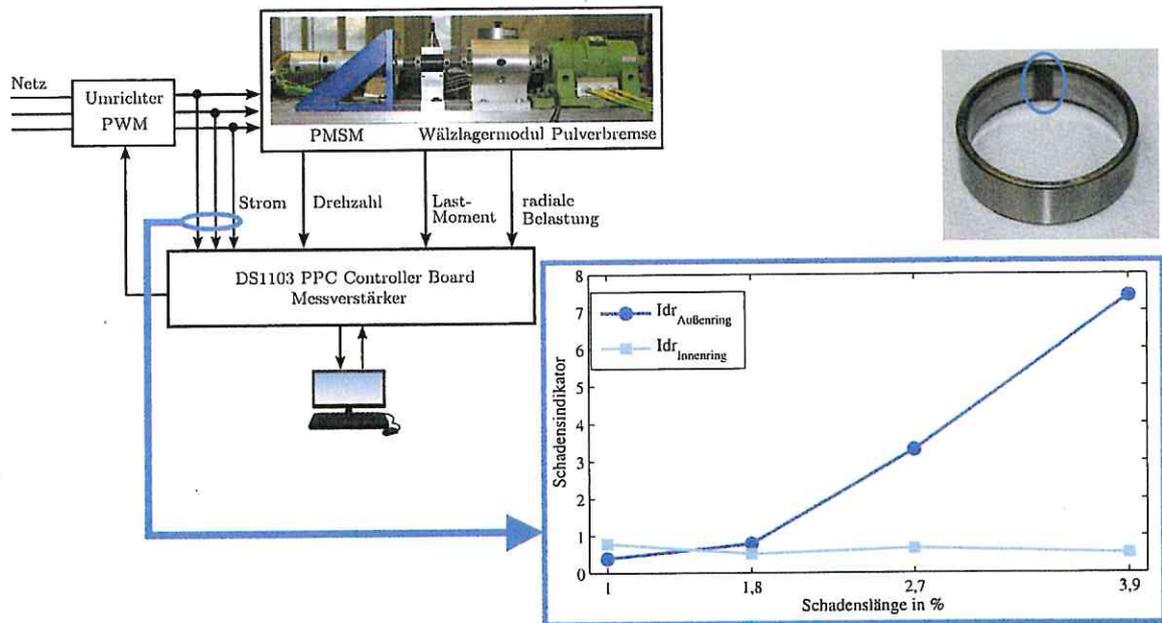




Umrichtertechnik

So schnell und einfach lassen sich Feldverteiler in Betrieb nehmen und bedienen

Frequenzselektiver Schadensindikator für die Diagnose von Wälzlagerschäden im elektrischen Antriebsstrang



40–50 Prozent der Maschinenausfälle werden durch Wälzlagerschäden verursacht. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein alternatives Verfahren für die Diagnose von Wälzlagerschäden vorgestellt, welches im Gegensatz zum Standardverfahren, der Vibrationsanalyse, keine zusätzlichen Sensorsignale benötigt. Für dieses Verfahren wird der messtechnisch zur Verfügung stehende Statorstrom eines Antriebssystems verwendet.

Wälzlagerschäden können heutzutage mithilfe unterschiedlicher Diagnoseverfahren, wie der Temperatur-, Schwingungs-, Körperschall-, Statorstrom- und Öl-Partikelanalyse erkannt werden [1]. Eine Diagnosemethode, welche sich bewährt hat, ist die mechanische Schwingungsanalyse [2], [3], [4]. Dieses Verfahren verwendet relativ kostspielige Beschleunigungssensoren, die je nach Einsatzort des Testobjekts und der Genauigkeit der erzielbaren Messungen ausgewählt werden. Ein alternatives Diagnoseverfahren stellt die Schadenserkenkung anhand der im Antrieb vorhandenen elektrischen Signalen dar. Hierbei sind keine zusätzlichen Sensoren für die Diagnose notwendig.

Eines der bewährten Verfahren basiert auf der Analyse des Statorstromsignals und wird als Motor Current Signature Analysis (MCSA) bezeichnet [5]. Diese Methode wird bereits für die Erkennung von Maschinenfehlern wie z. B. gebrochene Rotorstäbe in Asynchronmaschinen [6], Exzentrizitäten [7], [8], [9], [10] sowie

Wälzlagerschäden [11], [12], [13] verwendet. Bei der Statorstromanalyse werden frequenzbasierte Ansätze verwendet, da Wälzlagerschäden im Stromspektrum zusätzliche Frequenzanteile hervorrufen. Die hervorgerufenen Frequenzanteile können sich mit den im Statorstromsignal enthaltenen Frequenzkomponenten überlagern und zusätzlich gedämpft werden. Außerdem haben diese Frequenzen im Vergleich zu den Stromfrequenzen eine kleinere Amplitude, welche stark von der Schadensgröße und den Maschinenbetriebsbedingungen abhängt. Daher ist die Schadensdiagnose mittels der Statorstromanalyse komplexer zu realisieren als die Schwingungsdiagnose und erfordert tieferegehende Untersuchungen. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Schadensindikator für die Diagnose von Wälzlagerschäden mittels der Statorstromanalyse zu entwerfen, der die Schäden nach ihrer Art differenziert. Zuerst wird die Vorgehensweise für den Entwurf des Indikators beschrieben. Da der entworfene Indikator getestet werden soll, wird der für die Datenerfassung gefertigte Prüfstand vorgestellt. Darüber hinaus werden die verwendeten beschädigten Wälzlager mit der Art ihrer Schadenserzeugung präsentiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Diagnose sowohl an künstlich als auch an real beschädigten Wälzlager vorgestellt und diskutiert.

Entwurf des frequenzselektiven Schadensindikators

Der frequenzselektive Schadensindikator soll eine zuverlässige Diagnose ermöglichen. Hiermit sollen die Schäden erkennbar und in

Dipl.-Ing. Christelle Piantsof Mbo'o ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen; Dipl.-Ing. Christian Lessmeier ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik der Universität Paderborn; Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer ist Lehrstuhlinhaber am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik der Universität Paderborn; Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer ist Institutsleiter am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen

ihrer Art unterscheidbar sein. Die Wälzlagerschäden können in den verschiedenen Lagerkomponenten auftreten: dem Außenring, dem Innenring, den Wälzkörpern sowie dem Käfig. Zudem sollen keine falsch-positiven Ergebnisse, d. h. Fehlalarme vorkommen. Diese Anforderungen werden bei der Bestimmung des Indikators berücksichtigt. Zuerst werden die gemessenen Statorströme des leistungselektronischen Umrichters für die Datenverarbeitung erfasst. Die Datenverarbeitung erfolgt in drei Stufen: Vorverarbeitung, Spektralanalyse und Berechnung des Indikators.

