



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**10.08.2011 Patentblatt 2011/32**

(51) Int Cl.:  
**B21F 1/00 (2006.01) B21D 7/12 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **10015530.8**

(22) Anmeldetag: **10.12.2010**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA ME**

- **Fries, Stefan**  
**72764 Reutlingen (DE)**
- **Schönle, Anton**  
**88348 Bad Saulgau (DE)**
- **Gröninger, Matthias**  
**72631 Aichtal (DE)**

(30) Priorität: **08.02.2010 DE 102010007888**

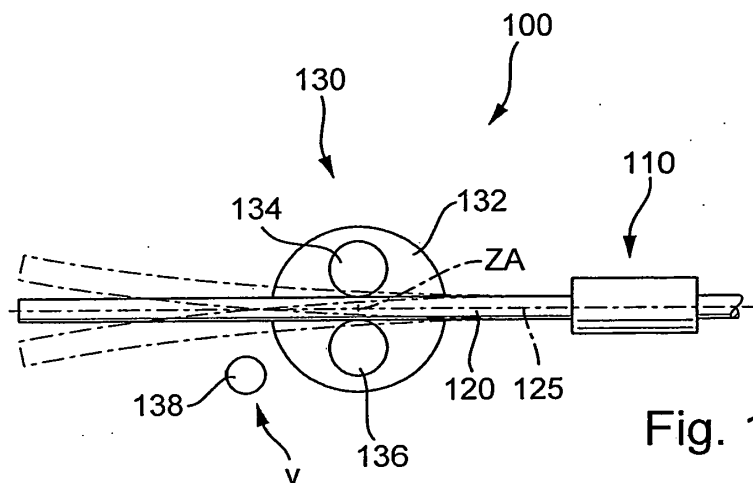
(74) Vertreter: **Patentanwälte**  
**Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster & Partner**  
**Kronenstrasse 30**  
**70174 Stuttgart (DE)**

(72) Erfinder:  
• **Steinhilber, Werner**  
**72116 Mössingen (DE)**

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Biegeteils**

(57) Bei einem Verfahren zur Herstellung eines Biegeteils durch zwei- oder dreidimensionales Biegen eines langgestreckten Werkstücks (120), insbesondere eines Drahtes oder eines Rohres, wird durch koordinierte Ansteuerung der Bewegungen von Maschinenachsen einer mittels einer Steuereinrichtung numerisch gesteuerten Biegemaschine in einem Biegeprozess mindestens ein Abschnitt des Werkstücks (120) durch eine oder mehrere Zufuhroperationen in eine Ausgangsstellung im Eingriffsbereich eines Biegewerkzeugs (130) bewegt und mit Hilfe des Biegewerkzeugs in mindestens einer Biegeope-

ration durch Biegen umgeformt. Die Bewegungen der Maschinenachsen werden jeweils gemäß einem durch die Steuereinrichtung der Biegemaschine vorgebbaren Bewegungsprofil erzeugt und umfassen mindestens eine zu einer Schwingung des freien Endabschnitts des Biegeteils führende schwingungsrelevante Bewegung. Während einer schwingungsrelevanten Bewegung wird in mindestens einem Kompensationszeitintervall eine die Schwingungserzeugung vermindernde und/oder eine die Schwingung dämpfende Kompensationsbewegung einer Maschinenachse erzeugt. Die Erfindung betrifft auch eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.



**Fig. 1**

**Beschreibung**Technisches Gebiet

5 **[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung eines Biegeteils durch zwei- oder dreidimensionales Biegen eines langgestreckten Werkstücks, insbesondere eines Drahtes oder eines Rohres, gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 sowie auf eine zur Durchführung des Verfahrens geeignete Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 11.

10 Beschreibung des Standes der Technik

**[0002]** Bei der automatisierten Herstellung von zwei- oder mehrdimensional gebogenen Biegeteilen mit Hilfe numerisch gesteuerter Biegemaschinen werden die Bewegungen von Maschinenachsen einer Biegemaschine mit Hilfe einer Steuereinrichtung koordiniert angesteuert, um an dem Werkstück, beispielsweise einem Draht, einem Rohr, einer Leitung oder einem Stab, durch plastisches Umformen eine oder mehrere bleibende Biegungen zu erzeugen. In einem Biegeprozess wird dabei mindestens ein Abschnitt des Werkstücks durch eine oder mehrere Zufuhroperationen, wie Einziehen, Positionieren und/oder Orientieren, in eine Ausgangsstellung im Eingriffsbereich eines Biegewerkzeugs bewegt und mit Hilfe des Biegewerkzeugs in mindestens einer Biegeoperation durch Biegen umgeformt.

