



(10) **DE 10 2016 002 995 B3** 2017.03.02

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 002 995.1**

(22) Anmeldetag: **14.03.2016**

(43) Offenlegungstag: –

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **02.03.2017**

(51) Int Cl.: **G05B 19/4062** (2006.01)

**B23Q 17/00** (2006.01)

**B23Q 23/00** (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH, 72622  
Nürtingen, DE**

(72) Erfinder:

**Faigle, Bernd, 72622 Nürtingen, DE**

(74) Vertreter:

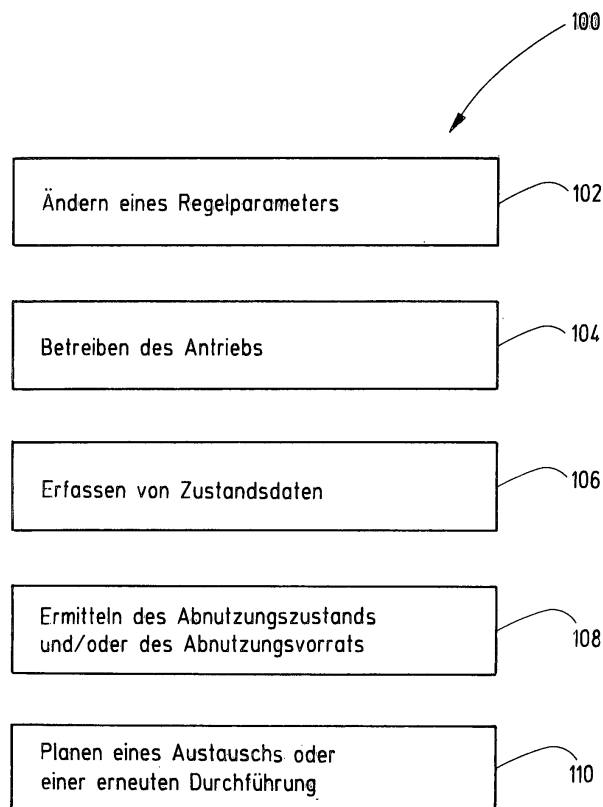
**Rüger, Barthelt & Abel, 73728 Esslingen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

|           |                        |           |
|-----------|------------------------|-----------|
| <b>DE</b> | <b>10 2005 058 038</b> | <b>B3</b> |
| <b>DE</b> | <b>699 30 506</b>      | <b>T2</b> |
| <b>EP</b> | <b>2 206 024</b>       | <b>B1</b> |

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Überwachung eines Antriebssystems einer Werkzeugmaschine**

(57) Zusammenfassung: Das erfindungsgemäße Verfahren (100) beruht darauf, dass ein funktioneller Zusammenhang zwischen dem Zustandsverhalten des Antriebs (16) einer Werkzeugmaschine (10) und einem Regelparameter (Kv) bzw. einer Größe, die eine Eigenschaft des Antriebs (16), insbesondere des mechanischen Übertragungssystems (22) bestimmt, und dem Abnutzungszustand bekannt ist oder durch einfache Testmessungen ermittelt und in der Datenbank hinterlegt werden kann. Der funktionelle Zusammenhang kann sich insbesondere durch eine plötzliche Änderung des Zustandsverhaltens bei einem bestimmten Abnutzungszustand auszeichnen, was problematisch für die Planung und Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme, insbesondere eines Austauschs, sein kann. Beim Normalbetrieb der Werkzeugmaschine (10) bleibt der Regelparameter oder die Größe in der Regel konstant und der Abnutzungszustand ändert sich mit der Zeit. In einem durch die Erfindung vorgeschlagenen beispielhaften Testbetrieb wird der Regelparameter (Kv) und/oder die Größe kurzzeitig von einem ersten Wert (w1) auf einen zweiten Wert (w2) geändert und der Antrieb mit dem geänderten Wert testweise betrieben, wobei aus dem Zustandsverhalten des Antriebs beim Betreiben der Werkzeugmaschine (10) mit dem geänderten Wert der aktuelle Abnutzungszustand des Antriebs (16), insbesondere des mechanischen Übertragungssystems (22) des Antriebs (16), zur Zeit der Durchführung des Tests ermittelt wird. Während des Erfassens (106) von Zustandsdaten auf Grund des Betriebes (104) des Antriebs mit geändertem Wert findet vorzugsweise keine Bearbeitung eines Werkstücks mit der Werkzeugmaschine statt. Besonders bevorzugt findet auch schon während des Änderns (102) des Regelparameters und/oder der Größe keine Bearbeitung eines Werkzeugs statt.



**Beschreibung**

**[0001]** DE 699 30 506 T2 offenbart ein System für eine Vielzahl von Maschinen, die einer vorausschauenden Wartung unterworfen werden sollen. Das System weist eine Vielzahl von Datenerfassungsgeräten mit Messwertgebern auf, die an den Maschinen angeordnet sind, um Vibrationen der Maschinen zu erfassen. Die Datenerfassungsgeräte bilden ein Peer-to-Peer-Netzwerk zum Austausch von Daten und Informationen.

**[0002]** EP 2 206 024 B1 offenbart ein Verfahren zur Überwachung der Güte eines Regelkreises in einem Kraftwerk. In einer Lernphase wird dazu eine Referenzregelgüte bestimmt. In einer Überwachungsphase wird diese Referenz zum Vergleich mit aktuellem Verhalten des Regelkreises herangezogen. Abweichungen von der Referenz können beispielsweise aufgrund von abgenutzten Stellglieder des Kraftwerks auftreten.

**[0003]** In einem Antriebssystem einer Werkzeugmaschine, beispielsweise dem Vorschubantriebssystem mit einem Vorschubantrieb oder dem Hauptantriebssystem, tritt im Wesentlichen an den mechanischen Übertragungselementen, beispielsweise einer Kupplung, einem Kugelgewindetrieb oder einem Zahnriemen, Abnutzung, insbesondere mechanischer Verschleiß, auf, so dass die Werkzeugmaschine folglich instand gehalten werden muss.

**[0004]** Grundsätzlich gibt es korrektive und präventive Instandhaltungsstrategien. In die Gruppe der präventiven Instandhaltungsstrategien gehört die zustandsorientierte Instandhaltung. Hier besteht das Ziel darin, anhand der Abnutzungszustände der Produktionsanlage, die als notwendig erkannte Instandhaltungsmaßnahmen zeit-, qualitäts- und kostenoptimal zu planen und durchzuführen. Um ausreichend Zeit für die Planung und Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme zu haben, muss jedoch ein drohender Ausfall frühzeitig erkannt werden. Ein Problem dabei ist jedoch die oftmals sehr steil verlaufende Ausfallcharakteristik und somit die fehlende Reaktionszeit zur Planung einer Instandhaltung.

**[0005]** Durch die verschleißbedingte Änderung der Eigenschaften mechanischer Übertragungselemente wie Steifigkeit und Dämpfung verändert sich zwangsläufig das dynamische Verhalten und somit das Stabilitätsverhalten von Antriebssystemen. Das dynamische Verhalten, insbesondere lage geregelter Vorschubantriebe, beschreibt die wechselseitige Abhängigkeit von Bearbeitungsgeschwindigkeit und erreichbarer Genauigkeit und ist ein wichtiges Kriterium für die Leistungsfähigkeit von Vorschubantrieben im industriellen Einsatz. Ein entscheidender und zugleich begrenzender Faktor für das dynamische Verhalten von Vorschubantrieben ist das Zusammenspiel von Regelung und den mechanischen Übertragungselementen. Durch die Wahl der Regelparameter lassen sich für ein und denselben Vorschubantrieb unterschiedliche dynamische Eigenschaften erzielen. Die Einstellung der Regelparameter und die damit verbundene Festlegung der dynamischen Eigenschaften eines Vorschubantriebs erfolgt in der Regel einmalig während der Inbetriebnahmephase. Bei Vorschubantriebssystemen mit direktem Messsystem, bei dem beispielsweise mittels eines Linearmaßstabes die Lage des Tisches direkt erfasst wird und nicht aus der Winkellage des Motors abgeleitet wird, führt der Verschleiß mechanischer Übertragungselemente zu einer Änderung des dynamischen Übertragungsverhaltens. Dies führt abhängig vom Verschleißzustand zu einem Abbau des Stabilitätsvorrates. Dieser kennzeichnet insbesondere die Zeit, die für das Vorschubantriebssystem noch verbleibt, bis eine nutzerseitige Anforderung an das dynamische Verhalten nicht mehr erfüllt werden kann. Problematisch ist, dass der Abbau des Stabilitätsvorrates eine Ausfallcharakteristik ohne ausreichende Reaktionszeit für die Instandhaltung aufweist und somit die Voraussetzung für eine präventive Zustandsüberwachung fehlt.

**[0006]** Die Praxis zeigt, dass bei den heutigen Anforderungen an die Antriebssysteme, insbesondere mit direktem Messsystem, der Stabilitätsvorrat die Gebrauchsdauer des Antriebssystems bestimmt.

**[0007]** DE 10 2005 058 038 B3 beschreibt ein Verfahren und eine Steuereinrichtung zur Bestimmung der Zeitdauer bis zu einer notwendigen Wartung eines Maschinenelementes. Ein Ausführungsbeispiel betrifft einen Antrieb einer Werkzeugmaschine, in dem ein Motor eine Spindel antreibt, durch deren Drehbewegung eine Werkstückhaltevorrichtung entlang eines Weges bewegt wird. Mit Hilfe einer Messeinrichtung wird die Position der Werkstückhaltevorrichtung entlang des Weges ermittelt. Die Steuereinrichtung des Antriebs weist ein Mittel zur Bestimmung einer positionsbezogenen Belastungskurve eines Maschinenelements, beispielsweise der Spindel, auf. Diese Kurve wird durch Ermittlung der Werte einer Prozessgröße, wie beispielsweise Ruck oder Beschleunigung der Werkstückhaltevorrichtung, als Funktion der Lage der Werkstückhaltevorrichtung entlang des Weges bestimmt. Die Belastungskurven können gespeichert und zu einer Summationskurve aufsummiert werden, die die positionsabhängige Belastung des Maschinenelements angeben soll. Durch Bestimmung des Abstands einer vorgegebenen Grenzgröße von der Summationskurve soll die Zeitdauer bis zur notwendigen Wartung des Maschinenelements bestimmt werden.

**[0008]** Ausgehend von oben angegebenem Stand der Technik ist es die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Überwachung eines Antriebssystems einer Werkzeugmaschine, insbesondere zur Überwachung dessen mechanischen Übertragungssystems, anzugeben, um den Abnutzungszustand des Antriebs vor dessen Ausfall zu ermitteln.

**[0009]** Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren nach Anspruch 1 und einer Werkzeugmaschine nach Anspruch 17 gelöst:

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Überwachung eines Antriebssystems einer Werkzeugmaschine mit einem Antrieb mit einem Übertragungssystem, einem Halter für ein Werkstück- und/oder ein Werkzeug, einem Regelkreis mit wenigstens einem Regler und einem Sensor zur Erfassung von Zustandsdaten des Antriebs weist das Ändern wenigstens eines Regelparameters des Reglers des Antriebs und/oder das Ändern wenigstens einer eine Eigenschaft des Antriebs bestimmenden Größe von einem ersten Wert des Regelparameters bzw. der Größe auf wenigstens einen zweiten Wert des Regelparameters bzw. der Größe auf. Dadurch wird die Eigenschaft selbst geändert. Der Antrieb wird mit auf den zweiten Wert geänderten Wert mit dem Motor des Antriebs betrieben. Während des Betriebes kann der Regelparameter und/oder die die Eigenschaft des Antriebs bestimmende Größe bei dem zweiten Wert vorzugsweise konstant gehalten werden. Es werden Zustandsdaten des Antriebs auf Grund des Betriebes mit dem zweiten Wert mit dem Sensor erfasst. Dies kann insbesondere während des Betriebes des Antriebs mit dem geänderten Wert geschehen. Auf Grund der erfassten Zustandsdaten des Antriebs bei dem zweiten Wert wird der Abnutzungszustand des Antriebs ermittelt. Insbesondere kann der Abnutzungsstand einer bestimmten Komponente oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten ermittelt werden, die den Abnutzungszustand des Antriebs maßgeblich mitbestimmen.

**[0010]** Das Verfahren beruht darauf, dass ein Zusammenhang zwischen dem Abnutzungsstand des Antriebs und/oder einer bestimmten Komponente und/oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten sowie dem Zustandsverhalten des Antriebs, das aus den Zustandsdaten ermittelt werden kann, und dem Regelparameter und/oder der Größe besteht. Aus den Zustandsdaten kann für die Ermittlung des Abnutzungszustands ein Wert wenigstens einer Kenngröße oder eine Kennfunktion ermittelt werden. Beispielsweise besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Regelparameter und/oder der Größe, dem Abnutzungszustand und einer Kenngröße des Zustandsverhaltens ermittelt aus den Zustandsdaten. In den Zusammenhang können beispielsweise der erste Wert und/oder der zweite Wert und/oder die absolute und/oder die relative Änderung als solche eingehen. Auf Grund des Zusammenhangs kann auf Grund der Zustandsdaten auf den Abnutzungszustand geschlossen werden. Der Zusammenhang kann beispielsweise mit einer Reihe von Testmessungen ermittelt werden, worauf der ermittelte Zusammenhang in einer Datenbank hinterlegt werden kann.

**[0011]** Zustandsdaten zeichnen sich demnach dadurch aus, dass aus ihnen der Abnutzungszustand des Antriebs oder einer bestimmten Komponente des Antriebs und/oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten des Antriebs ermittelt werden kann. Zustandsdaten können auch ein einziger Wert sein. Zustandsdaten können z. B. Schwingungsdaten oder Temperaturdaten sein.

**[0012]** Das erfindungsgemäße Verfahren hat den Vorteil, dass der Antrieb durch ein Betreiben des Antriebs mit auf den zweiten Wert geänderten Wert ein bestimmtes Zustandsverhalten auf Grund eines Zustands bereits fortgeschrittener Abnutzung zeigen kann, während der Antrieb das entsprechende Verhalten trotz Abnutzung beim Betreiben mit dem ersten Wert nicht oder noch nicht zeigt. Mit dem Verfahren kann der Abnutzungszustand demnach vor dem Ausfall des Antriebs ermittelt werden, so dass ausreichend Zeit für eine Instandhaltungsmaßnahme, z. B. einen Austausch oder eine Reparatur, bleibt. Bei dem bestimmten Zustandsverhalten kann es sich beispielsweise um eine Schwingung mit einer Kenngröße, z. B. einer maximalen Schwingungsamplitude, einer maximalen Schwinggeschwindigkeit und/oder einer maximalen Schwingbeschleunigung bei einem bestimmten Wert oder innerhalb eines bestimmten Wertebereichs, z. B. oberhalb einer Nachweisgrenze, handeln. Bei dem bestimmten Verhalten kann es sich insbesondere um ein Zustandsverhalten mit einem Wert einer Kenngröße innerhalb eines kritischen Bereichs, z. B. oberhalb eines Grenzwertes, handeln. In dem kritischen Bereich können die Anforderungen an die Werkzeugmaschine, z. B. die Genauigkeit bei vorgegebener Bearbeitungsgeschwindigkeit und/oder die Bearbeitungsgeschwindigkeit bei vorgegebener Genauigkeit, beispielsweise nicht mehr erfüllt sein. Das Verfahren erlaubt einen Zustand fortgeschrittener Abnutzung frühzeitig zu erkennen und beim Ermitteln eines Abnutzungszustands innerhalb eines kritischen Bereichs, z. B. einer voraussichtlichen restlichen Gebrauchsdauer unterhalb eines Grenzwerts, Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten oder zu planen. Es können auf Grund des ermittelten Abnutzungszustands insbesondere ein Austausch oder eine Reparatur einer oder mehrerer bestimmter Komponenten des Antriebs eingeleitet oder geplant werden. Beispielsweise kann ein Zeitpunkt und/oder ein Zeitintervall für den Austausch oder die Reparatur einer bestimmten Komponente oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten des Antriebs, insbesondere des Übertragungssystems, auf Grund des ermittelten Abnutzungszustands bestimmt werden.

