

Zusammenfassung der Promotionschrift

# **Stochastic Approaches to Selection of Fatigue Crack Growth Model for Life Cycle Assessment**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**M.Sc. Sharmistha Chowdhury**

Geboren am 22. November 1985 in Chittagong, Bangladesch

Mentor: Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke  
(interner Doktorand)

Weimar, 19 November 2019

---

## **Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit**

1. Ermüdung ist der wichtigste belastungsabhängige Schädigungsprozess dynamisch beanspruchter Stahlkonstruktionen. Stahltragwerke, insbesondere Brücken und Infrastrukturbauwerke, werden daher häufig überwacht, um die verbleibende Lebensdauer der Konstruktion abzuschätzen. Der Prozess der Materialermüdung wird oft durch verschiedene Modelle beschrieben, die von einfach bis komplex reichen und Unsicherheiten enthalten, die immense Auswirkungen sowohl auf die Modellaussage als auch auf die Modelauswahl haben. Die größte Herausforderung für die Lebensdauervorhersage (Life Cycle Assessment - LCA) von Ingenieurbauwerken besteht darin, aus einer Reihe von geeigneten Modellen das Modell auszuwählen, welches ein konkretes System möglichst wirklichkeitsnah abbildet.
2. Obwohl es eine enorme Anzahl von Ermüdungsrisswachstumsmodellen (CGM) gibt, wird für die schadensbasierte Ermüdungsanalyse nur das Paris Modell berücksichtigt. Das Problem bei der Berücksichtigung des Paris Modells im Rahmen der LCA-Analyse besteht darin, dass es die Schadensausbreitung einer Struktur über ihre gesamte Lebensdauer, von der Schadensinitiierung bis zum Strukturversagen, nicht abschätzen kann, was dem grundlegenden Wunsch eines LCA-Systems widerspricht. Leider gibt es keine Benchmarkstudie oder eine Methode, wie man im Rahmen des strukturellen Zustandsmonitorings ein geeignetes CGM auswählen kann.
3. Die Hauptaufgabe im Auswahlverfahren eines Risswachstumsmodells besteht darin, die Zuverlässigkeit dieses Modells für ein bestimmtes Schadensszenario zu beurteilen. Die Zuverlässigkeitsanalyse bezüglich Ermüdung beinhaltet Unsicherheiten, die sich aus der Auswahl eines CGM ergeben, das der Grenzzustandsfunktion entspricht, und zufällige Parameter, die jedem CGM aus verschiedenen Quellen zugeordnet sind. Die probabilistische Schätzung dieser zufälligen Parameter, die in die Zuverlässigkeitsanalyse integriert ist, ist Voraussetzung für jede Vorhersage der zukünftigen Dauerrisslänge.
4. Daher muss das Modellauswahlmodul mehr Modelle berücksichtigen, so dass das gesamte Schadensszenario abgedeckt wird und alle Einflussgrößen probabilistisch in das LCA-Schema einbezogen werden. Die primäre Motivation dieser Doktorarbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Auswahl des am besten geeigneten CGM, basierend auf dem aktuellen Schadenszustand der Struktur, so dass sie die verbleibende Lebensdauer einer Struktur prognostizieren kann.

## **Stand der Wissenschaft**

5. Ein typisches Ermüdungsrisswachstum wird in drei Bereiche unterteilt - Rissbildung, stabile oder lineare Rissausbreitung und instabile oder nichtlineare Rissausbreitung. Das Paris Modell (1963) kann nur die lineare Rissausbreitung darstellen und stellt fest, dass es die Effekte aus den belastenden, strukturellen oder experimentellen Details nicht in die Schadensprognose einbezieht. Die anderen auf dem Paris Modell basierenden Modelle versuchten, die Schadensprognose zu verbessern, indem sie die Einflüsse aus verschiedenen Quellen mit dem Aufwand für weitere zu schätzende Parameter berücksichtigten.
6. Im Wesentlichen müssen die Parameter in der probabilistisch basierten LCA-Analyse als stochastisch behandelt werden. Es gibt Studien, die verschiedene Zuverlässigkeitsmodelle in das Paris Modell eingeführt haben; es gibt jedoch keine Forschung darüber, wie diese Zuverlässigkeitsmodelle in die anderen Risswachstumsmodelle integriert werden können.