15 **[0003]** Wenn in einer Biegeoperation eine Biegung hergestellt wird, wird das freie Ende des Biegeteils, welches gegebenenfalls bereits ein- oder mehrfach gebogen ist, um ein Teil des Biegewerkzeugs, beispielsweise einen feststehenden Biegedorn, herumgeführt. Insbesondere bei der Biegeoperation, ggf. aber auch bei der Positionierung des Werkstücks und/oder bei einem Wechsel der Biegeebene, kann der freie Endabschnitt des Werkstücks Bewegungen und Beschleunigungen ausgesetzt sein, die zu Schwingungen des freien Endabschnitts führen können. Dieser Effekt der Erzeugung von Schwingungsbewegungen freier Werkstückabschnitte im Biegeprozess wird gelegentlich als "Peitscheneffekt" bezeichnet.

20 **[0004]** Der Peitscheneffekt wirkt sich in der Regel negativ auf die Stückleistung aus. Durch Schwingungsbewegungen kann es sogar zu unerwünschten plastischen Verformungen am Biegeteil kommen. Die Größe, die Länge und damit die Masse bzw. die Massenträgheit des Werkstücks sowie seine Steifigkeit haben dabei entscheidenden Einfluss auf das Ausmaß und die Art der unerwünschten Schwingungsbewegungen.

30 **[0005]** Wenn Probleme mit Schwingungen des Biegeteils auftreten oder erwartet werden, werden in der Regel die Geschwindigkeiten und/oder die Beschleunigungen der Maschinenachsen bei schwingungskritischen Bewegungen so weit reduziert, dass Schwingungen nur noch in einem nicht störenden Ausmaß oder idealer Weise gar nicht mehr auftreten. Diese Art der Ursachenbegrenzung wirkt sich jedoch nachteilig auf die Stückleistung aus, da das Teil langsamer gebogen wird. Alternativ oder zusätzlich werden teilweise Beruhigungszeiten zwischen den einzelnen Bewegungen programmiert, so dass die Schwingungen des bereits fertig gestellten Abschnitts des Biegeteils bis auf einen akzeptablen Wert abklingen können, bevor ein nachfolgender Arbeitsschritt des Fertigungsprozesses ausgeführt wird. Diese Möglichkeiten zur Beeinflussung des Schwingungsverhaltens basieren auf dem Wissen und Können des Anwenders und setzen sehr erfahrene Maschinenbediener voraus. In jedem Fall wird die Stückleistung der Biegemaschine durch diese Maßnahmen begrenzt, wodurch letztendlich die Herstellungskosten der Biegeteile steigen.

35 **[0006]** Weiterhin werden häufig Tischplatten oder andere Stützelemente eingesetzt, um die Freiheitsgrade der Schwingungen zu begrenzen und/oder durch Reibung zu dämpfen. Solche Maßnahmen erfordern jedoch einen mechanischen Zusatzaufwand und schränken den Biegefreiraum oft unerwünscht ein. Außerdem handelt es sich häufig um biegeteil-spezifische Lösungen, die für jedes Biegeteil oder für eine Gruppe von Biegeteilen neu entwickelt werden müssen. Auch hierdurch steigen die Herstellungskosten der Biegeteile.

45 ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0007]** Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung von Biegeteilen bereitzustellen, bei denen der nachteilige Einfluss von Schwingungsbewegungen am Biegeteil gegenüber herkömmlichen Verfahren und Vorrichtungen erheblich reduziert ist. Insbesondere soll die Stückleistung von Biegemaschinen bzw. des Biegeprozessen erhöht werden.

