

# Perspektiven regelungstheoretischer Methoden zur Überwachung dynamischer Systeme aus sicherheitstechnischer Sicht

*Dirk Söffker, Uwe Kay Rakowsky, Peter C. Müller, Olaf H. Peters, Wuppertal*

## **Kurzfassung**

Im Beitrag wird das SRCE-Konzept vorgestellt, welches die Regelung der Zuverlässigkeit eines dynamischen Systems zum Ziel hat. Zur Realisierung sind Schnittstellen zwischen dem System, der Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen und Schadendiagnoseverfahren notwendig. Schwerpunkt des Beitrages ist, neben der Darstellung des Konzeptes, die Definition derartiger Schnittstellen. Das Konzept wird am akademischen Beispiel der Leistungssollwertregelung einer Turbine exemplarisch illustriert.

## **1 Einführung**

Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen sind in zunehmendem Maß Kriterien zur Beurteilung und Überwachung dynamischer technischer Systeme. Diese Entwicklung ist durch steigende Qualitätsmaßstäbe, strengere juristische Auflagen und ökonomische Forderungen bedingt. Der Überwachung automatisierungstechnischer Anlagen durch menschliche oder künstliche Experten liegen meist bewährte klassische Verfahren der Signalanalyse, Kenngrößenbestimmung, Mustererkennung etc. zugrunde. Werden Veränderungen im Systemverhalten bestimmt, erfolgt entweder eine Aussetzung des Betriebes oder zumindest eine Unterbrechung oder Leistungsreduktion bis zur eindeutigen Bestimmung des Grundes des Fehlverhaltens bzw. der Einschätzung seiner Folgen aus Sicht der vorgenannten Kriterien.

Die Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Komponenten und Modulen bezogen auf das System ist Gegenstand der Technischen Zuverlässigkeit. Zuverlässigkeitsanalysen sind jedoch bis heute auf den Auslegungszustand eines Systems bezogen. Dies bedeutet, daß die bisherigen Methoden und Werkzeuge der Technischen Zuverlässigkeit nicht dazu verwendet werden können, Aussagen bezüglich der Zuverlässigkeit und Sicherheit eines realen, durch Reparaturen modifizierten und aktuell durch Schädigungen veränderten Systems zu treffen.

Derartige Entscheidungen unterliegen daher weitgehend der Erfahrung des Betriebspersonals und sind damit stark menschlich subjektiven Einflüssen unterworfen. Es erscheint angebracht und realisierbar, die sich zwischenzeitlich methodisch weiterentwickelten, im wesentlichen modellgestützten Methoden der Fehlerdetektion, Schadendiagnose und die der Technischen Zu-

verlässigkeit zum **Safety and Reliability Control Engineering (SRCE)** Konzept zu verbinden. Das Ziel eines derartigen Konzeptes ist die Etablierung eines Regelkreis zur Regelung geeigneter zuverlässigkeits- oder sicherheitstechnischer Kenngrößen. Die Störgrößen eines derartigen Regelkreises sind Alterungseinflüsse, auftretende Schädigungen, aber u.U. auch die vorgegebenen Sollwerte der technischen Regelung. Die Kompensation der Auswirkungen der Schädigungen kann prinzipiell nur durch Einflußnahme auf die Betriebsparameter erfolgen, durch Rekonfiguration des Systems, seiner Elemente /14/ oder durch den steuerbaren Einfluß von Instandhaltungs- und Wartungsmaßnahmen.

## 2 Überwachung dynamischer Systeme

Die Überwachung dynamischer Systeme kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Eine Klassifizierung klassischer und moderner Methoden der Fehlerdetektion findet sich beispielsweise in /1/. Eine kurze Bewertung dieser Methoden hinsichtlich ihrer Eignung im betrachteten Einsatzfeld bei dynamischen (schwingenden) Strukturen ist in /2/ angegeben. Ein Ergebnis dieser prinzipiellen Betrachtungen ist es, daß klassische Methoden Vorteile hinsichtlich einer einfachen und leicht zu realisierbaren Anwendung besitzen, jedoch dieses mit Nachteilen bezüglich der Eindeutigkeit ihrer diagnostischen Aussagefähigkeit kompensieren. Moderne Methoden (Unknown Input Observer, Erweitertes Kalman Filter etc.) sowie hierauf aufbauende Verfahren /3,4,5,6/ nutzen Systemwissen zur Unterscheidung spezifischer Fehler, realisieren dieses jedoch u.U. durch die Empfindlichkeit bezüglich der Genauigkeit des vorausgesetzten Wissens über System und Fehler.

