

Anwendung des RFC-Verfahrens auf Windgeschwindigkeitszeitreihen und Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Rotorblattbelastungen

Hans Georg Beyer*, Anja Rösen, Hans-Peter Waldl

Abteilung Energie- und Halbleiterforschung, Fachbereich Physik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Postfach 2503, D-26111 Oldenburg, Fax 0441/798-3326
e-mail: igor@ehf.physik.uni-oldenburg.de

* Groupe Télédétection et Modélisation, Ecole des Mines de Paris, Sophia-Antipolis, France

Zusammenfassung

Zur theoretischen Ermittlung der Lastspektren von Rotorblättern werden heute zumeist aufwendige Simulationsprogramme verwendet. Es wurden aber auch wiederholt Verfahren vorgeschlagen, Lastspektren für Windkraftanlagen durch die direkte Transformation der Ergebnisse einer Wind-Rainflow-Zählung abzuleiten [1], [2]. Die Vorteile solcher Verfahren liegen in der wesentlich einfacheren Ermittlung der grundlegenden Belastungs-Rainflow-Matrizen und der generellen Verminderung des Rechenaufwandes. Es ist jedoch zu erwarten, daß sich aufgrund nichtlinearer Antwortcharakteristiken der hier untersuchten Rotorblätter auf die anregenden Windkräfte in der Anwendung Schwierigkeiten ergeben. Wir haben deshalb den Anwendungsbereich und die Grenzen dieses Vorgehens auf der Basis von Simulationsrechnungen genauer betrachtet. Ein Zwischenziel war dabei auch, zu einem besseren Verständnis des verwendeten Wind-Rainflow-Zählverfahrens zu gelangen.

1 Einleitung

Zur Auswertung von empirisch ermittelten oder simulierten Ermüdungslasten bedient man sich des Rainflow-Counting-Verfahrens (RFC) [3]. Das RFC ist ein Zählverfahren zur Ermittlung von zyklisch auftretenden mechanischen Belastungen. Das Verfahren identifiziert in einer Zeitreihe einen Zyklus, wenn das Signal von einer bestimmten Ausgangsamplitude zu einer anderen Amplitude wechselt und wieder zur Ausgangsamplitude zurückkehrt. Die zeitliche Information geht beim RFC verloren. Dieses Verfahren wird hier im ersten Schritt auf Windgeschwindigkeitszeitreihen angewendet, deren statistischen Eigenschaften sehr gut bekannt sind. Auf diese Weise möchten wir mehr Einblick in das RFC-Verfahren erhalten. Mit Hilfe synthetischer Windzeitreihen mit vorgegebenen Eigenschaften wird zum einen untersucht, wie sich die Variation der Meßhöhe, der mittleren Windgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität und der Phasenlage der Fluktuationen unterschiedlicher Frequenz auf die Ergebnisse der RFC-Analyse auswirkt. Zum anderen wird der Einfluß eines Parameters des RFC-Verfahrens, die Klassenbreite, auf die Ergebnisse dargestellt.

Um Ermüdungslasten von Windkraftanlagen (WKA) theoretisch zu ermitteln, werden zumeist WKA-Strukturmechanik-Simulationsprogramme mit repräsentativen Windgeschwindigkeitszeitreihen als Eingangsdaten verwendet. Als mögliche Alternativen bieten sich Verfahren an, die im wesentlichen auf einer Verknüpfung der statischen Lastkennlinie, z.B. des Rotors, mit unterschiedlichen repräsentativen Winddaten beruhen. In dieser Arbeit, vgl.[7], werden zwei Verfahren zur direkten Übertragung von Windgeschwindigkeitsdaten auf Rotorblattbelastungen mit den Ergebnissen eines detaillierten Simulationsprogrammes verglichen. Ziel ist

es herauszufinden, ob auch die einfachen Verfahren realistische und repräsentative Rotorblattbelastungen ohne großen Rechenaufwand berechnen können und somit eine schnellere Lebensdauerabschätzung für einzelne Bauteile ermöglichen.

