

Entwicklung eines Condition Monitoring Systems für Gummi-Metall-Elemente

Amelie Bender*, Thorben Kaul und Walter Sextro

Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, Universität Paderborn

Pohlweg 47-49, 33098 Paderborn

**Tel.: 05251/ 60 1814, Fax: 05251/ 60 1803*

E-Mail: { amelie.bender / thorben.kaul / walter.sextro }@upb.de

Zusammenfassung

Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit gewinnen bei der Anwendung von technischen Systemen eine immer größere Bedeutung. Aus diesem Grund hat sich Condition Monitoring, die Zustandsüberwachung eines technischen Produkts, in verschiedenen Industriebranchen etabliert. Die sensorbasierte Überwachung eines Produkts während seiner Betriebsdauer in Kombination mit Condition Monitoring Methoden ermöglichen die Bestimmung des aktuellen Zustands des Produkts und somit eine Diagnose, ob das Produkt seine ihm zugeschriebene Funktion zum aktuellen Zeitpunkt erfüllt. Neben Diagnosen bietet Condition Monitoring auch die Möglichkeit Prognosen aufzustellen, dabei wird die restliche Nutzungsdauer des Produkts aufbauend auf geeigneten Sensordaten geschätzt. So kann eine intelligente Wartungsplanung umgesetzt werden, die im Gegensatz zu klassischen Ansätzen keine festen Wartungsintervalle benötigt und die Nachteile einer rein reaktiven Wartung kompensiert. Stattdessen ist es möglich ein Element bis vor das Ende seiner Lebensdauer zu nutzen und erst dann zu warten, um eine optimale Nutzung zu gewährleisten. Durch eine Bestimmung der verbleibenden Restlebensdauer während des Betriebs ist eine optimale Wartungsplanung möglich, wodurch die Verfügbarkeit und die Auslastung der überwachten Produkte signifikant gesteigert werden kann.

In dieser Arbeit soll ein produktspezifisches Condition Monitoring System für Gummi-Metall-Elemente entwickelt werden. Diese Elemente werden zur Federung, Geräusch- und/oder Schwingungsisolierung in vielen verschiedenen Anwendungen eingesetzt, wie bspw. in Nutz- und Schienenfahrzeugen oder Windenergieanlagen. In Industrie und Forschung werden bereits Zustandsüberwachungen von Systemen mit integrierten Gummi-Metall-Elementen eingesetzt, allerdings noch keine Condition Monitoring Systeme zur alleinigen Zustandsüberwachung dieser Elemente. Aktuell ist es üblich die Lebensdauer dieser Elemente aufbauend auf beschleunigten Lebensdauerversuchen und Erfahrungswerten abzuschätzen. Mit dem Ziel die Lebensdauer des fokussierten Produkts präziser vorherzusagen und damit eine intelligente Wartungsplanung zu ermöglichen, wird die Entwicklung eines Condition Monitoring Systems für Gummi-Metall-Elemente angestrebt und in dieser Arbeit erläutert.

Schlüsselworte

Zustandsüberwachung, Condition Monitoring, Prognose, Gummi-Metall-Elemente, Restlebensdauerschätzung

Development of a Condition Monitoring System for Rubber-Metal-Elements

Abstract

Reliability, safety and availability gain more and more importance in the context of technical systems' applications. Therefore Condition Monitoring of technical products is established in many industrial sectors. Sensor based monitoring of a product during its service life combined with Condition Monitoring methods enable the estimation of the product's current health state and thus a diagnostic if the product is still able to fulfill its defined function, at the time of data acquisition. Condition Monitoring enables not only diagnostics but prognostics, thereby the monitored product's remaining useful lifetime is estimated based on suitable sensor data. With the help of prognostics an intelligent maintenance scheduling is possible. Contrary to classical maintenance approaches intelligent maintenance does not cope with predefined maintenance intervals. Furthermore it compensates the disadvantages of reactive maintenance. Using intelligent maintenance offers the possibility to maintain an element not until its end of life is nearly reached, or its wear material is nearly gone, to ensure an optimal use. Estimating the remaining useful lifetime during a product's service enables an optimal maintenance scheduling, whereby its availability and utilization are significantly increased.

In this work an approach for a Condition Monitoring system for monitoring rubber-metal-elements is developed. These elements are used for suspension, noise and/or vibration isolation in many different applications, such as commercial vehicles and railways or wind turbines. In industry and scientific research Condition Monitoring of systems with integrated rubber-metal-elements is already implemented, but there is no Condition Monitoring system only monitoring such an element. The state of the art is to estimate the lifetime of such an element based on accelerated lifecycle tests and experience. To achieve the aim of more precisely estimating the product's lifetime and thereby enabling an intelligent maintenance scheduling the development of a Condition Monitoring system for monitoring rubber-metal-elements is aspired and clarified in this work.