Bei der Vorverarbeitung werden die Statorströme mit dem Ziel Signaländerungen besser erfassen zu können aufbereitet. Daher wird der Raumzeiger aus den gemessenen Strangströmen gebildet, um die in den einzelnen Strangströmen enthaltenen Informationen zusammenzufassen. Der Raumzeiger lässt sich wie folgt in Abhängigkeit des Drehzeigers \underline{a} berechnen [14]:

$$\underline{i}_s[n] = \frac{2}{3} \cdot (i_u[n] + \underline{a} \cdot i_v[n] + \underline{a}^2 \cdot i_w[n])$$

mit $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ und $n = 0, 1, \dots, N-1$ (1)

Mit dem berechneten Raumzeiger \underline{i}_s erfolgt eine mathematische Operation, die zur Entfernung der im Signal enthaltenen Offsets dient. Das vorverarbeitete Raumzeigersignal $\underline{i}_{s,dt}$ wird nun zur Schätzung der Frequenz spektral analysiert. Hierfür wird das Betragsspektrum des Raumzeigers gebildet. Dies erfolgt für die Signale aus dem fehlerfreien Zustand (als Referenz) und dem aktuellen Zustand. Durch das Betragsspektrum werden die Amplituden der Drehfrequenz und deren Vielfachen stark unterdrückt. Somit sind die niederfrequenten Modulationssignale und deren Vielfache im Spektrum besser sichtbar. Dieser Ansatz ist analog der Hüllkurvenanalyse [3, 15], welche die Erfassung von periodischen kurzzeitigen Stoßanregungen im Signal ermöglicht. Als Fensterfunktion wird das Hamming-Fenster $w[n]$ verwendet, dessen Fensterbreite N^* einem Vielfachen der Periodendauer der Drehfrequenz entspricht.

$$I_{s,dt}[r] = \left| \sum_{n=0}^{N^*-1} \underline{i}_{s,dt}[n] \cdot w[n] \cdot e^{j \cdot n \cdot r \cdot \frac{2\pi}{N}} \right|$$

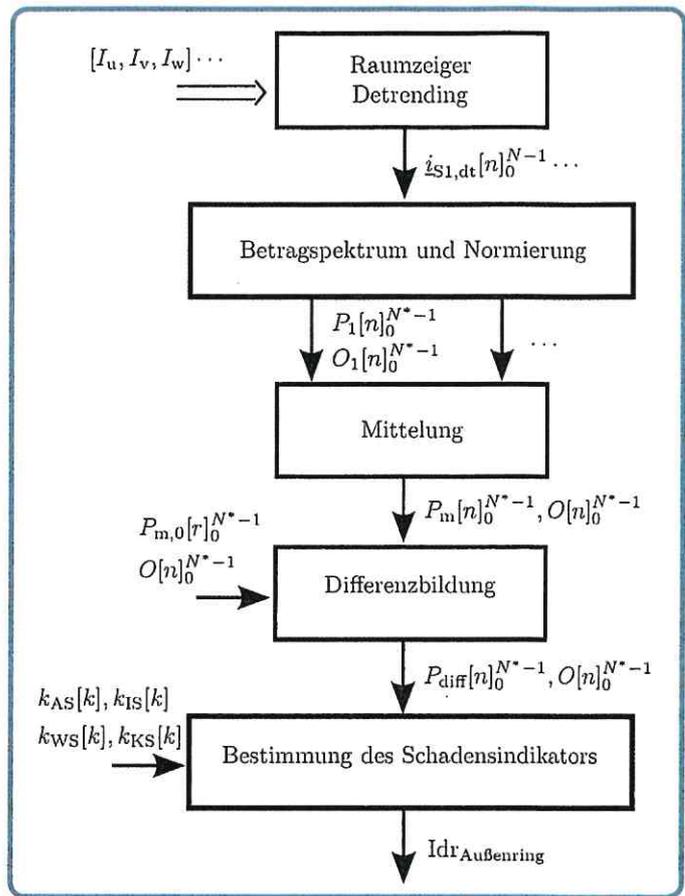
mit $r = 0, 1, \dots, N^* - 1, \Omega_r = \frac{2\pi r}{N}$ (2)

Die Länge beider Signale wird so angepasst, dass die geschätzten Winkelgeschwindigkeiten Ω_r genau übereinanderliegen. Diese Maßnahme ist erforderlich, da das Spektrum des Referenzzustands von dem Spektrum des aktuellen Zustands für die Merkmalsberechnung subtrahiert wird. Die ermittelten Betragsspektren werden auf die Drehfrequenz bezogen und quadratisch gemittelt. Daraus ergibt sich ein Vektor $P[n]$ aus Ordnungspegeln mit ihren entsprechenden Ordnungen $O[n]$ der Länge N^* . Die quadratische Mittelung führt dazu, dass Frequenzen mit höherer Amplitude besser hervortreten, während Frequenzen mit kleinerer Amplitude unterdrückt werden. Diese Maßnahme analog der Welch-Methode [16] hilft den Rauschanteil zu unterdrücken. Die Ströme werden hierzu für die Mittelung H -mal hintereinander erfasst.