**[0013]** Der Abnutzungszustand kann beispielsweise in Gestalt des Abnutzungsgrades und/oder des maximalen Abnutzungsgrades und/oder des Abnutzungsvorrats und/oder des minimalen Abnutzungsvorrats des Antriebs ermittelt werden. Der Abnutzungsgrad gibt an, wieviel Abnutzung schon stattgefunden hat. Der maximale Abnutzungsgrad gibt entsprechend eine obere Grenze dafür an, wieviel Abnutzung schon stattgefunden hat. Der Abnutzungsvorrat gibt an, wieviel Abnutzung voraussichtlich noch erfolgen kann, bis der Antrieb ausfällt. Entsprechend gibt der minimale Abnutzungsvorrat eine untere Grenze dafür an, wieviel Abnutzung voraussichtlich noch erfolgen kann, bis der Antrieb ausfällt.

**[0014]** Wie der Abnutzungsgrad und/oder der Abnutzungsvorrat zu bewerten ist, kann von dem Regelparameter und/oder der Größe abhängen. Vorzugsweise wird der Abnutzungsgrad und/oder der Abnutzungsvorrat bezogen auf einen Wert des Regelparameters und/oder einen Wert der Größe ungleich dem zweiten Wert des Regelparameters und/oder ungleich dem zweiten Wert der Größe ermittelt. Vorzugsweise wird der Abnutzungsgrad und/oder der Abnutzungsvorrat bezogen auf einen Betriebswert des Antriebs ermittelt. Der Betriebswert des Regelparameters und/oder der Größe kann insbesondere dadurch gekennzeichnet sein, dass das Zustandsverhalten bei dem Betriebswert innerhalb eines für die Bearbeitung von Werkstücken unkritischen Bereiches ist, in dem die von dem Benutzer geforderte Bearbeitungsgenauigkeit und/oder Bearbeitungsgeschwindigkeit eingehalten wird. Beispielsweise wird der Abnutzungsgrad und/oder der Abnutzungsvorrat bezogen auf einen Wert des Regelparameters und/oder einen Wert der Größe gleich dem ersten Wert des Regelparameters und/oder gleich dem ersten Wert der Größe ermittelt.

**[0015]** Als eine den Abnutzungsvorrat des Antriebs charakterisierende Größe kann beispielsweise die voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer und/oder die minimale voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer des Antriebs, einer bestimmten Komponente des Antriebs oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten des Antriebs auf Grund der Zustandsdaten ermittelt werden. Unter der voraussichtlichen restlichen Gebrauchsdauer wird der Zeitraum verstanden, der noch verbleibt, bis die Anforderungen eines Benutzers der Werkzeugmaschine an die Werkzeugmaschine, insbesondere an den Antrieb, voraussichtlich nicht mehr erfüllt sind. Bei einer Anforderung eines Benutzers kann es sich beispielsweise um eine geforderte Genauigkeit, beispielsweise eine Bearbeitungs- und/oder Positioniergenauigkeit, und/oder um eine geforderte Bearbeitungsgeschwindigkeit handeln. Insbesondere kann es sich um die Genauigkeit bei vorgegebener Bearbeitungsgeschwindigkeit und/oder die Bearbeitungsgeschwindigkeit bei vorgegebener Genauigkeit handeln. Die restliche Gebrauchsdauer kann auch als restliche Brauchbarkeitsdauer bezeichnet werden. Wie hoch die restliche Gebrauchsdauer ist, kann von dem Wert des Regelparameters und/oder dem Wert der Größe abhängen, mit dem der Antrieb im Bearbeitungsbetrieb der Werkzeugmaschine betrieben werden soll. Die ermittelte voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer und/oder die ermittelte minimale voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer bezieht sich vorzugsweise auf eine Einstellung des Antriebs mit einem Wert des Regelparameters oder einem Wert der Größe ungleich dem zweiten Wert, vorzugsweise mit einem Wert gleich dem ersten Wert.

**[0016]** Die voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer kann beispielsweise in einer zeitlichen Einheit (z. B. Tage, Wochen, Monate) oder in der Anzahl der innerhalb der voraussichtlichen restlichen Gebrauchsdauer bearbeitbaren Werkstücke ermittelt werden.

**[0017]** Als eine den Abnutzungszustand, insbesondere den Abnutzungsgrad und/oder den Abnutzungsvorrat, charakterisierende Größe kann beispielsweise der Abbau der Steifigkeit oder der Steifigkeitsvorrat des Übertragungssystems des Antriebs und/oder einer vorgegebenen Komponente davon und/oder einer vorgegebenen Gruppe von Komponenten davon ermittelt werden. Beispielsweise kann der Abbau der und/oder der Vorrat an Steifigkeit eines Gewindetriebs des Antriebs, insbesondere eines Kugelgewindetriebs, ermittelt werden. Beispielsweise werden der Abbau der Steifigkeit und/oder der Vorrat an Steifigkeit in Relation zu einer erforderlichen Mindeststeifigkeit für eine geforderte Genauigkeit und/oder Bearbeitungsgeschwindigkeit ermittelt.

**[0018]** Für die Ermittlung des Abnutzungszustands wird der Regelparameter und/oder die Größe zumindest vorübergehend geändert und der Antrieb bei zumindest vorübergehend geändertem Regelparameter und/oder zumindest vorübergehend geänderter Größe betrieben, um die Zustandsdaten zu erhalten. Das Verfahren kann nach dem Betreiben des Antriebs mit dem zweiten Wert und gegebenenfalls wenigstens einem weiteren zweiten Wert das Ändern des Regelparameters und/oder der Größe auf einen Betriebswert beinhalten, der für den Bearbeitungsbetrieb der Werkzeugmaschine geeignet ist. Der Betriebswert kann beispielsweise gleich dem ersten Wert sein. Auf diese Weise kann mit der Bearbeitung der Werkstücke fortgefahren werden. Das Ändern auf den Betriebswert kann sich unmittelbar an das Betreiben des Antriebs mit dem zweiten Wert oder an das Betreiben des Antriebs mit dem zeitlich letzten der weiteren zweiten Werte und/oder das Erfassen der Zustandsdaten bei dem zweiten oder dem zeitlich letzten der weiteren zweiten Werte anschließen.

**[0019]** Das Erfassen der Zustandsdaten des Antriebs bei geändertem Regelparameter und/oder geänderter Größe erfolgt vorzugsweise während einer bearbeitungsfreien Zeit, die dadurch festgelegt ist, dass zu der bearbeitungsfreien Zeit kein bearbeitender Eingriff zwischen dem oder den Werkzeugen der Werkzeugmaschine und einem Werkstück stattfindet. Vorzugsweise erfolgt das Ändern des wenigstens einen Regelparameters bzw. der Größe und/oder das Betreiben des Antriebs mit geändertem Wert während der bearbeitungsfreien Zeit. Auch kann der Abnutzungszustand des Antriebs beispielsweise während der bearbeitungsfreien Zeit aus den Zustandsdaten ermittelt werden. Das Ändern des wenigstens einen Regelparameters bzw. der Größe und/oder das Betreiben mit geändertem Wert und/oder das Erfassen der Zustandsdaten kann vorzugsweise ausschließlich während einer bearbeitungsfreien Zeit erfolgen. Dadurch können störende Einflüsse auf das Verfahren zur Ermittlung des Abnutzungszustands durch eine Bearbeitung vermieden werden.

**[0020]** Das Ändern wenigstens eines Regelparameters bzw. wenigstens einer Größe, die eine Eigenschaft des Antriebs bestimmt, und/oder das Betreiben des Antriebs mit geändertem Wert und/oder das Erfassen der Zustandsdaten wird vorzugsweise außerhalb der Hauptzeit der Werkzeugmaschine durchgeführt. Ein oder mehrere der Schritte können beispielsweise während einer Eilgangbewegung des Antriebs, insbesondere des Vorschubantriebs, durchgeführt werden. Schritte des Verfahrens, insbesondere das Betreiben mit geändertem Wert und/oder das Erfassen der Zustandsdaten, können beispielsweise mit von Werkstücken und/oder Werkzeugen entladener Werkzeugmaschine durchgeführt werden. Entsprechend kann die Werkzeugmaschine vor Beginn des Verfahrens von Werkstücken und/oder Werkzeugen entladen werden.

**[0021]** Das Verfahren kann insbesondere auf eine Werkzeugmaschine angewendet werden, die zum Zerspanen, insbesondere zum Fräsen und/oder Drehen, eingerichtet ist. Im Falle einer Anwendung des Verfahrens auf eine zerspanende Werkzeugmaschine findet während des Erfassens der Zustandsdaten vorzugsweise kein Zerspanen eines Werkstücks mit der Werkzeugmaschine statt.

**[0022]** Für das Verfahren kann eine Datenbank mit Daten über den Zusammenhang des Abnutzungsstands, des Zustandsverhaltens, das anhand der Zustandsdaten ermittelt wird, und dem Regelparameter und/oder der Größe bzw. der Eigenschaft bereitgestellt werden. Ein aus den Zustandsdaten ermittelter Wert der Kenngröße oder eine Kennfunktion kann zur Ermittlung des Abnutzungszustands beispielsweise mit Daten aus der, insbesondere elektronischen oder auf sonstige Weise zugänglichen, Datenbank verglichen werden, wobei der Abnutzungszustand des Antriebs auf Grund des Vergleichs ermittelt wird.

**[0023]** Vorzugsweise wird der Abnutzungszustand auf Grund von Zustandsdaten ermittelt, die während einer bearbeitungsfreien Zeit erfasst wurden. Besonders bevorzugt wird der Abnutzungszustand ausschließlich auf Grund von Zustandsdaten ermittelt, die während einer bearbeitungsfreien Zeit erfasst wurden.

**[0024]** Das Verfahren kann außer dem Ändern des Regelparameters und/oder der Größe von dem ersten Wert auf den zweiten Wert und dem Erfassen von Zustandsdaten beim Betreiben mit dem zweiten Wert, das Ändern des Regelparameters und/oder der Größe auf wenigstens einen weiteren zweiten Wert, das Betreiben mit dem weiteren zweiten Wert und das Erfassen von Zustandsdaten von dem Antrieb mit dem weiteren zweiten Wert sowie das Ermitteln auf Grund der Zustandsdaten erfasst mit dem weiteren zweiten Wert enthalten. In diesem Fall wird der Abnutzungszustand demnach wenigstens auf Grund der Zustandsdaten bei dem zweiten Wert und wenigstens einem weiteren zweiten Wert ermittelt. Der weitere zweite Wert kann beispielsweise ein Zwischenwert zwischen dem ersten Wert und dem zweiten Wert sein.

**[0025]** Bei der Ermittlung des Abnutzungszustands können beispielsweise zusätzlich der erste Wert, der zweite Wert, ein weiterer zweiter Wert, die absolute und/oder die relative Änderung und/oder Zustandsdaten berücksichtigt werden, die beim Betreiben des Antriebs mit dem ersten Wert des Regelparameters und/oder der Größe aufgenommen werden.

**[0026]** Das Verfahren wird vorzugsweise innerhalb eines kurzen Testzeitraums ausgeführt. Insbesondere werden das Ändern des Regelparameters und/oder der Größe und das Betreiben des Antriebs sowie das Erfassen der Zustandsdaten vorzugsweise bei ein und demselben Abnutzungszustand durchgeführt. Zudem kann auch das Ermitteln des Abnutzungszustands auf Grund der erfassten Zustandsdaten bei diesem Abnutzungszustand durchgeführt werden. Anders ausgedrückt werden insbesondere das Ändern, das Betreiben und das Erfassen und vorzugsweise auch das Ermitteln demnach vorzugsweise bei konstantem oder gleichbleibendem Abnutzungszustand durchgeführt.

**[0027]** Das Verfahren kann beispielsweise auf ein Hauptantriebssystem und/oder ein Vorschubantriebssystem der Werkzeugmaschine angewendet werden. Vorzugsweise wird das Verfahren auf ein Vorschubantriebssystem

tem mit einem oder mehreren Vorschubantrieben angewendet. Ein Vorschubantrieb ist dazu eingerichtet, eine Vorschubbewegung für ein Werkstück oder ein Werkzeug zu erzeugen. Der Vorschubantrieb kann zu jeder Art einer Vorschubbewegung eines Werkstücks oder Werkzeugs eingerichtet sein. Beispielsweise kann der Vorschubantrieb zu einer Linearbewegung, einer Bewegung entlang einer Kurve und/oder einer Rotationsbewegung als Vorschubbewegung des Werkzeugs oder des Werkstücks eingerichtet sein. Der Vorschubantrieb kann insbesondere ein elektromechanischer Vorschubantrieb sein.

**[0028]** Bei dem Regelkreis kann es sich beispielsweise um einen Lageregelkreis des Vorschubantriebs mit einem Lageregler handeln. Bei dem Halter kann es sich beispielsweise um einen Schlitten, einen Tisch und/oder eine Palette handeln. Es kann sich um einen Lageregelkreis mit indirektem Messsystem handeln. Bevorzugt handelt es sich um einen Lageregelkreis mit direktem Messsystem der Lage des Werkstück- und/oder Werkzeughalters.

**[0029]** Mit einem Regelparameter eines Reglers kann das Regelverhalten des Reglers und damit das Regelverhalten des Regelkreises bei vorgegebener Regelstrecke eingestellt werden. Die Änderung eines Regelparameters des Reglers von dem ersten auf den zweiten Wert bietet den Vorteil, dass eine Veränderung eines Regelparameters über die Steuerungseinrichtung der Werkzeugmaschine relativ einfach, reproduzierbar und nach dem Test wieder umkehrbar möglich ist.

**[0030]** Der Regelparameter, der geändert wird, kann beispielsweise ein proportionaler Verstärkungsfaktor, ein integraler Verstärkungsfaktor, eine Nachstellzeit und/oder eine Vorhaltzeit eines Reglers des Regelkreises sein. Vorzugsweise wird ein proportionaler Verstärkungsfaktor und/oder ein integraler Verstärkungsfaktor des Reglers von einem ersten Wert auf einen zweiten Wert erhöht. Alternativ oder zusätzlich kann beispielsweise eine Nachstellzeit des Reglers von einem ersten Wert auf einen zweiten Wert verringert werden.

**[0031]** In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Geschwindigkeitsverstärkung des Lagereglers, die auch als Kv-Faktor bezeichnet wird, geändert. Besonders bevorzugt wird der Kv-Faktor durch die Änderung erhöht. Um eine deutliche Änderung des Zustandsverhaltens zu erhalten, kann der Kv-Faktor beispielsweise zwischen minimal 10 Prozent bis 30 Prozent oder sogar noch stärker erhöht werden.

