

## Intelligente Bauwerke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen

FA 15.508

Forschungsstellen: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin /

Technische Universität München, Fachgebiet Risikoanalyse und Zuverlässigkeit (Prof. Dr. sc. tech. (ETH) D. Straub)

Bearbeiter: Thöns, S. / Schneider, R. / Straub, D. / Fischer, J. / Rücker, W.

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Abschluss: März 2013

### 1 Einleitung

Das Portfolio an Brückenbauwerken, welches als Teil der Verkehrsinfrastruktur eine herausragende gesamtwirtschaftliche Bedeutung einnimmt, wird zunehmend älter, ohne dass die verfügbaren Mittel für den damit verbundenen Unterhalt zunehmen. Eine umfassende Instandhaltungsplanung unter Berücksichtigung individueller Randbedingungen sowie ökonomischer Gesichtspunkte und Nachhaltigkeit ist deshalb eine zentrale Aufgabe des Brückenmanagements. Eine wesentliche Grundlage dafür stellt die zuverlässigkeitsbasierte Zustandsbewertung dar.

Die Verwendung von Inspektions- und Überwachungsdaten in der Bewertung und Zuverlässigkeitsanalyse von Tragwerken ist ein aktuelles Forschungsthema in vielen Ingenieurdisziplinen (Bauingenieurwesen: z. B. Liu et al. (2010), Straub (2009); Luft- und Raumfahrttechnik: z. B. Enright et al. (2006)).

### 2 Untersuchungsmethodik

Das Konzept, welches in diesem Forschungsvorhaben entwickelt wurde, ist in Bild 1 dargestellt.

Das Brückensystem wird durch ein Modell beschrieben. Dieses ist der zentrale Teil des Konzepts. Dieses Modell wird a priori durch die Eingangsdaten (welche etwa die Geometrien, Materialien, Verwendung der Brücke beschreiben) charakterisiert. Aus diesen ergeben sich dann auch die Anfangswerte der Modellparameter.

Das Modell selbst kann in Schädigungsmodelle und ein Tragwerkssystem-Modell unterteilt werden. Diese werden jeweils in den Abschnitten 2.2 und 2.3 dieses Kurzberichts behandelt. Aufgrund der hohen Unsicherheiten in diesen Modellen wird eine probabilistische Modellierung notwendig. Es wird darauf hingewiesen, dass Inspektionen und Überwachungen nur dann Sinn ergeben, wenn Unsicherheiten bestehen. Daher wäre eine deterministische Modellierung für die intelligente Brücke nicht zielführend.

Das Modell liefert eine probabilistische Zustandsbewertung, welche als Grundlage für die Planung von Maßnahmen dienen soll. Diese Zustandsbewertung, welche eine Aussage über den Zustand und die Zuverlässigkeit des Brückensystems und seiner Bauteile gibt, ändert sich kontinuierlich mit der Zeit. Die

daraus folgenden Maßnahmen sind entweder Reparaturmaßnahmen oder – im Falle einer sehr negativen Bewertung – auch kurzfristige Maßnahmen wie Sperrungen oder andere Sicherheitsmaßnahmen. In vielen Fällen kann die optimale Maßnahme aber auch die Beschaffung zusätzlicher Informationen sein. Dann werden Inspektionen durchgeführt.

Die Verwendung von Resultaten aus Inspektionen und Überwachungen (Abschnitt 2.1) erfolgt dann durch eine Aktualisierung der Modellparameter. Diese geschieht in der Regel mittels eines Bayes'schen Updates. Dieses Verfahren erlaubt es, alle Informationen in konsistenter Weise in ein einziges Modell einfließen zu lassen. Dabei wird die Genauigkeit und Aussagekraft der gewonnenen Daten und Beobachtungen explizit mit berücksichtigt.

Durch die Aktualisierung der Modellparameter wird dann auch die Zustandsbewertung aktualisiert (Abschnitte 2.2 und 2.3), wodurch wiederum entsprechende Maßnahmen geplant werden können – nun bedingt auf die Beobachtungen. Auf diese Weise wird die intelligente Brücke mit Inspektionen und Überwachungen zu einem adaptiven System, welches sich Veränderungen anpassen kann.

Die Konzeption wird in zwei Fallstudien angewendet (Abschnitt 3). In der Fallstudie A werden eine Betonbrücke und der Schädigungsmechanismus Bewehrungskorrosion betrachtet. Die zweite Fallstudie beinhaltet eine Stahlbrücke und den Schädigungsmechanismus Ermüdung.

#### 2.1 Klassifizierung und Modellierung von Überwachungs- und Inspektionsverfahren

Für die Analyse des Informationsgewinns aus Inspektions- und Überwachungsverfahren wird vorgeschlagen, diese Verfahren anhand folgender Parameter zu klassifizieren:

- Messparameter
- Messresultat
- Messdauer
- Messlokalität

Die Kategorien dieser Klassifizierungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Kategorisierung anhand dieser Klassen dient einer systematischen Herangehensweise bei der quantitativen stochastischen Modellierung von Inspektions- und Überwachungsverfahren und bei der Adaption von Schädigungs- und Zustandsmodellen mittels der Resultate aus diesen Verfahren.

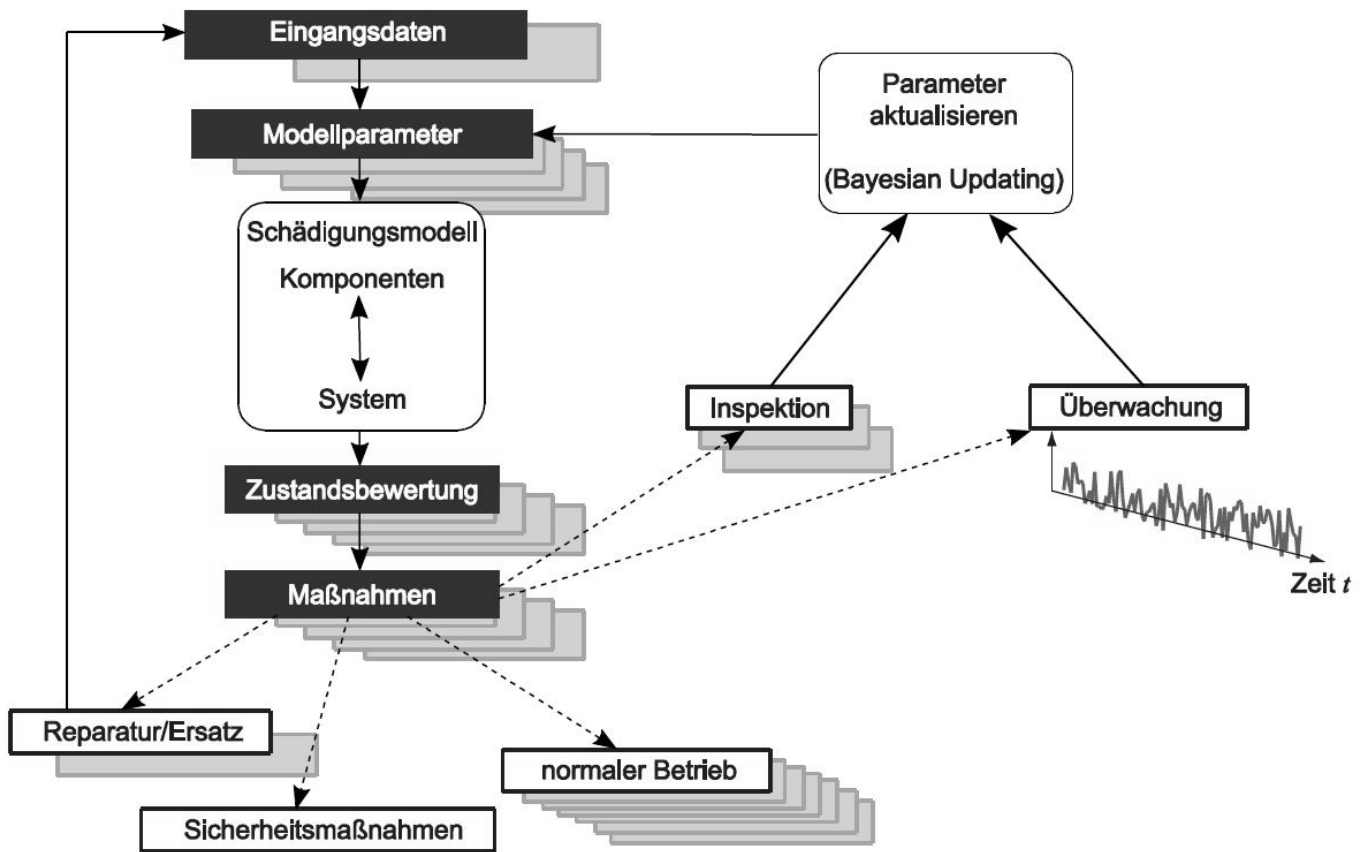


Bild 1: Allgemeines Konzept für die Beurteilung der Brücke unter Einbezug von Inspektions- und Überwachungsergebnissen

