

(12)

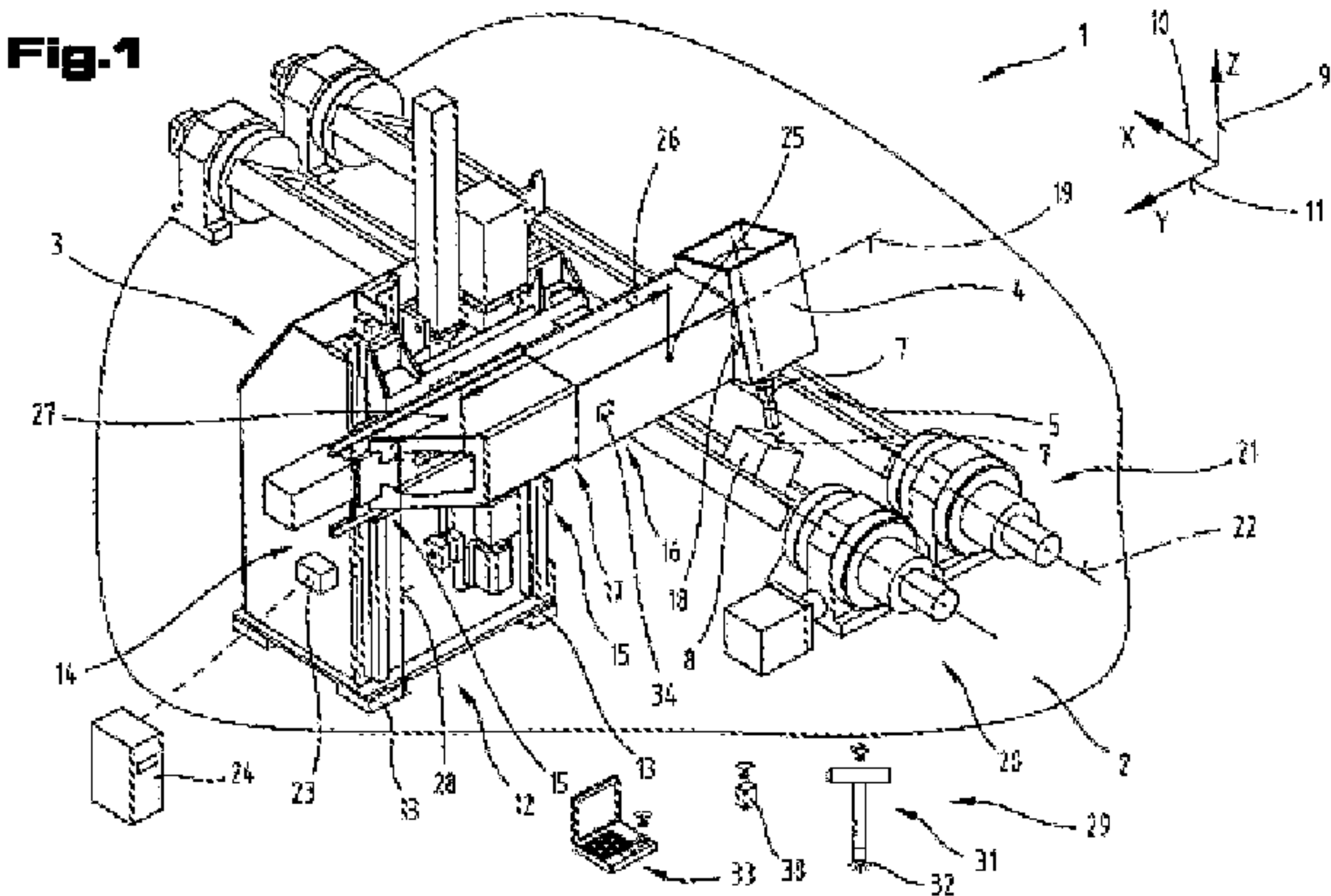
Patentschrift

(21)	Anmeldenummer:	A 50976/2019	(51)	Int. Cl.:	B23Q 15/007	(2006.01)
(22)	Anmeldetag:	14.11.2019			B23Q 15/08	(2006.01)
(45)	Veröffentlicht am:	15.11.2020			B23Q 15/12	(2006.01)
					B23Q 17/22	(2006.01)
					G05B 19/18	(2006.01)
					G05B 19/19	(2006.01)
					G05B 19/401	(2006.01)
					G05B 19/404	(2006.01)
					G05B 19/4069	(2006.01)

(56)	Entgegenhaltungen: DE 102019204949 A1 DE 102012101979 A1 US 2004193308 A1	(73)	Patentinhaber: Fill Gesellschaft m.b.H. 4942 Gurten (AT)
		(72)	Erfinder: Binder Roman Dipl.Ing. 4910 Ried im Innkreis (AT) Seherschön Harald Dipl.Ing. 4924 Waldzell (AT)
		(74)	Vertreter: Anwälte Burger und Partner Rechtsanwalt GmbH 4580 Windischgarsten (AT)

(54) Verfahren zum Betreiben einer Bearbeitungsanlage

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Bearbeitungsanlage 1 für die mechanische Bearbeitung von Werkstücken 8, wobei in der Bearbeitungsanlage 1 ein Bearbeitungswerkzeug 7 aufgenommen ist, wobei beim Bearbeiten des Werkstückes 8 das Bearbeitungswerkzeug 7 und das Werkstück 8 relativ zueinander bewegt werden und das Bearbeitungswerkzeug 7 mit dem Werkstück 8 in Eingriff steht, wobei die Bewegungsvorgaben für die Bearbeitungsanlage 1 in eine Maschinensteuerung 23 eingegeben werden. Die Bewegungsvorgaben werden computerimplementiert durch Modifikationsparameter angepasst, sodass zumindest einzelne der tatsächlich ausgeführten Bewegungen der Bearbeitungsanlage 1 von den eingegebenen Bewegungsvorgaben abweichen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Bearbeitungsanlage für die mechanische Bearbeitung von Werkstücken, sowie ein Verfahren zum Warten der Bearbeitungsanlage, sowie eine Messanordnung zum Warten der Bearbeitungsanlage.

[0002] Eine Bearbeitungsanlage für die mechanische Bearbeitung von Werkstücken ist beispielsweise aus der WO 2018/209373 A1 bekannt.

[0003] Weitere Details von charakterisierten Verfahren zum Betreiben bzw. Warten einer Bearbeitungsanlage sind aus der DE 102019204949 A1, der DE 102012101979 A1 und der US 2004193308 A1 bekannt.

[0004] Diese Bearbeitungsanlage weist den Nachteil auf, dass die maximale Bearbeitungsgeschwindigkeit so niedrig gewählt wird, dass zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist, dass die Fertigungstoleranzen eingehalten werden können bzw. dass die Bearbeitungsanlage nicht übermäßig beansprucht wird.

[0005] Aufgabe der vorliegenden Erfindung war es, die Nachteile des Standes der Technik zu überwinden und eine Bearbeitungsanlage und ein Verfahren zum Betreiben der Bearbeitungsanlage zur Verfügung zu stellen, mittels derer eine effiziente Bearbeitung von Werkstücken ermöglicht wird.

[0006] Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung und ein Verfahren gemäß den Ansprüchen gelöst.

[0007] Erfindungsgemäß ist ein Verfahren zum Betreiben einer Bearbeitungsanlage für die mechanische Bearbeitung von Werkstücken vorgesehen, wobei in der Bearbeitungsanlage ein Bearbeitungswerkzeug aufgenommen ist, wobei beim Bearbeiten des Werkstückes das Bearbeitungswerkzeug und das Werkstück relativ zueinander bewegt werden und das Bearbeitungswerkzeug mit dem Werkstück in Eingriff steht, wobei die Bewegungsvorgaben der Bearbeitungsanlage in eine Maschinensteuerung eingegeben werden. Die Bewegungsvorgaben werden computerimplementiert durch Modifikationsparameter angepasst, sodass zumindest einzelne der tatsächlich ausgeführten Bewegungen der Bearbeitungsanlage von den eingegebenen Bewegungsvorgaben abweichen.

[0008] Das erfindungsgemäße Verfahren bringt den Vorteil mit sich, dass die Bewegungsvorgaben gezielt auf die jeweilige Bearbeitungsanlage angepasst werden können, wodurch überraschenderweise die Bearbeitungsgenauigkeit bzw. die Effizienz der Bearbeitungsanlage verbessert werden kann. Insbesondere können durch das erfindungsgemäße Verfahren die Bewegungsgeschwindigkeiten bzw. die Beschleunigungen der Verfahrensbewegungen an der Bearbeitungsanlage erhöht werden. Weiters kann durch das erfindungsgemäße Verfahren die Bearbeitungsgenauigkeit der Bearbeitungsanlage erhöht werden. Weiters kann durch das erfindungsgemäße Verfahren die Oberflächenbeschaffenheit des hergestellten Werkstücks verbessert werden, da beispielsweise das Rattern während dem Bearbeitungsvorgang möglichst unterbunden werden kann.

[0009] Weiters kann es zweckmäßig sein, wenn die Modifikationsparameter eine oder mehrere der folgenden Bewegungsvorgaben anpassen:

die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit;

die zweite Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit;

die dritte Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit;

die Schnitttiefe;

die Schnittgeschwindigkeit.