Prinzipiell läßt sich festhalten:

- Methoden der Signalanalyse und Kenngrößenermittlung und -bestimmung sind einfach zu realisieren, differenzieren aber an sich nicht nach Fehlerursache, -ort oder anderen Kriterien. Sie dienen oft zur Realisierung von Aussagen der Art „*Es hat sich etwas verändert.*“
- Modellgestützte Methoden sind aufwendig in der Realisierung, weil sie Systemwissen voraussetzen, erlauben aber gleichzeitig Aussagen der Art „*Es hat sich ein Fehler der Art  $x_i$  ereignet.*“ Bestenfalls sind auch Schlüsse auf den kausalen Grund einer Veränderung der Art „*Im System ist der Schaden  $x_j$  eingetreten*“ möglich. Modellgestützte Methoden sind prinzipiell abhängig vom Modellwissen und damit auch empfindlich gegenüber ungenauem Wissen der als *normal* vorausgesetzten ungeschädigten und fehlerfreien Ausgangssituation.
- Die leicht realisierbare Idealmethodik der Überwachung mit eindeutiger Aussagekraft bezüglich der Interpretation beobachtbarer Veränderungen mit eindeutiger Zuordnung

kausaler Ursachen existiert noch nicht. Diese Aussage stellt jedoch die zahlreichen erfolgreichen Einzelanwendungen signalanalytischer oder plausibilitätsorientierter Methoden bei allerdings i.d.R. einfachen Überwachungsaufgaben nicht in Frage. Aktuelle Arbeiten versuchen die Robustheit modellgestützter Methoden zu verbessern /8, 12/.

Komplexe Systeme (z.B. der Automatisierungstechnik) erfordern jedoch insbesondere hinsichtlich eines ökonomischen und gleichzeitig sicheren Betriebes intelligente Aussagen über den aktuellen Systemzustand. Diese Aussage geht davon aus, daß es Sinn macht, ein System trotz Veränderungen infolge Alterungen oder Schäden weiter zu betreiben. Dies kann sinnvoll oder notwendig sein, um

- einen ökonomischen Betrieb zu gewährleisten, weil nicht jeder Schaden bzw. jede Systemveränderung automatisch einen Verlust an Zuverlässigkeit bzw. Sicherheit des Systems mit sich bringt, aber zunächst als Veränderung des Systems detektiert wird / werden muß.
- einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, weil z.B. die sofortige oder oftmalige Außerbetriebnahme des Systems größere Gefährdungen mit sich bringt als der eingeschränkte Weiterbetrieb. Als konkretes Beispiel seien vermutete Wellenquerrisse in Turbinenläufern erwähnt.

Sowohl zur Automatisierung derartiger Entscheidungen als auch zur Unterstützung menschlicher Entscheidungen wird das nachfolgend vorgestellte Konzept einer Regelung von nichttechnischen, die Zuverlässigkeit bzw. Sicherheit des Systems beschreibenden Größen vorgestellt.

### **3 Das Safety and Reliability Control Engineering Konzept**

Das in /9,10/ bereits skizzierte *SRCE*-Konzept hat zum Ziel, die Zuverlässigkeits- bzw. Sicherheitskenngrößen eines realen, gealterten, modifizierten und durch Schäden gegenüber seinem Auslegungszustand modifizierten Systems zu regeln. Ein schematischer Aufbau der Konzeption ist in Abb. 1 angegeben.

Die Intention der *SRCE*-Regelung ist klar von klassischen Regelungen zu unterscheiden. Eine *SRCE*-Regelung schließt gegenüber den klassischen technischen Regelungen auf einer hierarchisch höheren Ebene einen Regelkreis und greift dabei u.U. in die klassische Regelung ein.



Unter 'Intelligente Verfahren' ist in diesem Zusammenhang die Nutzbarkeit der Ausgangsinformationen der entsprechenden Module im Zusammenhang mit dem *SRCE*-Konzept zu verstehen. Die zentralen Kriterien sind die Eindeutigkeit und physikalische Kausalität der Aussagen über die Veränderungen im System.