50 **[0008]** Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1 sowie eine Vorrichtung mit den Merkmalen von Anspruch 11 bereit. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

55 **[0009]** Zur Herstellung des Biegeteils wird eine numerisch gesteuerte Vorrichtung verwendet, die mehrere Maschinenachsen hat, deren Bewegungen mit Hilfe einer computergestützten Steuereinrichtung gesteuert werden. Solche Vorrichtungen werden in dieser Anmeldung auch als CNC-Biegemaschinen bzw. einfach als Biegemaschinen bezeichnet. Zu einer Maschinenachse gehört mindestens ein Antrieb, z.B. ein elektrischer Motor. Der Antrieb treibt ein beweglich

gelagertes Teil der Maschinenachse an, z.B. einen linear verfahrbaren Schlitten oder ein drehbar gelagertes Teil. Durch koordinierte Ansteuerung der Antriebe bzw. der Bewegungen der Maschinenachsen wird in einem Biegeprozess mindestens ein Abschnitt des Werkstücks durch eine oder mehrere Zufuhroperationen in eine Ausgangsstellung im Eingriffsbereich eines Biegewerkzeugs bewegt und mit Hilfe des Biegewerkzeugs in mindestens einer Biegeoperation durch Biegen umgeformt. Zu den Zufuhroperationen gehören insbesondere das Einziehen, das Positionieren und das Orientieren des Werkstücks. Dabei steht der Begriff "Einziehen" hier für eine lineare Zufuhrbewegung des Werkstücks parallel zur Längsachse eines unverbogenen Werkstückabschnitts, z.B. um diesen in Richtung Biegewerkzeug zu fördern. Das "Positionieren" wird in der Regel ebenfalls mit Hilfe linearer Maschinenachsen erreicht, welche Bewegungen des Werkstücks quer, insbesondere senkrecht zur Längsachse des noch unverbogenen Werkstückabschnitts beinhalten. Beim "Orientieren" wird das Werkstück üblicherweise um die Längsachse des eingespannten, noch nicht verbogenen Werkstückabschnitts gedreht, so dass die zugehörige Maschinenachse eine Drehachse (Rotationsachse) ist. Drehbewegungen beim Orientieren werden insbesondere genutzt, um bei einem bereits mindestens einmal gebogenen Biegeteil einen Wechsel der Biegeebene herbeizuführen.

**[0010]** Nachdem das Werkstück durch eine oder mehrere Zufuhroperationen in eine Ausgangsstellung im Eingriffsbereich eines Biegewerkzeugs bewegt wurde, wird es mit Hilfe des Biegewerkzeugs in mindestens einer Biegeoperation durch Biegen umgeformt. Bei der Biegeoperation wird typischerweise mindestens eine Rotationsachse der Biegemaschine angetrieben, um beispielsweise einen Biegestift relativ zu einem feststehenden Biegedorn zu verdrehen und dadurch an einem zwischen Biegestift und Biegedorn liegenden Werkstückabschnitt eine Biegung mit vorgebbarem Biegeradius und Biegewinkel zu erzeugen.

**[0011]** Jede Bewegung einer Maschinenachse wird gemäß einem Bewegungsprofil durchgeführt, das durch die Steuereinrichtung auf Basis eines Computerprogramms vorgegeben wird. Der Antrieb der Maschinenachse wird hierzu entsprechend angesteuert bzw. mit Leistung versorgt. Das Bewegungsprofil kann beispielsweise durch den bei der Bewegung zurückgelegten Weg oder Winkel, die Geschwindigkeit und/oder die Beschleunigung der Bewegung jeweils als Funktion der Zeit oder anderer Parameter charakterisiert werden. Die Parameter für die Bewegungsprofile richten sich nach Art und Größe des herzustellenden Biegeteils und können beispielsweise bei der Einrichtung der Biegemaschine für einen Biegeprozess durch einen Maschinenbediener in eine Eingaberoutine anhand geeigneter Eingabeparameter eingegeben werden. Bei manchen Vorrichtungen können z.B. die Größe der Geschwindigkeit und der Beschleunigung von Bewegungen bzw. Bewegungsabschnitten vorgegeben werden. Manchmal kann auch zwischen verschiedenen Beschleunigungsverläufen für eine Beschleunigungsphase gewählt werden.

**[0012]** In der Regel führen viele der bei einem Biegeprozess koordiniert ablaufenden Bewegungen von Maschinenachsen aufgrund der Massenträgheit zu Schwingungen des über die Einspannung hinausragenden freien Endabschnitts des Biegeteils, vor allem dann, wenn dieser bereits einfach oder mehrfach gebogen ist oder ohne Biegung eine große freie Länge besitzt. Diejenigen Bewegungen von Maschinenachsen der Biegemaschine, welche zu einer den Biegeprozess eventuell störenden Schwingungsbewegung des freien Abschnitts eines Biegeteils führen können, werden hier als "schwingungsrelevante Bewegungen" bezeichnet.