[0010] Ferner kann vorgesehen sein, dass in den Modifikationsparametern ein für die jeweilige

Maschinenposition vorliegendes Abstandmasseprodukt des Bearbeitungswerkzeuges berücksichtigt wird. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die maximalen Verfahrgeschwindigkeiten bzw. die maximalen Beschleunigungen der einzelnen Achsen erhöht werden kann. Beispielsweise ist es denkbar, dass bei einer aktuellen Stellung der Bearbeitungsanlage in welcher der Massenschwerpunkt einer zu verstellenden Bearbeitungsachse nahe an der Antriebseinheit bzw. nahe am jeweiligen Führungsschlitten liegt, die entsprechenden Verfahrgeschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen erhöht werden können. Wenn jedoch die Ausladung größer wird, so werden entsprechend die Verfahrgeschwindigkeiten bzw. die Beschleunigungen verringert.

[0011] Darüber hinaus kann vorgesehen sein, dass die Modifikationsparameter auf Basis eines vorliegenden virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage unter Berücksichtigung der aktuellen Bearbeitungszustände und Bearbeitungspositionen berechnet werden. Dies bringt den überraschenden Vorteil mit sich, dass nicht nur die Beschleunigungen bzw. Verfahrgeschwindigkeiten der Bearbeitungsanlage angepasst werden können, sondern dass auch die Ratterneigung bzw. das Auftreten von Schwingungen in der Bearbeitungsanlage vermindert werden kann. Insbesondere ist es hierbei denkbar, dass Schnittgeschwindigkeiten bzw. Vorschubgeschwindigkeiten, in denen aufgrund des virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage ein Rattern erwartet wird, schnell durchfahren bzw. vermieden werden können, um somit die Bearbeitungsqualität der Oberfläche des Werkstückes verbessern zu können.

[0012] Insbesondere ist es hierbei denkbar, dass Bereiche kritischer Frequenzen bzw. Bearbeitungszustände, welche Anregungsfrequenzen nahe einer der Eigenfrequenzen der Bearbeitungsanlage auslösen, möglichst hintangehalten werden.

[0013] Zusammengefasst können die Modifikationsparameter auf Basis des vorliegenden virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage angepasst werden. In einer Weiterbildung ist es auch denkbar, dass zusätzlich während dem Bearbeitungsvorgang ein virtuelles Realkörpermodell des Werkstückes und/oder ein virtuelles Realkörpermodell des Bearbeitungswerkzeuges erstellt wird, und dies ebenfalls in den Modifikationsparametern berücksichtigt wird. Beispielsweise können dadurch die aufgrund einer vorhergehenden Bearbeitung im Werkstück erzeugten Oberflächenbeschaffenheiten in der weiteren Bearbeitung berücksichtigt werden, um beispielsweise in weiteren Bearbeitungsschritten ein Rattern des Bearbeitungswerkzeuges möglichst zu unterbinden.

[0014] Weiters ist es auch denkbar, dass dadurch die Standzeiten bzw. aktuelle Verschleißerscheinungen am Bearbeitungswerkzeug ermittelt bzw. berücksichtigt werden.

[0015] Ferner kann vorgesehen sein, dass das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage durch folgende Verfahrensschritte erstellt wird:

- Erstellen eines Finite-Elemente-Modelles der Bearbeitungsanlage auf Basis eines CAD-Modelles der Bearbeitungsanlage;
- Durchführen einer Modalanalyse auf Basis des Finite-Elemente-Modelles der Bearbeitungsanlage;
- Erstellen eines Zustandsraummodelles, welches das physikalische Verhalten des Modelles repräsentiert, auf Basis der Modalanalyse;
- Fertigen der Bearbeitungsanlage oder eines Prototypen der Bearbeitungsanlage auf Basis des CAD-Modelles der Bearbeitungsanlage;
- Aufbauen einer Messanordnung an der gefertigten Bearbeitungsanlage;
- Durchführen einer Modalanalyse, welche das physikalische Verhalten der gefertigten Bearbeitungsanlage repräsentiert, durch Aufbringen dynamischer mechanischer Belastungen an der gefertigten Bearbeitungsanlage und erfassen der Schwingungen mittels der Messanordnung;
- Anpassen des Zustandsraummodelles, sodass das physikalische Verhalten des Modelles innerhalb einer Abweichungstoleranz zum physikalischen Verhalten der gefertigten Bearbeitungsanlage liegt, wobei das angepasste Zustandsraummodell das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage repräsentiert.

[0016] Dies bringt den Vorteil mit sich, dass das physikalische Verhalten der gefertigten Bearbeitungsanlage hinreichend genau durch das Zustandsraummodell beschrieben werden kann. Somit

können die Bewegungsvorgaben der Bearbeitungsanlage computerimplementiert angepasst werden.

[0017] Das Zustandsraummodell kann durch lineare Regelansätze/Methoden gebildet sein. Alternativ oder zusätzlich dazu ist es auch möglich, dass das Zustandsraummodell nicht lineare Regelansätze/Methoden, wie etwa Fuzzy-Regler beinhaltet.

[0018] Das physikalische Verhalten der gefertigten Bearbeitungsanlage kann beispielsweise die Schwingungsmoden umfassen.

[0019] Die Abweichungstoleranz kann zwischen 90% und 110%, insbesondere zwischen 95% und 105%, bevorzugt zwischen 99% und 101% betragen.

[0020] Beispielsweise kann die tatsächlich gefertigte Bearbeitungsanlage eine dominante Eigenfrequenzen bei 36Hz aufweisen. Das unveränderte Zustandsraummodell, welches das physikalische Verhalten des Modelles repräsentiert, kann eine dominante Eigenfrequenz von 30Hz ausgeben. Da der physikalische Parameter der dominanten Eigenfrequenz des durch das Zustandsraummodell abgebildeten Modelles außerhalb des Toleranzbereiches der dominanten Eigenfrequenz der tatsächlich gefertigten Bearbeitungsanlage liegt, ist somit eine Anpassung des Zustandsraummodelles notwendig, bis die durch das Zustandsraummodell errechnete dominante Eigenfrequenz innerhalb des Toleranzbereiches liegt. Diese Anpassung ist natürlich für alle Parameter die das dynamische Verhalten widergeben, beispielsweise Dämpfung, Schwingform und/oder Amplitude, aller Moden notwendig.

[0021] Insbesondere kann vorgesehen sein, dass die Anpassung des Zustandsraummodelles durch automatisierte Algorithmen erfolgt. Dies kann durch iterative Prozesse erfolgen. Weiters ist es denkbar, dass die Anpassung des Zustandsraummodelles durch Berechnung mittels eines künstlichen Neuronalen Netzes erfolgt. Das künstliche Neuronale Netz kann durch entsprechende machine learning-Algorithmen angelernet sein. Insbesondere kann hierbei vorgesehen sein, dass die einzelnen Gleichungen des Zustandsraummodelles mit anpassbaren Parameterwerten verknüpft sind, sodass durch Anpassung der Parameterwerte das Berechnungsergebnis des Zustandsraummodelles abgeändert werden kann.

[0022] Weiters ist es natürlich auch denkbar, dass zum Anpassen des Zustandsraummodelles die Ergebnisse aus vorherigen Anpassungen herangezogen werden, sodass die Anpassung zu verbesserten Arbeitsergebnissen führt.

[0023] Vorteilhaft ist auch eine Ausprägung, gemäß welcher vorgesehen sein kann, dass das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage durch folgende Verfahrensschritte erstellt wird:

- Fertigen der Bearbeitungsanlage oder eines Prototypen der Bearbeitungsanlage;
- Erstellen eines Neuronalen Netzes, wobei das Neuronale Netz das Schwingungsverhalten und das Verformungsverhalten der Bearbeitungsanlage abbildet;
- Aufbauen einer Messanordnung an der gefertigten Bearbeitungsanlage;
- Trainieren des Neuronalen Netzes durch Aufbringen dynamischer mechanischer Belastungen an der gefertigten Bearbeitungsanlage während dem Stillstand und während dem Durchführen von Verfahrbewegungen und dabei erfassen des Schwingungsverhaltens und des Verformungsverhaltens der Bearbeitungsanlage mittels der Messanordnung und Vergleich des mittels des Neuronalen Netzes für die Belastung vorhergesagten Verhaltens mit dem mittels der Messanordnung gemessenen Verhaltens;
- Anpassen des Neuronalen Netzes;
- Erstellen des Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage auf Basis des trainierten Neuronalen Netzes.

[0024] Ein künstliches Neuronales Netz bringt gegenüber einem linearen oder linearisierten mathematischen Modell den Vorteil mit sich, dass die Modifikationsparameter in Echtzeit angepasst werden können, ohne dass dabei eine übermäßig lange Vorlaufzeit bzw. eine übermäßig große Rechenkapazität aufgewendet werden muss. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass beim Trainieren des Neuronalen Netzes dynamische mechanische Belastungen an der gefertigten Be-

arbeitungsanlage aufgebracht werden, welche einen Bearbeitungsablauf der mechanischen Bearbeitungsanlage simulieren. Somit ist es beispielsweise denkbar, dass die an der Bearbeitungsanlage aufgebrachten, dynamischen mechanischen Belastungen ein im spannenden Eingriff im Werkstück stehendes Bearbeitungswerkzeug simulieren. Hierbei können nicht nur die Schnittkräfte, sondern auch etwaige Schwingungen, welche durch einen wechselnden Zahneingriff des Bearbeitungswerkzeuges im Werkstück entstehen, simuliert werden. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass bei der Erstellung des Neuronalen Netzes die einzelnen Eigenfrequenzen der Bearbeitungsanlage ermittelt bzw. berücksichtigt werden.

