

Schwingungsisolationssystem mit Diagnosefunktion, sowie DiagnoseverfahrenBeschreibung

- 5 Die Erfindung betrifft ein vorzugsweise stationäres Schwingungsisolationssystem mit Diagnosefunktion sowie ein Diagnoseverfahren. Insbesondere betrifft die Erfindung ein aktives, stationäres Schwingungsisolationssystem, auf welchem eine Maschine zur Prozessierung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten oder Elementen, insbesondere von Wafern, Masken oder Displays, wie beispielsweise Flat-Panel Displays, oder zur
- 10 Vermessung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten, wie z.B. ein Elektronenstrahlmikroskop, angeordnet ist.

- Weiter können auch Laborgeräte und/oder medizinische Geräte, wie z.B. bildgebende Untersuchungsgeräte wie Magnetresonanztomographen (MRT) oder Mikroskope auf dem
- 15 stationären Schwingungsisolationssystem angeordnet sein.

Hintergrund der Erfindung

- 20 Aktive, stationäre Schwingungsisolationssysteme werden insbesondere in der Halbleiterindustrie zu Lagerungen von Bearbeitungsmaschinen, wie z.B. Lithographiegeräten und Messeinrichtungen, wie z.B. Elektronenstrahlmikroskopen, verwendet, um empfindliche Geräte zur Prozessierung von Halbleiterbauelementen schwingungsisoliert zu lagern.
- 25 Ein derartiges Schwingungsisolationssystem für eine Maschine oder Maschinenteile besteht in der Regel aus einer Platte, welche auf zumindest drei, oft vier, gegebenenfalls auch mehr als vier Schwingungsisolatoren, die jeweils eine Feder umfassen, schwingungsisoliert gelagert ist.

- Es können alternativ oder zusätzlich aber auch ein oder mehrere Isolatoren verwendet werden,
- 30 die nicht auf einer Platte stehen, sondern im Gerät zwischen zwei Teilen, beispielsweise zwischen einem Grundgestell und einer Stage oder einer Granitplatte angeordnet sind. Isolatoren

können auch außerhalb der Maschine angeordnet sein, beispielsweise kann auch die Maschine als Ganzes auf einen oder mehrere Isolatoren gestellt werden.

Die Maschine oder Maschinenteile werden so vor Schwingungen geschützt. Die Maschine oder Maschinenteile bilden gegebenenfalls zusammen mit einer Platte die schwingungs isoliert gelagerte Last.

Aus der Praxis bekannt sind insbesondere aktive Schwingungs isolationssysteme, bei welchen die Schwingungs isolatoren neben der Feder Aktoren, insbesondere Magnetaktoren, umfassen, mit denen aktiv Schwingungen entgegengewirkt wird. Es existieren auch Schwingungs isolationssysteme, bei denen zusätzliche Sensoren oder Aktoren an anderer Stelle der Maschine separat von den Schwingungs isolatoren angebracht sind. Über Sensoren, welche sowohl an der Basis des Schwingungs isolators und/oder in der Nähe der Basis einer oder mehrerer Schwingungs isolatoren, als auch an der schwingungs isoliert gelagerten Last angeordnet sein können, werden Schwingungen erfasst. Auf Basis der Sensorsignale werden die Aktoren angesteuert, um so durch Erzeugung von Gegenkräften Schwingungen zu kompensieren.

Mittels einer derartigen aktiven Regelung kann sowohl von außen in das System prolongierenden Schwingungen als auch Schwingungen entgegengewirkt werden, die von der schwingungs isoliert gelagerten Last selbst erzeugt werden (z.B. von einer verfahrbaren Bühne, wie etwa einer Stage, oder einem sich bewegenden Roboter).

Die Patentschrift EP 2 295 829 B1 der Anmelderin zeigt ein Schwingungs isolationssystem, bei welchem Aktoren zum Erzeugen von Kompensationskräften in mehreren Freiheitsgraden vorhanden sind.

Derartige Schwingungs isolationssysteme umfassen zum Verarbeiten der Sensorsignale eine Steuereinheit (oft auch als Controller bezeichnet), welche die Sensorsignale erfasst und auf Basis der Sensorsignale Steuersignale erzeugt, mittels der die Aktoren angesteuert werden, um so Kompensationskräfte zu generieren.

Die Steuereinheit kann dabei als zentrale Recheneinheit ausgebildet sein, an welcher sowohl die Sensoren als auch die Aktoren sämtlicher Isolatoren des Schwingungsisolationssystems angeschlossen sind. Das Dokument EP 3 726 094 A1 der Anmelderin beschreibt ein Verfahren zur Regelung eines derartigen stationären Schwingungsisolationssystems.

5

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Leistungsfähigkeit des Schwingungsisolationssystems und damit die Leistungsfähigkeit der mit dem Schwingungsisolationssystem verbundenen Maschine oder Gerät weiter zu verbessern oder besser beurteilen zu können, oder die Verfügbarkeit der Maschine zu optimieren.

10

Insbesondere liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, weitere Daten zu dem Schwingungsisolationssystem und/oder zu den schwingungsisoliert gelagerten Maschinen oder Geräten zu erhalten, mit welchen beispielsweise die Leistungsfähigkeit der Maschinen oder Geräte bestimmt oder vorhergesagt werden kann, oder welche es erlauben, rechtzeitig Veränderungen an oder im Umfeld der Maschine, wie beispielsweise Verschleißerscheinungen zu erkennen und Hinweise geben, um Abhilfe schaffen zu können zu können. Unter der Leistungsfähigkeit der Maschinen wird in diesem Zusammenhang deren Präzision, Genauigkeit, Verfügbarkeit und Produktivität verstanden.

15

20 Dieser Aufgabe haben sich die Erfinder angenommen.

Diese Aufgabe wird durch ein Schwingungsisolationssystem mit Diagnosefunktion sowie ein Verfahren zur Diagnose eines Schwingungsisolationssystems und/oder einer darauf schwingungsisoliert gelagerten Last

25

nach einem der unabhängigen Ansprüche gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen und Weiterbildungen der Erfindung sind den jeweiligen Unteransprüchen zu entnehmen.

Gegenstand der Erfindung ist demnach in einem ersten Aspekt ein

30

Schwingungsisolationssystem, insbesondere mit Diagnosefunktion, vorzugsweise stationäres, aktives Schwingungsisolationssystem, mittels der eine schwingungsisoliert gelagerte Last abgestützt werden kann, umfassend

- zumindest einen Schwingungsisolator, vorzugsweise eine Mehrzahl von Schwingungsisolatoren, welche mittels Aktoren im Betrieb auftretende Schwingungen entgegenwirken können,
- 5 zumindest einen Sensor, vorzugsweise eine Mehrzahl von Sensoren, welche dazu eingerichtet sind, Messwerte betreffend das Schwingungsisolationssystem und/oder die gelagerte Last und/oder die Umgebung aufzunehmen und als Eingangsdaten einem rechnerunterstützten Verfahren zur Verfügung zu stellen für eine Leistungsanalyse des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last.
- 10 Die Schwingungsisolatoren können dabei auftretenden Schwingungen aktiv oder passiv entgegenwirken. Es können auch aktive und passive Schwingungsisolatoren gemeinsam Bestandteile des Schwingungsisolationssystems bilden.
- 15 Messwerte betreffend die gelagerte Last können insbesondere eine mit dem Schwingungsisolationssystem gelagerte Maschine oder Teile derselben betreffen. Beispielsweise kann ein Schwingungssensor an einem optischen Sensor einer solchen Maschine, oder im Falle eines Elektronenmikroskops an der Elektronenstrahlsäule angebracht sein. Der Sensor muss dazu auch nicht einmal selbst an der gelagerten Last oder dem Schwingungsisolationssystem angebracht sein. So könnten Schwingungen des Systems, der Last oder Teilen davon auch mit
- 20 beispielsweise optischen Sensoren erfasst werden, die außerhalb dieses Systems angeordnet sind.
- 25 Unter einer Leistungsanalyse wird im Sinne dieser Offenbarung eine Klassifikation des Betriebszustands hinsichtlich schädlicher Störungen und Einwirkungen verstanden. Diese Störungen stellen bei einem Schwingungsisolationssystem insbesondere Einwirkungen durch unerwünschte Bewegungen des Systems, ganz besonders Schwingungsbewegungen dar. Die Leistungsanalyse umfasst neben der Klassifikation von Störgrößen auch die Klassifikation, ob das System gut, insbesondere optimal arbeitet, unter anderem dabei, ob das System optimal justiert oder eingestellt ist. Zum Beispiel kann die Leistungsfähigkeit klassifiziert werden in gut
- 30 und schlecht in Bezug auf die Ausschwingzeit nach der Bewegung einer Komponente des Systems wie etwa nach der Bewegung eines xy-Tisches. aber auch der dabei auftretenden

Frequenzgänge, oder anderer Umgebungsbedingungen, wie z.B. gleichzeitig in der Maschine ablaufender anderer Vorgänge oder Betriebszustände, Temperaturen, Lastfälle auf der Stage.

Allgemein kann hinsichtlich der Leistungsanalyse zwischen Betriebszuständen und Vorgängen, bzw. Maschinen-Funktionen unterschieden werden. In beiden Fällen geht es darum, dass Kräfte aus der Aktorik der Maschine oder aus der Umgebung in das dynamische System, die Strukturdynamik der Maschine eingeleitet werden. In der Strukturdynamik werden Schwingungen angeregt, die von den Sensoren des Schwingungsisolationssystems erfasst werden können. Bei den Betriebszuständen geht man eher von quasi-statischer Krafteinleitung, beziehungsweise konstanten Schwingungszuständen aus. Bei den Vorgängen oder Maschinen-Funktionen liegen transiente Krafteinleitungen oder Schwingungszuständen vor. Gemeinsam für beide Fälle können die Sensoren des Schwingungsisolationssystems Amplitude und spektrale Zusammensetzung der Schwingungssignale erfassen und bewerten. Bei Vorgängen, beziehungsweise Maschinen-Funktionen kommt zusätzlich noch das Zeitverhalten der Schwingungsamplituden und der spektralen Zusammensetzung hinzu. Von diesen Beobachtungen können als Leistungsanalyse dann Bewertungen und Klassifizierungen zu den jeweiligen Betriebszuständen und Vorgängen bzw. Maschinen-Funktionen abgeleitet werden.

Die Leistungsanalyse beinhaltet insbesondere also die Auswertung einer Vielzahl von Messwerten, die von dem oder den Sensoren des Schwingungsisolationssystems bereitgestellt werden, sowie die Bewertung des Betriebszustands des Systems, ausgedrückt durch einen Ausgabewert. Es können aber auch weitere oder andere Informationen genutzt oder mitgenutzt werden, wie zum Beispiel die Information, ob die Maschine die erforderliche Qualität produziert. Der Ausgabewert kann eine von mehreren Klassen umfassen, die den Betriebszustand des Systems kennzeichnet. Im einfachsten Fall wird eine Einordnung in nur zwei Klassen, die einen guten und einen schlechten Betriebszustand kennzeichnen, vorgenommen. Der Ausgabewert kann auch ein gleitender Wert innerhalb eines vorgegebenen Bereichs, etwa in Form einer Prozentangabe sein. So könnte ein Ausgabewert von 100% einen optimalen Betriebszustand kennzeichnen, ein Wert von 75% könnte beispielsweise einen gerade noch akzeptablen Zustand angeben.

