

# Überwachung, Diagnose und lebensdaueroptimierte Betriebsführung schwingungsfähiger Maschinen - Teil 1: Prinzipvergleich bestehender modellgestützter und signalanalytischer Verfahren am Beispiel der Wellenrissdetektion bei Turborotoren

Dr.-Ing. **S. Söffker**, Wuppertal

## 1 Einführung

Fehlerdetektion, Schadendiagnose, Schadenfrüherkennung und viele andere Begriffe kennzeichnen das Bemühen Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb technischer Systeme frühzeitig zu erkennen, um problemadäquat reagieren zu können. Hierbei kommt modernen Verfahren der automatisierten Anlagenüberwachung eine zentrale Bedeutung zu. Die üblicherweise in maschinen- und rotordynamischen Systemen (allgemein: elastischen mechanischen Strukturen) zum Einsatz kommenden Verfahren basieren häufig auf Methoden der Signalanalyse. Prinzipiell müssen die hierbei bestimmten Kennwerte (aus Fourieranalysen oder Spektralbetrachtungen) bewertet werden. Als Vergleichsbasis dienen Vergleichskennwerte des ungeschädigten System, zum Beispiel im Auslegungszustand, sowie das Systemverständnis und Anlagenwissen des Bedieners.

Signalanalytische Methoden klassifizieren Signale. Die Bewertung und somit die schwingungstechnische Diagnose erfolgt oft durch Menschen oder zunehmend auch durch Verfahren der Mustererkennung. Wissen um das Systemverhalten / Systemparameter wird beispielsweise innerhalb signalanalytischer Methoden nicht benötigt. Das vorhandene Wissen wird allerdings zur Diagnose benötigt und von der Bedienmannschaft oder dem Diagnoseteam implizit verwendet.

## 2 Diagnoseverfahren

Die moderne Regelungstheorie stellt Methoden zur Verfügung, mit denen sich ebenfalls auf Basis gemessener Signale entsprechende Untersuchungen vornehmen lassen. Die interessierenden Fragen sind: Lohnt sich der Aufwand (als Neuimplementationsaufwand für Software)? Ist der Unterschied im Vergleich zu den praxistauglichen und klassischen Verfahren wesentlich?

In diesem Beitrag wird ein Prinzipvergleich hinsichtlich des Einsatzes von Beobachtern und Identifikationsschemen als modernen Methoden der Regelungstheorie im Vergleich zu signalanalytischen Verfahren gegeben. Als Anwendungsbeispiel wird die Wellenrissdetektion an der elastischen mechanischen Struktur Turbinenrotor gewählt. Dieser Beitrag gibt keine Detailübersicht über alle in diesem Anwendungsbereich eingesetzten Verfahren sowie deren Ergebnisse. Für einen einführenden Überblick sei auf die Literatur /17-19,25-29/ verwiesen.

In den letzten Jahren wurden einige regelungstechnische Methoden zur Fehlerdiagnose entwickelt und angewendet zur

- Fehlerdetektion, um das Versagen von Sensoren oder Komponenten sowie die Existenz eines Fehlers zu erkennen,
- Schadendiagnose, um die Existenz ausgesuchter Fehler bzw. Schäden zu bestimmen, und zur
- Fehlerisolierung und -lokalisierung, was die Separierung weiterer unbekannter Effekte gegenüber dem eigentlichen Schaden (Isolierung) sowie die Bestimmung des genauen Ortes innerhalb der Struktur (Lokalisierung) beinhaltet. Die Schlagworte hierzu sind 'Residual Generator', 'Decision Maker', 'Extended Kalman Filter', 'Parity Equation' und 'Diagnostic Observer' /7-10,15,22,23/.

Die aktuellen Entwicklungen beinhalten die Berücksichtigung von Modellbildungsfehlern, was letztlich eine Entkopplung von Störungen und Fehler beinhaltet. Eine weitere Entwicklungsrichtung beinhaltet als Ziel die Entwicklung von Methoden zur kausalorientierten Schadendiagnose, d.h. die Entwicklung von Methoden, die eindeutige Anzeigeparameter hinsichtlich der Zuordnung Fehler/Schaden - Anzeigeparameter erlaubt.

Die Anwendung signalanalytischer Methoden beinhaltet immer den Vergleich ermittelter Kenngrößen mit Gutwerten, welche das ungeschädigte Systemverhalten charakterisieren, oder mit Grenzwerten, welche z.B. anlagentypisch spezifiziert wurden. Wenn mehrdimensionale Kennwerte bestimmt und verglichen werden, bieten sich Verfahren der Mustererkennung zum Vergleich von Ist und Gut an. Fortgeschrittene Verfahren verknüpfen die Kenngrößen derart miteinander, daß die Interpretationsgenauigkeit erhöht und gleichzeitig die Sensibilität verbessert werden, vgl. z.B. /25/.

Die angegebenen Entwicklungen sind durch einige implizite Annahmen und Einschränkungen gekennzeichnet: Die signalanalytische Informationskondensierung beinhaltet, daß lediglich die Ausgangsgrößen eines Systems betrachtet werden. Wissen um Struktur und Parameter sowie hinsichtlich der Eingänge des Systems werden nicht verwendet.

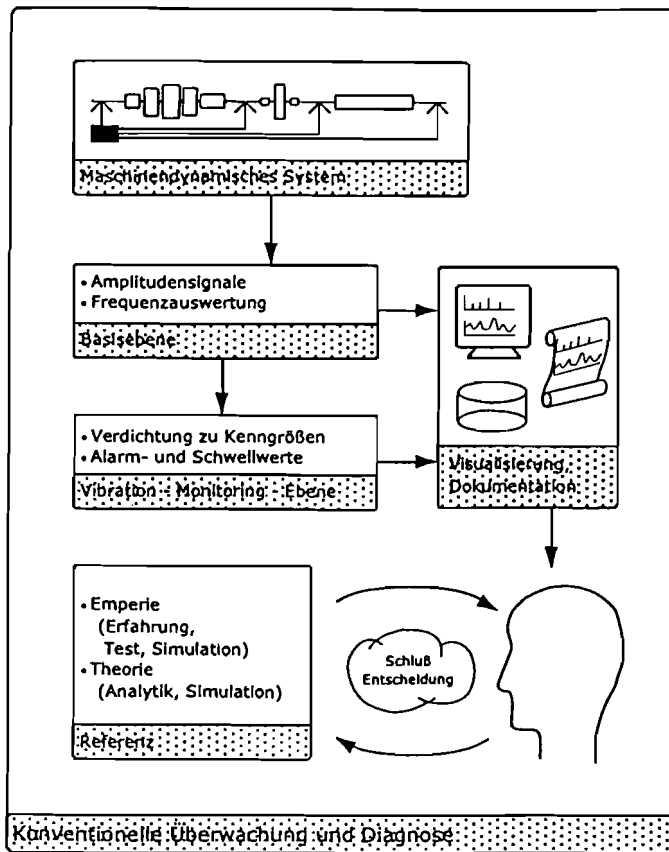


Abb. 1: Klassische Überwachung und Diagnose technischer Systeme

Obwohl die Zuordnung nicht notwendig eindeutig ist, wird sie doch vom Bedienpersonal praktisch oft gelöst.

