen Periodizitäten in Form von Amplituden- und Leistungsspektren ab [Kol95]. Eine eingehende Untersuchung der charakteristischen Frequenzen von Bearbeitungsprozess, Messkette, Werkzeug und Produktionsmittel erlaubt eine differenzierte Betrachtung von Schwingungsursachen sowie charakteristischen Ausprägungen in den gemessenen Sensorsignalen. Veränderungen in den frequenztransformierten Signalen lassen sich dann aus dem Verlauf des Amplituden- und/oder Leistungsspektrums ermitteln.

Im Unterschied zur Auswertung mit der Fourier-Transformation, bei der sich nur eine feste Fenstergröße für den gesamten Frequenzbereichs des Signals wählen lässt, werden bei der Wavelet-Analyse die Signale für verschiedene Frequenzbereiche mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung bewertet [Nat92]. Die Wavelet-Analyse berücksichtigt also sowohl die zeitlichen Änderungen des Signalverlaufs als auch unterschiedliche Frequenzanteile eines Signals. Die

Wavelet-Analyse liefert somit bei hochfrequenten Signalanteilen eine sehr gute zeitliche Auflösung und in niedrigen Frequenzbereichen eine sehr gute spektrale Auflösung, so bietet sich ihr Einsatz insbesondere bei instationären und hochdynamischen Signalen an. Hieraus ergeben sich Vorteile für die Wavelet-Analyse wenn Prozesse nur in sehr kurzen Zeitfenstern konstant sind, Abbildung 3.4.

Zeitbereich	Frequenzbereich	Wavelet-Analyse
• zeitlicher Signalverlauf	• Transformation des Signals in den Frequenzbereich	• Kodierung des Signals in Wavelet-Koeffizienten
• Signalanalyse in kontinuierlichen oder zeitlich begrenzten Ausschnitten	• Transformation mit Hilfe der Fourier-Analyse und daher rechenintensiv	• Anpassung der Länge eines Signalbandes an das zu analysierende Frequenzband
• Auswertung durch Mittelwertbildung, Regressionsanalyse und Verfahren der Zeitreihenanalyse	• Auswertung der Amplituden- und Leistungsspektren	• Auswertung sowohl des zeitlichen wie der spektralen Zusammensetzung innerhalb des Frequenzbandes
• geeignet für zeitkritische Prozesse, da keine Transformation	• geeignet für Prozesse mit periodisch wiederholenden Anteilen	• geeignet für Prozesse mit instationären Signalen

Abbildung 3.4 Kennzeichen der Signalanalyse [Krü99], [Reu01], [Büt96]

Wie bereits ausgeführt, basieren eine Vielzahl der Verfahren zur Überwachung und Diagnose in der Automatisierungstechnik auf der Schwingungs- und Schallanalyse. Ein Großteil der Verfahren wird vor allem für die Diagnose von Bearbeitungsprozessen oder für einzelne Antriebskomponenten wie Elektromotoren und Wälzlager eingesetzt. Signalgestützte Verfahren zur Diagnose von kompletten Maschinen und/ Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik finden in der Praxis aber aus zahlreichen Gründen nur bedingt Akzeptanz und führen nach kurzer Zeit zur Abschaltung der standardmässig eingebauten Maschinenzustandsüberwachung [Suw99], [Kön95]. Dies liegt vor allem in den Anforderungen, die an eine signalgestützte Merkmalsgewinnung zu stellen sind:

- So müssen die Messwertaufnehmer möglichst nahe am zu erwartenden Fehlerort angebracht werden, um Störsignale von benachbarten Bauteilen und Maschinen zu vermeiden, damit höherfrequente Signale ungedämpft bzw. ungedämmt mit geringer Signalverzerrung

erfasst werden können. Aufgrund ihrer kompakten Bauweise und den hochdynamischen Abläufen ist dies an elektromechanischen Antriebseinheiten meist nicht oder nur schwer möglich.

- Die fehlercharakteristischen Signalanteile müssen bekannt und von den charakteristischen Frequenzen des Bearbeitungsprozesses, der Messkette, den Maschinenkomponenten und der Maschine separierbar sein, um sie als Merkmale aus den Messsignalen extrahieren zu können. Dies erfordert neben einem hohen Methodenwissen auch sehr fundierte system-theoretische Kenntnisse, die in der Instandhaltung meist nicht vorhanden sind.

Die Anwendung signalgestützter Methoden bei elektromechanischen Antriebseinheiten ist im Vergleich zu modellgestützten Verfahren einfach zu realisieren. Die Verfahren differenzieren aber nicht ausreichend zwischen Fehlerursache, -ort oder anderen Kriterien. Sie dienen oft zur Formulierung von Aussagen der Art: „Es hat sich etwas verändert“ [SöRa98].

Modellgestützte Verfahren

Grundgedanke der modellgestützten Merkmalsextraktion ist, durch Anwendung mathematischer Modelle, das statische und dynamische Verhalten eines Prozesses auf der Basis physikalischer Gesetze zu beschreiben, um die für Fehler typischen, nicht messbaren prozessinternen Größen als Merkmale aus den messbaren Eingangssignalen und Ausgangsignalen zu ermitteln. Die Größen werden genutzt, um Veränderungen des aktuellen Zustands gegenüber einem früheren zu erkennen und Residuen zu ermitteln. Die Residuen, als Abweichung zwischen realem und idealem Prozess dienen zur Fehlererkennung. Mit den Modellen und Größen als Eingangssignalen werden die internen Größen des Prozesses wie Zustände und Parameter geschätzt und so rechnerisch auf Fehler und Fehlerort geschlossen. Das Prinzip der Merkmalsextraktion mit modellgestützten Verfahren wird in [He93], [Han98],[Ise94], [Ise99], [PaFrCl00],[SeFr00]dargestellt.

Das mathematische Modell kann auch als Referenz für die Merkmalsinterpretation dienen, die eigentliche Diagnose erfolgt aber meist mit wissensbasierten Verfahren oder Verfahren der Musterklassifikation und gehört zur Merkmalsinterpretation [Fre93],[He93],[Wan93],[Web96].

Die modellgestützten Verfahren lassen sich in drei Phasen unterteilen [Ise94]:

- **Phase 1: Modellbildung**

  Die Qualität der Fehlererkennung und das Diagnoseergebnis hängen maßgeblich von der Güte der Modelle ab. Bei der Modellbildung wird aufgrund der Kenntnisse und Erfahrungen ein Modell des normalen Prozesses, ein Modell des beobachteten Prozesses und/oder Modelle des fehlerbehafteten Prozesses entwickelt, wobei folgende Fragestellungen zu klären sind:

- Detaillierungsgrad der einzelnen Modelle,
- Beschreiben des Normalzustandes und der dazugehörenden Toleranzen,
- Einsatz eines Referenzmodells (= einmalig fest definiertes Modell des Normalzustandes) oder adaptives Modell (= Anpassung des Modells an die Beobachtungen),
- Genauigkeit der Nachführung wenn ein adaptives Modell verwendet wird,
- Definition der Fehlersignaturen (= Modell des fehlerbehafteten Prozesses und seine Auswirkungen auf die zu analysierenden Größen).

Der Prozess der Modellbildung, der sich aus den obigen Fragestellungen ableitet, ist nicht trivial und automatisierbar, da er eine Vielzahl an Freiheitsgraden hat. Insbesondere die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den beobachteten Größen und Fehlern geht weit über die Modellierungskenntnisse der rein physikalisch-technischen Prozesse im Normalzustand hinaus [Ise99].

Phase 2: Merkmalsinterpretation

Abhängig von den zu erkennenden Fehlern verwendet man für die Merkmalsextraktion entweder Parameterschätz- oder Referenzmodellmethoden (Zustandsgrößenschätzung oder Paritätsraumgleichungen). Die Residuen stellen Vergleichsgrößen zwischen normal und unnormal dar und sind somit extrahierte Merkmale. In zahlreichen Arbeiten wurden die verschiedenen Methoden und mathematischen Ansätze der Residuengenerierung detailliert untersucht, so dass an dieser Stelle nicht näher auf die bereits beschriebenen Grundmechanismen der Identifikationverfahren bei der Parameterschätzung wie z.B. Least-Square eingegangen wird [He93],[Fre93]. Zahlreiche praktische Untersuchungen an verschiedenen technischen Systemen haben ergeben, dass insbesondere die Parameterschätzung für die Fehlerfrüherkennung von sich langsam ändernden Prozessparametern (Steifigkeiten, Reibungskoeffizienten, Dämpfungsfaktoren usw.) ohne zusätzliche Sensorik geeignet ist [Wan93], [He93], [Ise94],[Ise99],[Krü99].

- **Phase 3: Symptomerkennung**

  Durch Vergleich der bekannten Fehlersignaturen mit den beobachten Merkmalen wird bei der Symptomerkennung festgestellt, ob eine signifikante Änderung im Vergleich zum Normalzustand (Residuengenerierung) vorliegt.

Anwendungsschwerpunkte der modellgestützten Verfahren sind die Antriebskomponenten von Werkzeugmaschinen [Hel92],[Ket95],[KrSu93],[Krü99],[Wan93],[Zha96]. Die Modellbildung der elektrischen und mechanischen Elemente führt meist zu komplexen Modellen. Vereinfachende Annahmen reduzieren den Aufwand für die Modellbildung und halten die Modelle überschaubar.

So entwickelte Wanke [Wan93] ein Modell, das trotz Vereinfachung der mechanischen Komponenten auf einen Zweimassenschwinger, mit Hilfe der Parameterschätzung eine ausreichende Diagnose des Antriebsstranges liefert.

Modellgestützte Methoden sind allerdings meist aufwendig in ihrer Realisierung, weil sie ein hohes Systemwissen voraussetzen, erlauben aber gleichzeitig Aussagen wie „Es hat sich ein Fehler der Art X ereignet“. Bestenfalls kann auf die Art es Fehlers und den physikalischen Hintergrund geschlossen werden. Jedoch müssen diese Beziehungen nicht eindeutig sein. Ein Schluss auf den Fehlerort ist nur selten möglich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass keine Idealmethode zur Merkmalsextraktion mit zwingend eindeutiger Aussage existiert. Diese Erkenntnis stellt jedoch nicht die zahlreichen erfolgreichen Einzelanwendungen signal- oder modellgestützter Methoden bei meist einfachen Überwachungsaufgaben in Frage [SöRa98].

3.3.2 Verfahren der Merkmalsinterpretation und Diagnosefindung

Nachdem aussagefähige Merkmale extrahiert worden sind, besteht die weitere Diagnoseaufgabe in der Interpretation der Merkmale bzw. deren Abweichungen (Symptome). Diese Aufgabe wird bisher meist von erfahrenen Spezialisten durchgeführt. Das zur Diagnose notwendige Fachwissen umfasst [Din98]:

- den Aufbau und die Funktionsweise der Maschine oder deren Baugruppen,
- die Betriebs- und Umfeldbedingungen in denen die Maschine eingesetzt wird,
- das Verhalten der Maschine in der Vergangenheit,
- Erfahrungen mit Maschinen und Komponenten des gleichen oder ähnlichen Typs sowie
- Ursache(n) und Wirkung(en) der sich anbahnenden bzw. bereits eingetretenen Fehler.

Je nach Anwendungsfall kann das Wissen explizit in Form von Prozessmodellen, Expertenregeln oder implizit in Form von Fallbeispielen vorliegen. Die Kombination dieses Wissens und die kontextabhängige Schlussfolgerungen des Experten lassen sich aus heutiger Sicht nur bedingt auf einen Computer übertragen [Din98],[Web96]. Dennoch wächst der Bedarf an einer rechnergestützten Merkmalsinterpretation bei der Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose. In Forschung und

Praxis sind zahlreiche, meist anwendungsspezifische Systeme, entwickelt worden. Dabei wird zwischen drei grundsätzlichen Strategien und Methoden der Merkmalsinterpretation, wie sie in Abbildung 3.5 dargestellt sind, unterschieden:

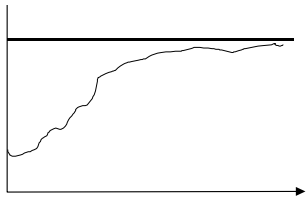
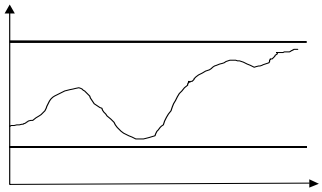
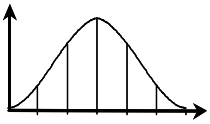
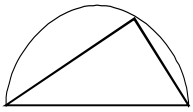
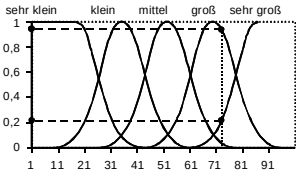
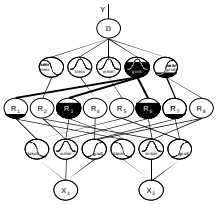
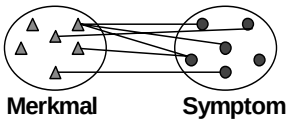
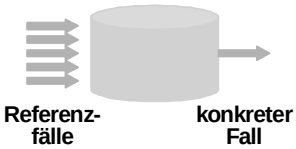
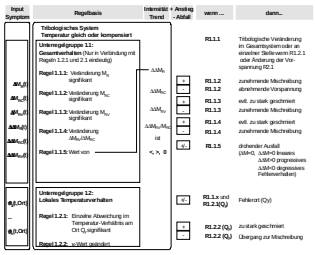
Toleranzbänder/ Schwellen/ Grenzwerte und Trends	Mustererkennung/ Klassifikation	Wissensbasierte Verfahren
Feste Grenzen  **Toleranzbandüberwachung**  **Mitlaufende Schwelle**	***Klassische Verfahren*** **Statistische Verfahren**  **Geometrische Verfahren**  ***Soft-Computing*** **Fuzzy-Klassifikatoren**  **Neuronale/ Fuzzy-Neuro Netze** 	**Assoziative Verfahren**  **Fallbasierte Verfahren**  **Modellbasierte Verfahren** 

Abbildung 3.5 Grundsätzliche Strategien und Verfahren der Merkmalsinterpretation

Toleranzbänder, Schwellen, Grenzwerte und Trends

Im einfachsten Fall können sich anbahnende Störungen oder Ausfälle direkt anhand eines gemessenen Sensorsignales erkannt werden, wenn sich der Signalverlauf eindeutig von einem störungsfreien Betrieb unterscheidet. Alternativ oder zusätzlich zu den direkt gemessenen Signalen können auch die mit den signal- bzw. modellgestützten Verfahren extrahierten Merkmale verwendet werden [Suw99].

Die in der Praxis eingesetzten Überwachungssysteme arbeiten überwiegend mit Grenzwerten oder Toleranzbändern mit festen Grenzen (Absolutwertüberwachung), die sich an einem angelernten Verlauf orientieren [Ise94],[Reu01],[Suw99]. Die Aufgabe einer einfachen Grenzwertüberwachung ist es, bei unzulässigen Abweichungen eines oder mehrerer Signale bzw. Merkmale vom Normalzustand zu reagieren. Bei den in der Praxis eingesetzten Verfahren der Grenzwertüberwachung werden dabei meist nur ein oder wenige direkte Messsignale sowie deren einfache statistischen Kennwerte verwendet. Die Grenzwertüberwachung mit einem oder wenigen Signalen hat sich in der Praxis als sehr störanfällig erwiesen, so dass sie oft nach kurzer Betriebszeit wieder abgestellt wird [Krü99], [Suw99].

Weiterentwicklungen der Grenzwertüberwachung führten zur Überwachung mit mitlaufenden Schwellen, deren Toleranzbänder sich dynamisch durch einen gleitenden Mittelwert anpassen. Bei einer abrupten Signalveränderung verletzt das Signal einen der ermittelten Schwellenwert und löst eine Warnmeldung aus. Die reine Überwachung mit dynamischen Schwellen wird in der Praxis nur selten angewandt, da die Bestimmung der Toleranzbänder sehr rechen- und speicherintensiv ist.

Da alle Grenzwertverfahren ereignisgesteuert arbeiten, sind sie für die Fehlerfrühdiagnose auch nur begrenzt einsetzbar. Dieses Defizit kann behoben werden, wenn neben den Abweichungen der Messsignale oder den extrahierten Merkmalen auch die zeitliche Veränderung der Signale berücksichtigt wird. In diesem Fall spricht man von einer Trendwertüberwachung bzw. einem Gradientenverfahren. Dabei wird die Geschwindigkeit der Signalveränderung über der Zeit ausgewertet. Die Gradientenverfahren spielen für die Fehlerfrühdiagnose an elektromechanischen Antriebseinheiten eine bedeutende Rolle, da sie insbesondere für sich langsam verändernde Signale und Merkmale geeignet sind, wie z.B. die Veränderungen in Folge von Verschleiß in tribologischen Systemen oder Alterung des Schmierstoffes.

Mustererkennung und Klassifikationsverfahren

Die Bedeutung von Mustererkennungs- und Klassifizierungsverfahren hat in den letzten Jahren vor allem in der Forschung durch Anwendung von Methoden des Soft-Computings zu zahlreichen neuen Ansätzen und Anwendungen geführt [KaTe01],[NaKlKr96],[Zel94]. Bei der Musterklassifikation werden im Gegensatz zur Grenzwertüberwachung mehrere Signal- oder Merkmalswerte durch n-dimensionale Merkmalsvektoren eines Punktes beschrieben, wobei jede Klasse einen der verschiedenen Maschinenzustände beschreibt [Nie83]. Die Klassifikation erfolgt dabei in zwei Phasen, wobei in der Lernphase zunächst die Klassen bzw. ihre Klassengrenzen erlernt werden. In der Betriebsphase werden die aktuellen Merkmalsvektoren den zuvor

angelernten Klassen zugeordnet. Die Fähigkeit neue Klassen anzutrainieren sollte auch während der Betriebsphase bestehen. Dabei sind an die Klassifikation nach Westernbusch [Wes94] folgende grundsätzliche Anforderungen zu stellen:

- Merkmalsvektoren, die in eine Klasse abgebildet werden, dürfen innerhalb der Klasse nur eine geringe Standardabweichung haben, sprich sie müssen sich ähnlich sein.
- Merkmalsvektoren, die in verschiedene Klasse abgebildet werden, müssen relativ unähnlich und damit unterscheidbar sein.

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit und somit Akzeptanz der Diagnose mit Methoden der Musterklassifikation sind die in der Lernphase zu definierenden Trennfunktionen der Merkmalsräume bzw. Klassen, die den obigen Anforderungen genügen müssen. Bei den Ansätzen zur Klassifikation unterscheidet man grundsätzlich zwischen den nicht-numerischen (syntaktischen) und numerischen Verfahren, siehe Abbildung 3.6. Bei den numerischen Verfahren unterscheidet man weiter die konventionellen Ansätze wie geometrische und statistische Klassifikatoren bzw. die Ansätze des Soft-Computings mit Fuzzy-Klassifikatoren, Neuro-Fuzzy-Klassifikatoren sowie Künstliche Neuronale Netze [KaTe01],[NaKlKr96],[Bot98],[Kel00]. Die konventionellen Klassifikationsansätze basieren auf einer festen, mathematischen oder statistischen Beschreibung, die in der Praxis meist so nicht gegeben sind [Suw99]. So ist die Bestimmung von Verteilungsdichten, a-priori-Wahrscheinlichkeiten, bedingten Wahrscheinlichkeiten meist problematisch, da sie den geforderten mathematischen Kriterien wie statistische Unabhängigkeit oder dem geforderten Stichprobenumfang nicht genügen. Bei allen Verfahren der numerischen Klassifikation muss eine ausreichend große Stichprobe von Merkmalsvektoren vorhanden sein, die eine bestimmte zu lernende Zustandsklasse (z.B. Gut-Zustand, Fehler an Bauteil x) repräsentieren. Da gleiche Fehler an elektromechanischen Antriebseinheiten in der Praxis aber meist nur einmal oder sehr selten auftreten, gibt es nur wenige industrielle Anwendungen der Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose mit Hilfe von Musterklassifikationsverfahren. Insbesondere während und kurz nach der Inbetriebnahmephase sind meist nicht genügend Merkmalsvektoren vorhanden, die Repräsentanten einer zu lernenden Zustandsklasse sind für eine Diagnose mit Musterklassifikationsverfahren, wenn überhaupt, erst nach einer längeren Betriebszeit möglich.

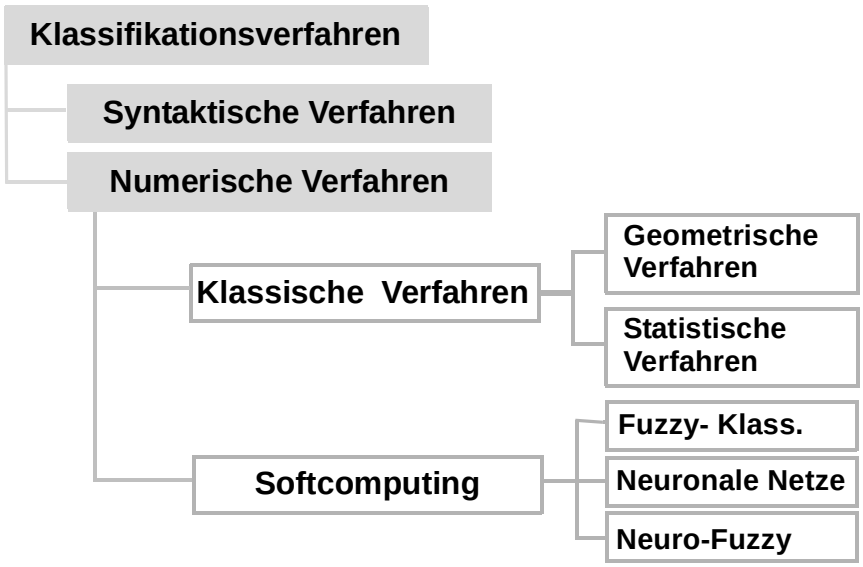


Abbildung 3.6 Systematik der Musterklassifikationsverfahren

Die Diagnose von technischen Systemen und Bearbeitungsprozessen mit Methoden des Soft-Computing haben in jüngerer Zeit vor allem in der Forschung einen hohen Reifegrad erreicht. Dabei ergaben insbesondere Untersuchungen im Bereich der Fuzzy-Logik, der Künstlichen Neuronalen Netze (KNN) und den Neuro-Fuzzy-Ansätzen neue Ansatzpunkte für die Fehlerfrühdiagnose [Geb92],[Dai93],[Rei94],[Wes94],[Rit96],[Web96][ChLi97],[Krü99],[Suw99],[Reu01].

Fuzzy-Klassifikatoren

Die Fuzzy-Logik ist ein mathematisches Konzept zur Beschreibung unscharfer Begriffe. Zentraler Begriff ist die Zugehörigkeitsfunktion, mit der reellwertige Ausprägungen eines unscharfen Begriffes auf Zugehörigkeitswerte im Intervall [0,1] abgebildet werden. Ein unscharfer Begriff kann aus mehreren sogenannten Termen zusammengesetzt werden. So könnte sich die „Temperatur“ sich aus den Termen „nieder“, „mittel“ und „hoch“ zusammensetzen. Jeder Term wird dann durch eine geeignete Zugehörigkeitsfunktion definiert. Es können auch Aussagen des Instandhalters wie z.B. ein „schlagartiger Stromanstieg“ oder „langsame Temperaturveränderung“ in mathematische Kalküle umgewandelt und auf dem Rechner verarbeitet werden. Die Fuzzy-Logik bildet den Rahmen für regelbasierte Fuzzy-Systeme wie sie z.B. für die Diagnose verwendet werden. Es soll an dieser Stelle nicht näher auf die bereits vielfach beschriebenen Grundmechanismen der Fuzzy-Logik [Bie97] eingegangen werden.

Grundsätzlich basiert ein Fuzzy-System für die Diagnose auf einem Modell, das aus den folgenden drei Phasen besteht:

1. Fuzzifizierung - Definition der unscharfen Begriffe (linguistische Variablen), der Terme und ihre Zugehörigkeitsfunktionen.
2 Fuzzy-Inferenz - Approximatives Schließen mit Hilfe von WENN ... DANN...Regeln
3 Defuzzifizierung - Berechnen des scharfen Wertes aus den Ergebnissen der Fuzzy-Inferenz

Beim Fuzzy-Klassifikator ist also die Information über die Zusammenhänge zwischen den Merkmalen und den Fehlerklassen in den linguistischen Variablen mit ihren unscharfen Mengen und Regeln enthalten. Die einzelnen Fuzzy-Systeme unterscheiden sich dabei in der Definition ihrer Zugehörigkeitsfunktion, den verwendeten Fuzzy-Operatoren bei der Inferenz sowie den Defuzzifikationsmethoden. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von Freiheitsgraden, was die Anpassung und Optimierung eines Fuzzy-Systems betrifft. Die manuelle Anpassung eines Fuzzy-Systems an seine Aufgabe ist daher nicht trivial, da bereits sehr kleine Änderungen große Auswirken auf die Diagnose haben können und die Optimierung von mehr als einem Kriterium abhängt [Suw99]. Das Anlernen des Fuzzy-Klassifikators setzt also ein hohes Prozesswissen des Experten voraus und kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Zum einen müssen durch Experten-Befragungen die Zugehörigkeitsfunktionen für die jeweiligen Terme bestimmt werden, zum anderen gilt es die entsprechenden Fuzzy-Regeln zu finden. Es wäre daher wünschenswert einen automatischen Adaptionsprozess zur Optimierung des Fuzzy-Systems zu haben.

Aufgrund ihrer Eigenschaften, auch analytisch erworbenes, unscharfes Wissen verarbeiten zu können, wurden die Einsatzmöglichkeiten von Fuzzy-Systemen in einer Reihe von Arbeiten untersucht, die sich zum einen mit der Diagnose technischer Systeme [Din98], [Krü99], [Rem98], [Xu88], zum anderen mit der Überwachung von Bearbeitungsprozessen [Suw99], [Pla93], [ChLi97], beschäftigen.

Klassifikation mit Künstlichen Neuronalen Netzen

Eine alternative Klassifikationsmethode ist der Einsatz von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN). Sie nutzen analog zum menschlichen Gehirn massiv parallele Strukturen und können so einige Fähigkeiten des Menschen, wie das Lernen und verallgemeinern von Beispielen, das Abstrahieren, Erkennen und vervollständigen komplizierter Muster oder assoziatives Speichern simulieren [Suw99]. Der Nutzen der KNN besteht darin, nach einer erfolgreichen Trainingsphase beliebig komplizierte (auch nichtlineare) Zielfunktionen nachzubilden [Zel94]. Die KNN´s sind also in der Lage, einen unbekannten Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen selbstständig herzustellen.

Neuronale Netze unterscheidet man nach der Art der Informationsverarbeitung im Knoten (Knotendynamik), der Topologie (Struktur) und dem Lernverfahren. Den Kern der KNN bilden dabei die Knoten (Neuronen), die man als Schaltelemente mit n-Eingängen, einer Input-, einer Transfer- und einer Output-Funktion beschreiben kann. Mit der Knotendynamik wird festgelegt, welche Ausgabe ein Neuron aus den Eingaben berechnet. Durch Zusammenschalten der Neuronen ergibt sich die Struktur (Topologie) des Netzes, das meist aus einer Eingabe-, einer Ausgabe- und einer oder mehreren verdeckten Schichten besteht [Zel94]. Die Neuronen können dabei mit beliebig vielen Neuronen der eigenen oder anderen Schichten verbunden werden. Die gerichteten Eingabeleitungen (Kanten) werden gewichtet, d.h. jeder Eingabewert x_i wird mit einem entsprechenden Gewicht w_i multipliziert. Wenn die gewichtete Summe der Eingangswerte einen bestimmten Schwellwert überschreitet, wird das Neuron aktiv und gibt einen Reiz an die nachgeschalteten Neuronen weiter. Mit der Auswahl eines bestimmten Lernverfahrens wird schließlich festgelegt, wie die Gewichte schrittweise zu ändern sind, damit eine bestimmte Aufgabe erlernt werden kann. KNN´s sind adaptive Systeme, mit denen aus Beispielwissen unbekannte Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgabedaten erlernt werden können [KaTe01].

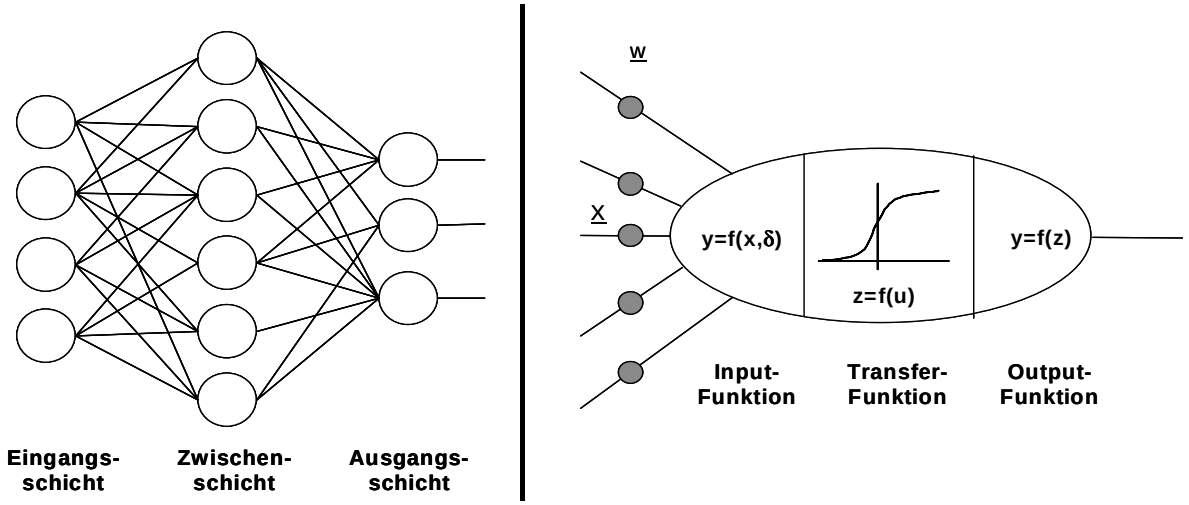


Abbildung 3.7 Aufbau eines Künstlichen Neuronalen Netzes [Suw99]

Das Klassifikationswissen des KNN ist also implizit in der Struktur, den Gewichten und Schwellwerten des Netzes enthalten. Die Verbindungsstärke des Neuronalen Netzes wird vom Bediener nicht eingegeben, sondern anhand von repräsentativen Eingangs- und Ausgangsdaten durch die Verwendung eines Lernverfahrens ermittelt.

Ein KNN liefert also eine Black-Box Lösung bei der die internen Zusammenhänge nicht explizit beschrieben sind, d.h. die Systemaussage nicht nachvollziehbar ist [Din98]. Das Ergebnis lässt sich daher nicht interpretieren und somit gezielt korrigieren [Suw99]. Eine weitere Voraussetzung ist, dass genügend repräsentative Trainingsdaten einer Klasse (Maschinenzustand) vorliegen müssen, um das Netz trainieren zu können. In den meisten Arbeiten werden solche Trainingsdaten meist mit Hilfe der Simulation oder mit bewusst induzierten Fehlern in Prüfständen gewonnen [Wes94], [Krü99], [Suw99]. Die Reproduzierbarkeit der so gewonnenen Trainingsdaten ist allerdings kritisch zu sehen, da sie in Abhängigkeit von der Herstellgenauigkeit bzw. den Betriebsbedingungen der elektromechanischen Antriebseinheiten sehr stark schwanken können.

Interessant sind Neuronale Netze für die Diagnose aber dann, wenn nach einer bestimmten Betriebszeit fehlertypische Maschinenzustände häufiger aufgetreten sind. So können neue Muster selbständig erlernt und dabei auch Nichtlinearitäten abgebildet werden.

Neuro-Fuzzy-Systeme zur Musterklassifikation

Bei Neuro-Fuzzy-Systemen werden die Methoden der Fuzzy-Logik mit denen der Künstlichen Neuronalen Netze gekoppelt [Bot98],[NaKlKr96]. Die Grundidee für den Einsatz von Neuro-Fuzzy-Systemen ist die Verknüpfung von vorhandenem, allgemeinem Prozess- und Expertenwissen mit der Lernfähigkeit neuronaler Netze. Ziel der Neuro-Fuzzy-Systeme ist es dabei, durch eine geeignete Kombination beider Ansätze deren Vorteile zu vereinen und Nachteile auszuschließen, um folgende Eigenschaften zu nutzen [Suw99]:

- unscharfes Schließen,
- Interpretierbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen,
- automatisches Anlernen der Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelbasis,
- schnelles Nachlernen sowie
- Möglichkeit des manuellen Eingreifens.

Für den Einsatz bei der Fehlerdiagnose haben sich solche Verfahren bewährt, die sich vollständig als Künstliches Neuronales Netz und auch als Fuzzy-System interpretieren lassen [LiLe91], [Krü99], [Suw99]. Das System sollte so aufgebaut sein, dass man erkennt, aufgrund welcher Regeln und Merkmale das System seine Entscheidungen trifft und welche Änderungen am System welche Auswirkungen auf die Ausgangswerte haben. Nur so kann der Benutzer oder Experte in den Entscheidungsalgorithmus eingreifen und ihn verbessern sowie die gefundenen Klassifikationsergebnisse nachvollziehen. Das von KRÜGER [Krü99] und SUWALSKI [Suw99] entwickelte NNFC-Modell (NeuralNetworkFuzzyControl) genügt diesen Anforderungen und

wurde für die Diagnose von Antriebseinheiten und bei der Prozessdiagnose von Drehmaschinen erfolgreich eingesetzt [KrSu93],[Krü99],[Suw99]. Eine Bewertung von weiteren Neuro-Fuzzy-Modellen im Hinblick auf die Klassifikation findet sich in [Bot98],[NaKlKr96].

Trotz ihrer hohen Flexibilität haben sich die Methoden des Soft-Computings für die Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose in der industriellen Praxis nicht durchgesetzt. Die Gründe sind vornehmlich in der ungenügenden Erklärbarkeit der Klassifikationsergebnisse sowie der hohen Komplexität dieser Methoden zu sehen. Zudem sind in den meisten Fällen umfangreiche Trainingsdaten erforderlich, um die abzubildenden Zusammenhänge zu erlernen, d.h. es müssen genügend bekannte Stichproben jeder Klasse (Maschinenzustand) vorhanden sein, um statistisch gesicherte Diagnosen zu bekommen [Reu01].

Wissensbasierte Diagnosesysteme

Wissenbasierte Diagnoseverfahren sind durch eine formalisierte Abbildung von Expertenkenntnissen charakterisiert [And98]. Hierbei umfasst der Begriff Diagnoseverfahren die drei Verfahrensschritte Wissensakquisition, Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung [Pup88],[Pup90],[Win96],[Wei93],[Web96]. Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal innerhalb der wissensbasierten Systeme ist das zur Anwendung kommende Verfahren zur Wissensverarbeitung. Zur Verarbeitung von Wissen wurden unterschiedliche Ansätze entwickelt von denen im folgenden die wichtigsten vorgestellt werden [Pup90]:

- Assoziative Diagnose
- Fallbasierte Diagnose
- Modellbasierte Diagnose

Assoziative Diagnoseverfahren verwenden das heuristische Erfahrungswissen von Experten, das aus empirisch begründeten Assoziationen zwischen Symptomen und Fehlerklassen besteht. Bei den assoziativen Verfahren unterscheidet man die ’Sichere Klassifikation’, die ’Statistische Klassifikation’ und ’Heuristische Klassifikation’. Die ’Sichere Klassifikation beruht auf sicherem Wissen und Daten, bei denen ein Symptom eindeutig einer Ursache zuordenbar ist. In der Praxis hat ein Fehler aber meist mehrere Ursachen, so dass die ‘Sichere Diagnose’ nur selten genutzt werden kann. Bei der ’Statistischen Klassifikation‘ wird mit Hilfe von statistischen Theoremen (z.B. Bayes-, Dempster-Shafer-Theorem) die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenhangs zwischen Merkmal und Symptom berechnet. Da die statistischen Grundannahmen der Theoreme einen großen Stichprobenumfang voraussetzen, sind statistische Diagnoseverfahren in der

Instandhaltung nur bedingt einsetzbar. Die meisten assoziativen Diagnoseverfahren basieren daher auf der 'Heuristischen Klassifikation', bei denen der Experte aufgrund seiner Erfahrung den Relationen zwischen Symptomen und Ursachen Wahrscheinlichkeiten zuordnet [Mer90].