Von besonderer Bedeutung für die Leistung eines Schwingungsisolationssystems sind naturgemäß Bewegungen, wie insbesondere Schwingungen und deren Unterdrückung. Daher ist gemäß eines zweiten Aspekts dieser Offenbarung ein Schwingungsisolationssystem zur schwingungsisolierten Lagerung einer Last vorgesehen, umfassend mindestens einen,

5 vorzugsweise mehrere Schwingungsisolatoren und zumindest einen Sensor, wobei der Sensor eingerichtet ist, eine Bewegungsgröße, insbesondere eine mechanische Schwingung, Bewegung oder Beschleunigung zu erfassen, sowie eine Recheneinrichtung, wobei die Recheneinrichtung ein künstliches neuronales Netzwerk enthält, wobei das künstliche neuronale Netzwerk eingerichtet ist, vom zumindest einen Sensor bereitgestellte Daten der Bewegungsgröße zu

10 verarbeiten und eine Klassifikation vorzunehmen, ob sich das Schwingungsisolationssystem mit der gelagerten Last in einem Betriebszustand mit hinreichend wenig oder zu viel durch Bewegungen gestörten Betriebszustand befindet. Diese Klassifikation kann dann ausgegeben werden. Die Ausgabe kann in einem einfachen Fall dazu vorgesehen sein, das Bedien- oder Überwachungspersonal über den Betriebszustand zu informieren. Die Ausgabe kann vom

15 Schwingungsisolationssystem selbst oder einer anderen informationstechnisch verbundenen Vorrichtung auch dazu eingesetzt werden, den Betriebszustand zu beeinflussen, falls dieser als durch zu viele Bewegungen gestört klassifiziert wurde. Bewegungsgrößen, die als Eingangsdaten dienen, können vor allem Schwingungen, insbesondere deren Amplitude und Frequenz sein. Weitere alternative oder zusätzliche Bewegungsgrößen können aber auch Beschleunigungen

20 und Geschwindigkeiten sein. Die vorgenannten Betriebszustände werden im Folgenden der Einfachheit halber auch als „gut“ (hinreichend wenig durch Bewegungen gestörter Betriebszustand) oder „schlecht“ (zu viel durch Bewegungen gestörter Betriebszustand) bezeichnet. Selbstverständlich kann die Klassifikation, wie oben erläutert, weitere, beziehungsweise feinere Abstufungen einbeziehen, beispielsweise in Form eines gleitenden

25 Ausgabewerts.

Eine besonders bevorzugte Form von Daten, die vom Sensor ausgegeben und vom künstlichen neuronalen Netzwerk verarbeitet werden, sind Spektrogramme. Im Sinne dieser Offenbarung wird als ein Spektrogramm insbesondere ein Datensatz verstanden, welcher den zeitlichen

30 Verlauf der Amplituden mehrerer Schwingungsfrequenzen enthält.

Die vorliegende Erfindung ermöglicht es, Messwerte der Sensoren als Eingangsdaten zu verwenden, um Leistungsdaten des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last zu gewinnen.

- 5 Die gelagerte Last kann dabei zum Beispiel Bearbeitungsmaschinen oder Teile davon, insbesondere in der Halbleiterindustrie wie z.B. Maschinen zur Prozessierung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten oder Elementen, insbesondere von Wafern, Masken oder Displays, Lithographiegeräte, oder Messeinrichtungen oder -geräte, insbesondere zur Vermessung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten
- 10 Substraten, wie z.B. ein Elektronenstrahlmikroskop, oder andere empfindliche Geräte, Maschinen oder Anlagen, beispielsweise Laborgeräte oder medizinische Geräte, etwa bildgebenden Untersuchungsgeräte wie Magnetresonanztomographen (MRT), umfassen. Zusammenfassend und vereinfachend wird nachfolgend auch allgemein von Maschine oder Gerät gesprochen.
- 15 Die gelagerte Last kann in vielen Ausführungsformen der Erfindung eine Platte, insbesondere als Aufnahme umfassen, auf welcher die Maschine oder das Gerät angeordnet und befestigt sein kann. Auf einer derartigen Platte angeordnete Geräte oder Maschinen werden so vor Schwingungen geschützt. Platte und darauf angeordnete Geräte oder Maschinen können zusammen die schwingungsisoliert gelagerte Last bilden. Die gelagerte Last kann mittels eine
- 20 Dreipunkt-Lagerung über drei, aber auch über vier oder mehr Schwingungsisolatoren gelagert werden.

- Die Sensoren sind gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung eingerichtet, um im Betrieb eine Vielzahl von Informationen oder Messwerte betreffend das
- 25 Schwingungsisolationssystem und/oder die gelagerte Last oder auch die Umgebung aufnehmen und geeigneten rechnerunterstützten Verfahren zur Verfügung stellen. Diese Eingangsdaten können erfindungsgemäß genutzt werden für eine Leistungsanalyse des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last. Das Ergebnis der Leistungsanalyse kann zur Diagnose des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last verwendet
- 30 werden, so dass das Schwingungsisolationssystem über eine Diagnosefunktion verfügen kann.

Dabei können gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung die Sensoren vielfältige Informationen zur Verfügung stellen, beispielsweise Messwerte, welche in bestimmten Zusammenhängen gesehen werden können, und deren Auswertung über regelbasierte oder statistische Methoden nur begrenzt sinnvoll oder sogar überhaupt nicht möglich ist. Dies kann
5 beispielsweise bei Verwendung des Schwingungsisolationssystems an oder mit Maschinen oder Anlagen der Halbleiterindustrie oder im Bereich der Inspektions- oder der Messtechnik oder auch allgemein bei Verwendungen an oder mit Maschinen von großem Interesse sein.

So kann es zum Beispiel bei bestimmten Maschinentypen hilfreich sein, auftretende
10 Schwingungen soweit es geht zu reduzieren oder zu eliminieren. Die Leistungsfähigkeit, beispielsweise die optische Auflösung eines Mess- oder Inspektionssystems, kann dabei stark von den auftretenden Schwingungen abhängen.

Demnach kann ein vielfältiger Zusammenhang zwischen den auftretenden Schwingungen und
15 der Leistungsfähigkeit der mittels des Schwingungsisolationssystems gelagerten Last bestehen.

Zur Reduktion der Schwingungen können Sensoren vorgesehen sein, welche auftretende Schwingungen an definierten Stellen im System messen können. Dies können zum Beispiel Beschleunigungssensoren sein, welche eine Beschleunigung in einer der Raumrichtungen x, y
20 oder z eines kartesischen Koordinatensystems detektieren können. Da in vielen Fällen ein Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des Schwingungsisolationssystems und der gelagerten Last, wobei hierunter insbesondere die Leistungsfähigkeit der gelagerten Maschine oder des gelagerten Gerätes verstanden wird, und den auftretenden Schwingungen bestehen kann, gleichzeitig die Schwingungen aber auch gemessen werden können, ist es möglich, auf
25 Basis der Messwerte der Sensoren eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der gelagerten Last, respektive der gelagerten Maschine oder des gelagerten Gerätes, zu treffen.

Die Erfinder haben herausgefunden, dass anhand der Messwerte der Sensoren noch darüber hinaus weitere Informationen gewonnen werden können. Beispielsweise kann ermittelt werden,
30 ob eine gelagerte Maschine noch innerhalb ihrer Spezifikationen arbeitet oder nicht. Es kann anhand der Charakteristik der Schwingungen auch ermittelt werden, was die Ursache für eine mögliche Abweichung von der Spezifikation ist, beispielsweise ob ein gelagerter xy-Tisch bzw.

- Kreuztisch („stage“) korrekt arbeitet, oder ob beispielsweise eine an dem System angeschlossene Vakuumpumpe zu viele Schwingungen auf das System überträgt, oder etwa auch, ob eine seismische Ursache für die Abweichung vorliegt. Unter der Charakteristik der Schwingungen werden im Sinne dieser Offenbarung zeitliche Veränderungen in der spektralen
- 5 Verteilung und Korrelationen zwischen Signalen verstanden, wobei ein Signal die Anregung repräsentiert und das oder die anderen Signale ein Antwortverhalten. Allgemein kann die Charakteristik der Schwingungen auch durch die zeitabhängige Intensität der verschiedenen Frequenzen des vorkommenden Frequenzspektrums dargestellt werden, etwa nach einer Impulsanregung.
- 10
- Ferner kann zum Beispiel auch anhand der Charakteristik von Schwingungen eine Information über den Betriebszustand der Maschine gewonnen werden, beispielsweise ob sich ein xy-Tisch in einer bestimmten Position befindet, etwa einer Übergabeposition für ein Substrat, oder ob er noch in Bewegung ist. So kann sich durch die Position des Tisches das Schwingungsspektrum
- 15 ändern. Auch können bestimmte Schwingungsmuster auf spezifische Betriebszustände oder Fehler, wie etwa eine defekte Vakuumpumpe hinweisen.
- Weiterhin kann anhand der Charakteristik der Schwingungen eine Information über den Verschleiß / oder den Wartungszustand der Maschine erhalten werden. Diese Informationen
- 20 können auch der Maschinen-Steuerungssoftware oder dem Bedienpersonal zur Verfügung gestellt werden.
- Dabei können auch die aktuellen Betriebszustände der gelagerten Last berücksichtigt werden, beispielsweise Ruhezustand, Beschleunigung oder Bewegung eines xy-Tisches.
- 25
- Weitere messbare Einflussgrößen für die Leistungsfähigkeit der Maschine sind beispielweise auch die Schwingungen der Umgebung, etwa der Boden, insbesondere am Aufstellort, oder vorhandene elektromagnetische Felder, oder die Temperatur.
- 30
- Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist es daher, mittels der Sensoren eines Schwingungsisolationsystems gewonnene Informationen nicht nur direkt für die Schwingungsisolierung, also die Ansteuerung der Aktoren zur Schwingungsreduzierung, sondern

auch für weitere Analysen über die Leistungsfähigkeit des Schwingungsisolationssystems und/oder der darauf gelagerten Last heranzuziehen und auf diese Weise eine Leistungsanalyse durchzuführen, welche eine Diagnose ermöglicht.

- 5 Es ist gemäß einer Ausführungsform der Erfindung auch vorgesehen, diese Informationen zum Beispiel für die Steuerung und Regelung des Schwingungsisolationssystems und/oder der darauf gelagerten Last, bzw. der Maschine oder des Gerätes, oder weiterer Systemkomponenten wie z.B. einer Vakuumpumpe, zu nutzen.
- 10 Die Auswertung der Messwerte kann dabei sehr komplex werden. Bei Daten betreffend die Schwingungen können beispielsweise verschiedene Frequenzen mit verschiedenen Amplituden auftreten, welche unter anderem im Zeitbereich, im Frequenzbereich oder in einem Spektrum dargestellt werden können. Weitere einzubeziehende Umgebungsbedingungen oder Maschinenzustände erhöhen die Komplexität zusätzlich.
- 15 Zur Auswertung bzw. Leistungsanalyse können zwar regelbasierte, rechnerunterstützte Verfahren und Methoden verwendet werden. Hierbei können bestimmte Regeln definiert sein, welche auf Basis der Messwerte oder Daten eine Ausgangsinformation erzeugen können. Ein Beispiel für eine einfache Regel ist, dass eine Maschine nicht mehr in der Spezifikation arbeitet, wenn die
- 20 Amplitude einer Schwingung einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet.
- Von daher können analytische, statistische oder andere mathematische Methoden eingesetzt werden, welche nach zu definierenden analytischen oder statistischen Regeln die gewünschte Information erzeugen. Diese Regeln werden dabei im Allgemeinen manuell erzeugt.
- 25 Damit können Informationen für eine einfache Leistungsanalyse gewonnen werden, welche zum Beispiel Informationen zu nachfolgenden Aspekten umfassen können:
- Erdbeben oder Floor-Vibration,
 - 30 – „Windowing function“: ist der xy-Tisch an der Position zu einer Übergabe,
 - Überwachung von Vibrationsleveln nach Grenzwerten.

Statistische oder andere regelbasierte Methoden, welche es erforderlich machen, dass manuell Regeln erzeugt werden und hinterlegt werden, nach welchen die gewünschten Informationen aus den Eingangsdaten erzeugt werden, stoßen dann an Grenzen, wenn die Eingangsdaten zu komplex werden oder voneinander abhängen oder.

5

Beispielsweise kann es vorkommen, dass eine Schwingung bzw. eine Beschleunigung einen Grenzwert überschreiten darf, wenn dies in einem bestimmten Betriebszustand einer Maschine als gelagerte Last erfolgt, bei welchem dieses kurzfristige Überschreiten für die Leistungsfähigkeit nicht oder kaum relevant ist, und/oder wenn es gleichzeitig kompensierende Einflüsse auf die Maschine gibt, und/oder wenn das Überschreiten nicht gehäuft auftritt. Eine manuelle Definition von Regeln für solche komplexen Zusammenhänge ist nicht nur sehr aufwendig, sondern auch sehr fehleranfällig bzw. bei komplexen Zusammenhängen auch gar nicht oder zumindest nicht zuverlässig möglich.

10

Erfindungsgemäß ist daher eine rechnerunterstützte Leistungsanalyse auf Basis künstlicher neuronaler Netzwerke vorgesehen, welche anstelle von festen Regeln trainiert werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, wesentlich mehr Informationen über die Leistung des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last zu gewinnen und für die Steuerung und Regelung zur Verfügung zu stellen.