**[0013]** Eine Besonderheit des Verfahrens besteht nun darin, dass während einer solchen schwingungsrelevanten Bewegung einer Maschinenachse in mindestens einem Kompensationszeitintervall eine Kompensationsbewegung der Maschinenachse erzeugt wird, die die Schwingungserzeugung vermindert und/oder die dazu geeignet ist, Schwingungsenergie aus einer bereits angeregte Schwingung abzuziehen bzw. abzuleiten. Die Bewegungsprofile von schwingungsrelevanten Bewegungen werden dabei im Vergleich zu entsprechenden Bewegungsprofilen herkömmlicher Verfahren gezielt so modifiziert, dass Schwingungen von störendem Ausmaß von vornherein unterdrückt werden und/oder dass die Amplitude entstandener Schwingungen durch Schwingungsenergieentzug so stark reduziert wird, dass unvermeidliche Restschwingungen so geringfügig sind, dass der Biegeprozess dadurch praktisch nicht beeinträchtigt wird. Der Entzug von Schwingungsenergie mit der Folge der Amplitudenreduzierung wird in dieser Anmeldung auch als "Dämpfung" der Schwingung bezeichnet.

**[0014]** Durch die Vermeidung und/oder Reduzierung von Schwingungen mit Hilfe optimierter Bewegungsabläufe mindestens einer Maschinenachse können Beruhigungszeiten im Vergleich zu konventionellen Verfahren völlig vermieden oder jedenfalls erheblich reduziert werden, wodurch z.B. ein schnelleres Einfädeln des Werkstücks in das Biegewerkzeug möglich wird. Hierdurch kann die Stückleistung des Biegeprozesses erheblich erhöht werden. Zudem können Geschwindigkeiten und Beschleunigungen schwingungsrelevanter Bewegungen gegenüber herkömmlichen Verfahren erhöht werden, so dass z.B. eine Biegeoperation schneller als bisher ablaufen kann, ohne durch Biegeteilschwingungen beeinträchtigt zu werden. Zur Erzielung dieser Vorteile ist kein mechanischer Zusatzaufwand erforderlich. Die Optimierung des Biegeprozesses ist zudem unabhängig von der Geometrie des Biegeteils, da die entsprechenden Schwingungsreduzierungsmaßnahmen und/oder Schwingungsunterdrückungsmaßnahmen nach Eingabe der Biegeteilparameter auf Ebene der Steuerungssoftware der Steuereinrichtung, gegebenenfalls automatisch, halbautomatisch oder manuell aufgrund der Erfahrung des BEdieners umgesetzt werden können.

**[0015]** Ein Kompensationszeitintervall ist ein Zeitintervall, in welchem mindestens eine Maschinenachse eine speziell auf die Vermeidung und/oder Reduzierung von Schwingungsbewegungen des Biegeteils optimierte Kompensationsbe-

wegung ausführt, wobei diese Kompensationsbewegung vorzugsweise ungleichförmig ist. Ein Kompensationszeitintervall kann sich über die gesamte Zeit zwischen dem Anfangspunkt und dem Endpunkt einer Bewegung erstrecken. Die gesamte Bewegung kann dann nach einem schwingungsoptimierten Bewegungsgesetz ablaufen. Es ist auch möglich, dass ein Teil der Bewegung, z.B. deren Anfangsphase, ohne Rücksicht auf Schwingungserzeugung und/oder Schwingungsenergieentzug durchgeführt wird, und dass sich ein Kompensationszeitintervall nur über einen Teil der Gesamtzeit zwischen Anfangspunkt und Endpunkt der Bewegung erstreckt, z.B. über weniger als 50% oder weniger als 30% der Gesamtzeit. Der Anfangspunkt und der Endpunkt einer Bewegung sind in der Regel jeweils Rastpunkte bzw. Stillstandspunkte der Bewegung (Bewegungsgeschwindigkeit gleich null).