Tabelle 1: Klassifizierung von Überwachungs- und Inspektionsverfahren

Klassifizierung	Kategorien
Messparameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>– eine Eingangsgröße des Schädigungsmodells wird gemessen</li> <li>– direkte Schadensmessung (d. h. Messung der Ausgangsgröße des Schädigungsmodells)</li> <li>– eine indirekt gekoppelte Größe wird gemessen</li> </ul>
Messresultat	<ul style="list-style-type: none"> <li>– kontinuierliches Messresultat (z. B. Chlorideintragtiefe)</li> <li>– diskretes Messresultat (z. B. binäre Schadensindikatoren)</li> </ul>
Dauer der Messung	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zeitlich diskrete Messungen</li> <li>– zeitlich kontinuierliche Messungen</li> </ul>
Messlokalität	<ul style="list-style-type: none"> <li>– räumlich diskrete Messungen</li> <li>– räumlich verteilte Messungen</li> </ul>

2.1.1 Modellierung von Überwachungs- und Inspektionsverfahren

Die Fehler, welche bei Messungen im Allgemeinen entstehen und deren Qualität beeinträchtigen, beruhen einerseits auf menschlichen Fehlern, andererseits auf Fehlern, welche auf die Messgeräte an sich zurückzuführen sind. Beide Fehler können erfasst, quantifiziert und probabilistisch modelliert werden. Die

Messfehler, welche durch menschliches Versagen verursacht werden, können z. B. durch Versuche oder arbeitspsychologische Verfahren quantifiziert und erfasst werden. Der Messfehler, welcher durch die Fehler in einem Messsystem verursacht wird, kann durch eine Prozessgleichung oder Beobachtungen des Messprozesses (ISO 2008) und durch die a posteriori-Messunsicherheit (Thöns, 2011) beschrieben werden.

Das vielleicht bekannteste Modell zur Beschreibung der Qualität von Inspektionen ist die sogenannte Detektionswahrscheinlichkeit, die "Probability of Detection" (PoD), welche sowohl menschliche Fehler als auch die Fehler des Messgeräts einschließt. Die Detektionswahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Schaden entdeckt wird (Messresultat ist hier die Entdeckung, Zustand ist i. d. R. die Größe des Schadens).

Eine weitere wichtige Größe zur Beschreibung der Qualität von Inspektionen und Überwachungssystemen ist die Wahrscheinlichkeit eines Falschen Alarms, die "Probability of False Alarm" (PoFA). Im Fall eines Falschen Alarms wird durch die Inspektion, Prüfung oder das Überwachungssystem eine Schädigung angezeigt, welche in Realität nicht vorhanden ist.

2.2 Modellierung und Adaption von Schädigungsmechanismen

In der Regel unterliegen Bauwerke während ihrer Nutzungsdauer einer Vielfalt verschiedener Schädigungsmechanismen. Unter einem Schädigungsprozess versteht man physikalische, chemische oder mechanische Prozesse, welche den Zustand eines Bauwerks verschlechtern und damit – ohne Gegenmaßnahmen – auch dessen Lebensdauer verkürzen.

Typische Schädigungsprozesse im Brückenbau, die zu Schäden und Mängeln im Sinne der RI-EBW-PRÜF (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 2007b) führen können, sind beispielsweise:

- Karbonatisierung des Betons,
- Chlorideindringung in den Beton,
- Bewehrungskorrosion,
- Spannungsrisskorrosion,
- Ermüdung an Spannbetonbrücken,
- Ermüdung von Stahlbetonbrücken,
- Frost-Tausalz-Angriff,
- Alkali-Kieselsäure-Reaktion,
- Defizite der Konstruktion,
- Konstruktionsteile und Brückenausstattung etc.

Diese Schädigungsprozesse sind beispielsweise in der RI-EBW-PRÜF aufgelistet und, soweit Modelle vorhanden sind, in Zilch et al. (2011) beschrieben.

2.2.1 Physikalische und empirische Modelle

In der Regel werden die Schädigungen mithilfe mathematischer Modelle beschrieben, welche den Schädigungsfortschritt als Funktion von Modellparametern  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  ausgeben.

Dabei beschreiben die Modellparameter  $\mathbf{x}$  jeweils

- die äußeren Bedingungen, wie z. B. Wetter, Belastung, Chloridbeaufschlagung etc.,
- die inneren Bedingungen, wie z. B. Materialfestigkeiten, Diffusionswiderstände etc.,
- die funktionalen mathematischen, physikalischen und chemischen Modellzusammenhänge,
- die geometrischen Randbedingungen, wie z. B. die Risstiefe/-länge, Betonüberdeckung oder die Eintragtiefe von Chloridionen in den Beton.

Unter den genannten Aspekten wird die Schädigung  $M$  dann als Funktion der Parameter  $\mathbf{x}$  und der Zeit  $t$  geschrieben als  $M = M(\mathbf{x}, t)$ .

Eine weitere Möglichkeit, Schädigungsvorgänge zu beschreiben, stellen die empirischen Modelle dar.

Ein Beispiel ist die Schädigungsklassifizierung gemäß RI-EBW-PRÜF. In der RI-EBW-PRÜF werden für die typischen Schädigungsmechanismen einer Brücke jeweils verschiedene Schädigungs-

niveaus definiert. Anhand dieser Schädigungsniveaus wird dem jeweiligen Bauteil eine Bewertung hinsichtlich Stand-sicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit gegeben, anhand derer wiederum die Gesamtbewertung des Bauwerks stattfinden kann (Haardt 1999). Hierbei ist zu erwähnen, dass es sich bei der RI-EBW-PRÜF nur bedingt um ein empirisches Schädigungsmodell handelt. Durch die physikalische Berechnung einer Schädigung wird diese mithilfe der empirischen Bewertung klassifiziert und bewertet; Schädigungen werden damit nicht berechnet.

2.2.2 Stochastische Modellierung

In der Regel können weder die Schädigungen  $M = M(\mathbf{x}, t)$  bzw. die Einwirkungen  $S(\mathbf{x}, t)$ , noch die Bauteilwiderstände  $R(\mathbf{x}, t)$  exakt bzw. deterministisch ermittelt werden. Vielmehr unterliegen die genannten Parameter gewissen zufälligen Streuungen und müssen deswegen mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $f_x(\mathbf{x})$  beschrieben werden. Wahrscheinlichkeitsverteilungen, für eine kontinuierliche Zufallsvariable  $f_x(x)$  bzw. für eine diskret verteilte Zufallsvariable  $p_x(x_i)$ , beschreiben die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Zufallsgröße  $X$  mit einem Wert  $X = x$  bzw.  $X = x_i$  realisiert wird. Für mehrere Parameter  $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]$  kann eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung  $f_x(\mathbf{x})$  definiert werden.

