

19./20. NOVEMBER
2014

AKIDA[®]

Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung

ASRE - AACHENER SCHRIFTEN ZUR ROHSTOFF- UND ENTSORGUNGSTECHNIK
DES INSTITUTS FÜR MASCHINENTECHNIK DER ROHSTOFFINDUSTRIE

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus

Prof. Dr.-Ing. Paul Burgwinkel

IMR - Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie der RWTH Aachen
Wüllnerstraße 2 • D-52056 Aachen

Tel.: +49 241 80 95680 • Fax: +49 241 80 92311

Internet: <http://www.imr.rwth-aachen.de> • E-Mail: mail@imr.rwth-aachen.de

1. Auflage Aachen:

Verlag R. Zillekens, 2014

Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik, Band 81

ISBN: 978-3-941277-17-5

© 2014 Nienhaus/Burgwinkel

Verlag R. Zillekens

Am Bachpütz 4; 52224 Stolberg

Telefon 02408. 958216; Telefax 02408. 958217

E-Mail: verlag@druckservice-zillekens.de

Gesamtherstellung:

Druckservice Zillekens

Am Bachpütz 4; 52224 Stolberg

Telefon 02408. 958216; Telefax 02408. 958217

www.druckservice-zillekens.de; E-Mail: info@druckservice-zillekens.de

Bibliografische Information der deutschen Bibliothek

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie.

Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Vergleich der Lagerschwingbeschleunigungs- und Generatorstromanalyse zur frühzeitigen Identifizierung von Wälzlagerschäden

Malte Rave¹

Dipl.-Ing. Marc Hilbert¹

Dipl.-Ing. Roman Konrad²

Dipl.-Ing. Christelle Piantsof Mbo'o²

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer²

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus¹

1 - Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie,
RWTH Aachen University

2 - Institut für Elektrische Maschinen,
Lehrstuhl für Elektromagnetische Energiewandlung,
RWTH Aachen University

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende wird seit einigen Jahren vermehrt auf den Einsatz erneuerbarer Energien gesetzt. Hierbei finden zunehmend Windenergieanlagen Verwendung. Der Ausfall oder längere Wartungszeiten einer Windenergieanlage (WEA) sind meist mit hohen Kosten für das jeweilige Unternehmen verbunden. Aus diesem Grund ist die frühzeitige Erkennung von Schäden, die zum Ausfall einer WEA führen oder eine aufwändige Wartung erfordern, von großer Bedeutung. Die Kosten für die Schadensbehebung und für Reparaturplanungen können dadurch verringert werden. Ein häufiger Schaden ist der Defekt der Wälzlager [1]. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass Lagerschäden schon im frühen Stadium detektiert werden. Eine etablierte Methode zur Fehlerfrüherkennung ist die Analyse von Lagerschwingbeschleunigungsmessungen. Eine weitere Möglichkeit Lagerschäden zu detektieren ist, besonders bei elektrischen Maschinen, die Stromanalyse. In dieser Ausarbeitung werden daher die Lagerschwingbeschleunigungs- und Stromanalyse miteinander verglichen. Dabei lässt sich die Ausarbeitung in die folgenden Abschnitte gliedern: Grundlagen und Ansätze zur Auswertung, Lagerschwingbeschleunigungsanalyse und Stromanalyse. Als Datenbasis hierfür dienen Körperschall- und Genera-

torstrommessungen des Wälzlagers eines Windenergieanlagengenerators, die über einen Zeitraum von fünf Monaten aufgezeichnet wurden. Dieses Lager wies im Vorfeld Anzeichen einer Beschädigung auf. Sofern sich der Verdacht auf eine Beschädigung des Wälzlagers bestätigt, soll dieser durch das Aufzeigen eines Trendverlaufes verifiziert werden. Nachfolgend werden die Aufzeichnungen des Generatorstroms hinsichtlich einer Beschädigung des Lagers analysiert. Abschließend sollen die beiden Analyseverfahren verglichen werden, um eine Aussage bezüglich der Qualität beider Methoden treffen zu können.

