

Neuartiges Konzept zur Lebensdauerprognose von Gummi-Metall-Elementen

Amelie Bender¹, Prof. Dr.-Ing. **Walter Sextro¹** und **Kai Reinke²**

¹Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik, Universität Paderborn,
Pohlweg 47-49, 33098 Paderborn

²Jörn GmbH, Kriegsbergstraße 17, 71336 Waiblingen

Kurzfassung

In der Windenergieindustrie haben die Größen Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit eine enorme Bedeutung erlangt aufgrund des Trends Windenergieanlagen zur optimalen Windausnutzung an schwer zugänglichen Positionen aufzustellen, wie bspw. Offshore. Dies führt zu erschwerten Wartungsbedingungen und damit zu höheren Kosten. Der Einsatz von Condition Monitoring hat sich in dieser Industrie etabliert, denn diese Technik ermöglicht eine Zustandsdiagnose des überwachten Systems und eine Prognose seiner nutzbaren Restlebensdauer (remaining useful life: RUL), jeweils basierend auf geeigneten Sensordaten.

In dieser Arbeit wird ein Konzept für ein produktspezifisches Condition-Monitoring-System für Gummi-Metall-Elemente (GM-Elemente) vorgestellt, welches den Schwerpunkt auf die Prognose der RUL dieser Elemente setzt. In Windenergieanlagen werden zahlreiche GM-Elemente zur Geräusch- und Schwingungsisolation verwendet. Der Einsatz des hier vorgestellten produktspezifischen Condition-Monitoring-Systems kann somit einen erheblichen Beitrag zum verlässlichen Betrieb von Windenergieanlagen liefern, da die Überwachung einzelner Komponenten in die Zustandsüberwachung der gesamten Anlage integriert und dadurch der Betrieb der Anlage optimiert werden kann.

In dieser Arbeit werden einige Herausforderungen diskutiert, die sich bei der Entwicklung eines Condition-Monitoring-Systems für GM-Elemente ergeben. So wird evaluiert, welche Größen sich zur Beschreibung der Alterung eines spezifischen Elements eignen und wie diese gemessen werden können. Temperaturen werden bereits in einigen technischen Systemen, wie auch in Windenergieanlagen, aufgezeichnet und ausgewertet, aber ihr Potential für die Bestimmung der RUL der überwachten Komponente ist noch nicht ausgeschöpft. Hier wird eine Lösungsmöglichkeit vorgestellt, die auf Temperatursensoren aufbaut. Als Grundlage für die Entwicklung des Condition-Monitoring-Systems wurden beschleunigte Lebensdauerversuche der GM-Elemente auf einem Versuchsstand zur Schwingungsanalyse durchgeführt. In diesen Lebensdauerversuchen wird die mechanische

Alterung eines GM-Elements über einen kraftgeregelten Hydraulikzylinder erzielt. Dabei wird das Ende der Lebensdauerversuche in einem ersten Schritt über die Wegamplitude des Zylinders bestimmt. Während dieser Versuche wurden diverse Sensoren eingesetzt. Die aufgezeichneten Temperaturdaten zeigen, dass sich Temperaturmessungen eignen die Lebensdauer von GM-Elementen mittels Condition Monitoring Prognosemethoden zu schätzen.

Abstract

In wind energy industry reliability, safety and availability gained a huge importance due to the trend of establishing wind turbines at nearly inaccessible places, such as offshore. Thereby the maintenance conditions worsen and the costs increase. Using condition monitoring is state of the art in this industry, since this technic enables a diagnosis of the current condition of the monitored system. Furthermore, a prognosis of the remaining useful life (RUL) of the system is possible. Diagnosis and prognosis are based on feasible sensor data.

The topic of this work is a concept for a product specific condition monitoring system for rubber-metal-elements (Gummi-Metall-Elemente, GM-elements). Thereby, the concept's focus lies on estimating the RUL of these elements. In wind turbines multiple GM-elements are used for noise and vibration isolation. By using the developed product specific condition monitoring system the reliability of the wind energy plant can be improved significantly. Since the monitoring of single components can be included in condition monitoring of the whole plant and thereby optimizing the plant's activity.