**[0032]** Der Regler kann einen oder mehrere unterlagerte Regler aufweisen. In einem solchen Regelkreis wird aus der Reglerausgangsgröße eines Reglers, der auch als Führungsregler bezeichnet werden kann, die Führungsgröße für einen unterlagerten, auch als Folgeregler bezeichneten, Regler berechnet. Ein solcher Regler mit einem Führungsregler und einem Folgeregler kann auch als Kaskadenregler bezeichnet werden, der auch einen übergeordneten Führungsregler und wenigstens zwei Folgeregler aufweisen kann, wobei einem Folgeregler ein weiterer Folgeregler unterlagert ist.

**[0033]** Es kann der Regelparameter des Führungsreglers geändert werden. Es kann zusätzlich oder alternativ ein Regelparameter eines Folgereglers, insbesondere eines dem Führungsregler unmittelbar folgenden Folgereglers, geändert werden. In einer bevorzugten Ausführungsform wird alternativ oder zusätzlich zu einer Änderung eines Regelparameters des Führungsreglers ein proportionaler Verstärkungsfaktor und/oder ein integraler Verstärkungsfaktor des dem Führungsregler direkt folgenden Folgereglers als der Regelparameter von einem ersten auf einen zweiten Wert geändert, vorzugsweise erhöht, und/oder eine Nachstellzeit des direkt auf den Führungsregler folgenden Folgereglers von einem ersten Wert auf einen zweiten Wert geändert, vorzugsweise reduziert.

**[0034]** Wenn der Regelkreis als Lageregelkreis ausgebildet ist, kann dieser einen Lageregler als Führungsregler aufweisen, dem ein Geschwindigkeitsregler unterlagert ist. Dem Geschwindigkeitsregler wird eine die Geschwindigkeit des Halters charakterisierende Führungsgröße zugeführt. Der Geschwindigkeitsregler kann, insbesondere bei elektromechanischen Übertragungssystemen, beispielsweise als Drehzahlregler ausgeführt sein. Dem Geschwindigkeitsregler kann ein Beschleunigungsregler unterlagert sein. Dem Beschleunigungsregler wird eine die Beschleunigung des Halters charakterisierende Führungsgröße zugeführt. Der Beschleunigungsregler kann beispielsweise als Stromregler für den Motor des Antriebs ausgeführt sein. Der Lageregler kann beispielsweise ein P-Regler sein und/oder der Geschwindigkeitsregler kann beispielsweise ein PI-Regler sein. In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel, insbesondere mit einem vorstehend beschriebenen Lageregelkreis, wird die Geschwindigkeitsverstärkung des Lagereglers von dem ersten auf den zweiten Wert geändert, vorzugsweise erhöht, und/oder der proportionale Verstärkungsfaktor des Geschwindigkeitsreglers von einem ersten auf einen zweiten Wert geändert, vorzugsweise erhöht, und/oder die Nachstellzeit des Geschwindigkeitsreglers von einem ersten Wert auf einen zweiten Wert geändert, vorzugsweise verringert.

**[0035]** Bei der Eigenschaft des Antriebs, die die Größe bestimmt, kann es sich beispielsweise um eine elektrische und/oder mechanische Eigenschaft des Antriebs handeln. Die Eigenschaft kann beispielsweise eine Eigenschaft des Motors des Antriebs und/oder eine Eigenschaft des mechanischen Übertragungssystems des Antriebs sein.

**[0036]** Das Übertragungssystem dient der Übertragung der Kraft des Motors des Antriebs auf das Werkstück oder das Werkzeug. Das Übertragungssystem weist wenigstens ein mechanisches Übertragungselement auf, das im Kraftfluss zwischen dem Motor und dem Werkzeug oder dem Werkstück liegt. Bei der Eigenschaft des Übertragungssystems, die durch die Größe bestimmt wird, kann es sich beispielsweise um die Steifigkeit des Übertragungssystems, die Dämpfung der Bewegung eines Übertragungselements, insbesondere des Halters, und/oder die Masse eines Übertragungselements handeln. Zu der effektiven Masse des Halters kann die Masse eines von dem Halter gehaltenen Werkstücks oder Werkzeugs und/oder einer an dem Halter angeordneten und mit dem Halter, vorzugsweise gegenüber diesem unbeweglich, verbundenen Zusatzmasse gehören.

**[0037]** Das Übertragungssystem kann als schwingungsfähiges System betrachtet werden, in dem eine Masse, insbesondere die effektive Masse des Werkstück- oder Werkzeughalters, Schwingungen in Antriebsrichtung, z. B. in Vorschubrichtung bei einem Vorschubantrieb, ausführen kann. Bei der Eigenschaft des Übertragungssystems, die durch die Größe bestimmt und geändert wird, kann es sich um eine Eigenfrequenz des mechanischen Übertragungssystems handeln. Durch die Änderung des Regelparameters und/oder der Änderung der die Eigenschaft bestimmenden Größe von dem ersten auf den zweiten Wert können eine Eigenfrequenz des Regelkreises und eine Eigenfrequenz des mechanischen Übertragungssystems aneinander angenähert werden. In der Regel wird insbesondere bei einem Lageregelkreis einer Vorschubachse darauf geachtet, dass die Eigenfrequenz des Regelkreises deutlich unter einer Frequenz einer Resonanz des mechanischen Übertragungssystems bleibt, wobei damit Resonanzen gemeint sind, die für das Verhalten des Systems, insbesondere das Auftreten von Schwingungen in Vorschubrichtung, relevant sind. Durch die Änderung des Regelparameters und/oder der die Eigenschaft des mechanischen Übertragungssystems bestimmenden Größe kann die Eigenfrequenz des Regelkreises erhöht und/oder die Resonanzfrequenz des mechanischen Übertragungssystems verringert werden, so dass die Frequenzen einander angenähert werden. Durch die Änderung des Regelparameters und/oder der Änderung der die Eigenschaft bestimmenden Größe kann die Dämpfung des Regelkreises, insbesondere des Lageregelkreises, und/oder die Dämpfung des Übertragungssystems als Regelstreckeneigenschaft verringert werden.

**[0038]** Zur Änderung der Steifigkeit des Übertragungssystems kann beispielsweise die Steifigkeit eines oder einer Gruppe von Übertragungselementen geändert werden. Das Übertragungssystem kann beispielsweise einen Gewindetrieb, insbesondere einen Kugelgewindetrieb oder einen Rollengewindetrieb, als ein Übertragungselement aufweisen, dessen Steifigkeit geändert werden kann.

**[0039]** Besonders bevorzugt wird die Steifigkeit des mechanischen Übertragungssystems bezogen auf die Vorschubrichtung durch die Änderung der Größe vermindert. Bei einem durch Abnutzung ohnehin in der Steifigkeit geschwächtem Gewindetrieb, kann eine zusätzliche Verminderung oder Schwächung der Steifigkeit zu einem messbaren Zustandsverhalten führen. Die Steifigkeit eines Vorschubantriebs hängt im Allgemeinen von der Position des Werkstück- oder Werkzeughalters ab. Die Größe kann z. B. derart geändert werden, dass die minimale Steifigkeit und/oder die maximale und/oder die mittlere Steifigkeit entlang des Verfahrenswegs geändert, insbesondere verringert, wird.

**[0040]** Die Größe zur Änderung der Steifigkeit kann beispielsweise die Vorspannkraft der Mutter des Gewindetriebs, z. B. die minimale Vorspannkraft und/oder die maximale Vorspannkraft und/oder die mittlere Vorspannkraft, sein. Die Größe kann beispielsweise die Dicke einer Distanzscheibe zwischen zwei Hälften einer zweiteiligen Mutter eines Gewindetriebs und/oder der Stellweg eines Aktors zwischen den Hälften zur Einstellung der Vorspannkraft sein.

**[0041]** Wenn eine die Dämpfung eines Übertragungselements bestimmende Größe geändert wird, dann handelt es sich beispielsweise um die Dämpfung der Bewegung des Werkstück- oder Werkzeughalters in Vorschubrichtung. Das mechanische Übertragungssystem kann als Regelstrecke aufgefasst werden. Durch die Änderung der Größe kann die Dämpfung als Regelstreckeneigenschaft des mechanischen Übertragungssystems geändert werden. Es kann sich um die mechanische Dämpfung eines Übertragungselements handeln. Insbesondere kann es sich um die Dämpfung der Bewegung des Übertragungselements durch direkt an dem Übertragungselement angreifende Dämpfungskräfte, insbesondere dissipative, Dämpfungskräfte handeln. Für die Dämpfung kann das Übertragungssystem beispielsweise ein passives und/oder ein aktives Dämpfungssystem enthalten, dessen Dämpfung geändert werden kann. Vorzugsweise wird die Größe derart geändert, dass

die Dämpfung, beispielsweise die maximale und/oder die minimale Dämpfung und/oder die mittlere Dämpfung der Bewegung entlang des Fahrwegs, verringert wird.

**[0042]** Bei der Eigenschaft kann es sich um die Masse eines oder einer Gruppe von Übertragungselementen handeln. Beispielsweise ist die von der geänderten Größe bestimmte Eigenschaft die effektive Masse des Werkzeughalters- oder des Werkstückhalters, die die Masse eines gehaltenen Werkzeugs oder Werkstücks und gegebenenfalls einer Zusatzmasse einschließt. Die Masse des Halters, beispielsweise des Tisches, kann beispielsweise durch Anordnung einer Zusatzmasse erhöht werden.

**[0043]** Vorzugsweise sind die Zustandsdaten, die beim Betreiben des Antriebs erfasst werden, Schwingungsdaten. Im Falle eines betrachteten Vorschubantriebs handelt es sich vorzugsweise um Daten einer Schwingung in Vorschubrichtung. Bei dem bestimmten Zustandsverhalten, das sich abhängig von dem Abnutzungszustand und dem Wert des Regelparameters und/oder dem Wert der Größe zeigt, kann es sich beispielsweise um eine Schwingung, insbesondere eines Elements des Übertragungssystems, z. B. des Werkzeug- oder Werkstückhalters, bei einem bestimmten Wert und/oder innerhalb eines bestimmten Wertebereichs einer Frequenz, einer maximalen Amplitude, auch bei einer bestimmten Frequenz, einer maximalen Schwinggeschwindigkeit und/oder einer maximalen Schwingbeschleunigung und/oder eine Schwingung mit einem bestimmten Spektrum handeln, die als Kenngröße aus den Schwingungsdaten ermittelt werden können.

**[0044]** Als ein Schwingungssensor zur Erfassung von Schwingungsdaten als Zustandsdaten kann beispielsweise ein Positions- bzw. Lagesensor, ein Geschwindigkeitssensor und/oder ein Beschleunigungssensor verwendet werden. Vorzugsweise wird ein von den Sensoren des Regelkreises gesonderter Sensor als Schwingungssensor verwendet. Besonders bevorzugt ist der Schwingungssensor dazu eingerichtet, die Schwingung einer Komponente des Antriebs wie beispielsweise eines Elements des mechanischen Übertragungssystems zu erfassen. Besonders bevorzugt ist der Schwingungssensor dazu eingerichtet, Schwingungen des Werkstück- oder Werkzeughalters, beispielsweise eines Tisches, eines Schlittens und/oder einer Palette, in Vorschubrichtung zu erfassen. Besonders bevorzugt ist der Schwingungssensor zur direkten Erfassung der Schwingung des Elements, beispielsweise des Werkstück- oder Werkzeughalters, eingerichtet. Beispielsweise kann hierfür ein Linearmaßstab verwendet werden. Es ist auch möglich die Schwingung des Elements, beispielsweise des Werkstück- oder Werkzeughalters, mit dem direkten Messsystem des Lageregelkreises zu erfassen, das den Lageistwert misst. Die Schwingung kann grundsätzlich auch indirekt, z. B. anhand des Stromistwertes des Motors des Antriebs, anhand des Winkels der Motorwelle und/oder eines mechanischen Übertragungselements, wie beispielsweise einer Spindel, erfasst werden. Als Schwingungsdaten können grundsätzlich auch Körper- oder Luftschalldaten erfasst werden.

**[0045]** In einer bevorzugten Ausführungsform wird eine Übertragungskomponente oder eine Gruppe bzw. ein System von Übertragungskomponenten des Übertragungssystems des Antriebs, deren Abnutzungszustand ermittelt werden soll, ausgewählt, wobei als Zustandsdaten Schwingungsdaten über eine Schwingung eines Übertragungselements des Übertragungssystems erfasst werden, so dass die ausgewählte Komponente oder das ausgewählte System bzw. die ausgewählte Gruppe von Komponenten die Kraft von dem Motor des Antriebs auf das Übertragungselement übertragend zwischen dem Motor und dem Übertragungselement angeordnet ist, dessen Schwingung auf Grund des Betriebes des Antriebs mit dem Motor des Antriebs mit geändertem Wert erfasst wird.

**[0046]** In einer bevorzugten Ausführungsform werden die Zustandsdaten bei einer Frequenz ermittelt, die einer Anregungsfrequenz des mechanischen Übertragungssystems durch die Regelung durch den Regler entspricht.

**[0047]** Bei dem ersten Wert kann sich die Abnutzung des Antriebs beim Betreiben des Antriebs mit dem ersten Wert noch nicht bemerkbar machen. Darunter wird auch der Fall verstanden, dass zwar ein Wert für den Abnutzungszustand anhand von Zustandsdaten, erfasst mit dem Sensor beim Betreiben mit dem ersten Wert, ermittelt werden kann, dieser jedoch derart fehlerbehaftet ist, so dass er insbesondere für die Planung einer Instandhaltungsmaßnahme, z. B. einen Austausch, ungeeignet ist. Beispielsweise liegt der Wert einer Kenngröße der Zustandsdaten bei einer Erfassung von Zustandsdaten mit dem ersten Wert unterhalb einer Nachweisgrenze. Der erste Wert kann beispielsweise dadurch charakterisiert sein, dass die Werkzeugmaschine mit dem ersten Wert bei einem Ermitteln von Zustandsdaten mit dem Sensor ein Zustandsverhalten anhand der Zustandsdaten zeigt, die außerhalb des kritischen Bereichs liegen. Z. B. können Schwingungen des Tisches eines Vorschubantriebs bei dem ersten Wert eine maximale Amplitude, eine maximale Schwingbeschleunigung und/oder eine maximale Schwinggeschwindigkeit unterhalb eines für die Bearbeitung geforderten Grenzwerts aufweisen. Der erste Wert kann insbesondere zu einem Betriebsparametersatz oder einer Betriebseinstellung

gehören, bei dem die Werkzeugmaschine im Produktionsbetrieb regulär nach der Anforderung des Benutzers Werkstücke bearbeiten kann.

