



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 717 054 A2

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

Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 00054/20

(71) Anmelder:
mechmine llc, Wiesen 8
9478 Azmoos (CH)

(22) Anmeldedatum: 17.01.2020

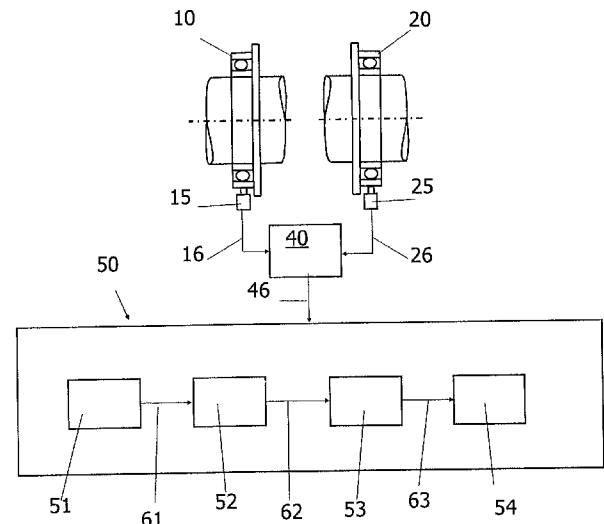
(72) Erfinder:
Rudolf Tanner, 9478 Azmoos (CH)
Christine Tanner, 9478 Azmoos (CH)

(43) Anmeldung veröffentlicht: 30.07.2021

(74) Vertreter:
Industrial Property Services GmbH, Rosenweg 14
4303 Kaiseraugst (CH)

(54) Verfahren zur Diagnose eines Lagers.

(57) Ein erfindungsgemässes Verfahren zur Diagnose eines oder mehrerer Lager (10, 20) einer Maschine aus Vibrationsdaten eines Vibrationssensors umfasst das Erstellen und Einspeisen von digitalisierten Vibrationsdaten (46) in einen Prozessor (50). Im Prozessor (50) erfolgt eine Berechnung eines Frequenzspektrums aus den digitalisierten Vibrationsdaten (46). Das Frequenzspektrum wird in eine Mehrzahl von Frequenzbereichen unterteilt, wobei jeder der Frequenzbereiche eine Mehrzahl von Frequenzlinien umfasst. Aus den Frequenzlinien wird ein Datenvektor ermittelt, wobei aus jedem Datenvektor eine Signalstärke ermittelt wird, wobei die Signalstärke dem Lagerdefekt oder der Position des Lagers (10, 20) in der Maschine entspricht und daher eindeutig dem entsprechenden Lager (10, 20) der Maschine zugeordnet werden kann, sodass der Betriebszustand oder der Einbauort des Lagers (10, 20) in der Maschine zu jedem Zeitpunkt erfasst werden kann. Aus dem Datenvektor wird eine Kurve gebildet, wobei Polynomkoeffizienten verwendet werden, welche die nicht-Linearität der Kurve beschreiben und Rückschlüsse auf den Typ und den Schweregrad eines Lagerdefektes zulassen.



Beschreibung

Hintergrund

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Diagnose eines Lagers, insbesondere eines Wälzlagers, Kugellagers, Rollenlagers. Das Verfahren kann beispielsweise in einem Getriebe, einer Pumpe, einem Ventilator oder einer anderen Maschine, die rotierende Bauteile enthält, verwendet werden.

[0002] Defekte Lager können in der Praxis zu Produktionsunterbrüchen, Unfällen, Folgeschäden an Maschinen und Anlagen führen. Daher bestehen bereits jahrzehntelange Bestrebungen, einen bevorstehenden Lagerschaden zu detektieren, bevor überhaupt ein Defekt des Lagers eintreten kann.

[0003] Bewährte Massnahmen zur Erreichung einer hohen Zuverlässigkeit sind eine Überdimensionierung sowie altersbedingter und zunehmend auch zustandsabhängiger Austausch der Lager, wobei der Ersatz des Lagers frühzeitig erfolgen muss, um einen plötzlichen Ausfall des Lagers zu vermeiden.

[0004] Bedingt durch die technische Entwicklung haben sich neue Möglichkeiten für die Diagnose, Kontrolle und Zustandsüberwachung derartiger Lager ergeben. Bezüglich der Rissprüfung von Lagern waren dies zum Beispiel optische, metallurgische, magnetische und radiologische Verfahren. Die Nachteile dieser Verfahren sind der De- und Montageaufwand, die mangelnde Zugänglichkeit, die beschränkte Aussagekraft (zum Beispiel zur Risttiefe) sowie eine Einschränkung des Zeitraums für die Diagnose, Kontrolle oder Überwachung auf Serviceintervalle.

[0005] Mittels Schwingungsmesstechnik ist heutzutage eine Überwachung von rotierenden Teilen einfach möglich und wird im Maschinenbau auch erfolgreich zur Überwachung der Schwingungsamplituden von Wälzlager und Getrieben eingesetzt.

Stand der Technik

[0006] Aus der JP2009020090 A ist ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Zustandsdiagnose eines Kugellagers bekannt. Hierbei werden Vibrationen, welche im Betrieb des Kugellagers erzeugt werden, mittels eines Beschleunigungssensors detektiert. Die Vibrationssignale werden an eine Signalverarbeitungseinheit übermittelt und in ein digitales Signal konvertiert. Das Niveau des Frequenzspektrums wird mittels einer Frequenzanalyse bestimmt. Abnormale Vibrationsfrequenzen, die aus einem schadhafte Kugellagerteil stammen, werden aufgrund einer vorgegebenen mathematischen Beziehung ermittelt, wodurch das Niveau des Frequenzspektrums erhalten wird, welches zu der abnormalen Vibrationsfrequenz gehörig ist. Das derart ermittelte Niveau des Frequenzspektrums wird mit einem Schwellwert verglichen und abgeglichen, der individuell für jede Frequenz der Grundwelle mit der abnormalen Vibrationsfrequenz sowie deren Harmonischen vorgegeben wird, wobei deren Grösse bestimmt wird, sodass die Existenz einer Abnormalität eines Kugellagerteils feststellbar ist.

[0007] In einer Weiterbildung dieses Verfahrens gemäss JP2009020090 A wird gemäss US2014214363 A1 anstatt eines Schwellwerts ein Datenset aus einer Datenbank verwendet, welche die Angaben für die Frequenzen charakteristischen Vibrationen einer Mehrzahl von Lagerherstellern enthält, insbesondere auch Angaben über die Fehlerfrequenzen der Vibrationen, die auftreten, wenn ein bestimmter Lagerdefekt auftritt. Diese Angaben über die Fehlerfrequenzen können von den Herstellern der Lager stammen oder können während des Betriebs des Lagers ermittelt werden und in einer Speicher-einheit abgespeichert werden. Die Angaben über die Fehlerfrequenzen der Vibrationen verschiedener Hersteller liegen in der Datenbank für die bekannten Lagerfehlerfrequenztypen vor. Diese Lagerfehlerfrequenztypen umfassen daher die Fehlerfrequenzen für einen Aussenschalenlagerfehler, einen Innenschalenlagerfehler, einen Käfigfehler oder einen Wälzkörperfehler. In der Datenbank sind diese Lagerfehlerfrequenzen für verschiedene Hersteller, für verschiedene Lagerarten und für verschiedene Einbaustellen der Lager in der betreffenden Maschine abgelegt.

[0008] Mit dem Messverfahren gemäss US2014214363 A1 kann also die Einbaustelle eines Lagers eines bestimmten Herstellers ermittelt werden, wenn der Lagerhersteller bekannt ist. Wenn die Einbaustelle des Lagers bekannt ist, kann umgekehrt ermittelt werden, welches Lager von welchem Hersteller an einer bestimmten Einbaustelle verbaut worden ist. Mit dem Messverfahren kann auch ermittelt werden, welches Lager der Maschine einen Defekt aufweist, indem die gemessenen Frequenzbereiche mit den von den Herstellern angegebenen Frequenzbereichen überlagert und damit verglichen werden. Hierzu werden zu jedem Frequenzbereich die maximalen Vibrationsamplituden ermittelt und mit den entsprechenden Frequenzbereichen der verschiedenen Hersteller verglichen. Die Frequenzbereiche, welche die grösste Übereinstimmung aufweisen, haben auch die höchste Vibrationsamplitude. Daher lässt sich auf diese Weise die Einbaustelle eines schadhafte Lagers eines bestimmten Herstellers auf der Maschine identifizieren oder bei bekannter Einbaustelle jedes schadhafte Lager jedes Herstellers identifizieren.

[0009] Abschliessend beschreibt US2018/0347548A1 ein Verfahren, gemäss welchem die Amplituden von Lagerdefekt-frequenzen und deren Harmonische verwendet werden, um ein Anstieg der Signalenergie zu ermitteln, um daraus einen Defektfaktor zu berechnen. Der Defektfaktor wird mit einem Schwellwert, empirisch ermittelt, verglichen um auf den Lagerzustand zu schliessen. Verfahren, zum Vergleich einer Signalenergie oder einer Amplitude mit Schwellwerten sind weit verbreitet, da eine Signalanalyse einfach zu bewerkstelligen ist. Die vorliegende Erfindung basiert auf dem Muster der Verteilung der Signalenergie oder Amplitude und nicht einer Korrelation zwischen Defektfrequenzen und Signalenergie.

[0010] Bei der Zustandsüberwachung (condition monitoring) und der Zustandsvorhersage (predictive maintenance) von Wälz-, Rollen- oder Kugellagern werden somit Vibrationssignale verwendet. Mittels eines Beschleunigungssensors, z.B. piezo- oder MEMS- basiert, der idealerweise nahe an einem Lager angebracht ist, werden die Vibrationssignale aufgenommen und als analoges elektrisches Signal einer Digitalisierungseinheit zugeführt. Das so digitalisierte Vibrationssignal wird anschliessend mittels einer Fourier-Analyse (FFT) in seine Frequenzteile zerlegt. Das resultierende Frequenzspektrum dient der Analyse, ob ein Defekt im Lager vorliegt. Ein Lagerhersteller stellt die Frequenzen zur Verfügung, welche auf einen Lagerdefekt hinweisen. Ein Lagerdefekt kann diagnostiziert werden, wenn ein Spitzenwert oder Peak an der vom Lagerhersteller angegebenen Frequenz zu finden ist. Die relevanten Lagerdefektfrequenzen sind on-line auf einer Herstellerwebsite des Lagerherstellers zu finden. Diese Lagerdefektfrequenzen können auch bei Kenntnis der Lagergeometrie, Durchmesser und Anzahl Wälzkörper für das Lager berechnet werden, aber diese Lagerherstellerinformationen liegen nicht immer vor. Unter einem Peak wird nachfolgend ein Spitzenwert, insbesondere ein lokaler Spitzenwert in einer Datenreihe verstanden.