Here a couple of challenges are discussed concerning the development of a condition monitoring system. So the applicability of different metrics for describing the aging of a specific element is evaluated. Furthermore, their measuring possibility is investigated. Temperatures are already metered and analyzed in different technical systems such as wind energy plants. Their potential for estimating the RUL is not yet fully exploited. In this work a solution is presented that is based on temperature sensors. Accelerated lifecycle tests of GM-elements on a testbed for vibration analysis are the basis for developing the condition monitoring system. During these lifecycle tests a mechanical aging of the components is achieved by a force controlled hydraulic cylinder. Thereby, in a first step the end of the tests is determined by the cylinder's displacement amplitude. Different sensors are investigated during the lifecycle tests. The logged temperatures show that this metric is suitable for estimating the RUL of GM-elements by using condition monitoring prognostics.

1. Einleitung

Condition Monitoring bietet diverse Vorteile für die Instandhaltung. So können die Verlässlichkeit des Systems und deren Aspekte Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit gesteigert werden [1]. Wichtige Definitionen aus diesem Themenbereich werden in der DIN 31051 erläutert. Lange wurde der Einsatz von Condition Monitoring Systemen aufgrund der Installationskosten sowie der Kosten für eine kontinuierliche Überwachung in Frage gestellt. Heute zählen Diagnose-Systeme in der Windenergietechnik allerdings zum Stand der Technik, u. a. weil die Instandhaltungskosten ungeplanter Wartungen über die gesamte Lebenszeit einer Windenergieanlage deutlich größer sind als die Kosten eines auf die jeweilige Anlage abgestimmten Condition Monitoring Systems [2], [3]. Zur Überwachung der Anlagen werden ohnehin sogenannte Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systeme eingesetzt, die in der Regel im zehn Minuten Takt Daten verschiedener Sensoren aufzeichnen und aufbauend auf diesen Daten die Anlage, die Umgebungsbedingungen und die Stromgewinnung überwachen. Es ist jedoch empfehlenswert für Condition Monitoring weitere Sensoren und eine höher frequentierte Datenakquisition zu betreiben, um die Genauigkeit der Analysen zu steigern. Weiterhin können eine vorausschauende Wartungsplanung aufbauend auf der prognostizierten Restlebensdauer des Systems bzw. seiner Komponenten und damit eine optimale Nutzung des Systems durch Prognosemethoden realisiert werden. Aus den genannten Gründen rückt in dieser Industriebranche die Umsetzung einer zuverlässigen Prognose der nutzbaren Restlebensdauern auf Basis geeigneter Daten immer stärker in den Mittelpunkt.

Die in dieser Arbeit betrachteten Gummi-Metall-Elemente (GM-Elemente) werden an verschiedenen Positionen zur Schwingungs- und Geräuschisolation in Windenergieanlagen eingesetzt. Mögliche Anwendungen sind Wellen-, Generatorlagerungen, Getriebelager und Lager für die Gondel sowie ihre Komponenten. Dem Stand der Technik entspricht es die nutzbare Lebensdauer von GM-Elementen während der Entwicklung und Auslegung aufbauend auf beschleunigten Lebensdauerersuchen und Erfahrungswerten abzuschätzen. Mit dem Ziel eine optimale Wartungsplanung realisieren zu können, soll durch den Einsatz von Condition Monitoring die nutzbare Restlebensdauer (RUL) präziser prognostiziert werden. Konkret ermöglicht die Schätzung dieser Lebensdauer während des Betriebs eine signifikante Steigerung der Verfügbarkeit und der Auslastung der überwachten Elemente und damit der gesamten Anlage. Eine größere Verfügbarkeit ist gleichbedeutend mit weniger, vor allem ungeplanten Stillständen, wodurch das System in einer größeren Zeitspanne seiner Lebenszeit einsatzbereit ist. Dies kann zu einer Reduzierung der Stillstandskosten und einer größeren Stromgewinnung führen. Am Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik der

Universität Paderborn ist eine Condition Monitoring Datenbank entwickelt worden, auf die bei der Entwicklung und Umsetzung des hier vorgestellten Konzepts zurückgegriffen werden kann. Diese Datenbank enthält verschiedene Methoden zur Merkmalsextrahierung (Feature Extraction) als auch zur Prognose der nutzbaren Lebensdauer oder eines sogenannten Health Index' [4].