**[0048]** Der zweite Wert und gegebenenfalls der weitere zweite Wert sind vorzugsweise derart gewählt, dass sich ein vorgegebener Abnutzungszustand bei dem zweiten Wert anhand der Zustandsdaten bemerkbar machen würde. Der zweite Wert kann dadurch gekennzeichnet sein, dass die Werkzeugmaschine mit dem zweiten Wert bei einem vorgegebenen Abnutzungszustand, wie beispielsweise einer vorgegebenen zu erwartenden restlichen Gebrauchsdauer, ein vorgegebenes Zustandsverhalten anhand der Zustandsdaten zeigt. Die vorgegebene zu erwartende restliche Gebrauchsdauer kann sich auf eine Einstellung des Antriebs mit einem Wert des Regelparameters und/oder einem Wert der Größe ungleich dem zweiten Wert, beispielsweise mit dem ersten Wert, beziehen. Das vorgegebene Zustandsverhalten kann sich zum Beispiel durch Zustandsdaten mit einer Kenngröße bei einem vorgegebenen Wert und/oder innerhalb eines vorgegebenen Bereichs und/oder mit einer vorgegebenen Kennfunktion äußern.

**[0049]** Wenn beispielsweise ermittelt werden soll, ob ein Abnutzungsgrad, mit einer vorgegebenen zu erwartenden restlichen Gebrauchsdauer, beispielsweise von etwa zwei bis etwa drei Monaten, vorliegt, kann der zweite Wert derart gewählt werden, dass beim Vorliegen eines derartigen Abnutzungsgrads eine Schwingung mit einer maximalen Schwingungsamplitude und/oder einer maximalen Schwinggeschwindigkeit und/oder einer maximalen Schwingbeschleunigung innerhalb eines vorgegebenen Intervalls erzeugt würde. Der zweite Wert kann beispielsweise derart ausgewählt werden, dass der Antrieb bei dem Vorliegen eines vorgegebenen Abnutzungszustands ein Zustandsverhalten anhand von Zustandsdaten innerhalb des kritischen Bereichs oder oberhalb einer Nachweisgrenze, zeigt. Der zweite Wert kann zu einem Testparametersatz gehören, mit dem die Maschine eingestellt wird, um den Abnutzungszustandstest durchzuführen. Der zweite Wert kann gegenüber dem ersten Wert insbesondere dadurch ausgezeichnet sein, dass der Antrieb, insbesondere der Halter, beim Betreiben mit dem zweiten Wert eine Schwingung mit einer Amplitude oberhalb eines für die geforderte Genauigkeit der Bearbeitung maximal zulässigen Grenzwerts ausführt. Der zweite Wert kann demnach zu einem in diesem Sinne instabilen Regelkreis führen.

**[0050]** Der zweite Wert kann gegenüber dem ersten Wert dadurch ausgezeichnet sein, dass der Antrieb, beispielsweise das mechanische Übertragungssystem, insbesondere ein Gewindetrieb, beim Betreiben des Antriebs mit dem zweiten Wert eine gegenüber dem Betreiben des Antriebs mit dem ersten Wert reduzierten voraussichtlichen Abnutzungsvorrat, insbesondere eine reduzierte zu erwartende restliche Gebrauchsdauer, aufweist. Die reduzierte zu erwartende restliche Gebrauchsdauer kann sich insbesondere auf ansonsten identische Einstellungsparameter des Antriebs beziehen. Die Einstellung der Werkzeugmaschine mit dem Regelparameter mit dem zweiten Wert oder der Größe mit dem zweiten Wert stellt demnach beim Betreiben des Antriebs mit dem zweiten Wert im Produktionsbetrieb eine erhöhte Anforderung an den Antrieb dar.

**[0051]** Für den Fall, dass mit dem Sensor zur Ermittlung des Abnutzungsstands Schwingungsdaten ermittelt werden, wird der Regelparameter und/oder die Größe vorzugsweise derart geändert, dass die maximale Schwingungsamplitude, die maximale Schwingungsschnelle und/oder die maximale Schwingungsbeschleunigung des Halters in Vorschubrichtung bei dem Betreiben mit dem zweiten Wert größer ist als bei einem Betreiben mit dem ersten Wert.

**[0052]** In einer Ausführungsform kann sich der zweite Wert gegenüber dem ersten Wert dadurch auszeichnen, dass bei dem Betreiben mit dem zweiten Wert ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Zustandsverhalten und dem Abnutzungszustand besteht.

**[0053]** In einer bevorzugten Ausführungsform kann beispielsweise eine minimale Genauigkeit vorgegeben werden, mit der der Abnutzungszustand mindestens ermittelt werden können soll. Der zweite Wert des Regelparameters und/oder der zweite Wert der Größe werden danach derart ausgewählt, so dass der Abnutzungszustand mindestens mit der vorgegebenen minimalen Genauigkeit ermittelt werden kann. In einer Ausführungsform kann der zweite Wert danach ausgewählt werden, dass ein vorgegebener maximaler Abnutzungsvorrat und/oder ein vorgegebener minimaler Abnutzungsgrad noch mindestens mit der geforderten minimalen Genauigkeit ermittelt werden kann.

**[0054]** Es wird eine Werkzeugmaschine mit einem Antrieb, insbesondere mit einem Vorschubantrieb, mit einer Steuerungseinrichtung angegeben, die zu der Durchführung eines vorstehend beschriebenen Verfahrens eingerichtet ist. Die Werkzeugmaschine kann insbesondere zum Fräsen und/oder Drehen eingerichtet sein.

**[0055]** Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen sowie aus der Zeichnung. Es zeigen in schematischer Darstellung:

**[0056]** **Fig. 1:** eine beispielhafte erfindungsgemäße Werkzeugmaschine mit einem Vorschubantrieb mit einer Steuerungseinrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens eingerichtet ist,

**[0057]** **Fig. 2:** einen beispielhaften Lageregelkreis der Werkzeugmaschine für den Vorschubantrieb aus **Fig. 1**,

**[0058]** **Fig. 3:** ein Ablaufschema des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß einer beispielhaften ersten Ausführungsform,

**[0059]** **Fig. 4:** ein Diagramm zur Veranschaulichung des Verfahrens gemäß der ersten Ausführungsform,

**[0060]** **Fig. 5:** ein Ablaufschema des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß einer beispielhaften zweiten Ausführungsform,

**[0061]** **Fig. 6:** ein Diagramm zur Veranschaulichung des Verfahrens gemäß der zweiten Ausführungsform,

**[0062]** **Fig. 7:** ein Diagramm zur beispielhaften Veranschaulichung des Verfahrens.

**[0063]** **Fig. 1** zeigt ein Beispiel einer erfindungsgemäßen Werkzeugmaschine **10** mit einer Steuerungseinrichtung **12**, die zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet ist. Die Steuerungseinrichtung **12** weist eine Eingabeeinheit für Eingaben eines Bedieners, eine Anzeigeeinheit, eine Auswerteeinheit und eine Empfangseinheit auf, die nicht im Detail dargestellt sind. Die Empfangseinheit dient zum Empfangen von Daten von einer Datenbank eines Servers **14**, der mit der Empfangseinheit über ein Computernetzwerk verbunden ist. Detailliert dargestellt ist ein Vorschubantrieb **16** der Maschine **10**, anhand dessen das Verfahren erläutert wird. Eventuell vorhandene weitere Vorschubantriebe des Vorschubantriebssystems und der Hauptantrieb sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

**[0064]** Der Vorschubantrieb **16** weist einen Motor **18** für die Vorschubbewegung eines Halters **20** für ein Werkstück auf. Der Vorschubantrieb **16** weist ein mechanisches Übertragungssystem **22** für die Übertragung der Kraft über den Halter **20** auf das Werkstück oder das Werkzeug (nicht dargestellt) auf. Das Übertragungssystem **22** kann beispielsweise ein Getriebe **24** und einen Kupplung **26** aufweisen. Für die Wandlung der Rotationsbewegung der Motorwelle in eine Linearbewegung kann das Übertragungssystem **22** einen Gewindetrieb **28** aufweisen, der insbesondere ein Kugelgewindetrieb, aber beispielsweise auch ein Rollengewindetrieb oder einen Planetenwälzgewindetrieb sein kann. Der Gewindetrieb **28** weist eine Gewindespindel **30**, im Folgenden auch kurz Spindel **30** genannt, und eine Spindelmutter **32**, im Folgenden auch kurz Mutter **32** genannt, auf. Die Steifigkeit des mechanischen Übertragungssystems **22** in Vorschubrichtung (hier die x-Richtung) kann durch die Vorspannung der Mutter **32** gegen die Spindel **30** eingestellt oder zumindest beeinflusst werden. Die Mutter **32** weist dazu ein Vorspannmittel auf, mit dem die Vorspannung eingestellt oder zumindest beeinflusst werden kann, wobei das Vorspannmittel über eine Einstellgröße eingestellt werden kann. Das Vorspannmittel kann beispielsweise eine Distanzscheibe zwischen zwei Hälften der Mutter **32** aufweisen, mit deren Hilfe die beiden Hälften der Mutter **32** auseinandergedrückt oder zusammengezogen werden können. Es kann dazu auch ein elektrisch-, pneumatisch-, hydraulisch- und/oder mechanisch angetriebener Aktor zwischen den Hälften der Mutter **32** angeordnet sein. Die Spindel **30** ist mit einem ersten Lager **34a** und einem zweiten Lager **34b** gelagert. Bei dem Halter **20** für das Werkstück oder das Werkzeug kann es sich beispielsweise um einen Schlitten, einen Tisch und/oder um eine auf einem Tisch oder einem Schlitten fixierte Palette handeln. Der Halter **20** wird mit einer Linearführung **36**, die an dem Bett **38** oder einem übergeordneten Vorschubantrieb angeordnet ist, geführt. An dem Halter **20** ist gegenüber diesem unbeweglich ein Schwingungssensor **40** angeordnet, der dazu eingerichtet ist, eine Schwingung des Halters **20** in Vorschubrichtung x direkt zu erfassen und ein entsprechendes Schwingungssignal an die Auswerteeinrichtung der Steuerungseinrichtung **12** zu übermitteln, um einen oder mehrere Werte einer Kenngröße der Schwingung zu generieren. Bei dem Schwingungssensor **40** kann es sich beispielsweise um einen Lageistwertsensor, einen Geschwindigkeitssensor und/oder einen Beschleunigungssensor handeln. Dem Übertragungssystem **22** ist außerdem ein translatorisches Wegmesssystem **42** zur direkten Lageistwerterfassung zugeordnet. Das Wegmesssystem **42** weist einen Abtaster **44**, der an dem Halter **20** gegenüber diesem unbeweglich angeordnet ist, und einen Maßstab **46** auf, der an dem Bett **38** oder einem übergeordneten Vorschubantrieb angeordnet ist. Das Wegmesssystem **42** dient der Bestimmung des Lageistwerts des Halters **20** für den Lageregelkreis des Vorschubantriebs **16**. Der Vorschubantrieb **16** kann alternativ oder zusätzlich ein indirektes Messsystem **48** aufweisen, mit dem der Drehwinkel der Welle des Mo-

tors **18** oder der Spindel **30** mit Hilfe eines nicht dargestellten Drehaufnehmers ermittelt und daraus auf die Lage des Halters **20** geschlossen werden kann.

**[0065]** Zum Betreiben des Vorschubantriebs **16** wird der Motor **18** mit Strom gespeist, wobei der Motor **18** eine Kraft über das mechanische Übertragungssystem **22** auf den Halter **20** überträgt. Aus dem Signal des direkten Wegmesssystems **42** oder gegebenenfalls des indirekten Wegmesssystems **48**, das der Steuerungseinrichtung **12** zugeführt werden kann, kann der Lageistwert des Halters **20** in x-Richtung ermittelt und, beispielsweise mit dem in **Fig. 2** dargestellten Kaskadenregler **60**, geregelt werden. Aus dem Signal des Schwingungssensors **40**, das der Steuerungseinrichtung **12** zugeführt wird, kann mit der Auswerteeinrichtung eine Kenngröße der Schwingung abgeleitet werden, die eine Aussage über Schwingungen des Halters in Vorschubrichtung x erlaubt.

**[0066]** In **Fig. 2** ist ein beispielhafter Lageregelkreis **62** des in **Fig. 1** dargestellten Vorschubantriebs **16** stark vereinfacht dargestellt. Der Lageregelkreis **62** weist einen Lageregler **64** auf, der seine Reglerausgangsgröße aus der Differenz aus einem Lagesollwert  $x_s$ , vorgegeben durch die Steuerungseinrichtung **12**, und einem Lageistwert  $x_i$  berechnet. Der Lageistwert  $x_i$  wird dabei vorzugsweise mit dem direkten Wegmesssystem **42** bestimmt. Alternativ kann der Lageistwert  $x_i$  auch mit dem gestrichelt dargestellten indirekten Messsystem **48** bestimmt werden. Auf den Lageregler **64** folgt der Geschwindigkeitsregler **66**, der beispielsweise als Drehzahlregler ausgeführt sein kann. Der Drehzahlregler **66** ist dazu eingerichtet seine Reglerausgangsgröße  $I_s$  auf Grund der Differenz des Drehzahlsollwerts  $n_s$ , bereitgestellt von dem Lageregler **64**, und dem Drehzahlwert  $n_i$  zu berechnen, der dem Regler über ein Drehzahlmesssystem **68**, beispielsweise des indirekten Wegmesssystems **48**, zugeführt wird. Auf dem Drehzahlregler **66** folgt ein als Stromregler ausgeführter Beschleunigungsregler **70**, dessen Rückführung nicht gesondert dargestellt ist. Der Stromregler **70** bestimmt mit seiner Reglerausgangsgröße letztendlich das Drehmoment des Motors **18** aus. Das Verhalten des Lageregelkreises **62** wird insbesondere durch Regelparameter der Regelung, insbesondere der Regler **64**, **66**, **70** bestimmt. Die Regler können beispielsweise jeweils P-, PI- oder PID-Regler sein. Das Verhalten der Regler **64**, **66**, **70** kann insbesondere durch einen proportionalen Verstärkungsfaktor  $K$ , beispielsweise  $K_v$ , eine Nachstellzeit  $T_n$  und/oder eine Vorhaltzeit  $T_v$  bestimmt sein. Das Verhalten des Lagereglers **64** kann durch einen proportionalen Verstärkungsfaktor  $K_v$  festgelegt werden, der Geschwindigkeitsverstärkung oder auch  $K_v$ -Faktor genannt wird. Das Verhalten des Drehzahlreglers **66** kann durch einen proportionalen Verstärkungsfaktor  $K_p$  des Drehzahlreglers **66** und gegebenenfalls eine Nachstellzeit  $T_{np}$  des Drehzahlreglers **66** festgelegt werden. In einer Ausführungsform ist der Lageregler **64** beispielsweise ein P-Regler und der Drehzahlregler **66** ist beispielsweise ein PI-Regler. Unabhängig davon kann der Lageregelkreis **62** zusätzliche Maßnahmen zur Regelung, wie etwa eine Störgrößenaufschaltung oder eine Führungsgrößenvorsteuerung, aufweisen.

**[0067]** Ein Ausführungsbeispiel des Verfahrens **100** wird anhand des beispielhaften Ablaufschemas in **Fig. 3** und des Diagramms in **Fig. 4** erläutert. Es wird außerdem auf die **Fig. 1** und **Fig. 2** Bezug genommen. Die Steuerungseinrichtung **12** kann das Verfahren **100** automatisiert durchführen.

