

Betriebsüberwachung und Schadensdiagnose an rotierenden Maschinen

-

Bewährte Methoden versus neue modellbasierte Ansätze

von *D. Söffker und P.C. Müller*

1 Problemstellung

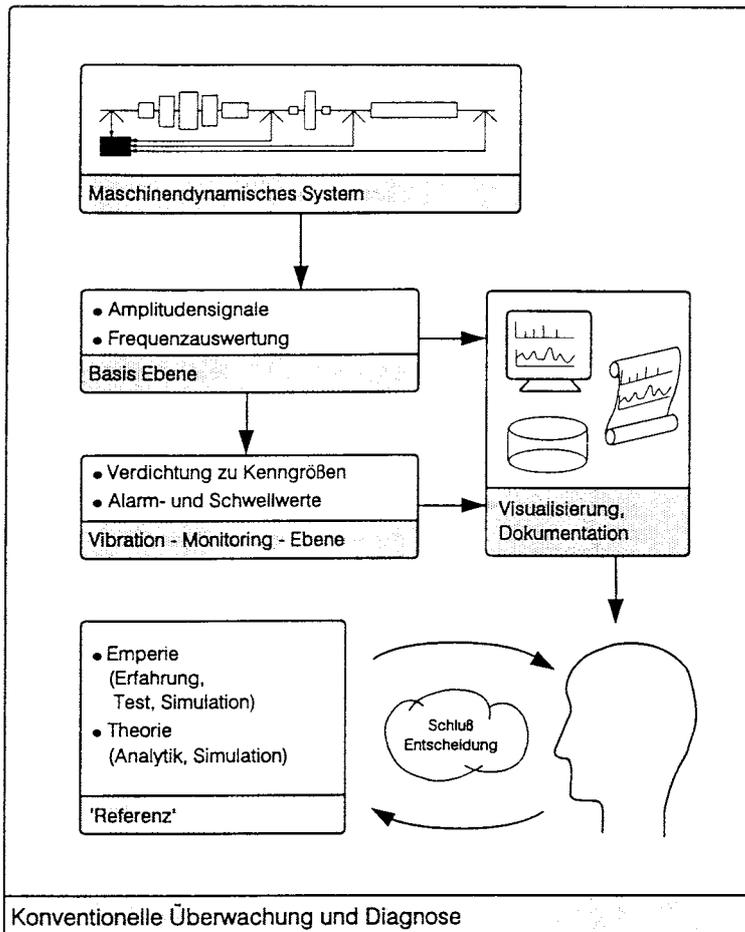
Hohe Ausfallkosten und unter Umständen große Gefährdungspotentiale weisen der Betriebsüberwachung und Schadensdiagnose beim Einsatz von Turbomaschinen eine bedeutende Rolle bezüglich des Erfassens von Störungen und Schädigungen von Maschine und Bauteilen zu.

Zur Überwachung von Turbomaschinen sowie zum gezielten Zuordnen von Veränderungen im System zu (physikalischen) Fehlern stehen neben dem großen Erfahrungswissen von Betreibern und Herstellern eine große Anzahl von meist rechnergestützten Vibration Monitoring Systemen nebst herstellerepezifischen Diagnosephilosophien zur Verfügung, welche sich bezüglich einiger praktischer Fragestellungen bewährt haben.

Theoretische Grundlage der eingesetzten Systeme bilden Verfahren der Signalanalyse und auch der Mustererkennung, aus denen sich unter Einsatz moderner Rechnertechniken vielfache Kenngrößen ableiten lassen.

Durch die verbesserte Aufbereitung oder Verdichtung zu Kenngrößen wird jedoch das Kernproblem jeder Schadensdiagnose, das gezielte Auswerten der vorliegenden Informationen zur Benennung des konkreten physikalischen Schadens nicht in allen Schadensfällen hinreichend genau gelöst. Am Beispiel des konkreten Schadens Wellenquerriß und seinen vielfältigen Auswirkungen auf die Wellendynamik, läßt sich für den Fall 'atmender' Risse, also sich, auf Grund der Belastung und der Wellendrehung, öffnender und schließender Rißfronten, mit Methoden der Signalanalyse Änderungen der Dynamik sicher feststellen.