**[0016]** Bei manchen Ausführungsformen werden die Schwingungen des freien Endabschnittes des Werkstücks durch gezielte Vorgaben für den Geschwindigkeitsverlauf für eine oder mehrere relevante Maschinenachsen der Vorrichtung innerhalb eines Kompensationszeitintervalls durch gezieltes Entziehen bzw. Ableiten von Schwingungsenergie hinsichtlich ihrer Schwingungsamplitude reduziert bzw. gedämpft. Der Schwingungsenergieentzug kann so stark sein, dass die Schwingungsamplitude innerhalb einer Zeitdauer von weniger als einer Schwingungsperiode, insbesondere innerhalb einer Zeitdauer von weniger als einer halben Schwingungsperiode, durch den Energieentzug auf weniger als 50% oder weniger als 30% oder weniger als 20% des vor Beginn des Energieentzuges vorliegenden Ausgangswertes reduziert.

**[0017]** Bei einer Ausführungsform wird mindestens eine bei einer schwingungsrelevanten Bewegung aktive Maschinenachse so gesteuert, dass zu Beginn des Kompensationszeitintervalls eine positive oder negative Beschleunigung, d.h. eine Geschwindigkeitsänderung der Maschinenachse derart erzeugt wird, dass sich eine Verringerung einer Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der momentanen Bewegungsgeschwindigkeit der Maschinenachse und der korrespondierenden momentanen Bewegungsgeschwindigkeit des schwingenden freien Endabschnitts des Werkstücks im Vergleich zur Geschwindigkeitsdifferenz ohne die Kompensationsbewegung ergibt. Es findet also aufgrund der Kompensationsbewegung eine Annäherung der Bewegungsgeschwindigkeiten von Maschinenachse und schwingenden Werkstückabschnitt statt. Diese Annäherung der Bewegungsgeschwindigkeiten entspricht einer Verringerung der Relativbeschleunigung bzw. einer Differenzbeschleunigung zwischen der Maschinenachse und dem freien Endabschnitt. Dadurch kann je nach zeitlicher Lage des Beginns der kompensierenden Beschleunigung in Bezug auf die Phase bzw. den zeitlichen Verlauf der Schwingungsbewegung potentielle und/oder kinetische Energie aus dem schwingenden Werkstück abgezogen werden.

**[0018]** Es gibt mehrere Möglichkeiten, denjenigen Zeitpunkt zu legen, bei dem eine wirksam kompensierende Beschleunigung beginnen kann. Eine Betrachtung der Erscheinungsformen von Schwingungsenergie während einer Schwingung ist hier hilfreich.

**[0019]** In einem Zeitpunkt maximaler Auslenkung einer Schwingungsbewegung (bzw. einer Komponente der Schwingungsbewegung) ist die gesamte Schwingungsenergie der Schwingungsbewegung (bzw. der entsprechenden Komponente) in Form von potentieller Energie (Federenergie, elastische Energie) im freien Endabschnitt des Biegeteils gespeichert. Danach wird sie freigesetzt, wandelt sich zunehmend in kinetische Energie um und hält die Schwingung in Gang. In einem dem Zeitpunkt maximaler Auslenkung unmittelbar nachfolgenden Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit, d.h. nach einer Viertel der Schwingungsperiode, bewegt sich der schwingende Endabschnitt des Biegeteils durch die Null-Lage bzw. Ruhelage der Schwingungsbewegung. Zu diesem Zeitpunkt hat sich die elastische Verformung des freien Endabschnitts idealer Weise völlig abgebaut, so dass die gesamte Schwingungsenergie in Form von kinetischer Energie vorliegt. Nach Durchtritt durch die Null-Lage bewegt sich der freie Endabschnitt in Richtung maximaler Auslenkung in die andere Schwingungsrichtung und es wird durch elastische Verformung des freien Endabschnitts wieder Federenergie (potentielle Energie) aufgebaut.

**[0020]** Wird nun der Beginn des Kompensationszeitintervalls möglichst nahe zum Zeitpunkt maximaler Auslenkung der Schwingungsbewegung gelegt, so kann vor allem die im elastisch deformierten Biegeteilabschnitt in Form von potentieller Energie gespeicherte Schwingungsenergie mit Hilfe der Kompensationsbewegung aus dem schwingenden Abschnitt des Biegeteils abgeführt werden. Wird dagegen der Beginn des Kompensationszeitintervalls möglichst nahe zu einem Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit (Durchgang durch die Null-Lage) der Schwingungsbewegung gelegt, so kann vor allem in Form von kinetischer Energie vorliegende Schwingungsenergie mit Hilfe der Kompensationsbewegung aus dem schwingenden Abschnitt des Biegeteils abgeführt werden. In der Regel werden Mischformen vorliegen, so dass sowohl kinetische als auch potentielle Energie durch die Kompensationsbewegung abgebaut wird.

