

## FOOTPRINTS, der nächste Schritt

### FOOTPRINTS, the next step

Seifert, Henry; Kramkowski, Theo; DEWI  
Siebers, Tom; Tacke Windenergie GmbH

Zur messtechnischen Ermittlung von Betriebsbelastungskollektiven stehen prinzipiell zwei Methoden zur Verfügung. Zum einen sind dies aus gemessenen Zeitreihen und vorgegebenen Windhäufigkeitsverteilungen synthetisierte Lastkollektive wie sie in der neu erschienenen IEC 61400-13 [1] ausführlich beschrieben sind. Zum anderen sind dies während der Messung direkt reduzierte Daten, die in Form von Rainflow-gezählten Übergangsmatrizen abgelegt werden. Während der Messkampagne an der Tacke TW1,5s (siehe auch Abb. 1) auf dem DEWI Testfeld wurden diese beiden Methoden exemplarisch für zwei Beanspruchungsrichtungen an der Rotorblattwurzel angewandt und sowohl ausgewählte und getriggerte 10-Minuten-Zeitreihen als auch sogenannte „On-line“ Rainflow-gezählte Beanspruchungskollektive aufgezeichnet. Auswertungen der kontinuierlich registrierten Blattbeanspruchungen über einen Zeitraum von fast vier Monaten liegen jetzt vor.

In order to evaluate the fatigue load spectra in principle two methods are available. On one side they can be synthesised from measured time series and given wind speed frequency distributions. This method is described in detail in the new IEC Technical Specification IEC 61400-13 [1]. On the other side the load spectra can be on – line reduced by the Rainflow – counting algorithm during the entire measurement campaign and stored in so-called from-to matrices. During the load measurement campaign at the Tacke TW1,5s (see Fig. 1) installed on the DEWI test site both methods were applied for two load directions at the rotor blade root. During nearly four months operation continuous Rainflow counted load data have been recorded and evaluated. The results are shown here.

From the power curve measurement campaign wind and operation statistics from the same time period were already available.



Abb. 1: Rotor der TACKE TW1,5s auf dem Testfeld des DEWI.

Fig. 1: Rotor of the TACKE TW1,5s at DEWI's test site north of Wilhelmshaven.

Aus der Leistungskurvenvermessung existieren für den gleichen Zeitraum gesammelte Wind- und Betriebsstatistiken, so dass mit Hilfe der „statistischen“ Information über die Windhäufigkeitsverteilung, wie sie in Abbildung 2 auf der linken Seite als Messpunkte und als Weibull-Verteilung dargestellt ist, überprüft werden kann, ob tatsächlich typische und damit repräsentative äußere Randbedingungen während der Messkampagne vorlagen. Die rechte Seite der Abbildung 2 zeigt die normierten Amplitudenkollektive für die Beanspruchungsrichtungen Schlagen und Schwenken für den gesamten Messzeitraum von 3,6 Monaten. Das on-line Verfahren liefert dabei eine gleichmäßige Ausbildung der Amplitudenkollektive, da alle Lastspiele im Messzeitraum Berücksichtigung finden. Aus Zeitreihen berechnete Kollektive zeigen üblicherweise eine ausgeprägte

Together with the statistical information such as the frequency distribution of the wind speed (shown in Fig. 2 on the left side as measured data and as fitted Weibull distribution) it is possible to check, whether the external conditions during the measurement campaign were representative. The right side of Fig. 2 shows the normalised range spectra for the two directions flapwise and lead-lag wise of the blade root bending moment for the entire time period of 3.6 months. The on-line method produces rather smooth range spectra indicating that all load cycles have been recorded within the campaign. Spectra calculated from time series typically show marked steps in the curves. Using the lin-log scale for the diagrams the flap wise load spectrum shows a triangular shape which has its origin from the more stochastic

Treppenform. Im lin-log Maßstab des Diagramms ist das mehr von stochastisch auftretenden Lasten geprägte Schlagbiegemoment als „Dreiecksform“ zu erkennen und das Schwenkbiegemoment durch die höheren deterministischen Anteile der Blattbewegung durch das Erdschwerefeld als angenähertes „Rechteckkollektiv“ zu sehen.