20

In einem Aspekt der Erfindung wird demnach ein Schwingungsisolationssystem zur Verfügung gestellt, welches Methoden oder Verfahren der künstlichen Intelligenz verwendet, vorzugsweise künstliche neuronale Netzwerke, zur Leistungsanalyse des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last.

25

Die aus den Messwerte gewonnenen Eingangsdaten können das Schwingungsisolationssystem als solches, die gelagerte Last oder auch andere Informationen betreffen. Diese Eingangsdaten können dabei einzeln, oder auch in Kombinationen verwendet werden. Zur Diagnose können die Informationen klassifiziert werden, sowohl einzeln als auch in Kombinationen.

30

Zum Erfassen der gewünschten Messwerte können geeignete Sensoren entsprechend ausgewählt und zur Verfügung gestellt werden. Sofern nachfolgende bestimmte Sensoren genannt sind, so stellt dies nur eine Auswahl dar und ist nicht als abschließend zu betrachten.

- 5 Die Eingangsdaten können beispielsweise das Schwingungsverhalten des Schwingungsisolationssystems betreffen, umfassend die Signalverteilung im Frequenzspektrum – Veränderungen im Frequenzbereich - sowie das Impuls- und Abkling-Verhalten – Veränderungen im Zeitbereich. Geeignete Sensoren können beispielsweise Beschleunigungssensoren umfassen, vorzugsweise zur Messung in drei Raumrichtungen.
- 10 Zum Erfassen der zugrundeliegenden Messwerte können die Sensoren in oder an dem Schwingungsisolationssystem vorgesehen sein, und beispielsweise das Schwingungsverhalten in einer Richtung, oder in mehreren Richtungen messen. Vorzugsweise werden Sensoren mit einem Freiheitsgrad verwendet. Durch Verwendung mehrerer solcher Sensoren können dann
- 15 auch entsprechend mehrere, beispielsweise bis zu sechs Freiheitsgrade, beziehungsweise Schwingungsrichtungen erfasst werden. Gemäß einer anderen Ausführungsform können aber auch ein oder mehrere Sensoren verwendet werden, welche in mehr als nur einer Richtung bzw. in mehr als einem Freiheitsgrad messen können.
- 20 Die Sensoren können hierzu nicht nur in oder an dem Schwingungsisolationssystem, oder auch an der gelagerten Last angeordnet sein, beispielsweise an oder in einer gelagerten Maschine oder an oder in einem gelagerten Gerät. Sofern die gelagerte Last eine Platte umfasst, kann es gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung auch vorteilhaft sein, die Sensoren dieser Platte zuzuordnen.
- 25 Weiterhin können die Sensoren auch an oder in weiteren zugeordneten Komponenten angeordnet sein, beispielsweise an einem xy-Tisch, an einem optischen Element, an einer Verkleidung, an einer Vakuumpumpe, oder an einer anderen Komponente des Schwingungsisolationssystems.
- 30 Die Eingangsdaten können ferner auch Betriebszustände („An“, „Aus“, „in Ruhe“, „im Prozess“, „Service“, „Störung“) des Schwingungsisolationssystems und/oder einzelner Komponenten der

gelagerten Last umfassen. Auf diese Weise können Informationen betreffend Stillstand oder Betrieb der Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last, eine mögliche Beschleunigung, ein Verfahren eines xy-Tisches, oder zu den Betriebszuständen einer Komponente gewonnen werden, beispielsweise einer Vakuumpumpe. Hierzu können
5 beispielsweise optische Sensoren, Ultraschall-Sensoren oder Abstands-Sensoren vorgesehen sein.

Weitere Sensoren können der Umgebung des Schwingungsisolationssystems zugeordnet sein, beispielsweise dem Boden bzw. dem Aufstellort, oder auch der Umgebung, beispielsweise
10 anderen Bauteilen in der Umgebung des Schwingungsisolationssystems. Insbesondere bietet es sich an, hierzu Bauteile auszuwählen, welche Schwingungen an das Schwingungsisolationssystem und/oder an die gelagerte Last übertragen können.

Weiterhin kann es hilfreich sein, die am Aufstellort des Schwingungsisolationssystems
15 vorherrschende Stärke und spektrale Zusammensetzung elektromagnetischer Felder zu erfassen, welche ebenfalls die Leistungsfähigkeit des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last beeinträchtigen können. Im Sinne der Erfindung können also auch ganz andere als Schwingungsinformationen zur Ermittlung von Leistungsdaten der Maschine verwendet werden. Zum Beispiel kann anstelle eines Spektrums eines Magnetfeldes auch
20 ermittelt werden, ob die Maschine mit diesem Magnetfeld noch in Spec, also innerhalb der zugelassenen Toleranzen arbeitet. Es kann auch eine Kombination eines Magnetfelds mit Schwingungsdaten dazu verwendet werden. Dies wird zwar immer komplexer, aber genau das ist der Vorteil der hier beschriebenen Vorrichtung, deren Stärke darin liegt, komplexe Zusammenhänge zu verarbeiten. Vielfach ist die Leistungsfähigkeit der gelagerten Last von
25 verschiedenen Umweltgrößen - z.B. Magnetfeld - abhängig. Durch die Erfassung von verschiedenen Signalen kann auch der Effekt von Kombinationen von verschiedenen Störeinflüssen auf die Leistungsfähigkeit der Maschine berücksichtigt werden. Zur Messung elektromagnetischer Felder können Magnetfeldsensoren oder Fluxgate-Magnetometer bzw. Saturationskern-Magnetometer vorgesehen sein.

30 Weiterhin kann es günstig sein, die Stärke von am Aufstellort vorhandenen akustischen Feldern zu erfassen. Hier gelten ähnliche Vorteile, wie bei den vorstehend beschriebenen

Ausführungsformen mit der Erfassung von Magnetfeldern. Vielfach ist die Leistungsfähigkeit der gelagerten Last von verschiedenen Umweltgrößen - z.B. Schalldruck - abhängig. Durch die Erfassung von verschiedenen Signalen kann auch der Effekt von Kombinationen von verschiedenen Störeinflüssen auf die Leistungsfähigkeit der Maschine berücksichtigt werden.

5 Hierzu können beispielsweise Drucksensoren und Mikrophone vorgesehen sein.

Ferner kann es aus den gleichen Gründen auch von Vorteil sein, Informationen zu der Temperatur am Aufstellort, und/oder an Komponenten des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last zu gewinnen. Hierzu können entsprechende Thermoelemente

10 vorgesehen sein.

Vielfach ist die Leistungsfähigkeit der gelagerten Last von verschiedenen Umweltgrößen - z.B. Temperatur - abhängig. Durch die Erfassung von verschiedenen Signalen kann auch der Effekt von Kombinationen von verschiedenen Störeinflüssen auf die Leistungsfähigkeit der Maschine berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann es möglich sein, fehlerhafte Betriebszustände des Schwingungsisolationssystems oder der gelagerten Last zu erkennen, beispielsweise ein Überhitzen einer fehlerhaften Komponente, oder Betriebszustände zu erkennen, bei welchen ein regulärer Betrieb nicht mehr möglich ist, beispielsweise bei optischen Messungen.

20 Anhand der vorstehend beschriebenen Meßgrößen ist ersichtlich, dass beliebige Korrelationen beliebiger Eingangsgrößen im Bezug auf Leistungsdaten der Maschine ermittelt werden können, sofern sie vorhanden sind und messbar sind. Ohne Beschränkung auf bestimmte Meßgrößen und deren Sensoren ist daher in einer Weiterbildung der Erfindung vorgesehen, dass das Schwingungsisolationssystem eingerichtet ist, aus Eingangsdaten von mehreren Sensoren, die unterschiedliche Meßgrößen erfassen, eine Klassifikation des Zustands der Leistung einer mit dem Schwingungsisolationssystem gelagerten Vorrichtung anhand einer Korrelation der

25 Eingangsdaten der mehreren Sensoren durchzuführen.

Im Sinne der Erfindung kann auf Basis der Eingangsdaten mittels der rechnerunterstützten

30 Verfahren, insbesondere mit Unterstützung künstlicher neuronaler Netzwerke, eine Leistungsanalyse durchgeführt werden, um die Leistung des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last zu klassifizieren.

- Die Klassifizierung kann zum Beispiel die Ausprägungen „gut“ oder „schlecht“ umfassen. Die Diagnose kann auf Basis dieser Leistungsanalyse zum Beispiel die Auswertung „Betrieb möglich“ oder „Betrieb nicht möglich“ liefern. Eine Klassifikation als „gut“ oder „schlecht“ kann beispielsweise auch auf den Durchsatz einer mit dem Schwingungsisolationsystem gelagerten
- 5 Vorrichtung beziehen. Sind die Ausschwingzeiten nach einer Bewegung der Vorrichtung zu lang und ist der von der Vorrichtung ausgeführte Prozess davon abhängig, ob die Vorrichtung sich in Ruhe befindet, führt ein ungünstiges Schwingungsspektrum zu Haltezeiten und damit zu einer Verlangsamung der Produktion oder Messung. Nimmt der Prozess auf Schwingungen hingegen keine direkte Rücksicht, können die Schwingungen aber wiederum die Messgenauigkeit oder
- 10 Produktionsgenauigkeit beeinflussen. Auch diesbezüglich kann der Zustand des Schwingungsisolationsystems als beispielsweise „gut“, „akzeptabel“, oder „schlecht“ klassifiziert werden. Weitere Diagnosen könnten sein „Betrieb möglich mit Einschränkungen“, oder „Betrieb möglich mit Änderungen der Steuerung oder Regelung einer Komponente“.
- 15 Die Diagnose kann somit zum Beispiel die Einstellung oder die Justage des Schwingungsisolationsystems selbst betreffen, wobei als Referenzwert beispielsweise die Spezifikation des Schwingungsisolationsystems herangezogen werden kann. Die Klassifizierung „gut“ kann bedeuten, dass das Schwingungsisolationsystem innerhalb der Spezifikation arbeitet („Betrieb möglich“).
- 20 In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung kann die gelagerte Last analysiert werden, beispielsweise dahingehend, ob eine gelagerte Maschine oder ein gelagertes Gerät innerhalb der Spezifikation arbeitet oder arbeiten kann („gut“) oder nicht („schlecht“). Auch hier kann die Spezifikation der Maschine oder des Gerätes als klassifizierendes Kriterium herangezogen
- 25 werden. Als Eingangsinformation können alle oben beschriebenen Signale als klassifizierendes Kriterium verwendet werden, beispielsweise die Spezifikation der Umgebung, wie Floor-Vibration-Level, oder auch elektromagnetische oder akustische Umgebungsbedingungen und andere Schwingungsdaten, wobei die verschiedenen Daten zur Klassifikation auch kombiniert werden können.
- 30 Erfindungsgemäß können für die Erzeugung der Ausgangsdaten aus den Eingangsdaten rechnerunterstützte Verfahren, vorzugsweise umfassend oder auf der Basis künstlicher

neuronaler Netzwerke, verwendet werden. Zur Aufbereitung der Messwerte oder zur Erzeugung der Eingangsdaten können geeignete Verfahren der Datenaufbereitung oder -verarbeitung zum Einsatz kommen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

- 5 Für die erfindungsgemäße Leistungsanalyse können unterschiedliche Konfigurationen von neuronalen Netzwerken für maschinelles Lernen verwendet werden.

- In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung kann das künstliche neuronale Netzwerk mindestens ein Modell ausbilden, welches mindestens eine Faltungsebene (Convolutional Layer) und/oder mindestens eine Neuronenebene (Neuronaler Layer) umfasst. Dabei kann es weiterhin vorzugsweise zumindest einen der folgenden zusätzlichen Bestandteile umfassen: einen Aktivierungs-Layer, einen Pooling-Layer, einen Flatten-Layer, und/oder einen Drop-Layer. Von Vorteil umfasst das künstliche neuronale Netz Daten zur Gewichtung von mindestens einem, bevorzugt mehreren und besonders bevorzugt allen gewichtbaren Bestandteilen des Modelles.
- 10
- 15 Diese Gewichtung kann dabei besonders einfach durch einen Trainingsvorgang bestimmt werden.