Abb. 1. zeigt den diagnosetypischen Schlußfolgerungsprozeß. Erfahrungswissen beinhaltet erworbenes oder erzeugtes Wissen über Sachverhalte. Definierte Bedingungen ergeben typische Merkmale (signalanalytische Signaturen). Die Schadendiagnose kehrt diese Richtung um: von den konkret beobachteten Phänomenen wird auf die kausalen Ursachen geschlossen. Der Schluß erfolgt dabei unter Nutzung des vorhandenen Wissens.

Einige Aspekte des Diagnosevorganges als menschlichen Entscheidungsvorgang verdeutlichen die resultierende Problematik:

- Die Beziehung zwischen sichtbarem Phänomen dargestellt durch die Messung, bzw. die Aufbereitung der Messungen durch Kenngrößen ist nicht notwendig kausal. Die erhaltenen Größen müssen interpretiert werden. Dies trifft insbesondere für Methoden zu, welche auf Grund der Messungen oder des Verfahrens nicht 'nah' (genug) am interessierenden Prozess messen, die

Dies beinhaltet eine nur phänomenologische Betrachtung des Systems, wobei ein Teil der direkt messbaren Größen verwendet werden. Es wird angenommen, daß unterschiedliche Fehler oder Schäden zu unterschiedlichen Signaturen führen.

Die Signaturen an sich beinhalten keine kausale Analyse bzw. den Schluß auf die Ursache der Veränderung. Die Zuordnung zwischen betrachteter Kenngröße und kausaler Ursache wird durch menschliches Wissen, durch Erfahrungen oder Schlußfolgerungen bestimmt.

Bandbreite möglicher Interpretationsfehler ist daher groß.

- Ökonomische Zusammenhänge und psychologische Effekte bestimmen die Entscheidungssituation. Die Entscheidungssituation einen evtl. quervergitterten Turbinenläufer eines Großkraftwerkes im Grundlastbereich zu stoppen ist aufwendig und kostspielig. Falls nach dem (mehrmaligen) Abdecken des Läufers die Nichtexistenz eines Risses festgestellt wurde, ist die Sensibilität für eine erneute Entscheidungssituation abgesenkt.
- Insbesondere im Fall seltener Fehler mit einem hohen Gefährdungspotential (z.B. im Fall nuklearer Kraftwerke oder großchemischer Anlagen) sind diese menschlichen Entscheidungsprozesse sehr aufwendig und fehleranfällig. Aus diesen Erfahrungen läßt sich als die für die Schaden- diagnose / Fehlerdetektion resultierende Aufgabenstellung als Ziel, die Herstellung schadennaher Anzeigeindikatoren formulieren.

Dies kann naheliegenderweise nur durch Methoden erzielt werden, welche über die Messungen hinaus, weiteres Wissen über das System zur Auswertung heranziehen, wie schematisch in Abb. 2 dargestellt ist. Die folgenden Abschnitte stellen kurz quantitative modellbasierte Ansätze vor und bewerten diese hinsichtlich des angegebenen Zieles der Ermittlung schadennaher Diagnoseindikatoren. Details finden sich in der angegebene Literatur, oder z.B. in /21/.

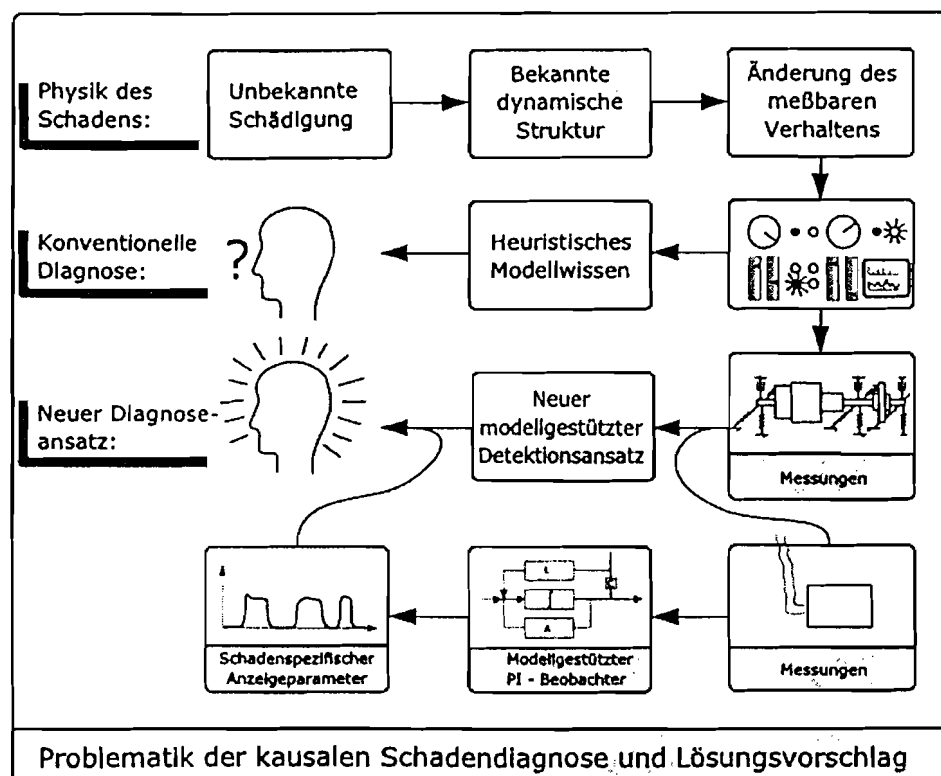


Abb. 2: Vorgehensweise menschlicher Diagnostizität

### Methoden der analytischen Redundanz - Beobachter:

Der Kern der Methoden der analytischen Redundanz zur Fehlerdetektion sind analytische Beziehungen z.B. in Form eines Differential- oder Differenzgleichungssystems. Die angenommenen Beziehungen bilden systemtheoretisch als mathematisches Äquivalent zum realen physikalischen System die Ein-/Ausgangsbeziehungen in geeigneter Form ab. Dieses kann auch angenommene Fehler (bzw. deren Beschreibungen) beinhalten. Die hier interessierenden Fähigkeiten der Vorgehensweise beinhalten die Isolierbarkeit (von Fehlern), die Sensitivität als auch die Robustheit (gegenüber z.B. Fehlern der Modellbildung) der Methoden.