[0025] Das künstliche Neuronale Netz weist mehrere künstliche Neuronen auf, die miteinander verbunden sind und in mehreren Schichten aufgebaut sein können. Die Neuronen können verschiedene Gewichtungen aufweisen bzw. können die einzelnen Neuronen verschiedene Schwellenwerte aufweisen, bei welchen die Neuronen feuern. Beim Trainieren des künstlichen Neuronalen Netzes können folgende Einstellungen vorgenommen werden: Entwicklung neuer Verbindungen; Löschen existierender Verbindungen; Ändern der Gewichtung (der Gewichte w_{ij} von Neuron i zu Neuron j ; Anpassen der Schwellenwerte der Neuronen, sofern diese Schwellenwerte besitzen; Hinzufügen oder Löschen von Neuronen; Modifikation von Aktivierungs-, Propagierungs- oder Ausgabefunktion.

[0026] Das künstliche Neuronale Netz kann beispielsweise mit folgenden Lernverfahren trainiert werden:

[0027] Überwachtes Lernen (supervised learning): Beim Überwachten Lernen wird dem Künstlichen Neuronalen Netz als Eingangsmuster eine auf eine tatsächlich gefertigte Bearbeitungsanlage aufgebrachte Kraftanregung gegeben und die Ausgabe, die das Neuronale Netz in seinem aktuellen Zustand produziert, mit dem Wert verglichen, den es eigentlich ausgeben soll. Dieser Wert den das Netz eigentlich ausgeben soll wird durch Messung an der tatsächlich gefertigten Bearbeitungsanlage ermittelt. Durch Vergleich von Soll- und Istausgabe kann auf die vorzunehmenden Änderungen der Netzkonfiguration geschlossen werden. Bei einlagigen Perzeptrons kann die Delta-Regel - auch Perzeptron-Lernregel - angewendet werden. Mehrlagige Perzeptrons werden in der Regel mit Backpropagation trainiert, was eine Verallgemeinerung der Delta-Regel darstellt.

[0028] Alternativ dazu oder zusätzlich kann das Künstliche Neuronale Netz durch Unüberwachtes Lernen (unsupervised learning), Bestärkendes Lernen (reinforced learning) oder Stochastisches Lernen trainiert werden.

[0029] Weiters ist es auch denkbar, dass die Ausgabe des Neuronalen Netzes nicht die auftretenden Verformungen und Schwingungen an der Bearbeitungsanlage repräsentiert, sondern dass die Ausgabe des Neuronalen Netzes in weiterer Folge direkt als Modifikationsparameter dient.

[0030] Die Erstellung eines Neuronalen Netzes bringt gegenüber einem linearen, mathematischen Modell, welches unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode erstellt werden könnte, den Vorteil mit sich, dass das virtuelle Realkörpermodell die gefertigte Bearbeitungsanlage genauer abbildet, als dies bei einem linearen mathematischen Modell der Fall wäre. Dies resultiert daraus, dass in der Bearbeitungsanlage mehrere Schnittstellen zwischen einzelnen Körpern, wie etwa Führungsschuhe auf Führungsschienen vorhanden sind, deren exaktes Schwingungs- bzw. Verformungsverhalten sich in einem Finite-Elemente Modell nicht bzw. nur ungenügend darstellen lässt. Auch das Verhalten der Antriebskomponenten lässt sich in einem Finite-Elemente Modell nicht oder nur ungenügend genau darstellen.

[0031] Zum Trainieren des Neuronalen Netzes durch Aufbringen dynamischer mechanischer Belastungen kann vorgesehen sein, dass aus einer Datenbank von möglichen Belastungsabfolgen, verschiedenste Belastungsabläufe durchgespielt werden.

[0032] Weiters ist es auch denkbar, dass die dynamischen mechanischen Belastungen an der gefertigten Bearbeitungsanlage per Zufallsgenerator ausgewählt werden bzw. dass für alle möglichen Bearbeitungspositionen bzw. Bearbeitungszustände die dynamischen mechanischen Be-

lastungen simuliert werden und deren Auswirkungen an der Bearbeitungsanlage mittels der Messanordnung erfasst werden können. Insbesondere ist es denkbar, dass die mechanischen Belastungen in einem festgelegten Raster bzw. einem festgelegten Verfahrensablauf aufgebracht werden. Weiters ist es auch denkbar, dass an dazwischenliegenden Punkten das Verhalten der Bearbeitungsanlage durch Interpolation zwischen den durch Messung ermittelten Punkten geschätzt wird, sodass das Neuronale Netz möglichst über den gesamten Bearbeitungsbereich eine ausreichende Gültigkeit aufweist.

[0033] Weiters ist es auch denkbar, dass für jede der gefertigten Bearbeitungsanlagen ein eigenes virtuelles Realkörpermodell erstellt wird.

[0034] Weiters kann vorgesehen sein, dass das Neuronale Netz auf Basis eines Masse-Feder-Systems eines Konstruktionsmodells der Bearbeitungsanlage erstellt wird.

[0035] Gemäß einer Weiterbildung ist es möglich, dass ein für eine Schwesterbearbeitungsanlage erstelltes Neuronales Netz oder Zustandsraummodell als Basis für das Trainieren des Neuronalen Netzes oder des Zustandsraummodells der aktuellen Bearbeitungsanlage verwendet wird, wobei ein verkürzter Trainingsalgorithmus zum Anpassen des Neuronalen Netzes oder des Zustandsraummodells zur Anwendung kommt. Dies bringt überraschende Vorteile in der Effizienz der Erstellung des virtuellen Realkörpermodells mit sich. Insbesondere bei einer Serienfertigung von Bearbeitungsanlage, mit grundsätzlich ähnlichem oder gleichen Aufbau, kann es somit sinnvoll sein, nur einen Prototypen der Bearbeitungsanlage einer vollständigen Modellbildung zur Erstellung des virtuellen Realkörpermodells zu unterziehen und für die nachfolgend gefertigten Bearbeitungsanlagen das virtuelle Realkörpermodell unter Anpassung des Prototypmodells zu erstellen.

[0036] Ferner kann es zweckmäßig sein, wenn für ausgewählte Bewegungsachsen der Bearbeitungsanlage ein Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor ermittelt wird, wobei in den Modifikationsparametern der Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor berücksichtigt wird. Mit diesem Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor können die Maßabweichungen aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten der einzelnen Antriebsstränge berücksichtigt werden.

[0037] Der Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor (k_v -Faktor) ist eine dem Fachmann bekannte Kenngröße, die das Verhältnis zwischen der Prozessgeschwindigkeit und der Differenz zwischen Ist- und Sollgeschwindigkeit der Maschine angibt. Der Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor berechnet sich aus $\text{Verfahrgeschwindigkeit} (\text{Pos.Soll} - \text{Pos.Ist})$. Der Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor ist somit ein Maß für die Steifigkeit des Antriebs.

[0038] Darüber hinaus kann vorgesehen sein, dass die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsverstärkungsfaktors angepasst wird, wobei Wertgrenzen für die einzelnen Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren definiert werden und wobei die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit so groß als möglich gewählt wird, jedoch nur so groß gewählt wird, dass die Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren noch innerhalb der definierten Wertgrenzen liegen. Somit ist es möglich, dass unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren die maximale Bearbeitungsgeschwindigkeit bzw. die maximalen Beschleunigungswerte gewählt werden. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass die Wertgrenzen für die Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren zwischen 1 bis 20 $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{mm})$, insbesondere zwischen 1,1 bis 10 $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{mm})$, bevorzugt zwischen 2,5 bis 2,7 $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{mm})$, liegen. Natürlich ist es auch denkbar, dass die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit unter Berücksichtigung weiterer Faktoren angepasst wird.

[0039] Weiters kann vorgesehen sein, dass die Maschinensteuerung in Form einer CNC-Steuerung ausgebildet ist, wobei die Modifikationsparameter in der CNC-Steuerung berücksichtigt werden. Durch diese Maßnahme ist es möglich, dass beispielsweise für verschiedene Bearbeitungsanlagen in einer zentralen Recheneinheit ein Bearbeitungsablaufprogramm erstellt wird, und dass in der jeweiligen Bearbeitungsanlage die Modifikationsparameter berücksichtigt werden, wobei

für jede der parallelen Bearbeitungsanlagen eigene Modifikationsparameter berücksichtigt werden.

[0040] Gemäß einer besonderen Ausprägung ist es möglich, dass in den Modifikationsparametern Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges und/oder der Bearbeitungsanlage berücksichtigt werden. Durch diese Maßnahmen kann das Bearbeitungsergebnis überraschenderweise verbessert werden. Diese überraschenden Vorteile können insbesondere dadurch erzielt werden, dass nicht nur das Verhalten der Bearbeitungsanlage an sich sondern auch das aufgrund des Verschleißes auftretende Verhalten berücksichtigt wird.

[0041] In einer Weiterbildung ist es auch denkbar, dass in den Modifikationsparametern die Beschaffenheit eines Werkstückes bzw. die vorhergehenden Bearbeitungsschritte an einem Werkstück berücksichtigt werden.

[0042] Entsprechend einer vorteilhaften Weiterbildung kann vorgesehen sein, dass die Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges auf einem Speicherchip, wie etwa einem RFID-Chip direkt am Bearbeitungswerkzeug abgespeichert werden, oder dass die Bearbeitungsanlagen mittels eines Netzwerkes mit einer zentralen Verschleißdatenbank verbunden sind und dass die Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges in die Verschleißdatenbank übertragen werden. Somit ist es möglich, den Verschleiß des Bearbeitungswerkzeuges lückenlos zu dokumentieren, um die entsprechenden Werte im weiteren Betrieb der Bearbeitungsanlage berücksichtigen zu können.