2 Grundlagen und Ansätze zur Auswertung

Bei dem Wälzlager, welches in Abschnitt 3 und 4 auf eine Beschädigung untersucht wird, handelt es sich um ein einreihiges Radial-Rillenkugellager. Beschädigungen an Wälzlagern lassen sich als Abtragung oder Ausbrechen von Material an den Komponenten verdeutlichen. Dies verursacht im Frequenzspektrum zusätzliche Schwingungen [2]. Jeder Schadenstyp verursacht dabei charakteristische Schadensfrequenzen. Diese charakteristischen Schadensfrequenzen und deren Vielfache können durch Analyse von Schwingungsbeschleunigungsmessungen beispielsweise mittels Spektral- oder Hüllkurvenanalyse nachgewiesen und darüber Rückschlüsse auf die jeweilige Beschädigung gezogen werden [3][4]. Die Schadensfrequenzen finden sich ebenfalls im Stromverlauf des Generators wieder. Sie setzen sich aus dem Vielfachen der charakteristischen mechanischen Schadensfrequenz sowie der Frequenz des Stroms zusammen [5]. Zusätzlich zur Frequenzanalyse können Kennwerte im Zeitbereich berechnet werden. Diese Kennwerte können zudem genutzt werden, um eine Tendaussage zu treffen und den Schadensverlauf darzustellen. Hierfür liegen im Optimalfall Messungen vor, in denen der intakte Zustand des Lagers aufgezeichnet wurde. Durch Kennwertverfahren im Zeitbereich ist häufig keine Ermittlung des exakten Schadens möglich. Eine oft verwendete Methode ist die Bildung des RMS-Wertes [6].

3 Lagerschwingbeschleunigungsanalyse

Die Lagerschwingbeschleunigungen wurden mit einer Abtastrate von 20 kHz für jeweils eine Sekunde in radialer Richtung am Lagergehäuse gemessen. Um einen Anhaltspunkt in Bezug auf den Zustand des Lagers zu erhalten, werden die vorliegenden Daten im Zeitbereich analysiert und im Frequenzbereich ausgewertet. Vor der ersten Auswertung muss zunächst gewährleistet sein, dass für die Untersuchungen nur Datensätze mit gleicher Drehzahl verwendet wer-

den. Eine Ordnungsanalyse wurde aufgrund des fehlenden Drehzahl- und Leistungssignals nicht durchgeführt. Da eine Beurteilung für alle Zeitreihen durchgeführt werden muss, wird eine automatisierte Matlab®-Funktion genutzt, um die Rotationsfrequenzen der Zeitreihen zu bestimmen. Basierend auf den Drehfrequenzen können die spezifischen Schadensfrequenzen einer jeden Zeitreihe ermittelt werden. Auf diese Schadensfrequenzen sollen die Zeitreihen hin untersucht werden, um einen weiteren Anhaltspunkt auf eine vorliegende Beschädigung des Lagers und die Schadensart zu erhalten. Damit die hohe Anzahl einzelner Zeitreihen schnell auf die Schadensfrequenzen und deren Amplituden untersucht werden kann, wird dies mit Hilfe einer programmierten Funktion durchgeführt. Diese berechnet die Schadensfrequenz für jede Zeitreihe und untersucht diese anschließend mit der Hüllkurvenanalyse auf Auffälligkeiten im Bereich der ersten, zweiten und dritten Ordnung der Schadensfrequenz. Beispielhaft ist das Ergebnis der Hüllkurvenanalyse in Abbildung 1 dargestellt. Markiert wurden die Innenringschadensfrequenzen (1. bis 3. Ordnung) für das untersuchte Lager.

