

## **Antriebsbasierte Zustandsdiagnose von Vorschubantrieben**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Michael Rolf Nathaniel Walther  
geboren in Tel Aviv / Israel

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Alexander Verl  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. Uwe Heisel

Tag der Einreichung: 26. Januar 2011  
Tag der mündlichen Prüfung: 13. Mai 2011

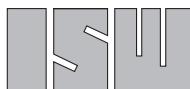
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen  
und Fertigungseinrichtungen  
der Universität Stuttgart

2011

# **ISW/IPA Forschung und Praxis**

Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen  
der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für  
Produktionstechnik und Automatisierung IPA

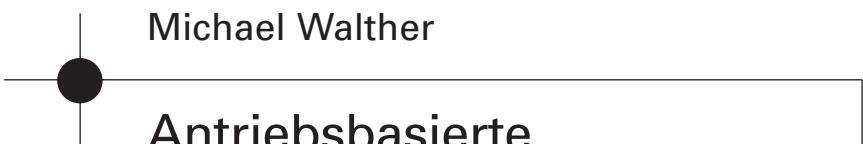
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. A. Verl



Institut für Steuerungstechnik  
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen



Michael Walther



A decorative graphic element consisting of a horizontal line with a black circle at its left end, intersected by two thin vertical lines.

# Antriebsbasierte Zustandsdiagnose von Vorschubantrieben

Nr. 183

**JOST-JETTER VERLAG**  
Fachverlag · 71296 Heimsheim

D 93

ISBN 978-3-939890-77-5  
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. Zu widerhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2011.

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 des Herausgebers**

In der Reihe „ISW/IPA Forschung und Praxis“ wird fortlaufend über Forschungsergebnisse des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart (ISW) und des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) berichtet. Die Institute stehen unter gemeinsamer Leitung von Professor Alexander Verl und beschäftigen sich sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch im Bereich der angewandten Forschung mit der Weiterentwicklung und Optimierung der Automatisierung in der Produktionstechnik. Fraunhofer IPA und ISW repräsentieren Deutschlands größte Forschungseinrichtung im Bereich der Produktionsautomatisierung.

Besonderes Augenmerk wird auf die Systeme Werkzeugmaschine und Roboter gelegt. Die Arbeiten des ISW konzentrieren sich im Besonderen auf die Bereiche Numerische Steuerungstechnik, Bewegungssteuerung, Planungs- und Leitsysteme, Softwaretechnik, Simulationstechnik und Antriebstechnik. Am Fraunhofer IPA konzentriert man sich im Bereich der Automatisierungstechnik auf die Themen: Servicerobotik, Industrierobotik, Montageautomatisierung, Orthopädisysteme, Prozessautomatisierung (insbesondere im Life Science Bereich), Messtechnik, Prüftechnik, Bildverarbeitung sowie die Automatisierung in der Reinst- und Mikroproduktion. Dabei stehen Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Entwicklung in einem stetigen Austausch, wodurch ein ständiger Technologietransfer zur Praxis sichergestellt wird.

Die Buchreihe erscheint in zwangloser Folge und stützt sich auf Berichte über abgeschlossene Forschungsarbeiten und Dissertationen. Sie soll dem Ingenieur bei der Weiterbildung dienen und ihm Hilfestellungen zur Lösung spezifischer Probleme geben. Für den Studierenden bietet sie eine Möglichkeit zur Wissensvertiefung. Sie bleibt damit unter erweitertem Namen und in der inzwischen dritten Generation in der bewährten Konzeption, die ihr die Vorgänger am ISW, Professor Gottfried Stute (1972 - 1982) und Professor Günter Pritschow (1984 - 2005), gegeben haben.

Der vorliegende Band beschäftigt sich mit der prinzipiellen Eignung und Nutzung von antriebsinternen Signalen zur Zustandsdiagnose eines Antriebsstranges mit Kugelgewindetrieb. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Früherkennung von Abweichungen des Normverhaltens einer Werkzeugmaschine automatisiert durchzuführen. Eine rein augenscheinliche Erfassung und Bewertung des Zustandes entspricht nicht den gestellten Anforderungen. Es erfolgt sowohl eine theoretische Beschreibung der Grundlagen für Diagnosemethoden nach dem Ursache-Wirkungsprinzip als auch der Nachweis der neuen Methoden im Experiment. Es wird ein direkter Zusammenhang zwischen einem sich verschlechternden Zustand des Wälzkontaktes und erhöhtem Schwingungsverhalten aufgezeigt. Das Ziel der Arbeit wird mit der Kenngröße Schwingungsenergie erreicht.

Der Herausgeber dankt der Druckerei für die drucktechnische Betreuung und dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme der Reihe in sein Lieferprogramm.

A. Verl



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Verl gilt mein besonderer Dank für seine Unterstützung, die wissenschaftlichen Anregungen und die gewährten Freiräume, sowie für die Übernahme des Hauptberichtes.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr. h. c. mult. U. Heisel danke ich herzlich für die Erstellung des Mitberichtes.

Weitere wertvolle Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit haben der Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken mit seiner Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik e.V., durch seinen Arbeitskreis „Steuerungs- und Systemtechnik“ (AK II) und die Forschergruppe FOR 639 der Deutschen Forschungsgemeinschaft beigetragen. Ich möchte mich bei allen Beteiligten dafür bedanken.

Ein herzliches Dankeschön sage ich hiermit auch allen Mitarbeitern des Instituts, die mich bei meiner wissenschaftlichen Tätigkeit begleitet und unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr.-Ing. P. Pruscheck, Dipl.-Ing. A. Dietmair, Dipl.-Phys. A. Huf und Dipl.-Ing. D. Maier für die Durchsicht meiner Arbeit und die fachlichen Kommentare. Darüber hinaus haben mir Diskussionen mit meinem Kollegen Dipl.-Ing. A. Hafla Denkanstösse gegeben, die über das Fachliche hinausgingen.

Last but not least bedanke ich mich sehr herzlich bei meiner Frau Anna, meinem Sohn Lars und meiner ganzen Familie, dass sie mich immer motiviert haben.

Stuttgart, im Mai 2011  
Michael Walther

Für Anna

## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>13</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>14</b>
<b>Abstract</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>16</b>
1.1 Anforderungen und Ziele	19
1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	21
<b>2 Begriffe, Grundlagen und Systematisierung der Diagnose</b>	<b>25</b>
2.1 Transfer in den Bereich der Werkzeugmaschinen mit Fokus auf den Antriebsstrang	28
2.2 Arten der Diagnose an Werkzeugmaschinen	30
2.2.1 Beobachtungen durch den Maschinennutzer	31
2.2.2 Messmittel / Prüfverfahren	31
2.2.3 Prüfwerkstück	31
2.2.4 Zusätzliche Sensorik	32
2.2.5 Antriebsbasierte Diagnose	32
2.2.5.1 Modellbasierte Diagnose	33
2.2.5.2 Signalanalytische Diagnose	35
2.3 Weitere Unterscheidungsmerkmale der Diagnose	36
2.3.1 Online und Offline-Verfahren	36
2.3.2 Bereiche der Diagnosemethoden	36
2.4 Prinzipielle Bewertung der Diagnosemethoden	36
<b>3 Stand der Technik und Forschung</b>	<b>39</b>
3.1 Beobachtungen durch den Maschinennutzer	39
3.2 Messmittel / Prüfverfahren	40
3.2.1 Statische mechanische Beurteilung mit Messmitteln	40
3.2.2 Dynamische mechanische Beurteilung mit Messmitteln	41
3.2.3 Kreisformtest mit Messmitteln	41
3.2.4 Prüfverfahren	42

3.3	Prüfwerkstück	42
3.4	Zusätzliche Sensorik	44
3.5	Antriebsbasierte Diagnose	46
3.5.1	Reglerselbststeinstellung / Frequenzgang der Mechanik	47
3.5.2	Oszilloskop oder Trace-Funktionen	48
3.5.3	Antriebs-SPS	48
3.5.4	Integrated Monitoring and Diagnostics für Sinumerik	49
3.5.5	Productivity Agent im IndraDrive-System	50
3.5.5.1	Signalbasierte Mechanikanalyse	50
3.5.5.2	Frequenzgangmessung und -analyse	51
3.5.5.3	Signalbasierte Hüllkurvenüberwachung	52
3.5.6	Die Möglichkeiten des ePS Systems	53
3.5.6.1	Universalachstest	54
3.5.6.2	Gleichlauftest	55
3.5.6.3	Kreisformtest	58
3.6	Fazit und Bewertung des Standes der Technik	60
3.7	Stand der Forschung im Bereich antriebsbasierte Maschinendiagnose	62
3.7.1	Wissenschaftliche Monographien	63
3.7.2	Forschungsprojekte	66
3.7.2.1	FWF Forschungsvorhaben „Maschinen- und Prozessdiagnose I-IV“	67
3.7.2.2	DFG Forschergruppe 639 „Gezielte vorbeugende Wartung durch automatisierte Zustandsbeobachtung“	67
3.7.2.3	BMBF „Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung“	68
3.8	Fazit und Bewertung des Standes der Forschung	72
<b>4</b>	<b>Diagnostik für antriebsinterne Signale</b>	<b>73</b>
4.1	Grundlagen	74
4.1.1	Mögliche Signalquellen für die Diagnose	74
4.1.2	Signalflussplan zwischen Schadensort und Signalerfassung	75
4.1.3	Ursache-Wirkungsprinzip	77
4.1.4	Ableitung künstlicher Schadenszenarien	79
4.2	Unterscheidungsmerkmale der Phänomene	79
4.2.1	Schadensbedingte Phänomene	80
4.2.2	Betriebsbedingte Phänomene	81
4.3	Nachweis der Schadensphänomene in Antriebssignalen	83
4.3.1	Wälzlager an einer Index V100 Achse	84

4.3.1.1 Ursache-Wirkbeziehung für das axiale Wälzlager	84
4.3.1.2 Ergebnis	88
4.3.1.3 Bestätigung der Ergebnisse an einem speziellen Lagerprüfstand	89
4.3.2 Nachweis der Schadensphänomene am KGT	92
4.3.2.1 Ursache-Wirkbeziehung für Fremdkörper im KGT	92
4.3.2.2 Ergebnis	94
4.3.2.3 Bestätigung der Ergebnisse an einem speziellen KGT-Prüfstand	97
4.3.3 Berechnung einer charakteristischen Frequenz eines KGT	99
4.3.4 Fazit	103
4.4 Analyse und Kategorisierung der Phänomenursachen	104
4.4.1 Ursachen der Verschleiß- und Schadensentstehung	104
4.4.2 Schadensarten	108
4.4.2.1 Periodische Schadensart	109
4.4.2.2 Nicht-periodische Schadensart	110
4.4.3 Ableitung von Schadensphänomenen aus dem Schadensverlauf	111
4.5 Zusammenfassung	114
<b>5 Kenngröße aus Phänomenen in antriebsinternen Signalen</b>	<b>115</b>
5.1 Kenngröße Schwingungsenergie	118
5.1.1 Erster Ansatz und detaillierter Algorithmus	121
5.1.2 Spezieller Ansatz	123
5.1.3 Komponentenspezifischer Ansatz	125
5.2 Ergebnisse der Kenngröße Schwingungsenergie	125
5.3 Fazit zur Kenngröße Schwingungsenergie	127
<b>6 Prototypische Umsetzung</b>	<b>129</b>
6.1 Datenverarbeitung	130
6.2 Architekturspezifische Umsetzung für Siemens (840D)	131
6.3 Architekturspezifische Umsetzung für Rexroth (MTX)	133
6.4 Fazit zur prototypischen Umsetzung	135
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
<b>Literatur</b>	<b>140</b>
<b>A Anhang</b>	<b>160</b>

A.1	Prinzipieller Aufbau aller Versuchsstände	160
A.2	Versuchsstand Index V100 Achse	162
A.3	Versuchsstand vertikale Schütté Achse	163

## Formelzeichen

$a$	Beschleunigung	$U$	Spannung
$C_{dyn}$	Dynamische Tragzahl	$v$	Geschwindigkeit
$d$	Dämpfung	$x$	a) Gemessene Ist-Lage, Position b) Eingang
$D$	Durchmesser	$\dot{x}$	Gemessene Ist-Geschwindigkeit
$D_w$	Nenndurchmesser der Kugel	$\ddot{x}$	Gemessene Ist-Beschleunigung
$D_{pw}$	Kugelmittelpunktdurchmesser	$X$	Laplace-Transformierter Eingang
$D_T$	Rollkreisdurchmesser	$x_{Soll}$	Soll-Lage
$E$	Energie	$\dot{x}_{Soll}$	Soll-Geschwindigkeit
$E_{Kin}$	Kinetische Energie	$\ddot{x}_{Soll}$	Soll-Beschleunigung
$E_{Pot}$	Potentielle Energie	$\ddot{x}_{Soll}$	Soll-Ruck
$E_{Reib}$	Reibenergie	$y$	Ausgang
$f$	Frequenz	$Y$	Laplace-Transformierter Ausgang
$F_n$	Normalkraft	$Z$	Anzahl der Wälzkörper
$g$	Schwerebeschleunigung		
$G$	Übertragungsfunktion		
$i$	gemessener Motorstrom / Motormoment		
$i_{Soll}$	Soll-Motormoment als Ausgang des Drehzahlreglers	$\alpha$	Druckwinkel zwischen Wälzkörper und Wälzbahn
$I$	Strom	$\beta$	Abstandswinkel zwischen zwei Wälzkörpern
$J$	Massenträgheit	$\vartheta$	Temperaturkoeffizient
$k$	Federkonstant	$\mu_R$	Reibungskoeffizient
$M$	Äquivalente Masse	$\varphi$	Winkel
$P$	Leistung	$\omega$	Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz, Winkelfrequenz
$P_{rel}$	Kenngröße Schwingungsenergie	$\omega_{Soll}$	Soll-Winkelgeschwindigkeit als Ausgang des Lagerreglers
$P_h$	Steigung des Kugelgewindetriebs	$\dot{\varphi}$	Winkelbeschleunigung
$Q$	Wärme, Wärmemenge		
$\dot{Q}$	Wärmefluss		
$r$	Radius		
$s$	komplexe Frequenz		
$S_{xx}$	Autokorrelation		
$t$	Zeit		

## Abkürzungen

ACX	Herstellerspezifische Abwandlung des XML-Formates
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
(C)NC	(Computerized) Numerical Control, (computerisierte) numerische Steuerung
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
ERP	Enterprise Resource Planning System, Planung des Einsatzes / der Verwendung der Unternehmensressourcen
FFT	Fast Fourier-Transformation
FWF	Forschungsvereinigung Werkzeugmaschinen
GLT	Gleichlauftest
H-FFT	Hilbert Fast Fourier-Transformation
HMI	Human-Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle
IMD	Integrated Monitoring and Diagnostics
IPO	Interpolationstakt
ISW	Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
IT	Informationstechnik
KFT	Kreisformtest
KGT	Kugelgewindetrieb
MDE/BDE	Maschinen- / Betriebs-Daten-Erfassung Anbindung
NCK	Numerik Control Kernel
NFS	Network File System, ein Netzwerkprotokoll
PA	Productivity Agent
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller, Speicherprogrammierbare Steuerung
RMS	Root Mean Square, Effektivwert
SERCOS	SErial Realtime COmmunication System, ein Antriebsbusprotokoll
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol, ein Netzwerkprotokoll.
VDW	Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.
WZM	Werkzeugmaschinen
XML	Extensible Markup Language

## Abstract

The main aim of further developing machine tools is the improvement of accuracy and reducing the consumption of resources. Maintenance resources and system downtimes have a major impact on the total cost of the equipment. In order to be competitive, it is necessary to reduce the system downtime by applying sensorless automated condition monitoring (SACM). An effective and low-cost condition monitoring can be realized by avoiding additional sensors. The principal purpose is to accomplish an early recognition brought about by deviations of the normal action of a machine tool. Merely taking a look at the apparent conditions of the components does not meet the requirements. The feed drive examined is based on the typical mechanical structures in the machine tool.

This thesis provides an outline on SACM-algorithms based only on signals which are available in position-controlled feed drives such as position, speed and motor current. The cause-and-effect principle is used to link phenomena in the available signals with defective changes in the mechanics. The theoretical considerations and derivations that are shown, are used for the interpretation and analysis of experiments which were performed. Phenomena in the drive signals were caused by intentionally provoking various damages. A causal connection between phenomena and damage is demonstrated by these experiments. This interconnection is in turn examined and substantiated by the cause-and-effect principle. It was achieved to set up a generally accepted categorization of the causes of the phenomena in the form damage process and damage types. The damage types can be classified by their effects and phenomena in drive signals. They are divided into periodical and non-periodical damages. Due to the analyses made, it is possible to hold as a principle:

The condition of the feed drive can be determined and explained by the spectral composition of the transmitted power. There is a direct correlation between a deteriorating condition of the feed drive and increasing vibrations. Once the damage has approached the final stage, the mechanical transmission behavior is massively changed by increasing vibration. Furthermore, it was possible to exactly assign to a cause of damage those individual frequencies in the spectrum of oscillations which were sustained by damage.

With the findings thus gained, it is possible to describe the condition of a feed drive. The results are abstracted to a scalar parameter. With the established “vibration energy parameter”, an automated condition monitoring function for a single feed drive is provided.

## 1 Einleitung

Der technische Fortschritt an Werkzeugmaschinen (WZM) muss sich immer an zwei Merkmalen messen lassen: Zum einen an der erreichbaren Steigerung des Bearbeitungsergebnisses zum anderen an der stetigen Reduktion der für diese Bearbeitung notwendigen Ressourcen. Getrieben wird diese Entwicklung von der aus ihr resultierenden und mit ihr verbundenen Wirtschaftlichkeit.

Für beide Fälle wird ständig steigenden Forderungen hinsichtlich Bearbeitungsgenauigkeit und -geschwindigkeit von Werkzeugmaschinen immer erfolgreicher nachgekommen /1/. Mit dem damit verbundenen und gewünschten Anstieg der Produktivität steigt jedoch auch das wirtschaftliche Risiko, dass bei plötzlichem und unerwartetem Produktionsausfall oder bei nicht tolerablem Qualitätsverlust enorme Kosten verursacht werden /2/.

Durch die zunehmende Flexibilität von Fertigungseinrichtungen wird es bei einem planbaren Ausfall einer Werkzeugmaschine in der Produktion zunehmend einfacher, die Produktion passend umzuorganisieren, um den Verpflichtungen als Lieferant nachzukommen. Die bei der ersten Inbetriebnahme der Werkzeugmaschine üblichen Verfahren und Messmethoden /3/ könnten sich als hilfreich erweisen, laufend den Zustand der Antriebsachsen zu erfassen. Jedoch ist der hierfür betriebene zeitliche und gerätetechnische Aufwand in der laufenden Produktion meist nicht rechtfertigbar. Eine effektive Maschinendiagnose kann hier die Basis zur Abschätzung der verbleibenden Lebenserwartung von Maschinen und Komponenten aufbauen und damit die Kosten durch unvorhersehbare Produktionsausfälle minimieren /4/.

Daneben wird das Fertigungsergebnis auch schon vor einem Ausfall durch Maschinenparameter, die direkt oder indirekt vom Verschleißzustand einzelner Maschinenkomponenten abhängig sind, beeinflusst. Um eine optimale Prozesseistung sicherzustellen und gegebenenfalls die Prozessparameter anzupassen, sind somit über Diagnoseverfahren gewonnene Kenntnisse über den aktuellen Maschinenzustand unentbehrlich.

Der Informationsgewinn durch Arbeiten auf dem Gebiet der Maschinendiagnose trägt weiterhin zu einem vertieften Verständnis von kausalen Zusammenhängen im Verhalten der Werkzeugmaschine bei und ist somit von zentraler Bedeutung für den technologischen Fortschritt.

Es soll ein vordringliches Ziel der Forschung auf dem Gebiet der Maschinendiagnose sein, die in einer Werkzeugmaschine ohnehin anfallenden Signale für Diagnosezwecke zu erschließen /5/. Der ohne zusätzliche Sensoren auskommenden antriebsbasierten Maschinendiagnose stehen also nur indirekte und kombinatorische Messverfahren zur Verfügung /6/.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen verschiedene Methoden zur Zustandsbeschreibung eines mechanischen Antriebsstranges innerhalb einer Werkzeugmaschine im Sinne einer zustandsorientierten Instandhaltung /7, 8/ untersucht werden. Im Fokus stehen die Komponenten eines Antriebsstranges mit Wälzkontakt. Hierbei handelt es sich um die in Bild 1-1 dargestellte Linear- und Rotationstechnik mit Wälzkontakt des Antriebsstranges.

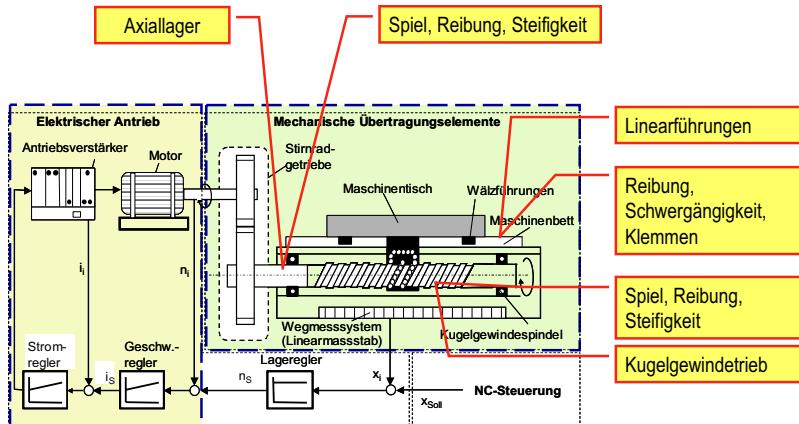


Bild 1-1: Betrachtete Komponenten und typische Schadensauswirkungen im Antriebsstrang (nach /9/)

Die Begriffe im Umfeld einer NC bzw. CNC-Steuerung sind wie in Bild 1-1 dargestellt durch die in /10/ bzw. /11/ getroffenen Definitionen und Beschreibungen ausführlich erklärt. Daraus ist ebenfalls der übliche Aufbau der Reglerkaskade für den Antriebsstrang ersichtlich. Der betrachtete Antriebsstrang orientiert sich an dem in /12/ beschriebenen Aufbau und an den Eigenschaften einer Antriebsachse für Vorschubbewegungen innerhalb einer Werkzeugmaschine. Als zentrales mechanisches Vorschubbewegungselement wird der Kugelgewindetrieb (KGT) oder auch

Gewindespindel-Mutter-Trieb /13/ genutzt. Dieser erfüllt in idealer Weise die an ein solches mechanisches Übertragungselement gestellten Anforderungen /12/:

- hohe geometrische und kinematische Genauigkeit
- hohe Steifigkeit und Spielfreiheit
- hohe erste mechanische Resonanz- oder Eigenfrequenz
- geringe Massenträgheitsmomente und Massen der zu bewegenden Maschinenbauteile
- ausreichend Dämpfung
- niedrige Reibung und lineares Übertragungsverhalten

Aus diesen Anforderungen lassen sich die in Bild 1-1 aufgeführten Schadensauswirkungen wie Spiel, Reibung, Schwergängigkeit, Klemmen und der Verlust von Steifigkeit ableiten.

Gelingt es, nicht nur eine automatisierte Fehlererkennung nach Auftreten eines Maschinenstillstandes zu realisieren, sondern darüber hinaus eine Früherkennung von Abweichungen vom Normverhalten einer Maschine durchzuführen, ist dies von großem wirtschaftlichen Nutzen /14/. Das fehlerhafte Bauteil durch einen zuverlässigen Algorithmus zu benennen, kann einen unerwarteten Maschinenstillstand und den damit verbundenen Produktionsausfall durch eine zustandsabhängige Wartung vermeiden. Bei der Entwicklung von Maschinendiagnosefunktionen, die antriebsinterne Signale nutzen, ist auf die von der kommerziell erhältlichen Steuerungs- und Umrichtertechnik gesetzten Grenzen zu achten. Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Kenngröße Schwingungsenergie gibt es eine zuverlässige Methode. Für einen soliden Serieneinsatz bedarf es jedoch einer Parametrierung und Abstimmung spezifisch zu jeder Baureihe. Für die Umsetzung empfiehlt sich daher in einem ersten Schritt die Unterstützung mit Analysefunktionen, die über Eingabemasken für Parameter, Speicherungsfunktion und Werkzeuge, wie z.B. die Darstellung des aktuellen Trendverlaufes der Kenngrößen, verfügen.

Mit derartigen Hilfsmitteln ist es möglich, jederzeit den Maschinenzustand zu überprüfen und das gewonnene Wissen über sich anbahnende Schäden rechtzeitig in die Wartungsplanung und die Instandhaltung /15/ einfließen zu lassen.

## 1.1 Anforderungen und Ziele

Die Formulierung der Anforderungen an die Diagnose ist maßgeblich bestimmt durch die Überwachbarkeit /16/ ihrer Ergebnisse. Eine rein augenscheinliche Erfassung und Bewertung des Zustandes der Komponenten über beispielsweise ein Bild reicht nicht aus. Die Entscheidungsgrundlage für eine Produktionsdrosselung oder gar Unterbrechung muss fundiert und fehlerfrei sein. An jede Art der zuverlässigen Maschinen-diagnose werden somit folgende Anforderungen /17/ gestellt:

- **Vermeiden von zusätzlicher Sensorik**

Ziel ist es, nicht nur die Kosten für den Einsatz von zusätzlicher Sensorik zu sparen, sondern auch weitere mögliche Fehlerquellen auszuschließen.

- **Quantifizierbare, automatisch überwachbare Diagnoseergebnisse**

Die durch einen Schaden verursachte Veränderung im Verhalten des Antriebsstranges muss durch eine Zahl ausgedrückt werden. Es muss möglich sein, zumindest einen relativen Grenzwert festlegen zu können.

- **Eindeutigkeit der Diagnoseergebnisse**

Das Ergebnis muss kausal mit einem Schadensfall zusammenhängen, es darf nicht durch andere Einflüsse verfälscht werden. Dies ist durch die Detektion von nur schadensbedingten Vorgängen möglich. Einflüsse, die durch den ordnungsgemäßen Betrieb und den Prozess verursacht werden, sollen ausgeblendet werden.

- **Kein Expertendilemma /18/**

Der Ansatz nach dem Ursache-Wirkungsprinzip verwendet sehr häufig die Abduktion, um auf den Schaden als Ursache zu schließen. Ob die erklärende und plausibelste Hypothese wirklich und eindeutig zutrifft, muss hinreichend gesichert sein. Hier kann ein mehrstufiges oder paralleles Verfahren Abhilfe schaffen. Es ist jedoch häufig ausreichend festzustellen, in welchem Antriebsstrang ein Schaden vorliegt. Des Weiteren sollen mögliche Einflüsse durch sich selbst erfüllende Vorhersagen von Experten vermieden werden.

- **Integration in bestehende Steuerungssysteme**

Um ein möglichst breites Einsatzgebiet zu erschließen, sollten die Diagnosemethoden auf der aktuellen Steuerungsgeneration einsetzbar sein. Der geräte-technische Aufwand für die Inbetriebnahme soll minimiert werden.

Aus dem Schlagwort **Maschinendiagnose** oder **Condition Monitoring** ist der meist vermischt gesehene Vorgang der Prognose der zu erwartenden Restlebensdauer und als die dafür notwendige Basis die Diagnose oder bewertende Zustandsbeschreibung herauszutrennen. Die zu erwartende Restlebensdauer drückt den vorhandenen Abnutzungsvorrat aus (Abnutzungsprognose).

Der Fokus dieser Arbeit ist hauptsächlich auf die **Diagnose** gelegt, nicht auf die **Prognose**. Ziel ist es, eine Schädigung so früh wie möglich zu erkennen und in Form einer Zahl zusammenzufassen. Hierbei sind unterschiedliche Detaillierungsgrade über die Schadensart und den Schadensort möglich. Somit sind die Grundlagen für eine Prognose in Form einer Restlebensdauerabschätzung gelegt. Der in der Prognose dominierende Aspekt ist das noch zu erwartende, reale Belastungskollektiv, denn die Geschwindigkeit des Schadensfortschrittes hängt direkt von dem zukünftigen Belastungskollektiv ab. Wie in Bild 1-2 dargestellt, greifen Prognose und Diagnose auf die gleiche Datenbasis zu.

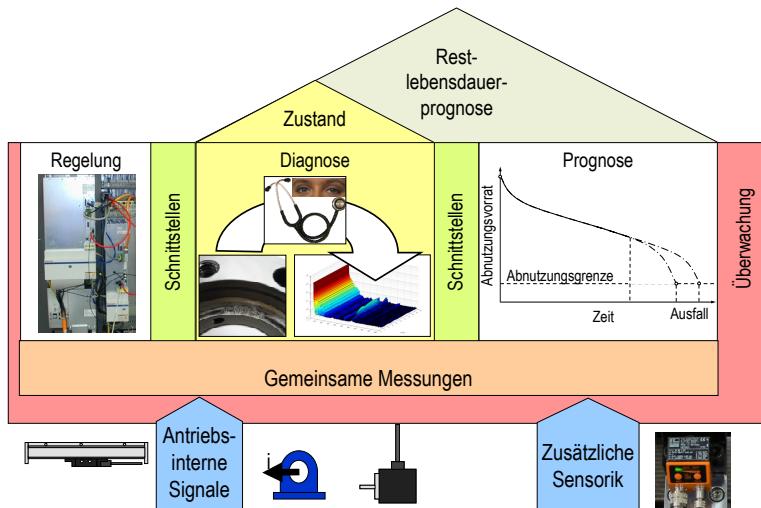


Bild 1-2: Gemeinsame Datenbasis von Diagnose und Prognose

Die zu untersuchenden Komponenten haben sich aus Befragungen zu den im alltäglichen Betrieb vorkommenden Ausfällen /19, 20, 21/ bei mehreren WZM-

Herstellern ergeben. Als ein Schwerpunkt und aussichtsreich für eine Senkung der Ausfallhäufigkeit der Werkzeugmaschine haben sich die mechanischen Komponenten mit Wälzkontakt im Antriebsstrang herausgestellt (siehe Bild 1-3).

- Achsen
  - rotatorische Achsen
    - ...
  - lineare Achsen
    - Führungen
    - KGT
    - Motor
    - ...
- Elektrik / Elektronik
  - ...
- Fluidik
  - Hydraulik
  - Kühl- und Schmiermittel
- Werkzeugsystem / Spindel
  - ...

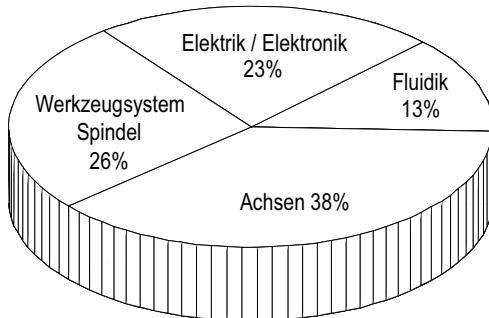


Bild 1-3: Struktur der an der WZM untersuchten Komponenten (links) und deren Ausfallhäufigkeit (rechts) nach /19/

Nicht Teil dieser Arbeit ist ein Achsverbund. Das Trennen der möglichen Einflüsse von mehreren Antriebssträngen beispielsweise durch ein Übersprechen oder einen direkten Einfluss wird nicht durchgeführt. Effekte, die durch die Kopplung von Achsen möglich sind, werden erwähnt, aber nicht weiter vertieft oder genutzt. Es bedarf zunächst der Grundlagen und Lösungsansätze für einen einzelnen Antriebsstrang, um möglicherweise in weiterführenden Arbeiten den Achsverbund zu betrachten.

## 1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit stellt bestehende Methoden und Algorithmen für die Diagnose an Werkzeugmaschinen vor. Sie befasst sich vor allem mit der Erklärung von Phänomenen in antriebsinternen Signalen, die durch schadhafte Veränderungen am Antriebsstrang verursacht werden. Mit der so neu gewonnenen Erkenntnis ist es möglich, den Zustand des Antriebsstranges zu beschreiben. Die Ergebnisse werden zu einer allgemeingültigen Kenngröße abstrahiert.

Zu Beginn der Arbeit (Kapitel 2) werden zunächst das Gebiet der technischen Diagnose allgemein beschrieben und die meist unterschiedlich genutzten Begriffe definiert, um die Grundlagen in Form einer Klassifizierung der Begriffe für die weitere Arbeit zu legen. Dabei kann nicht auf etablierte Begriffsdefinitionen zurückgegriffen werden. Aus den allgemeinen Definitionen erfolgt ein Übertrag speziell auf die Werkzeugmaschine. Nach der Abgrenzung des thematischen Rahmens werden generell gültige Methoden erläutert. Einen Überblick geben die in Bild 1-4 fett markierten fünf Hauptarten. Eine Beschreibung und Bewertung der Eigenschaften der vorgestellten Diagnosemethoden runden diesen Abschnitt ab.

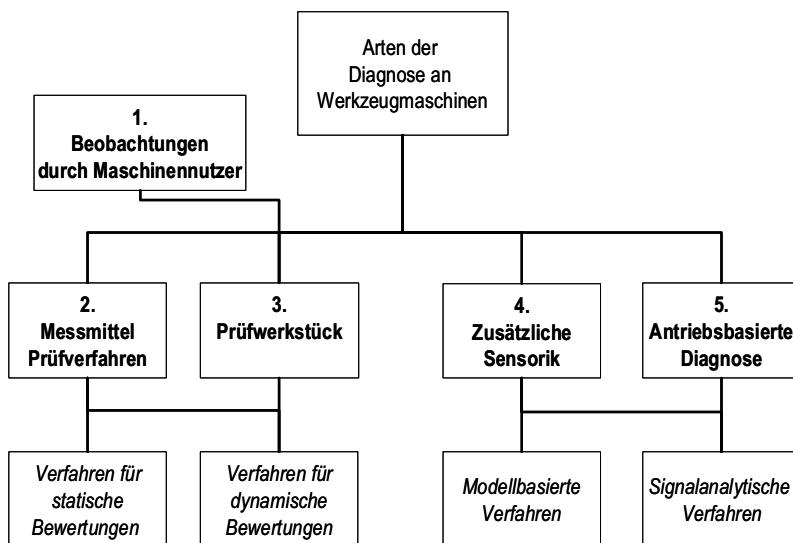


Bild 1-4: Überblick der Diagnosearten und -verfahren im Bereich der Werkzeugmaschine nach /22/

Mit dem Stand der Technik und Forschung in Kapitel 3 wird auf die auf bislang üblichen Diagnosemethoden, wie in Bild 1-4 kursiv dargestellt, eingegangen. Dies erfolgt mit dem Ziel, zunächst einen allgemeinen Überblick zu verschaffen. Dies ist notwendig, um die später in Kapitel 4 getroffenen und hergeleiteten Erkenntnisse in den passenden Kontext zu stellen. Der über die ersten vier Arten aus Bild 1-4 gegebene Überblick erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll die für die weitere Arbeit

relevanten Schwerpunkte beleuchten. Der Abschnitt 3.5 ist dem Stand der Technik der antriebsbasierten Diagnose in Steuerungen von Werkzeugmaschinen gewidmet. Die existierenden technischen Lösungen, an denen sich neue Ansätze messen lassen müssen, werden vorgestellt. Die Anforderungen an eine technische Realisierung der entwickelten Methoden sind ebenfalls aus diesem Kapitel zu entnehmen. Mit einer umfassenden Bewertung des gesamten Standes der Technik für die weitere Arbeit schließt dieser Abschnitt ab.

Die aus der Forschung bekannten Erkenntnisse und Richtungen der Fortschritte werden in Abschnitt 3.7 beschrieben. Um die Gefahr einer zu starken Fokussierung und das damit verbundene Ausblenden von wichtigen Arbeiten zu vermeiden, werden die Auswahlkriterien nicht eng ausgelegt. Der so erreichte Überblick soll richtungsweisend für die Forschungslandschaft sein und die mit dieser Arbeit noch zu schließende Lücke aufzeigen.

Der darauf folgende Hauptteil der Arbeit konzentriert sich auf die Beschreibung von schadensbedingten Phänomenen und der damit verbundenen Herleitung der Methoden zur Diagnose (Kapitel 4). Für eine automatisch auswertbare Diagnose werden numerische Kenngrößen vorgestellt. Es können sowohl der Verlauf der Kenngröße als auch der absolute Wert für die dann zu treffende Diagnose entscheidend sein.

Zunächst bauen die theoretischen Untersuchungen der Diagnostik auf der Analyse von Experimenten auf. Im Vorfeld der experimentellen Untersuchungen werden die zur Auswertung notwendigen Annahmen beschrieben. Durch ein gezieltes Provozieren von Schäden sollen Phänomene in den antriebsinternen Signalen verursacht werden. Dieses Vorgehen hat das Ziel, einen kausalen Zusammenhang zwischen Phänomenen und Schäden nachzuweisen. Diese Abhängigkeit wird als Ursache-Wirkungsprinzip eingeführt. Der Nachweis dieser Thesen wird erfolgreich in unterschiedlichen Versuchen geführt. Aus den so gewonnenen und bestätigten Erkenntnissen erfolgt dann ein synthetisches Beschreiben der Vorgänge, die einen Schaden als Ursache haben. Es gelingt eine allgemein gültige Kategorisierung der Phänomenursachen aufzustellen. Durch die vorgestellte Systematik können die Auswirkungen von Schäden in einem Grundsatz festgehalten werden.

Das Hauptziel der Arbeit wird in Kapitel 5 erreicht, nämlich aus den vorangegangenen Feststellungen eine Kenngröße zur Erfassung des aktuellen Zustandes des Antriebsstranges aufzustellen. Eine detaillierte Beschreibung der hierfür notwendigen Schluss-

folgerungen erfolgt aus den in den vorausgegangenen Kapiteln gewonnenen Erkenntnissen. Die Herleitung des Algorithmus zur Berechnung der Kenngröße ist wesentlicher Bestandteil der Arbeit. Die Vorteile und Einsatzmöglichkeiten der Kenngröße Schwingungsenergie werden deutlich gemacht.

Im letzten praktischen Teil der Arbeit wird in Kapitel 6 die für eine Etablierung der Kenngröße Schwingungsenergie notwendige Umsetzung in die kommerziell erhältlichen Steuerungssysteme beschrieben. Die Arbeit schließt mit der in Kapitel 7 vorgenommenen Zusammenfassung des erreichten Fortschrittes und einem Ausblick.

## 2 Begriffe, Grundlagen und Systematisierung der Diagnose

Aus den widersprüchlichen Begrifflichkeiten im Rahmen der unterschiedlichen wissenschaftlichen und kommerziellen Arbeiten im Themengebiet Diagnose an Werkzeugmaschinen ergibt sich die Notwendigkeit einer genauen Skizze und Definition des gesamten Gebietes. Eine einheitliche oder etablierte Systematik und Klassifikation existiert nicht. Durch ein systematisches Vorgehen soll für die weitere Arbeit eine einheitliche Bewertung ermöglicht werden. Die so gelegten Grundlagen werden im weiteren Verlauf der Arbeit erweitert und ergänzt.

Eine Vermischung von Prozess- und Maschinendiagnose ist häufig anzutreffen. Prinzipiell sind beide Diagnosegebiete eng miteinander verwandt /23/, der Bearbeitungsprozess an sich ist jedoch kein Gegenstand dieser Arbeit. Nach den grundlegenden Definitionen müssen die Begrifflichkeiten der Maschinendiagnose in den fertigungs-technischen Kontext eingebunden werden.

Die in der DIN 31051 /24/ enthaltenen Definitionen der Grundlagen der Instandhaltung werden im Weiteren als Richtschnur verwendet.

Als **Fehler** wird der Zustand einer Komponente angesehen, 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. Mit Erreichen des irreversiblen Fehlerzustandes geht das **Lebensdauerende** einher.

Als **Schaden** wird jede Verletzung der Oberfläche und jede Veränderung der vorgegebenen Geometrie angesehen. Die DIN 31051 enthält den Begriff „Schaden“ nicht mehr. Er wurde durch den Begriff „**Abnutzungsgrenze**“ ersetzt. Die Änderung der Definition trägt dem Umstand Rechnung, dass die festgelegte Grenze des Abnutzungsvorrates nicht mehr unbedingt mit einer unzulässigen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit verbunden sein muss.

**Verschleiß** ist ein Schädigungsvorgang, der einen Fehler der Komponente zur Folge hat. Veranlasst wird der Verschleiß hauptsächlich durch eine **Last** verursachende Bewegung. Des Weiteren kann Verschleiß auf Grund einer durch äußere Bedingungen, wie Überlast oder Umwelteinflüsse, entstandenen Schädigung auftreten. Somit ist Verschleiß ein fort-schreitender Prozess, der mit der Inbetriebnahme anfängt und mit dem Ausfall (bzw. Fehler) endet.

Die **Überwachung** an Maschinen wurde bereits mit den Dampfmaschinen eingeführt, um unmittelbare Gefahren von Mensch und Maschine abzuwenden und ist heute insbesondere in der Fertigung als Stand der Technik anzusehen. Sie basiert in der Regel auf der Prüfung einer Größe auf einen Grenzwert und verfügt meist über eine direkte und schnelle Eingriffsmöglichkeit in das Maschinenverhalten. So wird zum Beispiel ein Not-Aus ausgelöst, sobald die Amplitude der Spursignale eines Sinus- / Cosinus Geber-signals einen kritischen Wert unter- oder überschreitet.

Daneben sind verhindernde und warnende Überwachungseinrichtungen verbreitet. Maschinenüberwachung ist das Überprüfen von harten, diskreten Bedingungen, die sich innerhalb eines Maschinenlebens nicht verändern. Falls diese Bedingungen verletzt werden, erfolgt eine direkte und unmittelbare Reaktion. Die möglichen Reaktionen umfassen dabei das Spektrum von einem Hinweis oder einer Warnung an den Maschinennutzer bis zu dem unmittelbaren Einnehmen eines sicheren Zustandes. Hierbei kommt es nicht auf Tendenzen und langwierige Entwicklungen an, sondern es wird binär entschieden. Die Überwachungsgrenzen sind zeitinvariant und fast immer unabhängig vom Betriebszustand der Maschine.

Die **Diagnose** ist gegenüber der Überwachung als komplexer und umfassender anzusehen und wird wie folgt allgemein definiert:

*Diagnose (griechisch: „unterscheidende Beurteilung, Erkenntnis“) ist das Feststellen, Prüfen und Klassifizieren von Merkmalen mit dem Ziel der Einordnung zur Gewinnung eines Gesamtbildes /25/.*

Am häufigsten wird der Begriff in der Medizin verwendet, wo er die Erkennung einer Krankheit oder Verletzung (Kategorie) aufgrund von Symptomen und / oder Zeichen (Phänomene) bezeichnet. Dabei wendet der Diagnostiker intuitiv oder explizit das Bayes-Theorem an /26/. Die Methoden und das algorithmische Prozedere der Diagnose werden in der Diagnostik (Kapitel 4) zusammengefasst. Die Auswahl von Diagnosen, die zu einem Zeitpunkt möglich sind, bezeichnet man als Differenzialdiagnose. Sie wird durch das diagnostische Vorgehen eingeschränkt, bis eine ausreichende Basis für die Entscheidung über eine Therapie besteht. Die Diagnose kann so als Tätigkeit zur Erkennung, Ortung und Ursachenfeststellung beschrieben werden /24/. Für eine Diagnose wird somit nicht unbedingt nur ein einzelnes Signal bewertet, sondern das Zusammenspiel unterschiedlicher Signalkombinationen, Zustände und Bewertungen.

Das Ergebnis der Diagnose ist eine Zustandsbeschreibung. Um von der Diagnose auf eine Restlebensdauer zu schließen, bedarf es schlussendlich der Prognose.

Die **Prognose** wird folgendermaßen definiert:

*Prognose (griechisch: „das Vorherwissen“) ist eine wissenschaftliche fundierte Voraussage von Entwicklungen, Zuständen oder Ereignissen, die zu einem gegenüber der Äußerung dieser Voraussage späteren Zeitpunkt eintreten /27/.*

Die Basis einer validen Prognose bilden hier das Diagnoseergebnis und der daraus abgeleitete aktuelle Zustand. Auf dieser Grundlage und einer Aussage über die noch zu erwartenden Verschleiß verursachenden Ereignisse können dann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Voraussagen für die Zukunft getroffen werden.

Durch die Beschreibung von **Phänomenen**, die durch einen Schaden oder Verschleiß hervorgerufen werden, ist es möglich, die Ursache frühzeitig zu erkennen.

*Phänomen (griechisch: „das Erscheinende“) ist eine Erscheinung; etwas, das in seiner Erscheinungsform ungewöhnlich ist; auffällig /28/.*

Unter einer **Kenngroße** ist eine meist dimensionslose relative Größe zu verstehen, die zur Beschreibung eines oder mehrerer Parameter des betrachteten Systems dient. Die Kenngroße soll eine Entscheidungsgrundlage für den Maschinenzustand bilden, wobei sie sich an die Dimensionsanalyse anlehnt.

Bei der **Dimensionsanalyse** wird der Zusammenhang von physikalischen Größen bei Phänomenen erfasst. Die bei diesem physikalischen Vorgang zugrunde liegende Formel oder exakte Gesetzmäßigkeit muss nicht explizit bekannt sein. Das hierfür notwendige grobe Systemverständnis wird durch das Ursache-Wirkungs-Prinzip in Kapitel 4 aufgebaut. Somit kann auf eine detaillierte und aufgrund der komplexen Zusammenhänge und Randbedienungen kaum möglichen mathematischen Beschreibung der Vorgänge verzichtet werden.

Unter dem **Ursache-Wirkungs-Prinzip** wird der kausale Zusammenhang zwischen einer Ursache und deren Auswirkung auf ihre Umgebung ausgedrückt. Es handelt sich hierbei um eine eindeutig zuordenbare Information zu einem Verhalten /29/.

## **2.1 Transfer in den Bereich der Werkzeugmaschinen mit Fokus auf den Antriebsstrang**

Auf Werkzeugmaschinen und den Antriebsstrang angewandt, bedeuten die im vorherigen Abschnitt getroffenen Beschreibungen und Definitionen, dass nicht mehr nur unmittelbar vorliegende Maschinensignale auf ihren Momentanwert hin überprüft werden. Aus dem sich verändernden Signalbild einer Maschine und den darin enthaltenen Schadensphänomenen soll auf den Zustand des Antriebsstrangs und der Maschine geschlossen werden. Die Veränderung wird durch einen Vergleich des aktuellen Zustandes mit einem in der Vergangenheit liegenden ermittelt. Dieser Vorgang kann im Kontext des in der DIN 31051 normierten Begriffs der Inspektion gesehen werden. Als Feststellung wird die Erfassung des aktuellen Zustandes angesehen. Die Beurteilung dieses Ist-Zustandes erfolgt mit Hilfe des Vergleiches. Die somit erhaltene Kenntnis über den aktuellen Komponentenzustand kann mit dem Vorgang der Prognose in eine Aussage über die Restlebensdauer umgesetzt werden /30/.

