

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 51156/2018
(22) Anmeldetag: 27.12.2018
(45) Veröffentlicht am: 15.09.2023

(51) Int. Cl.: **G01M 13/045** (2019.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 102005042776 A1
US 6553837 B1
WO 2018050016 A1
US 2011264391 A1
EP 2402731 A1

(73) Patentinhaber:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

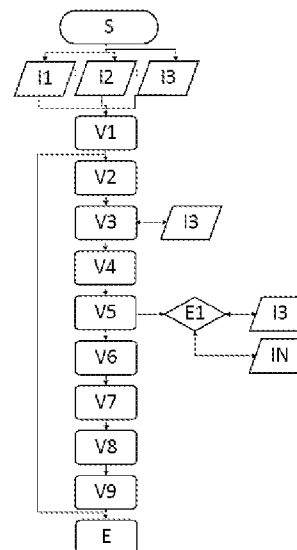
(72) Erfinder:
Zalar Gerhard
8141 Unterpremstätten (AT)
Schmidt Joachim Ing.
8402 Werndorf (AT)
Koiser Silvio-Leon Ing.
8112 Gratwein (AT)

(74) Vertreter:
Babeluk Michael Dipl.Ing. Mag.
1080 Wien (AT)

(54) Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers, bei dem in einem ersten Schritt Messungen im Bereich um das Lager aufgenommen werden, zumindest eine Transferfunktion bestimmt wird und mit dieser aus den Messungen der Sensoren zumindest dynamische Belastungen auf das Wälzlager zur Berechnung der verbleibenden Lebensdauer bestimmt werden und in einem nachfolgenden Schritt eine verbleibende Lebensdauer berechnet wird. Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer anzugeben, das eine bessere Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer ermöglicht. Dies wird dadurch erreicht, dass im ersten Schritt mit zumindest zwei Sensoren Messungen im Bereich um das Lager aufgenommen werden und aus den Signalen der Sensoren, vorzugsweise mit Fast Fourier Transformation (FFT), je ein Antwortspektrum ermittelt wird.

Fig.2



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers, bei dem in einem ersten Schritt Messungen im Bereich um das Lager aufgenommen werden, zumindest eine Transferfunktion bestimmt wird und mit dieser aus den Messungen der Sensoren zumindest dynamische Belastungen auf das Wälzlager zur Berechnung der verbleibenden Lebensdauer bestimmt werden und in einem nachfolgenden Schritt eine verbleibende Lebensdauer berechnet wird.

[0002] Die WO 2018/050016 A1 zeigt ein Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers, wobei eine Transferfunktion über Messungen im Bereich um das Lager bestimmt wird, über die die dynamischen Belastungen auf das Wälzlager bestimmt werden und die verbleibende Lebensdauer berechnet wird. Die Ermittlung eines Antwortspektrums je Sensor ist nicht vorgesehen.

[0003] Aus der DE 10 2005 042 776 A1 ist eine Sensoranordnung zur Lagerzustandsüberwachung von Lagerspindeln mit im Bereich eines inneren und eines äußeren Lagerringes angeordneten Schwingungssensoren bekannt, wobei eine akustische Übertragungsfunktion bestimmt wird, um Rückschlüsse auf den Lagerzustand zu ziehen.

[0004] Die US 6,553,837 B1 offenbart ein Verfahren zur Überwachung eines Wälzlagers mit einem Beschleunigungssensor, wobei eine akustische Transferfunktion bestimmt wird, anhand derer auf den Zustand der Wälzflächen rückgeschlossen werden kann.

[0005] Derzeit ist es üblich, die verbleibende Lebensdauer eines Wälzlagers oder den Schadensfall aufgrund von Messungen mit einem Sensor vorherzusagen. Dabei kann aufgrund der auftretenden Schallemissionen der Zustand der Wälzkörper beurteilt werden und bei bestimmten auftretenden Ereignissen wird beispielsweise eine Wartung beziehungsweise ein Austausch initiiert.

[0006] Nachteilig dabei ist, dass keine genauen Vorhersagen der verbleibenden Lebensdauer möglich sind. Es wird vielmehr erst ab dem merkbaren Auftreten eines beginnenden Schadens ein Hinweis auf den vorzeitigen Ausfall gegeben. Dadurch kommt es häufig ungeplant zu einem Stillstand der Vorrichtung.

[0007] Weiters ist eine Messung direkt am Wälzlager leider oft nur mit großen Umbauten unter großem Aufwand erreichbar.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es ein Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer anzugeben, das eine bessere Vorhersage der verbleibenden Lebensdauer ermöglicht.

[0009] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch das eingangs erwähnte Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers dadurch gelöst, dass im ersten Schritt mit zumindest zwei Sensoren Messungen im Bereich um das Lager aufgenommen werden und aus den Signalen der Sensoren - vorzugsweise mit Fast Fourier Transformation (FFT) - je ein Antwortspektrum ermittelt wird.

[0010] Außerdem wird die Aufgabe durch eine Vorrichtung zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers zur Durchführung des Verfahrens der Überwachung, mit zumindest zwei Sensoren zur Messung gelöst, wobei die Sensoren im Bereich des Lagers angeordnet sind und in einem nachfolgenden Schritt eine verbleibende Lebensdauer berechnet wird.