Die **fallbasierte Diagnose** beruht auf der Auswertung von Fällen, die in einer Datenbank gespeichert sind [Web96],[Win96]. Das Diagnosewissen und Problemlösungsverhalten wird dabei durch die Abfolge von Merkmalen und Symptomen, beobachtet in der jeweiligen Fehlersituation, in sogenannten Fällen beschrieben [Win96]. Bei der Diagnose wird dann ein Fall ausgewählt, dessen Symptome mit den aktuellen Symptomen am besten übereinstimmen. Für den Vergleich wird ein Abstandsmaß definiert, das die Ähnlichkeit bzw. den Unterschied der zu vergleichenden Fälle beschreibt. Die Festlegung des Abstandsmaßes stellt ein grundlegendes Problem der fallbasierten Diagnose dar. So sollen möglichst nur die relevanten Fälle ausgewählt werden, gleichzeitig aber möglichst viele neu auftretende Fälle diagnostiziert werden können. Daher sind zur Bestimmung genaue Kenntnisse des Anwendungsgebietes Voraussetzung [Web96]. Die Problemlösungsqualität der fallbasierten Diagnose ist aufgrund des fehlenden Tiefenwissens und des fehlenden Erfahrungswissen der assoziativen und modellbasierten Klassifikation unterlegen [Pup90]. Dies wird durch die Vergleichsweise einfache Erfassung des erforderlichen Wissens nicht aufgehoben. Die Einsatzmöglichkeiten von fallbasierten Diagnosesystemen für die Maschinendiagnose wurden in [Win96] näher untersucht.

Im Unterschied zu den assoziativen Verfahren beinhalten die **modellbasierten Diagnoseverfahren Wissen** über kausale Zusammenhänge zwischen Fehlern und Merkmalen, d.h. die Diagnose liefert Informationen über die grundlegenden Zusammenhänge. Die kausalen Zusammenhänge resultieren meist aus einer Kombination von heuristischem (erfahrungsbasiertem) und analytischem Wissen, das in Modellen der zu diagnostizierenden Einheiten enthalten ist [Krü99]. Die Diagnose von Fehlern erfolgt also mit Kenntnissen über Konstruktion, Dimensionierung, Funktion und/oder Werkstoffverhalten sowie deren kausale Zusammenhänge. Bei der Diagnose von technischen Systemen ist dieses Wissen im Normalfall vorhanden, da es für die Erstellung und den Betrieb einer Maschine oder Anlage ohnehin notwendig ist. Durch die Verknüpfung von assoziativem und modellbasiertem Wissen in Form von WENN (Bedingung) - DANN (Schlussfolgerung)-Regeln kann Expertenwissen hervorragend abgebildet werden. Zur Abbildung von kausalem Wissen durch Regeln wurden spezielle Programmiersprachen oder Expertensystem-Schalen (sogenannte Shells) entwickelt [Win96],[Wei93],[Hel96].

Nachteilig an den modellbasierten Verfahren ist die nicht realisierbare Lernfähigkeit, was einen hohen Aufwand beim Aufbau der Wissensbasis sowie deren Wartung und Pflege bedeutet. Durch mangelnde Aktualisierung der Wissensbasis sind schon zahlreiche Projekte in der Praxis

gescheitert [Web96],[Win96]. Ursache ist der sich ständig erweiternde Wissensbereich, wobei vage Wissensteile durch Präzedenzfälle bestätigt oder widerlegt werden, und neue Diagnosebereiche hinzuzufügen sind. Bevor es jedoch überhaupt zu einer praktischen Anwendung eines wissensbasierten Diagnosesystems kommen kann, sind über eine länger Zeit Eingaben verbunden mit einer Vielzahl von Regeln nötig [Bir95],[Per98],[Wag97].

Dennoch bieten die modellbasierten Systeme einen großen Vorteil gegenüber anderen Diagnoseverfahren hinsichtlich der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der gewonnenen Diagnoseergebnisse. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein modellbasiertes Verfahren entwickelt werden, das bereits mit wenigen Regeln, auf Basis weniger Merkmale die modellgestützt extrahiert worden sind, eine qualifizierte Diagnose für eine elektromechanische Antriebseinheit mit der Inbetriebnahme erlaubt.

3.4 Methoden und Verfahren zur Überwachung und Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten

Elektromechanische Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik zählen zu den hochbelasteten und kritischen Baugruppen in modernen Produktionsmitteln wie z.B. Werkzeug-, Verpakkungs- oder Druckmaschinen. In Forschung und Praxis wurden vor allem Verfahren der Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose an elektromechanischen Antriebseinheiten in Werkzeugmaschinen untersucht und entwickelt [Sim86],[Krü99],[Geb92],[Rei93]. Empirische Studien haben dabei ergeben, dass der größte Anteil der Fehler in Antriebseinheiten an den mechanischen Bauteilen auftritt. Da das Beseitigen von Störungen und Ausfällen meist mit einem größeren Zeitaufwand und somit höheren Kosten, z.B. durch Produktionsausfall verbunden ist, wurden in der Vergangenheit zahlreiche Methoden und Verfahren zur Diagnose solcher Einheiten entwickelt, von denen im folgenden einige Arbeiten zur modellgestützten Diagnose vorgestellt und bewertet werden.

In [Fre93] wird zur Identifikation der Parameter von Reibmodellen an Industrierobotern ein Korrelationsverfahren entwickelt, mit dem auf Basis der Messgrößen Motorstrom und Drehzahl Fehler diagnostiziert werden [He93]. KETTERER [Ket95] griff das Verfahren auf und führte auf der Basis eines stark vereinfachten Systemmodells eine Identifikation von Spiel und Reibungsparametern durch. Die Identifizierbarkeit der einzelnen Reibparametermodelle unter Berücksichtigung des praktischen Einsatzes wird nur in wenigen Arbeiten berücksichtigt [Fre93],[Wan93]. Die Reibungsparameter werden dabei meist unter Laborbedingungen bestimmt. Last- und Temperaturschwankungen führen aber zu einem zeitvariablen Reibverhalten, welches ebenfalls nur ver-

einzelt betrachtet wird [Kum01]. Die Interpretation der rein modellgestützt gewonnenen, parametrischen Kenngrößen wurde mit wissensbasierten Verfahren durchgeführt [Fre93], [He93], [Geb92].

SCHNEIDER [Schn86] leitet ein Konzept für ein Fehlerfrühdiagnosesystem in einer Vorschubantriebseinheit durch die Kombination der direkten, z.B. Körperschallmessungen mit den modellgestützten Verfahren und unter Einsatz der Mustererkennung ab. Nach SCHNEIDER gibt es derzeit noch kein Diagnosesystem, das die Zustandsverschlechterung einzelner mechanischer Komponenten anhand des Driftverhaltens so rechtzeitig erkennt, dass Störungen vermieden werden können. Dieses Verfahren wurde von HELML [Hel92] aufgegriffen und um Teilmodelle wie z.B. das Verhalten in Abhängigkeit von der Schlittenposition erweitert. In KRÜGER [Krü99] wird eine ähnliche Vorgehensweise mit signal- und modellgestützten Verfahren für numerisch gesteuerte Achsen vorgestellt. Dabei wurde zur Berücksichtigung nichtlinearer Einflüsse, die eine Schwierigkeit bei der Anwendung von Identifikationsverfahren darstellen, eine detailliertes Simulationsmodell der Antriebsstrecke entworfen. Die Interpretation der gewonnenen parametrischen Kenngrößen erfolgt mit Verfahren der Musterklassifikation. Interessant ist der von KRÜGER [Krü99] und SUWALSKI [Suw99] auf der Grundlage von CHEN [LiLe91] weiterentwickelte Neuro-Fuzzy-Ansatz [KrüSu93].

Zu den wissensbasierten Verfahren finden sich in der Literatur über hundert dokumentierte Systeme von denen nahezu fünfzig in der Produktions- und Fertigungstechnik eingesetzt werden [Fäh90]. Für kleinere, in sich abgeschlossene Komponenten wie z.B. bei elektromechanische Antriebseinheiten, war der Einsatz von wissensbasierten Systemen bisher wirtschaftlich nicht vertretbar [Krü99], [Hel92]. Die Zahl der wissenschaftlichen Aufsätze und Arbeiten dokumentieren allerdings das Interesse an solchen Systemen.

Eine Übersicht über modellgestützte Verfahren zur Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten sowie deren Komponenten gibt Abbildung 3.8:

Untersuchungs-gegenstand	Mess-größen	Merkmals-extraktion	Merkmals-interpretation	mit Identi-fikations-programm	Lit.
Prozessüberwachung für Drehmaschinen (WZM)	Strom Körperschall	Parameter-schätzung	KNN Neuro-Fuzzy Netz		[Suw99]
Überwachung und Diagnose von elektromechanischen Vorschubantrieben (WZM)	Strom Drehzahl	Parameter-schätzung	Wissensbasiertes Verfahren	Leerlauf Eilgang	[Hel92]
Diagnose von elektro-mechanischen Antriebs-strecken (WZM)	Strom Drehzahl Körperschall Temperatur	Parameter-schätzung Wavelet-Verfahren	Numerische Klassi-fikatoren, Fuzzy-, Neuro-Fuzzy- und Neuronale Netze	Eilgang Leerlauf	[Krü99]
Diagnose von elektro-mechanischen Antriebs-strecken (WZM)	Strom Drehzahl Körperschall	Parameter-schätzung	Numerische Klassifikatoren Neuronales Netz	Eilgang; Referenz-fahrt	[Geb92]
Diagnose von Industrierobotern	Drehzahl Kräfte	Parameter-schätzung	Wissensbasierte Systeme		[Fre93]
Diagnose von elektro-mechanischen Antriebs-strecken (WZM)	Spannung Drehzahl Kräfte	Parameter-schätzung	Wissensbasierte Systeme		[He93]
Hauptantrieb eines Bearbeitungszentrums	Strom Kräfte	Parameter-schätzung	Laufsummentests Numerische Klassi-fikatoren, Zuge-hörigkeitsfunk-tionen		[Wan93]

Abbildung 3.8 Modellgestützte Verfahren für elektromechanische Antriebseinheiten

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die existierenden signal- und modellgestützten Verfahren der Merkmalsextraktion bzw. Symptomgenerierung den gestellten Anforderungen an eine praxisnahe Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten auf Bauteile- oder Baugruppenebene nicht genügen. Ein in der Praxis erfolgreich einsetzbares Verfahren fehlt bisher. Dennoch sind die modellgestützten Verfahren gegenüber signalgestützten Verfahren vorzuziehen, da sie ohne zusätzliche Sensorik treffsichere Aussagen über Veränderung und Art des Fehlers liefern können.

Den modellgestützten Verfahren liegt allerdings meist ein detailliertes Gesamtmodell der Antriebseinheit zugrunde, das aufwendig zu erstellen und dessen Identifikation fehlerbehaftet ist. In Anlehnung an den Instandhaltungsexperten, der bei seiner Diagnose die elektromechanische

Antriebseinheit gedanklich in einfache Modelle, sogenannte „Minimalmodelle“ [Dre01] zerlegt, bietet es sich an, das Gesamtmodell so weit zu segmentieren, dass sich die fehlercharakterisierenden Parameter explizit erfassen und durch einfache statistische Methoden weiterverarbeiten lassen. Durch die zeitabhängige Auswertung der Residuen mit Hilfe von Gradientenverfahren kann die Diagnosequalität gegenüber Grenzwertverfahren mit Absolutwerten weiter verbessert werden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, „Minimalmodelle“ zu entwickeln, mit denen die fehlercharakterisierenden Merkmale und deren zeitliches Verhalten sich explizit ermitteln lässt.

Für die Interpretation der gewonnenen Merkmale bieten sich während der Inbetriebnahme und in der frühen Betriebsphase vor allem Verfahren an, die auf Modellvorstellungen beruhen, da sie ohne repräsentative Fehlerdaten anhand von Regeln einen Schluss auf Art, Ort, Ursache und Auswirkung möglicher Fehler zulassen. Durch die explizite Beschreibung der kausalen Zusammenhänge zwischen Merkmal und Fehler sind die Diagnoseergebnisse leicht nachvollziehbar und führen zu einer hohen Akzeptanz beim Anwender.

Mit zunehmender Betriebsdauer bzw. anhand von gewonnenen repräsentativen Fehlerdaten aus dem laufenden Betrieb bietet sich die Einbeziehung von lernenden Verfahren wie Neuro-Fuzzy oder Künstliche Neuronale Netze an. Mit solchen Verfahren können auch nichtlinear-dynamische Effekte implizit abgebildet und diagnostiziert werden. Eine solche Vorgehensweise entspricht der des Menschen, der sich neue Fähigkeiten zunächst anhand von Regeln aneignet, mit zunehmender Erfahrung lernt das Gehirn allerdings komplexere Zusammenhänge (Muster) zu erkennen und unterscheiden, die zu entsprechenden Handlungen führen. Da für den Einsatz von Neuro-Fuzzy-Netzen oder Künstlichen Neuronalen Netzen ein zeitlich langwieriger Lernprozess nötig ist, die Verfahren selbst aber bekannt sind, werden sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

4 Anforderungen und Lösungsansatz

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des neuen Lösungsansatzes vorgestellt und erläutert. Ausgehend von den Anforderungen in Kapitel 4.1 werden die Prinzipien des neuen Lösungsansatzes in Kapitel 4.2 dargestellt.

4.1 Anforderungen an die Überwachung und Diagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten

Elektromechanische Antriebseinheiten werden in gleicher Bauart in größeren Stückzahlen gefertigt und in unterschiedlichen Maschinen eingebaut. Sie bestehen aus einem Energiewandler, der elektrische in mechanische Energie umsetzt. Die resultierende Bewegung kann rotatorisch oder translatorisch (Linearmotor) sein. Zur Anpassung der Drehmoment-/Drehzahlverhalten bei rotatorischen Antrieben werden Getriebe eingesetzt. Zur Umwandlung der Rotations- in eine Translationsbewegung dienen Gewindespindeln, Zahnstangen oder Zahnriementriebe. Zur Einschränkung der Freiheitsgrade werden Lager bzw. Führungen verwendet [Wec01],[GrHa00].

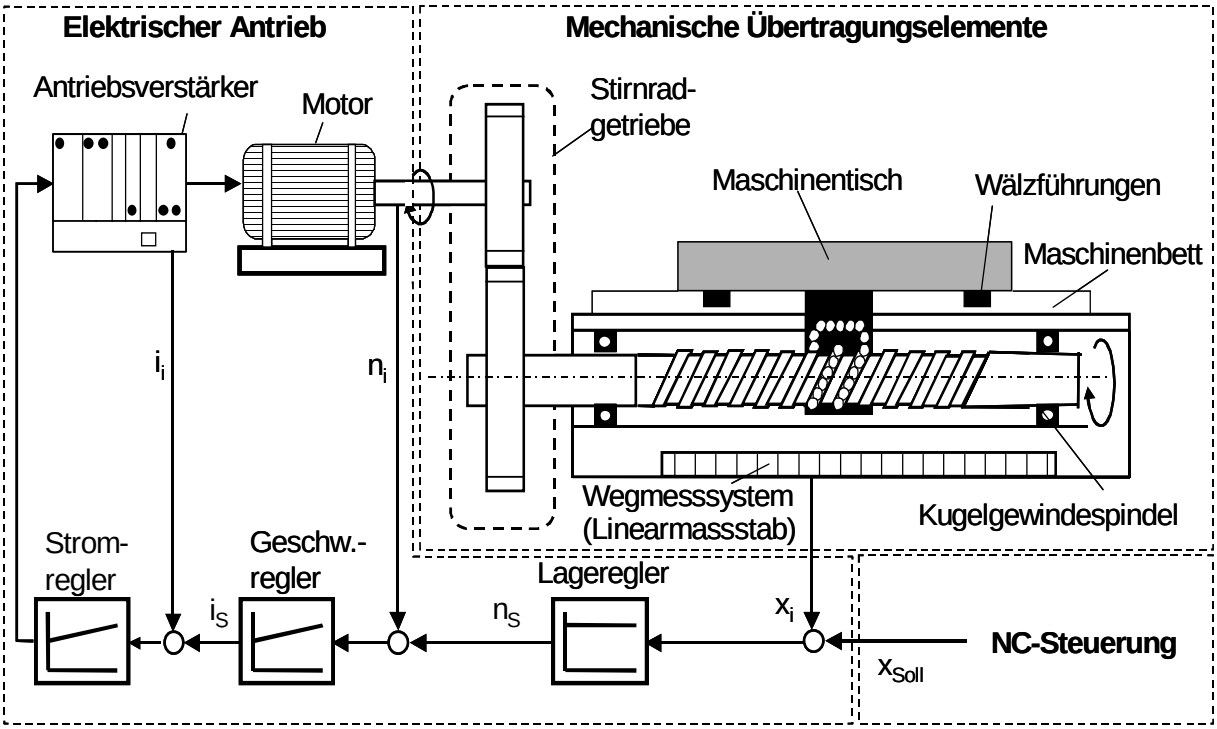


Abbildung 4.1 Schematische Abbildung einer elektromechanischen Antriebseinheit in einer Werkzeugmaschine

Schäden in elektromechanischen Antriebseinheiten treten vorwiegend an den relativ zueinander bewegten Kontaktflächen der Komponenten auf, die ansonsten dauerfest ausgelegt sind. Schadensursachen an tribologischen Systemen sind Mangel, Alterung, Verschmutzung und sonstige Veränderungen des Schmierstoffs sowie Alterung, Verschleiß und Ermüdung der Reibpartner. Die Relativbewegungen zwischen den bewegten Teilen verursachen Reibung. Die Schäden führen zu einer Veränderung der Reibverhältnisse, der Hysterese und des Spiels im Antriebsstrang. Entsprechend muß eine Fehlerfrüh- bzw. eine Fehlerdiagnose primär diese Veränderungen erkennen. Auch der Elektromotor hat, in Form von Wälzlagern, Maschinenelemente mit relativ zueinander bewegten Reibflächen. Fehlerquellen im Motor sind die Wälzlager mit ca. 76%, gefolgt von einer Verschlechterung der Wicklungsisolation infolge thermischer Belastung [Schr00], [Schr01]. Moderne Regler verfügen über eine Selbstdiagnose, die den elektrischen Teil des Motors mit einschließen. Deshalb werden in der Arbeit nur dessen mechanische Komponenten berücksichtigt.

Dem Instandhalter müssen Methoden und Verfahren an die Hand gegeben werden, mit denen er den Zustand der tribologischen Systeme und der elektromechanischen Übertragungsstrecke beurteilen kann. Elektromechanische Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik werden mit Sensoren ausgerüstet, die eine Strom-, Drehzahl- und Lageinformation für die Regelung liefern. Diese Sensoren können auch für Diagnosezwecke genutzt werden. So lassen sich zum Beispiel über den Strom die Reibmomente und das mechanische Übertragungsverhalten des Gesamtsystems erfassen. Um deren Temperaturabhängigkeit berücksichtigen zu können, benötigt man zusätzliche Temperatursensoren, die auch zur Beurteilung der lokalen Reibverlustleistung verwendet werden.

Die Ermittlung der diagnoserelevanten Merkmale aus den indirekten Messgrößen wie Strom und Temperatur erfordert eine möglichst einfache Darstellung der Zusammenhänge zwischen Fehlerursache und Wirkung, sogenannte Minimalmodelle. Das Schließen auf die Fehlerursache an Hand der Wirkung, d.h. von extrahierten Merkmalen muss einfach nachvollziehbar sein.

Um das Diagnoseverfahren bereits mit dem Anlauf einer neuen Antriebseinheit einsetzen zu können, muss die Konstruktion für die Minimalmodelle die Anordnung und die Parameter der Komponenten, wie Übersetzungen und Trägheitsmoment, liefern. Damit lassen sich die Minimalmodelle parametrieren und eine verfügbare, allgemeine Regelbasis für elektromechanische Antriebseinheiten adoptieren. Der Diagnoseprozess kann unmittelbar mit der Inbetriebnahme gestartet werden. In die Regelbasis müssen die im Feld gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse einfließen. Wegen der hohen Varianten- und Parametervielfalt ist ein leicht anpassbares Diagnoseverfahren Voraussetzung für die Akzeptanz in der Praxis.

4.2 Prinzipien des neuen Lösungsansatzes

Ziel ist es, die sich anbahnenden Fehler einer elektromechanischen Antriebseinheit rechtzeitig zu erkennen oder nach einer Störung oder einem Ausfall die Fehlerursachen schnell zu ermitteln.

Das grundlegende Lösungsprinzip orientiert sich am Vorgehen des Instandhaltungsexperten, der die komplexe Aufgabenstellung ohne Unterstützung durch ein Diagnosesystem in mehreren Schritten löst. Zunächst zerlegt er die Antriebseinheiten gedanklich in einfache Funktionsblöcke, die er nacheinander in definierte Betriebszustände versetzt (divide et impera), die es ihm gestatten, mit einem oder wenigen Indikatoren fehlertypische Verhaltensweisen zu identifizieren. Aus der Summe der Erkenntnisse schließt er auf Fehlerart, Fehlerort, Ursache und Umfang.

Das neue Diagnoseverfahren arbeitet analog zu dieser Vorgehensweise. Es ist modellgestützt, verwendet aber Minimalmodelle, die das Verhalten bei definierten Betriebszuständen mit ausreichender Genauigkeit beschreiben. Die möglichst mit vorhandenen Sensoren gemessenen Größen werden dem entsprechenden Minimalmodell zugeführt, das als Ergebnis bevorzugt nur einen Kennwert liefert, der eine fehlerspezifische, physikalische Größe darstellt. Dabei geht es nicht um den absoluten Wert, sondern um dessen Veränderung gegenüber einem früheren Zustand. Ändert er sich, dann entscheidet die Regelbasis ob, wann und an welcher Baugruppe ein Fehler zu erwarten ist.

Die bevorzugt analytischen Minimalmodelle beruhen auf physikalischen Grundprinzipien, die als Partialmodelle das mechanische und thermische Verhalten des Antriebssystems und seiner Komponenten, bei definierten Betriebszuständen beschreiben. Die Minimalmodelle sind leicht übertragbar, da lediglich die Parameter individuell angepasst werden müssen. Damit ist eine hohe Wiederverwendbarkeit gewährleistet.

Die Regelbasis verknüpft die einzelnen Partialmodelle zu einem Diagnosemodell. Die Regeln interpretieren die aus den Kenngrößen der Minimalmodelle abgeleiteten fehlerrelevanten physikalischen Größen und schließen auf einen sich anbahnenden Fehler. Sie berücksichtigen das Lang- und Kurzzeitverhalten, d.h. Trends und Ereignisse.

Dieser Ansatz hat folgende Eigenschaften:

- Für die Diagnose werden die Größen des Antriebsregelkreises und die mit dessen Sensorik erfassbaren Größen verwendet.
- Parallel wird die Temperatur an den Reibstellen erfasst.

- Die Größen werden Minimalmodellen zugeführt, die bevorzugt aus einer Eingangsgröße eine fehlerrelevante Ausgangsgröße liefern (SISO-Modell). Voraussetzung hierfür ist, dass die Eingangsgrößen bei speziellen Betriebszuständen wie z.B. Eilgang, Auslauf erfasst werden.
- Die identifizierten fehlerrelevanten Größen wie coulomb´sche oder viskose Reibung sind konzentrierte Parameter für den gesamten Antriebsstrang. Die Temperaturmessung kann die Reibungsänderungen und die kritische Reibstelle identifiziert werden.
- Für die Beurteilung des Maschinenzustands werden weniger die absoluten Größen, sondern vor allem deren Änderungen bei definierten Arbeitspunkten herangezogen.
- Um die leistungs- und umgebungsabhängigen Temperatureinflüsse von den fehlerbedingten trennen zu können, werden die Temperaturen an den einzelnen Reibstellen als bezogene Größen behandelt, d.h. die Änderung der Verhältnisse zwischen den einzelnen Temperaturmesswerten betrachtet.
- Die Temperatur wird auch zur Korrektur des Temperatureinflusses auf das Reibverhalten verwendet.
- Neben der Reibung lässt sich durch eine Auswertung der lageabhängig auftretenden Veränderungen des Stroms das Spiel ermitteln bzw. kann bei örtlich auftretenden Stromspitzen auf Schwer- und Leichtgängigkeit geschlossen werden.
- Die Parameter werden gespeichert und aus dem Trendverhalten, d.h. dem Gradient, ein möglicher Ausfall prognostiziert. Bei auftretenden Störungen wird die damit verbundene Historie gespeichert und als Referenz für zukünftige verwendet.
- Das Lang- und Kurzzeitverhalten wird mit dem ähnlicher oder gleicher Einheiten verglichen und damit Fehlersymptome generiert.
- Die Merkmalsinterpretation erfolgt mit einer Regelbasis.
- Die Regelbasis ist allgemein anwendbar. Nur die für die zu beurteilende Antriebseinheit zulässigen Regeln werden jeweils angewandt.
- Die Regelbasis lässt sich einfach erweitern. Neue Erkenntnisse können eingegeben werden. Der Lernprozess verbessert die Treffsicherheit.
- Die Regeln erfassen die Abhängigkeit zwischen den Ausgangsgrößen der Minimalmodelle und interpretieren sie. Die Regeln und das Schließen können vom Instandhalter leicht nachvollzogen werden.

- Die Regeln erlauben es, trotz einer niederen Ordnung der Minmalmodelle, auch Zusammenhänge höherer Ordnung zu berücksichtigen, die als Erfahrung vorliegen, wenn die Regelbasis im Laufe der Zeit mit Fehlerdaten trainiert wird. Mit den Kennwerten bei Fehlern, Störungen oder Ausfällen lassen sich zukünftig individuelle Neuro-Fuzzy Netze und schließlich neuronale Netze entwickeln und trainieren.
- Die Minimalmodelle sind in ihrer Struktur allgemeingültig, sie lassen sich durch Parametereingabe einfach an verschiedene elektromechanische Antriebseinheiten anpassen. Die Regelbasis ist somit leicht zu übertragen.

Der neue Lösungsansatz erfasst nur die lebensdauerbegrenzten mechanischen Bauteile des elektromechanischen Antriebssystem.

5 Physikalisch-technische Grundlagen des Diagnosemodells

Das entwickelte Diagnosemodell deckt bei der Produktklasse elektromechanische Antriebssysteme den mechanischen Teil des Antriebstranges ab. Ziel ist es, nur Strom-, Temperatur- und Lageinformationen für die Diagnose zu nutzen, vorhandene Sensoren zu verwenden und nur Temperatursensoren zusätzlich zu installieren. Dauerfest ausgelegte Bauteile werden vom Diagnoseprozess nicht erfasst. Als fehlersensitiv werden alle Bauteilflächen eingestuft, die mit einem Nachbarbauteil in Kontakt stehen und bei denen die Kontaktflächen Relativbewegungen zueinander ausführen, wie z.B. Lager, Zahnräder, Führungen und Dichtungen. Zwischen den Kontaktflächen befindet sich meist ein Schmiermittel. Es handelt sich um tribologische Systeme. Tribologische Systeme werden nach Aggregatzustand, Art der Relativbewegung und Bewegungszustand charakterisiert, Abbildung 5.1 [Spu96].

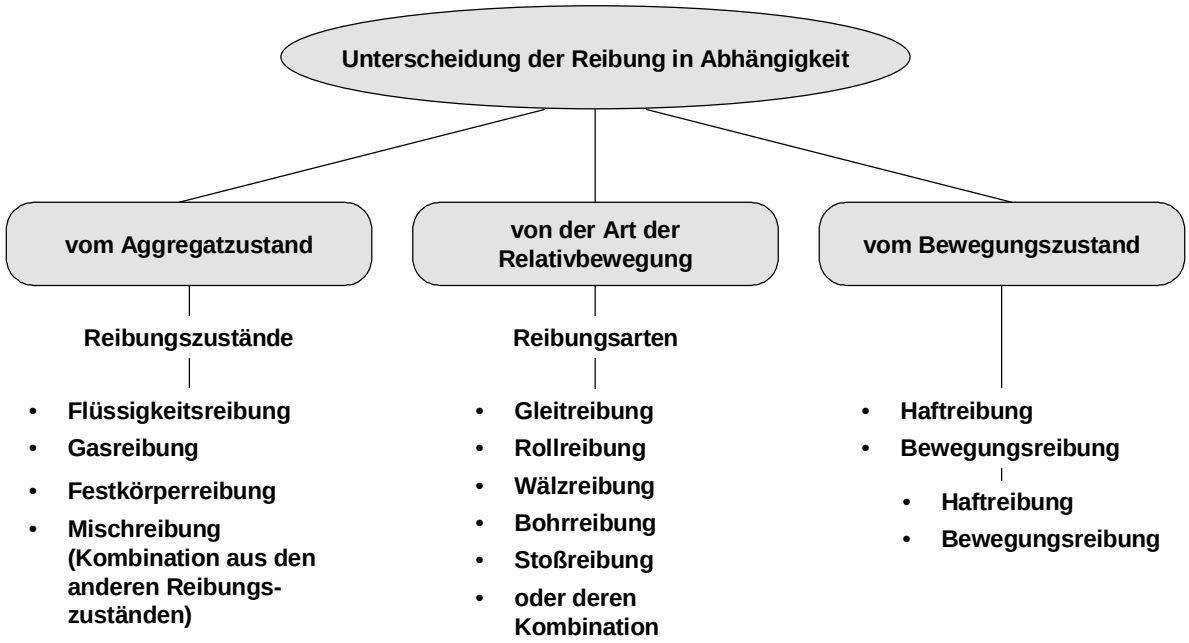


Abbildung 5.1 Charakterisierung der Reibung von tribologischen Systemen

5.1 Physikalische Grundlagen tribologischer Systeme

Zwischen relativ zueinander bewegten Flächen, die in Kontakt stehen, tritt Reibung auf. Die Reibkräfte und Reibmomente verursachen in Verbindung mit der Relativgeschwindigkeit eine Verlustleistung die als Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Die Größe der Reibkräfte bzw. Reibmomente ist von der Art des Reibzustandes im Kontakt abhängig. Befindet sich ein Fluid zwischen den Kontaktflächen und berühren sich die Flächen nicht, so spricht man von hydrodynamischer Schmierung mit flüssiger oder viskoser Reibung. Berühren sich die Flächen unmittel-

bar so handelt es sich um trockene bzw. coulomb´sche Reibung. Bei kleinen Schmierspalten gibt es Mischreibung, bei der anteilig flüssige und trockene Reibung vorliegt. Bei hochbelasteten Roll- und Wälzkontakten tritt elastohydrodynamische Schmierung auf. Die unterschiedlichen Reibzustände sind in Abbildung 5.2 dargestellt

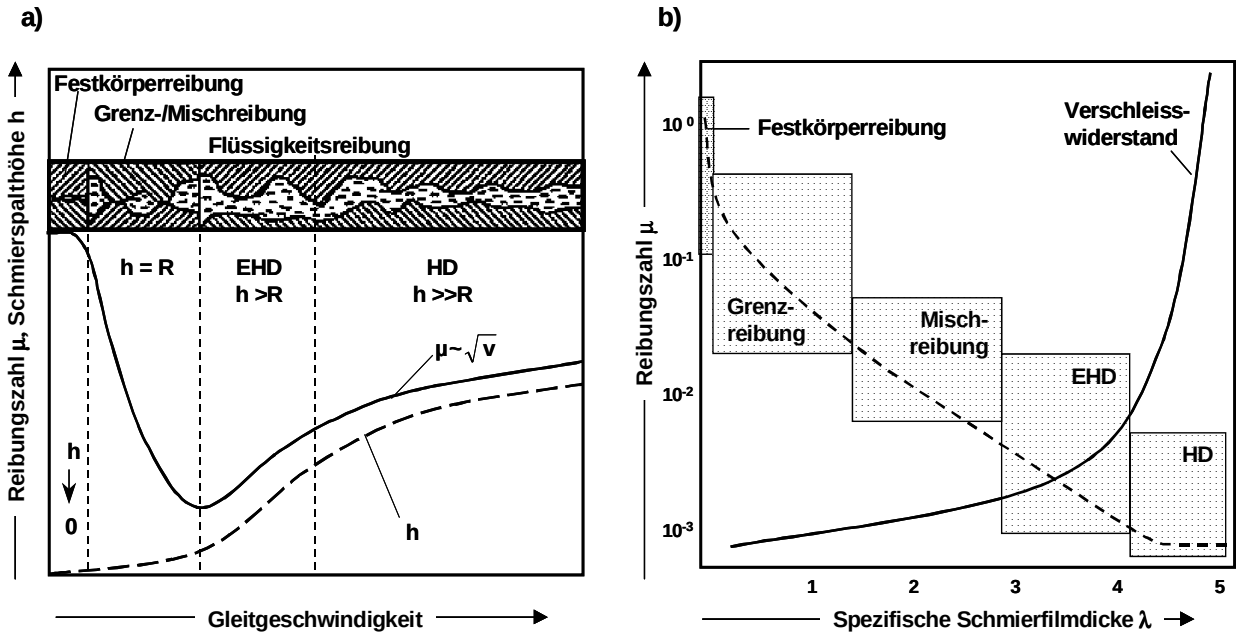


Abbildung 5.2 ***a) Darstellung der Stribekkurve [Stri1902], b) Abhängigkeit der Reibungszahl μ, der Rauhigkeit R, der Schmierspalthöhe h und des Verschleißwiderstands von der spezifischen Schmierfilmdicke λ (Gl. 5.9)***

Abhängig von der Gleitgeschwindigkeit v bzw. der spezifischen Schmierfilmdicke λ herrschen unterschiedliche Reibzustände mit den Extremzuständen Festkörperreibung und hydrodynamischer Schmierung. Bei der hydrodynamischen Schmierung werden die beiden Flächen durch einen im Schmierfilm erzeugten Druck getrennt. Durch die bewegten Flächen wird bei der hydrodynamischen Schmierung Schmierstoff zwischen die Flächen gedrückt, wodurch es nach den Gesetzen der Hydrodynamik im konvergierenden Spalt zu einem Druckaufbau kommt. Der Druck wirkt den äußeren Belastungen entgegen und verhindert somit eine Berührung der bewegten Flächen unter der Voraussetzung, dass genügend Schmierstoff vorhanden ist. Bei der seltener verwendeten hydrostatischen Schmierung wird der Druck im Schmierspalt durch ein extern, unter Druck zugeführtes Schmiermittel erzeugt.

Kennzeichnend für die Reibkraft bzw. das -moment ist die Schubspannung τ in der Flüssigkeit, die sich über das Newton‘sche Schubspannungsgesetz ergibt,

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz} \qquad \text{Gl. 5.1}$$

wobei η die dynamische Viskosität des Fluids und dv/dz die Schergeschwindigkeit bzw. das Geschwindigkeitsgefälle im Schmierspalt in z-Richtung, d.h. senkrecht zur Strömungsrichtung bzw. Bewegungsrichtung ist.