---

## Eingesetzte Methoden

7. Diese Dissertation hat einen starken Bezug zu den Methodenvorschlägen zur Modellobewertung, entstanden im Rahmen des DFG-geförderten Projektes "Graduiertenkolleg 1462 - Bewertung gekoppelter numerischer und experimenteller Partialmodelle im Konstruktiven Ingenieurbau" an der Bauhaus-Universität Weimar. Die Modellauswahl besteht aus mehreren Aufgaben, wie einer multikriteriellen Modellobewertung (Multicriterial model assessment, MMA) und der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiment, DoE). Diese stellt sicher, dass die im Rahmen der Inspektionen gesammelten Daten die bestmögliche Modellauswahl erlauben und für eine Verifikation und Validierung (V&V) mit dem Ziel der Minimierung von Unsicherheiten genutzt werden können.
8. Zunächst wird ein kurzer Überblick über 27 Modelle, die für Ermüdungsanalysen entwickelt wurden, gegeben. Die Modelle werden auf der Grundlage ihrer Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungen in drei Hauptgruppen unterteilt: a) Modelle, die eine konstante Beanspruchungsamplitude berücksichtigen (12 Modelle), b) Modelle, die variable Beanspruchungsamplituden ohne die Betrachtung der Belastungsreihenfolge berücksichtigen (7 Modelle), und c) Modelle, die sowohl variable Beanspruchungsamplituden als auch die Betrachtung der Belastungsreihenfolge berücksichtigen (8 Modelle).
9. Aus diesen 27 Modellen werden vier Modelle mit spezifischen Eigenschaften, gemeinsamen und unterschiedlichen Parametern sowie unterschiedlicher Komplexität beispielhaft im Modellauswahlverfahren betrachtet – die Modelle von Paris, Walker und Forman sowie das NASGRO-Modell. Diese Modelle beruhen auf unterschiedlichen Parametern, die vor der Anwendung im Rahmen einer Lebensdaueranalyse festzulegen sind. Dabei wurden drei Parameterschätzmethode betrachtet: die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least squares errors - LSE), eine modifizierte Methode der kleinsten Fehlerquadrate (modified Least squares errors - MLSE) und die Maximum-Likelihood-Methode (MLE). Anschließend erfolgt eine multikriterielle Modellobewertung aus der ein Vorschlag für die Auswahl eines für ein bestimmtes Schadensszenario geeigneten Rissmodell sowie einer zugehörigen Parameterschätzmethode abgeleitet wird. Die Auswirkungen von Messunsicherheiten auf die Auswahl der Modell-Methoden-Kombination werden ebenfalls dargestellt.
10. Ein weiteres Werkzeug im Prozess der Modellauswahl ist der Entwurf einer optimalen Versuchsplanung (Design of Experiments-DoE). Im Rahmen des DoE wird eine Bayessche Formulierung vorgestellt, um strukturelle Fehler wie Risse durch Dehnungsmessungen zu identifizieren. Dabei steht die Minimierung von Unsicherheiten, die sich aus der anfänglichen Annahme bestimmter Parameter, wie beispielsweise der Anfangsrisslänge, der Risslage oder der Rissgeometrie, für ein gewähltes RWM ergeben, im Mittelpunkt. Darüber hinaus wurden die Einflüsse des Nutz- zu Störsignalverhältnisses und die Anzahl der verwendeten Sensoren berücksichtigt, um eine wirtschaftliche experimentelle Anordnung zur Identifikation unterschiedlicher Rissgrößen in einem bestimmten Bereich zu erhalten. Die entwickelte Methodik beruht dabei auf Bayesschen Ansätzen.