Um für diese Arbeit eine einheitliche Form zu finden, ist im Begriff Maschinendiagnose nur die Diagnose als Zustandserfassung, -beurteilung und Ursachenbeschreibung enthalten. Somit ist das Ergebnis der Diagnose keine Aussage über die zu erwartende Restlebensdauer der Maschine.

Die Definition der Abnutzungsgrenze erfolgt auf der Komponentenebene anders als für den gesamten Antriebsstrang. Bei einer bleibenden Gefügeveränderung ist für eine mechanische Komponente schon vom Lebensdauerende auszugehen. Für den gesamten Antriebsstrang liegt aber noch kein Fehlerfall vor, da die geforderte Funktion noch ausführbar ist. Erst wenn sich das mechanische Übertragungsverhalten maßgeblich ändert, kann von einem Fehlerfall ausgegangen werden.

Der natürliche Verschleißvorgang an Werkzeugmaschinen ist ohne negative äußere Einflüsse eher als träge Vorgang (Beharrungszustand mit konstanter Verschleißrate) /31/ zu beschreiben. Kleinere Kollisionen im Betrieb können wohl zu kleinen sprungförmigen Zunahmen des Verschleißes führen, aber nicht zu einem unmittelbaren Ausfall. Selbst im ungünstigsten Verlauf, wenn sich Abrasivstoffe direkt im Wälzkontakt befinden, ist von Zeitkonstanten im Stundenbereich auszugehen, eher üblich sind Tage und Wochen.

Diagnose, Prognose und Überwachung nutzen meist dieselben Messungen wie in Bild 2-1 dargestellt. Der Verlauf der Kenngröße beschreibt den Komponentenzustand. Die Prognose jedoch braucht neben dem Kenngrößenverlauf auch die Belastungshistorie der relevanten Komponenten, da diese maßgeblich sind für den Komponentenzustand (gepunktete Wirklinien in Bild 2-1). Während bei der Überwachung die aktuelle Betriebsbereitschaft der Maschine im Vordergrund steht und der Zustand somit nur implizit eingeht, hat die Prognose mit der Diagnose als Basis eine Schätzung des Zustands selbst und seiner zukünftigen Entwicklung zum Ziel. Die weitere Schadensentwicklung wird maßgeblich von der noch zu erwartenden zukünftigen Belastung bestimmt. Im Rahmen der Diagnose erfolgt keine unmittelbare Reaktion, sie stellt jedoch ein Ergebnis zur Verfügung, welches von einer Überwachung bewertet werden kann und die Basis für eine Restlebensdauerprognose bietet (strichpunktete Wirklinien in Bild 2-1). Je nach Entwicklungsstand und Zuverlässigkeit der Diagnostik und Prognostik können so einzelne Phänomene, der Maschinenzustand oder die dynamisch ermittelte Restlebensdauer von Komponenten überwacht werden (gestrichelte Wirklinie in Bild 2-1).

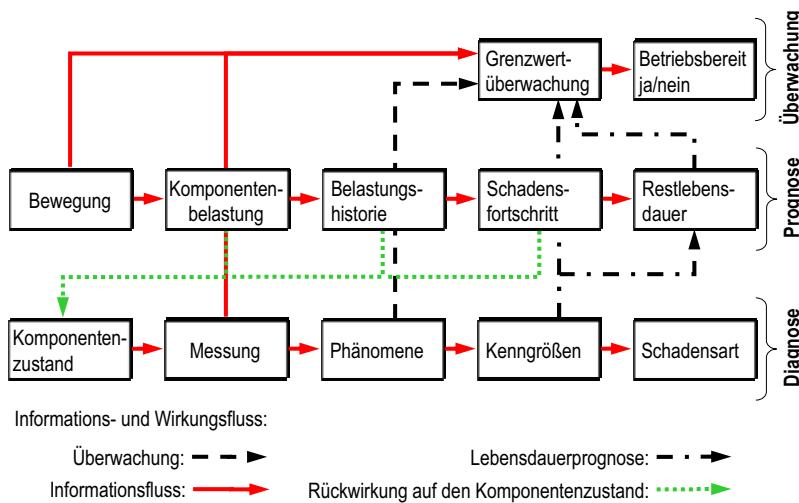


Bild 2-1: Abläufe und Zwischenschritt bei der Diagnose, Prognose und Überwachung

## 2.2 Arten der Diagnose an Werkzeugmaschinen

In /22/ wird die Maschinendiagnose in fünf unterschiedliche Hauptarten eingeteilt.

- Beobachtungen durch den Maschinennutzer
- Messmittel / Prüfverfahren
- Prüfwerkstücke
- Zusätzliche Sensorik
- Antriebsbasierte Diagnose

In Bild 2-2 sind diese fünf Hauptarten illustriert. In Kapitel 3 „Stand der Technik und Forschung“ werden die betrachteten Produkte bzw. Forschungsergebnisse und -ansätze mit diesen Arten abgeglichen und bewertet. Diese Einteilung in Arten ist nicht als abschließend anzusehen, zumal es auch Verfahren gibt, die sich nicht eindeutig einer Art zuordnen lassen.



Bild 2-2: Arten der Maschinendiagnose

### **2.2.1 Beobachtungen durch den Maschinennutzer**

Die bisher gängigste Vorgehensweise bei der Maschinendiagnose ist die Zustands erfassung und -beschreibung durch den Maschinennutzer selbst. Da er bis zu acht Stunden am Tag vor der Maschine verbringt und dadurch einen fundierten und auf allen Sinneswahrnehmungen basierenden Gesamteindruck von der Maschine hat, ist er den meisten Diagnosesystemen überlegen. Bei einem erfahrenen Maschinennutzer kann sogar von einem siebten Sinn für seine Maschinen ausgegangen werden /32/.

### **2.2.2 Messmittel / Prüfverfahren**

Als weiterer Standard sind Messmittel /3, 33, 34/ und Prüfverfahren /35, 36/ zu nennen. Prüfverfahren sind meist nur auf eine einzelne Komponente anwendbar und mit einem großen gerätetechnischen Aufwand verbunden. Ihr eigentliches Anwendungsbereich stammt aus den sicherheitssensitiveren Gebieten, wie dem Kraftwerksbau oder dem Flugzeugbau /37/. Bei den in diesen Gebieten üblichen regelmäßigen Inspektionen werden die Komponenten intensiv und einzeln geprüft. Ziel dieser Prüfung ist es, frühzeitig Materialermüdungen sowie Haarrisse im Material zu entdecken. Während dieser Inspektion können die zu prüfenden Baugruppen in ihre Einzelteile zerlegt und erneut zusammengebaut werden. Hingegen werden Messmittel vor allem während der Einrichtung und Inbetriebnahme der Werkzeugmaschine benutzt. Messmittel sind nicht fest mit der Maschine verbunden, sondern werden nur zu bestimmten Zeitpunkten installiert.

### **2.2.3 Prüfwerkstück**

Werkstücke, die nur mit dem Ziel gefertigt werden bestimmte Geometrien zu Diagnosezwecken zu enthalten, stellen Prüfwerkstücke dar. Aus dem Fertigungsergebnis können dann Rückschlüsse auf den Zustand der Werkzeugmaschine gezogen werden. Durch das Erstellen von Prüfwerkstücken werden der Zerspan- bzw. anderweitige Fertigungsprozesse miteinbezogen /3, 38/. Es lassen sich prinzipiell die gleichen Fehler wie bei Verfahren mit Messmitteln erkennen. Durch den Kraftschluss der kinematischen Kette bei Zerspanprozessen können darüber hinaus weitere Fehlverhalten der Maschinenstruktur sichtbar werden. Hinzu kommt, dass die reine Maschinendiagnose

verlassen wird und der Prozess als solcher mitbetrachtet wird. Meist wird versucht, den Prozesseinfluss durch passende Wahl der beteiligten Parameter zu minimieren. Somit kann im Rahmen einer speziellen Auswertung anhand der Veränderungen an der geforderten Geometrie ein Rückschluss auf Fehler in den betrachteten Antriebssträngen und der gesamten Werkzeugmaschine erfolgen.

#### 2.2.4 Zusätzliche Sensorik

Zur sensorgestützten Maschinendiagnose sind bereits kommerzielle Produkte verfügbar. Hier sind im Bereich der Werkzeugmaschine die Diagnoseverfahren an Hauptspindeln als Vorreiter zu sehen. Bei ihnen erfolgt die Überwachung der Lager mit meist festinstallierten Körperschallsensoren /39/. Die Auswertung ist durch eine hersteller-spezifische Software realisiert. Der für die Diagnose verwendete Sensor wird für keine weiteren Zwecke genutzt.

#### 2.2.5 Antriebsbasierte Diagnose

Die antriebsbasierte Diagnose nutzt primär Antriebssignale wie Ströme, Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen /40/. Diese Art lässt sich wieder in zwei prinzipiell unterschiedliche Ansätze unterteilen /41/. Zum einen gibt es Verfahren, welche auf einem umfangreichen Modell basieren, zum anderen gibt es Methoden, die nur eine Signalanalyse und einfaches Systemwissen nutzen. Somit ist die Tiefe der Systemkenntnis und des Systemverständnisses ausschlaggebend /39/, ob ein ausreichend genaues Modell erstellt werden kann.

In Bild 2-3 sind die zwei unterschiedlichen Ansätze dargestellt. Unter einfachem Systemwissen ist neben den für die Durchführung der Messungen relevanten Kenntnissen auch grundlegendes Wissen über den mechanischen Aufbau zu verstehen. Es handelt sich hierbei um konstruktive Größen, die benötigt werden, um das Bewegungsverhalten zu beschreiben. Hierbei werden jedoch üblicherweise alle dynamischen Effekte ausgeblendet. Als Beispiel ist bei einem Antriebsstrang mit KGT die Spindelsteigung zu nennen.

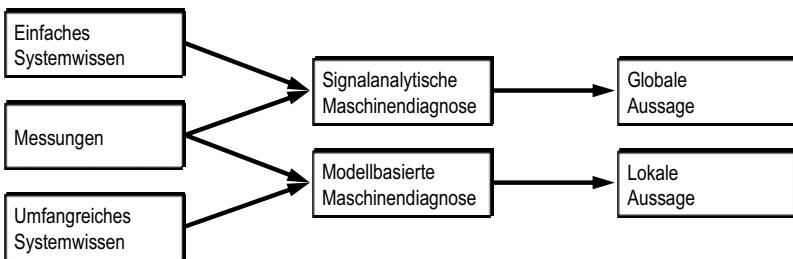


Bild 2-3: Umfang des Wissens als Unterscheidungsmerkmal für antriebsbasierte Diagnose

Die Kenntnis von Vorgängen und Eigenschaften, die sowohl durch die Bewegung verursacht werden können als auch die Form der Bewegung beeinflussen können, wird als umfangreiches Systemwissen angesehen. Um dieses Wissen zu erlangen, sind eine Analyse und eine mathematisch-physikalische Beschreibung des Antriebsstranges notwendig. Diese Analyse kann sowohl durch eigenständige Messungen als auch durch eine Herleitung der mathematisch-physikalischen Bewegungsgleichungen anhand der durch die Konstruktion vorgegebenen Geometrie erfolgen.

Die Berechnung von Bewegungsgeschwindigkeiten von Wälzkörpern oder die Übertragungsfunktion der Mechanik ist als Beispiel zu nennen.

### 2.2.5.1 Modellbasierte Diagnose

Bei der modellbasierten Diagnose sind zwei unterschiedliche Ansätze möglich. Im ersten Fall wird ein Maschinenmodell und im zweiten Fall ein Modell eines Schadens in der Maschine aufgestellt.

Bei den auf Maschinenmodellen und einem Beobachter /42, 43/ basierenden Verfahren (Bild 2-4) wird grundsätzlich die Art der Modellgewinnung unterschieden /22/. Entweder geht das Modell aus einem physikalisch-mathematischen Ansatz hervor (theoriebasierte Modellbildung) oder es wird aufgrund einer Signalanalyse zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen erstellt (Identifikation ohne Berücksichtigung der Bedeutung der Modellparameter). Die erstgenannte Möglichkeit ist bei gleicher Modellgüte oft aufwändiger, erlaubt jedoch unmittelbare Rückschlüsse auf die verhaltensbestimmenden Maschinenzustände. Bei der Erstellung des Modells liegt die

Schwierigkeit darin, das Gütekriterium und die Ordnung zu bestimmen. Durch die vorhandene Kopplung von Diagnosemöglichkeit und Modellzuständen bzw. -ordnung wird die Diagnose eingeschränkt. Phänomene, die sich erst während des Betriebes entwickeln und für die kein Zustand vorgesehen wurde, können nicht erkannt werden.

Der Weg über ein Modell ist als Umweg zu bezeichnen, da die Phänomene nicht direkt aus den Signalquellen gewonnen werden. Aus Bodediagrammen und Übertragungsfunktionen werden die Schwingungsmoden des Antriebsstrangs oder von Teilen davon bestimmt. Schwankungen von Maschinenparametern wie Steifigkeiten und Ver- spannungen wirken sich dabei in ihrer Gesamtheit direkt auf die Lage der Pole der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich aus. In Fällen, in denen eine eindeutige Zuordnung von Ursache (in Form einer Eigenschaftsveränderung) und Wirkung (als Veränderung des dafür vorgesehenen Parameter) möglich ist, können somit Tendenzen und Veränderungen von Komponenteneigenschaften festgestellt werden. Der Vorteil des Umweges über eine maschinenmodellbasierte Methode ist, dass bei hinreichender Güte des Modells eine quantitative Aussage über den Maschinenzustand möglich ist. Als Beispiel wäre hier die Gesamtsteifigkeit des Antriebsstranges möglich.

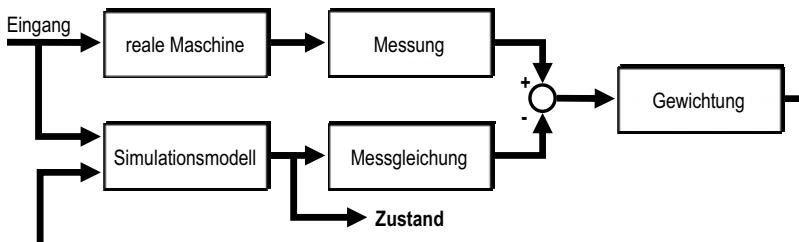


Bild 2-4: Ansatz für modellbasierte Verfahren

Das Aufstellen und Trainieren eines Neuronalen Netzes ist als eine weitere Methode zur Modellgewinnung zu verstehen. Auch ein Verzicht auf einen Beobachter und statt dessen eine sich wiederholende Identifikation des Antriebsstranges /44/ ist als modellbasierter Ansatz zu werten, da zumindest die Ordnung des Modells festgelegt werden muss.

Das Fehlermodell-Verfahren geht nicht von der Kenntnis des Gesamtverhaltens der Maschine, sondern von der spezifischeren Modellkenntnis des Fehlerverhaltens aus

(Bild 2-5). Somit lässt das Ausgangssignal in diesem Fall nach geeigneter Weiterverarbeitung mit Filtern direkte Rückschlüsse auf das Auftreten eines Schadenszustandes oder -ereignisses an einer Komponente zu.

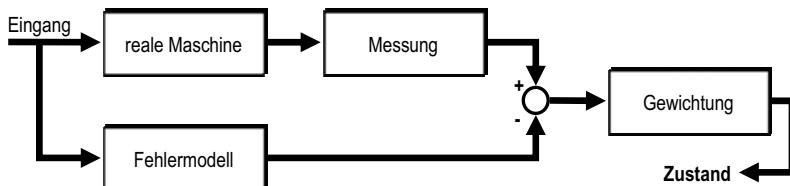


Bild 2-5: Fehlermodellansatz

Die fehlermodellbasierte Maschinendiagnose stellt meist geringere Anforderungen an den Umfang der Modelle. Da die Fehler explizit modelliert werden, können nicht berücksichtigte Fehlerfälle auch nicht erkannt werden.

### 2.2.5.2 Signalanalytische Diagnose

Da sich Schäden bei Komponenten von Werkzeugmaschinen häufig in Veränderungen an deren funktionaler Oberfläche zeigen, können die dadurch hervorgerufenen Signalanomalien beobachtet werden. Beispielsweise ergibt sich in Wälzlagern eine Reihe von Stoßimpulsen, wenn die Laufbahn eines geschädigten Außen- oder Innenrings von einem Wälzkörper überrollt wird. Diese Stoßimpulsreihe tritt bei konstanter Grunddrehfrequenz periodisch auf und kann aus der Grunddrehfrequenz und der Lagergeometrie berechnet werden. Somit ergibt sich eine charakteristische Frequenz, welche indirekt (siehe Abschnitt 4.4.2.1) über die Lagergrenzen hinaus messbar ist. Daher ist es prinzipiell möglich die Messungen auch an einem entfernten Ort durchzuführen und dem schadhaften Lager zuzuordnen, wie in /45/ beschrieben ist.

Signale, in denen derartige Phänomene identifiziert werden können, umfassen sowohl die Antriebssignale /46/ als auch die Signale von einer Reihe von Zusatzsensoren. Aus den gemessenen Signalen wird nur mit Mitteln der Signalanalyse eine Aussage über den Zustand getroffen. Zusammenfassend kann der signalanalytische Ansatz als direkter Weg zum Diagnoseergebnis bezeichnet werden.

## **2.3 Weitere Unterscheidungsmerkmale der Diagnose**

Neben dieser Einteilung nach Informationsquelle und -gewinnung ist eine weitere Charakterisierung, wann und mit welchen Mitteln die Diagnose erfolgt, sinnvoll.

### **2.3.1 Online und Offline-Verfahren**

Die vorgestellten Arten der Diagnose lassen sich in Online und Offline-Verfahren unterteilen. Diese Unterscheidung in Online-Verfahren, die während des laufenden Produktionsbetriebs im Einsatz sind und Offline-Verfahren, die eine Unterbrechung der Produktion erfordern, ist für eine spätere Bewertung und Reihenfolge der Anwendung der Methoden zweckmäßig.

Genauer sind die Online-Verfahren zu spezifizieren, da während der Produktion Bewegungsabläufe auftreten können, die sich im Speziellen für die Diagnose eignen, wie z.B. Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit und ohne äußere Störgrößen.

### **2.3.2 Bereiche der Diagnosemethoden**

Als abschließendes Merkmal der Diagnosemethode ist der Bereich zu nennen, in dem die Bewertung vorgenommen wird. Die zur Auswertung stehenden Daten werden meist im Zeitbereich gemessen. Prinzipiell ist aber auch jeder andere Bereich der Signal- aufzeichnung, wie beispielsweise der Ortsbereich, möglich.

Als weitere Möglichkeit kann durch eine mathematische Transformation der Wechsel in einen anderen Bereich erfolgen. Hier können sowohl der übliche Frequenzbereich als auch der Ortsbereich gewählt werden.

## **2.4 Prinzipielle Bewertung der Diagnosemethoden**

Die unterschiedlichen Methoden werden an den in Abschnitt 1.1 aufgestellten Zielen und Unterscheidungsmerkmalen gemessen und bewertet:

- Automatisch überwachbare Ergebnisse
- Eindeutigkeit der Ergebnisse
- Kein Expertendilemma
- Trennung: Prozess- und Maschinenzustand
- Integration in bestehende Steuerungssysteme
- Online / Offline Methode
- Bereich der Methode (Zeit- / Frequenzbereich)

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die prinzipielle Beurteilung der unterschiedlichen Diagnosemethoden und ermöglicht eine Fokussierung auf die für diese Arbeit relevanten Methoden.

Methode	Eigenschaften						
	Automatisch überwachbare Ergebnisse	Eindeutigkeit der Ergebnisse	Kein Expertendilemma	Trennung: Prozess- und Maschinenzustand	Integration in bestehende Steuerungssysteme	Online / Offline Methode	Bereich der Methode
Maschinennutzer	○	○	○	○	○	On	Z F
Messmittel / Prüfverfahren	○	○	○	○	○	Off	Z F
Prüfwerkstück	○	○	○	○	○	(On)/ Off	Z
Zusätzliche Sensorik	●	○	○	○	○	On / Off	Z F
Antriebsbasierte Diagnose: Modellbasierte Diagnose	●	○	○	○	○	On / Off	Z F
Antriebsbasierte Diagnose: Signalanalytische Diagnose	●	○	○	○	○	On / Off	Z F

Kann erfüllt werden:



Kann nicht erfüllt werden:



(On) es gibt Ansätze an Serienbauteilen und mit speziellen Prüfvorrichtungen dafür zu sorgen, dass der Produktionsbetrieb nicht oder nur kurz unterbrochen werden muss.  
Z = Zeitbereich, F = Frequenzbereich

Tabelle 2-1: Erreichbare Eigenschaften der Diagnosemethoden

Die Kombination aus automatisierbarer Auswertung zur Überwachung, Kausalität zwischen Diagnoseergebnis und Schadensbild und Integration in die Steuerung ist nur bei den letzten zwei Methoden gegeben:

- Zusätzliche Sensorik
- Antriebsbasierte Diagnose, als:
  - Modellbasierte Diagnose
  - Signalanalytische Diagnose

Da zusätzliche Sensorik an sich nicht mit den aufgestellten Zielen in Deckung zu bringen ist, wird auf die zwei grau unterlegten Methoden der Schwerpunkt gelegt, während die zuerst dargestellten vier Hauptarten nur kurz umrissen werden.

### 3 Stand der Technik und Forschung

Der Stand der Technik der einzelnen Arten von Diagnose wird, angepasst an den Schwerpunkt dieser Arbeit, unterschiedlich tief beleuchtet. Zunächst wird ein kurzer Überblick über die ersten vier Hauptarten der Maschinendiagnose gegeben:

- Beobachtungen durch den Maschinennutzer,
- Messmittel / Prüfverfahren,
- Prüfwerkstücke und
- zusätzliche Sensorik.

Diese vier Hauptarten werden weiter nicht verfolgt, sondern sollen einen Überblick über die existierenden technischen Realisierungen und Forschungsergebnisse ermöglichen. Wie im vorhergegangenen Kapitel festgestellt, können diese vier Hauptarten vor allem den Ansprüchen an die Eindeutigkeit ihrer Diagnoseergebnisse und die Integration in bestehende Steuerungssysteme nicht gerecht werden.

Die **antriebsbasierte Diagnose** wird ausführlicher erläutert. Die Verfahren, die in einer Werkzeugmaschinensteuerung umgesetzt sind, bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit.

#### 3.1 Beobachtungen durch den Maschinennutzer

Methoden, das Wissen und Vorgehen von Bedien- und Fachpersonal abzuschöpfen und zu nutzen, haben sich nicht etabliert. Zwar werden in /16/ Lösungen der Firma Scania und in /47/ ein steuerungsintegriertes System zur wissensbasierten Maschinendiagnose und Benutzerunterstützung beschrieben. Diese Systeme haben sich jedoch nicht im Umfeld der Werkzeugmaschine durchgesetzt. Die Umsetzung scheitert am Aufbau und der notwendigen Pflege des Systems. Die Software Solvatio /48/ wird von Heidelberger Druckmaschinen und der Deutschen Telekom genutzt, um ihren Kundenservice zu optimieren. Hierbei handelt es sich um eine kommerzielle Version von der im Rahmen der Arbeit von Baumeister /49/ entstanden Software D3. Bei den später in Abschnitt 3.5 betrachteten Steuerungssystemen gibt es keine direkte Verbindung oder Schnittstelle zu diesen Systemen. Die Beobachtungen durch den Maschinennutzer können keine automatisch überwachbaren Ergebnisse liefern.

### **3.2 Messmittel / Prüfverfahren**

Die unter diesem Punkt zusammengefassten Verfahren werden meist nur bei grundlegenden Veränderungen der WZM oder zur Abnahme angewandt. Diese Verfahren haben das Ziel die an den Antriebsstrang gestellten Anforderungen /12/ zu überprüfen:

- hohe geometrische und kinematische Genauigkeit,
- hohe Steifigkeit und Spielfreiheit,
- hohe erste mechanische Resonanz- oder Eigenfrequenz,
- niedrige Reibung und lineares Übertragungsverhalten.

Der Einsatz von Messmitteln zur Abnahme und somit zur Beschreibung des Zustandes einer Werkzeugmaschine hat sich als unerlässlich gezeigt. Neben der Ausrichtung der Achsen und statischen und dynamischen Steifigkeitsmessungen hat sich der Kreisformtest etabliert.

Um diese Verfahren zu Diagnosezwecken einzusetzen, müssen die Messungen wiederholt werden, um damit eine mögliche Veränderung des Zustandes erfassen zu können. Ob eine absolute oder zeitrelative Bewertung der Ergebnisse vorgenommen wird, kann unterschiedlich sein. Ziel ist es hier einen für einen Fehler empfindlichen Zustand zyklisch zu beschreiben.

Die hier weiter aufgeführten Verfahren werden nicht den Ansprüchen an ein automatisch überwachbares und eindeutiges Ergebnis gerecht. Auch stellt die Integration in bestehende Steuerungssysteme eine technisch schwer zu nehmende Hürde dar.

#### **3.2.1 Statische mechanische Beurteilung mit Messmitteln**

Als etablierte Methode ist eine Vermessung nach DIN ISO 230 /50/ oder VDI/DGQ 3441 /51/, „Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen“ zu nennen. Als Messmittel wird nach der Norm ein Laserinterferometer-System genutzt. Renishaw hat mit seinem Produkt ML10 /52, 53/ bzw. dem Nachfolger XL-80 diese Abnahmemessungen geprägt und sein Produkt sehr stark an den Normen ausgerichtet. Es ist eine Reihe von Messungen zur Geometriebestimmung der Antriebsachsen möglich. Es können Positions-, Kippwinkel-,

Geradheits-, Rechtwinkligkeits-, Ebenheits- und Drehachsenmessung mit einer Genauigkeit von bis zu  $0,7 \mu\text{m}/\text{m}$  durchgeführt und bewertet werden.

Die Ausrichtung der Achsen im Raum und der Ebene wird durch das Abfahren von Norm-Maßkörpern mit Messtastern oder -uhren bewertet. Durch eine weitere statische Messung kann die gesamte Achsstifigkeit ermittelt werden. Diese wird aus einer Kombination aus Kraft / Wegmessung bestimmt.

### **3.2.2 Dynamische mechanische Beurteilung mit Messmitteln**

Die dynamische mechanische Beurteilung legt ihren Fokus auf die Resonanzmoden, welche mit Hilfe einer Schwingungsanalyse bestimmt werden. Damit ist es möglich, die Regelkreise genau einzustellen und die mögliche Genauigkeit des Vorschubes bei einer maximalen Regelbandbreite zu nutzen /52, 53/. Als etabliertes Verfahren ist die Frequenzgangmessung der Mechanik und deren Auswertung durch ein Bode-Diagramm zu nennen. Dieses Verfahren ist in der Steuerungstechnik implementiert und etabliert (siehe Abschnitt 3.5.5). Neben dieser Bewertung des Übertragungsverhaltens zwischen Eingang und Ausgang kann auch nur der Ein- oder Ausgang betrachtet werden. Hier wird der Effekt der mechanischen Rückkopplung genutzt. Diese Messung des dynamischen Verhaltens der Maschine ist auch mit Hilfe des ML10 Lasers möglich. Als weitere Quelle sind Beschleunigungssensoren für eine Analyse der Dynamik geeignet. Als ein möglicher kommerzieller Vertreter ist der SPECTRA™ PULSE von Montronix zu nennen.

### **3.2.3 Kreisformtest mit Messmitteln**

Beim Kreisformtest werden neben rein statischen, mechanischen Eigenschaften auch dynamische Eigenschaften der Mechanik und der Regelungstechnik abgebildet. Es wird das Verhalten von zwei Achsen in einer Ebene bewertet. Diesen von den Steuerungssignalen unabhängigen Weg der Diagnose beschreiben die Firmen Renishaw und Heidenhain mit ihren Diagnoseprodukten /54, 55, 56/, die auf der systematischen Bewertung von Kreisformtests durch zusätzliche Testinstrumente basieren. Durch diese Vorgehensweise lässt sich nicht nur, wie in /57/ beschrieben, die Genauigkeit einer Maschine ermitteln. Vielmehr lassen sich auch tendenziell verschieden gemessene Effekte einem Fehlverhalten unterschiedlicher Typen von Komponenten zuordnen. Aus

der Form der gemessenen Kreise kann die Diagnose erstellt werden. Genauer sind folgende Möglichkeiten spezifiziert: Schleppfehler, Geraheitsfehler, Maßfehler, Stick-Slip-Effekte, Umkehrspiel, Führungsspiel, Spitzen am Quadrantenübergang, zyklischer Fehler und Rechtwinkligkeitsfehler. Ein eindeutiges Auffinden eines defekten Bauteils gelingt damit allerdings bislang nicht.

### 3.2.4 Prüfverfahren

Prüfverfahren sind nur aus grundsätzlichen Erwägungen aufgeführt, da der wirtschaftliche Nutzen sicherlich sehr selten bei Werkzeugmaschinen bzw. den zu diagnostizierenden Komponenten gegeben ist. Prinzipiell können unter wirtschaftlichem und konstruktivem Vorbehalt die aus der Werkstoffprüfung /37, 58/ bekannten Standardverfahren für Diagnosezwecke angewandt werden. Es macht jedoch nur Sinn, hierfür die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung zu betrachten. Diese kostenintensiven Prüfverfahren haben sich hauptsächlich in anderen Bereichen der Industrie etabliert, wobei die Haupteinsatzgebiete der Behälter- und Rohrleitungsbau, der Flugzeug-, Schiffs- und Fahrzeugbau sowie die Kraftwerkstechnik sind. Die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung machen sich hauptsächlich die Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen, Feldern oder Teilchen mit dem zu prüfenden Material zu Nutze. Die gängigsten zerstörungsfreien Prüfungsverfahren sind /37/:

- Sichtprüfung (visuelle und taktile Begutachtung durch den Menschen)
- Durchstrahlungsprüfung (Grundbegriffe: DIN EN 1330-3 /59/, DIN EN 444 /60/)
- Ultraschallprüfung (Grundbegriffe: DIN EN 1330-4 /61/, DIN EN 583-1 /62/)
- Wirbelstromprüfung (Grundbegriffe: DIN EN 1330-5 /63/, DIN EN 12084 /64/)
- Magnetpulverprüfung (Grundbegriffe: DIN EN ISO 9934-1 /65/)
- Farbeindringprüfung (Grundbegriffe: DIN EN 571-1 /66/)

### 3.3 Prüfwerkstück

Eine Möglichkeit zur indirekten Messung des Maschinenzustandes bietet die regelmäßige Vermessung von der WZM gefertigten Prüfwerkstücken. Mit den in der VDI-Richtlinie 2851 /67/ festgelegten Prüfwerkstücken lässt sich beispielsweise das

geometrische Verhalten für Bohr-, Dreh- und Fräsmaschinen ermitteln, woraus Aussagen über den Komponentenzustand abgeleitet werden können. Maßgeblich bei der Normung von Prüfstücken ist die NC Gesellschaft e.V /68/. In der von ihr veröffentlichten Empfehlung NCG 2005 /69/ werden folgende Richtlinien und Normen zusammengefasst und ergänzt:

- VDI 2851 /67/ – Beurteilung von Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren durch Einfachwerkstücke - ersatzlos zurückgezogen -
- VDI 3427, Blatt 1 /70/ – Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, dynamisches Verhalten von numerischen Bahnsteuerungen an Werkzeugmaschinen; Begriffe und Merkmale - ersatzlos zurückgezogen -
- VDI 3427, Blatt 2 /71/ – Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, dynamisches Verhalten von numerischen Bahnsteuerungen an Werkzeugmaschinen; Kenngrößen - ersatzlos zurückgezogen -
- VDI/DGQ 3441 /51/ – Statische Prüfung der Arbeits- und Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen; Grundlagen
- VDI/DGQ 3444 /72/ – Statische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Koordinatenbohrmaschinen und -bearbeitungszentren
- VDI/AWF 2870 /73/ – ersatzlos zurückgezogen -
- DIN 8601 /74/ – Abnahmeverbedingungen für Werkzeugmaschinen für die spanende Bearbeitung von Metallen

Als Ergebnis einer solchen Untersuchung erfolgt eine Bewertung der betrachteten WZM für zwei Bereiche (siehe Abschnitt 2.2.2) für folgende Kriterien:

### **Statische mechanische Beurteilung**

Durch die Auswertung des Prüfwerkstückes ist es möglich zu erkennen, ob die X / Y / Z Achskoordinaten rechtwinklig, die Orientierungen parallel zu X / Y / Z und Rotationsachsen rechtwinklig sind. Des Weiteren werden Wegfehler, Durchhang, Kippen, Nicken, Gieren erkannt. Damit kann auf Umkehrlose und Getriebefehler geschlossen werden. Abschließend kann eine Aussage über die Funktion der eingestellten 5 Achstransformationsparameter und Pivotlänge getroffen werden.

### **Dynamische mechanische Beurteilung**

Mit der Bewertung des gefertigten Prüfwerkstückes können Aussagen über folgende mögliche Fehlerquellen getroffen werden: Instabilität und / oder falsche Parametrierung der Achsenregelung, Federwirkung, Reibung (Hystereseffekte), Temperaturgang und Eigenfrequenzen der Mechanik.

Die Werkstückaufspannung beeinflusst das Ergebnis. Dieser Umstand muss bei der Bewertung berücksichtigt und wenn möglich kompensiert werden.

Bisher werden solche Diagnosen allerdings zum großen Teil aus visuellen Begutachtungen der Testwerkstücke ermittelt, was eine Objektivierung und Integration dieses Prüfverfahrens in automatisierte Lösungen behindert. Deshalb sind automatisch überwachbare und eindeutige Ergebnisse bei einer Integration in bestehende Steuerungssysteme nicht verfügbar.

### **3.4 Zusätzliche Sensorik**

Für eine erfolgreiche Bestimmung des Zustands einzelner Komponenten einer Maschine sind die Messgröße und der Messort der Sensoren von ausschlaggebender Bedeutung. Eine allumfassende Überwachung aller relevanten Komponenten im Kraft- und Bewegungsfluss würde daher eine große Anzahl an Sensoren bedeuten, wodurch die Anlagenkosten in die Höhe getrieben und die Möglichkeit einer fehlerhaften oder falschen Diagnose durch ein Fehlverhalten der Sensoren selbst erhöht würde. Daher werden Methoden eingesetzt, die die Sensorik auf ein Minimum beschränken, indem Effekte indirekt gemessen werden. Für Maschinendiagnose, die sich auf zusätzliche Sensoren stützt, sind bereits viele kommerzielle Produkte auf dem Markt verfügbar. Eine Hauptgruppe stellen die Verfahren dar, welche schwingungs- / vibrationsbasierte Sensoren nutzen. Hier fungieren Rotationsmaschinen, die mit konstanten Drehzahlen betrieben werden, als Vorreiter /75/. Der Einsatz von zusätzlicher Sensorik wie Körperschallaufnehmern für einzelne Diagnoseaufgaben ist ein etabliertes Verfahren /39, 75/. Das Einbinden mancher zusätzlicher Sensoren kann einen erheblichen Eingriff in die Maschine bedeuten und macht eine entsprechende Umkonstruktion der betroffenen Maschinenkomponenten erforderlich. (vgl. Moment- / Kraftmessung mit Dehnmessstreifen in Getrieben /76/). Neben dieser Schwingungsanalyse sind Verfahren,

meist mit Schwerpunkt auf Prozessdiagnose, die beispielsweise als Quelle den Antriebsstrom direkt messen oder Antriebsbussignale auswerten, kommerziell erhältlich /77, 78, 79/. Für die Mechanik im Antriebsstrang wurde die zusätzliche Sensorik noch nicht kommerziell eingesetzt.

Die Systeme mit zusätzlicher Sensorik lassen sich allerdings nur bedingt in bestehende Steuerungen integrieren und nutzen daher auch nicht im vollen Umfang die dort verfügbaren Signale als Quelle.

Eine vollständige Maschinendiagnose über alle möglichen Verschleißkomponenten wird mit Zusatzzensoren auf Grund der Anzahl von nötigen Sensoren kostspielig. Es existiert keine realistisch und wirtschaftlich umsetzbare direkte Messmöglichkeit für Verschleiß und Schäden an Komponenten des Antriebsstranges /80, 81/.

#### **Schwingungs- / vibrationsbasierte Verfahren:**

Vor allem für die Überwachung von Lagern werden erfolgreich Körperschallsensoren eingesetzt, die durch eine herstellerspezifische Software ausgewertet werden, z.B. /82, 83, 84/. Hier ist die Diagnose von Hauptspindeln in der Werkzeugmaschine als Vorreiter zu sehen. Bei ihnen erfolgt die Überwachung der Lager mit Körperschallsensoren. Die Auswertung ist durch eine herstellerspezifische Software realisiert. Als Beispiel ist die efector octavis /85/ (siehe Bild 2-2) Schwingungsüberwachung von der Firma ifm electronic zu nennen. Durch die vorhandene Modularität dieses Systems ist es möglich, sowohl eine zentrale als auch eine dezentrale Struktur für die Zustandserfassung und -bewertung aufzubauen. Zur Bewertung des Maschinenzustandes werden folgende Methoden angeboten:

- Spektrale Analyse / FFT
- Hüllkurven-FFT (H-FFT)
- Peak
- $V_{\text{eff}}$  RMS
- Trendanalyse

Eine Alternative zu Körperschallsensoren bietet die Firma THK mit dem Acoustic Emissions System, welches sich auf akustische Sensoren zur Untersuchung von Linear-

führungen und Kugelgewindetrieben stützt. Mit diesem Messprinzip können ohne aufwändige Demontage von Maschinenteilen beginnende Laufbahnschäden und andere Schadenssituationen analysiert und erkannt und in Echtzeit visualisiert werden. Da dieses Diagnose-System nicht unter dem Einfluss von niederfrequenten mechanischen Vibrationen und gekoppelten Schwingungen steht, können auch verschiedene Bauteile nacheinander separat untersucht werden /86/. Auch dieses System ist allerdings von der Steuerung und einer Auswertung der Antriebssignale entkoppelt.

### **Stromanalyseverfahren:**

Verfahren, die den Antriebsstrom des Motors analysieren, haben als weitere Diagnosemethoden für den Bearbeitungsprozess in die WZM Einzug gehalten. Auch hier lässt sich als Unterscheidungsmerkmal die Art der Datenaufnahme ausmachen. Ein Vertreter für die direkte Messung ist das ARTIS MTC – System (MU3) zur Prozessdiagnose von Hauptspindeln, welches mit zusätzlichen Hallsensoren zur direkten elektrischen Leistungsmessung (AR100S) ausgestattet ist. Hingegen benutzt beispielsweise das DDD Digital Drive Data von Montronix den Profibus als Datenquelle. Als Gemeinsamkeit der beiden Systeme kann die separate und eigenständige Datenaus- und -bewertung bezeichnet werden. Diese Verfahren sind prinzipiell mit dem in die Steuerung integrierten Ansatz des Productivity Agent von BoschRexroth (siehe Abschnitt 3.5.5.3) vergleichbar.

Das erklärte Ziel dieser Arbeit ist es aber, ohne zusätzliche Sensorik mit den schon genannten Nachteilen auszukommen. Daher werden diese etablierten Methoden lediglich zur Validierung der Ergebnisse dieser Arbeit genutzt.

## **3.5 Antriebsbasierte Diagnose**

Konsequent der Strategie der indirekten Schadenserkennung folgend, wird von Werkzeugmaschinenherstellern und -nutzern angestrebt, für die Bestimmung der Komponentenzustände auf Signale zurückzugreifen, die ohnehin für die Antriebsregelung erfasst werden /21/. In den Antriebssträngen von Werkzeugmaschinen sind dies üblicherweise die Stromsignale der Motoren (Phasenströme und momentenbildender Strom  $i$ ) sowie die Signale der Positionsmesssysteme am Motor (indirekte Lage und Geschwindigkeit  $\varphi, \omega$ ) und am Ende der Übertragungskette des Antriebs (direkte Lage

und Geschwindigkeit  $x, \dot{x}$ ). Die Funktion der für diese Signale nötigen und genutzten Sensoren ist in /11/ beschrieben. Auch die in der Reglerkaskade vorhandenen Sollsignale ( $\omega_{Soll}, i_{Soll}$ ) stehen zur Verfügung.

Im diesem Abschnitt sollen die schon in den kommerziellen Steuerungssystemen vorhandenen Funktionen, die zu Diagnosezwecken genutzt werden können, und die Diagnosemethoden an sich beschrieben werden. In der vorhandenen Struktur der Steuerung wird nach Möglichkeiten gesucht, um eines der Ziele dieser Arbeit – die Integration von neuen Ansätzen – zu ermöglichen. Es werden zuerst die allgemein vorhandenen Funktionen, die nicht nur auf Diagnose spezialisiert sind, aufgeführt. Eine Bewertung findet nur für Produkte statt, die eine spezifische Diagnosefunktionalität haben.

### **3.5.1 Reglerselbststeinstellung / Frequenzgang der Mechanik**

Die wahlweise im Umrichter oder in der Steuerung vorhandene Reglerselbststeinstellung könnte für eine Diagnose genutzt werden, da im Rahmen der hierzu notwendigen Algorithmen /87/ eine Identifikation der mechanischen Strecke erfolgen muss. Somit wäre ein modellbasierter Ansatz, beispielsweise durch eine Betrachtung der Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion möglich. Diese Möglichkeit wird aktuell in keinem System für eine Diagnosefunktionalität genutzt, sondern hauptsächlich zur Inbetriebnahme verwendet.

Eine von der Reglereinstellung losgelöste Betrachtung des Frequenzganges /3/ der Mechanik ist genauso zielführend. Die dafür nötigen Funktionen, eine besondere Sollwertanregung wie ein Sinus-Sweep oder Rauschen und eine Datenaufzeichnungsmöglichkeit (siehe nächster Abschnitt 3.5.2) sind in vielen kommerziell erhältlichen Steuerungs- und Umrichtersystemen vorhanden. Dabei existieren die unterschiedlichsten Ausbaustufen, die von keinem Zusammenhang der Funktionen über eine automatische Berechnung des Bodendiagramms und visuelle Darstellung bis zu einer automatisierten Auswertung (siehe Abschnitt 3.5.5.2) reichen.

### **3.5.2 Oszilloskop oder Trace-Funktionen**

Die verschiedenen Steuerungs- und Umrichtersysteme bieten diverse Möglichkeiten antriebsinterne Daten aufzuzeichnen und an ein PC-System zu übermitteln. Als Hauptunterscheidungsmerkmal sind hier die Umgebung, in der die Aufzeichnung stattfindet, und ob die Daten über ein Bussystem transportiert werden müssen, zu nennen. Der höchste Determinismus ist bei Aufzeichnungen, die in einer Echtzeitumgebung erfolgen, zu finden. In diesem Rahmen ist mit einer Beschränkung des nutzbaren Speichers auf beispielweise 8192 Werte und den für die Aufzeichnung verfügbaren Signalen auszugehen. Weitaus variabler ist die Datenaufnahme im Rahmen eines normalen PC-Betriebssystems mit den dort üblichen Echtzeitbedingungen und dem somit weitaus niedrigeren Determinismus und Synchronität zwischen den einzelnen Signalen. Es handelt sich bei hierbei um eine reine Datenaufzeichnungsfunktion ohne weitere Auswertung oder Verarbeitung.

Sobald die Daten auf einem PC-System sind, gibt es weitreichende Verarbeitungs- und Aufbereitungsmöglichkeiten. Diese können dann mit einem allgemeinen oder hersteller-spezifischen Programm erfolgen.

### **3.5.3 Antriebs-SPS**

Mit der Antriebs-SPS hat Rexroth eine Plattform geschaffen, welche eine Möglichkeit bietet, die Funktionen der Umrichter des eigenen Hauses wie das Oszilloskop, den Sollwertgenerator und das antriebsgeführte Positionieren zu parametrieren, zu steuern und auszulesen. Des Weiteren sind grundlegende mathematische Funktionen in vorgefertigten Bausteinen vorhanden, die sich an den in einer SPS üblichen orientieren. Es ist somit möglich, Daten in einem sehr schnellen Takt ( $62,5 \mu\text{s}$ ) aufzunehmen und mit Taktzeiten ab 1 ms weiterzuverarbeiten. Durch diese Plattform ist eine Möglichkeit für die Implementierung von Diagnosealgorithmen gegeben. Danach können die neu entstandenen Ergebnisse über SERCOS-Parameter der Steuerung zur Verfügung gestellt werden.

### 3.5.4 Integrated Monitoring and Diagnostics für Sinumerik

Um kundenspezifische Erweiterungen direkt in die Steuerung einbringen zu können, stehen seit langer Zeit Compile Cycles für die Steuerung 840D der Fa. Siemens zur Verfügung. Mit Hilfe von Compile Cycles konnten Kunden die Offenheit der Steuerung ausnutzen, indem sie in C++ programmierte Funktionen direkt in den Echtzeitteil der Steuerung einbringen können.

Da dies aufgrund der hohen Lizenz- und Entwicklungskosten sowie vor allem aufgrund der durch die entstehende direkte Abhängigkeit der Kundenzyklen von NC-Kernfunktionen nur bedingt aufrecht erhaltbaren Herstellergarantie nur von sehr wenigen Kunden genutzt wurde, ging die Entwicklung dahingehend weiter, dass Siemens ein in Funktionalität und Kernabhängigkeiten beschränktes Pattern zur Verfügung stellt, mit dem Überwachungs- und Diagnosefunktionen einfacher realisiert werden können. Die von Siemens mit IMD (Integrated Monitoring and Diagnostics) bezeichnete Erweiterung bietet die Möglichkeit, ebenfalls mit in C++ geschriebenen Funktionen kundenspezifisches Know-how in die Steuerung einzubringen. In Bild 3-1 sind die vorhandenen Schnittstellen von IMD und Möglichkeiten zur Integration eigener Software aufgezeigt.