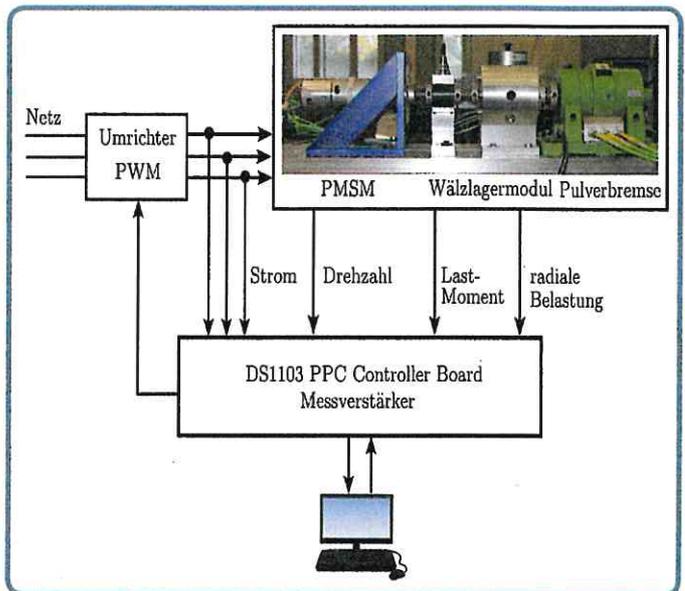
$$P_m[n] = \sqrt{\frac{1}{H} \sum_{h=1}^H P_h^2[n]} \text{ mit } n = 0, 1, \dots, N^* - 1$$
 (3)

Die gemittelten Spektren des Referenzzustands $P_{m,0}[n]$ und des aktuellen Zustands $P_m[n]$ werden zum Erhalt des Differenzspektrums subtrahiert.

Das Differenzspektrum wird für die Berechnung der Schadensindikatoren verwendet. Wälzlagerschäden verursachen Drehzahl-schwankungen und somit Drehmomentschwankungen, die das Vorkommen neuer Frequenzkomponenten im Stromsignal bewirken [17, 18, 19]. Das Betragsspektrum ermöglicht eine Demodulation der Anregungsfrequenz f_{el} . Aufgrund eines vorliegenden Schadens können die folgenden Frequenzen im Spektrum auftreten:



01 Ablauf für die Berechnung des Schadensindikators



02 Prüfstands-aufbau

$$f_{LK}[k] = k \cdot N_{LK} \cdot f_R = f_{el} \cdot \left(k \cdot \frac{N_{LK}}{p} \right) \text{ mit } k = 1, \dots, K$$
 (4)

Diese Frequenzen werden als charakteristische Frequenzen bezeichnet. Die charakteristischen Fehlerfrequenzen einzelner Lagerkomponenten sind von der mechanischen Rotordrehfrequenz f_R und der Anzahl der Überrollungen an den beschädigten Wälzlagerkomponenten N_{LK} abhängig [3, 20]. Die Rotordrehfrequenz kann als Funktion der elektrischen Anregungsfrequenz und der Polpaarzahl p der Maschine aufgeführt werden. Dies ermöglicht eine Herleitung

der Schadensordnungen k_{LK} je Lagerkomponente. N_{LK} wird für Außenringsschäden (N_A) sowie Innenringsschäden (N_I) in Abhängigkeit der geometrischen Lagerdaten wie folgt definiert:

$$N_A = \frac{z}{2} \cdot \left(1 - \frac{D_w}{D_r} \cos \alpha\right) \text{ und } N_I = \frac{z}{2} \cdot \left(1 + \frac{D_w}{D_r} \cos \alpha\right) \quad (5)$$

Z ist die Anzahl der Wälzkörper, D_w der Durchmesser der Wälzkörper und D_r der Teilkreisdurchmesser.

Der Schadensindikator soll einzelne Schäden untereinander differenzieren können, daher wird ein Indikator für jede Schadensart anhand der im Stromspektrum extrahierten Frequenzbänder mit der Schadensordnung als Mittenordnung ermittelt. Im Folgenden wird die Berechnung des Indikators am Beispiel des Außenrings $I_{dr, \text{Außenring}}$ erläutert.

Zuerst werden die Ordnungsintervalle mit der Schadensordnung k_{AS} als Mittenordnung im Differenzspektrum extrahiert. Die Intervallgrenzen der zu extrahierenden Frequenzbänder sind so festgelegt, dass keine Vielfachen von anderen Schadensordnungen k_{js} , k_{ws} , k_{KS} und deren Seitenbänder, Ordnungen der Rotordrehfrequenz sowie der Anregungsfrequenz ins Intervall fallen. Damit wird sichergestellt, dass eine Änderung im Indikator auf den Schaden zurückzuführen ist. Die Schadensordnungen des Lagers mit den entsprechenden Seitenbändern sind in **Tabelle 1** als Funktion der Anzahl der Überrollungen der jeweiligen Lagerkomponente zusammengefasst. Die Ermittlung erfolgt anhand der Maximalwertsuche im eingegrenzten Extraktionsintervall je Vielfachem der Schadensordnung. Aufgrund der Fensterung bei der Fourieranalyse kann es vorkommen, dass die Amplitude einer geschätzten Frequenz sich auf benachbarte Frequenzen verteilt.

Die verwendete Hamming-Funktion kann eine Ausbreitung der Amplitude auf maximal fünf Frequenzpunkte verursachen. Deswegen werden anstatt des gefundenen Maximums fünf diskrete Werte um das gefundene Maximum für die Berechnung des Schadensindikators verwendet. Der Schadensindikator berechnet sich hiermit zu:

$$I_{dr, \text{Außenring}} = \sum_{k=1}^K \frac{y_{AS}[k]}{\sigma_{sk}[k]}$$

$$\text{mit } y_{AS}[k] = \frac{1}{\sqrt{L_k}} \cdot \sum_{l=-2}^{l=2} P_{Ext, AS}^k (O_{AS}[k] + l) \text{ und } k = 1, 2, 3 \quad (6)$$

- $O_{AS}[k]$ bezeichnet die reale Schadensordnung des gefundenen Maximums der Ordnung k . Die ersten drei Ordnungen sind für die Diagnose signifikanter als die anderen Ordnungen. Hiermit gilt: $K=3$.
- $P_{Ext, AS}^k$ bezeichnet die Ordnungspegel in den extrahierten Ordnungsbändern der Ordnung k
- L_k bezeichnet die Anzahl der positiven und ungleich Null diskreten Werte. Die Summe wird durch die Wurzel der Länge geteilt.
- $\sigma_{sk}[k]$ bezeichnet den skalierten Rauschpegel der Ordnung k .

Der Schadensindikator stellt die relative Abweichung von der in den Ordnungspegeln enthaltenen Energie zur skalierten Rauschenergie des Signals dar. Die Festlegung des skalierten Rauschpegels erfolgt durch die Ermittlung des Rauschpegels vom gemessenen Signal. Wenn der Indikator größer als Eins ist, dann heben sich die Pegel der Schadensordnungen von ihren skalierten Rauschpegeln ab. Somit liegt wahrscheinlich eine Änderung im Pegel der betrachteten Schadensordnung vor, sodass diese im Spektrum erkennbar ist. Die Größe des Indikators weist auf einen vorhandenen Schaden in der betroffenen Komponente hin. Daher erfolgt die Diagnose durch die Grenzwertüberwachung der einzelnen Indikatoren. Der Ablauf für die Berechnung des Indikators wird in **Bild 01** dargestellt. Analog dazu werden die Schadensindikatoren der anderen Lagerkomponenten berechnet.

