

Zur Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen innerhalb des *SRCE*-Konzeptes

Online-Determination of Reliability Characteristics as a Modul of the *SRCE*-concept

Dirk Söffker, Bergische Universität-GH Wuppertal

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Peter C. Müller, zur Vollendung seines 60. Lebensjahres gewidmet

Im Beitrag wird die Realisierung der Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen innerhalb des *Safety Reliability and Control Engineering* Konzeptes (*SRCE*) vorgestellt. Das *SRCE*-Konzept hat das Ziel, Nutzungs- und Zuverlässigkeitseigenschaften dynamischer Systeme zu überwachen und zu regeln. Eine derartige Regelung beinhaltet daher die Verknüpfung klassischer (direkt messbarer, physikalischer) Größen mit nicht direkt messbaren, nicht physikalischen technischen Kenngrößen innerhalb des Regelkreises.

Zur Realisierung des Konzeptes ist die laufende Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngrößen des betrachteten Systems notwendig. Hierzu werden im Beitrag Ausfallraten definiert, welche die aktuelle Beanspruchung und die Beanspruchungsgeschichte des Systems berücksichtigen. Auf Basis derartiger beanspruchungs- und lebensdauerorientierter Kenngrößen lassen sich aufsetzende Regelungs- oder Überwachungsstrategien in zahlreichen Anwendungsfeldern der Automatisierungstechnik realisieren.

Die Vorgehensweise wird am praktischen Beispiel der Überwachung eines Kfz-Reifens demonstriert.

The contribution introduces the realization of the online-determination of reliability characteristics as a modul of the *SRCE*-concept. The idea of the *SRCE*-concept is the observation and supervision of reliability characteristics of dynamic systems.

The contribution contents the development of failure rates, which depend on the stress and the stress-history of a system. The proposed failure rates can be used for control or supervision purposes in several applications of the automation control and engineering fields.

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, er-

folgt entweder eine Betriebsunterbrechung oder eine Leistungsreduktion bis zur eindeutigen Bestimmung der Ursache des Fehlverhaltens und der Einschätzung seiner Folgen aus Sicht der vorgenannten Kriterien.

In [1; 2] wurde eine theoretische Konzeption vorgestellt, die zum Ziel hat, Sicherheits- und Zuverlässigkeitskenngrößen eines realen, gealterten, modifizierten und durch Schäden gegenüber seinem Auslegungszustand veränderten Systems zu regeln resp. zu überwachen. Ein schematischer Überblick ist in Bild 2 angegeben. Die Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen wie z.B. Ausfallwahrscheinlichkeiten und Ausfallraten von Komponenten, Mo-

dulen oder Systemen ist Aufgabe der quantitativen Methoden der Technischen Zuverlässigkeit. Da die Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen im Allgemeinen vor Inbetriebnahme des Systems erfolgt, erfassen die Kenngrößen nicht die durch die Unterschiede zwischen dem prognostizierten Belastungsverlauf und dem wirklichen Belastungsverlauf entstehenden Abweichungen [2].

Das in [1; 2] vorgeschlagene Konzept beinhaltet die Realisierung eines Regelkreises zur Regelung der Sicherheits- und Zuverlässigkeitskenngrößen eines technischen Systems. Nach [2] sind die Störgrößen eines derartigen Regelkreises Alterungseinflüsse, auftretende Schädigungen und unter Umständen die vorgegebenen Sollwerte der technischen Regelung. Die Kompensation der Auswirkungen der Schädigungen soll durch Einflussnahme auf die Betriebsparameter, durch Restrukturierung des Systems oder durch den steuerbaren Einfluss von Instandsetzungs- und Wartungsmaßnahmen erfolgen.

Die zuverlässigkeitstechnischen Größen Ausfallrate $h(t)$, Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ sowie Überlebenswahrscheinlichkeit/Zuverlässigkeit $R(t)$ beschreiben das Ausfallverhalten eines technischen Systems. 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 beschreibt wahr-scheinlichkeitstheoretisch 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 Erläuterungen finden sich z.B. in [3; 4]. Wie aus der kurzen Darstellung deutlich wird, beschreiben die zuverlässigkeitstechnischen Kenngrößen das Ausfallverhalten des betrachteten Systems als Funktion der Zeit. Werden die experimentell ermittelten Verläufe $h(t)$, $R(t)$ und $F(t)$ zur wahrscheinlichkeitstechnischen Beschreibung einzelner Systeme herangezogen, werden indirekt verschiedene Voraussetzungen getroffen:

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

Insbesondere der letztgenannte Aspekt lässt sich nicht immer realisieren, z.B. wenn sich die Belastungsverläufe auf

Grund der technischen Funktion des Systems nicht im Voraus bestimmen lassen.

Um die angerissene Problematik zu entschärfen, werden beispielsweise in [4] sogenannte π -Faktoren eingeführt, die die gegenüber dem Auslegungszustand veränderten Belastungsbedingungen und deren Einfluss auf die Ausfallrate berücksichtigen sollen. So werden beispielsweise für elektronische Bauteile mit $\pi_E, \pi_Q, \pi_T, \pi_V, \pi_L$ die Einflüsse der Umweltbedingungen, der Fertigungsqualität, der Bauteiltemperatur und der Technologie, der Spannungsbelastung sowie der Reife des Herstellungsprozesses berücksichtigt. Zusätzliche Faktoren $C_{1,2}$ sollen die Beschreibung von Einflüssen auf Grund der Komplexität und der Zahl der Pin-Anschlüsse erlauben. Die modifizierte Ausfallrate $h_{\text{mod}}(t)$ wird dann beispielsweise durch

$$h_{\text{mod}}(t) = \pi_Q \pi_L (C_1 \pi_T \pi_V + C_2 \pi_E) h(t) \quad (3)$$

beschrieben. Da $h(t)$, $R(t)$ und $F(t)$ für ein betrachtetes System als feststehende Zeitfunktionen wahrscheinlichkeitstechnische Größen beschreiben, gibt es keine weiteren Einflüsse auf diese Größen und damit auch keine Möglichkeit, den Zeitverlauf zu verändern. Die genannte Einführung von Belastungsfaktoren π_x ändert nicht die aus der Definition der Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen in der Entwicklungsphase resultierende Problematik.