[0011] Man unterscheidet üblicherweise zwischen vier Typen von Lagerdefektfrequenzen: Wälzkörper, Käfig, Innenlagerschale oder Aussenlagerschale, siehe hierzu auch Fig. 3.

[0012] Lagerdefektfrequenz, ermittelt für die Aussenlagerschale
BPFO = ballpass frequency, outer race

$$BPFO = \frac{n * fr}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\phi\right)$$

Lagerdefektfrequenz, ermittelt für die Innenlagerschale
BPFI = ballpass frequency, inner race

$$BPFI = \frac{n * fr}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\phi\right)$$

Lagerdefektfrequenz des Lagerkäfigs
FTF = fundamental train frequency, cage speed

$$FTF = \frac{fr}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\phi\right)$$

Lagerdefektfrequenz des Wälzkörpers
BSF = Ball (roller) spin frequency

$$BSF = \frac{D*fr}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos\phi\right)^2\right)$$

wobei:

- n Anzahl der Kugeln, Rollen oder Wälzkörper des Lagers
- fr Drehfrequenz der Welle in [1/s]
- d Kugeldurchmesser [m]
- D mittlerer Kugelbahndurchmesser [m]
- φ Lagerkontaktwinkel [-]

[0013] Ein Experte kann anhand des Frequenzspektrums und der Lagerdefektfrequenzen visuell feststellen, ob ein Lagerdefekt vorliegt. Hierfür schaut er sich das Frequenzspektrum an, wie es beispielsweise in Fig. 1 gezeigt ist, und vergleicht die Position der Peaks im Frequenzspektrum mit den für jeden der oben genannten Defekte charakteristischen Lagerdefektfrequenzen. Wenn die Peaks an den Positionen einer der für den entsprechenden Defekt typischen Lagerdefektfrequenzen liegen, dann liegt vermutlich der entsprechende Defekt im Lager vor.

[0014] Bei der automatisierten Lagerdefektüberwachung führt ein Computerprogramm dieselbe Analyse durch, die ein Experte macht, aber ohne über dessen Interpretationsvermögen zu verfügen. Die aktuellen Lagerdefektfrequenzen müssen aus den vom Hersteller angegebenen Lagerdefektfrequenzen abgeleitet werden. Diese sind auf 60 RPM bzw. 1 Hz normiert, daher skaliert man diese mit der Drehzahl. Beim Aussenlagerschalendefekt ist dies $BPFO' = BPFO * RPM/60$. Weil beim Aussenlagerschalendefekt nur die harmonischen Frequenzen relevant sind, ergeben sich die relevanten Lagerdefektfrequenzen für einen Aussenlagerschalendefekt zu: $BPFO'$, $2 * BPFO'$ und $3 * BPFO'$.

[0015] Das Computerprogramm vergleicht nun, ob signifikante Peaks im Frequenzspektrum an den vorgegebenen (relevanten) Lagerdefektfrequenzen vorhanden sind, oder misst die Stärke der Peaks oder gibt deren Schwingungsgeschwindigkeitswert aus. Je nach Signalstärke wird das Lager, z.B. für RMS Werte gemäss der Norm ISO-10816-3, dann als unbedenklich, auffällig, defekt oder kritisch, eingestuft. Analog zu dieser Bewertung wird vom Computerprogramm ein Bericht über den Zustand des Lagers bereitgestellt oder eine Empfehlung für einen Servicetechniker erstellt.

[0016] Die Qualität einer automatisierten Lagerdefektüberwachung hängt demnach massgeblich von der Qualität der Herstellerangaben über die relevanten Lagerdefektfrequenzen ab. Dabei gibt es mehrere Fehlerquellen, welche die Genauigkeit oder Korrektheit dieser Lagerdefektfrequenzen beeinflussen oder gar beeinträchtigen können:

Vom Lagerhersteller gelieferte Frequenzen sind falsch oder ungenau. Die aktuellen Lagereigenfrequenzen stimmen nicht mehr mit den Lagerdefektfrequenzen überein, beispielsweise aufgrund von Abnutzung oder Alterungsprozessen, welche die Lagergeometrie verändern. Ein ungenauer oder falscher Messwert einer Drehzahlmessung führt dazu, dass die gesuchten Lagerdefektfrequenzen an einem anderen Ort im Frequenzspektrum zu liegen kommen.

[0017] Derartige Fehlerquellen können mittels der vorbekannten Computerprogramme nicht identifiziert werden, da diese Computerprogramme solche Abweichungen nicht automatisch erkennen und korrigieren, wohingegen ein geschulter Experte diese Abweichungen bei der visuellen Analyse erkennt.

Aufgabe der Erfindung

[0018] Es ist Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zu entwickeln, welches mit altersbedingten oder durch ungenaue Messwerte verursachten Frequenzabweichungen umgehen kann, sodass die Ausgabe fehlerhafter Messwerte bzw. Empfindungen verhindert werden kann.

[0019] Hiermit ist es möglich, Lagerdefekte für jedes beliebige Lager frühzeitig festzustellen, sodass ein Versagen des Lagers mit hoher Zuverlässigkeit vermieden werden kann.

[0020] Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur Überwachung oder Zustandsdiagnose eines Lagers bereitzustellen, welche ermöglicht, einen Defekt bereits zu erkennen, bevor es bei einer weiteren Belastung zu einem möglichen Versagen des Lagers kommen kann.

Beschreibung der Erfindung

[0021] Die Lösung der Aufgabe der Erfindung erfolgt durch ein Verfahren Diagnose eines Lagers gemäss Anspruch 1. Vorteilhafte Ausführungsbeispiele des Verfahrens sind Gegenstand der Ansprüche 2 bis 13. Eine bevorzugte Verwendung des Verfahrens ist Gegenstand des Anspruchs 14.

[0022] Wenn der Begriff „beispielsweise“ in der nachfolgenden Beschreibung verwendet wird, bezieht sich dieser Begriff auf Ausführungsbeispiele und/oder Ausführungsformen, was nicht notwendigerweise als eine bevorzugtere Anwendung der Lehre der Erfindung zu verstehen ist. In ähnlicher Weise sind die Begriffe „vorzugsweise“, „bevorzugt“ zu verstehen, indem sie sich auf ein Beispiel aus einer Menge von Ausführungsbeispielen und/oder Ausführungsformen beziehen, was nicht notwendigerweise als eine bevorzugte Anwendung der Lehre der Erfindung zu verstehen ist. Dementsprechend können sich die Begriffe „beispielsweise“, „vorzugsweise“ oder „bevorzugt“ auf eine Mehrzahl von Ausführungsbeispielen und/oder Ausführungsformen beziehen.

[0023] Die nachfolgende detaillierte Beschreibung enthält verschiedene Ausführungsbeispiele für das erfindungsgemässe Verfahren sowie die erfindungsgemässe Vorrichtung zur Überwachung oder Zustandsdiagnose eines Lagers. Die Beschreibung einer bestimmten Vorrichtung eines bestimmten Verfahrens ist nur als beispielhaft anzusehen. In der Beschreibung und den Ansprüchen werden die Begriffe „enthalten“, „umfassen“, „aufweisen“ als „enthalten, aber nicht beschränkt auf“ interpretiert.

[0024] Unter dem Begriff „Verfahren zur Diagnose“ kann auch ein Verfahren zur Überwachung oder ein Verfahren zur Zustandsdiagnose des Lagers verstanden werden. Die nachstehenden Merkmale können somit auf jedes der genannten Verfahren zutreffen.

[0025] Ein Verfahren zur Diagnose eines Lagers einer Maschine umfasst eine Aufnahme von Vibrationsdaten durch einen am oder in der Nähe des Lagers angebrachten Vibrationssensor, wobei die Vibrationsdaten charakteristisch für das Betriebsverhalten des Lagers sind, Einspeisen der Vibrationsdaten in eine Digitalisierungseinheit zur Digitalisierung der Vibrationsdaten und Erstellen von digitalisierten Vibrationsdaten, Einspeisen der digitalisierten Vibrationsdaten in einen Prozessor, wobei im Prozessor eine Berechnung von Frequenzspektrern aus den digitalisierten Vibrationsdaten erfolgt. Insbesondere kann der Prozessor eine FFT (Fast-Fourier Transformation) oder ein Hüllkurvenspektrum aus Spannungs-, Strom-, Beschleunigungs- oder Schwingungsgeschwindigkeitsmesswerten zur Berechnung des Frequenzspektrums ausführen.

[0026] Das Frequenzspektrum wird in eine Mehrzahl von Frequenzbereichen 1 bis N unterteilt, wobei jeder der Frequenzbereiche 1 bis N eine Mehrzahl von Frequenzlinien 1 bis K umfasst.

[0027] In Fig.1 ist ein Frequenzspektrum mit N=9 Frequenzbereichen gezeigt, der Grundfrequenz (4) und 2 Harmonischen (5) und (6) und Seitenbändern (8).

Ausschnitt (7) in Fig.4 zeigt ± 15 Frequenzlinien, d.h. K=31, um den Frequenzbereich (6), wobei der Frequenzunterschied zwischen zwei Frequenzlinien der Auflösung der FFT entspricht.

Zu jeder der K Frequenzlinien wird ein Datenvektor mit N Elementen ermittelt, sodass zu den N Frequenzbereichen K Datenvektoren erhalten werden, wobei aus jedem der K Datenvektoren eine Signalstärke ermittelt wird, wobei aus den Signalstärken eine Kurve gebildet wird, die mittels eines Polynoms beschrieben werden kann und deren nicht-Linearität, ermittelt durch die Beurteilung der Höhe der einzelnen Polynomkoeffizienten und deren Verhältnisse zueinander, Aussagen über den Lagerdefekt und dessen Grösse zulassen, sodass diese K Signalstärken Aussagen über den Lagerdefekt zulassen oder der Position des Lagers in der Maschine entsprechen und daher eindeutig dem entsprechenden Lager der Maschine zugeordnet werden können, sodass der Betriebszustand oder der Einbauort des Lagers in der Maschine zu jedem Zeitpunkt erfasst werden kann. Aus dem Datenvektor wird somit eine Kurve gebildet, wobei die Polynomkoeffizienten verwendet werden, welche die nicht-Linearität der Kurve beschreiben und Rückschlüsse auf den Typ und den Schweregrad eines Lagerdefektes zulassen.

[0028] Insbesondere entspricht die Kennlinie der Signalstärke dem Lagerdefekt.

