

# Perspektiven regelungs- und zuverlässigkeitstheoretischer Methoden zur Überwachung dynamischer Systeme aus sicherheitstechnischer Sicht

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

**Dr.-Ing. Dirk Söffker** arbeitet als Wissenschaftlicher Assistent im Fachgebiet Sicherheitstechnische Regelungs- und Meßtechnik der Bergischen Universität-Gesamthochschule Wuppertal (BUGHW). Seine Hauptarbeitsgebiete sind Anwendung regelungstheoretischer Methoden in der Mechanik, nicht-lineare Modellbildung mechanischer Systeme und Mensch-Maschine Interaktion.

Adresse: Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich 14 – Sicherheitstechnik, D-42097 Wuppertal, e-mail: soeffker@wrcs1.uni-wuppertal.de, <http://wssrm86.site.uni-wuppertal.de/pers/soeffker>

**Dr.-Ing. Uwe Kay Rakowsky** arbeitet als Oberingenieur im Fachgebiet Verkehrssicherheitstechnik der BUGHW. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeiten liegt in der Entwicklung methodischer Werkzeuge und Konzepte für Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen.

Adresse: siehe oben, e-mail: ry@verkehr.uni-wuppertal.de, <http://www-verkehr.uni-wuppertal.de/ry>

**Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Peter C. Müller** ist Leiter des Fachgebietes Sicherheitstechnische Regelungs- und Meßtechnik der BUGHW. Seine Hauptarbeitsfelder sind: Regelung mechanischer Systeme, nichtlineare Regelungen, Deskriptorsysteme, Fehlererkennung und -diagnose, Robotik/Mechatronik.

Adresse: siehe oben, e-mail: mueller@srm.site.uni-wuppertal.de, <http://wssrm86.site.uni-wuppertal.de/pers/mueller>

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Olaf H. Peters** ist Leiter des Fachgebietes Verkehrssicherheitstechnik an der BUGHW. Seine Arbeitsgebiete sind Simulationstechnik, VR und Technische Zuverlässigkeit.

Adresse: siehe oben, e-mail: peters@verkehr.uni-wuppertal.de, <http://www-verkehr.uni-wuppertal.de>

*Im Beitrag wird das Safety Reliability and Control Engineering Konzept (SRCE) vorgestellt, welches die Regelung der Zuverlässigkeit eines dynamischen Systems zum Ziel hat. Zur Realisierung sind Schnittstellen zwischen dem System, dem Modul zur Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen und den verwendeten Schadendiagnoseverfahren notwendig. Schwerpunkt des Beitrages ist, neben der allgemeinen Darstellung des Konzeptes, die Definition derartiger Schnittstellen. Das Konzept wird am akademischen Beispiel der Leistungs-sollwertregelung einer angerissenen Turbine exemplarisch illustriert.*

## Perspective Control Theory Methods for Monitoring Dynamical Systems under Safety and Reliability Engineering Aspects

*Subject of the paper is the Safety Reliability and Control Engineering concept (SRCE), which deals with the control of the reliability characteristics of dynamical systems.*

*For the realisation interfaces are necessary between the system itself, the modul for estimation of the reliability characteristics and of the failure detection and fault diagnosis unit. Beside the illustration of the general concept the core of the contribution is the definition of such interfaces / connections. The concept is illustrated by the academic example of a power tracking control of a cracked turbine.*

## 1 Einleitung

Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen sind in zunehmendem Maß Kriterien zur Bewertung und Überwachung dynamischer Systeme. Diese Entwicklung ist durch steigende Qualitätsmaßstäbe, strengere juristische Auflagen, ökonomische und ökologische Forderungen bedingt. Der Überwachung automatisierungstechnischer Anlagen durch menschliche oder künstliche Experten liegen meist bewährte klassische Verfahren der Signalanalyse, Kenngrößenbestimmung, Mustererkennung usw. zugrunde. Werden Veränderungen im Systemverhalten bestimmt, erfolgt entweder eine Betriebsunterbrechung oder eine Leistungsreduktion bis zur eindeutigen Bestimmung der Ursache des Fehlverhaltens und der Einschätzung seiner Folgen aus Sicht der vorgenannten Kriterien.