[0011] Nach der Berechnung der verbleibenden Lebensdauer wird diese ausgegeben. Die Ausgabe erfolgt dabei auf einem technischen Ausgabegerät, visuell auf einem Bildschirm oder in elektronischer Form in einem Speicher, oder sie wird über einen Drucker in gedruckter Form ausgegeben. Das Ausgabegerät kann durch einen Bildschirm, einen Drucker oder ähnliche Vorrichtungen realisiert sein.

[0012] Mit der Transferfunktion werden vorzugsweise alle Belastungen auf das Wälzlager zur Berechnung der verbleibenden Lebensdauer aus den Messungen der Sensoren bestimmt.

[0013] Mithilfe der Transferfunktion ist es möglich genaue Ergebnisse für die Belastungen des

Wälzlagers zu erreichen, ohne die Notwendigkeit, dass die Sensoren direkt am Wälzlager anliegen. Die Sensoren können von den Lagerringen entfernt angeordnet werden.

[0014] Durch diese Transferfunktion steigt die Genauigkeit der ermittelten Werte, da Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten des Materials, welche die Messung beeinflussen, berücksichtigt werden.

[0015] Durch diese Transferfunktion kann die verbleibende Lebensdauer auf einfache Weise bestimmt werden. Es sind keine Umbauten an Wälzlagern nötig und es werden trotzdem gute Messungen erzielt.

[0016] In einer günstigen Variante des Verfahrens ist vorgesehen, dass die Sensoren außerhalb eines inneren Lagerrings und außerhalb eines äußeren Lagerrings angeordnet sind und mit der Transferfunktion dynamische Eigenschaften der Lagerringe aufgenommen werden.

[0017] Aufgrund der Anordnung der Sensoren außerhalb der belasteten Bereiche steigt die Haltbarkeit der Sensoren und in weiterer Folge die Beständigkeit der Genauigkeit über einen längeren Zeitraum. Aufgrund der ständigen Überrollung von Wälzkörpern können die Sensoren mit der Zeit beschädigt werden und die Messungen somit unbrauchbar werden. Dies wird mit der Anordnung der Sensoren an nicht von Wälzkörper überrollten Bereichen erreicht.

[0018] Besonders günstig ist dabei, wenn die Sensoren an einem Lagerschild angeordnet sind und mit der Transferfunktion dynamische Eigenschaften des Lagerschilds aufgenommen werden. Der Lagerschild ist dabei jenes Bauteil, das in axialer Richtung das Wälzlager von nach außen hin abdeckt und vor Umwelteinflüssen wie dem Eintrag von Staub schützt. Die Alterung und Verschmutzung von Schmierstoffen wird so auf ein Minimum - beispielsweise durch den Abrieb, der sich nicht verhindern lässt - reduziert. Zur idealen Ausnützung der Vorteile kommt es, wenn alle Sensoren außerhalb eines inneren Lagerrings und eines äußeren Lagerrings angeordnet werden, beispielsweise am Lagerschild.

[0019] Zur besonders leichten und genauen sowie günstigen Bestimmung wird die Transferfunktion mit einem Impulshammer, der einen Kraftsensor zur Aufnahme eines Signals aufweist, und den Sensoren ermittelt. Ein Impulshammer ist ein übliches Gerät, das einfach erhältlich, günstig und genau ist.

[0020] Alternativ wird die Transferfunktion mit einem Schwingerreger, der einen Kraftsensor zur Aufnahme eines Signals aufweist und den Sensoren ermittelt.

[0021] Besonders einfach lassen sich die ermittelten Signale derart verarbeiten, wenn aus dem Signal des Kraftsensors des Impulshammers oder des Schwingerregers - vorzugsweise mit Fast Fourier Transformation (FFT) - ein Anregungsspektrum ermittelt wird. Mit FFT kann dies besonders einfach durchgeführt werden.

[0022] In einer günstigen Alternative ist vorgesehen, dass die Sensoren zur Messung Beschleunigungssensoren sind und die Beschleunigungssensoren die Beschleunigung im Bereich des Wälzlagers vorzugsweise mit einer Aufzeichnungsrate von mindestens 2,56 kHz messen und/oder dass je ein Frequenzspektrum des Beschleunigungssignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt wird. Mithilfe der Beschleunigungssensoren können dynamische Belastungen auf das Wälzlager sehr einfach und präzise bestimmt werden. Beschleunigungssensoren sind mittlerweile günstig und in vielerlei Ausführung für diverse Anwendungen erhältlich.

[0023] Das erfindungsgemäße Verfahren ist insbesondere computergestützt oder wird insbesondere computergestützt ausgeführt.

[0024] Um die zu speichernden Datenmengen zu reduzieren ist in einer Alternative des Verfahrens vorgesehen, dass in festgelegten Intervallen Frequenzspektren des Beschleunigungssignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt werden.

[0025] Besonders einfach und ohne viel Aufwand lässt sich die Belastung auf das Wälzlager dadurch bestimmen, dass ein Summenpegel aus einem Kraftspektrum bestimmt wird, wobei das Kraftspektrum als Quotient aus dem Frequenzspektrum des Beschleunigungssignals und der Transferfunktion bestimmt wird.

