

Überwachung, Diagnose und lebensdaueroptimierte Betriebsführung schwingungsfähiger Maschinen -

Teil 2: Entwicklung lebensdauer- und belastungsabhängiger Ausfallraten im SRCE-Konzept

Dr.-Ing. D. Söffker, Wuppertal

1 Einführung

Zuverlässigkeits- und Sicherheitskriterien werden in zunehmendem Maß zur Beurteilung und Überwachung technischer Systeme herangezogen. Diese Entwicklung ist durch steigende Qualitätsmaßstäbe, strengere juristische Auflagen und ökonomische Forderungen bedingt. Der Überwachung entsprechender Anlagen durch menschliche Experten oder künstliche rechnerbasierte Systeme liegen meist klassische Verfahren der Signalanalyse, Kenngrößenbestimmung, Musterrerkennung o.ä. zugrunde. In zunehmendem Maß werden auch modellgestützte Verfahren der Fehlerdetektion und Schadendiagnose eingesetzt. Werden Veränderungen im Systemverhalten erkannt, erfolgt entweder eine unmittelbare 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 des Fachgebietes der Technischen Zuverlässigkeit. Zuverlässigkeitsanalysen sind jedoch auf den Auslegungszustand eines Systems bezogen. Dies beinhaltet, 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 Aussagen unterliegen daher im wesentlichen der Erfahrung des Betriebspersonals und sind damit menschlich subjektiven Einflüssen unterworfen. Es erscheint realisierbar, modellgestützte Methoden der Fehlerdetektion und Schadendiagnose bzw. entsprechende signalanalytische Verfahren mit den Methoden der Technischen Zuverlässigkeit zum *Safety and Reliability Control Engineering (SRCE)* Konzept zu verbinden. Das Ziel eines derartigen Konzeptes ist die Etablierung eines Regelkreises zur Regelung geeigneter zuverlässigkeits- oder sicherheits-

technischer 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 oder durch den steuerbaren Einfluß von Instandhaltungs- und Wartungsmaßnahmen, wie dieses auch - im Sinne der vorbeugenden Instandhaltung - bereits praktiziert wird. Die Gesamtkonzeption des *SRCE*-Konzeptes ist bereits in /1/ ausführlich dargestellt und begründet worden.

2 Überwachung dynamischer Systeme

Die Überwachung dynamischer Systeme kann auf verschiedene Weisen erfolgen, wie in /2/ bewertend für ihren Einsatz bei elastischen mechanischen Strukturen dargestellt.

Komplexe Systeme (z.B. der Automatisierungstechnik) erfordern insbesondere hinsichtlich eines ökonomischen und gleichzeitig sicheren Betriebes, Aussagen über den aktuellen Systemzustand. Dies beinhaltet bisher im wesentlichen technische Größen (Druck, Temperatur, Schwingwege, Spektren, ...). Dies wird aber in zunehmendem Maß auch Größen beinhalten, welche die Beanspruchungen des Systems und seine zuverlässigkeitstechnischen Auswirkungen erfassen.

Es kann sinnvoll oder notwendig sein, ein System trotz Veränderungen infolge Alterungen oder Schäden weiter zu betreiben, 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 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 Unterstützung menschlicher Entscheidungen als auch zur Automatisierung wird das nachfolgend vorgestellte Konzept einer Regelung von nichttechnischen, die Zuverlässigkeit bzw. Sicherheit des Systems beschreibenden Größen vorgestellt.

Das *SRCE*-Konzept stellt daher den nächsten konsequenten Entwicklungsschritt über die regelungstechnischen Fehlerdetektions- und Schadendiagnosemodule hinaus dar, da es eine Verknüpfung von deren Aussagen mit der Betriebsführung an sich ermöglicht, indem es eine Rückkopplung zur Leitebene realisiert. Dies ist ein weiterer Schritt zur Automatisierung der Anlagenführung.