Die Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen wie z.B. Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausfallraten von Komponenten, Modulen oder Systeme ist Aufgabe der quantitativen Methoden der Technischen Zuverlässigkeit. Zuverlässigkeitsanalysen werden im allgemeinen während der frühen Entwicklungs- und Konstruktionsphase durchgeführt und beschränken sich auf den Auslegungszustand des Systems. Schäden, Reparaturen und Modifikationen, die nach der Inbetriebnahme erfolgen, werden im allgemeinen nicht modelliert und somit nicht in die Kenngrößenermittlung einbezogen. Aussagen über die Sicherheit und Zuverlässigkeit eines Systems unterliegen in diesen Fällen weitgehend den Erfahrungen des Betriebspersonals und sind stark den menschlichen, subjektiven Einflüssen unterworfen. Es erscheint sinnvoll und realisierbar, die im wesentlichen

modellgestützten Methoden der Fehlerdetektion, Schendendiagnose einerseits und die methodischen Werkzeuge der Technischen Zuverlässigkeit andererseits zum *Safety and Reliability Control Engineering* Konzept (*SRCE*) zu verbinden. Das Ziel des Konzeptes ist die Realisierung eines Regelkreises zur Regelung geeigneter Sicherheits- und Zuverlässigkeitskenngrößen. Die Störgrößen eines derartigen Regelkreises sind Alterungseinflüsse, auftretende Schädigungen und unter Umständen die vorgegebenen Sollwerte der technischen Regelung. Die Kompensation der Auswirkungen der Schädigungen kann durch Einflußnahme auf die Betriebsparameter erfolgen, durch Restrukturierung des Systems oder durch den steuerbaren Einfluß von Instandsetzungs- und Wartungsmaßnahmen.

## 2 Überwachung dynamischer Systeme

Die Überwachung dynamischer Systeme kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Eine Beschreibung klassischer und moderner Methoden der Fehlerdetektion findet sich beispielsweise in [1]. Eine kurze Bewertung dieser Methoden hinsichtlich ihrer Eignung im betrachteten Anwendungsgebiet bei dynamischen (schwingenden) Strukturen ist in [2] wiedergegeben. Ein Ergebnis dieser Betrachtungen ist es, daß klassische Methoden Vorteile hinsichtlich einer einfachen und leicht realisierbaren Anwendung aufweisen, jedoch diese mit Nachteilen bezüglich der Eindeutigkeit ihrer diagnostischen Aussagefähigkeit kompensieren. Moderne Methoden (*Unknown Input Observer*, *Erweitertes Kalman Filter u.a.*) sowie hierauf aufbauende Verfahren [3; 4; 5; 6] nutzen Systemwissen zur Unterscheidung spezifischer Fehler. Dies führt jedoch oftmals zu einer Zunahme der Empfindlichkeit bezüglich der Genauigkeit des vorausgesetzten Wissens über System und Fehler. Es läßt sich festhalten:

- Die diskutierten Einflüsse können sicherheitsrelevant sein oder nicht. Es wird jedoch nachfolgend überwiegend von Zuverlässigkeitskenngrößen gesprochen, da die gesamte Menge der Einflüsse in ihren Auswirkungen betrachtet wird.
- Methoden der Signalanalyse und Kenngrößenermittlung und -bestimmung sind einfach zu realisieren, differenzieren aber nicht ausreichend nach Fehlerursache, -ort oder anderen Kriterien. Sie dienen oft zur Formulierung 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 Schlüsse von der Veränderung der Art „*Im System ist der Schaden  $z_i$  eingetreten*“ auf die physikalische Ursachen möglich. Jedoch muß diese Beziehung nicht eindeutig sein. Modellgestützte Methoden sind abhängig vom Modellwissen und damit empfindlich gegenüber ungenauen Beschreibungen der als *normal* vorausgesetzten, ungeschädigten und fehlerfreien Ausgangssituation.

- Die leicht realisierbare Idealmethode der Überwachung mit eindeutiger Aussagekraft bezüglich der Interpretation beobachtbarer Veränderungen und eindeutiger Zuordnung physikalischer Ursachen existiert noch nicht. Diese Aussage stellt jedoch die zahlreichen erfolgreichen Einzelanwendungen signalanalytischer oder plausibilitätsorientierter Methoden bei meist einfachen Überwachungsaufgaben nicht in Frage. Neuere Arbeiten versuchen die Robustheit modellgestützter Methoden zu verbessern [8; 12].

Systeme der Automatisierungs- und Kraftwerkstechnik sowie der Luft- und Raumfahrt erfordern jedoch hinsichtlich eines sicheren und gleichzeitig ökonomischen Betriebes intelligente Aussagen über den aktuellen Systemzustand. In diesen Anwendungsbereichen werden Systeme trotz Veränderungen infolge Alterung oder Schäden weiter betrieben. Dies kann sinnvoll und notwendig sein, um

- einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, weil z.B. eine sofortige oder mehrmalige Außerbetriebnahme des Systems eine größere Gefährdung zur Konsequenz hat als ein eingeschränkter Weiterbetrieb. Als Beispiel seien vermutete Wellenquerrisse in Turbinenläufern erwähnt.
- einen ökonomischen Betrieb zu gewährleisten, da nicht jeder detektierte Schaden bzw. jede physikalische Veränderung des Systems automatisch einen Verlust an Sicherheit bzw. Zuverlässigkeit mit sich bringt.