Prüfstands Aufbau und Messbedingungen

Der entworfene frequenzselektive Schadensindikator soll anhand von beschädigten Wälzlager bewertet werden. Hierfür ist ein Prüfstand für die Messsignalerfassung mit den Wälzlager konstruiert und gebaut worden, welcher im Folgenden vorgestellt wird. Zusätzlich werden die beschädigten Lager präsentiert und die Messbedingungen für die Datenerfassung festgelegt.

Prüfstands Aufbau

Der aufgebaute Prüfstand wird in **Bild 02** dargestellt. Die Anordnung besteht aus dem Testmotor, einem Wälzlagermodul und einer Magnetpulverbremse zur Aufbringung des Lastmoments. Das Konzept des Wälzlagermoduls orientiert sich an dem in [21] entworfenen Modul. Der Testmotor ist eine mit einem leistungselektronischen Umrichter gesteuerte permanentmagneterregte Synchronmaschine. Die Steuerung der Pulsweitenmodulationssignale (PWM) des Umrichters sowie die Umrichter-Freigabe erfolgen über das Steuergerät DS1103 PPC Controller Board von der Firma D Space. Dieses Rapid Control Prototyping Steuergerät dient der zeitsynchronen Erfassung der Messsignale. Für die Messung der Belastungsgrößen: Drehzahl, Lastmoment und Radialkraft wird der Prüfstand mit verschiedenen Sensoren und zugehörigen Messverstärkern ausgestattet. Die Radialkraft dient zur radialen Belastung des Testlagers. Die zu bewertenden Statorströme werden direkt im Umrichter gemessen. Es sind keine zusätzlichen Stromsensoren notwendig. Zusätzlich werden Beschleunigungssensoren am Wälzlagermodul angebracht, um das entworfene Diagnosesystem mit dem Standardverfahren abzugleichen. Die Schwingungsdiagnose stellt das Standardverfahren für die Schadensdiagnose von Lagern dar. Das für den Prüfstand aufgebaute Wälzlagermodul ist eine Baugruppe, in der Wälzlager mit unterschiedlichen Verschleißerscheinungen betrieben und vermessen werden können. Eine Schnittansicht des Moduls ist in **Bild 03** dargestellt. Das Modul besteht im Wesentlichen aus einer gelagerten Welle zur Aufnahme des Testlagers, welche aufgrund der Öl-Schmierung in einem Gehäuse integriert ist. Das Testlager ist zentral auf der Welle in einer Testlagerhülse verbaut, um die Zentrierung des Lagers im Gehäuse sowie die radiale Belastung zu gewährleisten. Für die Messung der radialen Belastung des Lagers ist ein Kraftaufnehmer auf dem Gehäuse montiert. Die Radialkraft am Wälzlager wird über eine Einstellschraube eingestellt.

Wälzlagerschäden

Im Wälzlagermodul können unterschiedlich geschädigte Wälzlager eingebaut und vermessen werden. Für die vorliegende Untersuchung werden sowohl künstlich als auch real beschädigte Wälzlager betrachtet.

Die hier untersuchten künstlichen Schäden sind lokale Beschädigungen an der Innenlaufbahn des Außenrings eines Zylinderrollenlagers mit unterschiedlichen Schadenslängen in Laufbahnrichtung. Die Schäden wurden durch Anerodieren oder durch Anschleifen der Laufbahnoberfläche erzeugt. Es werden vier unterschiedliche Schadenslängen betrachtet, welche bezogen auf den Laufspurumfang des Außenrings $L_{Um, \text{Außen}}$ angegeben werden. Es sind jeweils: 1 % $L_{Um, \text{Außen}}$, 1,8 % $L_{Um, \text{Außen}}$, 2,7 % $L_{Um, \text{Außen}}$ und 3,9 % $L_{Um, \text{Außen}}$. Diese künstlich erzeugten Schadenszustände werden als Schadensfall 1 bezeichnet.

Der Schadensfall 2, welcher stellvertretend für real beschädigte Wälzlagerschäden verwendet wird, ist ein mehrfacher Pitting-schaden in einem Zylinderrollenlager. Auf der Außenlaufbahn des Innenrings des Zylinderrollenlagers befinden sich vier lokale Pittingschäden mit den Schadenslängen von 2,4 mm, 1,8 mm, 1,5 mm und 1,3 mm. Die Schäden haben quer zur Laufrichtung eine Ausdehnung von 27 % bis 40 % der Lagerbreite. Das geschädigte Versuchslager wurde in einem beschleunigten Lebensdauer-versuch am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik der Universität in Paderborn erzeugt. Dazu wurde ein Prüfstand verwendet, welcher für die Erzeugung von realen Ermüdungsschäden aufge-

baut wurde. In diesem Prüfstand werden vier Versuchslager bei erhöhter Last, ohne Überschreiten der statischen Tragzahl betrieben. Eine detaillierte Beschreibung des Ermüdungsprüfstands und der aus den beschleunigten Lebensdauerversuchen entstandenen Schäden befindet sich in [22].

Bild 04 zeigt beispielhaft die künstlich erzeugte Beschädigung an der Innenlaufbahn des Außenrings mit einer Schadenslänge von 3,9 % $L_{Um,Außen}$ (Schadensfall 1) und den realen Pittingschäden aus den Lebensdauerversuchen auf der Außenlaufbahn des Innenrings (Schadensfall 2).

Festlegung der Messbedingungen

Der frequenzselektive Schadensindikator berechnet sich mithilfe der Frequenzanalyse aus den gemessenen Statorströmen. Für eine zuverlässige Frequenzwahl ist es erforderlich, dass die Stromsignale sowohl eine hohe Frequenzauflösung als auch ein großes Signalrauschverhältnis haben. Die Frequenzauflösung wird durch die Aufzeichnungslänge und die Abtastfrequenz bestimmt. Diese Parameter sind auch für die Datenmenge entscheidend, welche aufgrund der Hardwarebeschränkung begrenzt ist.