Das Safety and Reliability Control Engineering Konzept

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

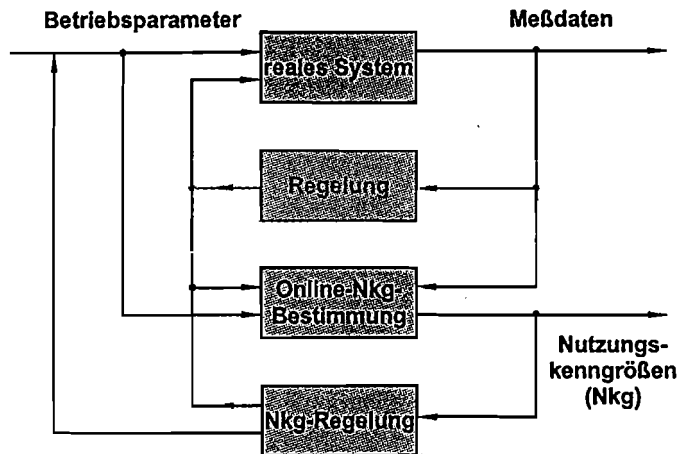


Abb. 1: Schematischer Aufbau des *SRCE* - Konzeptes

Eine *SRCE*-Regelung schließt gegenüber den klassischen technischen Regelungen auf einer hierarchisch höheren Ebene einen Regelkreis und greift dabei unter Umständen in die klassische Regelung ein.

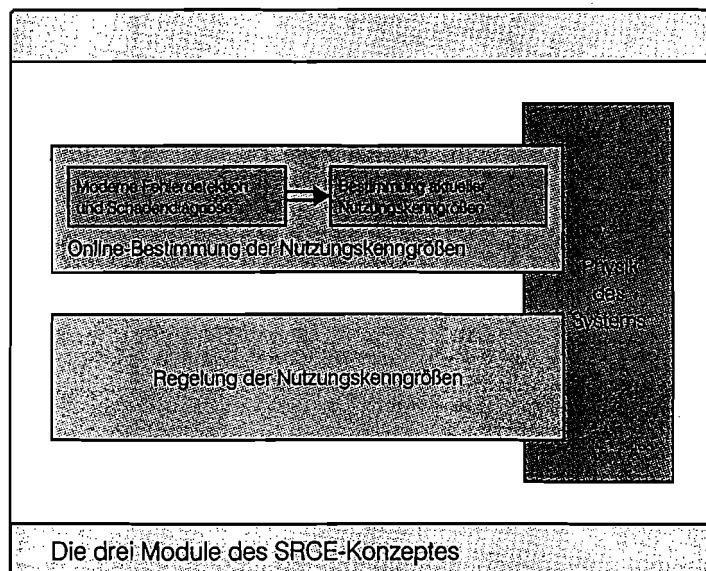


Abb. 2: Die drei Module des *SRCE*-Konzeptes

Die in Abb. 2 angegebenen Kernelemente des *SRCE*-Konzeptes zur Realisierung eines derartigen Konzeptes sind:

Moderne Verfahren der Fehlerdetektion und Schadendiagnose

Unter 'Moderne 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 (vgl. z.B. /2/).

Verfahren der Online-Bestimmung von Nutzungskenngrößen (NKg)

Die Verfahren der Online-Bestimmung von relevanten Größen erlauben das Aktualisieren der NKg unter Zuhilfenahme des Wissens um den aktuellen Systemzustand unter Nutzung klassischer Verfahren der Berechnung der Größen.

Regelung der Zuverlässigkeit

In den genannten Modulen sind Zusammenhänge zwischen Prozeßgrößen und Betriebsparametern problemspezifisch als Voraussetzung für die Online-Bestimmung der NKg enthalten. Die inverse Nutzung dieser Zusammenhänge unter Nutzung beeinflussbarer Stellgrößen (Betriebsparameter) führt zur Regelung der Nutzungskenngrößen. Prinzipiell können dieses aber auch andere Einflüsse sein, dessen Einfluß auf die NKg bekannt und modellierbar ist.