Mit der Annahme, dass die realen Belastungsverläufe von den für die Bestimmung der klassischen zuverlässigkeitstechnischen Kenngrößen vorausgesetzten Belastungsverläufen abweichen und einen signifikanten Einfluss auf das Ausfallverhalten eines technischen Systems haben, lässt sich schlussfolgern, dass dann die klassischen zuverlässigkeitstechnischen Größen $h(t)$, $R(t)$ und $F(t)$ nicht zur Beschreibung der aktuellen, die gesamte Belastungsgeschichte des Systems berücksichtigenden Kenngrößen geeignet sind. Da die Größen in keiner Weise veränderlich sind, können sie auch nicht die regelungstechnische Betrachtungs- und Beschreibungsgrundlage einer *SRCE*-Konzeption nach [2] sein.

Die Beschreibung der Belastungseinflüsse auf nutzungsrelevante und weitere Kenngrößen (N_{kg}) und die Bestimmung der aktuellen Kenngrößen (Online-Bestimmung) bei beliebigen (belastungstechnischen) Vergangenheiten des betrachteten Systems sind daher direkt miteinander verknüpft. Die Entwicklung einer anderen Beschreibungsgrundlage kann daher Grundlage aufbauender Regelungs- oder Überwachungskonzeptionen sein und als Berechnungsmodul zentraler Bestandteil der *SRCE*-Konzeption werden. Die verschiedenen Möglichkeiten, aus den zur Verfügung stehenden Messdaten des technischen Systems Zuverlässigkeits- oder allgemeiner Nutzungskenngrößen zu bestimmen, sind in Bild 1 dargestellt und in [1; 2] erläutert.

Die Bestimmung geeigneter Nutzungskenngrößen aus Messdaten kann direkt oder durch Umrechnung über Prozessgrößen und Beanspruchungsgrößen erfolgen. Die Nutzung regelungstechnischer Methoden (Beobachter, Verfah-

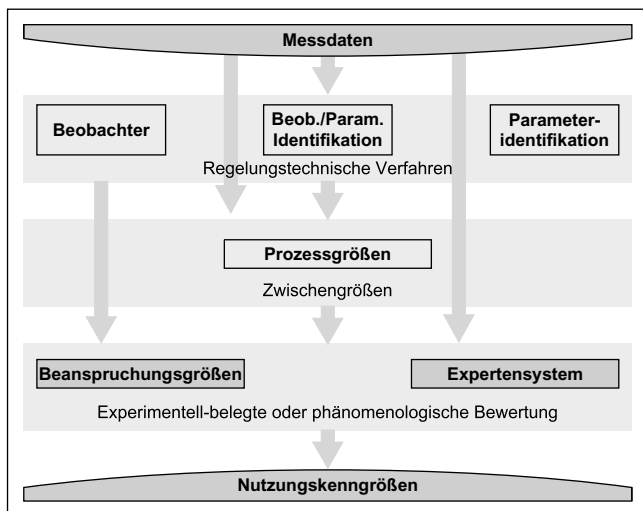


Bild 1: Von den Messdaten zu den Nutzungskenngrößen (nach [2] verallgemeinert).

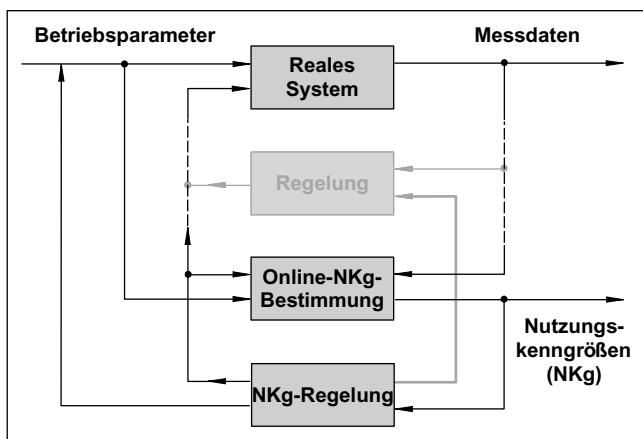


Bild 2: Schematischer Aufbau des SRCE-Konzeptes (nach [2] modifiziert).

ren der Parameteridentifikation oder kombinierte Verfahren) erlaubt gegebenenfalls die Bestimmung notwendiger, aber nicht direkt messbarer Zwischengrößen. Alternativ zum klassischen, im Wesentlichen auf experimentell bestätigten Zusammenhängen aufbauenden Pfad (Messgrößen → Beanspruchungsgrößen → Nutzungskenngrößen) kann auch über phänomenologisch beobachtete und auf Basis anerkannter Methoden geschätzte Zusammenhänge unter Nutzung von Experten(-systemen) vorgegangen werden.

Die in diesem Beitrag vorgeschlagene Methodik fasst die zeitvariablen Belastungen und resultierenden Beanspruchungen als Ursache für Abnutzungsprozesse auf. Diese führen zum Aufbrauchen des Nutzungsvorrates und schließlich zum Verlust der Funktionsfähigkeit, also letztlich zum Ausfall des betrachteten Systems (Begriffe nach DIN 31051 – Instandhaltung).

Die zuverlässigkeitstechnischen Kenngrößen lassen sich dann auch als Nutzungskenngrößen (NKg) begreifen.

2 Online-Bestimmung der Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen

Wesentlicher Bestandteil einer SRCE-orientierten Überwachung und Regelung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen ist die Entwicklung geeigneter Betrachtungsweisen zur Bestimmung äquivalenter Kenngrößen, wie sie in den folgenden Abschnitten vorgeschlagen wird.

2.1 Belastungsabhängigkeit der Lebens- oder Nutzungsdauer

Der Zusammenhang zwischen äußerer Belastung B und Lebens- bzw. Nutzungsdauer LD lässt sich empirisch bestimmen und sei wie in Bild 3 grafisch dargestellt angenommen.

Die Kurven in Bild 3 unterscheiden sich durch die Überlebenswahrscheinlichkeit R , wobei für die nachfolgenden Betrachtungen $R_1 > R_2 > R_3$ gilt, und die Stetigkeit der Verläufe vorausgesetzt wird. Das klassische Beispiel für derartige Darstellungen ist das sogenannte Wöhler-Diagramm [5], das die Biegewechselfestigkeit mechanischer Bauteile als Belastungsparameter als Funktion der Zahl der Lastspiele wiedergibt.

Die grafisch dargestellten Verhältnisse beschreiben das Ausfallverhalten von Elementen / Komponenten / Systemen einer betrachteten Grundgesamtheit als Funktion des Belastungsparameters (Zahl der Belastungswechsel, Lebenszeit, Laufleistung).