Bei einem linearen Geschwindigkeitsprofil gilt,

$$\tau = \eta \frac{v}{h} \qquad \text{Gl. 5.2}$$

wobei v die Relativgeschwindigkeit zwischen den bewegten Flächen und h deren Abstand ist.

Bei translatorischer Bewegung ist die aufzuwendende viskose Reibkraft F_{RV}, um einen Körper mit der Reibfläche A_R mit der Geschwindigkeit v zu bewegen

$$F_{RV} = \tau \cdot A_R \qquad \text{Gl. 5.3}$$

während bei rotatorischen Bewegungen das Reibmoment

$$M_{RV} = \tau \cdot \frac{\pi \cdot B \cdot D}{2} \text{ ist.} \qquad \text{Gl. 5.4}$$

Dabei ist D der Durchmesser der relativ zueinander bewegten zylindrischen Flächen die eine Breite B haben. Bei hydrodynamischer Schmierung ist die Reibkraft damit im laminaren Bereich proportional zur dynamischen Viskosität des Schmierstoffs, zur Relativgeschwindigkeit der Kontaktflächen, zur Kontaktfläche selbst und umgekehrt proportional zur Spalthöhe. Im turbulenten Bereich ist die Reibkraft bzw. das Reibmoment ungefähr proportional zur Relativgeschwindigkeit im Quadrat.

Damit lassen sich bei hydrodynamischer Schmierung Veränderungen am tribologischen System durch Reibmomentmessungen erkennen. Erfassbar sind auch Veränderungen der dynamischen Viskosität infolge von Alterung oder Verunreinigung des Schmierstoffes sowie Veränderungen der Schmierspalthöhe als Folge von Schmierstoffmangel, bei sonst gleichen Randbedingungen. Dabei muss beachtet werden, dass die dynamische Viskosität η nach Vogel [Vog21],[Vog22] mit steigender Schmierstofftemperatur exponentiell fällt.

$$\eta = a \cdot \exp\left(\frac{b}{\theta \cdot c}\right) \qquad \text{Gl. 5.5}$$

Dabei sind a, b und c ölspezifische Koeffizienten und θ die jeweilige Temperatur in Celsiusgraden. Mit zunehmender Temperatur reduziert sich gleichzeitig die Spalthöhe und der Druck nimmt zu. Der Temperatureinfluss kompensiert sich teilweise, so dass der Viskositäts-Temperatur-Einfluss in erster Näherung vernachlässigt werden kann [StRö96].

Bei der Festkörper- bzw. trockenen oder coulomb´schen Reibung ist die Reibkraft für translatorische Bewegungen

$$F_{RC} = \mu \cdot F_N \cdot \mathrm{sign}(v) \qquad \text{Gl. 5.6}$$

Das heißt, die coulomb´sche Reibkraft ist proportional zum Reibungskoeffizienten μ und der Normalkraft F_N in den Kontaktflächen, aber unabhängig von der Kontaktfläche selbst.

Bei rotatorischen Bewegungen ist das coulomb´sche Reibmoment

$$M_{RC} = \frac{D}{2} \cdot \mu \cdot F_r \cdot \mathrm{sign}(n) \qquad \text{Gl. 5.7}$$

mit dem Durchmesser D der relativ zueinander bewegten zylindrischen Flächen und der radialen Belastung F_r.

Reine Festkörperreibung tritt bei geschmierten technischen Oberflächen nicht auf. Der Bereich der Teilschmierung, d.h. der Grenz- und Mischreibung ist gekennzeichnet durch teilweise metallische Berührung, bei der Flächen gegeneinander einlaufen.

Bei der Grenzschmierung ist die Schmierfilmdicke etwa so groß wie ein Ölmolekül. Dieser Zustand herrscht, wenn die Schmierstoffmenge nicht ausreicht, oder die Relativbewegung zwischen den bewegten Flächen zu gering ist. Der Reibbeiwert liegt bei 0,1 [Bar97],[Bar99]. Bei der Mischreibung gibt es anteilig Bereiche mit Grenzschmierung und hydrodynamischer Schmierung mit niedrigen Reibwerten [Fei93].

Damit hängt in diesem für die elektromechanischen Antriebseinheiten häufigen Fall, die Reibkraft bzw. das Reibmoment vom Anteil der beiden Reibungsarten ab. Die gesamte Reibkraft ist

$$F_{RM} = F_{RV} + F_{RC} \qquad \text{Gl. 5.8}$$

Bei reiner hydrodynamischer Schmierung wirkt nur F_{RV} ohne Verschleiß, bei abnehmender Schmierspalthöhe zunehmend die coulomb´sche Reibkraft F_{RC}, verbunden mit abnehmendem Verschleißwiderstand.

Ein gesondert zu behandelnder Fall sind hochbelastete Kontakt- und Lagerstellen von Körpern, die aufeinander abwälzen, z.B. bei Wälzlagern und Zahnrädern von elektromechanischen Antrieben, wo elastohydrodynamische Schmierung bzw. Rollreibung herrscht [GfT84],[GfT80]. Die beiden aufeinander abrollenden Körper bilden einen stark konvergierenden Spalt, in den das Schmiermittel unter hohem Druckanstieg eingezogen wird. Die Körper verändern ihre Geometrie unter der Hertz´schen Pressung, so dass sich in etwa ein paralleler Spalt einstellt. Durch den Anstieg der Viskosität infolge des hohen Drucks, stellt sich eine Schmierspalthöhe ein, die einen metallischen Kontakt vermeidet.

Die Reibung des unbelasteten Wälzlagers hängt von der Betriebsviskosität des Schmierstoffs, der Drehzahl und der Baugröße ab, die des belasteten von der Größe der Kontaktfläche, die abhängig von der Schmierung und der Belastung des Lagers ist. Auch hier gibt es einen geschwindigkeits- und einen belastungsabhängigen Anteil.

Der Reibungszustand und der verbundene Verschleißprozess wird nach Wellauer/Halloway [WeHa76] durch die spezifische Schmierfilmdicke λ charakterisiert,

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \qquad \text{Gl. 5.9}$$

mit dem Rauheitskennwert σ =1,3 R_a der jeweiligen Kontaktfläche und der wirksamen Schmierfilmdicke h_{min} entsprechend der elastohydrodynamischen Schmierungstheorie [WiChe80]. In Abhängigkeit von der spezifischen Schmierfilmdicke ist mit unterschiedlichen Verschleißmechanismen zu rechnen [And80]. Bei einem $\lambda > 1{,}5$ treten primär Oberflächenzerrüttungsprozesse (Grübchenbildung) auf, unterhalb dieses Wertes sind abrasive und adhäsive Verschleißprozesse wirksam, siehe Abbildung 5.3. Nach Bartz [Bar99] sollte λ nicht unter 1,5 (2,0) liegen, um Fressen zu vermeiden.

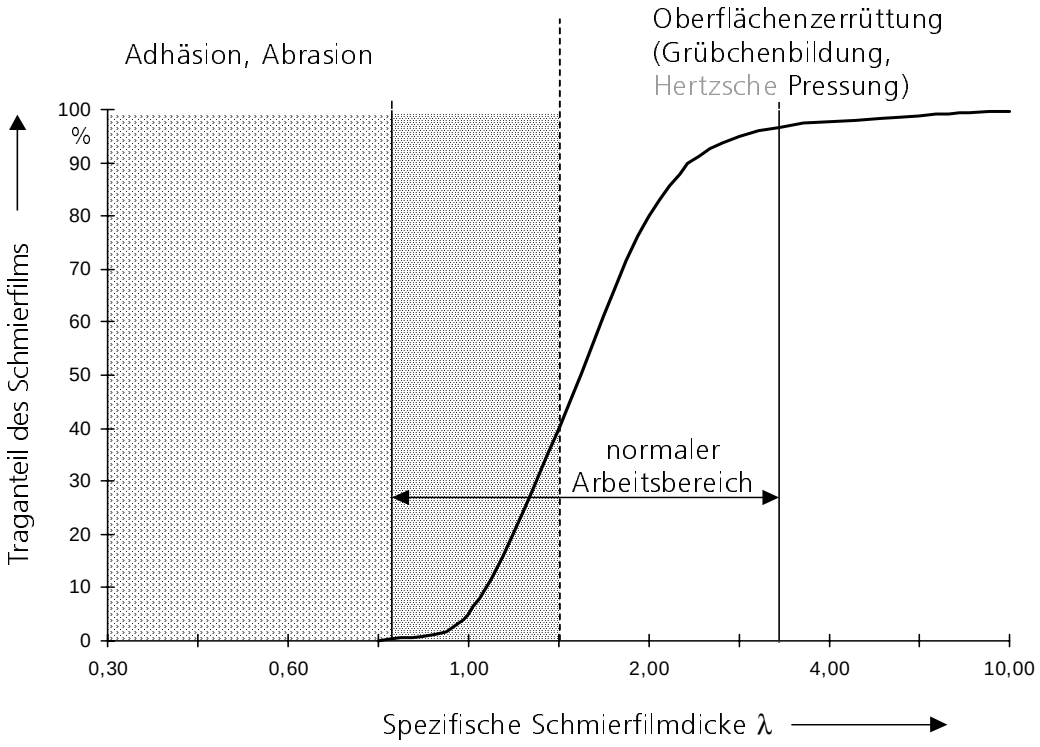


Abbildung 5.3 Traganteil des Schmierfilms bei der elastohydrodynamischen Schmierung von Wälzlagern in Abhängigkeit von der spezifischen Schmierfilmdicke nach Anderson [And80]

Verändert sich das tribologische System, so ändert sich die Reibung. Bei flüssiger und trockener Reibung unterscheiden sich die Reibkoeffizienten um mehrere Zehnerpotenzen, siehe Abbildung 5.4. Bei der elastohydrodynamischen Schmierung sind die Reibungszahlen niedrig. Sie liegen in der gleichen Größenordnung wie bei der reinen Flüssigkeitsreibung.

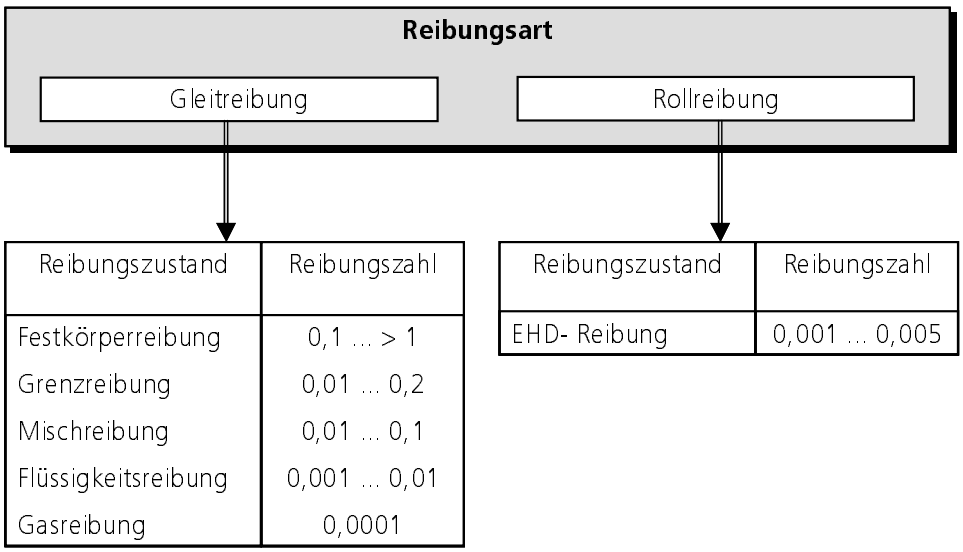


Abbildung 5.4 Reibungsarten und deren Reibungszahlen [Bar99],[CzHa92]

Bei gleichen Betriebszuständen, d.h. gleiche Normalkräfte, gleiche Temperatur etc. während der Auswertung vorausgesetzt, lassen sich damit Veränderungen des Reibungskoeffizienten μ infolge veränderter, z.B. geschädigter Oberflächen, anhand der Reibkraft bzw. dem Reibmoment erkennen.

Für die Reibleistung bei translatorischen Bewegungen gilt

$$P_R = F_R \cdot v \qquad \text{Gl. 5.10}$$

und bei rotatorischen

$$P_R = M_R \cdot \omega \qquad \text{Gl. 5.11}$$

Die Reibleistung P_R erwärmt den Schmierstoff und das Umfeld der Kontaktflächen. Die Temperatur der Reibstelle kann als zusätzlicher Indikator für lokale Veränderungen der Reibverhältnisse herangezogen werden.

Bei der Beurteilung des tribologischen Systems, insbesondere der möglichen Schädigungen an den Kontaktflächen, muß noch die Art der Relativbewegung zwischen den Teilen einbezogen werden. Man spricht von Haft-, Gleit-, Roll-, Wälz- und Bohrreibung. Bei der Haftreibung tritt keine Relativbewegung zwischen den Kontaktflächen auf. Haftreibungskräfte und -momente werden erst dann wirksam, wenn äußere Kräfte oder Momente an den Kontaktflächen wirken.

Beim Übergang vom ruhenden zum bewegten Zustand spricht man vom Losbrechmoment. Das Losbrechmoment hängt unter anderem von der Haftzeit T_H, der Oberflächenrauheit und den Werkstoffen ab.

Bei der Gleitreibung kommt es zu einer Relativbewegung zwischen den Kontaktflächen. Von Rollreibung spricht man, wenn die beiden Kontaktflächen, ohne zu gleiten, aufeinander abrollen. Bei der Wälzreibung ist der Rollreibung eine meist kleine Gleitreibung (Schlupf) überlagert. Zu Bohrreibung kommt es bei rotierenden Bewegungen zwischen den Kontaktflächen, d.h. die Drehung erfolgt um eine senkrecht zur Tangentialfläche stehenden Achse.

Bei elektromechanischen Antriebseinheiten werden zur Lagerung der Wellen sowie beim Gewindetrieb Wälzelemente eingesetzt, bei denen neben Rollreibung auch Bohrreibung in unterschiedlichem Maße auftritt. Bei Führungen gibt es sowohl Wälz- als auch Gleitführungen mit Roll- bzw. Gleitreibung. Bei den sehr häufig eingesetzten Zahnradgetrieben tritt an den Zahnflanken Wälzreibung auf. Bei Planetengewindetrieben wirkt Bohrreibung.

Die in den Kontaktflächen wirkenden Kräfte wirken sich schädigend auf die Werkstoffe der Kontaktflächen aus. Bei Wälzlagern tritt zwischen Wälzkörpern und Lagerringen eine hohe Hertzsche Pressung auf, die nach einer gewissen Anzahl von Überrollungen infolge von Werkstoffermüdung zum Ausbruch von Material an den Laufflächen führt. Solche Veränderungen erhöhen den Rollreibungswiderstand. Entsprechendes gilt für Wälzführungen und Kugelumlaufspindeln. Da das Ausbrechen des Materials meist nur an einzelnen, örtlich sehr begrenzten Stellen erfolgt, wirkt sich die Schädigung auf das Reibverhalten anfänglich nicht oder nur wenig aus. Signalbasierte Verfahren können kleine Veränderungen an den Kontaktflächen unter Umständen früher erkennen. Erst wenn größere Schädigungen aufgetreten sind, lassen sich diese über das Reibmoment detektieren. Da kleinere Ausbrüche nicht zum Ausfall führen, ist dieses Verhalten nicht von Nachteil für die Diagnose.

In der Antriebstechnik werden häufig zur Abdichtung rotierender Teile berührende Elastomerdichtungen eingesetzt, bei denen Mischreibung im Kontakt zwischen Dichtlippe und Welle auftritt. Dichtungen haben ein typisches Reibverhalten [Fre93]. Eine Veränderung der nicht unerheblichen Reibung kann auf eine demnächst ausfallende Dichtung hinweisen. Die Ursachen für den Ausfall können Verschleiß, Beschädigungen und Alterung der Dichtung sein. Beim Ausfall einer Dichtung kommt es zu Leckage.

5.2 Minimalmodelle zur Beschreibung des Zeitverhaltens von tribologischen Systemen

Zur Beurteilung des Zustands des mechanischen Teils einer elektromechanischen Antriebseinheit müssen die Auswirkungen im tribologischen System zwischen den Kontaktflächen der Maschinenelemente erfasst werden. Die Abbildung 5.5 zeigt den Wirkplan eines Zweimassenschwingers mit Motor- und Lastseite als Ersatzmodell für den mechanischen Teil einer elektromechanischen Antriebseinheit mit Getriebe.

Last- und Motorseite sind über eine Elastizität mit Spiel gekoppelt. Das Spiel wird häufig durch eine Verspannung der Kontaktflächen kompensiert, der Steifigkeitsverlauf ist meist nichtlinear. Die Übersetzung des Getriebes ist i_G. Bedingt u.a. durch Maßabweichungen oder Verschleiß treten kinematische Fehler auf.

Im Ersatzmodell sind getrennt die motor- und lastseitigen Reibkontakte, d.h. die dort verursachten Reibmomente zusammengefasst. Als Reibmodell wird eine Kombination aus coulomb´scher und viskoser Reibung zugrundgelegt. Lastseitige Änderungen, d.h. nach dem Getriebe, wirken sich auf das Motormoment weniger aus, wenn das Getriebe eine größere Übersetzung hat.

Bei Verschleiß geht zunächst, wenn vorhanden, die Vorspannung zurück, später tritt Spiel zwischen den Kontaktflächen auf, das sich vergrößert. Bei einem Drehmomentrichtungswechsel geht bei nachlassender Verspannung M_M temporär zurück, bei Spiel wird M_M kurzzeitig null. Der drehzahlgeregelte Motor wird entlastet, der Strom geht kurzzeitig zurück. Kinematische Fehler treten bei jedem Antrieb auf. Sie können einerseits als Information für die Diagnose dienen, andererseits überlagern sie die Reibungssignale nachteilig. Die lastseitigen Fehler wirken sich über einen größeren Drehwinkel des Motors aus, als die motorseitigen. Periodisch mit der Getriebeabtriebswellenumdrehung auftretende Fehler wirken sich motorseitig, nach i_G Motorumdrehungen wiederkehrend aus.

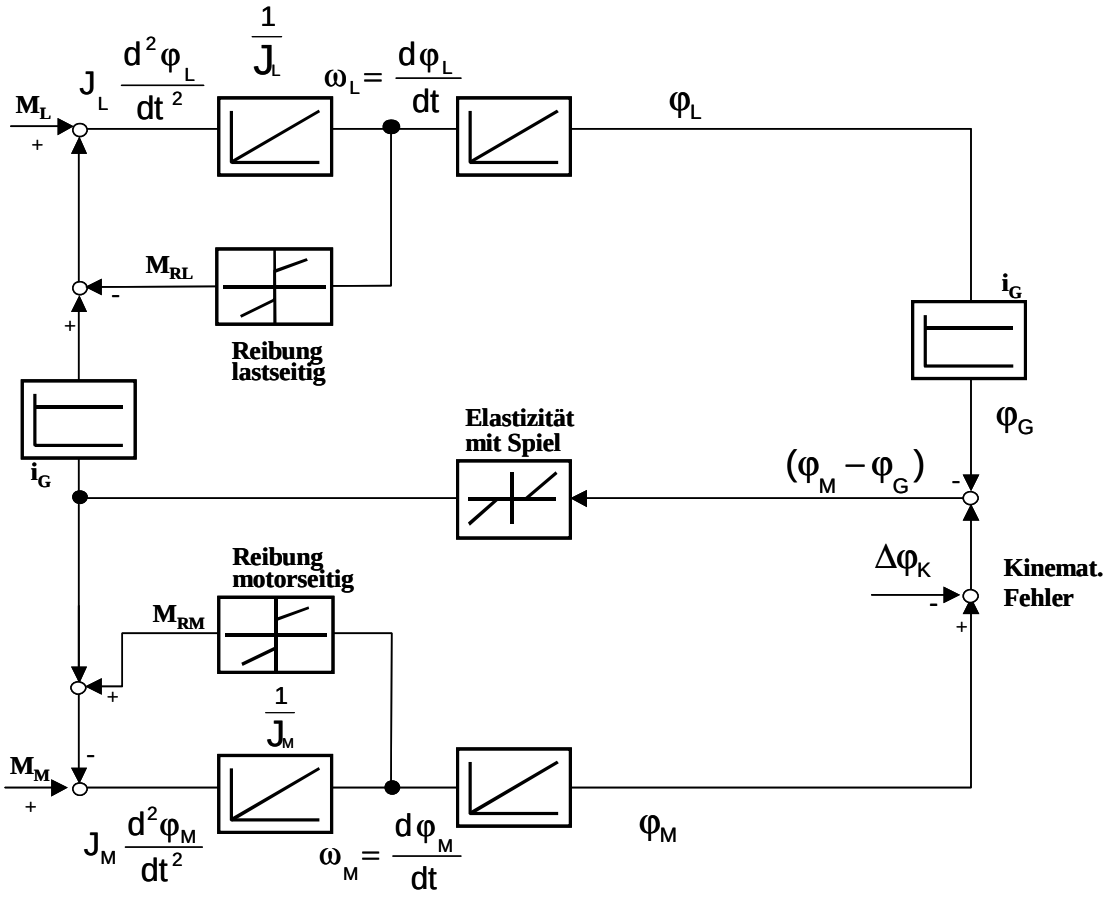


Abbildung 5.5 Wirkplan einer elektromechanischen Antriebseinheit

Das Modell in Abbildung 5.5 lässt sich für die Diagnose vereinfachen, wenn diese nur bei bestimmten Betriebszuständen erfolgt. Für die Erfassung der Reibungssignale, des Spiels sowie von periodisch auftretenden kinematischen Übertragungsfehlern als Folge von Verschleiß, ist es vorteilhaft, solche Betriebszustände zu verwenden, bei denen nur eine schädigungsrelevante Größe einen Einfluss hat. Damit entfallen die Unschärfen die mit einer Parameterschätzung mit mehreren Parametern, z.B. mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square Methode) entstehen, insbesondere wenn wie im vorliegenden Fall minimale Reibwertänderungen detektiert werden müssen.

Vor allem sollten Betriebszustände gewählt werden, bei denen die Last wiederkehrend konstant ist, das heißt M_L = const. oder null ist. Günstig sind z.B. auch konstante Gewichtskräfte wie sie z.B. bei vertikalem Einbau wirken. Keine Prozesskräfte wirken beim Eilgang oder der Referenzfahrt einer Maschine. Des weiteren sollten Betriebszustände gewählt werden, bei denen eine

stationäre Bewegung mit konstanter Drehzahl oder Geschwindigkeit abläuft. Auch hier ist der Eilgang oder die Referenzfahrt günstig. Sofern keine Eigenfrequenzen angeregt werden, haben Elastizitäten und Spiel bei diesen Randbedingungen keinen Einfluss.

In diesem Fall kann das statische Gleichgewicht angesetzt werden, da die Beschleunigungsterme null sind und die Verdrehung $\varphi_G - \varphi_L$ = const. ist.

$$M_M = M_{RM} + \frac{M_{RL}}{i_G} \qquad \text{Gl. 5.12}$$

Das Motormoment M_M entspricht damit der Summe aus motorseitigem Reibmoment M_{RM} und reduziertem lastseitigen Reibmoment M_{RL}. Lediglich Stick-Slip-Effekte oder kinematische Übertragungsfehler können die Reibmomentmessung im Leerlauf bzw. bei konstanter Last stören. Diese Einflüsse lassen sich durch eine entsprechende Signalvorverarbeitung minimieren.

Da entsprechend

$$M_M = \Phi \cdot I \qquad \text{Gl. 5.13}$$

das am Motor wirkende Moment proportional zum Motorstrom und Φ als verketteter Fluss bei gleichen Umgebungsbedingungen konstant ist, ist der Motorstrom ein Maß für das Gesamtreibmoment. Entscheidend für die Diagnose ist nicht die absolute Größe des Motormoments bzw. des Motorstroms, sondern seine Änderung über der Zeit. Das Motormoment M_M ergibt sich als Summe von motor- und lastseitiger viskoser und coulomb´scher Reibung.

$$M_M = M_{RM} + M_{RL} \qquad \text{Gl. 5.14}$$

$$= M_{CM} \cdot \mathrm{sign}(n_M) + d_M \cdot \omega_M + \frac{1}{i_G}(M_{CL} \cdot \mathrm{sign}(n_L) + d_L \cdot \omega_L) \qquad \text{Gl. 5.15}$$

$$= M_{CM} \cdot \mathrm{sign}(n_M) + \frac{1}{i_G} \cdot M_{CL} \cdot \mathrm{sign}(n_L) + \left(d_M + \frac{d_L}{i_G}\right) \cdot \omega_M \qquad \text{Gl. 5.16}$$

Der coulomb‘sche Anteil lässt sich vom viskosen Anteil trennen, wenn die geschwindigkeitsabhängige viskose Reibung bei zwei verschiedenen Eilganggeschwindigkeiten (Superpositionsverfahren) oder durch einen Auslaufversuch ermittelt wird. Beide Methoden werden im folgenden kurz vorgestellt.

5.2.1 Trennung der coulomb´schen und viskosen Reibung mit dem Superpositionsverfahren

Ein Ansatz die coulomb‘sche und viskose Reibung bei laufendem Betrieb zu trennen, beruht auf der Tatsache, dass nur die viskose Reibung geschwindigkeits- bzw. drehzahlabhängig ist. Da entsprechend Gl. 5.2 das Motormoment M_M proportional zum Motorstrom I_M ist, gilt

$$\frac{M_{M\ ist}}{M_{M\ Nenn}} = \frac{I_{M\ ist}}{I_{M\ Nenn}} \qquad \text{Gl. 5.17}$$

Da im Eilgang bei konstanter Verfahrgeschwindigkeit ausschließlich das Gesamtreibmoment M_R am Motor wirkt, lässt sich Gl. 5.17 umschreiben mit $M_M = M_R$ in

$$M_R = \frac{I_{M\ ist}}{I_{M\ Nenn}} \cdot M_{M\ Nenn} \qquad \text{Gl. 5.18}$$

Erfasst man den Motorstrom bei zwei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten (Eilgängen), dann ergeben sich bei sonst gleichen Randbedingungen zwei unterschiedliche Reibmomente M_{R1} und M_{R2} am Motor

$$_{R1} = M_{V1} + M_C \qquad \text{Gl. 5.19}$$

$$M_{R2} = M_{V2} + M_C \qquad \text{Gl. 5.20}$$

wobei $M_{V1} \sim n_{eil1}$ und $M_{V2} \sim n_{eil2}$ ist, mit n_{eil1} und n_{eil2} als den Motordrehzahlen bei zwei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten. Subtrahiert man die beiden Gl. 5.19 und Gl. 5.20 dann erhält man

$$_{R1} - M_{R2} = M_{V1} - M_{V2} \qquad \text{Gl. 5.21}$$

Es ist

$$M_V = d_{ges} \cdot \omega_M = d_{ges} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_M \qquad \text{Gl. 5.22}$$

mit d_{ges} als drehzahlunabhängiger Dämpfungskonstante, ω_M als Winkelgeschwindigkeit und n_M als Drehzahl des Motors. Die Gl. 5.22 in Gl. 5.21 eingesetzt ergibt:

$$M_{R1} - M_{R2} = d_{ges} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{eil1} - d_{ges} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{eil2} \qquad \text{Gl. 5.23}$$

Daraus folgt

$$d_{ges} = \frac{M_{R1} - M_{R2}}{2\pi \cdot (n_{eil1} - n_{eil2})} \quad , \qquad \text{Gl. 5.24}$$

Das Reibmoment nach Gl. 5.18 eingesetzt ergibt:

$$d_{ges} = \frac{(I_{M1ist} - I_{M2\,ist}) \cdot \left(\frac{M_{M\ Nenn}}{I_{M\ Nenn}}\right)}{2\pi \cdot (n_{eil1} - n_{eil2})} \qquad \text{Gl. 5.25}$$

Praktisch bedeutet dies, dass der Quotient aus Stromdifferenz und Drehzahldifferenz mit der Motorkonstante multipliziert werden muss, um die Dämpfungskonstante d_{ges} für das Gesamtsystem zu ermitteln. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Dämpfungskonstante drehzahlunabhängig ist bzw. nur deren Änderungen für die Auswertung verwendet werden.

Das viskose Reibmoment M_V lässt sich damit nach Gl. 5.22 wie folgt berechnen:

$$M_{Vl} = d_{ges} \cdot \omega_M = d_{ges} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{eil1} \quad \text{bzw.} \qquad \text{Gl. 5.26}$$

$$M_{V2} = d_{ges} \cdot \omega_M = d_{ges} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{eil2} \qquad \text{Gl. 5.27}$$

Damit lässt sich die Änderung der viskosen Reibung über der Zeit und als Differenz zum Gesamtreibmoment auch die Änderung der coulomb´schen Reibung ermitteln.

5.2.2 Trennung des viskosen und coulomb´schen Reibanteils durch Auslaufversuch

Zur Bestimmung des viskosen Reibanteils aus dem Auslaufverhalten wird der Antrieb im stromlosen Zustand mit eingeschaltetem Lagegeber am Motor bei einer definierten Anfangsdrehzahl abgeschaltet. Die Auslaufkurve, d.h. $\omega(t)$ wird aufgezeichnet. Das Modell aus Abbildung 5.5 lässt sich dafür auf einen massenbehafteten starren Antrieb mit coulomb´scher und viskoser Reibung reduzieren. Es gilt

$$\left(J_M + \frac{J_L}{i_G^2}\right) \cdot \dot{\omega}_M = M_M - \left(M_{VM} + \frac{M_{VL}}{i_G}\right) - \left(M_{CM} \cdot \mathrm{sign}(n_M) + \frac{M_{CL}}{i_G} \cdot \mathrm{sign}(n_L)\right) \qquad \text{Gl. 5.28}$$

mit $J_{red} = \left(J_M + \frac{J_L}{i_G^2}\right)$, $M_{VM} = d_M * \omega_M$ sowie $M_{VL} = d_L * \omega_L$ Gl. 5.29

und da i_G und sign(n_L) die gleichen Vorzeichen haben sowie der Annahme, dass das Motormoment positiv ist und die Reibmomente ihm entgegenwirken, folgt

$$J_{red} \cdot \dot{\omega} + \left(d_M + \frac{d_L}{|i_G|}\right) \cdot \omega_M = M_M - \left(M_{CM} + \frac{d_L}{|i_G|}\right) \qquad \text{Gl. 5.30}$$

Die lineare Differentialgleichung erster Ordnung mit konstantem Koeffizienten beschreibt ein Verhalten mit Verzögerung erster Ordnung (PT1-Verhalten) [Stu86],[Schi86]. Die linke Seite der Differentialgleichung beschreibt das für das Auslaufverhalten maßgebende Eigenverhalten des Antriebssystems. Nach einer Umformung und mit

$$d_{ges} = \left(d_M - \frac{d_L}{i_G}\right) \qquad \text{Gl. 5.31}$$

erhält man

$$\frac{J_{red}}{d_{ges}} \cdot \dot{\omega}_M - \omega_M = \frac{1}{d_{ges}}\left(M_M - \left(M_{CM} + \frac{M_{CL}}{i_G}\right)\right) \qquad \text{Gl. 5.32}$$

mit $T_A = \frac{J_{red}}{d_{ges}}$ als Zeitkonstante.

Die bekannte Lösung des homogenen Teils der Differentialgleichung mit ω_0 als Anfangsdrehzahl lautet

$$\omega(t) = \omega_o \cdot e^{-\frac{t}{T_A}} \qquad \text{Gl. 5.33}$$

und beschreibt das Auslaufverhalten eines massebehafteten Antriebssystems mit viskoser Reibung. Der Wert der Ableitung der Funktion bei t=0 ist,

$$\left.\frac{d\omega}{dt}\right|_{t=0} = -\frac{1}{T} \cdot \omega_0 \cdot \left.e^{-\frac{1}{T} \cdot t}\right|_{t=0} = -\frac{\omega_0}{T_A} \qquad \text{Gl. 5.34}$$

Dies ist die Steigung der Tangente an die Auslaufkurve im Beginn des Auslaufs mit $\omega = \omega_0$.

Der Wert T_A lässt sich damit grafisch als t-Achsenabschnitt der Tangente oder durch Approximation (Least Square) aus den Werten der gemessenen Auslaufkurve berechnen.

Der Auslaufversuch muss immer bei der gleichen, möglichst hohen Anfangsdrehzahl gestartet werden und die Tangentensteigung aus wenigen, in unmittelbarer Nähe von ω_0 liegenden ω-Werten bestimmt werden, um den Einfluss einer eventuell arbeitspunktunabhängigen Dämpfung auszuschließen.

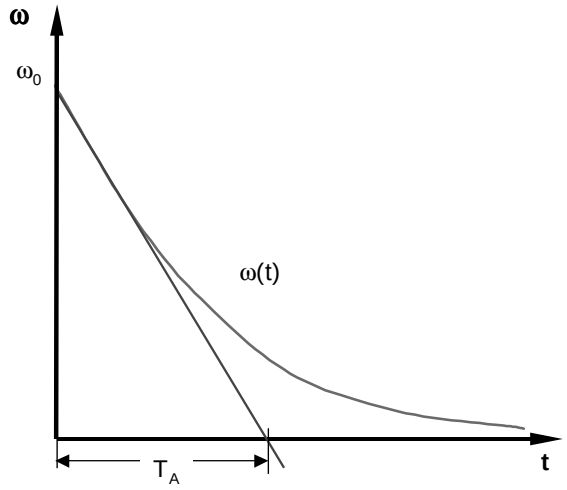


Abbildung 5.6 Auslaufverhalten der elektromechanischen Antriebseinheit

Mit T_A lässt sich die viskose Dämpfungskonstante, unter der Annahme eines konstanten Massenträgheitsmoments J_{red} wie folgt ermitteln:

$$d_{ges} = d_M + \frac{d_L}{i_G} = \frac{J_{red}}{T} \qquad \text{Gl. 5.35}$$

Aus Gl. 5.30 folgt mit einem bei der Anfangsdrehzahl ω_0 gemessenen Motormoment $M_M(\omega_0)$ das gesamte coulomb´sche Reibmoment M_{Cges}.

$$M_{Cges} = \left(M_{CM} + \frac{M_{CL}}{i_G}\right) = M_M(\omega_0) - d_{ges} \cdot \omega_0 \qquad \text{Gl. 5.36}$$

Die Werte von d_{ges} und M_{Cges} charakterisieren die jeweiligen Reibanteile.

Damit lässt sich wie beim Superpositionsverfahren die gesamte coulomb´sche Reibung ermitteln. Da auch hier nur die Änderungen für die Diagnose relevant sind, lassen sich bei gleichen Randbedingungen die ermittelten Parameter direkt verwenden.

Die ermittelten Merkmalsgrößen sind wie folgt zu bewerten:

1. Sind Motor- und Lastseite über ein Getriebe verbunden, wirkt sich das lastseitige Reibmoment

nur mit dem Faktor $1/i_G$ auf das Motormoment aus.

2. Sowohl mit dem Auslaufverhalten als auch mit dem Superpositionsverfahren lassen sich viskoser und coulomb´scher Anteil des Gesamtreibmoments trennen.
3. Beobachtet man die Veränderungen des Dämpfungskoeffizienten d_{ges} und der coulomb´schen Reibung M_{RC} so lassen sich für den Instandhalter Aussagen über den Reibungszustand des Gesamtantriebssystems und dessen Veränderung über der Zeit machen.

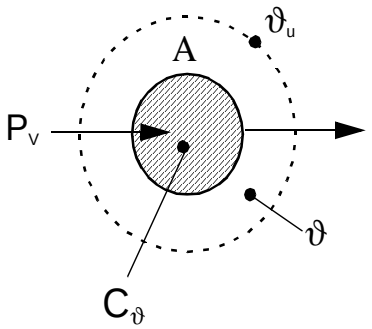
Damit lassen sich die Art des Fehlers bzw. Veränderungen des Reibzustands erkennen. Alternativ kann die coulomb´sche Reibung bei sehr langsamen Vorschubgeschwindigkeiten direkt aus dem Motorstrom ermittelt werden, da die geschwindigkeitsabhängige viskose Reibung praktisch nicht mehr vorhanden ist. Extrem langsame Verfahrbewegungen treten z.B. bei der Referenzpunktsuche auf.