Der zentrale Aspekt zur Umsetzung des Konzeptes ist daher die Frage zum Vorhandensein von analytischem oder heuristischem Wissen zum Einfluß von Fehlern / Schädigungen, Alterungs- und Belastungseinflüssen auf das Ausfallverhalten von Systemen und Komponenten.

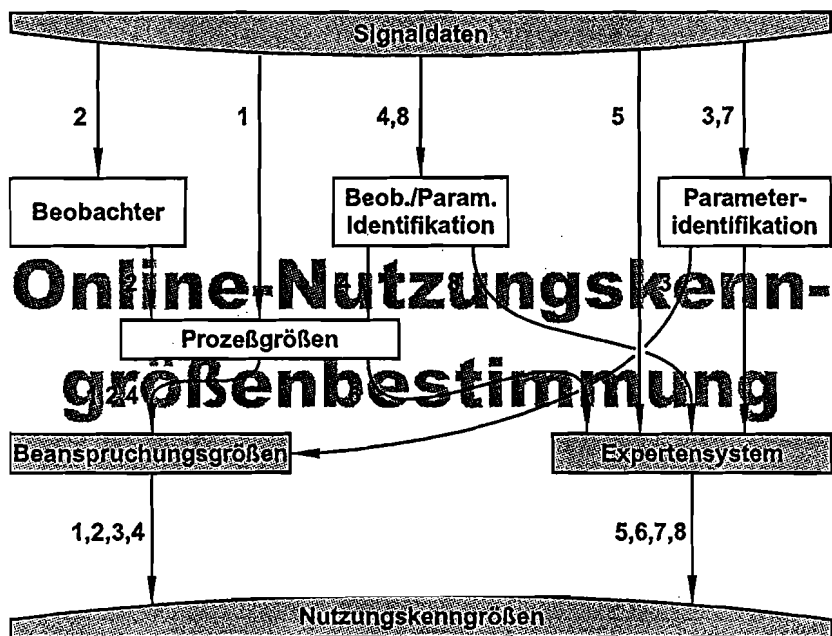


Abb. 3: Pfade von den Meßgrößen zu den Zuverlässigkeitskenngrößen

Zur realitätstreuen Abbildung der Zusammenhänge ist eine genaue Abbildung des Einflusses notwendig, aber nur für ausgewählte Zusammenhänge bereits verfügbar. Die prinzipielle Vorge-

hensweise zur Ermittlung von aktuellen Nkg in Abb. 3 angegeben. Für zahlreiche Einsatzfelder kann direkt über die physikalischen Wirkmechanismen das vorhandene 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 'Moderne Schadendiagnose' weitergearbeitet werden. Diese Pfade (1,2,3,4) benutzen Beanspruchungsgrößen als Zwischengrößen.

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. /3/) anbietet (Pfade 5,6,7,8).

Die in Abb. 3 angegebenen Zwischenebenen (Beanspruchungsgrößen, Prozeßgrößen, Experten-system) fungieren als anschauliche Schnittstellen zwischen den technischen Signaldaten und den nichttechnischen Nutzungskenngrößen. Details zu den einzelnen Pfaden sind in /1/ angegeben.

Deutlich wird, daß der „Blick ins Innere“ eines Systems zum Erfassen von physikalischen Änderungen im Hinblick auf die Realisierung des *SRCE* - Konzeptes an Bedeutung gewinnt, weil auch anschaulich gesehen, sich die Konsequenzen hinsichtlich der Bewertung der Nutzung dann wesentlich leichter absehen lassen.

4 Eine belastungs- und lebensdauerorientierte Ausfallrate

Eine alterungs- und belastungsorientierte Ausfallrate kann auf Basis einer mathematisierten Darstellung Kern einer *SRCE*-Konzeption sein, da sie die relevanten Einflüsse berücksichtigt. In /4/ wurde eine derartiger Größe entwickelt.