Die Festlegung einer geeigneten Kombination von Aufzeichnungslänge und Abtastfrequenz für die Erfassung der Statorströme erfolgt anhand der Bewertung des Signalrauschanteils bei unterschiedlichen Variationen der Aufzeichnungslängen und Abtastfrequenzen.

Aus dieser Analyse hat sich eine Aufzeichnungslänge von 60 s bei einer Abtastfrequenz von 8 kHz im Hinblick auf ein großes Signalrauschverhältnis als guter Kompromiss erwiesen. Für die Mittelung werden drei Spektren aus hintereinander erfassten Signalen des gleichen Lastfalls verwendet.

Schadensdiagnose

Im Folgenden wird das entworfene Diagnosesystem mit künstlich erzeugten Schäden parametrisiert und an real beschädigten Wälzlagern getestet. Die Ergebnisse werden diskutiert.

Schadensdiagnose an künstlich erzeugten Schäden

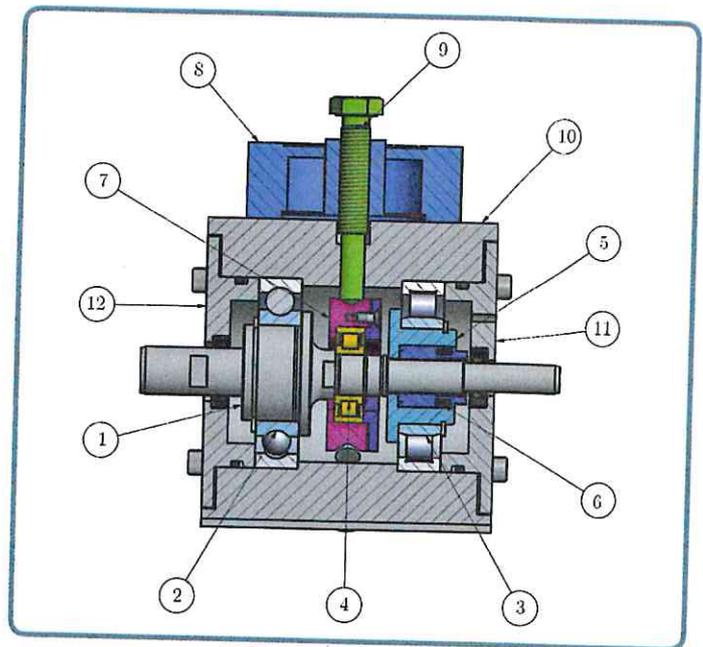
Zur Bewertung des Systems werden die Statorströme aus dem Schadensfall 1 mit den Messbedingungen erfasst. Die Stromerfassung erfolgt bei unterschiedlichen Drehzahlen, Lastmomenten und Radialkräften. Die Momente werden in Bezug auf das Bemessungsmoment der PMSM und die Radialkräfte in Bezug auf die radiale Ermüdungsgrenzbelastung des betrachteten Lagers aufgeführt.

Bild 05 veranschaulicht beispielhaft die gemittelten Betragsspektren jeweils für den schadensfreien Fall und den Fall mit einem Außenringsschaden der Schadenslänge von 3,9 % $L_{Um,Außen}$. Der Lastfall entspricht einer Drehzahl von 500 min^{-1} , einem Lastmoment von 7 % M_N und einer Radialkraft von 25 % F_{Er} .

Zusätzlich wird der ermittelte Rauschpegel dargestellt, der im Mittel 0,018 % in Bezug auf die Amplitude der Anregungsfrequenz beträgt. Die Zylinderrollenlager vom Typ N203E-TVP2 werden mit der N_{Lk} -fachen Häufigkeit der Drehfrequenz überrollt. N_{Lk} ergibt sich für die Überrollungen am Außenring zu $N_A = 4,25$ sowie am Innenring zu $N_I = 6,25$. Diese Werte leiten sich aus den Gleichungen (3) anhand der Lagerkenndaten aus Tabelle 2 ab. Bei einem Außenringsschaden lassen sich die ersten drei Schadensordnungen aus Tabelle 1 zu $k_{AS}[1] = 1,0625$, $k_{AS}[2] = 2,1250$ und $k_{AS}[3] = 3,1875$ berechnen. Die erste Schadensordnung ist im Spektrum deutlich zu erkennen.

Im Folgenden werden die Diagnoseergebnisse am Beispiel eines vorliegenden Außenringsschadens mit einer Schadenslänge von 3,9 % $L_{Um,Außen}$ bei unterschiedlichen Lastfällen bewertet. In den Lastfällen wurden die folgenden Belastungsgrößen in den genannten Abstufungen verwendet:

- Drehzahlen von 100 min^{-1} bis 2000 min^{-1} mit einer Schrittweite von 100 min^{-1} ,
- Lastmomente von 7 % M_N und 25 % M_N des Bemessungsmoments der PMSM,



03 Längsschnitt des Moduls mit folgenden Komponenten: 1 Welle; 2 Festlager; 3 Loslager; 4 Testlager; 5 Stützlagerhülse; 6 Spannelement; 7 Testlagerhülse; 8 Kraftaufnehmer; 9 Einstellschraube; 10 Gehäuse; 11 Deckel; 12 Deckel



04 Darstellung der ausgewählten Schadensfälle: 1 (links) und 2 (oben)

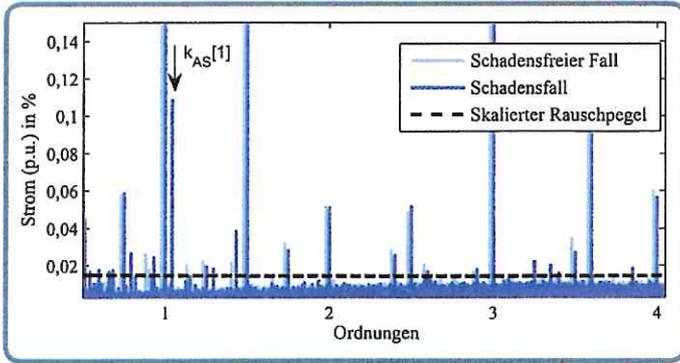
■ Radialkräfte von 0,5 % F_{Er} und 25 % F_{Er} der radialen Grenzbelastung. Zur Beurteilung des Einflusses des Lastmomentes und der Radialkraft auf die Schadenserkenkung werden die drei folgenden Lastvarianten ausgewählt:

- Lastmoment von 7 % M_N und Radialkraft von 25 % F_{Er} ,
- Lastmoment von 7 % M_N und Radialkraft von 0,5 % F_{Er} ,
- Lastmoment von 25 % M_N und Radialkraft von 25 % F_{Er} .