2.2 Schädigungsmechanismus und Schadenakkumulation

Aus dem in Bild 3 dargestellten Verlauf lässt sich eine Abhängigkeit der Nutzungsdauer LD von der (abstrakten) Belastung B erkennen. Die Idee der Schadenakkumulation besteht darin, jeder Nutzung einen belastungsabhängigen Verbrauch des Nutzungsvorrates zuzuschreiben. Komplementär zum Nutzungsvorrat lässt sich die Abnutzung bzw. der abstrakte Schaden modellieren, wie dies Palmgren für Wälzlagerberechnungen 1920 [6] und in allgemeinerer Form Miner 1945 [7] bereits dargestellt haben.

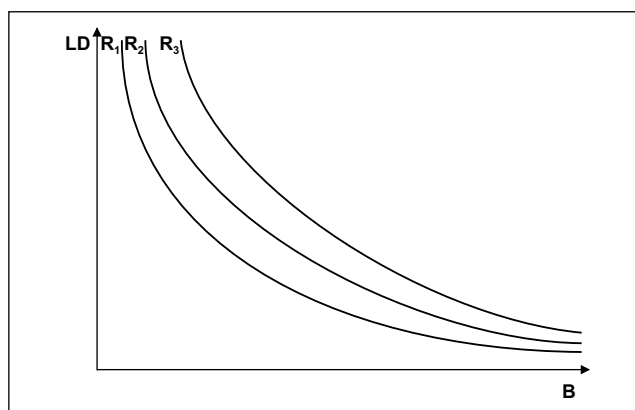


Bild 3: Angenommener prinzipieller schematischer Zusammenhang zwischen Belastung B – Lebens-/Nutzungsdauer LD – Überlebenswahrscheinlichkeit R .

Der Ansatz von Miner wird hier so verstanden, dass ein abstrakter skalarer Schaden S mit den nachstehend beschriebenen Eigenschaften formuliert wird [5]:

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

Die Koinzidenz des Ereignisses $S(t) = 1$ mit dem Ausfall des Systems ist über empirisch zu bestimmende, wahrscheinlichkeitstechnische Zusammenhänge gegeben.

Mit Hilfe

- eines Zusammenhanges zur Beschreibung der Schädigung s_i der betrachteten (und hier als zeitdiskret angenommenen) i -ten Nutzung und
- eines Ansatzes zur Akkumulation der einzelnen Schädigungen s_j , mit $j = 1..i$

lässt sich eine Bestimmung des akkumulierten aktuellen Schadens $S(t)$ bzw. des verbleibenden Nutzungsvorrates

$$N(t) = 1 - S(t) \quad (4)$$

für diskrete Nutzungszeitpunkte t_i vornehmen. Beide Vorgänge sind prinzipiell unabhängig voneinander.

Der aktuelle Schadenbeitrag s_i kann beispielsweise

- abhängig von der Größe des schon eingetretenen Schadens $S(t)$,
- abhängig von der Entwicklungsgeschwindigkeit $\frac{dS(t)}{dt}$ sowie
- in sonstiger Weise mit Parametern verknüpft sein.

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

$$s_i = f(B_i, ld_i) \quad (5)$$

abhängig ist, führt zu einem (einfachen) linearen Schädigungsmechanismus.

Mit der Annahme, dass der i -te Schadenbeitrag unabhängig vom akkumulierten Schaden ist, lässt sich der i -te Schadenbeitrag auf Grund der zugehörigen Belastung B_i bestimmen. Wie in Bild 4 dargestellt, lässt sich aus den empirisch bestimmten Gesetzmäßigkeiten (Bild 3) für eine über die gesamte Lebensdauer als konstant angenommene Belastung B_i die zugehörige theoretische Nutzungsdauer LD_i ablesen. Entsprechend den dem betrachteten System zuzuordnenden Verhältnissen der Überlebenswahrscheinlichkeiten R_1, R_2, R_3 ergeben sich an die jeweilige Überlebenswahrscheinlichkeit geknüpfte theoretische Nutzungsdauern $LD_{i,R_1}, LD_{i,R_2}, LD_{i,R_3}$.

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

$$s_{i,R_x} = \frac{ld_i}{LD_{i,R_x}(B_i)} \quad (6)$$

bestimmen.

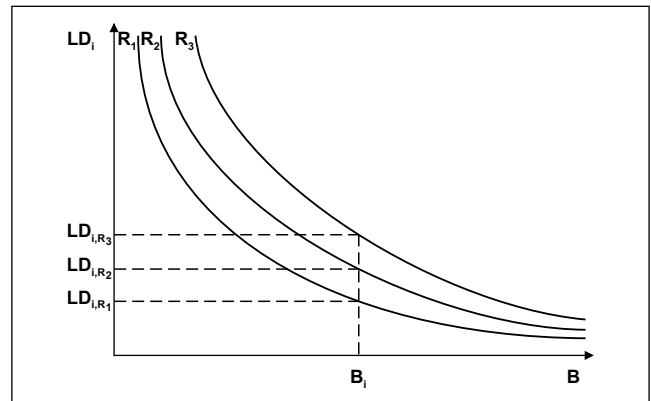


Bild 4: Abhängigkeit der Nutzungsdauer von der Überlebenswahrscheinlichkeit.

Die einzelnen belastungsabhängigen Beiträge lassen sich dann zum abstrakten Schaden

$$S_{R_x}(B(t)) = \sum_{i=1}^k s_{i,R_x}(B_i(t)) \quad (7)$$

addieren, welcher auf Grund der Abhängigkeit der Bezugsgrößen wiederum von der zugrundegelegten Überlebenswahrscheinlichkeit abhängt. Der Parameter k ist dabei der Laufindex der aktuellen und letzten Nutzung.

Ein derartiger Additionsmechanismus wird hier als lineare Schadenakkumulation bezeichnet. Er wird in der Wälzlager- und Zahnradberechnung üblicherweise benutzt, obwohl er wissenschaftlich nicht ausreichend begründet ist [5]. Da der Schadenakkumulationsmechanismus unabhängig vom zugrundeliegenden Schadenmechanismus ist, kann auch ein beliebiger anderer Berechnungsmechanismus verwendet werden. Die Gültigkeit des Akkumulationsmechanismus kann nur durch experimentelle Validierung gesichert werden. Die vorliegenden Grundsatzbetrachtungen sind unabhängig vom verwendeten Akkumulationsmechanismus.