Die Gliederung der Arbeit beinhaltet vier weitere Kapitel. In Kapitel zwei wird der Stand der Technik im Bereich der Prognosemethoden sowie der verwendeten Messgrößen vorgestellt. Die Datengenerierung für die Prognose erfolgt in beschleunigten Lebensdauerersuchen, welche in Kapitel drei erläutert werden. Im vierten Kapitel wird das auf Temperaturdaten basierende Konzept zur Schätzung der RUL der GM-Elemente vorgestellt, bevor in Kapitel fünf eine Zusammenfassung und ein Ausblick folgen.

2. Condition Monitoring – Verfahren und Messgrößen

Prognosemethoden im Condition Monitoring können unterteilt werden in datenbasierte, modellbasierte und statistische Methoden. Während die erste Variante eine große Menge an Daten benötigt, um ein Prognosemodell zu erlernen, kann mit modellbasierten Methoden eine Prognose mit wenigen Daten aufbauend auf einem zuvor entwickelten Modell erzeugt werden. Nach der Art des Modells kann eine weitere Unterteilung in empirische und physikalische Modelle stattfinden. Die statistischen Methoden basieren auf statistischem Wissen über das Ausfallverhalten der betrachteten Produkte. In dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, das mittels modellbasierter Methoden umgesetzt werden soll. Diese Methoden bieten den Vorteil, dass sie eine sehr genaue Prognose ermöglichen, wenn das verwendete Modell hinreichend gut ist. Zudem ist mit der hier verwendeten Methode, dem Partikelfilter, eine online Prognose realisierbar.

Als modellbasierte Prognosemethode wird ein Partikelfilter verwendet, ein Algorithmus, der mittels Bayes'scher Wahrscheinlichkeitstheorie Zustandsschätzungen nichtlinearer Systeme ermöglicht. Dabei wird für jeden Zustand des technischen Systems eine Population aus Samples, den sogenannten Partikeln, erzeugt, welche durch Monte Carlo Simulation bis zu einem vorher definierten Grenzwert in die Zukunft propagiert werden. Der verwendete Partikelfilter wird in [5] erläutert. Diese Methodik wird insofern angepasst, dass hier mehrere Modelle für die Prognose zugrunde liegen sollen, um die Streuung in den Verläufen der Messgrößen besser abzubilden. Dieser Ansatz hat sich bereits in der Prognose der restlichen Nutzungsdauer für die Messgröße „Weg“ als geeignet erwiesen [6].

In der Literatur finden sich diverse Messgrößen, welche für Condition Monitoring geeignet sind. Dabei muss für jedes System individuell entschieden werden, welche Messgröße bzw. welche Messgrößen das Systemverhalten am besten beschreiben und zudem detektiert werden können. Im Bereich der Windenergieanlagen werden verschiedene Messgrößen für Condition Monitoring genutzt. Diese sind Beschleunigung, Ölverschmutzung, akustische Signale, auch die Temperatur [3], [7] etc.

3. Lebensdauerversuche der GM-Elemente

Die Prüfung und Charakterisierung von GM-Elementen ist komplex [8]. Dies ist u. a. durch das nichtlineare Verhalten der Elemente und die fertigungsbedingten hohen Streuungen bei gleichen Lagertypen zu begründen, die sich auch in den Lebensdauern der Lager widerspiegeln. Auch aus diesem Grund wird die Lebensdauerschätzung dieser Elemente heute standardmäßig basierend auf den Ergebnissen der Lebensdauerversuche und ggf. einer linearen Schadensakkumulation, welche sich aus der Lebensdauerberechnung der Metalle ableitet, aufgestellt [9]. Daher ist es nicht der Anspruch dieser Arbeit ein physikalisches Modell zur Prognose der Lebensdauer dieser Elemente aufzustellen, sondern mit einem empirischen Ansatz diese Schätzung mit möglichst kleinem Fehler durchzuführen.