Sowohl zur Automatisierung als auch zur Unterstützung menschlicher Entscheidungsfindungen wird das nachfolgend vorgestellte *SRCE*-Konzept einer Regelung von Kenngrößen vorgestellt, die die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Systems beschreiben.

## 3 Das Safety and Reliability Control Engineering Konzept

Das in [9; 10] bereits skizzierte *SRCE*-Konzept hat zum Ziel, die Sicherheits- und Zuverlässigkeitskenngrößen eines realen, gealterten, modifizierten und durch Schäden gegenüber seinem Auslegungszustand veränderten Systems zu regeln. Ein schematischer Aufbau des Konzeptes ist in Bild 1 angegeben.

Die Intention der *SRCE*-Regelung ist eindeutig von der einer klassischen Regelung zu unterscheiden: Eine *SRCE*-Regelung schließt auf einer hierarchisch höheren Ebene einen Regelkreis und greift in die klassische Regelung ein.

Die in Bild 2 dargestellten Kernelemente des *SRCE*-Konzeptes zur Realisierung eines derartigen Konzeptes sind:

**Intelligente Verfahren der Fehlerdetektion und Schendendiagnose.** Unter intelligenten Verfahren ist in diesem Zusammenhang die Nutzbarkeit der Ausgangsinformationen der entsprechenden Module durch die

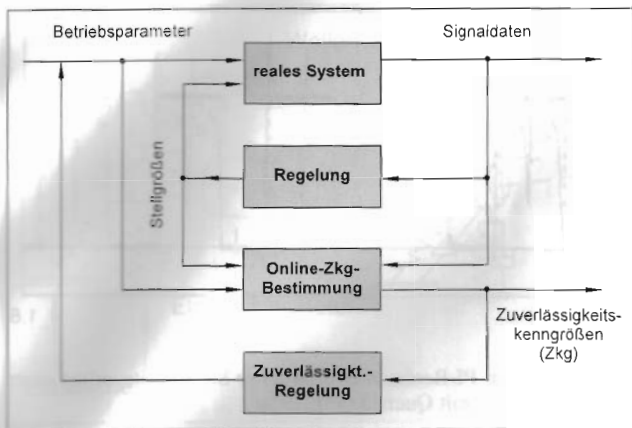


Bild 1: Schematischer Aufbau des SRCE-Konzeptes.

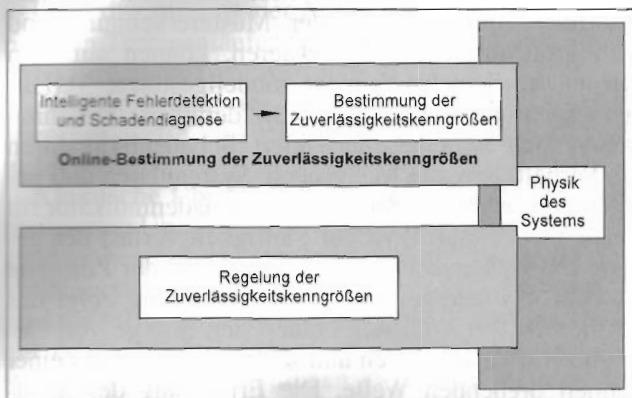


Bild 2: Die drei Module des SRCE-Konzeptes.

SRCE-Regelung zu verstehen. Die relevanten Kriterien sind die Eindeutigkeit und physikalische Kausalität der Aussagen über die Veränderungen im System.

**Verfahren der Online-Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen.** Die online zu bestimmenden relevanten Zuverlässigkeitskenngrößen sind die *Ausfallrate* zur Modellierung der momentanen Performance des Systems und die *Ausfallwahrscheinlichkeit*, die die Vergangenheit des Systems beschreibt. Voraussetzung für die Umsetzung von Regelungs- in Zuverlässigkeitskenngrößen ist das Wissen über den aktuellen Systemzustand. Diese Umsetzung kann mit Hilfe klassischer Verfahren (z.B. Wöhler [10], siehe Abschnitt 4) oder durch Verfahren, die das Erfahrungswissen des Betriebspersonals einbeziehen (z.B. Fuzzy-Ansätze [9]), erfolgen.