2.3 Belastungs- und lebensdauerabhängige Kenngrößen

Der aktuelle zuverlässigkeitstechnische Zustand eines betrachteten Systems wird unter Zugrundelegung der vorgenannten Ausführungen 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. Die in Bild 5 gegebene Darstellung ist prinzipiell – da auf den gleichen empirischen Auswertungen beruhend – identisch zu denen der Bilder 3 und 4. Ausgehend von der Gültigkeit des linearen Schadenakkumulationsmechanismus lässt sich das zugrundeliegende Datenmaterial erneut in Verknüpfung mit der aktuellen Schädigung S_{akt} verwenden.

Zusätzlich ist nun neben der Nutzungsdauer LD der abstrakte Schaden S aufgeführt. Der durch die aktuelle Nutzungsdauer LD_{akt} in der Skalierung der Nutzungsdauer de-

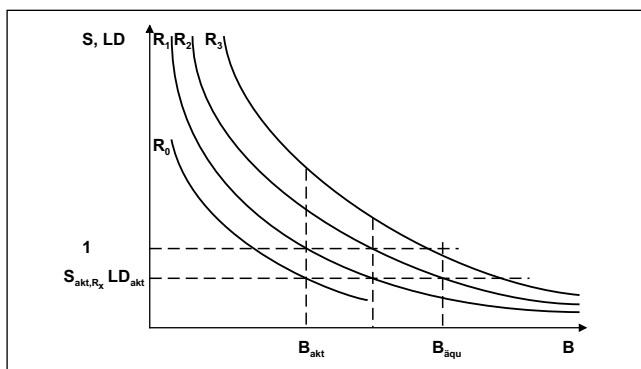


Bild 5: Beschreibung des aktuellen belastungs- und lebensdauerabhängigen Nutzungszustandes.

finierte Ordinatenabschnittspunkt bestimmt die Skalierung des abstrakten Schadens, da die aktuelle Nutzungsdauer und der aktuelle Schaden den gleichen Zustand des betrachteten Systems beschreiben. Entsprechend der Skalierung ergibt sich damit auch der Ordinatenabschnittspunkt für den abstrakten Schaden $S = 1$, also den Ausfall des Systems. Für die nachfolgenden Darstellungen gilt, dass die getroffenen Aussagen nur mit der Wahrscheinlichkeit der zugrundeliegenden Überlebenswahrscheinlichkeit R_x wahr sind.

In der Darstellung von Bild 5 ist die zugrundeliegende Überlebenswahrscheinlichkeit R_2 .

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

Aus der Darstellung lassen sich verschiedene zentrale Beziehungen ableiten.

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 funktionstüchtig ist, im nächsten Moment ausfällt.

Auf Grund der eingeführten Belastungsabhängigkeit sowie des Schadenakkumulationsmechanismus ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der Definition ausfallratenäquivalenter Größen. Hier wird zunächst nur die Definition einer belastungs- und lebensdauerabhängigen Ausfallrate entwickelt.

2.3.1 Belastungs- und lebensdauerabhängige Ausfallrate

Eine zur klassischen Ausfallrate der Zuverlässigkeitstechnik analoge Größe lässt sich auf Basis der in Bild 5 wiedergegebenen Zusammenhänge nicht direkt bilden, da die hierzu vorausgesetzte rein zeitliche Abhängigkeit der Überlebenswahrscheinlichkeit durch Abhängigkeiten von Nutzungsdauer LD und Belastungsparameter B ersetzt wurde.

In Bild 6 sind die Zusammenhänge von Bild 5 auf ein R, S Diagramm übertragen.

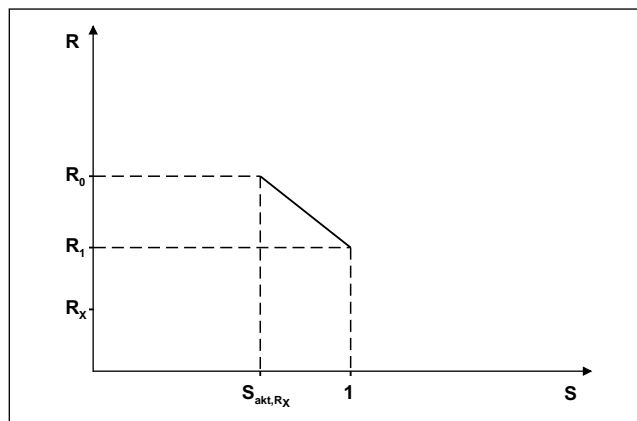


Bild 6: Ableitung der Ausfallrate bezogen auf die aktuelle Belastung.

Eine analoge Definition der Ausfallrate bezogen auf die aktuelle Belastung B_{akt} und den aktuellen Schaden S_{akt} lässt sich unter Nutzung der in Bild 6 dargestellten Zusammenhänge durch

$$h_{BS}(B_{akt}, S_{akt}) = - \frac{\partial R(B_{akt})}{\partial S} \frac{1}{R_{akt,x}(B_{akt})} \quad (8)$$

$$= - \frac{\partial R(B_{akt})}{\partial S} \frac{1}{R_x} \quad (9)$$

$$= - \left(\frac{R_1(B_{akt}, S_{R_x} = 1) - R_0(B_{akt}, S_{akt, R_x})}{(1 - S_{akt, R_x})R_x} \right) \quad (10)$$

definieren. Für den konkret in Bild 6 dargestellten und aus Bild 5 abgeleiteten Zusammenhang ergibt sich (wenn $R_x = R_2$):

$$h_{BS}(B_{akt}, S_{akt}) = - \left(\frac{R_1(B_{akt}, S_{R_2} = 1) - R_0(B_{akt}, S_{akt, R_2})}{(1 - S_{akt, R_2})R_2} \right). \quad (11)$$

Die in Bild 6 beispielhaft dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen, dass die Ausfallrate $h_{BS}(B_{akt}, S_{akt})$

- notwendigerweise von dem aktuellen Schaden S_{akt} und der damit verknüpften aktuellen Nutzungsdauer LD_{akt} abhängt,
- mit wachsendem Schaden S_{akt} zunimmt,
- mit wachsender Differenz $R_1(B_{akt}, S = 1) - R_0(B_{akt})$ zunimmt und
- wie die klassische Ausfallrate mit der Überlebenswahrscheinlichkeit verknüpft ist.