Keywords

Condition Monitoring, Prognostic, Rubber-Metal-Element, Remaining Useful Lifetime

1 Einleitung

Der Wandel in verschiedenen Industriebranchen hin zu teilintelligenten Systemen wird vielfach als vierte industrielle Revolution bzw. Überführung zur Industrie 4.0 bezeichnet. Systeme mit Intelligenz werden im BMBF-Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme Ostwestfalen-Lippe (it's OWL)“ unterteilt in das Grundsystem, die zugehörige Sensorik und Aktorik sowie eine Informationsverarbeitung. Die Sensorik nimmt Daten des Systems auf, welche Rückschlüsse über den Systemzustand liefern. Die Aktorik und der Systemaufbau sind für die physikalische Aktion des Systems verantwortlich. Die Informationsverarbeitung setzt u. a. die Kommunikation zwischen den einzelnen Einheiten um ([GCD2015]). Zur Zustandsüberwachung des teilintelligenten Systems kann ein Condition Monitoring System in die Informationsverarbeitung integriert werden. Ein derartiges System vorverarbeitet die aufgezeichneten Daten, um Muster und Merkmale besser erkennen zu können, und analysiert sie dann hinsichtlich einer Diagnose und einer Prognose. Für eine Diagnose wird der aktuelle Zustand des Systems betrachtet. Dabei wird analysiert, ob das überwachte Produkt seine Funktion erfüllt, ein fehlerhaftes Verhalten zeigt oder die Funktion versagt. Prinzipiell kann man eine beliebige Anzahl an Zuständen während der Lebensdauer eines Produkts bzw. eines Systems definieren. Eine sinnvolle Definition muss von dem jeweiligen Systemverhalten abhängen bspw. aufbauend auf einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse getroffen werden. Die Prognose kann auf der Diagnose des Produktzustands und den detektierten Daten basieren, kann aber auch separat von der Diagnose durchgeführt werden. In einer Prognose wird entweder ein sogenannter Health Index, eine numerische Beschreibung des Schädigungsgrads bzw. der Funktionsfähigkeit eines Produkts im Bereich zwischen 0 (vollkommen funktionsfähig) und 1 (Versagen bzw. Lebensende), oder die nutzbare Restlebensdauer (RUL, remaining useful lifetime) prognostiziert. Dabei soll die Prognose eine möglichst frühe Fehlererkennung beinhalten, um ausreichend Zeit für eine planbare Wartung und mögliche Ersatzteillieferung zu gewährleisten. Aufbauend auf der Prognose kann das Condition Monitoring System auch eine Empfehlung bzgl. eines geeigneten Wartungszeitpunkts nennen. Prognosen zu treffen stellt eine Herausforderung dar, bietet aber den größeren Nutzen im Vergleich zur Diagnose hinsichtlich der Reduzierung von Wartungs- und Lebenszykluskosten sowie der Sicherheit des Betriebs des überwachten Systems ([VLR+06]). In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Konzepts für ein produktspezifisches Condition Monitoring System für Gummi-Metall-Elemente (GM-Elemente) thematisiert. Dabei ist das Ziel die RUL durch Prognosemethoden präziser vorhersagen zu können, um die Einsatzdauer der Produkte erhöhen zu können und die Wartungskosten zu reduzieren. Die Entwicklung basiert auf beschleunigten Lebensdaueruntersuchungen der Elemente auf einem Schwingungsanalyse-System. Dabei stellt sich neben der Auswahl einer geeigneten Prognosemethode die Herausforderung, welche Messgröße sich für Condition Monitoring der Elemente eignet. Prinzipiell kann z. B. die Steifigkeit als Größe zur Beschreibung der Alterung eines Gummi-Elements heran gezogen werden, allerdings ist diese im Prüfstand nicht direkt messbar. Daher soll eine andere Messgröße gefunden werden, welche die Alterung des GM-Elements indirekt beschreibt.

Die weitere Arbeit gliedert sich wie folgt. In Kapitel 2 wird der Stand der Technik vorgestellt und eine Motivation für den Einsatz dieser Verfahren näher erläutert. Anschließend werden im dritten Kapitel die Lebensdauerversuche und der Versuchsaufbau beschrieben, bevor in Kapitel 4 erste Ergebnisse einer Prognose der nutzbaren Restlebensdauer mit Condition Monitoring vorgestellt werden. Kapitel 5 nennt Herausforderungen, die bei der Entwicklung eines Condition Monitoring Systems bewältigt werden müssen. Schließlich folgen in Kapitel 6 ein Resümee und ein kurzer Ausblick.

2 Stand der Technik

Condition Monitoring wurde in den 1960er Jahren entwickelt für die Überwachung nuklearer Anwendungen in den USA. Im Allgemeinen führt der Einsatz von Condition Monitoring zu einigen Vorteilen gegenüber einem Betrieb ohne dieses. So wird die Sicherheit des Systems verbessert, ungeplante sowie katastrophale Stillstände können vermieden werden, u. a. können dadurch die Instandhaltungskosten reduziert werden. Weiterhin kann die Produktqualität durch die Überwachung optimiert werden. Weitere Vorteile liegen in der Steigerung der Verlässlichkeit und der Ausnutzung, was wiederum zu einer verbesserten Produktivität führt ([JB14],[VLR+06]).