Die hier verwendeten GM-Elemente werden auf einem Schwingungsanalysesystem in Lebensdauerversuchen getestet [10]. Das GM-Element selbst wird für die Versuche durch einen Bolzen und einen Hohlzylinder vorgespannt, um eine möglichst realistische Anbindung in der Windenergieanlage nachzubilden. Mittels dieser Elemente wird es dann auch im Lebensdauerversuch eingespannt. In Bild 1 ist der Aufbau des Lebensdauerversuchs dargestellt. An dem Winkel an der linken Seite befindet sich die Positioniereinheit des Lagers, in der das Lager fest verspannt wird. Dabei wird der Bolzen, welcher durch den inneren Metallring des Lagers läuft, derart eingespannt, dass das Lager weder translatorisch noch rotatorisch bewegt werden kann. Über den äußeren Hohlzylinder erfolgt die Anbindung an einen Hydraulikzylinder. Dieser Hydraulikzylinder, positioniert mit Hilfe eines Turms, erzwingt eine kraftgeregelte Bewegung des Lagers, welches größtenteils durch die Nachgiebigkeit des Gummis ermöglicht wird. Die Anregung erfolgt über eine Sinus-Schwingung des Zylinders mit konstanter Kraftamplitude und konstanter Frequenz.

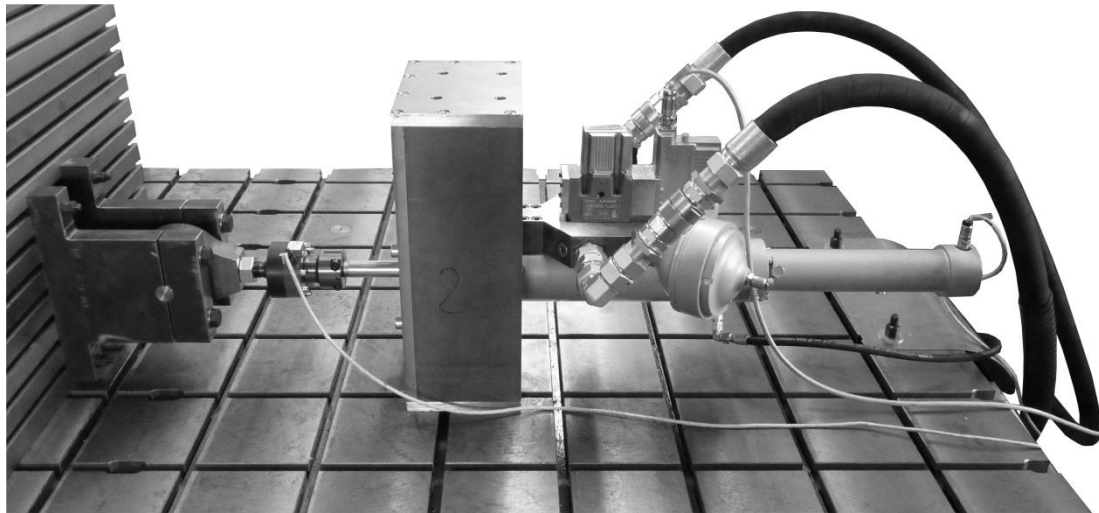


Bild 1: Aufbau des Lebensdauerversuchs

Auf diese Art und Weise soll eine mechanische Alterung des GM-Elements umgesetzt werden. Um weitere Alterungsmechanismen des GM-Elements auszuschließen, wie beispielsweise eine thermische Alterung, wird die Temperatur des Elements kontinuierlich überwacht. Wenn die Lagertemperatur eine vordefinierte maximale Temperatur übersteigt, wird das Lager mit einer Kühleinheit luftgekühlt.