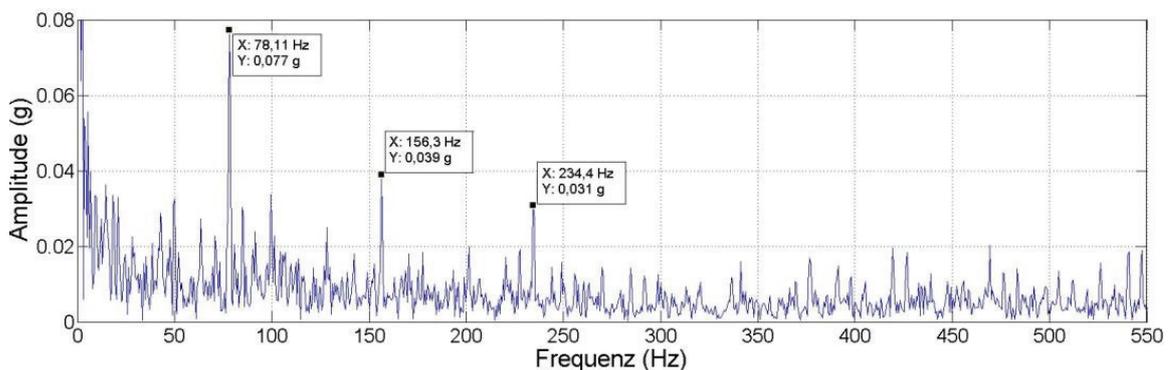


Abbildung 1. Ergebnis der Hüllkurvenanalyse

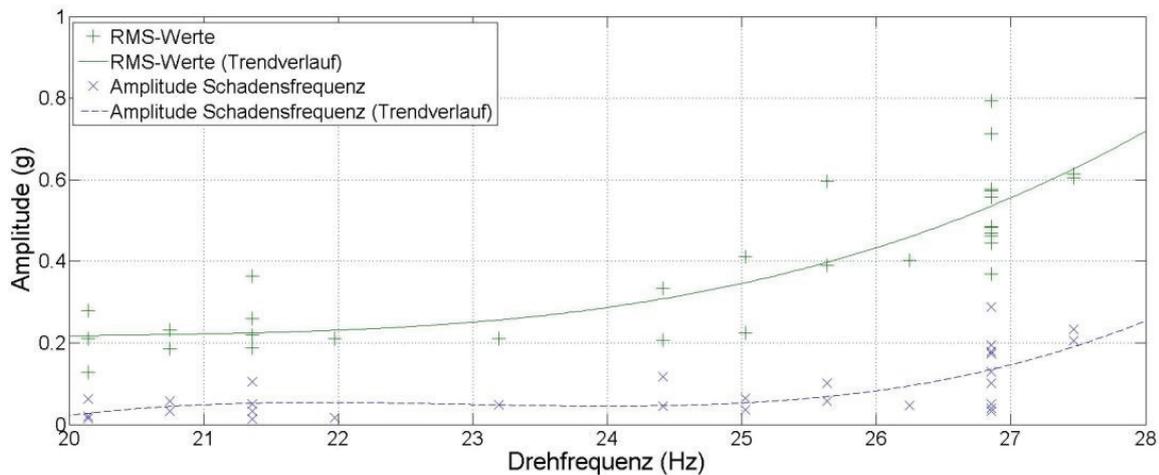


Abbildung 2. Schadensamplitude, RMS-Werte

Abbildung 2 zeigt den RMS-Wert sowie die Schadensamplitude erster Ordnung in Abhängigkeit von der Drehfrequenz. Zudem ist eine Trendlinie für beide Werte dargestellt, um die Ergebnisse einfacher auszuwerten. In dem Diagramm wurden die Zeitreihen der Messung von einem Monat verwendet. Es ist wie erwartet eine Korrelation zwischen der Schadensamplitude bzw. dem RMS-Wert und der Drehfrequenz zu erkennen. Sowohl der RMS-Wert als auch die Schadensamplitude steigen bei höheren Drehzahlen an. Dies bestätigt sich auch in den restlichen Datensätzen der übrigen Messmonate. Damit die gelieferten Daten hinsichtlich eines Trendverlaufes ausgewertet werden können, müssen die Amplituden der einzelnen Zeitintervalle mit ähnlichen Betriebsbedingungen zusammengefasst werden. Dazu ist in Abbildung 3 die Verteilung der Generator-drehfrequenzen der einzelnen Zeitreihen an den fünf Messmonaten dargestellt.

Nachdem die Zeitsegmente des Schwingbeschleunigungssignals geordnet wurden, wird für jedes Zeitsegment der Schadensamplituden erster Ordnung dessen Mittelwert und Standardabweichung berechnet, um diese anschließend gegenüberzustellen. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Auswertung als Balkendiagramme aufgezeigt. Es ist abzulesen, dass die Mittelwerte der Schadensamplituden kontinuierlich ansteigen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Werte einen positiven Trend aufweisen. Es kann damit gezeigt werden, dass die Schadensamplitude stetig ansteigt. Dies bekräftigt die anfängliche Vermutung eines vorliegenden und sich verschlechternden Lagerschadens. Die Analyse hat aufgezeigt, dass ein Innenringschaden bei dem verwendeten Lager als sehr wahrscheinlich angesehen werden kann.

