

Validierung einer Lastmessungs-gestützten Methode zur Restnutzungsdauer-Ermittlung von Windenergieanlagen (Validation of a load measurement based method for the assessment of the remaining service life of wind turbines)

Dipl.-Ing. **R. Kamieth***, Prof. Dr.-Ing. R. Liebich*,
M. Melsheimer**, Dipl.-Ing. A. Grunwald**, Dr.-Ing. C. Heilmann**

*Technische Universität Berlin, Fachgebiet Konstruktion und Produktzuverlässigkeit, Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, Berlin

**BerlinWind GmbH, Berlin

Kurzfassung

Die im Allgemeinen 20jährige Auslegungs-Lebensdauer erreichen derzeit in Deutschland einige tausend Windenergieanlagen (WEA) pro Jahr. Für die Betreiber stellt sich damit die Frage nach dem Umgang mit der alten Anlage. Eine Möglichkeit bietet der Weiterbetrieb, der allerdings abgesichert werden muss. Die hier vorgestellte Methode der Restnutzungsdauer-Bestimmung verwendet dazu eine Kurzzeit-Lastmessung, um die Beziehung zwischen den standortabhängigen Windlasten und den resultierenden Beanspruchungen der vorgeschädigten Anlage zu ermitteln. Zusammen mit den verfügbaren Aufzeichnungen zum WEA-Leben werden daraus die bislang erlebten Lasten rekonstruiert, um eine realistische Restnutzungsdauer abzuschätzen.

Für das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Firma BerlinWind GmbH ein flexibles Messsystem entwickelt, das eine wirtschaftliche Lastmessung auch für einzelne Anlagen erlaubt. Für die genutzten Dehnmessstreifen wurde ein Video-basiertes Kalibrierverfahren konzipiert, welches den Verzicht auf einen Mobilkran zur Erzeugung bekannter Lasten an der Anlage ermöglicht. Kalibrierverfahren und Messsystem wurden ausgiebig an einer kleinen WEA getestet.

Für die weitere Validierung der Methode wurde ein Versuchsstand entwickelt, der automatisiert vorgegebene Lasten durchfährt, um gezielte Parameteränderungen zu ermöglichen. Weiterhin wird eine Messung an einer großen ($P_n > 500$ kW) Anlage durchgeführt.

Abstract

In Germany, the general design lifetime of 20 years is being completed by several thousand wind turbines (WT) per year. The operator is thereby confronted with the question of handling

their old turbine. One possibility is the continued operation which requires inspection for safety reasons. The presented method of the assessment of the remaining service life utilises a short time load measurement campaign as a means to determine the correlation between the wind loading and the structural response of the predamaged turbine. Using the available information about the turbine's lifetime, the endured loads are reconstructed, leading to a realistic estimation of the remaining service life.

In cooperation with the company BerlinWind GmbH, a flexible measurement system has been developed which allows for an economic load measurement on WT. For the calibration of the comprised strain gauges, a video-based calibration method has been conceptualised which allows for a calibration at the turbine without the expensive use of a mobile crane. The calibration method and the measurement system have been extensively tested on a small WT.

For further validation of the method, a test stand has been constructed that simulates known loads in a controlled environment for a selective manipulation of parameters. Additionally, a load measurement on a big turbine ($P_n > 500 \text{ kW}$) will be conducted.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Windenergieanlagen (WEA) werden im Allgemeinen für eine Betriebsdauer von 20 Jahren ausgelegt [1, 2, 3, 4]. Da seit dem Beginn der 1990er Jahre in Deutschland eine steigende Anzahl WEA errichtet wurde, erreichen aktuell einige tausend Anlagen pro Jahr diese Auslegungs-Lebensdauer. Für die Betreiber stellt sich die Frage, wie sie mit ihren häufig noch voll funktionstüchtigen Anlagen umgehen können.

Bei vielen Anlagen wurde in der 20jährigen Betriebsdauer der erwartete Energie-Ertrag aufgrund von hinter den anfänglichen Prognosen zurückbleibenden Windgeschwindigkeiten nicht erreicht. Entsprechend ist anzunehmen, dass die von den Anlagen ertragenen Lasten geringer waren, als bei der Auslegung vorausgesetzt. Auch wurden bei der Auslegung der älteren Anlagen vereinfachte Annahmen getroffen, die mit entsprechend hohen Sicherheiten einhergehen. Die so potentiell entstandenen Lebensdauer-Reserven könnten durch den Weiterbetrieb der WEA genutzt werden.