Ausgehend von der linearen, zeitinvarianten Zustandsraumbeschreibung

$$\dot{x} = Ax + Bu + E_d d_d + K_d f_d \quad y = Cx + E_m d_m + K_m f_m \quad (1)$$

mit dem n-dimensionalen Zustandsvektor  $x$ , dem r-dimensionalen Eingangsvektor  $u$ , dem m-dimensionalen Ausgangsvektor  $y$ , der Systemmatrix  $A$ , dem Eingangsvektor  $B$ , der Meßmatrix  $C$ , den Verteilungsmatrizen  $E_d, E_m$  der unbekanntten Eingänge  $d_d$  und  $d_m$ , welche auf die Dynamik  $d_d$  und auf die Messungen  $d_m$  wirken, den Verteilungsmatrizen  $K_d, K_m$  der Fehlereinflüsse  $f_d, f_m$  von entsprechender Dimensionierung, beinhaltet die Aufgabe der Beobachterentwicklung - auf der gegebenen  $(A, C)$  - Beobachtbarkeit (oder der Beobachtbarkeit eines interessierenden Unterraumes) - die Schätzung der (zum Teil nicht messbaren) Zustände  $\hat{x}$ , bzw. eines interessierenden Unterraumes.

Die Unterschiede zwischen den real am System gemessenen Größen  $y = Cx$  und den vom Beobachter geschätzten Werten  $\hat{y} = C\hat{x}$  werden durch den Schätzfehler

$$e = C(\hat{x} - x) \quad (2)$$

als Residuen für FDI-Konzeptionen (Fault Detection and Isolation) verwendet. Die Analyse der Residuen kann zur Entdeckung von Fehlern, Schäden und deren Lokalisierung verwendet werden. In diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, daß FDI-Applikationen zur

- Instrumentenfehlerdetektion (→ Detektion von Sensorfehlern),
- Komponentenfehlerdetektion (→ Detektion von fehlerbehafteten Teilen innerhalb einer verknüpften Struktur) und zur
- Aktorfehlerdetektion (→ Detektion von Fehlern in Aktoren als Teil eines geregelten Systems) angewendet werden.

Der Parity-Space Ansatz nutzt die Beobachtbarkeit in der Weise, als das bei Ausfall von Sensoren sofort Änderungen der Schätzungen auftreten. Die Nutzungen struktureller Systeminfor-

mationen und die logische Verknüpfung der Sensorinformationen erlauben die Aufstellung des Parity-Space-Vectors, welcher elementweise die eindeutige Zuordnung von Sensorfehlern erlaubt.

Der Erfolg aller Methoden der analytischen Redundanz ist wesentlich an die Abbildungsqualität des realen (fehlerfreien / fehlerbehafteten) Systems und seines Modelles geknüpft. Modellbildungsfehler führen unweigerlich zum Anzeigen von Fehlern und damit zur Nichtunterscheidbarkeit von Modellbildungsfehler und gesuchtem Fehler. Die Entwicklung robuster Residuengeneratoren, bei denen die Schätzung innerer (nichtmeßbarer) Zustände unabhängig von Unsicherheiten sowohl der Modellbildung als auch weiterer bekannter Fehler ist, ist das Ziel der aktuellen Entwicklung. In diesem Beitrag werden zwei Forschungsansätze einführend vorgestellt, welche dieses zum Ziel haben.

**Unknown Input Observer (UIO):** Die Idee der Entkopplung von Unsicherheiten (verursacht durch Modellbildungsfehler) und Einflüssen, welche durch die zu detektierenden Änderungen eintreten, ist Auslegungsziel des Unknown Input Observers (UIO) oder auch generell der robusten Residuengenerierung. Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf den Arbeiten von Frank /9,10/.

Den Betrachtungen liege das dynamische System

$$\dot{z} = Fz + Ju + Gy \quad r = L_1z + L_2y \quad (3)$$

mit  $z$  als dem  $t$ -dimensionalen Unterraum von  $x$  und dem  $v$ -dimensionalen Unterraum  $r$  der Ausgänge, genannt Residuen, zugrunde. Das vorstehende Gleichungssystem wird Unknown Input Observer des Systems (1,2) genannt.

Die zugehörige Gleichung für den Schätzfehler ist

$$\dot{e} = \dot{z} - T\dot{x} \quad (4)$$

$$\dot{e} = Fz + ju + GCx + GE_m d_m + GK_m f_m - TAx - TBu - TE_d d_d - TK_d f_d \quad (5)$$

mit den Beziehungen der Ausgangsgleichungen.

$$t = L_1z + L_2Cx + L_2E_m d_m + L_2K_m f_m \quad (6)$$

Um die erwähnten Robustheitseigenschaften exakt zu erfüllen, müssen einige Gleichungen gelöst werden:

$$TA - FT = GC \quad J = TB \quad TE_d = 0 \quad (7)$$

$$GE_m = 0 \quad L_2E_m = 0 \quad L_1T + L_2C = 0 \quad (8)$$

Die Fehlerdynamik der Residuen bestimmt sich zu

$$\dot{e} = Fe + GK_m f_m - TK_d f_d \quad r = L_1 e + L_2 K_m f_m \quad (9)$$

Die notwendigen Bedingungen sind

$$\text{Rang}[TK_d] = \text{Rang}[K_d] \quad \text{und} \quad \text{Rang} \begin{bmatrix} G \\ ( \quad ) \\ L_2 \end{bmatrix} K_m = \text{Rang}[K_m], \quad (10)$$

wie in /9/ angegeben.

In einigen praktischen Anwendungen können diese Bedingungen erfüllt werden. Um die Bedingungen (Gl. 7-10) aufzulösen, sind Methoden entwickelt worden, welche auf der kroneckerkanonischen Darstellung beruhen /22/, bzw. die Eigenstrukturvorgabetechnik benutzen /14/. Neue Ergebnisse finden sich in /11,12/. Der wesentliche Problem der Anwendung des UIO bei elastischen mechanischen Strukturen ist die sich ergebende Forderung hinsichtlich der Zahl der notwendigen Messungen. Um  $p$  Fehler und  $q$  unbekannte Eingänge zu trennen, sind  $p+q$  Messungen notwendig /10/. Bedingt durch die große Zahl modellierter elastischer Freiheitsgrade, was zur detailgerechten Auftrennung hinsichtlich der Elementknoten wesentlich ist, kann diese Forderung theoretisch erfüllt werden. Praktisch beinhaltet dieses jedoch eine hohe Zahl notwendiger Messungen.