[0043] Insbesondere kann es vorteilhaft sein, wenn in den Modifikationsparametern aktuelle Maschinendaten, wie etwa Umgebungstemperatur, Temperatur im Zerspanungsraum, aktuell anliegende Schnittkräfte, berücksichtigt werden, wobei die Maschinendaten mittels Sensoren und/oder durch Ermittlung der Motorströme von Antriebsmotoren erfasst werden.

[0044] Ferner kann vorgesehen sein, dass in den Modifikationsparametern die erreichte Oberflächenqualität bzw. die Genauigkeit von bereits an der Bearbeitungsanlage gefertigten Werkstücken berücksichtigt wird, wobei die bei bestimmten Bewegungsvorgaben und bestimmten Modifikationsparametern erreichte Oberflächenqualität bzw. Genauigkeit analysiert wird. Dies bringt insbesondere die Vorteile mit sich, dass auf Basis der gefertigten Werkstücke das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage angepasst werden kann und somit eine Alterung der Bearbeitungsanlage bzw. Verschleißerscheinungen der Bearbeitungsanlage berücksichtigt werden zu können. Insbesondere ist es dabei denkbar, dass auf Basis der Messdaten der gefertigten Werkstücke auf etwaige Verschleißerscheinungen rückgeschlossen wird bzw. dass auf Basis dieser Messdaten ein Wartungsplan erstellt wird.

[0045] Darüber hinaus kann vorgesehen sein, dass mehrere Bearbeitungsanlagen mittels eines Netzwerkes miteinander gekoppelt sind, wobei die Modifikationsparameter unter Berücksichtigung von Daten aus den anderen Bearbeitungsanlagen angepasst werden. Dies bringt insbesondere die Vorteile mit sich, dass jene Bearbeitungsanlage, welche schon lange in Betrieb sind, als Referenz zur Planung von Wartungsintervallen und von kürzer in Betrieb befindlichen Bearbeitungsanlagen dienen können. Weiters ist es auch denkbar, dass übermäßige Verschleißerscheinungen von älteren Bearbeitungsanlagen ausgewertet werden und in den Modifikationsparametern von jüngeren Bearbeitungsanlagen berücksichtigt werden, um derartige Verschleißerscheinungen an den jüngeren Bearbeitungsanlagen zu minimieren.

[0046] Erfindungsgemäß ist eine Bearbeitungsanlage für die mechanische Bearbeitung von Werkstücken vorgesehen, wobei in der Bearbeitungsanlage ein Bearbeitungswerkzeug aufnehmbar ist, wobei die Bearbeitungsanlage eine Maschinensteuerung aufweist, welche zum Ausführen des obig beschriebenen Verfahrens ausgebildet ist.

[0047] Gemäß einer Weiterbildung ist es möglich, dass die einzelnen Bewegungsachsen der Bearbeitungsanlage so ausgelegt sind, dass die Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren der einzelnen Bewegungsachsen im Vergleich zueinander eine maximale Abweichung von kleiner 10 m/(min*mm), insbesondere von kleiner 5 m/(min*mm), bevorzugt von kleiner 0,3 m/(min*mm) aufweisen.

[0048] Ferner kann ein Verfahren zum Warten einer Bearbeitungsanlage vorgesehen sein. Das Verfahren umfasst die Verfahrensschritte:

- Aufbauen einer Messanordnung an der Bearbeitungsanlage;
- Aufbringen einer dynamischen mechanischen Belastung auf die Bearbeitungsanlage;
- Auswerten des in der Messanordnung gemessenen Schwingungsverhaltens der Bearbeitungsanlage;
- Vergleichen des in der Messanordnung gemessenen Schwingungsverhaltens der Bearbeitungsanlage mit einem zu einem früheren Zeitpunkt gemessenen Schwingungsverhalten der Bearbeitungsanlage oder mit einem, auf Basis eines virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage berechneten, zu erwartenden Schwingungsverhalten der Bearbeitungsanlage.

[0049] Das erfindungsgemäße Verfahren bringt den Vorteil mit sich, dass mittels des Verfahrens einfach festgestellt werden kann, wenn die Bearbeitungsanlage eine strukturelle Veränderung aufweist, welche auf ein Bauteilgebrechen Rückschlüsse ziehen lässt. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass die Auswertung des Schwingungsverhaltens, welche auch als Modalanalyse bezeichnet wird, in periodischen Abständen durchgeführt wird, um strukturelle Veränderungen an der Bearbeitungsanlage frühzeitig erkennen zu können.

[0050] Insbesondere ist es denkbar, dass bei mehreren baugleichen Bearbeitungsanlagen die Veränderungen im Frequenzspektrum vor und nach dem erneuern von Bauteilen der Bearbeitungsanlage abgespeichert werden. Somit kann in einem selbstlernenden Algorithmus auf Basis der alterungsbedingten Veränderungen des Frequenzspektrums und der Kenntnis der parallelen Bearbeitungsanlage bereits auf Basis der Änderungen im Frequenzspektrum auf ein spezifisches Bauteilgebrechen bzw. eine spezifische Bauteilermüdung geschlossen werden. Somit ist es möglich durch einfache Frequenzanalyse defekte Bauteile zu lokalisieren.

[0051] Ferner kann vorgesehen sein, dass die Messanordnung zumindest einen Beschleunigungssensor zur Erfassung einer Schwingung aufweist, wobei die Lage und die Position des Beschleunigungssensors an der Bearbeitungsanlage ermittelt wird und dass die dynamische mechanische Belastung mittels eines Impulshammers auf die Bearbeitungsanlage aufgebracht wird, wobei der Impulshammer einen Kraftsensor zur Erfassung der Einwirkkraft und einen Sensor zur Erfassung der aktuellen Lage und/oder Orientierung des Impulshammers aufweist, wobei der Beschleunigungssensor und der Impulshammer drahtlos mit einem Messrechner gekoppelt sind und in Echtzeit die Daten des Beschleunigungssensor und des Impulshammers an den Messrechner übermittelt werden.

[0052] Die Verwendung einer derartigen Messanordnung bringt den Vorteil mit sich, dass die Eigenfrequenzen der Bearbeitungsanlage einfach erfasst werden können.

[0053] In einer alternativen Ausführungsvariante kann auch vorgesehen sein, dass ein in der Bearbeitungsanlage standardmäßig verbauter Sensor, wie etwa ein Wegmesssensor der Bearbeitungsachsen, zur Erfassung der Schwingungen der Bearbeitungsanlage dient.

[0054] In einer alternativen Ausführungsvariante kann auch vorgesehen sein, dass die Bearbeitungsanlage nicht durch einen Impulshammer angeregt wird, sondern dass sich die Bearbeitungsanlage durch Verfahrbewegungen selbst anregt. Insbesondere kann hierbei ein eigenes Anregeprogramm vorgesehen sein, bei welchem die Verfahrbewegungen entsprechend einem vorbestimmten Verfahrensablauf erfolgen. Somit kann der Beschleunigungssensor zur Erfassung einer Schwingung auch in einem wiederkehrenden Rhythmus die Schwingungen erfassen.

[0055] Ferner kann vorgesehen sein, dass der Impulshammer ein Anzeigemittel aufweist, welches zur Anzeige der Güte des Schlages auf die Bearbeitungsanlage dient. Dies bringt den überraschenden Vorteil mit sich, dass eine Person, welche die Messung durchführt, einfach erkennen kann, ob die Anregung der Bearbeitungsanlage richtig durchgeführt wurde. Somit kann das Messergebnis verbessert werden.

[0056] Ferner kann vorgesehen sein, dass das Anzeigemittel als optisches Anzeigemittel ausge-

bildet ist, wobei durch farblich unterschiedliche Darstellung die Güte des Schlages auf die Bearbeitungsanlage dargestellt wird oder dass das Anzeigemittel als akustisches Anzeigemittel ausgebildet ist, wobei durch unterschiedliche Töne oder Tonabfolgen oder durch unterschiedliche Lautstärken die Güte des Schlages auf die Bearbeitungsanlage dargestellt wird oder dass das Anzeigemittel als haptisches Anzeigemittel ausgebildet ist. Besonders derart ausgebildete Anzeigemittel können in einer rauen Umgebung, wie etwa in einer Maschinenhalle einfach erkannt werden.

[0057] Insbesondere die Verwendung einer drahtlosen Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen der Messanordnung bringt eine überraschend einfache Handhabung mit sich. In Kombination mit einem Impulshammer mit einem Anzeigemittel führt dies zu überraschen präzisen Messergebnissen.

[0058] Ferner kann vorgesehen sein, dass an der Bearbeitungsanlage zumindest eine Beschleunigungssensoraufnahme ausgebildet ist, sodass der Beschleunigungssensor an einer festgelegten Aufnahmeposition und in einer festgelegten Aufnahmeausrichtung an der Bearbeitungsanlage aufgenommen wird.

[0059] Darüber hinaus kann vorgesehen sein, dass im Messrechner ein Modell der Bearbeitungsanlage hinterlegt ist, wobei im Modell die Beschleunigungssensoraufnahme definiert ist und dass die aktuelle Lage und/oder Orientierung des Impulshammers relativ zum Beschleunigungssensor ermittelt wird, wodurch die Auftreffposition des Impulshammers auf die Bearbeitungsanlage errechnet wird.

[0060] Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die Person, welche die Messung durchführt, eine beliebige Stelle der Bearbeitungsanlage anschlagen kann. Insbesondere kann es notwendig sein, dass zu Beginn der Messung ein Referenzhammerschlag in unmittelbarer Nähe des Sensors durchgeführt wird.

