

Alternde Bauwerksmonitoring- systeme – Beschreibung des Langzeitverhaltens und probabilistische Messanomalie-Detektion

Jan-Hauke Bartels, M. Sc.

Geboren am: 24. März 1994 in Heide

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann-Diederich

Prof. Dr.-Ing. Michael Beer

Eingereicht am: 11. August 2025

Verteidigt am: 15. Dezember 2025

Zusammenfassung

Messsysteme in der Ingenieurwissenschaft, etwa im Structural Health Monitoring (SHM) und der zerstörungsfreien Prüfung, ergänzen heute schon periodische Inspektionen durch kontinuierliche Datenerfassung, um die Integrität von Bauwerken teilweise über mehrere Jahre hinweg zu überwachen. Häufig wird ein lineares, zeitinvariantes Messsystemverhalten angenommen, obwohl Umwelteinflüsse und Alterung zeitvariable Effekte verursachen. Während Bauwerke im Laufe der Zeit alterungsbedingte Schäden erleiden können, unterliegen auch die Messsysteme selbst einem Alterungsprozess, der zu fehlerhaften Sensordaten führt. Solche Messanomalien scheinen im ersten Moment der Dateninterpretation plausibel, können jedoch zu Fehlinterpretationen des Bauwerkszustandes führen. Daher ist es entscheidend, solche Messanomalien zu identifizieren, um die langfristige Zuverlässigkeit von SHM-Systemen sicherzustellen.

In dieser Dissertation werden daher experimentell die Alterungerscheinungen in Messsystemen untersucht und ein probabilistisches Verfahren zur robusten Detektion von Messanomalien in aktiven Bauwerksmonitoringsystemen entwickelt. Im Fokus stehen Dehnungsmessungen, Wegmessungen und Beschleunigungsmessungen. Die zugehörigen Messketten werden hinsichtlich Messunsicherheit und Langzeitstabilität analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Messsysteme bereits unter stationären Bedingungen signifikante systematische und zufällige Messabweichungen aufweisen, die durch eine optimierte Messkettengestaltung minimiert werden können. Langzeituntersuchungen belegen ferner ein zeitvariantes Messsystemverhalten, sodass die gängige Annahme eines zeitinvarianten Messsystems nicht mehr zutrifft. Besonders Messungen mit Dehnungsmessstreifen zeigen zeitabhängige Signalveränderungen in der Größenordnung struktureller Schäden, wodurch die Unterscheidung zwischen Strukturschaden und Messanomalie erschwert wird.

Zur Lösung dieses Problems wird ein probabilistisches Verfahren zur Messanomalie-Detektion vorgestellt, welches zuverlässig Messanomalien detektiert, ohne dass Strukturschäden fälschlicherweise als solche klassifiziert werden. Insbesondere die Mahalanobis-Distanz (MD) mit probabilistischem Grenzwert erweist sich als robustes Verfahren zur Detektion von Messanomalien in aktiven SHM-Systemen. Dabei wird eine Detektionsgenauigkeit von über 90 % erreicht. Im Vergleich dazu zeigt der Ansatz basierend auf linearer Regression mit probabilistischem Grenzwert eine deutlich schlechtere Performanz mit nur 21 % Detektionsgenauigkeit. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden Empfehlungen für die SHM-Praxis abgeleitet, die eine optimierte Gestaltung von Messketten und eine effektive Detektion von Messanomalien ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine langfristig verlässliche Zustandsbewertung von Bauwerken nur dann gewährleistet werden kann, wenn neben strukturellen Veränderungen auch die Alterungseffekte der Messsysteme berücksichtigt werden. Die vorgestellte Methode leistet einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Sensorsdiagnostik und bildet die Grundlage für eine zukünftig noch zuverlässigere Praxis im Bauwerksmonitoring. Zukünftige Arbeiten sollten das entwickelte Verfahren durch fortgeschrittene maschinelle Lernverfahren, wie neuronale Netze, erweitern und datenbasierte Strategien zur Rekalibrierung von Sensoren erforschen, um adaptive, über die Lebensdauer hinweg zuverlässige Monitoringsysteme weiter zu entwickeln.

Abstract

Measurement systems are used in engineering applications such as Structural Health Monitoring (SHM) and nondestructive testing to support periodic inspections with continuous data acquisition. These systems are often assumed to exhibit linear, time-invariant behavior. In practice, however, they are subject to environmental influences and internal aging processes that result in time-varying behavior. SHM systems use sensor networks to monitor the integrity of structures, sometimes over several years. While the structures may suffer age-related damage over time, the measurement systems themselves are also subject to an aging process that leads to erroneous sensor data. Such sensor faults may seem plausible at the first moment of data interpretation, but can lead to misinterpretations of the structural condition. Therefore, it is crucial to identify sensor faults to ensure the long-term reliability of SHM systems.

This thesis investigates experimentally the aging effects in measurement systems and develops a probabilistic method for the robust detection of sensor faults in SHM systems. The focus is on strain measurements, displacement measurements and acceleration measurements. The associated measurement chains are analyzed with respect to measurement uncertainty and long-term stability.

The results show that the tested measurement systems already exhibit significant systematic and random measurement errors under stationary conditions, which can be minimized by an optimized measurement chain design. Long-term measurement system tests, however, show a time-variant behavior, so that the common assumption of a time-invariant measurement system is no longer valid. Especially in the case of strain measurements, time-dependent signal changes occur that are comparable in magnitude to structural damage, making it difficult to distinguish between structural damage and sensor faults.

To solve this problem, a probabilistic sensor fault detection method is presented that allows a reliable distinction between these two states. In particular, the Mahalanobis distance (MD) method with a probabilistic threshold proves to be a robust metric for detecting sensor faults in active SHM systems. A detection accuracy of over 90 % is achieved. In comparison, an approach based on linear regression with a probabilistic threshold shows significantly worse performance with only 21 % detection accuracy.

Based on these results, recommendations for SHM practice are derived, which allow an optimized design of measurement chains and an effective detection of sensor faults. The results of this work show that a reliable long-term condition assessment of structures can only be guaranteed if, in addition to structural changes, the aging effects of the measurement systems are also taken into account. The presented method makes a decisive contribution to the improvement of sensor diagnostics and forms the basis for an even more reliable practice in structural monitoring in the future. Future work should extend the developed method with advanced machine learning techniques, such as neural networks, and explore data-based sensor recalibration strategies to further develop adaptive, lifetime reliable SHM systems.