Mögliche Layer eines geeigneten künstlichen neuronalen Netzwerkes sollen hier kurz umrissen werden:

- 20
- Input Layer: hier wird das Spektrogramm in das Netzwerk eingelesen
 - Faltungsebene bzw. Convolutional Layer(s): Es ist eine Vielzahl von Konfigurationen möglich (z.B. betreffend die Anzahl der Layer, die Anzahl und Größe der Filter, die Aktivierungsfunktionen, MaxPooling-Funktionen),
 - 25 - Flatten Layer: Umwandlung des 3-dimensionalen Ergebnisses des letzten Convolutional-Layers in ein eindimensionales Format zur Übergabe an die Neuronalen Layer
 - Neuronaler Layer: Es ist eine Vielzahl von Konfigurationen möglich (z.B. betreffend Anzahl der Layer, die Anzahl der Neuronen, die Aktivierungsfunktionen, Dropouts. Es ist in bestimmten Fällen auch möglich, ganz auf die Neuronalen Layer zu verzichten (betrifft auch den
 - 30 Klassifikationslayer). In solch einem Fall kann die Klassifikation auch durch einen Convolution-Layer erzeugt werden.

- Neuronaler Layer zur Klassifikation: die Neuronen stehen für die gewünschten Klassen, z.B. zwei Neuronen für die Klassen „gut“ und „schlecht“. Im Lernprozess werden die Parameter des Netzwerkes durch iterativen Soll-Ist-Vergleich der erzeugten Klassifizierung optimiert, in der Anwendung der Klassifikation werden diese Parameter dann angewendet. Eine Softmax-Aktivierung zur Erzeugung eines Float-Wertes kann eingesetzt werden, zur Darstellung der Klassenzugehörigkeit des Spektrogramms zu den beiden Klassen „gut“ und „schlecht“.

Der Lernvorgang solch künstlicher neuronaler Netzwerke wird oft auch als selbstadaptiver Algorithmus oder als „Maschine Learning“ verstanden. Wenn eine Reihe von Hierarchieebenen bzw. „Layer“ verwendet wird, so wird dies auch als „Deep-Learning“ bezeichnet, wobei die dafür erforderliche Anzahl der „Layer“ nicht genau definiert ist.

Am Beispiel von Eingangsdaten, welche das Schwingungsverhalten des Schwingungsisolationssystems betreffen, soll das Trainieren bzw. Lernen des künstlichen neuronalen Netzes kurz umrissen werden.

Als Messgröße soll die Frequenz der Schwingung des Schwingungsisolationssystems dienen, welche mittels geeigneter Sensoren aufgenommen werden und als Spektrogramme die Eingangsgröße für das künstliche neuronale Netzwerk darstellen. Jedes Spektrogramm kann für einen als „gut“ oder „schlecht“ zu bewertenden Vorgang stehen, sofern diese zwei Klassen zur Analyse gebildet werden sollen. Anschließend erfolgt das sogenannte „Labeling“, also die Zuweisung der Spektrogramme zu den Klassen „gut“ oder „schlecht“.

Die Erzeugung von Varianzen kann mittels Augmentierung der Spektrogramme, also einer Veränderung bzw. Transformation der Datensätze, erfolgen, d.h. es werden – vorzugsweise ebenfalls rechnerunterstützt – bewusste Abweichungen der Spektrogramme bzw. Eingangsgrößen erzeugt, um die Anzahl an verschiedenen Trainings-Datensätzen zu vergrößern.

Auf diese Weise, also durch Aufzeichnen einer Vielzahl von Positionierungssequenzen, und eventuell Augmentierungen kann eine Vielzahl von Spektrogrammen generiert werden, mit welchen das verwendete künstliche neuronale Netzwerk trainiert werden kann. Die Spektrogramme werden dazu den vorgesehenen Kategorien bzw. Klassen zugeordnet. Die

Zuordnung kann gemäß einer Ausführungsform der Erfindung auch automatisch rechnerunterstützt erfolgen.

5 Für eine gute Leistungsanalyse und Diagnose ist es hilfreich, wenn genügend Spektrogramme in den entsprechenden Klassen zur Verfügung stehen. In bestimmten Fällen können 10 bis 100 Eingangsdatensätze, beispielsweise Spektrogramme, pro Klasse bereits ausreichen, besser aber sind z.B. ca. 1.000 oder sogar 10.000 oder mehr Datensätze pro Klasse vorgesehen, um die Qualität der Leistungsanalyse zu verbessern und zu erhöhen.

10 Das künstliche neuronale Netzwerk wird erstellt, zum Beispiel ein Convolutional Netzwerk wie weiter oben beschrieben. In dem diskutierten Beispiel kann das künstliche neuronale Netzwerk über zwei Ausgangsneuronen verfügen, welche für die beiden definierten Klassen „gut“ und „schlecht“ stehen. Auf diese Weise kann ein Lernen erfolgen. Das Anlernen eines künstlichen neuronalen Netzwerkes ist dem Fachmann allgemein bekannt und soll daher an dieser Stelle
15 nicht weiter ausgeführt werden. Als Ergebnis wird das sogenannte „Weights-File“ erzeugt, welches die Parametrisierung der einzelnen Elemente und Verbindungen des CNN-Netzwerkes enthält.

Es versteht sich, dass das vorstehend ausgeführte Anlern-Verfahren nur ein Beispiel darstellt und
20 sowohl die Anzahl und die Art der Klassen als auch die Eingangsgrößen abweichend ausgeprägt sein können und auch andere Architekturen des künstlichen neuronalen Netzwerkes, sowie auch weitere Eingangsdaten verwendet werden können.

So sind beispielsweise auch 4-dimensionale Eingangsinformationen verwendbar, in welchen die vierte Dimension beispielsweise eine Zeitachse sein kann, entlang der beispielsweise dann die
25 Zeitpunkte für verschiedene Spektrogrammen liegen.

Es versteht sich weiterhin, dass im regulären Betrieb des Schwingungsisolationssystems vorzugsweise ein bereits trainiertes oder angelerntes künstliches neuronales Netz verwendet wird.

30

In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das künstliche neuronale Netzwerk im regulären Betrieb des Schwingungsisolationssystems angelernt bzw.

weiter trainiert werden kann. Dies bietet den Vorteil, dass das erfindungsgemäße Schwingungsisolationssystem einfach an die am Aufstellort vorherrschenden Bedingungen angepasst werden kann.

- 5 In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das künstliche neuronale Netzwerk angelernete Daten aus einem vorangegangenen Lernvorgang oder auch einer sonstigen externen Quelle verwendet.

- 10 Durch die Leistungsanalyse können Informationen oder Ausgangsdaten, zum Beispiel Steuerparameter zur Steuerung oder Regelung des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last, generiert werden. Ein wichtiger Aspekt der Erfindung ist daher darin zu sehen, dass diese Steuerparameter direkt oder indirekt zur Steuerung oder Regelung des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last verwendet werden können.

- 15 Mit von der Erfindung umfasst ist demnach auch ein Verfahren zur Steuerung oder Regelung eines Schwingungsisolationssystems, wobei im Betrieb im Rahmen einer Leistungsanalyse wie vorstehend beschrieben Steuerparameter zur Steuerung des Schwingungsisolationssystems gewonnen und genutzt werden. Auf diese Weise kann ein selbst-lernendes Schwingungsisolationssystem zur Verfügung gestellt werden, welches zum Beispiel auf
20 Veränderungen in der Umgebung, etwa auftretende Schwingungen über den Boden, reagieren kann.

- Das Schwingungsisolationssystem kann ein aktives, stationäres Schwingungsisolationssystem umfassen, wie es vorstehend beschrieben wurde. Dabei kann über eine Mehrzahl von
25 Schwingungsisolatoren eine schwingungsisoliert gelagerte Last abgestützt werden, und es kann über eine Mehrzahl von Aktoren Schwingungen aktiv entgegengewirkt werden.

- Mit von der Erfindung umfasst ist in einem weiteren Aspekt ein Verfahren zur Diagnose eines Schwingungsisolationssystems, umfassend ein Schwingungsisolationssystem wie vorstehend
30 beschrieben.

Ebenfalls mit von der Erfindung umfasst ist in einem nochmals weiteren Aspekt eine Bearbeitungsmaschine, insbesondere in der Halbleiterindustrie wie z.B. eine Maschine zur Prozessierung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten oder Elementen, insbesondere von Wafern, Masken oder Displays, ein Lithographiegerät, oder eine
5 Messeinrichtung oder -gerät, insbesondere zur Vermessung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten, wie z.B. ein Elektronenstrahlmikroskop, oder ein anderes empfindliches Gerät, eine Maschine oder Anlage, beispielsweise ein Laborgerät oder ein medizinisches Gerät, etwa ein bildgebendes Untersuchungsgerät wie ein Magnetresonanztomograph (MRT), umfassend ein Schwingungsisolationssystem wie vorstehend
10 beschrieben.

Das Verfahren kann eine Analyse der Leistungsfähigkeit des Schwingungsisolationssystems ermöglichen, aber auch der gelagerten Last.

15 Weitere Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung der dargestellten Ausführungsbeispiele und den angefügten Ansprüchen.

Die Zeichnungen zeigen:

20

Fig. 1 in einer schematischen Draufsicht den grundsätzlichen Aufbau eines stationären Schwingungsisolationssystems,

25

Fig. 2 schematisch an einem Beispiel den Aufbau die Verwendung eines künstlichen neuronalen Netzwerkes mit maschinellen Lernen für die Auswertung von Eingangsdaten,

30

Fig. 3 schematisch einen möglichen Aufbau eines geeigneten künstlichen neuronalen Netzwerkes,

Fig. 4 schematisch einen Ablauf zum Anlernen eines künstlichen neuronalen Netzwerkes,

- Fig. 5 das Schwingungsverhalten eines xy-Tisches in den drei Richtungen eines kartesischen Koordinatensystems bei verschiedenen Betriebsphasen,
- 5 Fig. 6 beispielhaft ein Spektrogramm,
- Fig. 7 beispielhaft den Ablauf des Anlernens eines künstlichen neuronalen Netzwerkes anhand von Spektrogrammen gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel,
- 10 Fig. 8 beispielhaft den Ablauf der Klassifizierung anhand von im regulären Betrieb gewonnenen Spektrogrammen gemäß dem Ausführungsbeispiel aus Fig. 7,
- Fig. 9 beispielhaft ein Spektrogramme gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel,
- 15 Fig. 10 beispielhaft den Ablauf des Anlernens eines künstlichen neuronalen Netzwerkes anhand von Spektrogrammen gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel,
- Fig. 11 beispielhaft den Ablauf der Klassifizierung anhand von im regulären Betrieb gewonnenen Spektrogrammen gemäß dem Ausführungsbeispiel aus Fig. 10,
- 20 Fig. 12 beispielhaft Eingangsdaten gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel,
- Fig. 13 beispielhaft den Ablauf des Anlernens eines künstlichen neuronalen Netzwerkes anhand von Eingangsdaten gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel,
- 25 Fig. 14 beispielhaft den Ablauf der Klassifizierung gemäß dem Ausführungsbeispiel aus Fig. 13,
- Fig. 15 beispielhaft Eingangsdaten gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel,
- 30 Fig. 16 beispielhaft den Ablauf des Anlernens eines künstlichen neuronalen Netzwerkes anhand von Eingangsdaten gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel,

- Fig. 17 beispielhaft den Ablauf der Klassifizierung gemäß dem Ausführungsbeispiel aus Fig. 15, und
- 5 Fig. 18 schematisch ein Ablauf zur Anpassung eines künstlichen neuronalen Netzwerkes.

Detaillierte Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen

Bei der nachfolgenden detaillierten Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen bezeichnen
5 um der Klarheit willen gleiche Bezugszeichen im Wesentlichen gleiche Teile in oder an diesen
Ausführungsformen. Zur besseren Verdeutlichung der Erfindung sind die in den Figuren
dargestellten bevorzugten Ausführungsformen jedoch nicht immer maßstabsgerecht gezeichnet.

Fig. 1 zeigt in einer schematischen Draufsicht den grundsätzlichen Aufbau eines
10 Schwingungsisolationsystems 1. Das ebenfalls schematisch dargestellte
Schwingungsisolationsystem 1 umfasst eine Mehrzahl von Schwingungsisolatoren 2a - 2d,
welche eine Feder umfassen und eine schwingungs isoliert gelagerte Last 4 abstützen. Die
gelagerte Last 4 kann mittels eine Dreipunkt-Lagerung über drei, aber auch über vier
Schwingungsisolatoren 2a-2d, wie im Beispiel der Fig. 1 gezeigt, gelagert werden.