Der kausale Bezug zwischen ermittelter Änderung der Wellendynamik, resp. der Änderung errechneter Kennwerte und der physikalischen Ursache wird durch das Betriebs- und Überwachungspersonal hergestellt. Die Anzeigewerte klassischer und moderner Verfahren der Maschinenüberwachung müssen interpretiert werden, wie in Bild 1 plakativ dargestellt ist.



Seit einiger Zeit sind Methoden der modellgestützten Ermittlung und Überwachung von Systemparametern, z.B. [1,2], bekannt und nicht nur an theoretischen sondern auch an komplexen praktischen Problemen erprobt [2]. Grundlage derartiger Verfahren der Parameteridentifikation ist die Abbildung des mechanischen Systems auf ein parametrisches Modell, wobei die einzelnen (nichtphysikalischen) Parameter mit Hilfe von Schätzverfahren bestimmt werden. Die Anwendung zur Maschinenüberwachung erfolgt durch die laufende

Bild 1: Konventionelle Überwachung und Diagnose

Ermittlung der Parameter, ggf. einer Rückrechnung zu mechanischen Parametern [1] und den Vergleich mit schadensfreien Werten. Hierbei sind auch modale Betrachtungen möglich, ggf. die Betrachtung nur einzelner 'modaler Signaturen' [2], die sich in Form von Einzel- oder Summenformulierungen auch zur Fehlerdetektion heranziehen lassen. Eine andere Vorgehensweise der modellgestützten Überwachung und Diagnose liegt den Arbeiten [3,4,5,6,7] zu Grunde. Auf Basis eines linearen Modells der ungeschädigten Struktur, also der Kenntnis der mechanischen Systemparameter, z.B. in Form der M-D-K - Matrizen (Massen-, Dämpfungs-, Steifigkeitsmatrix), wie sie bei Turbomaschinen in der Regel für Dynamikrechnung benutzt werden und zur Verfügung stehen, wird eine Modellerweiterung derart vorgenommen, daß der zusätzliche Einfluß des Fehlers ebenfalls entweder in Form eines Modelles [3,4,5,6] oder allgemein ohne eine Modellstruktur prinzipiell [6,7,9] berücksichtigt wird. Die genaue Erläuterung der math. Vorgehensweise findet sich in den angegebenen Arbeiten und soll hier nur allgemein dargestellt werden. Für derart erweiterte Gesamtbeschreibungen (lineares Modell der ungeschädigten Struktur + Modell des Schadens, resp. Berücksichtigung des Schadens) lassen sich aus der Regelungstheorie bekannte Verfahren des Beobachterentwurfes (Nichtlinearitätenbeobachter [9], PI-Beobachter [10]), resp. der Filtertechnik [11]) anwenden. Die Anwendung derartiger Techniken beinhaltet unter Nutzung der genannten mechanischen Parameter (M, D, K) und der zur Verfügung stehenden Messungen der Wellenschwingung in den Lagern neben der Rekonstruktion nicht meßbarer Verschiebungen (im

der ersten harmonischen Schwingungsanteile dargestellt, welche auf Grund der Phasenabhängigkeit sehr sensibel auf Änderungen der Wellendynamik sind. Wird nun ein maschinenspezifischer 'Gutbereich' um den Endpunkt einer derartigen Zeigerdarstellung herum definiert, so lassen sich leicht unzulässige Veränderungen rechentechnisch erfassen. Die Diagnosefähigkeiten derartiger Systeme beschränken sich jedoch auf die beschriebenen Auswertungen aller vorliegenden Informationen, z.T. werden jedoch auch weitergehende Aussagen bezüglich der Qualität der eingetretenen Änderung gegenüber dem Normalverhalten ermittelt, resp. das aktuelle Schadensrisiko ermittelt, bzw. die Restlaufzeit abgeschätzt [14,17], mit dem Ziel einer planbaren Instandsetzung.

Wird jedoch unter Diagnose die Zuordnung von Änderungen zu konkreten physikalischen Schäden verstanden, so wird das in Bild 1 dargestellte Grundproblem zwar auf Grund einer wesentlich besser aufbereiteten Informationsbasis etwas entschärft, jedoch dennoch nicht gelöst.

