

Konstruktion und Zustandsüberwachung eines Gummi-Metall-Teils mit integriertem Thermoelement

A. Bender¹, K. Reinke² und W. Sextro¹

¹Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn,

²Jörn GmbH, Kriegsbergstraße 17, Waiblingen

Kurzfassung

Gummi-Metall-Teile (GM-Teile) werden zur Schwingungsreduktion u. a. in Windenergieanlagen eingesetzt. Mögliche Anwendungen der Teile liegen in Wellen-, Generator- und Getriebelagerungen, Lagern für die Gondel und ihre Komponenten sowie in Drehmomentstützen. Mit dem Ziel eine prädiktive Instandhaltung zu realisieren, soll eine Zustandsüberwachung für die GM-Teile entwickelt werden. Diese Entwicklung basiert auf der Umsetzung diverser Schritte. Neben der funktionalen Betrachtung wird zwingend auch die konstruktive Integration der Sensoren in das überwachte Teil berücksichtigt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der verwendeten Messgröße Temperatur, die mittels ausgewählter Sensorik detektiert wird. Dabei werden Lebensdauerversuche unter instationären Betriebsbedingungen durchgeführt, um diese Messdaten zu generieren. In der Datenauswertung werden sie hinsichtlich der Degradierung des GM-Teils analysiert und für die Ermittlung der nutzbaren Restlebensdauer verwendet.

Abstract

Rubber-metal-elements are used for isolation of vibrations e. g. in wind turbines. Possible applications of the elements are shaft bearings, generator bearings, gearbox bearings, bearings for the nacelle and its components and torque supports. In order to realize predictive maintenance, an accurate condition monitoring system for rubber-metal-elements should be developed. During that development different aspects have to be implemented. Additionally to the functional analysis, the constructive integration of the sensors into the monitored part is mandatory. The focus of this work is on the measured variable temperature, which is detected by means of appropriate sensors. Thereby lifetime tests are run under non-stationary operating conditions to generate temperature measurements. During data analysis, the measured data is analyzed regarding the degradation of the rubber-metal-elements and remaining useful lifetimes are estimated.

1. Einleitung

In der Entwicklung von GM-Teilen wird ihre Lebensdauer auf Basis der zu erfahrenden Belastungen, Lebensdauerversuchen und Schadensakkumulationsrechnungen durch Experten abgeschätzt. Die ermittelte Lebensdauer wird kundenseitig in der präventiven Instandhaltung als Grundlage für die Wartungsplanung verwendet. Eine individuelle und damit bessere Ausnutzung der Lebensdauer im Zusammenspiel mit einer größeren Verfügbarkeit wird durch eine kontinuierliche Zustandsüberwachung sowie die zugehörige Auswertung der Sensordaten ermöglicht.

Zustandsüberwachung ist nach DIN ISO 17359 definiert als Sammelbegriff für alle Tätigkeiten, die zur Feststellung des technischen Zustands der überwachten Maschine, Anlage oder deren Komponenten umgesetzt werden. Dabei grenzt sich die Zustandsüberwachung insofern von der Inspektion ab, als dass weder eine Unterbrechung des Betriebs noch eine Demontage der überwachten Maschine notwendig sind. Häufig wird eine Zustandsüberwachung als Entscheidungsgrundlage für eine zustandsbasierte Instandhaltung herangezogen. Dabei wird unterschieden, ob diese auf einer Zustandsdiagnose oder auf einer Prognose zukünftiger Zustände beruht. Im letzten Fall spricht man auch von prädiktiver Instandhaltung (Predictive Maintenance). Die zustandsbasierte Instandhaltung ist besonders relevant für die Windenergieindustrie, in der ungeplante Wartungen an Offshore Anlagen zeit- und kostenintensiv ausfallen [1]. Das in dieser Arbeit entwickelte Zustandsüberwachungssystem (CMS, Condition Monitoring System) basiert auf der Prognose zukünftiger Zustände der überwachten Teile, sodass der Einsatz des hier vorgestellten CMS einen entscheidenden Beitrag zu einer prädiktiven Instandhaltung von Windenergieanlagen liefern kann.