[0061] Dass das Bearbeitungswerkzeug und das Werkstück relativ zueinander bewegt werden, kann in einem ersten Ausführungsbeispiel dadurch realisiert werden, dass das Werkstück stillsteht und das Bearbeitungswerkzeug bewegt wird. In einem weiteren Ausführungsbeispiel ist es auch denkbar, dass das Bearbeitungswerkzeug ausschließlich um seine Rotationsachse rotiert und das Werkstück bewegt wird. In wieder einem anderen Ausführungsbeispiel ist es auch denkbar, dass sowohl das Bearbeitungswerkzeug, als auch das Werkstück gleichzeitig bewegt werden. Insbesondere kann hierbei vorgesehen werden, dass das Bearbeitungswerkzeug und das Werkstück in unterschiedlichen Achsen bewegt werden. Eine Bewegung des Bearbeitungswerkzeuges kann durch eine Drehbewegung um eine Drehführung oder durch eine Längsverschiebung entlang einer Längsführung realisiert werden.

[0062] Ferner kann vorgesehen sein, dass die dynamische mechanische Belastung auf die Bearbeitungsanlage aufgebracht wird, während zumindest eine der Bewegungsachsen in Bewegung ist. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass durch die Bewegung einer der Bewegungsachsen der Bearbeitungsanlage die Haftreibung dieser bewegten Bewegungsachsen bereits überwunden ist und an der Bewegungsachse eine Rollreibung bzw. Gleitreibung anliegt. Damit kann das tatsächliche Verhalten der Bearbeitungsanlage, wie es auch im Betrieb auftritt, erfasst werden. Bei einer Anregung im Stillstand der Bearbeitungsanlage kann es aufgrund der Haftreibung zu verfälschten Werten kommen.

[0063] Ferner kann ein Verfahren zum Warten einer Bearbeitungsanlage vorgesehen sein. Das Verfahren umfasst die Verfahrensschritte:

- Verwenden einer Messanordnung an der Bearbeitungsanlage;
- Aufbringen einer dynamischen mechanischen Belastung auf die Bearbeitungsanlage;
- Auswerten des in der Messanordnung gemessenen Regelverhaltens der Bearbeitungsanlage;
- Vergleichen des in der Messanordnung gemessenen Regelverhaltens der Bearbeitungsanlage mit einem zu einem früheren Zeitpunkt gemessenen Regelverhalten der Bearbeitungsanlage oder mit einem, auf Basis eines virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage berechne-

ten, zu erwartenden Regelverhalten der Bearbeitungsanlage.

[0064] Das erfindungsgemäße Verfahren bringt den Vorteil mit sich, dass mittels des Verfahrens einfach festgestellt werden kann, wenn die Bearbeitungsanlage eine strukturelle Veränderung aufweist, welche auf ein Bauteilgebrechen Rückschlüsse ziehen lässt. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass die Auswertung des Regelverhaltens, in periodischen Abständen durchgeführt wird, um strukturelle Veränderungen an der Bearbeitungsanlage frühzeitig erkennen zu können. Insbesondere kann diese Analyse der Bearbeitungsanlage unter Verwendung der standardmäßig in der Bearbeitungsanlage verbauten Antriebe bzw. Sensoren erfolgen.

[0065] In einem kaskadiertem Regler sind eine Vielzahl von Regelkreisen mit Regelparameter vorsehbar. Beispielsweise Stromregelung, Drehzahlregelung und weitere.

[0066] Eine dynamische mechanische Belastung im Sinne dieses Dokumentes kann beispielsweise ein extern zugefügter Schlag bzw. Impuls sein. Eine dynamische mechanische Belastung kann jedoch auch durch Bewegungen zumindest einer der Bewegungsachsen der Bearbeitungsanlage eingeleitet werden. Eine statische mechanische Belastung kann beispielsweise eine konstant wirkende Kraft sein. Beide Begriffe lassen sich unter dem Oberbegriff mechanische Belastung zusammenfassen.

[0067] Erfindungsgemäß ist eine Messvorrichtung ausgebildet. Die Messvorrichtung umfasst:

- einen Impulshammer;
- einen Beschleunigungssensor;
- einen Messrechner, wobei der Impulshammer einen Kraftsensor zur Erfassung der Einwirkkraft und einen Sensor zur Erfassung der aktuellen Lage und/oder Orientierung des Impulshammers aufweist, wobei der Beschleunigungssensor und der Impulshammer drahtlos mit einem Messrechner gekoppelt sind und in Echtzeit die Daten des Beschleunigungssensor und des Impulshammers an den Messrechner übermittelbar sind.

[0068] Die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit wird auch als Vorschubgeschwindigkeit bzw. als Verfahrgeschwindigkeit bezeichnet.

[0069] Die zweite Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit wird auch als Beschleunigung bezeichnet.

[0070] Die dritte Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges und/oder des Werkstückes nach der Zeit wird auch als Ruck bezeichnet.

[0071] Das Abstandmasseprodukt im Sinne dieser Anmeldung ergibt sich aus einer Masse, von welcher der Massenschwerpunkt in einem Abstand zu einer Führung, insbesondere Längsführung oder Drehführung, angeordnet ist. Die betreffende Masse kann sich aus der Masse der bewegten Teile der Bearbeitungsanlage an sich berechnen. Weiters kann vorgesehen sein, dass in der zur Berechnung des Abstandmasseproduktes herangezogenen Masse, die Masse des Bearbeitungswerkzeuges ebenfalls berücksichtigt wird. Weiters kann vorgesehen sein, dass in der zur Berechnung des Abstandmasseproduktes herangezogenen Masse die Masse des Werkstückes ebenfalls berücksichtigt wird. Für die verschiedenen in der Bearbeitungsanlage vorhandenen Führungen können einzeln und unabhängig voneinander die Abstandmasseprodukte berechnet werden.

[0072] Weiters kann vorgesehen sein, dass ein Basisabstandmasseprodukt definiert ist, bei welchem die Bewegungsvorgaben nicht durch die Modifikationsparameter angepasst werden, sondern die tatsächlich ausgeführten Bewegungen den Bewegungsvorgaben entsprechen. Bei einem gegenüber dem Basisabstandmasseprodukt erhöhten aktuellen Abstandmasseprodukt werden die Modifikationsparameter derart berechnet, dass sie die tatsächlich ausgeführten Bewegungen, insbesondere die erste, zweite oder dritte Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges nach der Zeit, gegenüber den Bewegungsvorgaben verringern.

[0073] Das Basisabstandmasseprodukt im Sinne dieser Anmeldung ist jenes Abstandmassepro-

dukt, bei welchem die maximal auf der Bearbeitungsanlage zulässigen Bewegungsvorgaben ausgeführt werden können.

[0074] Ein virtuelles Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage kann direkt auf Basis von Konstruktionsdaten, daher direkt auf Basis des CAD-Modelles erstellt werden. Weiters ist es auch denkbar, dass das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage auf Basis von Vermessungsdaten der tatsächlich gefertigten Bearbeitungsanlage erstellt wird. Das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage kann Informationen von Geometriedaten der Bearbeitungsanlage enthalten. Weiters ist es auch denkbar, dass das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage Materialeigenschaften, wie etwa die Festigkeit oder die Dichte von einzelnen Bauteilen enthält.

[0075] In den Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges kann die maximale Standzeit des Bearbeitungswerkzeuges und die tatsächlich eingesetzte Ist-Einsatzzeit des Bearbeitungswerkzeuges berücksichtigt werden. Weiters ist es auch denkbar, dass in den Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges zusätzlich zur Ist-Einsatzzeit auch die jeweils vorgelegenen Belastungsparameter, wie etwa Schnitttemperatur, Schnittkraft, Schnittgeschwindigkeit, Spantiefe, zerspannte Werkstoffe usw. berücksichtigt werden. Insbesondere kann die Auftretedauer der jeweiligen Belastungsparameter über die Zeit berücksichtigt werden.

[0076] In den Verschleißdaten der Bearbeitungsanlage kann die maximale Lebensdauer der Bearbeitungsanlage und die tatsächlich eingesetzte Ist-Einsatzzeit der Bearbeitungsanlage berücksichtigt werden. Weiters ist es auch denkbar, dass in den Verschleißdaten der Bearbeitungsanlage der Wartungszustand der Bearbeitungsanlage, die jeweils vorgelegenen Belastungsparameter, wie etwa auftretende Kräfte, auftretende Schwingungen usw. berücksichtigt werden. Insbesondere kann die Auftretedauer der jeweiligen Belastungsparameter über die Zeit berücksichtigt werden.

[0077] Eine Zustandsraumdarstellung im Sinne dieses Dokumentes ist eine Methode der Analyse und Synthese dynamischer Systeme im Zeitbereich. Dabei werden sämtliche Beziehungen der Zustandsgrößen, der Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen in Form von Matrizen und Vektoren dargestellt. Das Zustandsraummodell wird durch zwei Gleichungen - die Zustandsdifferenzialgleichung erster Ordnung und die Ausgangsgleichung - beschrieben.

[0078] Zum besseren Verständnis der Erfindung wird diese anhand der nachfolgenden Figuren näher erläutert.

[0079] Es zeigen jeweils in stark vereinfachter, schematischer Darstellung:

[0080] Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Bearbeitungsanlage.