1.2 Aktuelles Vorgehen beim Weiterbetrieb von WEA und Richtlinien

Es existieren bereits Richtlinien, die das Thema „Weiterbetrieb von WEA“ aufgreifen. Diverse Arbeitsgruppen beschäftigen sich in regelmäßigen Treffen mit dem Thema. Dennoch ist die

rechtliche Lage in Deutschland bislang nicht eindeutig. Bereits jetzt werden einige Anlagen über die ursprüngliche, 20jährige Betriebsdauer hinaus betrieben.

Der Germanische Lloyd (GL) schlägt in seiner „Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen“ [1] zwei Methoden vor, um eine Anlage auf ihre Tauglichkeit zum Betrieb über die Auslegungs-Lebensdauer hinaus zu prüfen:

- Die analytische Methode, bei der die Lebensdauer der betrachteten Anlage erneut berechnet wird, allerdings auf Basis von aktuellen Richtlinien anstatt den ursprünglich verwendeten, sowie unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik und den standortspezifischen Daten. Anschließend wird ggf. eine Inspektion und eine wiederkehrende Prüfung empfohlen.
- Die praktische Methode beinhaltet eine ausführliche Inspektion der gesamten WEA, bei der neben Turm und Fundament auch alle weiteren großen Elemente geprüft werden sollen (Rotor, Sicherheitseinrichtungen, elektrische Einrichtungen, etc.).

Weiterhin ist der GL-Richtlinie folgend auch eine Kombination beider Methoden möglich.

Da für den Weiterbetrieb und den damit verbundenen Standsicherheitsnachweis insbesondere die tragende Struktur des Bauwerks WEA von Relevanz ist, d.h. Turm und Fundament, ist auch die „Richtlinie für Windenergieanlagen“ [2] des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) zu nennen, welche für Bauämter bei der Genehmigung normativen Charakter besitzt. In der aktuellen Fassung von 2012 hat das DIBt erstmals einen Abschnitt zum Weiterbetrieb von WEA aufgenommen. Darin wird mit einigen Ergänzungen auf die GL-Richtlinie zum Weiterbetrieb verweisen.

1.3 Möglicher Nutzen der Restnutzungsdauer-Bestimmung

Die Bestimmung der Restnutzungsdauer einer WEA kann aus verschiedenen Gründen von Interesse sein. Rechtlich gesehen ist die Absicherung des Weiterbetriebs nach Ablauf der Auslegungs-Lebensdauer notwendig. Der Weiterbetrieb an sich kann z.B. attraktiv sein, falls ein Repowering, siehe Abschnitt 1.4, nicht möglich ist. Die Energiebilanz der Anlage betrachtend und auch wirtschaftlich gesehen ist der Weiterbetrieb interessant, da ohne erneute Investition – sowohl energetischer als auch finanzieller Art – weiterhin ein positiver Energieertrag möglich ist, wobei die entstehenden Betriebskosten ebenfalls relevant sind.

Eine weitere Anwendung der Restnutzungsdauer-Bestimmung ist zudem die Feststellung eines Restwerts einer WEA, z.B. bei einem Besitzer-Wechsel oder aus versicherungstechnischen Gründen.

1.4 Abgrenzung zum Repowering und zum Condition Monitoring

Mit „Repowering“ wird das Ersetzen von bestehenden Anlagen durch neuere, effizienter produzierende Anlagen bezeichnet. Meist werden dabei viele meist kleinere Anlagen eines Parks durch weniger Anlagen ersetzt, die aber u.a. größere Turmhöhen und Nennleistungen aufweisen. Dies ist jedoch nicht an jedem beliebigen Standort möglich. So gibt es Auflagen, die das Landschaftsbild schützen sollen und maximale Nabenhöhen von unter 100 m vorschreiben. Ist diese Höhe durch eine bestehende Anlage bereits erreicht, kann sie nach Ende ihrer Auslegungs-Lebensdauer zumindest nicht durch eine höhere Anlage ersetzt werden. Ein Weiterbetrieb kann hier eine sinnvolle Alternative sein.