2 RFC-Matrizen für Windgeschwindigkeitszeitreihen

Das Rainflow-Counting-Verfahren wird hier auf Windgeschwindigkeitszeitreihen angewendet, die mit der Shinozuka-Methode [4] generiert wurden. Winddaten werden bei diesem Verfahren als Cosinus-Schwingungen zufälliger Phasenlage dargestellt. Die Amplituden werden entsprechend Modellen der spektralen Leistungsdichte festgelegt. Es wurde zunächst untersucht, wie sich die Ergebnisse der RFC-Analyse verändern, wenn man die statistischen Parameter der Eingangsdaten variiert.

2.1 Turbulenzintensität

Die Variation der Turbulenzintensität liefert deutlich unterschiedliche RFC-Matrizen, wie in Abb.1 und 2

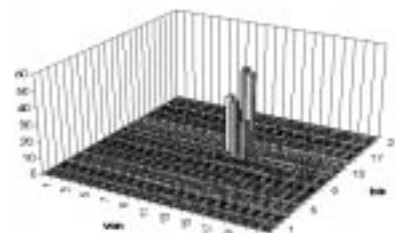


Abb. 1) RFC-Matrix einer synthetisierten Windgeschwindigkeitszeitreihe mit $\bar{u} = 12$ m/s und $\sigma/\bar{u} = 5\%$. Die Summe der Zyklen beträgt 113. Die Klassenbreite beträgt 1 m/s.

für die Turbulenzintensitäten $\sigma/\bar{u} = 5\%$ und 30% dargestellt. Mit zunehmender Turbulenzintensität steigt die Anzahl der Zyklen: 113 Zyklen bei $\sigma/\bar{u} = 5\%$ und 221 Zyklen bei 30% . Mit wachsender Turbulenzintensität nimmt der Bereich der auftretenden Amplituden deutlich zu.

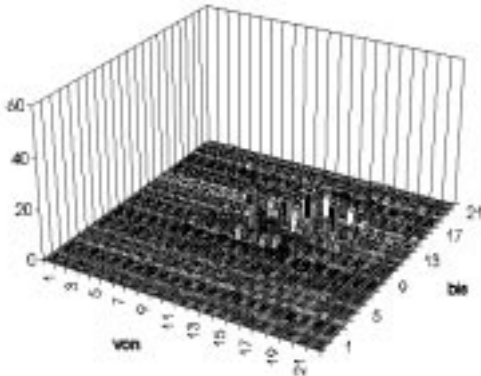


Abb. 2.) RFC-Matrix einer synthetisierten Windgeschwindigkeitszeitreihe mit $\bar{u} = 12\text{ m/s}$ und $\sigma/\bar{u} = 30\%$. Die Klassenbreite beträgt 1 m/s . Die Summe der Zyklen beträgt 221. Deutlich ist die große Streuung der Zyklen auf viele verschiedene Amplituden zu erkennen.

2.2 Mittlere Windgeschwindigkeit

Erhöht sich die mittlere Windgeschwindigkeit der untersuchten Windzeitreihen, so nimmt die Anzahl der vom RFC gefundenen Zyklen deutlich zu und der Amplitudenbereich wächst. Zum Verständnis ist hier zu beachten, daß bei gleichbleibender Turbulenzintensität die Standardabweichung der Fluktuationen proportional zur mittleren Windgeschwindigkeit ansteigt. Das Zentrum der Wind-RFC-Matrix liegt jeweils bei der mittleren Windgeschwindigkeit.

2.3 Meßhöhe

Mit zunehmender Meßhöhe der Windgeschwindigkeitsdaten nimmt die Anzahl der Zyklen leicht ab, da entsprechend der verwendeten Modelle die Turbulenzintensität mit der Höhe langsam abnimmt. Den RFC-Matrizen selbst ist kaum eine Veränderung anzusehen.