Condition Monitoring Systeme eignen sich zur Zustandsüberwachung der unterschiedlichsten Systeme, da sie individuell an das jeweilige System mit verschiedenen Sensoren, Modellen und Methoden angepasst werden können. Kommerziell sind aufgrund der genannten Vorteile bereits diverse diagnosebasierte Condition Monitoring Systeme im Einsatz, bspw. in Windenergieanlagen ([CZT14]) oder zur Überwachung von Schienen ([WWS+10]). Die Windenergieindustrie ist im Bereich Condition Monitoring einer der Vorreiter, u. a. da die Industrie schnell wachsen soll und ein verlässlicher Betrieb für die Stromgewinnung notwendig ist. Aus diesem Grund liegt in dieser Industriebranche auch schon ein Forschungsschwerpunkt auf der Umsetzung einer Prognose mittels Condition Monitoring.

Zustandsüberwachungen von Systemen mit integrierten Gummi-Metall-Elementen werden bereits eingesetzt, wie bspw. für die Zustandsüberwachung von Schienenfahrzeugaufhängungen ([SKS01]). Allerdings existiert noch kein Condition Monitoring System zur alleinigen Zustandsüberwachung von GM-Elementen. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Prognose der nutzbaren Restlebensdauer dieser Elemente. Dem Stand der Technik entspricht es die Lebensdauer von GM-Elementen mittels beschleunigter Lebensdauerversuche zu ermitteln. Konkret wird aufbauend auf den Zeitdaten der Lebensdauerversuche ohne den Einsatz von Condition Monitoring entschieden, ob die Elemente die an sie gestellten Anforderungen hinsichtlich der vorgegebenen Laufzeiten erfüllen. Dabei wird die nutzbare Lebensdauer mittels der im Versuch ermittelten Lebenszeit zur sicheren Seite abgeschätzt, bspw. weisen elastische Lager aus Gummi-Metall im Drehgestell eines Schienenfahrzeugs abhängig vom Einsatzfall Revisionszyklen zwischen sechs und acht Jahren auf. Mit Hilfe von Condition Monitoring kann die nutzbare Restlebenszeit der Lager mit einer gewissen Sicherheit ermittelt und dann genutzt werden, indem durch eine Prognose der Zeitpunkt bestimmt wird, zu dem das betrachtete Element ausfallen wird.

2.1 Instandhaltungsstrategien

Instandhaltung kann analog zu DIN EN 13306 in verschiedene Arten unterteilt werden. Klassische Instandhaltung basiert meist auf reaktiven Strategien – Komponenten werden erst nach ihrem Ausfall ausgetauscht oder gewartet – oder wird zu festen Intervallen durchgeführt. Diese Strategien führen jedoch zu hohen Stillstandszeiten und Lagerhaltungskosten sowie einer ineffizienten Ressourcennutzung, indem Komponenten vor dem Ende ihrer Lebensdauer getauscht werden ([KHV09]).

Condition Monitoring ermöglicht die Umsetzung von zustandsbasierter Instandhaltung als Basis einer intelligenten Instandhaltung in Form von vorausschauender Wartung (predictive Maintenance). Da Condition Monitoring Verfahren zur Prognose der Restlebensdauer technischer Komponenten eingesetzt werden, kann der Ausfallzeitpunkt auf Basis des aktuellen Schädigungszustands der Komponente vorausberechnet werden. Die Kenntnis über den Ausfallzeitpunkt ermöglicht eine ressourcen- und kosteneffiziente Planung der Instandhaltung und zudem Stillstandszeiten minimal zu halten. Zur Umsetzung einer zustandsbasierten vorausschauenden Instandhaltung werden leistungsfähige Condition Monitoring Verfahren benötigt, die eine Bestimmung des aktuellen Schädigungszustands und eine präzise Berechnung der Restlebensdauer der betrachteten Komponente ermöglichen. Wichtige Definitionen aus diesem Themenbereich finden sich in der DIN 31051.

2.2 Condition Monitoring Methoden

Generell kann man Condition Monitoring Methoden in daten-, modell- und wahrscheinlichkeitsbasierte Methoden unterteilen. Diese Methoden weisen verschiedene Vor- und Nachteile auf. So sind datenbasierte Methoden einfach und schnell zu implementieren und an verschiedene Systeme anpassbar. Nachteilig ist jedoch die erforderliche, große Menge an Daten und eine rechenintensive Trainingsphase. Modellbasierte Methoden können in Bezug auf die Art des Modells weiter klassifiziert werden, dabei unterscheidet man physikalische und empirische Modelle. In Abhängigkeit vom aufgestellten Modell und der Eignung der Methode können modellbasierte Methoden eine hohe Genauigkeit aufweisen und zusätzlich in der Entwicklungsphase eines Systems zur Modellbildung und Simulation verwendet werden. Allerdings erfordert die physikalische Modellbildung ein umfassendes Verständnis des Systems, während empirische Modelle weniger Vorwissen zur Umsetzung benötigen. In beiden Fällen kann die Prognose rechenintensiv sein. Wahrscheinlichkeitsbasierte Methoden beruhen auf Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, daher liegt ein Vorteil darin, dass sie weniger detaillierte Informationen benötigen und dass diese Informationen sich in statistischen Daten finden ([VLR+06], [MKT+11]). In dieser Arbeit werden aus zwei Gründen modellbasierte Methoden implementiert. Zum einen soll ein möglichst genaues Ergebnis erzielt werden, zum anderen ist diese Umsetzung kostengünstiger, als eine ausreichende Menge an Daten für eine datenbasierte Umsetzung zu erzeugen. In dieser Arbeit werden empirische Modelle verwendet, die genaue Beschreibung erfolgt in Kapitel 4.