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

Die in den Gleichungen (8–11) formulierte Ausfallrate ist auf die den Berechnungs- und Akkumulationsmechanismen der Gleichungen (6, 7) zugrundeliegenden Überlebenswahrscheinlichkeiten R_x (hier als R_2) bezogen. Auf Grund der zusätzlichen Freiheitsgrade bei der Definition der Ausfallrate ist alternativ auch ein Bezug auf die durch die aktuelle Belastung und den aktuellen Schaden be-

stimmt Überlebenswahrscheinlichkeit möglich, was zur Definition einer zweiten, modifizierten Ausfallrate führt:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_{BS}(B_{akt}, S_{akt}) &= \\ &= -\frac{\partial R(B_{akt})}{\partial S} \frac{1}{R_{akt,x}(B_{akt})} \end{aligned} \quad (12)$$

$$= -\frac{\partial R(B_{akt})}{\partial S} \frac{1}{R_x} \quad (13)$$

$$= -\left(\frac{R_1(B_{akt}, S_{R_x} = 1) - R_0(B_{akt}, S_{akt,R_x})}{(1 - S_{akt,R_x})} \right) \frac{1}{R_{akt}(B_{akt}, S_{akt})}. \quad (14)$$

Eine derartige Definition ist beispielsweise Grundlage des in [13] veröffentlichten analogen Rechenbeispiels und führt zu entsprechend modifizierten Ausfallraten.

Die aufgezeigten Beziehungen verdeutlichen auch die Möglichkeit, die Ausfallrate als Regelgröße innerhalb eines *SRCE*-Konzeptes zu nutzen. Für Überwachungsstrategien ist die Bestimmung von $h_{BS}(B_{akt}, S_{akt})$ und ein Vergleich mit Schwell- bzw. Alarmwerten ausreichend. Für Regelungsstrategien lässt sich für den „Stellmechanismus“ die Beziehung

$$\frac{\partial R(B_{akt})}{\partial S} \quad (15)$$

auf Grund ihrer direkten Abhängigkeit von der aktuellen Belastung B_{akt} nutzen. Die Regelung der Zuverlässigkeits- und Nutzungsgrößen wird dann auf Basis der gegebenen und als bekannt vorausgesetzten Kennlinienfelder durch Verknüpfung von Beanspruchung bzw. äußerer Belastung und Ausfallrate realisierbar.

Unter Verwendung der in Bild 6 dargestellten Zusammenhänge bedeutet dies die Beeinflussung der Ausfallrate durch die Beeinflussung der Größe $(R_1(B_{akt}, S_{R_x} = 1) - R_0(B_{akt}, S_{akt,R_x}))$ durch Veränderung von B_{akt} , da die anderen Größen des Ausdrucks zur Bestimmung des Gradienten festgelegt sind.

Die anhand der Darstellung in Bild 6 unter Nutzung eines Differenzenquotienten erfolgte Bestimmung der Ausfallrate $h_{BS}(B_{akt}, S_{akt})$ setzt die Kenntnis der Abhängigkeiten der Überlebenswahrscheinlichkeiten von den Belastungen z.B. als Kennlinienfeld, wie in Bild 7 dargestellt, voraus. Die Nutzung eines derartigen Kennlinienfeldes auf Basis klassischer Ausfallversuche erfordert wiederum die Gültigkeit des linearen Schadenakkumulationsmechanismus.

Der für eine Regelung der Ausfallrate relevante Zusammenhang wird durch den Gradienten

$$\frac{\partial h_{BS}(B_{akt}, S_{akt,R_x})}{\partial B} \Big|_{B_{akt}} \quad (16)$$

bestimmt und wie in Bild 8 als Differenzenquotient dargestellt angenommen.

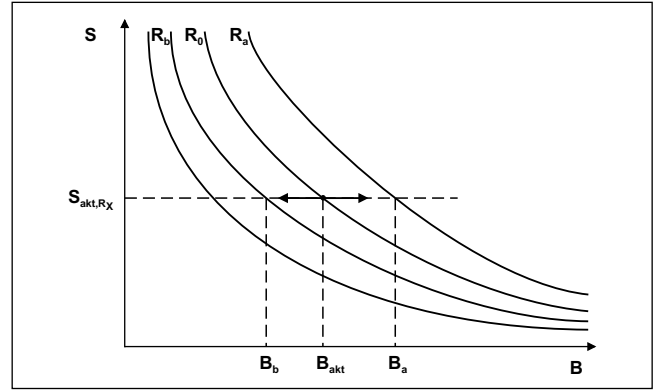


Bild 7: Kennlinienfeld der belastungsabhängigen Überlebenswahrscheinlichkeiten.

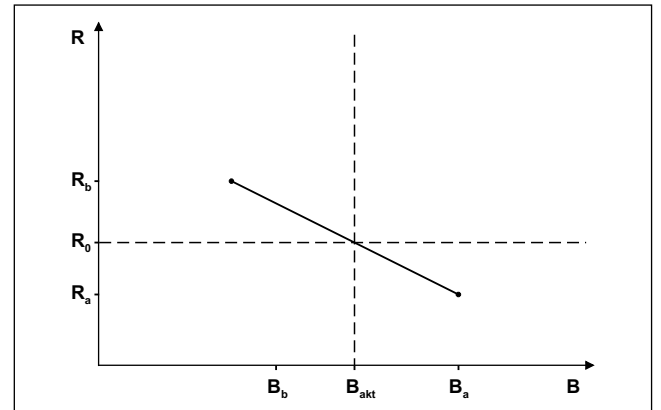


Bild 8: Gradient $\frac{\partial R(S_{akt,R_x})}{\partial B} \Big|_{B_{akt}}$ als Differenzenquotient.

Für die konkrete Situation (Bild 8) unter Verwendung des aus dem Kennlinienfeld resultierenden Differenzenquotienten ergibt sich für die Bestimmung der äußeren Belastung B zur Realisierung der Sollausfallrate $h_{BS,soll}$

$$B = (R_1 - h_{BS,soll}(R_2(1 - S_{akt}))) \left(\frac{B_a - B_b}{R_a - R_b} \right). \quad (17)$$

Wie ersichtlich, lässt sich in gewissen Grenzen die Belastung als Funktion der Ausfallrate $h_{BS}(B, S_{akt})$ begreifen und damit beeinflussen.