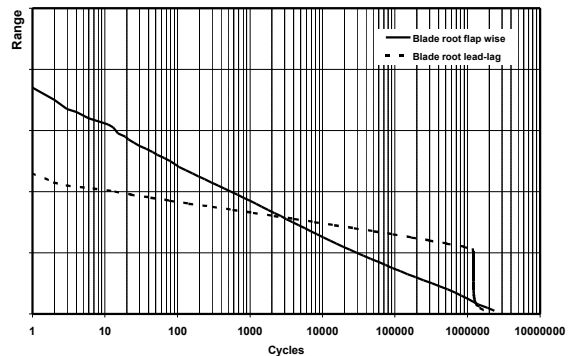
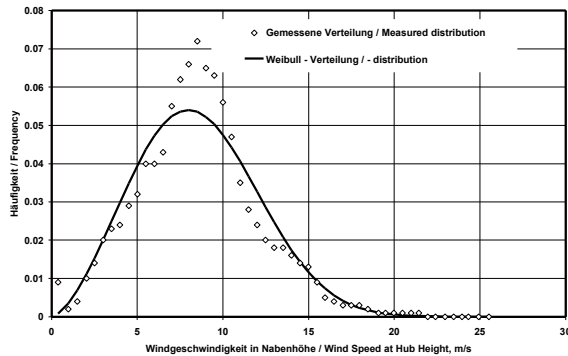


Abb. 2: Windhäufigkeitsverteilung in Nabenhöhe (links) und die aufsummierten Amplitudenkollektive der Rotorblattwurzel in Schlag- und Schwenkrichtung während der Messkampagne.

Fig. 2: Wind speed frequency distribution at hub height (left side) and the resulting normalised load range spectra for flapwise and lead-lag direction of the blade root bending moment during the measurement campaign.

Die visuelle Darstellung der anwachsenden Belastungskollektive - Zwischenauslesungen der Matrizen erfolgten nach drei Tagen bis 4 Wochen – veranschaulicht, bei welchen Windsituationen welche Teile der Übergangsmatrizen aufgefüllt wurden. Die anwachsenden „Säulen“ stellen die Anzahl der Lastwechsel von einer bestimmten Klasse in eine andere dar, das Auffüllen der „Matrix-Bodenfläche“ querab zur Diagonalen der Matrix repräsentiert dabei große Amplituden der Belastungen. Was hier in Abbildung 3 am Beispiel von drei Matrizen für die beiden Beanspruchungsrichtungen an der Blattwurzel nur ungenügend dargestellt werden kann, ist in einem ablaufenden „Film“ optisch wesentlich besser nachzuvollziehen. Um diese Entwicklung der Ermüdungslasten und die damit zusammenhängenden Formen und Inhalte solcher Rainflow-gezählten Matrizen quantifizieren zu können, wurde das von der Europäischen Kommission geförderte Projekt „FOOTPRINTS“ [2] durchgeführt, das unter anderem darauf zielte, typische „Fußabdrücke“ oder Häufigkeitsverteilungen in Form von Matrixkennwerten zu quantifizieren und anhand der Konvergenz der Parameter über der Aufzeichnungszeit festzustellen, ob die ausgezeichneten Daten repräsentativ sind. Diese Konvergenz der Matrixparameter konnte auch bei der vorliegenden Messkampagne von 3,6 Monaten gezeigt werden, so dass die dargestellten Kollektive für die vermessene WEA, am Standort Wilhelmshaven repräsentativ sein dürften.

Visualising the growth of the load spectra demonstrates at which wind speeds which parts of the matrices are filled. The matrices have been read out in periods from 3 days to 4 weeks. The growing columns represent the number of load cycles from one class (the whole load range is divided in classes, here 100) to another class. Filling the from-to area of the matrix perpendicular to the diagonal represents the large load amplitudes. The growth of the matrices is depicted for the two signals at the blade root in Fig. 3 in three steps. This can be demonstrated much better in a “movie” to follow up the steady growth in smaller steps compared against the external conditions. In order to reconstruct the development of the fatigue loads and the shape and content of the Rainflow counted matrices DEWI coordinated the research project “FOOTPRINTS” which has been partially funded by the European Commission [2]. This project aimed at quantifying typical footprints by defining matrix parameters. Converging of these parameters during the measurement campaign indicates that these are representative data. This convergence could also be found in the data of the measurement campaign at the Tacke TW 1,5s described here. This shows that the load spectra are representative for this turbine at this site.

The design engineers as well as the certification bodies are more and more interested in accurate information about the fatigue loads of the optimised components of the large Megawatt turbines.