2.3 Vorgehen bei der Entwicklung eines Condition Monitoring Systems

Bei der Entwicklung eines Condition Monitoring Systems werden verschiedene Schritte durchgeführt, wie in Bild 1 dargestellt ist.

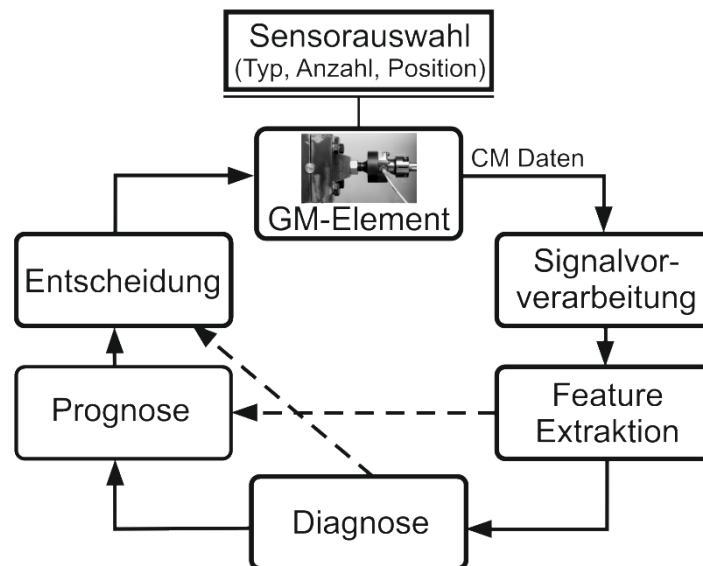


Bild 1: Vorgehen für Condition Monitoring (analog zu [GSD+12])

Insbesondere für die Sensorauswahl bzw. die Auswahl der Messgrößen benötigt man ein Verständnis für das System und sein Verhalten. Die Messgrößen sollten die Alterung des Systems beschreiben und direkt oder indirekt messbar sein. Das Ziel ist es ein gutes Signal möglichst kostengünstig zu erzielen. Daher sollten idealerweise die Sensoren gefunden werden, die für das jeweilige System am besten geeignet sind. Insbesondere komplexe Systeme benötigen eine Überwachung durch verschiedene Sensoren, damit die Alterung des Systems detektiert werden kann. Für diesen Fall muss eine Datenfusion der unterschiedlichen Sensoren erfolgen, damit die Prognose aufbauend auf allen verwendeten Daten erstellt werden kann. Hierfür gibt es verschiedene Ansätze ([JLB06]). In dieser Arbeit ist eine Sensordatenfusion nicht notwendig, da nur die Daten eines Sensors für das Condition Monitoring Verfahren verwendet werden. Je nach Sensorauswahl und Eigenschaften der Daten können verschiedene Merkmale aus diesen extrahiert werden, dazu sollten die Daten zuerst vorverarbeitet werden, um mögliche Muster oder Trends besser erkennen zu können. Um ein gutes Ergebnis zu erzielen und die Datenmenge zu reduzieren, muss eine Auswahl der Merkmale getroffen werden, welche die Alterung des Systems am besten beschreiben. Diese Merkmale werden dann anstelle der Rohdaten in den Methoden verwendet. Anschließend sollte überlegt werden, welche Methoden zur Auswertung geeignet sind. Allerdings kann die endgültige Entscheidung, welche Methode am besten arbeitet, erst aufbauend auf Daten bzw. extrahierten Merkmalen getroffen werden. Denn erst deren Auswertung zeigt, welche Methode das beste Ergebnis erzielt. Aufbauend auf der Prognose oder der Diagnose kann eine Entscheidung bezüglich des zukünftigen Vorgehens getroffen werden, beispielsweise wann die nächste Wartung geplant werden kann.

3 Lebensdauerversuche

Als Vorbereitung für den Versuch wird das GM-Element u. a. durch einen Bolzen vorgespannt, um eine Anwendung bspw. im Schienenfahrzeug realistisch nachzubilden. Im Versuchsaufbau werden die Stahlkomponenten des GM-Elements fest eingespannt, sodass die Hauptverformungen durch das Gummi ermöglicht werden. In Bild 2 ist der wichtigste Abschnitt des Versuchsaufbaus der Lebensdauerversuche dargestellt. Die Stirnseite des zuvor beschriebenen Bolzens kann man links erkennen, diese ist umgeben von den Elementen, die das GM-Element fixieren. Rechts ist der Hydraulikzylinder zu sehen, der das Gummi im kraftgeregelten Dauerversuch mechanisch altern lässt.