Mit dem Ziel die Degradierung eines Gummi- bzw. GM-Elements zu beschreiben werden Größen gesucht, die diese Degradierung wiedergeben können. Dabei existieren in der Literatur verschiedene Ansätze, die häufig auf den Kriterien sichtbare Risslänge, Steifigkeit und Dämpfungsarbeit beruhen [9]. Einen Condition Monitoring Ansatz, der auf der Messgröße Steifigkeit beruht, wurde in [6] vorgestellt. Da die Steifigkeit keine direkte Messgröße während der Lebensdauerversuche ist, wurde die Wegamplitude als Messgröße für die Nachgiebigkeit zur Beschreibung der Degradierung genutzt. Unter Verwendung eines Partikelfilters kann mit der Wegamplitude eine gute Prognose erstellt werden. Eine direkte Umsetzung dieses Konzepts mit einem Wegsensor erwies sich in der Realität als schwierig, da zur Detektion aller Bewegungsmöglichkeiten des GM-Elements eine große Anzahl an Sensoren benötigt würde. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein Konzept vorgestellt, in dem die Temperatur als Messgröße verwendet wird. Bei den durchgeführten Lebensdauerversuchen wurde weiterhin die Messgröße „Weg“ bzw. das von dieser Messgröße abgeleitete Merkmal „Wegamplitude“ als Kontrollgröße verwendet. Das bedeutet, dass das Lebensende der GM-Elemente durch eine zuvor definierte maximale Wegamplitude gekennzeichnet ist und die im folgenden Kapitel dargestellten Temperaturdaten mit den in [6] erläuterten Wegamplituden korrelieren.

4. Konzept Temperatursensor

Die Position des verwendeten Temperatursensors spielt bei der Datenakquise eine entscheidende Rolle. Es ist zu erwarten, dass die Temperatur im Gummi des GM-Elements am höchsten ist aufgrund der umgesetzten Walkarbeit und der Degradierung des Gummis. Um diese Temperatur messen zu können, soll im ersten Schritt ein zum Temperaturmessen verwendeter PT100 möglichst nah an das Gummi herangeführt werden, ohne das Produkt selbst konstruktiv zu ändern. Das Ziel war es in diesem ersten Schritt zu testen, ob die Messgröße Temperatur eine geeignete Größe ist, um die Lebensdauer der GM-Elemente mittels Prognosemethoden zu schätzen. Die praktische Umsetzung ist in Bild 2 dargestellt. Hier ist ein Ausschnitt des Lebensdauerversuchs zu sehen, in dem das Lager noch nicht vollständig verspannt ist, um einen besseren Blick auf den Aufbau zu gewähren. Auf den durch das Lager laufenden Bolzen wird ein metallischer Ring geschoben. Mit einem wärmeleitenden, Zweikomponenten Klebstoff wird der PT100 von außen auf diesen Ring appliziert. Dabei ist zu beachten, dass die Spitze des PT100s am Rand des Rings befestigt und damit nah am Gummi ist. Während des Versuchs liegt der Ring mit dem PT100, wie in Bild 2 dargestellt, am Innenring des GM-Elements an und befindet sich damit in unmittelbarer Nähe zu dem Gummi.



Bild 2: Position des Temperatursensors

In mehreren Versuchen wurde auf diese Art die Temperatur der Lager mitgeschrieben. Die in dem folgenden Bild 3 dargestellten Temperaturverläufe zeigen alle einen ähnlichen Verlauf. Zu Beginn steigen die Temperaturen stark an, bevor sie im mittleren Bereich Schwankungen in einem kleinen Temperaturbereich aufweisen. Am Ende des Lebensdauerversuchs sehen wird dann für Lager 1 und 3 einen deutlichen Anstieg, der bei Lager 2 kleiner ausfällt.