Die hier vorgestellte Methode zur Abschätzung der Restnutzungsdauer nutzt u.a. Sensoren, die Schwingungen und Lasten messen, siehe Abschnitt 2. Ähnliche Sensor-Konfigurationen werden von sog. Condition Monitoring Systemen (CMS) genutzt. Diese werden oft für eine permanente Zustandsüberwachung an WEA installiert. Meist beschränkt sich die Überwachung dabei auf die fehleranfälligeren und nicht für die Standsicherheit relevanten Bauteile wie Getriebe, Lager, ggf. auch Rotorblätter. Eine seit Inbetriebnahme einer Anlage durchgeführte Zustandsüberwachung von Turm und Fundament findet bislang nicht statt, insbesondere nicht an älteren Anlagen. Da hier im Regelfall keine durchgängigen Aufzeichnungen der erlebten Lasten vorhanden sind, ist eine Prüfung vor dem Weiterbetrieb nötig. Eine Lastmessung kann hierbei Aufschluss über das tatsächliche Schwingverhalten der durch den Betrieb vorgeschädigten Anlage geben.

2 Methode

2.1 Kurzzeit-Lastmessung

Die hier vorgestellte Methode zur Restnutzungsdauer-Bestimmung von WEA nutzt eine Kurzzeit-Lastmessung. Aufbau und Durchführung richten sich dabei nach der Norm IEC 61400-13 für Lastmessungen an WEA [4]. Im Unterschied zu den Vorgaben in der Norm wird allerdings kein Windmessmast benutzt, da ein solcher Aufbau zu kostenintensiv wäre und keine wirtschaftliche Messung einer Einzelanlage erlauben würde. Stattdessen kommt der Messaufbau mit Dehnmessstreifen und Beschleunigungs-Sensoren, sowie der Aufzeichnung von Wetter- und Anlagen-Betriebsdaten aus, siehe Abschnitt 2.2.

Weiterhin soll die Messdauer möglichst kurz gehalten und eine zeitnahe, aber präzise Aussage erreicht werden. Die Lastmessung ist daher nicht – im Gegensatz z.B. zur Vermessung von Prototypen bei der WEA-Auslegung – auf viele Monate oder sogar Jahre ausgelegt, sondern soll in wenigen Wochen durchgeführt werden. Auch hier gibt die IEC-Norm [4] mit

der sog. „Capture Matrix“ eine Hilfestellung für die Bestimmung des Erreichens eines ausreichenden Messdaten-Umfangs.

Ziel der Messung ist die gleichzeitige Aufzeichnung von Belastungen durch den Wind (Windgeschwindigkeit v , Windrichtung δ , Gondel-Beschleunigungen a_i) und der Antwort der durch den bisherigen Betrieb vorgeschädigten Struktur, in Form der Turm-Beanspruchungen (Dehnungen ε_i bzw. Spannungen $\sigma_i = \varepsilon_i \cdot E$). Belastungen und Beanspruchungen können dann korreliert werden, um mithilfe der konservativen Annahme, dass die erhöhten Lasten während des gesamten bisherigen Betriebs gewirkt haben, eine sichere Restnutzungsdauer-Abschätzung anzustellen, siehe Abschnitt 2.3.