[0026] Eine günstige Alternative zu den Beschleunigungssensoren stellt die Möglichkeit der Verwendung von Dehnmessstreifen dar. Dabei sind die Sensoren zur Messung je eine Messanordnung mit mehreren Dehnmessstreifen (DMS) und jede Messanordnungen misst die Kraft im Bereich des Wälzlagers.

[0027] Temperatureffekte lassen sich günstig kompensieren, wenn die Messanordnung je Raumrichtung eine Wheatstone'sche-Messbrücke aufweist und Kräfte in allen drei Raumrichtungen aufnimmt. Dadurch ist die Messgenauigkeit stark erhöhbar.

[0028] Um auch statische Belastungen berücksichtigen zu können, ist in einer Alternative vorgesehen, dass mit einer Spannvorrichtung eine Kalibrierung für statische Belastungen - und vorzugsweise dynamische Belastungen bis zu einer Grenzfrequenz - durchgeführt wird.

[0029] Die Signale lassen sich gut weiterverarbeiten, wenn ein Frequenzspektrum eines Kraftsignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt wird.

[0030] Die Datenmengen lassen sich reduzieren, wenn in festgelegten Intervallen Frequenzspektren des Kraftsignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt werden.

[0031] Besonders einfach gelingt die Ermittlung der Lagerbelastung, wenn ein Summenpegel aus einem Kraftspektrum bestimmt wird, wobei das Kraftspektrum als Quotienten aus dem Frequenzspektrum des Kraftsignals und der Transferfunktion bestimmt wird und/oder wenn Belastungen aus den statischen Belastungen und dem Summenpegel des Kraftspektrums summiert werden.

[0032] Um die Sicherheit und die Lebensdauer der gesamten Anlage zu erhöhen, ist in einer günstigen Variante vorgesehen, dass die Berechnung der verbleibenden Lebensdauer kontinuierlich - vorzugsweise in Intervallen - durchgeführt wird.

[0033] Weiter steigern lässt sich dies, wenn bei Erreichen eines unteren Grenzwertes der verbleibenden Lebensdauer eine Warnung ausgegeben wird und/oder wenn eine Wartung initiiert wird.

[0034] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es möglich, die in Wälzlager wirkenden Kräfte zu erfassen ohne dabei konstruktive Änderungen an der Maschine vornehmen zu müssen.

[0035] Die im Betrieb gemessenen Kräfte dienen als Basis für eine adaptive Berechnung der verbleibenden Lebensdauer. Je nach den erfolgten Belastungen verkürzt oder verlängert sich die vorhergesagte Lebensdauer.

[0036] Das Verfahren eignet sich besonders für Prüfstands-Leistungsbremsen, ist aber auch für andere Anordnungen mit verbauten Wälzlager einsetzbar. Prinzipiell ist es für alle Maschinen, die mit Wälzlager gelagerten Wellen oder Elementen ausgestattet sind, anwendbar.

[0037] Die Messung der im Betrieb wirkenden Kräfte kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: Einerseits durch Messung der Schwingung mittels Beschleunigungssensoren und einer Umrechnung der Beschleunigung der Schwingung in Kraft mithilfe der Transferfunktion. Die Transferfunktion muss vorher einmalig für den Lagerschild oder das jeweilige Bauelement, an dem die Sensoren angeordnet sind bestimmt werden.

[0038] Andererseits kann die Ermittlung durch Applikation von DMS (Dehnmessstreifen) am Lagerschild oder anderem Bauelement und mit Kalibrierung mittels Kalibriereinrichtung erfolgen. Des Weiteren muss eine Transferfunktion errechnet und implementiert werden, um die dynamischen Eigenschaften des Lagerschildes oder des jeweiligen Bauelements zu berücksichtigen.

[0039] Die Messung durch Beschleunigungssensoren erfolgt derart: Die Transferfunktion wird mittels Impulshammer und einem Beschleunigungssensor ermittelt. Mit dem Impulshammer, der einen Kraftsensor an der Spitze aufweist, wird an der Welle angeschlagen und gleichzeitig die Antwort an den Beschleunigungssensoren gemessen. Aus diesen Signalen wird ein Spektrum mittels FFT gerechnet, und danach die Transferfunktion $H(f)$ für jeden Beschleunigungssensor ermittelt. Dabei wird das Spektrum der Beschleunigungssensoren als Antwortspektrum $V(f)$ und das Spektrum aus dem Signal des Kraftsensors als Anregungsspektrum $U(f)$ bezeichnet. Die Transferfunktion $H(f)$ ergibt sich folgendermaßen:

$$H(f) = \frac{V(f)}{U(f)}$$

$H(f)$ Transferfunktion
 $U(f)$ Fourier Transformation der Anregung [N]
 $V(f)$ Fourier Transformation der Antwort [m/s^2]