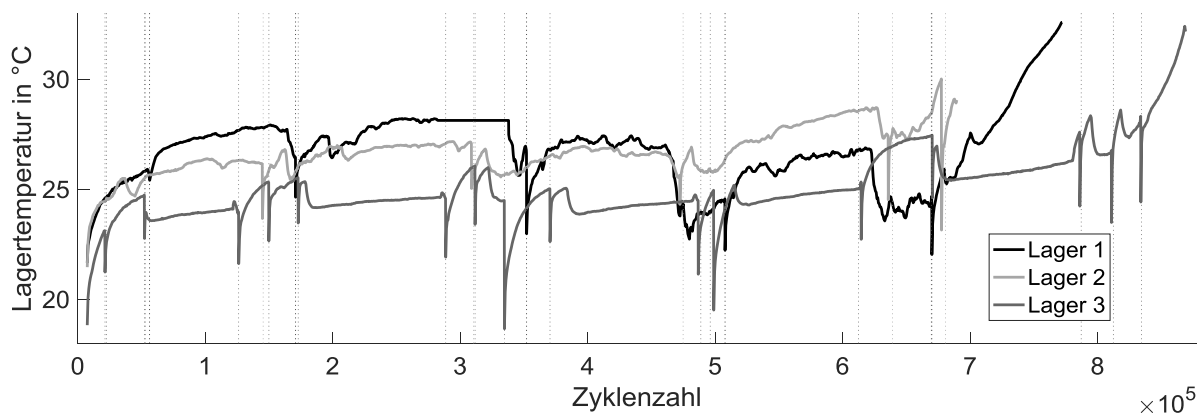


Bild 3: Lagertemperatur während der Lebensdaueruntersuchung

Analog zu realen Anwendungen stand der Versuch zeitweise still, sodass das Lager abkühlen konnte, wie die lokalen Minima in den Kurven zeigen. Diese Zeitpunkte sind durch die senkrechten, gepunkteten Linien gekennzeichnet. Nach dem erneuten Starten des Versuchs stieg die Lagertemperatur schnell wieder an. Dabei erreichte sie ein Niveau, das über weite Strecken des Lebensdaueruntersuchungs annähernd konstant war. Erst gegen Ende der Lebensdauer stieg die Temperatur nach Stillständen und auch während des Betriebs über dieses Temperaturniveau hinaus an. Wie in Bild 3 dargestellt, liegt das Temperaturniveau im Mittelteil der Versuche in einem Bereich um 25 °C. Unterschiede im Niveau der Lebensdaueruntersuchung können beispielsweise durch den Einfluss der Umgebungstemperatur erklärt werden. Die für Prognose wichtige Eigenschaft eines Trends in der Messgröße lässt sich in dieser Abbildung gut erkennen. Somit wurde eine Größe gefunden, welche die Alterung des GM-Elements beschreiben kann und zudem messbar ist. Dennoch wird zu diesem Zeitpunkt keine Prognose aufbauend auf den Temperaturdaten durchgeführt, weil die Temperaturen der Lager leicht durch äußere Bedingungen, insbesondere die Umgebungstemperatur beeinflusst werden können. Aus diesem Grund wurden neben den Lagertemperaturen auch die Umgebungstemperaturen im Labor während der Lebensdaueruntersuchung mit einem Thermoelement bzw. einer Thermocamera gemessen. Bildet man anschließend die Differenz aus der Lagertemperatur und der Umgebungstemperatur, so ergeben sich die in Bild 4 dargestellten Temperaturverläufe. In der Abbildung sind die Temperaturdifferenzen der drei Lebensdaueruntersuchungen über der Zyklenzahl abgebildet.