**Regelung der Zuverlässigkeit.** In den genannten Modulen sind die Zusammenhänge zwischen Prozeßgrößen und Betriebsparametern als Voraussetzung für die Online-Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngrößen enthalten. Die inverse Verwendung dieser Zusammenhänge in verschiedener Weise unter Nutzung beeinflussbarer Stellgrößen (Betriebsparameter) führt zur Regelung der Zuverlässigkeit. Prinzipiell können dieses aber auch andere Einflüsse wie z.B. Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sein, deren Effekte auf die Zuverlässigkeitskenngrößen bekannt und entsprechend formulierbar sind.

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

- Eignung der Verfahren (insbesondere die der Schadendiagnose) für ein durch Fehler und Schädigungen modifiziertes System,
- Existenz von Schnittstellen zur Kommunikation der Module und
- analytisches oder heuristisches Wissen über den Einfluß von Fehlern und Schädigungen auf die Zuverlässigkeitskenngrößen von System und Komponenten.

Dies sind gleichzeitig die weiteren Entwicklungsfelder des vorgeschlagenen Ansatzes, da vorhandene Einzelmodule nicht auf die Kompatibilität im SRCE-Konzept hin entwickelt wurden. Die zu erweiternden Fähigkeiten der Module bestehen

- in einer Anpassung der Eignung vorhandener Fehlerdetektions- und Schadendiagnose-Algorithmen für das vorgesehene Anwendungsgebiet, wie z.B. im Fall der Wellenrißdetektion in [11] diskutiert,
- im Erwerb von Wissen über den Einfluß spezifischer Schädigungen auf Zuverlässigkeitskenngrößen des Systems,
- in einer Nutzung der Abhängigkeit von Betriebsparametern zur Zuverlässigkeits-Regelung.

Zur realitätsnahen Abbildung der Zusammenhänge sind genaue Formulierungen einzelner Einflüsse notwendig. Diese sind jedoch nur selten direkt verfügbar. Für zahlreiche Anwendungsgebiete kann direkt über die physikalischen Wirkmechanismen das vorhandene, an Modellen gewonnene Wissen über Zusammenhänge zwischen Beanspruchung und Ausfallrate genutzt werden, wie im nachfolgenden Beispiel dargestellt wird. In diesen Fällen wird mit dem Ausgang des Moduls der intelligenten Schadendiagnose weitergearbeitet.

Sollte dieser Ansatz problemspezifisch nicht durchführbar sein, verbleibt nur die erfahrungsorientierte Abschätzung der Verhältnisse, wobei sich für diese Vorgehensweise die Nutzung von Expertensystemen und Modellierungskonzepten wie beispielsweise die Fuzzy-Logik [9] anbietet.

In Bild 3 sind die wesentlichen Pfade zur Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen aus den Meßdaten dargestellt. Um aus den aktuell meßbaren Größen des Systems auf die Zuverlässigkeitskenngrößen zu schließen, sind verschiedene Vorgehensweisen möglich. Hierbei werden die nachstehend benannten und beschriebenen Zwischenebenen der Bestimmung von Prozeßkenngrößen, von Beanspruchungsgrößen und von inneren Systemgrößen bzw. -parametern durch modellgestützte Verfahren eingelegt. Diese Zwischenebenen fungieren als anschauliche Schnittstellen zwischen den Signaldaten und den Zuverlässigkeitskenngrößen. Die klassischen Pfade benutzen Beanspruchungsgrößen des Systems, um von diesen Zwischengrößen aus die Zuverlässigkeitskenngrößen zu bestimmen. Um wiederum die Beanspruchungsgrößen zu ermitteln, sind verschiedene Pfade denkbar, sei es über die direkte Verwendung von Prozeßkenngrößen aus

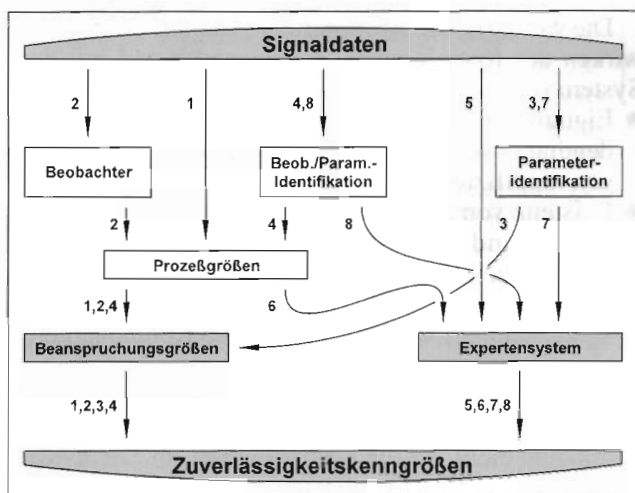


Bild 3: Pfade von den Meßgrößen zu den Zuverlässigkeitskenngrößen.