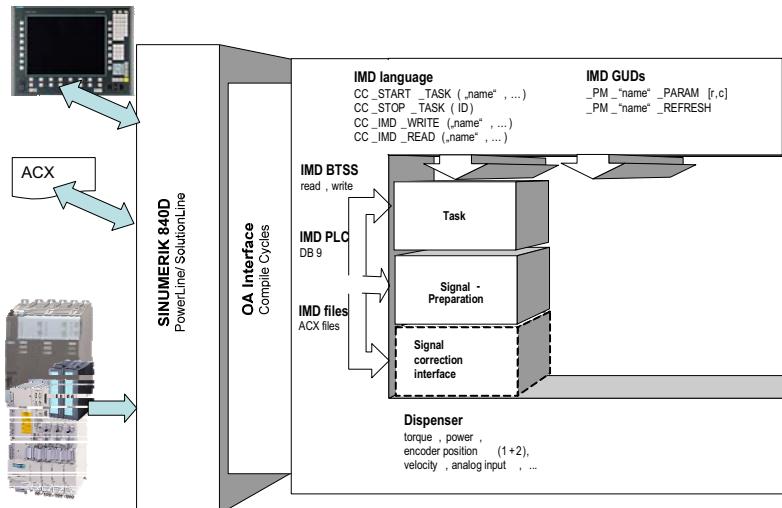


Bild 3-1: Aufbau von Integrated Monitoring and Diagnostics /88/

### **3.5.5 Productivity Agent im IndraDrive-System**

Da die Antriebs-SPS nur eine Programmierplattform darstellt, aber nicht direkt zur Maschinendiagnose dient, werden ihre Funktionen im Rahmen dieser Übersicht nur insoweit beschrieben, als sie für die Diagnose relevant sind.

Inhalt des folgenden Abschnittes sind die Möglichkeiten der Maschinendiagnose mit Rexroth Umrichtern und Steuerungen. Als Diagnosefunktion wurde in die Rexroth IndraDrive Plattform der Productivity Agent (PA) aufgenommen. Er basiert auf einer im Umrichter laufenden SPS (MLD-S, Antriebs-SPS). Grundlage des PA sind drei separate SPS-Programme, welche folgende Diagnosefunktionalitäten enthalten:

1. Signalbasierte Mechanikanalyse (Abschnitt 3.5.5.1)
2. Frequenzgangmessung und -analyse (Abschnitt 3.5.5.2)
3. Signalbasierte Hüllkurvenüberwachung (Abschnitt 3.5.5.3)

Mit dem PA wird ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das eine Bewertungsgrundlage liefert. Die Bewertung des Zustandes des Antriebsstranges als „gut“ muss der Maschinenbetreiber bzw. -hersteller selbst vornehmen, diese Bewertung ist keine Funktionalität des PA.

#### **3.5.5.1 Signalbasierte Mechanikanalyse**

Mit der Mechanikanalyse können Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, wie Lose / Spiel, Reibung und Steifigkeit anhand des Systemverhaltens erkannt werden. Die Funktion und der Ablauf der signalbasierten Mechanikanalyse sind in Bild 3-2 aufgezeigt.

In einem ersten Schritt muss zunächst der „Ist-“ bzw. „Gut-Zustand“ des Antriebsstranges aufgenommen und gespeichert werden. Dies sollte idealerweise im eingelaufenen und betriebswarmen Zustand durchgeführt werden. Im zweiten Schritt wird bei Bedarf eine Testmessung durchgeführt, um zu beliebigen Zeitpunkten den Zustand des Antriebsstranges mit dem Zustand zum Zeitpunkt der Referenzmessung zu vergleichen.

In Abhängigkeit von frei definierbaren Schwellen und Empfindlichkeiten für Reibungs- und Spiel / Steifigkeit-Überwachung wird beim Überschreiten der Schwelle eine Warnung bzw. Fehlermeldung ausgegeben.

Die Angabe der verschiedenen Schwellen erfolgt in der Form eines prozentualen Anteils, bezogen auf die Kenngrößen bei Durchführung der Referenzmessung.

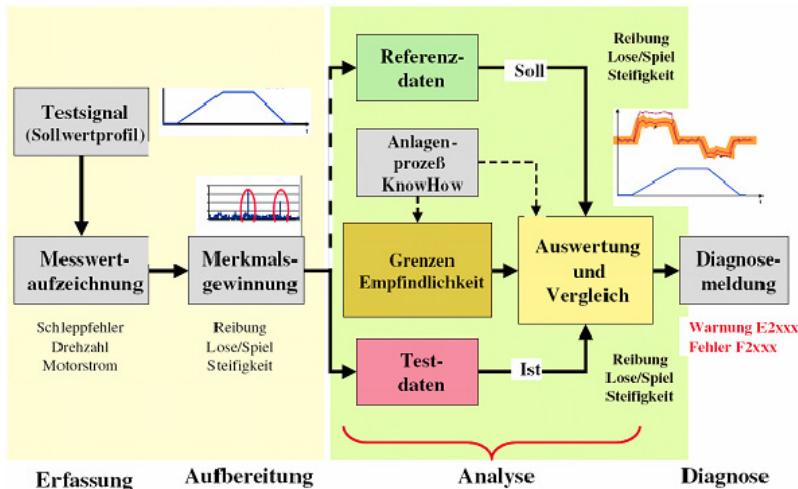


Bild 3-2: Funktionsprinzip der signalbasierten Mechanikanalyse /89/

### 3.5.5.2 Frequenzgangmessung und -analyse

Bei der erweiterten Diagnosefunktion "Frequenzgangmessung und -analyse" handelt es sich um ein signalbasiertes Offline-Verfahren im Frequenzbereich. Diese Diagnosefunktion kann bei Bedarf gestartet werden.

Der Frequenzgang des geschlossenen Regelkreises und dessen Kenngrößen (Bandbreite, Resonanzstellen) können sowohl als Hilfsmittel für eine Erstinbetriebnahme dienen als auch für eine weiterführende, regelmäßige Analyse und Diagnose des Mechanikverschleißes / -zustands herangezogen werden. Nachfolgendes Bild 3-3 zeigt den Ablauf der Frequenzgangmessung und -analyse.

Die Frequenzganganalyse kann automatisch gestartet werden und reagiert auf Veränderungen im Frequenzverhalten. Die Form und die Ansprechschwelle der Reaktion können eingestellt werden.

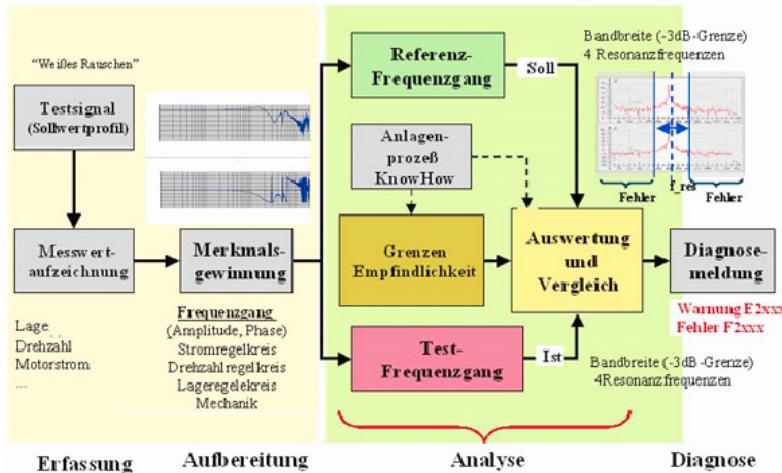


Bild 3-3: Ablauf der Frequenzgangmessung und -analyse /89/

### 3.5.5.3 Signalbasierte Hüllkurvenüberwachung

Bei der signalbasierten Hüllkurvenüberwachung kann ein frei konfigurierbares Signal hinsichtlich des Verlassens von zwei festgelegten Toleranzbändern überwacht werden (Bild 3-4). Daneben kann auch die Anzahl der Messwerte, die nötig ist, um eine dauerhafte Überschreitung festzustellen, angegeben werden. Als Basis für den Referenzwert wird eine Referenzmessung herangezogen. Die Diagnosefunktion ist eine reine Überwachungsfunktion, welche sich zur Überprüfung eines Antriebsstranges bzw. des gesamten Arbeitsprozesses auf mechanische und elektrische Veränderungen während des Betriebs eignet (Online-Verfahren).

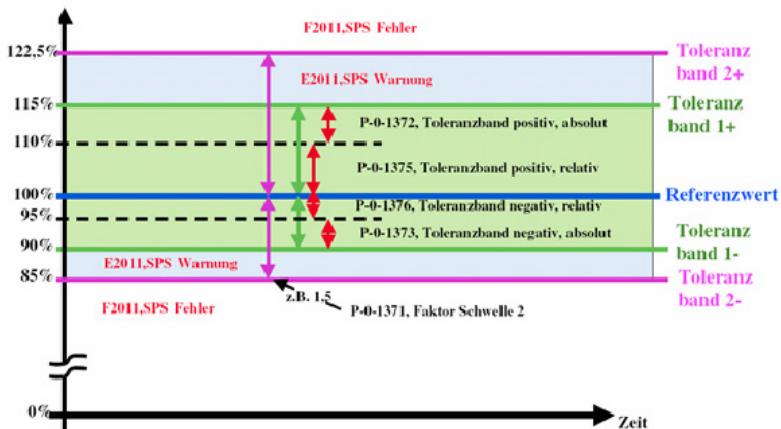


Bild 3-4: Art der Toleranzbänder der signalbasierten Hüllkurvenüberwachung /89/

### 3.5.6 Die Möglichkeiten des ePS Systems

Durch das ePS-System lassen sich verschiedene Tests auf einer Zielmaschine ausführen. Während der Tests werden die Antriebssignale mitgeschrieben und daraus Kenngrößen, beispielsweise für das Reibungsverhalten, bestimmt. Diese Kenngrößen werden in einer Datenbank beim Maschinenhersteller oder einem Service-Provider hinterlegt und können mit einem früheren Zustand der Maschine verglichen werden. Somit ist es möglich, eine Veränderung des Verhaltens zu beobachten und gegebenenfalls frühzeitig eine Wartung einzuleiten. Dabei lässt sich jedoch derzeit noch nicht unmittelbar aus einer Veränderung der Kenngrößen auf den Verschleißgrad einer bestimmten Komponente schließen. Das große Potenzial des ePS-Ansatzes liegt in der einfachen Vergleichsmöglichkeit der Zustände mehrerer gleicher Maschinen, da die Daten auf einem gemeinsamen Server gesammelt werden.

Als Übertragungsmedium zwischen Steuerung und ePS-Server-System wird das Internet genutzt. Die Vorgehensweise zum Aufbau der Plattform ist an die in /90/ beschriebenen Strukturen angelehnt.

In den folgenden Abschnitten werden die Teilbereiche eP-Performance des ePS Systems /91, 92, 93/ vorgestellt, der

1. Universalachstest (Abschnitt 3.5.6.1),
2. Kreisformtest (Abschnitt 3.5.6.3) und
3. Gleichlauftest (Abschnitt 3.5.6.2).

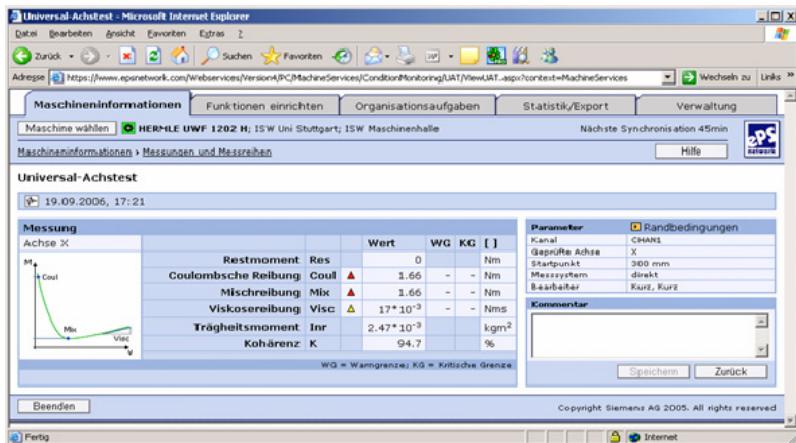
Darüber hinaus bietet das ePS System die Möglichkeit, Reaktionen auf Fehlerzustände der Maschine einzurichten und per Fernzugriff die Werkzeugmaschinensteuerung zu bedienen, worauf hier nicht eingegangen wird, da diese Funktionen für die Diagnose nicht relevant sind. Die Auswertungsergebnisse werden im Falle des ePS-Systems über einen Webservice dargestellt.

### **3.5.6.1    Universalachstest**

Bei einem Universalachstest von ePS werden verschiedene Bewegungsmuster gefahren, aus denen folgende Kenngrößen berechnet werden:

- das Restmoment
- die Coulombsche Reibung
- die Mischreibung
- die viskose Reibung
- das Trägheitsmoment

Zusätzlich wird die Kohärenz angegeben, die dem Benutzer anzeigt, wie aussagekräftig die Ergebnisse sind. Da die gemessenen Werte mit einem mathematischen Modell der Reibung abgeglichen werden, kann über die Kohärenz abgeschätzt werden, ob die vermessene Achse sich durch das hinterlegte Modell gut beschreiben lässt oder nicht. So wird verhindert, dass berechnete Kenngrößen einer Achse, die sich eventuell nicht mit dem hinterlegten Modell beschreiben lässt, als aussagekräftige Kenngrößen aufgefasst werden. Bild 3-5 zeigt, wie dem Benutzer zusätzlich grafisch angezeigt wird, wie die berechneten Kenngrößen der Achse zu verstehen sind.



**Bild 3-5:** Darstellung des Ergebnisses eines Universalachstests in ePS

Das angezeigte Restmoment beschreibt das Moment, das an der Achse nach dem Einbremsen auf eine Position im Stillstand anliegt. Die Coulombsche Reibung beschreibt, wie groß die Reibung beim Anfahren aus dem Stillstand ist, wobei die Mischreibung die extrapolierte Reibung aus der Kennlinie der viskosen Reibung beschreibt. Die Viskosereibung beschreibt den Anstieg der Reibung mit zunehmender Geschwindigkeit. Zusätzlich wird das an der Motorwelle wirksame Trägheitsmoment angezeigt.

### 3.5.6.2 Gleichlauftest

Bei dem ePS Gleichlauftest (GLT) wird mit einer einzelnen Maschinenachse eine Bewegung mit konstanter Soll-Geschwindigkeit ausgeführt und dabei die tatsächliche Position, Geschwindigkeit und das benötigte Moment bzw. die Kraft aufgezeichnet. Auf der in [Bild 3-6](#) dargestellten Web-Seite werden neben den Kenngrößen auch die im Interpolationstakt gemessenen Daten grafisch in einem Diagramm dargestellt.

Diese Messung erfolgt symmetrisch bei Bewegung in beiden Richtungen. Aus den Messgrößenverläufen werden folgende Kenngrößen berechnet:

- Maximal- und Minimalwert des Moments

- Durchschnitt des Moments
- Standardabweichung des Moments
- Maximum in der Rampe des Moments
- Maximale und minimale Steifigkeit
- Durchschnitt der Steifigkeit
- Standardabweichung der Steifigkeit

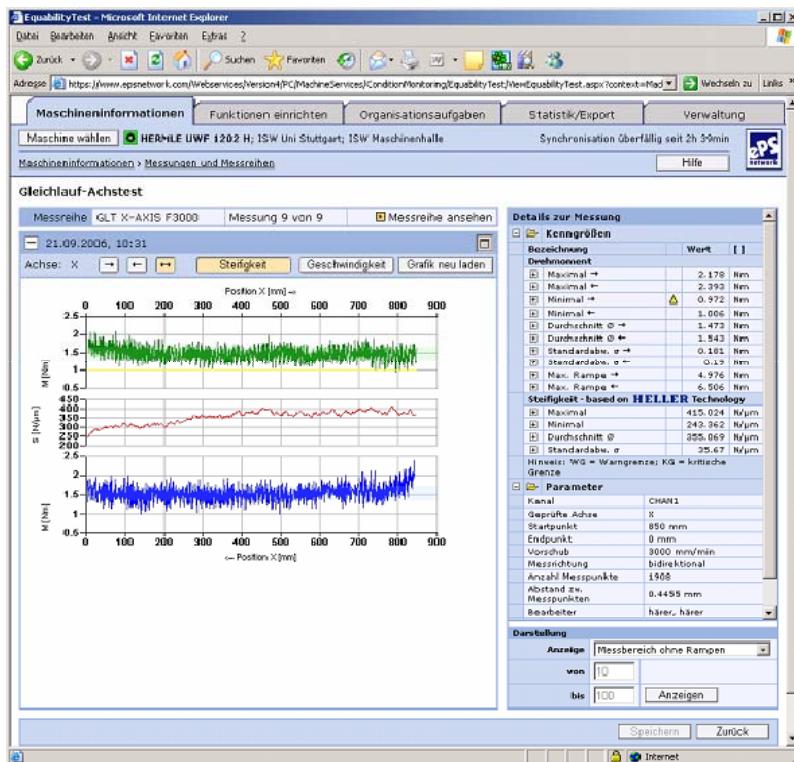


Bild 3-6: Darstellung einer Gleichlauftestmessung im Browserfenster in ePS

Zusätzlich werden die Parameter, wie Geschwindigkeit, Start- und Stopposition und als Randbedingungen die aktiven Kompensationen der Steuerung angezeigt. Diese

Informationen stellen eine wichtige Voraussetzung dar, um die Aussagefähigkeit der Kenngrößen zu gewährleisten. Vor allem bei Veränderungen der Kenngrößen kann so vom Nutzer verifiziert werden, ob die Messung unter gleichen Randbedingungen stattfand. Durch die wiederholte Auswertung der ermittelten Steifigkeit kann der fortschreitende Verschleiß einer Maschinenachse überwacht werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass über die Lebensdauer eines KGT diese Kenngröße sinkt und über sie eine Veränderung der Mechanik erfasst werden kann. Hier können dann sehr einfach Grenzen definiert werden, bei deren Überschreiten automatische Reaktionen ausgelöst werden sollen. Allerdings ist keine eindeutige Zuordnung zu einem bestimmten Maschinen-element möglich, da es sich bei der überwachten Größe um die Gesamtsteifigkeit des Antriebsstrangs handelt.

Die Messung setzt ferner voraus, dass es sich um eine Achse mit direktem und indirektem Messsystem handelt. Bei Achsen, die nur mit indirektem Messsystem betrieben werden, kann keine Steifigkeitsauswertung durchgeführt werden. Bei allen Achsen ist es jedoch möglich, das durchschnittliche Motormoment zu überwachen und durch einen Rückgang einen sich entwickelnden Vorspannungsverlust zu detektieren.

Durch Überwachung eines Anstiegs des benötigten Moments kann eine ausgefallene Schmierung oder anderweitig verursachte Schwergängigkeit detektiert werden. Da eine eindeutige Zuordnung der Ursache dabei jedoch nicht möglich ist, eignet sich zur Überwachung der Reibkennwerte der Universalachstest besser (siehe 3.5.6.1). Über den GLT kann eine Lokalisierung einer festgestellten Schwergängigkeit vorgenommen werden, wenn sich diese nicht konstant über dem gesamten Verfahrbereich der Achse zeigt. Mit dem Gleichlauftest kann also nicht nur eine Aussage über den Zustand der Achse gemacht werden, sondern gegebenenfalls auch eine Aussage über die Position der Auffälligkeit im Verfahrbereich.

Aus den durch die Gleichlauftestmessungen gewonnenen Kenngrößen kann eine Überwachung aufgebaut werden. Bild 3-7 zeigt beispielhaft eine Messreihe für das durchschnittliche Moment des Gleichlauftests der X-Achse.

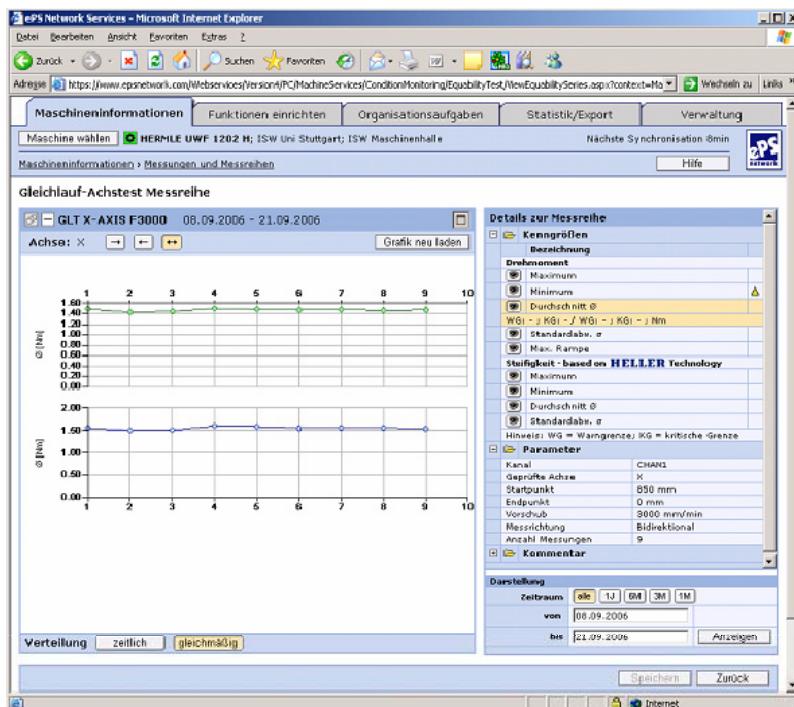


Bild 3-7: Messreihe für das durchschnittliche Moment eines Gleichlauftests in ePS

### 3.5.6.3 Kreisformtest

Bei dem ePS Kreisformtest (KFT) wird mit zwei Achsen ein Soll-Kreis mit konstanter Bahngeschwindigkeit gefahren und dabei die tatsächliche Position aufgezeichnet. Aus den gemessenen Daten werden folgende Kenngrößen berechnet:

- Kreisformabweichung
- Kreisumkehrspanne

Anschließend wird zu diesen Kenngrößen das Ergebnis als Abweichung vom idealen Kreis grafisch dargestellt. Bild 3-8 zeigt beispielhaft die Darstellung des KFT im

Browserfenster eines beliebigen PCs. Die Kenngrößen können, wie in Bild 3-7 für den GLT gezeigt, über eine gesamte Messreihe angezeigt werden und auf einen Trend hin untersucht werden. Um das Ergebnis schnell einschätzen zu können, werden hier auch schon einige relevante Parameter, wie z.B. die aktiven  $k_V$ -Faktoren der beteiligten Achsen angezeigt.

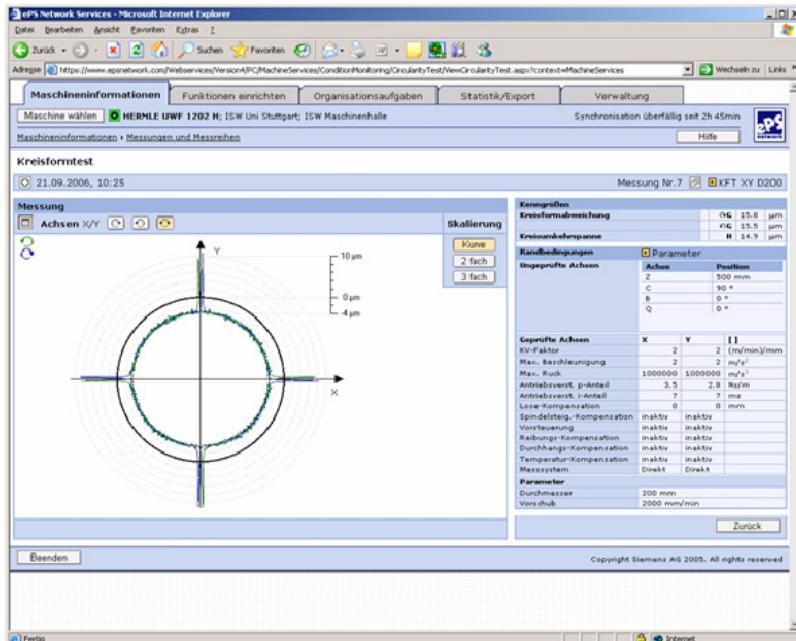


Bild 3-8: Darstellung des Ergebnisses eines Kreisformtests im Browserfenster in ePS

Wie allgemein bekannt, kann aus dem Ergebnis des KFT an den Quadrantenübergängen die Haftreibung in Kombination mit den Reglereinstellungen und der aktiven Umkehrspielkompensation beurteilt werden. Durch die nebenstehenden Parameter kann ferner eine evtl. vorliegende Ovalität auf ihre Ursache hin schnell analysiert werden. Eine Hysterese aufgrund von Spiel im Antriebsstrang kann, ebenso wie zyklische Fehler durch unzureichende Ausrichtung, erkannt werden. Zusätzlich zu diesen Eigenschaften des KFTs bietet das ePS System die Möglichkeit, in einer Seriendarstellung mehrere Messungen miteinander zu vergleichen und eine einfache Überwachung der oben

genannten Kenngrößen aufzubauen. Der Vorteil des ePS Systems unter Nutzung der direkten Geber an der Mechanik gegenüber dem Kreisformtest mit Messmitteln liegt darin, dass auch sehr kleine und schnelle Kreise gefahren werden können. Als Nachteil ist jedoch anzumerken, dass die mechanische Strecke vom direkten Geber zur Werkzeugspitze nicht erfasst werden kann.

### **3.6 Fazit und Bewertung des Standes der Technik**

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Produkte und die dadurch realisierten Methoden bilden eine solide Basis für die Diagnose in Form einer Zustandsbeschreibung. Es besteht jedoch erhebliches Verbesserungspotential, was den Verzicht auf zusätzliche Sensorik, die automatische Überwachbarkeit der eindeutigen Ergebnisse und die Integration in bestehende Steuerungssysteme betrifft. Im folgenden werden die Techniken nach ihrer Hauptart im einzelnen bewertet.

Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt, sind durch den Maschinennutzer gemachte Beobachtungen hilfreich für die weitere Entwicklung von Diagnoseverfahren. Da es bis jetzt aber nicht gelungen ist, das hierfür nötige Wissen und die erforderlichen Sinneseindrücke allgemeingültig zu beschreiben und zu erfassen, ist eine technische Nutzung nicht möglich. Es bleibt dem individuellen Können des Maschinennutzers überlassen eine Diagnose zu erstellen. Die in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 vorgestellten Verfahren auf Basis von Messmittel / Prüfverfahren, Prüfwerkstücke und zusätzliche Sensorik erfüllen nur jeweils eines der beiden ersten Kriterien. Keine der in diesen Abschnitten vorgestellten Methoden erfüllt jedoch die abschließende Bewertung, die Integration in bestehende Steuerungssysteme. Sie scheiden daher prinzipiell aus.

Die in diesem Kapitel erläuterten Methoden der antriebsbasierten Diagnose nutzen fast alle eine Auswertung der antriebsinternen Signale im Zeitbereich. Durch diese Beschränkung können die genannten Verfahren nicht alle auftretenden Schäden erkennen.

Auch leidet darunter die eindeutige Zuordnung der Schadensursache und -quelle, somit wird ein Expertendilemma begünstigt.

Das einzige verfügbare Verfahren im Frequenzbereich, die in Abschnitt 3.5.5.2 vorgestellte Frequenzganganalyse, setzt ein spezielles Anregungssignal voraus und

bewegt die Achsen ohne die CNC-Steuerung. Somit sind alle Überwachungsfunktionen der Steuerung, wie Kollisionsüberwachung und Transformation ausgeschaltet. Im Achsverbund wird deshalb „blind“ gefahren. Diese Diagnosemethode zielt auf die später in Abschnitt 4.4.2.2 vorgestellten nicht-periodischen Schadensarten ab, welche erfahrungsgemäß erst kurz vor dem Versagen auftreten.

Methode	Kriterien	Methode auf den Antriebsstrang angewendet	Verwendung von antriebsinternen Signalen	Detektion der Schadensart	Automatisch überwachbare Ergebnisse	Eindeutigkeit der Ergebnisse	Kein Expertendilemma	Trennung: Prozess- und Maschineriezustand	Integration in bestehende Steuerungssysteme	Online / Offline Methode	Bereich der Methode
Beobachtungen durch den Maschinennutzer (3.1)	●	○	np / p	○	●	○	○	○	○	Off On	Z
Messmittel / Prüfverfahren (3.2)	●	○	np / p	●	●	●	●	●	●	Off	Z
Prüfwerkstück (3.3)	●	○	np / p	●	●	●	●	○	○	Off	Z
Zusätzliche Sensorik (meist Schwingungsaufnehmer 3.4)	○	●	p / np	●	●	●	●	●	●	Off On	F
Signalbasierte Mechanikanalyse (3.5.5.5.1)	●	●	np	●	●	●	●	●	●	Off	Z
Frequenzgangmessung und -analyse (3.5.5.5.2)	●	●	np	●	●	●	●	●	●	Off	F
Signalbasierte Hüllkurven-überwachung (3.5.5.5.3)	●	●	ü	●	○	○	○	●	●	On	Z
Gleichlauftest (3.5.6.1)	●	●	np	●	●	●	●	●	●	Off	Z
Kreisformtest (3.5.6.2)	●	●	np	●	●	●	●	●	●	Off	Z
Universalachstest (3.5.6.3)	●	●	np	●	●	●	●	●	●	Off	Z

Z = Zeitbereich, F = Frequenzbereich

p = Periodische Schadenart

np = Nicht-periodische Schadenart

ü = Nur Überwachung

Kann erfüllt werden: ●

Kann nicht erfüllt werden: ○

Tabelle 3-1: Bewertung des Standes der Technik

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zur Zeit nur die antriebsbasierte Diagnose in Form der modellbasierten und signalanalytischen Diagnose den in Abschnitt 1.1 aufgestellten Anforderungen genügt, wie aus Tabelle 3-1 ersichtlich ist. Alle kommerziell umgesetzten Produkte aus einer anderen Art der Diagnose sind wahlweise wegen Nutzung zusätzlicher Sensorik, fehlender automatischer Überwachbarkeit oder prinzipiell mangelnder Integrationsmöglichkeit in die Steuerung bereits ungeeignet.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Verfahren entwickelt werden müssen, die die periodische Schadensart detektieren können. Neben der Eindeutigkeit der Ergebnisse steht die Integration in die Steuerung als Ziel fest. Durch die Nutzung von antriebsinternen Signalen und mit der Definition von Kenngrößen können diese Ziele – wie die vorliegende Arbeit zeigt – erreicht werden.

### **3.7 Stand der Forschung im Bereich antriebsbasierte Maschinendiagnose**

Die relevanten Grundlagen werden auch für Forschungsergebnisse jenseits des Fokus auf antriebsbasierte Diagnose mit dem Ziel aufgeführt, einen umfassenden Überblick zu geben. Da es nicht immer gelingt, genau zwischen Prozess- und Maschinendiagnose zu trennen, ist im folgenden Abschnitt die Grenze absichtlich unscharf gehalten.

Der Leitartikel „Advanced monitoring of machining operations“ /94/ der CIRP-Annalen aus dem Jahr 2010 stellt die Entwicklung des gesamten Gebiets der Prozess- und Maschinendiagnose an Werkzeugmaschinen über die letzten dreißig Jahre dar. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Einsatz von Sensoren und möglichen Auswerteargorithmen. Die antriebsinternen Signale sind nach Lesart der Autoren auch als Sensoren in ihrem Sinne zu sehen. Dabei werden Sensoren zur Strommessung explizit genannt, aber Sensoren zur Positions- oder Geschwindigkeitsmessung nur implizit erwähnt. Neben Beispielen aus der industriellen Anwendung wird auch auf allgemeine Ansätze und Methoden aus der Signalanalyse eingegangen. Als einzige Arbeit mit Fokus auf den Verschleiß einer Antriebsachse wird auf /95/ verwiesen.

### 3.7.1 Wissenschaftliche Monographien

Als Grundlage für das gesamte Gebiet der Maschinendiagnose sind zunächst die Signalanalyse und Messtechnik kurz zu umreißen. Die allgemeinen Grundlagen sind beispielsweise aus /96/ und /97/ zu entnehmen. Die meisten dort erwähnten Analyseverfahren sind in der Software MATLAB /98/ des Unternehmens The MathWorks, Inc. verfügbar. Spezialisiert auf die Nutzung im Diagnosekontext bieten /35, 39, 99/ und /100/ einen sehr guten Überblick im Bereich der Signalanalyse, Mustererkennung und Bewertung.

Neben Autoren, die Methoden vorstellen, durch Beobachter und Modelle /6/ auf den Zustand einer Werkzeugmaschine zu schließen, haben Geropp /101/ und Wirth /102/ die Basis für die Zustandsüberwachung von Wälzlagern mit Hilfe von zusätzlicher Sensorik gelegt. So wurde durch die Hüllkurvenanalyse aus einem Schwingungssignal die Impulsreihenfolge eines Schadens extrahiert. Auf diese Arbeiten baut die Unterteilung in unterschiedliche Schadensarten auf, die in Abschnitt 4.4.2 vorgenommen wird.

In wissenschaftlichen Arbeiten hat Wirth /103, 104/ überdies aufgezeigt, dass die optimale Wahl von Sensortyp, Sensoranzahl und Sensorposition stark von den Diagnoseobjekten und -zielen abhängt. Eine vollständige Maschinendiagnose über alle möglichen Verschleißkomponenten wird daher mit Zusatzsensoren extrem kostspielig.

Im Kontrast zu den auf Signalanalyse von zusätzlicher Sensorik basierenden Verfahren wird von Weber /105/ die prinzipielle Verwendbarkeit selbstadaptierender konnektionistischer Modelle zur Maschinendiagnose nachgewiesen. Die Schwierigkeit besteht hierbei in der korrekten Auslegung der Modelle bei der Ausweitung des Verfahrens auf unterschiedliche Komponenten.

Ispaylar /106/ und Plapper /107/, die ebenfalls signalanalytische Methoden zur Maschinendiagnose beschreiben, haben ihren Schwerpunkt auf Profilschienen-Wälzführungen gelegt. So wurde neben der genauen Beschreibung des Betriebsverhaltens zuerst der Nachweis von charakteristischen Frequenzen in Antriebssignalen mittels einer Wavelet-Analyse geführt. Es fehlt jedoch ein Übertrag auf weitere Komponenten mit Wälzkontakt. Da die Verfahren alle auf einer Modellbildung der jeweils betrachteten Komponenten basieren, lassen sie sich nur schwer auf unterschiedliche Bauarten oder gar unterschiedliche Komponententypen übertragen.

Die auf einer Modellbildung basierenden Ansätze wurden von Imiela /108/ aufgegriffen und weiterentwickelt. Seine Arbeit gründet auf dem Ansatz, dass sich die physikalischen Eigenschaften der Maschinenachse verschleißbedingt ändern. In diese Methoden fließen die unterschiedlichsten nichtlinearen Eigenschaften des elektrischen Motors und der Mechanik in die Modellierung ein. Hirschmann /109/ nutzt nur Merkmalswerte für die Beurteilung des Reibzustandes zur Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebseinheiten.

Krüger /110/ entwickelte eine Mischung aus signal- und modellgestützten Methoden. Er leitete aus den antriebsinternen Signalen Kenngrößen ab. Als Beispiel ist eine Kenngröße aus dem Phasenportrait des Motorstroms zu nennen. Die Signalanalyse tritt aber stark hinter die Modellansätze zurück. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den modellgestützten Methoden und den dafür notwendigen Teilmethoden wie Identifikation, Modellbildung und Mustererkennung. Daraus resultierend wird ein Konzept zur Integration in die Steuerungstechnik aufgezeigt.

Die Konzeption und Realisierung eines steuerungsintegrierten Fertigungsprozessüberwachungssystems ist Inhalt der Arbeit von Kaever /111/. Es werden dabei sowohl das Potential auf Basis der verfügbaren Steuerungs- und Antriebsinformationen als auch die zusätzlichen Möglichkeiten durch ergänzende Nutzung externer Sensoren erläutert. Als Schwerpunkte werden die notwendige Signalaufbereitung sowie die Systemstruktur- und Integrationsaspekte inklusive der notwendigen Inbetriebnahmeunterstützung für den Benutzer erarbeitet. Basierend auf der von der Firma Siemens vertriebenen Technik ist ein generisches Systemkonzept entstanden. Der genutzte Rahmen wird in der vorliegenden Arbeit in Abschnitt 6.2 ebenfalls für eine prototypische Umsetzung verwendet.

Die prinzipiellen Möglichkeiten und Werkzeuge sowohl der signalanalytischen als auch der modellbasierten Diagnose fasst Isermann /112/ in seinem Buch zusammen. Er legt seinen Schwerpunkt aber nicht mehr wie in seinen früheren Arbeiten /6/ auf die Werkzeugmaschine, sondern auf das Automobil als in seinem Verschleißzustand zu beschreibendes System. Die einzelnen Diagnosemethoden sind allgemein und umfassend beschrieben.

Im Rahmen der Arbeit von Metzele /113/ sind verschiedene Methoden zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinenhauptspindeln im Sinne einer

zustandsorientierten Instandhaltung diskutiert worden. Dabei liegt der Fokus der Arbeit auf der simultanen Auswertung aller verfügbaren Informationen (auch von zusätzlichen Sensoren) des Hauptspindelsystems mit Hilfe signal- und modellgestützter Analysemethoden, sowie eines aktorischen Systems zur Vermeidung kritischer Betriebszustände der Hauptspindel.

Der Nachweis von charakteristischen Frequenzen eines Wälzlagers in antriebsinternen Signalen wird von Villwock /114/ erbracht. Dieser Nachweis ist in Form einer Frequenzgangmessung geführt. Als Ergebnis stehen grafisch dargestellte Bode-Diagramme zur Verfügung, die augenscheinlich bewertet werden müssen. Eine Anregung mit einem für die Frequenzgangmessung geeigneten Signal wird als notwendig angesehen.

Die drei von Schopp /115/ beschriebenen Verfahren zur Zustandsdiagnose Kugelgewindetriebe setzen ausschließlich auf Signale von zusätzlichen Sensoren. Diese im Rahmen des Projektes OptiLast erstellten Methoden ermöglichen eine zuverlässige Aussage über den Verschleißzustand. Das erste Verfahren /116/ nutzt die erste mechanische Biegeeigenfrequenz als Maßstab. Die weitere Ermittlung des Zustandes basiert auf der Bewertung der zeitlichen Entwicklung der Veränderungen der Schwingungen in den Messsignalen. Sowohl auf Basis einer Messung mit Beschleunigungssensoren als auch auf Basis einer Luftschallmessung kann der Verschleißzustand eines Kugelgewindetriebs einem von drei Bereichen zugeordnet werden /117/. Unter der Voraussetzung gleichbleibender Betriebsbedingungen und der daraus resultierenden Belastung ist beim Übergang vom ersten zum zweiten Bereich von ca. 30 bis 40 % Restlaufzeit auszugehen. Mit dem Eintritt in den dritten Bereich werden noch ca. 10 % Restlaufzeit erwartet.

Der Stand der in der Forschung veröffentlichten Monographien und die Bewertung zur Maschinendiagnose ist graphisch abschließend in Tabelle 3-2 dargestellt.

Kriterien		Methode auf den Antriebsstrang angewendet	Verwendung von antriebsinternen Signalen	Dektion der Schadensart	Automatisch überwachbare Ergebnisse	Eindeutigkeit der Ergebnisse	Kein Expertendilemma	Trennung: Prozess- und Maschinenzustand	Integration in bestehende Steuerungssysteme	Online / Offline Methode	Bereich der Methode
Autor											
Schopp (2009)		●	○	np / p	●	○	●	○	○	On / Off	Z
Metzele (2008)		○	○	p	●	●	●	●	○	On / Off	F/Z
Hirschmann (2007)		○	●	p	○	○	○	○	○	Off	Z
Villwock (2007)		○	●	np / p	○	●	●	○	○	On / Off	F/Z
Imiela (2006)		●	●	np	●	●	●	●	○	Off	Z
Kaever (2005)		●	●	np / p	●	●	●	○	●	On / Off	Z/F
Isermann (2005)		○	●	np	●	●	●	●	○	On	Z/F
Plapper (2004)		○	●	np / p	●	●	●	●	●	On	Z/F
Krüger (1999)		○	○	np / p	○	●	●	●	○	On / Off	Z/F
Ispaylar (1997)		○	○	np / p	○	●	●	●	○	On / Off	Z
Geropp (1995)		○	○	p	●	●	●	○	○	Off	Z
Wirth (1994)		○	○	p	●	●	●	○	○	Off	Z

Kann erfüllt werden:



Kann nicht erfüllt werden:



Z = Zeitbereich, F = Frequenzbereich  
p = Periodische Schadensart  
np = Nicht-periodische Schadensart

Tabelle 3-2: Bewertung des Standes der Forschung

### 3.7.2 Forschungsprojekte

Die Forschung im Bereich der antriebsbasierten Maschinendiagnose hat durch massive öffentliche Förderung ab dem Jahr 2006 an Fahrt gewonnen. So wurde die von dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) durch die Forschungs-

vereinigung Werkzeugmaschinen (FWF) beauftragte Forschung auf breitere wissenschaftliche Basis gestellt.

Von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wurde ab Anfang des Jahres 2006 die Forschergruppe 639 „Gezielte vorbeugende Wartung durch automatisierte Zustandsbeobachtung“ gefördert. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat danach insgesamt neun Verbundprojekte im Bereich der zustandsorientierten Wartung gestartet. In diesem Projektrahmen sind fünf Projekte im Bereich der Werkzeugmaschinen angesiedelt. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Projekte und die bis dato erreichten Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

### **3.7.2.1 FWF Forschungsvorhaben „Maschinen- und Prozessdiagnose I-IV“**

Die Ergebnisse der vier Studien /20, 118, 119, 120/ haben das Potenzial der Maschinendiagnose auf Basis von antriebsinternen Signalen gezeigt. Für die Schäden am KGT wurden Kenngrößen entwickelt, mit deren Hilfe eine Trenddarstellung des Schadensverlaufes möglich ist. Hierzu wurden hauptsächlich Zeitsignale aller verfügbaren Antriebssignale in relativ niedriger Abtastrate verwendet. Neben diesen Zeitbereichskenngrößen für Reibung, Laufruhe, Steifigkeit und Spiel im Antriebsstrang wurden auch Phänomene im Frequenzbereich nachgewiesen und in einer Kenngröße zusammengefasst. Es wurden implementierungsreife Algorithmen entwickelt und in Bezug auf ihren Umsetzungsaufwand bewertet. Die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Ergebnisse sind teilweise in diesem Vorhaben erlangt worden.

### **3.7.2.2 DFG Forschergruppe 639 „Gezielte vorbeugende Wartung durch automatisierte Zustandsbeobachtung“**

Ziel der zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Dissertation noch aktiven Forschergruppe /121/ ist es, Methoden zur Steigerung der Verfügbarkeit von Werkzeugmaschinen durch Automatisierung der Zustandsbeobachtung zu entwickeln. Durch situationsoptimales Planen der Instandhaltung (Predictive Maintenance) am Beispiel der wesentlichen verschleißbehafteten mechanischen Komponenten von Vorschubantrieben mit Kugelgewindetreiben wird ein Konzept für eine reale Bohr-/Fräsmaschine realisiert, das die Verfügbarkeit der einzelnen Maschine maximiert. Während in der ersten

Förderperiode das Ziel erreicht wurde, durch Betrachtung der einzelnen Bauteile des Vorschubantriebs das Gesamtverhalten zu erfassen, soll in der zweiten Förderperiode in komplementärer Ergänzung das Verhalten des integrierten Gesamtsystems betrachtet werden. Darüber hinaus sollen die entwickelten Ergebnisse auf die Untersuchung aller linearen Hauptachsen einer kartesischen Maschine angewandt werden. Damit ist es möglich, Analysemethoden einzusetzen, die sich auf achsübergreifende Informationen stützen. Ein Maschinenmodell wird in die NC-Steuerung integriert, um durch den Vergleich mit der realen Maschine, Rückschlüsse auf den Maschinenzustand ziehen zu können. Das flexible Modellierungs- und Analyseverfahren für die Optimierung der Instandhaltungsstrategie von Fertigungsmaschinen auf Basis einer Petrinetz-Modellierung und einer Monte Carlo-Simulation wird um Kostenaspekte erweitert, um auch Lebenszykluskosten und Betreibermodelle zu analysieren. Alle Methoden sollen in eine gesamtheitliche Steuerungsarchitektur auf einer Steuerungshardware integriert werden. Die Realisierung des gesamten Systems erfolgt möglichst mit den in einer Werkzeugmaschine vorhandenen Ressourcen. Insbesondere soll keine zusätzliche Sensorik eingesetzt werden. Da die vorliegende Arbeit in Teilen in dieser Forschergruppe entstanden ist, werden die Ergebnisse und ihre Bewertung in späteren Kapiteln vorgenommen.

### **3.7.2.3 BMBF „Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung“**

Die im Jahr 2006 gestartete Förderung des BMBF zur Verbesserung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit von Produktionssystemen hat neben dem geforderten Dienstleistungsaspekt auch neue Forschungsergebnisse erzielt. Es wurden insgesamt 9 Verbundprojekte mit 65 Partnern aus Industrie und Forschung unterstützt. Im Rahmen der Abschlussveranstaltung "Verfügbarkeit von Produktionssystemen – Maschinen, Komponenten und Verfügbarkeitsmanagement" am 24. - 25. Juni 2009 im Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz wurden die erreichten Forschungsergebnisse präsentiert. Im Folgenden werden die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Ergebnisse aus fünf für diese Dissertation relevanten Projekten (fett markierten) zusammengefasst:

- **VeraPro** - Ganzheitliches, regelbasiertes Verfügbarkeitsmanagement von Produktionssystemen  
Innerhalb des Verbundprojektes VeraPro konnte ein ganzheitliches Konzept

entwickelt und umgesetzt werden, das einem verbesserten Management sowie der Steigerung der Verfügbarkeit von Produktionssystemen dient. Dazu wurde im Kern ein flexibles und anpassungsfähiges Zustandsinformationssystem konzipiert, dass durch eine Regelbasis immer wieder mit neuen Erkenntnissen erweitert werden kann und unter der Anforderung der Ganzheitlichkeit neben der technischen Verfügbarkeit auch die organisatorische Verfügbarkeit mit in die Zustandsbewertung einbezieht. Für ein verbessertes Management der Verfügbarkeit von Produktionssystemen setzt sich der Lösungsansatz somit aus einer durchgängigen, prozessbegleitenden Erfassung von Maschinen-, Betriebs- und Prozessdaten zur zeitnahen Reaktion auf aktuelle Betriebszustände zusammen. Während der Laufzeit des Projektes wurden verschiedene Tools entwickelt und in das VeraPro-System integriert, die zum einen eine Zusammenführung heterogener Daten auf eine homogene Systemplattform ermöglichen und zum anderen Möglichkeiten schaffen, die Verfügbarkeitsrelevanten Daten für eine bessere Zustandserfassung und -bewertung mittels Regeln zu verknüpfen /122/.