## Ergebnisse

11. Es wird ein stochastischer Ansatz vorgeschlagen, um die optimale Modell-Methoden-Kombination für ein gegebenes Schadensszenario zu bestimmen. Als Fortsetzung wurde auch festgelegt, wie die Modell-Methoden-Kombination mit der

Prognose des Schadens aktualisiert werden kann. Im ersten Testbeispiel wurde beobachtet, dass, wenn der Riss bei 7 mm unter 13000000 Belastungszyklus und mit 3% Messunsicherheit erreicht wurde, die Paris Modell-MLE Methode den Riss mit 94% Wahrscheinlichkeit korrekt identifizieren kann, während die NASGRO Modell-MLE Methode mit 65% Wahrscheinlichkeit Korrektheit identifiziert. Wenn der Riss jedoch unter 200000 Lastspielen bei 17 mm ankommt, identifiziert sich die Paris Modell-MLE Methode mit 61% Wahrscheinlichkeit und die NASGRO Modell-MLE Methode mit 100% Wahrscheinlichkeit.

12. Ein weiteres wichtiges Ergebnis dieser Arbeit war der Einfluss der Lastreihenfolge auf die Modellauswahl - dies wurde durch die Betrachtung eines weiteren Beispiels mit variabler Amplitudenbelastung festgestellt. Die Modellpriorität wurde aufgrund der zusätzlichen Effekte, die sich aus den unterschiedlichen Belastungsverhältnissen in den Belastungsgeschichten ergeben, als verändert angesehen. In diesem Beispiel wurde beobachtet, dass, wenn der Riss 11 mm unter 21500000 Ladezyklus mit 3% Messunsicherheit beträgt, der Paris-MLE, Walker-MLE, Forman-MLE, NASGRO-MLE den Riss mit 35%, 97%, 90% bzw. 52% Wahrscheinlichkeit korrekt identifizieren. Daher wird in diesem Beispiel das Walker-Modell als das geeignete Risswachstumsmodell gegenüber dem Paris Modell anerkannt, da das Walker-Modell den Belastungseffekt in die Schadensprognose einbezieht.
13. An beiden Beispielen ist zu erkennen, dass zunehmende Unsicherheiten in den Eingangsdaten zu einer geringeren Zuverlässigkeit in der Risswachstumsprognose führen und alle betrachteten Modelle ähnliche Ergebnisse ergeben. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die für die Lebensdaueranalyse vorgeschlagene Vorgehensweise, die mehrere Risswachstumsmodelle und Parameterschätzverfahren integriert, nur dann auf relevante Ergebnisse führt, wenn sichergestellt ist, dass die zugrundeliegenden Daten über Messunsicherheiten von weniger als 5% verfügen.
14. Die vorgeschlagene Bayessche Formulierung kann erfolgreich die Lage, Größe und Ausrichtung des Risses mit Hilfe einfacher Gitter von Sensoren identifizieren, auch bei Vorhandensein von Mess- und Modellfehlern, vorausgesetzt, der Rauschpegel beträgt bis zu 5%. Um einen kleinen Riss der Größe 50 mm zu identifizieren, wurde das 7 X 7 Vollquadratgitter in einer 1000 X 1000 mm Quadratplatte benötigt, während für einen großen Riss der Größe 100 mm das 5 X 5 Gitter ausreichend war, da die Unsicherheit in beiden Fällen gering war.
15. Ein selbst entwickeltes Experiment mit einem Maßstab 1:1 Nachbau einer Brückenfalte wird als Umsetzung der entwickelten Frameworks in MMA und DoE im Rahmen der Verifikations- und Validierungsaufgabe (V&V) betrachtet. Die Bedeutung der Beurteilung von reduziertem Datensatz und vollständigem Datensatz wird untersucht, um zu verstehen, wie sich die Kombination von Modell und Methode auf die Schadensprognose auswirkt. Das Konzept der Aktualisierung der Modell-Methoden-Kombination im Hinblick auf die Lebenszyklusanalyse wurde im Experiment erfolgreich validiert, da bisherige Erfahrungen in die Schadensprognose einfließen können, um den aktuellen Schadenszustand zu verbessern.