**[0021]** Bei manchen Ausführungsformen wird mindestens eine bei einer schwingungsrelevanten Bewegung aktive Maschinenachse so gesteuert, dass ein Beginn eines Kompensationszeitintervalls bezogen auf den zeitlichen Verlauf der Schwingungsbewegung innerhalb eines ersten Zeitintervalls zwischen einem Zeitpunkt maximaler Auslenkung der Schwingungsbewegung und dem unmittelbar nachfolgenden Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit liegt. Zu jeder Schwingungsperiode gehören zwei erste Zeitintervalle. In einem ersten Zeitintervall vergrößert sich der Betrag der Geschwindigkeitsdifferenz ausgehend von null (zum Zeitpunkt maximaler Auslenkung) zu einem größeren Wert zum Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit. Eine kompensierende Beschleunigung der Maschinenachse, die möglichst früh nach einem Zeitpunkt maximaler Auslenkung einsetzt, kann dazu genutzt werden, den Aufbau einer

kritisch großen Geschwindigkeitsdifferenz zu verhindern. Sanfte Beschleunigungen können dabei große dämpfende Wirkung entfalten.

**[0022]** Alternativ oder zusätzlich kann vorgesehen sein, dass mindestens eine bei einer schwingungsrelevanten Bewegung aktive Maschinenachse so gesteuert wird, dass ein Beginn eines Kompensationszeitintervalls bezogen auf den zeitlichen Verlauf der Schwingungsbewegung innerhalb eines zweiten Zeitintervalls zwischen einem Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit und dem unmittelbar nachfolgenden Zeitpunkt maximaler Auslenkung der Schwingungsbewegung liegt. Wenn die kompensierende Beschleunigung der Maschinenachse möglichst früh nach einem Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit einsetzt, kann erreicht werden, dass überwiegend in Form von kinetischer Energie vorliegende Schwingungsenergie entzogen wird.

**[0023]** Von mehreren möglichen Lagen des Beginns einer Kompensationsbewegung wird häufig diejenige gewählt, bei der der freie Endabschnitt in Rückwärtsrichtung, also entgegen der Bewegungsrichtung der Maschinenachse schwingt oder schwingen will. In diesem Fall wird die Kompensationsbewegung der Maschinenachse mit einer Phase negativer Beschleunigung, also mit einer Reduzierung der Bewegungsgeschwindigkeit bzw. einer Abbremsbewegung beginnen. Beispielsweise kann ein erstes Zeitintervall so gewählt werden, dass die maximale Auslenkung der Schwingungsbewegung, die den Anfang des ersten Zeitintervalls definiert, eine maximale Auslenkung in Vorwärtsrichtung der Bewegung der Maschinenachse ist. Dann schwingt nämlich das Biegeteil im ersten Zeitintervall in Rückwärtsrichtung.

**[0024]** Kompensationsbewegungen mit negativer Beschleunigung, d.h. Abbremsbewegungen der Maschinenachse, können besonders in der Endphase einer Maschinenachsenbewegung, d.h. zeitlich kurz vor Erreichen des Endpunktes der Bewegung nützlich sein. Die Abbremsbewegung kann dann so ausgelegt werden, dass die Maschinenachse nach der kompensierenden Abbremsbewegung nicht mehr schneller bewegt wird, sondern ihren Rastpunkt (Stillstand der Bewegung der Maschinenachse) ohne nochmalige substantielle positive Beschleunigung unmittelbar anstrebt.

**[0025]** Eine Ableitung von Schwingungsenergie aus dem Biegeteil ist jedoch auch in einer Phase einer Vorwärtsschwingung des Biegeteils möglich, in welcher sich der schwingende Abschnitt des Werkstücks schneller als die Maschinenachse bewegt. Ein Entzug von Schwingungsenergie ist dann durch positive Beschleunigung der Maschinenachse möglich. Dies kann z.B. in Bewegungsphasen vorteilhaft sein, in denen die Bewegung der Maschinenachse ohnehin schneller wird, etwa in der Anfangsphase einer Biegeoperation.