[0029] Moderne Prozessoren verarbeiten Daten effizient, wenn sie als Arrays (Reihe, Sequenz), sequentiell im Speicher, vorliegen. Ein Array (im Syntax von C, Pascal, Python etc.) kann eindimensional oder mehrdimensional sein. Unter einem Datenvektor wird in der vorliegenden Anmeldung ein eindimensionaler Array verstanden, wobei der Datenvektor eine Mehrzahl von (Amplituden)-Werten aus einem Fourier-Frequenzspektrum enthält. Ein mehrdimensionaler Array wird als Matrix bezeichnet. Ein Datenvektor muss mehrere Frequenzwerte beinhalten und nicht nur einen skalaren (Amplituden)-Wert. Zudem muss erfindungsgemäss eine Mehrzahl von Datenvektoren vorgesehen werden, d.h. $N > 1$ und $K > 1$, damit Amplitudenvariationen, hervorgerufen durch Rauschen oder impulsive Störfrequenzen, minimiert werden können. K kann hierbei maximal 1024 betragen. N kann maximal 256 betragen.

[0030] Es ist dem Fachmann bekannt, dass eine Zuordnung, wie oben erwähnt, am einfachsten mittels eines Vergleichs der Signalstärken möglich ist. Es ist dem Fachmann auch bekannt, dass der Betriebszustand oder der Einbauort des Lagers zu jedem Zeitpunkt erfasst werden kann. Je grösser die Signalstärke, desto wahrscheinlicher ist die Wahl der korrekten Zuordnung, in Analogie zum maximumlikelihood (ML) Verfahren, welches dem Fachmann an sich bekannt ist und an dieser Stelle beispielhaft für ähnliche Verfahren genannt werden soll.

[0031] Insbesondere kann ein Index in jedem Frequenzbereich bestimmt werden und ein zu diesem Index gehöriger Amplitudenwert ermittelt werden. Ein Index entspricht der Position eines Elements in einem Datenvektor mit K Elementen. Der Index der grössten der K Signalstärken kann als optimaler Index bezeichnet werden und kann Rückschlüsse auf die effektiven Positionen der Lagerdefektfrequenzen zulassen.

[0032] Der Vibrationssensor kann insbesondere als Beschleunigungssensor oder Geschwindigkeitssensor ausgebildet sein.

[0033] Das Frequenzspektrum wird somit in mehrere Frequenzbereiche eingeteilt. Ein Frequenzbereich ist ein Bereich im Spektrum, welcher sich um eine Grundfrequenz oder Harmonische oder ein Seitenband erstreckt. Der Frequenzbereich umfasst eine Mehrzahl von Frequenzlinien. Ein BPFO-Defekt hat beispielsweise drei Frequenzbereiche, ein BPFI-Defekt hat beispielsweise neun Frequenzbereiche. Die drei Frequenzbereiche des BPFO Defekts bestehen aus der Grundfrequenz und zwei Harmonischen. Die neun Frequenzbereiche des BPFI- Defekts bestehen aus der Grundfrequenz, zwei Harmonischen und je einem Seitenband. Ein Frequenzbereich kann beispielsweise 31 Frequenzlinien ($\pm 15 + 1$) beinhalten. Beispielsweise entspricht für die Grundfrequenz die Frequenzlinie mit Index -15 bei der ersten Harmonischen der Frequenzlinie mit dem Index -30, weil die erste Harmonische eine doppelt so hohe Frequenz aufweist wie die Grundfrequenz. Ausgehend von Index -15 der ersten Grundfrequenz bzw. dessen Frequenzbereich, werden alle 9 Amplitudenwerte, einer pro Frequenzbereich im Fall des vorliegenden BPFI Beispiels, in einem Datenvektor zusammengefasst, z.B. gemäss Fig. 5 und Fig. 6 aufaddiert, und daraus ein Messwert gebildet. Daraus ergeben sich in diesem Beispiel 31 Messwerte. Wenn man dann alle 31 Messwerte auf diese Weise berechnet hat, erkennt man, welcher Messwert den höchsten Wert aufweist, sowie dessen zugehörige Position. Die Position entspricht hierbei dem Index der Frequenzlinie mit dem grössten Wert bezogen auf den Frequenzbereich. Diese Position kann als die optimale Position innerhalb eines jeden Frequenzbereiches angesehen werden.

[0034] Wenn kein Lagerdefekt vorliegt, dann sind die über N Frequenzbereiche gemittelten K Messwerte in ihrem Wert ähnlich, weil es sich um Rauschen handelt und nicht um ein Signal welches durch eine Anregung bzw. Eigenfrequenz hervorgerufen wird.

[0035] Dann kann beispielsweise ein Polynom P -ten Grades basierend auf allen Messwerten berechnet werden. Der Lagerdefekt wird über die Betrachtung dieses Polynoms beurteilt. Hierzu wird das Polynom mit einer linearen Kennlinie verglichen. Wenn die Abweichung zwischen dem Polynom und der linearen Kennlinie einen Schwellwert überschreitet, wird diese Abweichung als Lager- oder Getriebedefekt interpretiert. Dieses Verfahren hat den grossen Vorteil, dass es robuster ist als der etablierte Vergleich von Amplitudenwerten mit Schwellwerten, und automatisiert werden kann, d.h. kein Schwingungsexperte die Messwerte begutachten muss.

[0036] Gemäss einem Ausführungsbeispiel kann ein Vergleich der Frequenzspektren des Lagers mit einer Mehrzahl von Fehlerfrequenzspektren beispielsweise unterschiedlicher Lagerhersteller erfolgen. Die Fehlerfrequenzspektren können in einer Datenbank gespeichert sein. Die Fehlerfrequenzspektren können unterschiedlichen Lagerdefekten eindeutig zugeordnet sein.

[0037] Nach einem Ausführungsbeispiel wird ein erweitertes Messfenster für jede Frequenzlinie ermittelt, welches mehrere nebeneinander liegende Frequenzlinien berücksichtigt. Insbesondere kann das erweiterte Messfenster aus mehreren nebeneinander liegenden Frequenzlinien bestehen. Beim erweiterten Messfenster wird dann nicht nur eine Frequenzlinie pro Frequenzband im Datenvektor berücksichtigt, sondern 3, 5, 7 Frequenzlinien oder bis zu 5% der Frequenzlinien, bezogen auf eine gewählte höchste Frequenz im Frequenzspektrum. Die nebeneinander liegenden Frequenzlinien werden wie eine einzige Frequenzlinie betrachtet und angewendet. Dadurch erweitert sich jeder Frequenzbereich im selben Verhältnis wie sich die Breite des Messfensters erhöht. Durch die Verwendung eines erweiterten Messfensters vergrößert sich die Länge des Datenvektors mit K Elementen proportional zu der Anzahl der zusätzlich berücksichtigten Frequenzlinien.

[0038] Nach einem Ausführungsbeispiel wird zur Ermittlung der Signalstärken, wie beispielsweise in Fig. 2 und Fig. 5 dargestellt, ein Suchverfahren für Signalstärken verwendet.

[0039] Die Signalstärken können ein oder mehrere Elemente aus der Gruppe der SNR, FNR (faultfrequency-to-noise ratio), Amplituden, Summe von Amplituden, Spitzenwerte, RMS-Messwerte, MA6*, FM4*, NB4, MA6, FM4, NA4, PAPR, Crest-factor, Energie-Ratio, Kurtosis umfassen. Beispielsweise kann aus den N Messwerten eine Signalstärke gebildet werden, z.B. SNR, wobei unter den K SNR Werten der Stärkste ausgewählt wird. Alternativ kann zur Verbesserung der Qualität der Positionsschätzung aus den N Messwerten das SNR und z.B. noch MA6 berechnet werden, und dann aus der doppelten Anzahl von Signalstärken (eine Hälfte SNR, andere Hälfte gemäss diesem Beispiel MA6) diese so kombinieren, um die Position der Lagerdefektfrequenz mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zu bestimmen.

[0040] Nach einem Ausführungsbeispiel kann die optimale Position in den Frequenzbereichen, das heisst ein optimaler Index, mittels eines Optimierungskriteriums ermittelt werden. Insbesondere kann das Optimierungskriterium eines oder mehrere der Elemente aus der Gruppe SNR, FNR, Amplituden, Summe aller Amplituden, Spitzenwerte, RMS Messwerte, MA6*, FM4*, NB4, MA6, FM4, NA4, PAPR, Crest-factor, Energie-Ratio, Kurtosis umfassen. Insbesondere kann eine Kombination oder Fusion von Signalstärken erfolgen.

[0041] Nach einem Ausführungsbeispiel können die Signalstärken, bzw. die maximalen Messwerte, für weitere Analysen verwendet werden, wobei weitere Daten, beispielsweise Daten einer Mehrzahl von Tagen, berücksichtigt werden können.

[0042] Insbesondere kann eine Mehrzahl von statistischen Berechnungen durchgeführt werden, deren Resultat eine Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Frequenz ergibt.

[0043] Gemäss einem Ausführungsbeispiel können die Messwerte der Frequenzbereiche mittels eines Klassifizierungsverfahrens analysiert werden, welches basierend auf der Verteilungsfunktion der kumulierten Summe eine Kurve ergibt, welche mittels eines Polynoms beschrieben und mit einer linearen Kurve verglichen werden kann, woraus ein Abweichungswert ermittelt werden kann. Insbesondere kann ein Klassifizierungsverfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens zum Einsatz kommen. Mittels des Klassifizierungsverfahrens kann der Typ des Lagerdefekts oder dessen Schweregrad ermittelt werden, beispielsweise ob ein Wälzkörper-, Käfig-, Innenlagerschalen-, Aussenlagerschalendefekt vorliegt, indem der Abweichungsgrad in Klassen unterteilt wird und jede Klasse einem Schweregrad entspricht. Mittels des Klassifizierungsverfahrens kann somit ermittelt werden, in welchem Stadium sich der Lagerdefekt befindet, das heisst, wie fortgeschritten der Defekt ist. Hierzu kann ein Polynom P -ten Grades oder eine Interpolationsfunktion oder eine Kurvenanpassungsfunktion berechnet werden, wobei je nach Grösse der Polynomkoeffizienten auf die Linearität bzw. Nichtlinearität und somit auf die Stärke des vorhandenen Lagerdefekts rückgeschlossen werden kann. Hierzu kann beispielsweise ein Polynom P -ten Grades basierend auf allen Messwerten berechnet werden. Je nach Grösse der Polynomkoeffizienten kann auf die Linearität bzw. Nichtlinearität und somit auf die Stärke, das heisst den Schweregrad, des vorhandenen Lagerdefekts rückgeschlossen werden.

[0044] Zur Automatisierung der Analyse können die Daten durch Verfahren des maschinellen Lernens verarbeitet werden, beispielsweise mittels eines neuronalen Netzwerks, insbesondere eines tiefen neuronalen Netzwerks, wobei hier kein Polynom analysiert wird, sondern Netzwerkoeffizienten.

[0045] Die aus den resultierenden Messwerten abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten können einem Beurteilungsschema zugeordnet werden, aufgrund dessen das Lager beispielsweise als gut, auffällig, kritisch oder defekt eingestuft wird.