15 Die gelagerte Last 4 umfasst in dem gezeigten Beispiel nur die Platte; eine schwingungs isoliert
gelagerte Maschine oder Gerät ist der Übersichtlichkeit halber nicht eingezeichnet. In anderen
Worten, im regulären Betrieb umfasst die gelagerte Last typischerweise neben der Platte die
schwingungs isoliert zu lagernde Maschine oder das schwingungs isoliert zu lagernde Gerät.

20 Die gelagerte Last 4 kann dabei zum Beispiel Bearbeitungsmaschinen oder Teile solcher
Maschinen, insbesondere in der Halbleiterindustrie wie z.B. Maschinen zur Prozessierung von
Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten oder Elementen, insbesondere
von Wafern, Masken oder Displays, Lithographiegeräte, oder Messeinrichtungen oder -geräte,
25 insbesondere zur Vermessung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten
Substraten, wie z.B. ein Elektronenstrahlmikroskop, oder andere empfindliche Geräte, Maschinen
oder Anlagen, beispielsweise Laborgeräte oder medizinische Geräte, etwa bildgebenden
Untersuchungsgeräte wie Magnetresonanztomographen (MRT), umfassen.

30 Jeder der Schwingungsisolatoren 2a - 2d umfasst Aktoren 5a - 5d sowie Sensoren 6a - 6d. Über
die Sensoren 6a - 6d werden Schwingungen der schwingungs isoliert gelagerten Last 4 und/oder
der mit dem Boden gekoppelten Basis des Schwingungsisolators erfasst. Die Sensoren 6a - 6d

sind, wie auch die Aktoren 5a - 5d, mit einer Recheneinrichtung 3 verbunden, welche im Beispiel zentral ausgebildet ist. Anhand der Signale der Sensoren 6a - 6d errechnet die Recheneinrichtung 3 Kompensationssignale zur Ansteuerung der Aktoren 5a - 5d. Die Recheneinrichtung 3 fungiert in diesem Fall demnach auch als Steuereinheit.

5

Die Schwingungsisolatoren 2a - 2d sind vorzugsweise, wie im Ausführungsbeispiel, sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung wirksam. Die Schwingungsisolatoren 2a - 2d können dazu eine Feder, insbesondere eine pneumatische Feder, umfassen. Sensoren, Feder und Aktoren können integrierte Bestandteile eines derartigen Schwingungsisolators sein oder auch als separate Einheiten ausgebildet sein. Im letzteren Fall bilden die separaten, insbesondere räumlich benachbarten Einheiten von Sensoren, Feder und Aktoren zusammen eine logische Einheit, die die Funktion eines aktiven Schwingungsisolators hat, der nicht nur als passive Feder wirksam ist, sondern der aktiv Schwingungen entgegen wirkt.

10

15

Das erfindungsgemäße Schwingungsisolationssystem 1 umfasst eine Mehrzahl von Aktoren, mittels derer Schwingungen aktiv durch Erzeugung von an der schwingungsisoliert gelagerten Last angreifenden Kräften entgegengewirkt wird. Die Aktoren können insbesondere als Magnetaktoren, wie im Ausführungsbeispiel, oder als pneumatische Aktoren ausgebildet sein. Steuerparameter zur Steuerung oder Regelung des Schwingungsisolationssystem 1 können in Form von Steuersignalen über einen Digital-Analog-Wandler (nicht dargestellt) beispielsweise in einen Strom umgewandelt werden, um die Magnetaktoren anzusteuern.

20

25

Die Recheneinrichtung 3 ist dazu eingerichtet, ein Programm abzuarbeiten, mittels welchem unter Berücksichtigung der Messwerte der Sensoren die Steuersignale erzeugt werden, um die Kompensationskräfte zu generieren. Die Steuersignale sind Signale, die der Ansteuerung der Aktoren auf Basis der Sensorsignale und der Erzeugung von Gegenkräften dienen. Vorzugsweise werden über die Aktoren in dem Isolator jeweils Kompensationskräfte in zumindest zwei, besonders bevorzugt zumindest drei Freiheitsgraden erzeugt.

30

Das in Fig. 1 abgebildete Schwingungsisolationssystem 1 umfasst gemäß einer bevorzugten Ausführungsform Aktoren 5a-5d, über die Kompensationskräfte in drei

Translationsfreiheitsgraden gemäß den drei Raumrichtungen x, y und z und/oder in drei Rotationsfreiheitsgraden erzeugt werden können.

Das erfindungsgemäße Schwingungsisolationssystem 1 kann als stationäres, aktives
5 Schwingungsisolationssystem ausgebildet, was bedeutet, dass es im Betrieb fest auf einer vorgesehenen Aufstellfläche steht und auftretenden Schwingungen, welche etwa über den Boden eingetragen werden können, aktiv entgegenwirken kann. In einer anderen Ausführungsform ist das Schwingungsisolationssystem passiv aufgebaut. In diesem Fall ist die Recheneinrichtung insbesondere dazu ausgebildet, anhand der Eingangsdaten des oder der Sensoren den Zustand
10 des Systems mit der gelagerten Last hinsichtlich des Betriebszustands anhand der Leistungsanalyse zu überwachen.

Dabei werden die Messwerte der Sensoren als Eingangsdaten dem rechnerunterstützten Verfahren, welches als Programm in der Recheneinrichtung 3 hinterlegt ist, zur Verfügung
15 gestellt und nicht nur zur Schwingungsdämpfung, sondern auch für eine Leistungsanalyse des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4 genutzt. Somit können Leistungsdaten des Schwingungsisolationssystems 1 oder der gelagerten Last 4 gewonnen werden.

20 Die Sensoren 5a-5d sind eingerichtet, um im Betrieb eine Vielzahl von Informationen oder Messwerte betreffend das Schwingungsisolationssystem 1 und/oder die gelagerte Last 4 oder auch die Umgebung, beispielsweise die Aufstellfläche, aufzunehmen, um im Rahmen einer Diagnose eine Leistungsanalyse des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4 zu ermöglichen. In dem abgebildeten Ausführungsbeispiel sind der Einfachheit halber nur
25 die Sensoren 5a-5d dargestellt, welche der Platte zugeordnet sind. Weitere Sensoren können einem gelagerten Gerät oder einer gelagerten Maschine, und/oder der Umgebung, beispielsweise dem Boden bzw. der Aufstellfläche, der Wand, der Decke o.ä. zugeordnet sein.

Erfindungsgemäß ist eine rechnerunterstützte Leistungsanalyse auf Basis künstlicher neuronaler
30 Netzwerke vorgesehen, welche anstelle von festen Regeln trainiert werden kann. In Fig. 1 ist allein zur Veranschaulichung ein künstliches neuronales Netzwerk 10 schematisch als Bestandteil der Recheneinrichtung 3, insbesondere ausgebildet als Steuereinheit eingezeichnet.

Die Erfindung stellt demnach ein Schwingungsisolationssystem 1 zur Verfügung, welches Methoden der künstlichen Intelligenz verwendet, insbesondere künstliche neuronale Netzwerke, zur Leistungsanalyse und Diagnose des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4 verwendet.

5

Die aus den Messwerten der Sensoren gewonnenen Eingangsdaten können das Schwingungsisolationssystem 1 als solches, die gelagerte Last 4 oder auch andere Informationen betreffen. Diese Eingangsdaten können dabei einzeln, oder auch in Kombinationen verwendet werden. Zur Diagnose können die Informationen klassifiziert werden, sowohl einzeln als auch in

10

Kombinationen.

In der Ausführungsform der Fig. 1 umfassen die Eingangsdaten das Schwingungsverhalten der Platte. Hierzu können die Amplitude, die Periodendauer, die Frequenz und/oder das Frequenzspektrum der Platte gehören. Hierzu sind die Sensoren 5a-5d als

15

Beschleunigungssensoren ausgebildet. In einem Beispiel werden hier die Beschleunigungsdaten in x-Richtung des Beschleunigungssensors 6a des Isolators 2a verwendet.

Nachfolgend soll ein erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel des Schwingungsisolationssystems 1 angegeben werden, welches ausgebildet ist, um die Qualität der Einstellung bzw. die Justage des Schwingungsisolationssystems 1 in die Klassen „gut“ und „schlecht“ zu ermöglichen. Es versteht sich, dass diese zwei Klassen lediglich beispielhaft angegeben sind, und auch weitere Klassen, beispielsweise „mittel“, bzw. auch eine andere Klassifizierung möglich und angedacht ist. Als schwingungsisoliert gelagerte Last 4 soll für das Ausführungsbeispiel eine Platte mit einem xy-Tisch („stage“) angenommen werden. Dieser xy-Tisch ermöglicht eine Bewegung in den Raumrichtungen x und y.

20

25

Es ist dem Fachmann ersichtlich, dass der in den Ausführungsbeispielen angegebene xy-Tisch nur exemplarisch zur Veranschaulichung ausgewählt ist und selbstverständlich die zugrundeliegenden Prinzipien und Methoden auch für andere gelagerte Maschinen und Geräte

30

gelten.

- Fig. 2 verdeutlicht schematisch an einem Beispiel den Aufbau die Verwendung eines künstlichen neuronalen Netzwerkes mit maschinellen Lernen für die Auswertung von Eingangsdaten. Aus den Eingangsdaten, beispielsweise der Amplitude einer Schwingung über die Zeit oder eine die Schwingung repräsentierende Beschleunigung, kann mittels Datenaufbereitung ein
- 5 Spektrogramm erzeugt werden, im Beispiel der zeitliche Verlauf des Frequenzspektrums, welches in das künstliche neuronale Netzwerk eingegeben werden kann. Als Ausgangsdaten liegt eine Klassifikation, also eine Zuordnung des Spektrogramms in die Klassen „gut“ oder „schlecht“ vor.
- 10 Fig. 3 zeigt schematisch einen möglichen Aufbau eines geeigneten künstlichen neuronalen Netzwerkes. Mit den Ziffern sind die verschiedenen Ebenen bzw. Layer gekennzeichnet, welche der Einfachheit halber nachfolgend nur kurz genannt sein sollen.
- 15 (1) Input Layer
- (2) Faltungsebene bzw. Convolutional Layer(s)
- (3) Flatten Layer
- (4) Neuronaler Layer
- (5) Neuronaler Layer zur Klassifikation.
- 20 In einer geeigneten Ausführungsform der Erfindung bildet das künstliche neuronale Netzwerk mindestens ein Modell aus, welches mindestens eine Faltungsebene (Convolutional Layer) und/oder mindestens eine Neuronenebene (Neuronaler Layer) umfasst.
- 25 Das künstliche neuronale Netzwerk wird mit Daten, im Beispiel mit Spektrogrammen, zur Gewichtung von mindestens einem, bevorzugt mehreren und besonders bevorzugt allen gewichtbaren Bestandteilen des Modelles beaufschlagt. Diese Gewichtung kann dabei besonders einfach durch einen Trainingsvorgang bestimmt werden.
- 30 Fig. 4 zeigt schematisch einen geeigneten, möglichen Ablauf zum Anlernen eines künstlichen neuronalen Netzwerkes, wobei die Ausgangsdaten zwei Klassen umfassen. Der Ablauf umfasst die im Ablaufdiagramm mit den Bezugszeichen 101 bis 109 bezeichneten Schritte. In Schritt 101 wird eine Datenaufnahme durchgeführt. Schritt 102 ist die Datenverarbeitung. In Schritt 103 wird

ein Labelling der verarbeiteten Daten durchgeführt. Anschließend erfolgt in Schritt 104 eine Augmentierung, so dass ein Satz Training-Spektrogramme (Schritt 105) und ein Satz Test-Spektrogramme (Schritt 106) erhalten wird. Damit wird in Schritt 107 ein Netzwerk, beispielsweise ein CNN-Netzwerk erstellt. In Schritt 108 erfolgt dann das Lernen des neuronalen Netzwerks, woraufhin in Schritt 109 ein Gewichts-Vektor oder eine Gewichts-Datei erstellt wird. Die einzelnen Schritte sollen nachfolgend genauer in Bezug auf das Beispiel der Fig. 5 dargestellt werden:

- (1) Aufnahme von Schwingungsdaten, im Beispiel (Fig. 5) die Amplitude der Beschleunigung der gelagerten Last in der Raumrichtung x über die Zeit, ermittelt an einem Schwingungsisolator
- (2) Erzeugung der hier als Eingangsgröße für das Netzwerk verwendeten Spektrogramme. Im Beispiel steht jedes Spektrogramm für einen als „gut“ oder „schlecht“ zu bewertenden Vorgang.
- (3) Labeling, d.h. Zuweisung der Spektrogramme zu den definierten Klassen „gut“ oder „schlecht“.
- (4) Optional Erzeugung von Varianzen durch Augmentierung der Spektrogramme. Dies kann manuell, bevorzugt aber auch rechnerunterstützt erfolgen.
- (5) Das verwendete Netzwerk benötigt im Lernprozess Spektrogramme zum Lernen, Testen und Validieren. Die Spektrogramme werden dazu den zuvor definierten Klassen zugeordnet, diese Zuordnung kann jedoch auch automatisch programmgesteuert erfolgen. Es müssen genügend Spektrogramme für jede Klasse zur Verfügung stehen (z.B. 1.000, oder 10.000 pro Klasse).
- (6) Das Netzwerk wird erstellt, im Beispiel ein CNN-Netzwerk. Das Netzwerk hat zwei Ausgangsneuronen, für die beiden definierten Klassen („gut“, „schlecht“).
- (7) Der Lern-Vorgang wird durchgeführt.
- (8) Das Weights-File wird erzeugt, welches die Parametrisierung der einzelnen Elemente und Verbindungen des CNN-Netzwerkes enthält.