### **Verfahren der Online-Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen (ZKg)**

Die Verfahren der Online-Bestimmung von relevanten Größen erlauben das Aktualisieren der ZKg unter Zuhilfenahme des Wissens um den aktuellen Systemzustand unter Nutzung klassischer Verfahren der Berechnung der Größen (wie im nachstehend angegebenen Beispiel) oder neuerer Verfahren (wie z.B. in /9/).

### **Regelung der Zuverlässigkeit**

In den genannten Modulen sind Zusammenhänge zwischen Prozeßgrößen und Betriebsparametern problemspezifisch als Voraussetzung für die Online-Bestimmung der ZKg enthalten. Die inverse Nutzung dieser Zusammenhänge in verschiedener Weise unter Nutzung beeinflubarer Stellgrößen (Betriebsparameter) führt zur Regelung der Zuverlässigkeit. Prinzipiell können dieses aber auch andere Einflüsse sein, dessen Effekt auf die ZKg bekannt und entsprechend nutzbar ist.

Die wesentlichen Anforderungen an das Zusammenspiel der Kernelemente untereinander und mit dem System sind:

- Eignung der Verfahren (insbesondere die der Schadendiagnose) für den relevanten Einsatzfall eines durch Fehler und Schädigungen modifizierten Systems,
- Vorhandensein von Schnittstellen zur 'Kommunikation' der Module und
- Vorhandensein von analytischem oder heuristischem Wissen zum Einfluß von Fehlern / Schädigungen etc. auf das Ausfallverhalten von System und Komponenten.

Dies sind gleichzeitig auch die wesentlichen Schwachstellen des Konzeptes, weil vorhandene Einzelmodule nicht auf die Kompatibilität im *SRCE*-Gesamtkonzept hin entwickelt wurden. Die vom aktuellen Stand der Forschung aus betrachteten Schwächen des Konzeptes bezogen auf die Fähigkeiten der Module bestehen daher in

- der mangelnden Eignung vorhandener Fehlerdetektions- und Schadendiagnosealgorithmen für das vorgesehene Einsatzfeld, wie z.B. im Fall der Wellenrißdetektion in /11/ diskutiert,

- der Tatsache, daß kaum Wissen über den Einfluß spezifischer Schädigungen auf z.B. die zu erwartende Lebensdauer etc. des Systems vorliegen, welches sowohl für die Bestimmung der aktuellen ZKg notwendig ist,

- als auch unter Nutzung der Abhängigkeit von Betriebsparametern, zur Zuverlässigkeits-Regelung.

Zur realitätstreuen Abbildung der Zusammenhänge ist eine genaue Abbildung des Einflusses notwendig, aber für nur wenige Zusammenhänge direkt verfügbar. Für zahlreiche Einsatzfelder kann jedoch direkt über die physikalischen Wirkmechanismen das vorhandene (an Modellen gewonnene) Wissen über Zusammenhänge der Art Beanspruchung - Versagenswahrscheinlichkeit genutzt werden, wie im nachfolgenden Beispiel dargestellt wird. In diesen Fällen kann demnach direkt mit dem Ausgang des Moduls der 'Intelligenten Schadendiagnose' weitergearbeitet werden.