[0081] Einführend sei festgehalten, dass in den unterschiedlich beschriebenen Ausführungsformen gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen bzw. gleichen Bauteilbezeichnungen versehen werden, wobei die in der gesamten Beschreibung enthaltenen Offenbarungen sinngemäß auf gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen bzw. gleichen Bauteilbezeichnungen übertragen werden können. Auch sind die in der Beschreibung gewählten Lageangaben, wie z.B. oben, unten, seitlich usw. auf die unmittelbar beschriebene sowie dargestellte Figur bezogen und sind diese Lageangaben bei einer Lageänderung sinngemäß auf die neue Lage zu übertragen.

[0082] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Bearbeitungsanlage 1 zur spanabhebenden Bearbeitung von Werkstücken 8. Die Bearbeitungsanlage 1 weist ein Maschinengestell 2 auf, welches als Basis für die daran angebauten Bauteile dient.

[0083] Das Maschinengestell 2 ist in Fig. 1 der Übersichtlichkeit halber nur schematisch dargestellt. Es sei jedoch festgehalten, dass das Maschinengestell 2 am Aufstellungsort verankert sein kann. Darüber hinaus dient das Maschinengestell 2 natürlich zur Aufnahme sämtlicher Bauteile der Bearbeitungsanlage 1.

[0084] Weiters ist eine Spindelverstellvorrichtung 3 ausgebildet, welche am Maschinengestell 2 angeordnet ist bzw. mit diesem gekoppelt ist. Die Spindelverstellvorrichtung 3 weist einen Ar-

beitskopf 4 auf, an welchem eine Arbeitsspindel 5 gelagert ist. Die Arbeitsspindel 5 ist um eine Spindelachse 6 drehbar am Arbeitskopf 4 gelagert. Die Arbeitsspindel 5, dient zur Aufnahme eines Bearbeitungswerkzeugs 7 und weist hierzu eine Spannvorrichtung zur Aufnahme des Bearbeitungswerkzeugs 7 auf.

[0085] Die Arbeitsspindel 5 ist mittels der Spindelverstellvorrichtung 3 in einer vertikalen Z-Achse 9, in einer horizontalen X-Achse 10 und in einer im rechten Winkel zur Z-Achse 9 und X-Achse 10 angeordneten Y-Achse 11 relativ zum Maschinengestell 2 verstellbar. Das Ausführungsbeispiel der Bearbeitungsanlage 1 dient nur zur Veranschaulichung, wobei der Aufbau der Bearbeitungsanlage 1, insbesondere die Ausrichtung und Bewegungsmöglichkeit der Achsen 9, 10, 11 sich natürlich auch anders ausgebildet sein kann.

[0086] Die Spindelverstellvorrichtung 3 weist eine Hauptverstelleinheit 12 auf, welche mittels einer X-Achsen-Linearführung 13 mit dem Maschinengestell 2 gekoppelt ist. Zur vereinfachten Veranschaulichung ist die X-Achsen-Linearführung 13 nur rudimentär dargestellt. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass die X-Achsen-Linearführung 13 vier Führungsschlitten bzw. Führungsschuhe aufweist, welche mit der Hauptverstelleinheit 12 gekoppelt sind und welche mit zwei Führungsschienen zusammenwirken, die mit dem Maschinengestell 2 gekoppelt sind.

[0087] Durch die X-Achsen-Linearführung 13 ist die Hauptverstelleinheit 12 in Richtung der X-Achse 10 relativ bezüglich des Maschinengestells 2 verschiebbar.

[0088] Weiters kann vorgesehen sein, dass eine Höhenverstelleinheit 14 ausgebildet ist, welche mittels einer Z-Achsen-Linearführung 15 mit der Hauptverstelleinheit 12 gekoppelt ist. Durch die Z-Achsen-Linearführung 15 ist die Höhenverstelleinheit 14 entlang der Z-Achse 9 relativ zur Hauptverstelleinheit 12 bzw. relativ zum Maschinengestell 2 verschiebbar.

[0089] Die Z-Achsen-Linearführung 15 kann ebenfalls eine Führungsschiene aufweisen, welche an der Hauptverstelleinheit 12 angeordnet ist und welche mit einem oder mehreren Führungsschlitten gekoppelt ist, die an der Höhenverstelleinheit 14 angeordnet sind.

[0090] Weiters ist eine Ausschubeinheit 16 ausgebildet, welche mittels einer Y-Achsen-Linearführung 17 an der Höhenverstelleinheit 14 angeordnet ist. Mittels der Y-Achsen-Linearführung 17 ist die Ausschubeinheit 16 in Richtung der Y-Achse 11 relativ zur Höhenverstelleinheit 14, zur Hauptverstelleinheit 12 und zum Maschinengestell 2 verschiebbar. Die Y-Achsen-Linearführung 17 kann beispielsweise in Form eines Teleskoparmes ausgeführt sein. Alternativ dazu ist es denkbar, dass die Y-Achsen-Linearführung 17 beispielsweise ebenfalls Führungsschlitten umfassen, welche mit einer Führungsschiene gekoppelt sind.

[0091] Außerdem kann vorgesehen sein, dass der Arbeitskopf 4 mittels einer Schwenklagerung 18 schwenkbar bezüglich einer Arbeitskopfschwenkachse 19 an der Ausschubeinheit 16 aufgenommen ist.

[0092] In einer nicht dargestellten Alternativvariante kann vorgesehen sein, dass der Arbeitskopf 4 starr an der Ausschubeinheit 16 aufgenommen ist.

[0093] Durch den beschriebenen Aufbau der Spindelverstellvorrichtung 3 ist der Arbeitskopf 4 bezüglich dem Maschinengestell 2 in der Z-Achse 9, in der X-Achse 10 und in der Y-Achse 11 verschiebbar sowie bezüglich der parallel zur Y-Achse 11 liegenden Arbeitskopfschwenkachse 19 verdrehbar.

[0094] Außerdem umfasst die Bearbeitungsanlage 1 eine Werkstückspannvorrichtung 20, welche zur Aufnahme der zu bearbeitenden Werkstücke 8 dient.

[0095] Die Werkstückspannvorrichtung 20 weist zumindest einen ersten Werkstücktisch 21 auf. Der erste Werkstücktisch 21 ist bezüglich einer ersten Schwenkachse 22 relativ zum Maschinengestell 2 verschwenkbar.

[0096] Wie aus Fig. 1 weiters ersichtlich, ist eine Maschinensteuerung 23 vorgesehen, welche zur Steuerung der einzelnen Antriebe der Bearbeitungsanlage 1 dient. Die Maschinensteuerung 23 kann mit einem zentralen Rechner 24 gekoppelt sein, welcher zur Erstellung eines Pro-

grammablaufes dienen kann.

[0097] Wie aus Fig. 1 weiters ersichtlich, weist beispielsweise die Ausschubeinheit 16 einen Massenschwerpunkt 25 auf, welcher in einem Abstand 26 zur Z-Achsen-Linearführung 15 der Höhenverstelleinheit 14 angeordnet ist. Aus der Multiplikation der Masse mit dem Abstand 26 ergibt sich das Abstandmasseprodukt. Die Größe der Masse der Ausschubeinheit 16 ist von der Masse des Bearbeitungswerkzeuges 7 abhängig.

[0098] Der Masse der Ausschubeinheit 16 werden alle mittels der Z-Achsen-Linearführung 15 verschiebbaren Bauteile zugeordnet. Die Position des Massenschwerpunktes 25 der Ausschubeinheit 16 ist davon abhängig, wie weit die Ausschubeinheit 16 ausgeschoben ist. Der Abstand 26 des Massenschwerpunktes 25 der Ausschubeinheit 16 kann sich somit während dem Betrieb der Bearbeitungsanlage 1 verändern. Wenn nun der Abstand 26 des Massenschwerpunktes 25 der Ausschubeinheit 16 aufgrund der aktuellen Bearbeitungslage geringer ist, so ist auch das Abstandmasseprodukt geringer, wodurch an der X-Achsen-Linearführung 13 und an der Z-Achsen-Linearführung 15 eine erhöhte Beschleunigung erreicht werden kann, ohne dabei eine erhöhte Belastung auf die Bearbeitungsanlage 1 auszuüben.

[0099] Analog dazu weist die Höhenverstelleinheit 14 einen Massenschwerpunkt 27 auf. Der Massenschwerpunkt 27 der Höhenverstelleinheit 14 ist in einem Abstand 28 zur X-Achsen-Linearführung 13 der Hauptverstelleinheit 12 angeordnet. Die Position des Massenschwerpunktes 27 der Höhenverstelleinheit 14 ist einerseits von der Position der Ausschubeinheit 16 sowie von der Position des Arbeitskopfes 4 sowie von der Masse des Bearbeitungswerkzeuges 7 abhängig. Auch hier kann ein Abstandmasseprodukt berechnet werden, welches während dem Betrieb der Bearbeitungsanlage 1 variieren kann.

[00100] Die maximal möglichen Beschleunigungswerte der einzelnen Linearführungen 13, 15, 17 sind somit von der aktuellen Positionierung der Bearbeitungsanlage 1 abhängig und können somit zur Steigerung der Effizienz je nach Lage der einzelnen Masseschwerpunkte 25, 27 angepasst werden.

[00101] Natürlich kann mutatis mutandis zu den oben beschriebenen Masseschwerpunkten 25, 27 für jede weitere Linearachse ein Massenschwerpunkt berechnet werden. Weiters ist natürlich auch bei Drehachsen der Massenschwerpunkt zur Berechnung des Massenträgheitsmomentes relevant, wodurch die maximale Winkelbeschleunigung berechnet werden kann. Auch die maximale Winkelbeschleunigung kann je nach Größe des Massenträgheitsmomentes während dem Betrieb der Bearbeitungsanlage 1 angepasst bzw. variiert werden.