Fig. 5 zeigt exemplarisch das Schwingungsverhalten eines xy-Tisches („stage“) in den drei Raumrichtungen bei verschiedenen Betriebsphasen über einen Zyklus. Die obere Graphik zeigt die drei Amplituden des Schwingungsverhaltens in den drei Raumrichtungen x, y, z über die Zeit

während der verschiedenen Betriebsphasen, angefangen mit der durch den Beschleunigungssensor eines Schwingungsisolators gemessenen Beschleunigung in Raumrichtung x, y, z (es wird im Beispiel nur die Beschleunigung in x -Richtung verwendet) in der Ruhephase vor der Beschleunigung der Stage, gefolgt von der vom Sensor gemessenen Beschleunigung während der Beschleunigung der Stage, dann gefolgt von der vom Sensor gemessenen Beschleunigung in der gleichförmigen Bewegung der Stage, dann beim Abbremsen, sowie in der Ruhephase nach der Bewegung der Stage. Die untere Graphik zeigt die Beschleunigung der Stage in den Raumrichtungen x und y über die Zeit. Es ist zu erkennen, dass im dargestellten Beispiel eine Beschleunigung bzw. ein Abbremsen nur in Richtung y erfolgt, die Schwingungen, beziehungsweise Beschleunigungen in allen Raumrichtungen gemessen werden.

In dem Ausführungsbeispiel ist gut zu erkennen, dass sich jede der einzelnen Betriebsphasen oder Zyklen durch einen bestimmten Frequenzgang auszeichnet. Dieser Frequenzgang in seinen Eigenschaften (Frequenzen, Amplituden, zeitliche Abfolge) ist abhängig davon, ob die Maschine noch die erforderlichen Leistungsdaten liefert oder nicht. Weiterhin können auch andere Informationen gewonnen werden. Zum Beispiel ist es möglich, Fehler im System, welche sich auf den Frequenzgang auswirken, beispielsweise ein defektes Lager, zu erkennen, sofern sich dieses Lager auf den Frequenzgang auswirkt. Dieses defekte Lager kann dann zu einer Klassifikation „schlecht“ führen, bei entsprechender Auslegung des neuronalen Netzwerkes ist es sogar möglich, das betreffende Lager direkt als Fehlerquelle zu identifizieren.

Zum Anlernen wird eine ausreichend große Anzahl an Spektrogrammen erzeugt, wobei jeweils ein Spektrogramm einem vollständigen Durchlauf der vier Betriebsphasen entsprechend einem vollständigen Stage-Zyklus entspricht. Diese werden „gelabelt“, d.h. in die vorgesehenen Klassen („gut“/„schlecht“) eingeordnet.

In Fig. 6 ist hierzu rein beispielhaft ein Spektrogramm abgebildet. Das Spektrogramm kann dabei die Schwingungsdaten des xy -Tisches in einer der Raumrichtungen x , y oder z enthalten. Es ist aber auch möglich, die Schwingungen in allen drei Raumrichtungen x , y und z in einem Spektrogramm zu überlagern, wie es in dem Ausführungsbeispiel der Fig. 6 der Fall ist, wobei Fig. 6 allerdings nur das Spektrogramm in einer Raumrichtung darstellt.

Es ist weiterhin möglich, die Schwingungen in den Raumrichtungen x, y und z in getrennten Spektrogrammen darzustellen und zusammen in dem künstlichen neuronalen Netzwerk zu verarbeiten.

- 5 Es kann weiterhin auch das Schwingungsverhalten bezüglich der Rotationsachsen gemäß den Raumrichtungen x, y oder z erfasst und verarbeitet werden. Dadurch können mehr Informationen zur Klassifikation verwendet werden, was sinnvoll sein kann, und die Zuverlässigkeit der Klassifikation zu erhöhen. Zusätzliche Informationen erhöhen jedoch auch die Komplexität des neuronalen Netzwerkes, es ist deshalb sinnvoll, die letztlich zur Klassifikation „gut“ und „schlecht“
10 tatsächlich benötigten Informationen im konkreten Anwendungsfall festzulegen.

Die Schwingungsdaten können auch auf andere Weise dargestellt werden, beispielsweise über Darstellungen im Zeitbereich oder im Frequenzbereich. Auch dies wird für die hier dargestellten Ausführungsbeispiele und die folgenden angenommen.

- 15 Ein Spektrogramm, wie es beispielhaft in Fig. 6 dargestellt ist, stellt eine Sammlung einer Vielzahl von Messwerten dar. So beinhaltet das Spektrogramm Zeitverläufe für eine Vielzahl von Frequenzen, also auch die spektrale Zusammensetzung der auftretenden Schwingungen. In einer Leistungsanalyse wird diese Vielzahl der Messwerte, beziehungsweise deren Gesamtheit
20 bewertet und das Ergebnis in einem Ausgabewert ausgedrückt. Dieser kann eine Angabe einer Klasse sein, die beispielsweise den Betriebszustand als gut oder schlecht kennzeichnet. Nicht nur beim speziellen Beispiel eines Spektrogramms, sondern im Allgemeinen erfolgt die Bewertung der Messwerte in ihrer Gesamtheit im neuronalen Netz, was im typischerweise auch eine komplexe Wichtung und Verrechnung der Messwerte beinhaltet, um den Ausgabewert zu
25 erhalten.

- In dem in Fig. 7 dargestellten Ausführungsbeispiel soll ein künstliches neuronales Netzwerk angelernet werden, um aus Schwingungsdaten in Raumrichtung x eine Klassifikation in die Klassen „gut“ oder „schlecht“ zu erzeugen. Dazu sind rein beispielhaft jeweils drei
30 Spektrogramme aus Schwingungen jeweils in Raumrichtung x dargestellt, welche in die Klassen „gut“ oder „schlecht“ eingeordnet sind. Es versteht sich, dass in der Praxis nicht nur drei

Spektrogramme verwendet werden, sondern vorzugsweise ein Vielfaches hiervon, beispielsweise 100 oder mehr, oder auch 1.000 oder mehr.

- 5 Zur Klassifikation wird das im Anlernen erzeugte „Weights-File“, beziehungsweise die Gewichts-
Datei 13 in das Netzwerk 15 geladen, und die Spektrogramme, welche während des regulären
Betriebs des Schwingungsisolationssystems 1 gewonnen werden, beziehungsweise allgemeiner
die Messdaten 14, in das Netzwerk 15 gegeben, Fig. 8. Diese Daten werden dann klassifiziert,
also mindestens zwei Klassen 16, 17, vorzugsweise in Klassen „gut“ oder „schlecht“ zugeordnet.
- 10 In einem weiteren, zweiten, anhand der Fig. 9 und Fig. 10 illustrierten Ausführungsbeispiel,
welches auf dem vorgenannten Ausführungsbeispiel basiert, sollen die Bewegungsphasen
Beschleunigung, (gleichförmige) Bewegung, Abbremsen und Ruhezustand eines xy-Tisches
unterschieden werden. Durch diese Zuordnung ist eine genauere Klassifizierung des
Betriebszustands des xy-Tisches möglich, d.h., die Klassifizierung kann mit höherer
15 Zuverlässigkeit erfolgen, da sich die Schwingungsdaten in diesen Bewegungsphasen
unterscheiden, und nicht, wie in dem Ausführungsbeispiel der Fig. 5 angenommen, über einen
kompletten Bewegungszyklus, beinhaltend alle vier Bewegungsphasen in einer summierten
Betrachtung.
- 20 Als Eingangsdaten werden Schwingungen eines Schwingungssensors eines
Schwingungsisolationssystems 1 in einer Raumrichtung, z.B. in Raumrichtung x, bei der
Bewegung eines xy-Tisches angenommen.
- Im Ergebnis können Informationen über die Qualität der Einstellung bzw. über die Justage des
25 Schwingungsisolationssystems 1 in die Klassen „gut“ und „schlecht“ zur Verfügung gestellt
werden, separat für jede Bewegungsphase.
- Dies ermöglicht eine genauere Leistungsanalyse des Schwingungsverhaltens in den einzelnen
Bewegungsphasen, so dass Abweichungen von der Spezifikation des xy-Tisches oder,
30 allgemeiner, eines gelagerten Gerätes oder einer gelagerten Maschine, beispielsweise ein
Lagerschaden wie vorstehend diskutiert, noch genauer erkannt werden können.

Zum Anlernen wird eine ausreichende Anzahl an Spektrogrammen 20 verwendet, wobei ein Spektrogramm dabei einer bestimmten Bewegungsphase (Beschleunigen, Bewegen, Abbremsen, Ruheposition), oder einer bestimmten Kombination von Bewegungsphasen, wie etwa die Phase von Ruheposition bis zum Erreichen einer Maximalgeschwindigkeit entspricht.

5 Die Spektrogramme 20 stellen die vom Sensor 6a – 6d bereitgestellten Daten der Bewegungsgröße dar, welche den zeitlichen Verlauf der Amplituden mehrerer Schwingungsfrequenzen enthalten. Diese Spektrogramme 20 werden ebenfalls entsprechend in die vorgesehenen Klassen, im Beispiel in die Klassen „gut“ und „schlecht“, eingeteilt. Jedem Spektrogramm wird dabei zusätzlich eine Information über die Bewegungsphase bzw. den
10 entsprechenden Zyklus des xy-Tisches zugeordnet, wie in dem Ausführungsbeispiel der Fig. 9 gezeigt. Basierend auf den vier Bewegungsphasen des xy-Tisches gelten die Zuordnungen in der Fig. 9 wie folgt:

- Daten P1: Daten für die Bewegungsphase 1, Beschleunigung
- 15 - Daten P2: Daten für die Bewegungsphase 2, Bewegung
- Daten P3: Daten für die Bewegungsphase 3, Bremsen
- Daten P4: Daten für die Bewegungsphase 4, Ruhephase

20 Zum Anlernen werden dann mehrere Spektrogramme 20 der verschiedenen Bewegungsphasen verwendet, welche getrennt sind nach den Bewegungsphasen, Fig. 10.

Zur Klassifikation wird das durch Anlernen erzeugte „Weights-File“, beziehungsweise die Gewichts-Datei 13 in das künstliche neuronale Netzwerk geladen, und die Messdaten 14, insbesondere in Form von Spektrogrammen und die Zuordnung der Bewegungsphase aus einem
25 regulären Betrieb der Maschine werden in das Netzwerk 15 gegeben. Diese Daten werden dann in „gut“ oder „schlecht“ klassifiziert, und den jeweiligen Bewegungsphasen zugeordnet ausgegeben, Fig. 11.

30 Gemäß einem nochmals weiteren, dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung sollen weitere Informationen für die Leistungsanalyse verwendet werden. Ansonsten basiert dieses Ausführungsbeispiel auf den zuvor genannten Ausführungsformen.