2.4 Phasenlage der Schwingungskomponenten

Es wurden mit ein und derselben statistischen Charakteristik 10 Shinozuka-Windgeschwindigkeitszeitreihen generiert, die sich nur durch Phasenlage der Cosinuskomponenten unterscheiden. Die RFC-Analyse dieser Daten ergab keine qualitativen Unterschiede in den Ergebnissen.

Ebenso ergab der Vergleich der RFC-Analyse für gemessene und synthetisierte Windgeschwindigkeitszeitreihen keine gravierenden Unterschiede in den Ergebnissen.

2.5 RFC-Klassenbreite

Ein sehr sensibler Parameter des Verfahrens ist die Klassenbreite, mit der die auszuwertenden Daten klassiert und untersucht werden. Je größer die Klassenbreite wird, desto kleiner wird die Anzahl der gefundenen Zyklen im Signal und desto kleiner wird die Streuung der RFC-Ergebnis-Matrix. Eine Verminderung der Streubreite der untersuchten Windgeschwindigkeitszeitreihen (bzw. der Turbulenzintensität) und eine Vergrö-

ßerung der Klassenbreite führen zu ähnlichen Veränderungen der RFC-Matrizen.

3 Übertragung von Windgeschwindigkeitszeitreihen und Wind-RFC-Matrizen auf Last-RFC-Matrizen

Wir haben drei unterschiedlich aufwendige Verfahren zur Bestimmung von Rotorblattbelastungen für vorgegebene Winddaten angewandt und deren Ergebnisse verglichen. Für alle drei Verfahren wurden als Ausgangsdaten synthetisierte Windgeschwindigkeitszeitreihen [4] verwendet (Auflösung 100 Hz), deren Mittelwerte zwischen $\bar{u} = 5\text{ m/s}$ und $\bar{u} = 13\text{ m/s}$ lagen.

3.1 Simulation von Rotorblattbelastungen

Als Referenz wurden Rotorblattwurzelbiegemomente mit dem WKA-Dynamik-Simulationsprogramm DUWECS [6] berechnet. Die so erhaltenen Last-Zeitreihen wurden mit dem RFC-Verfahren analysiert und als Last-RFC-Matrizen ausgewertet (siehe Abb. 3).

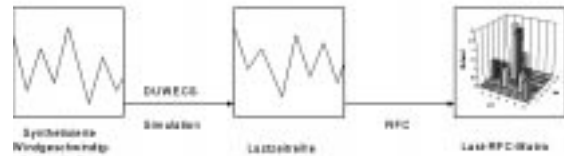


Abb. 3.) Simulation von Windzeitreihen in Lastzeitreihen mit dem WKA-Simulationsprogramm DUWECS.

3.2 Direkte Transformation von Windzeitreihen über statische Lastkennlinien

Ein einfacher Ansatz ist, Lastzeitreihen über die Windzeitreihen mittels der statischen Lastkennlinie (Last/Windeingang) des betrachteten Bauelementes aus Windzeitreihen abzuleiten. Die so erhaltenen Lastzeitreihen lassen sich ebenso in Form von Last-RFC-Matrizen darstellen (siehe Abb. 4).

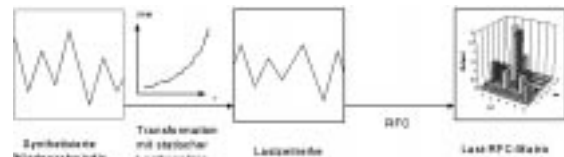


Abb. 4.) Transformation von Windzeitreihen in Lastzeitreihen über die statische Lastkennlinie des Bauteils.