Eine grundlegende Tätigkeit im Prozess der Zustandsüberwachung liegt in der Aufnahme von Messdaten. Aufbauend auf diesen Daten wird der Zustand des überwachten Teils bestimmt. Entscheidend ist, dass die Messgröße in der Lage ist den Zustand des überwachten Teils zu beschreiben bzw. schadensrelevante Merkmale beinhaltet. Für die vorliegende Anwendung hat sich die Temperatur als geeignete Messgröße herausgestellt [2, 3]. Dabei wird die relative Temperatur zwischen der Temperatur im Lager und der Umgebungstemperatur gebildet. Dadurch wird der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Lagertemperatur kompensiert. Im Kapitel 2 wird der Aufbau des CMS mit Fokus auf die verwendeten Temperatursensoren und ihre Montage vorgestellt, bevor die in Lebensdauerversuchen unter instationären Betriebsbedingungen gemessenen Temperaturen analysiert werden. In Kapitel 4 folgt eine Vorstellung

der Ergebnisse der Lebensdauerprognose aufbauend auf den Temperatursignalen, bevor in Kapitel 5 eine kurze Zusammenfassung diese Arbeit abschließt.

2. Aufbau des Condition Monitoring Systems

In diesem Kapitel wird der generelle Aufbau eines CMS betrachtet, bevor das System der GM-Teile näher analysiert wird. Dabei liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf der Sensorik und ihrer Montage.

Ein CMS setzt sich aus folgenden Elementen zusammen: das zu überwachende System, die benötigte Sensorik, die Einheit zur Datenerfassung und -übertragung, die Software zur Datenauswertung und der Entscheidung über den ermittelten Zustand, außerdem eine Einheit zur Wartungsplanung und das Datenmanagementsystem. Diese Elemente finden sich in verschiedenen Systemen zur Überwachung technischer Systeme [4]. So setzt sich das hier betrachtete CMS für GM-Teile neben dem überwachten Teil aus der darin integrierten Sensorik, einer Elektronik zur Datenspeicherung, einer Software zur Auswertung, einer Datenübertragungseinrichtung sowie der Energieversorgung zusammen. Die Sensoren stellen eine wesentliche Größe dar, weil eine geeignete Messgröße zwingend erforderlich ist, um den Zustand des überwachten Elements genau zu detektieren. Daher soll eine konstruktive Integration der Temperatursensoren in die GM-Teile entwickelt werden, während für alle übrigen Komponenten auf bewährte Produkte zurückgegriffen werden soll.

Die Anforderungen an die Sensoren und ihre Integration sind vielfältig. So muss der Sensor selbst eine Lebensdauer erreichen, die deutlich über der des GM-Teils liegt, sodass das GM-Teil nicht aufgrund eines defekten Sensors eher gewartet werden muss. Weiterhin muss der Sensor ausreichend robust sein, um eventuell später folgende Fertigungsschritte ertragen und den hohen Montagekräften standhalten zu können. Die Verkabelung muss flexibel sein, um den Bewegungen des Systems widerstandsarm und ohne Schaden zu nehmen folgen zu können. Die Befestigung selbst muss robust aber auch einfach sein, um die Kosten gering zu halten. Hinsichtlich der Position des Sensors ist zu beachten, dass sich Sensor und das GM-Teil nicht negativ beeinflussen. Die Eigenschaften und die Lebensdauer sollen erhalten bleiben. Die fokussierte Sensorik zur Messung der Temperatur der GM-Teile besteht aus Thermoelementen. Ein GM-Teil mit integriertem Thermoelement ist in Bild 1 dargestellt. Das GM-Teil basiert auf einem metallischen Innenrohr, auf das die Gummispur appliziert wurde. Das geschlitzte Außenrohr bildet den äußersten Part des GM-Teils. Dabei ermöglicht der Schlitz dem GM-Teil eine größere Lebensdauer, indem er eine größere Vorspannung des Teils ermöglicht.