In manchen Fällen ist es notwendig, einzelne Parameter der Schädigungsfunktion  $M(\mathbf{X}, t)$  als stochastische Prozesse zu modellieren (Bild 2). Dies gilt im Bauwesen insbesondere für diejenigen Belastungen, welche über die Zeit starken Schwankungen unterworfen sind, wie z. B. die Verkehrsbelastung einer Brücke oder die Konzentration von Chloridionen an der Betonoberfläche. Der stochastische Prozess ist beschrieben durch eine Reihe von Zufallsvariablen  $X(t)$ , wobei  $t$  jeden Wert auf der Zeitachse annehmen kann. Im Falle eines zeitdiskreten Prozesses handelt es sich dabei um bestimmte Zeitpunkte  $t_1, t_2, \dots$  und entsprechend eine diskrete Anzahl von Zufallsvariablen, im Falle eines zeitkontinuierlichen Prozesses um eine unendliche Anzahl Zufallsvariablen. Die Abhängigkeit zwischen den zu  $X(t)$  verschiedenen Zeitpunkten wird durch die Korrelationsfunktion beschrieben.

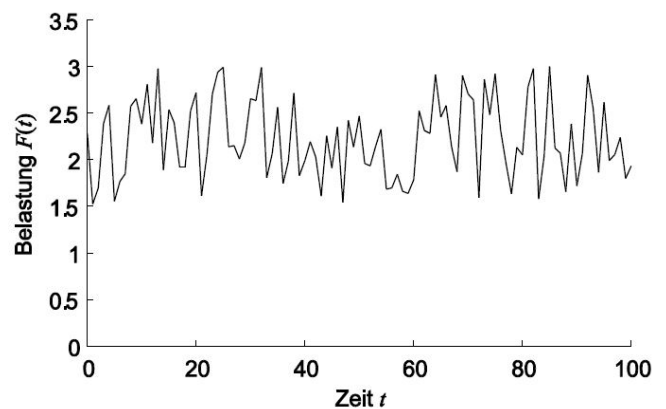


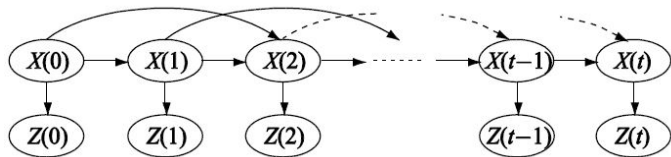
Bild 2: Eine Realisierung der Belastung  $F(t)$  über die Zeit  $t$  als stochastischer Prozess

Die Behandlung von stochastischen Prozessen zur Berechnung der Schädigungswahrscheinlichkeit ist häufig aufwendig. Oft ist aber die Verwendung von Zufallsgrößen anstatt stochastischer Prozesse ausreichend.

Ein Beispiel für die Verwendung von Zufallsvariablen anstelle von stochastischen Prozessen ergibt sich, wenn die maximale Einwirkung in einer bestimmten Zeitperiode von Interesse ist. Diese wird durch Extremwertverteilungen beschrieben (Melchers, 2001).

Ein mathematisch einfach zu behandelndes Modell eines stochastischen Prozesses stellt die sogenannte Markov-Kette dar (Isaacson & Madsen, 1976). Aus diesem Grund wird diese oft angewandt. Durch sie ist es möglich, den zukünftigen Zustand eines Bauteils auf vereinfachende Weise zu prognostizieren und dessen Wahrscheinlichkeit mithilfe von Beobachtungen zu aktualisieren. Es ist aber bei jeder Anwendung zu klären, inwiefern die Vereinfachungen der Markov-Kette auf den untersuchten Prozess zutreffen.

Eine Möglichkeit, die gemeinsame Verteilungsdichtefunktion  $f_X(x)$  zu finden, stellen die Bayes'schen Netze dar (Straub, 2011b, Jensen & Nielsen, 2007). Ein Beispiel für ein Bayes'sches Netz zeigt Bild 3.



**Bild 3:** Beispiel eines Bayes'schen Netzes mit den kausalen Zusammenhängen zwischen den Variablen  $X(i)$  und  $Z(i)$

### 2.2.3 Räumliche Modellierung

Bei vielen Schädigungsvorgängen spielen insbesondere räumliche Abhängigkeiten der jeweiligen Modellparameter  $X_i$  eine wichtige Rolle. Dazu ist eine Parametermodellierung mittels räumlicher Zufallsfelder erforderlich, bei denen speziell die Kovarianzmatrix der einzelnen Modellparameter bestimmt werden muss. Durch Annahme einer entsprechenden Korrelationslänge  $l_{X_i}$  kann diese beispielhaft durch

$$Cov[X_{i,j}, X_{i,k}] = \sigma_{X_i}^2 \exp\left(-\frac{d_{jk}}{l_{X_i}}\right)$$

modelliert werden, wobei  $X_{i,j}$  den Modellparameter  $X_i$  an der Stelle  $j$  auf der Oberfläche, und  $d_{jk}$  den euklidischen Abstand zwischen den Orten  $j$  und  $k$  repräsentieren (Straub, 2011a; Fischer und Straub, 2011).

### 2.2.4 Adaption der Schädigungswahrscheinlichkeit

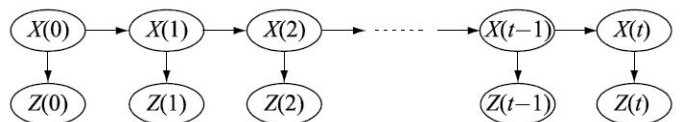
Mithilfe der gewonnenen Daten aus Inspektion bzw. Überwachung ist es möglich, die Versagens- bzw. die Schädigungswahrscheinlichkeit einzelner Bauteile sowie die des Gesamtsystems auf Basis der Daten zu aktualisieren. Dadurch ist es möglich, je nach Inspektionsresultat, notwendige und passende Maßnahmen zu Reparatur oder Erneuerung der Bauteile zu ergreifen. Mit der Überlegung, wann wo welche Informationen

eine zielgerichtete Maßnahme ermöglichen, kann schließlich eine optimale Inspektions- und Überwachungsstrategie bestimmt werden.

Die Schädigungswahrscheinlichkeit kann mithilfe der Messresultate und unter Berücksichtigung der Messfehler bzw. der Detektionswahrscheinlichkeit aktualisiert werden. Die Aktualisierung erfolgt dabei unter Zuhilfenahme des Satzes von Bayes (Bayes'sches Update). Das Bayes'sche Update kann dabei erfolgen durch:

- Aktualisierung einzelner direkter Modellparameter  $X_i$ ,
- Aktualisierung des Modelloutputs  $M(X, t)$ ,
- Aktualisierung des Schädigungsmodells anhand gewonnener großmaßstäblicher Messdaten.

Die zuvor erwähnten Unterschiede zwischen Inspektion/Bauwerksprüfung und Überwachung spielen dadurch auch beim Aktualisieren eine wichtige Rolle. Grundsätzlich funktioniert die Aktualisierung auf die gleiche Art und Weise, jedoch ergeben sich Unterschiede im zeitlichen Verlauf. In jedem Zeitschritt  $t$  kann dabei der Zustand  $X(t)$  durch eine Beobachtung  $Z(t)$  aktualisiert werden. Das nachfolgende Bild 4 zeigt ein Markov-Modell mit dem Parameter  $X(t)$  und dessen Beobachtung  $Z(t)$ .



**Bild 4:** Eine Markov-Kette mit dem Modelloutput/-parameter  $X(t)$  und der Beobachtung  $Z(t)$  desselben

Bei der Aktualisierung nach einer Inspektion wird die Schädigungswahrscheinlichkeit jeweils nach der Inspektion zeitdiskret aktualisiert. Die Aktualisierung durch Überwachungsdaten kann zeitkontinuierlich, grundsätzlich aber auf die gleiche Weise wie bei der zeitdiskreten Aktualisierung erfolgen. Die Aktualisierung kann auch durch Dynamische Bayes'sche Netze erfolgen (Straub, 2009a).

Bei vielen Schädigungsvorgängen spielen insbesondere räumliche Abhängigkeiten der jeweiligen Modellparameter  $X_i$  eine wichtige Rolle. Durch die Modellierung der jeweiligen Parameter  $X_i$  mittels räumlicher Zufallsfelder kann die Schädigungswahrscheinlichkeit durch den Informationsgewinn an einer beliebigen Stelle auf der Oberfläche auch an den umgebenden Orten aktualisiert und somit ein zusätzlicher Informationsgewinn erzielt werden.