Wie die Erfahrungsberichte [12,13] zeigen, obliegt die verantwortungsbewußte Diagnose dem erfahrenen Betriebspersonal. Im Fall spezieller Schäden müssen alle verfügbaren Informationen sehr genau interpretiert werden, letztlich bleibt als Beweis nur das kostenaufwendige Abfahren und Abdecken der Maschine. Das Betriebspersonal interpretiert alle Ergebnisse auf Grund seiner Erfahrungen mit der konkreten Maschine, jedoch immer auf Grund erworbenen theoretischen Wissens.

Die mit dem konkreten Schaden Wellenquerriß implizierte Rißdetektion beinhaltete lange Zeit die Entwicklung von Rißmodellen, welche das dynamische Verhalten von (atmenden) Wellenquerrissen beschrieb. Eine sehr ausführliche Übersicht finden sich bei [18]. Das prinzipielle Verhalten eines atmenden Risses ist jedoch seit langem bekannt [19] und wird mit einem Scharnier-Modell ausreichend beschrieben [20].

Durch den Einbau derartiger (Schadens-)Modelle in die bekannte Dynamikgleichung der Turbomaschine läßt sich die Auswirkung eines Wellenquerrisses auf die (in den Lagern) meßbare Schwingbewegung studieren, um dann im Umkehrschluß nach den derartig ermittelten Phänomenen im Schwingungsverhalten realer Rotoren zu suchen und bei Vorhandensein auf die Existenz eines Wellenrisses zu schließen. Eine derartig fundierte Vorgehensweise beinhaltet sicherlich grundlegende Erkenntnisse bezüglich des Rißeinflusses, andererseits erlaubt sie keinen eindeutigen Rückschluß vom (meßbaren) Phänomen zur kausalen Schadensursache, so daß das Kernproblem der Ermittlung der Schadensursache letztlich weiterhin der Interpretation des erfahrenen Betriebspersonals obliegt.

Aktuelle Arbeiten zu diesem Themenkomplex beinhalten einerseits das Ziel der Entwicklung eines realistischen Rißmodelles [21] als auch eines möglichst eindeutigen signalanalytischen Kennwertes [22]. Insbesondere aus den Simulationsstudien von [22] ist ersichtlich, daß die als relevant erachteten 1. und 2. Harmonischen des Schwingungssignales von zahlreichen weiteren Einflußfaktoren abhängen, und bei speziellen Konfigurationen von Unwucht- und Rißwinkel auch fallen können, was eine entsprechende Detektion im Sinne der vorstehenden Ausführungen zusätzlich erschwert.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, daß die Verdichtung der komplexen Wellendynamik einer Turbomaschine mit Hilfe von Verfahren der Signalanalyse zu Kennwerten aber auch die Verwendung von aufbereiteten Zeigerdarstellungen sehr gute Möglichkeiten der Überwachung im Sinne der kontinuierlichen Erfassung des Ist-Zustandes einer Maschine bietet. Auftretende Änderungen können auf verschiedenste Weise erfaßt werden.

Inneren) des Rotors die Ermittlung von Parametern des Schadensmodelles [3,4], resp. von durch den Schaden auftretenden zusätzlichen Kräften und Momenten [5,6,7].

Die so erhaltenen Schadensmodellparameter [3,4], bzw. die ermittelten Kräfte und Momente [5,6,7] repräsentieren den konkreten Schaden, wie in Kapitel 3 erläutert werden wird.

Durch die erwähnte Systemerweiterung um ein Schadensmodell, resp. die Einführung von Freiheitsgraden für den Schaden und die Anwendung auf das, bedingt durch den Schaden (z.B. einen Wellenriß), u.U. nichtlineare System, unterscheiden sich diese beiden Vorgehensweisen von der Anwendung (modaler) Beobachter zur Schadensdetektion [8]. In den folgenden Abschnitten werden die Vor- und Nachteile von Methoden basierend auf Verfahren der Signalanalyse und der neuen, modellorientierten Ansätze dargestellt und verglichen. Hierbei wird zugunsten der konzeptionellen Darstellung der Methoden auf den Einsatz von Formeln verzichtet. Der mathematische Hintergrund ist in der zitierten Literatur ausreichend angegeben.