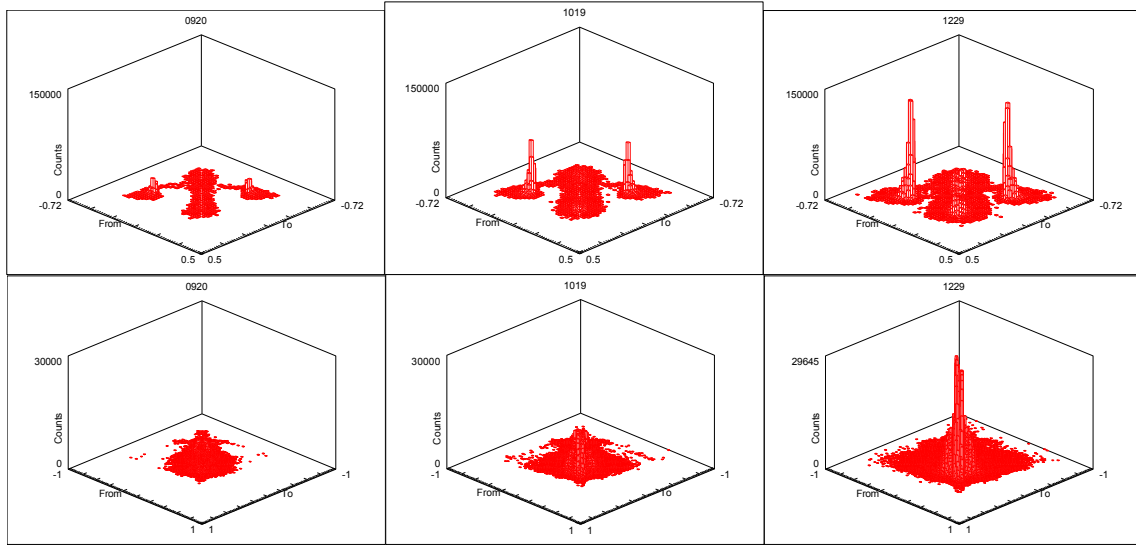


Abb. 3: Rainflow-gezählte normierte Beanspruchungskollektive in Form von from-to Matrizen (Schwenkrichtung obere, Schlagrichtung untere Reihe). Start der Meßkampagne 9.9.99, linke Spalte 20.9.99, mittlere Spalte 19.10.99 und rechte Spalte 29.12.99.

Fig. 3: Rainflow counted normalised load spectra as from-to matrices (lead-lag direction upper row, flapwise direction lower row). Start of the measurement campaign 9 Sep 99, left column 20 Sep 99, middle column 19 Oct 99, right column 29 Dec 99.

Eine möglichst genaue Aussage über die Ermüdungsbelastungen der materialoptimierten Komponenten großer Windenergieanlagen rückt immer stärker in das Interesse der Entwicklungsingenieure und Zertifizierer. Dabei tauchen Fragen auf, in welchen Mindestabständen WEA in Windparks aufgestellt werden dürfen, wobei der verminderte Energieertrag nur die eine Seite der Kostenmedaille darstellt. Für die andere Seite, nämlich die mögliche Beeinträchtigung der Lebensdauer der im Nachlauf betriebenen WEAs festzustellen, besteht noch reichlich Informationsbedarf. Dies gilt prinzipiell auch für den Betrieb von WEA im Off-shore-Bereich und in komplexem Gelände.

Die on-line monitoring Methode, wie in der vorliegenden Messkampagne angewandt, bietet dabei vielfältige Vorteile. Sie ist im Vergleich zu den oben erwähnten „Standardmessungen“, basierend auf 10-min-Zeitreihen, weitaus kostengünstiger und kann dadurch an mehreren WEA-Komponenten an verschiedenen Standorten in unterschiedlichen Konfigurationen gleichzeitig angewandt werden. Als Beispiel sei hier ein Windpark angeführt, in dem an zwei ausgewählten Anlagen des gleichen Typs, gleiche Komponenten unter gleichen äußeren Bedingungen im typischen Betrieb überwacht werden. Sogenannte Low-cycle-fatigue-Beanspruchungen, die mit herkömmlichen Meßmethoden nur sehr aufwendig zu erfassen sind, zeichnet die „on-line-monitoring“ Methode gleich mit auf. Je nach eingesetzter Datenerfassungstechnik besteht neben der Rainflow-Zählung

Questions are asked about minimum distances of wind turbines within wind farms where reduced energy yield is only one side of the “cost” medal. For the other side – the possible reduction of the lifetime of the turbine operating in the wake – a lot more information is needed. This is and will be especially true for the operation of wind turbines off-shore and in complex terrain.

The on-line monitoring method as described here offers manifold advantages. Compared to the “standard” load measurements based on 10-minute time series, the on-line monitoring method is much less costly. Thus, this method can be used on several wind turbine components in various configurations at different sites at the same time. This can be for example a wind farm in which two selected turbines of the same type, with the same components under the same external and operational conditions are monitored. So-called low-cycle fatigue loads, which can be recorded only with high effort using standard measurement methods are automatically recorded here. Depending on the data acquisition system used it is also possible to record triggered time series in parallel to the Rainflow counting, for example extreme loads on the components observed. The large number of comparable measurements and the long time period with a small amount of stored data enables also manifold statistical evaluations and assessments.

auch die Möglichkeit, sogenannte getriggerte Zeitreihen – zum Beispiel extreme Beanspruchungen – parallel aufzuzeichnen. Die größere Anzahl von vergleichbaren Messungen und die lange Meßdauer bei geringem Datenumfang lassen dann auch statistische Auswertungen und Bewertungen zu.