## 2.3 Modellierung und Adaption der Systemzuverlässigkeit

### 2.3.1 Modell zur Bestimmung der Systemzuverlässigkeit

Als Modell für die Berechnung der Systemzuverlässigkeit einfacher Brückenbauwerke (z. B. Brückenbauwerke mit einem geringen Grad an statischer Unbestimmtheit, geringer Redundanz oder sprödem Bauteilversagen) im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird vorgeschlagen, ein logisches Seriensystem von Versagensereignissen  $F_i$  des Brückenbauwerks zu ver-

wenden. Wenn  $n$  Versagensereignisse berücksichtigt werden, hat das Seriensystem  $n$  Elemente. Jedes Versagensereignis  $F_i$  wird durch einen Bereich  $\Omega_{F_i} = \{g_i(\mathbf{X}) \leq 0\}$  im Ereignisraum der Basisvariablen  $\mathbf{X}$ , die eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$  haben, definiert. Hierbei ist  $g_i(\mathbf{X})$  die zum Versagensereignis  $F_i$  zugeordnete Grenzzustandsfunktion. Analog wird das Systemversagensereignis  $F_S$  des Seriensystems der Versagensereignisse  $F_i$  durch einen Bereich  $\Omega_{F_S}$  im Ereignisraum der Basisvariablen  $\mathbf{X}$  definiert:

$$\begin{aligned} \Omega_{F_S} &= \{g_1(\mathbf{X}, t) \leq 0\} \cup \dots \cup \{g_n(\mathbf{X}, t) \leq 0\} \\ &= \{g_S(\mathbf{X}) \leq 0\} \end{aligned}$$

Hierbei ist  $g_S(\mathbf{X})$  die Systemgrenzzustandsgleichung. Diese kann aus den individuellen Grenzzustandsgleichungen  $g_i(\mathbf{X})$  wie folgt gebildet werden:

$$g_S(\mathbf{X}) = \min_{1 \leq i \leq n} g_i(\mathbf{X})$$

Es ist zu beachten, dass diese Gleichung nur für Seriensysteme gültig ist. Die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens  $\Pr(F_S)$  kann darauf aufbauend durch Integration der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$  der Basisvariablen über den Bereich  $\Omega_{F_S}$  bestimmt werden.

### 2.3.2 Adaption der Systemzuverlässigkeit

Die Adaption der Systemzuverlässigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann durch die Modellierung von kontinuierlichen oder binären Schädigungszuständen, welche durch die Schädigungsmechanismen verursacht werden, erfolgen. Für die Berücksichtigung allmählich fortschreitender Schädigungsmechanismen bei der Systemzuverlässigkeit erfolgt eine direkte Modifikation der Grenzzustandsgleichungen der einzelnen Tragwerkselemente. Dies kann z. B. durch die Definition entsprechender Zufallsvariablen (z. B. Abrostungsgrad), welche die Widerstände der Tragstruktur reduzieren, geschehen. Es ist dabei darauf zu achten, dass verschiedene Bauwerksschäden räumlich korreliert sein können. Diese Korrelationen müssen ebenfalls im Modell berücksichtigt werden.

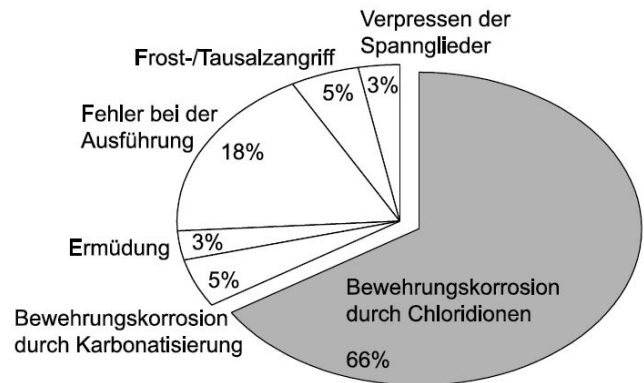
Werden binäre Schädigungszustände modelliert, ist ein Tragwerkselement zu einem gegebenen Zeitpunkt  $t$  entweder intakt oder ausgefallen (Straub und Der Kiureghian (2011)). Der Schädigungszustand eines Tragwerkselements zum Zeitpunkt  $t$  ist durch eine Grenzzustandsgleichung definiert. Die Grenzzustandsgleichung ergibt sich aus der jeweiligen Modellierung des Schädigungsmechanismus.

## 3 Fallstudien

### 3.1 Fallstudie A: Betonbrücke

Im Rahmen dieser Fallstudie wird eine Zuverlässigkeitsbewertung von Brückenhauptträgern unter Korrosion der Bewehrung exemplarisch durchgeführt und es erfolgt die mögliche Adaption von Schädigungsmodellen anhand der gewonnenen Daten aus Inspektion bzw. Überwachung.

Die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion ist ein weit verbreitetes Phänomen an Betonbauten. Etwa zwei Drittel aller auftretenden Schädigungen an Betonbrücken in Deutschland folgen diesem Schädigungsmechanismus (Bild 5).



**Bild 5:** Die verschiedenen Ursachen und ihre zugehörige Häufigkeit für die Schädigungen an Betonbrücken. Markant ist der Anteil der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion (66 %).

#### 3.1.1 Modellierung des Schädigungsmechanismus

Bei der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion diffundieren Chloridionen  $Cl^-$  aus etwa Tausalzbeaufschlagung oder Meerwasser an der Betonoberfläche in den Beton ein und bewegen sich in Richtung Betoninneres. Durch die Diffusion der Chloridionen wird sich im Inneren des Betons eine Chloridkonzentration  $C(z, t)$  einstellen.

Durch den hohen pH-Wert des Betons und die dadurch entstehende Passivschicht an den Bewehrungseisen sind diese zunächst vor Korrosion geschützt. Bei der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion wird diese Passivschicht jedoch durch die Herabsetzung des pH-Werts aufgelöst und die Chloridionen können den Korrosionsprozess initiieren. Dies geschieht dann, wenn die Konzentration der Chloridionen auf dem Niveau der Bewehrung einen kritischen Wert überschreitet.

Für den Schädigungsmechanismus der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion steht ein leistungsfähiges Modell zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um die Lösung der Fick'schen Diffusionsgleichung (Gehlen, 2000; Malioka, 2008; Lentz, 2002), bei der jedoch der Diffusionskoeffizient als konstant in der Zeit angenommen wird. Mit diesem Modell und einem räumlichen Zufallsfeld wird die a priori-Schädigungswahrscheinlichkeit berechnet.

#### 3.1.2 Adaption der Schädigungswahrscheinlichkeit

Die berechnete Korrosionswahrscheinlichkeit wird mithilfe von Messdaten aus Inspektion bzw. Überwachung aktualisiert. Dabei werden die nachfolgend aufgelisteten Inspektionsdaten zur Aktualisierung der Korrosionswahrscheinlichkeit verwendet:

##### Inspektion:

- Messung der Betonüberdeckung über die gesamte Betonoberfläche des ausgewählten Brückenabschnitts; dieses Verfahren erfolgt zeitdiskret und raumkontinuierlich.
- Messung der Konzentration der Chloridionen an einzelnen diskreten Stellen der Oberfläche des ausge-

wählten Brückenabschnitts und in verschiedenen Tiefen; dieses Verfahren erfolgt zeit- und raumdiskret.

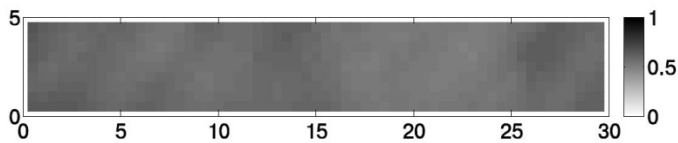
- Messung der Potenzialdifferenz zwischen Bewehrung und Betonoberfläche über die gesamte Oberfläche des ausgewählten Brückenabschnitts mithilfe einer elektrochemischen Halbzelle; dieses Verfahren erfolgt zeitdiskret und raumkontinuierlich.

## Überwachung:

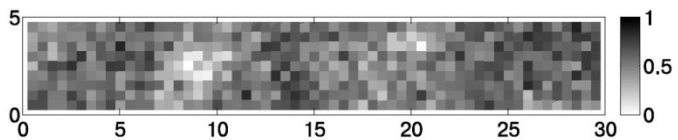
- Messung mithilfe von Korrosionssensoren; dieses Verfahren erfolgt zeitkontinuierlich und raumdiskret.