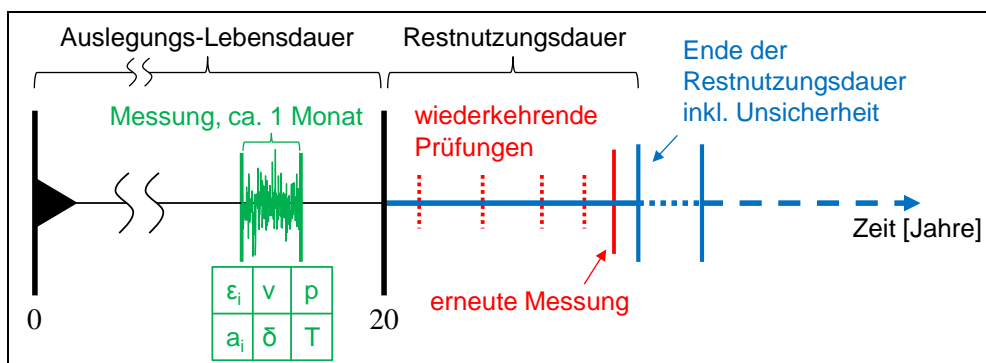


Bild 1: Schematischer Ablauf der Restnutzungsdauer-Bestimmung: Lastmessung vor Ablauf der meist 20jährigen Auslegungs-Lebensdauer zur Bestimmung der Restnutzungsdauer, belegt mit einer Prognoseunsicherheit, daraus ableitend Empfehlungen für Intervalle einer wiederkehrenden Prüfung sowie einer möglichen erneuten Messung zur Feststellung eines weiteren Restnutzungsdauer-Potentials

2.2 Messsystem

Für die Kurzzeit-Lastmessung ist in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner BerlinWind GmbH ein Messsystem entwickelt worden, das flexibel und wirtschaftlich an beliebigen Einzelanlagen eingesetzt werden kann. Das System besteht aus mindestens vier Dehnmessstreifen (DMS), von denen jeweils zwei orthogonal zueinander an Turmfuß und -kopf angebracht werden, um die Längungen in allen Richtungen erfassen zu können. Weiterhin werden drei Beschleunigungssensoren (BSS) in der Gondel angebracht, um die auf den Turmkopf wirkenden Beschleunigungen und Kräfte in den relevanten Richtungen (lateral, axial und torsional) aufzuzeichnen. Daneben werden Wetterdaten wie Windgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur und Druck sowie die Betriebsdaten der Anlage aufgezeichnet.

Eine Schwierigkeit liegt hier bei der zuverlässigen Bestimmung der Windgeschwindigkeit. Da sich das Anemometer der WEA oft auf der Gondel hinter dem Rotor befindet, sind die von ihm aufgezeichneten Windgeschwindigkeiten ggf. verfälscht. Ebenso kann nicht unbedingt von einer gültigen Kalibrierung des Anemometers ausgegangen werden. Eine Alternative ist die Ableitung der Windgeschwindigkeit aus zusammenhängenden Größen wie der Leistung

oder der Drehzahl, was zumindest im Teillast-Bereich möglich ist. Befinden sich in Standort-Nähe weitere Anlagen oder Wetterstationen, können deren Daten ebenfalls zum Vergleich herangezogen werden.

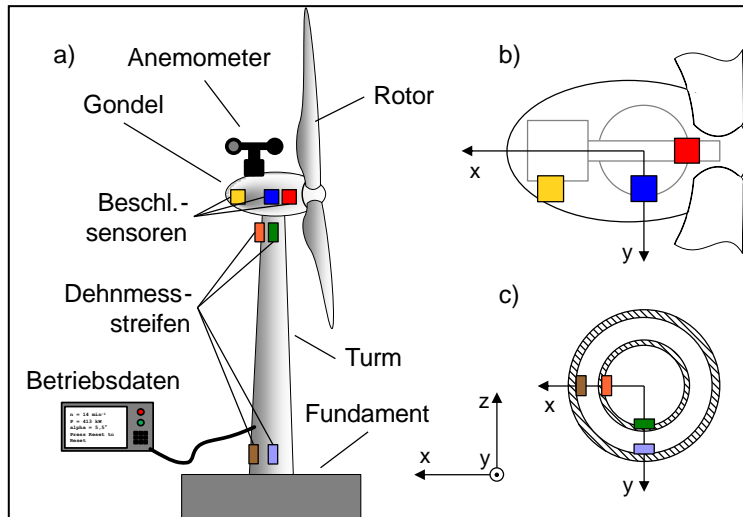


Bild 2: Messsystem zur Bestimmung der Restnutzungsdauer von WEA, a) an der Anlage installiert, b) Beschleunigungssensoren in der Gondel, c) Dehnmessstreifen je orthogonal an Turmfuß und -kopf