den Signalen (1), über die Bestimmung innerer Zustände unter Verwendung von Beobachtern über Prozesskenngrößen (2) oder die Verwendung von Parameterschätzverfahren (3) bzw. kombinierten Verfahren (4). Moderne Expertensysteme schließen unter Nutzung von heuristischem Wissen und Faktenwissen auf Ursachen oder Konsequenzen. Dies schließt ihre Tauglichkeit zur Formulierung der Zusammenhänge zwischen Systemänderungen, den meßbaren Signalen und den sich ergebenden Zuverlässigkeitskenngrößen 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 sich die Konsequenzen hinsichtlich der Zuverlässigkeit wesentlich leichter absehen lassen. Diesen „Blick“ leisten jedoch nicht die klassischen Methoden der Fehlerdetektion und Schadensdiagnose. 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 das spezielle *Wie* der Änderungen relevant oder über das *Was* der Änderung. Wobei im letzteren Fall möglichst physikalische Parameter verwendet werden sollen. Insofern lassen sich die Pfade 1,2,3,4 als physikalisch, die Pfade 5,6,7,8 als phänomenologisch orientierte Pfade klassifizieren.

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

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

Neben den klassischen Verfahren zur Überwachung einer Turbomaschine, den sogenannten *Vibration Mo-*

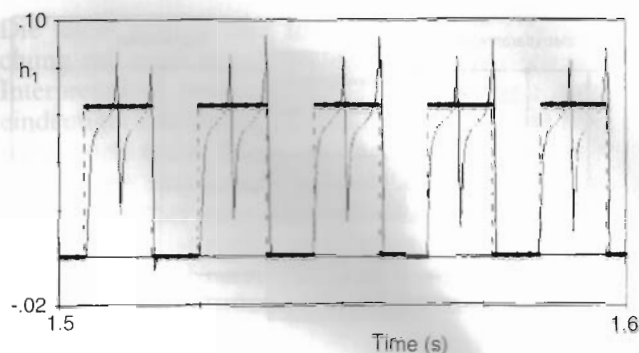


Bild 4: Mit dem PI-Beobachter ermittelter Steifigkeitsverlust einer rotierenden Welle mit Querriß [13].

onitoring Systems, welche im wesentlichen auf der Anwendung signalanalytischer Methoden und der Verwendung von Verfahren der Mustererkennung und Kenngrößenüberwachung basieren, können auf dem Gebiet der Schadensdiagnose modellgestützte Verfahren angewandt werden. Mit Hilfe derartiger Verfahren lassen sich hypothesenorientiert Schadenindikatoren als Verhältnisse von Meßgrößen, Systemdaten und geschätzten Größen bilden [12]. Ein Schadenindikator für einen Wellenquerriß ist der Steifigkeitsverlust des gerissenen Wellenabschnittes als Funktion der Zeit, wie in Bild 4 wiedergegeben. Die Darstellung zeigt das Phänomen des *Rißatmens* eines sich infolge von Gewichtskräften öffnenden und schließenden Risses einer schnell drehenden Welle. Die Ermittlung des nicht-meßbaren Phänomens erfolgt mit Hilfe eines PI-Beobachters, wie er in [13] für diesen Anwendungszweck dargestellt und angewendet wurde.

Dieser in Realzeit bestimmbare Indikator beinhaltet eine Information über die Rißtiefe und dazu komplexer, eine Aussage über den verbleibenden tragfähigen Restquerschnitt. Hier läßt sich mit Hilfe des Schadensdiagnosealgorithmus eine Aussage sowohl über die Art als auch den Grad der Schädigung formulieren. Diese Information ist beim diskutierten System direkt verwendbar, um über die Belastung der Welle (aus Systemdaten und Betriebsparametern) unter Wissen des verbleibenden Querschnittes (aus Aussagen des Schadensdiagnosemoduls, hier PI-Beobachter) die aktuelle Beanspruchung des Systems zu ermitteln. Unter Anwendung des über die Wöhler/Palmgreen/Miner Gleichungen vorhandenen bruchmechanischen Wissens über die Beziehungen

Lastgeschichte – Beanspruchung – Versagenswahrscheinlichkeit

läßt sich in diesem Fall leicht eine realzeitfähige Aussage zur aktuellen Versagenswahrscheinlichkeit treffen. Die Invertierung der durch diese Beziehung beschriebenen Verhältnisse kann zur Regelung herangezogen werden. Unter Regelung ist in diesem Beispiel der direkte Eingriff auf die Betriebsparameter (z.B. die Soll-Leistung) in der Weise zu verstehen, daß trotz Schädigung durch einen Riß, die von der Zuverlässigkeit vorgegebenen Grenzen nicht unterschritten werden.