[0040] Wie erkennbar ist, weist die Transferfunktion die Einheit $[H(f)] = \frac{\text{m/s}^2}{\text{N}}$ auf. Die Messungen im Betrieb werden dann so durchgeführt, dass die Beschleunigungssensoren möglichst nahe dem Wälzlager am Lagerschild der Maschine oder an dafür vorgesehenen Messpunkten angebracht sind. Damit eine Auswertung des Signals von bis zu 1 kHz gewährleistet ist, erfolgt die Messung mit ausreichend hoher Aufzeichnungsrate von mehr als 2,56 kHz. Vom laufend aufgezeichneten Beschleunigungssignal werden in regelmäßigen Intervallen, die zeitlich festgelegt sein können, Frequenzspektren mittels FFT berechnet. Diese werden dann mit der zuvor bestimmten Transferfunktion $H(f)$ spektral dividiert. Als Ergebnis erhält man ein Kraftspektrum $F(f)$ gemäß der untenstehenden Formel:

$$F(f) = \frac{a(f)}{H(f)}$$

$H(f)$ Transferfunktion
 $F(f)$ Kraftspektrum [N]
 $a(f)$ Spektrum Beschleunigungssignal [m/s^2]

[0041] Der Summenpegel dieses Kraftspektrums $F(f)$ spiegelt die im Wälzlager wirkende Gesamtkraft wider.

[0042] Bei der Verwendung von DMS werden diese am Lagerschild so angeordnet, dass in allen drei Raumrichtungen die Kraft gemessen werden kann. Um die ideale Position zu finden wird eine Finite Elemente Berechnung der Struktur durchgeführt. Dabei bedeutet die ideale Position eine möglichst akkurate Trennung der gemessenen Raumrichtungen bei höchster Messempfindlichkeit. Für jede Raumrichtung ist dabei eine Wheatstone'sche Messbrücke notwendig, d.h. es werden vier DMS pro Richtung vorgesehen.

[0043] Durch entsprechende Positionierung der DMS an der Innen- und Außenseite des Lagerschilds und Anordnung in der Wheatstone'schen Messbrücke, kann eine Trennung der Messrichtungen (axial, horizontal, vertikal) mit minimalem Übersprechen realisiert werden. Das Übersprechen hängt dabei von der Qualität (Genauigkeit der Wandstärken, Homogenität des Gusses) des Lagerschilds ab. Wenn hohe Genauigkeit gefordert ist, wird der Lagerschild günstigerweise als Stahldrehteil ausgeführt.

[0044] Die Kalibrierung der DMS erfolgt mit einer eigens angefertigten Spannvorrichtung, die in allen drei Raumrichtungen Zug an der Welle ausüben kann. Zwischen Welle und der Spannvorrichtung ist ein Kraftsensor angebracht, der die ausgeübte Zugkraft misst. Gleichzeitig werden die Spannungen der Vollbrücken gemessen und aufgezeichnet. Der Kalibrierfaktor f ergibt sich aus:

$$f = \frac{\Delta U}{\Delta F}$$

f ... Kalibrierfaktor V/N
 ΔU ... Spannungsdifferenz aus 2 Messwerten
 ΔF ... Kraftdifferenz aus 2 Messwerten

[0045] Sobald sich die Maschine dreht, entstehen durch unterschiedliche Einflüsse, wie z.B. die Unwucht, Kräfte im Wälzlager. Diese Kräfte führen zu einer Verformung des Lagerschilds und somit zu einer Aufnahme von Kräften an den DMS. Dadurch kann die wirkende Kraft gemessen werden.

[0046] Ab einem bestimmten Frequenzbereich führt die statische Kalibrierung zu größeren Abweichungen und es muss wie bei der zuerst erläuterten Variante mit den Beschleunigungssensoren eine Transferfunktion $H(f)$ zur Korrektur der dynamischen Eigenschaften des Lagerschilds eingeführt werden.

[0047] Die Messung kann prinzipiell in der oben beschriebenen Weise erfolgen, mit dem Unterschied, dass die Antwort das Kraftsignal aus der DMS Messung ist.

[0048] Die Anregung kann ebenfalls durch einen Impulshammer erfolgen oder mittels eines

Schwingerregers, der auch die eingeleitete Kraft mit einem Kraftsensor misst.

[0049] Für die Lebensdauerberechnung von Wälzlager wird üblicherweise die Norm ISO 281 herangezogen. Bei dieser Norm dienen die mechanischen Spezifikationen des Wälzlagers und die Betriebsbedingungen als Berechnungsgrundlage.

[0050] Um die verbleibende Lebensdauer zu berechnen wird dabei Gebrauch von einer dynamisch äquivalenten Lagerbelastung P gemacht. Außerdem wird eine dynamische Tragzahl C , die von Wälzlager zu Wälzlager unterschiedlich ist, eingesetzt. Eine Betriebsdrehzahl n sowie ein Lebensdauerexponent gehen ebenso in die Gleichung für die nominelle Lebensdauer L_{10h} ein. L_{10h} gibt die nominelle Lebensdauer bei 90% Erlebenswahrscheinlichkeit in Betriebsstunden h an. Die nominelle Lebensdauer L_{10h} in Betriebsstunden h berechnet sich demnach derart:

$$L_{10h} = \frac{16\,666}{n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

C ...Dynamische Tragzahl

P ...Dynamisch äquivalente Lagerbelastung für Radial- und Axiallager

p ...Lebensdauerexponent; für Rollenlager: $p = 10/3$ für Kugellager: $p = 3$

n ...Betriebsdrehzahl.