2 Klassische und moderne Methoden der Maschinenüberwachung und Schadensdiagnose

Die Anwendung klassischer Methoden der Maschinenüberwachung wird bereits in der VDI-Richtlinie 2059 beschrieben. Das Ziel nur einfache Messungen und Aufzeichnungen zu verwenden, führt zu einem auf den max. Wellenausschlag im Zusammenhang mit Drehzahlinformationen basierenden Kriterien- und Handlungskatalog mit Alarm- und Schwellwerten, sowie einer Zuordnung bekannter, einfacher Schäden zu resultierenden Phänomenen der Wellenschwingung.

Berichte aus der Praxis, z.B. [12], zeigen einerseits, daß bereits mit einfachen Messungen, z.B. der Lageröltemperatur, Veränderungen erfaßbar sind, andererseits wird auf erhebliche diagnostische Schwächen, z.B. bei der Rißerkennung, bei allgemein sich nur langsam verändernden Parametern sowie drehwinkelabhängigen Phänomenen hingewiesen, woraus die Forderung nach modernen EDV-gestützten (Vibration-Monitoring) Systemen abgeleitet wird. Der Vorteil dieser Systeme wird in den vielfältigen graphischen Ausgabemöglichkeiten, den Fähigkeiten zum Dokumentieren und moderneren Analyseverfahren gesehen.

Die Anbieter derartige Überwachungssysteme, z.B. [13], bieten eine kontinuierliche Überwachung von Wellenschwingungen weit unterhalb der Grenzwerte, die Anwendung verschiedenster Schwingungsanalyseverfahren im Zeit- und Frequenzbereich, die Speicherung von Ergebnissen, den Vergleich mit vergangenen Untersuchungen oder mit Referenzwerten, z.B. vom Einrichtzustand der Maschine. Mit derartigen Systemen kann der maschinendynamische Zustand sowie Änderungen des Zustandes gut erfaßt werden, so daß sie in der Tat ein sinnvolles Werkzeug zur Überwachung und zur Erfassung allgemeiner Änderungen darstellen.

Andere Systeme bieten neben den bekannten Signalanalyseverfahren herstellerspezifische Aufbereitungen an [14.15.16]. Typischerweise werden hier u.a. Zeigerdarstellungen

Zur Schadensdiagnose bedarf es jedoch weiterhin der großen Erfahrung des Betriebspersonals. Derartige Systeme erleichtern hierbei jedoch auf Grund ihrer vielfachen Darstellungs- und Speichermöglichkeiten die Arbeit. Einen Anzeigeparameter für spezielle Schäden bieten derartige Systeme nicht.

3 Neue, modellbasierte Ansätze der Maschinenüberwachung und Schadendiagnose

Die hier prinzipiell zu erläutern modelbasierten Verfahren der Überwachung und Diagnose sind jene, welche einen Schaden im (erweiterten) Modell berücksichtigen [3,4,5,6,7]. Modellbasierte Verfahren der Parameteridentifikation [1,2] werden hier nicht berücksichtigt, da mit derlei Verfahren ebenfalls analog zu den Ausführungen zur Signalanalyse zwar eindeutige Aussagen über die Änderung des Ist-Zustandes infolge eines Fehlers möglich ist, jedoch keine Zuordnung zu konkreten Schäden möglich ist.

Die Anwendung des Nichtlinearitätenbeobachters [5,6,9] liefert auf Basis der Wellenschwingungsmessung Schätzungen für die modellierten und nichtmeßbaren Schwingungen im Inneren des Rotors. Zusätzlich werden die in zu vorgegebenen Eingängen existieren äußeren Einflüsse (zum gegebenen Nominalmodell) in Form von Kräften und Momenten geschätzt.

Die gewonnenen Größen lassen sich klassisch, d.h. mit Hilfe von Methoden der Signalanalyse, auswerten. Vorteilhaft ist, das nun nicht nur die meßtechnisch verfügbaren Messungen herangezogen werden können, sondern zusätzlich Größen, welche dem physikalischen Problem an sich viel näher sind. In [23] wurden beispielsweise Lyapunovexponenten für die Verschiebungsordinate des Risses inmitten des Rotors ermittelt, um die (chaotische) Komplexität der Wellendynamik in Folge eines Wellenrisses aufzuzeigen. Derartige Parameter lassen sich allerdings ebensowenig wie signalanalytische Kennwerte zur eindeutigen Schadensdetektion verwenden.