[0046] Ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ausführungsbeispiele kann zur Bestimmung der Drehfrequenz (RPM) einer Maschine verwendet werden.

[0047] Insbesondere kann das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ausführungsbeispiele zur Bestimmung der Drehfrequenz (RPM) einer Maschine ohne Drehzahlsensor verwendet werden.

[0048] Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ausführungsbeispiele kann zur Ermittlung des Lagertyps oder des Lagerherstellers verwendet werden. Mit dem Verfahren lässt sich auch nachweisen, dass bei einer Wartung oder Reparatur ein falsches Lager verbaut worden ist, ohne die Maschine zerlegen zu müssen.

[0049] Um die Peaks der Lagerdefektfrequenzen bestimmen zu können, können verschiedene Verfahren zur Diagnose, Überwachung oder Zustandsdiagnose eines Lagers zum Einsatz kommen, zum einen ein Diagnoseverfahren, welches sich eines erweiterten Messfensters bedient oder ein Diagnoseverfahren, welches ein Suchverfahren für Peaks umfasst (Peak-Searcher).

[0050] Das vorliegende Verfahren kann auch zur Bestimmung der Drehfrequenz (RPM) einer Maschine verwendet werden, wobei auf einen kostspieligen Drehzahlsensor verzichtet werden kann. Des Weiteren kann auch die Drehfrequenz (RPM) einer Maschine mit Gleitlagern bestimmt werden, dabei kann auf teure Distanzmesssensoren verzichtet werden, für welche keine Wälzlagerdefektfrequenzen ermittelt werden können. Insbesondere ist somit kein Drehzahlsensor zur Bestimmung des Betriebszustandes jedes der Lager erforderlich.

[0051] Das vorliegende Verfahren eignet sich auch zur Ermittlung des Lagertyps und Lagerherstellers, wobei man sich die kleinen Unterschiede in den Lagerdefektfrequenzen zu Nutze macht. Alternativ lässt sich ermitteln, ob und gegebenenfalls welcher der vier typischen Lagerdefekte vorliegt.

[0052] Das Verfahren eignet sich somit zur Kombination mit weiteren Überwachungsverfahren im Sinne von Erweiterungs- oder als Backup-Funktionen. Beispiele zur Verwendung des Verfahrens in der Maschinenindustrie sind Lager-, Getriebe-, Wellenbruch-, Achsbruch-, Unwucht-, Misalignment-, Loosenessüberwachung. Unter Misalignmentüberwachung wird in der vorliegenden Anmeldung eine Überwachung eines Ausrichtefehlers verstanden. Unter Loosenessüberwachung wird in der vorliegenden Anmeldung eine Lockerungsüberwachung, beispielsweise von Schrauben, verstanden.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0053] Nachfolgend werden die erfindungsgemässen Verfahren anhand einiger Ausführungsbeispiele dargestellt. Es zeigen

- Fig. 1 eine Darstellung eines Frequenzspektrums eines Lagers mit einem Defekt, die x-Achse beschreibt die Frequenz in Hertz und die y-Achse die Amplitude, z.B. in Volt,
- Fig. 2 ein Fließschema des Datenflusses vom Lager bis zur Anzeige der Resultate des erfindungsgemässen Verfahrens zur Diagnose des oder der Lager,
- Fig. 3 eine Visualisierung der für die Ermittlung eines bestimmten Lagerdefekts erforderlichen Parameter,
- Fig. 4 ein Verfahren zur Ermittlung eines erweiterten Messfensters,
- Fig. 5 das Erstellen eines der K Datenvektoren mit N Elementen und ein Erstellen von Signalstärken in einer Berechnungseinheit,
- Fig. 6 eine Darstellung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ausführungsbeispiele,
- Fig. 7 eine Grafik der Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz.

Detaillierte Beschreibung der Zeichnungen

[0054] Wenn in den Figuren Elemente gestrichelt gezeichnet sind, handelt es sich um Optionen, welche alternativ oder zusätzlich zum durchgezogen gezeichneten Ausführungsbeispiel möglich sind.

[0055] Fig. 1 zeigt eine Darstellung eines Frequenzspektrums 1 eines Lagers mit einem Defekt. In Fig. 1 ist das Beispiel eines Innenlagerschalendefekts gezeigt. Das Frequenzspektrum enthält eine Lagerdefektgrundfrequenz 4, eine erste Harmonische 5, eine zweite Harmonische 6, welche den für den Innenlagerschalendefekt charakteristischen Fehlerfrequenzen entsprechen. Die Lagerdefektgrundfrequenz 4, die erste Harmonische 5 und die zweite Harmonische 6 werden nachfolgend auch als Hauptfrequenzen bezeichnet. Jede Hauptfrequenz hat Seitenbänder 8, in Fig. 1 ist links und rechts je ein Seitenband dargestellt. Auf der Abszisse des Diagramms ist die Frequenz in Hz aufgetragen, auf der Ordinate die Amplitude in V.

[0056] Fig. 2 zeigt ein Fließschema des Datenflusses vom Lager bis zur Anzeige der Resultate des erfindungsgemässen Diagnoseverfahrens für eine Messung i, wobei i die Laufnummer der Messung bzw. des Spektrums kennzeichnet. In der vorliegenden Darstellung werden ein erstes Lager 10 und ein zweites Lager 20 überwacht, die auf einer Welle angeordnet sind. Für die Erfassung von Vibrationen des ersten Lagers 10 und des zweiten Lagers 20 sind je ein Vibrationssensor 15, 25 am Lager oder in der Nähe des Lagers angebracht. Jeder der Vibrationssensoren 15, 25 dient somit der Aufnahme von Vibrationsdaten des entsprechenden Lagers 10, 20. Der Vibrationssensor 15, 25 ist in vorliegendem Ausführungsbeispiel als Beschleunigungssensor ausgebildet. Die Vibrationsdaten 16, 26 werden in eine Digitalisierungseinheit 40 zur Digitalisierung der Vibrationsdaten 16, 26 eingespeist. In der Digitalisierungseinheit 40 werden aus den Vibrationsdaten digitalisierte Vibrationsdaten 46 erstellt. Die digitalisierten Vibrationsdaten 46 werden in einen Prozessor 50 eingespeist. Der Prozessor 50 kann einen lokalen PC oder eine Cloudlösung umfassen. Im Prozessor 50 erfolgt eine Berechnung von Frequenzspektren 1 aus den digitalisierten Vibrationsdaten 46. Hierzu umfasst der Prozessor 50 eine Berechnungseinheit 51. Die Frequenzspektren des entsprechenden Lagers werden als Ergebnisdaten 61 an eine Vergleichseinheit 52 übermittelt. In der Berechnungseinheit wird jedes Frequenzspektrum in eine Mehrzahl von Frequenzbereichen unterteilt. Jeder der Frequenzbereiche umfasst eine Mehrzahl von Frequenzlinien. In jedem Frequenzbereich wird ein Index bestimmt und ein zu diesem Index gehöriger Amplitudenwert ermittelt. Der Index im Frequenzbereich referenziert die Position im Fre-

quenzspektrum (FFT), einen Amplitudenwert, der bestimmt werden kann (siehe hierzu auch Seiten 9, 10). Einen Index, das heisst eine Position im Frequenzspektrum, berechnet man gemäss $\text{round}(f/f_a)$, wobei f die Frequenz ist, für welche man den Index sucht, und f_a die Auflösung des Spektrums, z.B. 0.1 Hz, ist.

[0057] Der zu dem Index gehörige Amplitudenwert kann wie folgt in einem Datenvektor zusammengefasst werden: Der Amplituden-Wert $x_{i,k,n}$ der Frequenzlinien des n -ten Frequenzbereichs, des k -ten Messwerts, des i -ten Spektrums wird in einem ersten Schritt gesammelt. In einem zweiten Schritt wird der k -te Datenvektor erstellt $x(i,k)=[x_{i,k,1}, x_{i,k,2}, \dots, x_{i,k,N}]$. In einem dritten Schritt wird aus dem k -ten Datenvektor ein neuer Messwert bestimmt, die Signalstärke $s(i,k)$, d.h. beispielsweise SNR, FNR Amplituden, Summe von Amplituden, Spitzenwerte, RMS-Messwerte, $MA6^*$, $FM4^*$, $NB4$, $MA6$, $FM4$, $NA4$, $PAPR$, Crest-factor, Energie-Ratio, Kurtosis berechnet. Wenn alle K Signalstärken vorhanden sind, kann in einem vierten Schritt ein neuer Datenvektor erstellt werden, $y(i) = [s(i,1), s(i,2), \dots, s(i,K)]$, sowie dessen grösster Wert in $y(i)$ gefunden und dessen Position im Datenvektor gefunden werden, was in der Vergleichseinheit 52 durchgeführt wird. In einem fünften Schritt wird der Datenvektor $y(i)$ an die Klassifizierungseinheit 53 geschickt. In einem sechsten Schritt wird in der Klassifizierungseinheit 53 der Datenvektor $y(i)$ beispielsweise nach folgender Vorschrift analysiert: ist der Datenvektor $y(i)$ linear oder das Resultat einer Funktion $f(y(i))$, liegt kein Lagerdefekt vor, andernfalls ist ein Lagerdefekt wahrscheinlich. In einem siebenten Schritt kann der Typ des Lagerdefekts bestimmt werden. Mit anderen Worten wird ein Messwert für den entsprechenden Frequenzbereich ermittelt, wobei eine Signalstärke aus allen Messwerten ermittelt wird. Die Signalstärke entspricht der Position des Lagers 10, 20 in der Maschine und kann daher eindeutig dem entsprechenden Lager 10, 20 der Maschine zugeordnet werden, sodass der Betriebszustand oder der Einbauort des Lagers 10, 20 in der Maschine zu jedem Zeitpunkt erfasst werden kann, wobei insbesondere die Kennlinie der Signalstärke dem Lagerdefekt entspricht.