**[0068]** **Fig. 4** stellt den funktionellen Zusammenhang zwischen der Kenngröße einer Schwingung, z. B. der maximalen Schwingungsamplitude, der maximalen Schwinggeschwindigkeit oder der maximalen Schwingbeschleunigung des Halters **20** beim Betreiben des Vorschubantriebs **16**, und einem Verstärkungsfaktor des Reglers **60**, hier dem  $K_v$ -Faktor des Lagereglers **64**, für den Gewindetrieb **28** des Vorschubantriebs **16** aus **Fig. 1**, insbesondere einen Kugelgewindetrieb, bei unterschiedlichen Abnutzungszuständen beispielhaft und stark vereinfacht dar. In dem Diagramm in **Fig. 4** soll ein tendenzieller Verlauf in einem Bereich von Abnutzungsvorräten und Werten für den  $K_v$ -Faktor veranschaulicht werden. Der tatsächliche funktionelle Zusammenhang kann einem anderen Kurvenverlauf folgen. Ein ähnlicher Zusammenhang kann sich beispielsweise zwischen der Kenngröße und dem proportionalen Verstärkungsfaktor  $K_p$  des Drehzahlreglers oder der reziproken Nachstellzeit  $T_{np}$  des Drehzahlreglers bei gegebenem Abnutzungszustand ergeben. Der Zusammenhang kann in einer Datenbank z. B. als analytische Funktion oder als Wertetabelle hinterlegt sein. Die Datenbank kann beispielsweise in der Steuerungseinrichtung **12** oder auf dem Server **14** hinterlegt sein und durch die Steuerungseinrichtung **12** von dem Server **14** abgerufen werden. Der Server **14** kann beispielsweise eine Datenbank für verschiedene Antriebe mit unterschiedlichen Komponenten bereitstellen. Ein Maß für den Abnutzungsvorrat des Vorschubantriebs **16**, insbesondere des mechanischen Übertragungssystems **22**, ist die Zeit, die auf Grund des Abnutzungszustands noch verbleibt, bis die Anforderung des Nutzers der Maschine, insbesondere an die Bearbeitungsgeschwindigkeit und/oder Bearbeitungsgenauigkeit, ohne Austausch oder Reparatur einer Komponente, insbesondere einer Komponente des mechanischen Übertragungssystems, nicht mehr erfüllt werden kann (restliche Gebrauchsdauer).

**[0069]** In dem Diagramm der **Fig. 4** ist der Funktionsgraph  $Z_a$  für einen ersten Zustand des Gewindetriebs **28** ohne Abnutzung und mit einer voraussichtlichen restlichen Gebrauchsdauer des Kugelgewindetriebs von  $G_a$  dargestellt. Ebenfalls dargestellt ist der Funktionsgraph  $Z_b$  für einen Zustand fortgeschrittener Abnutzung und entsprechend einer zu erwartenden restlichen Gebrauchsdauer von  $G_b$  kleiner als  $G_a$ . Darüber hinaus ist der Funktionsgraph  $Z_c$  für einen dritten Zustand noch weiter fortgeschrittener Abnutzung und entsprechend mit einer zu erwartenden restlichen Gebrauchsdauer von  $G_c$  kleiner  $G_b$  dargestellt. Die Gebrauchsdauern  $G_a$ – $G_c$  sind in **Fig. 4** und in **Fig. 6** zur Verdeutlichung neben die Bezeichnungen der entsprechenden Funktionsgraphen  $Z_a$ – $Z_c$  in Klammern eingetragen. Für die dargestellten Abnutzungszustände  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  gilt die Tendenz, dass der Wert der Kenngröße einer Schwingung beim Betrieb stark zunimmt, wenn der  $K_v$ -Faktor über einen bestimmten Wert, als  $w_a$ ,  $w_b$  und  $w_c$  bezeichnet, vergrößert wird. Durch Abnutzung nimmt die Steifigkeit eines Gewindetriebs **28** von dem Abnutzungszustand  $Z_a$  bis zu dem Abnutzungszustand  $Z_c$  ab. Die Abnutzungsvorräte bei den Abnutzungszuständen  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  hängen auch von den Regelparametern der Regelung ab. Im Allgemeinen ist die restliche Gebrauchsdauer bei einer hohen Anforderung an den Vorschubantrieb **16**, die sich in einem hohen vorgegebenen  $K_v$ -Faktor und/oder einer hohen vorgegebenen Steifigkeit des mechanischen Übertragungssystems **22** für den Bearbeitungsbetrieb der Werkzeugmaschine **10** ausdrücken kann, kleiner als bei einer niedrigen Anforderung, die einem kleineren vorgegebenen  $K_v$ -Faktor und/oder einer geringeren vorgegebenen Steifigkeit des mechanischen Übertragungssystems **22** entspricht. Eine zu den Abnutzungszuständen  $Z_a$ – $Z_c$  in der Datenbank hinterlegte restliche Gebrauchsdauer  $G_a$ ,  $G_b$ ,  $G_c$  kann sich beispielsweise auf einen  $K_v$ -Faktor mit einem ersten Wert  $w_1$  beziehen.

**[0070]** Aus dem Diagramm der **Fig. 4** ist ersichtlich, dass für  $K_v$ -Faktoren kleiner  $w_b$  der resultierende Wert der Kenngröße für die Abnutzungszustände  $Z_a$  und  $Z_b$  gleich oder unterhalb einer Nachweisgrenze  $agrenz$  für den Wert der Kenngröße ist. Deshalb sind die Abnutzungszustände  $Z_a$  und  $Z_b$  für  $K_v$ -Faktoren kleiner  $w_b$  an Hand der Messung eines Wertes für die Kenngröße nicht unterscheidbar.

**[0071]** Ausgangspunkt des beispielesgemäßen Verfahrens **100**, dessen Ablauf in **Fig. 3** dargestellt ist, ist eine zur Bearbeitung von Werkstücken mit den Anforderungen des Nutzers betriebsbereite Werkzeugmaschine **10**, denn das Überwachungsverfahren wird vorzugsweise vor dem Ausfall der Maschine **10** auf Grund von Abnutzung durchgeführt. Insbesondere sind die Werte für die Einstellungsparameter der Steuerungseinrichtung **12** des Vorschubantriebs **16**, zu denen auch der  $K_v$ -Faktor gehört, derart gewählt, dass die Werkzeugmaschine **10** gemäß den Anforderungen eines Benutzers, insbesondere an die Bearbeitungsgenauigkeit und/oder Bearbeitungsgeschwindigkeit, Werkstücke bearbeiten kann. Beispielsweise ist der  $K_v$ -Faktor des Vorschubantriebs **16** auf einen ersten Wert  $w_1$  eingestellt, der beispielesgemäß kleiner als  $w_b$ , jedoch größer als  $w_c$  ist. Die Anforderungen an die Werkzeugmaschine **10** können beispielsweise derart sein, dass der Wert für den  $K_v$ -Faktor auf Grund der geforderten Dynamik mindestens  $w_1$  betragen muss, eine Schwingung mit einer maximalen Schwingbeschleunigung jedoch, wie sie gemäß **Fig. 4** für einen Kugelgewindetrieb **28** mit einem Zustand  $Z_c$  bei  $w_1$  auftreten würde, auf Grund der geforderten Genauigkeit nicht mehr akzeptabel ist. Eine Werkzeugmaschine **10** mit einem Kugelgewindetrieb **28** mit einem Abnutzungszustand  $Z_c$  würde demnach als ausgefallen gelten ( $G_c = 0$ ). Aus **Fig. 4** lässt sich demnach ableiten, dass die voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer bei einem vorgegebenen Abnutzungszustand umso kleiner ist, je höher der Wert des vorgegebenen  $K_v$ -Faktors ist.

**[0072]** Der Bediener der Werkzeugmaschine **10** kann zu Beginn des Verfahrens **100** beispielsweise einen maximalen ermittelbaren Abnutzungsvorrat festlegen und über die Eingabeeinheit in die Steuerungseinrichtung **12** eingeben. Der Bediener kann beispielsweise festlegen, dass ein Abnutzungsvorrat entsprechend einem Zustand  $Z_b$  mit einer bestimmten Genauigkeit noch ermittelbar sein soll. Der Wert des  $K_v$ -Faktors muss dazu größer als  $w_b$  sein. Die Steuerungseinrichtung **12** wählt daher auf Grund der Bedienereingabe beispielsweise einen zweiten Wert für den  $K_v$ -Faktor von  $w_2$ , der, abhängig von der geforderten minimalen Genauigkeit, etwas größer als  $w_b$  ist. Es erfolgt eine Änderung **102** des  $K_v$ -Faktors durch die Steuerungseinrichtung **12** auf den Wert  $w_2$ , der als neuer Wert für den  $K_v$ -Faktor gesetzt wird. Während das dargestellte Ausführungsbeispiel darauf beruht, dass der  $K_v$ -Faktor erhöht wird, kann das beispielesgemäße Verfahren auch analog dazu durchgeführt werden, indem zusätzlich oder alternativ zu der Erhöhung des  $K_v$ -Faktors des Lagereglers **64** der proportionale Verstärkungsfaktor  $K_p$  des Drehzahlreglers **66** und/oder die reziproke Nachstellzeit  $T_{np}$  des Drehzahlreglers **66** erhöht wird.

**[0073]** Mit dem geänderten  $K_v$ -Faktor erfolgt ein Betreiben **104** des Antriebs **16**, hier ein Verfahren des Vorschubantriebs **16** in  $x$ -Richtung, in dem der Halter **20** in Vorschubrichtung  $x$  des Vorschubantriebs **16** verfahren wird, um Zustandsdaten, beispielsweise Schwingungsdaten, mit dem Schwingungssensor **40** bei geändertem Wert zu ermitteln. Über die Lagesollwerte  $x_s$ , die zu gegebenen Zeiten durch die Steuerungseinrichtung **12** beim Betreiben **104** vorgegeben werden, wird für das Betreiben **104** beispielsweise eine konstante Geschwin-

digkeit festgelegt, mit der der Halter **20** für die Ermittlung des Abnutzungszustands verfahren werden soll. Es können jedoch auch andere geeignete Weg-Zeit-Profile für das Verfahren des Halters **20** vorgegeben werden.

**[0074]** Während des Verfahrens **104** des Halters **20** erfolgt ein Erfassen **106** von Schwingungsdaten über den Antrieb **16** mit dem Schwingungssensor **40** und ein Übermitteln an die Steuerungseinrichtung **12**. Die Schwingungsdaten können zunächst von einer internen oder externen Speichereinrichtung, z. B. bei dem Schwingungssensor **40**, der Steuerungseinrichtung **12** empfangen werden. Die Schwingungsdaten können in diesem Fall zu einem späteren Zeitpunkt der Auswerteeinheit zugeführt werden. Andernfalls können die Schwingungsdaten der Auswerteeinheit direkt nach dem Erfassen **106** zugeführt werden. Es können insbesondere Daten von dem nach dem Beginn des Antreibens **104** eingeschwungenen System **22** erfasst werden. Die Schwingungsdaten können zur Ermittlung eines Wertes einer Kenngröße oder einer Kennfunktion während des Verfahrens **104** des Halters **20** und/oder nach dem Verfahren **102** durch die Auswerteeinrichtung ausgewertet werden. Beispielsweise wird die maximale Schwingbeschleunigung aus den Schwingungsdaten in Vorschubrichtung als Kenngröße ermittelt.

**[0075]** Die Schwingung des mechanischen Übertragungssystems **22**, insbesondere des Halters **20**, die zur Ermittlung des Abnutzungszustands mit dem Schwingungssensor **40** erfasst wird, kann ihren Ursprung in einer Anregung des mechanischen Übertragungssystems **22** durch den Regler **60** selbst haben. Die Schwingungsdaten können grundsätzlich im Zeitbereich und/oder im Frequenzbereich zur Ermittlung einer Kenngröße und/oder einer Kennfunktion erfasst und/oder ausgewertet werden. Die Schwingungsdaten können vorzugsweise frequenzselektiv in einem bestimmten Frequenzbereich erfasst und/oder ausgewertet werden. Die Zustandsdaten können zur Ermittlung des Abnutzungszustands beispielsweise bei einer Frequenz erfasst und/oder ausgewertet werden, die einer Anregungsfrequenz auf Grund der Regelung entspricht. Es kann allgemein ein Bandpassfilter eingesetzt werden, um gefilterte Schwingungsdaten aus einem Frequenzband, um eine Anregungsfrequenz auf Grund der Anregung durch die Regelung zu erhalten.

**[0076]** Es folgt ein Ermitteln **108** des tatsächlichen Abnutzungszustands aus den Schwingungsdaten, beispielsweise aus der Kenngröße. Wenn der noch unbekannte Abnutzungszustand  $Z_t$  ein Zustand mit einer höheren Abnutzung als bei dem Zustand fortgeschrittener Abnutzung  $Z_b$  ist, wie in **Fig. 4** an Hand des Funktionsgraphen für den Zustand  $Z_t$  dargestellt, wird bei einem  $K_v$ -Faktor von  $w_2$  gemäß dem in **Fig. 4** dargestellten Zusammenhang eine maximale Schwingbeschleunigung von  $a_{max}$  als Wert der Kenngröße ermittelt werden. Aus dem  $K_v$ -Faktor und dem Wert  $a_{max}$  der Kenngröße kann auf Grund des in der Datenbank hinterlegten Zusammenhanges der Abnutzungszustand des Antriebs **16** und/oder einer bestimmten Komponente und/oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten zu  $Z_t$  bestimmt werden, mit dem eine bestimmte zu erwartende restliche Gebrauchsdauer als Abnutzungsvorrat verknüpft ist.

**[0077]** Wenn der tatsächliche Abnutzungszustand beispielsweise ein Zustand geringerer Abnutzung  $Z_t'$  als bei dem Zustand fortgeschrittener Abnutzung  $Z_b$  ist, wie in **Fig. 4** anhand des Funktionsgraphen  $Z_t'$  dargestellt, nimmt die maximale Schwingbeschleunigung bei dem eingestellten  $K_v$ -Faktor einen Wert an, der unterhalb einer Nachweisgrenze  $a_{grenz}$  des Wertes der Kenngröße ist. Z. B. kann der aus den Schwingungsdaten ermittelte Wert der Kenngröße stark fehlerbehaftet sein. In diesem Fall kann zumindest ermittelt werden, dass ein tatsächlicher Abnutzungsgrad des mechanischen Übertragungssystems und/oder einer bestimmten Komponente und/oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten von höchstens einem Abnutzungsgrad entsprechend einem Abnutzungszustand  $Z_b$  fortgeschrittener Abnutzung vorliegt. Es kann also eine obere Grenze für den Abnutzungsgrad ermittelt werden. Das Verfahren kann zusätzlich auch mit einem  $K_v$ -Faktor mit einem weiteren zweiten Wert wiederholt werden, der größer als der zweite Wert ist, um den Abnutzungszustand noch weiter einzugrenzen.

**[0078]** Auf Grund des ermittelten Abnutzungszustands, beispielsweise der oberen Grenze für den Abnutzungsgrad, aus dem eine untere Grenze für den Abnutzungsvorrat abgeleitet werden kann, kann als ein weiterer Schritt das Planen **110** eines Zeitpunkts oder Zeitintervalls für einen Austausch des mechanischen Übertragungssystems **22** oder einer bestimmten Komponente davon und/oder eines Zeitpunkts oder eines Zeitintervalls für eine erneute Durchführung des Überwachungsverfahrens **100** erfolgen. Zum Beispiel kann der Austausch des Kugelgewindetriebs **28** und/oder des Kugelgewindetriebs **28** und der Kupplung **26** geplant werden.