3.3 Transformation von RFC-Wind-Matrizen in RFC-Last-Matrizen über statische Lastkennlinien

In dem von Ganander [1] vorgeschlagenen Verfahren werden für die Windzeitreihen zuerst die Wind-RFC-Matrizen bestimmt. Diese Wind-RFC-Matrizen werden dann über die statische Lastkennlinie in Last-RFC-Matrizen transformiert (siehe Abb.5). Bei der Analyse von Standorten unbekannter Windstatistik wäre dieses Verfahren das am wenigsten aufwendige, weil man am Standort nicht mehr Windzeitreihen messen und speichern müßte, sondern vor Ort eine online-RFC-Windzählung vornehmen könnte, und somit die erforderliche Speicherkapazität der Datenaufzeichnung vermindert wäre.

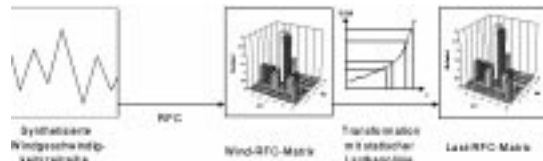


Abb. 5.) Transformation von Wind-RFC-Matrizen über die statische Lastkennlinie eines Bauteils in Last-RFC-Matrizen.

4 Ergebnisse

Für mittlere Windgeschwindigkeiten $\bar{u} < 10$ m/s stimmen die Ergebnisse der Simulation mit denen der Transformation der Zeitreihen (Abb. 4) gut überein. Erst ab mittleren Windgeschwindigkeiten oberhalb 10 m/s liefert die Transformation der Zeitreihen mit der statischen Lastcharakteristik deutlich höhere Lasten im Vergleich zur dynamischen Simulation. Das erklärt sich dadurch, daß das Rotorblatt aufgrund seiner Massenträgheit Schwingungen abdämpft und Änderungen der Windgeschwindigkeit nicht instantan folgt. Bei der direkte Nutzung der statischen Lastkennlinie wird eine derartige Verzögerung nicht beachtet.

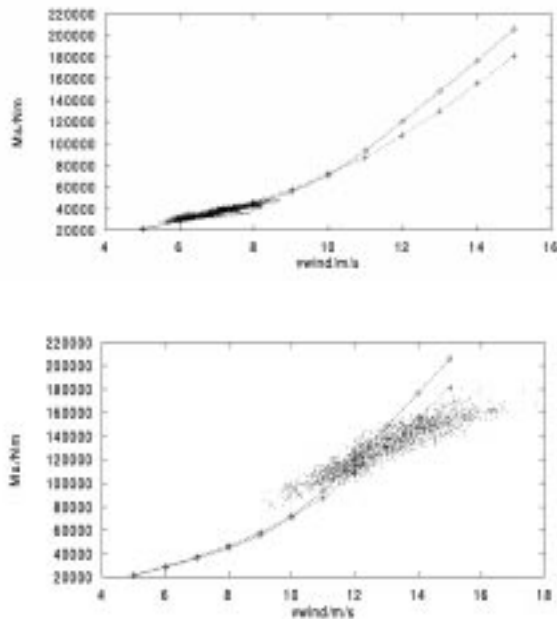


Abb. 6.) u. 7.) Aufgetragen ist das Schlagbiegemoment über der Windgeschwindigkeit. Die statische Kennlinie ist mit Rauten \diamond , die simulierten Momentanwerte sind als Punkte \cdot und die aus den Momentanwerten berechnete mittlere Kennlinie mit Kreuzen gekennzeichnet. Für $\bar{u} = 7$ m/s (oben) liegen die simulierten Momentanwerte der Rotorblattbelastungen auf der statischen Kennlinie. Für $\bar{u} = 13$ m/s (unten) erkennt man deutliche Abweichungen zwischen Simulation und Kennlinie. Das liegt daran, daß das Rotorblatt Schwingungen durch mechanische und aerodynamische Dämpfung abfängt.