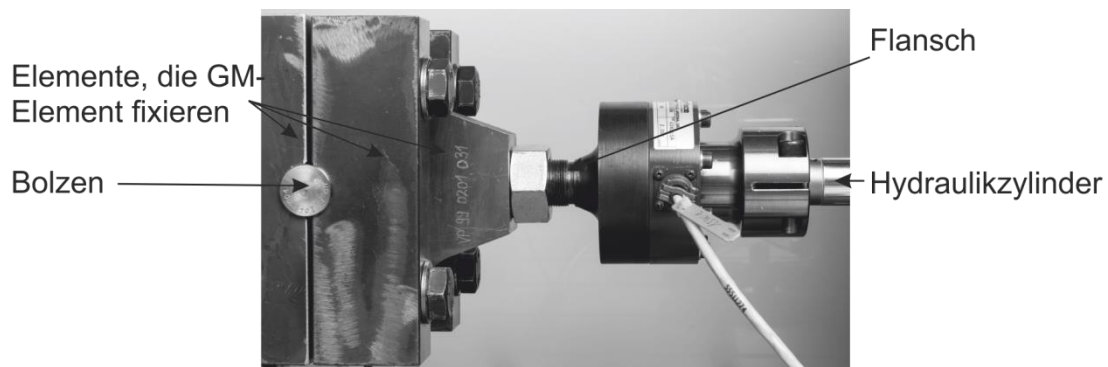


Bild 2: Versuchsaufbau des Lebensdauerversuchs der GM-Elemente

Konkret wird in den Lebensdauerversuchen ein Hydraulikzylinder des Schwingungsanalysesystems ([Sch13]) mit einer sinusförmigen Kraftanregung bei konstanter Frequenz verfahren, welcher wie in Bild 2 dargestellt über einen Flansch mit der Halterung des GM-Elements verbunden ist. Die Alterung des GM-Elements soll mit Hilfe der Wegamplitude detektiert werden, welche durch den im Zylinder integrierten Wegsensor gemessen werden kann. Belastet man ein derartiges Element durchgehend dynamisch mit der gleichen Kraftamplitude, so fällt auf, dass die Wegamplitude des Zylinders nicht konstant bleibt, sondern mit voranschreitender Lebenszeit des eingebauten Elements wächst. Dieses Verhalten kann durch die Steifigkeit des Gummis erklärt werden. Mit der Alterung des Gummis wird seine Steifigkeit geringer, das Gummi gibt bei gleichen Belastungen zunehmend nach und ermöglicht dadurch eine größere Wegamplitude des Zylinders, dieses Verhalten ist in Bild 3 zu erkennen. In der Darstellung ist die Wegamplitude des Zylinders aufgetragen über der Zeit des Lebensdauerversuchs. Zu Beginn weist der Verlauf ein degressives Verhalten auf, bevor er im mittleren Bereich nahezu linear ansteigt. Am Ende weist der Verlauf dann ein progressives Verhalten auf.

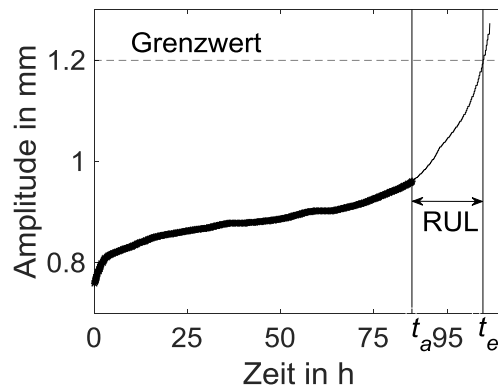


Bild 3: Wegamplitudenverlauf während eines Lebensdauerversuchs

Aufgrund dieses Verhaltens ist das Ausfallkriterium die resultierende Steifigkeit, der Kehrwert der Nachgiebigkeit. Die Nachgiebigkeit kann durch die Wegamplitude des Versuchs dargestellt werden, die damit das Lebensende eines Elements definiert. Ein Versuch wird dann solange gefahren, bis eine vorher definierte maximale Wegamplitude des Hydraulikzylinders erreicht wird.

4 Prognose

Die im Lebensdauerversuch auf dem Schwingungsanalysesystem gemessenen Wegamplituden der betrachteten GM-Elemente weisen einen charakteristischen Verlauf auf, wie Bild 3 zeigt. Daher kann die Wegamplitude als geeignetes Merkmal verwendet und mit einem Modell nachgebildet werden. Während einer realen Anwendung werden zu verschiedenen Zeitpunkten Prognosen der nutzbaren Restlebensdauer der Elemente erstellt. Dabei gehen in eine Prognose die Zeitdaten bis zum aktuellen Zeitpunkt t_a ein. Das Lebensende t_e ergibt sich zu dem Zeitpunkt, an dem die Wegamplitude den im Vorfeld definierten Grenzwert, hier 1,2 mm erreicht. Die RUL wird dann aus der Differenz von t_e und t_a ermittelt.