5.3 Minimal- und Relativmodell zur Beschreibung des Temperaturverhaltens von tribologischen Systemen

Da nur Veränderungen am Reibverhalten des Gesamtsystems erfasst werden können, kann damit nur die Fehlerart und eingeschränkt die Fehlerursache ermittelt werden. Um den Fehlerort zu lokalisieren, müssen die sich verändernden Reibverluste in den diskreten Kontaktstellen detektiert werden. Die Reibverluste bewirken eine lokale Temperaturerhöhung, die mit folgendem Minimalmodell beschrieben wird.

5.3.1 Modellbildung

Die Verluste im Antriebsmotor und im Antriebsstrang werden in Wärme umgesetzt. Für die Beurteilung der Erwärmung genügt ein einfaches Modell das als homogen angenommen wird, Abbildung 5.7.



P_V = Wärmeverlustleistung
ϑ_u = Umgebungstemperatur

ϑ = Temperatur des Körpers
A = Wärmeabgabefähigkeit
C_ϑ = Wärmekapazität

Abbildung 5.7 Erwärmungsmodell [Schr00]

Dabei ist $P_V(t)$ die Wärme-(Verlust-) Leistung, $\vartheta(t)$ die Temperatur des Reibkontaktkörpers und $\vartheta_U(t)$ die Temperatur der Umgebung, $c_\vartheta(t)$ die Wärmekapazität in $\left[\frac{kcal}{°C}, \frac{Ws}{°C}\right]$ und A die Wärmeabgabefähigkeit $\left[\frac{kcal}{°Cs}, \frac{W}{°C}\right]$.

Die Wärmebilanz ergibt dann,

$$P_V \cdot dt = A \cdot (\vartheta - \vartheta_U)dt + c_\vartheta \cdot d\vartheta \qquad \text{Gl. 5.37}$$

Dividiert durch dt und A ergibt sich

$$\frac{P_V}{A} = \vartheta - \vartheta_U + \frac{c_\vartheta}{A} \cdot \frac{d(\vartheta - \vartheta_U)}{dt} \qquad \text{Gl. 5.38}$$

Mit $R_\vartheta = 1/A$ als Wärmewiderstand und $C_\vartheta/A = T_\vartheta$ als Wärmezeitkonstante sowie $\Delta\vartheta = (\vartheta - \vartheta_U)$ folgt, die Differentialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten und angenommener konstanter Umgebungstemperatur ϑ_U:

$$T_\vartheta \cdot \frac{d(\Delta\vartheta(t))}{dt} + \Delta\vartheta(t) = P_V \cdot R_\vartheta \qquad \text{Gl. 5.39}$$

Die Differentialgleichung beschreibt ein System 1. Ordnung (PT1-Verhalten) Sie hat bei einer sprungförmigen Wärmezufuhr $\hat{P}_v$ die Übergangsfunktion, Abbildung 5.8,

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_\infty \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_\vartheta}}\right) \qquad \text{Gl. 5.40}$$

mit dem Endwert

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{1}{A} \cdot \hat{P}_V \qquad \text{Gl. 5.41}$$

und

$$\vartheta_\infty = \vartheta_U + \Delta\vartheta_\infty \qquad \text{Gl. 5.42}$$

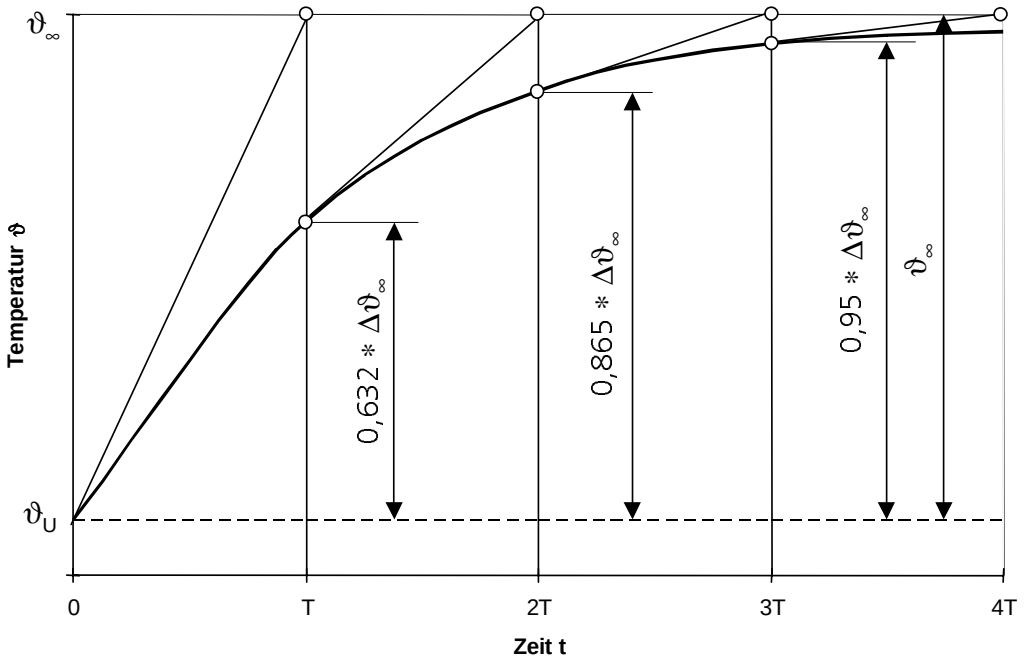


Abbildung 5.8 Erwärmung idealer Systeme

Im Dauerbetrieb wird bei konstanter Verlustleistung P_V eine stationäre Endtemperatur bzw. 95% vom Endwert nach $t=3T_\vartheta$ erreicht. Bei wechselnden, sich wiederholenden Verlustleistungen stellt sich eine ebenfalls wechselnde, zwischen zwei Grenzwerten schwankende Temperatur ein. Erfasst man die Temperatur an der Reibstelle, so lassen sich aus dem Temperaturverlauf Rückschlüsse auf die dort entstehenden Reibverluste ziehen.

Da bei elektromechanischen Antriebseinheiten Reibmoment und Drehzahl zeitlichen Schwankungen unterliegen, diese aber auf alle Reibstellen gleichermaßen wirken, bietet es sich an, für die Überwachung nicht die absoluten Temperaturen zu verwenden, sondern deren relative Abhängigkeiten und Veränderungen.

$$\vartheta_{\infty l,\,t} \div \vartheta_{\infty 2,\,t} \div \vartheta_{\infty 3,\,t} \div \ldots \div \vartheta_{\infty n,\,t} = \vartheta_{\infty l,\,t-1} \div \vartheta_{\infty 2,\,t-1} \div \vartheta_{\infty 3,\,t-1} \div \ldots \div \vartheta_{\infty n,\,t-1} \qquad \text{Gl. 5.43}$$

wobei $\vartheta_{\infty n,\,t}$ die Temperatur an der Reibstelle n zum Zeitpunkt t und $\vartheta_{\infty n,\,t-1}$ die Temperatur an der Reibstelle n zum Zeitpunkt t -1 ist.

Voraussetzung ist es, dass sich die Beharrungstemperatur ϑ_∞ eingestellt hat oder die Zeitkonstanten T_ϑ aller Messstellen etwa in der gleichen Größenordnung liegen.

Unter dieser Voraussetzung und ohne fehlerbedingte Erwärmung gilt

$$\frac{\vartheta_{\infty l,\,t}}{\vartheta_{\infty l,\,t-1}} = \frac{\vartheta_{\infty 2,\,t}}{\vartheta_{\infty 2,\,t-1}} = \ldots = \frac{\vartheta_{\infty n,\,t}}{\vartheta_{\infty n,\,t-1}} < C_{Lim} \qquad \text{Gl. 5.44}$$

wobei C_{Lim} ein Intervall zwischen $C_{min} < C < C_{max}$ bezeichnet, dessen Intervallbreite C_{max} - C_{min} die statistische Schwankung der Messwerte berücksichtigt, innerhalb dem die Quotienten C_{Lim} liegen müssen, wenn keine fehlerhafte Erwärmung aufgetreten ist. Die Lage des Intervalls ergibt sich als Mittelwert aller Quotienten C_1 bis C_n. Liegt ein Quotient außerhalb der zulässigen Schwankungsbreite C_{Lim} so kann daraus auf eine fehlerbedingte Erwärmung geschlossen werden.

Damit lassen sich mit Temperatursensoren, die in unmittelbarer Nähe zum Reibkontakt angebracht sind, lokale Veränderungen der Reibverhältnisse detektieren. Es kann also bei einer gleichzeitig auftretenden Änderung des Motorstroms auf den Fehlerort geschlossen werden. Die Fehlererkennung erfolgt redundant. Eine verhältnismässige Temperaturänderung kann aber auch unabhängig auf eine Veränderung der Reibverhältnisse hinweisen.

5.3.2 Kompensation von Temperatureinflüssen und Berücksichtigung von Belastungen

Der Zustand des tribologischen Systems, aber auch Verspannung, Schwer- und Leichtgängigkeit sowie das Spiel sind von der Temperatur der beteiligten Komponenten abhängig. Insbesondere die starke Abhängigkeit der Ölviskosität von der Temperatur wie auch die Wärmeausdehnung der Bauteile beeinflussen die Merkmalswerte.

Bei der Schwer- und Leichtgängigkeit sowie beim Spiel kann eine Beobachtung der Merkmalsgrößen bei unterschiedlichen Temperaturen, zum besseren Verständnis der Funktionsqualität und deren Einflussgrößen beitragen. Grundsätzlich gilt, dass die Merkmalswerte aber immer bei den gleichen Temperaturen der Komponenten erfasst werden müssen, wenn die Fehlerfrühdiagnose vor allem in Form einer Trendanalyse verwendet wird. Die Feststellung der Temperaturen ist mit den ohnehin vorhandenen Temperatursensoren einfach möglich. Da es jedoch im laufenden Betrieb schwierig ist, immer eine definierte Temperatur einzuhalten, empfiehlt es sich, den Temperatureinfluss zu korrigieren [WeSaFr89].

Dies lässt sich realisieren, wenn im neu- oder fehlerfreien Zustand die Reibmomente als Funktion der Temperatur ermittelt und diese bei der späteren Beurteilung des Reibverhaltens zur Korrektur herangezogen werden.

Die an den einzelnen Messstellen erfassten Temperaturen werden sowohl als Mittelwert, wie auch als Temperaturprofil abgespeichert, um die Einflüsse der Temperatur auf das tribologische System und die mechanischen Verspannungen in Lagern und Führungen berücksichtigen zu können.

Beim tribologischen System lässt sich, da

$$M_{RV} \sim \tau = \eta(\vartheta) \cdot \frac{dv}{dz} \text{ ist,} \qquad \text{Gl. 5.45}$$

die folgende Korrekturformel angeben

$$M_{RVkorr} = \frac{\eta(\vartheta_0)}{\eta(\vartheta_x)} \cdot M_{RV}(\vartheta_x) \qquad \text{Gl. 5.46}$$

mit M_{RVkorr} als auf die Merkmalsreferenz ϑ_0 korrigiertem viskosen Reibmoment $M_{RV}(\vartheta_x)$ das bei der Temperatur ϑ_x gemessen wurde. Liegen keine gemessenen Viskositäts-/ Temperaturabhängigkeiten vor, dann kann mit der Gleichung nach Vogel [Vog21],[Vog22]

$$\eta(\vartheta) = a \cdot e^{\frac{b}{\vartheta \cdot c}} \qquad \text{Gl. 5.47}$$

mit a,b,c als ölspezifischen Konstanten gearbeitet werden.

Setzt man Gl. 5.47 in Gl. 5.46 ein ergibt sich

$$_{RVkorr} = \frac{a \cdot e^{\frac{b}{\vartheta_0 \cdot c}}}{a \cdot e^{\frac{b}{\vartheta_x \cdot c}}} \cdot M_{RV}(\vartheta_x) \qquad \text{Gl. 5.48}$$

$$M_{RVkorr} = M_{RV}(\vartheta_x) \cdot e^{\frac{b}{c} \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_0} - \frac{1}{\vartheta_x}\right)} \qquad \text{Gl. 5.49}$$

Bei der Verwendung der korrigierten Werte muss, wegen der bestehenden Toleranzen der Koeffizienten, die Signifikanz einer Änderung des Reibwertes sorgfältig beurteilt werden. Genauer ist die Korrektur, wenn die Koeffizienten im Neuzustand der elektromechanischen Antriebseinheit experimentell ermittelt wurden.

Bei der Erfassung der Zeit- und Temperaturgrößen wirken alle, das Zeitverhalten beeinflussende Größen, die nicht durch Reibungseffekte oder Spiel verursacht werden als Störgrößen. Hierzu gehören, sich nicht oder nur selten wiederholende äußere Kräfte und Momente, die z.B. bei Werkzeugmaschinen durch Bearbeitungskräfte verursacht werden, aber auch die Massen- und Gewichtskräfte die durch unterschiedliche Werkstücke verursacht werden.

Um die äußeren Kräfte, Momente und veränderlichen Massenkräfte auszuschließen, werden die Reibwerte in Form des Motorstroms bevorzugt bei stationären Zuständen und im Maschinenleerzustand erfasst. Gibt es regelmäßig wiederkehrende Belastungen, z.B. infolge gleicher Werkstückgewichte bei Werkzeugmaschinen, so lassen sich auch bei diesen Zuständen die Reibkennwerte in Form des Motorstromes erfassen und als getrennte Gruppe in die Auswertung mit einbeziehen. Als bevorzugter Zustand sind Eilgänge, aber auch Vorschubgeschwindigkeiten ohne Bearbeitungskräfte, wie sie z.B. für die Referenzpunktsuche verwendet werden, geeignet.

5.4 Ermittlung des Spiels

Bei den meisten elektromechanischen Antriebseinheiten führt zu großes Spiel zu unzulässigen Abweichungen. Unzulässiges Spiel kann vor allem im Getriebe, den Gewindetrieben sowie in den Führungen auftreten. Im Wirkplan Abbildung 5.5 sind das Spiel und die Elastizitäten konzentriert dargestellt. Bei einer Drehrichtungsänderung ohne Last wirkt sich das lastseitige Moment erst nach einer Überbrückung des Spiels auf das Motormoment aus. Diese Tatsache kann genutzt werden, um das Spiel zu detektieren. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen. Der Motor wird in einer Drehrichtung so lange gedreht, bis sicher einseitiger Kontakt bei allen spielbehafteten Elementen erreicht ist. Dann wird die Drehrichtung geändert, die Inkremente des Motordrehwinkelgebers gezählt und der Motorstrom beobachtet. Nacheinander kommen alle Gegenseiten der spielbehafteten Elemente verbunden mit einem Stromanstieg zur Anlage. Der Stromanstieg ist bedingt, durch die zu beschleunigenden trägen Massen und wird dazu verwendet, den Kontakt zu detektieren an dem der Motordrehwinkel ausgelesen wird. Der Motordrehwinkel entspricht direkt dem Spiel oder ergibt sich nach einer Division durch die dazwischenliegende Übersetzungen. Bei Umwandlungen in translatorische Bewegungen muss die Steigung berücksichtigt werden. Die Zuordnung zum Ort, an dem das jeweilige Spiel aufgetreten ist, ergibt sich aus der Berücksichtigung der momentan wirksamen trägen Massen.

Für die Diagnose werden bevorzugt die relativen Veränderungen der einzelnen spielbehafteten Stellen im Antriebsstrang bei möglichst gleicher Temperatur ausgewertet. Damit wird der Trend quantifiziert, mit dem durch Extrapolation Aussagen über das zukünftige Erreichen eines unzulässigen Spiels gemacht wird.

5.5 Detektion periodisch auftretender Fehler

Diskrete Fehler an einzelnen Zahnflanken, Gewindegängen, Führungen etc. beeinflussen den Motorstrom periodisch, wenn sie sich durch Schwer- oder Leichtgängigkeit bemerkbar machen. Motorseitige Fehler wirken sich dabei voll, lastseitige Fehler reduziert auf den Motorstrom aus-aus. Die Auswirkung hängt von den trägen Massen, den Steifigkeiten und den zwischen Motor und Fehlerort wirksamen Übersetzungen ab. Bei kurzer Wirkdauer ist entscheidend, ob das Drehwinkelmesssystem die Drehzahlschwankungen auflösen kann und der Regler eine genügend hohe Abtastrate hat, um auf die Drehzahlschwankungen reagieren zu können.

Diskrete Fehler an direkt mit der Motorwelle verbundenen rotierenden Bauteilen wie dem Getriebeeingangsritzel treten periodisch mit der Motordrehzahl n_M auf. Bei Stirnradgetrieben reduziert sich die Häufigkeit entsprechend der Übersetzung der dazwischen liegenden Getriebeübersetzungen. Bei Planetengetrieben ergibt sich die Periodizität aus den Standübersetzungen der Radpaare und der überlagerten Blockdrehung des Getriebes. Periodizitäten höherer Ordnung entstehen bei Planetengetrieben durch Schwergängigkeit infolge fehlendem Verzahnungsspiels, bei bestimmten Stellungen der Radpaare und des Planetenträgers. Bei Fehlern an Zahnriemen wiederholt sich das Fehlersignal periodisch mit der Riemenlänge. Aus der Periodizität kann auf den Fehlerort im Getriebe geschlossen werden.

Bei Gewindespindeln und Führungen mit Fehlstellen an diskreten Positionen kann in Verbindung mit der Lageregelung bzw. dem ausgewerteten Lagesignal eine örtlich wiederholt auftretende Stromschwankung als Fehlersignal gewertet werden. Auch hier ist die Beobachtung als Trend für die Diagnose entscheidend.

6 Merkmalsaufbereitung und Symptomgenerierung

Im Betrieb werden die elektromechanischen Antriebseinheiten einer Maschine überwacht, d.h. ihr Ist-Zustand festgestellt. Mit den in Kapitel 5 entwickelten Minimalmodellen lassen sich explizit Parameter ermitteln, die Reibungszustände, Spiel und periodisch auftretende Leicht- und Schwergängigkeiten charakterisieren. Die Parameter sind im Sinne der Instandhaltung Merkmale, die interpretiert, eine Fehlerfrüh- oder Fehlerdiagnose erlauben, d.h. Aussagen über Art, Ort, Ursache und Umfang eines sich anbahnenden oder bereits eingetretenen Fehler liefern. Bei der Interpretation spielt auch die Historie der Maschine eine wichtige Rolle. In Abbildung 6.1 ist der Ablauf der Merkmalsinterpretation dargestellt. Zur Gewinnung der Symptome aus den Merkmalswerten werden statistische Verfahren eingesetzt. Die Symptome werden anschließend mit heuristischen Methoden weiterverarbeitet, um auf Fehler und Fehlermerkmale zu schließen [Fre93],[Ise99],[Ise94],[Ise00].

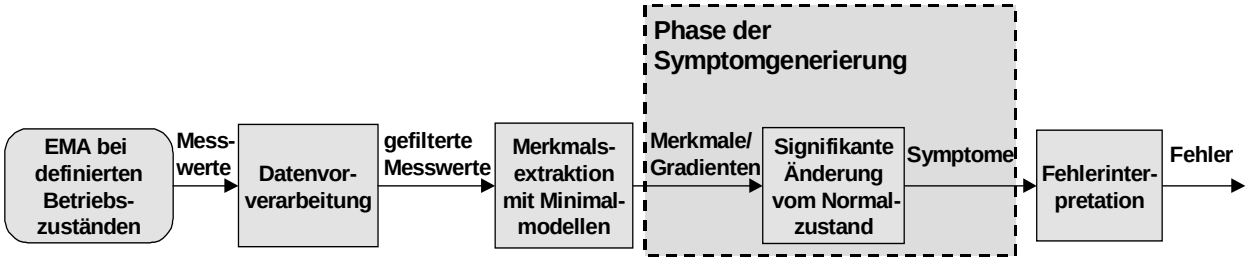


Abbildung 6.1 Merkmalsextraktion und Symptomgenerierung

6.1 Gewinnung von Merkmalen mit Minimalmodellen

Stetige Zustandsänderungen lassen sich durch eine Trendanalyse beurteilen, wenn typische Zustandsverläufe als fehlercharakteristisch bekannt sind. In Abbildung 6.2 sind solche typischen Verläufe als Graphen (1) und (2) für Driftausfälle dargestellt. Kurzzeitige Störungen (3) haben meist typische Verläufe, die zusammen mit ihrer Häufigkeit vom Instandhalter interpretiert, d.h. für die Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose verwendet werden. Plötzliche Zustandsänderungen führen ohne Vorankündigung zu Störungen oder zum spontanen Ausfall (4), der als Sprungausfall bezeichnet wird.

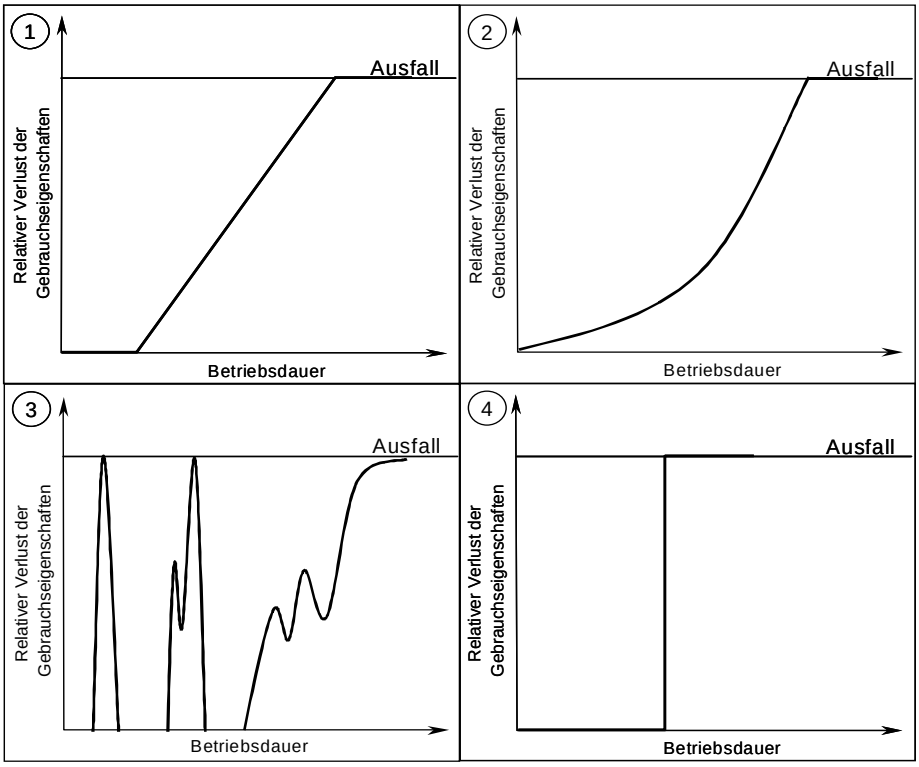


Abbildung 6.2 Charakteristische Merkmalsverläufe

Grundsätzlich gilt, dass Fehler nach einem Ausfall schwieriger zu diagnostizieren sind, als an der noch laufenden elektromechanischen Antriebseinheit. Die Fehlerfrühdiagnose hat deswegen, und vor allem auch aus wirtschaftlichen Gründen, die größere Bedeutung. Ihr Ziel ist es, den Fehler bereits in einem Stadium zu identifizieren, bei dem er sich noch nicht auswirkt bzw. genügend Zeit zur Verfügung steht, um noch geeignete Instandhaltungsmaßnahmen einleiten zu können, die eine Störung oder einen Ausfall vermeiden.

6.2 Statistische Auswertung der Merkmale

Durch eine Bewertung der Änderungen der aktuellen Merkmalswerte einer elektromechanischen Antriebseinheit wird unter Einbeziehung der Maschinenzustandshistorie festgestellt, ob die Änderungen signifikant sind, d.h. ob es sich um Symptome handelt, die einen Fehler charakterisieren. Die Symptome, als bekannte signifikante Änderungen werden dann in einem zweiten Schritt, einer regelbasierten Auswertung zugeführt, die eine Fehlerdiagnose liefert oder die Symptome als nicht fehlerkritisch einstuft.

Für die Bewertung der Änderungen wird zunächst der Normalzustand festgestellt. Im Vergleich mit dem aktuellen Zustand wird die Signifikanz der aufgetretenen Veränderungen beurteilt. Die Merkmale, die diese Zustände beschreiben werden mit den in Kapitel 5 erläuterten Minimalmodellen für Reibung, Temperatur, Spiel, Leicht- und Schwergängigkeit, aus den Messwerten Strom Temperatur etc., die typischerweise bereits innerhalb der Messkette gefiltert wurden, ermittelt. Die so ermittelten Größen sind die weiter zu verarbeitenden Merkmalswerte.

In technischen Systemen unterliegen die verschiedenen Merkmale M_i immer statistischen Schwankungen. Deshalb müssen die Merkmalswerte mit statistischen Verfahren behandelt werden, um die Unsicherheiten zu verringern und damit eine zuverlässige Fehlerfrüh- und Fehlererkennung zu gewährleisten [Sac83]. Am häufigsten werden dafür der „empirische (arithmetische) Mittelwert“ und die „empirische Varianz“ der jeweiligen Merkmalsgrößen M_i ermittelt [Fre93]. Die mittels der Momentenmethode gewonnenen Größen stellen im quadratischen Mittel konsistente Schätzgrößen für das erste und zweite Moment vom M_i dar. Sie werden sowohl bei der Referenzwertermittlung M_{0i} als auch bei der Ermittlung der aktuellen Merkmale $M_{1,i}$ eingesetzt.
Für den Normalzustand Index 0 (Referenz), ist der Mittelwert

$$\mu_{0i} = E\{M_{0i}\} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} M_{0i}(k) \qquad \text{Gl. 6.1}$$

mit M_{0i}, i = 1,...,n als Merkmalen

N, k = 1,...,N als Lernstichprobenumfang

zusammenfassend als Merkmalsvektor $\overline{\mu_0} = [\mu_{01}, \ldots, \mu_{0n}]^T$

und der Varianz

$$\sigma_{0i}^2 = E\{(M_{0i} - \mu_{0i})^2\} = \frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N} (M_{0i}(k) - \mu_{0i})^2 \qquad \text{Gl. 6.2}$$

Praktisch werden die Merkmalswerte $M_{0i}(k)$ in einer festen zeitlichen Abfolge erfasst. Dann kann k als zeitlicher Abtastschritt interpretiert und die Werte rekursiv berechnet werden. Bei der Lernphase wird davon ausgegangen, dass keine wesentlichen Zustandsänderungen auftreten und die skalaren Merkmale stationär und statistisch unabhängig sind.

Als Maß für die relative Schwankungsbreite der geschätzten Merkmalswert kann der Variationskoeffizient V (nach DIN13303) für den Nominalzustand verwendet werden:

$$V_{0i}(N) = \frac{\sigma_{0i}(N)}{\mu_{0i}(N)} \qquad \text{Gl. 6.3}$$

Bei der Fehlerfrühdiagnose geht es darum, aus den sich langsam ändernden Merkmalswerten (Drift) sich anbahnende Fehler und Zustände zu prognostizieren. Hierzu werden während der Überwachungsphase die statistischen Kenngrößen des Mittelwertes und der Varianz über einen begrenzten Zeitabschnitt, d.h. einem Zeitfenster ermittelt. Der Fenstermittelwert ergibt sich in Anlehnung an Gl. 6.1 zu

$$\mu_{1i}(k) = \frac{1}{m}\sum_{j=L}^{k} M_{1i}(j) \qquad \text{Gl. 6.4}$$

mit Index 1 als Überwachungsindex, k als aktuellem Abtastschritt, m als Fensterbreite, d.h. der Anzahl der Merkmalswerte und L = k - m + 1.

Die Fenstervarianz ergibt sich in Anlehnung an Gl. 6.2 zu

$$\sigma_{1i}(k) = \frac{1}{m-1}\sum_{j=L}^{k} \left(M_{1i}(j) - \mu_{1i}(k)\right)^2 \qquad \text{Gl. 6.5}$$

Auch diese Gleichungen lassen sich für den Echtzeiteinsatz rekursiv darstellen. Das Fenster gleitet über die Merkmalswerte, der älteste Wert wird entfernt und der neue aktuelle hinzugenommen. Dann wird der neue Mittelwert und die Varianz berechnet. Diese Werte werden auch als gleitende Mittelwerte und gleitende Varianz bezeichnet.

Für jeden Wert $\mu_{1i}(k)$ und $\sigma_{1i}(k)$ lässt sich die bezogene Änderung gegenüber dem Referenzzustand m_{0i} ermitteln:

$$\Delta M_1(k) = \frac{\mu_{1i}(k) - \mu_{0i}}{\mu_{0i}} \qquad \text{Gl. 6.6}$$

6.3 Verwendung von Gradienten zur Fehlerfrühdiagnose

Für die Trendanalyse bietet es sich an, nicht nur die Veränderungen der Mittelwerte und der Varianz zu ermitteln und auszuwerten, sondern auch deren Gradienten und dessen Ableitung.

Der Gradient zweier benachbarter Mittelwerte berechnet sich als:

$$\Delta\mu_{1i}(k) = \frac{\mu_{1i}(k) - \mu_{1i}(k-1)}{t(k) - t(k-1)} \qquad \text{Gl. 6.7}$$

mit t(k) und t(k-1) als Abtastzeitpunkten. Prinzipiell können auch Abtastzeitpunkte mit größerer dazwischenliegender zeitlicher Distanz verwendet werden.

Die Ableitung des Gradienten ergibt sich als Differenz der Gradienten in den Mitten der beiden Zeitabschnitte

$$\Delta\Delta\mu_{li}(k) = \frac{\Delta\mu_{li}(k) - \Delta\mu_{li}(k-1)}{\frac{1}{2} \cdot [(t(k) - t(k-1)) + t(k-1) - t(k-2))]} \qquad \text{Gl. 6.8}$$

$$= \frac{2(\Delta\mu_{li}(k) - \Delta\mu_{li}(k-1))}{t(k) - t(k-2)} \qquad \text{Gl. 6.9}$$

Entsprechend ist mit den Standardabweichungen zu verfahren.

Die Berechnungsvorschriften erzeugen Tiefpassverhalten. Die Tiefpasseigenschaften werden durch die Wahl der Fensterlänge m festgelegt. Es ist ein Kompromiss zwischen geringer Dämpfung, aber schneller Reaktion auf Änderungen bei kleinem m und starker Dämpfung verbunden-mit langsamer Reaktion auf Änderungen bei großem m zu finden.

Hat der Gradient einen konstanten Wert und ist die Ableitung der Gradienten damit null, dann handelt sich um eine konstante Drift. Die stetige Veränderung eines Zustands führt entsprechend Abbildung 6.2 zu einem kalkulierbaren Fehlerzeitpunkt. Hat die Ableitung des Gradienten einen endlichen Wert, so verändert sich ein Zustand progressiv oder degressiv, ein wichtiges Signal für einen möglicherweise unmittelbar bevorstehenden Fehler.

Um längerfristige Beurteilungen des Trends zu ermöglichen, werden Werte von Gradienten und Ableitungen über einen längeren Zeitraum gespeichert und ausgewertet.

6.4 Symptomgenerierung

Um eine signifikante Änderung festzustellen werden häufig skalare Distanzfunktionen verwendet. Auf die Mittelwerte aus der Lernphase und der Überwachungsphase lässt sich eine einfache Distanzfunktion erster Ordnung anwenden:

$$\delta_{\mu i}(k) = (\mu_{1i}(k) - \mu_{0i}) \qquad \text{Gl. 6.10}$$

Eine gegenüber Abweichungen wesentlich empfindlichere Diatanzfunktion 2. Ordnung ist

$$\delta_{\mu i}(k) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=L}^{k} (M_{1i}(k) - \mu_{0i})^2 \qquad \text{Gl. 6.11}$$

die den quadratischen Abstand der Mittelwerte beschreibt. Die Distanzfunktionen lassen sich gleichermaßen auf die Gradienten und deren Ableitungen anwenden, wobei die Distanz nicht nur zur Referenz, sondern auch zu Vorgängerzuständen ermittelt wird.

Bei einer Überschreitung der für jeden Merkmalswert vorgegebenen Intervalle werden aus den Distanzen und Testwerten Symptome. Die erzeugten Symptome sind die Informationen, die an die Regelbasis zur Auswertung übergeben werden. Der Regelinterpreter schließt daraus auf mögliche oder vorhandene Fehler bzw. deren Art, Ort, Ursache und Umfang.

Während die zuvor beschriebene Trendanalyse bevorzugt die Annäherung an den Fehlerzustand erfasst, spielen diskrete Ereignisse, insbesondere wenn sie unmittelbar vor einem Ausfall auftreten, eine wichtige Rolle bei der späteren Fehlerdiagnose. Durch einen Mustervergleich lässt sich die Fehlerursache in Verbindung mit der Trendbeobachtung ermitteln. Für den Mustervergleich werden die bekannten Verfahren eingesetzt [Nie83],[Geb92]. Der prinzipielle Ablauf der Langzeitspeicherung ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

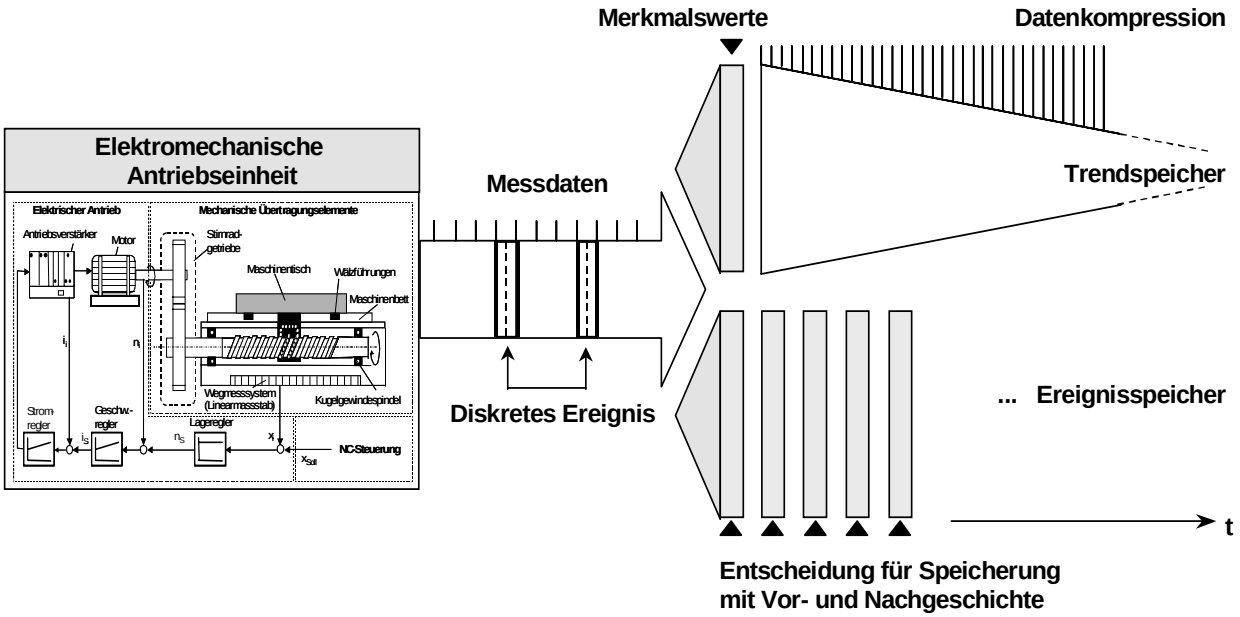


Abbildung 6.3 Trend- und Ereignisspeicher

7 Interpretation der Messwerte und extrahierten Merkmale

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie aus Symptomen Schlußfolgerungen über mögliche Fehler gezogen werden. Verwendet wird eine heuristische Problemlösungskomponente, die aus den unterschiedlichen Symptomen zu erwartende oder vorhandene Fehler diagnostiziert, siehe Abbildung 7.1. Symptome sind Merkmale bzw. deren Gradienten, die sich signifikant verändert haben. Die Merkmale liefern Minimalmodelle aus Messgrößen, die bei bestimmten Betriebszuständen ermittelt wurden. Die Betriebszustände sind Eilgang, Auslauf und Referenzfahrt verbunden mit der permanenten Temperaturmessung, die Messgrößen sind Strom, Drehwinkel, Drehzahl und Lage.