[0051] Da die Eingangsgrößen Betriebsdrehzahl n und dynamisch äquivalente Lagerbelastung P laufend gemessen werden, wird die Lebensdauerberechnung laufend durchgeführt und angepasst. Dabei wird von einer Summierung des Schadens ausgegangen, der die verbleibende Lebensdauer der Maschine sukzessive reduziert.

[0052] Die Darstellung der verbleibenden Lebensdauer erfolgt günstigerweise in verbleibenden Betriebsstunden h . Somit kann bevor ein Schaden und Stillstand eintritt, rechtzeitig ein Service initiiert werden oder etwa ein Alarm ausgegeben werden.

[0053] Die dynamisch äquivalente Lagerbelastung P ist ein rechnerischer Wert. Dieser Wert ist eine in Größe und Richtung konstante Radiallast bei Radiallagern oder Axiallast bei Axiallagern. Eine Belastung mit der dynamischen äquivalenten Lagerbelastung P ergibt die gleiche Lebensdauer wie die tatsächlich wirkende kombinierte Belastung in axialer Richtung F_a und in radialer Richtung F_r .

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

[0054] Die Messung der Kraft erfolgt in zwei Richtungen. Die dynamische äquivalente Lagerbelastung P erhält man mittels lagerspezifischen Faktoren X und Y und den gemessenen Kräften in axialer Richtung und in radialer Richtung. Die Faktoren X und Y werden üblicherweise in Produktkatalogen vom Lagerhersteller bereitgestellt.

[0055] Die adaptive Lebensdauerberechnung erfolgt dann über die dynamische Tragzahl C mit der oben angeführten dynamischen äquivalenten Lagerbelastung P für Radial- und Axiallager. Der Lebensdauerexponent p für Rollenlager wird mit $p = 10/3$ eingesetzt und für Kugellager mit $p = 3$.

[0056] Bezogen auf die Auslegung des Wälzlagers, bei der Last- und Drehzahlkollektive angenommen werden, verringert sich die Lebensdauer nach jeder Berechnung aufgrund der aktuellen Drehzahl und der aktuell wirkenden Kräfte schneller oder langsamer. Das heißt, dass eine Steigung einer Lebensdauerkurve, wie in der Fig. 1 gezeigt ist, größer oder kleiner ist. Mit Hilfe der Steigung wird die Reduktion der Lebensdauer bis zum nächsten Berechnungsintervall berechnet.

[0057] Dasselbe Ergebnis wird erzielt, wenn man mit Hilfe der Lebensdauerberechnung L_{10h} eine Wöhlerkurve bestimmt, welche aussagt wie viele Millionen Umdrehungen das Wälzlager bei Belastungen von 0 Newton bis zur Tragzahl C standhält. Bei der anschließenden Bestimmung des Verhältnisses $D_i = n_i/N_i$ wird die Teilschädigung pro Berechnungs-Zyklus bestimmt.

D_i ...Teilschädigung

n_i ... Anzahl der Umdrehungen bei aktueller Belastung im Berechnungszyklus

N_i ... ertragbare Umdrehungen bei aktueller Belastung

[0058] Die Summe aller Teilschädigungen ergibt die Gesamtschädigung D:

$$D = \sum_{i=0}^k n_i / N_i.$$

[0059] Wenn die Gesamtschädigung D eins erreicht hat, ist eine Schädigung von 100% erreicht.

[0060] In der Folge wird die Erfindung anhand der folgenden Figuren näher erläutert. Es zeigen:

[0061] Fig. 1 einen Verlauf einer Lebensdauer und einer Schadensreserve über Betriebsstunden h;

[0062] Fig. 2 eine Lebensdauerberechnung unter Nutzung des erfindungsgemäßen Verfahrens; und

[0063] Fig. 3 eine beispielhafte Wöhlerlinie.

[0064] Die Fig. 1 zeigt eine adaptive Lebensdauerberechnung und Schadensakkumulation. Dabei ist eine verbleibende Schadensreserve S über den Betriebsstunden h aufgezeichnet. Eine erste Linie 1 zeigt dabei die vorausberechnete Lebensdauer L bei vorbestimmter Drehzahl n. Dabei gilt hierfür die Annahme, dass die Belastung und die Drehzahl n über die gesamte Lebensdauer L konstant bleiben. Dabei beträgt die Lebensdauer L in etwa 85.000 Stunden im gezeigten Fall.

[0065] Eine zweite Linie 2 gibt die Lebensdauer in % an, wobei diese Lebensdauer mittels Steigung ermittelt wurde.

[0066] Eine dritte Linie 3 gibt eine Schadensakkumulation in % an, die mittels Wöhlerlinie ermittelt wurde.

[0067] In Fig. 2 ist eine beispielhafte adaptive Lebensdauerberechnung nach dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Lebensdauerberechnung gezeigt. Dabei ist ein Schema des Ablaufs des Verfahrens angeführt. Die Lebensdauerberechnung startet in S. Dann erfolgen in I1, I2 und I3 die Eingaben der Messdaten. In I1 wird die Kraft in radialer Richtung F_r , die Kraft in axialer Richtung F_a und die verstrichene Zeit Δt in die Berechnung eingepflegt. In I2 werden Konstanten berücksichtigt, wie die dynamische Tragzahl C, die statische Tragzahl C_0 , ein Faktor für Rillenkugellager f_0 laut Wälzlagerkatalog, die nominelle Lebensdauer in Stunden $L_{10h,nom}$ sowie ein Lebensdauerbeiwert a_1 . Optional kann die Einpflege von weiteren Werten erfolgen. In I3 erfolgt die Eingabe von Werten aus Tabellen, wie die Tabelle 3 der ISO 281 zur Aufnahme der Werte für die lager-spezifischen Faktoren X und Y sowie Berechnungsfaktor e.