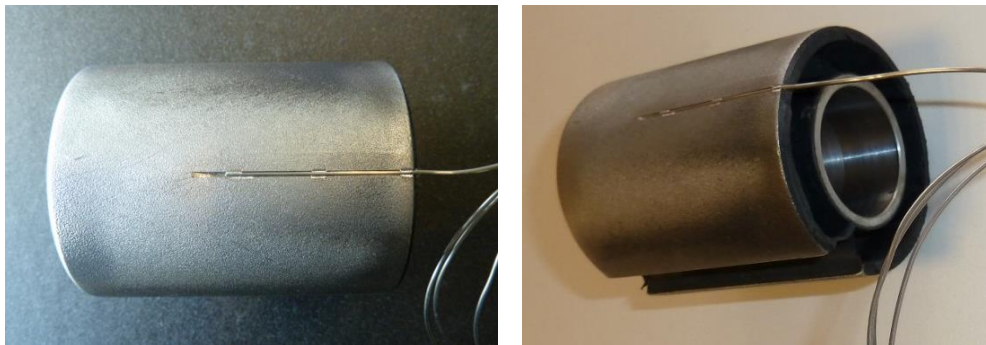


Bild 1: GM-Teil mit eingeschweißten Thermoelement

Idealerweise soll der Sensor von außen aufgebracht werden können, um dem Gummi keine Schwachstelle zuzufügen und selbst durch Verformungen des Gummis nicht geschädigt zu werden. Molls [5] zeigte, dass die Temperatur in der Gummispur eines von ihm betrachteten Elastomerteils nach Erreichen einer stabilen Temperatur eine Abweichung von maximal 3 °C zu der Temperatur an der Prüfkörperaufnahme aufweist. Daher erscheint die Temperatureaufnahme außerhalb des Gummis am besten geeignet.

Für die beschriebene Anwendung hat sich nach einigen Versuchen ein sogenanntes biegbares Mantelthermoelement aus Edelstahl als geeignet erwiesen. Dieses kann in eine Nut im Außenrohr des Teils eingelegt werden und wird dort an drei Stellen per Laserschweißung dauerhaft und robust befestigt. Die Nut wurde im vorliegenden Fall des in Bild 1 dargestellten GM-Teils eingefräst. In einer Serie kann die Nut in den Stanz-Biegeprozess zur Herstellung des Außenrohrs ohne zusätzlich Stückkosten – nur die Werkzeugkosten steigen minimal – integriert werden. Die Wärmeenergie, die für den Laserschweißprozess notwendig ist, ist minimal und hat keinen Einfluss auf die Lebensdauer des GM-Teils. Dies haben verschiedene Lebensdauerexperimente eindeutig gezeigt. Weiterhin lassen sich die biegbaren Mantelthermoelemente einfach zu Spiralfedern formen, so dass sie auch Vibrationen mit großen Amplituden folgen können. Sie verformen sich dabei ausschließlich im elastischen Bereich.

Die Signale aus den Thermoelementen werden anschließend von einer eignen Datenerfassung verarbeitet. Eine Möglichkeit besteht darin, die Daten dort nur aufzubereiten und in eine Cloud zu verschieben, von wo aus sie ausgelesen, durch den Auswertalgorithmus bewertet werden und die restliche nutzbare Lebensdauer (RUL, Remaining Useful Lifetime) berechnet wird. Es ist genauso möglich an dieser Stelle Elektronik für die Erfassung und Weiterleitung der Daten zu verwenden, die in der Windenergieanlage vorhanden ist.