For the design engineers possibilities open up to verify their simulations, to monitor new developments and modifications and to react in time on problems detected by the measurements. Compared to the investment of a Megawatt turbine the costs of such a monitoring campaign seem to be negligible.

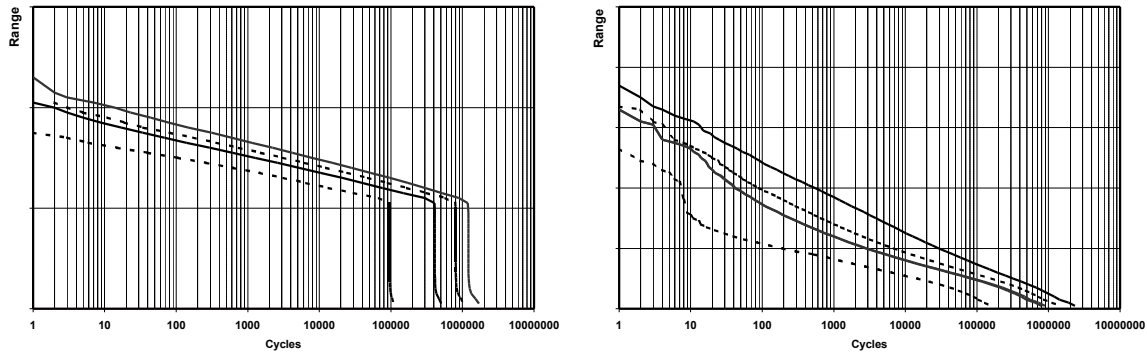


Abb. 3: Die im Monatsrhythmus ausgelesenen und aufsummierten normierten Amplitudenkollektive der Rotorblattwurzel in Schwenk- (links) und Schlagrichtung (rechts).

Fig. 3: The monthly evaluated and added normalised range spectra for lead-lag (left side) and flap-wise (right side) direction of the blade root bending moment.

Für die Entwicklungsingenieure eröffnen sich Möglichkeiten, Simulationen zu verifizieren, Neuentwicklungen und Änderungen zu verfolgen und bei erkannten Problemen rechtzeitig und gezielt Gegenmaßnahmen einzuleiten. Im Vergleich zu den hohen Investitionskosten der Megawatt-WEA erscheinen die Kosten eines solchen „Monitorings“ recht gering, bietet es doch vielfältige Vorteile. Erstmals wurde die Methode in dem EU-Projekt „Monitoring Fatigue Loads Using Cycle Counting Data Acquisition Systems“ [3] vom DEWI erprobt und in dem o.g. Projekt „FOOTPRINTS“ [2] weiter optimiert. Auch in dem im DEWI Magazin 15 vorgestellten Projekt „Ermittlung von Ermüdungslasten an großen WEA“ [4] konnten weitere Erfahrungen mit dem On-line-Monitoring gesammelt werden, die nun in dieser kommerziellen Anwendung umgesetzt wurden.

Ein Vergleich zu den Simulationen der Ermüdungslasten und zu synthetisierten Lastkollektiven, die entsprechend der gemessenen Windhäufigkeitsverteilung aus Zeitreihen erstellt werden, ist in Arbeit. Über die Ergebnisse wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet.

The method has been applied by DEWI for the first time in the JOULE-Project „Monitoring Fatigue Loads Using Cycle Counting Data Acquisition Systems“ [3] and has been further optimised in the a. m. project „FOOTPRINTS“ [2]. Further experience could be gained in the national research project „Monitoring Fatigue Loads at Large Wind Turbines“ [4].

A comparison with the synthesised load spectra from time series related to the wind speed frequency distribution measured is under work and the results will be presented at a later date.

## References

- [1] International Standard (IEC) for the Measurement of Mechanical Loads of Wind Turbines; Frans van Hulle; DEWI Magazin 16
- [2] Söker, Holger; Measuring Footprints of Wind Turbine Fatigue Loads using Monitoring Methods; Results of the JOULE Project; DEWI Magazin 14 (1999), pages 44-50.
- [3] Seifert, Henry: Lasten sammeln an Ort und Stelle. - DEWI-Magazin (1995) 7, S. 74-79
- [4] Seifert, Henry; VDMA Research Project; Monitoring Fatigue Loads at Large Wind Turbines; DEWI Magazin 15 (1999), pages 57-64.