## Einfluss der gemessenen Größen

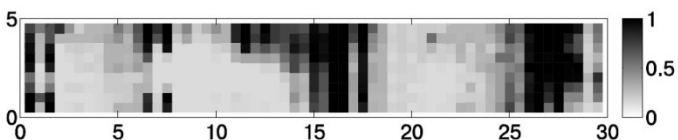
Die verschiedenen gemessenen Modellparameter bzw. mit dem Modelloutput gekoppelten Größen weisen jeweils unterschiedliche Einflüsse auf die aktualisierte Korrosionswahrscheinlichkeit auf. Die Resultate sind in Bild 6 dargestellt.



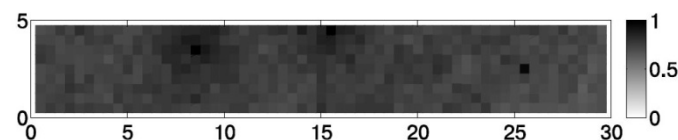
(a) Update mittels flächig ausgeführter Überdeckungsmessung (Korrosionswahrscheinlichkeit beträgt 50 bis 66 %)



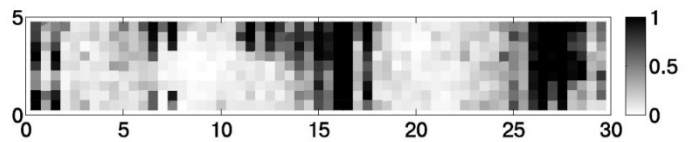
(b) Update mittels diskret durchgeführter Konzentrationsmessung (Korrosionswahrscheinlichkeit beträgt 1 bis 86 %)



(c) Update mittels flächig ausgeführter Potenzialfeldmessung (Korrosionswahrscheinlichkeit beträgt 14 bis 99 %)



(d) Update mittels diskret verbauter Korrosionssensoren (Korrosionswahrscheinlichkeit beträgt 64 bis 99 %)

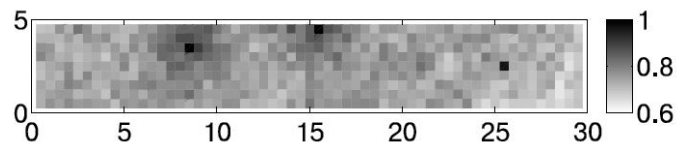


(e) Update mittels Kombination der Messdaten aus (a) – (d) (Korrosionswahrscheinlichkeit beträgt 1 bis 99 %)

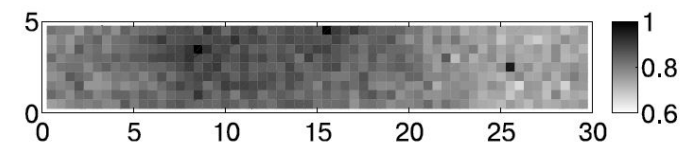
**Bild 6:** Aktualisierte Korrosionswahrscheinlichkeit über die Platte der Brücke, jeweils flächig aktualisiert mithilfe der verschiedenen Messresultate sowie deren Kombination.

## Einfluss der Korrelationsmodelle

Einen wesentlichen Einfluss auf die Bewertung eines Tragwerks durch Inspektionen und Messungen nimmt die Wahl des Korrelationsmodells ein. Bild 7 zeigt die mittels Überwachung durch Korrosionssensorik aktualisierte Korrosionswahrscheinlichkeit für zwei verschiedene Korrelationsmodelle, aus welchem der angesprochene Einfluss klar hervorgeht.



(a) Korrelationsmodell mit  $c = 0$  und  $l_{Korr} = 2$  m



(b) Korrelationsmodell mit  $c = 0,2$  und  $l_{Korr} = 5$  m

**Bild 7:** Der Einfluss der verschiedenen Korrelationslängen und Korrelationsmodelle auf die Aktualisierung der Korrosionswahrscheinlichkeit mittels Sensorüberwachung

## Fazit

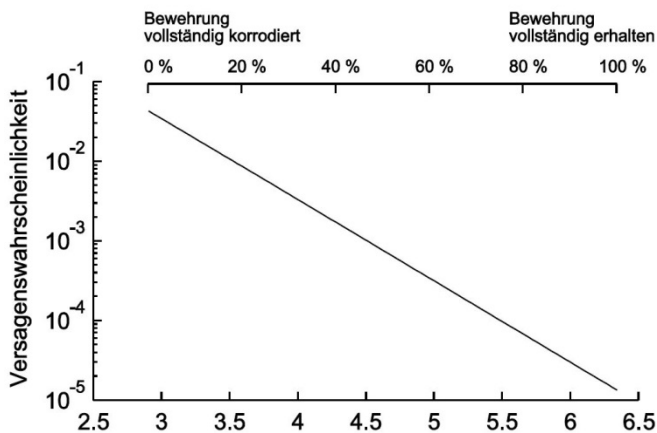
Die Wahl der gemessenen Modellparameter bzw. Größen nimmt einen wesentlichen Einfluss auf die jeweilige aktualisierte Korrosionswahrscheinlichkeit.

Eine weitere, wesentliche Rolle spielt das ausgewählte Korrelationsmodell für die einzelnen Modellparameter. Da dieses den räumlichen Einfluss des Messresultats auf die aktualisierte Korrosionswahrscheinlichkeit steuert, können die Ergebnisse für verschiedene Korrelationsmodelle stark schwanken.

### 3.1.3 Adaption der Systemzuverlässigkeit

An einem einfachen Beispiel soll die Zuverlässigkeit des Brückensystems ermittelt werden. Zunächst werden die Berechnungsparameter in einer einfachen Dimensionierung geschätzt und anschließend die Zuverlässigkeit der Brücke in Funktion der Zeit bestimmt, bedingt auf die beschriebenen aktualisierten Korrosionswahrscheinlichkeiten.

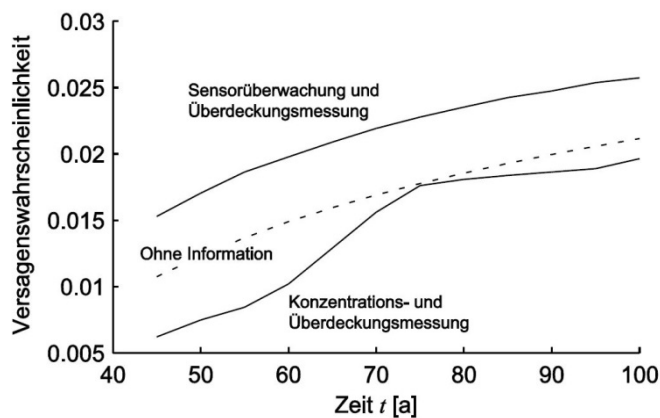
Bild 8 zeigt die Versagenswahrscheinlichkeit der Brücke als Funktion des vorhandenen Biegungswiderstands bzw. der vorhandenen Bewehrung.



**Bild 8:** Die Versagenswahrscheinlichkeit  $Pr(F|m_R)$  in Abhängigkeit des vorhandenen Biegungswiderstands der Brücke

Mithilfe des Satzes der Totalen Wahrscheinlichkeit kann damit auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems geschlossen werden (Bild 9).

Als maßgeblicher Schnitt wird die Trägermitte angenommen, da dort die Bewehrung in der unteren Brückenplatte die höchste Beanspruchung erfährt.



**Bild 9:** Die Versagenswahrscheinlichkeit des Brückenträgers, ohne Information, mit Überdeckungs- und Konzentrationsmessung, und mit Information aus Sensorüberwachung und Überdeckungsmessung, ausgewertet in Trägermitte.