Die zuverlässigkeitstechnischen Größen Ausfallrate $h(t)$, Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ sowie Überlebenswahrscheinlichkeit / Zuverlässigkeit $R(t)$ beschreiben das Ausfallverhalten eines technischen Systemes. Die Zeitverläufe werden empirisch durch Analyse des zeitlichen Verhaltens des Ausfalls einer statistisch ausreichend großen Zahl N_0 identischer Systeme unter Zugrundelegung identischer Belastungen ermittelt. In der Praxis ergibt sich dann für die Lebens- oder Nutzungsdauer T des betrachteten Systems eine Verteilungsfunktion $F(t)$. Diese Verteilungsfunktion beschreibt wahrscheinlichkeitstheoretisch die Lebensdauer T . Das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ ist die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$

$$F(t) + R(t) = 1, \quad (1)$$

welche auch als Zuverlässigkeit bzw. Zuverlässigkeitsfunktion bezeichnet wird. Die Ausfallrate $h(t)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, daß ein betrachtetes, funktionsfähiges System zum Betrachtungszeitpunkt t ausfallen wird mit

$$h(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}. \quad (2)$$

Vertiefende Darstellungen finden sich z.B. in /5,6,10/. Klassische zuverlässigkeitstechnische Kenngrößen beschreiben das Ausfallverhalten des betrachteten Systems als Funktion der Zeit. Werden die experimentell ermittelten Verläufe $h(t)$, $R(t)$, $F(t)$ zur wahrscheinlichkeitstechnischen Beschreibung herangezogen, werden indirekt verschiedene Voraussetzungen getroffen:

- Das betrachtete System ist identisch zu den Systemen, welche Grundlage der experimentellen Untersuchungen waren.
- Die den experimentellen Untersuchungen zugrundeliegende Belastungsfunktion ist identisch zur realen Belastungsfunktion.

Da die Größen $h(t)$, $R(t)$, $F(t)$ nur zeitabhängig sind, können sie nicht die regelungstechnische Betrachtungsgrundlage einer *SRCE*-Konzeption nach /1/ sein. Zur Bestimmung der Nutzungsdauer eines Systems mit variablen Belastungen sind die genannten Größen nicht direkt nutzbar.

4.1 Belastungsabhängigkeit der Lebens- oder Nutzungsdauer

Der Zusammenhang zwischen äußerer Belastung B und Lebens- bzw. Nutzungsdauer LD sei, wie in Abb. 4 dargestellt, empirisch bekannt.

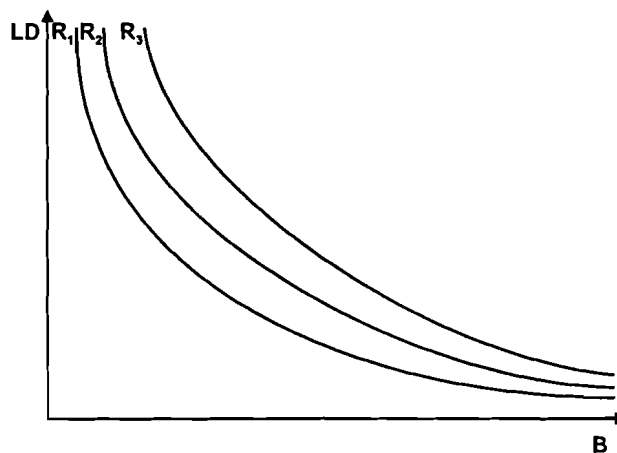


Abb. 4: Schematischer Zusammenhang

Belastung B - Lebens-/Nutzungsdauer LD - Überlebenswahrscheinlichkeit R

Die unterschiedlichen Kurven in Abb. 4 unterscheiden sich durch die Überlebenswahrscheinlichkeit R , wobei für die nachfolgenden Betrachtungen $R_1 > R_2 > R_3$ sowie die Stetigkeit der

Verläufe vorausgesetzt wird. Das klassische Wöhler-Diagramm /7/, gibt beispielsweise die Biege-wechselfestigkeit als Belastungsparameter als Funktion der Zahl der Lastspiele wieder.