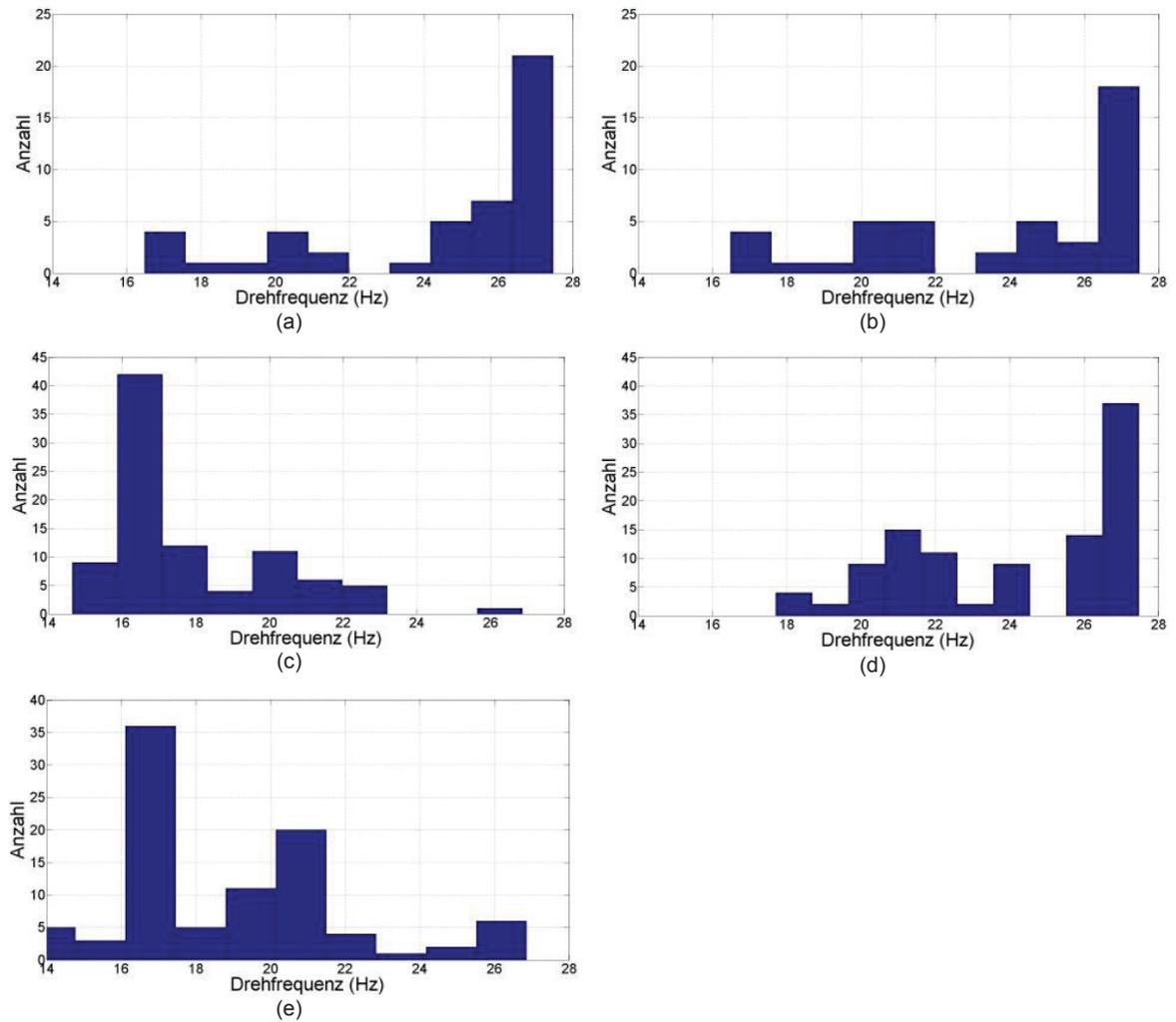


Abbildung 3. Übersicht Verteilung der Drehfrequenzen für 5 Messmonate (a bis e)