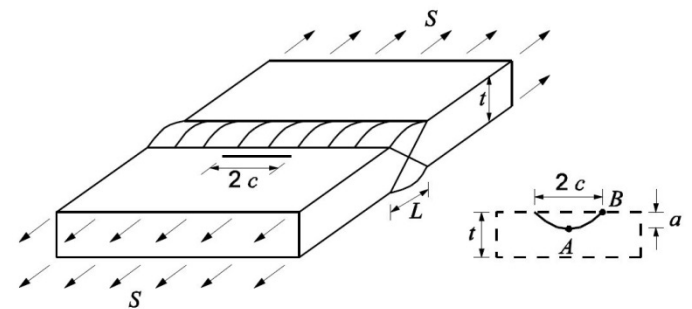
### 3.2 Fallstudie B: Stahlbrücke

Stahlbrücken mit mittelgroßen und großen Spannweiten werden meistens mit einer orthotropen (orthogonal-anisotropen) Fahrbahnplatte ausgeführt. In der Vergangenheit sind Ermüdungsrisse, die durch zyklische Beanspruchungen aus Verkehrslasten an charakteristischen Schweißverbindungen der orthotropen Platten entstanden sind, entdeckt worden (BASt (2011)). Dazu gehören die Anschlüsse zwischen den Stegblechen der Längssteifen und den Deckblechen sowie die Anschlüsse zwischen den Längssteifen und den Querträgern. Der relevante

Schadensmechanismus ist die Materialermüdung. Das Ermüdungsrisswachstum kann mit Methoden der linear-elastischen Bruchmechanik modelliert werden.

#### 3.2.1 Modellierung des Schädigungsmechanismus

Ein Ermüdungsversagen entsteht durch die Initiierung eines Oberflächenrisses und dessen anschließendes Wachstum in der Region der Schweißnahtwurzel (Bild 10) mit einer hohen Spannungskonzentration, welche als Hot Spots bezeichnet werden. Folgend wird angenommen, dass die Hot Spots identifiziert werden können und Ermüdung nur an diesen Orten auftritt.



**Bild 10:** Schematische Darstellung einer Stumpfschweißnaht mit semi-elliptischem Riss im Bereich der Schweißnahtwurzel

Der Ermüdungsrissfortschritt wird typischerweise in drei Phasen eingeteilt: (1) die Initiationsphase des Risses, (2) die Rissfortschrittsphase und (3) das Ermüdungsversagen (z. B. Lassen et al., 2006).

Es können in der Bruchmechanik zwei verschiedene Arten von Versagenskriterien verwendet werden. Zum einem wird häufig als einfaches Kriterium die Überschreitung einer bestimmten kritischen Rissgröße verwendet. Zum anderen ist es möglich, Ermüdungsversagen durch ein Bruchkriterium zu definieren (z. B. BS7910, 2005). Hier wird nach Straub (2004) im Folgenden das erste Kriterium, nach dem Ermüdungsversagen bei Überschreiten einer kritischen Rissgröße erfolgt, verwendet. Üblicherweise wird die nominale Materialdicke bei der Betrachtung eines Oberflächenrisses als die kritische Rissgröße verwendet. Das heißt, dass ein Ermüdungsversagen eintritt, wenn die Risstiefe die nominale Materialdicke erreicht. Dies stellt für viele Fälle eine konservative Annahme dar, da die Resttragfähigkeit des Querschnitts in diesem Fall vernachlässigt wird. Hierbei ist anzumerken, dass es möglich ist, die kritische Rissgröße basierend auf dem Bruchkriterium zu bestimmen (z. B. Rackwitz, 2002; Altamura und Straub, 2012).

Die Modellierung des Risswachstums beinhaltet viele unsichere Faktoren und Parameter. Das umfasst die Berechnung der Spannungsschwingbreiten, die Unsicherheiten in der Initiationsphase des Risses, die Unsicherheiten für die Bestimmung des Spannungsintensitätsfaktors und für die initiale Rissgröße sowie die Unsicherheiten der Parameter des Risswachstums.

## 3.2.2 Adaption der Schädigungswahrscheinlichkeit

Für die Inspektion und Überwachung einer Stahlbrücke mit einer orthotropen Fahrbahnplatte sind verschiedene Verfahren von Bedeutung. Hier wird beispielhaft das Inspektionsverfahren Alternating Current Field Measurement zur Ortung und Vermessung von Oberflächenrissen und die Messung von ermüdungswirksamen Spannungs-Zeit-Verläufen mit Dehnungsmessstreifen vorgestellt.

Alternating Current Field Measurement (ACFM) wird zur Ortung und Vermessung von Oberflächenrissen in metallischen Materialien verwendet. Das Messverfahren basiert auf elektromagnetischen Prinzipien. Ein ACFM-Messinstrument wird auf der Oberfläche des zu inspizierenden Bauteils platziert und ein Wechselstromfeld wird in die Bauteiloberfläche induziert. Wenn kein Riss vorhanden ist, entsteht ein gleichförmiges magnetisches Feld über der Bauteiloberfläche. Ein Oberflächenriss stört hingegen das elektrische Wechselstromfeld, wobei es um den Riss herum und unterhalb des Risses fließen muss. Dadurch wird das magnetische Feld ungleichmäßig und diese Feldveränderungen können durch die Sensoren im ACFM-Messinstrument gemessen werden. Tabelle 2 enthält die Klassifizierung des ACFM-Verfahrens.

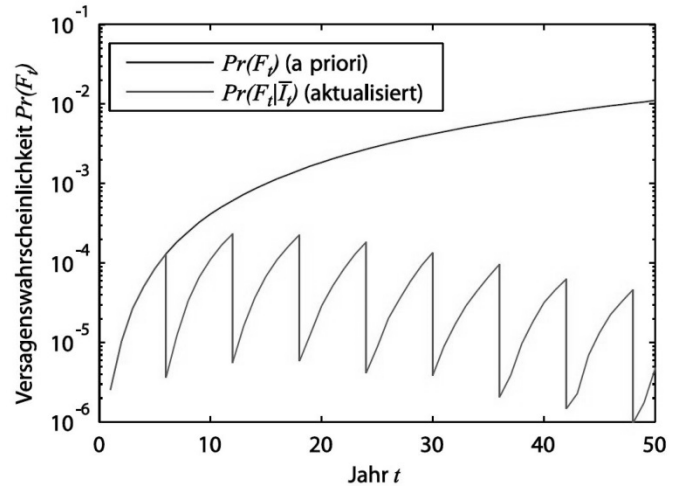
**Tabelle 2: Klassifizierung des ACFM-Verfahrens zur Ortung von Oberflächenrissen in Schweißnähten**

Klassifizierung	Kategorien
Messparameter	– direkte Schadensmessung (d. h. Messung der Ausgangsgröße des Schädigungsmodells)
Messresultat	– kontinuierliches Messresultat (Rissgröße) UND – diskretes Messresultat (Rissdetektion ja/nein)
Dauer der Messung	– zeitlich diskrete Messungen
Messlokalität	– räumlich diskrete Messungen

Das ACFM-Inspektionsverfahren kann im Sinne der Ortung von Oberflächenrissen durch die "Probability of Detection" und der "Probability of False Alarm" probabilistisch modelliert werden. Mit Blick auf die Vermessung von georteten Oberflächenrissen kann die Genauigkeit des ACFM-Inspektionsverfahrens mit einem einfachen additiven Messfehler modelliert werden.

Eine Aktualisierung der Versagenswahrscheinlichkeit kann durch die Inspektionsergebnisse "Ortung eines Oberflächenrisses", "keine Ortung eines Oberflächenrisses" oder "Ortung und Vermessung eines Oberflächenrisses" erfolgen. Wenn z. B. ACFM-Inspektionen im Intervall von sechs Jahren durchgeführt werden und bei keiner der Inspektionen ein Riss geortet wird, ergibt sich die in Bild 11 dargestellte aktualisierte Wahrscheinlichkeit des Ermüdungsversagens des betrachteten Hot Spots.

Die dargestellten Ergebnisse sind die Grundlage der zuverlässigkeitsbasierten Inspektionsplanung unter Einhaltung einer Zielversagensrate für eine Tragwerkskomponente.