4.2 Schädigungsmechanismus und Schadenakkumulation

Die Idee der Schadenakkumulation besteht darin, jeder Nutzung einen belastungsabhängigen Verbrauch des (unbekannten) Nutzungsvorrates zuzuschreiben. Komplementär zum Nutzungsvorrat läßt sich die Abnutzung bzw. der abstrakte Schaden modellieren, wie dies Palmgren für Wälzlagerberechnungen 1920 /8/ und in allgemeinerer Form Miner /9/ 1945 bereits formuliert haben.

Der Ansatz von Miner /9/ werde hier so verstanden, daß ein abstrakter skalarer Schaden S mit den nachstehend beschriebenen Eigenschaften angenommen werde:

- $S = 0$: voll funktionsfähiges System, 100 % Nutzungsvorrat,
- $S = n, n \in]0, 1[$: voll funktionsfähiges System mit $100 \cdot (1-n)\%$ Nutzungsvorrat und
- $S = 1$: ein nicht funktionsfähiges und zu 100 % verbrauchtes System.

Der Schaden $S(t)$ ist mit dem Nutzungsvorrates $N(t)$

$$N(t) = 1 - S(t) \quad (3)$$

verknüpft.

Die Annahme, daß der Schadenbeitrag s_i der i -ten Nutzung ausschließlich vom Belastungsparameter B_i sowie der i -ten Nutzungsdauer ld_i

$$s_i = f(B_i, ld_i) \quad (4)$$

abhängig ist, führt zu einem (einfachen) linearen (weil von der Vorgeschichte unabhängigen) Schädigungsmechanismus (Schadenmechanismus) /4/. Dies ist kein notwendiger Zusammenhang, soll hier aber - im Sinne einer klaren Darstellung - verwendet werden.

Die Grundlage zur Bestimmung des i -ten Schadenbeitrages liefert daher ausschließlich die zur i -ten Nutzung zugehörige Belastung B_i . Wie in in Abb. 4 dargestellt, lassen sich aus den empirisch bestimmten Gesetzmäßigkeiten für eine - über die gesamte Lebensdauer als konstant angenommene - Belastung B_i die zugehörige theoretische Nutzungsdauer LD_i ablesen.

Der Schadenbeitrag der i -ten Nutzung läßt sich dann z.B. durch

$$s_{i,R_x} = \frac{ld_i}{LD_{i,R_x}(B_i)} \quad (5)$$

bestimmen und ist, auf Grund der Verknüpfung der Bezugsgröße LD_{i,R_x} mit der Überlebenswahrscheinlichkeit R_x , auf diese bezogen.

Die einzelnen belastungsabhängigen Beiträge lassen sich für die Lebensgeschichte des betrachteten Systems zum abstrakten Schaden

$$S_{R_x}(B(t)) = \sum_{k=0}^i s_{i,R_x}(B_i(t)) \quad (6)$$

addieren, welcher auf Grund der Abhängigkeit der Bezugsgrößen wiederum von der zugrundegelegten Überlebenswahrscheinlichkeit abhängt.

Ein derartiger Additionsmechanismus wird als lineare Schadenakkumulation bezeichnet. Prinzipiell kann die Ermittlung der Beiträge s_i auch abhängig sowohl vom bereits akkumulierten Schaden S_{R_x} als auch von der bisherigen Nutzungsdauer LD sein. Für die Darstellung der prinzipiellen Vorgehensweise ist dies jedoch unerheblich.