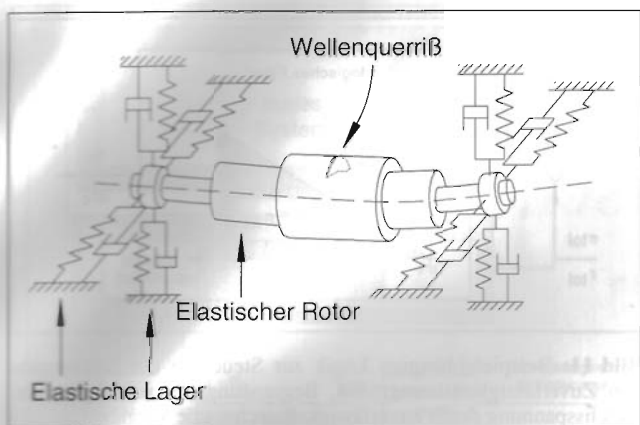


Bild 5: Schematische Darstellung eines angerissenen Turbinenläufers.

Die Prinziplösung der SRCE-Regelung eines angerissenen Turbinenläufers wird nachfolgend dargestellt, siehe Bild 5.

Zur Darstellung des Unterschiedes zur klassischen Vorgehensweise soll diese hier kurz wiedergegeben werden.

**Klassische Überwachungskonzepte.** Die der automatisierten Überwachung von Turborotoren zur Verfügung stehenden Schwingungsmeßgrößen beschreiben die Wellen- oder Lagerbockbewegungen. Mit Hilfe von signalanalytischen Methoden wird das Systemverhalten gut erfaßt. Veränderungen im rotodynamischen System sind durch Änderungen in den Kenngrößen des Spektrums bzw. in den Maximalwerten der Schwingungsamplituden erkennbar. Mit Hilfe menschlicher oder künstlicher Fähigkeiten zur Mustererkennung werden diese Veränderungen interpretiert. Die Interpretation realisiert die Zuordnung der beobachteten Phänomene zu der physikalischen Ursache.

Der resultierende Entscheidungsprozeß wird wesentlich durch die Erfahrung des Personals sowie durch ökonomische und psychosoziale Aspekte bestimmt.

In den statistisch seltenen Fällen des Auftretens eines Wellenquerrisses ergeben sich im Schwingungsverhalten verschiedene Änderungen, welche jedoch nicht eindeutig auf einen Riß schließen lassen. Zur Detektion von Wellenquerrissen existieren verschiedene Diagnosphilosophien (z.B. [15; 16]).

Unabhängig von der Entscheidung über die Existenz eines Wellenquerrisses, kann keinerlei Aussage über die Rißtiefe und die Beeinflussung der Zuverlässigkeit von Komponenten des Systems formuliert werden. Um sowohl hinsichtlich der Existenz eines Risses als auch seiner zuverlässigkeitstechnischen Konsequenzen Aussagen treffen zu können, wird nach dem Stand der Technik der Betrieb unterbrochen und der Turbinenläufer abgedeckt. Abhängig vom Ergebnis einer derartigen Inspektion werden Maßnahmen getroffen bzw. Strategien hinsichtlich eines eventuell reduzierten Betriebes oder des Einflusses von Instandhaltungsstrategien entwickelt. Der gesamte Vorgang ist stark personal- und kostenintensiv sowie anfällig für menschliche Fehlentscheidungen.

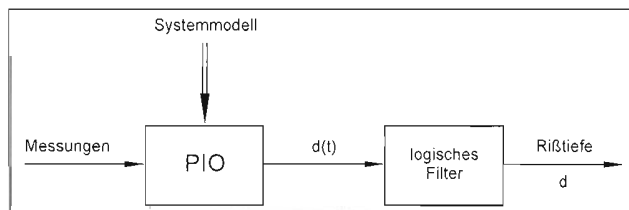


Bild 6: Prinzipskizze des Einsatzes des PI-Beobachters.



Bild 7: Herstellen der Beziehung Rißtiefe - Widerstandsmomente.