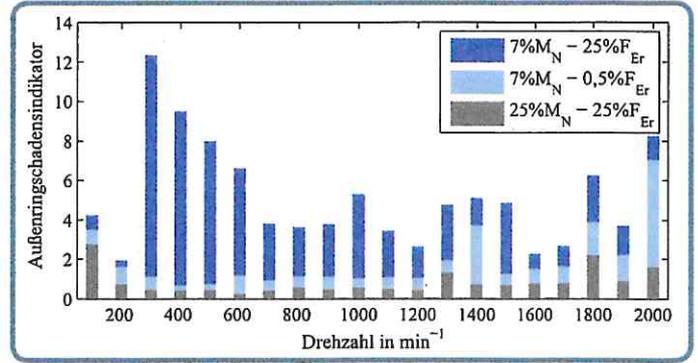
Mithilfe des Betragsspektrums wird der Außenringsschadensindikator des beschädigten Wälzlagers mit der Schadenslänge 3,9 % $L_{Um,Außen}$ nach der Prozedur unter Berücksichtigung der betrachteten Lastvarianten für Drehzahlen zwischen 100 min^{-1} bis 2000 min^{-1} ermittelt und in **Bild 06** veranschaulicht.

Bei Betrachtung der Lastfälle mit geringem Lastmoment von 7 % M_N zeigt der Verlauf des Indikators bei beiden Radialkräften eine Abhängigkeit von der Drehzahl. Der Verlauf des Indikators bei der Radialkraft von 0,5 % F_{Er} zeigt, dass eine Schadenserkenkung bis auf einige Ausnahmen nicht möglich ist. Bei der Radialkraft von 25 % F_{Er} ist eine Schadenserkenkung im Drehzahlbereich unterhalb von 300 min^{-1} nicht möglich. Im restlichen Bereich zeigt sich eine Änderung des Indikators, der zwischen 300 min^{-1} und 1000 min^{-1} zum größten Teil oberhalb von Eins liegt. Eine Erkennung des Schadens ist in diesem Fall sicher möglich. Eine Verringerung der Radialkraft führt zur Reduktion der Auswirkung des Schadens im Stromspektrum.

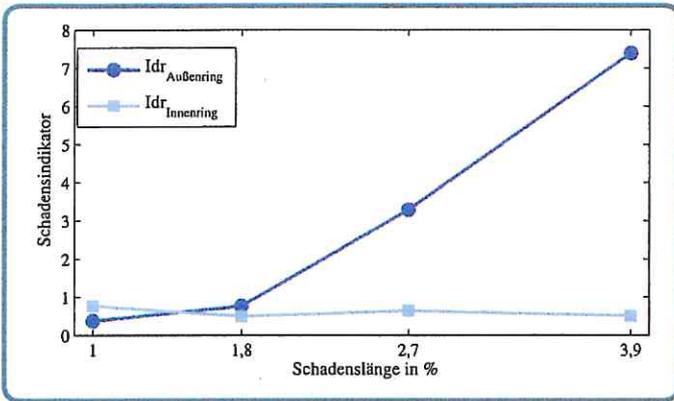
Der Verlauf des Indikators bei der Radialkraft von 25 % F_{Er} und dem erhöhten Lastmoment von 25 % M_N zeigt, dass die Auswirkung des Schadens auf das Stromsignal bei höheren Lastmomenten gedämpft wird. Wälzlerschäden verursachen mechanische Schwingungen, die zu Drehzahlschwankungen führen und somit Drehmomentschwankungen erzeugen. Diese Schwankungen bewirken neue Frequenzkomponenten im Drehmomentspektrum und somit



05 Gemitteltetes Betragsspektrum des schadensfreien Falles und des Schadensfalls mit einem Außenringsschaden der Schadenslänge 3,9 % bei dem Lastfall mit einer Drehzahl von 500 min⁻¹, einem Lastmoment von 7 % M_N und einer Radialkraft von 25 % F_{Er}



06 Verlauf des Außenringsschadensindikators bei einem vorliegenden Außenringsschaden der Schadenslänge von 3,9 % L_{Um,Außen} für die betrachteten Lastfälle



07 Verlauf des Schadensindikators für Außenring und Innenring bei vorliegenden Außenringsschäden mit variabler Schadenslänge

Komponente	Schadensordnungen kEN	Seitenbänder kEN
Außenring k _{AS}	$k \times N_A / p$	
Innenring k _{IS}	$k \times N_I / p$	$k \times (N_I \pm 1) / p$
Wälzkörper k _{WS}	$2 \times k \times N_W / p$	$2 \times k \times (N_W \pm N'_W) / p$
Käfig k _{KS}	$k \times N_K / p$	

Tabelle 1: Schadensordnungen mit entsprechenden Seitenbänder je Lagerkomponenten [3, 20]

Größe	Formelzeichen	Wert
Innendurchmesser des Innenrings	d	17 mm
Außendurchmesser des Außenrings	D	40 mm
Durchmesser der Wälzkörper	D _w	6,5 mm
Teilkreisdurchmesser	D _T	28,55 mm
Anzahl der Wälzkörper	Z	11 Stück
Ermüdungsgrenzbelastung, radial	F _{Er}	2,19 kN

Tabelle 2: Kenndaten des Zylinderrollenlagers vom Typ N203E-TVP2

Indikator	1 % L _{Um,Außen}	1,8 % L _{Um,Außen}	2,7 % L _{Um,Außen}	3,9 % L _{Um,Außen}
Idr _{Außenring}	0,47	0,55	1,68	4,41
Idr _{Innenring}	0,87	0,53	0,92	0,66

Tabelle 3: Mittelwerte einzelner Indikatoren aus den relevanten Lastfällen

auch im Stromspektrum [17]. Bei höherer Last wird die Auswirkung der Drehmomentschwankungen auf dem Statorstrom der PMSM gemindert [23]. Dies führt zur Verringerung der Amplitude der von Schäden hervorgerufenen Frequenzkomponente.