2.3.2 Alternative Nutzungskenngrößen

Auf Grund der gegenüber den klassischen Betrachtungen komplexeren Zusammenhänge, welche durch die Berücksichtigung der Abhängigkeiten von der aktuellen Belastung und der Belastungsgeschichte entstehen, lassen sich weitere Kenngrößen definieren und als Betrachtungsgrundlage von Bewertungs-, Überwachungs- und Regelungsstrategien verwenden.

2.3.3 Bewertung

Der vorgeschlagene Weg skizziert erstmalig die Online-Bestimmung von belastungs- und lebensdauerabhängigen Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen. Der Online-Bestimmung der Kenngrößen kommt innerhalb des *SRCE*-Konzeptes nach [2] eine zentrale Bedeutung zu. Die Ablei-

Die Kenntnis eines für das betrachtete System gültigen Schadengesetzes und Schadenakkumulationsmechanismus voraus. Insbesondere aus den Darstellungen zur Ableitung der belastungs- und lebensdauerabhängigen Ausfallrate wird deutlich, dass die Kenntnis und Gültigkeit des zugrundeliegenden Kennlinienfeldes (vgl. Bild 5) zur Beschreibung der Beziehungen zwischen Überlebenswahrscheinlichkeiten, Belastungen und vorhandenem Schaden zwingend notwendig ist und wesentlich die Zusammenhänge bestimmt.

Der hierfür notwendige versuchstechnisch experimentelle Aufwand muss mit den neu gewonnenen Möglichkeiten abgewogen werden. Sicherlich wird dieses bei sicherheitstechnisch bedeutsamen technischen Systemen bzw. bei Systemen mit großem Investitionsvolumen anders zu bewerten sein als beispielsweise bei Konsumartikeln.

2.4 Gesamtkonzept

Das *SRCE*-Gesamtkonzept wurde bereits in [2] vorgestellt. Als akademisches Beispiel wurde dort die Überwachung eines angerissenen Turbinenläufers dargestellt. Der Kern des Konzeptes, die Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- oder Nutzungskenngrößen, wurde konzeptionell vorgestellt. Die konkrete Durchführung ist problemabhängig und wurde ausgespart. Im vorliegenden Beitrag wird eine Strategie zur Lösung der Aufgaben dieses zentralen Moduls vorgestellt.

3 Beispiel: Überwachung eines Kfz-Reifens

Das nachstehende Beispiel der Überwachung eines Kfz-Reifens wurde im Rahmen der Arbeit [8] vorbereitet. Die Nutzbarkeit eines Kfz-Reifens wird wesentlich durch verschiedene Belastungsgrößen bestimmt. Bei den hier zugrundeliegenden Betrachtungen werden äußere Schäden, z.B. durch schlagartige und punktuelle mechanische Beanspruchungen, welche zu anomalen Beanspruchungen führen, ausgeschlossen. Betrachtet werde der bestimmungsgemäße Gebrauch eines Kfz-Reifens bis zum Ausfall durch Defekt. Die beschreibende Größe ist die Laufleistung *LL*.

Die Funktionserfüllung des Reifens wird nur als durch den Defekt beeinflusst, nicht aber als abhängig von der aktuellen Laufleistung bzw. der (unbekannt) verbleibenden Laufleistung angenommen. Auf diese Weise kann die in Abschnitt 2.2 hergestellte Verknüpfung zwischen Funktionsfähigkeit bis zum Ausfall bei gleichzeitig kontinuierlichem Verbrauch des Nutzungsvorrates hergestellt werden.

Die verbleibenden Einflussgrößen auf die Laufleistung sind die Geschwindigkeit *V*, der Reifendruck *P*, die Radlast *A* sowie die Umgebungstemperatur *T_u*. Die prinzipiellen Zusammenhänge sind in Bild 9 dargestellt und in der einschlägigen Literatur (z.B. [9; 10; 11]) detailliert dokumentiert.

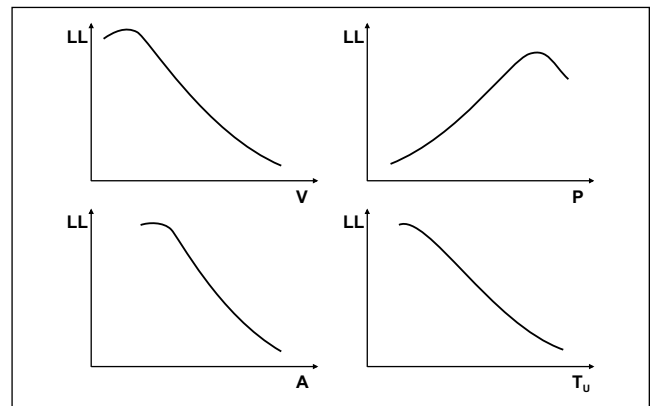


Bild 9: Prinzipielle Abhängigkeiten zwischen Belastung und Laufleistung *LL*.

Die einzelnen Belastungen wirken in bestimmten Abhängigkeiten voneinander auf die Laufleistung ein. Die Geschwindigkeit *V* hat in Abhängigkeit von der Einsenkung *E* des Reifens Einfluss auf die resultierende Reifenschultertemperatur *T_R*. Die Einsenkung *E* ist abhängig von Luftdruck *P* und Radlast *A*. Die auf Grund der verschiedenen Belastungen im stationären Beanspruchungszustand resultierende Reifenschultertemperatur *T_R* ist ebenfalls abhängig von der Umgebungstemperatur *T_u*. Die resultierende Reifenschultertemperatur *T_R* steht mit der Laufleistung *LL* in einem direkten Verhältnis.

Nach [8] lässt sich mit Hilfe der Beziehung

$$T_R = \frac{2}{3} T_u + (V - 20) E \cdot F \quad (18)$$

eine grobe Näherung für den resultierenden Beanspruchungsparameter Reifenschultertemperatur *T_R* angeben. Hierbei stellt *F* eine reifenspezifische Konstante dar.