**Proportional-Integral Beobachter:** Der zweite zu betrachtende Ansatz ist der des PI-Beobachters (PI-Oberserver (PIO)). Dieser Ansatz realisiert die Entkopplung von Modellbildungsfehlern und eigentlichen Fehlern nur approximativ. Die Entkopplung wird hier nicht durch den Entwurf selbst (wie im UIO) realisiert, sondern durch den Betrieb des Beobachters mit großen Verstärkungen. Die prinzipielle Idee wurde bereits in /20/ vorgestellt und als FDI-Schema allgemein angewendet /21/.

Das zu betrachtende System mit unbekanntem Eingängen (Fehler / Schäden, Modellbildungsfehler, zusätzliche äußere Störungen) werde durch

$$\dot{x} = A_o x + Bu + \Delta A(x, u, t)x = A_o x + Bu + \tilde{N} \tilde{f}, \quad (11)$$

beschrieben, wobei  $A_o$  das ungeschädigte Nominalsystem und  $\Delta A(x, u, t)$  den Einfluss von Systemänderungen durch Fehler / Schäden und zusätzliche Eingänge zu den äußeren Störungen etc. erfasse. Hierbei fasst  $\tilde{N}$  Gleichung (11) alle äußeren Einflüsse, welche auf das Nominalsystem wirken, zusammen und ist von vollem Rang.

Die Grundidee des Proportional-Integral Beobachters (PIO) besteht darin, den bekannten Luenerberger Beobachter um einige zusätzliche Freiheitsgrade zu erweitern.

Diese Freiheitsgrade werden zum Schätzen der unbekannt-ten Eingänge benutzt und durch das Integral des Schätzfehlers 'angetrieben'. Die grundsätzliche Idee besteht in der Teilung der äußeren additiven Eingänge

$$\Delta A(x, u, t)x = \tilde{N}\tilde{f} = Nf + N_c f_c, \quad (12)$$

wobei die interessierenden unbekannt-ten Eingänge  $f$  in denen durch  $N$  ausgewählten Eingängen ähnlich zu den Matrizen  $E_d, K_d$  des UIO durch den PIO geschätzt werden sollen.

Das Produkt  $N_c f_c$  beschreibt die unbekannt-ten Einflüsse

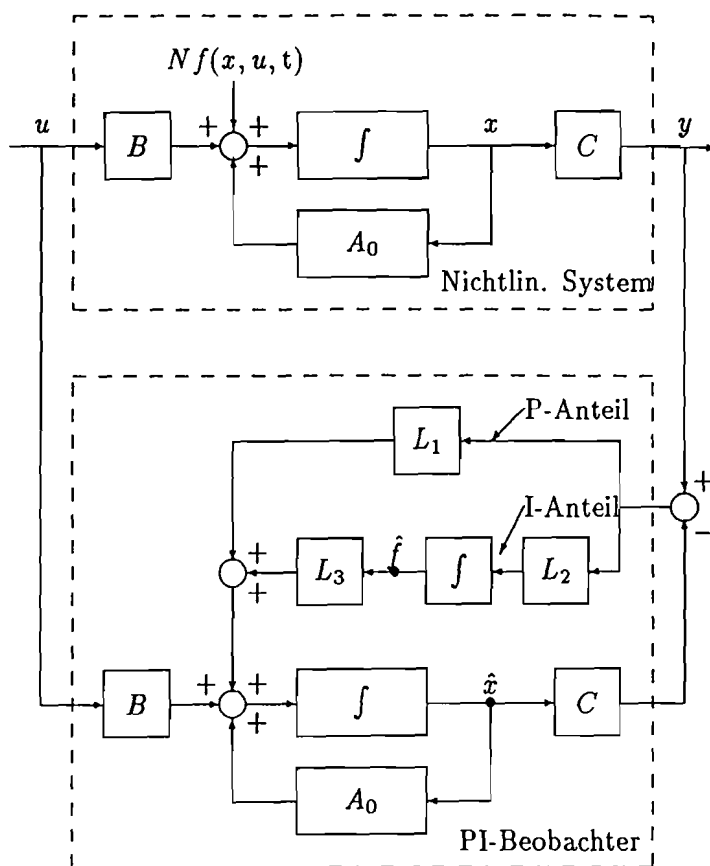


Abb. 3: Grundstruktur des PI-Beobachters /3/

in den verbleibenden Eingängen. Die resultierende Forderung

$$\text{rang } N = r_2 \leq \text{rang } C = r_1, \quad (13)$$

begrenzt die Zahl der schätzbaren unbekannt-ten Effekte. Durch die Anwendung von großen Verstärkungen kann die Wirkung dieser künstlich wirkenden Trennung  $N, N_c$  verstanden werden.

Mit  $\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \rho_1 \begin{bmatrix} \tilde{L}_1 \\ \tilde{L}_2 \end{bmatrix}$  kann eine erweiterte Fehlergleichung

$$\frac{1}{\rho_1} \begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{\hat{f}} \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho_1} \begin{bmatrix} A & N \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \hat{f} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{L}_1 \\ \tilde{L}_2 \end{bmatrix} C e - \frac{1}{\rho_1} \begin{bmatrix} N \\ 0 \end{bmatrix} f - \frac{1}{\rho_1} \begin{bmatrix} N_c \\ 0 \end{bmatrix} f_c \quad (14)$$

angegeben werden. Mit Gleichung (14) folgt

$$C e = 0 \quad (15)$$



für  $\rho_1 \rightarrow \infty$ . Differenzieren von Gl. (15) und Anwenden von Gl. (14) liefert

$$C\dot{e} = C(A - L_1C)e + CN(\hat{f} - f) + CN_c(\hat{f} - f_c) \quad (16)$$

Mit

$$CN = 0 \quad (17)$$

und Gl. (14) kann leicht eingesehen werden, daß

$$CAe = 0 \quad (18)$$

folgt. Auf dem gleichen Weg wird unter der Voraussetzung der Beobachtbarkeit des gesamten System

$$CA^i e = 0 \quad i = 0, 1, \dots, k-1 \quad . \quad (19)$$

erhalten. Mit (14), (16) und (17) folgt das

$$e = 0 \quad (20)$$

gilt. Wird (19) in (14) eingesetzt ergibt sich mit  $\rho_1 \rightarrow \infty$

$$0 = N\hat{f} - Nf - N_c f_c \quad . \quad (21)$$

Mit  $L_3 = \rho_2 N$ ,  $\frac{\rho_2}{\rho_1} \rightarrow \infty$  folgt

$$\hat{f} - f = 0 \quad , \quad (22)$$

was beinhaltet, das die Schätzungen  $\hat{x}$  und  $\hat{f}$  des PIO (12) gegen den Systemzustand konvergieren und das die über  $N$  gewählten unbekanntenen Eingänge als  $f$  geschätzt werden.