Für die funktionale Entwicklung des CMS wird die Degradation der GM-Teile beobachtet. Allerdings ist deren Degradation ein sehr komplexer Prozess, der diverse Abhängigkeiten aufweist. Eine Gruppe der Einflussfaktoren umfasst die mechanischen Belastungen, welche sich in den Betriebsbedingungen der realen Anwendung sowie der Lebensdauerversuche widerspiegeln [5]. Daher wird eine Zustandsüberwachung der GM-Teile aufbauend auf der Messgröße Temperatur unter instationären Betriebsbedingungen in diversen beschleunigten Lebensdauerversuchen durchgeführt. Dabei wurden die Teile auf einem Versuchsstand zur Schwingungsanalyse mit dem Ziel eine mechanische Degradation des GM-Teils zu erzielen mit einer oszillierenden Radialkraft belastet. Die dabei am Prüfling detektierten Temperaturen werden in eine entwickelte Prognosemethode eingegeben, um die Schädigung bzw. das Lebensende der Teile zustandsbasiert vorherzusagen. Anschließend findet für diese Bedingungen ein Vergleich der prognostizierten mit der realen RUL statt.

3. Zustandsermittlung der GM-Teile

In diesem Kapitel werden die Messdaten zur Beschreibung der Zustände der GM-Teile näher betrachtet, dafür werden zuerst der Lebensdauerversuch, in dem diese Daten aufgenommen werden, und das Versuchsprogramm kurz vorgestellt. Anschließend werden die Daten grafisch dargestellt und analysiert.

3.1 Lebensdauerversuche der GM-Teile

Wallmichrath et al. [6] beschreiben die Prüfung und Charakterisierung von Elastomeren als komplex. Dies kann auf GM-Teile übertragen werden, da ihre dynamischen Eigenschaften und insbesondere ihr Alterungsverhalten auf das integrierte Gummi zurückzuführen sind. Zwei Beispiele hierfür sind in dem nichtlinearen Verhalten der GM-Teile und der fertigungsbedingten großen Streuungen der Lebensdauern gleicher Teile zu sehen. In den Lebensdauerversuchen wird die Anregung des Teils durch einen kraftgeregelten Hydraulikzylinder realisiert. Während des Versuchs ist das Innenrohr des Teils fixiert, wohingegen das Außenrohr durch den Hydraulikzylinder bewegt wird. So altert das Gummi mechanisch über der Zeit. Der genaue Aufbau der Lebensdauerversuche kann in [3] nachgelesen werden. Hier soll der Fokus auf dem Versuchsprogramm liegen.

Mit dem Ziel möglichst realitätsnahe Bedingungen auf dem Versuchsstand nachzustellen, wurden die Betriebsbedingungen variiert. So wird zum einen die Erregerkraft des Hydraulikzylinders hinsichtlich ihrer Amplitude und ihrer Frequenz in einem definierten Bereich variiert, zum anderen wird die Umgebungstemperatur entweder durch ein klimatisiertes Prüflabor oder eine

Wärmekammer beeinflusst. Im Versuchsprogramm wurde immer eine der drei Einflussgrößen verändert, während die anderen beiden Einflussgrößen nahezu konstant gehalten wurden.

3.2 Analyse der Messdaten

Im Folgenden werden die Messdaten für die Variation der drei Einflussgrößen betrachtet. Dafür wird zuerst der Temperaturverlauf bei GM-Teilen, die bei konstanter Kraftamplitude, konstanter Erregerfrequenz und Prüflabortemperaturen belastet werden, in Bild 2 (links) über der Zyklenzahl des Lebensdauerversuchs dargestellt. Dieser Verlauf ist charakteristisch für Lebensdauerversuche der GM-Teile. Zu Beginn, während der ersten 5-15 % der Lebensdauer, steigt die Temperatur deutlich an, bis sie ein stabiles Niveau erreicht hat. In der zweiten Phase schwankt die Temperatur um diese stabile Temperatur. Durch einen Versuchsstillstand kühlt sich das Teil ab, wie bei 10^6 Zyklen zu erkennen ist. Die letzte Phase des Lebenszyklus der Teile, je nach Betriebsbedingungen ca. 10-20 % der Lebensdauer, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur progressiv ansteigt. Bild 2 (rechts) zeigt die Temperaturverläufe zweier Teile, die während des Versuchs eine variierende Kraftamplitude erfahren haben. Die einzelnen Erregerkraftsprünge sind durch deutliche Temperatursprünge gekennzeichnet. Der generelle Verlauf und die Einteilung in die beschriebenen drei Phasen der Kurven sind jedoch weiter zu erkennen.