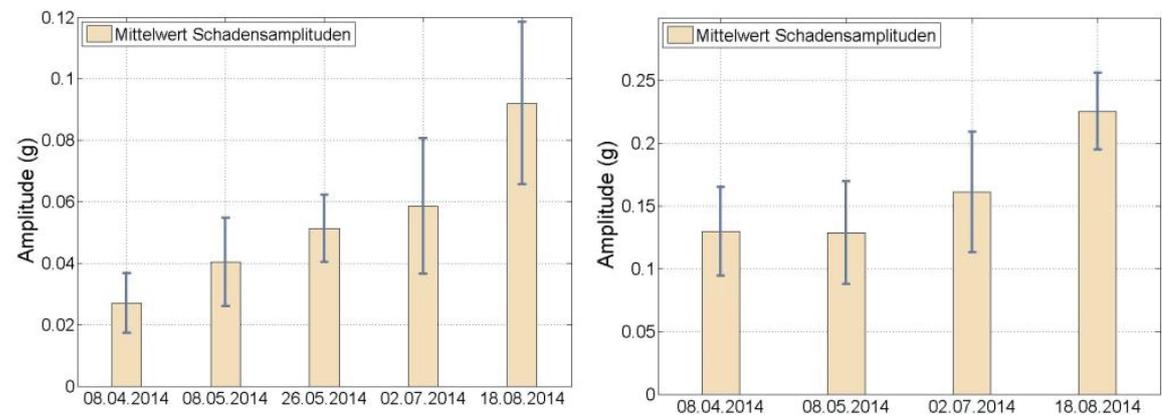


Abbildung 4. Trendverlauf des Mittelwertes und der Standardabweichung der Amplituden der Innenringschadensfrequenz im Drehzahlbereich 20-22 Hz (links) und 26-28 Hz (rechts) für fünf Messmonate

4 Generatorstromanalyse

Der bereits durch die Analyse der Körperschallmessungen detektierte Lagerschaden soll auch mit Hilfe der Generatorstrommessungen identifiziert werden. Die Messungen des Generatorstroms beinhalten sowohl den Stator- als auch den umgerichteten Rotorstrom. Aufgezeichnet wurde die erste Phase direkt bevor diese aus der Windenergieanlage heraus geführt wird (siehe Abbildung 5.). Die Daten wurden durch Messen des Magnetfeldes für jeweils eine Sekunde mit einer Abtastrate von 20 kHz aufgezeichnet. Ein Datenblatt des verwendeten Sensors ist in [7] zu finden.

Wie in Abschnitt 2 erläutert, haben mechanische Schwingungen, welche aus einer Beschädigung des Lagers resultieren, eine geringfügige Veränderung des Drehmomentes zur Folge. Dies führt dazu, dass im Statorstrom zusätzliche Frequenzen induziert werden [8]. Im Folgenden gilt es, diese zusätzlichen Frequenzen durch Analyse der gelieferten Daten nachzuweisen, um eine Beschädigung des Lagers zu detektieren. Die einzelnen Zeitreihen müssen demnach auf die durch eine Beschädigung zusätzlich induzierten Frequenzen hin analysiert werden. Die Schadensfrequenz setzt sich aus der Frequenz des Generatorstroms und einem Vielfachen der charakteristischen Schadensfrequenz zusammen. In Abbildung 6 ist, basierend auf diesen Zuordnungen, der RMS-Wert der Zeitreihen in Abhängigkeit der Drehfrequenz dargestellt und durch eine Trendlinie beschrieben. Diese zeigt auf, dass sich der RMS-Wert mit zunehmender Drehzahl erhöht. Für das Diagramm wurden alle Daten aus den fünf Messmonaten verwendet.

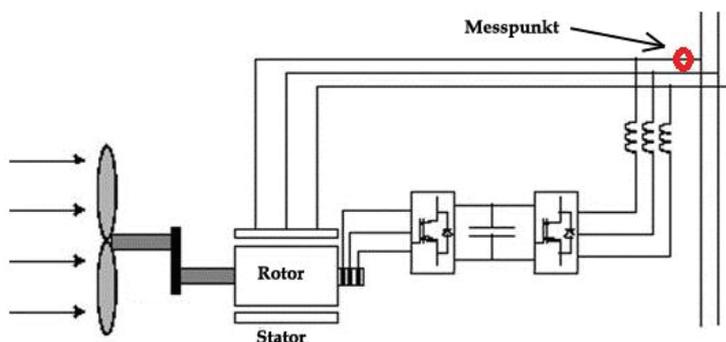


Abbildung 5. Messpunkt des Generatorstroms [9]