[0068] In Verfahrensschritt eins V1 wird von einer Lebensdauer in Prozent von aktuell 100% ausgegangen. Weiter startet die erste Lebensdauerbestimmung in Verfahrensschritt zwei V2 durch die Berechnung des Verhältnisses $f_0 \cdot F_a / C_0$. Durch dieses Verhältnis ist beispielsweise aus der Tabelle 3 der ISO 281, hier als I3 gekennzeichnet, der Berechnungsfaktor e auslesbar in Verfahrensschritt drei V3. Es ist jedoch alternativ zur Tabelle 3 der ISO 281 ein anderer Ursprung der Tabelle für das Auslesen der Faktoren heranziehbar. Diese Vorgehensweise entspricht der derzeit gängigen Praxis zur Lebensdauerberechnung von Wälzlagern.

[0069] In Verfahrensschritt vier V4 wird das Verhältnis F_a / F_r zwischen der dynamischen Kraft in axialer Richtung F_a und der dynamischen Kraft in radialer Richtung F_r berechnet.

[0070] Dann erfolgt die Bestimmung von den Faktoren X und Y in Verfahrensschritt fünf V5. Dazu erfolgt die Entscheidung E1 bei der bestimmt wird, ob das Verhältnis F_a / F_r größer e ist. Wenn ja, dann kommt es zur Eingabe der Faktoren von X und Y aus der in I3 eingegebenen Tabelle. Wenn das Verhältnis F_a / F_r kleiner als der Berechnungsfaktor e ist, dann wird für den Faktor X der Wert 1 und für den Faktor Y der Wert 0 verwendet.

[0071] In Verfahrensschritt sechs V6 erfolgt die Berechnung der äquivalenten dynamischen Lagerbelastung P anhand der oben angegebenen Formel. In weiterer Folge wird die Lebensdauer $L_{10h,aktuell}$ als $a_1 \cdot (C/P)^3 \cdot 10^6 / 60/n$ und die Steigung k mit $k = 100\% / L_{10h} \cdot (-1)$ in Verfahrensschritt sieben V7 berechnet. Die Berechnung einer neuen Lebensdauer in Prozent $L_{10\%,aktuell}$ erfolgt in Verfahrensschritt 8 mit $L_{10\%,neu} = k \cdot \Delta t + L_{10\%,aktuell}$ und Setzung der neuen Werte $L_{10\%,aktuell} = L_{10\%,neu}$. In Verfahrensschritt neun V9 erfolgt die Anzeige der Lebensdauer als $L_{10h,nom} / 100 \cdot L_{10\%,aktuell}$ in

Stunden.

[0072] Durch die Rückkopplung nach Verfahrensschritt neun V9 vor Verfahrensschritt zwei V2 erfolgt die Berechnung von Neuem. Bis zum Erreichen des Endes der Lebensdauer E kann dieses Verfahren wiederholt werden. Mit dem Ende E kann eine Warnung ausgegeben werden und/oder eine Wartung oder ein Austausch des Lagers initiiert werden.