Das Schätzergebnis wird erhalten, obwohl gleichzeitig weitere Störungen über  $N_c$  einwirken können. Auf das Nominalsystem können demnach in allen Eingängen Störungen wirken, wobei nur die über  $N$  definierten schätzbar sind. Durch die Rangbedingung (13) wird die Zahl der durch  $N$  definierten Eingänge begrenzt.

Die approximative Entkopplung wird (beweistechnisch) durch die gegen Unendlich getriebenen Verstärkungen  $\rho_1$  und  $\rho_2$  erhalten. Der vollständige Beweis ist in /21/ angegeben. Die Realisierung unendlicher Verstärkungen ist nicht möglich, die Anwendung sehr großer Verstärkungen mit anderen Einschränkungen verbunden. Praktische und experimentelle Anwendungen zeigen jedoch, daß die Anwendung mit großen Verstärkungen bereits zu sehr guten Ergebnissen führt.

Die kurze Einführung zeigt, daß die Anwendungsfelder des PIO ähnlich zu denen des UIO sind. Beide Beobachter lassen sich zur Fehlerdetektion und -isolation verwenden und erzielen

die Entkopplung der Auswirkung von nicht berücksichtigten Modellbildungsfehlern durch eine Entkopplung. Diese Entkopplung ist beim UIO bereits in den Entwurfsgleichungen integriert und wird daher exakt erreicht, beim PIO wird diese hingegen nur approximativ durch den Betrieb mit großen (theoretisch: unendlichen) Verstärkungen erzielt.

Die Bedingungen für die PIO sind einfacher zu realisieren als die des UIO. Insbesondere bei der Anwendung bei elastischen mechanischen Strukturen können die Entwurfsbedingungen des UIO nur dann realisiert werden, wenn praktisch alle modellierten elastischen Freiheitsgrade auch gemessen werden. Dies ist beim Turbinenläufer beispielsweise konstruktiv praktisch ausgeschlossen. Die Anwendungsbedingungen des PIO lassen sich hingegen leicht erfüllen. Die wesentliche Restriktion besteht darin, daß lediglich Verschiebungen (statt Geschwindigkeiten) benutzt werden können (Gleichung 17). Die Zahl der unabhängigen Messungen beschränkt die Zahl der bestimmbaren unbekanntem äußeren (Fehler-) einflüsse.

Beide Verfahren haben Probleme bei der Anwendung mit Systemen mit multiplikativen Fehlern. Wie nachfolgend gezeigt wird, läßt sich mit Hilfe einer geeigneten Vorgehensweise die Problematik bei Wahl einer geeigneten Schadendiagnose nutzen /21/.

Beispielhaft sei der aus Schätzungen

ermittelte Steifigkeitsverlauf eines angerissenen Turbinenläufers als Zeitfunktion aufgetragen. Dieser (multiplikative Fehler) kann durch das gleichzeitige Schätzen von fiktiver Rißkraft und Verschiebung am Rißort zum Diagnoseindikator 'Relativer Steifigkeitsverlust' am Rißort bestimmt werden.

Deutlich wird das rotationsbedingte 'Atmen' des Risses.

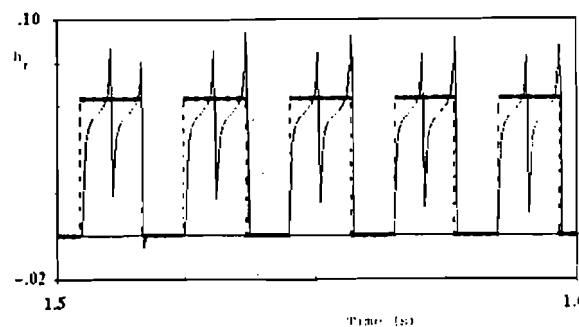


Abb. 4: Relative Rißnachgiebigkeit als schadenspezifischer, kausaler Anzeigeparameter /29/

**Parameterschätzung:** Ansätze zur Parameteridentifikation benutzen ebenfalls die Ein-/ Ausgangsbeziehung eines Systems modelliert in Form von Differenzen- oder Differentialgleichungen, dargestellt als Satz  $\Theta$  der Parameter  $a_i$ ,  $b_i$  für eine gegebenen Ein-/ Ausgangsbeziehung

$$y(k) + \dots + a_n y(k - n) = b_0 u(k) + b_1 u(k - 1) + \dots + b_m u(k - m). \quad (23)$$

zwischen den Ausgängen  $y$  und den Eingängen  $u$ , wobei  $k$  den aktuellen Zeitschritt darstellt.

Die Parameter  $a_i, b_i$  stellen dabei nicht die physikalischen Parameter  $p_i$  des Systems dar, sondern sind z.B. über die Beziehung

$$\Theta = f(p_i) \quad (24)$$

eindeutig mit ihnen verknüpft. Über die inverse Transformation  $f^{-1}$  sind die physikalischen Parameter erhältlich.

Veränderungen in der Physik des System, führen zu Veränderungen in den physikalischen Parametern der beschreibenden Modellgleichungen  $\Delta p_i$ , wobei diese Änderungen dann auch zu Änderungen in den Prozessparametern  $a_i, b_i$  führen. Die Idee der FDI auf Basis von Parameterschätz- und Identifikationsverfahren besteht in der Beobachtung und Auswertung dieser Parameter (als Prozess- oder physikalische Parameter) im Vergleich mit Grenzwerten, praxisorientierten heuristischen Auswertestrategien oder unter Nutzung stochastischer Entscheidungstheorie. Um den eigentlichen Schätzprozess zu realisieren, steht eine Vielzahl von Schätzverfahren zu Verfügung, wie das 'Least-Square'-Verfahren (LS) oder das 'rekursive Least-Square'-Verfahren (RLS). Von besonderer Bedeutung in Hinblick auf die Anwendung bei elastischen mechanischen Strukturen sind wiederum die zur Anwendung notwendigen Voraussetzungen. Hinsichtlich der Messungen  $\varphi$  gilt

$$\det E\{\varphi(t)\varphi(t)^T\} \neq 0. \quad (25)$$

Dies bedeutet, daß es eine große Informationsdichte durch die Messungen geben muss. Die Bedingung kann leicht erfüllt werden, wenn entsprechend der Modellierungstiefe ausreichend Messungen zur Verfügung stehen. Gerade hinsichtlich der Fehlerlokalisierung ist bei elastischen Strukturen jedoch ein höherer Modellierungsaufwand notwendig, was sich entsprechend in der Zahl der elastischen Freiheitsgrade niederschlägt. Entsprechend sind die Annahmen hinsichtlich der Informationsdichte (Gleichung 25) nur durch eine hohe Zahl von Messungen (= Zahl der elastischen Freiheitsgrade oder der Hälfte) zu erfüllen.