Das von Ganander [1] vorgeschlagene Verfahren - die Transformation von Wind-RFC-Matrizen über eine statische Lastkennlinie in Last-RFC-Matrizen - weist die Vernachlässigung der auftretenden mechanischen

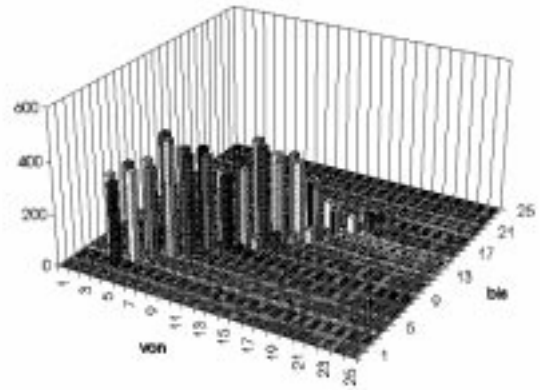


Abb. 8) Mit dem WKA-Simulationsprogramm DU-WECS berechnete Last-RFC-Matrix (siehe 3.1). Die Lasten sind sehr schmal um die Hauptdiagonale verteilt. Die Summe der Zyklen beträgt 4844. Diese simulierte Lastmatrix dient als Referenzergebnis für die beiden Transformationsverfahren. Die Klassenbreite der Lastmatrix beträgt 10 kNm.

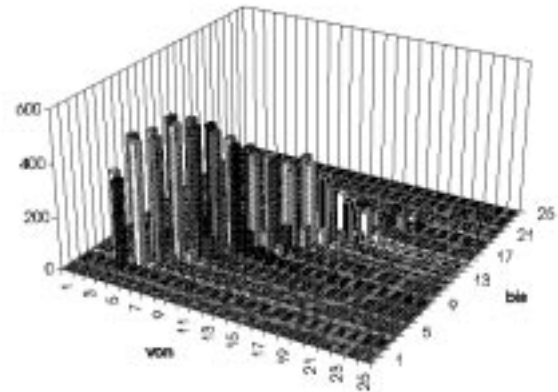


Abb. 9.) Last-RFC-Matrix berechnet durch die Transformation von Windzeitreihen über die statische Kennlinie in Lastzeitreihen (siehe 3.2). Für kleine Lastniveaus ist diese Matrix ebenso wie die simulierte schmal. Für höhere Lastniveaus wird sie deutlich breiter als die Referenzmatrix. Die Summe der Zyklen beträgt 6505. Die Klassenbreite beträgt 10 kNm.

und aerodynamischen Dämpfungen des Rotorblattes in gleicher Weise auf. Ein weiteres Problem tritt hier durch die feste Klassenbreite der RFC-Analyse auf. Durch die Wahl äquidistanter Klassenbreiten bei der Windzählung können Lastklassen mit erheblichen Spreizungen auftreten. Dies macht sich vor allem bei höheren Windgeschwindigkeiten bemerkbar, weil die Lastkennlinie in diesem Bereich steiler ist. Klassiert man den Wind mit einer typischen Klassenbreite von 1 m/s, so sind in dem hier untersuchten Fall die Schlagbiegemomentklassen bei $\bar{u} = 5$ m/s ca. 7 kNm breit, bei 12 m/s sind es bereits 23 kNm. Es ist also darauf zu achten, daß die Klassenbreite für die Windauswertung möglichst fein zu wählen ist. Für die Klassenbreite von 1 m/s liefert dieses Verfahren keine brauchbaren Ergebnisse.

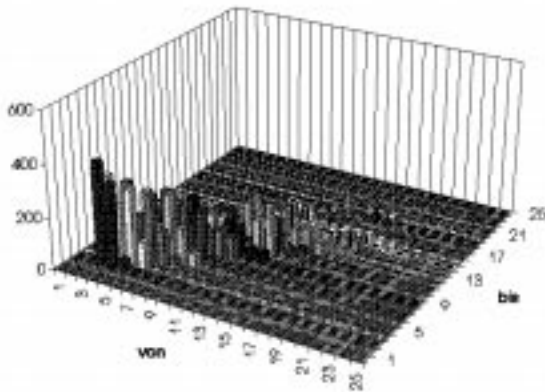


Abb. 10.) Last-RFC-Matrix berechnet mittels der statischen Transformation von Wind-RFC-Matrizen in Last-RFC-Matrizen (siehe 3.3). Die Matrixeinträge verbreitern sich stark mit zunehmendem Lastniveau. Die Summe der Zyklen beträgt 10183. Die Klassenbreite der Matrix beträgt 10 kNm.