Um beispielhaft zu zeigen, wie Fehler, Fehlerort, Fehlerart, Ursache und deren Auswirkung an elektromechanischen Antriebseinheiten vorhergesagt werden können, werden Baugruppen und deren fehlerspezifischen Messgrößen und Merkmale in Kapitel 7.1 für eine ausgewählte Antriebseinheit definiert. Die fehlercharakterisierenden Messgrößen werden den Baugruppen bzw. Maschinenelementen, die Minimalmodelle den jeweiligen Betriebszuständen zugeordnet. In Kapitel 7.2 wird gezeigt, wie daraus eine Regelbasis für die Interpretation der Merkmale abgeleitet wird.

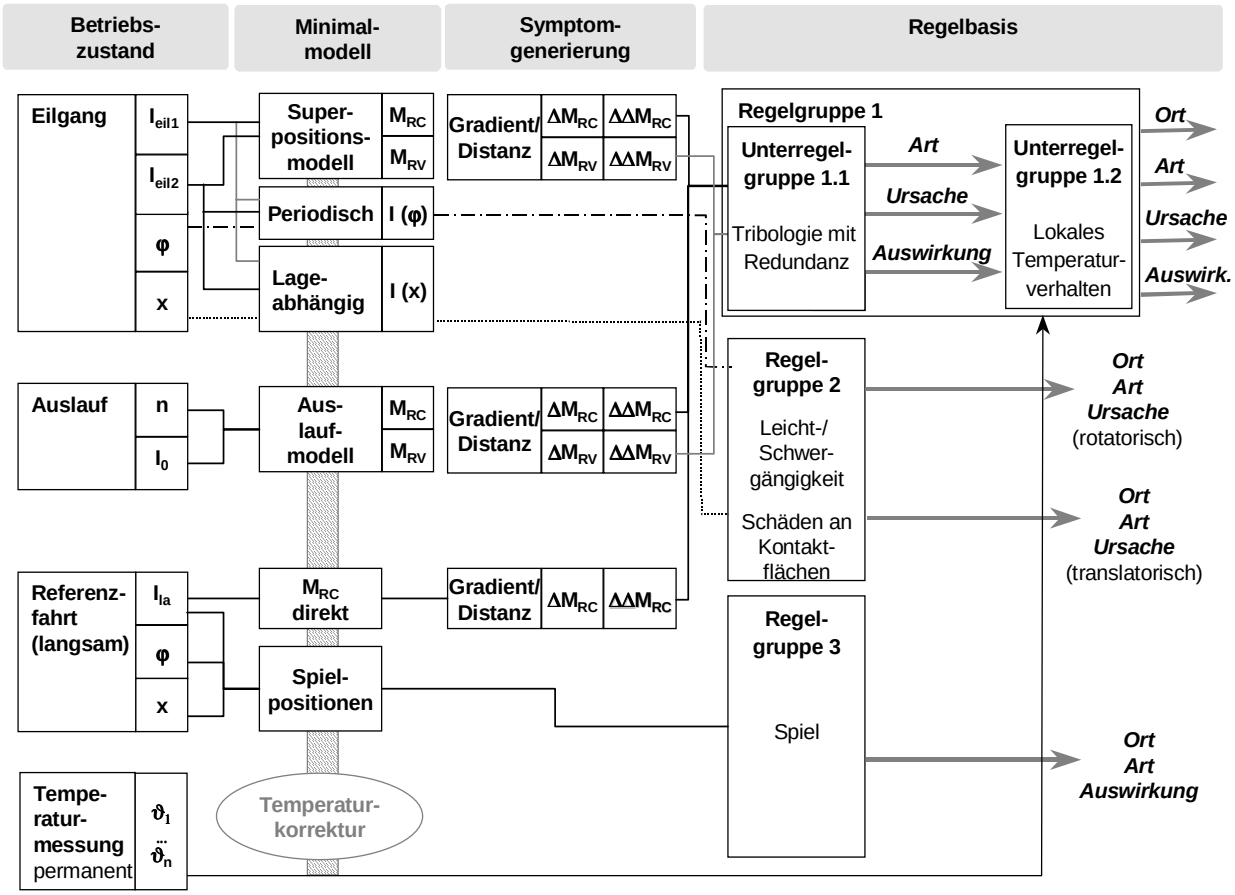
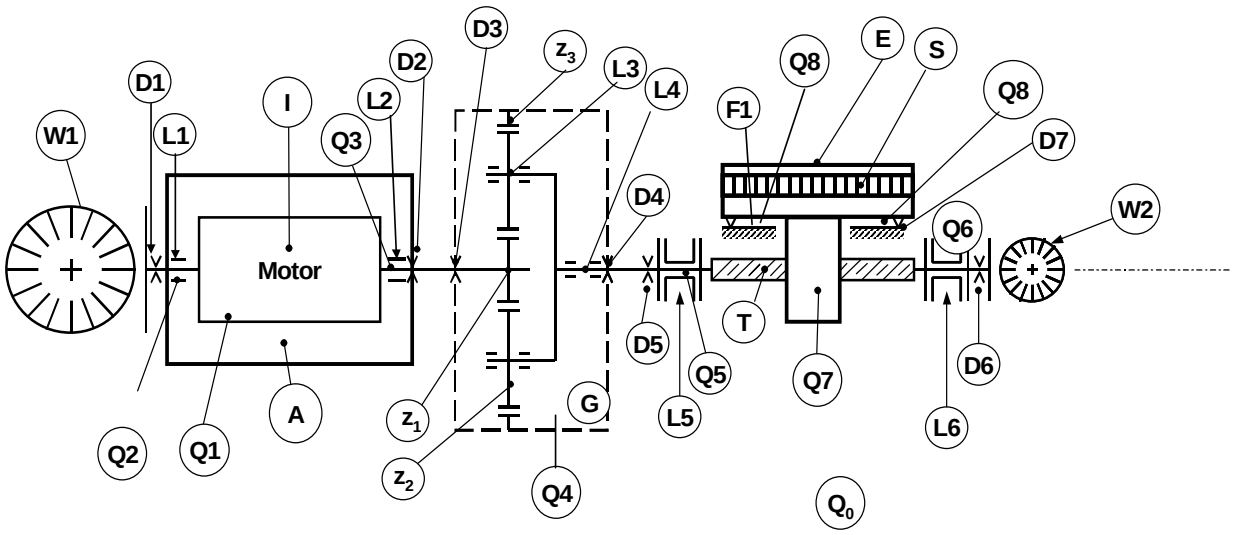


Abbildung 7.1 Ablaufstruktur der Fehlerdiagnose bei elektromechanischen Antriebseinheiten

7.1 Darstellung des Diagnosemodells

Eine typische elektromechanische Antriebseinheit, Abbildung 7.2, besteht aus einem Elektromotor A, einem optionalen Übersetzungsgetriebe G, einem Bewegungstrieb T sowie dem Endeffektor E. Für die Baugruppen, wie z.B. die Übersetzungsgetriebe G, gibt es unterschiedliche Lösungen, mit denen die Grundfunktion Drehzahl-Drehmoment wandeln, realisiert werden kann. Gleiches gilt für den Bewegungstrieb T, der nicht nur als Bewegungsgewinde, sondern auch als Ritzel-Zahnstange oder Zahnriemen ausgeführt sein kann.

Zu jeder Baugruppe gehören Parameter, die deren Verhalten charakterisieren. Mehrere Baugruppen bilden die Antriebseinheit mit ihren globalen Eigenschaften.



Legende

A = Antriebsmotor
G = Getriebe
T = Bewegungstrieb
E = Endeffektor
F = Führung
z = Zahnrad
L = Lager
D = Dichtung

I = Strommessung
Q = Temperaturmessstellen 1...n
Q_0 = Umgebungstemperatur
W = Drehwinkelgeber
S = Lagegeber

Abbildung 7.2 Maschinenelemente mit reibungs- und spielbehafteten Wirkpaarungen der elektromechanischen Antriebseinheit einschließlich Messstellen

Die Baugruppen sind aus Maschinenelementen aufgebaut. Die Maschinenelemente sind die fehlerrelevanten Bauelemente. Jeder Maschinenelementetyp hat charakteristische, sein Fehlerverhalten bestimmende Wirkmechanismen, die bei einer ganzen Kategorie von Maschinenelementen wirken, d.h. allen Fehlern liegen nur wenige, physikalisch-technisch gleichartige Fehlermechanismen zugrunde, wie sie in Kapitel 5 beschrieben wurden. Bei den elektromechanischen Antriebseinheiten treten die fehlerrelevanten Wirkmechanismen vorwiegend an den sogenannten Wirkpaarungen auf, die aus zwei relativ zueinander bewegten Wirkflächen bestehen. Werden die Wirkflächen zusätzlich durch einen Schmierstoff getrennt, handelt es sich um ein tribologisches System, siehe Kapitel 3.2. Bei doppelten Wirkpaarungen mit wechselnder Vorder- und Rückflankenanlage kann bei Umkehr der Momenten- oder Kraftrichtung Spiel auftreten, das innerhalb vorgegebener Toleranzen liegen muss. Bei negativen Spielwerten tritt Verspannung auf, die Schwergängigkeit verursacht. Anderseits wird um Spiel zu vermeiden, bewusst vorgespannt. Nachlassende Vorspannung führt zu Leichtgängigkeit und Spiel. In Abbildung 7.3 sind die Zusammenhänge von Messgrößen geordnet nach Fehlerart zu Fehlerauswirkung und -ort dargestellt. Im folgenden werden die einzelnen Fehlerarten behandelt.

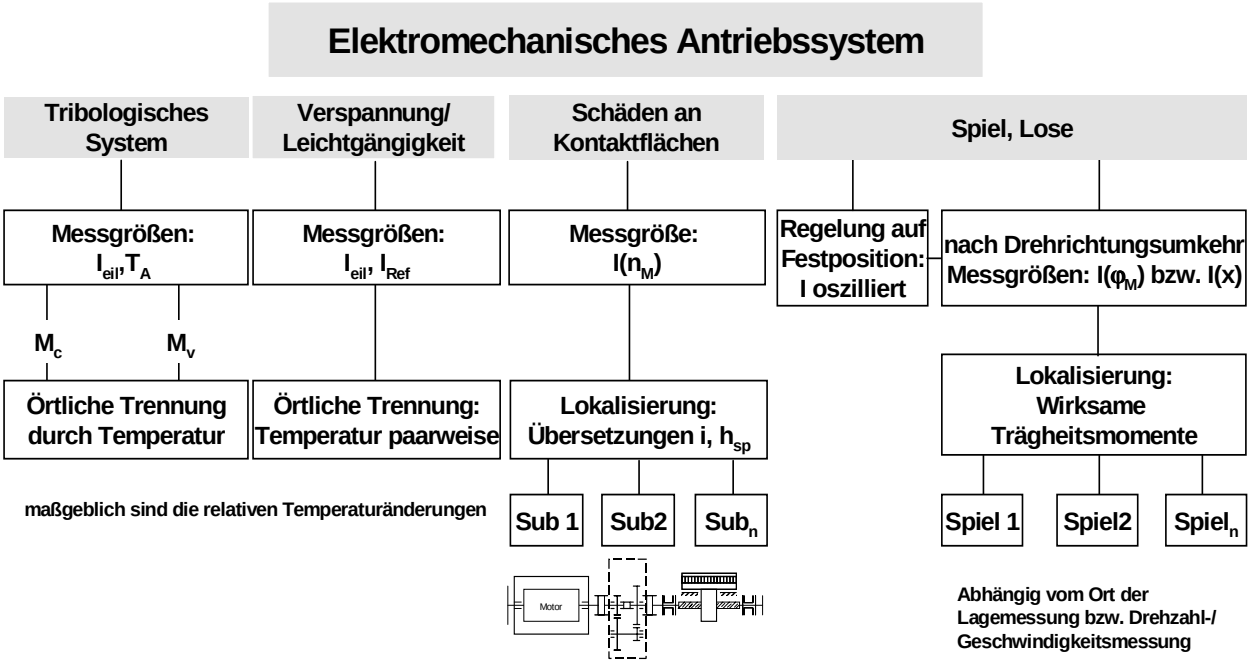


Abbildung 7.3 Diagnostizierbare Fehler

7.1.1 Beschreibung der tribologischen Systeme

Bei den tribologischen Systemen wird entsprechend den Relativbewegungen der Wirkflächen zwischen Gleit-, Roll-, Wälz- und Bohrreibung unterschieden, Abbildung 7.4. Abhängig von der Spalthöhe und der Oberflächenrauhigkeit stellt sich beim tribologischen System hydro- oder elastohydrodynamische Reibung, ansonsten Misch-, Grenz- oder Festkörperreibung ein. Jede Reibungsform hat typische, den Schmierzustand charakterisierende Reibwerte. Die Reibwerte ändern sich abhängig vom Schmierzustand, d.h. den sich ändernden Eigenschaften und Mengen des Schmierstoffs und dessen Verschmutzung sowie dem Zustand der Kontaktflächen und der Belastung. Die Eigenschaften des Schmierstoffs sind stark temperaturabhängig. Eine Veränderung des tribologischen Zustands ist mit einer Veränderung der Reibwerte verbunden.

Maschinen-elemente	**Wirkpaar**	**Tribologische System**	**Fehlerrelevante Kenngrößen**
Wälzlager Wälzführungen Kugelgewindetriebe	Wälzkörper (Kugel, Kegel, Zylinder) mit Gegenlauffläche	Roll- und Wälzreibung mit elastohydrodynamischer Schmierung, anteilig Bohrreibung	M_R M_{RC} M_{RV} $\Delta\vartheta$ an der Reibstelle (lokal) $\Delta\varphi$ Δx
Gleitlager Gleitführungen Gewindespindeln Dichtungen	Zylindrische Gleitkörper mit zylindrischen Gegenlaufflächen und ebene Gleitkörper mit ebenen Gegenlaufflächen	Gleitreibung mit Flüssigkeits- und Mischreibung	
Zahnräder Zahnstangen	Zahnflanken mit evolventischen Flächen und Gegenlaufflächen	Wälzreibung mit elastohydrodynamischer Schmierung	
Planetenrollspindel	Schraubflächen	Gleit- und Bohrreibung	

Abbildung 7.4 Maschinenelemente und ihre tribologischen Systeme

Im folgenden werden beispielhaft die Zusammenhänge, die zu den Fehlermerkmalen, d.h. Fehlerart, -ort, -ursache und -auswirkung bei Wälzlagern führen, dargestellt. Fehlerrelevant bei den Wälzlagern ist u.a. der Schmierzustand als Ursache mit dem resultierenden Reibverhalten als einer Auswirkung.

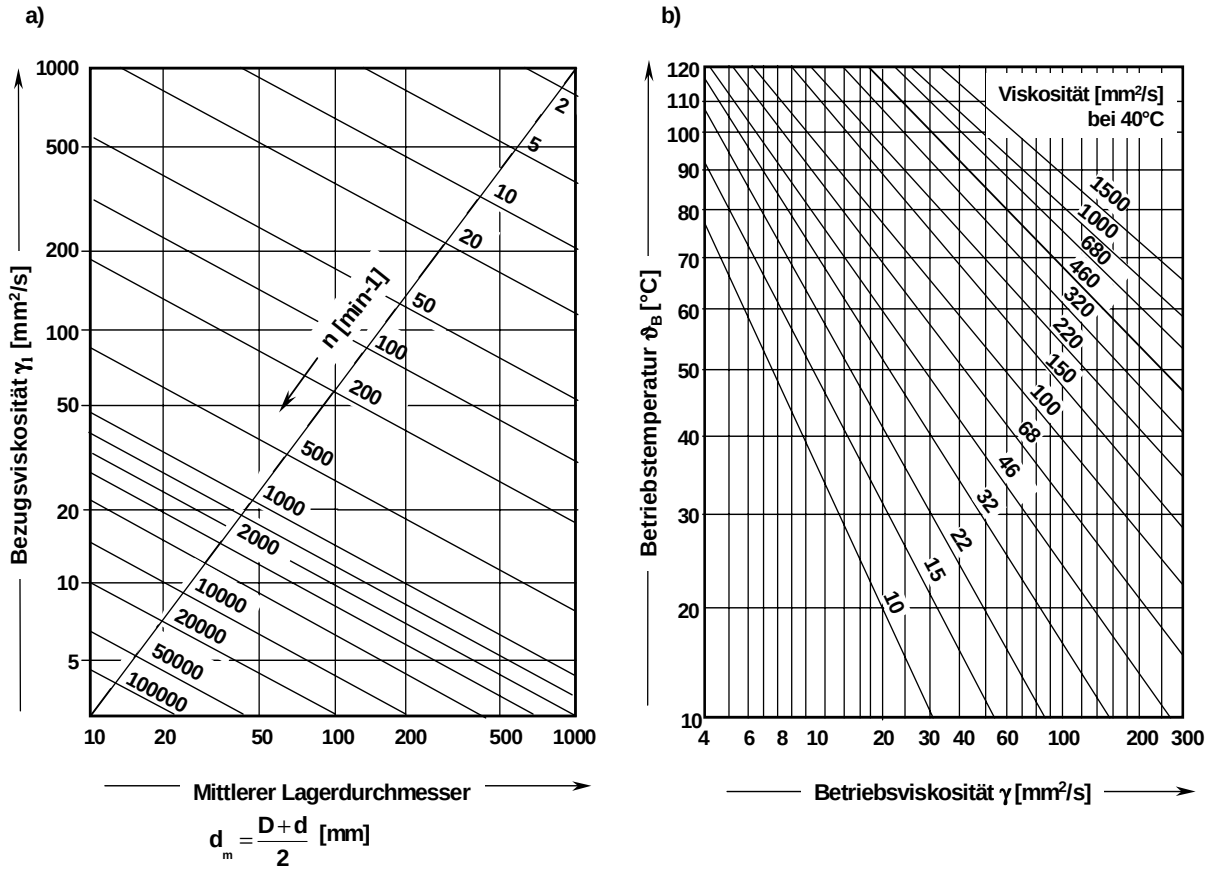


Abbildung 7.5 a) Bezugsviskosität abhängig vom mittleren Lagerdurchmesser und der Drehzahl, b) V-T-Diagramm für Mineralöle [GfT84]

An Hand der gemessenen Lagertemperatur kann der Maschinenbediener bzw. Instandhalter unabhängig Rückschlüsse und Hinweise auf einen Instandhaltungsbedarf bekommen. Als abgeleitete Größe charakterisiert der Wert κ für den Instandhalter den Schmierzustand im Schmierspalt. Das Verhältnis der Betriebsviskosität γ des Schmierstoffs bei der Betriebstemperatur zur Bezugsviskosität γ_1 ist $\kappa = \gamma/\gamma_1$ [GfT84]. Die Betriebsviskosität ist in Abbildung 7.5b, abhängig von der Betriebstemperatur und der Ölviskosität bei 40°C als Parameter dargestellt. Die Betriebstemperatur wird durch die Temperatursensoren Q erfasst. Die Bezugsviskosität ergibt sich abhängig vom mittleren Lagerdurchmesser und der Drehzahl, Abbildung 7.5a.

Bei κ = 4 liegt Vollschmierung vor, d.h. es befindet sich ein trennender elastohydrodynamischer Schmierfilm zwischen den Wälzkörpern und dem Lagerring. Für κ > 4 und bei höchster Sauberkeit des Schmierstoffs sind keine Ermüdungsschäden mehr zu erwarten, die von der Werkstoffbeanspruchung unter der Oberfläche ausgehen, d.h. man erreicht Dauerfestigkeit. Bei κ = 1 wird etwa die nominelle Lebensdauer erreicht.

Werte von $\kappa < 4$ charakterisieren die Mischreibung. Nur wenn der Schmierstoff geeignete EP-Wirkstoffe enthält, die eine Trennung im Kontaktbereich durch die Reaktionsprodukte der EP-Wirkstoffe erzielen, ist ein verschleißarmer Betrieb möglich. Bei einem $\kappa < 0{,}4$ ist abhängig von der Eignung der EP-Zusätze mehr oder weniger Oberflächenermüdung zu erwarten.

Verunreinigungen im Schmierstoff, besonders harte oder größere Teilchen, verschlechtern die Trennung der Kontaktflächen und verursachen Verschleiß. Eine Maßnahme um diese Teilchen unschädlich zu machen, ist der Einbau einer Keramikkugel oder um die extern eingebrachten Teilchen zu vermeiden, die Verwendung von sogenannten 'clean bearings'.

Voraussetzung für eine Fehlerfrühdiagnose ist damit die Messung der Betriebstemperatur im Rollreibungskontakt bzw. am Lageraussenring, mit der die Betriebsviskosität und schließlich der κ-Wert ermittelt werden kann. Eine Reduzierung des κ-Wertes induziert durch eine Erhöhung der Betriebstemperatur ist ein Indikator für zunehmenden Verschleiß.

Der zweite für die Fehlerfrühdiagnose wichtige Indikator ist die Reibung. Die Reibung eines Wälzlagers oder einer Wälzführung ergibt sich als Summe der Reibanteile von Roll-, Gleit- und Schmierstoffreibung. Das Reibmoment bzw. die Reibkraft entspricht dem Widerstand, der der Relativbewegung entgegenwirkt. Im folgenden werden nur Reibmomente betrachtet. Die Überlegungen lassen sich aber auch einfach auf die Reibkräfte übertragen.

Vom Reibmoment kommt man zum vergleichbaren Reibwert [GfT84]

$$\mu = \frac{M_R}{F \cdot d/2} \qquad \text{Gl. 7.1}$$

mit M_R als gesamtem Reibmoment des Lagers, $F = \sqrt{F_r^2 + F_a^2}$ als resultierender Lagerbelastung, mit F_r als radialer Lagerbelastung und F_a als axialer Lagerbelastung, sowie d als Durchmesser der Lagerbohrung. Der Verlauf von Reibmoment und Reibwert ist abhängig vom Belastungsverhältnis P/C, dargestellt in Abbildung 7.6.

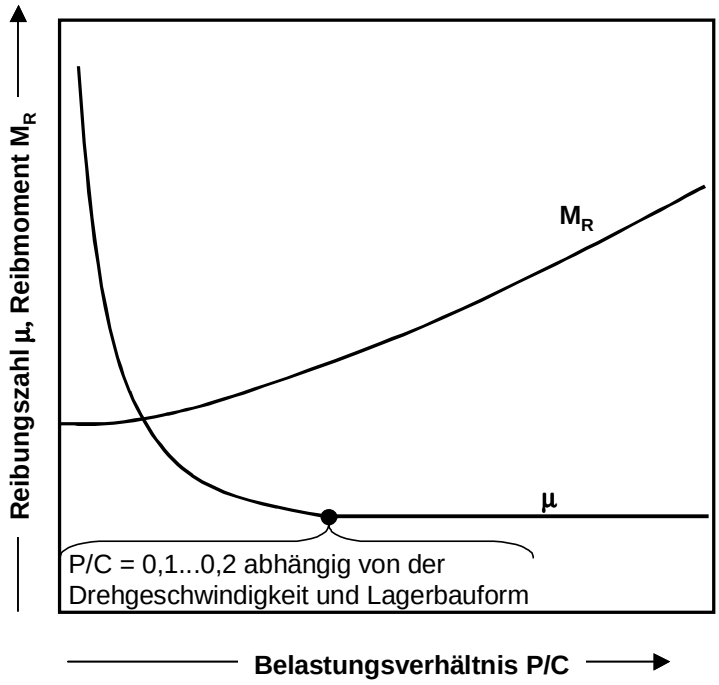


Abbildung 7.6 Prinzipieller Verlauf des Reibmoments und Reibwerts in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis P/C

Der Reibwert ist auch abhängig von der Lagerbauart, ein Umstand, der bei der Fehlerdiagnose, die nur zeitliche Veränderungen berücksichtigt, keinen Einfluss hat [GfT84],[StRö96]. Beim Anfahren treten 2- bis 3-fach höhere Reibwerte auf.

Wichtig für die Fehlerfrühdiagnose ist, dass der Reibwert mit zunehmendem Lastwinkel $\beta = \arctan F_a / F_r$ größer wird, d.h. bei reiner Radialbelastung ($\beta = 0°$) am geringsten ist und mit zunehmender Axialbelastung (β -> 90°) wächst. Lässt bei axial vorgespannten Lagern in X- oder O-Anordnung die Reibung nach, z.B. bei den Spindellagern des Gewindetriebs oder im Gewindetrieb selbst, so ist ein Verlust der Vorspannung aufgetreten. Umgekehrt verhält es sich bei einer zunehmenden Verspannung. Wichtig für die Fehlerfrühdiagnose ist, dass wegen der paarweisen Anordnung der Lager sich die veränderte Energiedissipation bei diesen paarweisen Anordnungen von Lagern auf beide Lagertemperaturen gleichermaßen auswirkt. Dies ist ein wichtiges Indiz, um zunehmende oder abnehmende Verspannung von Fehlern an einzelnen Lagern zu unterscheiden [Sche02].

Das Reibmoment von Wälzlagern setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Einem Wert M_0 des unbelasteten Lagers und einem Wert M_1, der mit zunehmender Belastung linear oder leicht progressiv wächst, siehe Abbildung 5.7.

$$M_R = M_0 + M_l \qquad \text{Gl. 7.2}$$

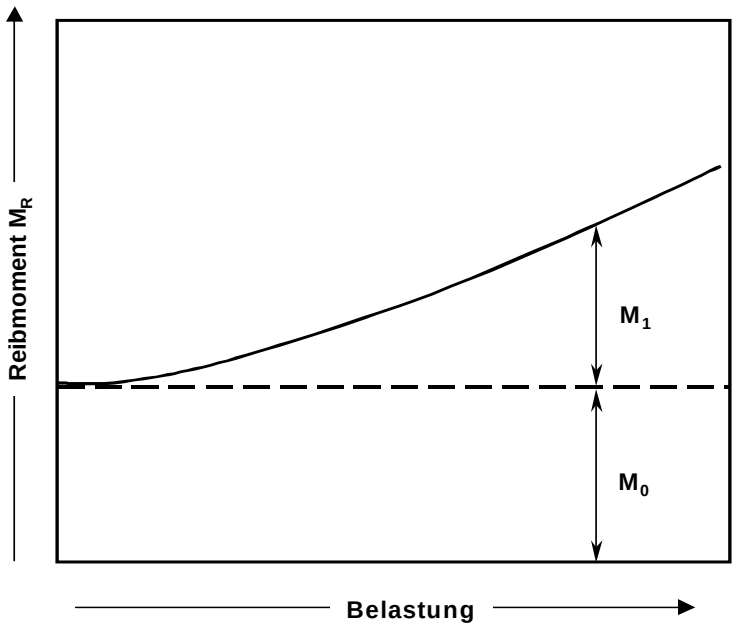


Abbildung 7.7 Reibmoment von Wälzlagern [GfT84]

Das Reibmoment M_0 ergibt sich hauptsächlich aus der Schmierstoffreibung, ferner aus der Reibung der Rollkörper in den Käfigtaschen und der Reibung des Käfigs auf seinen Führungsflächen.

Aus Versuchsergebnissen der GfT sind folgende gesicherte Ansätze bekannt [GfT84]:

$$M_0 = f_0 \cdot 10^{-7} \cdot (\upsilon \cdot n)^{2/3} \cdot d_m^3 \quad \text{wenn} \quad (\upsilon \cdot n) \geq 2000 \qquad \text{Gl. 7.3}$$

$$M_0 = 160 \cdot 10^{-7} \cdot f_0 \cdot d_m^3 \quad \text{wenn} \quad (\upsilon \cdot n) < 2000 \qquad \text{Gl. 7.4}$$

mit f_0 als Beiwert, der die Lagerbauform und die Art der Schmierung berücksichtigt, υ [mm²/s] als Betriebsviskosität des Öls bzw. des Fett-Grundöls, n [min-1] als Drehzahl des Lagers und d_m als mittleren Lagerdurchmesser d_m = (D + d)/2. In erster Linie hängt M_0 von der Betriebsviskosität des Schmierstoffs, von der Drehzahl und von der Bauform und Größe des Lagers ab, stellt also den viskosen Reibanteil dar.

Bei einem richtig gewählten Fett ergibt sich das Reibmoment M_0 überwiegend aus dem inneren Reibungswiderstand des Grundöls. Damit kann im Leerlauf eine Änderung der Viskosität des Schmiermittels ermittelt werden, wenn darauf geachtet wird, dass $(\upsilon \cdot n) \geq 2000$ ist und die übri-

gen Parameter, insbesondere die Drehzahl und die Lagertemperatur gleich sind. Lastfreie Zustände sind z.B. die Eilgänge. Dabei muss darauf geachtet werden, dass bei frisch mit Fett geschmierten Lagern das Reibmoment meist höher ist, und zwar so lange, bis sich das Lager erwärmt hat bzw. das überschüssige Fett verdrängt ist und der stationäre Zustand erreicht ist. Weicht die Lagertemperatur von der Bezugstemperatur ab, dann kann die Viskosität näherungsweise mit Hilfe des Diagramms, siehe Abbildung 7.5 oder der Gleichung nach Vogel [Vog62] korrigiert und danach mit der ursprünglichen Viskosität verglichen werden, siehe Kapitel 5.3.2. In der Instandhaltung wird eine Abweichung von 15% als signifikant für eine Veränderung der Schmiermitteleigenschaften angesehen [MöNa02]. Ändert sich beim Leerlauf trotz gleicher Temperatur das Reibmoment M_0 so kann dies auf eine Veränderung des Schmierstoffs oder der Laufflächen hindeuten. Es kann aber auch durch eine Veränderung der Vorspannung aufgetreten sein. Eine in Grenzen sich verändernde Vorspannung wirkt sich nicht auf das Leerlaufmoment M_0 aus.

Das Reibungsmoment M_1 ergibt sich vor allem aus der Rollreibung, insbesondere infolge von Hysterese und Gleitreibungseffekten. Es ändert sich mit der Drehzahl kaum, wohl aber mit der Größe der Kontaktflächen und damit mit der Schmierung und Belastung eines Lagers. Weitere Einflussgrößen sind auch hier die Lagerbauform und -größe.

$$M_l = f_l \cdot P_l^a \cdot d_m^b \qquad \text{Gl. 7.5}$$

a und b sind lagerabhängige Koeffizienten, die außer bei Pendelrollenlagern 1 sind. Bei Pendelrollenlagern liegt abhängig von der Lagerbauart a zwischen 1,35 und 1,5 sowie b zwischen -0,3 und 0,3. Mit f_1 wird die Lasthöhe und Lastrichtung berücksichtigt. Der Kennwert ist bei Kugellagern wegen der Druckhöhenkrümmung dem Ausdruck $(P_0/C_0)^S$ proportional, bei Rollenlagern ist f_1 konstant. P_0 ist die äquivalente Belastung und C_0 die statische Tragzahl. Der Wert des Exponenten s hängt vom Bohrreibungsanteil ab. Bei Kugellagern mit geringer Bohrreibung ist s = 1/2, für Schrägkugellager mit dem Druckwinkel x_0 = 40° und starker Bohrreibung ist s = 1/3. Der Wert von f_1 lässt sich aus Tabellen ermitteln [Bar99].

In P_1 ist enthalten, dass sich die Reibung mit der Richtung der äußeren Belastung bzw. mit dem Lastwinkel β ändert. Bei fehlenden äußeren Belastungen lässt sich, wie bereits erwähnt, eine Veränderung von M_1 infolge P_1 oder über der Zeit als Symptom für einen Verlust der Vorspannung, z.B. an Lagern der Kugelumlaufspindel deuten. Voraussetzung ist, dass ansonsten die gleichen Randbedingungen herrschen.

Die in Kapitel 5 vorgenommene Trennung des Gesamtreibmoments in einen viskosen und einen coulomb´schen Anteil entspricht dem mit den Gl. 7.3, Gl. 7.4 und Gl. 7.5 beschriebenen Sachverhalt. Bei höheren Drehzahlen ohne Last, ein Zustand wie er z.B. beim Eilgang vorliegt, wirken sich auf das Reibmoment vor allem die Schmierstoffeigenschaften aus. Die Lagerbelastung, beeinflusst z.B. durch eine Veränderung der Vorspannung, hat vor allem Einfluss auf den coulomb´schen Reibanteil.

Die für Wälzlager, Wälzführungen und Wälzschraubengetriebe durchgeführten Überlegungen lassen sich unmittelbar auf die anderen tribologischen Systeme übertragen.

7.1.2 Auswirkungen von Veränderungen am tribologischen System

Das am einzelnen Maschinenelement isoliert betrachtete Reibverhalten muss für die Auswertung auf das Antriebsgesamtsystem übertragen werden. Abbildung 7.11 zeigt das Prinzipbild einer elektromechanischen Antriebseinheit mit kaskadiertem Regler, den möglichen Lagemesssystemen und den wichtigsten Temperaturmessstellen. Grundlegendes Messsignal ist der Motorstrom $I_M = i_{ist}$ der proportional zum Motormoment ist. Bei den ausgewählten Betriebszuständen wie Verfahren im Eilgang, Referenzfahrt und Auslauf des Antriebsmotors im stromlosen Zustand mit Drehzahlerfassung am Lagegeber LA des Motors mit dem Signal X und/ oder am Lagegeber LS am Spindelende mit dem Signal Y und/ oder am Lagegeber LE am Endeffektor mit dem Signal Z kann, weil die Anregungsfrequenzen bei den üblichen Auslegungen deutlich unter den Eigenfrequenzen liegen, das mechanische System als starr angesehen werden. Lediglich bei Störungen, wie örtlich auftretender Leicht- und Schwergängigkeit, hat das Verhalten des Reglers einen relevanten Einfluss auf den Stromverlauf. Die motorseitigen Reibmomente wirken dem Motormoment M_M direkt entgegen, die lastseitigen reduziert um die Übersetzung i_G und die Steigung h_{Sp} der Spindel. Bei der Fahrt mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit, stellt sich I_M so ein, dass das Motormoment den Widerstandsmomenten, ohne Last sind es sämtliche auftretende Reibmomente, das Gleichgewicht hält. Der Strom folgt einem wechselnden Widerstandsmoment mit geringer Phasenverschiebung.

Grundsätzlich kann mit der Motorstrommessung bei verschiedenen Betriebszuständen wie den Eilgängen nur das Gesamtreibmoment erfasst werden. Da der Antriebsstrang bei den ausgewählten Betriebszuständen als starr angesehen werden kann, wirken sich alle Reibgrößen in Summe und direkt auf das Gesamtverhalten des Antriebsstrangs aus. Der Motorstrom reagiert bei konstant geregelten Verfahrbewegungen auf sich ändernde Reibmomente und Reibkräfte, in dem Maße wie sie sich an der Motorwelle auswirken, d.h. zwischen Reibort und Motor liegende

Übersetzungen verkleinern oder vergrößern das am Motor wirkende Reibmoment, Abbildung 7.8. Bei großen Übersetzungen ist eine lastseitige Veränderung auf den Motorstrom nur eingeschränkt feststellbar. Entsprechendes gilt auch für den Auslaufvorgang.