4.3 Belastungs- und lebensdauerabhängige Kenngrößen

Der aktuelle zuverlässigkeitstechnische Zustand eines betrachteten Systems wird durch die aktuelle Belastung $B(t_{akt}) = B_{akt}$, die aktuelle Schädigung $S(t_{akt}) = S_{akt}$ und die bisherige Nutzungsdauer $LD(t_{akt}) = LD_{akt}$ beschrieben. Ausgehend von der Gültigkeit des linearen Schadenakkumulationsmechanismus läßt sich das zugrundeliegende Datenmaterial erneut in Verknüpfung mit der aktuellen Schädigung $S(t_{akt})$ verwenden.

Neben der Nutzungsdauer LD ist in Abb. 5 der abstrakte Schaden S aufgeführt. Der durch die aktuelle Nutzungsdauer $LD(t_{akt})$ in der Skalierung der Nutzungsdauer definierte Ordinaten-schnittpunkt bestimmt die Skalierung des abstrakten Schadens, da die aktuelle Nutzungsdauer und der aktuelle Schaden den gleichen Zustand des Systems beschreiben. Entsprechend der Skalierung ergibt sich damit auch der Ordinaten-schnittpunkt für den abstrakten Schaden $S = 1$, also den Ausfall des Systems. Somit gilt für die nachfolgenden Darstellungen, daß die getroffenen Aussagen nur mit der Wahrscheinlichkeit der zugrundeliegenden Überlebenswahrscheinlichkeit R_x wahr sind.

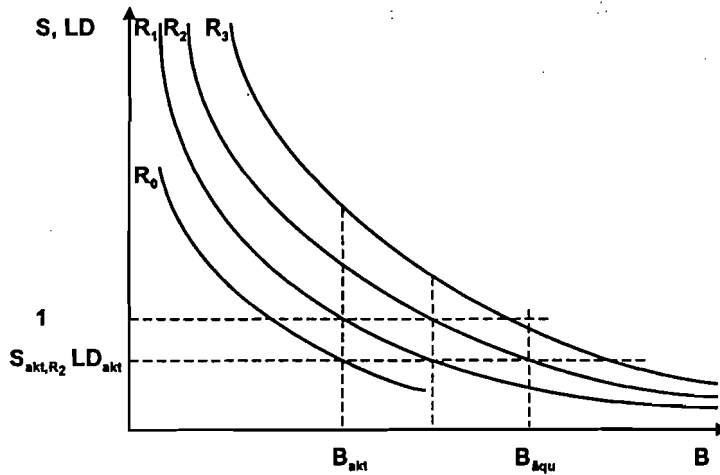


Abb. 5: Beschreibung des aktuellen belastungs- und lebensdauerabhängigen Nutzungszustandes

Der Schnittpunkt (S_{akt,R_2}, B_{akt}) liefert die Überlebenswahrscheinlichkeit R_0 von aktueller Belastung und aktuellem Schaden. Der Schnittpunkt (S_{akt}, R_2) liefert die zum aktuellen Schaden zugehörige äquivalente Belastung $B_{äqu}$.

Die klassische Ausfallrate der Zuverlässigkeitstechnik $h(t)$ wird als das Verhältnis der Rate der aktuellen Ausfälle bezogen auf die Zahl der noch funktionstüchtigen Einheiten der betrachteten Grundgesamtheit definiert und beschreibt daher die Wahrscheinlichkeit, daß eine betrachtete Einheit, die im betrachteten Moment noch lebt, im nächsten Moment ausfällt /10/.

Auf Grund der eingeführten Belastungsabhängigkeit sowie des Schadenakkumulationsmechanismus ergeben sich durch die eingeführten Differenzierungen zahlreiche Möglichkeiten der Definition ausfallratenäquivalenter Größen.

Belastungs- und lebensdauerabhängige Ausfallrate:

In Abb. 6 sind die Zusammenhänge der Abb. 5 auf ein R, S Diagramm übertragen.