2.3 Extrapolation, Rekonstruktion der erlebten Lasten

Die Rekonstruktion der erlebten Lasten der vermessenen WEA erfolgt in folgenden Schritten:

1. Lastmessung: Aufzeichnung von Belastung durch Wind und Beanspruchung der durch den bisherigen Betrieb vorgeschädigten Anlage
2. Korrelation von Belastung und Beanspruchung
3. Rekonstruktion der Lasten anhand von allen verfügbaren Aufzeichnungen zum WEA-Leben, basierend auf der ermittelten Strukturantwort

Die relativ kurze Lastmessung dient dabei in erster Linie der Bestimmung des Verhaltens, d.h. der Schwingungsantwort der durch den bisherigen Betrieb vorgeschädigten Struktur. Es wird also eine Korrelation zwischen den Windlasten und der resultierenden Turm-Beanspruchung hergestellt. Im Weiteren müssen alle verfügbaren Informationen zum bisherigen Betrieb der Anlage zusammengestellt werden. So können beispielsweise Stillstandszeiten, in denen die Anlage deutlich weniger Lasten erfährt, als Lebensdauer-Gewinn angerechnet werden. Umgekehrt führen Extremereignisse mit hohen Lasten oder Havarien zu einem schnelleren Verbrauch der verbleibenden Lebensdauer. Je mehr Informationen zum WEA-Leben vorhanden sind, desto geringer ist die Prognoseunsicherheit, die aus getroffenen Annahmen und Messunsicherheiten etc. resultiert.

Letztendlich werden aus der Summe der Informationen die erlebten Lasten rekonstruiert. Es wird dabei die konservative Annahme getroffen, dass die Lasten und Schwingungsantworten der vorgeschädigten Anlage über die gesamte Lebensdauer in der gemessenen Höhe auftra-

ten. Es soll so eine realistische Abschätzung der Restnutzungsdauer erreicht werden, ohne diese aber zu überschätzen.

3 Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse und Stand der Forschung

3.1 Kalibrierung der DMS

Eine Grundlage für ein aussagefähiges Messergebnis ist die Kalibrierung der Sensoren, für die Lastmessung insbesondere die der DMS. Um die DMS am Messobjekt, d.h. dem individuellen WEA-Turm, zu kalibrieren, müsste ein Mobilkran eingesetzt werden, um eine Schublast auf den Rotor aufzubringen und somit eine bekannte Dehnung zu erzeugen. Da dieses Vorgehen zu aufwändig ist, um eine wirtschaftliche Messung an einzelnen WEA zu erlauben, wurde ein Video-basiertes Kalibrierverfahren entwickelt. Hierbei wird die Gondelbewegung im Betrieb oder bei Manövern (z.B. Notstopp) von einer Videokamera aufgezeichnet, die am Turmfuß positioniert ist. Die Aufnahme wird mit einem Tracking-Verfahren ausgewertet, um eine Relativbewegung der Gondel zu erhalten. Mithilfe einer mechanischen Modellierung des Turms ist es dann möglich, die bei der Messung aufgetretenen Soll-Dehnungen zu ermitteln und damit die DMS zu kalibrieren. Die Ergebnisse werden durch die simultane Beschleunigungsmessung in der Gondel validiert.

Das Verfahren wurde mithilfe von Aufnahmen an kommerziellen WEA entwickelt und an einer kleinen WEA (KWEA) in Berlin getestet. Die zur Verfügung stehende KWEA wurde darüber hinaus für ausgiebige Tests des Messsystems genutzt, siehe Abschnitt 3.2.

3.2 Durchgeführte Messungen

Das Messsystem wurde in einer ersten Messung unter winterlichen Bedingungen (November/Dezember) an einer KWEA in urbanem Umfeld (Berlin) getestet, die Daten für mehr als 240 Betriebsstunden lieferte. Am gleichen Standort folgte eine weitere Messung mit mehr als 1000 Messstunden und sommerlichen Bedingungen (August bis Oktober).

Der Messaufbau umfasste dabei jeweils sechs Beschleunigungssensoren und Dehnmessstreifen, d.h. mehr Sensoren, als für die Mindestkonfiguration (Abschnitt 2.2) vorgesehen. Weiterhin wurden Wetterdaten (Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Temperatur) und die Drehzahl der KWEA aufgezeichnet.