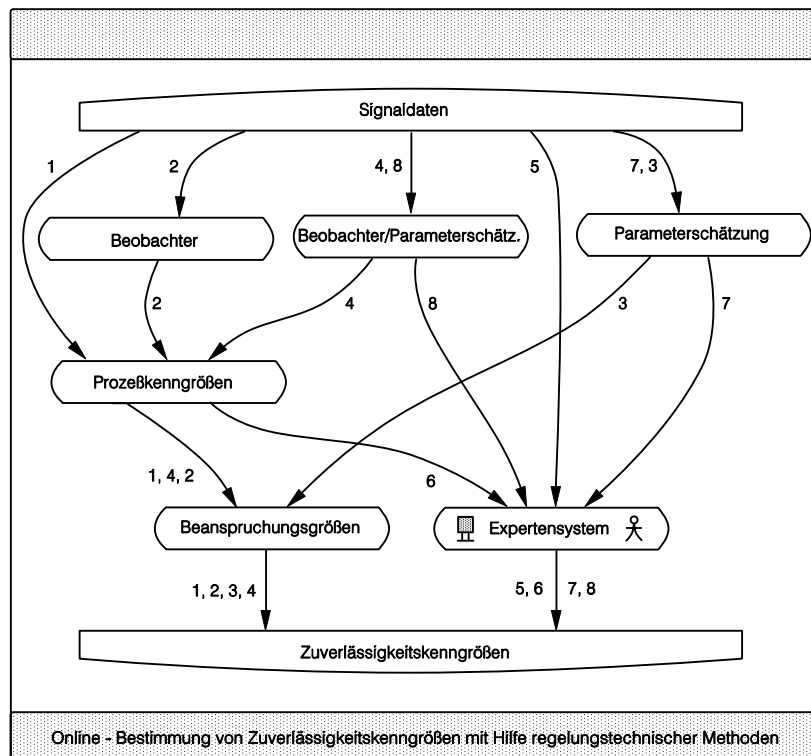


Abb. 3: Pfade von den Meßgrößen zu den Zuverlässigkeitskenngrößen

Sollte dieser Ansatz problemspezifisch nicht gangbar sein, verbleibt nur die erfahrungsorientierte Abschätzung der Verhältnisse, wobei sich für diese heuristische Vorgehensweise die Nutzung von Experten(-systemen) und modernen Modellierungskonzepten wie beispielsweise Fuzzy-Logik (vgl. /9/) anbietet.

In Abb. 3 sind von einem prinzipiellen Standpunkt aus, die wesentlichen Pfade zur Bestimmung von ZKg, aus den Meßdaten des Systems heraus, dargestellt.

Prinzipiell sind verschiedene Vorgehensweisen möglich, um aus den aktuell meßbaren Größen des

Systems auf die (nichttechnischen und nichtmeßbaren) Zuverlässigkeitkenngrößen zu schließen. Hierbei werden die nachstehend benannten und beschriebenen Zwischenebenen

- der Bestimmung von Prozeßkenngrößen,
- der Bestimmung von Beanspruchungsgrößen und
- der Bestimmung innerer Systemgrößen bzw. -parameter durch modellgestützte Verfahren

eingelegt. Diese Zwischenebenen fungieren als anschauliche Schnittstellen zwischen den technischen Signaldaten und den nichttechnischen Zuverlässigkeitskenngrößen. Die klassischen Pfade benutzen Beanspruchungsgrößen des Systems, um von diesen Zwischengrößen aus, die Zuverlässigkeitskenngrößen zu bestimmen. Um die Beanspruchungsgrößen zu ermitteln, sind verschiedene Pfade denkbar, sei es über die direkte Verwendung von Prozeßkenngrößen aus den Signaldaten (1), über die Bestimmung innerer Zustände unter Verwendung von Beobachtern über Prozeßkenngrößen (2) oder die Verwendung von Parameterschätzverfahren (4) bzw. kombinierten Verfahren (3). Moderne Expertensysteme schließen unter Nutzung von heuristischem Wissen und Faktenwissen auf Ursachen oder auf Konsequenzen. Dies schließt ihre prinzipielle Tauglichkeit bzgl. des Erstellens von Zusammenhängen zwischen Systemänderungen und den meßbaren Signaldaten und den sich ergebenden ZKg nicht aus (5,6,7,8). Deutlich wird, daß der „Blick ins Innere eines Systems“ zum Erfassen von physikalischen Änderungen im Hinblick auf die Realisierung des *SRCE* - Konzeptes eine große Bedeutung gewinnt, weil auch anschaulich gesehen, sich die Konsequenzen hinsichtlich der Zuverlässigkeit wesentlich leichter absehen lassen. Den 'Blick ins Innere, nicht direkt Meßbare' des Systems leisten jedoch klassische Methoden der Fehlerdetektion / Schadendiagnose nicht. Hier sind moderne modellgestützte Verfahren notwendig, welche unter Nutzung von zusätzlichem Systemwissen weit mehr leisten als Aussagen der Art „*Es hat sich etwas geändert.*“

Für das *SRCE*-Konzept ist entweder eine quantitative Aussage über ein spezielles *Wie* der Änderungen relevant oder aber das *Was* der Änderung möglichst in Form physikalischer Parameter. Insofern lassen sich die Pfade 1,2,3,4 als physikalisch orientierte Pfade, die Pfade 5,6,7,8 als phänomenologisch orientierte Pfade klassifizieren.

#### **4 Beispiel: SRCE-Überwachung einer Turbomaschine**

Am klassischen Beispiel der sicherheitstechnisch relevanten Überwachung der mechanischen Schwingungen eines Kraftwerksturbinenläufers, welches idealisiert als Mehrkörpersystem vereinfacht betrachtet werden kann, wird das *SRCE*-Konzept dargestellt.