**[0026]** Das Kompensationszeitintervall kann also mit einer Geschwindigkeitserhöhung, also mit positiver Beschleunigung, oder mit einer Verzögerung, d.h. mit negativer Beschleunigung, beginnen, wobei die Art der Beschleunigung (positiv oder negativ) dem Schwingungsverlauf des Biegeteiles so angepasst sein sollte, dass sich gleich zu Beginn des Kompensationszeitintervalls eine Verringerung der Beschleunigungsdifferenz ergibt.

**[0027]** Eine Kompensationsbewegung kann die Form einer Gegenschwingung annehmen, bei der sich Phasen mit positiver und Phasen mit negativer Beschleunigung der Maschinenachse einmal oder mehrfach abwechseln, um beispielsweise einen annähernd sinusförmigen Beschleunigungsverlauf zu erzeugen. Solche Kompensationsbewegungen können sich über mehr als eine halbe Periodenlänge einer Schwingung, insbesondere über mindestens eine oder mindestens zwei oder mindestens drei oder mehr Periodenlängen erstrecken.

**[0028]** In vielen Fällen tritt eine zu reduzierende Schwingung während einer Biegeoperation auf, bei der das Biegewerkzeug in Eingriff mit dem schwingenden Biegeteil steht und die Biegeachse aktiv ist. Dabei kann die im Biegeteil und/oder in der Bewegung des Biegeteils vorliegende Schwingungsenergie der in der Biegeebene liegenden Schwingungskomponente durch das eine Kompensationsbewegung ausführende Biegewerkzeug abgeführt werden. Die Kompensationsbewegung des Biegewerkzeuges reduziert somit die Schwingungsbewegung aktiv.

**[0029]** Eine Kompensationsbewegung kann grundsätzlich bei allen Maschinenachsen vorgesehen sein, um die Energie einer der Maschinenachse zugeordneten Schwingungskomponente teilweise oder ganz aus dem schwingenden System abzuführen, beispielsweise auch an einer Einzugsachse. Es können ggf. auch mehrere Maschinenachsen gleichzeitig so angesteuert werden, dass Energie aus mehreren Schwingungskomponenten einer komplexeren Schwingungsbewegung (z.B. ebene Schwingung und Torsionsschwingung) abgezogen wird.

**[0030]** Für die Wirksamkeit eines aktiven Entzugs von Schwingungsenergie mittels einer Kompensationsbewegung ist es wichtig, dasjenige Zeitfenster der Schwingungsbewegung zu treffen, in welchem während einer bestimmten Phase der Bewegung die Schwingungsenergie optimal abgeleitet werden kann. Besonders geeignete Zeitintervalle machen jeweils nur ein Viertel einer Schwingungsperiode aus, wobei die absolute Größe des Zeitfensters abhängig von der Schwingungsfrequenz des schwingenden Endabschnittes ist.

**[0031]** Eine besonders kostengünstig umsetzbare, ausreichend präzise, wirksame und ggf. ausschließlich durch geeignete Softwarekomponenten für die Steuerungssoftware realisierbare Verfahrensvariante beruht auf der Berechnung von Eigenfrequenzen des schwingungsfähigen freien Endabschnittes des Werkstücks während des Biegeprozesses. Wenn eine CNC-Biegemaschine für die Durchführung eines Biegeprozesses eingerichtet wird, werden u.a. Eingaben zur Definition der gewünschten Geometrie des fertigen Biegeteils benötigt. Die Biegeteilgeometrie kann z.B. durch strukturierte Eingabe von Geometriedaten (z.B. Angaben über Biegeradien, Biegewinkel und Orientierung der Biegeebene von ebenen Biegungen, die Länge anschließender ungebogener Schenkel, Parameter von ggf. vorgesehenen Wendeln etc. ) online oder offline definiert werden. Zusätzlich werden in der Regel Werkstückdaten eingegeben oder

aus einem Speicher eingelesen, z.B. Daten über Werkstückquerschnitt, Werkstückdurchmesser, Art des Werkstoffes, Dichte des Werkstoffes etc. Aus diesen Daten kann unter anderem die Massenverteilung und das Massenträgheitsmoment des freien Endabschnitts für jede Phase des Biegeprozesses errechnet werden.