**Bild 11: Aktualisierte Wahrscheinlichkeit des Ermüdungsversagens eines Hot Spots, wenn ACFM-Inspektionen im Intervall von sechs Jahren durchgeführt werden und bei keiner der Inspektionen ein Riss geortet wird.**

Dehnungsmessstreifen erfassen Verformungen von Bauteilen. Hierzu werden die Dehnungsmessstreifen mit Spezialklebern auf die Oberfläche von Bauteilen aufgeklebt. Moderne Dehnungsmessstreifen basieren auf dem physikalischen Prinzip, dass sich der elektrische Widerstand eines leitenden Materials bei Deformation verändert. Die gemessenen Dehnungs-Zeit-Verläufe können mittels des Hooke'schen Gesetzes in Spannungs-Zeit-Verläufe umgerechnet werden. Die Klassifizierung ist in Tabelle 3 enthalten.

**Tabelle 3: Klassifizierung von Dehnungsmessungen an Hot Spots mit Dehnungsmessstreifen zur Bestimmung von ermüdungswirksamen Spannungs-Zeit-Verläufen.**

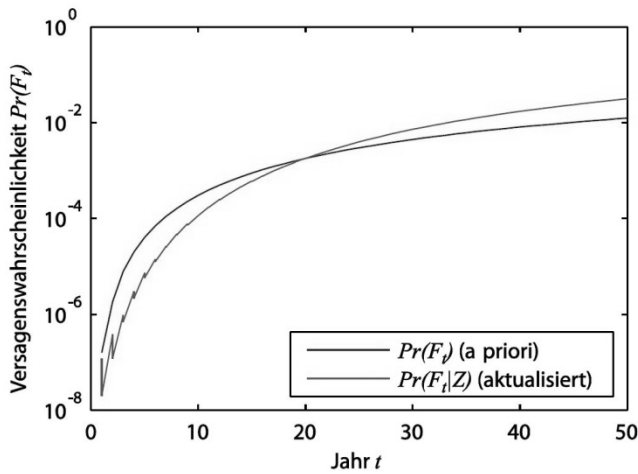
Klassifizierung	Kategorien
Messparameter	– eine indirekt gekoppelte Größe wird gemessen (aus den gemessenen Dehnungen werden Spannungen berechnet)
Messresultat	– kontinuierliches Messresultat
Dauer der Messung	– zeitlich kontinuierliche Messung
Messlokalität	– räumlich diskrete Messungen

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Spannungs-Zeit-Verläufen am Hot Spot umfassen den Messfehler des Messsystems, die Umrechnung der gemessenen Dehnungs-Zeit-Verläufe in Spannungs-Zeit-Verläufe und das strukturelle Modell zur Berechnung der Hot Spot-Spannung (Thöns, 2011).

Die gemessenen Spannungs-Zeit-Verläufe können verwendet werden, um die äquivalente Spannungsschwingbreite, welche ein Eingangsparameter des Ermüdungsmodells ist, zu aktualisieren. In Bild 12 ist beispielhaft dargestellt, welchen Einfluss



kontinuierliche Messungen der ermüdungswirksamen Spannungs-Zeit-Verläufe auf die Prognose der Wahrscheinlichkeit des Ermüdungsversagens eines Hot Spots haben, wenn kontinuierlich eine größere äquivalente Spannungsschwingbreite gemessen wird als a priori angenommen wurde.



**Bild 12:** Aktualisierung der Wahrscheinlichkeit des Ermüdungsversagens bedingt auf die Ergebnisse aus kontinuierlichen Messungen über die Lebensdauer des Bauwerks. Die Messungen wurden jedes Jahr ausgewertet und ergaben jeweils eine gemessene äquivalente Spannungsschwingbreite  $\Delta S_{e,m} = 20 \frac{N}{mm^2}$ . Die Standardabweichung des Messfehlers wurde mit  $\sigma_{e_m} = 0,3$  angenommen.

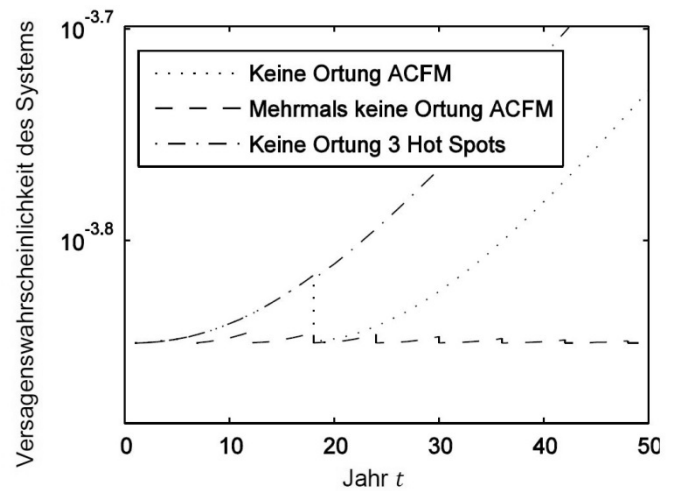
### 3.2.3 Adaption der Systemzuverlässigkeit

Die Systemzuverlässigkeit wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit für das Gesamtsystem Brückenoberbau berechnet. Dabei wird ein typisches Beispiel einer dreifeldrigen, durchlaufenden Stahlbrücke mit einer orthotropen Platte angenommen. Als Schädigungsmechanismus wird von Ermüdung in den Längsrippen der orthotropen Platte und dem dadurch bedingten Ausfall von Teilen der Längsrippen ausgegangen.

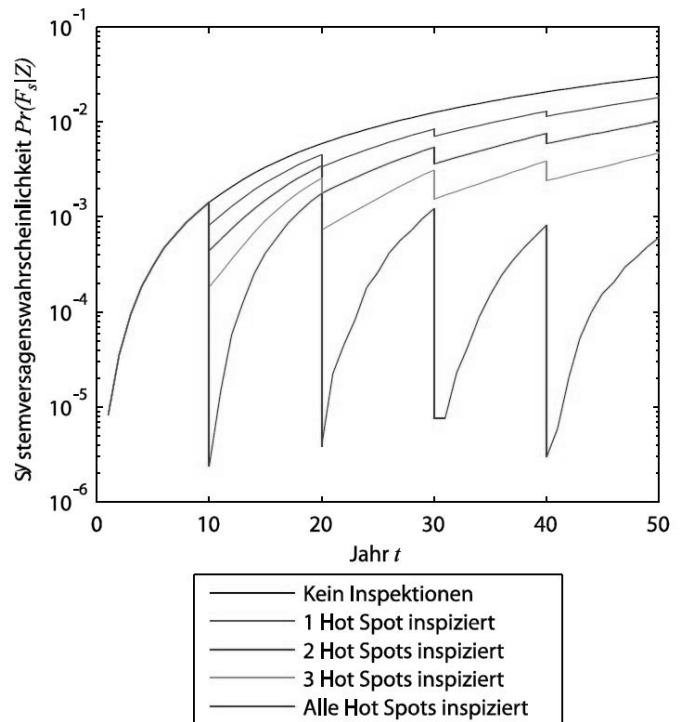
Die Modellierung und die Berechnung der Systemzuverlässigkeit und deren Adaption umfasst die Systemzuverlässigkeit des intakten Systems, des geschädigten Systems und des geschädigten Systems unter Berücksichtigung von Inspektionsinformationen sowie von Überwachungsinformationen.

Die Adaption der Systemzuverlässigkeit durch Inspektionsdaten ist in Bild 13 dargestellt. Hierfür wurden die Adaption mittels der Inspektionsereignisse an allen Hot Spots "Keine Ortung durch ACFM im Jahr 18", "Mehrmals keine Ortung durch ACFM" und "Keine Ortung durch ACFM im Jahr 18 an Hot Spots" durchgeführt. Die Inspektionsereignisse haben in beiden Fällen einen signifikanten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems. Die Berücksichtigung mehrmaliger Nicht-Ortung führt dazu, dass die Systemversagenswahrscheinlichkeit sich nur wenig von der Systemversagenswahrscheinlichkeit des intakten Systems unterscheidet. Die Durchführung und Berücksichtigung von Inspektionen an allen Hot Spots im Jahr 18 führt zu einem deutlichen Abfall der Wahrscheinlichkeit des Systemversagens. Werden hingegen nur drei Hot Spots inspiziert (mit dem Ergebnis "Keine Ortung") ist der Abfall deutlich geringer.