- **VERSTAND** - Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung - Stellhebel zur Steigerung der Verfügbarkeit produzierender Unternehmen  
In produzierenden Unternehmen weist die Instandhaltung wesentliche Stellhebel auf, um die Verfügbarkeit und Produktivität nachhaltig zu steigern. Zu diesem Zweck wurden im BMBF-Projekt „VERSTAND“, Methoden und Werkzeuge entwickelt, um die Instandhaltung verfügbarkeitsorientiert zu ermöglichen. Die Forschungsaktivitäten gliederten sich dabei in technologische und organisatorische Aspekte. Für die Organisation der Instandhaltung wurden Methoden entwickelt, um die Wahl der Instandhaltungsstrategie anwendungsspezifisch zu treffen. Auf technologischer Ebene wurden dabei Lösungen erarbeitet, die durch eine geeignete Maschinen-/Betriebs-Daten-Erfassung Anbindung (MDE/BDE) einen durchgängigen Informationsfluss von der Maschine bis in das Enterprise Resource Planning System (ERP) realisieren. So wurde die Möglichkeit geschaffen, Instandhaltungs- und Produktionskennzahlen in Echtzeit zu generieren und die Maschinen verfügbarkeitsorientiert instand zu halten. Wesentlich war hierfür neben der Konzeption einer unternehmensunabhängigen IT-Infrastruktur die Entwicklung eines Quasistandards, um unterschiedlichste Maschinensteuerungen an die Infrastruktur anzubinden /123/.
- **SMART STAMPING** - Gestaltung von Dienstleistungen basierend auf "intelligenten" Presse-Werkzeugsystemen

- **ZUPACK** - Zustandsorientierte Instandhaltung von Verpackungsmaschinen /124/.

- **OPTILAST** - Steigerung der Verfügbarkeit durch Überlastbegrenzung und prozessparallele Last- und Verschleißüberwachung der Maschinentechnik

Im Fokus des Projekts OPTILAST standen die Analyse und das Monitoring der auf die Maschinentechnik wirkenden Belastungen, die Auswirkungen dieser Belastungen auf den Verschleiß kritischer Komponenten, das Ableiten von Strategien für einen last- und verschleißoptimalen Betrieb der Maschine sowie die Erarbeitung von Dienstleistungsangeboten für eine effiziente, zustandsabhängige Instandhaltung. Wesentliche Ergebnisse des Projekts sind Methoden zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben, die Ermittlung von Komponentenbelastungen mittels simulationsbasiertem Übertragungsverhalten sowie ein steuerungsintegrierter Ansatz zur Online-Belastungserfassung (Belastungsintegral /125/). Auf Basis dieser Ergebnisse konnten neue Ansätze für die Analyse von Ausfallkosten umgesetzt und daraus Konzepte für unterschiedliche Dienstleistungen entwickelt werden /126/. Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit wurden innerhalb dieses Projektes erstellt.

- **ZuPRO** - Zuverlässige Produktionsanlage

Das Ziel des Projektes "ZuPRO" war die Verfügbarkeitssteigerung von Produktionsanlagen durch den Einsatz eines umfassenden Diagnosemoduls. Zentrales Element des Diagnosemoduls ist eine softwarebasierte Korrelationsmatrix, die auf Basis einer durchgängigen Mehrgrößenauswertung verlässliche Zustandsbeurteilungen für die hoch belasteten Schlüsselkomponenten (z.B. Lager, Führungen, Hauptspindeln etc.), insbesondere in Werkzeugmaschinen ermöglicht /127/.

- **VIPRO** - Vorausschauende zustandsabhängige Instandhaltung an Produktionsmaschinen

Projektziel von VIPRO war es, Maschinenhersteller und -betreiber in die Lage zu versetzen, anhand von Kennwerten den Zustand von Maschinen zu verfolgen und die Restlebensdauer der überwachten Baugruppen vorauszusagen. Dazu wurden ausgewählte Maschinenbaugruppen unter maximaler Nutzung vorhandener Signale aus Steuerung und Antrieben auch mit Hilfe von Sensoren überwacht, die Messdaten verdichtet und durch intelligente Mess- und Auswertemethoden der Zusammenhang zwischen Sensordaten und Verschleißzustand der Maschine hergestellt. Die ermittelten Kennwerte sind über eine internetfähige Service-

-Plattform abrufbar und damit für unterschiedliche Nutzer (Bedienpersonal, Wartungszentrale, Maschinenhersteller) im Sinne der zustandsorientierten Instandhaltung verwendbar. Aufgrund der ermittelten Kennwerte können Wartungs- und Instandhaltungsanweisungen angezeigt werden /128/.

Die Bewertung der einzelnen Forschungsvorhaben ist in Tabelle 3-3 graphisch wiedergegeben. Die beiden BMBF-Projekte (ZUPACK und SMART STAMPING), die nicht im Umfeld der WZM durchgeführt wurden, fallen aus der Bewertung.

Projekt \ Kriterien	Methode auf den Antriebsstrang angewendet	Verwendung von antreibsinternen Signalen	Detection der Schadensart	Automatisch überwachbare Ergebnisse	Eindeutigkeit der Ergebnisse	Kein Expertendilemma	Trennung: Prozess- und Maschinenzustand	Integration in bestehende Steuerungssysteme	Online / Offline Methode	Bereich der Methode
Projekt										
Maschinen- und Prozessdiagnose I-IV	●	●	np / p	●	●	●	●	●	On	Z/F
DFG FG 639	●	●	np / p	●	●	●	●	●	On / Off	Z/F
VeraPro	●	●	p	●	●	●	●	●	On / Off	F
VERSTAND	●	●	p	●	●	●	●	●	On	F
OPTILAST	●	●	np / p	●	●	●	●	●	On / Off	F/Z
ZuPRO	●	●	p	●	●	●	●	●	Off	F
VIPRO	●	●	p	●	●	●	●	●	Off	F

Kann erfüllt werden:

Kann nicht erfüllt werden:

Z = Zeitbereich, F = Frequenzbereich  
 p = Periodische Schadensart  
 np = Nicht-periodische Schadensart

Tabelle 3-3: Bewertung des Standes der Forschungsprojekte

Die Forschungsergebnisse dieser Arbeit sind während der drei fett markierten Projekte FWF „Maschinen- und Prozessdiagnose I-IV“, DFG „Forschergruppe 639“ und BMBF „OptiLast“ erlangt worden.

### **3.8 Fazit und Bewertung des Standes der Forschung**

Aus dem Stand der Forschung ist ein starker Trend zum Verzicht auf zusätzliche Sensoren zu entnehmen. Ziel ist es, Verfahren zur sensorlosen Maschinendiagnose zu entwickeln, welche nur mit den Signalen der Antriebe auskommen. Signalanalytische und modellbasierte Methoden sind häufig in einander überführbar.

Das Gütekriterium und die Ordnung für die Erstellung des Modells zu bestimmen, stellt die eigentliche Schwierigkeit dar (siehe Abschnitt 2.2.5.1). Durch die Kopplung von Diagnosemöglichkeit und Modellzuständen bzw. -ordnungen wird die Diagnose stark eingeschränkt. Phänomene, die sich erst während des Betriebes entwickeln und für die kein Zustand vorgesehen wurde, können nicht erkannt werden. Weitere Fortschritte für eine Diagnose auf Basis von Modellen und Beobachtern sind direkt von den Fortschritten im Bereich der Simulationstechnik abhängig. In der technischen Anwendung werden nur rudimentäre modellbasierte Methoden genutzt, da Modelle in der erforderlichen Güte kaum wirtschaftlich verfügbar gemacht werden können.

Die signalanalytischen Methoden, die zusätzliche Sensoren nutzen, sind für rein rotative Komponenten etabliert und im Bereich der Forschung durch die Arbeit von Schopp auf die translatorische Komponente Kugelgewindetrieb übertragen.

Die Ergebnisse der signalanalytischen, antriebsinternen Methoden basieren entweder nur auf Signalen im Zeitbereich oder sind nur graphisch dargestellt und nicht automatisiert bewertbar. Ein für alle wälzenden Komponenten gültiger Ansatz fehlt sowohl im Stand der Technik als auch in der Forschung.

Ein flächendeckender Einsatz der bis dato entwickelten Methoden scheitert oft an der schwierigen und anspruchsvollen Nutzung. Normalerweise ist ein manuelles Einstellen und Optimieren der Verfahren unvermeidlich. Dementsprechend ist eine der wichtigsten Herausforderungen die Entwicklung von Diagnoseverfahren welche ohne Eingriff und signalanalytisches Fachwissen des Bedieners auskommen und das Ergebnis möglichst einfach darstellen /95/.

#### 4 Diagnostik für antriebsinterne Signale

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Grundlagen für eine Erfassung des Zustands des Antriebsstranges auf Basis der antriebsinternen Signale zu legen und dabei auf eine spezielle Anregung zu verzichten. Eine spezielle Anregung schränkt die Nutzbarkeit der Diagnose ein. Die dadurch nötige Unterbrechung der Produktion senkt die Akzeptanz der Hersteller und Betreiber erheblich. Die Entscheidungen von Betreibern der Werkzeugmaschinen werden vorrangig von wirtschaftlichen Gründen bestimmt, so sind weitere Kosten wie für zusätzliche Sensoren nicht erwünscht oder nur bedingt durchsetzbar.

Die aus dem Stand der Technik und Forschung bekannten Methoden setzten entweder auf die Nutzung von zusätzlicher Sensorik oder ein Zusammenspiel von Beobachter und Modell der elastischen Mechanik. Hier ist die nötige Modellgüte als Schlüsselkompetenz anzusehen. Des Weiteren kann der modellbasierte Ansatz als unnötiger Umweg angesehen werden, da aus den antriebsinternen Signalen mit Mitteln der Signalanalyse ein Modell erstellt wird. Dieses Modell wird dann unter Nutzung der antriebsinternen Signale für die Diagnose verwendet. Die eigentliche Modellbildung ist nicht nötig, wenn direkt geeignete Ergebnisse der Signalanalyse für die Diagnose vorliegen. Als geeignetes Ergebnis kann jedes Verfahren, das eine augenscheinliche Beurteilung benötigt, ausgeschlossen werden.

Weder aus dem Stand der Technik noch aus der Forschung ist ein Verfahren zur Diagnose für Antriebsstränge zu entnehmen, das allen aufgestellten Anforderungen entspricht:

- automatisch überwachbare Ergebnisse,
- Eindeutigkeit der Ergebnisse,
- kein Expertendilemma,
- Trennung von Prozess- und Maschinenzustand und
- Integration in bestehende Steuerungssysteme.

Der Mangel an automatisch überwachbaren signalanalytischen Verfahren für die Zustandsbeschreibung von Antriebssträngen soll durch die Diagnostik für antriebsinterne Signale abgestellt werden.

Im folgenden Kapitel werden die neuen Methoden und die Vorgehensweisen der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren der antriebsbasierten Diagnose zunächst abstrakt und allgemein beschrieben. Dabei wird auch der prinzipielle Funktionsnachweis der Maschinendiagnose auf Basis von antriebsinternen Signalen geführt. Hierzu erfolgt zuerst eine Analyse der wälzenden Komponenten des Antriebsstranges sowie der Schadensentstehung und -entwicklung. Eine zentrale Aufgabe bei der Entwicklung von Methoden zur Maschinendiagnose ist die Formulierung von Schlussfolgerungen, die eine Verbindung zwischen den beobachteten Phänomenen und ihren Ursachen herstellt.

Es wird zwischen Phänomenen, die lediglich durch den ordnungsgemäßen Betrieb verursacht werden, und Phänomenen, die einen Schaden als Quelle haben, unterschieden. Es erfolgt der Nachweis, dass diese Phänomene sich in den zur Verfügung stehenden Signalen detektieren lassen. Des Weiteren werden für die Schadensphänomene passende und mögliche Schadenszenarien aufgezeigt und in Bezug auf die Auswirkungen und mögliche Messmethoden bewertet.

## 4.1 Grundlagen

Als Basis für eine theoretische Analyse erfolgt zunächst eine geordnete Aufstellung der im Bereich der Werkzeugmaschine üblichen Randbedingungen. Die Betrachtungen werden durch das Ziel, nur mit den am Antriebsstrang vorhandenen internen Signalen auszukommen, geleitet. Abschließend werden künstliche Schadenszenarien abgeleitet, mit dem Zweck die Laufzeit der Versuche zu kürzen und die gewünschte Verschlechterung des Zustandes zu erreichen.

### 4.1.1 Mögliche Signalquellen für die Diagnose

Der Anspruch der antriebsbasierten Maschinendiagnose liegt darin, ohne weitere zusätzliche Sensoren auszukommen. Für die Maschinendiagnose sind Signale relevant, aus denen auf auftretende Kräfte und Momente, deren Ursachen und Auswirkungen und damit auf Eigenschaften von Komponenten, geschlossen werden kann. Somit ist die Datenbasis hauptsächlich in den schon in der Steuerung und Antriebsregelung vorhandenen Signalen zu sehen (Bild 4-1) /129/. Die Funktionsweise der hierfür verbauten Sensoren ist in /11/ und /16/ ausführlich beschrieben.

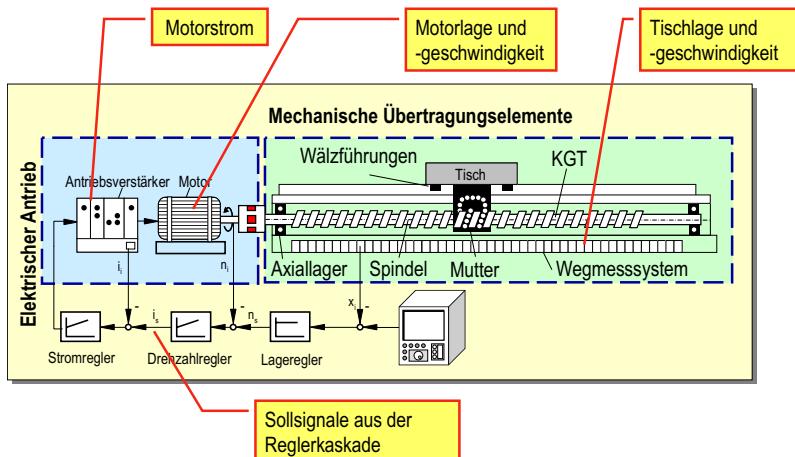


Bild 4-1: Signalquellen der antriebsbasierten Diagnose /23/

Die eindeutige, zuverlässige Auswertung und Interpretation im Rahmen der Diagnose stellt hohe Anforderungen an die aufgenommenen Signale. Dies betrifft deren Werteauflösung und Aufnahmetakt, die beschränkende Faktoren für die Detektion und Interpretation von Phänomenen darstellen. Des Weiteren ist auch die Freiheit von überlagerten Störungen und Schwankungen der Messzeit, die zur Detektion nicht existenter Fehler führen können, anzustreben. Da nicht nur die einzelnen Signale, sondern auch ihr Zusammenspiel einen großen Informationsgehalt haben, ist es unbedingt notwendig, dass das diagnostisch genutzte Signalensemble immer zeitsynchron von der Antriebsregelung zur Verfügung gestellt wird.

#### 4.1.2 Signalflussplan zwischen Schadensor und Signalerfassung

Ein bedeutender Einflussfaktor, der bei der Diagnose berücksichtigt werden muss, ist die Signalweiterleitung von der beschädigten Komponente, also der Stelle der Signalentstehung, zum Ort der Signalerfassung (Bild 4-2). Die Form und Amplitude der Anregung durch die Bewegung des Antriebs und somit die spektrale Zusammensetzung haben wesentliche Auswirkungen auf die Form des durch den Schaden verursachten Signals. Eine Anregung durch den Bearbeitungsprozess ist zu vermeiden und auszuschließen. Eine Anregung durch andere Antriebe, außerhalb des betrachteten

Antriebsstranges, ist jedoch prinzipiell denkbar, wird aber nach den in Abschnitt 1.2 durchgeföhrten Abgrenzungen nicht im Rahmen dieser Arbeit betrachtet.

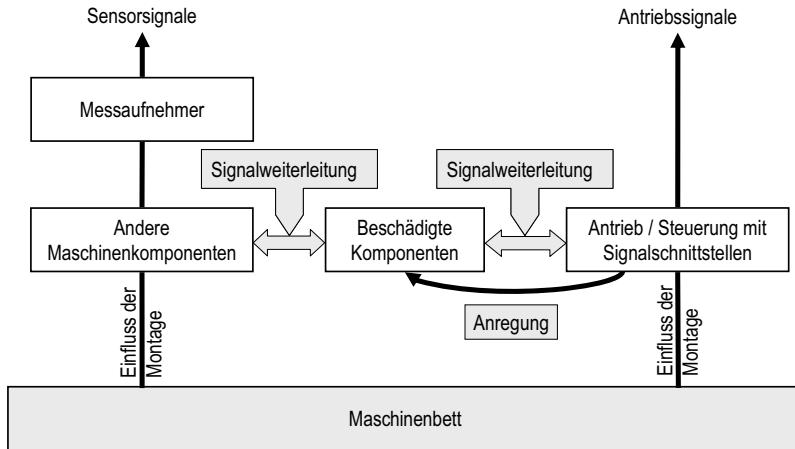


Bild 4-2: Signalflussplan nach /118/

Zur Nutzung der signalanalytischen Maschinendiagnose zur Erkennung von sich deutlich im Signalbild manifestierenden Schäden ist im Allgemeinen eine entsprechende Parametrierung der Bewertungs- und Auswertungsalgorithmen in Verbindung mit einer geeigneten Wahl des Messsignals und Messortes ausreichend. Um ein optimales Ergebnis der Diagnose mit quantitativen Aussagen zu erzielen, muss jedoch für jedes Phänomen die entsprechende Übertragungsfunktion der Signalweiterleitung durch die Maschine berücksichtigt werden. Es kann von einem Einfluss der Montage der einzelnen Komponenten beispielsweise auf die Form der Dämpfung der Signalweiterleitung ausgegangen werden.

Vorsicht ist bei der Übertragung von Diagnose- und Überwachungskriterien von einer Maschine auf andere geboten. Wie in Bild 4-3 am Beispiel einer Vorschubeinheit mit getauschtem Festlager verdeutlicht, beeinflussen alle Maschinenkomponenten das Übertragungsverhalten zwischen Schad- und Messort hier in Form eines Absinkens der ersten mechanischen Eigenfrequenz und der damit verbundenen Änderung des Amplitudenganges. Ein umfassendes, automatisches Diagnosesystem muss stets durch einen Inbetriebnahmezyklus bzw. eine Messung im Urzustand (km0-Messung) an die

speziellen Eigenschaften einer Maschine angepasst werden. Diese Anpassung kann auch im Hintergrund erfolgen oder automatisch initiiert sein und erfolgt mit dem später genutzten Anregungssignal. Schlussendlich ist der Einfluss der immer unterschiedlichen Montage nicht zu vernachlässigen.

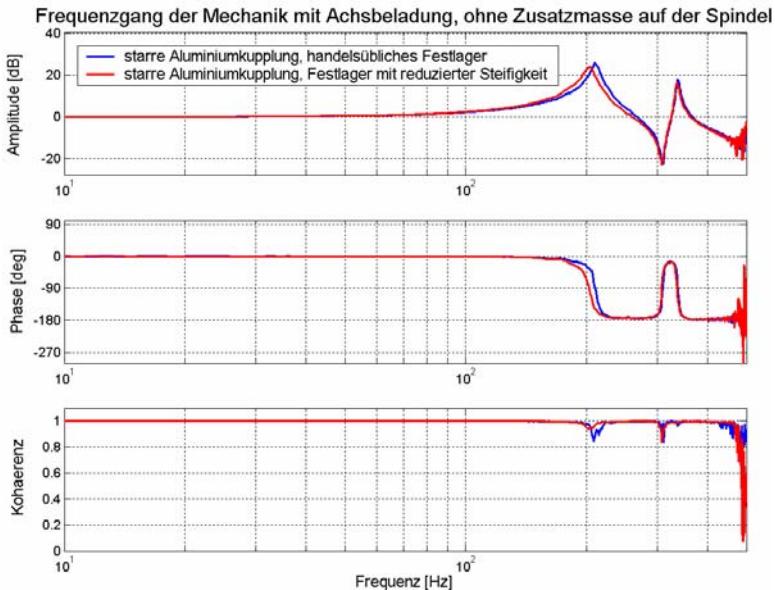


Bild 4-3: Bodediagramm unterschiedlicher Wälzlagertypen

#### 4.1.3 Ursache-Wirkungsprinzip

Formalisierte Wirkungsbeziehungen sind die Grundlage für die Deutung und Beschreibung von den Zusammenhängen zwischen Phänomenen und ihrer Entstehung durch einen Schaden im Rahmen der Maschinendiagnose /29/. Wie Bild 4-4 zeigt, lässt sich eine Reihe von Schritten benennen, die ausgehend von einer Schadensursache über ihre Auswirkungen auf das Maschinenverhalten zu Phänomenen als mess- und beschreibbare Veränderungen in den Maschinensignalen führt. Beispielsweise verursacht Schmiermittel mangel über den erhöhten Verschleiß von Kontaktflächen der Wälzpaarung eine veränderte Schwingungsentstehung im Betrieb eines Antriebs, die

sich als Spitzen bei bestimmten Frequenzen im Leistungsspektrum des Motorstroms manifestiert.

Eine Möglichkeit der Diagnose von Schäden besteht darin, von den detektierten Phänomenen über die Wirkungskette zurück auf den Schaden und die Schadensursachen zu schließen. Die Phänomene müssen sich aus dem Systemverständnis und dem Systemmodell ergeben. Der Aufbau und die Erklärung von Phänomenen folgen dem Fehlermodellansatz aus Abschnitt 2.2.5.1. Um gemessene Daten für die Diagnose nutzen zu können, müssen die Schadenseffekte analytisch oder heuristisch durch Phänomene beschrieben werden, wodurch ihnen ein Informationsgehalt zugeordnet wird /110/.

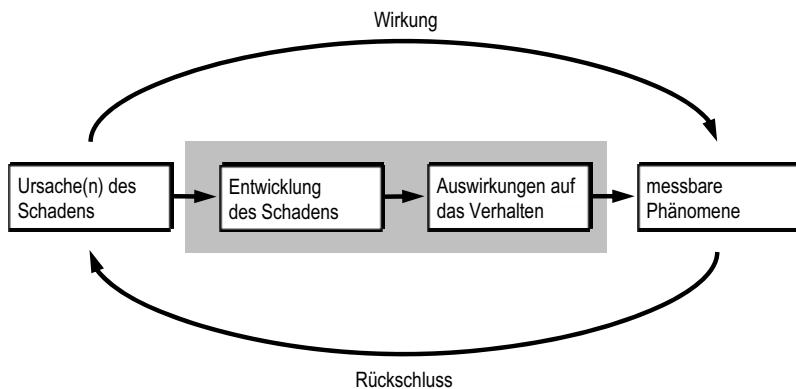


Bild 4-4: Ursache-Wirkungsprinzip /118/

Die Gesamtheit der so formulierten Phänomene kann sich in ihrer Manifestation im Signalbild und in den mit ihnen assoziierten Wirkungsbeziehungen überlappen, weshalb sie zu einem Wirkungs- und Deutungsbaum integriert werden muss oder es muss eine allgemein gültige Aussage getroffen werden. Bei der Erstellung des Baums ist darauf zu achten, dass ein Signalbild im Hinblick auf das Diagnoseergebnis eindeutig interpretiert werden muss und dass es nicht zu sich widersprechenden Ergebnissen kommt, wodurch der Entscheidungsfindungsprozess in übergeordneten Überwachungssystemen blockiert werden kann. Dazu müssen Klassen von Phänomenen oder einzelne Phänomene definiert werden. Somit wird die Diagnose darauf sensibilisiert, welche Phänomene sie beachten soll und welche Phänomene unter den vorherrschenden Betriebsbedingungen als unbedenklich gelten können.

#### 4.1.4 Ableitung künstlicher Schadensszenarien

Zuerst wurden im Rahmen von Befragungen /19, 20/ von mehreren WZM-Herstellern die im alltäglichen Betrieb vorkommenden Schadensszenarien an Werkzeugmaschinen zusammengefasst. Die daraus abgeleiteten und aufgelisteten Szenarien dienen der möglichst realistischen Nachbildung und Provokation von Schäden am Versuchsstand. Die im Rahmen der Befragungen erhobenen Daten können grob zu fünf Schadensszenarien zusammengefasst werden. Aus diesen im Betrieb üblichen Schadensszenarien sind fünf künstliche Möglichkeiten für die Verwendung am Versuchsstand abgeleitet worden:

- Pitting durch künstliches Einschleifen von Vertiefungen
- Pitting durch künstliches Aufbringen von Erhöhungen
- Vorspannungsverlust durch Schmutz- oder Fremdkörpereintrag
- Mangelschmierung
- Verschleißversuch durch maximale Last ( $< C_{dyn}$ )

Es existieren mehrere mögliche Abläufe für den Ausfall der mechanischen Komponenten, die in Kapitel 4.4 genauer analysiert und auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. Am Lebensdauerende steht fast immer der totale Verlust von Vorspannung in mechanischen Übertragungselementen, die zu Spiel und dann Lose führen. In Sonderfällen kann es auch zu einer Blockade der Bewegung kommen.

Als eine der Möglichkeiten einen Schaden künstlich einzuprägen, wird in der Literatur /114/ im Bereich der Wälzlagertechnik das Einschleifen einer Rille genannt.

#### 4.2 Unterscheidungsmerkmale der Phänomene

Durch die Definition des Begriffes Phänomen sollen alle möglichen Erscheinungsbilder von Schäden in Signalen erfasst werden. Konkret bedeutet dies hier, dass sich in einem Verhalten oder einer Veränderung des Verhaltens einer Antriebsachse ihr Zustand widerspiegelt. Daraus ergibt sich dann eine Abhängigkeit von dem Zustand der Antriebsachse und dem gemessenen Signalbild. Für die Klassifizierung und Zuordnung eines Phänomens zu einem Vorgang in der Mechanik muss auf Modellwissen zurückgegriffen werden.

Beispielhaft ist dies in Bild 4-5 skizziert. Als Modellwissen werden die durch die Bewegung entstehenden und durch die Geometrie der Wälzpaarung bestimmten charakteristischen Frequenzen bzw. Ordnungen vorausgesetzt. Ein Schaden an einem Wälzlager als Bestandteil des Antriebsstrangzustands zeigt sich – hier wird durch einen künstlichen Schaden eine Impulsreihe erzeugt, die aus den Messsignalen extrahiert wird – als Teil des Signalbilds. Da der Einfluss periodisch ist, kann er aus der Spektral-darstellung in Form einer erhöhten Schwingungsanregung bei charakteristischen Frequenzen als Phänomen beobachtet werden.

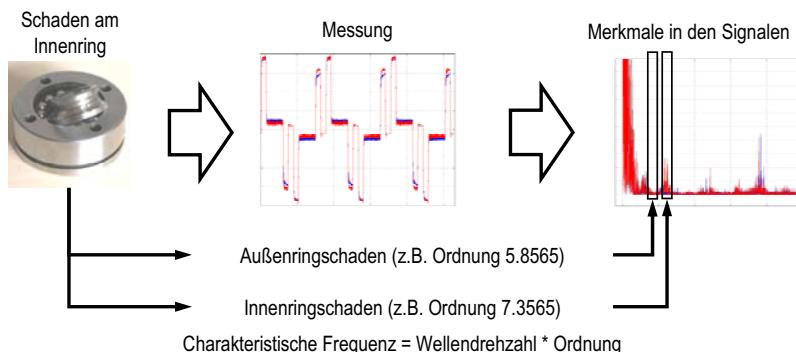


Bild 4-5: Beispiel für ein Phänomen

Daher spielen die während des Betriebes an einem Antriebsstrang auftretenden Phänomene für die Diagnose eine zentrale Rolle. Jedoch ist nicht jedes Verhalten einem Schaden zuzuordnen. Es bedarf hier einer Trennung zwischen schadens- und betriebsbedingten Phänomenen. Eine Zuordnung von Phänomenen zur Schadensursache erfolgt in Kapitel 4.1.3 durch das Ursache-Wirkungsprinzip.

#### 4.2.1 Schadensbedingte Phänomene

Wie oben ausgeführt, sind primär schadensbedingte Phänomene für die Maschinen-diagnose von Interesse. Diese Phänomene haben als unausweichliche irreversible Folge einen Fehlerzustand der Maschine. Dagegen resultieren die im nächsten Abschnitt behandelten betriebsbedingten Phänomene aus temporären, reversiblen Effekten, die

durch die spezifischen Betriebsbedingungen einer Maschine verursacht werden und ebenfalls Einfluss auf das Signalbild nehmen.

#### **4.2.2 Betriebsbedingte Phänomene**

Im Rahmen der Diagnose müssen betriebsbedingte Phänomene klar gegen schadensbedingte Phänomene abgegrenzt werden, da diese keine dauerhaften Veränderungen des Maschinenzustandes repräsentieren, aber dennoch zu Veränderungen im Signalbild führen.

Die von einer Vorschubachse aufgenommene elektrische Energie wird zur Überwindung der Reibung, sowohl zum Beschleunigen des Tisches als auch der Massenträgheiten und zur Deckung des Verlusts durch Maschinenschwingungen genutzt. Der Umfang, in dem dies geschieht, ist abhängig von den Maschinenparametern, wobei sich diese nicht nur über den Lebenszyklus der Komponenten, sondern auch aufgrund der Betriebsbedingungen verändern.

Im Rahmen einer ersten Versuchsreihe, mit dem Ziel das normale Betriebsverhalten eines Antriebsstranges /130/ zu erfassen, hat sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Temperatur des Wälzlagers und der Stromaufnahme gezeigt (Bild 4-6). Diese Versuchsreihe wurde mit dem Ziel gestartet, ohne weitere Manipulationen das Verhalten (km0-Messung) der in Anhang A.2 beschriebenen Versuchsachse aufzunehmen. Das in Bild 4-10 aufgeführte Sollprofil wurde der Versuchsachse vorgegeben. In diesem Fall ist ein Phänomen aufgetreten, welches im normalen Betrieb als unbedenklich zu werten ist. Die Maschinendiagnose muss dieses Phänomen daher ignorieren und darf die erhöhte Stromaufnahme nicht automatisch mit einer schadbedingten erhöhten Reibung assoziieren.

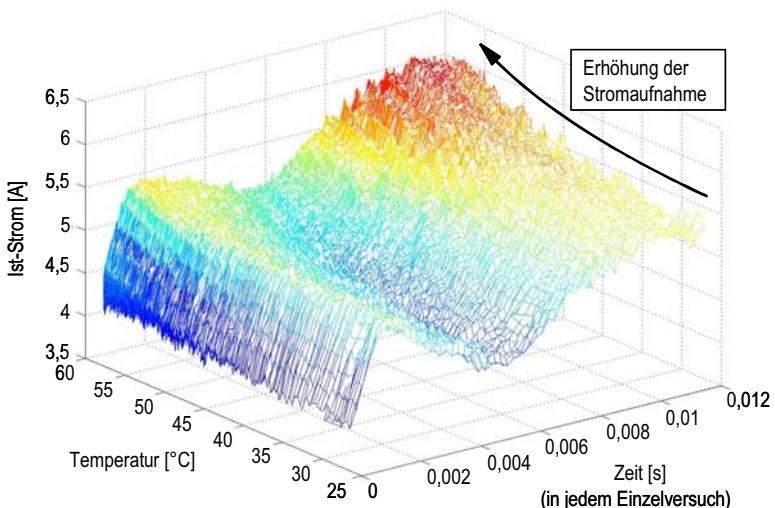


Bild 4-6: Betriebsbedingtes Phänomen

Auch durch die Mechanik verursachte Phänomene, wie die Abhängigkeit der ersten Eigenfrequenz von der Position der KGT-Mutter /44/, dürfen das Diagnoseergebnis nicht verfälschen. Dieses Phänomen ist sowohl aus der Modellbildung ersichtlich, da die axiale Steifigkeit /131/ als Funktion der Mutterposition berechnet wird, als auch am Prüfstand messbar. In Bild 4-7 wird dieses Phänomen für den in Abschnitt 4.3.2.1 verwendeten Prüfstand dargestellt. Es wurden über den gesamten Verfahrbereich kontinuierlich hintereinander 50 Sinus-Sweeps durchgeführt und jeweils in Form eines Bodediagramms der jeweilige Amplitudengang berechnet.

Abgebildet ist der Verlauf der ersten mechanischen Eigenfrequenz in Form einer Draufsicht, die Höhe der Amplitude ist farblich aufgetragen. Die beiden senkrechten Linien zeigen die Extrema der Eigenfrequenz von 50 Hz und 51,5 Hz, die diagonale Linie den linearisierten theoretischen Verlauf der ersten mechanischen Eigenfrequenz über die gesamte Länge des KGT. Der dargestellte Verlauf zeigt das zu erwartende, positions-abhängige Verhalten auf. Bei Messungen muss dieses betriebsbedingte Phänomen implizit oder explizit berücksichtigt werden, um eine fehlerhafte Diagnose zu vermeiden.

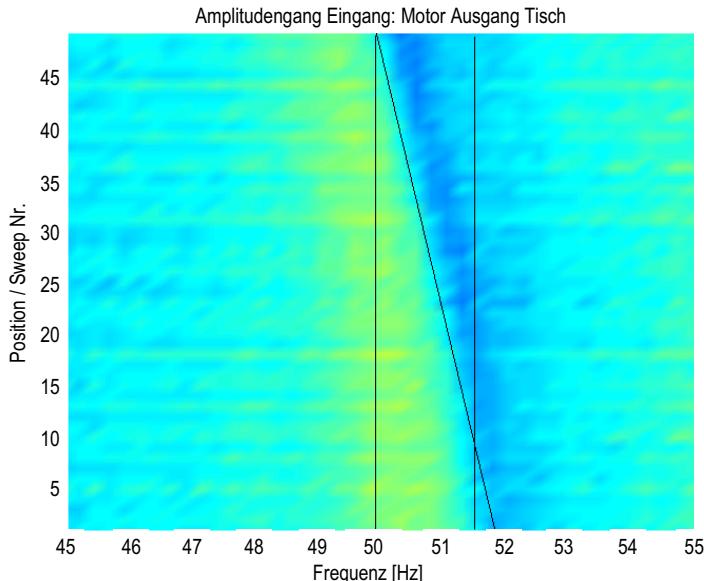


Bild 4-7: Positionsbedingtes Phänomen /118/

#### 4.3 Nachweis der Schadensphänomene in Antriebssignalen

Bis jetzt ist der Nachweis von Schadensphänomeren in den Antriebssignalen nur unter bestimmten Bedingungen erbracht worden. Dieser wurde für Wälzlager in einem eigenen Prüfstand im Rahmen einer Frequenzganganalyse der Mechanik /114/ und für Linearführungen mit Hilfe einer Wavelet-Analyse /107/ erbracht. Um einen Nachweis unter Betriebsbedingungen führen zu können, wurde eine Reihe von Versuchen gemacht. Hierbei wurden sowohl spezielle Versuchsstände als auch gesamte Antriebsstränge aus Werkzeugmaschinen betrachtet. Ziel dieser Versuchreihe ist es, den prinzipiellen Ansatz der Diagnose auf Basis von antriebsinternen Signalen zu verifizieren. Die dann erkannten Phänomene werden durch das Ursache-Wirkungsprinzip auf die Schadensursache zurückgeführt und durch die in Absatz 4.1.4 künstlichen Schadensszenarien provoziert. Die hierfür verantwortliche Wirkungskette der Ursachen wird in den folgenden Abschnitten aufgebaut.

Alle innerhalb dieses Abschnittes gemachten Versuche sind mit einer Kombination aus kommerziell erhältlichen Umrichtersystemen und einem frei programmierbaren Prototyping System der Firma dSPACE zur Regelung und Messung durchgeführt worden. Die Datenaufnahme erfolgte immer mit den am ISW entwickelten /132/ dSPACE-Erweiterungskarten. Meist haben die dSPACE-Systeme auch die Lage- und Drehzahlregelung übernommen. Die so gewonnenen Daten wurden mit Matlab ausgewertet. Die jeweilige genauere Versuchsbeschreibung ist im Anhang aufgeführt.

#### **4.3.1 Wälzlager an einer Index V100 Achse**

Im Rahmen dieses Versuches sollte der Nachweis von Schadensphänomenen unter möglichst realistischen Bedingungen erbracht werden. Als Versuchsträger diente ein Antriebsstrang einer Achse einer Maschine des Typs V100 der Firma Index. Untersucht wurde das axiale Wälzlager des Kugelgewindetriebs. Als erstes Schadensszenario wurde die Mangelschmierung /133/ benutzt. Der konstruktive Aufbau, die Lebensdauerberechnung und charakteristische Frequenzen von Wälzlagern sind /134/ zu entnehmen.

##### **4.3.1.1 Ursache-Wirkbeziehung für das axiale Wälzlager**

Bild 4-8 stellt die Wirkbeziehungen beim Wälzlagerverschleiß und die daraus abgeleiteten Möglichkeiten zu einer diagnostischen Erfassung entsprechend Abschnitt 4.1.3 als Graph dar.

Mangelhaftes oder fehlendes Schmiermittel im Wälzlager führt unmittelbar zu einer erhöhten Reibung an den Kontaktflächen von Wälzkörpern und Laufflächen. Über einen längeren Zeitraum hinweg kommt es zu einer Veränderung der Oberflächen, wobei geringe Inhomogenitäten des Materials zu einer ungleichmäßigen Zunahme der Rauheit führen. In einem selbstverstärkenden Prozess entstehen lokale Depressionen, die von den Wälzkörpern überrollt werden und zu einem Schwingungseintrag in den KGT führen.

Wie Bild 4-9 zeigt, pflanzt sich das so entstandene Signal über die kraftübertragenden Komponenten fort und ist in Form von periodischen Veränderungen von Lage-, Beschleunigungs- und Stromsignalen messbar.

Der Schmiermittelmangel und die abnehmende Oberflächengüte haben zusätzlich ein erhöhtes mittleres Reibungsmoment zur Folge. Dieses wirkt sich in Form eines Anstieges des Motorstroms bei gleicher Drehzahl aus. Durch die größere Verlustleistung kommt es zu einer steigenden Lagertemperatur, die über Wärmedehnungseffekte ihrerseits Auswirkungen auf die an das Axiallager angrenzenden Komponenten hat.

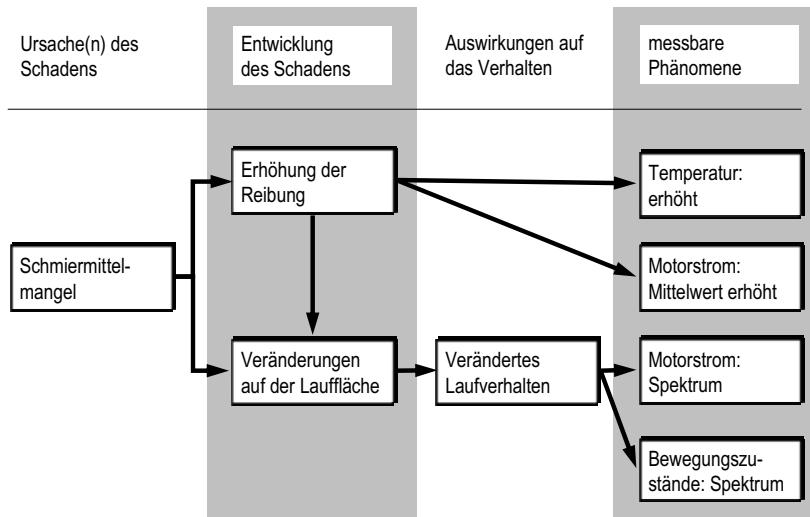


Bild 4-8: Wirkbeziehungen und Detektion für Verschleiß bei Wälzlagern mit Schmiermittelmangel /118/

Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich das Vorgehen für die Diagnose der Wälzlagerschäden. Als Datenquellen wurden alle Aufnehmer und Signale aus der Regelung genutzt. Dabei wurden die sich durch einen kurzen Übertragungsweg mit dem Lager auszeichnenden Messorte (der Motorstrom und die Ausgaben des indirekten Messsystems) zuerst betrachtet. Ergänzend wurde ein Temperatursensor im Lager eingesetzt, um ein Referenzsignal bereit zu stellen.

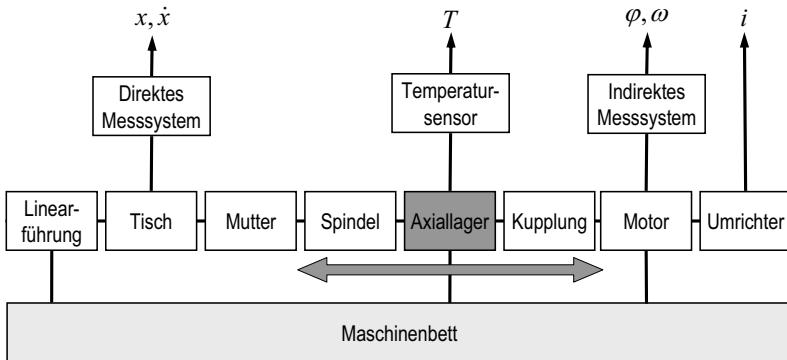


Bild 4-9: Signalweiterleitung bei Wälzlagerschäden /118/

Als zuerst zu bewertende Methoden kommen die Mittelwertbildung des Momentenstrombetrags über eine Referenzfahrt und die Spektraldarstellung der genannten Signale zur Auswertung und zum Einsatz. In den Spektren werden insbesondere charakteristische Überrollfrequenzen des Axiallagers betrachtet, die das Auftreten von Oberflächenschäden anzeigen (Vgl. Tabelle 4-1). Für die Bestimmung der charakteristischen Überrollfrequenzen sind folgende Geometriedaten des INA ZKLF 2575.2 RS Lagers nötig:

- Durchmesser der Wälzkörper:  $D_w = 7\text{mm}$
- Rollkreisdurchmesser:  $D_T = 40.5\text{mm}$
- Druckwinkel:  $\alpha = 60^\circ$
- Anzahl der Wälzkörper:  $Z = 15$

Da sich nach /113/ die Geometrie eines Wälzlagers unter Belastung ändern kann, wird mit einem Band von  $\pm 5\%$  gesucht.

Komponente	Formel für die charakteristische Frequenz	INA ZKLF 2575.2 RS	560 Hz Ordnung
Angetriebener Innenring:	$f_{Spindel} = \frac{v_{Tisch}}{P_h}$	40 Hz	14
Käfigrotationsfrequenz	$f_{Käfig} = \frac{1}{2} \cdot f_{Spindel} \cdot \left( 1 - \frac{D_w}{D_T} \cdot \cos \alpha \right)$	18.3 Hz	30
Wälzkörperfrequenz	$f_{Wälzkörper} = \frac{1}{2} \cdot f_{Spindel} \cdot \left( \frac{D_T}{D_w} - \frac{D_w}{D_T} \cdot \cos^2 \alpha \right)$	114.9 Hz	4.8
Überrollen des Innenrings:	$f_{Innenring} = (f_{Spindel} - f_{Käfig}) \cdot Z$	325.9 Hz	1.7
Überrollen des Außenrings:	$f_{Aussenring} = f_{Käfig} \cdot Z$	274 Hz	2.0
Beide Wälzbahnen:	$f_{Wälzbahn} = f_{Spindel} \cdot \left( \frac{D_T}{D_w} - \frac{D_w}{D_T} \cdot \cos^2 \alpha \right)$	229.7 Hz	2.4

Tabelle 4-1: Charakteristische Grundfrequenzen bei Wälzlagerverschleiß (v=800mm/s).

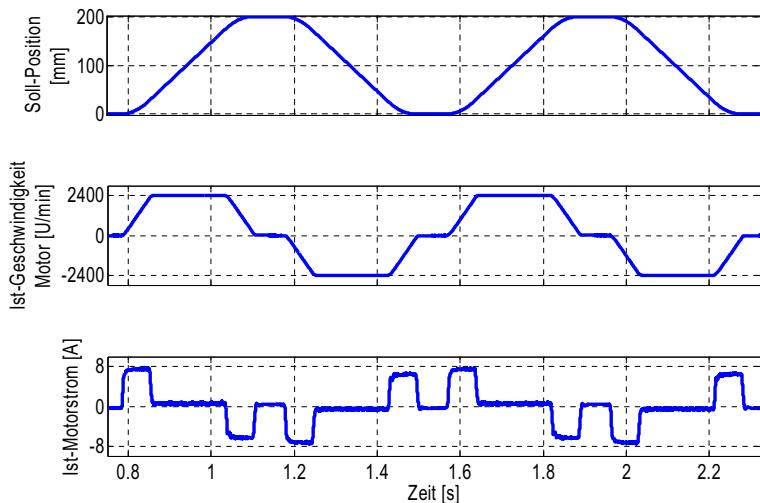


Bild 4-10: Testprofil zur Erzeugung eines Verschleißes am Axiallager

Beaufschlagt wurde die Vorschubachse, in der das mangelgeschmierte Lager eingesetzt wurde, über mehrere Wochen hinweg mit dem in Bild 4-10 gezeigten periodischen, rampenförmigen Lage- und Geschwindigkeitsprofil.

Die detaillierten Parameter der Versuchsdurchführung sind im Anhang A.2 zu finden.

#### 4.3.1.2 Ergebnis

Bild 4-11 zeigt in Anlehnung an Bild 4-5 ein typisches verschleißbedingtes Phänomen. Ein Ausschnitt aus dem Signalbild des Vorschubantriebs ist durch das Amplitudenspektrum des momentenbildenden Stroms über den in Bild 4-10 dargestellten Sollwertzyklus gegeben. Für die Wasserfalldarstellung werden über einen längeren Zeitraum hinweg regelmäßig Spektren ermittelt und nacheinander aufgetragen. Das linke Spektrum zeigt einen Zeitpunkt zu dem noch keine Schädigung vorliegt. Im rechten Spektrum ist ein Ansteigen des Signalpegels in einem Frequenzband bei ca. 560 Hz deutlich erkennbar.

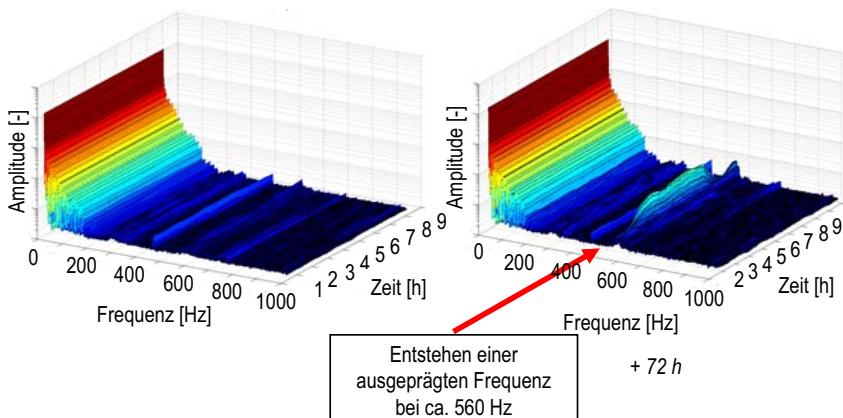


Bild 4-11: Schadensbedingtes Phänomen eines Kugellagers, links keine Schädigung, rechts Entwicklung des Schadens

Der Antriebsstrang ändert also im betrachteten Zeitraum sein Verhalten derart, dass in diesem Band selektiv eine höhere Leistungsaufnahme erfolgt. Dies lässt den Schluss zu, dass sich die Reibung im System in zunehmendem Maße periodisch wiederkehrend

ändert, also ein Schaden an einer periodisch überstrichenen Kontaktfläche zwischen zwei Elementen vorliegt. Ein derartiges Element stellt das Axiallager dar. Bei der vorliegenden Verfahrgeschwindigkeit wird eine charakteristische Überrollfrequenz im ermittelten Bereich erzeugt. In den aufgezeichneten Spektren ist die erste Harmonische (ca. 560 Hz) der charakteristischen Außenringfrequenz (ca. 280 Hz) deutlich erkennbar.