[0073] In Fig. 3 ist eine Wöhlerkurve der maximal möglichen Belastung über Millionen Umdrehungen aufgezeichnet. Die Wöhlerkurve wird anhand der Formel $L_{10}=(C/P)^p$ berechnet. Sie sagt aus, wie vielen Millionen Umdrehungen U das Lager bei einer bestimmten Belastung P in kN standhält.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers, bei dem in einem ersten Schritt Messungen im Bereich um das Lager aufgenommen werden, zumindest eine Transferfunktion bestimmt wird und mit dieser aus den Messungen der Sensoren zumindest dynamische Belastungen auf das Wälzlager zur Berechnung der verbleibenden Lebensdauer bestimmt werden und in einem nachfolgenden Schritt eine verbleibende Lebensdauer berechnet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass im ersten Schritt mit zumindest zwei Sensoren Messungen im Bereich um das Lager aufgenommen werden und aus den Signalen der Sensoren - vorzugsweise mit Fast Fourier Transformation (FFT) - je ein Antwortspektrum ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit der Transferfunktion alle Belastungen auf das Wälzlager zur Berechnung der verbleibenden Lebensdauer aus den Messungen der Sensoren bestimmt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sensoren außerhalb eines inneren Lagerrings und außerhalb eines äußeren Lagerrings angeordnet sind und mit der Transferfunktion dynamische Eigenschaften der Lagerringe aufgenommen werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sensoren an einem Lager Schild angeordnet sind und mit der Transferfunktion dynamische Eigenschaften des Lager Schilds aufgenommen werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Transferfunktion mit einem Impulshammer, der einen Kraftsensor zur Aufnahme eines Signals aufweist, und den Sensoren ermittelt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Transferfunktion mit einem Schwingerreger, der einen Kraftsensor zur Aufnahme eines Signals aufweist, und den Sensoren ermittelt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus dem Signal des Kraftsensors des Impulshammers oder des Schwingerregers - vorzugsweise mit FFT - ein Anregungsspektrum ermittelt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sensoren zur Messung Beschleunigungssensoren sind und die Beschleunigungssensoren die Beschleunigung in Form eines Beschleunigungssignals im Bereich des Wälzlagers vorzugsweise mit einer Aufzeichnungsrate von mindestens 2,56 kHz messen.
9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Frequenzspektrum des Beschleunigungssignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass in festgelegten Intervallen Frequenzspektren des Beschleunigungssignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt werden.
11. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Summenpegel aus einem Kraftspektrum bestimmt wird, wobei das Kraftspektrum als Quotient aus dem Frequenzspektrum des Beschleunigungssignals und der Transferfunktion bestimmt wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sensoren zur Messung je eine Messanordnung mit mehreren Dehnmessstreifen (DMS) aufweisen und jede Messanordnung die Kraft im Bereich des Wälzlagers misst.
13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass jede Messanordnung je Raumrichtung eine Wheatstone'sche-Messbrücke aufweist und Kräfte in allen drei Raumrichtungen aufnimmt.
14. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit einer Spannvorrichtung eine Kalibrierung für statische Belastungen - und vorzugsweise dynamische Belastungen bis zu einer Grenzfrequenz - durchgeführt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Frequenzspektrum eines Kraftsignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt wird.
16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass in festgelegten Intervallen Frequenzspektren des Kraftsignals - vorzugsweise mit FFT - ermittelt werden.
17. Verfahren nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Summenpegel aus einem Kraftspektrum bestimmt wird, wobei das Kraftspektrum als Quotienten aus dem Frequenzspektrum des Kraftsignals und der Transferfunktion bestimmt wird.
18. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass Belastungen aus den statischen Belastungen und dem Summenpegel des Kraftspektrums summiert werden.
19. Verfahren nach Anspruch 11, 17 oder 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Berechnung der verbleibenden Lebensdauer kontinuierlich - vorzugsweise in Intervallen - durchgeführt wird.
20. Verfahren nach Anspruch 11 oder einem der Ansprüche 17 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei Erreichen eines unteren Grenzwertes der verbleibenden Lebensdauer eine Warnung ausgegeben wird.
21. Vorrichtung zur Überwachung der Lebensdauer eines verbauten Wälzlagers durch ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 20, mit zumindest zwei Sensoren zur Messung, wobei die Sensoren im Bereich des Lagers angeordnet sind.