[0058] Nach einem Ausführungsbeispiel wird das i -te Frequenzspektrum mittels der Berechnungseinheit 51 in eine Mehrzahl von Frequenzbereichen unterteilt. Aus jedem Frequenzbereich wird sukzessive, von links nach rechts, das heisst von niedrigen zu höheren Frequenzen im Frequenzbereich, in einem Frequenzbereich 7 wie in Fig. 4 gezeigt, eine Frequenzlinie genommen, beispielsweise eine Anzahl von neun Frequenzlinien für den in Fig. 5 dargestellten BPF Defekt. Die Berechnungseinheit 51 erstellt aus den Frequenzlinien, bzw. deren Amplitude und Phase, einen Datenvektor $x(i,k)=[x_{i,k,1}, x_{i,k,2}, \dots, x_{i,k,N}]$ mit $k=1,2,\dots,K$, welcher im Fall ohne erweitertem Messfenster eine Anzahl K von Datenvektoren aufweist. Die Berechnungseinheit 51 erstellt eine Anzahl Datenvektoren, die der Anzahl K an Frequenzlinien im Frequenzbereich der Grundfrequenz F_g entspricht, wobei F_g in der Mitte der K Frequenzlinien liegt. Diese Anzahl K beträgt für BPF Lagerdefekt beispielsweise 31 oder 5% der Frequenzlinien bezogen auf F_{max} . F_{max} kann die höchste aller Lagerdefektfrequenzen oder eine empirisch bestimmte Frequenz sein. Die Anzahl der Frequenzbereiche hängt von der Art des zu untersuchenden Lagerdefektes und der gewählten Anzahl von Harmonischen und Seitenbändern ab. Die Berechnungseinheit 51 berechnet aus jedem Datenvektor eine Signalstärke. Die Signalstärke kann aus einer Vielzahl von möglichen Kenngrössen gewählt werden, die Signalstärke kann einen Skalarwert, einen RMS Messwert, einen SNR oder FNR Wert, den grössten Wert aller Elemente im Datenvektor, Amplituden, Summe von Amplituden, Spitzenwerte, $MA6^*$, $FM4^*$, $NB4$, $MA6$, $FM4$, $NA4$, $PAPR$, Crest-factor, Energie-Ratio, Kurtosis umfassen. Die resultierenden K Ergebnisdaten 61 werden der Vergleichseinheit 52 zugeführt. Die Vergleichseinheit 52 sammelt alle Ergebnisdaten, welche der iterative Berechnungsprozess, von links nach rechts, das heisst von niedrigen zu höheren Frequenzen im Frequenzbereich, liefert. Die Vergleichseinheit 52 bestimmt aus allen erhaltenen Ergebnisdaten den grössten Wert aller Signalstärken und gibt diesen Maximalwert und einen neuen Datenvektor, der alle K Maximalwerte oder $K*N$ Messwerte enthält, an die Klassifizierungseinheit 53 weiter. Die Klassifizierungseinheit 53 bestimmt aus allen erhaltenen Ergebnisdaten, welcher Lagerdefekt mit höchster Wahrscheinlichkeit vorliegt, oder von welchem Lagerhersteller das Lager ist, dessen digitalisierte Vibrationsdaten verarbeitet wurden. Alternativ oder ergänzend können auch historische Ergebnisdaten hinzugezogen werden.

[0059] Das in der Klassifizierungseinheit 53 derart aufbereitete Resultat 63 kann in einer Visualisierungseinheit 54 visualisiert werden. Die Visualisierungseinheit 54 kann beispielsweise als Display oder als Speichermedium für den Datenvektor oder Tensor ausgebildet sein.

[0060] Die Klassifizierungseinheit verarbeitet den Datenvektor $y(i)$, indem $f(y(i))$ auf Linearität geprüft wird: hierzu hat der Fachmann diverse Möglichkeiten. Wenn die Werte in $y(i)$ einer uniformen Verteilung ähnlich sind, was der Fall ist, wenn kein Lagerdefekt vorliegt, weil die Spektralwerte angenähert weissem Rauschen entsprechen, dann sind die Werte in $y(i)$ ziemlich gleich gross (d.h. flach). Wenn ein Lagerdefekt vorliegt, dann sind typischerweise 1-5 Werte in $y(i)$ massiv grösser und man erhält eine glockenähnliche Kurve wenn man $y(i)$ aufzeichnet. Da diese zwei Fälle einfach zu unterscheiden sind, auch grafisch, ist es für den Fachmann auf einfache Weise möglich, defekte und gute Lager zu unterscheiden. Zur automatisierten Analyse werden die Werte in $y(i)$ als kumulierte Summe dargestellt. Wenn die Werte in $y(i)$ gleich gross sind, ergibt sich eine lineare Linie Kurve sonst eine S-Kurve. Es kann eine Differenz zwischen einer linearen (Theorie) und der effektiven Kurve, basierend auf $y(i)$, ermittelt werden. Die effektive Kurve beschreibt man mittels eines Polynoms P -ten Grades. Aus der Differenz zwischen dem 1. Polynom und jenen höherer Ordnung lässt sich ein Mass für die Stärke der Ausprägung eines Lagerdefektes ermitteln. Die Klassifizierungseinheit 51 berechnet einen solchen Wert, welcher mit Erfahrungswerten, d.h. Schwellwerten, verglichen wird, und gegebenenfalls eine Warnung oder Alarm auslöst. Der Benutzer kann dann in der Visualisierungseinheit 54 den Schweregrad des Defektes vertieft beurteilen und passende Massnahmen ergreifen.

[0061] Fig. 3 zeigt die für die Ermittlung eines bestimmten Lagerdefekts erforderlichen Parameter. Ein Lager 10 ist auf einer Welle 5 angeordnet. Das Lager 10 ist im linksseitigen Teil der Fig. 3 in einer Seitenansicht sichtbar. Das Lager 10 ist auf

der rechten Seite der Fig. 3 in der Aufsicht vergrössert dargestellt. Ein Teil der Kugeln 13 des exemplarisch dargestellten Kugellagers ist weggelassen, um die Darstellung nicht zu überladen. Anstelle der Kugeln 13 können auch andere Wälzkörper vorgesehen sein, was zeichnerisch nicht dargestellt ist. Die Kugeln 13 sind zwischen einem Innenring 11 und einem Aussenring 12 angeordnet. Für die Berechnung einer Lagerdefektfrequenz, ermittelt für die Aussenlagerschale (BPFO), die Innenlagerschale (BPFI), für den Lagerkäfig (FTF) oder den Wälzkörper (BSF) werden der Kugeldurchmesser d , bzw. der Wälzkörperdurchmesser, sowie der mittlere Kugelbahndurchmesser D , bzw. der mittlere Wälzkörperbahndurchmesser, benötigt, die in Fig. 3 dargestellt sind.

[0062] Die Datenvektoren beinhalten keine willkürliche Werte, denn die Datenvektoren beinhalten die Resultierenden einer Spektralanalyse (Amplitudenwerte), deren Position (Index-Bereich) deterministisch ermittelt ist, basierend auf der Position eines Lagerdefektes gemäss den Berechnungen auf Seite 4 für PBFI, BPFO etc, oder gemäss den obigen Ausführungen. Somit kann eine Fachperson den Datenvektor erstellen und dieser ist nicht willkürlich.

[0063] Der Einbauort eines Lagers kann nicht bestimmt werden, wenn in einer Maschine ausschliesslich gleiche Lagertypen vom selben Hersteller verbaut sind, was in der Praxis selten auftritt und nur bei kleinen Motoren der Fall ist. US 2014/0214363 A1 stellt eine alternative Methode vor, womit die Idee, Lageridentifikation und Einbauort, bestimmt werden kann. Das Verfahren in dieser Anmeldung nutzt gleichfalls die lagerspezifischen Defektfrequenzen, berechnet gemäss den Formeln auf Seite 4, aber das Verfahren unterscheidet sich fundamental von US 2014/0214363 A1. In der US 2014/0214363 A1 werden zur Lageridentifikation nur die Grundfrequenzen herangezogen, Amplitudenwerte an den Lagerdefektfrequenzen aufsummiert und keine Massnahmen gegen Störsignale vorgeschlagen. Und wenn kein Lagerdefekt vorliegt, was in US 2014/0214363 A1 nicht untersucht und beurteilt wird, kann eine sichere Lageridentifikation nicht stattfinden, weil das Spektrum keine herausragenden Peaks an den Lagerdefektfrequenzen ausweist.

[0064] Fig. 4 zeigt ein weiteres Beispiel eines Verfahrens zur Überwachung oder Zustandsdiagnose eines Lagers, für welches in der Berechnungseinheit 51 ein erweitertes Messfenster Anwendung findet. Für das vorliegende erweiterte Messfenster finden nach diesem Ausführungsbeispiel M Spektrallinien Verwendung. z.B. kann $M=3$ (± 1 um eine Spektrallinie) sein. Dabei wird nicht nur ein Messwert pro Frequenzbereich berücksichtigt, sondern M Messwerte, und die M Amplituden der M Frequenzlinien eines Frequenzbereichs werden zusammengefasst, z.B. gemittelt oder aufsummiert. In diesem Beispiel erweitert sich der Frequenzbereich nicht und behält seine Breite K . Üblicherweise wird der grösste Messwert innerhalb des Messfensters verwendet, beispielsweise die maximale Amplitude oder der RMS Wert der Daten im Messfenster, siehe auch US20140214363 A1.

[0065] Das Verfahren zur Überwachung oder Zustandsdiagnose eines Lagers nach einem Ausführungsbeispiel umfasst somit ein erweitertes Messfenster, mittels welchem nicht nur die Signalstärke, also der Peak, einer einzelnen bestimmten Frequenz ermittelt wird oder deren Harmonische, d.h. f_{do} , $2 \cdot f_{do}$, $3 \cdot f_{do}$ und gegebenenfalls eine Anzahl von Seitenbändern, sondern das Umfeld einer jeden Lagerdefektfrequenz berücksichtigt wird, was in Fig. 4 gezeigt ist. f_{do} steht dabei insbesondere stellvertretend für BPFO', BPFI', FTF', BSF'.

[0066] Ein Spektrum gemäss dem in Fig. 4 dargestellten Beispiel weist eine Frequenzauflösung von 0.25 Hz auf. Die Drehzahl der Maschine beträgt 750 RPM, d.h. die Drehfrequenz beträgt 12.5 Hz, und man erwartet einen max. Frequenzfehler von $\pm 5\%$ ($\pm 0.625\text{Hz}$). Dann berücksichtigt man links und rechts von der eigentlichen Lagerdefektfrequenz bis zu weitere 3 Frequenzlinien, d.h. ± 3 . In diesem Beispiel würde das erweiterte Messfenster jeden Frequenzbereich um einen Faktor $M=7$ erweitern. Wenn man aber die M Amplituden pro Berechnungsschritt zusammenfasst, um eine Signalstärke zu berechnen, dann muss man den Frequenzbereich nicht erweitern.

[0067] Fig. 4 zeigt das FFT Spektrum 3, welches eine Lagerdefektgrundfrequenz 4 umfasst, die nachfolgend mit F_{g1} bezeichnet wird. Des Weiteren umfasst das FFT Spektrum 3 eine erste Harmonische 5 und eine zweite Harmonische 6 sowie je eine Seitenbandfrequenz. Das FFT Spektrum 3 kann insbesondere als ein Hüllkurvenspektrum, ein Amplitudenspektrum oder ein Dichtespektrum ausgebildet sein. Für die zweite Harmonische 6 ist ein Frequenzbereich 7 um die Frequenzlinie 6 (FFT-bin) vergrössert dargestellt, der einen Bereich um die zweite Harmonische 6 mit ± 15 FFT Frequenzlinien zeigt. Alle relevanten Frequenzlinien im Hüllkurvenspektrum, welche mit gestrichelten Linien dargestellt sind, zeigen die Lagerdefektfrequenzen. Diese Lagerdefektfrequenzen sind für einen bestimmten Lagertyp vom Lagerhersteller vorgegeben. Um diese Frequenzlinien wird ein Fenster definiert, beispielsweise mit ± 15 FFT Frequenzlinien oder $\pm 5\%$ von F_{max} , um die genaue Frequenz, das heisst die Lage, des Peaks im Spektrum zu finden. F_{max} ist hierbei die höchste aller möglichen Defektfrequenzen oder kann empirisch oder durch die Drehfrequenz bestimmt werden.