Durch diesen Versuch sind zwei wichtige Erkenntnisse gewonnen. Als erstes sind die Bewegungen der Mechanik als Schadensphänomen nachweisbar und eindeutig zuordenbar. Mit Hilfe der Ursache-Wirkungs-Beziehungen war es möglich, die Auswirkungen des provozierten Schadens auf die antriebsinternen Signale zu beschreiben.

Als zweite Erkenntnis ist das gleichbleibende Spektrum während des Normalbetriebs in Bild 4-11 links festzuhalten. Hierbei sind sowohl Frequenz als auch Amplitude nicht nur über acht Stunden gleich, sondern auch über Tage und Wochen. Betriebsbedingte Phänomene haben im eingefahrenen und betriebswarmen Zustand keinen Einfluss auf die Ausprägung des Spektrums. Es zeigt sich ein deutliches Linienspektrum.

#### **4.3.1.3 Bestätigung der Ergebnisse an einem speziellen Lagerprüfstand**

Ziel dieses Bestätigungsversuches ist es, in einem auf das nötige Minimum reduzierten Versuchsstand die Wirkbeziehungen aus Bild 4-8 auf eine künstliche, reproduzierbare Ursache zu beschränken und zu erkennen.

Für die Validierung wurde der in Bild 4-12 dargestellte Versuchsstand aufgebaut, an dem der Innenringschaden erkannt werden sollte. Als Referenz wurde ein System der Firma ifm (siehe Abschnitt 3.4) verwendet. Wie in Bild 4-14 ersichtlich ist, wurde der eingebrachte Schaden durch die Referenz erkannt. Das verwendete Rodriguez Wälzlager DRF-2068-2RS hat eine Innenringfrequenz von ca. 404 Hz bei einer Wellendrehzahl von 50 1/s.

Es wurden jeweils 10 Messungen pro Drehzahl gemacht. In der Darstellung sind zwei Flächen auf die Amplitudenebene gelegt. Beide Flächen enden an der aktuellen Wellenfrequenz. Die obere Grenze der grünen Fläche endet bei der errechneten Innenringfrequenz. Der Nachweis, dass charakteristische Frequenzen in der Geschwindigkeit oder Drehzahl bei konstanten Sollwerten sichtbar sind, ist in diesem Versuch gelungen. Der in das Wälzlager eingebrachte Innenringschaden ist deutlich in Bild 4-13 zu erkennen.

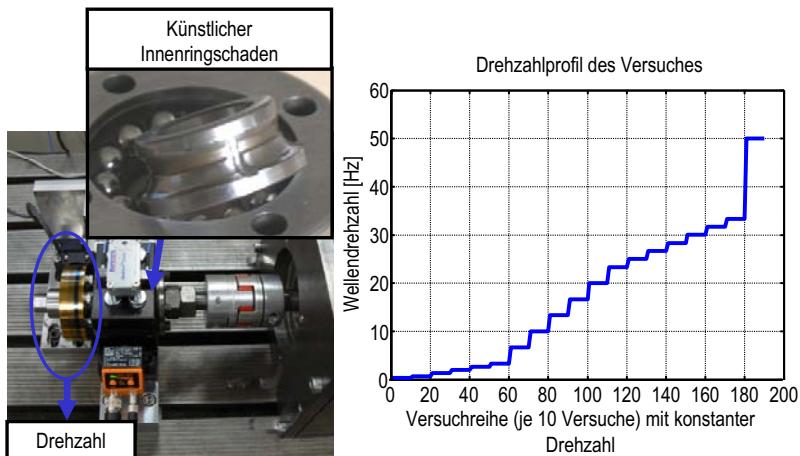


Bild 4-12: Versuchsstand zur Validierung künstlicher Schäden (links), Sollwertprofil (rechts)

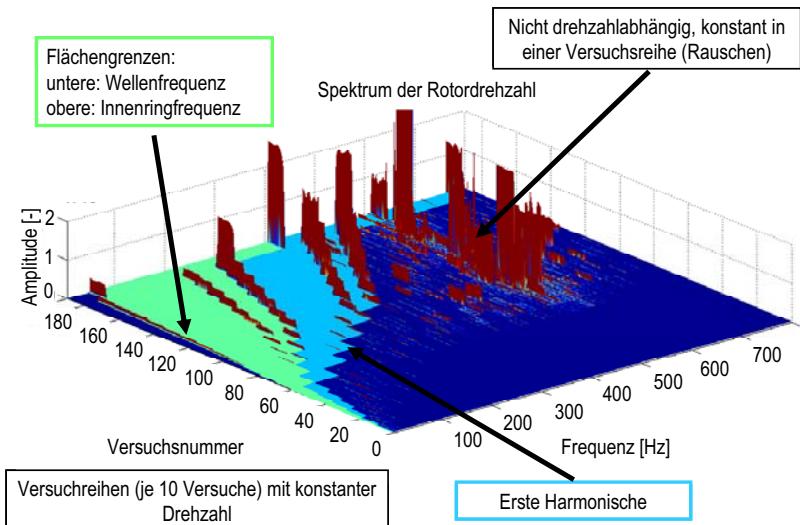


Bild 4-13: Spektrum der Wellendrehzahl über ansteigende Drehzahl

An der Grenze der die charakteristische Frequenz beschreibenden grünen Flächen ist immer ein konstanter Peak zu finden. Des Weiteren ist innerhalb einer Versuchsreihe, bei konstanter Solldrehzahl, ein konstantes Spektrum erkennbar. Die charakteristische Ordnung des Innenrings wurde nach /134/ berechnet.

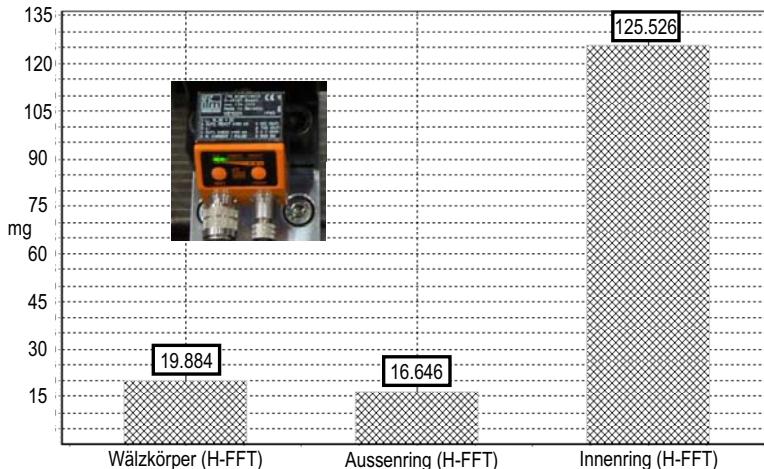


Bild 4-14: Ergebnis der kommerziellen Diagnosetechnik

In Bild 4-14 ist das originale Ergebnis aus der Auswertung des ifm-Sensors abgebildet. Die charakteristischen Frequenzen werden aus den Geometriedaten des Kugellagers in dem dazugehörigen Software-Tool berechnet. Die durch den Sensor gemessene Beschleunigung in mg [ $= 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ m} / \text{s}^2$ ] wird nach einer H-FFT /135/ dem einzelnen Wälzpartner zugeordnet. Der Innenring ist mit mehr als dem Faktor sechs deutlich dominanter als die beiden anderen am Wälzkontakt beteiligten Partner. Dies lässt eindeutig den Rückschluss zu, dass ein Schaden am Innenring vorliegt. Zu beachten ist, dass die quantitative Erfassung der Beschleunigung abhängig von Montageort und -art des Sensors ist. Daher ist ein absoluter Vergleich der Werte schwierig.

#### 4.3.2 Nachweis der Schadensphänomene am KGT

Der Nachweis der Existenz und der prinzipiellen Messbarkeit von Schadensphänomenen am KGT wurde geführt, indem Schleipaste direkt in die Mutter des Kugelgewindetriebes eingebracht wurde. Dieser Versuch wurde an einem Teststand durchgeführt, welcher in seiner Konstruktionsart einer WZM-Achse nachempfunden wurde. Es handelt sich hierbei um eine vertikale Achse aus einer Schleifmaschine (WU 305) der Firma Schütte.

##### 4.3.2.1 Ursache-Wirkbeziehung für Fremdkörper im KGT

In Bild 4-15 werden die Wirkbeziehungen beim Kugelgewindetriebverschleiß durch Fremdkörper, wie Läpp-Paste im Schmiermittel, dargestellt.

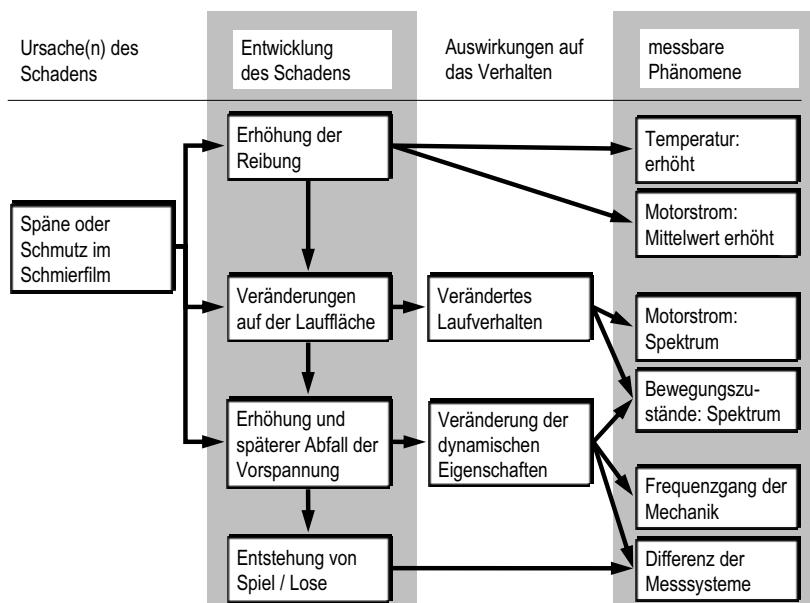


Bild 4-15: Wirkbeziehungen und Detektion für Verschleiß bei Kugelgewindetrieben mit Fremdkörpern im Schmiermittel /118/

Die daraus abgeleiteten Auswirkungen auf das Verhalten ergeben mehrere Möglichkeiten zu einer diagnostischen Erfassung. Die Darstellung erfolgt entsprechend Abschnitt 4.1.3 als Graph. Mit kleinen Partikeln versetztes Schmiermittel im Kugelgewindetrieb führt unmittelbar zu einer erhöhten Reibung und Verspannung an den Kontaktflächen von Wälzkörpern und Laufflächen. So kommt es zu einem kurzfristigen Anstieg der Steifigkeit. Diese Verspannung und die Fremdpartikel sorgen dafür, dass weitere Bewegungen der Mechanik wie eine Mühle funktionieren. So folgt dem schnellen Steifigkeitsanstieg ein kontinuierlicher Steifigkeitsverlust. Hierbei muss es nicht unbedingt zu einer direkten Schädigung der funktionalen Oberflächen kommen. Sobald aus dem sich vergrößernden Umkehrspiel dann Lose entstanden ist, kann der KGT seine Funktion nicht mehr erfüllen. Die Lageregelung wird instabil.

Wie aus der Bild 4-16 ersichtlich ist, kann die Kugelgewindetriebmutter als zentrales Element von beiden Messsystemen gut erfasst werden. Das durch die Fremdpartikel zwischen Mutter und Spindel entstandene Signal wird über die sich im Kraftfluss befindenden Komponenten übertragen und ist in Lage-, Geschwindigkeits- und Stromsignalen messbar.

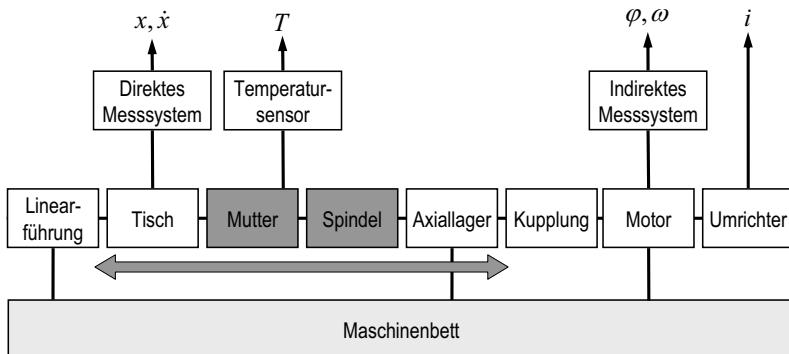


Bild 4-16: Signalweiterleitung bei Kugelgewindetrieb /118/

Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich das Vorgehen der Diagnose für den Kugelgewindetrieb mit der Schadensursache Fremdkörper. Es wurden alle vorhandenen Datenquellen, auch aus der Regelung, aufgezeichnet. Ein an der Kugelmutter angebrachter Temperatursensor liefert unmittelbare Hinweise auf einen reibungsbedingt erhöhten Leistungsverlust in der Kugelmutter.

Als erste Auswertemethoden wurden der Mittelwert des Momentenstrombetrags über

eine Referenzfahrt, die Differenz der beiden Positionssignale sowie die Spektral-darstellung der vorhandenen Signale betrachtet und bewertet. Das Motorstromsignal gibt Rückschlüsse auf den Momentenverlauf, wobei zu berücksichtigen ist, dass die mechanische Ankopplung der Schadstelle an den Motor über die Spindel mit im Vergleich zum Axiallager verringter und zusätzlich von der Schlittenposition abhängiger Steifigkeit erfolgt. Daher sind die höherfrequenten Phänomene im Motorstrom nicht mehr mit derselben Qualität detektierbar.

Die detaillierten Parameter der Versuchsdurchführung sind im Anhang A.3 zu finden.

#### 4.3.2.2 Ergebnis

Im Experiment wurde die Verschmutzung durch Fremdpartikel durch Aufbringen von Läpp-Paste simuliert. Es wurden hierfür in zwei Stufen zunächst direkt Paste auf die Spindel des KGT aufgebracht und später 1 ml Paste direkt in die Mutter eingebracht. Die Korngröße der verwendeten Läpp-Paste betrug 25 µm.

Eine Diagnose auf Basis von Impulsen im Motorstromsignal beim Überrollen von Einzelpartikeln war im hier betrachteten Fall durch die geringen Abmessungen der Fremdkörper und die gegebene Auflösung des Motorstromsignals nicht relevant. Die Auswirkungen auf den Motorstrom (Bild 4-17, rechts) sind zwar erkennbar aber nicht sehr ausgeprägt. Die Temperatur der Mutter des KGTs wie in Bild 4-17, links, wiedergegeben reagiert deutlicher, aber erst nach sechs bis sieben Stunden.

Die Temperatureinbrüche sind durch Stillstände der Versuchseinrichtung verursacht. Zu beachten ist beim Stromsignal, dass es beim Verfahren in negative z-Richtung aufgenommen wurde und demnach ein größerer Betrag bei kleineren Werten zu finden ist. Deutlich erkennbar ist auch der schmierende Effekt des Grundstoffs der Läpp-Paste, die 21 Stunden nach Versuchsbeginn (grüne Linie) zunächst nur auf die Spindel aufgebracht wurde. Die Abstreifer verhinderten zunächst ein Eindringen der Partikel in die Spindelmutter, weshalb vier Betriebsstunden (rote Linie) später 1 ml Läpp-Paste direkt in die Spindelmutter eingebracht wurde. Anschließend treten die erwarteten Phänomene deutlich zu Tage.

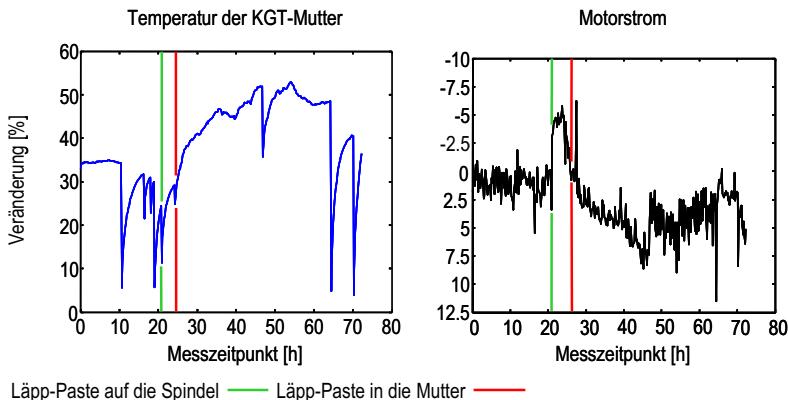


Bild 4-17: Verlauf von Temperatur und mittlerem Motorstrom bei Schmutzeintrag /118/

Auch im Frequenzbereich sind die Auswirkungen der stark erhöhten Reibung deutlich sichtbar, wie Bild 4-18 für die prozentuale Abweichung des Spektrums der Differenz direktes - indirektes Messsystem gegenüber km0 zeigt.

In dieser Darstellung wird deutlich, dass es beim Schmutzeintrag zu einem kaum ausgeprägteren Linienspektrum (schwarzer umrandeter Bereich in Bild 4-18) als beim Schaden durch Verschleiß in Folge von Mangelschmierung (siehe Bild 4-11) kommt.

Zwar treten über einige Zeit im Spektrum hinweg charakteristische Überrollfrequenzen deutlich auf, diese werden jedoch zunehmend durch breitbandige, an Rauschsignale erinnernde Anteile verdrängt bzw. sie verschmieren. Dies entspricht den Erwartungen, da die für charakteristische Rollfrequenzen verantwortlichen punktuellen Oberflächen-unregelmäßigkeiten durch die Partikel im Schmierfilm sehr schnell abgeschliffen werden und im Schmierfilm zunehmend das Aneinanderreiben von Fremdkörpern verschiedener Körnung vorherrscht. Eine schnell und breitbandig auftretende Veränderung in den Spektren der Antriebssignale kann somit als Phänomen für die Diagnose von Schmutzeintrag herangezogen werden.

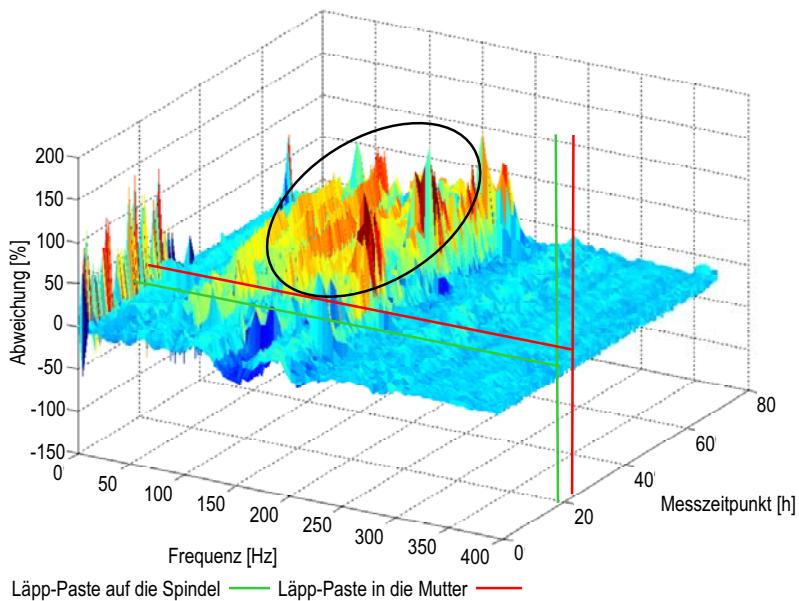


Bild 4-18: Relative Abweichung des Spektrums der Lagedifferenz von km0 /118/

Die Auswirkungen des Spiels werden auch im Zeitverlauf des Motorstroms sichtbar, wie Bild 4-19 zeigt. Dort ist der Verlauf des momentenbildenden Stroms am oberen und unteren Umkehrpunkt im Wasserfalldiagramm von vorne nach hinten in seiner Entwicklung über eine große Anzahl an Messungen während des Dauerversuchs dargestellt.

Neben einem geringfügigen, aber dennoch in beiden Plots sichtbaren Anwachsen der Amplitude des für die Beschleunigung des Tisches verantwortlichen Stroms nach dem Einbringen der Schleifpaste fällt beim Beschleunigen in negative z-Richtung ein deutliches Überschwingen des Stromsignals auf. Ein solcher bremsend wirkender Stelleingriff ist nötig, um ein hysterese- bzw. spielbedingtes Überschießen der Tischlage über den Sollwert zu kompensieren.

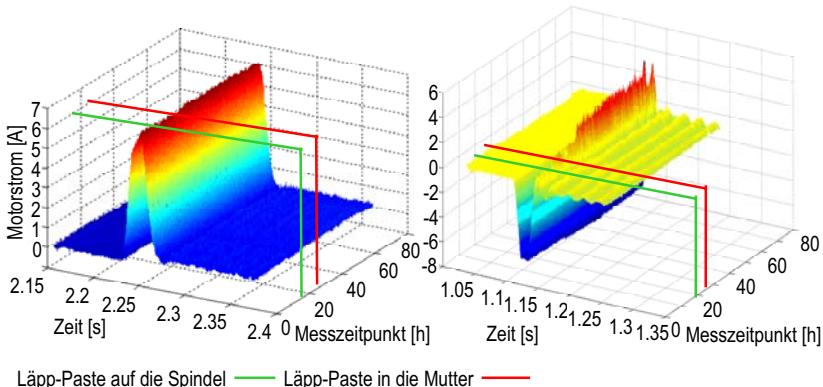


Bild 4-19: Momentenbildender Strom im oberen (links) und unteren Umkehrpunkt (rechts) /118/

#### 4.3.2.3 Bestätigung der Ergebnisse an einem speziellen KGT-Prüfstand

Die Nachweisbarkeit von Schadensphänomenen, welche in Abhängigkeit der konstruktiv bestimmten Größen des KGTs stehen, soll durch diesen Versuch bestätigt werden. Hierzu soll erneut ein auf das nötige Minimum reduzierter Versuchsstand dienen, um die Wirkbeziehungen aus Bild 4-15 auf eine künstliche, reproduzierbare Ursache zu beschränken und zu erkennen.

Für die Validierung wurde ein künstlich beschädigter KGT auf eine Drehmaschine aufgespannt und das Reibmoment, wie in Bild 4-20 dargestellt, bei konstantem Vorschub bzw. konstanter Drehzahl gemessen. Als Schadensszenario wurde hier ein Pitting durch künstliches Aufbringen von Erhöhungen gewählt. Wie in dieser Bild erkennbar ist, wurde auf die gehärtet funktionale Fläche ein Schweißpunkt aufgebracht und leicht überschliffen.

Der Nachweis, dass die messbaren Phänomene auf einem Schaden basieren, ist in diesem Versuch gelungen. In Bild 4-21 sind das Vorgehen der signalanalytischen Auswertung und das Ergebnis dargestellt. So wurde eine diskrete Fourier-Transformation (DFT) mit einer Fenstergröße von 2048 Werten immer um 128 Werte verschoben. Mit der erlangten Verbindung zwischen Frequenz und Ort in Form von

Bereichen (0 bis 320) war es möglich, den Ort und die Art des Schadens zu bestimmen. Der Schaden wird ab dem Bereich 150 von der Mutter überfahren.



Bild 4-20: Versuchsaufbau (links) an der Drehmaschine: KGT-Mutter (1) mit Drehmomentstütze (2), 3D-Schwingungssensor (3) und Laservibrometer (4); Künstlicher Schaden auf KGT (rechts)

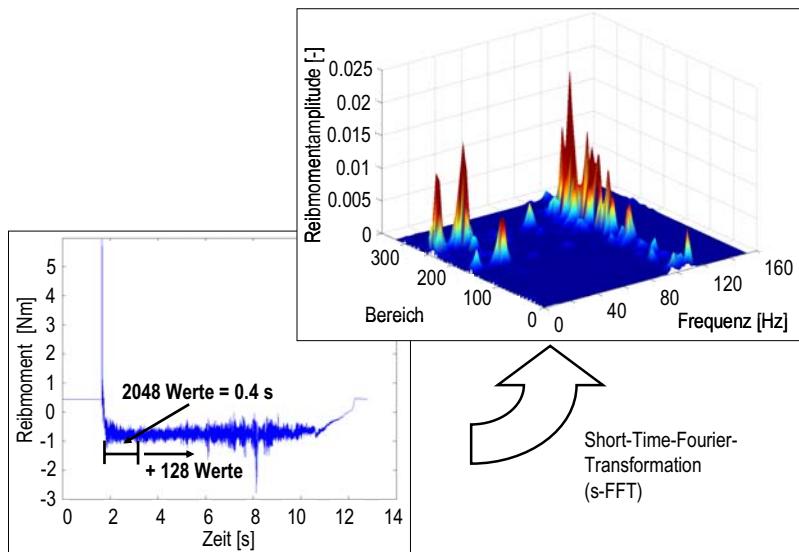


Bild 4-21: Auswertevorgehen (links) und Ergebnis (rechts) bei 90 U/min

Um das Ergebnis zu verfestigen, dass es sich hierbei um eine konstante, ortsgebundene Ursache handelt, wurde eine Ordnungsanalyse bei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt. Die in Bild 4-22 ersichtliche konstante 10. Ordnung lässt den Schluss zu,

dass es sich um ein von der Geometrie der Wälzpaarung bestimmtes Phänomen handelt. Diese Phänomene kann mit der bei Wälzlagern vorkommenden charakteristischen Frequenz vergleichbar sein.

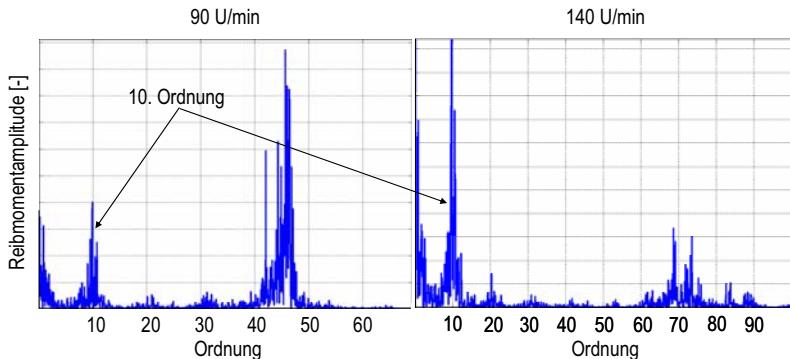


Bild 4-22: Bestätigung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Drehzahlen

Für die Berechnung der charakteristischen Frequenz von Kugelgewindetrieben kann ein sich an dem Vorbild des Wälzlagers orientierender Formelansatz verwendet werden. Im anschließenden Abschnitt folgt die Herleitung einer auf der Geometrie und Kinematik des KGT basierenden Ansatzes für eine Berechnung einer charakteristischen Frequenz. Es wird die Kugelaustrittsfrequenz berechnet.

#### 4.3.3 Berechnung einer charakteristischen Frequenz eines KGT

Ausgehend von den geometrischen Gegebenheiten in der Kugelmutter kann die Überrollgeschwindigkeit der Wälzkörper und somit das Ein- und Austreten aus den Umlenksäcken bestimmt werden /136/. Bild 4-23 links zeigt die zur Berechnung der charakteristischen Frequenzen notwendigen Maße eines Kugelgewindetriebs. In die Berechnung fließen der Kugelmittelkreisdurchmesser  $D_{pw}$  [mm], die Steigung  $P_h$  [1/mm], der Nenndurchmesser der Kugel  $D_w$  [mm] und der Kontaktwinkel zwischen Kugel und Laufbahn  $\alpha$  [rad] ein.

Für das weitere Vorgehen sind folgende idealisierte Annahmen als Grundlage zu sehen: Es liegt eine reine Rollbewegung vor. Schlupf, lineare und nichtlineare Reibung werden

vernachlässigt. Hier sind auch Effekte durch einen sich bildenden Schmierfilm eingeschlossen. Die Kugelmutter und somit die gesamte Bahn ist ganz ausgefüllt mit Kugeln. Hierbei kommt es zu keinen Interaktionen zwischen den einzelnen Wälzkörpern. Die Kugeln berühren sich nicht untereinander. Des Weiteren finden bei den Kugeln keine Ausgleichsbewegungen, wie beispielsweise ein Drall um die eigene Achse, statt.

Durch diese Annahmen kann der Ort des Momentanpols eindeutig bestimmt werden. Physikalisch wird der Rollvorgang als Bewegung der Kugel um den Momentanpol beschrieben. Die Rollgeschwindigkeit der einzelnen Kugeln lässt sich in gleicher Weise für Bahnen in der Ebene als auch im Raum berechnen.

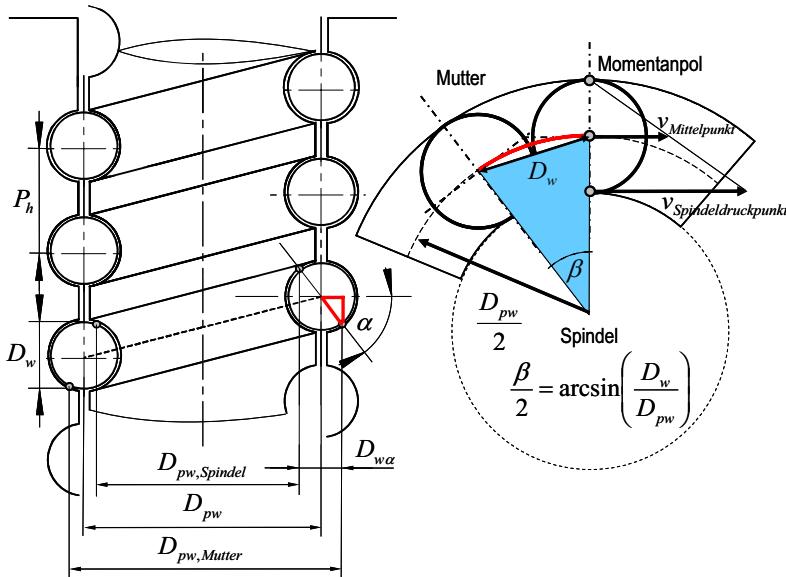


Bild 4-23: Bauteilmaße des KGT nach DIN 69051 /137/ (links), bestimmende Geometrie der Kugelbewegung (rechts)

Bild 4-23 rechts zeigt die kinematischen Zusammenhänge in der Kugelmutter. Daher dient als Basis auch die Berechnung eines Kugellagers für den zweidimensionalen Fall. Die Bahngeschwindigkeit eines Punktes bei einer Drehfrequenz der Spindel von  $f_{Spindel}$  kann nach Formel (4.1) berechnet werden.

$$v = \omega_{Spindel} \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot f_{Spindel} \cdot r = f_{Spindel} \cdot \pi \cdot D \quad (4.1)$$

Der Durchmesser der Spindel und die Steigung legen die Länge der Rollbahn des Kugelmittelpunktes fest. Die Mittelpunkte der Kugeln bewegen sich auf einer Bahn der Länge  $Bahn_{pw}$ , die sich aus dem Anteil der Kreisbahn ( $Bahn_{Kreisbahn} = \pi \cdot D$ ) und der Steigung nach Pythagoras berechnen lässt. Die Schraubenlinie hat pro Umdrehung die Länge  $Bahn_{pw}$ :

$$Bahn_{pw} = \sqrt{(\pi \cdot D_{pw})^2 + P_h^2} \quad (4.2)$$

Die einzelnen Kugeln rollen tatsächlich nicht an ihrem größten Durchmesser auf der Bahn ab, da sonst keine Axialkräfte übertragen werden können. Die Kugeln berühren die Kugelmutter unter dem Druckwinkel  $\alpha$ , wodurch sie die Bahn auf einem Rollkreis-durchmesser berühren. Der tatsächliche Durchmesser des Rollkreises  $D_w$  verringert sich (rotes Dreieck in Bild 4-23 links):

$$r_{w\alpha} = r_w \cdot \cos \alpha \text{ bzw. } D_{w\alpha} = D_w \cdot \cos \alpha \quad (4.3)$$

Die Länge der Rollbahn in der Kugelmutter ist nach (4.3):

$$Bahn_{pw,Mutter} = \sqrt{(\pi \cdot (D_{pw} + D_w \cdot \cos \alpha))^2 + P_h^2} \quad (4.4)$$

Analog berechnet sich die Rollbahn auf der Spindel:

$$Bahn_{pw,Spindel} = \sqrt{(\pi \cdot (D_{pw} - D_w \cdot \cos \alpha))^2 + P_h^2} \quad (4.5)$$

Gemäß Bild 4-23 rechts berechnet sich die Geschwindigkeit des Kugelmittelpunktes nach dem Strahlensatz:

$$\frac{v_{Mittelpunkt}}{v_{Spindeldruckpunkt}} = \frac{1}{2} \quad (4.6)$$

Aus den Formeln (4.6), (4.5) und (4.1) lässt sich die Geschwindigkeit des Kugelmittelpunkts, d.h. der Kugel an sich in Abhängigkeit der Spindeldrehzahl bestimmen.

$$v_{\text{Mittelpunkt}} = \frac{1}{2} \cdot f_{\text{Spindel}} \cdot \sqrt{(\pi \cdot (D_{pw} - D_w \cdot \cos \alpha))^2 + P_h^2} \quad (4.7)$$

Als erste Näherung /138/ kann also die Kugelaustrittsfrequenz als Inverse der Zeitdauer angegeben werden, die eine Kugel braucht, um die Distanz in Höhe ihres Durchmessers zurückzulegen.

$$f_{\text{Austritt}} \approx \frac{1}{t} \approx \frac{v_{\text{Mittelpunkt}}}{D_w} \approx \frac{1}{2} \cdot f_{\text{Spindel}} \cdot \frac{\sqrt{(\pi \cdot (D_{pw} - D_w \cdot \cos \alpha))^2 + P_h^2}}{D_w} \quad (4.8)$$

In Formel (4.8) ist jedoch die dreidimensionale Bahn der Kugel an sich nicht voll berücksichtigt. Daher ist es besser die Distanz als Bahn einer Umdrehung aufzufassen. Dazu passend muss die Anzahl von Kugeln  $z$  ausgerechnet werden, die in die Bahn einer Umdrehung passen. Somit werden  $z$  Impulse pro Umdrehung erzeugt. Bei der Anzahl der Kugeln  $z$  muss es sich nicht um eine ganze Zahl handeln. Im Rahmen dieser Berechnungen ist ein Runden weder sinnvoll noch zwingend.

Der Kugelmittelpunkt bewegt sich auf einer Kreisbahn, somit nimmt eine Kugel einen nach dem Bogenmaß  $\beta$  berechenbaren Winkel ein (siehe Bild 4-23 links).

$$\beta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{D_w}{D_{pw}}\right) \text{ daraus ergibt sich } z = \frac{2 \cdot \pi}{\beta} = \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{D_w}{D_{pw}}\right)} \quad (4.9)$$

Die Bahn der Kugelmittelpunkte ist nach Formel (4.2) bekannt. In Verbindung mit Formel (4.8) ergibt sich eine Kugelaustrittsfrequenz in Abhängigkeit der Spindeldrehfrequenz ( $f_{\text{Spindel}}$ ) und der festen Geometrien nach Formel (4.10).

$$f_{\text{Austritt}} = \frac{v_{\text{Mittelpunkt}}}{Bahn_{pw}} \cdot z = v_{\text{Mittelpunkt}} \cdot \frac{z}{Bahn_{pw}} =$$

$$\frac{1}{2} \cdot f_{\text{Spindel}} \cdot \sqrt{(\pi \cdot (D_{pw} - D_w \cdot \cos \alpha))^2 + P_h^2} \cdot \frac{\frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{D_w}{D_{pw}}\right)}}{\sqrt{(\pi \cdot D_{pw})^2 + P_h^2}} \quad (4.10)$$

bzw.

$$f_{Austritt} = \frac{1}{2} \cdot f_{Spindel} \cdot \frac{\sqrt{(\pi \cdot (D_{pw} - D_w \cdot \cos \alpha))^2 + P_h^2}}{\sqrt{(\pi \cdot D_{pw})^2 + P_h^2}} \cdot \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{D_w}{D_{pw}}\right)}$$

#### 4.3.4 Fazit

Der Nachweis von erkennbaren Schadensphänomenen in antriebsinternen Signalen unter Betriebsbedingungen wurde in vorangegangenen Absätzen erfolgreich erbracht. Die künstlich verursachten Schadensszenarien sind unter normalen Betriebsbedingungen deutlich messbar und stimmen mit den dazu nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip durchgeführten Analysen der Szenarien überein.

Für die Komponenten mit Wälzkontakt kann festgestellt werden, dass sich das Spektrum der antriebsinternen Signale verändert. Als Phänomene können entweder breitbandige Störungen oder charakteristische Frequenzen festgehalten werden.

Es sind keine speziellen Messmethoden und -aufbauten hierfür notwendig. Neben diesen vier beispielhaften Versuchen sind weitere Versuche zu den fünf Schadensszenarien durchgeführt worden, die das gleiche Ergebnis zeigten. Die hierfür verantwortlichen schadensspezialen und -individuellen Wirkungsketten der künstlichen Ursachen haben sich im Versuch bestätigen lassen.

Daher ergibt sich die Notwendigkeit, die nun nachweisbaren Phänomene weiter im Allgemeinen zu analysieren und zu kategorisieren. Hierzu bedarf es zunächst einer allgemeinen Betrachtung unter den üblichen Betriebsbedingungen der Phänomenentstehung bzw. -ursache. Die hierfür allgemein verantwortliche Wirkungskette mit ihren einzelnen Untergliederungen und Ursachen wird in den folgenden Abschnitten aufgebaut.

#### **4.4 Analyse und Kategorisierung der Phänomenursachen**

In diesem die Diagnostik abschließenden Abschnitt erfolgt eine allgemeine, abstraktere Analyse, die sich von den Fallbeispielen und Einzelnachweisen löst. Die vorausgegangenen Analysen wurden als einzelne für den speziellen Fall aufgestellte Hypothesen im Rahmen der Betrachtung nach dem Ursache-Wirkungsprinzip getroffen. Die theoretischen Betrachtungen waren bis jetzt durch die für eine praktische Realisierung notwendigen Aspekte, wie die Möglichkeiten für die messtechnische Erfassung der Schadensphänomene oder künstliche Schadensursachen, geprägt.

Die Wirkung wird in den einzelnen Schritten, wie in Bild 4-4 dargestellt, (Ursachen des Schadens, Entwicklung des Schadens, Auswirkungen auf das Verhalten und daraus resultierende messbare Phänomene) detaillierter analysiert und kategorisiert. Hierbei wird der Anspruch erhoben, allgemein gültige Schadenskategorien für die Komponenten mit Wälzkontakt aufzustellen. Dieser Abschnitt schließt mit einem mathematischen Modell zur Berechnung von charakteristischen Frequenzen eines Kugelgewindetriebs.

##### **4.4.1 Ursachen der Verschleiß- und Schadensentstehung**

Es gibt prinzipiell zwei unterschiedliche Ursachen für das Versagen einer Komponente mit Wälzkontakt /88/. Zuerst ist die sachgerechte Benutzung für den späteren Ausfall ausschlaggebend. Durch die Nutzung wird Verschleiß als ein Spezialfall der Schädigung erzeugt. Als mögliche zweite Ursache ist eine Überbeanspruchung der Komponente zu nennen. Durch diese Überbelastungen erfolgt eine direkte plastische Schädigung.

Das Übertragen von mechanischer Leistung, hier als Umsetzen der Lagesollwerte, ist letztendlich für den späteren Schaden verantwortlich. In Bild 4-24 sind die zwei direkten Ursachen und die indirekten Einflussgrößen aufgezeigt.

Als mögliche weitere indirekte Einflussquelle sind die Betriebs- und Umweltbedingungen zu nennen. Zuletzt können Alterungsprozesse, beispielsweise von Schmierstoffen, als eine Veränderung der Umweltbedingungen aufgefasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist der betriebsbedingte Verschleiß mit dem nominellen Lebensdauerende auf Basis der Materialermüdung gleich zu setzen.

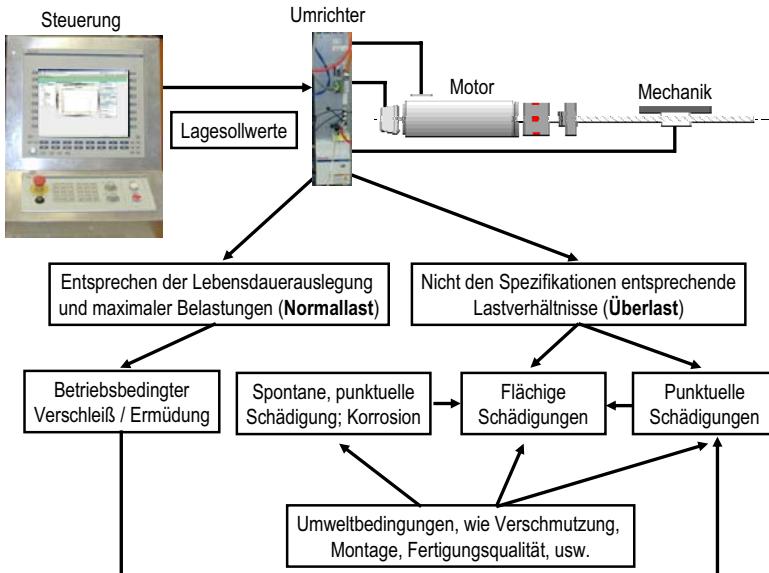


Bild 4-24: Ursachen der Schädigungen

Für die weiteren Betrachtungen der Wirk- und Schadensmechanismen ist ein kurzer Exkurs in das tribologische System der Wälzpaarungen sinnvoll.

„Unter Verschleiß versteht man den Werkstoffabtrag an der Oberfläche unter überwiegend mechanischer Einwirkung, d.h. unter Einwirkung von Kräften und Relativbewegungen. Ein tribologisches System (Reibsystem) muss einerseits aus der Sicht der Energieumsetzung durch Reibung und andererseits des Werkstoffabtrags betrachtet werden, der zu Geometrieveränderungen und schließlich zum Unbrauchbarwerden des Bauteils führen kann“ /37/.

Im Allgemeinen wird ein tribologisches System in Struktur und Beanspruchungskollektiv aufgeteilt. Zur Struktur werden alle beteiligten Körper, Feststoffe und Medien gezählt. Das Beanspruchungskollektiv setzt sich aus Belastung, Geschwindigkeit und Temperatur zusammen.

Durch das Zusammenfassen von ähnlichen Strukturen und Beanspruchungskollektiven können folgende Verschleißarten unterschieden werden:

- Körperpaarungen ungeschmiert und geschmiert
- durch Abrasivstoffe beanspruchte Struktur

Die kinematische Gegebenheit gibt ein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Es wird in den weiter betrachteten Fällen immer von Wälzen bzw. Rollen ausgegangen.

Die Energieumsetzung und der Werkstoffabtrag erfolgen nach den sog. Verschleißmechanismen, die die Reaktion des Werkstoffs auf das aufgeprägte Beanspruchungskollektiv zum Ausdruck bringen. Die übergeordneten Verschleißmechanismen, Bild 4-25, sind:

- Abrasion (Furchung) durch harte Rauberge eines Gegenkörpers oder durch harte körnige Gegenstoffe
- Ermüdung im Mikrobereich infolge wiederholter mechanischer Krafteinwirkung in der Grenzschicht
- Adhäsion infolge atomarer und molekularer Wechselwirkung der Stoffe in der Kontaktzone
- Ablation (Zersetzen, Verdampfen), hervorgerufen durch hohe Energiedichte an der Oberfläche.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Komponenten weisen als Gemeinsamkeit einen Wälzkontakt auf. Hierfür sind hauptsächlich die ersten beiden Verschleißmechanismen

- Abrasion
- und Ermüdung

maßgeblich.

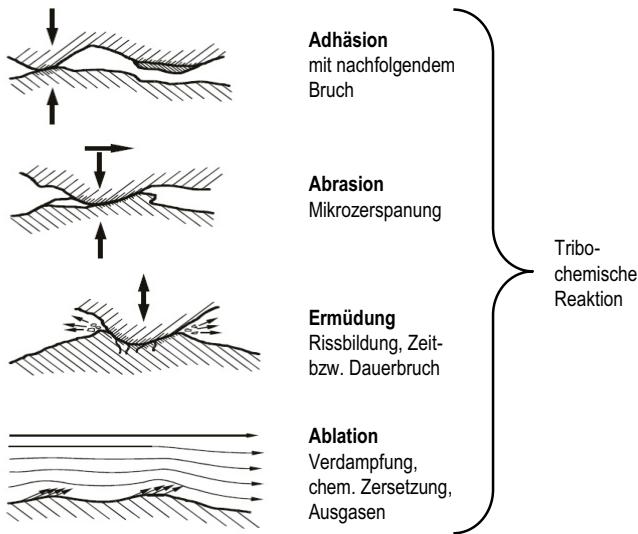
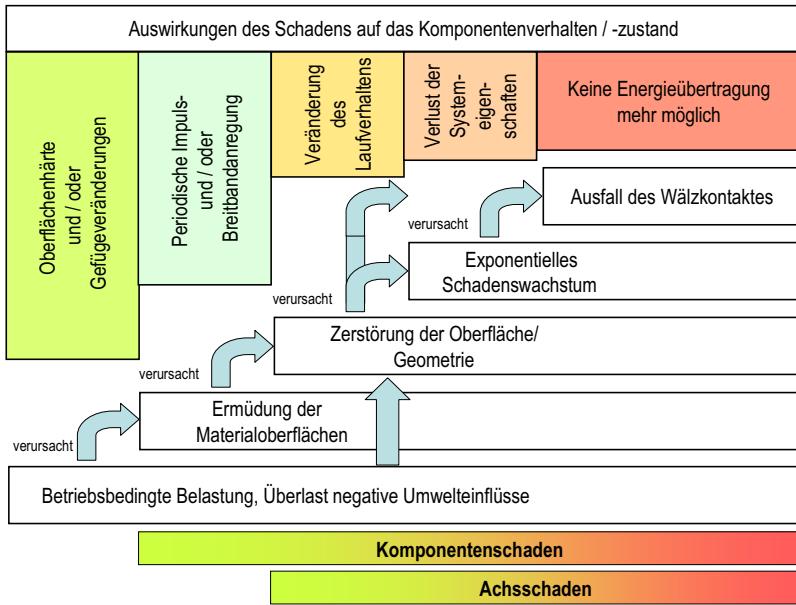


Bild 4-25: Verschleißmechanismen nach /37/

Auf den Antriebsstrang bezogen bedeutet dies, dass durch die Hertz'sche Pressung der Kugeln und Laufbahnen im metallischen Gefüge eine Mikroschädigung verursacht wird. Durch eine hohe Anzahl an Lastwechseln durch Überrollen entsteht somit ein Pitting oder eine Schälung. Wenn eine Verletzung der Lauf- oder Kugeloberfläche vorliegt, ist ein verschleißbedingtes Ende der Funktionsfähigkeit des Wälzkontakte absehbar. Diese Geometrie- und / oder Oberflächenveränderungen der Wälzpaarung können jedoch auch durch Belastungen oder Umwelteinflüsse hervorgerufen werden. Diese wurden nicht bei der Auslegung der Betriebsbedingungen für den Wälzkontakt spezifiziert (Überlast oder Schmutzpartikel) und können während des laufenden Betriebs auftreten. Die Veränderung der Oberfläche und / oder eine Veränderung der Geometrie der Wälzpaarung sind letztlich für das Komponentenversagen verantwortlich. Um dies zu verdeutlichen, wird nach dem Ursachen-Wirkungs-Prinzip die Entstehung eines Schadens analysiert. Der Schadensverlauf für die Komponenten bzw. den Antriebsstrang folgt dem in Bild 4-26 dargestellten Muster.