Im zweiten Schritt des in Kapitel 2 vorgestellten Vorgehens soll ein geeigneter Algorithmus gefunden werden. In dieser Arbeit werden hierfür empirische, parametrisierte Modelle verwendet, mit denen modellbasierte Condition Monitoring Prognosemethoden die RUL der Elemente prognostizieren. Der Vergleich der Methoden erfolgt über den gemachten Fehler. Wird als Prognoseziel die RUL gewählt, so berechnet sich der Fehler aus der Differenz der prognostizierten und der realen RUL. Im Folgenden wird gezeigt, wie unterschiedlich die Prognosen zwei verschiedener modellbasierter Prognosemethoden für die gleichen Daten ausfallen können.

4.1 Ergebnisse der modellbasierten Prognose

Für jedes GM-Element wird ein Modell entwickelt, das in der Prognose verwendet werden kann. Die Parametrierung der Modelle erfolgt mittels Differential Evolution, einem populationsbasierten, stochastischen Algorithmus für reale Parameter ([ESR12]). Am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn wurde eine Datenbank von Condition Monitoring Prognosemethoden entwickelt, mit der sowohl verschiedene

Features extrahiert als auch Prognosen der Restlebensdauer mit Hilfe diverser Methoden umgesetzt werden können ([Kim16]). Auf dieser Datenbank wird hier aufgebaut. Als erste Prognosemethode wird der Erweiterte Kalman Filter (EKF), eine Anpassung des rekursiven Kalman Filters für nicht-lineare Systeme ([WB01], [NPB+12]), verwendet. In dieser Methode kann immer nur ein Modell für die Prognose der nutzbaren Restlebensdauer des betrachteten Elements verwendet werden. Da die Modelle der einzelnen Elemente jedoch Unterschiede hinsichtlich Steigung und Lebensdauer aufweisen, führen sie zu stark abweichenden Ergebnissen. Beispielfhaft liegen die Fehler drei verschiedener Modelle für die Prognose für ein GM-Element nach 95 % verstrichener Lebensdauer zwischen 1,5 und 21,6 Stunden. Daher liegt eine Problematik in der Frage, welches Modell sich für das jeweilige Element am besten eignet. Das Problem könnte gelöst werden, wenn man den EKF so anpassen würde, dass dort mehrere Modelle berücksichtigt werden analog zu dem Multi-Modell Kalman Filter in [Wil09].

Zum Vergleich wird hier der Partikel Filter als Prognosemethode für die gleichen Daten angewendet. In dieser Methode werden die Modellparameter aus den Modellparametern aller geeigneten Modelle bestimmt ([AMG+02]). Dadurch kann ein kleinerer Prognosefehler erreicht werden, wie auch Bild 4 zeigt. In dieser Darstellung ist die RUL eines GM-Elements in Stunden über seiner Lebensdauer in % aufgetragen. Zudem sehen wir einen Vergleich zwischen der realen RUL und der prognostizierten RUL. Letztere liegt für fast alle Prognosezeitpunkte in einem 15 %-Fehlerband, nur am Ende ist der Fehler etwas größer, er beträgt 2,0 Stunden. In Relation mit der Anzahl an Trainingsdaten, hier liegen sieben verfügbare Modelle vor, handelt es sich dabei um ein gutes Ergebnis.

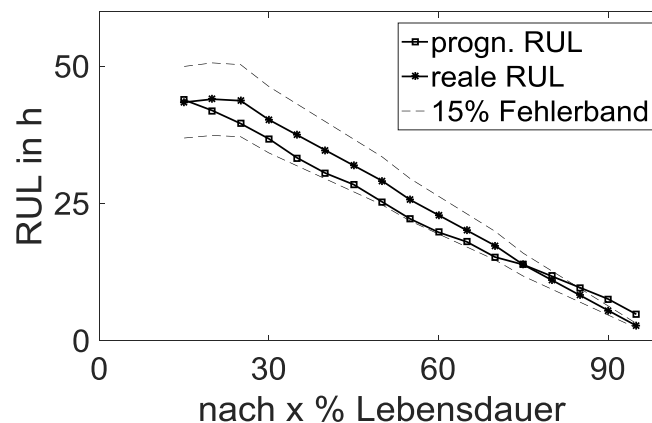


Bild 4: RUL für ein GM-Element unter Verwendung des Partikel Filters

5 Herausforderungen

Bei der Entwicklung eines Condition Monitoring Systems für ein spezifisches Produkt gibt es verschiedene Herausforderungen, die während der in Kapitel 2 beschriebenen Schritte gelöst werden müssen. So müssen bei der Durchführung der Lebensdauerversuche verschiedene Faktoren beachtet werden, welche die Alterung eines GM-Elements beeinflussen ([MF04]). In den Versuchen soll eine rein mechanische Alterung des Gummis bewirkt werden, dabei sollen die äußeren Einflüsse auf die Alterung unterbunden werden, bspw. durch große Variationen der Temperatur oder Feuchtigkeit. Während eine Reaktion mit Flüssigkeiten im Labor