Zusammenfassend wirkt sich die Erhöhung des Lastmoments auf die Schadenserkenkung nachteilig im Vergleich zu der Erhöhung der Radialkraft aus [24]. Eine Schadenserkenkung ist bei Drehzahlen zwischen 300 min⁻¹ und 1000 min⁻¹, geringeren Lastmomenten und mittleren Radialkräften zuverlässig möglich.

Der Schadensindikator wird nun anhand eines Lastfalls von Wälzlager mit Außenringsschäden unterschiedlicher Schadenslänge bewertet. Dazu werden sowohl der Außenring- als auch der Innenringsschadensindikator berechnet und bewertet. Die beiden Indikatoren sind in **Bild 07** als Funktion der Schadenslänge bei einer Drehzahl von 500 min⁻¹, einem Lastmoment von 7 % M_N und einer Radialkraft von 25 % F_{Er} dargestellt.

Bei steigender Schadenslänge zeigt der Verlauf des Außenringsschadensindikators eine Erhöhung insbesondere ab der Schadenslänge größer als 1,8 % L_{Um,Außen}, während der Verlauf des Innenringsschadensindikators relativ konstant und unterhalb von Eins bleibt. Dieses Verhalten wird bei Betrachtung der Mittelwerte einzelner Indikatoren aus den relevanten Lastfällen in **Tabelle 3** bestätigt. Die Ergebnisse weisen ab einer Schadenslänge größer als 1,8 % L_{Um,Außen} auf einen Außenringsschaden hin. Mit den entworfenen Schadensindikator kann ein Außenringsschaden von einem Innenringsschaden ab einer Schadenslänge größer als 1,8 % L_{Um,Außen} sicher unterschieden werden. Der umgekehrte Fall, bei dem ein Innenringsschaden von einem Außenringsschaden unterschieden wird, wird anhand einer Beschädigung am Innenring bewertet.

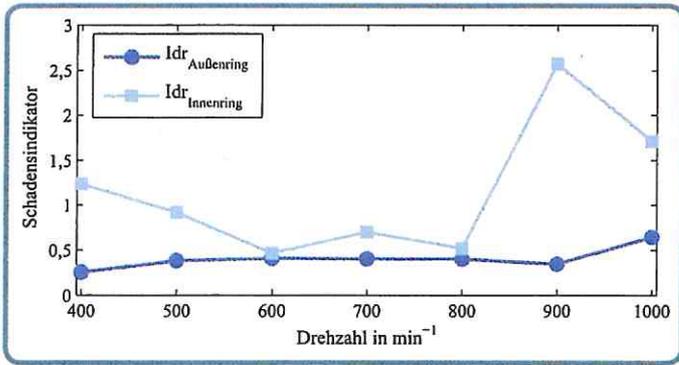
Schadensdiagnose an real beschädigten Wälzlager

Im Folgenden wird das Diagnosesystem an einem real beschädigten Wälzlager getestet. Es handelt sich um die vorgestellte Beschädigung am Innenring (Schadensfall 2). Der Außenring- und der Innenringsschadensindikator werden nach der Prozedur anhand der gemessenen Statorströme bei den relevanten Lastfällen ermittelt.

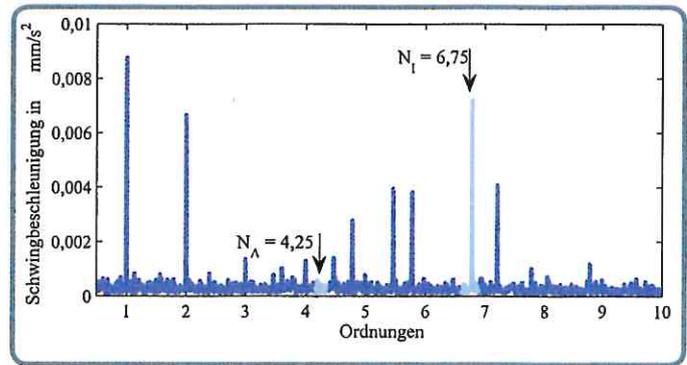
Bild 08 veranschaulicht den Verlauf des Außen- und Innenringsschadensindikators bei Drehzahlen zwischen 400 min⁻¹ und 1000 min⁻¹, einem Lastmoment von 7 % M_N und einer Radialkraft von 25 % F_{Er}.

Der Verlauf des Außenringsschadensindikators weist im Vergleich zum Verlauf des Innenringsschadensindikators einen relativ konstanten Verlauf auf. Der Innenringsschadensindikator schwankt zwischen 0,5 und 2,6. Der Mittelwert des Indikators über dem betrachteten Drehzahlbereich beträgt 1,3. Somit liegt wahrscheinlich ein Innenringsschaden vor.

Zum Abgleich der Ergebnisse wurde die Schwingbeschleunigung am Gehäuse des Wälzlagermoduls gemessen und bewertet. Hierfür wird die Hüllkurve der Schwingbeschleunigung ermittelt. Das Leistungsdichtespektrum der Hüllkurve wird danach mithilfe der



08 Schadensindikator für den Schadensfall 2 bei unterschiedlicher Drehzahl, einem Lastmoment von 7 % M_N und einer Radialkraft von 25 % F_{Er}



09 Schwingspektrum in Bezug auf die Rotordrehfrequenz f_r für den Schadensfall 2 bei einer Drehzahl von 500 min^{-1} und einem Lastmoment von 7 % M_N und einer Radialkraft 25 % F_{Er} . Markierte Schadensordnungen im Falle eines Außen- sowie eines Innenringschadens

Welch-Methode [16] geschätzt. Bild 09 veranschaulicht das Schwingspektrum in Bezug auf die Rotordrehfrequenz f_r für den Schadensfall 2 bei einer Drehzahl von 500 min^{-1} , einem Lastmoment von 7 % M_N und einer Radialkraft von 25 % F_{Er} , wobei die Schadensordnungen im Falle eines Außen- sowie eines Innenringschadens im Spektrum markiert sind. Die Schadensordnungen im Schwingspektrum bei einem Außenringschaden sind Vielfache von $N_A \times f_r$ bzw. $N_I \times f_r$ bei einem Innenringschaden. Es ist ein deutlicher Spitzenwert bei der ersten Innenringschadensordnung im Vergleich zu der ersten Außenringschadensordnung zu erkennen. Somit liegt ein Innenringschaden und kein Außenringschaden vor. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass sich ein Innenringschaden mit dem entworfenen Indikator von einem Außenringschaden unterscheiden lässt.