Erst die Verwendung der Schätzung äußerer Kräfte und Momente erlaubt weitergehende Aussagen. Der Rißeinfluß wird eine lokale Steifigkeitsänderung an der Rißposition zu Folge haben [18-22]. In Folge des Aufweichens kommt es zu einer zusätzlichen Verschiebung, wenn der Riß geöffnet ist. Wird nun ein ungerissenes System vorausgesetzt, kann die durch den Riß erzeugte zusätzliche Verschiebung auch von einer fiktiven äußeren Kraft erzeugt werden. Der Beobachter ermittelt nun diese fiktive Kraft, gleichzeitig aber auch die Verschiebung an der Rißposition. Der Quotient aus geschätzter, fiktiver Kraft und geschätzter Verschiebung entspricht exakt dem Steifigkeitsverlust in Folge des Risses. Da der atmende Riß wechselnde Steifigkeiten zur Folge hat, läßt sich das Atmen eines Risses mit Hilfe des erwähnten Quotienten als Anzeigeparameter bezüglich des Schadens Wellenriß anzeigen, wie in den Arbeiten [5.6.23] geschehen. Eine beispielhafte Darstellung ist in Bild 2 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine Simulationsrechnung unter Verwendung des Rißmodells nach Gasch [19], so daß auf Grund des benutzten Modells entsprechende (kantige) Kennlinien zu rekonstruieren waren. Da die Methodik keinerlei Kenntnisse über Struktur und Parameter des Risses voraussetzt, würde sie bei einer realen Anwendung entsprechende reale Nachgiebigkeitsverläufe ermitteln. Die theoretische Absicherung des zugrundeliegende regelungstechnischen Verfahrens ist zwischenzeitlich

in [10] abgeschlossen worden und konnte methodisch auf die verwandte Vorgehensweise des erweiterten Kalman-Filters beispielhaft übertragen werden [7].

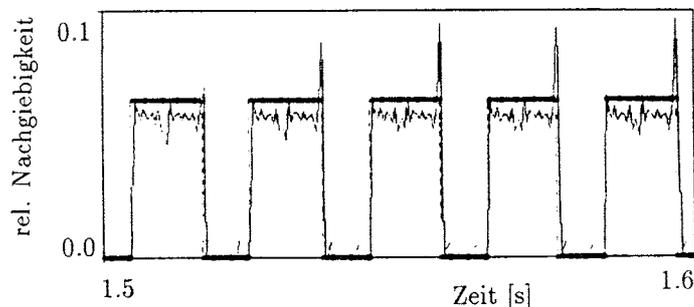


Bild 2: Atmender Wellenriß / Anzeigeparameter Nachgiebigkeitsverhältnis [5,6]

Die in [3,4] vorgestellte Detektionsmethodik unter Verwendung des erweiterten Kalman Filters benutzt ein Modell des Risses. Die zur vorgegebenen Struktur des Modells zugehörigen Parameter, z.B. der Rißtiefe werden konkret geschätzt, und als Anzeigeparameter des Schadens aufgetragen, wie beispielhaft in Bild 3 dargestellt.

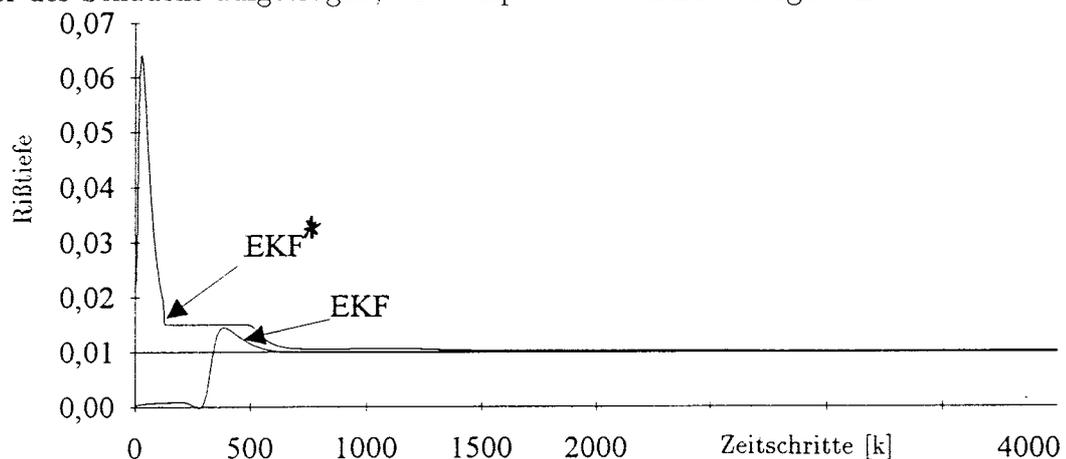


Bild 3: Wellenriß / Anzeigeparameter Rißtiefe [3,4]