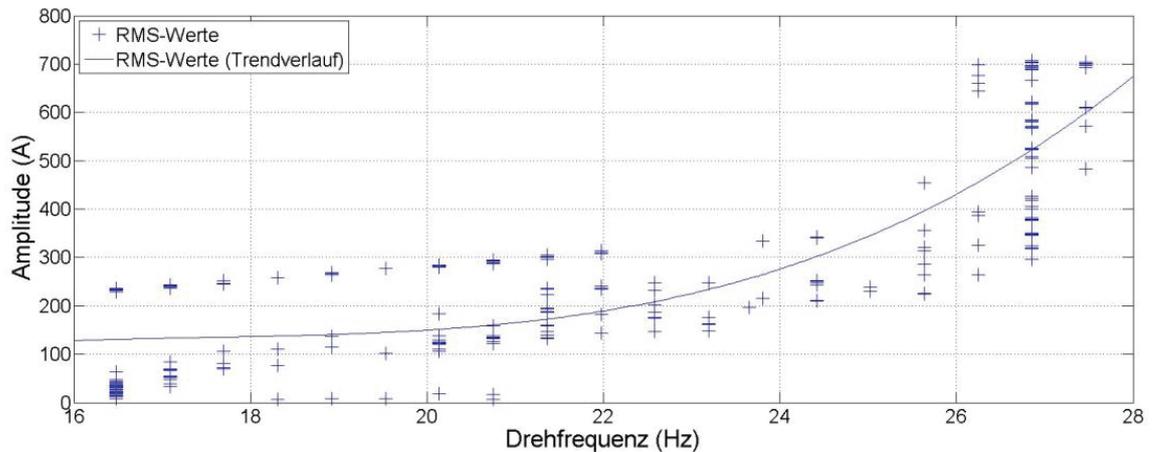


Abbildung 6. RMS-Werte in Abhängigkeit der Drehzahl

In Abbildung 7 ist das Ergebnis der Spektralanalyse des Generatorstroms einer einzelnen Messung dargestellt. Dabei bildet das obere Diagramm ein Amplitudenspektrum bis 900 Hz über die Amplitude ab, während das untere Diagramm einen vergrößerten Ausschnitt im Amplitudenbereich bis 6 A aufzeigt. Wie zu erwarten ist ein großer Ausschlag bei einer Frequenz von 50 Hz abzulesen, da diese der Generatorstroms- bzw. Netzfrequenz entspricht. In der vergrößerten Darstellung (Abbildung 8) sind die Vielfachen der Netzfrequenz zudem deutlich zu erkennen. Dies erschwert die Untersuchung von induzierten Schadensfrequenzen, welche in unmittelbarer Nähe dieser Frequenz liegen. Die Zeitreihe, deren Frequenzbereich in Abbildung 7 dargestellt ist, wurde bei einer Drehfrequenz von 26,85 Hz aufgezeichnet. Dementsprechend werden die Schadensfrequenzen für den Generatorstrom nach [5] und [8] berechnet. Es kann bei genauer Betrachtung weder eine Auffälligkeit für die Drehfrequenz noch für deren Vielfache ausgemacht werden. Dies ist auch bei einer weiteren Vergrößerung der Bereiche, in denen die Schadensfrequenzen vermutet werden, nicht der Fall. Die Auswertungen weiterer Zeitreihen unter Berücksichtigung verschiedener Drehfrequenzen ergaben ähnliche Resultate. Es konnten mit Hilfe der Spektralanalyse des Generatorstromes in keiner der betrachteten Zeitreihen die zuvor berechneten Schadenfrequenzen mit Sicherheit nachgewiesen werden. Es ist zudem festzustellen, dass Drehfrequenzen, welche eine starke Häufung von Schadensfrequenzen im Vielfachen der Generatorstromsfrequenz erzeugen, die Auswertung erschweren.