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt ein Diagnosesystem für Wälzlagerschäden auf Basis der Analyse der vom leistungselektronischen Umrichter zur Verfügung gestellten Statorströme vor. Die Diagnose erfolgt durch die Grenzwertüberwachung eines frequenzselektiven Schadensindikators, der für einzelne Lagerkomponenten durch die Eingabe der Lagerkenndaten ermittelt wird. Das entworfene System ist am Beispiel künstlich erzeugter Außenringschäden und eines Wälzlagers mit realer Beschädigung am Innenring bewertet worden. Die Diagnoseergebnisse haben gezeigt, dass das System Wälzlagerschäden nach ihrer Schadensart am Außenring und am Innenring je nach Schadensausprägung unterscheiden kann. Wälzlagerschäden mit einer Schadenslänge oberhalb von 1,8 % des Laufpurumfanges der betrachteten Komponente können sicher erkannt werden. Eine weitere Beschränkung tritt aufgrund der Frequenzextraktion auf. Daher können Schäden in den Wälzlagerkomponenten nur differenziert werden, wenn ihre Schadensfrequenzen voneinander abweichen.

Literaturverzeichnis:

- [1] P. Tavner, L. Ran und J. & S. H. Penman. *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. The Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [2] I. Bediaga, X. Mendizabal, A. Arnaiz und J. Munoa. „Ball bearing damage detection using traditional signal processing algorithms.“ *Instrumentation Measurement Magazine*, Bd. 16, Nr. 2, S. 20-25, 2013.
- [3] B. Geropp. *Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse*. Dissertation, Institut für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde, RWTH Aachen University, Verlag der Augustinus-Buchhandlung, 1995.
- [4] J. Shiroishi, Y. Li, S. Liang, T. Kurfess und S. Danyluk. „Bearing Condition Diagnostics via Vibration and Acoustic Emission Measurements.“ *Mechanical Systems and Signal Processing*, Bd. 11, Nr. 5, S. 693-705, 1997.
- [5] G. B. Kliman und J. Stein. „Methods of Motor Current Signature Analysis.“ *Electric Machines & Power Systems*, Bd. 20, Nr. 5, S. 463-474, 1992.
- [6] I. Ishkova und O. Vitek. „Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis.“ *Proc. Conf.: 16th International Scientific Conference on Electric Power Enginee-*

ring, EPE 2015, S. 682-686, 2015.

- [7] B. M. Ebrahimi, J. Faiz und J. M. Roshtkhari. „Static-, dynamic- and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors.“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Bd. 56, Nr. 11, S. 4727-4739, 2009.
- [8] S. Rajagopalan, W. le Roux, T. G. Habetler und R. G. Harley. „Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different Load Conditions.“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 22, Nr. 5, S. 2061-2069, 2007.
- [9] W. le Roux, R. Harley und T. Habetler. „Detecting Rotor Faults in Low Power Permanent Magnet Synchronous Machines.“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 22, Nr. 1, S. 322-328, 2007.
- [10] T. Kenull. *Zustandsdiagnose an Kreiselpumpen anhand instationärer Schwankungen der Motorstromaufnahme*. Dissertation, Pfeleiderer-Inst. für Strömungsmaschinen, TU Braunschweig, 1999.
- [11] M. E. H. Benbouzid. „A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection.“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Bd. 47, Nr. 5, S. 984-993, 2000.
- [12] F. Immovilli, A. Bellini, R. Rubini und C. Tassoni. „Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison.“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd. 46, Nr. 4, S. 1350-1359, 2010.
- [13] Z. Obeid, A. Picot, S. Poignant, J. Regnier, O. Darnis und P. Maussion. „Experimental comparison between diagnostic indicators for bearing fault detection in synchronous machine by spectral Kurtosis and energy analysis.“ *Proc. Conf.: 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2012*, S. 3901-3906, 2012.
- [14] D. Schröder. *Elektrische Antriebe - Grundlagen*, 1. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [15] U. Klein. *Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen*, Verein für Betriebsfestigkeitsforschung (VBFEh), 3. Auflage, 2003.
- [16] P. Welch. „The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms.“ *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, Bd. 15, Nr. 2, S. 70-73, 1967.
- [17] R. Schoen, T. Habetler, F. Kamran und R. Bartfield. „Motor bearing damage detection using stator current monitoring.“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd. 31, Nr. 6, S. 1274-1279, 1995.
- [18] C. Piantsof Mbo'o und K. Hameyer. „Modeling of a permanent-magnet excited synchronous machine with bearing damage.“ *Proc. Conf.: 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2014*, 2014.
- [19] J. Kim, I. Yang, D. Kim, M. Hamadache und D. Lee. „Bearing fault effect on induction motor stator current modeling based on torque variations.“ *Proc. Conf.: 12th International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2012*, 2012.
- [20] VDI 3832, VDI Richtlinie. *Körperschallmessungen zur Beurteilung von Wälzlagern in Maschinen und Anlagen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- [21] C. Lessmeier, C. Piantsof Mbo'o, I. Coenen, D. Zimmer und K. Hameyer. „Untersuchung von Bauteilschäden elektrischer Antriebsstränge im Belastungsprüfstand mittels Statorstromanalyse.“ *ANT Journal Technische Fachzeitschriften der Vereinigten Fachverlage GmbH*, Bd. 1, S. 8-13, 2012.
- [22] C. Lessmeier, J. K. Kimocho, D. Zimmer und W. Sextro. „Condition Monitoring of Bearing Damage in Electromechanical Drive Systems by Using Motor Current Signals of Electric Motors: A Benchmark Data Set for Data-Driven Classification.“ *Proc. Conf.: Third European Conference of the Prognostics and Health Management Society, PHME16*, S. 1-8, 2016.
- [23] I. Coenen. *Beitrag zur Analyse elektrischer Antriebssysteme mit toleranzbehafteten Komponenten: Vom elektromagnetischen Entwurf bis zur End-of-Line Prüfung*. Dissertation, Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen University, Shaker Verlag, 2014.
- [24] C. Piantsof Mbo'o, T. Herold und K. Hameyer. „Impact of the load in the detection of bearing faults by using the stator current in PMSM's.“ *Proc. Conf.: XXI International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014*, S. 1621-1627, 2014.