

## **Modellbasierte Prognose der nutzbaren Restlebensdauer von Gummi-Metall-Elementen**

*M.Sc. RWTH Amelie Bender<sup>1</sup>, M.Sc. James Kuria Kimotho<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Sergej Kohl<sup>1</sup>,  
Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro<sup>1</sup> und Dipl.-Ing. Kai Reinke<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, Universität Paderborn, Paderborn*

<sup>2</sup> *Jörn GmbH, Waiblingen*

### **1 Einleitung**

In vielen verschiedenen Industriezweigen hat sich Condition Monitoring aufgrund seiner finanziellen und sicherheitstechnischen Vorteile bereits etabliert. Um die Verlässlichkeit und die Auslastung zu steigern, sowie um die Lebenszykluskosten zu reduzieren, steigt auch im Schienenfahrzeugbereich die Anzahl an eingesetzten Condition Monitoring Systemen. Studien zu Versagensmodi von Schienenfahrzeugen haben gezeigt, dass Versagensursachen meistens in den Radprofilen oder im Fahrwerk liegen [1]. Wird das Fahrwerk heute mittels Condition Monitoring überwacht, werden hierfür häufig Sensoren an den Wagons angebracht, um bspw. deren Schwingungen zu kontrollieren [2, 3]. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf Gummi-Metall-Elementen (GM-Elementen) der Jörn GmbH.; als elastische Lager im Drehgestell sind diese Teil des Fahrwerks eines Schienenfahrzeugs. Mit dem Ziel die Wartungsplanung dieser Elemente zu optimieren, ist untersucht worden, ob diese Elemente einzeln mittels Condition Monitoring überwacht werden können. Die hierfür durchgeführten beschleunigten Lebensdauerests werden im nächsten Abschnitt erläutert. Anschließend werden die modellbasierten Methoden dargestellt, die aufbauend auf den im Versuch aufgezeichneten Daten eine Prognose der nutzbaren Restlebensdauer (RUL, remaining useful lifetime) der GM-Elemente aufstellen. Im letzten Abschnitt folgen eine kurze Zusammenfassung und ein Ausblick.

### **2 Condition Monitoring**

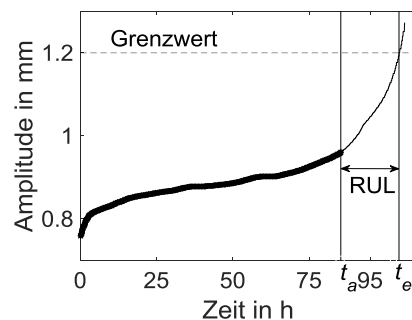
#### *2.1 Lebensdauerersuche*

Die Lebensdauer von GM-Elementen wird in einem beschleunigten Lebensdauerest auf einem Schwingungsanalysesystem ermittelt [4]. Ohne ein Condition Monitoring System wird aufbauend auf den Zeitdaten der Lebensdauerersuche entschieden, ob das Produkt die an es gestellten Anforderungen hinsichtlich der vorgegebenen Laufzeiten erfüllt. Dabei wird die aus dem Versuch abgeleitete Lebenszeit mit einer notwendigen Sicherheit festgelegt, bspw. liegen die Revisionszyklen elastischer Lager aus Gummi-Metall im Drehgestell eines Schienenfahrzeugs abhängig vom Einsatzfall zwischen sechs und acht Jahren. Um die nutzbare Restlebenszeit der Lager mit einer gewissen Sicherheit nutzen zu können, muss der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem die Lager ausfallen werden. Eine derartige Prognose kann mittels Condition Monitoring Methoden aufgestellt werden. Für den Versuch wird das GM-Element u. a. durch einen Bolzen vorgespannt, um den Einsatz im Schienenfahrzeug realistisch nachzubilden. Abgesehen von den Freiheitsgraden des Gummis sind alle Freiheitsgrade des GM-Elements durch den Versuchsaufbau fixiert. In dem kraftgeregelten Dauerversuch wird ein Hydraulikzylinder des Schwingungsanalysesystems mit einer

sinusförmigen Kraftanregung bei konstanter Frequenz verfahren. Das Ausfallkriterium ist die resultierende Steifigkeit, der Kehrwert der Nachgiebigkeit. Die Nachgiebigkeit kann durch die Wegamplitude des Versuchs dargestellt werden, die damit das Lebensende eines Elements definiert.

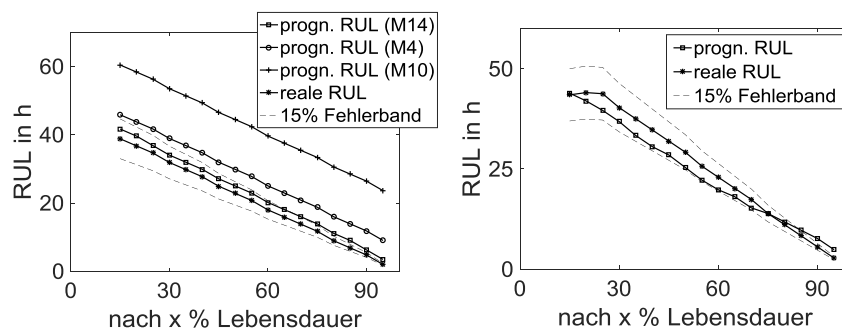
## 2.2 Prognose der nutzbaren Restlebensdauer

Die im Lebensdauerexperiment auf dem Schwingungsanalysesystem gemessenen Wegamplituden der betrachteten GM-Elemente weisen einen charakteristischen Verlauf auf, wie Abb. 1 zeigt. In eine Prognose gehen die Zeitdaten bis zum aktuellen Zeitpunkt  $t_a$  ein. Das Lebensende  $t_e$  ergibt sich aus dem Wegverlauf für den Grenzwert 1,2 mm. Die RUL ergibt sich aus der Differenz von  $t_e$  und  $t_a$ . Aufbauend auf entwickelten, parametrisierten Modellen der gemessenen Amplituden können modellbasierte Condition Monitoring Prognosemethoden die RUL der Elemente prognostizieren.