Bei dem dritten Ausführungsbeispiel werden weitere Informationen hinzugefügt, oder auch verschiedene Informationen miteinander kombiniert. Die Eingangsdaten können beispielsweise folgende Informationen umfassen, wobei die nachfolgende Auflistung nicht als abschließend zu betrachten ist:

- 5
- die Schwingungsinformation des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4, insbesondere der gelagerten Maschine oder des gelagerten Gerätes
 - die Schwingungsinformation einer angeschlossenen Komponente, wie z.B. einer Vakuumpumpe
 - die Schwingungsinformation vom Boden bzw. der Aufstellfläche des
 - 10 Schwingungsisolationssystems 1, oder die Schwingungsinformation einer Komponente innerhalb der Maschine, zum Beispiel die Schwingungen an einem optischen Sensor, oder die Schwingungen an einer Elektronenstrahlröhre, oder die Schwingungen an einer Vakuumpumpe
 - die Stärke akustischer Schwingungen
 - die Temperatur der Umgebung, des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten
 - 15 Last 4, insbesondere der gelagerten Maschine oder des gelagerten Gerätes
 - die Stärke elektromagnetischer Strahlung an der Maschine oder dem Gerät.

Die Schwingungsinformationen betreffen dabei wiederum das Schwingungsverhalten, umfassend die Amplitude, die Periodendauer, die Frequenz und/oder das Frequenzspektrum.

20

Fig. 12 zeigt hierzu beispielhaft eine Auswahl an Eingangsdaten, wobei folgende Zuordnungen gelten sollen:

- X1: Schwingungsinformationen des Schwingungsisolationssystems 1,
- X2: Schwingungsinformationen der Vakuumpumpe
- 25 - Xn: Messwerte zu Temperatur, elektromagnetischer Strahlung, akustischer Schwingung

Als Ergebnis können die erzeugten Ausgangsdaten bei entsprechender Kombination der Eingangsdaten Informationen über die Leistungsfähigkeit des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4, insbesondere der gelagerten Maschine oder des gelagerten

30 Gerätes, zur Verfügung stellen, beispielsweise Betriebsparameter, welche zu guter oder schlechter Leistung

des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4, insbesondere der gelagerten Maschine oder des gelagerten Gerätes, führen. Auf die beschriebene Weise können auch – unabhängig von Schwingungsinformationen – Informationen über Leistungsdaten gewonnen werden. Zum Beispiel kann auch die elektromagnetische Strahlung, welche durch eine

5 Frequenz der Strahlung, und/oder eine Amplitude der Strahlung, und/oder eine Richtung der Strahlung gekennzeichnet ist, zur Klassifikation der Leistungsdaten der Maschine verwendet werden, wenn das Netzwerk entsprechend angelernt ist.

Zum Anlernen ist wiederum eine ausreichende Anzahl von Informationen erforderlich, welche

10 nach entsprechender Aufbereitung „gelabelt“ werden, also den vorgegebenen Klassen zugeordnet, Fig. 13.

Den Ablauf der Klassifizierung anhand von im regulären Betrieb gewonnenen Messwerten bzw. Eingangsdaten zeigt rein beispielhaft Fig. 14.

15 Gemäß einem nochmals weiteren, vierten Ausführungsbeispiel der Erfindung wird die Leistungsanalyse des Schwingungsisolationssystems 1 zur Erkennung von Fehlerursachen verwendet. Ansonsten basiert dieses Ausführungsbeispiel auf den zuvor genannten.

20 Als Ergebnis können die erzeugten Ausgangsdaten bei entsprechender Kombination der Eingangsdaten Informationen darüber zur Verfügung stellen, ob das Schwingungsisolationssystem 1 und/oder die gelagerte Last 4, insbesondere die gelagerte Maschine oder das gelagerte Gerät innerhalb der vorgegebenen Spezifikation arbeitet oder ob Abweichungen hiervon bestehen.

25 Es können Informationen generiert werden, ob das Schwingungsisolationssystem 1 bzw. ob die Maschine oder das Gerät innerhalb der Spezifikation arbeitet. Für den Fall, dass sie außerhalb der Spezifikation arbeitet, kann ermittelt werden, welche Komponente die Ursache hierzu ist. Voraussetzung hierfür ist, dass die Eingangsdaten bzw. im regulären Betrieb die Messwerte

30 hinreichende Informationen bereitstellen, so dass eine entsprechende Klassifikation ermöglicht werden kann.

Die Eingangsdaten können beispielsweise Informationen umfassen, welche auf fehlerhafte oder nicht optimal eingestellte Komponenten oder Umgebungsbedingungen hinweisen. Die nachfolgende Auflistung ist hierzu beispielhaft und nicht als abschließend zu betrachten:

- 5 - die Schwingungsinformation eines innerhalb der Spezifikation arbeitenden Schwingungsisolationssystems 1, insbesondere der Maschine oder des Gerätes
- die Schwingungsinformation einer innerhalb der Spezifikation arbeitenden Vakuumpumpe
- die Schwingungsinformation eines nicht innerhalb der Spezifikation arbeitenden Schwingungsisolationssystems 1, insbesondere Maschine oder Gerätes
- 10 - die Schwingungsinformation einer nicht innerhalb der Spezifikation arbeitenden Vakuumpumpe

Die Schwingungsinformationen betreffen dabei wiederum das Schwingungsverhalten, umfassend die Amplitude, die Periodendauer, die Frequenz und/oder das Frequenzspektrum.

- 15 Fig. 15 zeigt hierzu rein beispielhaft eine Auswahl an Eingangsdaten, wobei folgende Zuordnungen gelten sollen

- X1: Schwingungsinformation Schwingungsisolationssystem 1
- X2: Schwingungsinformation Vakuumpumpe

20

Zum Anlernen werden dann jeweils mehrere Eingangsdatensätze verwendet, welche die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten abbilden. In Bezug auf das vorstehende Beispiel können das die folgenden Eingangsdaten sein:

- Schwingungsisolationssystem1 arbeitet innerhalb der Spezifikation, Vakuumpumpe arbeitet innerhalb der Spezifikation
- 25 - Schwingungsisolationssystem 1 arbeitet nicht innerhalb der Spezifikation, Vakuumpumpe arbeitet innerhalb der Spezifikation
- Schwingungsisolationssystem 1 arbeitet innerhalb der Spezifikation, Vakuumpumpe arbeitet nicht innerhalb der Spezifikation

30

Die Eingangsdaten betreffen neben den bereits diskutierten demzufolge auch Informationen, welche auf eine fehlerhafte Komponente oder Umgebungsbedingungen hinweisen. Weitere

Eingangsdaten können demnach auch die gelagerte Last 4, insbesondere eine gelagerte Maschine oder ein gelagertes Gerät, betreffen, beispielsweise einen xy-Tisch.

5 So kann beispielsweise ein Frequenzspektrum zum Anlernen verwendet werden, welches bei einem korrekten Verfahren eines xy-Tisches in einer Richtung, beispielsweise in Raumrichtung y, entsteht. Sofern ein Lagerschaden bei einem Lager entsteht, welches bei einer Bewegung in Raumrichtung y dieses xy-Tisches zum Einsatz kommt, kann es im regulären Betrieb zu einer Abweichung des Frequenzspektrums kommen. Abweichungen des Frequenzspektrums können weiterhin vielfältige Ursachen haben, z.B. Alterung von Komponenten, fehlerhafte / nicht optimale
10 Reparaturen oder Softwareupdates, geänderte Bewegungsabläufe in der Maschine, für welche sie nicht optimiert ist, Wackelkontakte in Kabeln, Druckluftschwankungen.
Daten solcher Komponenten können ebenfalls als Eingangsgrößen verwendet werden.

15 Das Anlernen und die Erzeugung des „Weights-File“ erfolgt wie vorstehend ausgeführt, wobei auf eine hinreichend große Anzahl an Datensätzen in den verschiedenen Kategorien zu achten ist, Fig. 16.

20 Den Ablauf der Klassifizierung anhand von im regulären Betrieb gewonnenen Daten zeigt rein beispielhaft Fig. 17.

Zur Klassifikation wird dabei das im Rahmen des Anlernens des künstlichen neuronalen Netzwerkes erzeugte „Weights-File“ in das Netzwerk geladen, und die Daten aus dem zu klassifizierenden Betrieb der Maschine in das Netzwerk gegeben. Diese Daten werden dann klassifiziert, und – wenn zutreffend - einer fehlerhaften Komponente zugeordnet.

25 Bei den vorstehend genannten Ausführungsbeispielen sind die Sensoren nicht nur in oder an dem Schwingungsisolationssystem 1 angeordnet, sondern auch an oder in der gelagerten Last 4, insbesondere an der Platte oder einer darauf gelagerten Maschine oder an oder in einem gelagerten Gerät.

30 Weiterhin können die Sensoren auch an oder in den zugeordneten Komponenten angeordnet sein, beispielsweise an einem xy-Tisch, an einem optischen Sensor, an licht- oder

- elektronenoptischen Elementen eines Mikroskops, an spektroskopischen, scatterometrischen oder interferometrischen Messeinrichtungen, oder auch an einem Rastersondenmikroskop, an einem Abstandssensor, etwa beispielsweise zur Messung des Abstands eines lichtoptischen Elements von einem Substrat, an einer Verkleidung, an einer Vakuumpumpe, oder an einer
- 5 anderen Komponente des Schwingungsisolationssystems.
- Die Sensoren können beispielsweise optische Sensoren, Ultraschall-Sensoren, Beschleunigungs-Sensoren oder Abstands-Sensoren umfassen, wobei vorliegend Beschleunigungs-Sensoren vorgesehen sind.
- 10 Weitere Sensoren können der Umgebung des Schwingungsisolationssystems 1 zugeordnet sein, beispielsweise dem Boden bzw. der Aufstellfläche, oder auch der Umgebung, beispielsweise anderen Bauteilen in der Umgebung des Schwingungsisolationssystems. Insbesondere bietet es sich an, hierzu Bauteile auszuwählen, welche Schwingungen an das
- 15 Schwingungsisolationssystem und/oder an die gelagerte Last übertragen können. Dies kann beispielsweise auch die Decke sein, oder ein in der Umgebung angeordnetes Hebezeug, wie etwa ein Hallen- oder Deckenkran.
- Zur Erfassung elektromagnetischer Felder sind Magnetfeldsensoren oder Fluxgate-Magnetometer bzw. Saturationskern-Magnetometer vorgesehen.
- 20 Zur Erfassung der Stärke von akustischen Felder sind Drucksensoren vorgesehen.
- Zur Erfassung der Temperatur am Aufstellort, und/oder an Komponenten des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last sind Thermoelemente vorgesehen.
- 25 Das Erzeugen der Ausgangsdaten aus den Eingangsdaten bzw. die Klassifizierung zur Leistungsanalyse erfolgt rechnerunterstützt, wobei die Programme in der Recheneinrichtung 3 hinterlegt sein können. Selbstverständlich ist es auch möglich, die Programme bzw. auch die Komponenten des künstlichen neuronalen Netzwerkes an anderen Orten zu hinterlegen.
- 30 So ist zum Beispiel in einer Weiterbildung der Erfindung angedacht, die Komponenten des künstlichen neuronalen Netzwerkes 10 zentral in einer übergeordneten Recheneinrichtung zu

hinterlegen und für mehrere dezentral angeordnete Schwingungsisolationssysteme 1 zu nutzen.
Dies hat Vorteile hinsichtlich der Wartung und des Anlernens.

5 Das künstliche neuronale Netzwerk kann dazu in einer nochmaligen Weiterbildung der Erfindung
auch derart ausgebildet sein, dass Informationen bzw. Eingangsdaten mehrerer
Schwingungsisolationssysteme 1 verwendet werden, um nach der Leistungsanalyse
Steuerparameter für die Steuerung und Regelung ein oder mehrere an die übergeordnete
Recheneinrichtung angeschlossene Schwingungsisolationssysteme 1 zu erzeugen.

10 Die Erzeugung von Varianzen kann mittels Augmentierung der Spektrogramme oder anderer
Darstellungsformen von Schwingungen, also einer Veränderung bzw. Transformation der
Datensätze, erfolgen, d.h. es werden – vorzugsweise ebenfalls rechnerunterstützt – bewusste
Abweichungen der Spektrogramme bzw. Eingangsgrößen erzeugt, um die Anzahl an
verschiedenen Trainings-Datensätzen zu vergrößern.

15 Dies ist vorteilhaft, da zum Anlernen eine große Anzahl von Daten benötigt wird, unter anderem
um im regulären Betrieb auftretende Streuungen der Eingangsinformationen so weit wie
notwendig zu erfassen. Solche Daten können in gewissen Grenzen auch künstlich bzw.
rechnerunterstützt erzeugt werden, indem die Daten künstlich bzw. rechnerunterstützt verfälscht
20 werden. Beispielsweise kann ein Rauschen auf die Schwingungsdaten addiert werden.