Auf Basis der resultierenden Beanspruchungsgröße *T_R* lässt sich nun der in Bild 10 wiedergegebene Zusammenhang zwischen der Laufleistung *LL* (in Kilometern) und der Reifenschultertemperatur (in Grad Celsius) nutzen. In Bild 10 ist für einen ausgewählten Reifentyp die Abhängigkeit der Laufleistung *LL* von der Reifenschultertemperatur *T_R* wiedergegeben. Die Normprüfbedingungen (*V* =

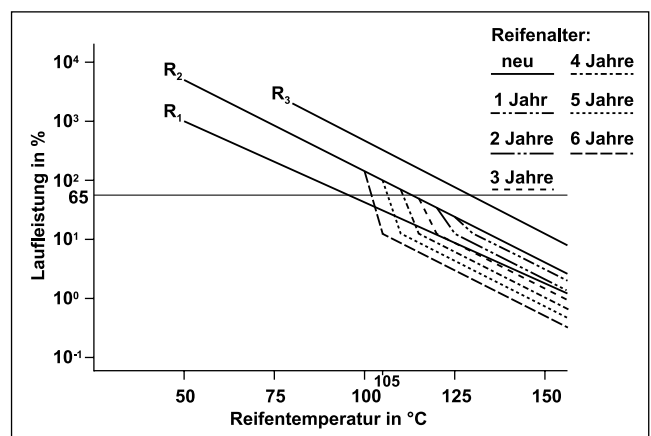


Bild 10: Einfluss der Reifentemperatur auf die Laufleistung (modifiziert nach [12], übernommen aus [8]).

160 km/h, $A = 475$ kg, $P = 2,0$ bar, $T_R = 105$ Grad) repräsentieren den 100 % Wert der Laufleistung [1; 2]. In Kombination mit einem ebenfalls in [1; 2] angegebenen Zusammenhang bezüglich der Laufleistung LL von älteren Reifen stellt das Bild 10 die Grundlage der nachfolgenden Berechnungen dar.

Mit der Annahme, dass der in Bild 10 dargestellte Zusammenhang ein empirisch bestimmter, statistischer Zusammenhang ist, lässt sich der angegebenen und abgesicherten Funktion (R_2) eine experimentell zu bestimmende Überlebenswahrscheinlichkeit zuordnen, welche hier mit $R_2 = 0,5$ angenommen werde. Eine zweite Kurve konstanter Überlebenswahrscheinlichkeit R_1 verbinde die Punkte (LL = 1000 %, $T_R = 50$ Grad) und (LL = 0,1 %, $T_R = 195$ Grad), eine dritte Kurve konstanter Überlebenswahrscheinlichkeit R_3 verbinde die Punkte (LL = 2000 %, $T_R = 80$ Grad) und (LL = 1 %, $T_R = 185$ Grad). Als Zahlenwerte werden $R_1 = 0,75$ und $R_3 = 0,25$ angenommen.

Aufgabe weiterer Reifenprüfversuche wäre es, das die gesicherte Kennlinie R_2 umgebende Kennlinienfeld zu bestimmen. Für das hier betrachtete Rechenbeispiel zur Verdeutlichung der Vorgehensweise werde die Existenz eines solchen Kennlinienfeldes wie beschrieben angenommen und der Einfachheit halber eine Nutzung als Neureifen unterstellt.

Rechenbeispiel:

Der angegebene Reifen habe eine Laufleistung unter Normbedingungen von 100 000 Kilometern.

Es werden zunächst 2 Nutzungen mit den resultierenden Beanspruchungen T_R vorgenommen:

1. Nutzung: 20 000 Kilometer mit $T_R(1) = 120$ Grad
2. Nutzung: 40 000 Kilometer mit $T_R(2) = 85$ Grad

Die durch (*) gekennzeichneten Größen sind geschätzte Größen.

Unter den genannten Voraussetzungen ergeben sich für die jeweiligen Schadenbeiträge:

1. Nutzung:

$$s_{1,R_2} = \frac{ld_i}{LD_i(T_R(1), R_2)} = \frac{20\,000}{0,33 \cdot 100\,000} = 0,60 \quad (19)$$

2. Nutzung:

$$s_{2,R_2} = \frac{ld_i}{LD_i(T_R(2), R_2)} = \frac{40\,000}{3,7 \cdot 100\,000} = 0,11 \quad (20)$$

Die Ausfallrate zu verschiedenen Zeitpunkten berechnet sich wie folgt:

erster Moment der 1. Nutzung:

$$h_{BS}(T_{Rakt}, S_{akt}) = - \frac{(R(T_{Rakt}, S_{R_2} = 1) - R(T_{Rakt}, S_{akt}, R_2))}{(1 - S_{akt, R_2}) R_2} \quad (21)$$

$$= - \frac{(0,33 - 0,9^{(*)})}{(1 - 0)} \frac{1}{0,5} = 1,14 \quad (22)$$

erster Moment der 2. Nutzung:

$$h_{BS}(T_{Rakt}, S_{akt}) = - \frac{(0,75 - 0,85^{(*)})}{(1 - 0,60)} \frac{1}{0,5} = 0,50 \quad (23)$$

letzter Moment der 2. Nutzung:

$$h_{BS}(T_{Rakt}, S_{akt}) = - \frac{(0,75 - 0,825^{(*)})}{(1 - 0,71)} \frac{1}{0,5} = 0,52 \quad (24)$$

Es werden nun 3 Nutzungsalternativen verglichen und die jeweiligen belastungsabhängigen Ausfallraten für den 1. Moment der 3. Nutzung ermittelt:

1. Alternative: $T_{Ra} = 110$ Grad Celsius

$$h_{BS}(T_{Rakt}, S_{akt}) = - \frac{(0,45^{(*)} - 0,525^{(*)})}{(1 - 0,71) 0,5} = 0,51 \quad (25)$$

2. Alternative: $T_{Ra} = 120$ Grad Celsius

$$h_{BS}(T_{Rakt}, S_{akt}) = - \frac{(0,33^{(*)} - 0,525^{(*)})}{(1 - 0,71) 0,5} = 1,34 \quad (26)$$

3. Alternative: $T_{Ra} = 130$ Grad Celsius

$$h_{BS}(T_{Rakt}, S_{akt}) = - \frac{(0,15^{(*)} - 0,525^{(*)})}{(1 - 0,71) 0,5} = 2,58 \quad (27)$$

Aus dem vorstehenden Rechenbeispiel lassen sich verschiedene Aspekte der Vorgehensweise verdeutlichen:

- Die Berechnungsformel (Gl. (11)) betont sehr wesentlich die aktuelle Belastung. Eine stärkere Berücksichtigung auch der Lebensdauer ist durch Gleichung (14) möglich. Im Detail bedeutet dieses abweichende Größen. Weitere Untersuchungen müssen daher sowohl die Sensibilitäten als auch die Qualitäten der unterschiedlichen Vorgehensweisen aufzeigen.
- Die Genauigkeit der Berechnungsmöglichkeiten steigt mit der Größe und der Genauigkeit der Datenbasis der Überlebenswahrscheinlichkeiten. Um auf Basis von Differenzenquotienten genaue Größen zu ermitteln, ist ein engmaschiges Netz experimentell belegter Daten zwingend notwendig.
- Der Übergang von der 2. Nutzung zur 3. Nutzung mit der Alternative $T_{Ra} = 110$ Grad Celsius zeigt, dass trotz zunehmender Beanspruchung die Ausfallrate konstant bleiben würde. Im Rechenbeispiel ist dies auf die „Willkür“ der gewählten Zahlenwerte bzw. der Kennlinien zurückzuführen. Gleichzeitig zeigt dies die Sensibilität der Berechnung auf „falsche“ Daten und die Notwendigkeit einer guten und experimentell abgesicherten Datenbasis auf.
- Es wird deutlich, dass die Belastung durch den resultierenden Beanspruchungsparameter $T_R = 120$ Grad Cel-

sus zu Beginn der Reifennutzung $S = 0,0$ durch eine geringere Ausfallrate charakterisiert wird als im Moment des abstrakten Schadens $S = 0,71$. Dies zeigt die Lebensdauerabhängigkeit der definierten Ausfallrate.

Eine aufsetzende Überwachungsstrategie könnte auf Basis praktischer Erfahrungen die aktuelle Ausfallrate mit zulässigen Maximalwerten vergleichen. Dies beinhaltet, dass alternde Systeme (hier: Reifen) prinzipiell mit immer niedrigeren Belastungen zu betreiben sind. Für das Reifenbeispiel bedeutet dies, dass Reifen mit zunehmendem Alter sensibler für Nutzungen werden, die hohe Beanspruchungen zur Folge haben. Derartige Nutzungen entstehen durch hohe Eindrücke E infolge geringen Luftdruckes P und hoher Lasten A , beziehungsweise durch hohe Fahrgeschwindigkeiten V . Diese Konsequenz deckt sich mit der praktischen Erfahrung [9; 10; 11]. Es ergibt sich allerdings auch die Möglichkeit, z.B. durch Erhöhung des Luftdruckes und damit durch Verringerung der Einsenkung E oder durch das Vermeiden hoher Geschwindigkeiten (vgl. Gleichung 18) trotz hoher Laufleistung einen Fahrbetrieb mit geringeren Ausfallraten zu realisieren und insofern den *SRCE*-Regelkreis zu schließen.

4 Zusammenfassung

Im Beitrag wird die Realisierung der Online-Bestimmung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen innerhalb des *Safety Reliability and Control Engineering* Konzeptes (*SRCE*) vorgestellt. Ziel des *SRCE*-Konzeptes ist die Überwachung und Regelung von Zuverlässigkeits- und Nutzungskenngrößen technischer Systeme. Die Online-Bestimmung der 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 und somit keine entsprechende individuelle zuverlässigkeitstechnische Aussage ermöglichen.

Im Beitrag werden Ausfallraten definiert, welche die aktuelle Beanspruchung und die Beanspruchungsgeschichte des Systems berücksichtigen. Hierzu ist die Kenntnis eines Abnutzungs- bzw. Schadenmechanismus sowie eines Schadenakkumulationsmechanismus notwendig. Der Schadenmechanismus lässt sich auf Basis klassischer zuverlässigkeitstechnischer Betrachtungen unter Berücksichtigung systemindividueller Eigenschaften definieren. Auf Basis der Definition eines abstrakten Schadens lassen sich die belastungsspezifischen Schadenbeiträge im Laufe der Belastungsgeschichte zum aktuellen Schaden bzw. zur aktuellen Abnutzung akkumulieren, welches letztlich den Ausfall des Systems zur Folge hat.

Im Beitrag werden die grundsätzlichen Beziehungen allgemein erklärt und als Nutzungskenngröße die belastungs- und lebensdauerorientierte Ausfallrate hergeleitet.

Auf Basis derartiger beanspruchungs- und lebensdauerorientierter Kenngrößen lassen sich aufsetzende Regelungs- oder Überwachungsstrategien für zahlreiche Anwendungsfelder der Automatisierungstechnik realisieren.

Das *SRCE*-Konzept beinhaltet die Verknüpfung nichtphysikalischer, nicht direkt messbarer technischer Größen – z.B. zuverlässigkeitstechnische Kenngrößen – mit technischen Größen innerhalb eines Regelkreises und kann daher regelungstechnischer Bestandteil von Automatisierungskonzepten sein.

Die Vorgehensweise wird am praktischen Rechenbeispiel der Überwachung eines Kfz-Reifens demonstriert.

Literatur

- [1] 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, Society for Machinery Failure Prevention Technology, 1997, pp. 671–682.
- [2] 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.
- [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] Gnllke, W.: Lebensdauerberechnung der Maschinenelemente. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1980.
- [6] Palmgren, A.: Grundlagen der Wälzlagerentechnik. 3. Auflage, Frank'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1964.
- [7] Miner, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue. ASME Journal of Applied Mechanics, 12 (1945), Heft 3, 1945, pp. A-159–A-164.
- [8] Rinne, M.: Realisierung eines *SRCE*-Konzeptes am Beispiel der Überwachung eines Kfz-Reifens. Studienarbeit, Fachgebiet SRM, BUGH Wuppertal, August 1998.
- [9] Backfisch, K. P.; Heinz, D.: Das Reifenbuch. 2. Auflage, Motorbuchverlag, Stuttgart, 1994.
- [10] Gräter, H.: Service-Fibel Kfz-Räder und -Reifen: Schadensursachen und -erkennung. Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1986.
- [11] Liermann, H.: Reifen- und Kautschuktechnologie im Fahrzeugbereich. Verlag Heinrich Vogel, München, 1985.
- [12] Reimpell, J.; Sponagel, P.: Fahrwerkstechnik: Reifen und Räder, Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1986.
- [13] Söffker, D.; Rinne, M.: The application of the *SRCE*-concept for monitoring high-speed automotive tires. in: Schueller, G. I.; Kafka, P.: Safety and Reliability. Proc. of ESREL '99, München-Garching, September 13–17, 1999, pp. 1083–1089.

Manuskripteingang: 26. Oktober 1998.



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, nichtlineare Modellbildung mechanischer Systeme sowie die Mensch-Maschine Interaktion.

Adresse: Bergische Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstechnische Regelungs- und Messtechnik, Gaußstraße 20, D-42097 Wuppertal,
E-Mail: soeffker@uni-wuppertal.de