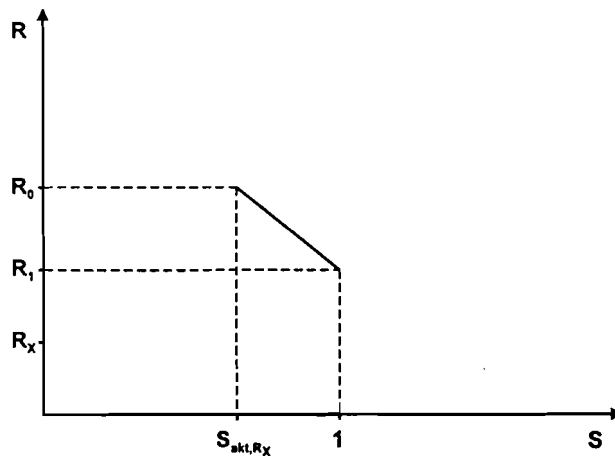


Abb. 6: Ableitung der Ausfallrate bezogen auf die aktuelle Belastung

Eine analoge Definition der Ausfallrate bezogen auf die aktuelle Belastung B_{akt} und den aktuellen Schaden S_{akt} läßt sich - unter Nutzung der beispielsweise in Abb. 7 dargestellten Zusammenhänge - durch

$$h_{\text{BS}}(B_{\text{akt}}, S_{\text{akt}}) = - \frac{\partial R(B_{\text{akt}})}{\partial S} \frac{1}{R_{\text{akt}}(B_{\text{akt}})} = - \frac{\partial R(B_{\text{akt}})}{\partial S} \frac{1}{R_{\text{akt}}} \quad (7)$$

$$= - \left(\frac{R_1(B_{\text{akt}}, S_{R_x} = 1) - R_0(B_{\text{akt}}, S_{\text{akt}}, R_x)}{(1 - S_{\text{akt}}, R_x)} \right) \frac{1}{R_{\text{akt}}} \quad (8)$$

definieren /4/. Für den konkret in Abb. 6 dargestellten - und aus Abb. 5 abgeleiteten Zusammenhang ergibt sich:

$$h_{\text{BS}}(B_{\text{akt}}, S_{\text{akt}}) = - \left(\frac{R_1(B_{\text{akt}}, S_{R_2} = 1) - R_0(B_{\text{akt}}, S_{\text{akt}}, R_2)}{(1 - S_{\text{akt}}, R_2)} \right) \frac{1}{R_0} \quad (9)$$

Die in Abb. 6 beispielhaft dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen, daß die Ausfallrate $h_{\text{BS}}(B_{\text{akt}}, S_{\text{akt}})$

- notwendigerweise vom aktuellen Schaden S_{akt} und der Nutzungsdauer LD_{akt} abhängt,
- mit wachsendem Schaden S_{akt} zunimmt,
- mit wachsender Belastung $B_{\text{akt}}(R_{\text{akt},x}(B_{\text{akt}}))$ zunimmt,
- mit wachsender Differenz $R_1(B_{\text{akt}}, S = 1) - R_0(B_{\text{akt}})$ zunimmt,
- und wie die klassische Ausfallrate mit der Überlebenswahrscheinlichkeit verknüpft ist.

Die genannte Beschreibung ist zunächst nur sinnvoll für Betrachtungen $S_{\text{akt}} \leq 1$.

Die aufgezeigten Beziehungen verdeutlichen auch die Möglichkeit, die Ausfallrate als Regelgröße innerhalb eines *SRCE*-Konzeptes zu nutzen. Für Überwachungsstrategien ist die Bestimmung von $h_{\text{BS}}(B_{\text{akt}}, S_{\text{akt}})$ ausreichend. Für Regelungsstrategien läßt sich

$$\frac{\partial R(B_{\text{akt}})}{\partial S} \quad (10)$$

als 'Stellmechanismus' auf Grund ihrer direkten Abhängigkeit von der aktuellen Belastung B_{akt} nutzen.