Gleichzeitig sind die Robustheitseigenschaften wie beim Beobachter ebenfalls von großer Bedeutung. Die Struktur der Ein-/Ausgangsbeziehungen (hinsichtlich Ordnung, Linearität, Qualität von Nichtlinearitäten) muss bekannt sein. Die implizite Voraussetzung hinsichtlich der Konstanz der Struktur des Systems erscheint gerade im Hinblick auf Fehlerdetektion problematisch, weil sich Struktur und Charakter durch Schäden ändern können. Ein Ansatz die genannte Problematik zu verbessern, besteht darin, einen modalen Ansatz zu wählen /8/. Dieser Weg beinhaltet

allerdings einen linearen Ansatz (modale Systemeigenschaften, Eigenfrequenzen, Eigenvektoren) und schafft zur Anwendung als FDI-Schema kausale Zuordnungsprobleme, ähnlich denen der Signalanalyse.

**Kombinierte Ansätze:** Aufsetzend auf einem (nichtlinearen / linearen) erweiterten Kalman Filter /13,19/ für das dynamische Modell des ungeschädigten Systems, wird zusätzlich ein Fehlermodell benutzt, welches durch ein geeignetes Schätzverfahren parametrisiert wird. Ist das Nominalsystem nicht exakt bekannt, treten die für Beobachter typischen Probleme auf: Fehler und Modellbildungsfehler können nicht entkoppelt werden. Die Idee ein Fehlermodell in die Systembeschreibung zu integrieren, beinhaltet, daß hinsichtlich Qualität, Struktur und Ordnung Annahmen über den (ungekannten) Fehler getroffen werden müssen.

Kombinierte Ansätze verknüpfen den Vorteil der Beobachertechnik (Verwendung von Systemwissen, wenige Messungen) auszukommen und den der Parameteridentifikation (keine Annahmen zu den Parametern des Fehlermodells) miteinander. Trotz der Kombination beider Nachteile ist dieser Ansatz bereits vielfach erfolgreich gerade bei elastischen Strukturen zum Einsatz gekommen /18,19/.

Die Idee ein Erweitertes Kalman Filter mit einer unstrukturierten Erweiterung zu versehen (was strukturell der integralen Rückführung der PI-Beobachteransatzes gleichkommt) wurde erstmals in /17/ vorgestellt und als 'Modifiziertes Erweitertes Kalman Filter' (MEKF) eingeführt.

Für den Fall, daß das Nominalsystem (welches die Basis zur Auslegung des Kalman Filters darstellt) ebenfalls nicht bekannt ist, kann eine Kombination der Kalman Filtertechnik mit der Verfahren der Parameteridentifikation benutzt werden /18,19/. Auf diesem Weg entsteht ein adaptiver Fehlerdetektionsansatz, welcher die Probleme im Umgang mit Modellbildungsfehlern in einer spezifischen Weise umgeht. Andererseits können auch die gesuchten Fehler als Modellbildungsfehler missinterpretiert werden.

**Bewertung:** Bekannte FDI-Verfahren und Ansätze haben signifikante Vorteile hinsichtlich des Einsatzes bei spezifischen Problemen /15/. In diesem Beitrag liegt der Anwendungsfocus auf elastischen mechanischen Strukturen. Die zentrale Einschränkung besteht darin, daß nur wenige

Messungen neben dem Systemwissen zur Verfügung stehen.

Kriterium Methode	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
UIO	+	-	+	+	--	0	+
PIO	+	0	+	+	+	0	+
Parky	+	+	+	+	+	0	+
EKF	+	++	++	+	+	--	+
PIA	+	0	-	0	--	0	++
Kombinierte PIA + EKF	-	+	0	0	+	0	0
Signal- analytisch orientierte Verfahren	++	-	-	--	++	++	++

Vergleich verschiedener FDI-Methoden zur Anwendung bei elastischen Strukturen

Abb. 5: Vergleich verschiedener Ansätze der Fehlerdetektion / Schadendiagnose

(Notation: ++ : sehr gut, + : gut, 0 : durchschnittlich, - : sehr schlecht, - : schlecht)

Zur Beurteilung moderner FDI-Methoden hinsichtlich der Anwendung im genannten Anwendungsfeld schwingungsfähiger Strukturen (Beispiele: Turbinenläufern, adaptiver Flügel von Großflugzeugen; Weltraumgittermaststrukturen) sollen die folgenden Kriterien vereinbart werden:

1. Brauchbarkeit für den Echtzeiteinsatz, 2. Eindeutigkeit der Beziehung: Systemveränderung - Angezeigter Parameter, 3. Bezug des beobachteten/überwachten Parameters zum interessierenden physikalischen Problem, 4. Aufwand, um vom Anzeigeparameter zum ursächlichen physikalischen Effekt zu schließen, 5. Aufwand zur Realisierung der notwendigen Messungen, 6. Genauigkeitsanforderung der vorausgesetzten Systeminformationen und 7. Praktikabilität hinsichtlich der Vor-Ort Realisierung

• Hinsichtlich Kriterium 1 (Echtzeitfähigkeit) sind signalanalytische Methoden sehr positiv zu bewerten, da FFT/DFT-Transformationen bereits als Hardwarelösungen realisiert verfügbar

sind. Andere Ansätze sind realisierbar, kombinierte Ansätze sowie Ansätze mit einer eigenen Dynamik (Beobachter, Erweitertes Kalman Filter) benötigen wesentlich mehr Zeit.