Bei den Messungen konnte eine nach IEC 61400-13 [4] mehr als ausreichende Datenmenge für die niedrigeren Windgeschwindigkeits-Klassen (Bins) aufgenommen werden. Lediglich die höheren Bins konnten nicht ausreichend gefüllt werden. Auch mit der längeren Messdauer von mehreren Monaten im Sommer wurde das von der Norm – hauptsächlich für größere Anlagen – gesetzte Ziel nicht erfüllt, was auch standort- und witterungsbedingte Gründe ha-

ben kann. Diese Erfahrung deutet darauf hin, dass die angestrebte, kurze Messdauer von wenigen Wochen prinzipiell eingehalten werden kann, für den Fall von fehlenden Windgeschwindigkeits-Daten müssen diese dann statistisch bzw. aus Standort-Aufzeichnungen rekonstruiert werden.

3.3 Auswertungssoftware

Aufgrund der großen Menge an Messdaten (50 bis 70 GByte / Monat) und den speziellen Auswertungszielen wurde zur Umsetzung der Restnutzungsdauer-Bestimmung eine Auswertungssoftware entwickelt (Bild 3). Die Hauptfunktionen sind:

- Sichtung und Zusammenführung der gesamten Datenmenge
- Identifizierung und Entfernen von fehlerhaften Daten durch den Nutzer
- Anwendung von konfigurierbaren Filtern und Darstellung der Messdaten in verschiedenen Diagrammen
- Klassierung der Messdaten anhand der Vorgaben aus IEC 61400-13 [4] oder anhand weiterer konfigurierbarer Vorgaben
- Erstellung eines Lastkollektivs inkl. Rainflow-Zählung nach ASTM E1049-85 [5]
- Eingabe und Dokumentation von Anlagendaten

Letztendlich werden alle verfügbaren Daten in der Software zusammengefügt, um die Restnutzungsdauer der vermessenen Anlage sowie der Prognoseunsicherheit zu errechnen.

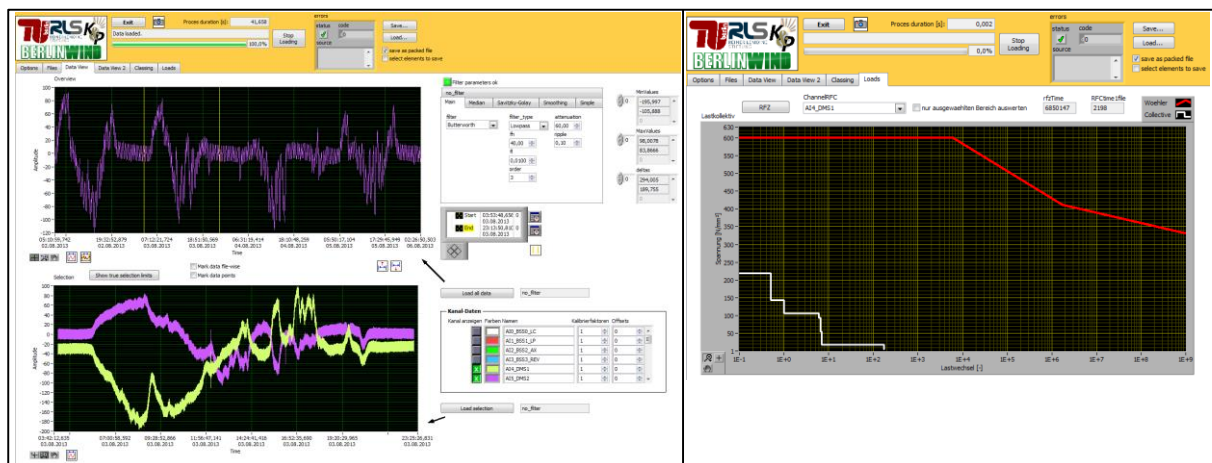


Bild 3: Benutzeroberfläche der Auswertungssoftware: Darstellung beliebiger Kanäle als Übersicht oder im Detail, inkl. Filteroptionen (links) und Darstellung eines errechneten Lastkollektivs mit synthetischer Wöhler-Linie (rechts)