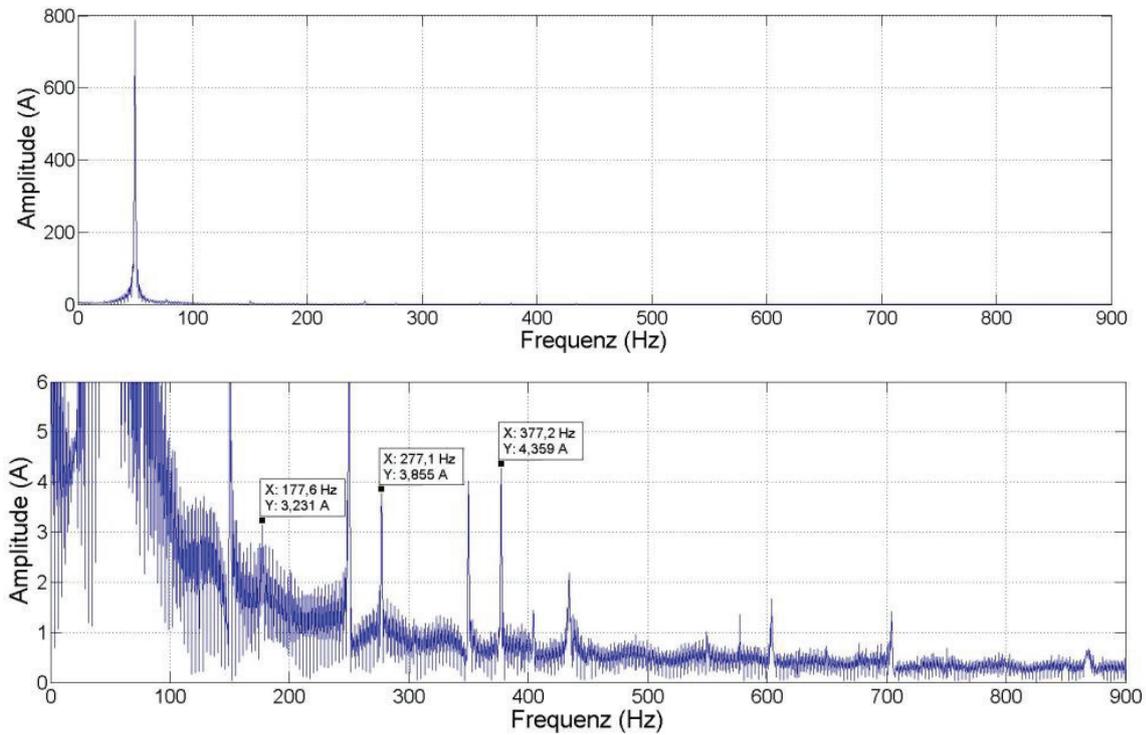


Abbildung 7 Spektralanalyse des Generatorstroms einer einzelnen Messung

Für die weitere Auswertung der Generatorstromdaten werden, ähnlich wie in der Trendanalyse der Körperschallmessungen, alle Zeitreihen eines Datensatzes, welche gleiche Drehfrequenzen aufweisen, zusammengefasst. Auf diese Weise ergeben sich Datensätze mit größerem Umfang.

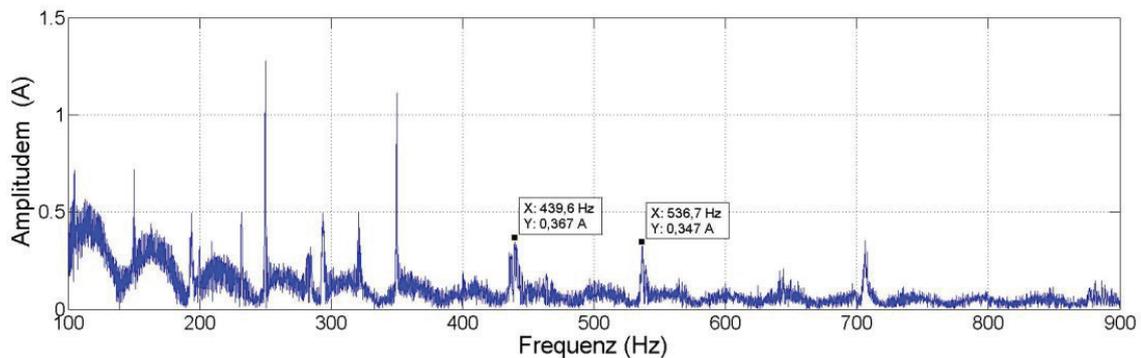


Abbildung 8 Frequenzanalyse der Generatorstrommessung von zusammengeführten Zeitreihen

In Abbildung 8 ist ein zusammengesetzter Datensatz im Frequenzbereich dargestellt. Die Drehfrequenz aller Zeitreihen beträgt 20,75 Hz. Im Diagramm lassen sich zwei Ordnungen der induzierten Schadensfrequenzen erkennen. Hierbei handelt es sich um die vierte und fünfte Ordnung, welche mit 439,27 Hz, bzw. 536,59 Hz berechnet wurden. Im dargestellten Fall konnten die Schadensfrequenzen mit einer maximalen Abweichung von 0,11 Hz detektiert werden. Ähnliche Ergebnisse sind auch in anderen zusammengeführten Zeitreihen zu verzeichnen. Dabei handelt es sich jedoch lediglich um einzelne Treffer im Bereich der berechneten Schadensfrequenzen, weshalb sie nicht mit Sicherheit auf einen Lagerschaden bezogen werden können. Bei den vereinzelt Auffälligkeiten scheint es zudem keine Konstanz zu geben, was die Ordnung der Schadensfrequenz betrifft.