5 Zusammenfassung

Im ersten Schritt wurde das Rainflow-Counting-Verfahren anhand von synthetischen Windgeschwindigkeitszeitreihen untersucht. Es wurde deutlich, daß u.a. die Klassenbreite, mit der das RFC Daten analysiert, ein sehr sensibler Parameter ist, dessen Variation sich stark auf die Summe der gefundenen Zyklen im Signal auswirkt.

Im zweiten Schritt wurden drei Verfahren zur Übertragung von Winddaten auf Rotorblattbelastungen an WKA getestet und verglichen. Dabei kommt man zu dem Ergebnis, daß die Transformation von Windzeitreihen in Lastzeitreihen mit Hilfe der statischen Wind-Last-Charakteristik bei niedrigen Windgeschwindigkeiten brauchbare Ergebnisse erzeugt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten sind die Abweichungen zwischen den transformierten und den simulierten Ergebnissen jedoch sehr hoch. Bei einer direkten Transformation der Wind-RFC-Matrizen in Last-RFC-Matrizen ist zu beachten, daß die Klassierung der Windgeschwindigkeit möglichst fein vorgenommen werden muß. Im Vergleich zur Simulation liefert dieses Verfahren für die Klassenbreite von 1 m/s keine brauchbaren Ergebnisse.

Es kann also gesagt werden, daß sich das einfache Verfahren - die Transformation von Windzeitreihen in Lastzeitreihen - zur Abschätzung der Lastspektren im niedrigen Windgeschwindigkeitsbereich eignet. Somit kann ein wesentlicher Anteil der Gesamtlasten schnell ermittelt werden.

Detaillierte Simulationsläufe sind zur verlässlichen Bestimmung der Beiträge von Situationen mit höheren mittleren Windgeschwindigkeiten erforderlich. Bei der Gesamtbewertung der Verfahren ist dabei die Häufigkeitsverteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten an einem Windturbinenstandort mit zu berücksichtigen.

Die Anwendung der Verfahren zur Bestimmung der Anlagenlebensdauer soll im weiteren unter Berücksichtigung der langfristigen Windstatistik an verschiedenen Standorten untersucht werden. Dabei ist geplant, das WKA-Strukturmechanik-Programm WINDSIM der

TU Berlin mit zu verwenden.

Literatur

- [1] H.Ganander, H.Johanson, Fatigue design by using a modified RFC Description of the Wind, Wind-power 1988
- [2] Th.Kramkowski, H.Söker, T.Metzler, Ableitung von Lastspektren für die Lebensdauerberechnung von WKA-Komponenten mittels Rainflow-Zählung von Winddaten, DEWEK94, Wilhelmshaven 1994
- [3] M.Matsuiski, T.Endo, Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress, Paper presented at Kyushu District Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan, 1968
- [4] M.Shinozuka, C.-M.Jan, Digital Simulation of Random Processes and its Application, Journal of Sound and Vibration, 25 (1): 111-128, 1972
- [5] O.Buxbaum, Betriebsfestigkeit. Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile, 2. erweiterte Auflage, Düsseldorf 1992
- [6] P.M.M.Bongers, Reference Guide Delft University Wind Energy Converter Simulation Package V2.0, Delft University of Technology, The Netherlands 1993
- [7] A. Rösen, Anwendung des 'Rainflow Counting' auf Windgeschwindigkeitszeitreihen und Test eines Verfahrens zur Übertragung der Ergebnisse auf Rotorblattbelastungen von Windkraftanlagen, Diplomarbeit an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 1996