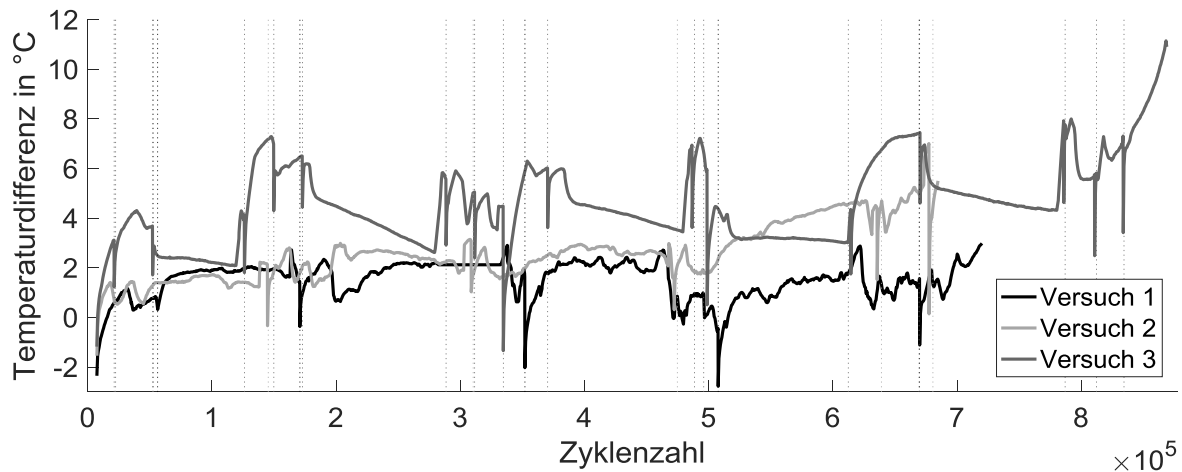


Bild 4: Temperaturdifferenz der Lager- und Umgebungstemperatur

Auch hier liegen die lokalen Minima der Verläufe in Versuchsstillständen begründet, welche erneut durch senkrechte, gepunktete Linien gekennzeichnet sind. Die Lebensdauerversuche der drei Lager ergeben einen ähnlichen Verlauf der Differenztemperatur. Aus diesem Grund soll ein parameterbasiertes Modell zur Beschreibung der zeitlichen Verläufe der Differenztemperaturen gebildet werden.

4.1 Prognose der RUL

Um die generelle Eignung des Vorgehens zu zeigen, soll im Folgenden mittels Partikelfilter nachgewiesen werden, dass aufbauend auf derartigen Modellen eine Schätzung der RUL der GM-Elemente möglich ist.

Daher wird jeweils ein Modell für den Lebensdauerversuch 2 und 3 gebildet. Diese Modelle basieren auf der gleichen Exponentialfunktion, verwenden aber unterschiedliche Parameter. Diese Parameter werden mittels des Optimierungsalgorithmus 'Differential Evolution' bestimmt. Eine nähere Erläuterung dieses Algorithmus' findet sich in [11]. Diese Modelle können dem Partikelfilter dann als Grundlage für die Schätzung der RUL der Lager dienen. Exemplarisch wird als Eingangssignal die gemittelte Differenztemperatur von Lager 3 verwendet. Zu verschiedenen Zeitpunkten kann dann eine Prognose der RUL erfolgen. In Bild 5 sind die zu verschiedenen Zeitpunkten während der Lebensdauer ermittelten RULs visualisiert. Dargestellt sind die realen RULs, die sich aus den Messdaten ergeben, im Vergleich zu den prognostizierten RULs. Zudem wurde ein 15%-Fehlerband hinzugefügt, das veranschaulicht, wie weit die Schätzung von den realen Werten abweicht. Verwendet man Modell 2 für die Prognose der Daten aus Lebensdauerversuch 3 zeigt sich, dass eine Prognose relativ große Fehler aufweist. Dieser Fehler wird gegen Ende der Lager-Lebensdauer deutlich geringer.