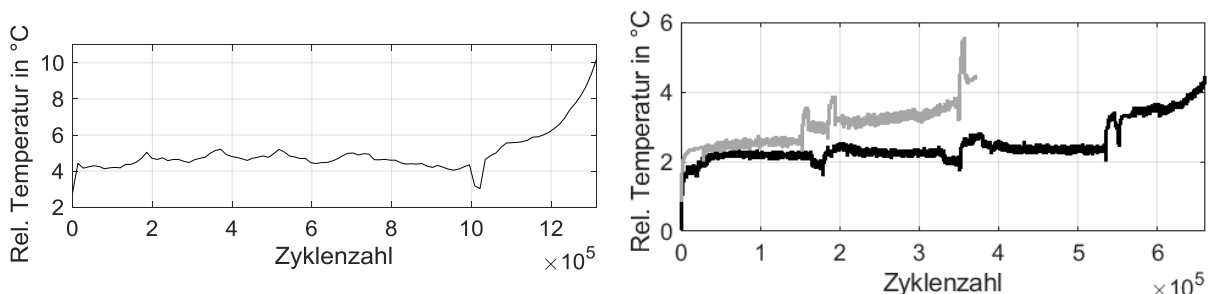


Bild 2: Lebensdauerversuche unter stationären Bedingungen (links) und bei variierender Kraftamplitude (rechts)

Bild 3 (links) zeigt den Temperaturverlauf eines Teils, das variierende Erregerfrequenzen im Lebensdauerversuch erfahren hat, über den gefahrenen Zyklen des Versuchs. Die Frequenzsprünge sind charakteristisch durch Temperatursprünge gekennzeichnet. In der Regel war der Temperaturanstieg umso größer, je größer der Frequenzunterschied war. Der Einfluss der Umgebungstemperatur wurde in zwei Versuchen in einer Wärmekammer untersucht. Dabei wurde eine Umgebungstemperatur von 60 °C in der Wärmekammer eingestellt, während die

anderen Versuche bei Laborbedingungen unter 20 °C umgesetzt wurden. Die beiden Temperaturverläufe sind in Bild 3 (rechts) dargestellt. Auffällig ist die deutlich kürzere Lebensdauer, welche bei einer erhöhten Temperatur des Teils zu erwarten war. Dies kann durch abnehmende Festigkeit der GM-Teile bei erhöhter Temperatur erklärt werden. Für alle Temperaturkurven in Bild 3 gilt, dass der generelle Verlauf der Temperaturkurve wieder in die drei Phasen eingeteilt werden kann.

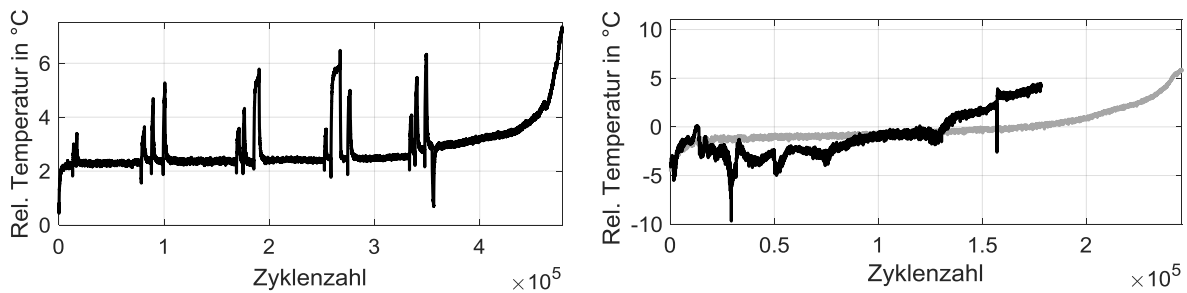


Bild 3: Lebensdauerversuche bei variierender Erregerfrequenz (links) und in der Wärmekammer (rechts)

Insgesamt weisen alle Temperaturkurven trotz der anregungsbedingten Abweichungen einen ähnlichen Verlauf mit den drei beschriebenen Phasen auf. Diese Gemeinsamkeit wird in der Prognose der RUL der GM-Teile genutzt.