**SRCE-Beispiel.** Das zentrale Element des SRCE-Konzeptes ist in diesem Beispiel der Proportional-Integral-Beobachter (PIO) [12], welcher hier auf den angerissenen Turbinenläufer angewandt wird [13]. Der Riß wird an der angenommenen Rißstelle identifiziert, und es wird eine Aussage bezüglich seiner Tiefe getroffen. Die Identifizierung basiert auf den gleichen Schwingungsmessungen wie bei klassischen Überwachungskonzepten: den Verschiebungen der Welle in den Lagern bzw. den Lagerbockbewegungen. Zusätzlich wird die Beschreibung des fehlerfreien mechanischen Systems genutzt, siehe Bild 6.

Die Rißtiefe  $d$  beeinflusst direkt die mechanischen Widerstandsmomente  $W, W_p$ . Die analytischen Zusammenhänge werden von Mayes und Davies [14] beschrieben. Der relevante Zusammenhang zwischen Geometrie-, Materialparametern und Rißtiefe einerseits sowie der Veränderung der Widerstandsmomente andererseits wird in Bild 7 wiedergegeben.

Mit der Annahme, daß die auftretenden mechanischen Spannungen in der einfachen Struktur des zugrundeliegenden Lavalrotors durch

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{mg\varrho^2L}{2W} \quad \text{und} \quad (1)$$

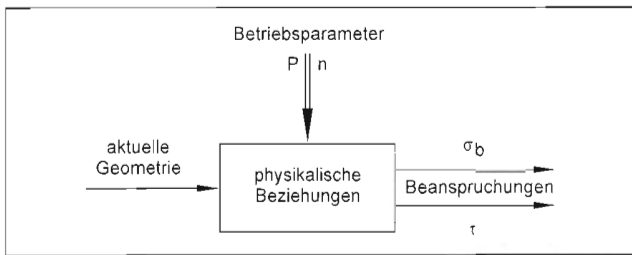
$$\tau = \frac{M_t}{W_p} = \frac{P}{2\pi n W_p} \quad (2)$$

mit dem Biegemoment  $M_b$ , dem Torsionsmoment  $M_t$ , der Masse  $m$ , der Gravitationskonstante  $g$ , der Dichte  $\varrho$ , der Länge  $L$  des Rotors, der übertragenden Leistung  $P$ , der Umdrehungszahl  $n$  und den Widerstandsmomenten  $W, W_p$  wie in Bild 8 beschrieben werden können, lassen sich die konkreten mechanischen Beanspruchungen bestimmen.

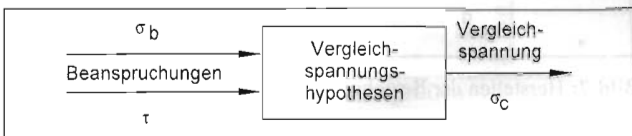
Die Verknüpfung der auftretenden mechanischen Beanspruchungen zu einer resultierenden mechanischen Größe gelingt mit Hilfe eines Vergleichsspannungsansatzes

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_b^2 + 3(\alpha_o\tau)^2} \quad (3)$$

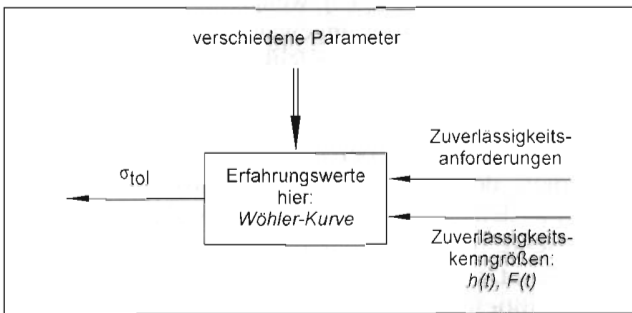
mit dem aus der Praxis bestimmten Wert  $\alpha_o = 0,63$  für Turbinenstahl, siehe Bild 9.



**Bild 8:** Physikalische Beziehungen resultierend in Beanspruchungsgrößen (mechanische Spannungen).



**Bild 9:** Ermittlung der Vergleichsspannung.



**Bild 10:** Vereinfachtes Wöhler Diagramm.

Diese skalare Größe wird nun mit den Werten verglichen, die in zahlreichen materialabhängigen Belastungsexperimenten zum Standverhalten bestimmt wurden. Im deutschen Sprachraum werden die Zusammenhänge in Form von Wöhler Diagrammen wiedergegeben, Bild 10:

Näherungsweise kann die Beziehung mit Hilfe der zeitabhängigen Beanspruchung bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,01 mit