Neben den klassischen Verfahren zur Überwachung einer Turbomaschine, den sogenannten Vibration Monitoring Systemen, welche im wesentlichen auf der Anwendung signalanalytischer Methoden und der Verwendung von Verfahren der Mustererkennung und Kenngrößenüberwachung basieren, können im Feld der Schadendiagnose modellgestützte Verfahren zum Einsatz kommen. Mit Hilfe derartiger Verfahren lassen sich hypothesenorientiert Schadensindikatoren als Verhältnisse von Meßgrößen, Systemdaten und geschätzten Größen bilden /12/. Ein derartiger Schadensindikator für einen Wellenquerriß ist der Steifigkeitsverlust eines Wellenabschnittes infolge eines Wellenquerrisses als Funktion der Zeit, wie in Abb. 4 angegeben. Die Darstellung zeigt das Phänomen des 'Rißatmens' eines sich infolge von Gewichtskräften öffnenden und schließenden Risses einer schnell drehenden Welle. Die Ermittlung dieses nichtmeßbaren Phänomens erfolgt mit Hilfe eines PI-Beobachters, wie er in /13/ für diesen Einsatzfall dargestellt ist und angewendet wurde.

Abb. 4: Mit dem PI-Beobachter ermittelter Steifigkeitsverlust einer rotierenden Welle mit Querriß (aus /13/)

Dieser in Realzeit bestimmbare Indikator beinhaltet auch eine Information über die Rißtiefe, und dazu komplementär eine Aussage über den verbleibenden tragfähigen Restquerschnitt. Hier liefert der Schadendiagnosealgorithmus also eine Aussage sowohl über die Art als auch den Grad der Schädigung. Diese Information ist bei diesem System direkt nutzbar, um über die Belastung der Welle (aus Systemdaten und Betriebsparametern) unter Wissen des verbleibenden Querschnittes (aus Aussagen des Schadendiagnosemodules, hier: des PI-Beobachters) die aktuelle Beanspruchung des Systems zu ermitteln. Unter Nutzung des über Wöhler/Palmgreen/Miner - Formeln vorhandenen bruchmechanischen Wissens über die Beziehungen

$$\text{Lastgeschichte} - \text{Beanspruchung} - \text{Versagenswahrscheinlichkeit} \quad (1)$$

läßt sich in diesem Fall leicht eine realzeitfähige Aussage zur aktuellen Versagenswahrscheinlichkeit treffen. Die Invertierung der durch die Beziehung (1) beschriebenen Verhältnisse läßt sich



zur Regelung eines derartigen Systems heranziehen. Unter Regelung ist in diesem Beispiel der direkte Eingriff auf die Betriebsparameter (z.B. die Sollleistung) in der Weise zu verstehen, daß trotz Schädigung durch einen Riß, die Zuverlässigkeit vorgegebene Grenzen nicht unterschreitet.

In Abb. 5 ist der vollständige Signalflußplan einer derartigen Regelung angegeben.

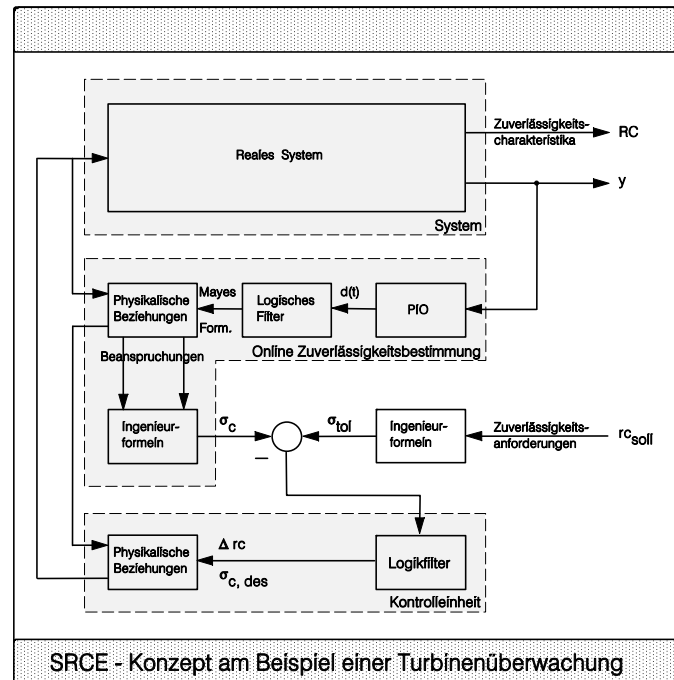


Abb. 5: Vollständiger Aufbau einer SRCE-Regelung am Beispiel der Rißüberwachung eines quergelassenen Turbinenläufers