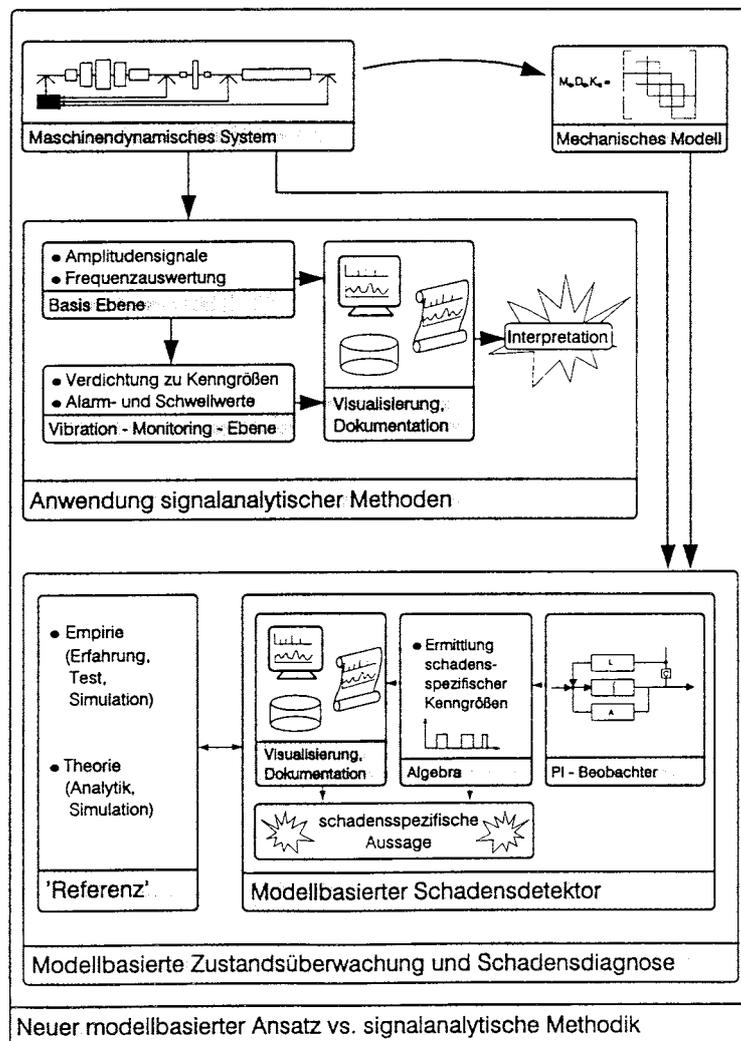
Da die Methodik im Gegensatz zu [5,6,10] die Struktur eines Rißmodells voraussetzt (und damit auf Annahmen bezüglich des realen Rißverhaltens basiert), war es naheliegend, sie entsprechend der zugrundeliegenden Strukturidentität zwischen Nichtlinearitätenbeobachter und Erweitertem Kalman Filter (EKF) zu modifizieren [7], so daß mit einer nur im Detail anderen Methodik des EKF analoge Ergebnisse zu [5,6] ermittelbar sind.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß bezüglich der Maschinenüberwachung modellgestützte Methoden basierend auf Verfahren der Parameteridentifikation [1,2] gleiche Vorteile wie Verfahren der Signalanalyse bieten. Die weitergehend betrachteten Verfahren der modellgestützten Schadensdetektion [3-7] lassen sich zur Maschinenüberwachung zwar anwenden, bedürfen jedoch zusätzlich der klassischen Auswertung nach Abschnitt 2. Unter Umständen bietet jedoch die klassische Auswertung innerer, nicht meßbarer Größen gewisse Vorteile, hier sind jedoch weitere Grundsatzuntersuchungen notwendig. Ihren großen Vorteil besitzen die Verfahren bei der Schadensdetektion. Durch die Ver-

wendung spezieller schadensspezifischer Kenngrößen, z.B. bei der Rißdetektion eines relativen Nachgiebigkeitsverhältnisses, oder der konkreten Ermittlung der Rißtiefe, läßt sich ein dem Schaden direkt zuordenbarer Anzeigeparameter finden, der eine kausale Aussage entsprechend dem Anspruch der Schadensdetektion auch tatsächlich zuläßt.