ausgeschlossen werden konnte, musste die thermische Alterung durch eine aktive Kühlung des Lagers unterbunden werden. Dabei soll die Lagertemperatur 30°C nicht überschreiten. Die in Bild 1 genannte Sensorauswahl stellt eine Schlüsselfrage zu Beginn der Entwicklung eines Konzepts dar. Nur eine geeignete Größe, mit der die Alterung des Produkts beschrieben werden kann, führt zu einem erfolgreichen Condition Monitoring System. In dieser Arbeit soll die Steifigkeit herangezogen werden, um die Alterung des Gummi-Elements zu beschreiben. Diese Größe ist im Versuch nicht direkt messbar. Mit der Wegamplitude wurde eine äquivalente, indirekt messbare Größe gefunden. Wenn eine geeignete Messgröße identifiziert wurde, stellt sich als nächstes die Frage nach dem Sensor bzw. der Sensorauswahl. In diesem Fall war bereits ein magnetostriktiver Wegsensor in dem Hydraulikzylinder integriert, welcher die Verfahrswege des Zylinders detektiert. Kann keine Messgröße oder kein Sensor gefunden werden, welche bzw. welcher die Alterung identifizieren kann, so ist die Umsetzung eines Condition Monitoring Systems nicht realisierbar. In dieser Arbeit wurden neben der Wegamplitude keine weiteren Merkmale aus dem Wegsignal extrahiert. Schließlich muss noch entschieden werden, ob die Messungen online oder offline ausgewertet werden. Im Versuch fand die Auswertung offline nach Abschluss des Versuchs statt, um den direktem Vergleich der prognostizierten mit der realen Lebensdauer aufstellen zu können, wie er in Bild 4 dargestellt ist. Diese Fragen können für eine reale Anwendung nicht analog beantwortet werden. Als Beispiel soll die Anwendung der GM-Elemente im Schienenfahrzeug dienen. Dort werden die Elemente im Drehgestell eingesetzt. Die Anregung erfolgt dann über die Fahrstrecke, bspw. durch Unebenheit im Gleis oder Weichen. Wegsensoren in diesem Szenario zu implementieren stellt eine Herausforderung dar. Es wurde ein Konzept entwickelt, das eine Umsetzung mittels 3D-Hall Sensoren vorsieht, welche die Wege bzw. Verschiebungen und Verdrehungen im GM-Element im Zusammenspiel mit Magneten messen können. Dieses Konzept birgt einige Komplikationen wie die Positionierung der Sensoren und Magnete im Gummi. Bei diesem Konzept müsste eine Beschädigung der Sensoren während der Montage sowie eine gegenseitige Verhaltensbeeinflussung von Gummi und Sensoren ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wird untersucht, ob sich andere Sensoren zur Detektion einer Alterung der GM-Elemente eignen. Dafür ist zu prüfen, ob der Weg als Messgröße realisierbar ist oder ob sich ggf. eine andere Messgröße besser geeignet. Im Idealfall kann dieser Sensor von außen auf dem GM-Element positioniert werden. Hinsichtlich des Messverfahrens ist in der realen Anwendung eine Messung im Betrieb anzustreben.

6 Resümee und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Entwicklung eines produktspezifischen Condition Monitoring Systems für GM-Elemente vorgestellt. Um die Verlässlichkeit dieser Elemente zu steigern und eine intelligente Wartungsplanung zu ermöglichen, soll die nutzbare Restlebensdauer dieser Elemente präzise prognostiziert werden. Es wurde gezeigt, dass eine gute Prognose aufbauend auf im Versuch gemessenen Wegdaten realisierbar ist. Hierfür muss die modellbasierte Prognosemethode jedoch mehrere Modelle berücksichtigen, andernfalls leidet die Genauigkeit der Prognose. So konnte gezeigt werden, dass mit dem Partikel Filter eine gute Prognosegenauigkeit erzielt wird, da dieser bei der Parametrierung des

Prognosemodells auf den bekannten Modellen aufbaut. Da reale Daten nicht vorliegen, ist eine derartige Validierung der Prognosemethode nicht umsetzbar.

Weiterhin wurden Herausforderungen für die Entwicklung eines Condition Monitoring Systems für GM-Elemente diskutiert. Für den Einsatz der Elemente im Versuch auf dem Schwingungsanalysesystem wurden diese Herausforderungen gelöst. So konnte mit dem im Hydraulikzylinder integrierten Wegsensor die Wegamplitude als Messgröße für die Alterung aufgenommen werden. Die nächste Herausforderung ist die Realisierung eines Konzepts für eine reale Anwendung. Dies beinhaltet die Suche nach einem geeigneten Sensor sowie seiner Position. In weiteren Arbeiten könnten zudem die Methoden weiter optimiert werden, um eine noch bessere Genauigkeit zu erreichen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Jörn GmbH durchgeführt. Die Autoren möchten sich insbesondere bei Herrn Reinke und Herrn Pohl für die freundliche Unterstützung bedanken.