**[0079]** Nach dem Verfahren des Halters **20** zur Ermittlung der Zustandsdaten, kann die Steuerungseinrichtung **12** den Wert für den  $K_v$ -Faktor wieder auf den ursprünglichen ersten Wert  $w_1$  oder einen anderen Wert ändern, mit dem der Vorschubantrieb **16** eine vom Benutzer der Werkzeugmaschine **10** vorgegebene Anforderung an die Bearbeitungsgenauigkeit und/oder Bearbeitungsgeschwindigkeit einhalten kann.

**[0080]** Das anhand der **Fig. 3** und **Fig. 4** erläuterte Verfahren wird vorzugsweise bei einem quasi-konstanten tatsächlichen Abnutzungszustand durchgeführt. Insbesondere werden die Schritte des Änderns **102** und des Betreibens **104** sowie des Erfassens **106** von Zustandsdaten während des Betriebes in einem kurzen Zeitintervall durchgeführt, so dass der Abnutzungszustand bei der Änderung **102** des Regelparameters  $K_v$ , dem Betreiben **104** des Antriebs mit dem geänderten Wert und dem Erfassen **106** der Zustandsdaten im Wesentlichen derselbe ist. Ein Bearbeiten eines Werkstücks findet zwischendurch vorzugsweise nicht statt.

**[0081]** Das Ändern **102**, das Betreiben **104** und/oder das Erfassen **106** werden vorzugsweise während einer bearbeitungsfreien Zeit, beispielsweise während einer Eilgangbewegung des Halters **20**, ausgeführt. Beispielsweise findet im Falle einer Anwendung des Verfahrens auf eine zerspanende Werkzeugmaschine während des Betriebes **104** des Antriebs mit geändertem Wert zum Erfassen **106** der Zustandsdaten kein Zerspanen eines Werkstücks statt. Das Verfahren kann beispielsweise zu Schichtbeginn oder in einer produktionsfreien Zeit wie beispielsweise in einer geplanten Wartungszeit durchgeführt werden.

**[0082]** In **Fig. 5** ist ein Ablaufschema eines weiteren Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens **100** mit einer Werkzeugmaschine **10** gemäß **Fig. 1** dargestellt. Zudem wird auf **Fig. 6** bezuggenommen, die ein Diagramm zeigt, das einen beispielhaften Zusammenhang zwischen einer Kenngröße und der Einstellgröße zeigt, die eine Eigenschaft des Vorschubantriebs **16**, insbesondere dessen mechanischen Übertragungssystems **22**, bestimmt. Das Verfahren des Ausführungsbeispiels gemäß **Fig. 5** und **Fig. 6** entspricht weitgehend dem Verfahren gemäß **Fig. 3** und **Fig. 4**, so dass auch auf die Beschreibung für das Ausführungsbeispiel gemäß den **Fig. 3** und **Fig. 4** verwiesen wird.

**[0083]** In diesem Ausführungsbeispiel erfolgt keine Änderung des Regelparameters, sondern eine Änderung der Einstellgröße. Die Einstellgröße, die zur Ermittlung des Abnutzungszustands geändert wird, kann beispielsweise der Stellweg eines Aktuators sein, der die Vorspannung der Spindelmutterhälften und damit die Steifigkeit des Systems Spindelmutter-Spindel als Eigenschaft des mechanischen Übertragungssystems **22** mitbestimmt. Die Einstellgröße kann alternativ eine Einstellgröße für ein Dämpfungssystem, in **Fig. 1** nicht dargestellt, sein, das die Bewegung des Halters **20** in Vorschubrichtung  $x$  dämpft und das somit die Dämpfung des mechanischen Übertragungssystems **22** als Regelstreckeneigenschaft mitbestimmt. Im Ausführungsbeispiel ist der Zusammenhang zwischen der Kenngröße und der Einstellgröße bei den Abnutzungszuständen  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  derart, dass die Kenngröße mit steigender Einstellgröße abfällt.

**[0084]** Die Einstellgröße bestimmt demnach die Steifigkeit des mechanischen Übertragungssystems **22**, insbesondere des Systems aus Spindelmutter **32** und Gewindespindel **30**, oder die Dämpfung als Eigenschaft des mechanischen Übertragungssystems **22**.

**[0085]** Die Einstellgröße weist zu Beginn einen ersten Wert  $w_1$  auf. Die Einstellgröße wird beispielsweise auf den zweiten Wert  $w_2$  geändert, bei dem auch ein Abnutzungszustand entsprechend  $Z_b$  noch mit ausreichender Genauigkeit festgestellt werden kann.

**[0086]** Der Beschreibung zu dem Ausführungsbeispiel gemäß der **Fig. 3** und **Fig. 4**, insbesondere zum Ablauf des Verfahrens **100**, gilt ansonsten analog für das weitere Ausführungsbeispiel gemäß den **Fig. 3** und **Fig. 4**.

**[0087]** In **Fig. 7** wird das erfindungsgemäße Verfahren, beispielsweise gemäß der Ausführungsbeispiele nach **Fig. 3** oder **Fig. 5**, anhand zweier Diagramme beispielhaft veranschaulicht.

**[0088]** Das obere Diagramm zeigt beispielhaft und schematisch den Abnutzungsvorrat als Funktion der Zeit bei drei verschiedenen  $K_v$ -Faktoren  $K_{v1} < K_{v2} < K_{v3}$ , mit denen die Werkzeugmaschine **10** betrieben wird. Anstelle der  $K_v$ -Faktoren kann analog zu dem Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 5** und **Fig. 6** auch ein ähnliches Diagramm bei unterschiedlichen Werten der Einstellgröße angegeben werden. Der Verlauf ist nichtlinear. Es kann sich aber auch ein linearer Verlauf ergeben, z. B. bei einer anderen Einheit des Abnutzungsvorrats. Wenn der Abnutzungsvorrat aufgebraucht ist, ist der Antrieb **12**, insbesondere das mechanische Übertragungssystem **22**, ausgefallen und es muss ein Austausch der für den Ausfall verantwortlichen Komponenten, beispielsweise des Gewindetriebs **28**, erfolgen. Wie dargestellt, ist der Abnutzungsvorrat bei einem größeren  $K_v$ -Faktor von vornherein kleiner und der Abnutzungsvorrat ist in kürzerer Zeit aufgebraucht. Das untere Diagramm stellt den Verlauf des Wertes der Kenngröße einer Schwingung als Funktion der Zeit jeweils für ein Betreiben mit den unterschiedlichen  $K_v$ -Faktoren  $K_{v1}$ ,  $K_{v2}$  und  $K_{v3}$  dar. Bei einer Schwingung mit einem Wert der Kenngröße über einem kritischen Niveau akrit (horizontale gestrichelte Linie in dem unteren Diagramm der **Fig. 7**) können die Anforderungen des Benutzers, z. B. an die Bearbeitungsgeschwindigkeit und/oder Bearbeitungsgenauigkeit, nicht mehr eingehalten werden, so dass der Antrieb **16** als ausgefallen gilt. Dies ist für die drei

unterschiedlichen Kv-Faktoren Kv1, Kv2, Kv3 zu den Zeitpunkten tA1, tA2, tA3 der Fall. Anhand des steilen Anstiegs der Kurven der Kenngröße als Funktion der Zeit im unteren Diagramm wird anschaulich, dass die Reaktionszeit vor einem Ausfall sehr kurz sein kann.

**[0089]** Bei der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens **100**, beispielsweise nach einem der vorigen Ausführungsbeispiele, kann Folgendes geschehen:

Es wird davon ausgegangen, dass die Werkzeugmaschine **10** mit einem Vorschubantrieb **12** mit einem ersten Wert Kv1 für den Kv-Faktor betrieben wird.

**[0090]** Wie durch den ersten Pfeil P1 angedeutet, wird der Kv-Faktor des Vorschubantriebs zur ersten Zeit t0 auf den zweiten Wert Kv2 erhöht und beim Betreiben werden Schwingungsdaten aufgenommen und daraus ein Wert der Kenngröße ermittelt. Wie anhand des unteren Diagramms ersichtlich, bleibt der Wert der Kenngröße trotz Änderung des Kv-Faktors unterhalb des kritischen Niveaus akrit. Aus dem Wert der Kenngröße wird ermittelt, dass der Abnutzungszustand des Antriebs derart ist, dass voraussichtlich noch eine restliche Gebrauchsdauer entsprechend mindestens der Differenz zwischen tA2 und t0 besteht. Der Kv-Faktor wird zu der Zeit t0 wieder auf den Wert Kv1 angehoben und der Produktionsbetrieb wieder aufgenommen.

**[0091]** Zur Zeit t1 wird das Verfahren wiederholt, indem, wie durch den zweiten Pfeil P2 angedeutet, der Kv-Faktor wieder von dem ersten Wert Kv1 auf den zweiten Wert Kv2 geändert und der Wert der Kenngröße ermittelt wird. Wie dargestellt ist der Zeitpunkt t1 etwa bei dem voraussichtlichen Ausfallzeitpunkt tA2 für einen Betrieb mit dem Kv-Faktor Kv2. Jedoch kann das Verfahren stattdessen oder zusätzlich zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt wiederholt werden. Wie aus dem unteren Diagramm ersichtlich ist, kann zu dem Zeitpunkt t1 ein erhöhter Wert für die Kenngröße von etwa akrit gemessen werden, aus dem die voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer bezogen auf einen Betrieb mit dem Kv-Faktor Kv1 ermittelt werden kann.

**[0092]** Durch den horizontalen gestrichelten dritten Pfeil P3 und den vertikalen gestrichelten vierten Pfeil wird angedeutet, dass durch die Vergrößerung des Kv-Faktors von dem ersten Wert Kv1 auf den zweiten Wert Kv2 für die Durchführung des Verfahrens – oder allgemein durch die Änderungen des Regelparameters oder der Größe derart, dass die voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer bezogen auf einen Produktionsbetrieb mit dem zweiten Wert w2 geringer ist als Bezogen auf einen Produktionsbetrieb mit dem ersten Wert w1 – der Antrieb **12** durch die Durchführungen des Verfahrens bei t0 bzw. t1 effektiv bei einem Zeitpunkt t0' bzw. t1' getestet wird, der beispielsweise um etwa die Differenz von etwa tA1 und tA2 „in der Zukunft“ liegt. Dies macht deutlich, dass durch das Verfahren **100** eine Vorhersage über das zukünftige Verhalten des Antriebs **16** über einen Zeitraum, der von der Größe der Veränderung des Regelparameters bzw. der Einstellgröße abhängig ist, insbesondere hinsichtlich einer Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls des Antriebs und/oder einer bestimmten Komponente und/oder einer Gruppe von Komponenten, getroffen werden kann.

**[0093]** Das erfindungsgemäße Verfahren **100** beruht darauf, dass ein funktioneller Zusammenhang zwischen dem Zustandsverhalten des Antriebs **16** einer Werkzeugmaschine **10** und einem Regelparameter Kv bzw. einer Größe, die eine Eigenschaft des Antriebs **16**, insbesondere des mechanischen Übertragungssystems **22** bestimmt, und dem Abnutzungszustand bekannt ist oder durch einfache Testmessungen ermittelt und in der Datenbank hinterlegt werden kann. Der funktionelle Zusammenhang kann sich insbesondere durch eine plötzliche Änderung des Zustandsverhaltens bei einem bestimmten Abnutzungszustand auszeichnen, was problematisch für die Planung und Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme, insbesondere eines Austauschs, sein kann. Beim Normalbetrieb der Werkzeugmaschine **10** bleibt der Regelparameter oder die Größe in der Regel konstant und der Abnutzungszustand ändert sich mit der Zeit. In einem durch die Erfindung vorgeschlagenen beispielhaften Testbetrieb wird der Regelparameter Kv und/oder die Größe kurzzeitig von einem ersten Wert w1 auf einen zweiten Wert w2 geändert und der Antrieb mit dem vorübergehend geänderten Wert teilweise betrieben, wobei aus dem Zustandsverhalten des Antriebs beim Betreiben der Werkzeugmaschine **10** mit dem geänderten Wert der aktuelle Abnutzungszustand des Antriebs **16**, insbesondere des mechanischen Übertragungssystems **22** des Antriebs **16**, zur Zeit der Durchführung des Tests ermittelt wird. Während des Erfassens **106** von Zustandsdaten auf Grund des Betriebes **104** des Antriebs mit geändertem Wert findet vorzugsweise keine Bearbeitung eines Werkstücks mit der Werkzeugmaschine statt. Besonders bevorzugt findet auch schon während des Änderns **102** des Regelparameters und/oder der Größe keine Bearbeitung eines Werkzeugs statt.

**[0094]** Das Verfahren **100** kann auf eine Werkzeugmaschine mehrfach angewendet werden, wobei zwischen den jeweiligen Durchführungen Bearbeitungen stattfinden können. Bei jeder Durchführung wird ein Wert für den jeweils aktuellen Abnutzungszustand erhalten. Der Verlauf der Werte kann in einem Ausführungsbeispiel zur Planung von Instandhaltungsmaßnahmen herangezogen werden, indem der Verlauf der Werte auf Grund

des bisherigen Verlaufs in die Zukunft extrapoliert wird, um eine Prognose über das Ende der Nutzungsdauer eines Verschleißteils des Antriebs zu erhalten.