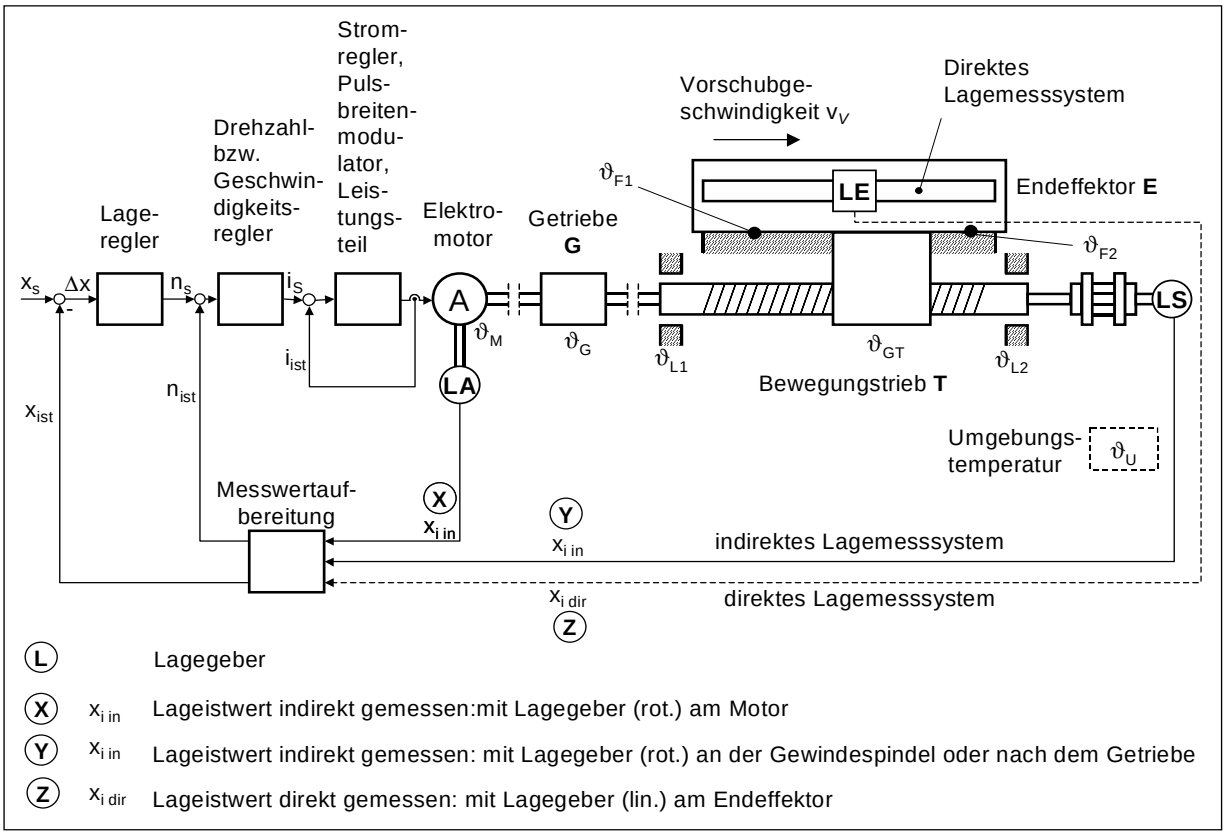


Abbildung 7.8 Prinzipieller Aufbau einer elektromechanischen Antriebseinheit mit Lagemesssystemen

Der in Kapitel 5.2.1 erläuterte Auslaufvorgang eignet sich parallel und redundant zum Eilgang dazu, eine Veränderung der viskosen Reibung des Gesamtsystems festzustellen. Aus der ermittelten Zeitkonstante T_A ergibt sich der viskose Reibkoeffizient d_v, dessen Veränderung, vorausgesetzt es herrscht die gleiche Betriebstemperatur, ein Maß für die Veränderung, vor allem der Viskosität des Schmierstoffs, ist. Beim Auslaufverhalten muss die Zeitkonstante T_A aus Drehzahlwerten ermittelt werden, die unmittelbar nach dem Ausschalten des Antriebsmotors bei gleicher Anfangsdrehzahl erfasst werden, um wie beim Eilgang eine mögliche Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Drehzahl auszuschließen.

Die Messung des Reibmoments bei der langsamen Referenzfahrt erlaubt entsprechend Gl. 7.5 eine Beurteilung von Belastungsänderungen, wie sie insbesondere durch auftretende Verspannungen oder nachlassende Vorspannungen verursacht werden.

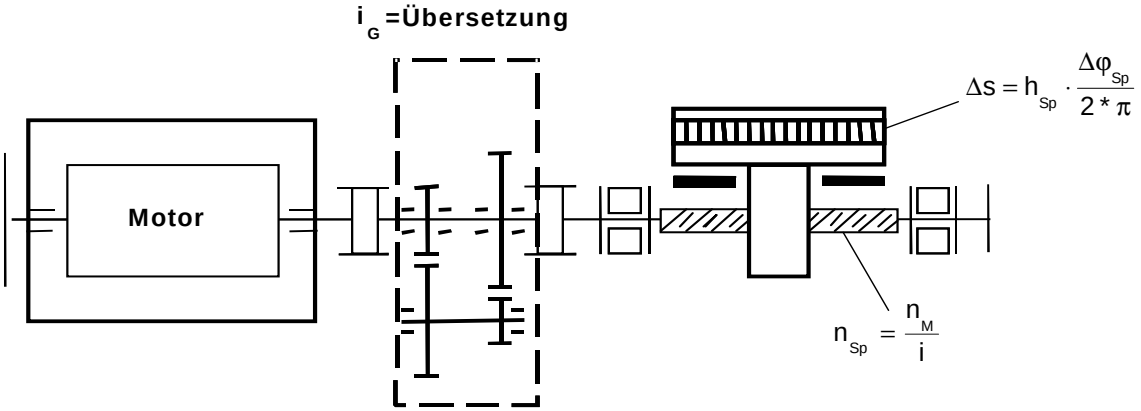
Durch eine zusätzliche Temperaturmessung kann auch die Reibstelle detektiert werden. Die Temperatursensoren müssen so nahe wie möglich an den Reibstelle, wie z.B Lagern, Gewindemuttern, Führungen angebracht werden. Mit Mikrotemperatursensoren ausgerüstete Wälzlager werden von den Herstellern angeboten. Bei Lagern ist die Einbausstelle bevorzugt der stillstehende Aussenring. Bei der Messung muss berücksichtigt werden, dass die Temperatur am Innenring 5 - 10°C höher ist als am Aussenring. Beim Antriebsmotor kann neben der Reibungswärme zusätzlich die Stromwärme zur Temperaturerhöhung beitragen, die unter Umständen auch die Proportionalität zwischen den einzelnen Temperaturmessstellen stört.

Wie in Kapitel 5.2 erläutert, erwärmt sich das Lager und seine Umgebung abhängig von der reibungsbedingten Verlustwärme, der örtlichen Wärmekapazität und der an die Umgebung über die Luft bzw. den Schmierstoff abgegebene Wärme. Nach einer gewissen Zeit stellt sich eine Beharrungstemperatur ein, die bei gleicher Belastung und unveränderten Maschinenparametern gegenüber der Umgebungstemperatur um einen konstanten Wert erhöht ist. Geht man davon aus, dass das Belastungskollektiv an allen Reibstellen gleichermaßen wirksam ist, so kann bei einer zuvor detektierten Änderung der Gesamtreibwerte aus der relativen Veränderung der Beharrungstemperatur auf den Fehlerort geschlossen werden. Einzelne Temperaturabweichungen können auch unabhängig als Fehlersymptom ausgewertet werden. Über den κ-Wert, der nur aus der Temperatur ermittelt wird, ist ein direkter Rückschluß auf den Schmierzustand möglich.

7.1.3 Konstant und periodisch auftretende Leicht- und Schwergängigkeit

Bei konstant auftretender Leicht- oder Schwergängigkeit stellen sich beim drehzahlgeregelten Antrieb niedere oder höhere Motorströme ein. Grundsätzlich wird zunächst in diesem Fall angenommen, dass sich die Reibverhältnisse in einem tribologischen System verändert haben, wenn alle sonstigen Randbedingungen gleichgeblieben sind. Eine Kontrolle der Temperaturen mit einer Abweichung an einer Reibstelle kann dies bestätigen. Treten Temperaturabweichungen bei zwei Lagern derselben Welle auf, so hat sich die axiale Vorspannung, insbesondere bei Lagerungen in X- oder O-Anordnung verändert. Tritt die Leicht- oder Schwergängigkeit nur bei bestimmten Temperaturen oder Temperaturbereichen auf, so bewirken unterschiedliche thermische Ausdehnungen eine Ent- oder Verspannung der Lager.

Periodisch auftretende Leicht- und Schwergängigkeit, die sich drehwinkel- bzw. lageabhängig wiederholt, lässt sich zunächst über die zwischen den Winkel- und Wegmesssystemen liegende Übersetzung einem bestimmten Antriebsstrangsystem zuordnen. Schwankt der Motorstrom periodisch mit der Motordrehzahl n_M, so liegt die Fehlerursache im Antriebsstrangbereich Motor bis Getriebe, schwankt er $n_M \cdot i_G$ periodisch, dann liegt er im Abschnitt nach dem Getriebe und vor dem Bewegungstrieb. Fehler innerhalb des Getriebes lassen sich über eine detaillierte Darstellung der inneren Übersetzungen des Getriebes feststellen. Fehler an den Linearführungen des Endeffektors und der Gewindespindel treten nur in bestimmten Endeffektorpositionen auf, die über die Lageauswertung der Steuerung ermittelt werden können, siehe Abbildung 7.9.



Fehlerort:

1. Motorstrom i_M ändert sich n_M-periodisch bei Fehlern z.B. verursacht durch Verschleiss an "Motorwelle" bzw. Getriebeeingangswelle mit Zahnrad
2. Motorstrom i_M ändert sich $n_M \bullet i_G$ -periodisch bei Fehlern an der Getriebeabtriebswelle mit Zahnrad und ungefähr $n_M \bullet i_G$ -periodisch bei Fehlern an der Gewindemutter
3. Motorstrom i_M ändert sich lageabhängig bei Fehlern an der Spindel oder der Tischführung

Abbildung 7.9 Bestimmen periodisch bedingter Leicht- oder Schwergängigkeit

Scheinbar periodisch auftretende Fehler können durch Schlupf zwischen den Kugeln und Laufflächen in Lagern und der Kugelumlaufmutter bei fehlerhaften Kugeln oder Laufflächen angezeigt werden. Die Intensität des Fehlers lässt sich aus der Höhe und Breite des Stromverlaufs ablesen. Die Beobachtung der Intensität der Veränderungen führt schließlich zur Entscheidung, ob eine Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt werden muss.

7.1.4 Spiel

Für die Ermittlung des Spiels an den unterschiedlichen Stellen des Antriebsstranges werden die Lagegebersignale X, Y oder Z zusammen mit dem Motorstrom ausgewertet. Bei der Referenzfahrt oder einer Fahrt in langsamer Eilganggeschwindigkeit mit Richtungsumkehr werden ab der Richtungsumkehr der Motordrehwinkel bzw. die Impulse des Motordrehgebers so lange erfasst, bis sich am Motor ein Stromanstieg einstellt. Dieser Prozess wird so lange fortgeführt, bis alle Rückflanken zur Anlage gekommen sind und beruht auf den folgenden Modellvorstellungen, Abbildung 7.10.

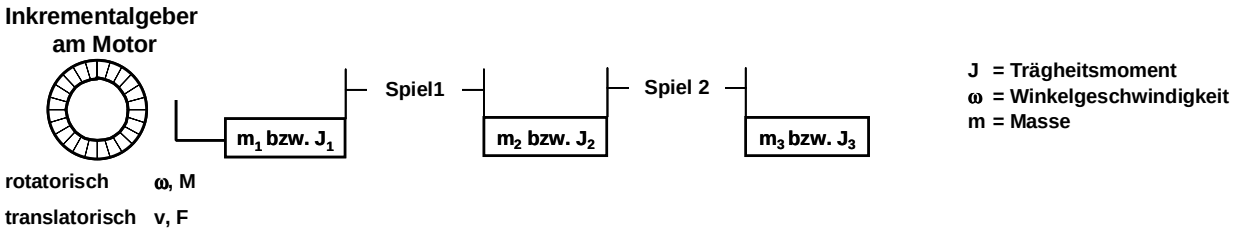


Abbildung 7.10 Modell für das Spiel

Bei der Vorwärtsfahrt kommen alle Vorderflanken der spielbehafteten Wirkpaare zur Anlage. Mit Beginn der Rückwärtsfahrt bewegt sich zunächst der direkt mit dem Motor verbundene Antriebsstrangteil mit der Masse m_1 bzw. J_1, so lange bis sich das Spiel 1 schließt. Mit der Anlage der Rückflanke von m_1 bzw. J_1 an m_2 bzw. J_2 ist ein Stromanstieg verbunden, da schlagartig die Masse m_2 bzw. J_2 wirksam wird, d.h. beschleunigt werden muss, um die vorgegebene Geschwindigkeit einzuhalten. Der Beschleunigungsvorgang wird vom Regler ausgelöst, der dafür den Motorstrom hochfährt. Für das Motormoment und damit den Motorstrom gilt

$$M_M(t) = \frac{d(J \cdot \omega)}{dt} \qquad \text{Gl. 7.6}$$

$$M_M(t) = \omega \cdot \frac{dJ}{dt} + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \qquad \text{Gl. 7.7}$$

$$M_M(t) = \omega \cdot \frac{J_2}{\Delta t} + J_1 \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \qquad \text{Gl. 7.8}$$

Der Motorstrom ist von den trägen Massen J_2 und der 'Ankoppelzeit' Δt abhängig. Geht man davon aus, dass die Massenverhältnisse sich bei jedem Vorgang deutlich ändern, so lassen sich mehrere nacheinander überbrückte Spiele über den Stromanstieg dem jeweiligen Ort des Spiels zuordnen, Abbildung 7.11.

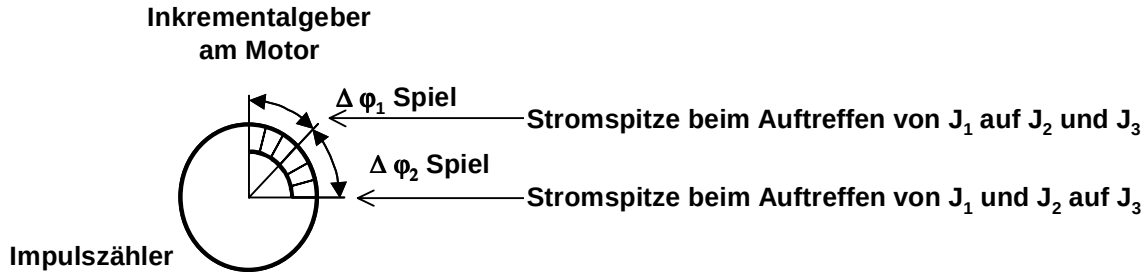


Abbildung 7.11 Bestimmen des Spiels in elektromechanischen Antriebseinheiten mit dem Inkrementalgeber am Motor

Die erfassten Drehwinkel müssen dann durch die zwischen Motor und Ort des Spiels wirkenden Übersetzungen korrigiert werden, um das tatsächliche Spiel zu erhalten. Für die Berechnung des tatsächlichen Spiels gilt, wenn zwischen dem Motor und der spielbehafteten Stelle die Übersetzung i wirkt.

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_1}{i} \qquad \text{Gl. 7.9}$$

Entsprechend gilt für ein Spiel nach dem Bewegungstrieb mit der Spindelsteigung h_{Sp}:

$$\Delta s = \frac{\Delta\varphi_2}{i} \cdot \frac{h_{sp}}{2 \cdot \pi} \qquad \text{Gl. 7.10}$$

Zusammenfassend können mit den Strommessungen Veränderungen des Gesamtreibmoments erfasst, lageabhängig Leicht- und Schwergängigkeit festgestellt sowie Änderungen der einzelnen Spiele detektiert werden. Mit den Temperaturmessungen werden lokal auftretende relative Veränderungen der Verlustleistungen an den Reibstellen erkannt. Die Kombination aus lageabhängigem Strom und Temperaturmessung erlaubt Aussagen über Veränderungen an den relativ zueinander bewegten Kontaktflächen, d.h. eine Fehlerfrühdiagnose mit Angabe des Fehlerorts, wenn die mit den Minimalmodellen extrahierten fehlerrelevanten Merkmale wie im nächsten Kapitel vorgeschlagen, interpretiert werden.

7.2 Modellbasierte Interpretation der Symptome

Die bei bestimmten Betriebszuständen erfassten Strommesswerte und die ständig erfassten Temperaturmesswerte werden vorverarbeitet den entsprechenden Minimalmodellen übergeben, die als Ergebnis einen Merkmalswert liefern. Nach der statistischen Bearbeitung der Merkmalswerte und deren Änderungen werden diese bei signifikanten Abweichungen zu Symptomen. Die Symptome werden der Regelbasis zugeführt, deren Entscheidungslogik in Abbildung 7.10 dargestellt ist.

In der Regelgruppe 1 werden die tribologischen Fehler behandelt, Abbildung 7.12. Wesentlich für diese Regeln ist die Tatsache, dass aus dem Motorstrom bzw. dessen Veränderung über der Zeit nur in Kombination mit der Temperatur auf eine Veränderung des tribologischen Verhaltens geschlossen werden kann. Die Entscheidung, ob sich das tribologische Gesamtsystem oder eine einzelne Reibstelle verändert hat bzw. eine Verspannung eingetreten oder die Vorspannung sich verändert hat, kann nur über die Temperaturmesswerte bzw. über deren relative Veränderungen zueinander getroffen werden. Die in diesem Verfahren enthaltenen Redundanzen reduzieren die Zahl der möglichen Fehlinterpretationen.

In der Regelgruppe 2 werden permanente, periodische und zufällige Schwer- und Leichtgängigkeit bewertet. Unter permanenter Schwer- oder Leichtgängigkeit werden die über die gesamten Motorendrehungen durch einen erhöhten oder geringeren Motorstrom angezeigten Reibmomente verstanden, wenn keine Lagerstelle im Verhältnis zu den anderen wärmer oder kälter geworden ist. Werden zwei paarweise angeordnete Lager gleichzeitig wärmer oder kühler, so handelt es sich um den Fall einer Leicht- bzw. Schwergängigkeit die temperaturabhängig sein kann.

Die bei konstanten Verfahrbewegungen periodisch mit jeder Motorumdrehung oder einem Vielfachen davon bzw. bei einer bestimmten Lage der linear bewegten Teile wiederkehrenden positiven oder negativen Stromspitzen signalisieren eine örtliche Schwer- oder Leichtgängigkeit. Die periodisch wiederkehrenden Stromspitzen werden auf ihre Korrelation mit der Motorumdrehung oder der i-fachen davon untersucht. Damit lässt sich direkt die kritische Baugruppe über die davorliegende Übersetzung identifizieren. Zufällig auftretende Stromspitzen werden auf ihre Häufigkeit hin untersucht. Die Zunahme der Häufigkeit ist ein Maß für die Verschlechterung des Betriebsverhaltens, eine Wartung ist notwendig.

In der Regelgruppe 3 sind die Regeln für das Spiel zusammengefaßt. Für die nach einer Richtungsumkehr ermittelten, unzulässigen Spiele wird der Wirkort ermittelt, Abbildung 7.13.

Wird bei der Ermittlung der Merkmalswerte bei den Reibwerten eine Temperaturkompensation angewandt, so sollte dies bei der Anwendung der Regeln, bezüglich der Sicherheit der Aussagen, mit einbezogen werden.

Die Diagnoseregeln sind in der Form von

WENN (Bedingung) ... **DANN** (Schlussfolgerung) ....**Regeln**

aufgebaut. Sowohl die Bedingungen als auch die Schlussfolgerungen können die logischen Bedingungen UND, ODER, NICHT enthalten. Die Regeln beinhalten vor allem physikalisch-analytisches, aber auch heuristisches Wissen. Die Regelbasis ist offen und kann jederzeit durch die gesammelten Erfahrungen des Instandhalters ergänzt werden. Damit kann u.a. die Maschinenhistorie einbezogen werden. Auf eine explizite Darstellung der Regeln wurde an dieser Stelle verzichtet.

Input Symptom	Regelbasis	Intensität Trend	+ Anstieg - Abfall	wenn ...	dann...
	Tribologisches System Temperatur gleich oder kompensiert				
	Unterregelgruppe 1.1: **Gesamtverhalten** (Nur in Verbindung mit Regeln 1.2.1 und 2.1 eindeutig)			**R1.1.1**	Tribologische Veränderung im Gesamtsystem oder an einzelner Stelle wenn R1.2.1 oder Änderung der Vorspannung R2.1
$\Delta M_R(t)$	**Regel 1.1.1:** Veränderung M_R signifikant	$\Delta\Delta M_R$	+	**R1.1.2**	zunehmende Mischreibung
			-	**R1.1.2**	abnehmende Vorspannung
$\Delta M_{RC}(t)$	**Regel 1.1.2:** Veränderung M_{RC} signifikant	$\Delta\Delta M_{RC}$	+	**R1.1.3**	evtl. zu stark geschmiert
$\Delta M_{RV}(t)$	**Regel 1.1.3:** Veränderung M_{RV} signifikant	$\Delta\Delta M_{RV}$	-	**R1.1.3**	zunehmende Mischreibung
$\Delta\Delta M_R(t)$	**Regel 1.1.4:** Veränderung $\Delta M_{RV}/\Delta M_{RC}$	$\Delta\Delta M_{RV}/M_{RC}$	+	**R1.1.4**	evtl. zu stark geschmiert
$\Delta\Delta M_{RC}(t)$		ist	-	**R1.1.4**	zunehmende Mischreibung
$\Delta\Delta M_{RV}(t)$	**Regel 1.1.5:** Wert von	<, >, 0	+/-	**R1.1.5**	drohender Ausfall ($\Delta M=0$, $\Delta\Delta M=0$ lineares $\Delta\Delta M>0$ progressives $\Delta\Delta M<0$ degressives Fehlerverhalten)
$\vartheta_1(t,Ort)$ ... $\vartheta_n(t,Ort)$	**Unterregelgruppe 1.2:** **Lokales Temperaturverhalten**		+/-	**R1.1.x und R1.2.1(Q_y)**	Fehlerort (Qy)
	Regel 1.2.1: Einzelne Abweichung im Temperatur-Verhältnis am Ort Q_y signifikant		+	**R1.2.2 (Q_y)**	zu stark geschmiert
			-	**R1.2.2 (Q_y)**	Übergang zur Mischreibung
	Regel 1.2.2: κ-Wert geändert				

bbildung 7.12: Regelklassen zur Messwert- und Merkmalsinterpretation (Teil 1)

Input Symptom	Regelbasis	Intensität Trend	+ Anstieg - Abfall	wenn ...	dann...
$M_R(\varphi_M)$ $M_R(x_E)$	**Regelgruppe 2: Leicht- / Schwergängigkeit**				
	konstant **Regel 2.1:** Veränderungen von $M_R(\varphi_M)$=const oder $M_R(x_E)$= const. in Verbindung mit verändertem Temperaturverhalten am Lagerpaar Y,Z		+	**R2.1 und R1.2.1(Qy,Qz)**	Axiale Verspannung in Lagerung Y, Z
			-	**R2.1 und R1.2.1(Qy,Qz)**	Nachlassende Vorspannung in Lagerung Y, Z
	winkelabhängig $M_R(\varphi_M)$ auftretend **Regel 2.2:** nach einer Motorumdrehung wiederholend		+/-	**R2.2 $M_R(\varphi_M)$**	Fehler vor Getriebe
	Regel 2.3: nach $1*i_G$ Motorumdrehungen wiederholend		+/-	**R2.3 $M_R(\varphi_M*i_G)$**	Fehler nach dem Getriebe
	lageabhängig $M_R(x_E)$ auftretend **Regel 2.4:** abhängig von Lageendeffektor		+/-	**R2.4 $M_R(x_E)$**	Fehler nach dem Getriebe
	scheinbar periodisch **Regel 2.5:** in unregelmässigen Abständen sich wiederholend		+/-	**R2.5**	Evtl. Fehler in Wälzkontakten
$\Delta\varphi_{M1}(I_M(t))$ ... $\Delta\varphi_{Mn}(I_M(t))$	**Unterregelgruppe 3:** **Spiel**				
	Nach Richtungsumkehr... **Regel 3.1:** ... $M_R(\varphi_M)$ kurzzeitig reduziert		+	**R3.1**	zu grosses Spiel $\Delta\varphi_M$
	Regel 3.2: ... bis zum nächsten Stromanstieg durchlaufender Drehwinkel φ_{M1} überschreitet Grenzwert		+	**R3.2**	zu grosses Spiel $\Delta\varphi_{M1}$
	Regel 3.3: ... bis zum nächsten Stromanstieg durchlaufender Drehwinkel φ_{M2} überschreitet Grenzwert		+	**R3.3**	zu grosses Spiel $\Delta\varphi_{M2}$
	Regel 3.n: ...		+	**R3.n**	...

Abbildung 7.12: Regelklassen zur Messwert- und Merkmalsinterpretation (Teil 2)

8 Verifizierung der Methoden mittels einer Versuchseinrichtung

Für die Überprüfung der in den vorhergehenden Kapiteln entwickelten Zusammenhänge wurde eine Versuchseinrichtung aufgebaut und damit die erforderlichen Versuche durchgeführt.

8.1 Beschreibung der Versuchseinrichtung

Der prinzipielle Aufbau der Versuchseinrichtung ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Die Versuchseinrichtung bildet den Aufbau einer elektromechanischen Antriebseinheit nach, wie sie in Abbildung 4.1 und Abbildung 7.2 dargestellt ist.

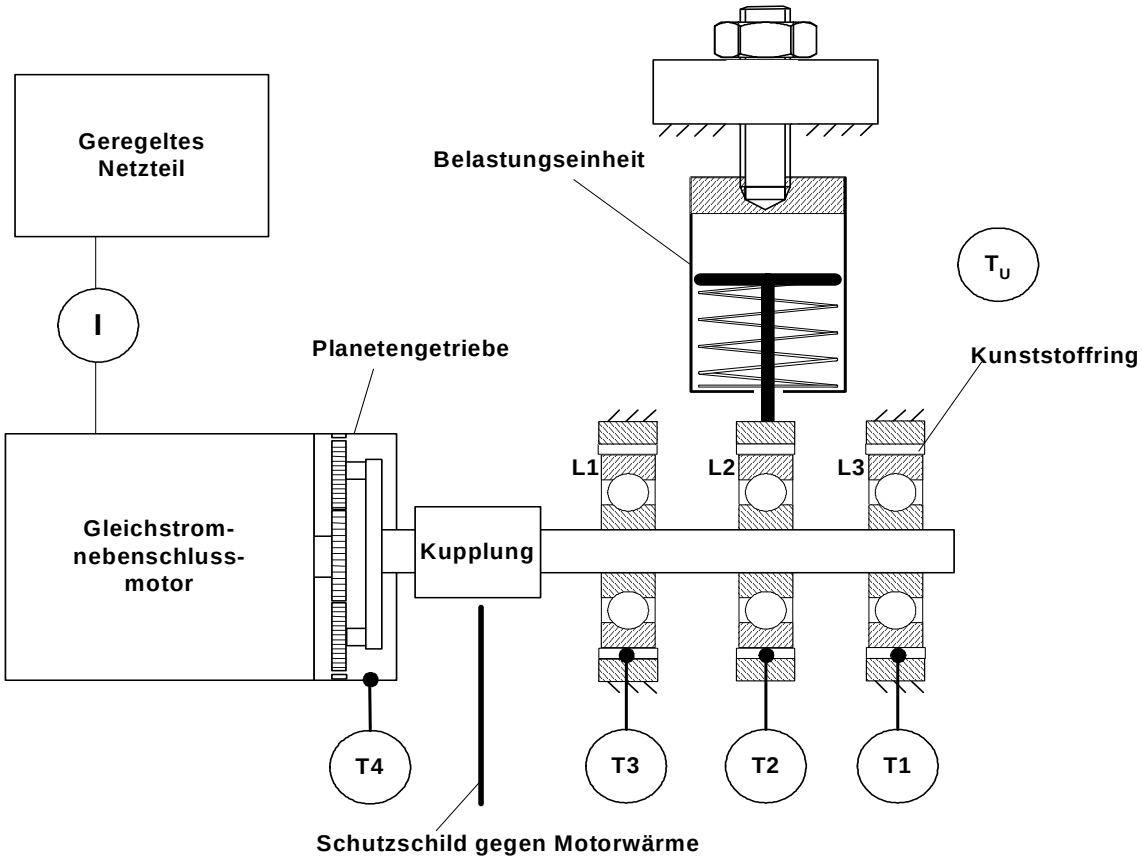


Abbildung 8.1 Aufbau der Versuchseinrichtung

Als Antrieb dient ein Gleichstromnebenschlussmotor mit angebautem Planetengetriebe. Motorwelle und Sonnenrad sind mit zwei Wälzlagern gelagert. Das Planetengetriebe hat drei Planetenräder mit insgesamt sechs Zahneingriffen. Die Antriebswelle des Planetengetriebes ist über eine Bogenzahnkupplung mit einer Welle verbunden, die in den Lagern L1 und L3 gelagert ist. Auf das Lager L2 wird eine radiale Belastung aufgebracht, die über die Lager L1 und L3 auf das Gestell abgetragen wird. Die Kraft an der Zugstange wird über deren Endscheibe und eine zylindrische Schraubendruckfeder am Boden eines zylindrischen Rohres abgestützt. Am anderen

Ende des Rohres ist eine Gewindestange befestigt. Mittels einer Mutter lässt sich die Feder über die Gewindestange vorspannen und damit die Lagerbelastung aufbringen. Die Mutter stützt sich über eine Druckplatte am Gestell ab. Durch Verdrehen der Mutter kann die Lagerbelastung eingestellt werden. Die Höhe der Belastung ist proportional zum Federweg. Der Unterschied zur Anordnung in Abbildung 4.1 bzw. Abbildung 7.2 liegt in der Lagerart und Lagerbelastung. Üblicherweise werden für die Lagerung der Kugelumlaufgewindespindeln von elektromechanischen Antriebseinheiten spezielle Lagereinheiten verwendet, mit denen die Spindel axial vorgespannt wird. Die kombinierte axiale und radiale Belastung wird bei der Versucheinrichtung durch eine reine Radialbelastung ersetzt.

Der Motor wird durch ein geregeltes Netzgerät gespeist. Gemessen werden der Motorstrom, die Motordrehzahl, die Getriebetemperatur und die Lagertemperaturen. Der Strom wird mittels eines Strommessgerätes erfasst und digital in Verbindung mit der Zeit gespeichert. Die Temperaturen T1, T2, T3 und T4 werden als Mittelwert erfasst und digital zusammen mit der Zeit abgespeichert. Die Umgebungstemperatur T_U wird in etwa kostant gehalten und zeitweise mit registriert. Für die Temperaturmessung werden Ni-CrNi-Thermoelemente eingesetzt. Die Thermoelemente T1, T2 und T3 sind durch Bohrungen im Gehäuse am Lageraussenring angelegt. Der Lageraussenring ist zur Wärmeisolation in einem Kunststoffring gelagert. Dadurch wird der Wärmeaustausch zwischen Lager und Lagerträger reduziert. Als thermische Abschirmung ist zwischen dem Motor und den Lagern ein Aluminiumblech eingebaut. Die Wärmeleitung zwischen Getriebeausgangswelle und Lagerwelle wird durch eine Bogenzahnkupplung reduziert, bei der die Verbindung zwischen Motorwellen- und Lagerwellenseite über ein Kunststoffgehäuse erfolgt. In Abbildung 8.3 ist der Gesamtaufbau der Versuchsanordnung dargestellt. Die Abbildung 8.2 zeigt im Detail die drei Lager mit den Thermoelementen sowie einen Teil der mit dem mittleren Lager verbundenen Belastungseinheit.

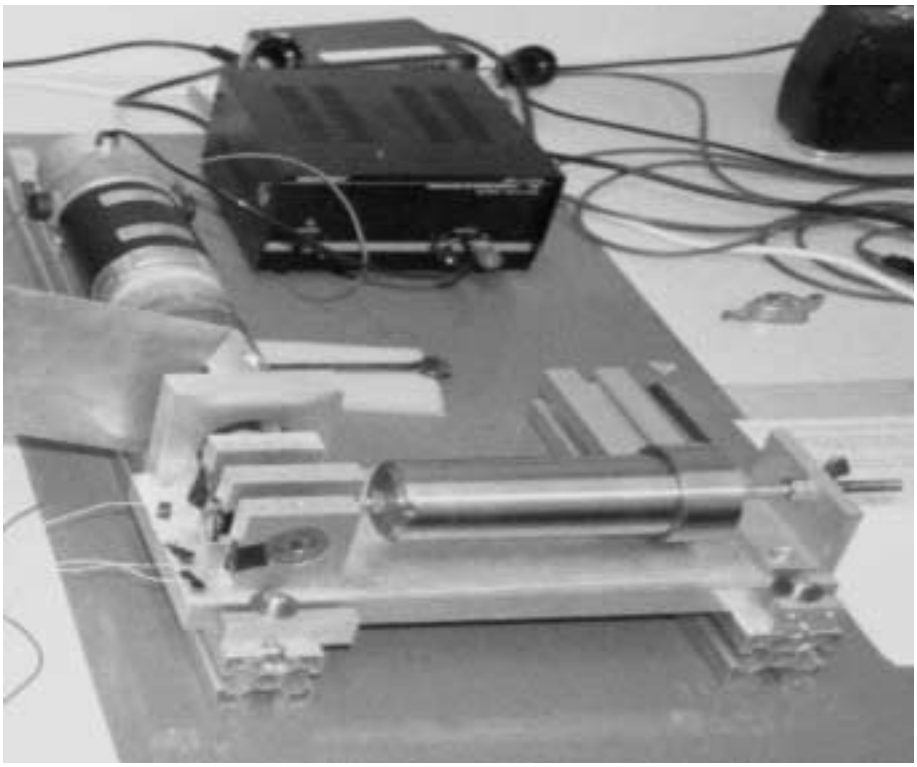


Abbildung 8.2 Gesamtansicht der Versuchseinrichtung

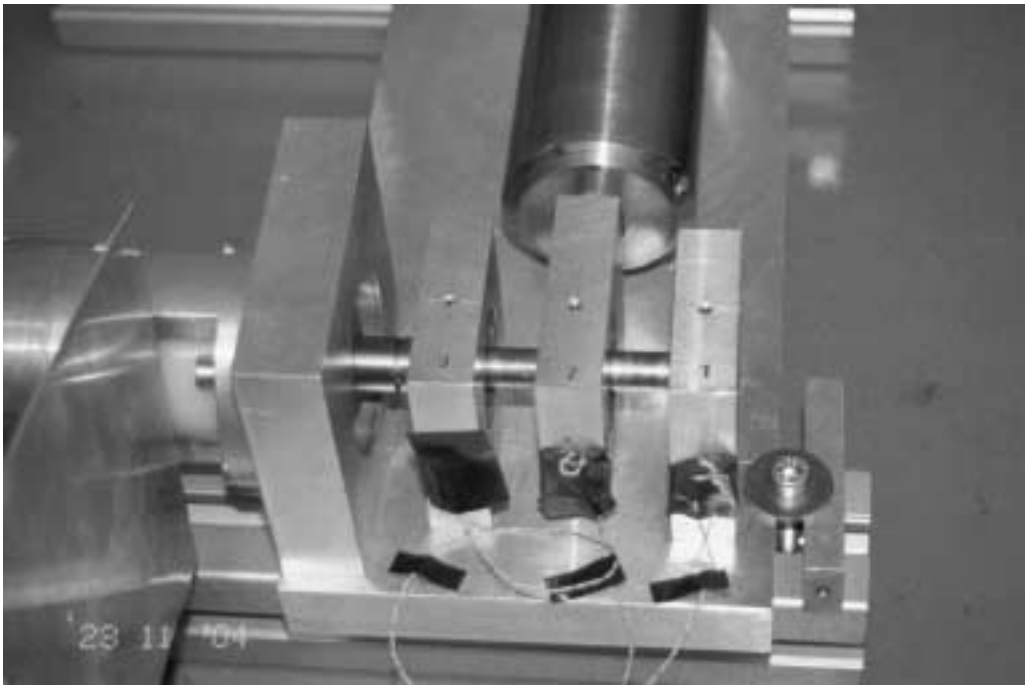


Abbildung 8.3 Lagerstellen mit Thermoelementen

In der Abbildung 8.4 sind die wichtigsten Kenndaten der Versuchseinrichtung zusammengefasst.