- Hinsichtlich Kriterium 2 (Eindeutigkeit) läßt sich das Erweiterte Kalman Filter am besten bewerten, weil das Fehlermodell im Ansatz bereits integriert ist. Hieraus resultieren aber gleichzeitig Nachteile (Kriterium 6).
- Mit Kriterium 3 wird die Eindeutigkeit der Ausgänge bewertet. Immer wenn ein Fehlermodell als Basis des FDI-Ansatzes verwendet wird (wie z.B. beim EKF) führt dies zu guten Ergebnissen (Kosten: Kriterium 6).
- Hinsichtlich Kriterium 4 (Schlußfolgerungsaufwand) läßt sich das EKF erneut mit (++) bewerten, weil ein Fehlermodell verfügbar ist, welches eine eindeutige Aussage zuläßt; Verfahren der Signalanalyse erhalten eine (-) Notation, weil die Auswertung Wissen beim Auswertenden voraussetzt.
- Hinsichtlich Kriterium 5 (Meßaufwand) werden (++) Notationen gegeben, wenn die für das Verfahren notwendigen Bedingungen leicht realisiert werden können (Signalanalyse) oder (-) Notation, wenn dieses sehr schwierig ist.
- Kriterium 6 bewertet den Anforderungsaufwand hinsichtlich der Genauigkeit des vorausgesetzten Systemmodelles (System und Fehler) für die erfolgreiche Anwendung. Das EKF erhält (-) Notierung, weil das typischerweise in Struktur und Parameter unbekanntes Fehlermodell vorausgesetzt wird (und nur wenige Schätzfreiheitsgrade verbleiben), Ansätze der Signalanalyse erhalten eine (++) Notierung, weil kein Modell vorausgesetzt wird (Kosten: Kriterium 4).
- Kriterium 7 (Praktikabilität des Ansatzes / der Methode an sich) bewertet den Aufwand für den Anwendungsingenieur vor Ort, die Methode zu realisieren und praktisch einzusetzen. Wenn kein zusätzlicher Aufwand notwendig ist, ist eine (++) Bewertung sinnvoll, wenn Strategie, Vorgehensweise und Realisierung komplex sind, oder vorab aufwendige Startparameter bestimmt werden müssen wird eine (0) Notation gegeben.

Deutlich wird, dass alle Ansätze Vor- und Nachteile besitzen. Besonders deutlich wird dieses beim Vergleich zwischen EKF und Verfahren der Signalanalyse. Der Ausgang des EKF ist einfach, eindeutig, aber stark modellabhängig. Der Ausgang signalanalytischer Methoden ist mehrdeutig und bedarf zur Diagnose der Interpretation. Die Anwendung dieser Verfahren ist allerdings sehr einfach.

### 3 Ausblick auf fortschrittliche Schadendiagnose bei elastischen mechanischen Strukturen und Zusammenfassung

Der Vergleich der Anwendung verschiedenen Ansätze zur Schadendiagnose bei elastischen Strukturen in Abb. 5 zeigt:

- Einfach anzuwendende Ansätze (Kriterium 1,5,6,7) ( $\rightarrow$  Signalanalyse) besitzen Nachteile hinsichtlich der Zuweisung von Ursachen (Kriterium 2,3,4). Um die Nachteile derartiger Ansätze zu überwinden, lassen sich diese Verfahren mit wissensbasierten Techniken wie Expertensystemen (auch Mustererkennung) kombinieren.
- Ansätze mit einem 'einfach zu verstehendem Ausgang' ( $\rightarrow$  EKF, Parity space Ansatz) (Kriterium 2,3,4) besitzen Nachteile hinsichtlich der Voraussetzungen um die notwendige System- und Fehlermodellinformation. Um derartige Nachteile zu überwinden, muss die Bedingung des vorausgesetzten Fehlermodelles umgangen werden. Ein erster Ansatz in diese Richtung findet sich in der Arbeit von Seibold et al. /17/.

Die in diesem Fall für das Fehlermodell vorhandene Erweiterung des EKF ist unstrukturiert. In der Anwendung auf mechanische Systeme beinhaltet dies die Schätzung von Kräften und Momenten. Das modifizierte EKF und der PIO sind strukturell gleich, lediglich die Techniken zum konkreten Entwurf der Verstärkungsmatrizen sind unterschiedlich.

- Aus theoretischer Sicht ist der UIO der Idealkandidat für FDI-Anwendungen. Das prinzipielle Problem (quantitativer modellbasierter Ansätze) der Trennung zwischen Modellbildungsfehlern und zu detektierenden Fehlern / Schäden des physikalischen Systems wird mit einem mathematisch exakten Ansatz in der Struktur des Beobachters gelöst. Dem gegenüber stehen jedoch hieraus resultierende notwendige Bedingungen hinsichtlich der Zahl der vorausgesetzten Messungen, welche sich beispielsweise im Fall der Detektion von Wellenquerrissen nicht realisieren lassen, weil die hierfür notwendige Zahl von Messungen (Lagerschwingungen) zu klein ist.
- Die Anwendung von Techniken zur Parameterschätzung führt auf vergleichbare Probleme. Der Einsatz in der Strukturmechanik (z.B. in der Testphase neuer Strukturen) zeigt ihre prinzipielle Tauglichkeit im genannten Einsatzfeld. Die Frage ist jedoch, ob der aus dem Verfahren resultierende Messaufwand gerade zum lebenslangen Einsatz verhältnismäßig ist. Desweiteren verbleibt als Problem, daß die geschätzten Parameter  $(a_i, b_i)$  nicht direkt die physikalischen Parameter enthalten. Zur Detektion von strukturellen Änderungen reicht die Kenntnis des Parametersatzes aus, zur Interpretation der Änderungen sind jedoch physikalische Größen und damit schnelle

Rücktransformationen notwendig.

- Die Anwendung des PIO setzt ebenfalls die Kenntnis eines Systemmodells voraus, allerdings werden im Gegensatz zum EKF keinerlei Annahmen über das Fehlermodell getroffen. Der Meßaufwand ist gering, die angezeigten Größen sind direkte physikalische Parameter (Wege, Neigungen, mechan. Parameter) und können entsprechend einfach interpretiert werden. Zur Verbesserung der Interpretation, bzw. um direkt physikalische Schadenparameter als Ausgang zu erhalten, können die geschätzten Größen miteinander zu Schadendiagnoseindikatoren kombiniert werden. Auf diese Weise läßt sich unter Nutzung geschätzter, nicht meßbarer innerer Größen der Blick ins Innere eines Systems ermitteln und hypothesenartig eine sehr schadennahe Diagnose problem- und anwendungsbezogen realisieren. Eine derartige Teststrategie wurde zur Wellenquerrissdiagnose in Simulationen bereits erfolgreich realisiert. Aktuelle Arbeiten kombinieren die Teststrategie mit Verfahren zur Mustererkennung.
- Als vorläufiges Ergebnis kann festgestellt werden, daß modellgestützte FDI-Applikation durchaus geeignet sind, um bei elastischen mechanischen Systemen zum Einsatz zu kommen.