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

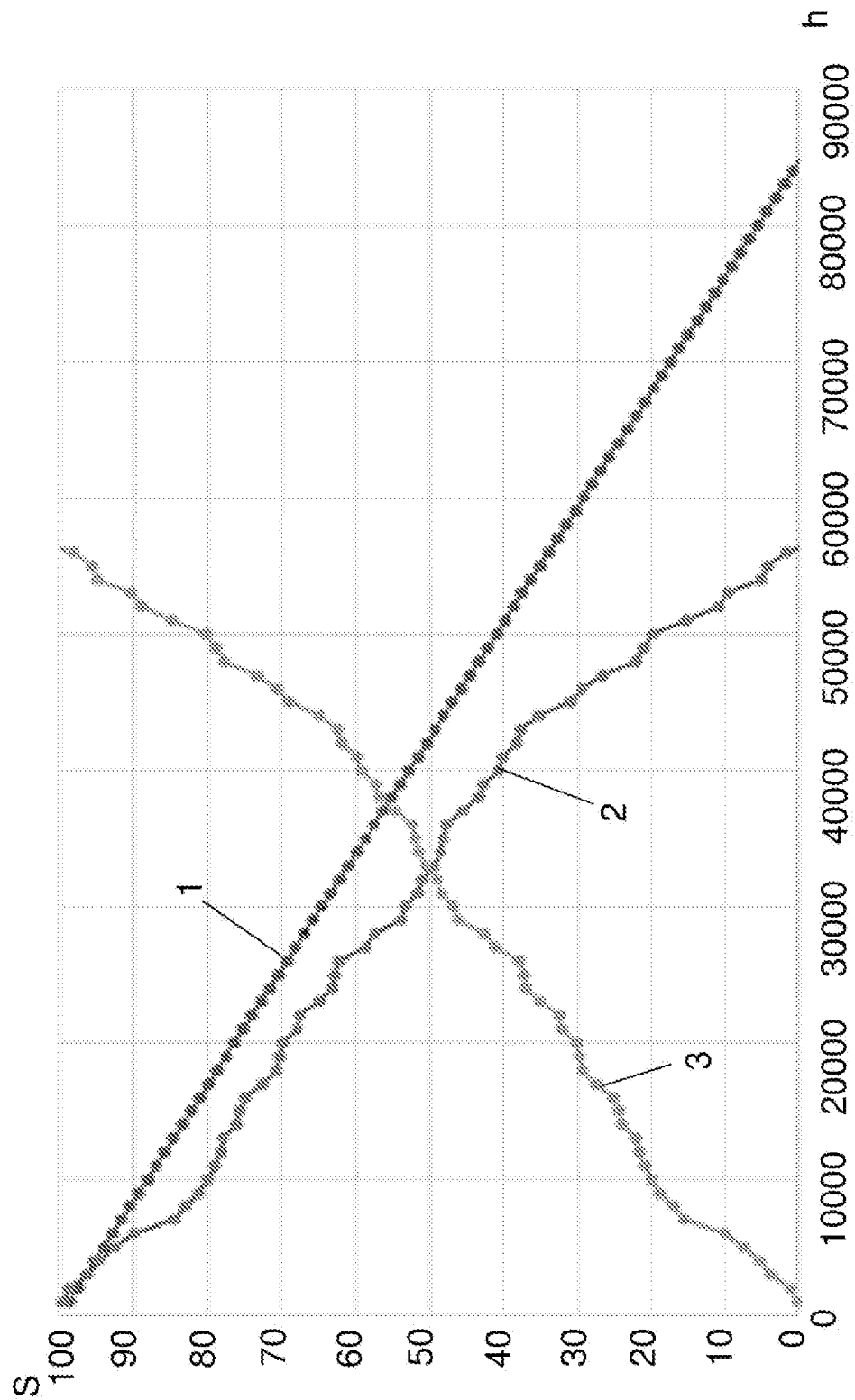


Fig.2

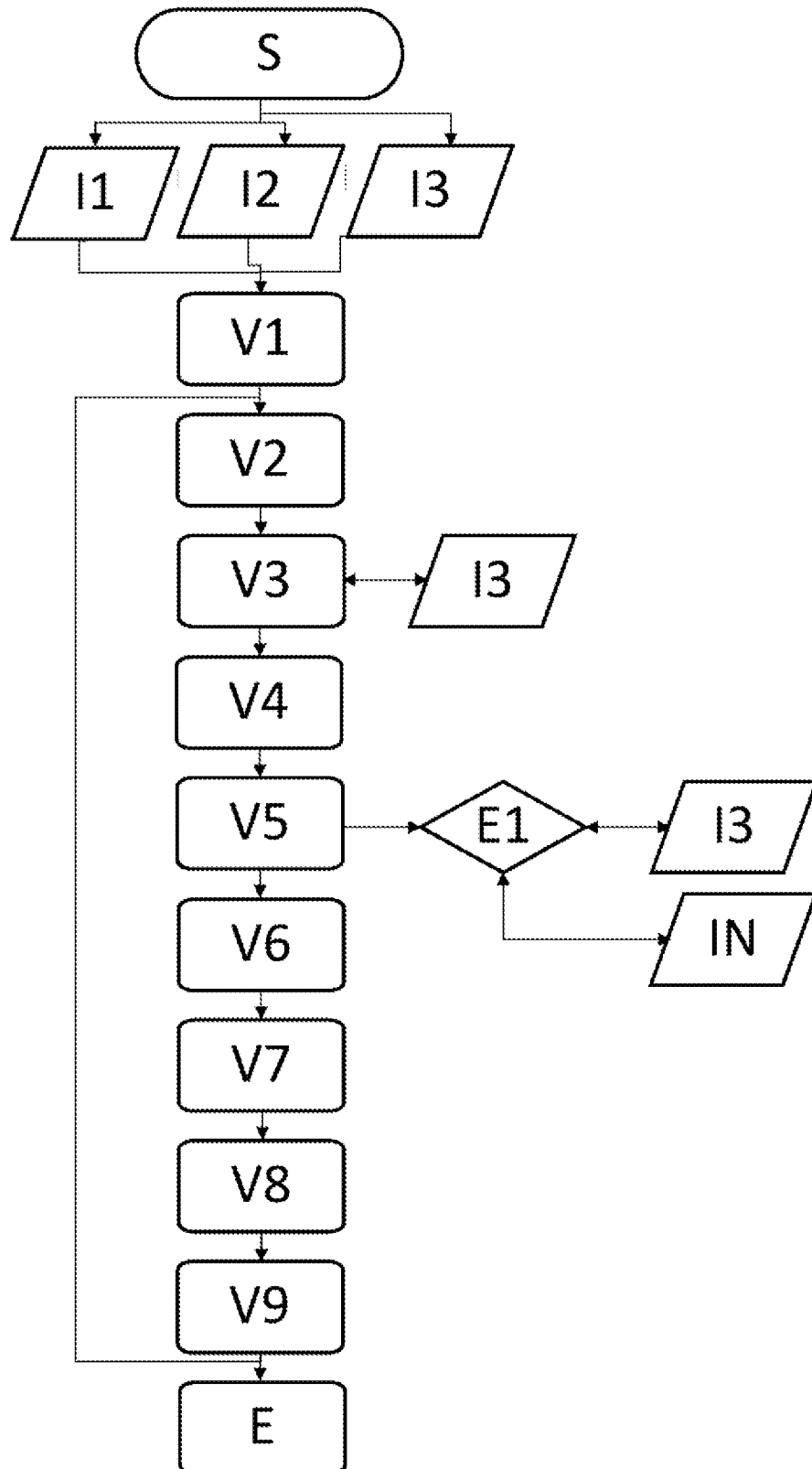


Fig.3