Einheit	Typ
Motor	**Gleichstromnebenschlussmaschine mit Planetengetriebe**
	M_{Nenn} = 0,46 Nm
	U_{Nenn} = 48V
	I_{Nenn} = 3,539 A
	n_{Nenn} = 3000 min^{-1}
Getriebe	**Planetengetriebe Übersetzung i_G = 12,5**
Lager	**L1, L2, L3 = Rillenkugellager 61900-2Z; fettgeschmiert.**
	Bohrungsdurchmesser d_i = 10 mm
	Aussenringdurchmesser d_a = 22 mm
	Lagerbreite b = 6 mm
	Stat. Tragzahl C_0 = 850 N
	Dyn. Tragzahl C = 2080 N
Belastungs-einrichtung	**Zylindrische Schraubendruckfeder, Federkonstante c = 39,4 N/mm**
	Gewindespindel M8 x 1,25
Strommessung	**Digital Multimeter Datenlogger; Messbereich: 0-2 A; Auflösung: 100µA Genauigkeit: +/-0,2%**
Temperatur-messung	**4-Kanal Datenlogger für Thermoelemente Typ K (Ni-CrNi); Messbereich -200 bis 1370°C; Auflösung 0,1°C; Genauigkeit +/-(0,3% + 1°C).**

Abbildung 8.4 Kenndaten der Versuchseinrichtung

8.2 Instandhaltungsbedingte Auslegung der Versuchseinrichtung

Bei der Auslegung der Versuchseinrichtung spielt die Lebensdauer der einzelnen Komponenten und Baugruppen eine entscheidende Rolle. Die Elemente die im Sinne der Instandhaltung ausfallen bzw. deren sich anbahnender Ausfall frühzeitig erkannt werden soll, sind die Lager L1, L2 und L3.

Die nominelle Lebensdauer der für alle drei Lagerstellen verwendeten Rillenkugellager 6199-2Z lässt sich mit der dynamischen Tragzahl C und der äquivalenten Lagerbelastung berechnen.

P ist im vorliegenden Fall gleich der radialen Lagerbelastung. Damit ergibt sich für die Lebensdauer des mittleren Lagers L2 mit einer Belastung P = 800 N die nominelle Lebensdauer zu

Gl. 8.1

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{2080N}{800N}\right)^3 \times 10^6 \left[\frac{U}{min}\right] = 17,576 \times 10^6 \left[\frac{U}{min}\right]$$

Das entspricht einem Dauerlauf von 47 Tagen bei einem 24h Betrieb pro Tag. Eine höhere Belastung als 800 N ist wegen der an der Versuchseinrichtung auftretenden Verformungen nicht möglich.

Die Belastung der beiden äusseren Lager L1 und L3 ist jeweils 400 N. Damit ergibt sich eine nominelle Lebensdauer zu

Gl. 8.2

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p = \left(\frac{2080N}{400N}\right)^3 \times 10^6 min^{-1} = 140,608 \times 10^6 min^{-1}$$

das entspricht einem Dauerlauf von 375 Tagen bzw. ca. einem Jahr.

Per Definition ist nach dieser Laufzeit die Ausfallwahrscheinlichkeit 10%, bzw. es wird erwartet, dass 10% der Lager nach dieser Laufzeit ausgefallen sind. Bei solch langen Laufzeiten mit nur statistisch vorhersagbarem Ende ist die experimentelle Verifizierung von Diagnoseverfahren zeitaufwendig. Deshalb wurde nur ein Ausfall aufgenommen und ausgewertet.

Die Auslegung der übrigen Komponenten und Baugruppen erfolgt möglichst langlebig. Im vorliegenden Fall wird die Motor-Getriebe-Einheit mit nur ca. 1/100 ihrer Nennleistung betrieben. Die zu erwartende Lebensdauer ist damit sehr viel höher als die der Lager L1, L2 und L3.

Damit entspricht die Versuchsanordnung weitgehend der einer elektromechanischen Antriebseinheit. Der zu diagnostizierende Ausfall wird in einem überschaubaren Zeitraum eintreten. Dies ist für eine instandhaltungsgerechte Bewertung der Ergebnisse unverzichtbar. Der Motorstrom erfasst die Summe aller Reibmomente und dient damit als Indikator für eine Veränderung am Antriebssystem als Ganzes. Mit dem bei verschiedenen Drehzahlen erfassten Strom kann über alle Reibstellen gemittelt, die Abhängigkeit zwischen Drehzahl und Reibmoment ermittelt werden. Das individuelle Temperaturverhalten jedes Lagers L1, L2 und L3, die untereinander weitgehend thermisch isoliert sind, dient als Indikator für die Änderung der individuellen Reibzustände über die sich eine anbahnende Störung ankündigt. Das Summenreibmoment und die über die Reibstellen gemittelte Temperatur erlauben schließlich den Einfluss der Temperatur auf die Viskosität und das Reibverhalten zu ergründen sowie das Reibverhalten temperaturabhängig zu korrigieren.

Durch eine überschlägige Rechnung werden im Folgenden zunächst die zu erwartenden mittleren Temperatur- und Stromerhöhung ermittelt.

Der Drehzahlbereich am Getriebeausgang liegt zwischen 80 und 270 min-1. Das mittlere Lager L2 wird maximal mit 800N belastet. Für die überschlägige Rechnung wird eine mittlere Belastung von 400N, eine mittlere Drehzahl von 175 min^{-1} und eine mittlere dynamischen Viskosität von 100 mm^2/s angesetzt. Die Betriebsviskosität ergibt sich entsprechend Abbildung 7.5b für 27°C zu 200 mm^2/s.

Das Gesamtreibmoment an einem Lager ergibt sich als Summe der Reibmomente M_0 (Gl. 7.3) und M_1 (Gl. 7.4) mit f_0=1,5 und f_1=0,0006

$$M_0 = f_0 \cdot 10^{-7} \cdot (\upsilon \cdot n)^{2/3} \cdot d_m^3 = 0,657\mathrm{Nmm}$$ und

$$M_l = f_l \cdot P_l \cdot d_m = 3,84\mathrm{Nmm}$$

M_0 steigt mit zunehmender Viskosität und folglich mit abnehmender Temperatur sowie mit zunehmender Drehzahl. M1 steigt mit zunehmender Belastung. Der Anteil von M_0 am Gesamtreibmoment des Lagers ist niedrig.

Das Gesamtreibmoment multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit ergibt die Leistung bzw. den Wärmestrom, der zur Erwärmung des Lagers führt

$$P_{l0} = (M_0 + M_l) \cdot 2 \cdot \pi \cdot n = 82\mathrm{mW} \qquad \text{Gl. 8.3}$$

Die zu erwartende Betriebstemperatur des Lagers läßt sich durch gleichsetzen des vom Lager erzeugten Wärmestroms P_{10} mit dem an die Umgebung abgeführten Wärmestrom [GfT84]

$$Q_U = 10^{-3}(t_L - t_U) \cdot k_q \cdot A_L) \qquad [\mathrm{mW}] \qquad \text{Gl. 8.4}$$

abschätzen. Die mittlere Lagertemperatur ist t_L in [°C], die Umgebungstemperatur ist t_U in [°C]. Der Wärmedurchgangskoeeffizient k_q der Lagersitzflächen ist einem Diagramm in [GfT84] entnommen worden. A_L ist die Lagersitzfläche.

Für Radiallager gilt

$$A_L = \pi \cdot (D + d) = 603\mathrm{mm}^2 \qquad \text{Gl. 8.5}$$

Die Temperaturerhöhung ist entsprechend Gl. 8.4 mit $Q_U = P_{10}$

$$\Delta t = t_L - t_U = \frac{P_{l0} \cdot 10^3}{k_q \cdot A_L} \qquad [°C] \qquad \text{Gl. 8.6}$$

Für k_q=0,2 $kWm^{-2}K^{-1}$ ergibt sich ein Δt= 6,8°C, für k_q=1$kWm^{-2}K^{-1}$ ergibt sich ein Δt von 1,3°C. Die gemessene Temperaturerhöhung betrug im Mittel 3°C, was einem k_q =0,43 $kWm^{-2}K^{-1}$ entspricht, also innerhalb dem für Lager mit schlechter Wärmeableitung üblichen Bereich liegt.

Die Abschätzung wie sich die Lagerreibung auf den Motorstrom auswirkt wird zunächst das Reibmoment eines Lagers auf die Motorwelle transformiert

$$\Delta M_{Motor} = \frac{M_{Lager}}{|i| \cdot \eta_G} = 0,43 Nmm \qquad \text{Gl. 8.7}$$

Dieses Moment verändert den Motorstrom um

$$\Delta I_{Motor} = \frac{\Delta M_{Motor}}{M_{Nenn}} \cdot I_{Nenn} = 3,4 mA \qquad \text{Gl. 8.8}$$

Bei drei Lagern L1, L2 und L3 mit 2 halb und einem voll belasteten Lager ergibt sich eine mittlere Motorstromänderung von 6,8 mA. Dies ist ein verhältnismässig kleiner Wert im Vergleich zum Strom des Motors mit Getriebe von ca. 260mA bei unbelasteten Lagern. Damit ist der Strom als Indikator für eine Schädigung nur dann zu verwenden ist, wenn sich eine deutliche Änderung des Lagerreibmoments infolge einer Schädigung ergibt.

8.3 Darstellung der Messergebnisse

Da die Schädigungsprozesse im allgemeinen sehr langsam ablaufen und von den charakteristischen Größen die Absolutwerte weniger aussagekräftig als der Trend sind, kann auf eine zeitlich hochauflösende Messtechnik zugunsten einer robusten, langzeitstabilen verzichtet werden. Die eingesetzten Datenlogger nehmen die Messwerte in Zeitabständen von 100ms auf und speichern diese intern. Die Messergebnisse werden täglich ausgelesen, dokumentiert und ausgewertet.

Zu Beginn wurden Messreihen mit unterschiedlichen Belastungen von 200N, 300N, 400N, 500N, 600N; 700N und 800N bei drei verschiedenen Drehzahlniveaus von 80 min^{-1}, 170 min^{-1} und 260 min^{-1} über jeweils einen Tag gefahren, anschliessend Dauerläufe.

Typischer Strom- und Temperaturverlauf

In der Abbildung 8.5 ist ein typischer Strom- und der Temperaturverlauf an den drei Lagern sowie der Motorgetriebeeinheit über mehrere Stunden dargestellt.

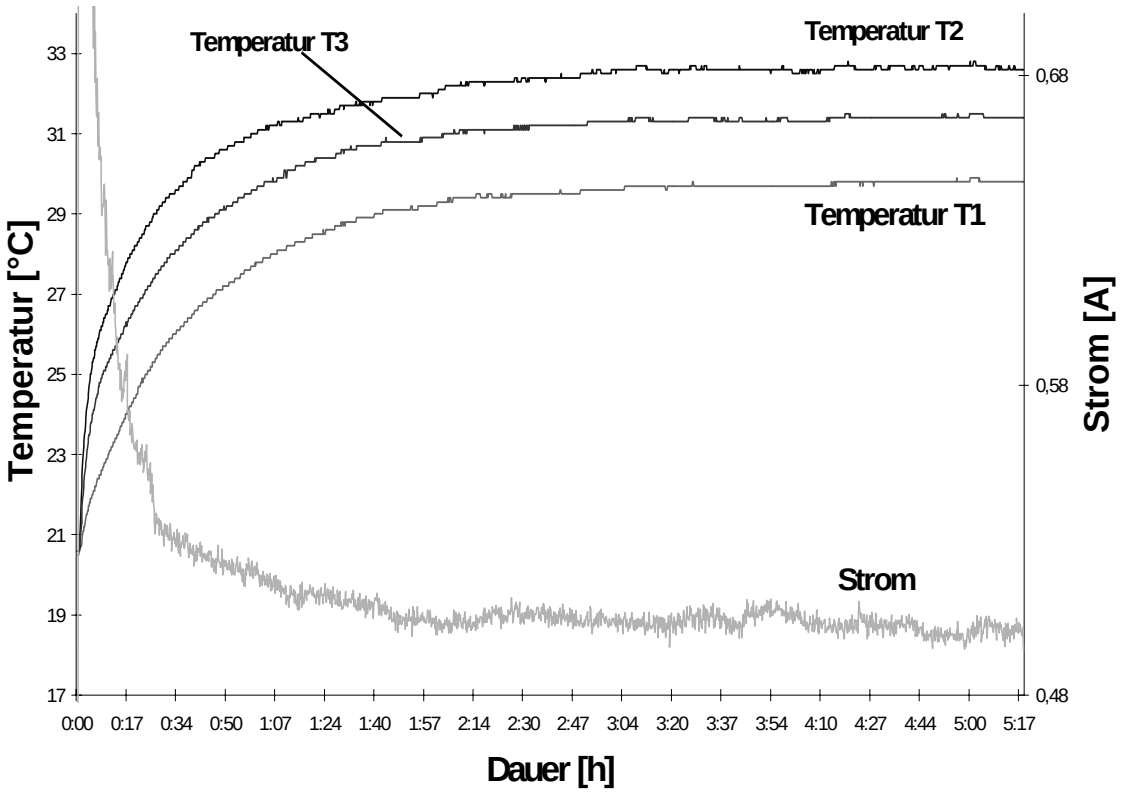


Abbildung 8.5 Typischer Strom- und Temperaturverlauf beim neuen Lager

Bei einem neuen Lager fliesst zu Beginn nach einem mehrstündigem Stillstand der Versuchseinrichtung ein bis zu zweifach so hoher Motorstrom als der sich nach etwa zwei Stunden einstellende, in etwa konstante Motorstrom. Der Abfall des Motorstroms verläuft synchron zur Erwärmung der Lager und des Motors mit Planetengetriebe die etwa nach zweieinhalb Stunden ihre Beharrungstemperatur erreicht haben. Die Erwärmung wird durch Reibverluste verursacht. Die Fettverdrängung und die Walkarbeit erzeugen beim neu anlaufenden ’kalten’ Antriebsstrang im Vergleich zum ’warmen’ zusätzliche Verluste, die zu einer raschen Erwärmung beitragen. Damit verbunden ist eine Veränderung des Lagerspiels. Wenn das Gleichgewicht von Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe erreicht ist, stellt sich die Beharrungstemperatur ein.

Beim 'kalten' Antrieb kann offensichtlich ein doppelt so hohes Reibmoment als beim 'warmen' auftreten. Der Reibungsabfall ist im wesentlichen eine Folge der abhängig von der Betriebstemperatur absinkenden Betriebsviskosität des Schmierstoffs in den Lagern wie auch im Getriebe. Die Betriebsviskosität kann entsprechend Gl. 5.5 berechnet bzw. dem Diagramm in Abbildung 7.5b entnommen werden, wenn die Temperatur bekannt ist. Der absinkende Motorstrom hängt damit, über die exponentielle Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur und damit von den ansteigenden Lager- und Getriebemotortemperaturen ab.

Bei der Ermittlung der Betriebsviskosität wird der Sachverhalt zu Grunde gelegt, dass bei fettgeschmierten Lagern und Getrieben die Schmierfette zum überwiegenden Anteil aus dem Grundöl und zum geringeren Teil aus dem Verdicker bestehen [BrEsHa02]. Die Schmierung erfolgt hauptsächlich durch das Grundöl, das der Verdicker mit der Zeit in geringen Mengen absondert. Damit lassen sich die Gesetzmässigkeiten für Öle auch bei Fettschmierungen anwenden. Folglich kann man bei Berechnungen die Betriebsviskosität des Grundöls verwenden.

Auffallend sind die unterschiedlichen Lagertemperaturen der Lager L1 und L3, obwohl diese gleich belastet sind. Die Ursache liegt in der Anordnung. Das Lager L3 liegt näher am Motor und wird trotz Wärmeschutzschild von diesem stärker erwärmt als das aussenliegende Lager L3. Erwartungsgemäss erreicht das doppelt so hoch belastete Lager L2 die höchste Temperatur. Das Lager L1 hat auch eine größere Wärmezeitkonstante $T_{\vartheta 1}$ = 32 min als die übrigen beiden Lager mit $T_{\vartheta 2}$ = $T_{\vartheta 3}$ = 22 min, bedingt durch die größere Wärmeabgabefähigkeit. Zieht man die Beharrungstemperatur für die Auswertung heran, so kann entsprechend Abbildung 5.8 diese erst nach ca. 96 min mit einer Genauigkeit von 95% abgelesen werden. Ansonsten könnte, wenn die Wärmezeitkonstante bekannt ist, die Beharrungstemperatur ϑ_∞ aus der Laufzeit t und der dazugehörigrn Temeratur $\Delta\vartheta(t)$ mittels Gl. 5.40 rechnerisch ermittelt werden. Die Beharrungstemperaturen in den drei Lagern stehen, wenn keine Störungen vorliegen in festem Verhältnis zueinander. Bei Störungen ändert sich dies. Mit der Gl. 5.43 kann die Veränderung der Temperaturverhältnisse ermittelt werden.

Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Messergebnisse

Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, muss der ausfallsbedingte Temperaturanstieg von einem umgebungsbedingten unterschieden werden können. Die Abbildung 8.6 zeigt den Einfluss einer schwankenden Umgebungstemperatur auf die Lagertemperaturen und den Strom. Die Umgebungstemperatur schwankt zyklisch um 1,2°C bis 1,4°C.

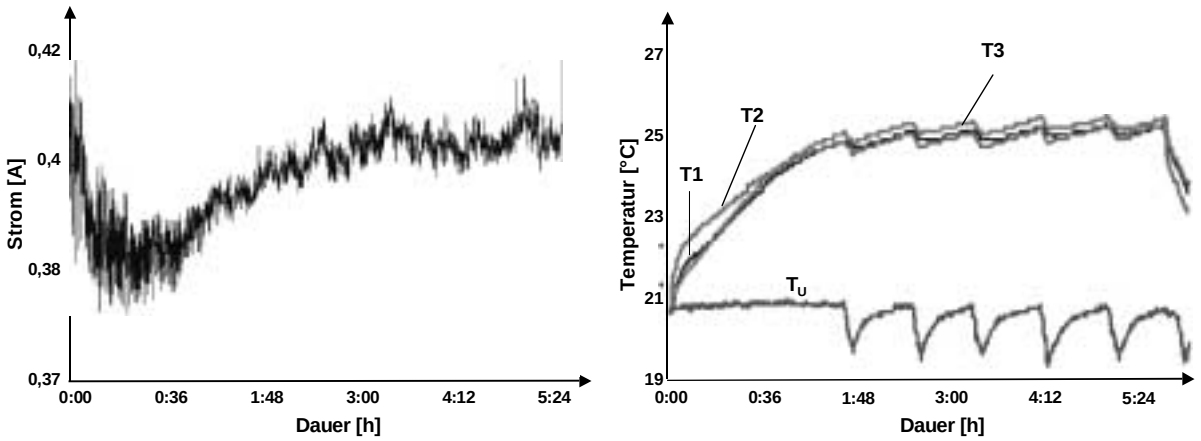


Abbildung 8.6 Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Lagertemperaturen

Analog schwankt die Temperatur an den Lagern L1, L2 und L3 um ca. 0,3 °C, d.h. die Schwankungen an den Lagern betragen nur knapp ein Drittel der Schwankungen der Umgebungstemperaturen. Das Verhältnis der Lagertemperaturen untereinander bleibt aber konstant. Hierfür ist Voraussetzung, dass die Wärmezeitkonstanten, wie im vorliegenden Fall zutreffend, etwa gleich groß sind. Damit ist gewährleistet, dass eine Auswertung des Temperaturverhaltens mit der Gl. 5.43 keinen Ausfall signalisiert, wenn die Umgebungstemperatur schwankt. Im übrigen ist im Stromverlauf der Einfluss der schwankenden Umgebungstemperatur nur unscharf zu erkennen. Der in Abbildung 8.8 dokumentierte Ausfall wird auch bei einer Auswertung mit der Gl. 5.43 in Verbindung der Gl. 6.7 als Trend erkannt, da jedes Lager einen unterschiedlichen Anstieg der Temperatur, d.h. einen unterschiedlichen Temperaturgradienten aufweist. Damit ist nachgewiesen, dass eine durch eine Umgebungstemperaturschwankung hervorgerufene Temperaturänderung von einer ausfallbedingten Temperaturänderung mittels der Betrachtung der Temperaturverhältnisse unterschieden werden kann.

8.4 Verifizierung der Modelle

In diesem Kapitel werden die in 5 entwickelten Ansätze überprüft. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die tribologischen Zusammenhänge und das Temperaturverhalten.

In 5.2.1 wird von einem linearen Zusammenhang zwischen dem Reibmoment und der Winkelgeschwindigkeit bzw. Drehzahl ausgegangen. Als Proportionalitätsfaktor wird d_{ges} verwendet, der als Dämpfungskonstante die elektromechanische Antriebseinheit als Ganzes charakterisiert. Die Versuchseinrichtung hat einen vergleichbaren Aufbau.

Anhand der Meßergebnisse wird geklärt, ob diese Annahme, d.h. die geschwindigkeitsproportionale Dämpfung hinreichend genau für die Diagnose ist. Des weiteren wird geprüft, ob es notwendig ist, die Abhängigkeit der Viskosität des Schmiermittels von der Temperatur bei der Fehlerdiagnose zu berücksichtigen.

Mit der Versuchseinrichtung wurden Meßreihen mit unterschiedlichen Drehzahlen und Lagerbelastungen gefahren. Der Strom und die Temperaturverläufe wurden aufgezeichnet und nach erreichen des Beharrungszustands die Werte für den Strom und die Temperaturen ausgewertet. Die Stromwerte sind in Abbildung 8.7 durchgezogen in Abhängigkeit von der Drehzahl dargestellt, ohne den Temperatureinfluss auf die Viskosität zu berücksichtigen.

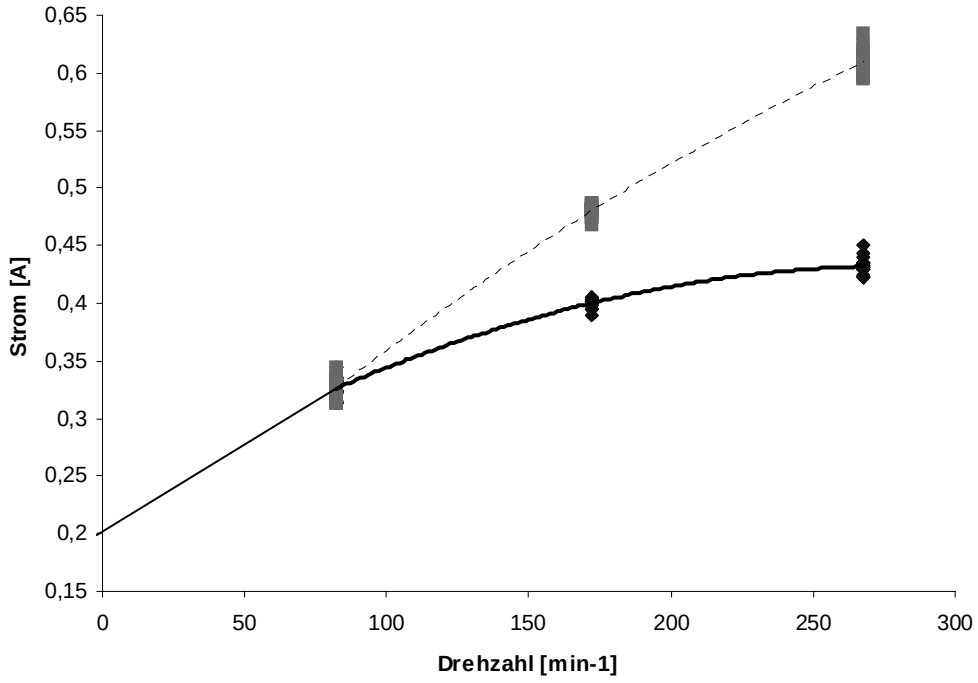


Abbildung 8.7 Zusammenhang zwischen Motorstrom und Drehzahl

Es kann offensichtlich trotz des zu grunde liegenden engen Temperaturbereichs von 24°C bis 31°C kein linearer Zusammenhang zwischen Drehzahl und Motormoment bzw. Reibmoment festgestellt werden. Damit kann das im Kapitel 5.2.1 entwickelte Superpositionsverfahren zur Trennung von coulombscher und viskoser Reibung nur bedingt angewandt werden.

Um den Einfluss der Temperatur auf die Viskosität mit einzubeziehen wird diese im Folgenden berücksichtigt. Es gilt für die kinematische Viskosität

$$\nu = \nu(\vartheta_B) \qquad \text{Gl. 8.9}$$

Voraussetzung dafür ist, dass die Temperaturen an den Reibstellen bekannt sind, d.h. wie im vorliegenden Fall gemessen wurden. Dann läßt sich aus Abbildung 7.5b für die gemessene Betriebstemperatur die entsprechende Betriebsviskosität entnehmen. Bei Fettschmierung ist die Viskosität des Grundöls maßgebend [StRö96]. Im vorliegenden Fall sind die Lager mit einem Fett geschmiert, dessen Grundöl eine kinematische Viskosität von ν=100mm^2/s bei 40°C hat. Den Graph für die Betriebsviskosität in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur aus dem Diagramm ersetzt man vorteilhaft durch eine beschreibende Gleichung. Diese entwickelt man nach DIN51563 und DIN53017 mittels der von Ubbelohde empirisch gefundenen V-T-Gleichung. Mit zwei abgelesenen Viskositätswerten ermittelt man zunächst

$$w_{l,2} = \log\log(\nu_{l,2} + 0,8) \qquad \text{Gl. 8.10}$$

die in die Gleichung

$$m = \frac{w_1 - w_2}{\log\vartheta_1 - \log\vartheta_2} \qquad \text{Gl. 8.11}$$

eingesetzt, die Steigung der Ausgleichsgeraden liefern. Damit lässt sich eine Geradengleichung darstellen, mit der die kinematische Viskosität für jede Temperatur rechnerisch ermittelt werden kann.

Über das Newton‘sche Schubspannungsgesetz nach Gl. 5.2 besteht eine Proportionalität zur Schubspannung und folglich zum Drehmoment der Welle nach Gl. 5.4, welches wiederum proportional zum Motorstrom ist

$$= I(\nu(\vartheta_B)) \qquad \text{Gl. 8.12}$$

Der viskositäts-temperaturkompensierte Stromwert ist in Abbildung 8.7 gestrichelt dargestellt. Durch die Temperaturkompensation ergibt sich ein guter linearer Zusammenhang.

Damit muss der Einfluss der unterschiedlichen Lagertemperaturen auf die Viskosität bei den unterschiedlichen Drehzahlniveaus in Gl. 5.24 berücksichtigt werden.

Die temperaturkompensierte Dämpfungskonstante ergibt sich zu

$$d_{ges\vartheta} = \frac{\left(I_{Mlist} - I_{M2ist} \cdot \frac{\nu(\vartheta_1)}{\nu(\vartheta_2)}\right) \cdot \left(\frac{M_{Nenn}}{I_{Nenn}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot (n_1 - n_2)} \qquad \text{Gl. 8.13}$$

Das heisst, mittels des temperaturkompensierten Stroms lässt sich die temperaturkompensierte Dämpfungskonstante $d_{ges\vartheta}$ bestimmen. Das Superpositionsverfahren kann damit nicht ohne Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität angewandt werden. Damit lässt sich das in Kapitel 5 entwickelte Superpositionsverfahren für die Charakterisierung des Reibungszustandes bei Wälzkontakten anwenden, um die Dämpfungskonstante $d_{ges\vartheta}$ zu ermitteln, deren Änderung über der Zeit, die Änderung des Schmierzustandes charakterisiert.

8.5 Fehlerfrühdiagnose anhand der beobachteten Temperaturen und des Stromes

Um die Anwendbarkeit der Verhältnisauswertung zu überprüfen wurde der Ausfall des Lagers L3 durch reduzieren der Fettmenge provoziert. In Abbildung 8.8 ist der Strom und Temperaturverlauf an den Lagern bis zum Ausfall dargestellt. Nach einer Laufzeit von ca. 100 min stellt sich ein stabiles Temperaturverhältnis ein.

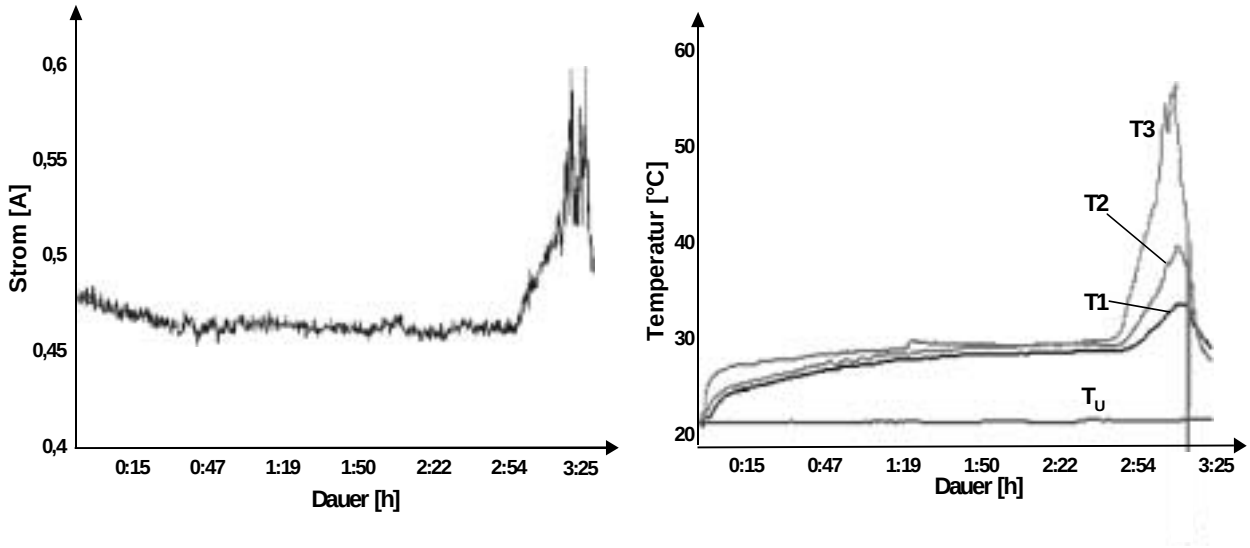


Abbildung 8.8 Strom- und Temperaturverlauf an den Lagern bei einem Ausfall des Lagers L3

Die Temperatur am Lager L3 überschreitet etwa eine Stunde vor dem Ausfall die Temperatur des Lagers L2. Bereits 90 min vor dem Ausfall beginnt die Veränderung der Verhältnisse zwischen den Temperaturen. Ca. 25 min vor dem Ausfall beginnt der drastische Temperaturanstieg am Lager L3. Das Verhältnis zwischen den Temperaturen verändert sich ebenfalls stark. Die Lager L1 und L2 werden durch Wärmeleitung mit erwärmt, d.h. die Lagertemperaturen T1 und T2 steigen ebenfalls, aber stark abgeschwächt an. Der Strom steigt 25 min vor dem Ausfall stark an. Vorher sind keine Veränderungen zu erkennen. Im Anstiegsbereich korrelieren Temperatur- und Stromverlauf. Die beim Ausfall auftretenden beiden Temperaturspitzen sind auch im Stromverlauf zu erkennen.

Damit hat sich im vorliegenden Fall gezeigt, dass sich die relativen Temperaturänderungen an Wälzlagern für eine Fehlerfrühdiagnose eignen. Durch eine parallele Messung des Motorstroms kann der zu erwartende Ausfall des Antriebs ebenfalls vorhergesagt werden, aber nicht die geschädigte Komponente. Die parallele Messung des Stroms kann dazu beitragen, Fehlinterpretationen zu vermeiden.

9 Bewertung und Diskussion weiterer Anwendungen

Bei elektromechanischen Antriebseinheiten erlaubt die kombinierte Auswertung des Motorstroms und der Temperaturen an den relativ zueinander bewegten Kontaktflächen eine Beurteilung des Zustands der tribologischen Systeme in Lagern, Führungen und Getrieben. Mit dem Motorstrom wird das Reibverhalten des Gesamtsystems erfasst. Durch die Temperaturmessung wird die aufgrund der erzeugten Reibenergie bewirkte Temperaturerhöhung an den einzelnen Reibstellen registriert.

Der Motorstrom wird bei bestimmten Betriebszuständen gemessen und mittels des Superpositionsverfahrens der Reibungskoeffizient ermittelt. Die lokalen Temperaturmesswerte werden kontinuierlich erfasst. Redundant kann der Reibkoeffizient im Auslaufversuch und während der langsamen Referenzfahrt die coulomb´sche Reibung des Antriebssystems bestimmt werden, d.h. der viskose und coulom‘sche Reibungsanteil lassen sich doppelt, mit unabhängigen Verfahren ermitteln. Der viskose und coulomb´sche Reibanteil werden doppelt, mit unabhängigen Verfahren ermittelt. Durch die Redundanz ist eine zuverlässige Beurteilung von Veränderungen im Reibverhalten des Gesamtsystems im Sinne einer Fehlerfrüherkennung möglich. Die bei höheren Drehzahlen bzw. Geschwindigkeiten ermittelten Änderungen der Reibwerte sind im wesentlichen eine Folge von geänderten Schmierstoffeigenschaften wie z.B. der Schmierstoffviskosität. Änderungen der coulomb´schen Reibung ergeben sich hauptsächlich bei Belastungsänderungen. Verschiebungen des Verhältnisses von coulomb´scher zu viskoser Reibung zeigen eine Veränderung des Reibzustandes an. Die Ursache kann zum Beispiel Verschleiß sein. Die an den einzelnen tribologischen Systemen erfassten Temperaturen werden hinsichtlich ihrer relativen Änderungen bewertet. Vom langzeitstabilen Verhältnis der Temperaturmesswerte abweichende Veränderungen einzelner Temperaturmesswerte signalisieren eine Veränderung des tribologischen Systems, z.B. einer Lagerbaugruppe. Damit kann allein über die gemessenen Temperaturen und wenn sich gleichzeitig auch die Gesamtreibung ändert, redundant eine Fehlerfrüherkennung erfolgen. Zur Beurteilung des Schmierzustands kann noch das Viskositätsverhältnis $\kappa=\gamma/\gamma_1$ mit der Bezugsviskosität γ_1 und der Betriebsviskosität γ herangezogen werden. Zusätzlich kann die gemessene Temperatur zur Korrektur der Betriebsviskosität bei vom Bezugswert abweichenden Temperaturen verwendet werden, um damit die Reibwerte temperaturabhängig zu korrigieren. Durch eine Beurteilung der ausfallkritischen tribologischen Systeme auf der Basis der Reibwertänderungen und der Energiedissipation entsteht ein redundantes Diagnosesystem. Die Redundanz ist unerlässlich für eine sichere Beurteilung der kleinen Änderungen die bereits einen Ausfall ankündigen. Das neue Verfahren verwendet nicht die absoluten Messgrößen als Merkmalswerte für die Beurteilung des momentanen Reibzustands, sondern deren Änderung, um über die Gradienten eindeutige Tendenzen zu erhalten.