Alle Verfahren haben jedoch spezifische Vor- und Nachteile. Aktuelle Entwicklungen versuchen die auftretenden Schwierigkeiten zu überwinden. Der Entwicklungstrend geht daher zur Zeit in Richtung der Verknüpfung von Methoden.

## Literatur:

- /1/ Söffker, D.; Rakowsky, U.K.; Müller, P.C.; Peters, O.H.: Perspektiven regelungs- und zuverlässigkeitstheoretischer Methoden zur Überwachung dynamischer Systeme aus sicherheitstechnischer Sicht. at - Automatisierungstechnik, 46 (1998) 6, Seiten 295 - 301.
- /2/ Söffker, D.: Zur Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen innerhalb des SRCE-Konzeptes. at-Automatisierungstechnik, 1998, angenommen.
- /3/ Ramakumar, R.: Engineering Reliability: Fundamentals and Applications. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1993.
- /4/ Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991.
- /5/ Palmgren, A.: Grundlagen der Wälzlagertechnik. 3. Auflage, Frank'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1964.
- /6/ Miner, M.A.: Cumulative Damage in Fatigue. ASME Journal of Applied Mechanics, 12 (1945), Heft 3, 1945, pp. A-159 - A-164.



- /7/ Basseville, M.; Nikiforov, I.V.: Detection of Abrupt Changes. Prentice Hall, 1993.
- /8/ Basseville, M. et al.: In situ damage monitoring in vibration mechanics: diagnostics and predictive maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, No. 5, 1993, pp. 401 - 423.
- /9/ Frank, P.M.; Köppen, B.: Review of optimal solutions to the robustness problem in observer-based fault detection. Proc. Instn Mech Engrs, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 207, 1993, pp. 105-112.
- /10/ Frank, P.M.: Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik. at-automatisierungstechnik, 42, 1994, pp. 47-64.
- /11/ Hou, M.; Müller, P.C.: Disturbance decoupled observer - a unified viewpoint. IEEE Trans. Aut. Contr. AC-39, 1994, pp. 1388-1392.
- /12/ Hou, M.: Descriptor Systems: Observers and Fault Diagnosis., VDI - Fortschrittberichte, Reihe 8, Nr. 482, Düsseldorf, 1995, Germany.
- /13/ Ljung, L.: Asymptotic Behaviour of the Extended Kalman Filter as a Parameter Estimator for Linear Systems. IEEE Trans. Aut. Contr., AC-24, 1979, pp.36-50.
- /14/ Patton, R.J.; Kangethe, S.M.: Robust fault diagnosis using eigenstructure assignment of observers. in: Patton, Frank, Clark, 1989, pp. 99-154.
- /15/ Pouliezios, A.D.; Stavrakakis, G.S.: Real Time Fault Monitoring of Industrial Processes. Kluwer, Dordrecht, 1994.
- /16/ Seibold, S. et al.: A Combined State and Parameter Estimator Applied to Fault Detection. IUTAM Symp. Ident. Mech. Syst., University of Wuppertal, Springer Verlag, 1993, appears.
- /17/ Seibold, S.; Söffker, D.; Fritzen, C.P.: Modellgestützte Detektion von Wellenrissen. 4th Meeting Dynamical Problems - Modeling and reality. eds: Natke, H.G.; Tönshoff, H.K.; Meltzer, G., University of Hannover, 1993.
- /18/ Seibold, S.: Ein Beitrag zur modellgestützten Schadendiagnose bei rotierenden Maschinen, VDI - Verlag, Düsseldorf, 1995.
- /19/ Seibold, S.; Fritzen, C.P.: Identification Procedures as Tools for Fault Diagnosis of Rotating Machinery, Int. J. of Rotating Machinery, 1996.
- /20/ Söffker, D; Yu, T.; Müller, P.C.: State Estimation of Dynamical Systems with Nonlinearities by using Proportional-Integral Observer. Int. J. Syst. Science, 26, no. 9, 1995, pp. 1571-1582.

- /21/ Söffker, D.: A new model-based tool for fault detection and isolation in machine- and rotordynamics. Proc. 11th ASME Conf. Reliability, Stress Analysis and Failure Prevention, Boston, Sept. 1995.
- /22/ Wünnenberg, J.: Observer-based fault detection in dynamic systems.  
VDI Fortschritt Berichte, Reihe 8, Nr. 222, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- /23/ Isermann, R. (Hrsg.): Überwachung und Fehlerdiagnose. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- /24/ Frank, P.M.: Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy - a survey and some new results. Automatica 26, pp. 459-474, 1990.
- /25/ Weigel, M.: Ein neues System zur rechnergestützten diagnostischen Zustandsüberwachung von Kraftwerksturboätzen, Gasturbinen und Turboverdichtern. Carl Schenck AG, Darmstadt, 1991.
- /26/ Wauer, J.: On the Dynamics of Cracked Rotors: A Literature Survey.  
Appl. Mech. Rev., Vol. 43, 1990, pp. 13-17.
- /27/ Rothkegel, W.: Rißerkennung bei Rotoren durch Schwingungsüberwachung.  
VDI-Fortschrittberichte, Reihe 11, Nr. 180, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- /28/ Mühlenfeld, K.: Der Wellenriß im stationären Betrieb von Rotoren.  
Dissertation., TU Berlin, 1992.
- /29/ Söffker, D.; Bajkowski, J.; Müller, P.C. : Detection of Cracks in Turbo Rotors - a New Observer Based Method. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, 3, 1993, pp. 518-524.

---

# **VDI** BERICHTE 1466

---

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

VDI-GESELLSCHAFT  
ENTWICKLUNG KONSTRUKTION VERTRIEB

## **VDI-SCHWINGUNGSTAGUNG '99**

### **SCHWINGUNGSÜBERWACHUNG UND -DIAGNOSE VON MASCHINEN UND ANLAGEN**

Tagung Frankenthal, 27. und 28. Mai 1999

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Schwingungsüberwachung und -diagnose von Maschinen und**

**Anlagen** : Tagung Frankenthal, 27. und 28. Mai 1999 / VDI-

Schwingungstagung '99. VDI-Gesellschaft Entwicklung,

Konstruktion, Vertrieb. – Düsseldorf: VDI Verl., 1999

(VDI-Berichte ; 1466)

ISBN 3-18-091466-1

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 1999

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck. Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder.

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 3-18-091466-1

Die digitalen  
Verwertungsrechte  
(z.B. der  
Webpublikation)  
liegen beim Autor.