Bezugszeichenliste:

|                |                                       |
|----------------|---------------------------------------|
| <b>10</b>      | Werkzeugmaschine                      |
| <b>12</b>      | Steuerungseinrichtung                 |
| <b>14</b>      | Server                                |
| <b>16</b>      | Vorschubantrieb                       |
| <b>18</b>      | Motor                                 |
| <b>20</b>      | Halter                                |
| <b>22</b>      | Übertragungssystem                    |
| <b>24</b>      | Getriebe                              |
| <b>26</b>      | Kupplung                              |
| <b>28</b>      | Gewindetrieb                          |
| <b>30</b>      | Gewindespindel                        |
| <b>32</b>      | Spindelmutter                         |
| <b>34a/34b</b> | Erstes/zweites Lager                  |
| <b>36</b>      | Linearführung                         |
| <b>38</b>      | Bett                                  |
| <b>40</b>      | Schwingungssensor                     |
| <b>42</b>      | direktes Wegmesssystem                |
| <b>44</b>      | Abtaster                              |
| <b>46</b>      | Maßstab                               |
| <b>48</b>      | indirektes Wegmesssystem              |
| <b>60</b>      | Kaskadenregler                        |
| <b>62</b>      | Lageregelkreis                        |
| <b>64</b>      | Lageregler                            |
| <b>66</b>      | Geschwindigkeitsregler/Drehzahlregler |
| <b>68</b>      | Drehzahlmesssystem                    |
| <b>70</b>      | Beschleunigungsregler/Stromregler     |
|                |                                       |
| <b>100</b>     | Verfahren                             |
| <b>102</b>     | Änderung                              |
| <b>104</b>     | Betreiben                             |
| <b>106</b>     | Erfassen                              |
| <b>108</b>     | Ermitteln                             |
| <b>110</b>     | Planen                                |
|                |                                       |
| xs             | Lagesollwert                          |
| xi             | Istwert Position                      |
| ns             | Drehzahlsollwert                      |
| ni             | Drehzahlistwert                       |

|                     |                                  |
|---------------------|----------------------------------|
| Is                  | Stromsollwert                    |
| U                   | Spannung                         |
|                     |                                  |
| Za, Zb, Zc, Zt, Zt' | Abnutzungszustand/Funktionsgraph |
| wa, wb wc           | Werte für Kv-Faktor              |
| w1                  | erster Wert                      |
| w2                  | zweiter Wert                     |
| amax                | Wert der Kenngröße               |
| agrenz              | Nachweisgrenze                   |
| akrit               | Kritisches Niveau                |
|                     |                                  |
| tA1, tA2, tA3       | Ausfallzeitpunkt                 |
|                     |                                  |
| P1–P4               | Pfeil                            |
| t0                  | erster Zeitpunkt                 |
| t0'                 | effektiver erster Zeitpunkt      |
| t1                  | zweiter Zeitpunkt                |
| t1'                 | effektiver zweiter Zeitpunkt     |
| Kv1, Kv2, Kv3       | Kv-Faktor/Funktionsgraph         |

### Patentansprüche

1. Verfahren (**100**) zur Überwachung eines Antriebssystems einer Werkzeugmaschine (**10**) mit einem Antrieb (**16**), wobei der Antrieb (**16**) ein Übertragungssystem (**22**), einen Halter (**20**) für ein Werkstück und/oder ein Werkzeug, einen Regelkreis (**62**) mit einem Regler (**60, 64, 66, 70**) und einen Sensor (**40**) zum Erfassen von Zustandsdaten des Antriebs (**16**) aufweist, mit den Schritten:

- Ändern (**102**) wenigstens eines Regelparameters (Kv) des Reglers (**60, 64, 66, 70**) von einem ersten Wert (w1) auf einen zweiten Wert (w2) des Regelparameters (Kv) und/oder wenigstens einer eine Eigenschaft des Antriebs bestimmenden Größe von einem ersten Wert (w1) auf einen zweiten Wert (w2) der Größe,
- Betreiben (**104**) des Antriebs (**16**) mit geändertem Wert,
- Erfassen (**106**) von Zustandsdaten mit dem Sensor (**40**),
- Ermitteln (**108**) des Abnutzungszustands des Antriebs (**16**) auf Grund der Zustandsdaten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Antrieb ein Vorschubantrieb (**16**) und der Regelkreis ein Lageregelkreis (**62**) ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Geschwindigkeitsverstärkung (Kv) des Lagereglers (**64**) von dem ersten Wert (w1) auf den zweiten Wert (w2) erhöht wird.

4. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei der Regler (**60**) einen unterlagerten Regler (**66, 68**) aufweist.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei der unterlagerte Regler ein Geschwindigkeits- und/oder Drehzahlregler (**66**) ist, wobei als Regelparameter der proportionale Verstärkungsfaktor des unterlagerten Reglers (**66**) erhöht und/oder eine Nachstellzeit des unterlagerten Reglers (**66**) verkleinert wird.

6. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei die Größe die Steifigkeit, die Dämpfung und/oder die Masse des mechanischen Übertragungssystems (**22**) als die Eigenschaft des Antriebs (**16**) bestimmt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei die Größe derart geändert wird, dass die Steifigkeit des mechanischen Übertragungssystems (**22**) verringert wird.

8. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei der Sensor ein Schwingungssensor (**40**) ist und wobei die Zustandsdaten Schwingungsdaten über Schwingungen eines Übertragungselementes des Übertragungssystems (**22**), insbesondere des Halters (**20**) für ein Werkstück und/oder Werkzeug in Vorschubrichtung (x), sind.

9. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei für das Ermitteln (**108**) eine Datenbank mit Daten über den Zusammenhang des Abnutzungszustands, der Zustandsdaten und dem Wert des Regelparameters und/oder der Größe und/oder der Eigenschaft bereitgestellt wird.

10. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei der zweite Wert (w1) gegenüber dem ersten Wert (w1) dadurch ausgezeichnet ist, dass der Antrieb (**16**) beim Betreiben mit dem geänderten Wert (w2) eine reduzierte zu erwartende restliche Gebrauchsdauer aufweist.

11. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei die Zustandsdaten Schwingungsdaten sind und wobei der Regelparameter und/oder die Größe derart geändert werden, dass die maximale Schwingungsamplitude, die maximale Schwinggeschwindigkeit und/oder die maximale Schwingbeschleunigung der Schwingung bei dem Betreiben mit dem zweiten Wert (w2) größer ist als bei einem Betreiben mit dem ersten Wert (w1).

12. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei der Regelparameter und/oder die Größe derart geändert wird, so dass der Abnutzungszustand mit einer vorgegebenen minimalen Genauigkeit ermittelt werden kann.

13. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei die Zustandsdaten bei einer Frequenz ermittelt werden, die einer Anregungsfrequenz des mechanischen Übertragungssystems (**22**) durch die Regelung entspricht.

14. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei der Abnutzungszustand ermittelt wird, indem die voraussichtliche restliche Gebrauchsdauer des Übertragungssystems (**22**), einer bestimmten Komponente und/oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten des Übertragungssystems und/oder der Abbau der Steifigkeit und/oder der Vorrat an Steifigkeit des Übertragungssystems (**22**), einer bestimmten Komponente und/oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten des Übertragungssystems ermittelt wird.

15. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche mit dem Schritt (**110**): Bestimmen eines Zeitpunkts und/oder Zeitintervalls für den Austausch einer bestimmten Komponente und/oder einer bestimmten Gruppe von Komponenten des Antriebs und/oder einer erneuten Durchführung des Verfahrens.

16. Verfahren nach einem der vorigen Ansprüche, wobei das Erfassen (**106**) der Zustandsdaten mit dem Sensor während einer bearbeitungsfreien Zeit durchgeführt wird.

17. Werkzeugmaschine (**10**) mit einer Steuerungseinrichtung (**12**), die zu Durchführung eines Verfahrens (**100**) nach einem der vorigen Ansprüche eingerichtet ist.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