**Bild 4-26:** Schadensverlauf in einem Antriebsstrang

Hier wird deutlich, dass der definierte Begriff Abnutzungsgrenze für die Komponente und den Antriebsstrang bei unterschiedlichen Zuständen von einem Schaden ausgeht. Aus diesem Muster wird eine Unterscheidung in Schadenskategorien auf Basis der Auswirkung des Schadens abgeleitet.

Die Unterteilung in periodische und nicht periodische Schadensarten ermöglicht eine Abgrenzung und genauere Beschreibung. Daraus lassen sich die Phänomene, wie sie in Kapitel 4.2.1 beschrieben sind, zur Schadensdetektion klassifizieren.

#### 4.4.2 Schadensarten

Die Definition von Schadensarten dient einer Klassifizierung von Phänomenen. Somit ist es möglich, Verschleiß- oder Schadensphänomene nach ihrer Erscheinungsart in zwei weitere Klassen zu unterteilen. Eine Unterteilung in periodische und nicht periodische

Schadensarten ermöglicht eine Abgrenzung und Beschreibung der Erscheinung von Schadensphänomenen in den antriebsinternen Signalen /139/.

#### 4.4.2.1 Periodische Schadensart

Die periodische Schadensart setzt eine bewegte, aus mehreren Elementen bestehende Kontaktmechanik voraus. Der Wälzkontakt ist als klassisches und häufigstes Element zu nennen. Durch eine Verletzung der Oberfläche oder Geometrie (z.B. Pitting) wird ein kleiner Stoß oder eine kurzfristige Erhöhung der Reibung beim Überrollen verursacht. Die durch den Schaden bewirkte impulsartige Anregung erfolgt periodisch. Sie ist von der Relativgeschwindigkeit der beteiligten mechanischen Elemente abhängig. Somit entsteht durch die erzeugte Impulsreihenfolge eine charakteristische Frequenz, die sich eindeutig den beteiligten mechanischen Komponenten aufgrund ihrer konstruktiven Ausprägung zuordnen lässt und die von deren Bewegungsgeschwindigkeit abhängig ist. Teilweise kann diese Impulsreihenfolge nicht direkt gemessen werden, da sie das umliegende Material zum Schwingen anregt.

Eine Beschreibung der Problematik der Vermessung ist /101/ zu entnehmen. Das umliegende Material schwingt dann mit seiner Eigenfrequenz. Die zur Extraktion der Impulsreihenfolge notwendigen signalanalytischen und mathematischen Verfahren sind durch /45/ auf Basis von externer Sensorik, vor allem Beschleunigungssensoren, beschrieben worden.

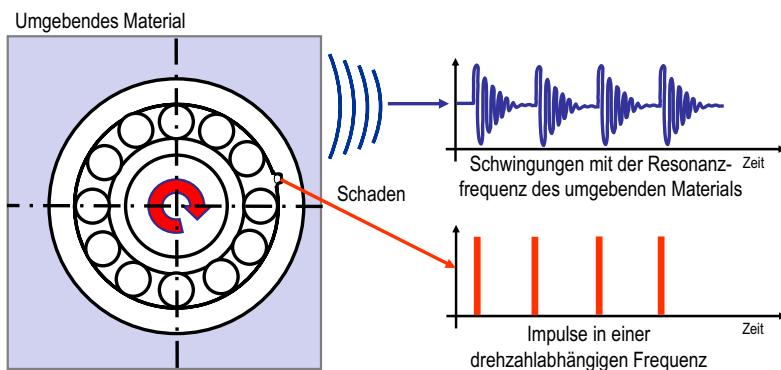


Bild 4-27: Ablauf der periodische Schadensart

Diese Schadensarten entziehen dem gesamten Antriebssystem periodisch Energie und wandeln diese in mechanische Schwingungen um, wobei die Frequenz des Energieentzuges nicht mit der Frequenz der in der Struktur angeregten Eigenschwingung übereinstimmen muss.

#### 4.4.2.2 Nicht-periodische Schadensart

Die Auswirkung der nicht-periodischen Schadensart zeigt sich zu keinem zyklischen Ereignis, egal ob zeit- oder ortsgebunden. Ihre Auswirkungen sind nicht mit einer spezifischen, geschwindigkeitsproportionalen Frequenz verbunden. Diese Schadensart wirkt sich auf den ganzen Bewegungsbereich aus. Als Beispiel ist hier die Abnahme der Komponentensteifigkeit oder die Veränderung von Reibung zu nennen. Nicht periodische Schadensarten können sich unterschiedlich auf die Komponenteneigenschaften auswirken. Prinzipiell sind sowohl eine langsame als auch eine beinahe sprunghafte Veränderung der für die Modellierung der Mechanik relevanten linearen und nichtlinearen Größen möglich.

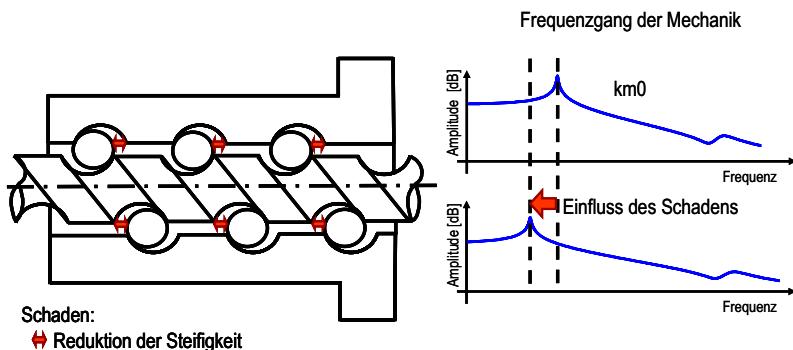


Bild 4-28: Nicht-periodische Schadensart

Die Unterteilung nach periodischen und nicht-periodischen Schadensarten bei dieser Definition ergibt eine Unschärfe. Diese ist von der spezifischen, konstruktiv bestimmten Gestaltung der Komponenten abhängig. So ist z.B. die zur Kraftübertragung genutzte Länge einer KGT – Mutter für die Unterteilung maßgeblich. Erst wenn der Schaden auf

der Gesamtlänge der Kugelgewindetriebmutter wirkt, wird aus dem periodischen ein nicht-periodischer Schaden.

Um dieser Unschärfe gerecht zu werden, müssen beide Schadensarten mit dafür geeigneten Zeit- und Frequenzmethoden der Maschinendiagnose erfasst werden.

#### **4.4.3 Ableitung von Schadensphänomenen aus dem Schadensverlauf**

Aus der Definition der Schadensarten lassen sich die relevanten, messbaren Phänomene ableiten. Hierbei werden alle möglichen Messmethoden aufgeführt. Die in einer Werkzeugmaschine nicht realisierbaren, bzw. praktikablen Messmethoden werden dementsprechend bewertet.

Die hier aufgeführten Phänomene benötigen prinzipiell eine Bewegung der zu untersuchenden Elemente. Eine weitere wichtige Unterscheidung ist bei der Bewertung des Zustandes der Komponente zu treffen. Ob eine Schädigung vorliegt, kann unterschiedlich bewertet werden. So sind kleinste Partikel im Schmierfilm schon ein Zeichen für die beginnende Schädigung des Wälzkontakte. Dieses Maß wird von den Komponentenherstellern herangezogen, um das Lebensdauerende festzusetzen. Diese Partikel sind jedoch für die Funktion eines Antriebsstranges zunächst nicht relevant.

Der Schadensfortschritt lässt sich wie in Bild 4-26 dargestellt in vier Abschnitte oder Stadien unterteilen:

##### **1. Ermüdung der Materialoberflächen**

Schadensauswirkung: Oberflächenhärte sinkt, verursacht durch Gefügeveränderungen (Veränderung von Werkstoffeigenschaften)

Messgrößen: Oberflächenhärte / -güte, Schädigung des Gefüges

Messprinzipien / Sensoren: Härteprüfung nach Brinell, Vickers, usw., Ultraschall, Röntgen, Wirbelstrom, usw.

Bewertung: Nicht in einer WZM umsetzbar, bzw. nicht immer zerstörungsfrei

## 2. Zerstörung der Oberfläche / Geometrie

Schadensauswirkung: Periodische Impuls- und / oder Breitbandanregung

Messgrößen: Schwingungen / Bewegungen, die durch die Anregungen entstehen, Verlust von Bewegungsenergie

Messprinzipien / Sensoren: Je nach Möglichkeit und / oder Ausprägung ein Zustand der Bewegung ( $x, \dot{x}, \ddot{x}, \varphi, \omega, \dot{\omega}$ ), des Motormomentes ( $i$ ), z.B. Beschleunigungsaufnehmer, Encoder, usw.

Bewertung: In einer WZM realisierbar

## 3. Exponentielles Schadenswachstum

Schadensauswirkung: Veränderung des Laufverhaltens

Messgrößen: Übertragungsverhalten der vorgegebenen Bewegungen, Veränderungen in der Energieumsetzung, Reglerkaskade ist an ihrer Stabilitätsgrenze

Messprinzipien / Sensoren: Je nach Möglichkeit und / oder Ausprägung mehrere Zustände der Bewegung ( $x, \dot{x}, \ddot{x}, \varphi, \omega, \dot{\omega}$ ), welche einem Sollprofil folgen sollten, um ein Übertragungsverhalten bestimmen zu können, Motormomente ( $i$ ), Wirkungsgrad z.B. Beschleunigungsaufnehmer, Temperatur, usw.

Bewertung: In einer WZM realisierbar

## 4. Ausfall des Wälzkontakte

Schadensauswirkung: Keine Funktion mehr, kontrollierte Bewegungen sind nicht mehr möglich

Messgrößen: Verlust des regel- und steuerbaren Übertragungsverhaltens und / oder Stillstand

Messprinzipien / Sensoren: Keine Kontrolle über die Bewegungen / Zustände ( $x, \dot{x}, \ddot{x}, \varphi, \omega, \dot{\omega}$ ) der Komponente

Bewertung: Der Totalausfall ist durch die vorhandenen Überwachungsmechanismen in einer WZM erkennbar. Diese sind in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit unterlegen, so dass weitere Folgeschäden nicht ausbleiben.

Aus diesen vier Abschnitten und den allgemeinen Vorarbeiten nach dem Ursache-Wirkungsprinzip lassen sich folgende Phänomene für den Einsatz in einer Werkzeugmaschine ableiten:

**Temperatur:**

Ein sich veränderndes Reibverhalten hat ein anderes thermisches Verhalten zur Folge. Eine messbare Veränderung tritt synchron mit dem Schaden ein. Es gibt keine Vorwarnzeit. Deshalb sind Temperaturmessungen nur zur Überwachung geeignet /35/.

**Veränderungen im mechanischen Übertragungsverhalten:**

Die bei der Auslegung der Mechanik wichtigen Eigenschaften sind nicht mehr gegeben. Hierbei wird das mechanische Übertragungsverhalten in Bezug auf seine Steifigkeit und Dämpfung optimiert /140/. Der Verlust dieser Eigenschaften sorgt dafür, dass die Komponente unfähig ist, die geforderte Funktion zu erfüllen. Als Endstadium des Verlustes von Steifigkeit wird Spiel und Lose im Antriebsstrang entstehen.

**Schwingungen:**

Die allgemeine Aussage, dass Schäden eine Veränderung des Schwingungsverhaltens als Folge haben, ist umstritten. Es ist möglich durch so genannte charakteristische Frequenzen die Schwingungen einzelnen Komponenten zuzuordnen. Die hierfür notwendigen Modelle für den Kugelgewindetrieb sind als Beispiel im folgenden Abschnitt aufgestellt.

#### 4.5 Zusammenfassung

Mit der in Kapitel 4 aufgestellten Diagnostik ist eine Systematik aufgezeigt worden, mit deren Hilfe der aktuelle Zustand der Elemente mit Wälzkontakt eines Antriebsstranges erfasst und bewertet werden kann. Als zwei Kernmethoden haben sich zum einen die Analyse des Schwingungsverhaltens und zum anderen des mechanischen Übertragungsverhaltens des gesamten Antriebsstranges herausgestellt. Durch die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten vier Grundlagenversuche ist vor allem die Notwendigkeit einer den Zustand relativ bewertenden Analyse hervorgehoben worden.

Die Temperatur hat sich als relativ später und von den Rahmenbedingungen abhängiger Indikator erwiesen. Der Zustand lässt sich bis jetzt nicht global an einer Zahl festmachen. Als Vergleich hierzu ist beispielsweise die Körpertemperatur eines Menschen zu nennen: Ab einer Kerntemperatur von 39 °C ist er als nicht mehr gesund anzusehen. Bei der Maschinendiagnose ist es allerdings nicht möglich, einen allgemeingültigen Grenzwert zu setzen. Die große Anzahl der unterschiedlichsten Konzepte und Konstruktionen von Werkzeugmaschinen erschwert dieses Bestreben erheblich. So ist jeder Signalübertragungsweg als individuelle Eigenschaft einer jeden einzelnen Werkzeugmaschine anzusehen.

Den im Rahmen dieser Arbeit durchgeföhrten Untersuchungen kann der Grundsatz entnommen werden, dass sich der Zustand des Antriebsstranges durch die spektrale Zusammensetzung der übertragenen Leistung, also dem Umsetzen von Energie, bestimmen und diagnostizieren lässt. Es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen einem sich verschlechternden Zustand des Wälzkontakte und erhöhtem Schwingungsverhalten. Sobald sich die Schädigung dem Endstadium nähert, werden durch ein sich massiv veränderndes mechanisches Übertragungsverhalten Schwingungen erzeugt. Des Weiteren ist es gelungen, einzelne Frequenzen im Spektrum der durch einen Schaden verursachten Schwingungen genau einer Schadensursache zuzuordnen.

Die bis jetzt neu getroffenen Diagnosen auf Basis der antriebsinternen Signale sind nur durch den Einsatz von Expertenwissen möglich. Dabei bedarf es einer Aufbereitung und Interpretation der Messungen. Bis jetzt wurde die Diagnose durch eine visuelle Interpretation von Bildern, besonders Wasserfalldiagrammen, gestellt. Dazu musste immer die Relation zwischen dem km0 und dem aktuellen Zustand hergestellt werden. Dies widerspricht fundamental dem Ansatz, die Diagnosefunktionalität automatisiert in die Maschinensteuerung zu integrieren. Das Ziel der weiteren Arbeit bestand daher darin, die einzelnen Schadensphänomene in einer Kenngröße zusammenzufassen.

## 5 Kenngröße aus Phänomenen in antriebsinternen Signalen

Um das Ziel einer überwachbaren Diagnose zu erreichen, ist es unabdingbar, skalare Kenngrößen aufzustellen, da eine Beschreibung der Schadensphänomene z.B. in Form einer grafischen Wasserfalldarstellung ([Bild 4-11](#)) nicht den im Kapitel 2 aufgestellten Anforderungen genügt. Es muss ein quantifizierbares und überwachbares Ergebnis erreicht werden. Die Phänomene müssen in eine bewertbare, quantisierbare Form gebracht und jeweils im Grad ihrer Ausprägung zu einem Zeitpunkt durch eine einzelne Zahl ausgedrückt werden.

Durch die Einführung und Definition von Kenngrößen ergeben sich bestimmte grundsätzliche Randbedingungen.

Für eine optimale Nutzung und für jeden Anwendungsfall müssen sogar die Parameter der Regelkaskade für jeden Antriebsstrang individuell angepasst werden /44/. Auf Grund dieser Schwankungen ist ein absoluter Vergleich der Kenngrößen zwischen zwei Maschinen gleichen Typs und gleicher Ausstattung nicht sinnvoll möglich. Weiter kann von einer nicht linearen Abhängigkeit zwischen Kenngröße und verbleibender Restlebensdauer ausgegangen werden. Somit ergibt sich die Notwendigkeit, den relativen Verlauf in Form eines Trends über die Zeit als Basis für die Aussage zu nutzen.

Eine Grenzwertüberwachung, wie in [Bild 2-1](#) dargestellt, kann nur relativ über einen zu bestimmenden Zeitraum erfolgen. Bei der Interpretation der Kenngrößen ist es nicht unbedingt möglich, mittels linearer Regression auf den aktuellen Zustand des Antriebsstranges zu schließen, sondern es ist eher von einem exponentiellen Schadenswachstum auszugehen (Vergleiche Abschnitt 4.4.3 drittes Stadium). Folglich ist meist keine absolute Aussage möglich.

Das Ziel einer automatisch überwachbaren Diagnose soll im vorliegenden Kapitel durch die Bewertung in Form einer Kenngröße der in Kapitel 4 aufgestellten Schadensphänomene erreicht werden. Die betrachteten mechanischen Komponenten in einem Antriebsstrang unterscheiden sich unter anderem durch die konstruktiven Gegebenheiten der Wälzlagerung (Wälzkörperanzahl, Wälzradius etc.). Daraus ergeben sich, z.B. bezüglich der Vorschubgeschwindigkeit, unterschiedliche charakteristische Frequenzen. Über diese ist es möglich, eine Zuordnung von Schadensphänomen im Messsignal und den zugehörigen Komponenten herstellen zu können. Hierzu bietet sich eine frequenzselektive und -bewertende Betrachtung der relevanten Signale der Bewegung

$x, \dot{x}, \ddot{x}, \varphi, \omega, \dot{\omega}$  und des Motormomentes  $i$  (vgl. Abschnitt 4.4.3) an.

Zusammenfassend aus Kapitel 4 kann festgestellt werden, dass die meisten verursachten Schäden durch das Übertragen von Leistung entstehen. Deshalb sind die Auswirkungen der Schäden den antriebsinternen Signalen auch im Transportieren und Umsetzen von mechanischen und elektrischen Energien zu suchen.

Es ist dabei immer zwischen den Signaleigenschaften und den durch das Signal ausgedrückten physikalischen Zuständen zu unterscheiden. So ist beispielsweise keinesfalls die Signalenergie eines kontinuierlichen Signals  $\dot{x}$ ,  $E = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}^2(t) dt$ , aus der Signaltheorie, nicht mit der aus der Physik stammenden kinetischen Energie  $E = \frac{1}{2} m \dot{x}^2$  der durch diese Geschwindigkeit  $\dot{x}$  ausgedrückten Bewegung gleich zu sehen.

Der Grundsatz aus Abschnitt 4.5, dass die Energie in dem betrachteten Antriebsstrang nicht nur in Form einer möglichst konstanten mechanischen Nutzbewegung umgesetzt wird, dient als Basis für die weiteren Betrachtungen /141/. Dieser Grundsatz ist auch der Arbeit von Schopp /115/ für zusätzliche Sensoren zu entnehmen. Es ist dabei nicht relevant, ob mehr elektrische Energie in Schwingungen oder Wärme verwandelt wird. Für die weiteren Betrachtungen ist zunächst in Bild 5-1 die Leistungsbilanz eines Antriebsstranges ohne Prozess aufgezeigt.

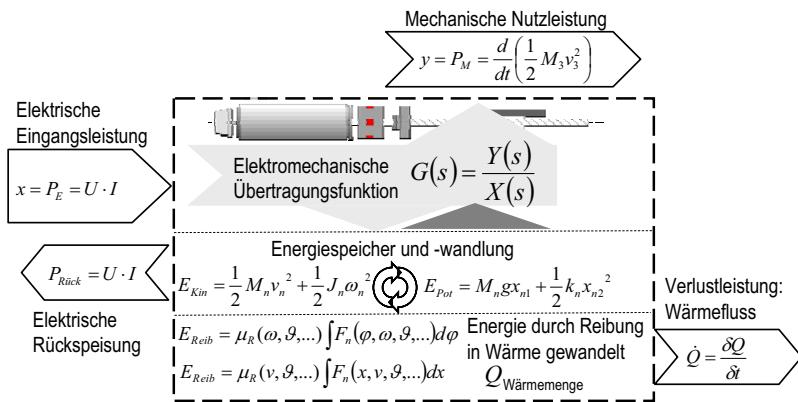


Bild 5-1: Leistungsbilanz eines Antriebsstranges mit KGT

Da die Messungen nicht während des Bearbeitungsprozesses durchgeführt werden, sind Einflüsse auf das Spektrum durch den Prozess ausgeschlossen. Die Relevanz der mechanischen Nutzleistung wird aus der aufgezeigten Leistungsbilanz ersichtlich. Ziel des gesamten Antriebsstranges ist es, den Anforderungen des auf der WZM laufenden Bearbeitungsprozesses gerecht zu werden. Wie aus /132/ und /142, 143/ zu entnehmen ist, spielt die Laufruhe bzw. eine konstante Vorschubgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle für die erreichbare Fertigungsqualität. Auf Grund dieses wichtigen Einflusses wird die Kenngröße im Folgenden für die Vorschubgeschwindigkeit entwickelt. Als Bezugsbasis von Seiten des Prozesses gilt die Soll-Geschwindigkeit. Eine Argumentation auf Basis der weiteren verfügbaren Signale wie  $x, \ddot{x}, \varphi, \dot{\omega}, i$  oder einer Kombination ist analog möglich. Die weiteren Ausführungen betrachten zunächst den Sollwert aus der CNC-Steuerung in Form eines Vektors  $[x_{Soll}, \dot{x}_{Soll}, \ddot{x}_{Soll}, \dddot{x}_{Soll}]$ .

Da alle mechanischen Vorgänge und Eigenschaften nicht idealisiert zu betrachten sind, kann bei einer konstanten Soll-Geschwindigkeit  $\dot{x}_{Soll}$  nicht von einer konstanten Ist-Geschwindigkeit  $\dot{x}$  ausgegangen werden, insbesondere wenn das Spektrum der Geschwindigkeit betrachtet wird. Daraus ist weiter ersichtlich, dass der Ausgang des Lagereglers  $\omega_{Soll}$  nicht mit der Soll-Geschwindigkeit  $\dot{x}_{Soll}$  gleich zu setzen ist. Die nicht konstanten Anteile der gemessenen Ist-Geschwindigkeit entstehen durch Schwingungen im mechanischen System. Diese Schwingungen haben als Ursache betriebsbedingte Phänomene, wie systembedingte Steifigkeiten, Fertigungstoleranzen der Mechanik und Schadensphänomene.

Der Sollwertverlauf der Vorschubgeschwindigkeit und somit die Anregung des mechanischen Systems lässt sich in zwei Arten von Bereiche einteilen. Zuerst sind die Bereiche **konstanter Soll-Geschwindigkeit** zu nennen. Die zweite Art von Bereichen zeichnet sich durch eine **wechselnde Soll-Geschwindigkeit**, auch durch Vorzeichenwechsel, aus. In diesen beiden Arten von Bereichen treten jeweils unterschiedliche betriebsbedingte Phänomene auf.

### Bereiche konstanter Soll-Geschwindigkeit

Der Haupteinfluss auf die nicht konstanten Anteile der Geschwindigkeit stammt aus mechanischen Ungenauigkeiten (wie Spindelsteigungsfehler) und Schäden. Der Einfluss der Steifigkeiten fällt auf Grund der niederfrequenten und schwachen Anregung ( $\dot{x}_{Soll} = konst \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \ddot{x}_{Soll} = 0$ ) sehr gering aus.

Folgende Phänomene können im Spektrum der Ist-Geschwindigkeit durch Schäden hervorgerufen werden:

- Einzelbänder entstehen durch die bekannten charakteristischen Frequenzen (Siehe Abschnitt 4.3.1 bzw. 4.4.3 Stadium zwei, periodische Schadensarten).
- Breitbandige Frequenzanteile entstehen bei Oberflächenschädigung durch viele reibende Partikel (Siehe Abschnitt 4.3.2 bzw. 4.4.3 Stadium zwei, nicht-periodische Schadensart).

### Bereiche wechselnder Soll-Geschwindigkeit

Bei einer sich ändernden Soll-Geschwindigkeit ( $\dot{x}_{Soll} = v(t) \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \ddot{x}_{Soll} = a(t)$ ) ergibt sich eine mehr oder minder starke Anregung des mechanischen Systems. Der Einfluss der Steifigkeiten und Dämpfungen ist in diesem Falle dominant. Es kommt zu einer Anregung der mechanischen Eigenfrequenzen. Bei dieser Art der Anregung sind vor allem folgende Schadensphänomene ausgeprägt:

- Entdämpfung und daraus folgende Instabilität der Reglerkaskade  
(Siehe Abschnitt 4.4.3 Stadium drei bis vier, nicht-periodische Schadensart).
- Mitkopplung des Schadens  
(Siehe Abschnitt 4.4.3 Stadium drei bis vier, nicht-periodische Schadensart).

## 5.1 Kenngröße Schwingungsenergie

In den folgenden Abschnitten wird das Verfahren zur Berechnung einer auf Diagnosezwecke ausgerichteten Kenngröße, bezeichnet als „Schwingungsenergie“, hergeleitet. Zusätzlich werden ihre allgemeinen Eigenschaften vorgestellt. Darauf folgt eine Unterteilung in drei unterschiedliche Anwendungen.

Die Entwicklung der Kenngröße Schwingungsenergie basiert auf dem in Bild 5-2 links dargestellten Versuch. Zur Versuchsdurchführung wurden mit Hilfe eines Zugankers (3) zwei KGT-Muttern (1) mit einer Kraft von  $9850 \text{ N}$  ( $C_{dyn}/2$ ) verspannt. Durch diese unter normalen Betriebsbedingungen in einer WZM unüblich große Belastung sollte ein Zeitraffereffekt erreicht werden. Zusätzlich wurde an einer Mutter ein Linearmaßstab angebracht.

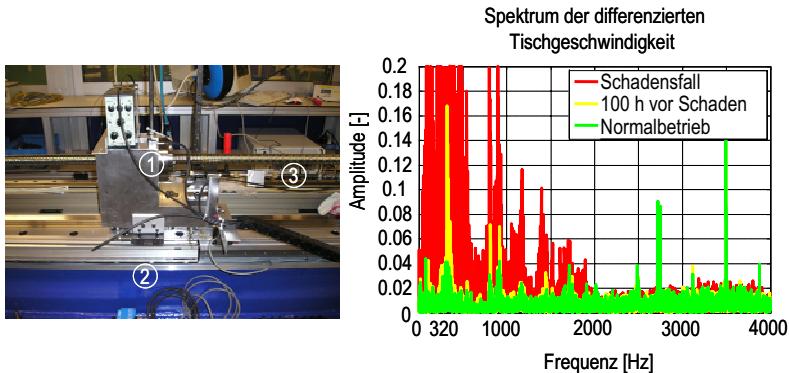


Bild 5-2: Ausschnitt aus dem Versuchsaufbau (links) bei Rexroth: KGT-Mutter (1), Tischmesssystem (2) und Zuganker (3); Spektrum der Geschwindigkeit aus (2) zu unterschiedlichen Zeitpunkten (rechts)

Aufgrund der in Kapitel 4 beschriebenen Untersuchungen und Erkenntnisse wurde aus Abschnitten der Ist-Geschwindigkeit, gemessen am Tischmesssystem (2), das Spektrum der Autokorrelation  $S_{xx}$  mittels einer DFT errechnet. Die Autokorrelation wurde genutzt, um den Einfluss des vorhandenen Rauschens zu minimieren. Das in Bild 5-2 rechts dargestellte Spektrum zeigt, dass die Amplitude für bestimmte Frequenzen im Schadensfall ansteigt, wie zu erwarten war. Für die Ermittlung einer skalaren Kenngröße wurde das in Bild 5-3 dargestellte Vorgehen gewählt.

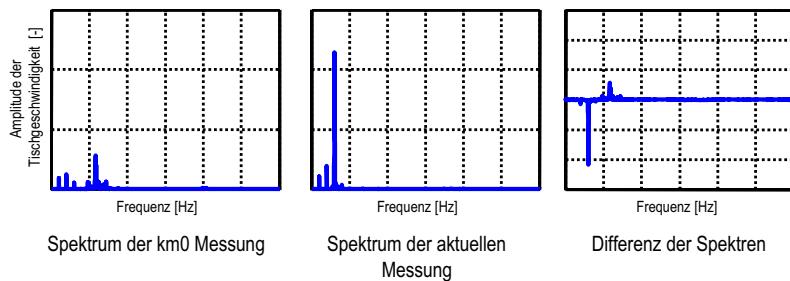


Bild 5-3: Bilden der Differenz der Spektren als erster Schritt zur Ermittlung der Kenngröße Schwingungsenergie

Um schadhafte Veränderungen zu erfassen, wird die frequenzspezifische Differenz der im Urzustand gemachten ersten Messungen (km0) zu einer aktuellen Messung berechnet /95/.

Die anschließende Bewertung der Differenz basiert auf einem RMS-Ansatz. In Formel (5.1) ist die Summe über den gemessenen Frequenzbereich von  $f_0 = 0$  Hz bis  $f_{\max}$  wiedergegeben. Das Ergebnis der Berechnung stellt die Kenngröße Schwingungsenergie dar.

$$P_{rel} = \sum_{f_0=0}^{f_{\max}} \sqrt{(S_{0xx}(f) - S_{xx}(f))^2} \quad (5.1)$$

Aus den Variationsmöglichkeiten des Ansatzes nach Formel (5.1) ergeben sich drei unterschiedliche Anwendungsfälle:

1. Durch die Berechnung der allgemeinen Schwingungsenergie  $P_{rel}$  über das gesamte zur Verfügung stehende Spektrum kann eine generelle Aussage über den Zustand des Antriebsstranges getroffen werden. Es ist nicht möglich, den Schaden genauer zu spezifizieren. Bereiche konstanter Geschwindigkeit werden mit Hilfe eines in /119/ beschriebenen Algorithmus laufend bestimmt.
2. Die Art der Auswahl des analysierten Signalabschnittes kann als Einflussgröße genutzt werden. Es ist zu unterscheiden, ob der Bereich konstanter Geschwindigkeit algorithmisch unabhängig für jede Messung erneut ermittelt oder einmalig in Anlehnung an ein bekanntes Sollprofil festgelegt wird. Durch das einmalige Festlegen des Signalabschnittes anhand des Sollprofils kann in Form der speziellen Schwingungsenergie implizit die gesamte Dämpfung der Mechanik mit abgebildet werden.
3. Durch die Berechnung der komponentenspezifischen Schwingungsenergie nur über Ausschnitten des Spektrums ist es möglich, speziell eine Komponente zu betrachten. Hierzu werden die Grenzen der Summe  $f_0$  bzw.  $f_{\max}$  verwendet. Diese Grenzen orientieren sich an den charakteristischen Frequenzen einer Komponente, für die die Diagnoseaussage getroffen werden soll.

### 5.1.1 Erster Ansatz und detaillierter Algorithmus

Mit dem ersten Ansatz wird das Ziel verfolgt, eine generelle Aussage über den gesamten Antriebsstrang zu treffen. Da eine absolute Aussage nicht möglich ist, sondern nur ein Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Zeitpunkten, muss zunächst der Ursprungszustand in einer km0 Messung erfasst werden. Um eine einheitliche Bewertungsbasis zu schaffen, müssen die nachstehenden Randbedingungen für die km0-Messung und die weiteren Messungen identisch beachtet werden.

1. Betriebswarmer Zustand
2. Kein Bearbeitungsprozess, keine Störungen durch andere Schwingungsquellen (Hauptspindel, etc.)
3. Gleiche Parameter der Datenaufzeichnung
4. Gleiche Belastungen durch Massen und Massenträgheiten
5. Gleiche, konstante Anregung (Soll-Beschleunigung, Soll-Ruck, usw.)
6. Gleicher Betrag und gleiche Richtung der konstanten Geschwindigkeit
7. Gleicher Bewegungsabschnitt auf dem gesamten Verfahrweg

Die Einhaltung dieser Randbedingungen ermöglicht es, so viel betriebsbedingte Schwingungsquellen wie möglich wahlweise zu unterdrücken oder in ihrer Frequenz und Amplitude konstant zu halten.

Neben diesen Randbedingungen darf es beim frequenzspezifischen Signalvergleich, in Form einer Differenz, zwischen dem km0 und dem aktuellen Zustand zu keinen Interferenzen im Zeitbereich kommen. Um diesen Effekt auszuschließen, findet der Vergleich im Frequenzbereich statt. Nach einer normierten DFT und der Berechnung der Autokorrelation  $S_{xx}$  können Betrag und Phase separat betrachtet werden. Somit kann der mögliche Effekt der Signalauslöschung durch passende Phasenverschiebung im Zeitbereich ausgeschlossen werden. Das Vorgehen des gesamten Algorithmus zur Berechnung der Kenngröße Schwingungsenergie ist in Bild 5-4 aufgezeigt.

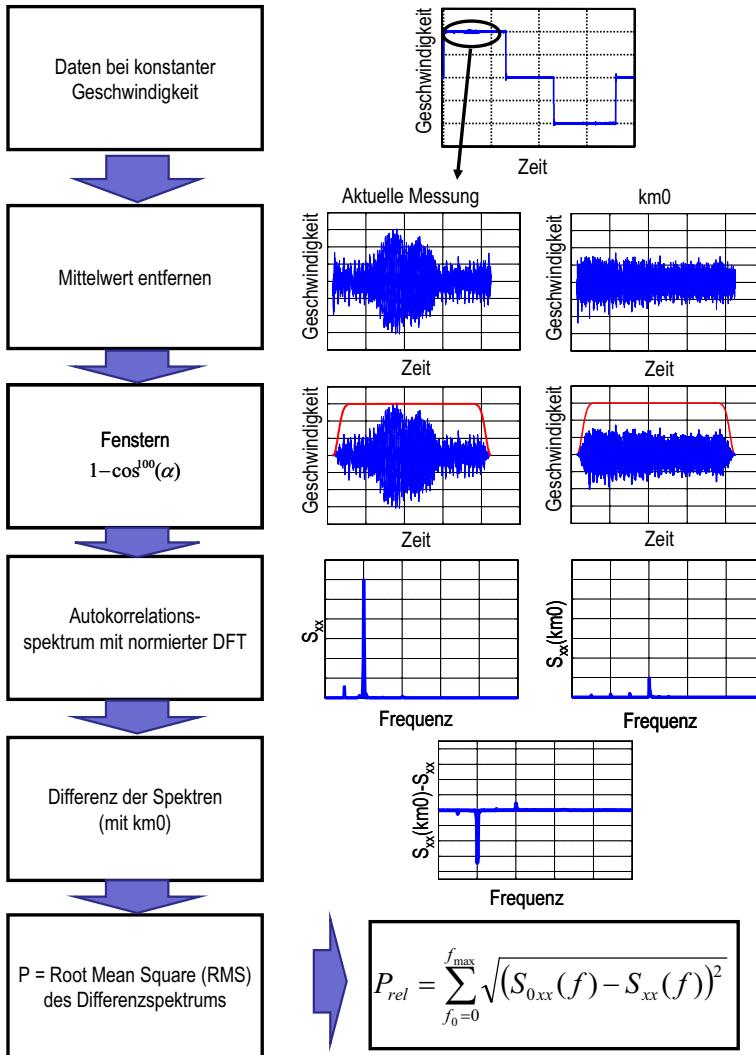


Bild 5-4: Vorgehen zur Ermittlung der Schwingungsenergie

Dieser Ansatz berücksichtigt neben der eigentlichen charakteristischen Frequenz eines Schadens auch die in Abschnitt 4.4.2.1 erwähnten Schwingungen mit der

Resonanzfrequenz des umgebenden Materials, die durch die Impulsreihenfolge eines Schadens angeregt werden. Da es vom Einzelfall abhängig ist, ob das direkte oder indirekte Phänomen dominant ist, ist dies von Vorteil gegenüber dem später aufgezeigten komponentenspezifischen Ansatz, bei dem der direkte Mechanismus bevorzugt wird.

Durch diesen frequenzselektiven Algorithmus werden zwei unterschiedliche Effekte im Spektrum erfasst. Es wird nicht nur die Amplitude an sich bewertet, sondern auch eine Verschiebung der Frequenz erfasst. Auch ist der Fall mit einer Reaktion der Kenngröße abgedeckt, wenn sich auf zwei oder mehreren Frequenzen die Amplituden gegenläufig verhalten und es durch Zufall zu keiner Veränderung im Zeit-RMS kommen könnte.

Diese vergleichende, frequenzspezifische Bewertung setzt eine Transformation in den Frequenzbereich voraus. Daher sind auch die Einflüsse der Mathematik und Numerik bei dieser Transformation in den Frequenzbereich zu berücksichtigen /144/. Hier ist das Ziel, die nicht vermeidbaren Effekte aus den diskreten mathematischen Ansätzen und der Numerik, wie beispielsweise Alias- und Leck-Effekte, möglichst dauerhaft konstant zu halten.

Da immer bei gleicher Anregung in Form der Soll-Geschwindigkeit ein gleich langer Bereich mit einer festen Aufnahmefrequenz aufgezeichnet wird, ergibt sich eine feste Zeit- / Frequenzauflösung bzw. Orts- / Frequenzauflösung. Eine Auflösung der Frequenz von 1 bis 0,5 Hz hat sich im Einsatz bewährt und ist in der aktuellen Steuerungstechnik umsetzbar. Wie oben beschrieben, ist die Frequenzauflösung als Funktion von Abtastzeit und Aufnahmezeit immer konstant zu wählen. Es fehlt daher nur ein konstanter Faktor zum RMS-Wert, der für den relativen Vergleich nicht relevant ist. Auf die Bestimmung dieses Faktors wurde verzichtet, um den Rechenaufwand für die Kenngröße so klein wie möglich zu halten.

### 5.1.2 Spezieller Ansatz

Durch die Art und Weise, wie der zu analysierende Signalabschnitt festgelegt wird, kann Einfluss auf die Aussagekraft genommen werden. Dabei wird ggf. weiteres vorhandenes Modellwissen genutzt, um den Bereich konstanter Geschwindigkeit festzulegen. So können auch nicht-periodische Schäden berücksichtigt werden, deren Auswirkung sich

als Abnahme der Dämpfung beschreiben lässt. Vor dem Ausfall des Wälzkontakte und dem Verlust des regelbaren Übertragungsverhalten beginnt der Regelkreis instabil zu werden.

Bei diesem Vorgehen wird die Datenaufnahme fest an ein bestimmtes Sollprofil gekoppelt. An dem in Form einer Geschwindigkeitsrampe vorliegenden Profil wird wahlweise durch eine Messung oder durch mathematische Analyse der früheste Zeitpunkt oder Ort festgelegt, an dem die Kriterien für konstante Ist-Geschwindigkeit erfüllt sind. Da immer von konstanten Rampenparametern ( $x_{Soll}, \dot{x}_{Soll}, \ddot{x}_{Soll}, \ddot{\ddot{x}}_{Soll}$ ) auszugehen ist, kann die Beruhigungszeit auch in eine feste Position  $x_{Soll}$  umgerechnet werden. Die Überschreitung dieser Zeit oder Position kann dann eine Messung triggern. Dieses Vorgehen zum Festlegen der Triggerzeit oder -position ist in Bild 5-5 links dargestellt. Der Triggerzeitpunkt liegt hier bei 0,0825 s. Der beginnende, vorgegebene Toleranzschlauch ist schwarz eingezeichnet. Im rechten Teil von Bild 5-5 ist die Auswirkung der geringeren Dämpfung dargestellt. Der vorgegebene Toleranzschlauch wird erst nach 0,135 s erreicht. Durch den festen Triggerzeitpunkt von 0,0825 s werden verstärkt die durch das Sinken der Dämpfung verursachten Schwingungen berücksichtigt.

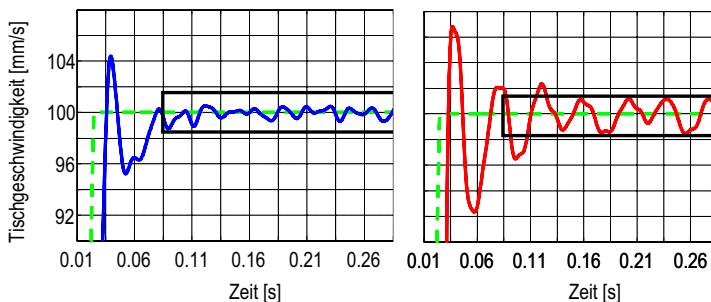


Bild 5-5: Festlegung des Triggerpunktes (links Sollsignal: grün gestrichelt, Ist-Signal: blau), Auswirkungen der geringeren Dämpfung (rechts Sollsignal: grün gestrichelt, Ist-Signal: rot)

Um diese Methode ohne Unterbrechung des Produktionsbetriebes zu ermöglichen, muss nach einer immer wiederkehrenden Bewegung gesucht werden. Hierzu bietet sich der Werkzeugwechsel an, insbesondere das Wiedereinfahren in den Bearbeitungsraum. Der

Vorteil des Wiedereinfahrens liegt in der konstanten Startposition, jedoch kann prinzipiell auch das Verlassen des Arbeitsraumes genutzt werden. Dies kann jedoch nur als eine Empfehlung ausgesprochen werden, da es sich hierbei immer um eine Einzelfalllösung für jeden Werkzeugmaschinentyp handelt. Des Weiteren müssen die Parameter für eine mögliche Messung, wie Messdauer, und die vorgegebene Soll-Geschwindigkeit mit der möglichen Verfahrstrecke in Einklang gebracht werden.

### **5.1.3 Komponentenspezifischer Ansatz**

Der komponentenspezifische Ansatz setzt ebenfalls die Modellkenntnis der charakteristischen Frequenzen der Komponenten mit Wälzkontakt voraus. Durch eine Beschränkung der Differenzbildung im Spektrum auf die Bereiche mit den charakteristischen Frequenzen ist eine weitere Berechnungsmöglichkeit gegeben. Die Ausgangsspektren können, wie oben beschrieben, aus der Kette „Zeitsignal → DFT → Autokorrelationsspektrum“ entnommen werden.

Diese Kette ist frequenzbandspezifisch auch mit Hilfe des Goertzel-Algorithmus /145/ verkürzt möglich. Dieser Algorithmus basiert auf einem digitalen Filter. Daher können die relevanten Bandanteile auch mit einem Filter direkt aus dem digitalen Signal herausgeschnitten werden. Die endgültige Berechnung des Kennwertes kann dann durch den Vergleich der Zeit-RMS des charakteristischen Bandanteils erfolgen.

## **5.2 Ergebnisse der Kenngröße Schwingungsenergie**

In diesem Abschnitt werden exemplarisch drei Ergebnisse der Kenngröße Schwingungsenergie vorgestellt. Dabei liegen den Daten die schon in den vorherigen Kapiteln erwähnten Versuche zugrunde. Es werden die letzten drei künstlichen Schadensszenarien aus Abschnitt 4.1.4 angewendet.

Die Zunahme des Kennwertes ließ sich dabei jeweils wie oben ausgeführt direkt mit einer Verschlechterung des Zustandes der Antriebsachse in Korrelation setzen. Wie den drei Bildern zu entnehmen ist, läuft der Verschleißprozess nicht-linear. Somit ist die Aussage am Anfang dieses Kapitels, dass das Schadenswachstum exponentiell verläuft, bestätigt. Bei den hier dargestellten Versuchsergebnissen handelt es sich um:

1. Versuch „Mangelschmierung des Axiallagers“ in Bild 5-6,
2. Versuch „Sterbender KGT“ in Bild 5-7 und
3. Versuch „Schleifpaste im KGT“ in Bild 5-8.

Während des normalen Betriebs ist in allen Verläufen zunächst eine lang andauernde Ruhephase zu erkennen. Die Kenngröße und somit die Zusammensetzung des Spektrums ändert sich nicht. Da hier die km0-Messungen nicht im betriebswarmen Zustand erfolgt sind, ist immer der Effekt des Warmlaufens, in Form eines Anstiegs, deutlich erkennbar. Die Aussage, dass sich die Kenngröße ohne Schadensphänomene auf einem bestimmten Wert einpendelt und diesen sehr lange beibehält, wird explizit sowohl in Bild 5-6 links deutlich als auch bei Anfängen der weiteren Versuche. Als einfachste Methode zur Bestimmung einer Überwachungsgrenze kann zunächst der doppelte Wert während des normalen Anfangsbetriebes gewählt werden. Dieser Wert hat sich im Rahmen aller Versuche bestätigt. Dabei sind jedoch auch Einlaufspänomene zu beachten. Es sollte daher mit einem Toleranzband um den erwarteten Wert gearbeitet werden.