4 Vergleich beider Vorgehensweisen

Wie erläutert, läßt sich das Schwingungsverhalten einer komplexen Struktur, bzw. Änderungen derselben, mit rechnerunterstützten Methoden der Signalanalyse gut beschreiben bzw. erfassen. Der meßtechnische Aufwand hierzu ist vergleichsweise gering, die üblicherweise benutzten Wellenschwingungsaufnehmer werden weiterverwendet. Modellkenntnisse werden direkt nicht vorausgesetzt, sind jedoch implizit im Erfahrungsschatz des Betriebspersonals enthalten, so daß auch Interpretationen von Änderungen der Dynamik hiermit möglich sind.



Die erläuterten Methoden der modellgestützten Schadensdetektion dürften bei der Überwachung nur minimale Vorteile dadurch bieten, daß nun weitere innere Meßgrößen zur klassischen Auswertung zur Verfügung stehen. Die Anwendung dieser Methoden erfordert allerdings die Kenntnis des mechanischen Modells des zugrundeliegenden Systems. Bezüglich der Messungen kann auf die Messungen welche der Signalanalyse zugrundeliegen, zurückgegriffen werden. Auf der Basis der dynamischen Modellbeschreibung werden nun erstmals schadensspezifische Parameter ermittelt, welche dem Betriebspersonal bei der Detektion spezieller Schäden den Interpretationsaufwand reduzieren helfen. Zusammenfassend ergibt sich daß in Bild 4 dargestellte Schema.

Bild 4: Neuer modellbasierter Ansatz vs. signalanalytische Methodik

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methoden der Signalanalyse, z.B. in Form von Vibration Monitoring Systemen und die neuen Methoden der modellgestützten Überwachung und Schadensdetektion konkurrieren nicht. Beide Methoden besitzen jeweils spezifische Stärken und Schwächen.

Signalanalytische orientierte Vibration Monitoring Systeme erfassen mit vergleichsweise einfachen mathematischen Mitteln die Komplexität der Wellendynamik von Turbomaschinen, bereiten diese graphisch auf und dokumentieren sie. Zur Detektion spezieller Schäden, z.B. des hier betrachteten Wellenrisses, bieten sie dem Bedienpersonal eine gute Grundlage, überlassen jedoch die eigentliche Schlußfolgerung bezüglich eines konkreten physikalischen Schadens dem interpretierendem Fachpersonal.

Bei der Interpretation kann die auf dem gleichen meßtechnischen Aufwand basierende, nur zusätzliche Rechnerkapazität erfordernde modellgestützte Detektion jedoch zusätzlich große Vorteile beinhalten. Die Ermittlung schadensspezifischer Kennwerte erlaubt die Anzeige eines dem physikalischen Schadensphänomen unmittelbar zugeordneten Anzeigeparameters, so daß im Idealfall keinerlei Interpretation mehr notwendig ist.

Auf Grund des nur geringen zusätzlichen Aufwandes (zusätzliches Modellwissen + zusätzliche Hardwarekapazität) ist ein praktischer Einsatz parallel zu einem bestehenden System entsprechend Abb. 4. problemlos möglich und im Sinne einer realistischen praktischen Erprobung gegenüber 'akademischen' Laborversuchsständen hinaus auch wünschenswert.