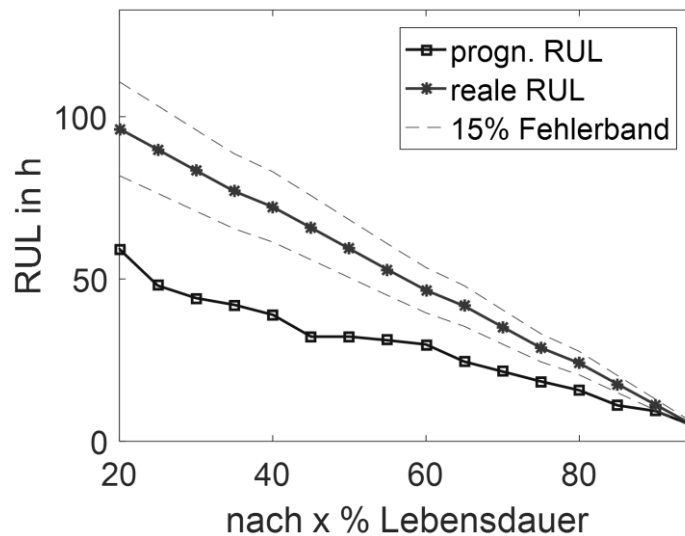


Bild 5: Schätzung der RUL für Lager 3 mit Modell 2

Prinzipiell eignen sich die Temperatur und die verwendete Methodik zur Schätzung der RUL. Die Prognose veranschaulicht jedoch, dass weitere Modelle für eine bessere Genauigkeit der Methode benötigt werden. In [6] hat der Multimodell-Ansatz mit der Messgröße Wegamplitude zu einem guten Ergebnis geführt. Daher sollen in Zukunft weitere Messungen durchgeführt werden, um aufbauend auf diversen Temperaturverläufen eine größere Anzahl an Modellen für die Prognose zur Verfügung zu stellen. Dann kann mit Hilfe des Partikelfilters auf mehreren Modellen beruhend eine Prognose der RUL durchgeführt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Condition Monitoring Konzept vorgestellt, das aufbauend auf beschleunigten Lebensdauerversuchen gebildet wurde. In diesen Versuchen konnten Temperaturdaten gewonnen werden, welche einen Trend aufweisen, der es erlaubt die Alterung der GM-Elemente durch die Temperatur der Lager zu beschreiben. Um den Einfluss der Umgebungstemperatur zu berücksichtigen, wurde in einem nächsten Schritt die Umgebungstemperatur in Korrelation zur Lagertemperatur gesetzt. Aufbauend auf dieser Temperaturdifferenz wurde gezeigt, dass mit dem Partikelfilter eine Schätzung der RUL realisierbar ist. Diese Schätzung weist noch einen relativ großen Fehler auf, sodass die Methode durch weitere Modelle optimiert werden muss.

Da sich die Temperatur als geeignete Messgröße erwiesen hat, wird ein Prototyp entwickelt, der eine bessere Detektion der Lagertemperatur ermöglicht. Dafür soll dieser Sensor im Lager möglichst nah am Gummi positioniert werden. Mit diesen Prototypen sollen in weiteren Lebensdauerversuchen Temperaturdaten aufgezeichnet werden. Zusätzlich soll außerdem

die Umgebungstemperatur detektiert werden, um beide Größen in einer Prognose berücksichtigen zu können. Dann können aufbauend auf diesen Daten weitere Modelle zur Implementierung im Partikelfilter gebildet werden, sodass bereits zu einem früheren Prognosezeitpunkt die Genauigkeit der Schätzung der RUL verbessert werden kann.

Weitere Arbeiten sollten zudem mit verschiedenen Anregungskräften durchgeführt werden, um zu untersuchen, wie sich die Lagertemperatur dadurch verändert. Die weiterführende Frage, wie sich das Systemverhalten bei instationären Bedingungen, wie beispielsweise variierenden Anregungskräften ändert, ist ein weiteres Themenfeld, das in Zukunft erforscht werden wird.

6. Literaturangaben

- [1] Avizienis, A.; Laprie, J.-C.; Randell, B.; Landwehr, C.: Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Vol. 1, No. 1, 2004, S. 11-33
- [2] Besnard, F.; Nilsson, J.; Bertling, L.: On the Economic Benefits of using Condition Monitoring Systems for Maintenance Management of Wind Power Systems. IEEE 11th International Conference, 2010, S. 160-165
- [3] Crabtree, C. J.; Zappalá, D.; Tavner, P. J.: Survey of Commercially Available Condition Monitoring Systems for Wind Turbines. Durham University School of Engineering and Computing Sciences and the SUPERGEN Wind Energy Technology Consortium, 2014
- [4] Kimotho, J. K.: Development and performance evaluation of prognostic approaches for technical systems. Universität Paderborn Dissertation, 2016
- [5] 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, 2002, S. 174-188
- [6] Bender, A.; Kimotho, J. K.; Kohl, S.; Sextro, W.; Reinke, K.: Modellbasierte Prognose der nutzbaren Restlebensdauer von Gummi-Metall-Elementen. 15. Internationale Schienenfahrzeugtagung, Dresden 2017, S. 123-125
- [7] 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
- [8] Wallmichrath, M.; Lücker, E.; Jöckel, M.: Elastomerbauteile - Charakterisierung und Prüfung. Elastomerbauteile 676 (2009). Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. (Hg.) 2009, S. 171-180

- [9] Spitz, M.: Modellbasierte Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomerbauteile. Universität Duisburg-Essen Dissertation, 2012
- [10] Schwingungsanalyse-System für mechanische und mechatronische Komponenten. Forschungsgroßgeräte-Antrag bei der DFG, DFG-GZ: INST 214/95-1 FUGG, 2013
- [11] Elsayed, S. M.; Sarker, R. A.; Ray, T.: Parameter Adaption in Differential Evolution. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane 2012