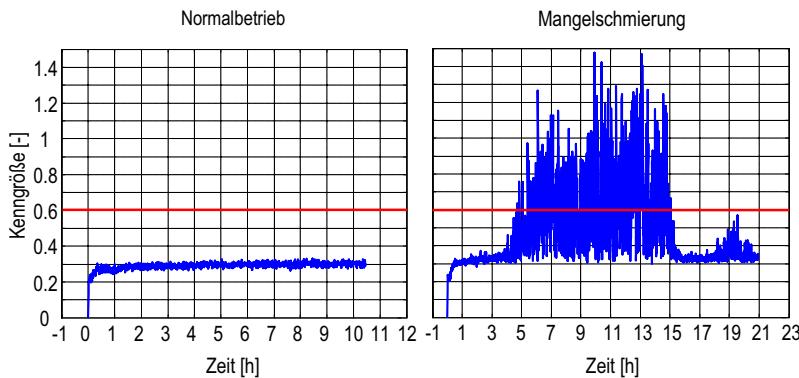


Bild 5-6: Trendverlauf der Kenngröße Schwingungsenergie für den Normalbetrieb (links) und für eine Schaden aufgrund einer Mangelschmierung des Axiallagers (rechts)

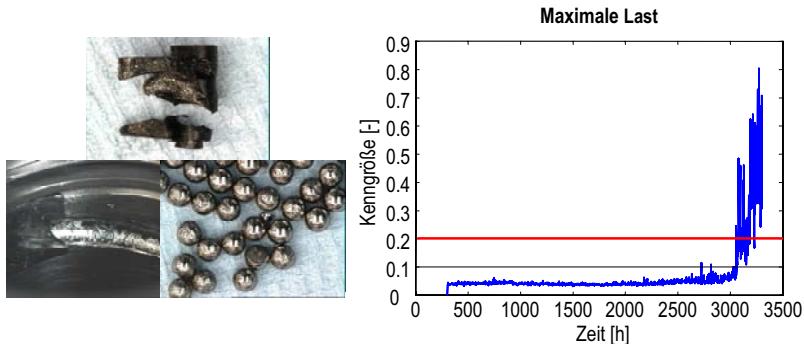


Bild 5-7: Schadensauswirkungen auf die Wälzpartner im Versuch „Sterbender KGT“ (links) und Trendverlauf der Kenngröße Schwingungsenergie (rechts)

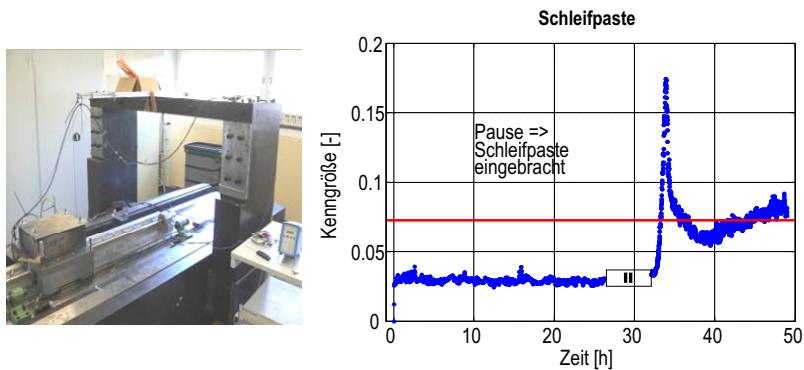


Bild 5-8: Versuchsaufbau (links) und Trendverlauf der Kenngröße Schwingungsenergie bei Schleifpaste im KGT (rechts)

### 5.3 Fazit zur Kenngröße Schwingungsenergie

Mit dem Aufstellen der Kenngröße Schwingungsenergie ist es gelungen, die formulierten Ziele:

- Automatisch überwachbare Ergebnisse
- Eindeutigkeit der Ergebnisse
- Kein Expertendilemma
- Trennung: Prozess- und Maschinenzustand
- Integration in bestehende Steuerungssysteme

aus Abschnitt 1.1 zu erreichen. Die Kombination aus automatisierbarer Auswertung zur Überwachung, Kausalität zwischen Diagnoseergebnis und Schadensbild und Integration in die Steuerung ist mit der rein signalanalytischen Methode gelungen. Das nötige Modellwissen ist nicht mehr zentraler Bestandteil der Methode.

Die in Kapitel 4 beschriebenen schadensbedingten Phänomene wurden sowohl allgemein als auch für die einzelnen Komponenten zu einer skalaren Kenngröße zusammengefasst. Die Phänomene sind in eine bewertbare, quantisierbare Form gebracht worden und können durch eine einzelne Zahl ausgedrückt werden. Die hier aufgezeigte Kenngröße Schwingungsenergie  $P_{rel}$  genügt allen in Kapitel 2 aufgestellten Anforderungen.

Aus dem Verlauf der Kenngröße ist eine Veränderung und vor allem eine Verschlechterung des Zustandes der Antriebsachse erkennbar. Die hier aufgestellte Kenngröße kann als Grundlage für die Prognose der verbleibenden Restlebensdauer, unter Berücksichtigung der noch zu erwartenden Last, im Sinne des Abschnittes 2.1 genutzt werden.

Um eine wissenschaftlich fundierte Aussage über die Grenzwerte und die Prognose der Restlebensdauer zu bekommen, sind weitere Felddaten und Versuche notwendig. Daneben soll auch der Zusammenhang zwischen Kenngröße und Fertigungsqualität in der laufenden Forschergruppe FOR 639 hergestellt werden.

Um den Nutzen im Produktionsumfeld nachzuweisen und eine breitere statistische Basis zu bekommen, wurde die Kenngröße Schwingungsenergie für zwei Steuerungssysteme umgesetzt. Die Erhebung von weiteren Felddaten aus der Produktion kann mit der in Kapitel 6 vorgestellten Umsetzung erfolgen.

## 6 Prototypische Umsetzung

Da die im vorherigen Kapitel beschriebene Kenngröße nicht Teil der bestehenden Systeme ist, wurden diese prototypisch im Rahmen von Industrieprojekten durch das ISW umgesetzt. Zunächst wurde nur der spezielle und komponentenspezifische Ansatz übernommen. Als Zielsysteme wurden zum einen die IndraMotion MTX von BoschRexroth, zum anderen die SINUMERIK 840D von Siemens ausgewählt. Das Programm, für die Siemensumsetzung wurde SinDiag genannt, die Realisierung für BoschRexroth SmartDiag (Excalibur).

Ziel dieser Realisierung war es, zwei Diagnosetools zu erstellen, die in einer Produktionsumgebung einsetzbar sind. Es sollte damit eine Basis geschaffen werden, um an produzierenden Werkzeugmaschinen Diagnosedaten zu sammeln und um die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen anwenden zu können. Dieser Ansatz sollte es ermöglichen, parallel zum normalen Betrieb Daten aufzeichnen und zusätzlich separate Testzyklen auswerten zu können. Mit den erfassten Felddaten können die Praxiserfahrungen mit der Kenngröße und dem daraus resultierenden Trendverlauf vertieft werden. Für den dauerhaften Praxiseinsatz ist es weiter nötig, eine Akzeptanz sowohl beim WZM Hersteller als auch beim Bedienpersonal aufzubauen.

Obwohl letztlich erhebliche Unterschiede in der Systemarchitektur der beiden Antriebs- und Steuerungssysteme vorliegen, kann das prinzipielle Vorgehen allgemein gültig beschrieben werden. Um den echtzeitfähigen Teil der Steuerung oder des Umrichters nicht weiter zu belasten, wird er bei den hier vorgenommenen Implementierungen nur zur Datengewinnung und -weiterleitung genutzt. Die unterschiedlich gewonnenen Daten werden einem Windows - Task zur weiteren Verarbeitung übergeben. Somit können wiederholt unterschiedliche Auswertealgorithmen ohne erneuten Eingriff in die sensible Echtzeitumgebung realisiert und erprobt werden. Die Ergebnissdarstellung erfolgt dann durch ein weiteres unabhängiges Programm.

Ein Merkmal dieser Umsetzung ist, dass nur die Datenaufnahme an ein strikt einzuhaltendes Zeitraster gebunden ist. Die weitere Übermittlung und Verarbeitung ist auf Grund des eher trügen Verschleißvorganges nicht zeit- und rechenzeitkritisch. Wenn die Daten erst nach Minuten ausgewertet und dargestellt werden, ist die Geduld des Nutzers als einschränkendes Kriterium zu sehen.

Eine direkte Einflussnahme auf die Werkzeugmaschine, wie das Drosseln oder gar Unterbrechen der Produktion, wurde zunächst nicht vorgesehen. Es soll zunächst Akzeptanz bei Betreiber und Maschinenbediener aufgebaut werden.

## 6.1 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung wurde generisch erstellt, um für beide Umsetzungen identisch zu sein. Sie folgt dem durch diese Arbeit aufgezeigten Schema in Bild 6-1.

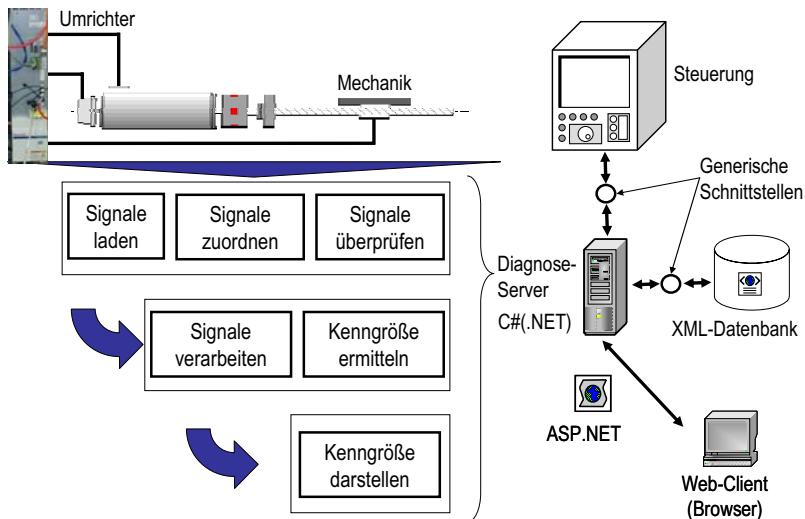


Bild 6-1: Vorgehen und grundlegende Struktur zur Kenngrößenermittlung

Wichtig war es, die Funktionalität der bis dato verwendeten Matlab-Skripte zu übertragen. Im Einzelnen müssen dafür folgende komplexere mathematische Funktionen möglich sein. Diese wurden durch das ISW in C# implementiert:

1. Mittelwert entfernen
2. Filterung, variable und feste Fensterung (z.B.: Hamming, Hanning)
3. Integrieren und Differenzieren
4. Berechnung der FFT (In Form einer DFT)
5. Berechnung von Auto- und Kreuzkorrelation

## 6.2 Architekturnspezifische Umsetzung für Siemens (840D)

Das von Siemens bei der SINUMERIK 840D Powerline umgesetzte Konzept beruht auf einer örtlichen Trennung von Lage- und Drehzahlregelung. Auf dem echtzeitfähigen Teil der Steuerung findet neben der Verarbeitung des NC-Programmes zu einer achsbezogenen Bahn auch die Lageregelung statt. Die Drehzahlsollwerte werden über den echtzeitfähigen Profibus (üblich 1 ms Taktzeit) an die Umrichter übermittelt. Dort findet die Drehzahl- und Stromregelung statt. Die Erfassung der antriebsinternen Signale ist durch das ISW mit Hilfe von IMD (siehe Abschnitt 3.5.4) im Echtzeitteil der Steuerung umgesetzt worden. Die aufgezeichneten Daten werden über vorhandene Funktionen dem nichtechtzeitfähigen Teil der Implementierung zur Verfügung gestellt, der auf dem Front-End PC der Steuerung läuft.

Nachdem der IMD-Zyklus in die Echtzeitumgebung geladen wurde, kann die Datenaufzeichnung durch einen Befehl (z.B. CC\_START\_TASK()) im NC-Programm getriggert werden. Neben dem eigentlichen Start und Stopp Befehl können auch Parameter wie die aufzuzeichnenden Signale an die IMD- Funktion übergeben werden. Nach dem Beenden der Aufzeichnung werden die gewonnenen Daten auf dem File-system des Numerik Control Kernel (NCK) abgelegt. Der auf der Windows-Umgebung laufende Task holt diese Daten im ACX-Format ab. Die Kommunikation zwischen dem IMD Compilcycle und der HMI wurde über GUD Variable und blockweise Übertragung mit Hilfe von ACX-Files, die von dem Compilcycle erstellt werden und anschließend von der HMI Anwendung ausgelesen werden, gelöst. Die Daten werden danach in ein XML-Format umgewandelt, um die weitere Verarbeitung zu erleichtern. Das in Abschnitt 6.1 beschriebene Vorgehen zur Datenverarbeitung wurde durch das ISW auf dem Windows-Betriebssystem umgesetzt.

Für die Darstellung und Bedienung der Diagnose-Funktionalität wurde ein Programm für die HMI erstellt. In Bild 6-2 ist oben eine Darstellung eines Messergebnisses im Zeitbereich und unten das dazugehörige Spektrum zu sehen. Die Austrittsfrequenz der KGT-Kugeln von ca. 28 Hz und ihrer Harmonischen sind deutlich erkennbar.

Über die einzelnen Messungen kann die Kenngröße Schwingungsenergie berechnet und dargestellt werden. Des Weiteren ist beispielsweise mit dem „Ball Screw Drive wizard“ die Möglichkeit gegeben, die charakteristischen Frequenzen eines Kugelgewindetriebs nach der Formel (4.10) zu berechnen.

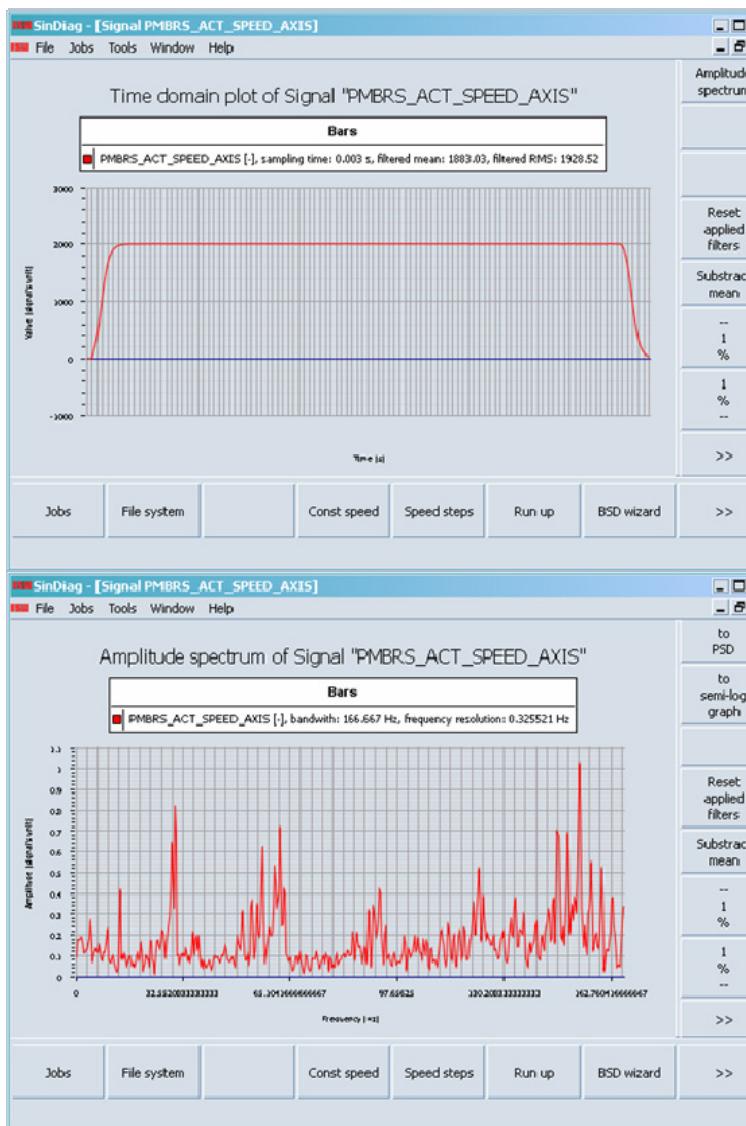


Bild 6-2: Darstellung der Ergebnisse von SinDiag

### 6.3 Architektspezifische Umsetzung für Rexroth (MTX)

In der Steuerungs- und Regelungsarchitektur der Firma Rexroth dient die Sollwertfolge als klare Schnitt- und Trennstelle zwischen Steuerung und Umrichter. Dies wird durch den Antriebsbus SERCOS so festgelegt. Alle Achsreglerkreise werden im Umrichter geschlossen.

Die Umsetzung der Methoden aus dieser Arbeit auf der Rexroth-Systemplattform wurde mit dem Ziel gestartet, soweit wie möglich mit vorhandenen Projektierungsmöglichkeiten auszukommen. Sie sollen mit geringen Eingriffen und neuen Strukturen direkt in der Steuerung implementiert werden, damit die Stabilität in der Produktionsumgebung gewährleistet werden kann. Daher wurde nur die Datenaufnahme direkt mit Umrichter und Steuerung durchgeführt. Die eigentliche Durchführung der Diagnose wurde entsprechend der Darstellung in Abschnitt 6.1 auf einem separaten Windows 2003 Server ausgeführt und die Ergebnisdarstellung über ein Webinterface zugänglich gemacht.

Rexroth Umrichter besitzen in der für diese Arbeit verwendeten Ausführung - wie ab Abschnitt 3.5.2 beschrieben - sehr umfangreiche Möglichkeiten für eigene Erweiterungen. Für die hier beschriebene Umsetzung war vor allem die Oszilloskopfunktion relevant. Mit der integrierten Oszilloskopfunktion können vier Kanäle mit je 8192 Messwerten (32 Bit Float) aufgezeichnet werden. Die variabel wählbare Abtastzeit beträgt intern min.  $62,5 \mu\text{s}$  (Stromregeltakt). Von außen über die Führungs-kommunikationsschnittstelle (z.B. SERCOS) kann aber nur auf Werte im Lageregeltakt zugegriffen werden, wobei dieser aktuell bei Verwendung der „Advanced-Performance“ Option bei  $T_{\text{Lage}} = 250 \mu\text{s}$  liegt. Es war möglich die aufgezeichneten Daten direkt auf dem Filesystem des Echtzeitsystems abzuspeichern. Ein übergreifendes Datenmanagement konnte aufgebaut werden, da ein Ethernet-Anschluss der Steuerung heute als Standard anzusehen ist. Über diesen konnten die üblichen TCP/IP Dienste zur weiteren Datenübertragung genutzt werden.

Für die Nutzung der integrierten Oszilloskopfunktion wurden zwei NC-Programme erstellt. Mit dem Programm „setup\_drive.ngp“ erfolgt die Parametrierung und Überprüfung der aktuellen Oszilloskopeinstellung. Es schließt mit der Aktivierung des Oszilloskops ab, bei der ein Positions-Trigger gesetzt wird. Dadurch wurde der spezielle Ansatz der Kenngröße Schwingungsenergie nach Abschnitt 5.1.2 umgesetzt. Mit dem

zweiten Programm „save\_drive.npg“ wird der Inhalt des Oszilloskopspeichers in Form von vier separaten Datensätzen gespeichert. Dieser Speicherort ist als NFS über TCP/IP erreichbar. Ein externer Diagnose-Server greift auf die so gewonnenen Daten zu und verarbeitet sie weiter. Die sich so ergebende Systemstruktur aus dieser Arbeit ist in Bild 6-3 dargestellt.

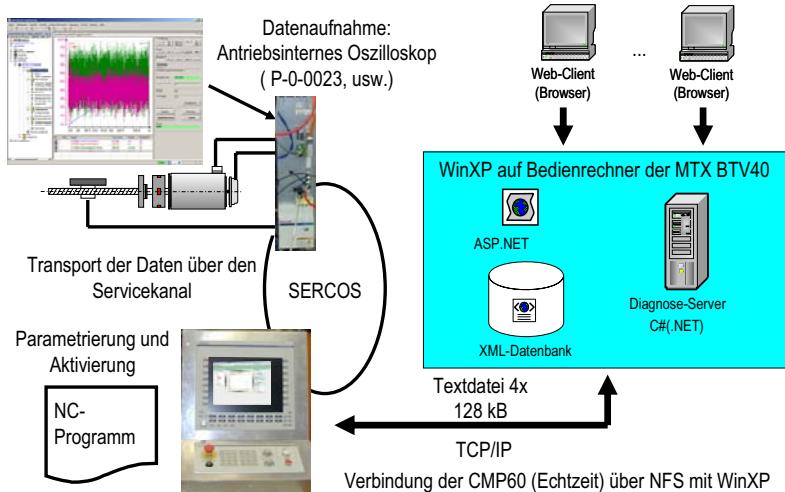


Bild 6-3: Übersicht der Realisierung für BoschRexroth

Eine direkte Einbindung in die HMI ist bewusst für die Beispiel-Implementierung durch das ISW auf der Rexroth-Systemplattform nicht erfolgt. Es wurde hier der Weg über einen separaten Webdienst gegangen. Auf dem Diagnose-Server wird nicht nur die eigentliche Datenverarbeitung durchgeführt, sondern auch eine Webseite gehostet. Mit dieser Webseite können die Funktionalität des Diagnose-Servers administriert und die Ergebnisse dargestellt werden.

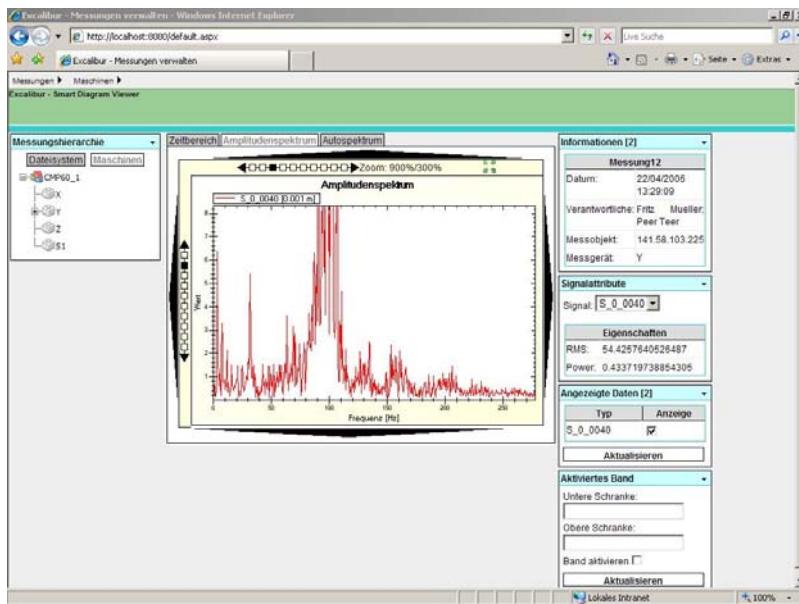


Bild 6-4: Ergebnisdarstellung für die Umsetzung für die Rexroth-Systemplattform

Beispielhaft für die verfügbaren Diagnoseschritte ist in Bild 6-4 das Spektrum einer einzelnen Messung bei konstanter Geschwindigkeit wiedergegeben.

#### 6.4 Fazit zur prototypischen Umsetzung

Es ist gelungen, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Diagnoseverfahren in zwei zuverlässig und robust laufenden Diagnosesystemen umzusetzen. Der Transfer der Methoden und Algorithmen von der Laborhalle in die Produktionshalle ist erfolgreich gelungen. Mit den dabei gewonnenen Felddaten können die Erfahrungen mit der Kenngröße und dem daraus resultierenden Trendverlauf in Zukunft weiter ausgebaut werden. Die vorgenommenen Implementierungen belasten den echtzeitfähigen Teil kaum und die erforderlichen Unterbrechungen der Produktion sind akzeptabel geringfügig. Durch einen modularen Ansatz und objektorientierte Programmierung ist mit Ausnahme der Aufrufe in den herstellerspezifischen NC-Programm-Dialekt ein weitestgehend generisches Ergebnis erreicht worden. Die Darstellung und die

Berechnungen wurden getrennt und erfolgten durch unabhängige Programme, die die gemeinsamen Daten im XML-Format abspeichern.

Ein weiteres Merkmal dieser Umsetzung ist, dass neben der eigentlichen technischen Umsetzung auch Wert auf eine möglichst einfache Bedienung gelegt wurde. Ein Knopfdruck reicht aus, um die gesamte Funktionalität zu erreichen. Neben den eigentlichen Programmen ist vor allem ein detailliertes und ausgearbeitetes Schema für die Integration von Diagnosefunktionen in die bestehenden Steuerungssysteme entwickelt worden. Die vorgestellten Programme sind gemeinsam mit den Steuerungs-herstellern realisiert worden und dienten als Muster für deren Weiterentwicklungen.

Die Kenntnis des gesamten Zustandes der WZM liegt in der Steuerung vor. Die für die Diagnose notwendigen Bewegungen können sicher und koordiniert von der Steuerung veranlasst werden. Da nur NC-Programme verwendet werden, sind alle Überwachungsfunktionen der Umrichter und der Steuerung aktiv. Die Steuerung hat sich als zentrale Instanz für die Diagnose bewährt. Welche Aufgaben der Signalverarbeitung der Umrichter übernehmen kann, hängt von der verfügbaren Rechenleistung und der Buskapazität ab.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Dank steigender Anforderungen an die Werkzeugmaschinen und ihrer zunehmenden Belastung sowie einer engmaschigen Abstimmung der Produktion spielt die Kenntnis des Zustandes der einzelnen Antriebsstränge eine immer größere Rolle für die nötige Zuverlässigkeit. Die für den zuverlässigen Betrieb notwendigen Reserven sollen so klein wie möglich gehalten werden. Durch den Einsatz der Mittel der Maschinendiagnose sollen Ausfälle nicht mehr überraschend kommen, sondern die Planbarkeit von Stillständen soll erhöht werden. Neben dem betriebsbedingten Verschleiß können auch vielfältige Umwelteinflüsse zum Stillstand einer Maschine führen.

In den Messungen der antriebsinternen Signale konnten eindeutig schadensbedingte Phänomene erkannt werden. Es ist der Nachweis gelungen, dass diese Phänomene sich den Eigenschaften der beschädigten Komponente eindeutig zuordnen lassen. Dieser Nachweis konnte sowohl durch theoretische Herleitungen als auch durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen erbracht werden. Neben dem Abgleich zwischen den theoretischen Grundlagen, Abläufen und den Messungen konnte eine allgemeine kausale Wirkkette für die Schadensursache und für den Schadensverlauf aufgestellt werden. Die gelegten Grundlagen haben es ermöglicht, das Ziel „den Verzicht auf zusätzliche Sensoren“ zu erreichen. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich mit den zum Teil aus anderen Gebieten bekannten, etablierten Verfahren, die auf zusätzlichen Sensoren aufbauen, messen.

Aus der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Betrachtung und auf Grund der erreichten Ergebnisse steht durch die Kenngröße Schwingungsenergie ein Verfahren zur Verfügung, mit dem Veränderungen des Zustandes einer Antriebsachse bestimmt werden können. Der Grundsatz, dass Schäden und Verschleiß das Schwingungsverhalten des Antriebsstranges verändern und meist mehr Schwingungen eingeprägt werden, kann festgehalten werden.

Der Offenheit von Steuerungssystemen ist es zu verdanken, dass der Zugang zu den antriebsinternen Signalen möglich ist. Neben der Kenngröße ist dies der wichtigste Faktor für die Etablierung von Diagnosefunktionalität. Es konnte so der Weg aus der Laborhalle in die Produktionshalle beschritten werden. Mit den Umsetzungen aus Kapitel 6 wurde dieser Weg abgeschlossen. Im Zuge steigender Kapazität der Antriebs-

busse stellt die Datenübertragung aus dem echtzeitfähigen Kern keine Engstelle mehr dar.

Es ist gelungen, einen großen Schritt in Richtung einer durchgängigen Methodik zur automatisierten Schadensvorhersage ohne zusätzliche Sensorik an der Maschine zu machen. Ein Maschinenausfall kann somit zuverlässig und rechtzeitig festgestellt werden.

Die entwickelte Kenngröße Schwingungsenergie dient nur zur Beschreibung des Unterschieds zwischen zwei Zeitpunkten. Aus diesem Unterschied kann dann mit Hilfe des Trendverlaufes eine Aussage über den Zustand des Antriebsstranges getroffen werden. Die Prognose setzt jedoch eine genauere Kenntnis der Zukunft und der zu erwartenden Belastungen voraus. Ohne die Beschreibung des aktuellen Zustandes ist jede Prognose zum Scheitern verurteilt.

Als Ausblick ergeben sich für Weiterentwicklungen folgende Punkte:

- **Integration von Lastbetrachtungen für eine belastbare Prognose**

Die Hauptaufgabe ist die Erfassung und Bewertung der durch die Produktion entstehenden Last im Sinne der Norm DIN 31051. Die in /146/ vorgenommene Unterteilung der Last in drei Bereiche (historischer, aktueller und zukünftiger Bereich) ermöglicht ein detailliertes Vorgehen und die Bewertung nach den in beispielsweise für KGT /147/ festgelegten Methoden. Die somit gelegten Grundlagen können als Basis, aufbauend auf dem aktuellen Zustand, für einen Blick in die Zukunft in Form einer Prognose dienen. Es fehlt ein umfassendes Konzept für die Berechnung einer Restlebensdauer aus Diagnoseergebnissen und zu erwartender Last.

- **Wechsel vom Frequenz- in den Ortsbereich**

Neben der hier vorgestellten Methodik ist eine Erfassung des Zustandes auch durch ein anderes Vorgehen möglich. So ist auch der in /138/ vorgestellte Effekt des Spindelsteigungsfehlers vielleicht für Diagnosezwecke nutzbar. Die in /95/ veröffentlichten Ansätze sind weiter auszubauen und in einem geschlossenen Konzept zu konkretisieren und zu bewerten. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Ergebnisse von beiden Bereichen ineinander überführbar sind.

- **Erweiterung auf mehrere Achsen**

Die notwendigen Randbedingungen für den Ansatz der Kenngröße Schwingungsenergie sind meist nur durch einen separaten Diagnosezyklus erfüllbar. Zwar kann dies durch geschicktes Auswählen der Datenaufnahme, z.B. während des Werkzeugwechsels, umgangen werden, doch es stellt noch nicht den Abschluss dar. Die in Werkzeugmaschinen vorhandenen Kopplungen von Achsen können es erfordern, die vorhandenen Ansätze in der Signalanalyse zu erweitern und mögliche neue Phänomene zu erschließen. Es gilt, das Übersprechen von einzelnen Phänomenen zu vermeiden oder diesen Effekt bewusst zur Diagnose zu nutzen. Als Beispiel ist die Verlagerung von Massen und deren Auswirkung auf die erste Eigenfrequenz zu nennen.

- **Statistische Auswertung der Ergebnisse**

Mit dem Ansatz einer umfassenden simulationsbasierten Optimierung der Instandhaltungsstrategie unter Nutzung von Diagnoseinformationen können die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Diagnoseinformationen weiter genutzt werden. Die Ziele für die weiteren Untersuchungen sollten zukünftig komponentenübergreifende, baugruppenspezifische und gesamtmaschinen-spezifische Effekte, deren Auswirkungen und Diagnoseverfahren sein. Ein weiteres, wesentliches Ziel ist die Realisierung einer automatisierten Optimierungsmöglichkeit für die Parameter von Instandhaltungsstrategien. Die vielfältigen Stellgrößen von Instandhaltungsstrategien, beispielsweise Instandhaltungsintervalle, Ersatzteilbevorratung können bis jetzt nur unzureichend manuell auf eine kostenoptimale Einsatzverfügbarkeit hin optimiert werden. Dieser Missstand sollte mit einem geeigneten evolutionären Algorithmus beseitigt werden.

## Literatur

- /1/ Verl, A.; Sawodny, O.; Hafla, A.; Dietmair, A.: *Potenziale der modellbasierten Regelungstechnik in der industriellen Steuerungstechnik von Werkzeugmaschinen und Robotern.* In: Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, FTK 2008, 10.-11.09.2008, Tagungsband. S.29-76.
- /2/ Synek, P.-M.; et al.: *Intelligenter Produzieren: Mit Condition-Monitoring-Systemen robust produzieren.* VDMA Verlag, 2007.
- /3/ Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 5 Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität.* Springer, Berlin Heidelberg, 2006.
- /4/ Richter, S.: *Condition Monitoring – Kosten- oder Wertschöpfungsfaktor?* A&D, Select Condition Monitoring, 2008/1
- /5/ Pritschow, G.; Pruschek, P.; Uhlmann, E.; Hohwieler, E.: *Analyse und Bewertung neuer Trends in der Steuerungstechnik.* ZWF 98 (2003) Nr. 11, S. 598-602.
- /6/ Isermann, R. (Hrsg.): *Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen.* VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1994.
- /7/ Maier, W.; Rothmund, J.; Heisel, U.: *Total Cost of Ownership – Neue Antworten auf alte Fragen.* ZWF 101 (2006) Nr. 7/8, S. 435-439.

- /8/ Fleischer, J.;  
Munzinger, C.;  
Broos, A.;  
Schopp, M.;  
Wieser, J.: *Development and implementation of smart maintenance activities for machine tools.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 1, Issue 4, 2009, Pages 237-246.
- /9/ Wahler, M.: *Agent in Sachen Produktivität.* A&D-Themenheft: Condition Monitoring 2006, S. 48.
- /10/ Pritschow, G.: *Steuerungen.* In: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau: Beitz, W. (Hrsg.); Grote, K.-H. (Hrsg.). Berlin Heidelberg, Springer, 2007.
- /11/ Pritschow, G.: *Einführung in die Steuerungstechnik.* Hanser, München Wien, 2006.
- /12/ Weck, M.;  
Brecher, C.: *Elemente der Werkzeugmaschine.* In: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau: Beitz, W. (Hrsg.) ; Grote, K.-H. (Hrsg.). Berlin Heidelberg, Springer, 2007.
- /13/ N.N.: *Handbuch Lineartechnik.* R310DE2017 BoschRexroth AG, Schweinfurt, 2006.
- /14/ N.N.: *Condition Monitoring: Eine Branche in den Startlöchern.* Elektronik 1/2005, S. 20-22.
- /15/ Wieser, J.: *Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen.* Dissertation, wbk, Karlsruhe, Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- /16/ Weck, M.;  
Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 3 Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.

- /17/ Dietmair, A.;  
Walther, M.: *Antriebsbasierte Maschinendiagnose.*  
Fortschritte in der Regelungs- und Antriebstechnik. 16.  
Lageregelseminar, ISW Stuttgart, 28.-29. Januar 2005.
- /18/ Hubig, C.: *Expertendilemma und Abduktion: Zum Umgang mit  
Ungewissheit* - Antrittsvorlesung Universität Stuttgart  
11.12.1997 [http://elib.uni-  
stuttgart.de/opus/volltexte/2000/650/](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2000/650/)  
Zuletzt besucht am 20.07.2010.
- /19/ Schopp, M.;  
Munzinger, C.: *Analyse des Ausfallverhaltens von Werkzeugmaschinen.*  
In: /126/.
- /20/ Eppler, C.;  
Fritz, S.;  
Kaufmann, M.;  
Kramer, C.;  
Pruscheck, P.: *Maschinen- und Prozessanalyse.*  
Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 1017  
(Forschungsbericht), FWF, 2003.
- /21/ Hagemann, D.: *Maschinen- und Prozessanalyse.*  
FWF Forschungs-Info, Ausgabe 17, November 2003.
- /22/ Walther, M.;  
Verl, A.: *Antriebsnahe Maschinendiagnose.*  
In: Zuverlässigkeit und Diagnose in der Produktion,  
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 663, S. 39-55.  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007.
- /23/ Walther, M.;  
Fritz, S.: *Maschinendiagnose und Prozessdiagnose – Unterschiede,  
Gemeinsamkeiten und Schnittstellen.*  
16. Lageregelseminar, ISW Stuttgart, 18.-19. Juni 2004.
- /24/ N.N.: *DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung.*  
Beuth Verlag Berlin, 2003.

- /25/ N.N.: *Diagnose*. Brockhaus Enzyklopädie in 30 Bänden, Band 6, F.A. Brockhaus Leipzig Mannheim, 2006, Seite 758.
- /26/ Bayes, T.: *An essay towards solving a problem in the doctrine of chances*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 53, S. 370-418. Deutsche Übersetzung von H.E. Timerding in Ostwald's Klassiker der exakten Naturwissenschaften Nr. 169, Leipzig 1908, speziell 12-20. Neu abgedruckt in: Hrsg. Schneider, I., 1988, S. 135-144.
- /27/ N.N.: *Prognose*. Meyers enzyklopädisches Lexikon in 25 Bänden, Band 19, Bibliographisches Institut Mannheim, 1977, Seite 297.
- /28/ N.N.: *Phänomen*. Brockhaus Enzyklopädie in 30 Bänden, Band 21, F.A. Brockhaus Leipzig Mannheim, 2006, Seite 359.
- /29/ Dietmair, A.; Kaufmann, M.; Walther, M.: *Maschinendiagnose und das Ursache-Wirkungs-Prinzip*. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) Heft 5, S. 281-286.
- /30/ N.N.: *DIN ISO 281 Wälzlager; Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer*. Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- /31/ Habig, K.-H.: *Tribologie*. In: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau: Beitz, W. (Hrsg.); Grote, K.-H. (Hrsg.). Berlin Heidelberg, Springer, 2007.
- /32/ Krems, J.: *Expertise und diagnostische Urteilsbildung*. In: Störungsmanagement und Diagnosekompetenz, Sonntag, K.; Schaper, N. (Hrsg.), (S. 77-94). Zürich: vdf Hochschulverlag, 1997.

- /33/ Weck, M.;  
Hanrath, G.: *Abnahme von spanenden Werkzeugmaschinen.*  
Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 0157/1  
(Forschungsbericht), FWF, 1995.
- /34/ Pfeifer, T.;  
Schmitt, R.: *Fertigungsmesstechnik.*  
Oldenbourg, München, 2010.
- /35/ Sturm, A. (Hrsg.): *Wälzlagerdiagnostik für Maschinen und Anlagen.*  
VEB Verlag Technik, Berlin, 1985.
- /36/ Gegner, J.: *Materialbeanspruchungsanalyse und ihre Anwendung  
auf Prüfstandsversuche zum Oberflächenausfall  
(Nierlich-Schadensmodus) von Wälzlagern.*  
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 37, Ausgabe  
3, S. 249–259, 03/2006.
- /37/ Roos, E.;  
Maile, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure; Grundlagen,  
Anwendung, Prüfung.* Springer, Berlin-Heidelberg, 2008.
- /38/ Kaufmann, M.;  
Pritschow, G.: *Methodik zum Erstellen maschinenabhängiger  
Testwerkstücke.*  
wt Werkstattstechnik online 94 (2004) Heft 7/8, S. 340-  
343.
- /39/ Klein, U.: *Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen  
und Anlagen.* Stahleisen Verlag, Düsseldorf, 1998.
- /40/ Uhlmann, E.: *Vom Teleservice zu e-Maintenance-Lösungen.*  
In: Autonome Produktion, Klocke, F., Pritschow, G.  
(Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.

- /41/ Feid, M.;  
Pandit, M.: *Systematischer Entwurf eines signalbasierten Fehlerdiagnosesystems, Teil 1.* at 54 (2006) Heft 1, S. 23-28.
- /42/ Luenberger, D. G.: *Observing the State of a linear System.* IEEE Transaction on Military Electronics, Vol. MIL-8, 1964.
- /43/ Luenberger, D. G.: *Observers for Multivariable Systems.* IEEE Transaction on Automatic Control, Vol AC-11, 1966, S. 190-197.
- /44/ Pruschek, P.: *Verfahren zur anwendungsgerechten Parametrierung der Steuerung und Regelung von Vorschubachsen.* Dissertation, ISW Stuttgart, Jost-Jetter Verlag Heimsheim, 2009.
- /45/ N.N.: *Spektrum vs. Hüllkurvenspektrum - nicht nur eine Frage der Firmenpolitik.*  
Maschinendiagnose – NEWS, Ausgabe 1/2001, GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose, 2001.
- /46/ Plapper, V.;  
Weck, M.: *Sensorless Machine Tool Condition Monitoring based on open NCs.*  
Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, Korea, 05.2001.
- /47/ Möller, H.;  
Flaig, H.;  
Soukchaleum, H.: *CNC integrierte wissensbasierte Maschinendiagnose.*  
wt Werkstattstechnik online 97 (2007) Heft 5, Seite 336-341.
- /48/ N. N.: [http://acuroc.net/data/Story\\_Heidelberg\\_DE.pdf](http://acuroc.net/data/Story_Heidelberg_DE.pdf).  
Zuletzt besucht am 08.07.2009.

- /49/ Baumeister, J.: *Agile Development of Diagnostic Knowledge Systems*  
Dissertation, diskri Verlag, Würzburg 2004.
- /50/ N.N.: *DIN ISO 230 Werkzeugmaschinen - Prüfregeln für  
Werkzeugmaschinen - Teil 1: Geometrische Genauigkeit  
von Maschinen, die ohne Last oder unter  
Schlichtbedingungen arbeiten.*  
Beuth Verlag, Berlin, 1996.
- /51/ N.N.: *VDI/DGQ 3441 Statistische Prüfung der Arbeits- und  
Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen;  
Grundlagen.* VDI Verlag-GmbH, Düsseldorf, 1977.
- /52/ N.N.: *Systeme zur Überprüfung der Maschinengenauigkeit &  
Kalibrierung.*  
Broschüre der Renishaw GmbH, Pliezhausen.
- /53/ N.N.: *Dynamische Schwingungsanalyse in Echtzeit.*  
Broschüre der Renishaw GmbH, Pliezhausen.
- /54/ N.N.: *QC10 – Schnelle Diagnose der Maschinengenauigkeit.*  
Broschüre der Renishaw GmbH, Pliezhausen.
- /55/ N.N.: *Renishaw Ballbar Help. Online Hilfe für die Diagnose-  
software der Renishaw Kreisformtestgeräte.*  
Renishaw GmbH, Pliezhausen, 2000.
- /56/ N.N.: „ACCOM – Mess- und Auswertesoftware zur Werkzeug-  
maschinenvermessung mit den HEIDENHAIN Mess-  
geräten: KGM Kreuzgitter, VM Vergleichsmessgerät und  
DBB Double Ball Bar“.  
Handbuch, Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut.

- /57/ Kakino, Y.: *Accuracy Inspection of NC-Machine Tools: Double Ball Bar Method.* Hanser Gardner Publications, 1993.
- /58/ Bargel, H.-J.; Schulze, G.: *Werkstoffkunde.* Springer, Berlin-Heidelberg, 2005.
- /59/ N.N.: *DIN EN 1330-3 Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 3: Begriffe der industriellen Durchstrahlungsprüfung.* Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- /60/ N.N.: *DIN EN 444 Zerstörungsfreie Prüfung; Grundlagen für die Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen mit Röntgen- und Gammastrahlen.* Beuth Verlag, Berlin, 1994.
- /61/ N.N.: *DIN EN 1330-4 Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung.* Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- /62/ N.N.: *DIN EN 583-1 Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundsätze.* Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- /63/ N.N.: *DIN EN 1330-5 Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 5: Begriffe zur Verwendung bei der Wirbelstromprüfung.* Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- /64/ N.N.: *DIN EN 12084 Zerstörungsfreie Prüfung - Wirbelstromprüfung - Allgemeine Grundlagen und Richtlinien.* Beuth Verlag, Berlin, 2001.

- /65/ N.N.: *DIN EN ISO 9934-1 Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen.* Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- /66/ N.N.: *DIN EN 571-1 Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen.* Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- /67/ N.N.: *VDI 2851, Blatt 3: Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen - Beurteilung von Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren durch Einfachprüfwerkstücke.* VDI Verlag-GmbH, Düsseldorf, 1986.
- /68/ N.N.: *NCG 2004 Teil 1 (Entwurf): Abnahmerichtlinien-/Werkstück für Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC) – Teil 1: Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren.* Empfehlung der NC-Gesellschaft, Springer, Berlin Heidelberg, 1997.
- /69/ N.N.: *NCG 2005 (Entwurf): Prüfwerkstück für die 5-Achs-Simultan-Fräsbearbeitung.* Empfehlung der NC-Gesellschaft, 2005.
- /70/ N.N.: *VDI 3427 Blatt 1: Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, dynamisches Verhalten von numerischen Bahnsteuerungen an Werkzeugmaschinen; Begriffe und Merkmale.* VDI Verlag-GmbH, Düsseldorf, 1977.  
- ersatzlos zurückgezogen -

- /71/ N.N.: *VDI 3427 Blatt 2: Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, dynamisches Verhalten von numerischen Bahnsteuerungen an Werkzeugmaschinen; Kenngrößen*; VDI Verlag-GmbH, Düsseldorf, 1988.  
- ersatzlos zurückgezogen -
- /72/ N.N.: *VDI/DGQ 3444: Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Koordinaten-Bohrmaschinen und Bearbeitungszentren.*  
VDI Verlag-GmbH, Düsseldorf, 1977
- /73/ N.N.: *VDI/AWF 2870: Beurteilung von numerisch gesteuerten Arbeitsmaschinen; Genauigkeit; Bestellvereinbarung und Nachweis.* VDI Verlag-GmbH, Düsseldorf, 1984.  
- ersatzlos zurückgezogen -
- /74/ N.N.: *DIN 8601: Werkzeugmaschinen; Abnahmebedingungen für Werkzeugmaschinen für die spanende Bearbeitung von Metallen; Allgemeine Regeln.*  
Beuth Verlag, Berlin, 1986  
- ersetzt durch: *DIN ISO 230-1: Werkzeugmaschinen - Prüfregeln für Werkzeugmaschinen - Teil 1: Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbedingungen arbeiten.*  
Beuth Verlag, Berlin, 1999
- /75/ Kolerus, J.: *Aktueller Stand, Tendenzen und Stellenwert der Normen zur Schwingungsüberwachung im industriellen Umfeld.*  
In: VDI-Schwingungstagung 2007. (VDI-Berichte Nr. 1982). Düsseldorf VDI, 2007, S. 15...38.

- /76/ N.N.: *Drehmomentmessung in der Praxis.*  
Maschinendiagnose – NEWS, Ausgabe 4/1999, GfM  
Gesellschaft für Maschinendiagnose, 1999.
- /77/ N.N.: *MTC Werkzeug- und Prozeßüberwachung.*  
Firmenschrift, ARTIS, Bispingen, 1997.
- /78/ N.N.: *DTA-I Digital Torque Adapter: Werkzeugüberwachung digital durch Anzapfung des Antriebbusses.*  
Firmenschrift, ARTIS, Bispingen, 1997.
- /79/ N.N.: *Wirkleistungsmeßtechnik zu den Nordmann Tool Monitoren.* Firmenschrift, Nordmann, Hürth, 2000.
- /80/ Lüthje, H.;  
Biehl, S.: *Dünnsschichtsensorik zur Messung von Kraft und Temperatur der Lagerlaufbahn.* Zuverlässigkeit von Produktionsmaschinen, Abschlussseminar zum BMBF-Projekt Intelligente Spindleinheit 09.12.04, Aachen.
- /81/ Lüthje, H.;  
Biehl, S.: *Wälzlager mit integrierter Zustandsmessung.* Patent DE 103 13 060 A1, 2004.
- /82/ N.N.: <http://www.fag-industrial-services.com/site/de>  
Produktübersicht der Firma FAG Industrial Services (FIS) GmbH. Zuletzt besucht am 08.07.2010.
- /83/ Pecher, R.: *Hohe Stückzahlen garantiert, Werkzeugüberwachungssystem sichert gleichbleibend hohe Qualität in Getriebefertigung*  
A&D, Select Condition Monitoring, 2008/1.