[00102] Fig. 1 zeigt außerdem eine Messanordnung 29 welche einen Beschleunigungssensor 30, einen Impulshammer 31 mit einem Anzeigemittel 32 und einen Messrechner 33 aufweist. Der Beschleunigungssensor 30 und der Impulshammer 31 können drahtlos mit dem Messrechner gekoppelt sein. Weiters kann vorgesehen sein, dass an der Bearbeitungsanlage 1 eine festgelegte Beschleunigungssensoraufnahme 34 ausgebildet ist, an welcher der Beschleunigungssensor 30 angeordnet wird.

[00103] Der Ordnung halber sei abschließend darauf hingewiesen, dass zum besseren Verständnis des Aufbaus Elemente teilweise unmaßstäblich und/oder vergrößert und/oder verkleinert dargestellt wurden.

BEZUGSZEICHENLISTE

- | | | | |
|----|-----------------------------|----|---------------------------|
| 1 | Bearbeitungsanlage | 28 | Abstand Führung Hauptver- |
| 2 | Maschinengestell | | stelleinheit |
| 3 | Spindelverstellvorrichtung | 29 | Messanordnung |
| 4 | Arbeitskopf | 30 | Beschleunigungssensor |
| 5 | Arbeitsspindel | 31 | Impulshammer |
| 6 | Spindelachse | 32 | Anzeigemittel |
| 7 | Bearbeitungswerkzeug | 33 | Messrechner |
| 8 | Werkstück | 34 | Beschleunigungssensorauf- |
| 9 | Z-Achse | | nahme |
| 10 | X-Achse | | |
| 11 | Y-Achse | | |
| 12 | Hauptverstelleinheit | | |
| 13 | X-Achsen-Linearführung | | |
| 14 | Höhenverstelleinheit | | |
| 15 | Z-Achsen-Linearführung | | |
| 16 | Ausschubeinheit | | |
| 17 | Y-Achsen-Linearführung | | |
| 18 | Schwenklagerung Arbeitskopf | | |
| 19 | Arbeitskopfschwenkachse | | |
| 20 | Werkstückspannvorrichtung | | |
| 21 | erster Werkstücktisch | | |
| 22 | erste Schwenkachse | | |
| 23 | Maschinensteuerung | | |
| 24 | zentraler Rechner | | |
| 25 | Massenschwerpunkt Aus- | | |
| | schubeinheit | | |
| 26 | Abstand Führung Höhenver- | | |
| | stelleinheit | | |
| 27 | Massenschwerpunkt Höhen- | | |
| | verstelleinheit | | |

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben einer Bearbeitungsanlage (1) für die mechanische Bearbeitung von Werkstücken (8), wobei in der Bearbeitungsanlage (1) ein Bearbeitungswerkzeug (7) aufgenommen ist, wobei beim Bearbeiten des Werkstückes (8) das Bearbeitungswerkzeug (7) und das Werkstück (8) relativ zueinander bewegt werden und das Bearbeitungswerkzeug (7) mit dem Werkstück (8) in Eingriff steht, wobei die Bewegungsvorgaben für die Bearbeitungsanlage (1) in eine Maschinensteuerung (23) eingegeben werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bewegungsvorgaben computerimplementiert durch Modifikationsparameter angepasst werden, sodass zumindest einzelne der tatsächlich ausgeführten Bewegungen der Bearbeitungsanlage (1) von den eingegebenen Bewegungsvorgaben abweichen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Modifikationsparameter eine oder mehrere der folgenden Bewegungsvorgaben anpassen:
die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges (7) und/oder des Werkstückes (8) nach der Zeit;
die zweite Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges (7) und/oder des Werkstückes (8) nach der Zeit;
die dritte Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges (7) und/oder des Werkstückes (8) nach der Zeit;
die Schnitttiefe;
die Schnittgeschwindigkeit.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Modifikationsparameter auf Basis eines vorliegenden virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage (1) unter Berücksichtigung der aktuellen Bearbeitungszustände und Bearbeitungspositionen berechnet werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage (1) durch folgende Verfahrensschritte erstellt wird:
 - Erstellen eines Finite-Elemente-Modelles der Bearbeitungsanlage (1) auf Basis eines CAD-Modelles der Bearbeitungsanlage (1);
 - Durchführen einer Modalanalyse auf Basis des Finite-Elemente-Modelles der Bearbeitungsanlage (1);
 - Erstellen eines Zustandsraummodelles, welches das physikalische Verhalten des Modelles repräsentiert, auf Basis der Modalanalyse;
 - Fertigen der Bearbeitungsanlage (1) oder eines Prototypen der Bearbeitungsanlage (1) auf Basis des CAD-Modelles der Bearbeitungsanlage (1);
 - Aufbauen einer Messanordnung (29) an der gefertigten Bearbeitungsanlage (1);
 - Durchführen einer Modalanalyse, welche das physikalische Verhalten der gefertigten Bearbeitungsanlage (1) repräsentiert, durch Aufbringen dynamischer mechanischer Belastungen an der gefertigten Bearbeitungsanlage (1) und erfassen der Schwingungen mittels der Messanordnung (29);
 - Anpassen des Zustandsraummodelles, sodass das physikalische Verhalten des Modelles innerhalb einer Abweichungstoleranz zum physikalischen Verhalten der gefertigten Bearbeitungsanlage (1) liegt, wobei das angepasste Zustandsraummodell das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage (1) repräsentiert.
5. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle Realkörpermodell der Bearbeitungsanlage (1) durch folgende Verfahrensschritte erstellt wird:
 - Fertigen der Bearbeitungsanlage (1) oder eines Prototypen der Bearbeitungsanlage (1);
 - Erstellen eines Neuronalen Netzes, wobei das Neuronale Netz das Schwingungsverhalten und das Verformungsverhalten der Bearbeitungsanlage (1) abbildet;
 - Aufbauen einer Messanordnung (29) an der gefertigten Bearbeitungsanlage (1);
 - Trainieren des Neuronalen Netzes durch Aufbringen mechanischer Belastungen an der gefertigten Bearbeitungsanlage (1) während dem Stillstand und während dem Durchführen von Verfahrbewegungen und dabei erfassen des Schwingungsverhaltens und des

- Verformungsverhaltens der Bearbeitungsanlage (1) mittels der Messanordnung (29) und Vergleich des mittels des Neuronalen Netzes für die Belastung vorhergesagten Verhaltens mit dem mittels der Messanordnung (29) gemessenen Verhaltens;
- Anpassen des Neuronalen Netzes;
 - Erstellen des Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage (1) auf Basis des trainierten Neuronalen Netzes.
6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein für eine Schwesterbearbeitungsanlage erstelltes Neuronales Netz oder Zustandsraummodell als Basis für das Trainieren des Neuronalen Netzes oder des Zustandsraummodelles der aktuellen Bearbeitungsanlage (1) verwendet wird, wobei ein verkürzter Trainingsalgorithmus zum Anpassen des Neuronalen Netzes oder des Zustandsraummodelles zur Anwendung kommt.
 7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für ausgewählte Bewegungsachsen der Bearbeitungsanlage (1) ein Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor ermittelt wird, wobei in den Modifikationsparametern der Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor berücksichtigt wird.
 8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges (7) und/oder des Werkstückes (8) nach der Zeit unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsverstärkungsfaktors angepasst wird, wobei Wertgrenzen für die einzelnen Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren definiert werden und wobei die erste Ableitung der Position des Bearbeitungswerkzeuges (7) und/oder des Werkstückes (8) nach der Zeit so groß als möglich gewählt wird, jedoch nur so groß gewählt wird, dass die Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren noch innerhalb der definierten Wertgrenzen liegen.
 9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Maschinensteuerung (23) in Form einer CNC-Steuerung ausgebildet ist, wobei die Modifikationsparameter in der CNC-Steuerung berücksichtigt werden.
 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in den Modifikationsparametern Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges (7) und/oder der Bearbeitungsanlage (1) berücksichtigt werden.
 11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges (7) auf einem Speicherchip, wie etwa einem RFID-Chip direkt am Bearbeitungswerkzeug (7) abgespeichert werden, oder dass die Bearbeitungsanlagen (1) mittels eines Netzwerkes mit einer zentralen Verschleißdatenbank verbunden sind und dass die Verschleißdaten des Bearbeitungswerkzeuges (7) in die Verschleißdatenbank übertragen werden.
 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in den Modifikationsparametern aktuelle Maschinendaten, wie etwa Umgebungstemperatur, Temperatur im Zerspanungsraum, aktuell anliegende Schnittkräfte, berücksichtigt werden, wobei die Maschinendaten mittels Sensoren und/oder durch Ermittlung der Motorströme von Antriebsmotoren erfasst werden.
 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in den Modifikationsparametern die erreichte Oberflächenqualität bzw. die Genauigkeit von bereits an der Bearbeitungsanlage (1) gefertigten Werkstücken (8) berücksichtigt wird, wobei die bei bestimmten Bewegungsvorgaben und bestimmten Modifikationsparametern erreichte Oberflächenqualität bzw. Genauigkeit analysiert wird.
 14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Bearbeitungsanlagen (1) mittels eines Netzwerkes miteinander gekoppelt sind, wobei die Modifikationsparameter unter Berücksichtigung von Daten aus den anderen Bearbeitungsanlagen (1) angepasst werden.
 15. Bearbeitungsanlage (1) für die mechanische Bearbeitung von Werkstücken (8), wobei in der Bearbeitungsanlage (1) ein Bearbeitungswerkzeug (7) aufnehmbar ist, wobei die Bearbei-