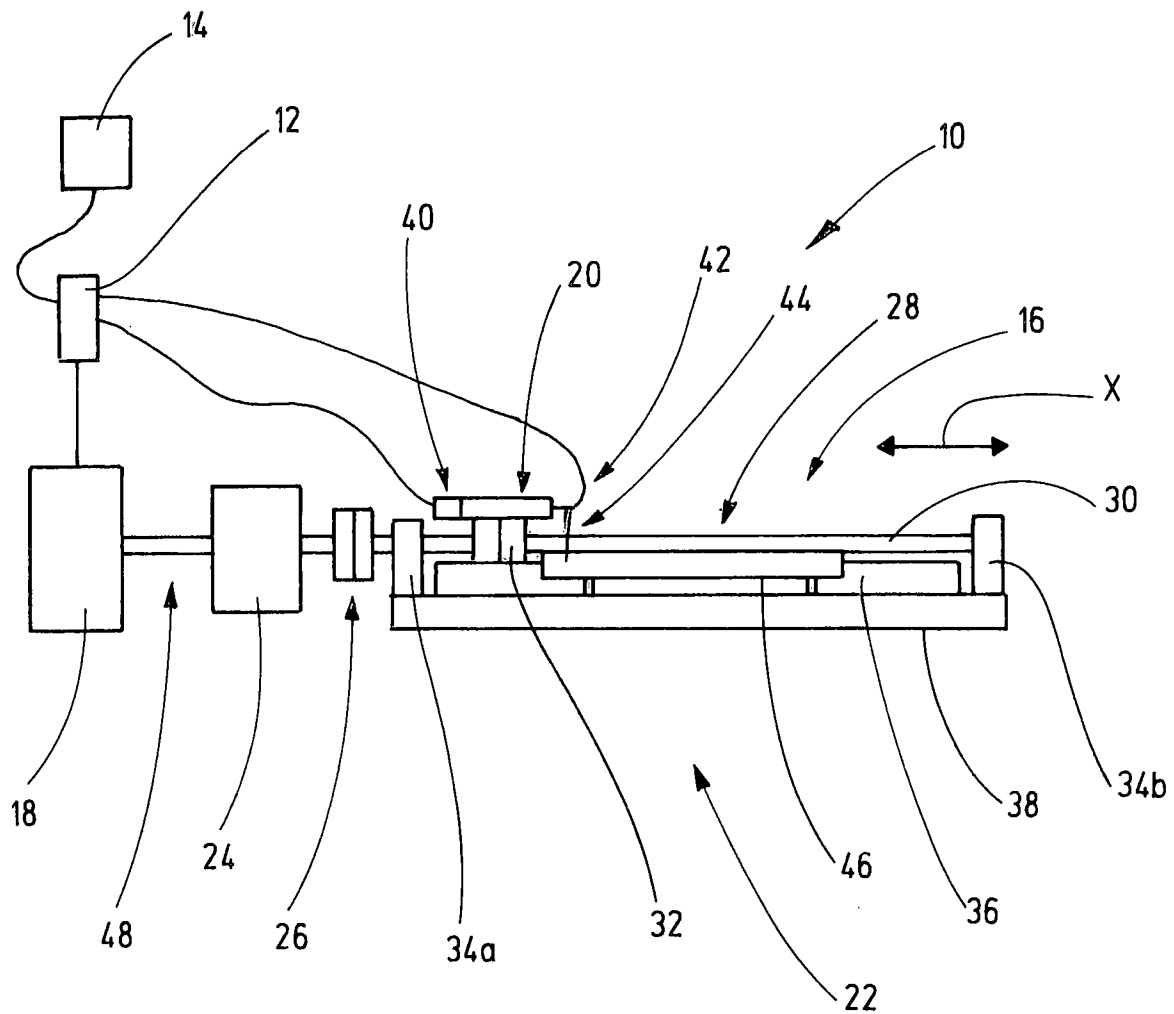


Fig.1

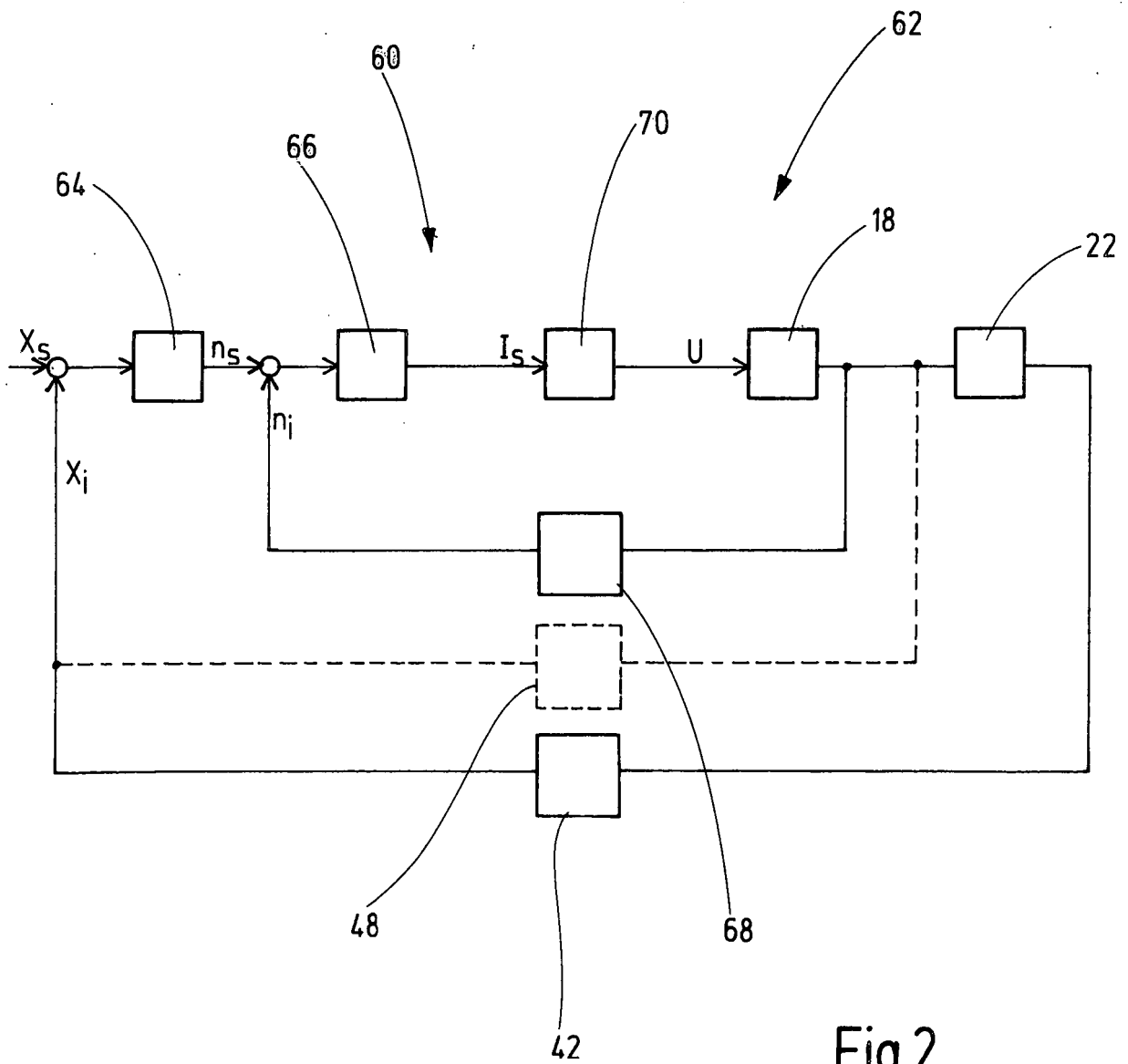


Fig.2

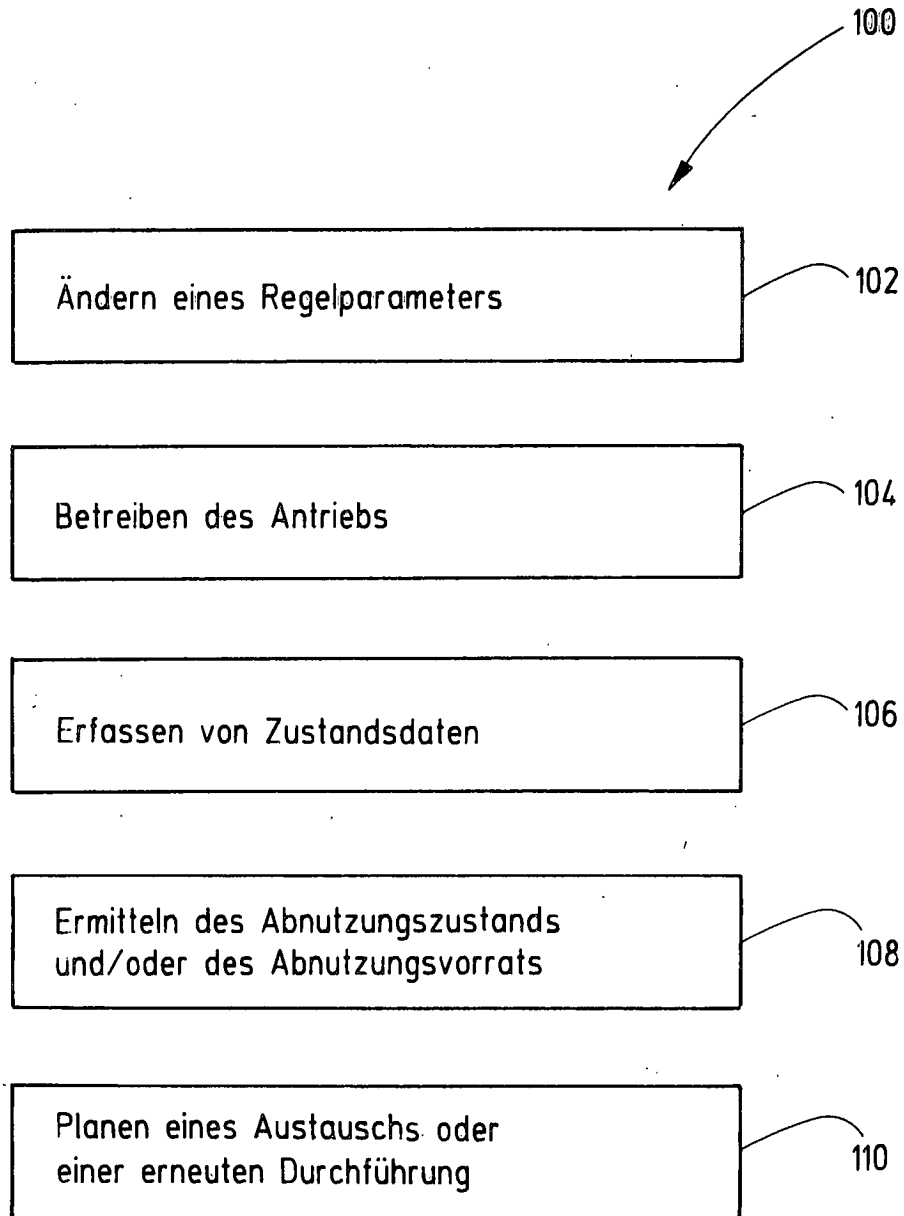


Fig.3

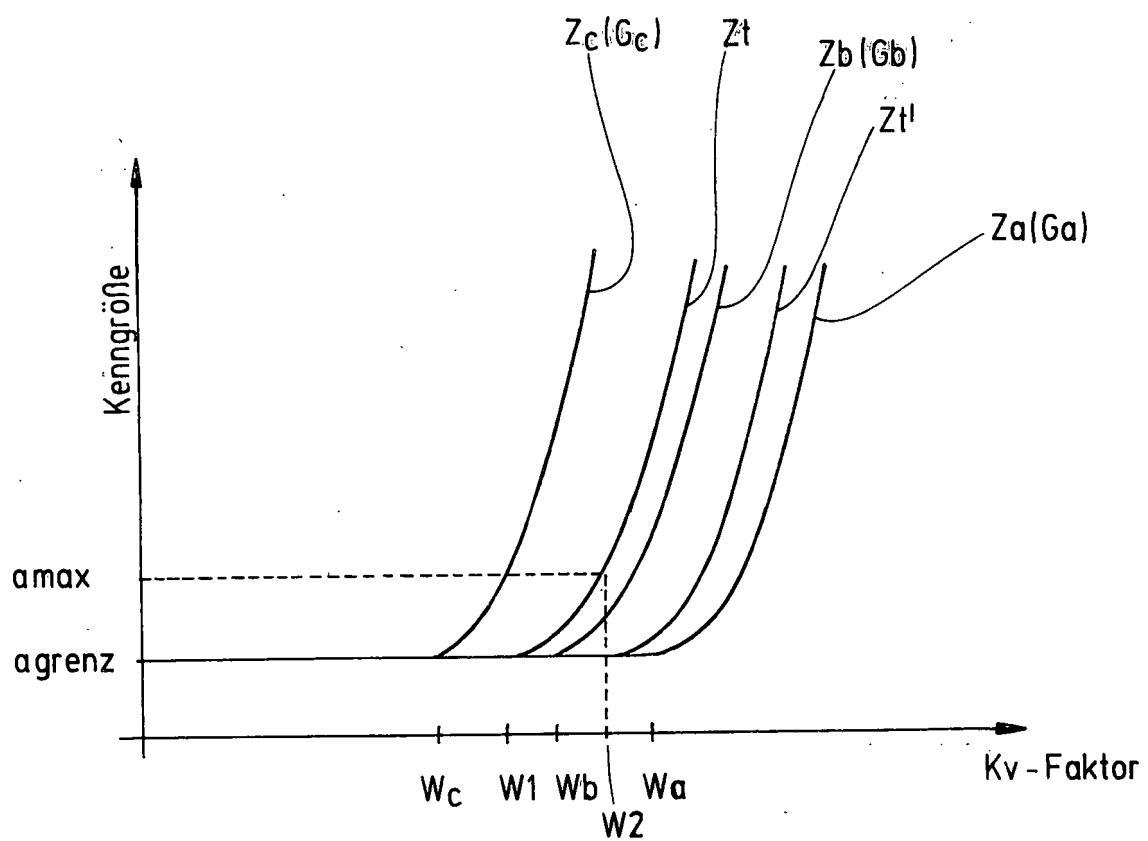


Fig.4

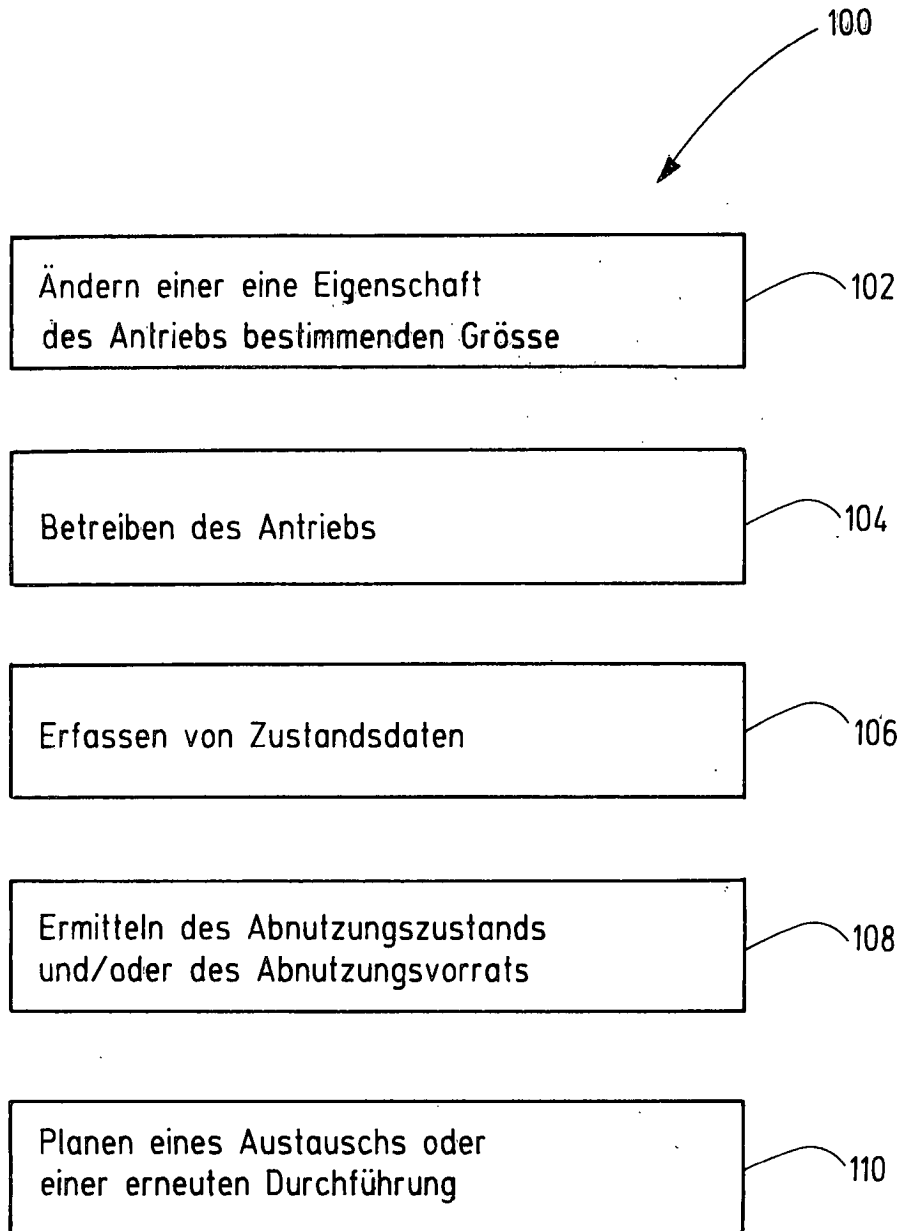


Fig.5

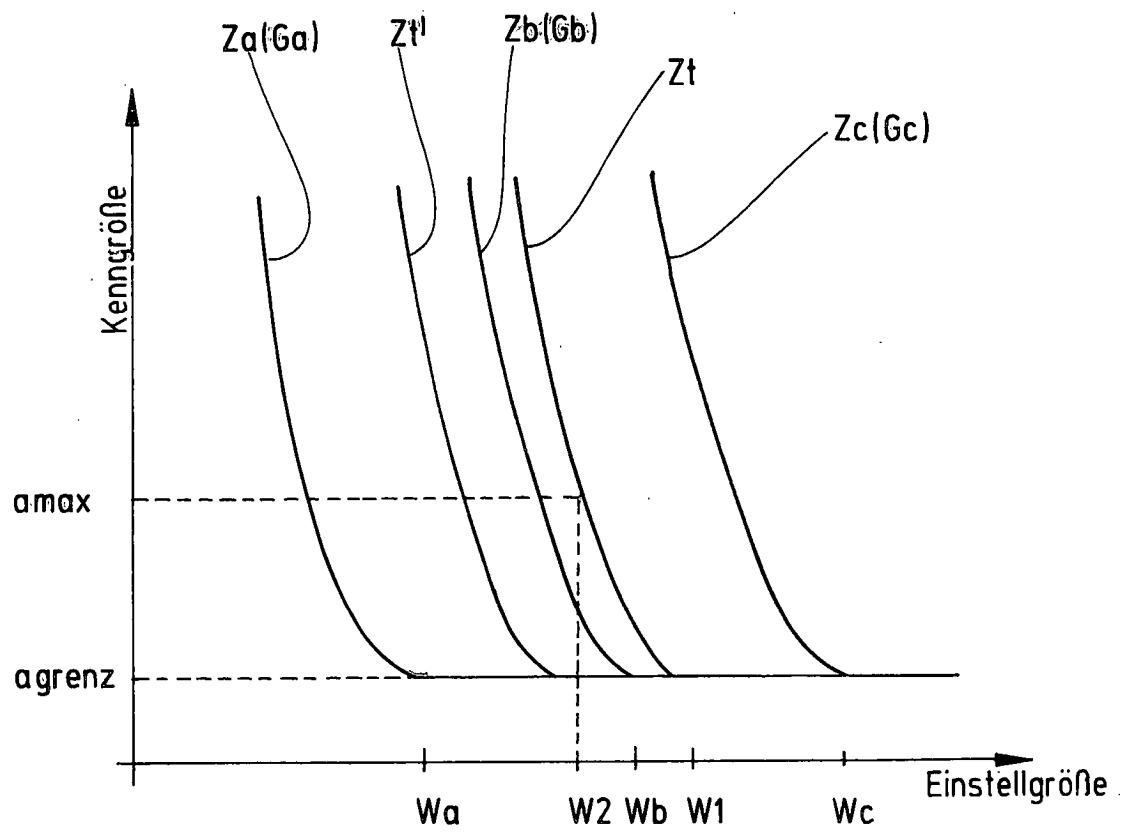


Fig.6

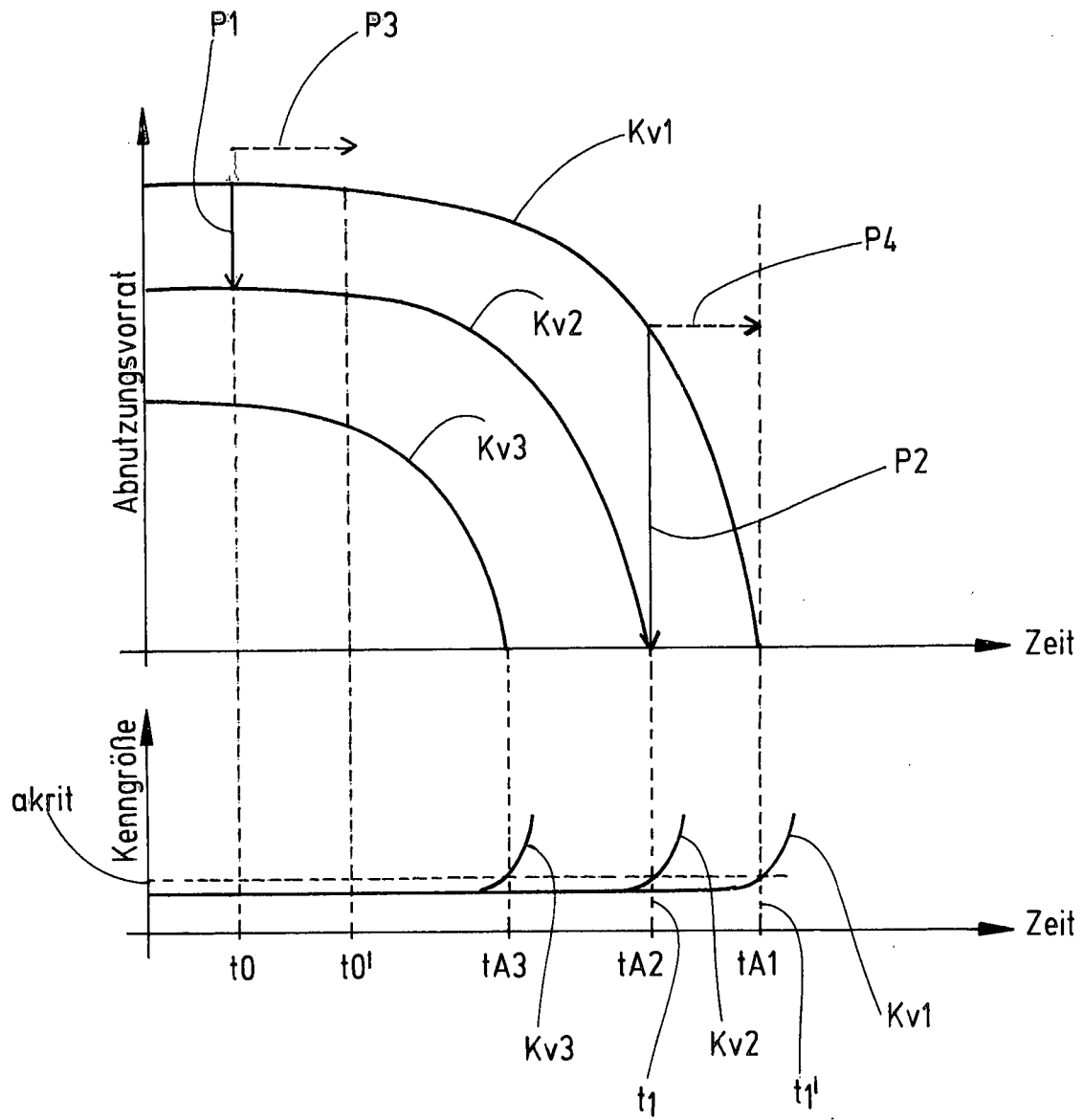


Fig.7