- /84/ N.N.: <http://www.ifm-electronic.de/ifmde/web/octavis.htm>  
Produktbeschreibung des Lagerüberwachungssystems  
„efector octavis“ der Firma ifm electronic GmbH.  
Zuletzt besucht am 08.07.2010.
- /85/ Danitschek, M.: *Wächter im Metallkleid*  
A&D, Select Condition Monitoring, 2008/1
- /86/ N.N.: *Neuartiges Diagnosesystem.*  
Konstruktionspraxis Ausgabe 02/2004.
- /87/ N.N.: *ecICP™ Intelligent Controller Parameterization*  
*Engineering Software for Standalone Use.*  
[http://dload.expertcontrol.com/Downloads/DataSheets/ds\\_ecICP.pdf](http://dload.expertcontrol.com/Downloads/DataSheets/ds_ecICP.pdf). Zuletzt besucht am 08.07.2010.
- /88/ Huf, A.;  
Walther, M.;  
Verl, A.;  
Platen, S.: *Steuerungsinterne Diagnose für eine Werkzeugmaschine mit KGT.* In: /126/.
- /89/ N.N.: *Productivity Agent: Erweiterte Diagnosefunktionen mit IndraDrive.* Anwendungsbeschreibung, BoschRexroth AG, Lohr am Main, 2006.
- /90/ Kreidler, V.: *Internet-basierte Produktions-Dienstleistungen für Werkzeugmaschinen.* Vulkan-Verlag, Essen, 2004.
- /91/ Wucherer, K.;  
Kreidler, V.: *E-Manufacturing und E-Service.*  
In: FTK 2003, Fertigungstechnisches Kolloquium.  
Gesellschaft für Fertigungstechnik, 2003, S. 181-206.

- /92/ Kreidler, V.: *Web-Architekturen für E-Dienstleistungen an Werkzeugmaschinen.* ZWF 98 (2003) Nr. 4, S. 141-148.
- /93/ Kreidler, V.; Maier, V.: *Fernwartung von Maschinen via Internet.* wt Werkstattstechnik online 94 (2004) Heft 10, 2004, S. 512-516.
- /94/ Teti, R.; Jemielniak, K.; O'Donnell, G.; Dornfeld, D.: *Advanced monitoring of machining operations.* CIRP Annals - Manufacturing Technology 59, 2010. S. 717–739.
- /95/ Verl, A.; Heisel, U.; Maier, D.; Walther, M.: *Sensorless Automated Condition Monitoring for the Control of the Predictive Maintenance of Machine Tools* CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 2009, S. 375–378.
- /96/ Mertins A.: *Signaltheorie.* Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010.
- /97/ Kiencke, U.; Eger, R.: *Messtechnik Systemtheorie für Elektrotechniker.* Springer, Berlin-Heidelberg, 2008.
- /98/ N.N.: *<http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/toolbox/signal>.* Beschreibung der Signal Processing Toolbox-MathWorks für MATLAB.  
Zuletzt besucht am 20.07.2010.
- /99/ Kolerus, J.: *Zustandsüberwachung von Maschinen.* expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 2000.

- /100/ Li, C. J.: *Signal Processing in Manufacturing Monitoring.*  
In: Condition Monitoring and Control for Intelligent  
Manufacturing, Wang, L.; Gao, R. X. (Hrsg.) Springer-  
Verlag, London, 2006, S. 245-267.
- /101/ Geropp, B.: *Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der  
Hüllkurvenanalyse.* Dissertation, WZL, Verlag der  
Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1995.
- /102/ Wirth, R.: *Einflüsse auf die Zuverlässigkeit von Schwingungs-  
diagnoseverfahren an Wälzlagern.*  
Dissertation, Zittau, 1994.
- /103/ Wirth, R.: *Maschinendiagnose an Industriegetrieben - Teil I:  
Grundlagen der Analyseverfahren.*  
Antriebstechnik, Bd.37, Nr.10, 1998, S.75-80.
- /104/ Wirth, R.: *Maschinendiagnose an Industriegetrieben - Teil II:  
Signalidentifikation in der Praxis.*  
Antriebstechnik, Bd.37, Nr.11, 1998, S.77-81.
- /105/ Weber, H.: *Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit  
konnektionistischen Methoden.* Berichte aus dem  
Produktionstechnischen Zentrum Berlin, 1996.
- /106/ Ispaylar, M. H.: *Betriebseigenschaften von Profilschienen-Wälz-  
führungen.* Dissertation, compuTEAM, Würzburg, 1997.
- /107/ Plapper, V.: *Steuerungsintegrierte Überwachung von Vorschub-  
antrieben an Werkzeugmaschinen.*  
Dissertation, WZL, Shaker Verlag, Aachen, 2004

- /108/ Imiela, J.: *Verfügbarkeitssicherung von Werkzeugmaschinenachsen mit Kugelgewindetrieb durch modellbasierte Verschleißüberwachung.* Dissertation, Berichte aus dem IFW, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen, 2006.
- /109/ Hirschmann, J.: *Ein Beitrag zur Fehlerfrüh- und Fehlerdiagnose von elektromechanischen Antriebeinheiten in der Automatisierungstechnik.* Dissertation, IFF, Stuttgart, 2006.
- /110/ Krüger, J.: *Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken.* Dissertation, FhG/IPK, Berlin 1999.
- /111/ Kaever, M.: *Steuerungsintegrierte Fertigungsprozeßüberwachung bei spanender Bearbeitung.* Dissertation, WZL, Aachen, 2004.
- /112/ Isermann, R.: *Fault Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance.* Springer Verlag, Heidelberg Berlin, 2005.
- /113/ Metzele, M.: *Zustandsorientierte Instandhaltung von schnelllaufenden Werkzeugmaschinen-Hauptspindeln.* Dissertation, WZL, Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- /114/ Villwock, S.: *Identifikationsmethoden für die automatisierte Inbetriebnahme und Zustandsüberwachung elektrischer Antriebe.* Dissertation, LEA; Siegen, 2007
- /115/ Schopp, M.: *Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben.* Dissertation, wkb, Karlsruhe, Shaker Verlag, Aachen, 2009.

- /116/ Roßteuscher, H.: *Spindeltrieb mit Lebensdauerüberwachung* Patent DE 102 008 004 061 A1. Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, 16.07.2009.
- /117/ Munzinger, C.; Schopp, M.; Broos, A.: *Optimizing Life Cycle Performance of Machine Components Using Time-Discrete Condition Monitoring and Prognosis.* 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 04.-06.05.2009, Kairo, Ägypten, Band Proceedings of the 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Life Cycle Engineering in the Sustainability Age, S. 418-424
- /118/ Walther, M.; Dietmair, A.; Pruschek, P.: *Maschinen- und Prozessanalyse Phase II.* Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 1018 (Forschungsbericht), FWF, 2004.
- /119/ Walther, M.; Dietmair, A.: *Maschinen- und Prozessanalyse Phase III.* Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 1019 (Forschungsbericht), FWF, 2005.
- /120/ Walther, M.; Kurz, O.: *Maschinen- und Prozessanalyse Phase IV.* Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 1020 (Forschungsbericht), FWF, 2006.
- /121/ Maier, D.; Nebel, S.; Rüdele, H.; Walther, M.; Oglodin, V.: *Sensorlose vorausschauende Wartung von Vorschubantrieben an Werkzeugmaschinen - Gezielte vorbeugende Wartung durch automatisierte Zustandsbeobachtung.* In: Schwingungsüberwachung und Diagnose von Maschinen -VDI-Schwingungstagung 2007. (VDI-Berichte Nr. 1982). Düsseldorf, VDI, 2007, S. 235...249.

- /122/ Meier, H. (Hrsg): *Ganzheitliches, regelbasiertes Verfügbarkeitsmanagement von Produktionssystemen (VeraPro)*  
Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, 2009.
- /123/ Schuh, G.; Kampker A.; Odak, R. (Hrsg): *Verfügbarkeitsorientierte Instandhaltung - Stellhebel zur Steigerung der Verfügbarkeit in produzierenden Unternehmen (Verstand): "Verfügbarkeit von Produktionssystemen als Dienstleistung".*  
Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, 2009.
- /124/ Brecher, C. (Hrsg): *ZuPack - Zustandsorientierte Instandhaltung von Verpackungsmaschinen.*  
Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, 2010.
- /125/ Poll, G.: *Wälzlager.* In: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau: Beitz, W. (Hrsg.) ; Grote, K.-H. (Hrsg.). Berlin Heidelberg, Springer, 2007.
- /126/ Munzinger C.; Schopp, M. (Hrsg): *Steigerung der Verfügbarkeit durch Überlastbegrenzung und prozessparallele Last- und Verschleißüberwachung (OPTILAST).*  
Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen, 2010.
- /127/ N.N.: *ZuPRO, Zuverlässige Produktionsanlage,*  
[http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF\\_ID=31&VP\\_ID=1957](http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF_ID=31&VP_ID=1957)  
Kurzfassung des Projektes auf der Seite des BMBF.  
Zuletzt besucht am 08.07.2010.

- /128/ N.N.: *VIPRO, Vorausschauende zustandsabhängige Instandhaltung an Produktionsmaschinen,*  
*http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?TF\_ID=31&VP\_ID=1884*  
Kurzfassung des Projektes auf der Seite des BMBF.  
Zuletzt besucht am 08.07.2010.
- /129/ Plapper, V.;  
Weck, M.: *Signale digitaler Antriebe zeigen Maschinenschäden.*  
ZWF, Jahrgang 97 3/2002, S.84-88
- /130/ Heisel, U.;  
Stehle, T.;  
Koscsák, G.: *Thermisches Verhalten von Kugelgewindetrieben.*  
wt Werkstatttechnik online 95 (2005), Nr. 5, S. 320 - 325.
- /131/ Lehner, W.-D.: *Regelung von Vorschubachsen unter Verwendung der Relativbeschleunigung.* Dissertation, ISW Stuttgart, Jost-Jetter Verlag Heimsheim, 2005.
- /132/ Kirchberger, R.: *Verbesserte Auswertung inkrementeller Messsysteme durch schnelle Signalvorverarbeitung.* Dissertation, ISW Stuttgart, Jost- Jetter Verlag Heimsheim, 2005.
- /133/ Fecht, N.: *Eine Sache der Auslegung Effizienz für Werkzeugmaschinen-Antriebe.* Antriebspraxis 03 / 2010, S. 26-29.
- /134/ Palmgren, A.: *Grundlagen der Wälzlagertechnik.*  
Franckh Verlag, Stuttgart, 1964.

- /135/ Dahlhaus, N.: *Wälzlagern nicht zu früh wechseln, Grenzen und Risiken des Hüllkurvenalgorithmus bei der Zustandsbewertung von Wälzlagern.* In: Schwingungsüberwachung und Diagnose von Maschinen und Anlagen -VDI-Schwingungstagung 1999. (VDI-Berichte Nr. 1466). Düsseldorf: VDI, 1999, S. 235...249.
- /136/ Walther, M.; Birenbaum, Ch.; Maier, D.: *Sensorlose automatisierte Verschleißdiagnose an Vorschubssystemen mit Kugelgewindetrieben in Werkzeugmaschinen.* In: Schwingungsanalyse & Identifikation: mit Fachausstellung ; Fachtagung, Stadthalle Leonberg, 23. und 24. März 2010 / VDI-Schwingungstechnik. (VDI-Berichte Nr. 2093). VDI, Düsseldorf, 2010, Seite 231..243.
- /137/ N.N.: *DIN 69051 Werkzeugmaschinen; Kugelgewindetriebe; Begriffe, Bezeichnungssystem.* Beuth Verlag, Berlin, 1989.
- /138/ Frey, S.; Walther, M.; Verl, A.: *Periodic variation of preloading in ball screws* Production Engineering: Volume 4, Issue 2 (2010), S. 261
- /139/ Broos, A.; Munzinger, Ch.; Walther, M.; Laptev, I.; Verl, A.: *Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose.* In: /126/.
- /140/ Zirm, O.; Weikert, S.: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme.* Springer Verlag, Heidelberg Berlin, 2006.

- /141/ Hoshi, T.: *Damage Monitoring of Ball Bearing*, CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 55, Issue 1, 2006, S. 427-430.
- /142/ Erkorkmaz, K.; Altintas, Y.: *High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation* International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 9, 2001, S. 1323-1345
- /143/ Okwudire Ch.; Altintas, Y.: *Minimum Tracking Error Control of Flexible Ball Screw Drives Using a Discrete-Time Sliding Mode Controller*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Volume 131, Issue 5, 051006, 2009.
- /144/ Heute, U.: *Fehler in DFT und FFT – Neue Aspekte in Theorie und Anwendung*. Dissertation, Copy-Center 2000, Erlangen 1982.
- /145/ N.N.: <http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/toolbox/signal/goertzel.html>. Beschreibung des Goertzel-Algorithmus vom MathWorks für MATLAB. Zuletzt besucht am 20.07.2010.
- /146/ Verl, A.; Huf, A.: *Optimale Nutzung von Werkzeugmaschinen – Das Belastungsintegral als Kenngröße für den Komponentenzustand*. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) Heft 5, S. 453-458.
- /147/ N.N.: *DIN ISO 3408-5: Kugelgewindetriebe; Teil 5: Statische und dynamische axiale Tragzahl und Lebensdauer*. Beuth Verlag Berlin, 2008.

## A Anhang

### A.1 Prinzipieller Aufbau aller Versuchsstände

Eine notwendige Voraussetzung für die antriebsbasierte Maschinendiagnose ist die Verfügbarkeit aller Signale, die für die Regelung des KGT verwendet werden. Des Weiteren sind zur Verifikation der Diagnoseverfahren verschiedene Zusatzsensoren sinnvoll, die bei einem späteren kommerziellen Einsatz nicht verfügbar sind, jedoch als Referenz zur Verifikation der Ergebnisse dienen können. Hierzu gehören beispielsweise zusätzliche Temperaturfühler sowie Körperschallauftnehmer. Solche Sensoren wurden an den einzelnen Versuchsständen eingesetzt. Sie mussten zusammen mit den Antriebssignalen zeit-synchron erfasst werden. Um dies zu gewährleisten, wurden Lage- und Drehzahlregler in einem Prototyping System der Firma dSPACE realisiert, das gleichzeitig direkten Zugang zu den Signalen der Zusatzsensoren erhielt. Die verwendeten dSPACE-Systeme ermöglichen das Aufzeichnen aller diagnoserelevanten Daten im Reglertakt, während die Stromregelung von den eingesetzten kommerziellen Umrichtern übernommen wurde. In Bild A-1 ist der für alle Versuchseinrichtungen verwendete schematische Aufbau gezeigt.

Während des Verlaufs der einzelnen Versuche wurden die in Tabelle A-1 aufgeführten Daten in einem Takt von 250 µs aufgezeichnet und anschließend entsprechend dem jeweiligen Schadfall und der daraus resultierenden Diagnosestrategie ausgewertet.

- Ist-Lage Motor
- Ist-Geschwindigkeit Motor
- Lagesollwert
- Momentensollwert
- Momentbildender Strom
- Motortemperatur
- Ist-Lage Tisch
- Ist-Geschwindigkeit Tisch
- Drehzahlsollwert
- Temperatur des Elements
- Schleppabstand
- Körperschallsignale

Tabelle A-1: Aufgezeichnete antriebsinterne Signale und zusätzliche Sensoren

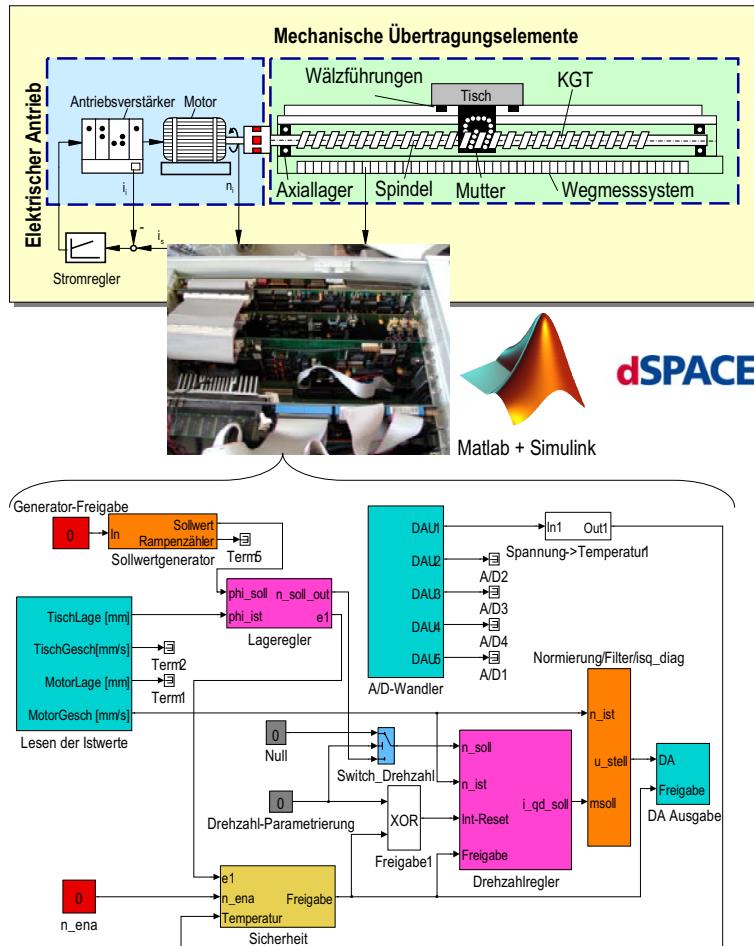


Bild A-1: Aufbau der Antriebsregelung

Die Aufzeichnung der Daten und die Regelung erfolgten zeitsynchron. Das Lesen der Istwerte wurde mit den am ISW entwickelten /132/ dSPACE-Erweiterungskarten durchgeführt. Neben der Lage- und Drehzahlregelung wurden auch Überwachungsfunktionen, wie eine Schleppabstands- und Temperaturüberwachung, in dem dSPACE-System implementiert.

## A.2 Versuchsstand Index V100 Achse

Für die Versuche stand eine separierte Achse einer Index V100 vertikalen Drehmaschine zur Verfügung. Die Regelung und Datenaufzeichnung folgt dem in [Bild A-1](#) dargestellten Schema. Die in [Tabelle A-2](#) aufgelisteten Komponenten waren Bestandteile der Versuchssachse.

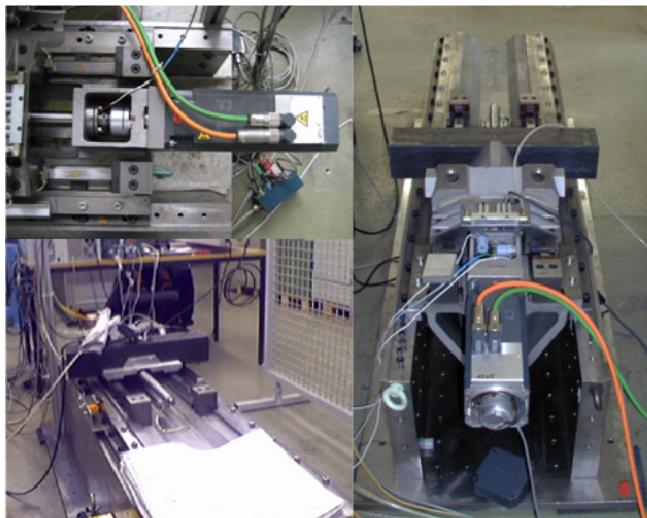


Bild A-2: Einzelachse einer Index V100

- Mannesmann T93001.10 KGT
- THK HS30R Linearführungen
- Siemens Umrichter 611U
- Linearmaßstab LS 487 der Firma Heidenhain GmbH
- INA ZKLF2575\_2RS Axiallager
- Siemens Motor 1FT6064
- Kupplung KTR Rotex GS
- (Baugleich LC 481)

Tabelle A-2: Komponenten des Versuchsstandes

### A.3 Versuchsstand vertikale Schütte Achse

Ein Versuchsstand basierte auf einem Antriebsstrang der vertikalen Achse aus einer Schleifmaschine WU 305 der Firma Alfred Schütte GmbH. Wie bei der „Index Achse“ folgte die Regelung und Datenaufzeichnung dem in Bild A-1 dargestellten Schema. Die verbauten Komponenten sind in Tabelle A-3 aufgelistet.

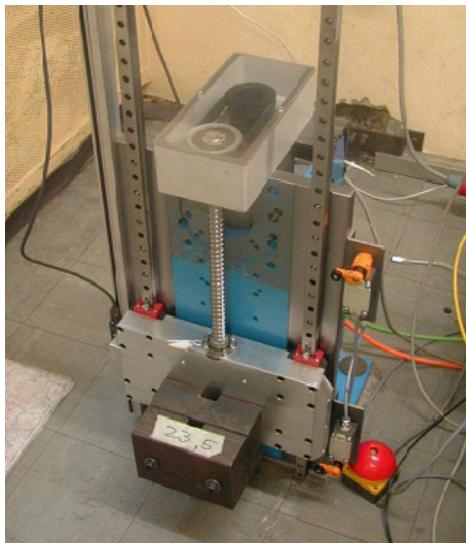


Bild A-3: Schütte Achse

- NSK W2505G KGT
- INA ZKLF2575\_2RS Axiallager
- Schneeberger MRA25G1-V2 Linearführungen
- Siemens Umrichter 611U
- Siemens Motor 1FT6064
- Riementrieb
- Linearmaßstab LF 401 v

Tabelle A-3: Komponenten des Versuchsstandes



## **Lebenslauf**

<b>Persönliches:</b>	Name	Michael Rolf Nathaniel Walther
	Geburtsort	Tel Aviv / Israel
	Geburtstag	23.09.1976
	Eltern	Hans-Jürgen Walther und Dorothea Walther, geb. Markert
	Familienstand	verheiratet, 1 Kind
<b>Schulbildung:</b>	1983 - 1996	Allgemeine Hochschulreife Technisches Gymnasium (TG), Waiblingen
<b>Zivildienst:</b>	1996 - 1997	Katharinenhospital, Stuttgart
<b>Studium:</b>	1997 - 2003	Studium „Technische Kybernetik“ an der Universität Stuttgart Diplomzeugnis vom 8. Oktober 2003
	2003	VDW Studienpreis 2003 für die Studienarbeit zum Thema „Aufbereitung der Normalformtheorie zum vereinfachten Beobachterentwurf“
<b>Berufstätigkeit:</b>	2002 - 2003	Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart
	2003 - 2009	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart
	2006	Teilnahme am 2. Rexroth Doktorandenkolloquium
	Seit 2009	Entwicklungsingenieur bei der ITK Engineering AG Tätigkeitsfeld: Lieferantenmanagement Aktuatoren für LKW Motoren und Funktionale Sicherheit



# **ISW/IPA Forschung und Praxis**

Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Herausgegeben bis Band 57 von Prof. Dr.-Ing. G. Stute †  
ab Band 58 von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.mult. Dr.-Ing. E.h G. Pritschow  
ab Band 161 von Prof. Dr.-Ing. A. Verl

---

## **Erschienen bei Springer-Verlag:**

- 1 Schmid, D.: Numerische Bahnsteuerung, 1973.
- 2 Schwegler, H.: Fräsbearbeitung gekrümmter Flächen, 1972.
- 3 Eisinger, J.: Numerisch gesteuerte Mehrachsenfräsmaschinen, 1972.
- 4 Nann, R.: Rechnersteuerung von Fertigungseinrichtungen, 1972.
- 5 Augsten, G.: Zweiachsige Nachformeinrichtungen, 1972.
- 6 Karl, B.: Die Automatisierung der Fertigungsvorbereitung durch NC-Programmierung, 1972.
- 7 Eitel, H.: NC-Programmiersystem, 1973.
- 8 Knorr, E.: Numerische Bahnsteuerung zur Erzeugung von Raumkurven auf rotationssymmetrischen Körpern, 1973.
- 9 Bumiller, S.: Viskohydraulischer Vorschubantrieb, 1974.
- 10 Maier, K.: Grenzregelung an Werkzeugmaschinen, 1974.
- 11 Waelkens, J.: NC-Programmierung, 1974.
- 12 Bauer, E.: Rechnerdirektsteuerung von Fertigungseinrichtungen, 1975.
- 13 König, H.: Entwurf und Strukturtheorie von Steuerungen für Fertigungseinrichtungen, 1976.
- 14 Damsohn, H.: Fünfachsiges NC-Fräsen, 1976.
- 15 Jetter, H.: Programmierbare Steuerungen, 1976.
- 16 Henning, H.: Fünfachsiges NC-Fräsen gekrümmter Flächen, 1976.
- 17 Boelke, K.: Analyse und Beurteilung von Lagesteuerungen für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, 1977.

- 18 Götz, F.-R.: Regelsystem mit Modellrückkopplung für variable Streckenverstärkung, 1977.
- 19 Tränkle, H.: Auswirkungen der Fehler in den Positionen der Maschinenachsen beim fünfachsigen Fräsen, 1977.
- 20 Stof, P.: Untersuchungen über die Reduzierung dynamischer Bahnabweichungen bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, 1978.
- 21 Wilhelm, R.: Planung und Auslegung des Materialflusses flexibler Fertigungssysteme, 1978.
- 22 Kappen, N.: Entwicklung und Einsatz einer direkten digitalen Grenzregelung für eine Fräsmaschine mit CNC, 1979.
- 23 Klug, H. G.: Integration automatisierter technischer Betriebsbereiche, 1978.
- 24 Binder, D.: Interpolation in numerischen Bahnsteuerungen, 1979.
- 25 Klingler, O.: Steuerung spanender Werkzeugmaschinen mit Hilfe von Grenzregeleinrichtungen, 1979.
- 26 Schenke, L.: Auslegung einer technologisch-geometrischen Grenzregelung für die Fräsbearbeitung, 1979.
- 27 Wörn, H.: Numerische Steuersysteme – Aufbau und Schnittstellen eines Mehrprozessorsteuersystems, 1979.
- 28 Osofisan, P. B.: Verbesserung des Datenflusses beim fünfachsigen NC-Fräsen, 1979.
- 29 Berner, J.: Verknüpfung fertigungstechnischer NC-Programmiersysteme, 1979.
- 30 Böbel, K.-H.: Rechnerunterstützte Auslegung von Vorschubantrieben, 1979.
- 31 Dreher, W.: NC-gerechte Beschreibung von Werkstücken in fertigungstechnisch orientierten Programmiersystemen, 1980.
- 32 Schurr, R.: Rechnerunterstützte Projektsteuerung hydrostatischer Anlagen, 1981.
- 33 Sielaff, W.: Fünfachsiges NC-Umfangfräsen verwundener Regelflächen. Beitrag zur Technologie und Teileprogrammierung, 1981.
- 34 Hesselbach, J.: Digitale Lageregelung an numerisch gesteuerten Fertigungseinrichtungen, 1981.
- 35 Fischer, P.: Rechnerunterstützte Erstellung von Schaltplänen am Beispiel der automatisierten Hydraulikplanzeichnung, 1981.
- 36 Ackermann, U.: Rechnerunterstützte Auswahl elektrischer Antriebe für spanende Werkzeugmaschinen, 1981.

- 37 Döttling, W.: Flexible Fertigungssysteme – Steuerung und Überwachung des Fertigungsablaufs, 1981.
- 38 Firnau, J.: Flexible Fertigungssysteme – Entwicklung und Erprobung eines zentralen Steuersystems, 1982.
- 39 Herrscher, A.: Flexible Fertigungssysteme – Entwurf und Realisierung prozeßnaher Steuerungsfunktionen, 1982.
- 40 Spieth, U.: Numerische Steuersysteme – Hardwareaufbau und Ablaufsteuerung eines Mehrprozessorsteuersystems, 1982.
- 41 Schimmele, A.: Rechnerunterstützter Entwurf von Funktionssteuerungen für Fertigungseinrichtungen, 1982.
- 42 Sanzenbacher, M.: NC-gerechte Beschreibung von Werkstücken mit gekrümmten Flächen, 1982.
- 43 Walter, W.: Interaktive NC-Programmierung von Werkstücken mit gekrümmten Flächen, 1982.
- 44 Huan, J.: Bahnregelung zur Bahnerzeugung an numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, 1982.
- 45 Erne, H.: Taktile Sensorführung für Handhabungseinrichtungen – Systematik und Auslegung der Steuerungen, 1982.
- 46 Plasch, D.: Numerische Steuersysteme – Standardisierte Softwareschnittstellen in Mehrprozessor-Steuersystemen, 1983.
- 47 Wang, Z. L.: NC-Programmierung – Maschinennaher Einsatz von fertigungstechnisch orientierten Programmiersystemen, 1983.
- 48 Schwager, J.: Diagnose steuerungsexterner Fehler an Fertigungseinrichtungen, 1983.
- 49 Klemm, P.: Strukturierung von flexiblen Bediensystemen für numerische Steuerungen, 1984.
- 50 Runge, W.: Simulation des dynamischen Verhaltens elektrohydraulischer Schaltungen – Einsatz von geräteorientierten, universellen Simulationsbausteinen, 1984.
- 51 Steinhilber, H.: Planung und Realisierung von Werkzeugversorgungssystemen für die NC-Bearbeitung, 1984.
- 52 Ohnheiser, R.: Integrierte Erstellung numerischer Steuerdaten für flexible Fertigungssysteme, 1984.
- 53 Keppeler, M.: Führungsgrößenerzeugung für numerisch bahngesteuerte Industrieroboter, 1984.
- 54 Kohler, P.: Automatisiertes Messen mit NC-Werkzeugmaschinen, 1985.

- 55 Rieger, K.-H.: Rechnerunterstützte Projektierung der Hardware und Software von Speicherprogrammierten Steuerungen, 1985.
- 56 Vogt, G.: Digitale Regelung von Asynchronmotoren für numerisch gesteuerte Fertigungseinrichtungen, 1985.
- 57 Chmielnicki, S.: Flexible Fertigungssysteme – Simulation der Prozesse als Hilfsmittel zur Planung und zum Test von Steuerprogrammen, 1985.
- 58 Renn, W.: Struktur und Aufbau prozeßnaher Steuergeräte zur Verkettung in flexiblen Fertigungssystemen, 1986.
- 59 Harig, K.: Quantisierung im Lageregelkreis numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen, 1986.
- 60 Frank, H.: Programmier- und Überwachungsfunktionen für teileartbezogene NC-Werkzeugmaschinen, 1986.
- 61 Möller, H.: Integrierte Überwachungs- und Diagnose-Systeme für numerische Steuerungen, 1986.
- 62 Fink, H.: Einsatz speicherprogrammierbarer Steuerungen in der Fertigungstechnik, 1986.
- 63 Fleckenstein, J.: Zustandsgraphen für SPS – Grafikunterstützte Programmierung und steuerungsunabhängige Darstellung, 1987.
- 64 Wagner, E.: Steuerungen von Koordinatenmeßgeräten mit schaltenden und messenden Tastsystemen, 1987.
- 65 Grimm, W.: Diagnosesystem für steuerungsperiphere Fehler an Fertigungseinrichtungen, 1987.
- 66 Swoboda, W.: Digitale Lageregelung für Maschinen mit schwach gedämpften schwingungsfähigen Bewegungssachsen, 1987.
- 67 Gruhler, G.: Sensorgeführte Programmierung bahngesteuerter Industrieroboter, 1987.
- 68 Walker, B.: Konfigurierbarer Funktionsblock Geometriedatenverarbeitung für numerische Steuerungen, 1987.
- 69 Mayer, J.: Werkzeugorganisation für flexible Fertigungszellen und -systeme, 1988.
- 70 Lederer, R.: Programmierung von NC-Drehmaschinen mit mehreren Werkzeugschlitten, 1988.
- 71 Häberle, G.: NC-Musterprogrammierung für rechnerintegrierte Textilfertigung, 1988.
- 72 Pfeiffer, D.: Kompensation thermisch bedingter Bearbeitungsfehler durch prozeßnahe Qualitätsregelung, 1988.

- 73 Schmidt, W.: Grafikunterstütztes Simulationssystem für komplexe Bearbeitungsvorgänge in numerischen Steuerungen, 1988.
- 74 Egner, M.: Hochdynamische Lageregelung mit elektrohydraulischen Antrieben, 1988.
- 75 Schittenhelm, W.: Konfigurierbares Bedienungssystem für Steuerungen an Fertigungseinrichtungen, 1988.
- 76 Scheifele, D.: Grafisch dynamische Simulation des Bearbeitungsvorgangs für Doppelschlittendrehmaschinen, 1988.
- 77 Keuper, G.: Automatisierte Identifikation der Streckenparameter servohydraulischer Vorschubantriebe, 1989.
- 78 Kayser, K.-H.: Kollisionserkennung in numerischen Steuerungen mit der Distanzfeldmethode, 1989.
- 79 Viefhaus, R.: Fräsergeometriekorrektur in Numerischen Steuerungen für das fünfachsige Fräsen, 1989.
- 80 Zirbs, J.: Fertigungsgerechte Aufbereitung von Flächenverbänden bei der NC-Programmierung im Formenbau, 1989.
- 81 Ruoff, W.: Optische Sensorsysteme zur On-line-Führung von Industrierobotern, 1989.
- 82 Jantzer, M.: Bahnverhalten und Regelung fahrerloser Transportsysteme ohne Spurbindung, 1990.
- 83 Schumacher, H.: Einheitliche Programmierung von Automatisierungskomponenten roboterbestückter Bearbeitungs- und Montagezellen, 1991.
- 84 Schimonyi, J.: NC-Programmierung für das Werkzeugschleifen, 1991.
- 85 Wurst, K.-H.: Flexible Robotersysteme – Konzeption und Realisierung modularer Roboterkomponenten, 1991.
- 86 Hagl, R.: Erhöhung der Verfügbarkeit von Vorschubantrieben mit selbstanpassender Lageregelung, 1991.
- 87 Krebser, G.: Betriebssystem für NC mit einheitlichen Schnittstellen, 1992.
- 88 Lei, W.-T.: Flächenorientierte Steuerdatenaufbereitung für das fünfachsige Fräsen, 1992.
- 89 Diehl, G.: Steuerungsperipheres Diagnosesystem für Fertigungseinrichtungen auf Basis überwachungsgerechter Komponenten, 1992.
- 90 Nepustil, U.: Offene NC-Schnittstellen zur Korrektur von Fertigungsfehlern, 1992.
- 91 Bauder, M.: Konfigurierbare Robotersteuerung mit allgemeiner Transformation, 1992.

- 92 Philipp, W.: Regelung mechanisch steifer Direktantriebe für Werkzeugmaschinen, 1992.
- 93 Härdtner, G. M.: Wissensstrukturierung in Diagnoseexpertensystemen für Fertigungseinrichtungen, 1992.
- 94 Wiedmann, H.: Objektorientierte Wissensrepräsentation für die modellbasierte Diagnose an Fertigungseinrichtungen, 1993.
- 95 Rudloff, H.: Hochgenaue Konturerzeugung bei Bewegungsachsen mit einer dominanten mechanischen Resonanzstelle, 1993.
- 96 Brantner, K.: Adaptierbares Leitsteuerungssystem für flexible Produktionssysteme, 1993.
- 97 Kugler, W.: Kommunikationsmechanismen für offene Numerische Steuerungssysteme, 1994.
- 98 Schnurr, B.: Elektrodynamisches Antriebssystem zur Unrundbearbeitung, 1994.
- 99 Schneider, J.: Fehlerreaktion mit Speicherprogrammierbaren Steuerungen – ein Beitrag zur Fehlertoleranz, 1994.
- 100 Siewert, U.: Systematische Erstellung adaptierbarer Leitsteuerungssoftware am Beispiel der Durchsetzungsplanung, 1994.
- 101 Heger, G. F. J.: Maschinenferner Qualitätsregelkreis in flexiblen Fertigungssystemen, 1994.
- 102 Hofmeister, W.: Objektorientiert strukturiertes Programmiersystem für NC-Mehrschlittenmaschinen, 1994.
- 103 Horn, A.: Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten, 1994.
- 104 Rentschler, U.: Fehlertolerantes Präzisionsfügen, 1995.
- 105 Junghans, G.: Modulares grafikunterstütztes Simulationssystem für Bearbeitungs- und Handhabungsvorgänge, 1995.
- 106 Heller, J.: Sensorgestützte Bewegungserzeugung leitlinienloser Transprt Fahrzeuge, 1995.
- 107 Wieland, E.: Anwendungsorientierte Programmierung für die robotergestützte Montage, 1995.
- 108 Ketterer, G.: Automatisierte Inbetriebnahme elektromechanischer, elastisch gekoppelter Bewegungsachsen, 1995.
- 109 Reibetanz, Th.: Situationsorientierte Bearbeitungsmodellierung zur NC-Programmierung, 1995.

- 110 Frager, O.: Durchgängige Programmierung von Fertigungszellen, 1996.
- 111 Ordenewitz, R.: Betriebsweite Bereitstellung von Werkzeuginformationen, 1996.
- 112 Daniel, C.: Dynamisches Konfigurieren von Steuerungssoftware für offene Systeme, 1996.
- 113 Angerbauer, R.: Anwenderorientierte Programmierung fahrerloser Transportsysteme, 1996.
- 114 Krauß, F.: Splineverarbeitung in numerischen Steuerungen für das fünfachsige Fräsen, 1996.
- 115 Schittenhelm, K.-M.: Einsatz vorgefilterter Führungsgrößen für Bewegungssachsen zur Bahnerzeugung, 1997.
- 116 Häberle, U.: Einheitliche Anwenderschnittstelle für Feldbusssysteme, 1997.
- 117 Strassacker, D.: Testumgebung für die Implementierung und Inbetriebnahme eines adaptierbaren Leitsteuerungssystems, 1997.
- 118 Renz, B.: Hochdynamische Strahllagekorrektursysteme zur Erhöhung der Bahngenaugigkeit von CO<sub>2</sub>-Laserbearbeitungsmaschinen, 1997.
- 119 Itterheim, C.: Objektorientiertes Bearbeitungsmodell für Freiformflächen – Erstellung und maschinengebundene Modifikation –, 1997.
- 120 Müller, J.: Objektorientierte Softwareentwicklung für offene numerische Steuerungen, 1997.
- 121 Glöckler, M.: Verbesserung des Störverhaltens elektrohydraulischer lagegeregelter Zylinderantriebe, 1998.
- 122 Uhl, J.: Entwurfssystematik für ein dezentral strukturiertes, objektorientiertes Fertigungsleitsystem, 1998.
- 123 Hammann, G.: Modellierung des Abtragsverhaltens elastischer, roboter geführter Schleifwerkzeuge, 1998.
- 124 Scholich-Tessmann, W.: Direktantriebe für Industrieroboter, 1998.
- 125 Wagner, R.: Robotersysteme zum kraftgeführten Entgraten grobtolerierter Leichtmetallwerkstücke mit Fräswerkzeugen, 1998.
- 126 Anders, C.: Adaptierbares Diagnosesystem bei Transferstraßen, 1998.
- 127 Fahrbach, C.: Regelung hochdynamischer elektrischer Servo-Direktantriebe in Fertigungseinrichtungen, 1999.
- 128 Sperling, W.: Modulare Systemplattformen für offene Steuerungssysteme, 1999.

**Erschienen bei Jost-Jetter Verlag:**

- 129 Kehl, G.: Gestaltung von Formgedächtnis-Aktorsystemen für sensorgeführte Inspektionsgeräte, 1999.
- 130 Brandl, Th.: Anlageninformationssystem - Informationsmodell und Erstellungssystematik, 1999.
- 131 Gronbach, H.: Simulationswerkzeug für die Gestaltung modularer CO<sub>2</sub>-Laserbearbeitungsmaschinen, 1999.
- 132 Lutz, R.: Softwaretechnik für Maschinennahe Steuerungsfunktionen bei Fertigungseinrichtungen, 1999.
- 133 Tran, T. L.: Allgemeine Transformation für Maschinen mit Parallelkinematiken, 2000.
- 134 Bretschneider, J.: Reglerselbststeinstellung für digital geregelte, elektromechanische Antriebssysteme an Werkzeugmaschinen, 2000.
- 135 Schoenenberg, M.: Zuverlässiger Fertigungsprozess bei Transferstraßen durch präventive Maßnahmen, 2000.
- 136 Uhl, A.: Flexibles Telerobotersteuerungssystem auf der Basis offener numerischer Steuerungen, 2000.
- 137 Rui Li: Agentenbasierte NC-Planung für die Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszentren, 2001.
- 138 Wildermuth, D.: Bahnvorbereitung in numerischen Steuerungen für Parallelkinematiken, 2001.
- 139 Handel, D.: Werkergerechte NC-Programmierung zur Komplett-Schleifbearbeitung von Bohrwerkzeugen, 2001.
- 140 Kosiedowski, U.: Adaptive Vorsteuerverfahren für elektromechanische Bewegungssachsen an Werkzeugmaschinen, 2001.
- 141 Haug, K.: Laser-Lichtschnittsensorik für die Automatisierung von Metall-Schutzbassschweißprozessen, 2002.
- 142 Hohenadel, J.: Einheitliches Steuerungssystem für NC und RC, 2002.
- 143 Wälde, K.: Sicherstellung der Softwarequalität von Anwendungsmodulen und Systemplattformen in offenen Steuerungssystemen, 2002.
- 144 Litto, M.: Störungsinformationssystem – Informationsmodell und Erstellungssystematik, 2002.
- 145 Schweiker, A.: Offene numerische Steuerungen für prozeßabhängige Bearbeitungen – vereinheitlichte Struktur, Funktionen und Schnittstellen – , 2003.
- 146 Rempp, B.: Regelungstechnische Untersuchung durchsatzgeregelter Produktionssysteme, 2003.

- 147 Eppler, C.: Kompensation fremderregter Schwingungen in Antriebssystemen mit Umlaufgetrieben, 2003.
- 148 Weiner, M.: Wiederverwendungsgerechte Entwicklungssystematik von Feinplanungssoftware für die flexible Fertigung, 2004.
- 149 McCormac, St.: Lageregelung hydraulischer Manipulatoren unter Einsatz eines Ferraris-Sensors, 2004.
- 150 Lehner, W.-D.: Regelung von Vorschubachsen unter Verwendung der Relativbeschleunigung, 2005.
- 151 Lewek, J.: Adaptierbares Informationssystem zur Erstellung baukastenbasierter Fertigungseinrichtungen, 2005.
- 152 Laible, U.: Aufbau numerischer Steuerungssysteme für sicherheitskritische Anwendungen, 2005.
- 153 Bürger, Th.: Durchgängige analytische Qualitätssicherung für numerische Steuerungssoftware, 2005.
- 154 Brinzer, B.: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung, 2005.
- 155 Heusinger, S.: STEP-NC-basierter Korrekturkreis für die Schlichtbearbeitung von Freiformflächen, 2005.
- 156 Kirchberger, R.: Verbesserte Auswertung inkrementeller Messsysteme durch schnelle Signal-Vorverarbeitung, 2005.
- 157 Conrath, M.: Systematische Gestaltung von frequenzadaptierbaren Ultraschall-Werkzeugsystemen zum Einsatz in fertigungstechnischen Prozessen, 2005.
- 158 Wadehn, W.: Gestaltung von Antriebssystemen für formadaptive Strukturen, 2005.
- 159 Horber, H.: Fugendetektion bei Lichtbogenschweißprozessen mit robuster Signalverarbeitung für optische Sensoren, 2006.
- 160 Dreyer, J.: Situative Informationsbereitstellung an Fertigungseinrichtungen Informationsmodell und Erstellungssystematik, 2006.
- 161 Fritz, S.: Rekonstruktion von Prozesskräften aus Antriebssignalen von Werkzeugmaschinen, 2006.
- 162 Staudt, S.: Spezifikation und Konformitätstest zur Interoperabilität von automatisierten Produktionsmaschinen, 2006.
- 163 Reichle, R.: Einsatz von Internet-Werkzeugen und -Diensten in numerischen Steuerungssystemen für Werkzeugmaschinen, 2006.
- 164 Kaiser, L.: Systematik für das Qualitäts- und Projektmanagement bei der Abwicklung von Unikatprojekten, 2006.

- 165 Garber, Th.: Nutzung des redundanten Freiheitsgrades von sechsachsenigen Parallelkinematik-Maschinen, 2007.
- 166 Altenburger, R.: Dynamische Eigenschaften und Regelung mechanisch verkoppelner Antriebssysteme, 2007.
- 167 Korajda, B.: Steuerungstechnische Verfahren zur echtzeitfähigen Kompensation der Fräserabdrängung, 2007.
- 168 Röck, S.: Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungssystemen, 2007.
- 169 Priese, J.: Verfahren zur durchgehenden dezentralen Planung in Werkstattstrukturen, 2007.
- 170 Boye, T.: Vorhersage der kinematischen Kalibriergüte von Parallelkinematiken, 2008.
- 171 Joannides, M.: Ein Beitrag zur volumenorientierten 3D-Objektrekonstruktion aus digitalen Daten, 2009.
- 172 Pruscheck, P.: Verfahren zur anwendungsgerechten Parametrierung der Steuerung und Regelung von Vorschubachsen, 2009.
- 173 Fritsch, D.: Steuerung selbstorganisierender Multi-Roboter-Systeme für dynamische Sammelaufgaben am Beispiel der Bekämpfung maritimer Ölverschmutzungen, 2009.
- 174 Schmitz, S.: Industrielle Powerline-Kommunikation für Antriebseinheiten in Werkzeugmaschinen, 2010.
- 175 Bengel, M.: Workpiece-centered Approach to Reconfiguration in Manufacturing Engineering, 2010
- 176 Weimer, T.: Informationsmodell für die durchgängige Datennutzung in Fabrikplanung und -betrieb, 2010
- 177 Oglodin, V.: Maschinenübergreifender agentenbasierter Informationsaustausch für die Störungsbeseitigung, 2010
- 178 Kramer, C.: Offene Antriebsreglerplattform, 2011
- 179 Stotz, M.: Adaptive Segmentierung von Tiefenbildern für die 3-D-Objektlageerkennung auf Basis von kombinierten regelgeometrischen Elementen, 2011.
- 180 Selig, A.: Informationsmodell zur funktionalen Typisierung von Automatisierungsgeräten, 2011
- 181 Meyer, C.: Aufnahme und Nachbearbeitung von Bahnen bei der Programmierung durch Vormachen von Industrierobotern, 2011
- 182 Meier, M.: Verfahren zum emulationsgestützten MES-Engineering für die Photovoltaikindustrie, 2011
- 183 Walther, M.: Antriebsbasierte Zustandsdiagnose von Vorschubantrieben, 2011