- tungsanlage (1) eine Maschinensteuerung (23) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Maschinensteuerung (23) zum Ausführen des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 14 ausgebildet ist.
16. Bearbeitungsanlage (1) nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Bewegungsachsen der Bearbeitungsanlage (1) so ausgelegt sind, dass die Geschwindigkeitsverstärkungsfaktoren der einzelnen Bewegungsachsen im Vergleich zueinander eine maximale Abweichung von 10 m/(min*mm), insbesondere von 5 m/(min*mm), bevorzugt von 0,3 m/(min*mm) aufweisen.
 17. Verfahren zum Warten einer Bearbeitungsanlage (1) umfassend die Verfahrensschritte:
 - Aufbauen einer Messanordnung (29) an der Bearbeitungsanlage (1);
 - Aufbringen einer dynamischen mechanischen Belastung auf die Bearbeitungsanlage (1);
 - Auswerten des in der Messanordnung (29) gemessenen Schwingungsverhaltens der Bearbeitungsanlage (1);
 - Vergleichen des in der Messanordnung (29) gemessenen Schwingungsverhaltens der Bearbeitungsanlage (1) mit einem zu einem früheren Zeitpunkt gemessenen Schwingungsverhalten der Bearbeitungsanlage (1) oder mit einem, auf Basis eines virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage (1) berechneten, zu erwartenden Schwingungsverhalten der Bearbeitungsanlage (1).
 18. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messanordnung (29) zumindest einen Beschleunigungssensor (30) zur Erfassung einer Schwingung aufweist, wobei die Lage und die Position des Beschleunigungssensors (30) an der Bearbeitungsanlage (1) ermittelt wird und dass die dynamische mechanische Belastung mittels eines Impulshammers (31) auf die Bearbeitungsanlage (1) aufgebracht wird, wobei der Impulshammer (31) einen Kraftsensor zur Erfassung der Einwirkkraft und einen Sensor zur Erfassung der aktuellen Lage und/oder Orientierung des Impulshammers (31) aufweist, wobei der Beschleunigungssensor (30) und der Impulshammer (31) drahtlos mit einem Messrechner (33) gekoppelt sind und in Echtzeit die Daten des Beschleunigungssensors (30) und des Impulshammers (31) an den Messrechner (33) übermittelt werden.
 19. Verfahren nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Impulshammer (31) ein Anzeigemittel (32) aufweist, welches zur Anzeige der Güte des Schlages auf die Bearbeitungsanlage (1) dient.
 20. Verfahren nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Anzeigemittel (32) als optisches Anzeigemittel ausgebildet ist, wobei durch farblich unterschiedliche Darstellung die Güte des Schlages auf die Bearbeitungsanlage (1) dargestellt wird oder dass das Anzeigemittel als akustisches Anzeigemittel ausgebildet ist, wobei durch unterschiedliche Töne oder Tonabfolgen oder durch unterschiedliche Lautstärken die Güte des Schlages auf die Bearbeitungsanlage (1) dargestellt wird oder dass das Anzeigemittel als haptisches Anzeigemittel ausgebildet ist.
 21. Verfahren nach einem der Ansprüche 18 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass an der Bearbeitungsanlage (1) zumindest eine Beschleunigungssensoraufnahme (34) ausgebildet ist, sodass der Beschleunigungssensor (30) an einer festgelegten Aufnahmeposition und in einer festgelegten Aufnahmeausrichtung an der Bearbeitungsanlage (1) aufgenommen wird.
 22. Verfahren nach einem der Ansprüche 18 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Messrechner (33) ein Modell der Bearbeitungsanlage (1) hinterlegt ist, wobei im Modell die Beschleunigungssensoraufnahme (34) definiert ist und dass die aktuelle Lage und/oder Orientierung des Impulshammers (31) relativ zum Beschleunigungssensor (30) ermittelt wird, wodurch die Auftreffposition des Impulshammers (31) auf die Bearbeitungsanlage (1) errechnet wird.
 23. Verfahren nach einem der Ansprüche 18 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass die dynamische mechanische Belastung auf die Bearbeitungsanlage (1) aufgebracht wird, während zumindest eine der Bewegungsachsen in Bewegung ist.

24. Verfahren zum Warten einer Bearbeitungsanlage (1) umfassend die Verfahrensschritte:
- Verwenden einer Messanordnung (29) an der Bearbeitungsanlage (1);
 - Aufbringen einer dynamischen mechanischen Belastung auf die Bearbeitungsanlage (1);
 - Auswerten des in der Messanordnung (29) gemessenen Regelverhaltens der Bearbeitungsanlage (1);
 - Vergleichen des in der Messanordnung (29) gemessenen Regelverhaltens der Bearbeitungsanlage (1) mit einem zu einem früheren Zeitpunkt gemessenen Regelverhalten der Bearbeitungsanlage (1) oder mit einem, auf Basis eines virtuellen Realkörpermodelles der Bearbeitungsanlage (1) berechneten, zu erwartenden Regelverhalten der Bearbeitungsanlage (1).
25. Messanordnung (29) umfassend:
- einen Impulshammer (31);
 - einen Beschleunigungssensor (30);
 - einen Messrechner (33);
- dadurch gekennzeichnet**, dass der Impulshammer (31) einen Kraftsensor zur Erfassung der Einwirkkraft und einen Sensor zur Erfassung der aktuellen Lage und/oder Orientierung des Impulshammers (31) aufweist, wobei der Beschleunigungssensor (30) und der Impulshammer (31) drahtlos mit einem Messrechner (33) gekoppelt sind und in Echtzeit die Daten des Beschleunigungssensor (30) und des Impulshammers (31) an den Messrechner (33) übermittelbar sind.

Hierzu 1 Blatt Zeichnungen

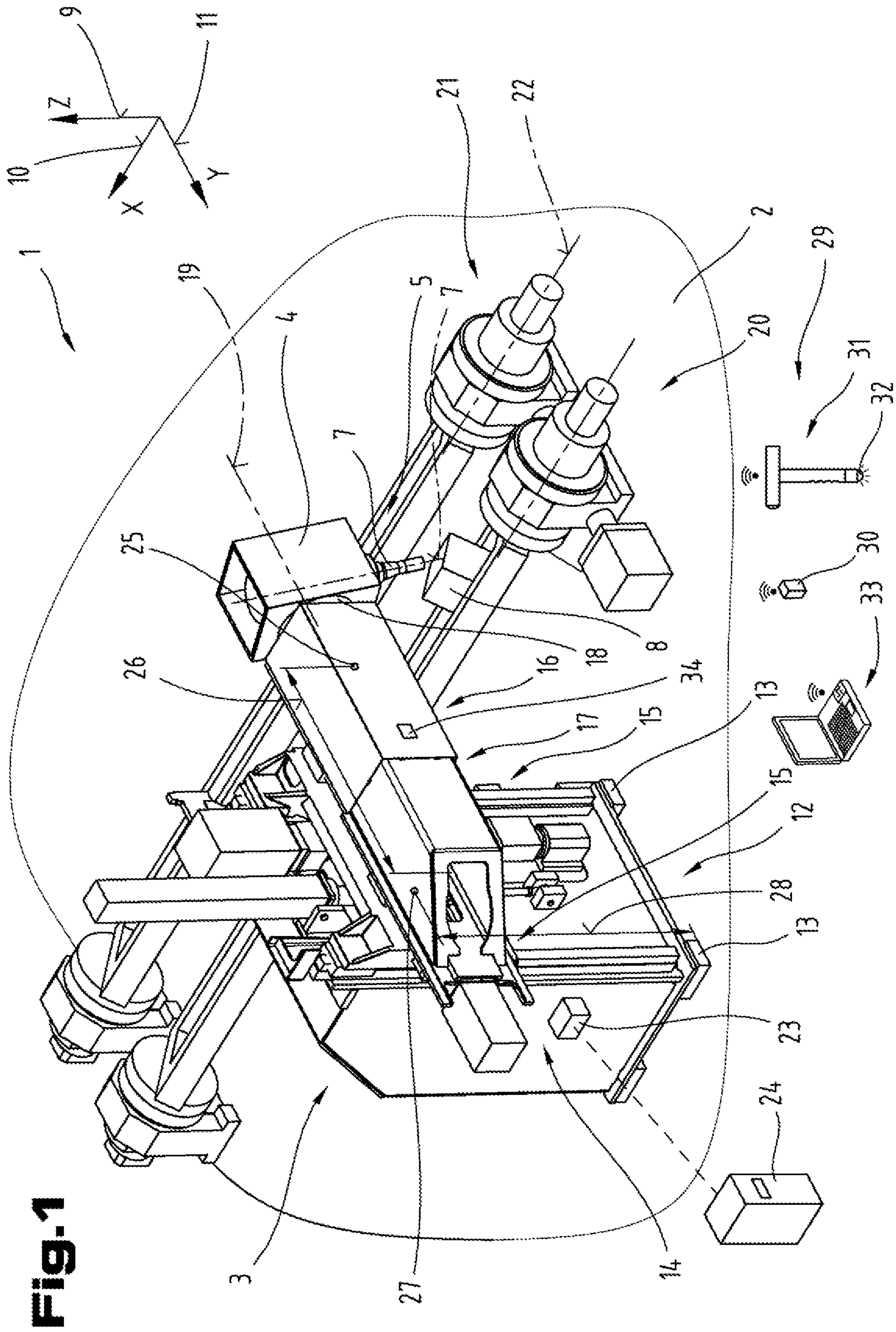


Fig. 1