Ergänzend kann zum Erfassen des Verdrehspiels der Lagegeber, in Verbindung mit dem Stromanstieg als Indikator für den rechten und linken Flankenkontakt eingesetzt werden. Zusätzlich lässt sich, durch die lageabhängige Aufzeichnung von Stromanstiegen und -abfällen, Schwer- und Leichtgängigkeit im Antriebssystem detektieren.

Die Strommessung ist bei modernen, digital und mit hoher Abtastfrequenz arbeitenden Stromrichtern hochauflösend möglich. Die Temperaturmessung an Lagern und an den übrigen tribologischen Kontakten wird durch neue mikroelektronische Temperatursensoren erst wirtschaftlich. Eine drahtlose Übertragung der Temperaturmesswerte von direkt am Objekt applizierten Sensoren ist möglich. Das Verfahren hat damit ein wachsendes Zukunftspotenzial.

Das modellgestützte Verfahren steht in Konkurrenz zu den signalbasierten Verfahren, die den Vorteil haben, dass bereits kleine Änderungen an den Kontaktflächen zu Körper- und Luftschallemissionen führen, die mit akustischen Sensoren erfasst werden können. Der Nachteil dieser Verfahren liegt aber in der Beurteilung der Schallemissionen die im Zeit- und Frequenzbereich erfolgt. Zwischen Schallemission und Ursache besteht nur ein schwer nachvollziehbarer Zusammenhang. Ein Rückschluß auf sich anbahnende Störungen oder Ausfälle ist häufig nur mit großer Unsicherheit möglich.

Beim hier entwickelten modellgestützten Verfahren liegt die Schwierigkeit in der Gewinnung zuverlässiger Messwerte, die Rückschlüsse auf die physikalischen Zustände im tribologischen Kontakt zulassen. Der Rückschluß auf mögliche Fehlerursachen gestaltet sich mit sicheren Messwerten anhand der physikalischen Zusammenhänge dagegen einfach. Die in dieser Arbeit eingeführten Minimalmodelle, die Gradientenauswertung sowie die relative Bewertung der Temperaturmesswerte reduzieren die Schwachstellen der modellgestützten Verfahren. Die isolierte Gewinnung einzelner Parameter bei ausgewählten Betriebszuständen und die Redundanz unterstützen eine zuverlässige Fehlerdiagnose. Das hier entwickelte Konzept schafft die Voraussetzung für die Anwendung modellgestützter Verfahren in der Praxis.

Die Anwendung des Verfahrens ist nicht auf elektromechanische Antriebseinheiten in der Automatisierungstechnik begrenzt. Da in steigendem Masse geregelte Antriebe in vielen Produkten und Prozessen, z.B. der Förder- und Verfahrenstechnik eingesetzt werden, bietet sich an, die Beobachtung des Stroms, die Realisierung des Auslaufversuchs und die Erfassung der Temperaturen sowie deren Auswertung allgemein in Um- und Wechselrichter zu integrieren. Entsprechendes gilt für die Gleichstromantriebe in Fahrzeugen.

Strategisches Ziel ist es, die bisherige Grenzwertüberwachung von Motorstrom und Motortemperatur durch eine Beobachtung des zeitlichen Verhaltens des Antriebs zu ersetzen, um anhand von Trends, sich anbahnende Ausfälle frühzeitig und zuverlässig vorhersagen zu können.

10 Zusammenfassung

In elektromechanischen Antriebseinheiten sind die hochbelasteten Gleit- und Wälzkontakte die ausfallkritischen Elemente des mechanischen Teils des Antriebsstrangs. Dafür wird eine Fehlerfrühdiagnose zur Vorhersage einer sich anbahnenden Störung oder eines sich abzeichnenden Ausfalls in dieser Arbeit vorgestellt. Bei einem Ausfall wird aus der Vorgeschichte auf die Fehlerursache und die fehlerhafte Baugruppe bzw. das ausgefallene Maschinenelement geschlossen.

Grundlage ist ein modellgestützter Ansatz, der durch die Verwendung von sogenannten Minimalmodellen eine isolierte Ermittlung einzelner, den Fehler charakterisierende Merkmale erlaubt. Die Minimalmodelle basieren auf physikalischen Grundlagen und liefern bei bestimmten Betriebszuständen unmittelbar einzelne Merkmale zum Zeit- und Temperaturverhalten, die einzeln oder kombiniert, redundante Rückschlüsse auf Veränderungen in den tribologischen Systemen der elektromechanischen Antriebseinheiten erlauben. Die Modellansätze werden durch Versuche bestätigt.

Nicht die absoluten Werte der Merkmalsgrößen werden für eine Fehlerfrühdiagnose herangezogen, sondern deren zeitlicher Verlauf. Aus den Trends lassen sich sichere Vorhersagen ableiten. Die als fehlerrelevant erkannten Merkmalsänderungen werden zu Symptomen, die unter Verwendung einer Regelbasis interpretiert werden. Ergebnis ist eine Aussage über den zu erwartenden Fehler, dessen Eintrittszeitpunkt und Ursache.

Aus der Sicht des Anwenders ist die Auswertung nachvollziehbar, da die Verwendung von Minimalmodellen der Denkweise des Instandhalters entspricht. Dadurch ist es für den Instandhalter möglich, die Plausibilität der vom eingesetzten Regelinterpreter gezogenen Schlüsse nachzuvollziehen und zu überprüfen. Der Anwender wird angeregt, die Regelbasis durch seine gesammelten Erfahrungen zu ergänzen.

Der Aufwand für die Hardware hält sich in Grenzen, da die mit modernen Antriebsreglern verbundene hohe wert- und zeitmässige Auflösung bei der Strom- und Lagemessung direkt als Eingangsgrößen für die Minimalmodelle genutzt werden können. Lediglich für die Temperaturmessung an den Reibstellen werden zusätzliche Sensoren benötigt. Mikroelektronische Temperatursensoren mit integrierter drahtloser Übertragung befinden sich im Endstadium der Entwicklung. Lager mit integrierten Temperatursensoren werden angeboten.

Die Auswertung kann in die Antriebssteuerung integriert werden. Die Diagnosekomponente ist integraler Bestandteil zukünftiger elektromechanischer Antriebseinheiten. Die Einbindung der Fehlerdiagnose in die Steuerung der Maschine reduziert den hardwaremäßigen Aufwand für die Merkmalsinterpretation und erlaubt es, erfahrungsbasierte Spezifika der Maschine als Memoryeffekt bei der Fehlerdiagnose mit einzubeziehen.

11 Summary

If interconnected machines and equipment in an automated production environment are suddenly brought to a halt, a significant loss of production is the result. To prevent unexpected stoppages, appropriate measures are needed for the early identification of imminent failures and breakdowns, and defects found during routine maintenance need to be rapidly rectified. Strategies and methods for planning and executing maintenance activities are embraced by the term ‘condition-based maintenance’. The objective of condition-based maintenance is to increase availability while making optimum use of the wear reserve and ensuring the required safety and product quality. According to DIN 40042, availability expresses the probability that a system is operable at any given time.

Satisfying these requirements in day-to-day business requires a fault detection and diagnosis system that fulfills certain criteria. For one thing, execution on running systems should be possible, without dismantling the machines and at low cost. In addition, the measuring of necessary parameters should not require additional sensory mechanisms to deliver valuable information on the current state of each machine part.

In automation technology, the most important subassemblies of equipment and facilities are electromechanical drive units for positioning and moving objects. If a drive unit fails, the complete machine or facility will break down. Therefore, provisions for fault detection and diagnosis should be made before putting a machine into operation. Practical insights from one or more identical drive units must be exploited to validate, verify and substantiate the existing diagnostic knowledge and therefore need to be stored in a knowledge base.

Damages to machine parts in electromechanical drive trains are often revealed by changes in time and temperature behavior. They are due to a modified frictional behavior or play, for example caused by a lack of lubricants, or wear. As yet, no satisfactory interpretation of frictional behavior exists useable for fault detection and diagnosis.

The aim of the present work is to develop a fault detection and diagnosis system by bringing together the evaluation of changes in both time and temperature behavior. For evaluation purposes, minimal models are defined which map the typical time and temperature behavior for certain operating states just like a maintenance expert would do. The interpretation of characteristics extracted by the minimal models is based on rules describing the changes in a drive unit’s time and temperature behavior.

Often, signal analysis can be ruled out in automation technology. Model-based methods are only rarely used because of the modeling effort and their insufficient accuracy.

Objective

This work aims to develop a fault detection and diagnosis system for electromechanical drive units in automation technology. The term ‘electromechanical drive unit’ describes an arrangement in which an electric motor moves an end-effector. Apart from an electric motor, it takes gears, screw drives, rack and pinion drives, synchronous belt drives, as well as bearings or guideways to generate the necessary movements, forces and moments.

The method to be developed draws on the experience and troubleshooting procedure of a maintenance expert building in his mind individual partial models—so-called minimal models—that allow him to emulate the physical behavior at certain operating states with sufficient accuracy while examining individual characteristics in isolation. The characteristic values of several minimal models are taken as a basis for an overall evaluation to identify the type, cause, location, and effect of a fault.

Consequently, it is the task of a monitoring and diagnosis system to extract fault-relevant characteristics from the preprocessed values collected for different operating states, making use of minimal models. The characteristic values are passed on to a rule interpreter storing the failure behavior of the complete electromechanical drive unit, being thus able to draw conclusions on the imminent or actual failure of a machine part. To avoid failure-relevant information going missing, the long-term failure trend must be recorded, while discrete events should be stored and their frequency and intensity be incorporated into the diagnostic process.

Further requirements to be met by the monitoring and diagnosis system are:

- Easy adaptation to different electromechanical drive units
- Usable right from the start of the first drive unit
- Providing a comprehensible interpretation for the maintenance engineer through clear minimal models and the application of rules
- Not only the mechanical but the thermal effects as well are used as failure indicators
- Learning from experience, thus implicating models of a higher order
- Delivering the greatest possible information value based on few sensors only

What is needed is a monitoring and diagnosis system using minimal models along with a rule interpreter that is able to identify imminent failures or defective machine parts.

Results of the work and discussion

For electromechanical drive units, the combined evaluation of motor current and temperatures at the contacts that are in relative motion to each other allows to assess the state of the tribological systems in bearings, guideways and gears. The motor current is used to capture the frictional behavior of the total system. The temperature measurement is used to record the temperature rise at the individual friction points caused by the resulting frictional energy.

The motor current is measured for different operating states, while the coefficient of friction is determined using the super position technique. The local temperature measurements are continuously recorded. In addition, the coefficient of friction can be determined with the deceleration test, while the Coulomb friction of the drive system can be identified during the slow reference run, i.e. the viscous and the Coulomb friction share can be determined by two independent techniques. Viscous and coulomb frictions are calculated twice by two independent techniques. The redundancy of this procedure allows for a reliable assessment of changes in the total system's frictional behavior, making it usable for early fault detection. If, at an increased number of revolutions or speed, the friction coefficients change, this is mainly due to altered lubricant characteristics, such as lubricant viscosity. Changes in coulomb friction often result from variations in load. A shift in the ratio of coulomb to viscous friction suggests a change in the frictional state. This may be caused by wear. The relative variations of temperatures recorded at the individual tribological systems are being assessed. Variations of individual temperature measurements deviating from the long-term stable ratio of temperature measurements signal a change in the tribological system, e.g. of a bearing assembly. Thus, the measured temperatures along with a concurrent change in total friction suffice to create a redundant system for early fault detection. To assess the lubrication state, it is also possible to consult the viscosity ratio $\kappa=\gamma/\gamma_1$ with reference viscosity γ_1 and service viscosity γ. In addition, the measured temperature can be used to correct the service viscosity in case of temperatures deviating from the reference value, thus rectifying the friction coefficients based on temperature. Using the changes in friction coefficients together with the energy dissipation to assess failure-prone tribological systems helps to create a redundant diagnosis system. The redundancy is essential to enable a reliable assessment of the small variations that are prime indicators of a breakdown. The new method does not employ the absolute values of characteristics for assessing the current frictional state, but their variations to identify clear tendencies based on gradients.

Additionally, for the purpose of recording the circumferential backlash, both the position transducer and the increase in current can serve as indicators for the right and left edge contacts. The position-dependent recording of current rises and drops also allows finding out if the drive system can be easily moved or not.

The high-resolution measurement of current is possible for modern and digital current converters with a high sampling frequency. Measuring temperature at bearings and other tribological contacts is only cost-efficient if new microelectronic temperature sensors are used. Thus, temperature measurements can be transmitted wirelessly and directly from the sensors attached to the object. It is a method with a promising future.

This model-based approach competes with the signal-based techniques; their advantage being the fact that even minor changes at the contacts lead to structure-borne and airborne emissions, which can be captured with acoustic sensors. The drawback of this approach is that the assessment of noise emissions occurs in the time and frequency domain. The correlation between noise emissions and their causes is hard to understand. For the most part, conclusions about imminent failures or breakdowns are very unreliable.

The difficulty with the model-based approach developed here is to obtain reliable measurements to draw conclusions about the physical states of the tribological contact. However, conclusions about possible failure causes are easy to derive if reliable measurements based on physical relationships are available. The minimal models introduced in this work, together with the gradient evaluation and the relative assessment of the temperature measurements, mitigate the drawbacks of the model-based approach. Reliable fault diagnosis is supported both by individual parameters obtained for selected operating states and by the given redundancy. The method developed here sets the stage for practically applying the model-based approach.

The application of the approach is not confined to electromechanical drive units in automation technology. As electronically controlled drives are increasingly found in many products and processes, e.g. in materials handling technology and process engineering, it would make sense to integrate the analysis of the current, the implementation of the deceleration test, and the recording of temperatures including their evaluation, into the converters and inverters. The same applies to DC drives in vehicles.

The strategic goal is to replace today’s method of limit value monitoring of motor current and motor temperature by analyzing the time behavior of the drive in order to reliably and early predict imminent failures based on trends.

Conclusions

In electromechanical drive units, the highly loaded sliding and rolling contacts are the failure-prone components in a drive train's mechanical part. Therefore this work introduces an early fault diagnosis to predict imminent failures or breakdowns. After a breakdown has occurred, conclusions can be drawn from previous history about the cause of failure and the defective subassembly or the failed machine part.

It draws on a model-based approach, using so-called minimal models to determine individual characteristics that classify the faults. The minimal models are built on physical foundations and provide, for certain operating states, individual characteristics of time and temperature behavior, which, by themselves or in combination, allow to draw conclusions about changes in tribological systems of electromechanical drive units. Tests have confirmed the practicability of the model-based approaches.

Not the absolute values of the characteristics are used for early fault diagnosis, but their change over time. The resulting trends enable reliable forecasts. As soon as changes to the characteristics have been identified as failure-relevant, they become symptoms that can be interpreted according to a set of rules. This allows for predictions regarding the expected fault, its time of occurrence, and the root cause.

The evaluation is comprehensible to the user, since the use of minimal models matches the maintenance engineer's way of thinking. This enables the maintenance engineer to understand and check the plausibility of the conclusions drawn by the rule interpreter. The user is encouraged to add to the rule base from his own experience.

The hardware expenditure is kept within reasonable limits, since the high resolution in terms of value and time associated with modern drive controllers for current and position measurement can be directly used as input parameter for the minimal models. Only the temperature measurement at the friction points requires additional sensors. Microelectronic temperature sensors with integrated wireless transmission are in the final stages of development. Bearings with integrated temperature sensors are already available.

The evaluation can be included in the drive control. The diagnostic component is an integral part of future electromechanical drive units. The inclusion of fault diagnosis in the control unit of a machine reduces the hardware expenditure for the interpretation of characteristics and allows integrating experience-based machine aspects as memory effects into fault diagnosis.

Literatur

[And80] Anderson, W.J.:
Rolling-element Bearings; in: Tribology-Friction, Lubrication and Wear; Hemisphäre Publication Corperation; Washington, New York, London;1980.

[And98] Anders, C.:
Adaptierbares Diagnosesystem bei Transferstraßen; Dissertation; Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart Band 126; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1998.

[Arm91] Armstrong-Hélouvry, B.:
Control of machines with Friction; Kluwer Academic Publishers; Boston; 1991.

[Bar97] Barwinek, R.:
Analyse von Wälzlagerdiagnosen unter praxisnahen Einsatzbedingungen; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 284; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1997.

[Bar99] Bartz, J.:
Schäden an geschmierten Maschinenelementen, Gleitlager, Wälzlager, Zahnräder; 3. Auflage; expert-Verlag; Renningen-Malmsheim; 1999.

[Ber89] Bertsche, B.:
Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten; Dissertation; Behr Fotodruck GmbH; Stuttgart; 1989.

[BeLe99] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau - Ermittlung von Bauteil- und Systemzuverlässigkeiten; 2. Auflage; Springer Verlag; 1999.

[BeMa87] Beckmann, G.; Marx, D.:
Instandhaltung von Anlagen, *Methoden, Organisation, Planung*; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig; 1987.

[Bie97] Biewer, B.:
Fuzzy-Methoden, Praxisrelevate Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprachen; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1997.

[Bir95] Birkel, G.:
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen; Dissertation; Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, Forschungsbericht Band 84; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1995.

[Bog94] Boge, C.:
Methoden zum Entwurf und Implementierung von prozeßorientierten Überwachungsverfahren für die Fertigungstechnik; Dissertation; Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 6/94; Shaker Verlag; Aachen; 1994.

[Bot98] Bothe, H.-H.:
Neuro-Fuzzy-Methoden, Einführung in die Theorie und Anwendungen; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1998.

[BrEsHa02] Brändlein, J; Eschmann, P.; Hasbargen,L; Weigand, R.:
Die Wälzlagerpraxis - Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen ; Vereinigte Fachverlage, Mainz; 2002:

[Büt96] Büttner, J.:
Integrierte Signalbewertung zur prozeßnahen Qualitätssicherung; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 209; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1996.

[ChLi97] Chen, J.C.; Liang, S.Y.:
A Fuzzy-Nets in Process System for Tool Breakage in End Milling Operations; International Journal Machine Tool and Manufacturing, Vol. 38, No. 4, S. 315 - 327; 1997.

[Col77] Collacott, R.A.:
Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring; Chapman and Hall; London; 1977.

[CzHa92] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie Handbuch, Reibung und Verschleiß; Vieweg Verlag; Braunschweig, Wiesbaden; 1992.

[Dai93] Dai, X.: Ein neuer Fuzzy-Klassifikator für die Maschinenfehlerdiagnose; Dissertation; Skaker Verlag; Aachen; 1993

[DIN31051] N.N.:
DIN 31051 - Instandhaltung - Begriffe und Maßnahmen; Beuth Verlag; Berlin, 1985.

[DIN50320] N.N.:
DIN 50320Z - Verschleiß - Begriffe; Beuth Verlag; Berlin, 1979.

[DIN50321] N.N.:
DIN 50321Z - Verschleiß - Messgrößen; Beuth Verlag; Berlin, 1979.

[DIN55303] N.N.:
DIN55303 - Statistische Auswertung von Daten; Beuth Verlag; Berlin; 1984.

[DIN55350] N.N.:
DIN55350 - Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Merkmalsbezogene Begriffe; Beuth Verlag; Berlin,1989.

[DIN50323] N.N.:
DIN 50323-2 - Tribologie, Verschleiß - Begriffe; Beuth Verlag; Berlin, 1995.

[Din98] Ding, Y.:
Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnosediagnose an Komponeneten und Systemen in Kernkraftwerken mit Hilfe eines Neuro-Fuzzy-Ansatzes; Dissertation; Herbert Utz Verlag; München; 1998.

[DoHi66] Dowson, D.; Higginson, G.:
Elastohydrodynamic; Pergamon Press; Oxford; 1966.

[Dre01] Dresig, H.:
Schwingungen mechanischer Antriebssysteme, *Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese*; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2001.

[Eic90] Eichler, C.:
Instandhaltungstechnik; 5. Auflage, Verlag Technik; Berlin; 1990.

[EN13306] N.N.:
13306 - Begriffe der Instandhaltung; CEN Europäisches Komitee für Normung; Brüssel;4/2001.

[Fäh90] Fähnrich, K.P.:
Ein System zur wissensbasierten Diagnose an CNC-Werkzeugmaschinen durch den Maschinenbediener; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1990.

[Fei93] Feil, A.: Diagnose fettgeschmierter Hauptspindellager; Dissertation; Carl Hanser Verlag; München, Wien; 1993.

[Fre93] Freyermuth, B.:
Wissensbasierte Fehlerdiagnose am Beispiel eines Industrieroboters; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 315; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1993.

[FrWe02] Freitag, E; Weiß, R.:
Reibung elastomerer Dichtungswerkstoffe; Konstruktion 54 (2002), Heft 1/2; S. 34 - 36.

[Geb92] Gebauer, K. P.:
Fehlerfrüherkennung an CNC-Drehmaschinen; Dissertation; Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung; Hanser Verlag; München, Wien; 1992.

[GfT80] N.N.:
GfT-Arbeitsblatt 5 - Tribotechnik im Maschinenbau - Zahnradgetriebe-schmierungen - Wechselbeziehung Schmierstoff/ Maschinenelemente; Gesellschaft für Tribologie; Beuth Verlag; Berlin; 11/1984.

[GfT84] N.N.:
GfT-Arbeitsblatt 3 - Tribotechnik Maschinenbau - Wälzlagerschmierungen - Wechselbeziehung Schmierstoff/ Maschinenelemente; Gesellschaft für Tribologie; Beuth Verlag; Berlin; 11/1984.

[GrHa00] Groß, H.; Hamann, J.; Wiegärtner, G.:
Elektrische Vorschubantriebe in der Automatisierungstechnik, *Grundlagen, Berechnung, Bemessung*, Publicis MCD Verlag; Erlangen/ München; 2000.

[Han98] Han Z.:
Parameterschätzverfahren zur Residuengenerierung für die Fehlerdiagnose; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 726; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1998.

[He93] He, X:
Modellgestützte Fehlererkennung mittels Parameterschätzung zur wissensbasierten Diagnose an einem Vorschubantrieben; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 354; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1993.

[Hel92] Helml, H. J.:
Ein Verfahren zur on-line Fehlererkennung und diagnose am Beispiel eines elektrischen Vorschubantriebs; Dissertation; Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, Forschungsbericht Band 53; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1992.

[Hel96] Helbig, H.:
künstliche Intelligenz und automatische Wissensverarbeitung; 2. stark bearbeitete Auflage; Verlag Technik; Berlin; 1996.

[Hil94] Hildebrandt, M.:
Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen; Dissertation; Behr Fotodruck GmbH; Stuttgart; 1994.

[Hum98] Hummels, M.:
Rechnerunterstützte benutzerorientierte Fehlerbehandlung bei automatisierten Fertigungsanlagen; Dissertation; Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 21/98; Shaker Verlag; Aachen; 1998.

[Ise00] Isermann, R.:
Integration of Fault Detection and Diagnosis Methods; In: Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2000.

[Ise94] Isermann, R.:
Überwachung und Diagnose, *Moderne Diagnose und ihre Anwendungen bei technischen Systemen*; VDI-Verlag; Düsseldorf; 1994.

[Ise99] Isermann, R.:
Mechatronische Systeme, *Grundlagen*; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1999.

[Jac92] Jacobi, H.-F.:
Begriffliche Abgrenzung, in: Warnecke, H.J.: Handbuch Instandhaltung, Band 1; 2. Auflage; Verlag TÜV Rheinland; 1992:

[Jan93] Janik, W.:
Fehlerdiagnose des Außenrund-Einstechschleifens mit Prozeß- und Signalmodellen; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 288; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1993.

[Kal94] Kalendar, T.:
Statistische Modellierung von Präzisionsgetrieben in elektromechanischen Antriebssystemen; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1, Nr. 236; VDI-Verlag, Düsseldorf;

[KaTe01] Karagiannis, D.; Telsko,R.:
Wissensmanagement - Konzepte der Künstlichen Intelligenz und des Softcomputings; Oldenbourg Verlag; München, Wien; 2001.

[Kel00] Keller, H.:
Maschinelle Intelligenz - Grundlagen, Lernverfahren, Bausteine intelligenter Systeme; Vieweg Verlag; Braunschweig, Wiesbaden; 2000.

[Kel97] Kelly, A.:
Maintenance Strategy; Butterworth Heinemann Verlag; Oxford, Boston et. al.;1997.

[Ket95] Ketterer, G.:
Automatisierte Inbetriebnahme elektromechanischer, elastisch gekoppelter Bewegungsachsen; Dissertation; Berichte aus dem ISW der Technischen Universität Stuttgart, Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1995.

[Kol95] Kolerus, J.:
Zustandüberwachung von Maschinen; expert- Verlag; Renningen-Malmsheim; 1999.

[Kön95] König, W.; Klocke, F.; Ketteler, G.; Memis, F.; Rehse, M.:
Prozeßüberwachung beim Bohren, Fräsen und Bohren unter Verwendung neuer Auswertestrategien; VDI-Berichte1179; CIRP/ VDI-Konferenz Düsseldorf; März 1995; S. 91-113.

[Kon97] Konrad, H.:
Modellbasierte Methoden zur sensorarmen Fehlerdiagnose beim Fräsen; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 449; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1997.

[KrSu93] Krüger, J.; Suwalski,I.:
Antriebsbasierte Diagnose- und Überwachungsfunktionen; ‘Werkzeugmaschineninitiative Berlin´ Abschlussbericht; Berlin; März 1998.

[Krü99] Krüger, J.:
Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken; Dissertation; Berichte aus dem produktionstechnischen Zentrum Berlin; Berlin; 1999.

[Kum01] Kummetz, J.:
Nichtlinear.dynamische Effektein elektromechanischen Antrieben; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 572; VDI-Verlag, Düsseldorf; 2001.

[LaSt75] Lang, O.R.; Steinhilper, W.:
Gleitlager; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1996.

[LiLe91] Lin, Ch., Lee, G.:
Neural-Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision Systems; IEEETransactions on computers; 40(1991)12; S. 1320 - 1336.

[Mer90] Mertens, P.:
Expertensysteme in der Produktion - Praxisbeispiele aus Diagnose und Planung, Entscheidungshilfen für den wissenschaftlichen Einsatz; Oldenbourg Verlag; München, Wien; 1990.

[MöNa02] Möller, U., Nassar, J.:
Schmierstoffe im Betrieb; 2. Auflage; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2002.

[NaCe97] Natke H.; Cempel, C.:
Modell-Aided Diagnoses of Mechanical Systems, *Fundamentals; Detection, Localization; Assessment*; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1997.

[NaKlKr96] Nauck, D.; Klawonn, F.; Kruse, R.:
Neuronale Netze und Fuzzy Systeme - grundlagen des Konnektionismus, Neuronaler Fuzzy-Systeme und der Kopplung mit wissensbasierten Methoden; 2. überarbeitete und erweiterte Auflage; Vieweg Verlag; Braunschweig, Wiesbaden; 1996.

[Nat92] Natke, Hans G.:
Einführung in die Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modanalyse, *Identifikation schwingungsfähiger elastomechanischer Systeme*; 3. Auflage; Vieweg Verlag; Braunschweig, Wiesbaden; 1992.

[Nie83] Niemann, H.:
Methoden der Musterklassifikation; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1983.

[PaFrCl00] Patton, R.; Frank,P.; Clark,R.:
Indroduction; In: Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2000.

[Per98] Perschl, F.:
Verfahren zur Analyse und Diagnose von Mehrfachfehlern in komplexen technischen Systemen; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 268; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1998.

[Pla93] Plapper, P.:
Echtzeitanalyse der Signale von Multisensorsystemen, Dissertation; Shaker Verlag; Aachen; 1993.

[Pro02] Proksch, R.:
Modellbasierte Planung und Bewertung von Instandhaltungsstrategien am Beispiel einer Serienfertigung mit geringer Variantenzahl; Dissertation; Jost-Jetter Verlag; Heimsheim; 2002.

[Pup88] Puppe, F.:
Einführung in Expertensysteme; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1988.

[Pup90] Puppe, F.:
Problemlösungsmethoden in Expertensysteme; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1990.

[Rei93] Reiß, T.:
Fehlerfrüherkennung an Bearbeitungszentren mit den Meßsignalen des Vorschubantriebs; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 286; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1993.

[Rem98] Remy, F.:
Fuzzy-Logik im Bereich der Regelung elektromechanischer Vorschubachsen; Dissertation; Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 25/97; Shaker Verlag; Aachen; 1998.

[Reu01] Reuber, M.:
Prozessüberwächung beim Schlichtfräsen von Freiformflächen; Dissertation; Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 3/2001; Shaker Verlag; Aachen; 2001.

[Rit96] Ritschel, W.:
Signalbasierte Qualitätsregelkreise zur technischen Diagnose; Dissertation; Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 17/96; Shaker Verlag; Aachen; 1996.

[Sac83] Sachs, L.:
Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1983.

[Sche02] Scherb, B.J.:
Reibungsverhalten von radial und axial belasteten Zylinderrollenlager; antriebstechnik 41(2002), Heft 9, S. 39 -44.

[Schi86] Schiehlen, W.:
Technische Dynamik; Teubner Studienbücher; Stuttgart; 1986.

[Schl01] Schlottmann, D.; Schnegas, H.:
Sicherheit von Kostruktionselementen - Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit im Maschinebau; 2. Auflage; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2001.

[Schr00] Schröder, D.:
Elektrische Antriebe; *Grundlagen*; 2. Auflage; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2000.

[Schr01] Schröder, D.:
Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen; 2. Auflage; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2001.

[SeFr00] Seliger, R.; Frank, P.:
Robust observer-based Fault Diagnosis in non-linear uncertain Systems; In: Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2000.

[Sim86] Simon, W.:
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen; Dissertation; Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, Forschungsbericht Band 5; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1986.

[SöRa98] Söffker, D.; Rakowsky, U.K.; Müller, P.C.; Peters, O.:
Perspektiven regelungs- und zuverlässigkeitstheoretischer Methoden zur Überwachung dynamischer Systeme aus sicherheitstechnischer Sicht; automatisierungstechnik 46(1998), Heft 6, S. 295 - 301.

[Spu96] Spur, G.:
Die Genauigkeit von Maschinen - Eine Konstruktionslehre; Hanser Verlag; München/ Wien; 1996.

[StFö88] Sturm, A.;
Förster, R.: Maschinen- und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung; VEB Verlag Technik; Berlin; 1988.

[Stri1902] Stribeck, R.:
Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager; Zeitschrift VDI 46(1902), S. 1341-1348, S. 1432-1438, S. 1463-1470.

[StRö96] Steinhilper, W.; Röper, R.:
Maschinen- und Konstruktionselement 3, *Elastische Elemente, Federn, Achsen und Wellen, Dichtungstechnik, Reibung, Schmierung, Lagerungen*; 2. Auflage; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1996.

[Stu81] Stute, G.:
Regelung an Werkzeugmaschinen; Fortschritte der Fertigung auf Werkzeugmaschinen Band 5; Hanser Verlag; München/ Wien; 1981.

[Stu86] Sturm, A.:
Wälzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen; VEB Verlag Technik; Ausgabe Verlag TÜV Rheinland; Berlin; 1986.

[Stu96] Sturm, A.:
Zustandswissen für Betriebsführung und Instandhaltung; Verlag VGB-Kraftwerkstechnik GmbH; Essen; 1996.

[Suw99] Suwalski, I.:
Steuerungsintegriertes Überwachungssystem für Drehmaschinen; Dissertation; Berichte aus dem produktionstechnischen Zentrum Berlin; Berlin; 1999

[VDI2893] VDI2893:
Bildung von Kennzahlen für die Instandhaltung, Entwurf; Beuth Verlag Berlin; 1989.

[VDI3822] VDI3822:
Schadensanalyse, Blatt 1-4; Beuth Verlag Berlin; 1989.

[VDI40042] VDI40042:
Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitskenngrößen, Blatt 4; Beuth Verlag; Berlin; 1986.

[Vog21] Vogel, H.:
Das Temperaturabhängigkeitsgesetz der Viskosität von Flüssigkeiten; Physikalische Zeitung 22(1921), S. 645 - 646.

[Vog22] Vogel, H.:
Die Bedeutung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität für die Beurteilung von Ölen; Zeitschrift für angewandte Chemie 35(1922], S. 561 - 563:

[Vog62] Vogelpohl, G.:
Bestimmung der Übergangsdrehzahl nach dem Auslaufverhalten; Konstruktion 16(1962) Heft 12; S.491 - 496.

[Vog64] Vogelpohl, G.:
Geringste zulässige Schmierschichtdicke und Übergangsdrehzahl; Konstruktion 14(1962) Heft 12; S.461 - 468.

[Vos88] Vossloh, M.:
Modellgestützte Fehlererkennung und wissensgestützte Diagnose von Fehlern an Werkzeugmaschinen; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 572; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1988.

[Wag97] Wagner, M.:
Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe; Dissertation; Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, Forschungsbericht Band 106; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1986.

[Wan93] Wanke, P.:
Modellgestützte Fehlerfrüherkennung am Hauptantrieb von Bearbeitungszentren; Dissertation; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 291; VDI-Verlag, Düsseldorf; 1993.

[Web96] Weber, H.:
Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen; Dissertation; Berichte aus dem produktionstechnischen Zentrum Berlin; Berlin; 1996.

[Wec01] Weck, M.:
Werkzeugmaschinen, *Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozeßdiagnose*; 5. Auflage; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 2001.

[WeHa76] Wellauer, E.J.; Halloway, G:A.:
Application of EHD Oil Fim Theory to Industrial Gear Drives; Trans. ASME; Journal Engineering for Idustrie 98(1976), S. 626 - 634.

[Wei93] Weiss, S.:
Modellbasiertes Lernen zur Wissensakquisition für technische Diagnosesysteme; Dissertation; Hanser Verlag; München, Wien; 1993.

[Wes94] Westernbusch, R.:
Entwicklung eines lernfähigen transputergestützten Werkzeugmaschinendiagnosesystem; Dissertation; Vulkan Verlag; Essen; 1994.

[WeSaFr89] Weck, M.; Saljé, H.; Fritsch, P.:
Körperschall- und Temperaturkennwerte zur Getriebeüberwachung; antriebstechnik 28(1989) Nr.10; S. 44 - 51.

[WeSi99] Westkämper, E.; Sihn; W.; Stender S.:
Instandhaltungsmanagement in modernen Organisationsformen; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1999.

[WiChe80] Winer, W.O.; Cheng, H.S.:
Film Thickness, contact stress and surface temperatures; In: Wear Control Handbook; American Society of Mechanical Engineering; New York; 1980.

[Win96] Wincheringer, W.:
Ein Verfahren zur reportbasierten Diagnose von technischen Maschinenstörungen in der Instandhaltung; Springer Verlag; Heidelberg, New York et. al.; 1996.

[Xu88] Xu, J.:
Fuzzy-Diagnosesysteme und ihre Anwendung bei der Fehlerdiagnose von Maschinenanlagen; Dissertation; Shaker Verlag; 1988.

[Zel94] Zell, A.:
Simulation Neuronaler Netze; Addison-Wesley Publishing Company; Bonn, Paris et. al.; 1994:

[Zha96] Zhang, M.:
Meßstellenreduktion an elektromechanischen Antriebssträngen mittels prozeßgeführter digitaler Simulation; Verlag der Augustinus Buchhandlung; Aachen; 1996.