[0068] Fig. 5 zeigt ein Suchverfahren für Signalstärken. Insbesondere können die Signalstärken als Peaks ausgebildet sein. Die Vergleichseinheit 52 umfasst gemäss diesem Ausführungsbeispiel eine Sucheinheit. Mittels der Sucheinheit kann ein Suchverfahren zur Ermittlung der grössten Signalstärke basierend auf den von der Berechnungseinheit 51 gelieferten Messwerten erfolgen. Ein Verfahren zur Überwachung oder Zustandsdiagnose eines Lagers nach diesem Ausführungsbeispiel umfasst insbesondere ein Suchverfahren für Peaks (Peak-Searcher).

[0069] Gemäss dem in Fig. 4 gezeigten Ausführungsbeispiel wird aus neun Frequenzbereichen in Fig. 5 eine Signalstärke in der Berechnungseinheit 51 ermittelt. Schrittweise wird die Signalstärke pro FFT Frequenzlinie über alle Frequenzbereiche berechnet. Gemäss dem vorliegenden Ausführungsbeispiel resultiert dies in 31 Messwerten, die einem Frequenzbereich mit ± 15 FFT Frequenzlinien entsprechen. Die gleiche prozentuale Toleranz umfasst bei niedrigeren Frequenzen weniger FFT Frequenzlinien. Somit beschreiben F_{g1} mit dem FFT Frequenzlinien -5 , $2 \cdot F_{g1}$, das heisst die zweite Harmo-

nische, mit dem FFT Frequenzlinien -10, 3*Fg1 mit dem FFT Frequenzlinien -15 jeweils die gleiche prozentuale Abweichung von Fg1, 2*Fg1, 3*Fg1. Mittels Interpolation, Kombination oder Summierung mehrerer Frequenzlinien können alle Frequenzlinien auf die Anzahl von 31 Messwerten gebracht und somit die multiplikative Natur der Frequenzabweichung berücksichtigt werden. Die Position des grössten der 31 Messwerte entspricht höchstwahrscheinlich der korrekten Abweichung der Lagerdefektfrequenz in Bezug auf die theoretische Lagerdefektfrequenz, beispielsweise eine vom Hersteller vorgegebene Fg.

[0070] Das Suchverfahren für Peaks (Peak-Searcher) ermittelt auf diese Weise die höchstwahrscheinlich korrekten Lagerdefektfrequenzen oder die Drehfrequenz einer Welle basierend auf einem Optimierungskriterium. Das Optimierungskriterium kann eines der Elemente SNR, FNR, Amplitudenwert, Amplituden, Summe der Amplituden, Spitzenwert, RMS Messwert, MA6*, FM4*, NB4, MA6, FM4, NA4, PAPR, Crest-factor, Energie-Ratio, Kurtosis umfassen. SNR wird in diesem Zusammenhang als Abkürzung für das Signal-Rauschverhältnis (signal-to-noise ratio) verwendet. FNR wird in diesem Zusammenhang als Abkürzung für das Fehlerfrequenz-Rauschverhältnis (faultfrequency-to-noise ratio) verwendet.

[0071] Die Signalstärke Ps wird gemäss nachstehender Beziehung ermittelt. Hierbei ist i die Laufnummer der Messung (z.B. Tag i), N ist die Anzahl Frequenzbereiche bzw. aller Defektfrequenzen inklusive Harmonischen und Seitenbändern eines Lagerdefekttyps, wie beispielsweise BPF1 oder BPF0, M ist die Breite des erweiterten Messfensters, und k=1..K ist die Anzahl von Frequenzlinien in jedem Frequenzbereich um die N Defektfrequenzen:

$$P_s(i, k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=\lfloor M/2 \rfloor}^{\lfloor M/2 \rfloor} (F_{i, n, m}^k)^2$$

[0072] Die multiplikative Natur der Frequenzabweichung und der absolute Index im Spektrum sind in der Formel nicht berücksichtigt. Alternativ kann Ps(i,k) auch aus der Varianz der relevanten N bzw. N*M Frequenzlinien gebildet werden. Die Rauschleistung wird wie folgt ermittelt. Es wird das halbe FFT Spektrum, F(i), mit einer Bandbreite von fs/2 verwendet. Im i-ten Spektrum F(i) werden dann alle N bzw. N*M Frequenzlinien genullt: F(i) → F'(i,k).

[0073] Die Rauschleistung Pn ergibt sich dann als $P_n = \text{Var}(F'(i)) = \sigma(i)^2$

[0074] Das FNR für das Spektrum i wird dann gemäss einem Ausführungsbeispiel zu $FNR_i = P_s(i)/\sigma(i)^2$ berechnet.

[0075] M kann insbesondere im Bereich von maximal +/- 10 % von Fmax liegen.

[0076] Die Messung der Peaks bzw. von Ps der Lagerdefektfrequenzen erfolgt dann ohne Berücksichtigung weiterer, möglicherweise falscher oder störender, Werte im Frequenzspektrum, wie in Fig. 5 gezeigt ist. Hierzu wird eine Mehrzahl von Frequenzlinien bestimmt. Im in Fig. 5 gezeigten Ausführungsbeispiel wird die Signalstärke aus neun Frequenzbereichen ermittelt.

[0077] Mittels der erweiterten Messfenster können noch weitere Frequenzlinien zur Berechnung der Signalstärke berücksichtigt werden, beispielsweise die Frequenzlinien links und rechts (±1) einer jeden Frequenzlinie.

[0078] Die resultierenden Messwerte der Lagerdefektfrequenzen können mittels eines Klassifizierungsverfahrens analysiert werden, welches nachgehend auch als Lagerdefektklassifizierungsverfahren bezeichnet werden soll (BDC, bearing defect classifier). Die resultierenden Messwerte können für weitere Analysen verwendet werden, wobei weitere Daten, beispielsweise Daten einer Mehrzahl von Tagen, berücksichtigt werden. Die Lagerdefekte können somit mit hoher Wahrscheinlichkeit identifiziert werden und klassiert werden. Mittels des BDC können eine Mehrzahl von statistischen Berechnungen durchgeführt werden, deren erweitertes Resultat eine Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Frequenz ergibt. Wenn man einen bestimmten Frequenzbereich ±Fps berücksichtigt, welcher K Frequenzlinien entspricht, erhält man lineare oder nicht-lineare Kennlinien. Ist die Kennlinie linear oder nahezu linear, ist das Vorliegen eines Lagerdefekts unwahrscheinlich. Mittels des Klassifizierungsverfahrens kann der Typ des Lagerdefekts oder dessen Schweregrad ermittelt werden, beispielsweise ob ein Wälzkörper-, Käfig-, Innenlagerschalen-, Aussenlagerschalendefekt vorliegt. Zusätzlich kann ermittelt werden, in welchem Stadium sich dieser Lagerdefekt befindet, das heisst wie fortgeschritten der Lagerdefekt ist. Hierzu kann beispielsweise ein Polynom P-ten Grades berechnet werden oder eine andere Methode aus dem Bereich der Interpolation oder Kurvenanpassung (curve fitting) zur Berechnung herangezogen werden. Je nach Grösse der P-Koeffizienten kann auf die Linearität bzw. Nichtlinearität und somit auf die Stärke des vorhandenen Lagerdefekts rückgeschlossen werden. Zur Automatisierung der Analyse können die Daten durch Verfahren des maschinellen Lernens verarbeitet werden, beispielsweise mittels eines neuronalen Netzwerks. Die Lesbarkeit der Analyse bzw. deren Interpretation kann weiter verbessert werden, indem die Resultate grafisch dargestellt werden, beispielsweise als zweidimensionales Schaubild, analog eines Spektrogramms.

[0079] Die aus den resultierenden Messwerten abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten können einem Beurteilungsschema zugeordnet werden. Beispielsweise können die Wahrscheinlichkeiten dem Kunden oder Experten derart mitgeteilt werden, dass den statistischen Werten oder den Polynomkoeffizienten ein Beurteilungsschema zugewiesen wird. Beispielsweise kann ein Lager als gut, auffällig, kritisch oder defekt eingestuft werden. Jeder dieser Beurteilungen kann eine Handlungsempfehlung zugeordnet werden. Die Handlungsempfehlung kann eine grafische Darstellung, beispielsweise eine Ampeldarstellung umfassen oder kann in Textform verfasst sein.

[0080] Fig. 6 zeigt eine Darstellung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ausführungsbeispiele. Wie vorgehend beschrieben, werden beispielhaft $N=9$ Frequenzbereiche 7 ausgewertet. In einem ersten Schritt wird der Amplitudenwert $x_{k,n}$ des k -ten Messwerts der Frequenzlinien des n -ten Frequenzbereichs gesammelt. In einem zweiten Schritt wird der k -te Datenvektor erstellt, gemäss

$$x(k) = [x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,N}]$$

[0081] In einem dritten Schritt wird aus dem k -ten Datenvektor ein neuer Messwert, der nachfolgend als Signalstärke bezeichnet wird, bestimmt, das heisst, SNR, FNR, Spitzenwerte, RMS-Messwerte, $MA6^*$, $FM4^*$, $NB4$, $MA6$, $FM4$, $NA4$, $PAPR$, Crest-factor, Energie-Ratio oder Kurtosis berechnet.

[0082] Sobald alle K Signalstärken vorhanden sind, beispielsweise wie vorgehend beschrieben, 31 Signalstärken, kann gemäss der untenstehenden Berechnungsvorschrift in einem vierten Schritt in der Berechnungseinheit 51 ein neuer Datenvektor erstellt werden:

$$y(i) = [x(1), x(2), \dots, x(31)]$$

somit kann der grösste Wert in $y(i)$ und dessen Position im Vektor gefunden werden.

[0083] In einem fünften Schritt wird der Datenvektor $y(i)$ an die Klassifizierungseinheit geschickt. In einem sechsten Schritt wird der Datenvektor $y(i)$ analysiert, wobei eine lineare Verteilung der kumulierten Summe ein Anzeichen hierfür ist, dass kein Lagerdefekt vorliegt, andernfalls ein Lagerdefekt wahrscheinlich ist.

[0084] In einem siebenten Schritt wird der Typ des Lagerdefekts bestimmt, beispielsweise BPF1, BSF.