Literaturhinweise:

- /1/ Rückwald, R.: Modellgestützte Überwachung mechanischer Systeme mittels differentieller Parameteridentifikation. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, Nr. 328, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- /2/ Basseville, M.; Benveniste, A.; et. al. (8 Autoren): In Situ Damage Monitoring in Vibration Mechanics. Diagnostics and Predictive Maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, 1993, p. 401-423.
- /3/ Fritzen, C.P.; Seibold, S.: Identification of Mechanical Systems by Means of the Extended Kalman Filter. Proc. 3rd Int. IFToMM Conf. Rotordyn., Lyon, p. 423-429.
- /4/ Seibold, S; Fritzen, C.P.; Leifeld, A.: A Combined State and Parameter Estimator Applied to Fault Detection. IUTAM Symp. Ident. Mech. Syst., University of Wuppertal, Springer Verlag, 1993. to appear.
- /5/ Söffker, D.; Bajkowski, J.: Crack Detection of a Rotor by State Observers. Proc. 8th IFToMM World Congress Th. Mach. Mechanism, Prague, p. 771-774.
- /6/ Söffker, D.; Bajkowski, J.; Müller, P.C.: Detection of Cracks in Turbo Rotors - a New Observer Based Method. ASME J. Dyn.Syst., Meas. and Contr., 115, 1993, p. 518-524.

- /7/ Seibold, S.; Söffker, D.; Fritzen, C.P.: Modellgestützte Detektion von Wellenrissen. in: Natke, H.G.; Tönshoff, H.K.; Meltzer, G.: Dynamische Probleme - Modellierung und Wirklichkeit - , Berichte aus dem Curt-Risch-Institut der Universität Hannover, Oktober 1993, Seiten 309-328.
- /8/ Waller, H.; Schmidt, R.: The Application of State Observers in Structural Dynamics. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 4, 1990, p. 195-213.
- /9/ Müller, P.C.: Indirect Measurements of Nonlinear Effects by State Observers. IUTAM-Symp. Nonl. Dyn. Eng. Syst., University of Stuttgart, Springer Verlag, 1990, p. 205-215.
- /10/ Söffker, D; Yu, Tie-Jun; Müller, P.C.: State Estimation of Dynamical Systems with Nonlinearities by using Proportional- Integral Observer. International Journal of Systems Science, 1993, appears.
- /11/ Ljung, L.: Asymptotic Behaviour of the Extended Kalman Filter as a Parameter Estimator for Linear Systems. IEEE Trans. Aut. Contr., AC-24, 1979, p. 36-50.
- /12/ Peter, U.: Schwingungsüberwachung an großen Turbosätzen - Stand und sinnvolle Weiterentwicklung aus Betreibersicht. in: VDI-Berichte 568, 1985, Seiten 105-125.
- /13/ Briendl, D.: Vibration Monitoring - Ein modernes System für die Zustandsüberwachung von Turbogruppen. in: VDI-Berichte 568, 1985, Seiten 305-317.
- /14/ Weigel, M.: Ein neues System zur rechnergestützten diagnostischen Überwachung von Kraftwerksturbosätzen, Gasturbinen und Turboverdichtern. Carl Schenck AG, Darmstadt, 1991.
- /15/ Muszynska, A.: Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions. in: Course on 'Rotor Dynamics and Vibration in Turbomachinery', Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium. Sept. 21-25, 1992.
- /16/ Muszynska, A.: Rotating Machinery Malfunctions Diagnostics through Vibration Monitoring. Bently Rotor Dynamics Research Corporation, Report No. 2. 1991.
- /17/ Knuth, Th.: Schadenfrüherkennung durch Schwingungsanalysen - Neue Möglichkeiten in der Instandhaltung. Der Maschinenschaden, 61, 1988, Seiten 70-74.
- /18/ Wauer, J.: On the Dynamics of Cracked Rotors: A Literature survey. Appl. Mech. Rev.. Vol. 43, 1990, p. 13-17.
- /19/ Gasch, R.: Kleiner Beitrag zur Behandlung des dynamischen Verhaltens einer rotierenden Welle mit angerissenem Querschnitt. ILR-Bericht 8, TU Berlin. 1975.
- /20/ Gasch, R.: A Survey of the Dynamic Behaviour of a Simple Rotating Shaft with a Transverse Crack. J. Sound Vibr., 160, 1993, p. 313-332.
- /21/ Rothkegel, W.: Rißerkennung bei Rotoren durch Schwingungsüberwachung. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 11, Nr. 180, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- /22/ Mühlenfeld, K.: Der Wellenriß im stationären Betrieb von Rotoren. Dissertation. TU Berlin, 1992.
- /23/ Söffker, D.; Bajkowski, J.; Müller, P.C.: Crack Detection in Turbo Rotors - Vibrational Analysis and Fault Detection. ASME DE-Vol 60, 1993, p. 277-287.