Literatur

- [AMG+02] ARULAMPALAM, M. S.; MASKELL, S.; GORDON, N.; CLAPP, T.: A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking. IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 50, No. 2, S. 174-188, 2002
- [CZT14] CRABTREE, C. J.; ZAPPALÁ, D.; TAVNER, P. J.: Survey of Commercially Available Condition Monitoring Systems for Wind Turbines. Technical Report. Durham University School of Engineering and Computing Sciences and the SUPERGEN Wind Energy Technology Consortium, 2014
- [ESR12] ELSAYED, S. M.; SARKER, R. A.; RAY, T.: Parameter Adaption in Differential Evolution. IEEE World Congress on Computational Intelligence, 10.-15.Juni 2012, Brisbane, 2012
- [GCD15] GAUSEMEIER, J.; CZAJA, A.; DÜLME, C.: Innovationspotentiale auf dem Weg zu Industrie 4.0. 10. Paderborner Workshop - Entwurf mechatronischer Systeme, 23.-24. März 2015, Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 343, Paderborn, 1. Auflage, 2015
- [GSD+12] GOEBEL, K.; SAXENA, A.; DAIGLE, M.; CELAYA, J.; ROYCHOUDHURY, I.: Introduction to Prognostics. Unter: <https://www.phmsociety.org/events/conference/phm/europe/12/tutorials>, 28.01.2017
- [JB14] JABER, A. A.; BICKER, R.: The State of the Art in Research into Condition Monitoring of Industrial Machinery. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 4, No. 3, 2014
- [JLB06] JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D.: A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006), S. 1483-1510, 2006
- [KHV09] KOTHAMASU, R.; HUANG, S. H.; VERDUIN, W. H.: System Health Monitoring and Prognostics – A Review of Current Paradigms and Practices. Handbook of Maintenance Management and Engineering, S. 337-362, 2009
- [Kim16] KIMOTHU, J. K.: Development and performance evaluation of prognostic approaches for technical systems. Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Paderborn, 2016

- [MF04] MARS, W. V.; FATEMI, A.: Factors that affect the fatigue life of rubber: a literature survey. *Journal of Rubber Chemistry and Technology*, Vol 77, No. 3, S. 391-412, 2004
- [MKT+11] MARJANOVIC, A.; KVASCEV, G.; TADIC, P.; DUROVIC, Z.: Applications of Predictive Maintenance Techniques in Industrial Systems. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 3, S. 263-279, 2011
- [MTP+12] MÁRQUEZ, F. P. G.; TOBIAS, A. M.; PÉREZ, J. M. P.; PAPAELIAS, M.: Condition Monitoring of Wind Turbines: Techniques and Methods. *Renewable Energy* 46 (2012), S. 169-178, 2012
- [NPB+12] NGIGI, R. W.; PISLARU, C.; BALL, A.; GU, F.: Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*, 346, 2012
- [Sch13] Schwingungsanalyse-System für mechanische und mechatronische Komponenten. Forschungs-Großgeräte-Antrag bei der DFG, DFG-GZ: INST 214/95-1 FUGG, 2013
- [SKS01] SKILLER, J.; KURE, G.; STAUFFER, P.: Qualitätsmanagement für Drehgestellkomponenten – das BoMo-Überwachungssystem. *ZEV + DET Glas. Ann.* 125 9/10, S. 434-440, 2001
- [VLR+06] VACHTSEVANOS, G.; LEWIS, F.; ROEMER, M.; HESS, A.; WU, B.: *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*, Hoboken, New Jersey, 2006
- [WB01] WELCH, G.; BISHOP, G.: An Introduction to the Kalman Filter: SIGGRAPH 2001 Course 8. *Computer Graphics, Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, S. 12-17, 2001
- [Wil09] WILMSHÖFER, F.: *Multi-Modell Kalman Filter zur Lokalisierung im Roboterfußball*. TU Dortmund, 2009
- [WWS+10] WARD, C. P.; WESTON, E. J.; STEWARD, E. J. C.; GOODALL, R. M.; ROBERTS, C.; MEI, T. X.; CHARLES, G.; DIXON, R.: Condition Monitoring opportunities using vehicle-based sensors. *Proc. IMechE*, Vol. 225, Teil F: Rail and Rapid Transit, S. 202-218, 2010

Autoren

Amelie Bender hat Maschinenbau an der RWTH Aachen und der University of Newcastle in Australien, studiert. Seit 2015 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Im Rahmen ihrer Tätigkeit am Lehrstuhl forscht sie im Themenfeld Condition Monitoring und Anwendung der Verfahren für spezifische Produkte.

Thorben Kaul hat Maschinenbau an der Universität Paderborn studiert. Seit 2014 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn. Im Rahmen seiner Tätigkeit am Lehrstuhl befasst er sich mit der integrierten Modellierung von Dynamik und Verlässlichkeit mechatronischer Systeme.

Prof. Dr.-Ing. Walter Sextro hat Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover und am Imperial College in London studiert. Nach seiner Industrietätigkeit in Deutschland und den USA promovierte er 1997 an der Universität Hannover. Seine Habilitation hat er im Bereich dynamischer Kontaktprobleme mit Reibung verfasst. In den Jahren 2004-2009 hatte er eine Professur für Mechanik und Getriebelehre an der TU Graz inne. Seit 2009 leitet er den Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Universität Paderborn.