Die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens verläuft mit der Zeit sehr nah an der Kurve des geschädigten Zustandes.



**Bild 13:** Versagenswahrscheinlichkeiten des geschädigten Systems im Intervall  $[0, t]$  unter Berücksichtigung der Inspektionsereignisse "Keine Ortung durch ACFM im Jahr 18" und "Mehrmals keine Ortung durch ACFM"



**Bild 14:** Aktualisierte Wahrscheinlichkeit des Systemermüdungsversagens berechnet auf Grundlage eines logischen Seriensystems von vier Hot-Spot-Versagensereignissen unter Berücksichtigung der Inspektionsergebnisse und der unterschiedlichen Anzahl von inspizierten Hot Spots

Zusätzlich wird die Systemzuverlässigkeit der Brücke im Grenzzustand der Ermüdung berechnet. Für eine ermüdungsbeanspruchte Brücke tritt der Grenzzustand der Ermüdung erst ein, wenn mindestens ein Hot Spot des Brückenbauwerks durch Ermüdung versagt. Unter Berücksichtigung der Anhängigkeiten zwischen den Hot Spots ergibt sich die in Bild 14

dargestellte Wahrscheinlichkeit des Systemermüdungsversagens, wenn alle zehn Jahre ACFM-Inspektionen durchgeführt werden, die jeweils keinen Riss orten. Der Einfluss der Anzahl der inspizierten Hot Spots (hier werden vereinfachend nur vier Hot Spots betrachtet) ist ebenfalls dargestellt.

## 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit diesem Bericht wurde eine Konzeption einer zuverlässigkeitsbasierten Zustandsbewertung von (intelligenten) Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Bauwerksinformationen (Bild 1) entwickelt und in zwei Fallstudien angewendet. In den Fallstudien, die eine Stahlbrücke und eine Betonbrücke beinhalten, wurde beispielhaft die Machbarkeit aufgezeigt.

Über dieses Projekt hinaus können somit Maßnahmen (z. B. Inspektionen und Reparaturen) aufbauend auf den Ergebnissen der Zuverlässigkeitsbewertung mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse auf quantitativer Basis verglichen und geplant werden. Dadurch können anschließend für Inspektions- und Überwachungsverfahren die Lokalisationen und Zeiten durch Ausnutzung von Systemeffekten optimiert ermittelt werden.

## 5 Weiterer Forschungsbedarf

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts zeigen detailliert das Prinzip der intelligenten Verwendung aller Informationen für eine adaptive, zuverlässigkeitsbasierte Beurteilung der Brücke. In den Fallstudien dieses Projekts wird dieser Sachverhalt für einzelne Schadensmechanismen illustriert. Es ist vonnöten zu demonstrieren, wie diese Verfahren für eine größere Zahl von Schadenmechanismen entwickelt werden können. Dabei ist zu zeigen, wie mit Schadenmechanismen umgegangen werden kann, für welche keine oder nur rudimentäre Schädigungsmodelle vorliegen, etwa Spannungsrissskorrosion. Im Prinzip können die dargestellten Methoden auch auf diese Schädigungen ausgeweitet werden. Allerdings ist dabei eine hohe Modellunsicherheit zu berücksichtigen.

Die Weiterentwicklung der Konzeption für die Anwendung sollte den Fokus auf die möglichst umfassende Zustandsbewertung eines Brückenbauwerks legen und zum Ziel haben, auf den entsprechend des Bauwerksmanagementsystems angewendeten Verfahren aufzubauen. Die entwickelte Konzeption sollte somit durch weitere Forschungen und aufbauende Konzepte in Form eines Prototyps für die Anwendung weiterentwickelt werden. Der Prototyp sollte unter Berücksichtigung aller Projektergebnisse im Rahmen "Intelligente Brücke" erstellt werden. Zusätzlich sollte die Möglichkeit geschaffen werden, die in der Konzeption entwickelten räumlichen Verfahren durch eine umfangreiche Datenbasis zu kalibrieren.

Auf die entwickelte Konzeption und Verfahren kann weiter aufgebaut werden. Insbesondere stellen die entwickelten Verfahren die Grundlage dar, auf welcher eine zuverlässigkeitsbasierte Maßnahmenplanung durchgeführt werden kann, d. h. der Vergleich verschiedener Maßnahmen und die Optimierung dieser Maßnahmen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die zuverlässigkeitsbasierte Maßnahmenplanung ermöglicht durch Festlegung einer Zielzuverlässigkeit die Planung von Maßnahmen unter Einhaltung eines definierten Zuverlässigkeitsniveaus. Durch die Quantifizierung des Einflusses verschiedener Maßnahmen, wie z. B. von Inspektionsverfahren,

Messverfahren oder Reparaturmaßnahmen, kann ein konsistenter Vergleich dieser Maßnahmen in Bezug auf die Zuverlässigkeit des Systems Brücke erfolgen. Auf der Grundlage des Systemmodells und durch Einbeziehung von Kosten dieser Maßnahmen und durch die Quantifizierung der Risiken kann eine zeitliche und räumliche Optimierung der Maßnahmen vorgenommen werden.

## 6 Literatur

- Altamura, A. und Straub, D. (2012). Subset simulation for reliability estimation of mechanical components subjected to fatigue using the Forman-Mettu model. 6th International ASRANet Conference, London, UK.
- BASt (2011). Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagsystems. Brücken- und Ingenieurbau. Heft B 76.
- Borrmann, A., Fischer, O., Dori, G. and Wild, M. (2012). Intelligente Bauwerke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse (FE 15.0538).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007), Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF), RI-EBW-PRÜF.
- BS 7910 2005. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. BSI. UK.
- Enright, M. P., et al. (2006). "Application of Probabilistic Fracture Mechanics to Prognosis of Aircraft Engine Components." AIAA JOURNAL 44(No. 2).
- Fischer, J. & Straub, D. (2011), 'Reliability Assessment of Corroding Reinforced Concrete Slabs with Inspection Data' in 9th International Probabilistic Workshop, Brunswick, Germany, pp. 150–160.
- Gehlen, C. (2000), Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken. Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Beuth, Berlin.
- Haardt, P. (1999), Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, H. 22, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven.
- Isaacson, D.L. & Madsen, R.W. (1976), Markov chains. Theory and applications, Wiley, New York.
- ISO 2008. Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995). ISO/IEC Guide 98-3.
- Jensen, F. & Nielsen, (2007), Bayesian Networks and Decision Graphs, Springer.
- Lassen, T. and Recho, N. 2006. Fatigue Life Analyses of Welded Structures. London, ISTE Ltd.

- Lentz, A., Faber, M.H. & Johnsen, H. (2002), Half-Cell Potential Measurements for Condition Assessment. In: First International Conference on Bridge; IABMAS 2002.
- Liu, M., et al. (2010). Fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridges integrating monitored data. *Structural Safety* 32(1): 77-89.
- Malioka, V. (2008), Condition Indicators for the Assessment of Local and Spatial Deterioration of Concrete Structures. Dissertation, Zürich, CH.
- Melchers, R. (2001), *Structural Reliability Analysis and Prediction*, Wiley.
- Straub, D. (2004). Generic Approaches to Risk Based Inspection Planning for Steel Structures. IBK Bericht 284. ETH Zürich.
- Straub, D. (2009a). Stochastic Modeling of Deterioration Processes through Dynamic Bayesian Networks. *Journal of Engineering Mechanics, Trans. ASCE*, 135(10): 1089-1099.
- Straub, D. & Der Kiureghian, A. (2011). Reliability Acceptance Criteria for Deteriorating Elements of Structural Systems. *Journal of Structural Engineering*, 137(12): 1573-1582.
- Straub, D. (2011a), Reliability updating with inspection and monitoring data in deteriorating reinforced concrete slabs. 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Proceedings, eds MH Faber, J Köhler & K Nishijima, Zürich, Switzerland.
- Thöns, S. (2011), Monitoring-Based Condition Assessment of Offshore Wind Turbine Support Structures. Dissertation, Zürich, CH.
- Zilch, K., Straub, D., Dier, F. & Fischer, J. (2011), Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerkprüfung (FE 88.0002/2009). Beauftragt und gefördert durch die Bundesanstalt für Straßenwesen.