Eine Referenzmessung des Lagers im intakten Zustand liegt nicht vor, sodass kein Vergleich möglich ist. Durch die Auswertung der Messwerte des Generatorstroms kann somit weder ein Trendverlauf noch eine konkrete Aussage darüber getroffen werden, ob eine Beschädigung des Lagers vorliegt. Basierend auf den sporadisch auftretenden Schadensfrequenzen ist lediglich eine Vermutung hinsichtlich eines Lagerschadens zu äußern.

5 Diskussion und Ausblick

In diesem Artikel wurden die Analysen von Körperschall- und Generatorstrommessungen dazu verwendet, ein Wälzlager auf den Verdacht einer Beschädigung hin zu untersuchen. Bei der Auswertung der Körperschallmessungen durch etablierte Methoden konnten sehr gute und eindeutige Ergebnisse erzielt werden. Der anfängliche Schadensverdacht wurde bestätigt und auf einen In-

nenringschaden spezifiziert. Dies konnte durch Aufzeigen eines Trendverlaufes dargestellt werden.

Die Analyse der Generatorstrommessungen ergab keine aussagekräftigen Resultate. Ohne Referenzmessungen des Lagers im intakten Zustand sind lediglich, Indizien für das Vorliegen eines Lagerschadens auszumachen. Die Auswertung der vorliegenden Messungen zeigte, dass Zeitreihen, welche Drehzahlen aufweisen, die Schadensfrequenzen in der Nähe des Vielfachen des Generatorstroms induzieren, nicht für die Analyse geeignet sind. Ergebnisse sind ausschließlich in Zeitreihen mit größerem Datenumfang zu erkennen. Diese beiden Umstände könnten in Zukunft so berücksichtigt werden, dass nur optimale Drehfrequenzen aufgezeichnet werden, diese dafür jedoch mit einer längeren Aufzeichnungsdauer. Des Weiteren sollte der Messpunkt so gewählt werden, dass ausschließlich der Statorstrom aufgezeichnet wird, um zusätzliche Störsignale zu vermeiden. Zudem können durch eine Vorfilterung, im speziellen eine analoge Tiefpassfilterung, bessere Ergebnisse erzielt werden, da die Messreihen des Stromes somit einen geringeren Rauschpegel im Frequenzbereich aufweisen. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit besteht darin, die Daten mit einer feineren Abtastung in digitale Signale umzuwandeln. Hier wird eine Abtastrate zwischen 50 und 100 kHz empfohlen, um eine höhere Frequenzauflösung in der Datenverarbeitung zu erzielen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine Lagerdiagnose mit Hilfe von Generatorstrommessungen, wie sie in diesem Beispiel durchgeführt wurden, nicht möglich ist. Allerdings könnten durch Berücksichtigung der oben thematisierten Veränderungen durchaus gute Resultate erzielt werden. Für das hier gewählte Beispiel ist die Analyse von Körperschallmessungen hinsichtlich der Bestimmung des Lagerzustandes zu empfehlen.

6 Literatur

[1] Ribrant, J. and Bertling, L. M.; Survey of Failures in Wind Power Systems With Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997-2005, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, 2007

[2] Geropp, B.; Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse. RWTH Aachen University Diss. 1995.

[3] Meyer, M.; Signalverarbeitung: Analoge und Digitale Signale, Systeme und Filter. Auflage 6.

[4] GfM Gesellschaft für Maschinendiagnose mbH: Kompendium
- Hüllkurvenanalyse. URL: [http://www.maschinendiagnose.de/
kompendium-huellkurvenanalyse.html](http://www.maschinendiagnose.de/kompendium-huellkurvenanalyse.html), Juli 2014.

[5] Schoen, R. ; Habetler, T. ; Kamran, F. ; Bartheld, R.; Motor bearing damage
detection using stator current monitoring. IEEE Transactions on Industrial
Applications, vol. 31, pp. 1274 - 1279, 1995.

[6] Klein, U.; Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anla-
gen. Auflage 3.

[7] Datenblatt ACP 3000: URL: [http://docs-europe.electrocomponents.
com/webdocs/0e08/0900766b80e08f7d.pdf](http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0e08/0900766b80e08f7d.pdf), August 2014.

[8] Blödt, M. ; Granjon, P. ; Raison, B. ; Rotating, G.; Models for Bearing
Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring. IEEE
Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, pp. 1813 – 1822, 2008.

[9] MathWorks: *Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type)*.
URL: [http://www.mathworks.de/de/help/physmod/sps/powersys/ref/
windturbinedoublyfedinductiongeneratorphasortype.html](http://www.mathworks.de/de/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbinedoublyfedinductiongeneratorphasortype.html), August 2014.