[0085] Fig. 7 zeigt eine Grafik des Frequenzspektrums $F(i)$, welches die Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz zeigt. Die Amplitude wird auf der Ordinate aufgetragen, die Frequenz auf der Abszisse. Im Frequenzspektrum sind exemplarisch drei der Frequenzbereiche 7 abgebildet, der Frequenzbereich (1), der Frequenzbereich (2) sowie der Frequenzbereich (N). Des Weiteren sind exemplarisch die Lagerdefektfrequenzen $Fg1$, $Fg2$, FgN in den entsprechenden Frequenzbereichen (1, 2, ..., N) eingezeichnet. Mit $Fg1$ ist die in Zusammenhang mit Fig. 4 bereits beschriebene Lagerdefektgrundfrequenz 4 bezeichnet. Mit $Fg2$ und FgN sind die Harmonische der Lagerdefektfrequenz 4 oder die Seitenbandmittenfrequenz der Lagerdefektfrequenz bezeichnet.

[0086] Für den Fachmann ist offensichtlich, dass viele weitere Varianten zusätzlich zu den beschriebenen Ausführungsbeispielen möglich sind, ohne vom erfinderischen Konzept abzuweichen. Der Gegenstand der Erfindung wird somit durch die vorangehende Beschreibung nicht eingeschränkt und ist durch den Schutzbereich bestimmt, der durch die Ansprüche festgelegt ist. Für die Interpretation der Ansprüche oder der Beschreibung ist die breiteste mögliche Lesart der Ansprüche massgeblich. Insbesondere sollen die Begriffe „enthalten“ oder „beinhalten“ derart interpretiert werden, dass sie sich auf Elemente, Komponenten oder Schritte in einer nichtausschliesslichen Bedeutung beziehen, wodurch angedeutet werden soll, dass die Elemente, Komponenten oder Schritte vorhanden sein können oder genutzt werden können, dass sie mit anderen Elementen, Komponenten oder Schritten kombiniert werden können, die nicht explizit erwähnt sind. Wenn die Ansprüche sich auf ein Element oder eine Komponente aus einer Gruppe beziehen, die aus A, B, C bis N Elementen oder Komponenten bestehen kann, soll diese Formulierung derart interpretiert werden, dass nur ein einziges Element dieser Gruppe erforderlich ist, und nicht eine Kombination von A und N, B und N oder irgendeiner anderen Kombination von zwei oder mehr Elementen oder Komponenten dieser Gruppe.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Diagnose eines Lagers (10, 20) einer Maschine umfassend eine Aufnahme von Vibrationsdaten (16, 26) durch einen am oder in der Nähe des Lagers angebrachten Vibrationssensor (15, 25), wobei die Vibrationsdaten (16, 26) charakteristisch für das Betriebsverhalten des Lagers (10, 20) sind, Einspeisen der Vibrationsdaten (16, 26) in eine Digitalisierungseinheit (40) zur Digitalisierung der Vibrationsdaten (16, 26) und Erstellen von digitalisierten Vibrationsdaten (46), Einspeisen der digitalisierten Vibrationsdaten (46) in einen Prozessor (50), wobei im Prozessor (50) eine Berechnung eines Frequenzspektrums (1) aus den digitalisierten Vibrationsdaten (46) erfolgt, wobei das Frequenzspektrum (1) in eine Mehrzahl von Frequenzbereichen 1 bis N unterteilt wird, wobei jeder der Frequenzbereiche 1 bis N eine Mehrzahl von Frequenzlinien 1 bis K umfasst, wobei zu jeder der K Frequenzlinien ein Datenvektor mit N Elementen ermittelt wird, sodass zu den N Frequenzbereichen K Datenvektoren erhalten werden, wobei aus jedem der K Datenvektoren eine Signalstärke ermittelt wird, wobei aus den Signalstärken eine Kurve gebildet wird, die mittels eines Polynoms beschrieben werden kann und deren nicht-Linearität, ermittelt durch die Beurteilung der Höhe der einzelnen Polynomkoeffizienten und deren Verhältnisse zueinander, Aussagen über den Lagerdefekt und dessen Grösse zulassen, sodass diese K Signalstärken Aussagen über den Lagerdefekt zulassen oder der Position des Lagers (10, 20) in der Maschine entsprechen und daher eindeutig dem entsprechenden Lager (10, 20) der Maschine zugeordnet werden können, sodass der Betriebszustand oder der Einbauort des Lagers (10, 20) in der Maschine zu jedem Zeitpunkt erfasst werden kann.
2. Das Verfahren nach Anspruch 1, wobei ein erweitertes Messfenster für jede Frequenzlinie verwendet wird, welches mehrere nebeneinander liegende Frequenzlinien berücksichtigt.
3. Das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei zur Ermittlung Signalstärken ein Suchverfahren für Signalstärken verwendet wird.

4. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Signalstärken ein Element aus der Gruppe der SNR, FNR, Amplituden, Summe von Amplituden, Spitzenwerte, RMS-Messwerte, MA6*, FM4*, NB4, MA6, FM4, NA4, PAPR, Crest-factor, Energie-Ratio, Kurtosis umfassen.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mittels einem Optimierungskriterium ein optimaler Index ermittelt wird, wobei das Optimierungskriterium ein Element aus der Gruppe der SNR, FNR, Amplituden, Summe von Amplituden, Spitzenwerte, RMS Messwerte, MA6*, FM4*, NB4, MA6, FM4, NA4, PAPR, Crest-factor, Energie-Ratio, Kurtosis umfasst.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Signalstärke für weitere Analysen verwendet wird, wobei weitere Daten, beispielsweise Daten einer Mehrzahl von Tagen, berücksichtigt werden können.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Messwerte der Frequenzbereiche mittels eines Klassifizierungsverfahrens analysiert werden, welches basierend auf der Verteilungsfunktion der kumulierten Summe eine Kurve ergibt, welche mittels eines Polynoms beschrieben und mit einer linearen Kurve verglichen werden kann, woraus ein Abweichungswert ermittelt werden kann.
8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei mittels des Klassifizierungsverfahrens der Typ des Lagerdefekts oder dessen Schweregrad ermittelt wird, indem der Abweichungsgrad in Klassen unterteilt wird und jede Klasse einem bestimmten Schweregrad entspricht.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8, wobei mittels des Klassifizierungsverfahrens ermittelt wird, in welchem Stadium sich der Lagerdefekt befindet, wobei ein Polynom P-ten Grades oder einer Interpolationsfunktion oder einer Kurvenanpassungsfunktion berechnet wird, wobei je nach Grösse der Polynomkoeffizienten auf die Linearität bzw. Nichtlinearität und somit auf die Stärke des vorhandenen Lagerdefekts rückgeschlossen werden kann.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Automatisierung der Analyse die Daten durch Verfahren des maschinellen Lernens verarbeitet werden, beispielsweise mittels eines neuronalen Netzwerks, insbesondere mittels eines tiefen neuronalen Netzwerks.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Mehrzahl von statistischen Berechnungen durchgeführt wird, deren Resultat eine Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Fehlerfrequenz ergibt.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei aus den Messwerten abgeleitete Wahrscheinlichkeiten einem Beurteilungsschema zugeordnet werden, aufgrund dessen das Lager als gut, auffällig, kritisch oder defekt eingestuft werden kann.
13. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei kein Drehzahlsensor zur Bestimmung des Betriebszustandes jedes der Lager erforderlich ist.
14. Verwendung des Verfahrens zur Bestimmung der Drehfrequenz (RPM) einer Maschine oder zur Ermittlung des Lagertyps und Lagerherstellers.

Fig. 1

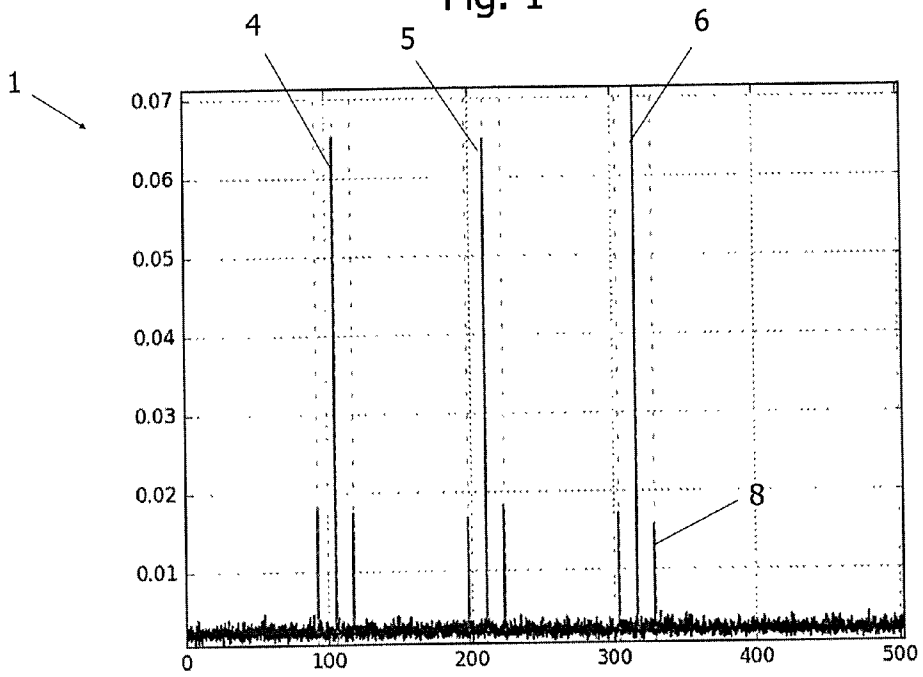
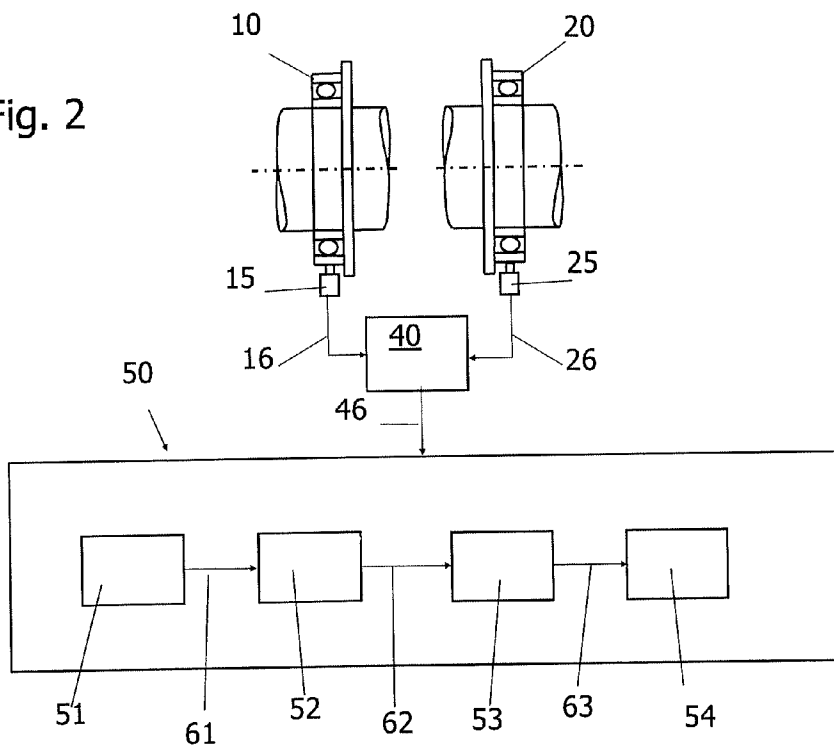