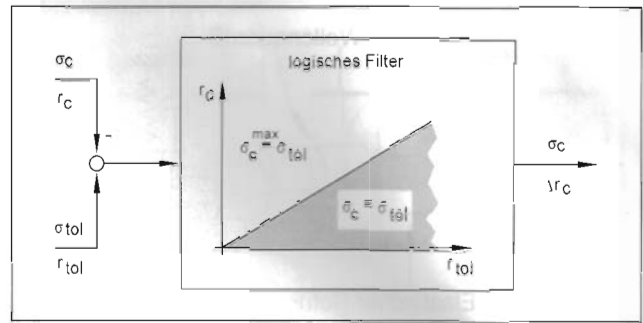
$$\sigma_{rc}(N) = \left( \lg \frac{\sigma_F}{\sigma_D} N + \lg \sigma_F \right) \cdot \lg \frac{N_F}{N_D} \quad (4)$$

$$- \lg N_F \left( \lg \frac{\sigma_F}{\sigma_D} \right) \text{ ind } [N_D - N]$$

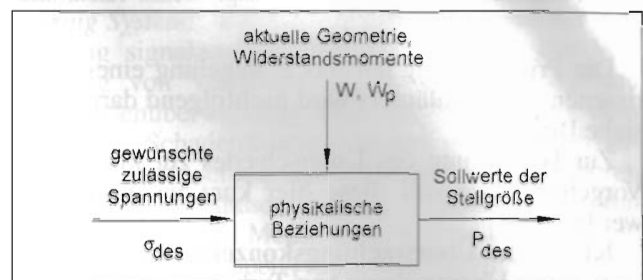
$$+ \lg \sigma_D \text{ ind } [N - N_D],$$

$$\text{ind } [arg] = \begin{cases} 1 & \text{für } arg \geq 0 \\ 0 & \text{für } arg < 0 \end{cases} \quad (5)$$

mit  $\sigma_F, N_F, \sigma_D, N_D$  als Funktionswertpaare der Wöhlerkurve und  $N$  als Anzahl erfolgter Belastungswechsel bestimmt werden. Das Ziel des *SRCE*-Beispiels ist die Regelung der Ausfallwahrscheinlichkeit auf den Wert 0,01. Ist die Beanspruchung unterhalb der zu  $\sigma_D$  gehörenden Ausfallwahrscheinlichkeit bedeutet dies eine theoretisch unendliche Lebensdauer der Welle. Bedingt durch einen Riß zum Belastungswechselzeit-



**Bild 11:** Beispielabhängige Logik zur Steuerung der Sollvorgabe von Zuverlässigkeitskenngrößen, Begrenzung der zulässigen Vergleichsspannung durch zuverlässigkeitstechnische Vorgaben.



**Bild 12:** Umsetzung der Größen in eine *SRCE*-Stellgröße.

punkt  $N_1$  nimmt die mechanische Beanspruchung zu. Zum Zeitpunkt des Belastungswechsels  $N_2$  erkennt der *SRCE*-Regelungsansatz einen nichtakzeptablen Verlust an Zuverlässigkeit. Hier kann eine einfache Vergleichslogik die relevanten Vorgaben bezüglich der zulässigen Spannung liefern, Bild 11.

Hier sind verschiedene logische oder analytische Funktionen als Regelungsgesetze realisierbar. Sehr interessant erscheinen Regelungssätze, welche mit Hilfe potentialtheoretischer Methoden arbeiten. Wird die *SRCE*-Regelung im Beispiel aktiv, ist auf Grund der durch den Riß veränderten Geometrie die zulässige Spannung reduziert  $\sigma_{c,soll} = \sigma_{tol}$ , die *SRCE*-Stellgröße für die technische Regelung wird mit Hilfe der Inversion der Gleichungen (1) bis (3) als

$$P_{soll} = \sqrt{\frac{2\pi n W_p}{3\alpha_a^2} \left( \sigma_{c,soll}^2 - \frac{m^2 g^2 \rho^2 L^2}{2W} \right)}. \quad (6)$$

Mit Hilfe der Betriebsparameter, hier der Leistung  $P$ , läßt sich der *SRCE*-Regelkreis schließen. Der gesamte Signalflußplan des geschlossenen Regelkreises wird in Bild 13 wiedergegeben.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte *SRCE*-Konzept hat zunächst lediglich einen akademischen Charakter. Ziel des Konzeptes ist die weitergehende Formalisierung des Anlagenbetriebes. Hauptaufgabe dieses, der klassischen technischen Regelung überlagerten Konzeptes ist die Regelung des Systems in Abhängigkeit von Sicherheits- und Zuverlässigkeitskenngrößen. Dieses Konzept soll