Über die aktuelle Belastung werden dann die nichttechnischen Nkg des Systems geregelt. Unter Verwendung der in Abb. 6 dargestellten Zusammenhänge bedeutet dies die Beeinflussung der Ausfallrate durch die Verschiebung der Größe $R_0(B_{\text{akt}})$, da alle anderen Größen zur Bestimmung des Gradienten durch die Vergangenheit des Systems bereits festgelegt sind. Da den betrachteten

Größen eine Überlebenswahrscheinlichkeit von R_x zugrundeliegt, sind hieraus abgeleiteten Aussagen ebenfalls nur Wahrscheinlichkeitsaussagen, was für die prinzipielle Vorgehensweise jedoch zunächst ohne Bedeutung ist.

Die vorgenannten Ausführungen setzen die Kenntnis der Abhängigkeiten der Überlebenswahrscheinlichkeiten von den Belastungen z.B. als Kennlinienfeld voraus. Die Nutzung eines derartigen Kennlinienfeldes auf Basis klassischer Ausfallversuche setzt wiederum die Gültigkeit des linearen Schadenakkumulationsmechanismus voraus.

5 Zusammenfassung

Im Beitrag wird in das *SRCE*-Konzept kurz eingeführt und die Realisierung der Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen vorgestellt. Die Online-Bestimmung der lebensdauer- und belastungsorientierten Kenngrößen ist das zentrale Modul innerhalb des *SRCE*-Konzeptes.

Zur Realisierung des *SRCE*-Konzeptes ist die laufende Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngrößen des betrachteten Systems notwendig. Die klassischen Größen der Zuverlässigkeitstechnik sind hierzu nicht geeignet, da sie keine Möglichkeiten bieten, sowohl die Belastungsgeschichte als auch die aktuelle Belastung zu berücksichtigen.

Im Beitrag werden daher belastungs- und lebensdauerabhängige Ausfallraten definiert, welche die aktuellen Beanspruchungen eines Systems mit einer individuellen Beanspruchungsgeschichte beschreibt. Hierzu ist die Kenntnis eines Abnutzungs- bzw. Schadenmechanismus sowie eines Schadenakkumulationsmechanismus notwendig. Auf Basis der Definition eines abstrakten Schadens lassen sich belastungsspezifische Schadenbeiträge im Laufe der Belastungsgeschichte zum aktuellen Schaden / zur aktuellen Abnutzung akkumulieren. Im Beitrag werden die grundsätzlichen Beziehungen allgemein erklärt und als Nutzungskenngröße die belastungs- und lebensdauerorientierte Ausfallrate dargestellt. Die ausführliche Herleitung findet sich in /4/. Auf Basis derartiger beanspruchungs- und lebensdauerorientierter Kenngrößen lassen sich aufsetzende Regelungs- oder Überwachungsstrategien realisieren, was eine weitergehende Formalisierung der Anlagenführung erlaubt.

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.: Überwachung, Diagnose und lebensdaueroptimierte Betriebsführung schwingungsfähiger Maschinen - Teil 1: Prinzipvergleich bestehender modellgestützter und signalanalytischer Verfahren am Beispiel der Wellenrissdetektion bei Turborotoren, VDI-Schwingungstagung, Mai 1999.
- /3/ 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, 1997, pp. 625-637.
- /4/ Söffker, D.: Zur Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen innerhalb des SRCE-Konzeptes. at-Automatisierungstechnik, 1998, angenommen.
- /5/ Ramakumar, R.: Engineering Reliability: Fundamentals and Applications. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1993.
- /6/ Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991.
- /7/ Gnilke, W.: Lebensdauerberechnung der Maschinenelemente. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1980.
- /8/ Palmgren, A.: Grundlagen der Wälzlagertechnik. 3. Auflage, Frank'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1964.
- /9/ Miner, M.A.: Cumulative Damage in Fatigue. ASME Journal of Applied Mechanics, 12 (1945), Heft 3, 1945, pp. A-159 - A-164.
- /10/ Ushakov, I.A.: Handbook of Reliability Engineering. John Wiley, New York, 1994.

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.