Auf diese Weise kann eine Vielzahl von Spektrogrammen generiert werden, mit welchen das
verwendete künstliche neuronale Netzwerk trainiert werden kann. Die Spektrogramme werden
dazu den gewünschten Kategorien bzw. Klassen zugeordnet. Die Zuordnung kann gemäß einer
25 Ausführungsform der Erfindung auch automatisch rechnerunterstützt erfolgen, was die manuelle
Datenaufbereitung deutlich vereinfachen kann.

Für eine gute Leistungsanalyse und Diagnose ist es hilfreich, wenn genügend Spektrogramme in
den entsprechenden Klassen zur Verfügung stehen. In bestimmten Fällen können 10 bis 100
30 Eingangsdaten bzw. Spektrogramme pro Klasse bereits ausreichen, besser aber sind z.B. ca.
1.000 oder sogar 10.000 oder mehr Datensätze pro Klasse vorgesehen, um die Qualität der
Leistungsanalyse zu verbessern und zu erhöhen.

Im regulären Betrieb des Schwingungsisolationssystems 1 wird ein bereits trainiertes oder angelerntes künstliches neuronales Netzwerk verwendet. In einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird dieses trainierte künstliche neuronale Netzwerk im laufenden Betrieb weiter
5 trainiert.

Auf diese Weise kann das Schwingungsisolationssystem 1 einfach an die am Aufstellort vorherrschenden Bedingungen angepasst werden kann.

10 In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass das künstliche neuronale Netzwerk angelernete Daten aus einem vorangegangenen Lernvorgang oder auch einer sonstigen externen Quelle verwendet.

Durch die Leistungsanalyse können Informationen oder Ausgangsdaten, zum Beispiel
15 Steuerparameter zur Steuerung oder Regelung des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4, generiert werden. Ein wichtiger Aspekt der Erfindung ist daher darin zu sehen, dass diese Steuerparameter direkt oder indirekt zur Steuerung oder Regelung des Schwingungsisolationssystems 1 und/oder der gelagerten Last 4 verwendet werden können.

20 Mit von der Erfindung umfasst ist demnach auch ein Verfahren zur Steuerung oder Regelung eines Schwingungsisolationssystems 1, wobei im Betrieb im Rahmen einer Leistungsanalyse wie vorstehend beschrieben Steuerparameter zur Steuerung des Schwingungsisolationssystems 1 gewonnen und genutzt werden. Auf diese Weise kann ein selbst-lernendes Schwingungsisolationssystem 1 zur Verfügung gestellt werden, welches zum Beispiel auf
25 Veränderungen in der Umgebung, etwa auftretende Schwingungen über den Boden, reagieren kann.

Das Schwingungsisolationssystem 1 ist als aktives, stationäres Schwingungsisolationssystem ausgebildet und umfasst in dem Ausführungsbeispiel vier Schwingungsisolatoren, wobei im
30 regulären Betrieb mittels der vier Aktoren auftretenden Schwingungen aktiv entgegengewirkt werden kann.

Mit von der Erfindung umfasst ist in einem weiteren Aspekt ein Verfahren zur Diagnose, insbesondere zur Leistungsanalyse, eines Schwingungsisolationssystems 1, umfassend ein Schwingungsisolationssystem wie vorstehend beschrieben.

- 5 Das Verfahren kann eine Analyse der Leistungsfähigkeit des Schwingungsisolationssystems ermöglichen, aber auch der gelagerten Last.

- In einer Weiterbildung der Erfindung ist vorgesehen, das künstliche neuronale Netzwerk anzupassen. Dies kann erforderlich werden, wenn während des Einsatzes des Netzwerkes sich
- 10 Einflussgrößen ändern, z.B.:
- es können beim Einsatz des Netzwerkes mehr Daten entstehen, welche zur Verbesserung der Klassifizierung verwendet werden können
 - es kann z.B. eine gelagerte Maschine aufgrund einer verbesserten Software besser mit Störungen umgehen
- 15 - ändert sich das durch die Maschine bearbeitete Produkt, welches andere Anforderungen an die Maschine stellt.

- Da ein neues Anlernen des künstlichen neuronalen Netzwerkes aufwendig sein kann, ist gemäß dieser Weiterbildung vorgesehen, permanent im regulären Betrieb des künstlichen neuronalen
- 20 Netzwerkes eine Optimierung vorzunehmen. Dadurch kann Zeit zum Anlernen eingespart werden, und die Zeit zwischen den Updates des Netzwerkes verkürzt werden. Das Verfahren ist in einer schematischen Übersicht in Fig. 18 dargestellt. Hier wird während des Anwendens des AI-Modells mit Hilfe von externen Leistungsindikatoren und Bewertungsindikatoren, die den Zustand des Systems klassifizieren, das AI-Modell fortlaufend trainiert. Unter einem AI-Modell
- 25 wird hier ein Modell verstanden, welches das beschriebene neuronale Netzwerk enthält.“.

- Neben den vorstehend ausgeführten Architekturen zur Klassifizierung von Eingangsdaten existieren weitere Ansätze. In den vorstehenden Ausführungsbeispielen werden die
- 30 Eingangsdaten innerhalb eines Zeitabschnittes ausgewertet, beispielsweise ein Zeitabschnitt von zwei Sekunden für einen Ablauf bestehend aus den Phasen Beschleunigung, Bewegung, Bremsen und Ruhe.

Es gibt auch Architekturen, welche die Abfolge von Zeitabschnitten bearbeitet. Ein Beispiel hierfür sind neuronale LSTM („Long Short-Term Memory“) – Netzwerke, welche in einer weiteren Dimension eine Abfolge von kleineren Zeitabschnitten bearbeiten können. Solche Architekturen können in ähnlicher Weise für die oben beschriebenen Klassifikationsaufgaben verwendet werden.

5

Bezugszeichenliste

1	Schwingungsisolationssystem
2a – 2d	Schwingungsisolator
3	Recheneinrichtung
4	Last
5a – 5d	Aktor
6a – 6d	Sensor
10, 11	Satz von Spektrogrammen
13	Gewichts-Datei
14	Messdaten
15	Netzwerk
16, 17	Klasse
20	Spektrogramm
101	Schritt: Datenaufnahme
102	Schritt: Datenverarbeitung
103	Schritt: Labelling
104	Schritt: Augmentierung
105	Trainings-Spektrogramme
106	Test-Spektrogramme
107	Schritt: Erstellung Netzwerk
108	Schritt: Lernen des Netzwerks
109	Schritt: Erstellen eines Gewichtsvektors oder einer Gewichts-Datei

Patentansprüche:

1. Schwingungsisolationssystem, insbesondere mit Diagnosefunktion, vorzugsweise stationäres, aktives Schwingungsisolationssystem, mittels der eine schwingungs isoliert
5 gelagerte Last abgestützt werden kann, umfassend
zumindest einen Schwingungsisolator, vorzugsweise eine Mehrzahl von
Schwingungsisolatoren, welche mittels Aktoren im Betrieb auftretende Schwingungen
entgegenwirken können,
zumindest einen Sensor, vorzugsweise eine Mehrzahl von Sensoren, welche dazu
10 eingerichtet sind, Messwerte betreffend das Schwingungsisolationssystem und/oder die
gelagerte Last und/oder die Umgebung aufzunehmen und als Eingangsdaten einem
rechnerunterstützten Verfahren zur Verfügung zu stellen für eine Leistungsanalyse des
Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last.
- 15 2. Schwingungsisolationssystem nach vorstehendem Anspruch, wobei das
rechnerunterstützte Verfahren zumindest ein künstliches neuronales Netzwerk umfasst
oder darauf basiert.
- 20 3. Schwingungsisolationssystem (1), insbesondere gemäß einem der vorstehenden
Ansprüche, zur schwingungs isolierten Lagerung einer Last, umfassend mindestens
einen, vorzugsweise mehrere Schwingungsisolatoren (2a – 2d) und zumindest einen
Sensor (6a – 6d), wobei der Sensor (6a – 6d) eingerichtet ist, eine Bewegungsgröße,
insbesondere eine mechanische Schwingung, Bewegung oder Beschleunigung zu
erfassen, sowie eine Recheneinrichtung (3), wobei die Recheneinrichtung (3) ein
25 künstliches neuronales Netzwerk (10) enthält, wobei das künstliche neuronale Netzwerk
(10) eingerichtet ist, vom zumindest einen Sensor (6a – 6d) bereitgestellte Daten der
Bewegungsgröße zu verarbeiten und eine Klassifikation vorzunehmen, ob sich das
Schwingungsisolationssystem (1) mit der gelagerten Last in einem Betriebszustand mit
hinreichend wenig oder zu viel durch Bewegungen gestörten Betriebszustand befindet,
30 und diese Klassifikation auszugeben.

4. Schwingungsisolationssystem gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die vom zumindest einen Sensor (6a – 6d) bereitgestellten Daten der Bewegungsgröße Spektrogramme (20) umfassen, welche den zeitlichen Verlauf der Amplituden mehrerer Schwingungsfrequenzen enthalten.
5. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei im regulären Betrieb ein trainiertes oder angelerntes künstliches neuronales Netzwerk verwendet wird.
10. 6. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die gelagerte Last über drei oder vier Schwingungsisolatoren gelagert wird.
15. 7. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die gelagerte Last Bearbeitungsmaschinen oder Teile davon, insbesondere in der Halbleiterindustrie wie z.B. Maschinen zur Prozessierung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten oder Elementen, insbesondere von Wafern, Masken oder Displays, Lithographiegeräte, oder Messeinrichtungen oder -geräte, insbesondere zur Vermessung von Halbleiterbauelementen und/oder nanostrukturierten Substraten, wie z.B. ein Elektronenstrahlmikroskop, oder andere empfindliche Geräte, Maschinen oder Anlagen, beispielsweise Laborgeräte oder medizinische Geräte, etwa bildgebenden Untersuchungsgeräte wie Magnetresonanztomographen (MRT), umfasst.
20. 8. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Eingangsdaten das Schwingungsverhalten des Schwingungsisolationssystems umfassen, insbesondere die Amplitude, die Periodendauer, die Frequenz oder die Beschleunigung.
25. 9. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Eingangsdaten die Temperatur am Aufstellort, und/oder an Komponenten des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last umfassen.
- 30.

10. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Eingangsdaten die Stärke elektromagnetischer Felder am Aufstellort umfassen.
- 5 11. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Eingangsdaten die Stärke akustischer Felder am Aufstellort umfassen.
- 10 12. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Sensoren in oder an dem Schwingungsisolationssystem, und/oder an der gelagerten Last und/oder in der Umgebung, insbesondere am Boden, der Aufstellfläche, oder an Bauteilen oder Elementen in der Umgebung des Schwingungsisolationssystems angeordnet sind.
- 15 13. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das künstliche neuronale Netzwerk mindestens ein Modell ausbildet, welches mindestens eine Faltungsebene (Convolutional Layer) und/oder mindestens einen Neuronenebene (Neuronaler Layer) umfasst, und/oder weitere Bestandteile, beispielsweise Aktivierungslayer.
- 20 14. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das künstliche neuronale Netzwerk angelernet werden kann, insbesondere im Betrieb des Schwingungsisolationssystems, und/oder angelernete Daten aus einem vorangegangenen Lernvorgang verwendet.
- 25 15. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das künstliche neuronale Netzwerk zumindest eine der Methoden der Regression, Machine-Learning oder Deep-Learning verwendet.
- 30 16. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei zum Anlernen des künstlichen neuronalen Netzwerkes Datensätze rechnerunterstützt verändert bzw. transformiert werden, um eine Mehrzahl von Trainings-Datensätzen zu erhalten.

17. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei auf Basis der Leistungsanalyse Steuerparameter zur Steuerung des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last erzeugt werden.
- 5 18. Schwingungsisolationssystem nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Steuerparameter zur Steuerung des Schwingungsisolationssystems und/oder der gelagerten Last verwendet werden.
- 10 19. Verfahren zur Steuerung oder Regelung eines Schwingungsisolationssystems, vorzugsweise nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei im Betrieb durch die Leistungsanalyse Steuerparameter zur Steuerung des Schwingungsisolationssystems gewonnen und genutzt werden.
- 15 20. Verfahren zur Diagnose, insbesondere zur Leistungsanalyse, eines Schwingungsisolationssystems, vorzugsweise nach einem der vorstehenden Ansprüche 1-14.