**Abb. 1:** Amplituden aus einem Lebensdauerexperiment eines GM-Elements

Für jedes der verwendeten, durchnummerierten GM-Elemente wird ein Modell mit der gleichen Nummer entwickelt. Die Parametrierung der Modelle erfolgt mittels Differential Evolution, einem populationsbasierten, stochastischen Algorithmus für reale Parameter [5]. Als erste Prognosemethode wird der Erweiterte Kalman Filter (EKF), eine Anpassung des rekursiven Kalman Filters für nicht-lineare Systeme [6, 2], verwendet. Untersucht werden Prognosen mit drei verschiedenen Modellen. Die beste Prognose der Wegamplitude von GM-Element 14 erzielt Modell 14, welches in der Realität während des Lebenszyklus dieses Elements noch nicht vorliegt. Daher muss auf andere Modelle zurückgegriffen werden. Der Unterschied in den Ergebnissen dieser Modelle ist groß, wie Abb. 2 (links) zeigt. Dargestellt sind die mit drei Modellen prognostizierten RULs für GM-Element 14 im Vergleich zu seinen realen RULs zu unterschiedlichen Zeitpunkten seiner Lebenszeit. Nach 95 % verstrichener Lebensdauer weist Modell 14 einen Fehler von 1,5 Stunden auf, während die Prognose-



**Abb. 2:** RUL für GM-Element 14, mit EKF (links) und mit Partikel Filter (rechts)

fehler der anderen Modelle 7,0 und 21,6 Stunden betragen. Dadurch dass diese Modelle voneinander abweichen und der EKF nur auf einem Prognosemodell basiert, ist keine genaue Prognose realisierbar. Eine Anpassung des EKF für mehrere Modelle könnte bessere Ergebnisse erzeugen [7].

Zum Vergleich wird hier die Methode Partikel Filter verwendet, in dieser werden die Modellparameter für die Prognose aus den Modellparametern mehrerer Modelle bestimmt. Die Prognosedaten für jeden Zeitschritt werden aufbauend auf den Daten des vorherigen Zeitschritts und dem aktuellen Modell berechnet [8]. Die Darstellung Abb. 2 (rechts) zeigt einen Vergleich der mit dem Partikel Filter prognostizierten RULs und den realen RULs für GM-Element 14. Die prognostizierten RULs liegen fast alle in einem Fehlerband von 15 %. Größere Abweichungen wie im letzten Punkt, bei 95 % verstrichener Lebensdauer, sind absolut gesehen klein, hier 2,0 Stunden. Bezogen auf die Anzahl der Trainingsdaten ist dies ein gutes Ergebnis.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Im Lebensdauerversuch wurden Wegamplituden der GM-Elemente der Jörn GmbH aufgezeichnet, welche die Alterung der Elemente beschreiben. Die Auswertung der Daten mittels der beiden Methoden Partikel Filter und Erweiterter Kalman Filter zeigt zum einen, dass aufbauend auf den Wegamplituden eine gute Prognose der RUL möglich ist, und zum anderen, dass nicht jede Methode gute Prognosen erstellt. Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass ein Condition Monitoring System zur Prognose der restlichen nutzbaren Lebensdauer mit integriertem Partikel Filter in der Lage ist, die Wartungsplanung für diese Elemente optimal auszulegen und anfallende Kosten durch längere Nutzungsdauern zu reduzieren. In Zukunft können die Methoden und die Modelle weiter optimiert werden. Außerdem wird ein Konzept zur Umsetzung für eine reale Anwendung angestrebt.

### 4 Literatur

- [1] Ward, C. P. et al.: "Condition monitoring opportunities using vehicle-based sensors", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 225 Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 202-218, 2010.
- [2] Ngigi, R. W. et al.: "Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics", Journal of Physics: Conference Series, 346, 2012.
- [3] Liu, X. Y.; Alfi, S. und Bruni, S.: "An efficient recursive least square-based condition monitoring approach for a rail vehicle suspension system", Vehicle System Dynamics, 54:6, 814-860, 2016.
- [4] "Schwingungsanalysesystem für mechanische und mechatronische Komponenten", Forschungsgroßgeräte-Antrag bei der DFG, DFG-GZ: INST 214/95-1 FUGG, 2013.
- [5] Elsayed, S. M.; Sarker, R. A. und Ray, T.: "Parameters Adaption in Differential Evolution", IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Juni 2012.
- [6] Welch, G. und Bishop, G.: "An Introduction to the Kalman Filter: SIGGRAPH 2001 Course 8", Computer Graphics, Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 12-17, 2001.
- [7] Wilmshöver, F.: "Multi-Modell Kalman Filter zur Lokalisierung im Roboterfußball", Technischer Report, Institut für Roboterforschung, TU Dortmund, September 2009.
- [8] Arulampalam, M. S. et al.: "A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50, No. 2, 174-188, 2002.