4. Prognose der RUL

Die Lebensdauerprognose erfolgt mit der Partikelfilter-Methode, welche basierend auf den Temperatursignalen den aktuellen Zustand des überwachten GM-Teils bestimmt und diesen in die Zukunft propagiert. Der verwendete Partikelfilter ist detailliert beschrieben in [2, 7]. Die RUL berechnet sich als zeitliche Differenz zwischen dem ermittelten Endzeitpunkt, an dem das Teil versagt, und dem aktuellen Zeitpunkt. Beispielsweise ist ein Vergleich der prognostizierten und der real vorliegenden RUL über unterschiedlichen Prognose-Zeitpunkten für ein GM-Teil, das mit variierender Kraftamplitude belastet wurde, in Bild 4 dargestellt. Die prognostizierten RULs liegen alle in einem 20 %-Fehlerband um die realen RULs.

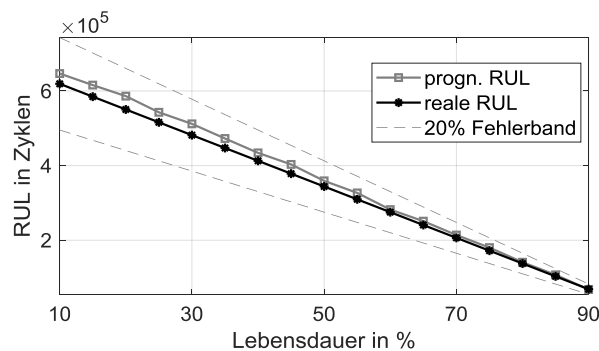


Bild 4: RUL eines GM-Teils über unterschiedlichen Prognose-Zeitpunkten

5. Zusammenfassung

Mit dem Ziel eine Zustandsüberwachung von GM-Teilen zu entwickeln, wurde der Schwerpunkt in dieser Arbeit auf die konstruktive Integration der Sensorik in das GM-Teil und die Ermittlung realistischer Lebensdauerdaten gelegt. Mantelthermoelemente wurden verwendet, um die GM-Teile zu überwachen. Dafür wurden sie in einem Schweißverfahren am Außenrohr des GM-Teils montiert. Diese Sensorik erfüllt die definierten Anforderungen, wie die Anwendung in verschiedenen Lebensdaueruntersuchungen belegt. Die in diesen Versuchen detektierten Temperaturkurven weisen alle einen Verlauf auf, der in drei Phasen unterteilt werden kann. Aus den Temperatursignalen lassen sich mit Hilfe eines Partikelfilters auch für instationäre Betriebsbedingungen genaue RULs ermitteln. Damit ist die Basis für eine prädiktive Instandhaltung von GM-Teilen in Windenergieanlagen gelegt.

6. Literaturverzeichnis

- [1] 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.
- [2] Bender, A.; Sextro, W.: A particle filtering approach for temperature based prognostics. Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World, 2018.
- [3] Bender, A.; Sextro, W.; Reinke, K.: Neuartiges Konzept zur Lebensdauerprognose von Gummi-Metall-Elementen. VDI-Berichte 2301, 2017.
- [4] Wong, K.-Y.: Design of a structural health monitoring system for long-span bridges. Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 3, Nr. 2, 2007, S. 169-185.
- [5] Molls, M.: Experimentelle und numerische Untersuchung ein- und mehrachsiger belasteter Elastomerbuchsen unter besonderer Berücksichtigung des Reihenfolgeinflusses. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen, 2013.

- [6] 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.
- [7] Arulampalam, M. S.; Maskell, S.; Gordon, N.; Clapp, T.: A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. IEEE Transactions on Signal Processing 50 (2), 2002, S. 174–188.