3.4 Validierungs-Strategie

Die Validierung der Methode erfolgt mithilfe verschiedener, zur Verfügung stehender Modelle bzw. Anlagentypen:

- Versuchsstand: Es wird ein eigens entwickelter Versuchsstand mit einem ansteuerbaren WEA-Labormodell genutzt, der, ohne Windkanal, bekannte Lastkollektive durchfährt, was definierte Parameterveränderungen erlaubt.
- KWEA: Ausgiebige Tests wurden bereits an einer kleinen WEA durchgeführt (siehe Abschn. 3.2).
- Große WEA: Es wird derzeit eine Messung an einer seit etwa 10 Jahren im Betrieb befindlichen, kommerziell betriebenen WEA der 600-kW-Klasse geplant.

Ziel der Validierung ist es sicherzustellen, dass die ermittelte Restnutzungsdauer eine sichere Abschätzung darstellt, d.h. dass die rekonstruierten Lasten entweder korrekt oder sogar konservativ eingeschätzt, nicht aber unterschätzt werden. Das Verfahren wird dazu auf die zur Verfügung stehenden Anlagen angewandt. Weiterhin werden aus den aufgenommenen Daten Ausschnitte genutzt, um mit der ermittelten Korrelation zwischen Belastung und Beanspruchung die verbleibenden Daten zu rekonstruieren. Somit lassen sich zu erwartende Fehlergrößen einschätzen.

4 Zusammenfassung

Die bisherigen Erfahrungen im vorgestellten Forschungsprojekt zeigen, dass es einen zunehmenden Bedarf für Methoden zur Restnutzungsdauer-Bestimmung gibt. Der Weiterbetrieb von WEA kann dabei sowohl die Energiebilanz betreffend als auch finanziell gesehen vorteilhaft sein.

Die hier beschriebene Methode zur Restnutzungsdauer-Bestimmung stützt sich auf eine Kurzzeit-Lastmessung, die wirtschaftlich für einzelne Anlagen durchführbar ist. Dafür wurde ein flexibles Messsystem entwickelt und getestet, mit dem über einige Wochen die Belastungen auf eine vermessene WEA, sowie die resultierenden Beanspruchungen aufgezeichnet werden können. Über eine Korrelation zwischen diesen Daten und unter Zuhilfenahme von gleichzeitig aufgezeichneten Anlagen-Betriebsdaten sollen, zusammen mit vorhandenen Aufzeichnungen zum Anlagenleben, die erlebten Belastungen rekonstruiert werden. Im Gegensatz zu anderen Prüfmethode wie einer reinen Inspektion kann so eine realistische Abschätzung der Restnutzungsdauer inkl. Prognoseunsicherheit gegeben werden.

Das Messsystem und die zugehörige Auswertungssoftware wurden durch umfangreiche Messungen an einer KWEA erprobt. Zur Validierung der Methode befindet sich zudem eine Messung an einer großen WEA in Planung.

5 Ausblick

Nach den ausführlichen Tests von Messsystem und Softwares mithilfe der zur Verfügung stehenden KWEA werden die gewonnenen Erfahrungen im nächsten Schritt auf die Vermessung einer großen WEA (> 500 kW) übertragen. Da hier auch ausführliche Informationen zum Anlagenleben zur Verfügung stehen, kann eine Parameterstudie durchgeführt werden, die eine Aussage über den Einfluss dieser Daten möglich macht.

Danksagung

Diese Arbeit wird freundlicherweise von der Reiner Lemoine Stiftung gefördert und von der Firma BerlinWind GmbH unterstützt.

Literatur

- [1] Germanischer Lloyd, *Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen*, Ausgabe 2009.
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik, *Richtlinie für Windenergieanlagen*, 2012.
- [3] International Electrotechnical Commission, *IEC 61400-1, Wind turbines - Part 1: Design requirements*, Third Edition, 2005.
- [4] International Electrotechnical Commission, *IEC 61400-13, Wind turbine generator systems - Part 13: Measurement of mechanical loads*, First Edition, 2001.
- [5] ASTM International, *ASTM E 1049-85 (Reapproved 2005) - Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*, 1985/2005.