Die Details dieses Beispiels sind in /10/ angegeben.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte SRCE-Konzept ist zunächst nur ein akademisches Konzept. Ziel des Konzeptes ist die weitergehende Formalisierung der Anlagenführung. Hauptaufgabe dieser der klassischen technischen Regelung überlagerten Konzeptes ist die Regelung der nichttechnischen Eigenschaften der Zuverlässigkeit und Sicherheit eines Systems. Dieses Konzept soll gerade auch für durch Alterung bzw. Schäden sich vom bekannten Auslegungszustand unterscheidenden Systemen Entscheidungen über den Weiterbetrieb erleichtern bzw. formalisieren. Die Kernmodule dieses Konzeptes sind intelligente Verfahren der Fehlerdetektion, der Schadendiagnose, der Online-Bestimmung von ZKg sowie der Regelung dieser Größen über Betriebsparameter, Systemrekonfiguration oder auch die gezielte Steuerung von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen.

Um dieses Konzept zu realisieren sind die Module entsprechend dem Konzept weiterzuentwickeln bzw. zu modifizieren. Der zentrale Aspekt ist jedoch die Gewinnung bzw. quantitative Modellierung des Einflusses anomaler Effekte, wie Schäden, auf die zuverlässigkeitstechnischen Eigenschaften von Komponenten und Systemen.

### **Literatur:**

- /1/ Isermann, R. (Hrsg.): Überwachung und Fehlerdiagnose, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- /2/ Söffker, D.: Robust Fault Detection of Large Vibrating Structures by Means of Control Theory - some Principal Remarks. Proc. 12th ASME Conf. on Reliability, Stress Analysis and Failure Prevention, Virginia Beach, USA, April 1997.
- /3/ Gertler, J.: Analytical Redundancy Methods in Fault Detection and Isolation - a Survey. IFAC-Symposium SafeProcess, Sept. 10-13, 1991, Baden - Baden, Germany, 1991.
- /4/ Frank, P.M.: Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik. at-Automatisierungstechnik, 42, 1994, pp. 47-64.
- /5/ Patton, R.J.; Frank, P.M.; Clark, R.N. (eds.): Fault Diagnosis in Dynamic Systems - Theory and Applications. Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- /6/ Pouliezos, A.D.; Stavrakakis, G.S.: Real Time Fault Monitoring of Industrial Processes. Kluwer, Dordrecht, 1994.
- /7/ Wünnenberg, J.: Observer-based Fault Detection in Dynamic Systems. VDI-Fortschritt Berichte, Reihe 8, Nr. 222, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- /8/ Frank, P.M.; Köppen, B.: Review of Optimal Solutions to the Robustness Problem in Observer-based Fault Detection. Proc. Istanb Mech Engrs, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 207, 1993, pp. 105-112.
- /9/ Rakowsky, U.K.; Söffker, D.: Real Time Reliability Evaluation of Vibrating Mechanical Structures. Proc. 12th ASME Conf. Reliability, Stress Analysis, and Failure Prevention, Virginia Beach, USA, April 1997.
- /10/ Söffker, D.; Rakowsky, U.K.: Perspectives of Monitoring and Control of Vibrating Structures by Combining New Methods of Fault Detection with New Approaches of Reliability Engineering. Proc. 12th ASME Conf. Reliability, Stress Analysis, and Failure Prevention, Virginia Beach, USA, April 1997.
- /11/ Söffker, D.; Müller, P.C.: Betriebsüberwachung und Schadendiagnose an rotierenden Maschinen - Bewährte Methoden versus Neue modellbasierte Ansätze. in: Irretier, H.; Nordmann, R.; Springer, H. (Hrsg.): Schwingungen in rotierenden Maschinen III. Verlag Vieweg, 1995, S. 85-93.
- /12/ 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.
- /13/ Söffker, D.; Bajkowsky, J.; Müller, P.C.: Detection of Cracks in Turborotors - a New Observer-based Method. Trans. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control., Vol. 115, pp. 518-524.
- /14/ Rakowsky, U.K.; Söffker, D.: On Self-Repairing and Self-Restructuring systems. SafeProcess 97, University of Hull, UK, 1997, submitted.