Fig. 2



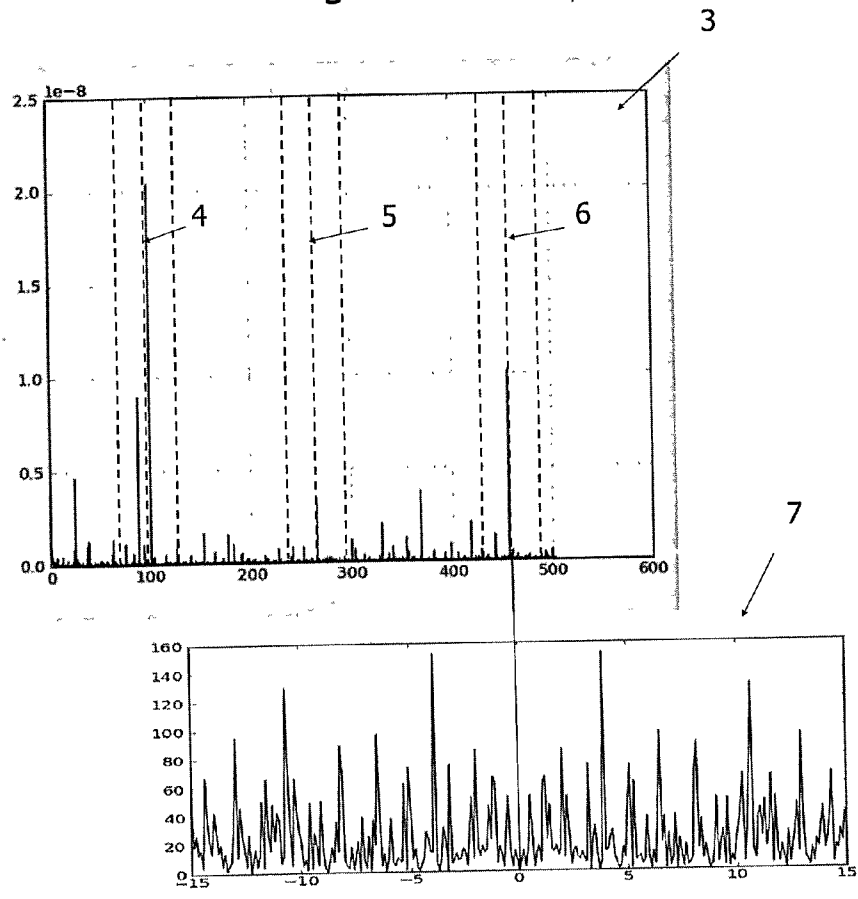
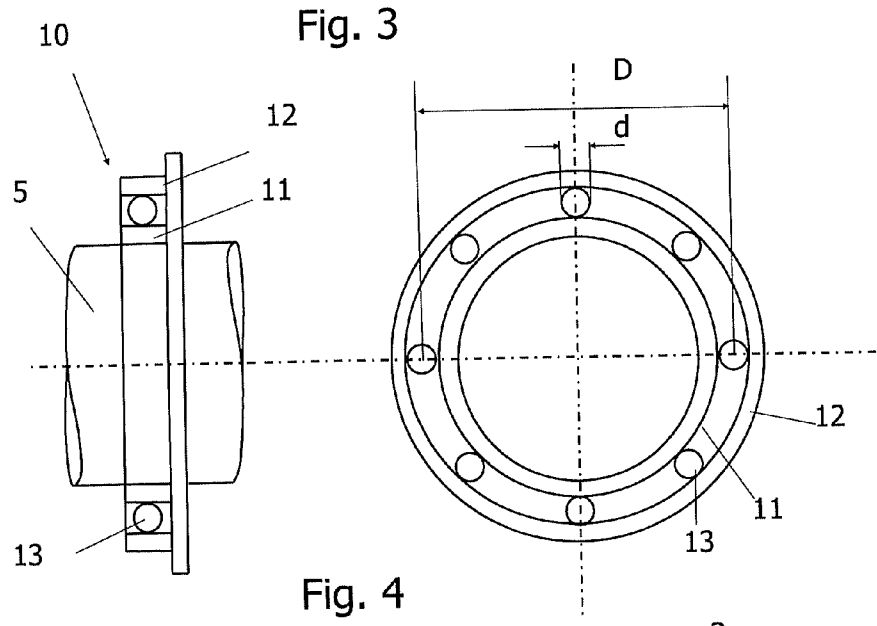


Fig. 5

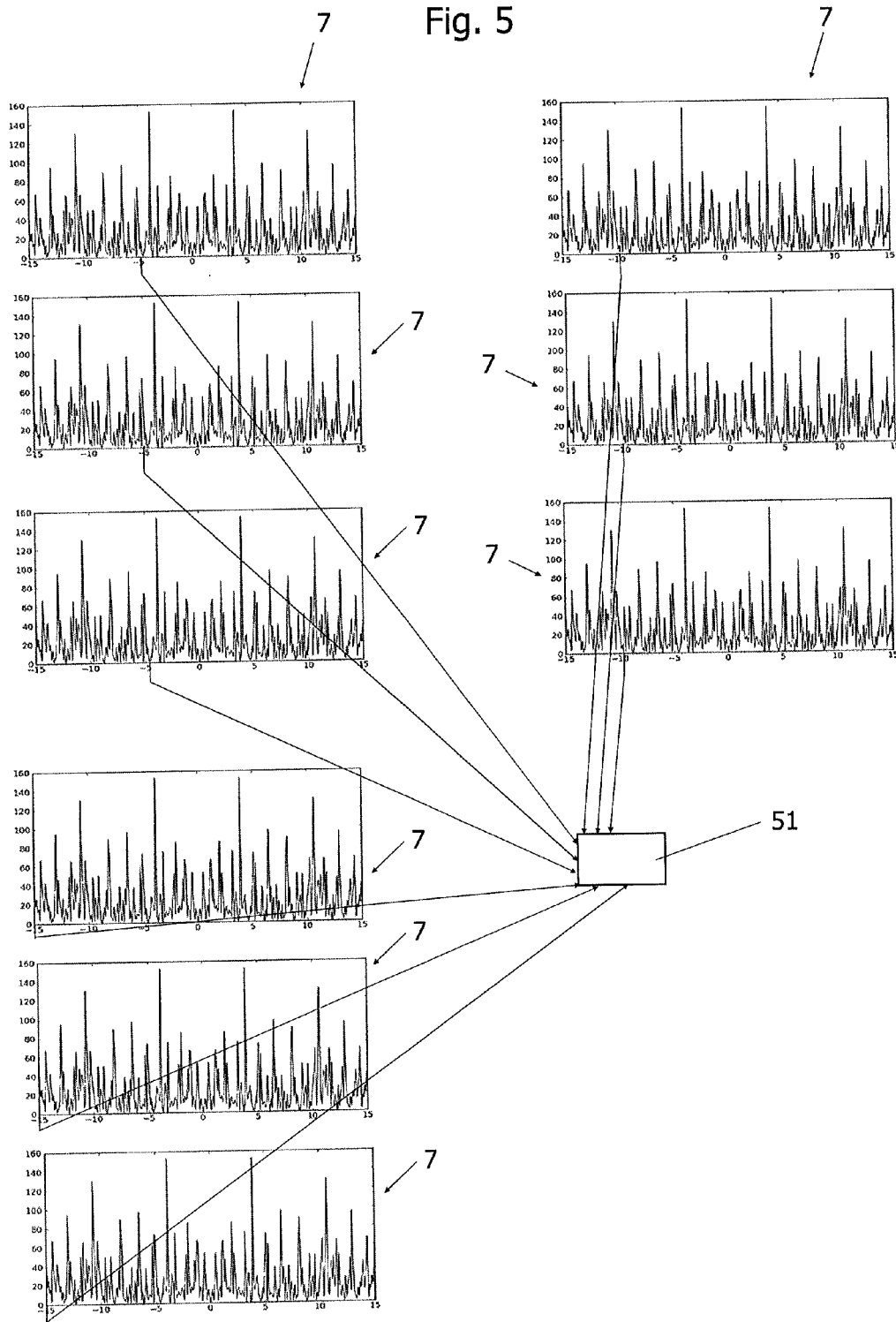


Fig. 6

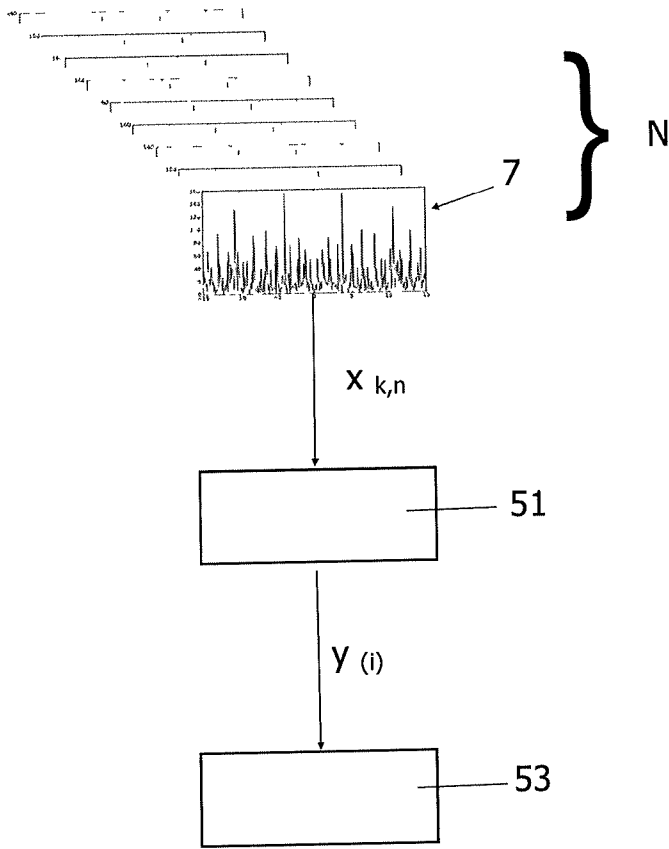


Fig. 7