**[0032]** Bei einer Verfahrensvariante werden unter Verwendung der Geometriedaten eines Biegeteils und Werkstückdaten Eigenfrequenzen bzw. Eigenfrequenzdaten errechnet, die eine oder mehrerer Eigenfrequenzen des schwingungsfähigen freien Endabschnitts des Werkstücks für eine oder mehrere aufeinanderfolgende Phasen, insbesondere für alle Phasen des Biegeprozesses repräsentieren.

**[0033]** Wird weiterhin für einen definierbaren Referenzzeitpunkt der Schwingung deren Phasenlage vorgegeben oder bestimmt, so kann unter Verwendung der Eigenfrequenzen bzw. von Daten, die die Eigenfrequenz bzw. die Eigenfrequenzen in geeigneter Form repräsentieren, der an diesen Referenzzeitpunkt anschließende Verlauf der Schwingungsbewegung hinsichtlich seiner Phasenlage exakt vorherbestimmt werden. Der definierbare Referenzzeitpunkt kann insbesondere der Zeitpunkt des Beginns einer Beschleunigungsbewegung nach einem Rastpunkt (Stillstand) der Bewegung einer Maschinenachse sein. Bei einer Biegeoperation kann der Referenzzeitpunkt z.B. der Beginn der Beschleunigungsbewegung eines Biegestifts nach einem Anlegen des Biegestifts an das (ggf. noch ruhende oder nur schwach schwingende) Werkstück sein.

**[0034]** Insbesondere kann vorgesehen sein, dass die zeitliche Lage des Beginns eines Kompensationszeitintervalls unter Verwendung von Eigenfrequenzdaten und Daten über die Phasenlage der Schwingung zu einem zeitlich früher liegenden, definierten Referenzzeitpunkt gesteuert wird.

**[0035]** Bei einer anderen Verfahrensvariante werden unter Verwendung geeigneter Geometriedaten eines Biegeprozesses und Werkstückdaten Trägheitsmomentdaten errechnet, die das Massenträgheitsmoment des schwingungsfähigen freien Endabschnitts des Werkstücks für eine oder mehrere aufeinanderfolgende Phasen, insbesondere für alle Phasen des Biegeprozesses repräsentieren, und das Ausmaß von Beschleunigungen bei der Bewegung von Maschinenachsen wird in Abhängigkeit vom Massenträgheitsmoment bzw. der entsprechenden Daten gesteuert. Beispielsweise kann die Beschleunigung automatisch reduziert werden, je größer das Massenträgheitsmoment des schwingungsfähigen freien Endabschnitts ist, um stärkere Schwingungen zu vermeiden.

**[0036]** Bei manchen Ausführungsformen wird ein zeitlicher Verlauf der Schwingungsbewegung mittels eines Schwingungserfassungssystems erfasst, das vorzugsweise mindestens einen Schwingungssensor aufweist, der ein mindestens die Phasenlage und die Frequenz der Schwingung repräsentierendes Schwingungssignal erzeugt. Ein Schwingungssensor ist ein Messsystem, welches Bewegungen (und damit auch Schwingungen) des freien Endabschnitts erfassen und in z.B. elektrisch weiterverarbeitbare Signale umwandeln kann. Damit kann für jedes Biegeteil individuell die Schwingung in Echtzeit überwacht und z.B. die zeitliche Lage von Kompensationsbewegungen optimal an die Schwingungsbewegung angepasst werden.

**[0037]** Die vom Schwingungserfassungssystem erfasste Schwingungsbewegung kann an einer Anzeige der Biegemaschine sichtbar gemacht und von einem Bediener zur Einstellung der Parameter für die Kompensationsbewegung (z.B. zeitliche Lage des Beginns, Bewegungsprofil etc.) genutzt werden. Vorzugsweise wird das Schwingungssignal der Steuereinrichtung zugeführt und die Steuereinrichtung verarbeitet das Schwingungssignal zur Steuerung des Bewegungsprofils einer oder mehrerer Maschinenachsen, so dass diese eine wirksame Kompensationsbewegung ausführen. Die automatisierte Schwingungserfassung erlaubt eine optimale Koordinierung der Kompensationsbewegung mit der tatsächlich am Biegeteil vorhandenen Schwingung, so dass bei jedem Biegeteil einer Serie in jedem Fall eine optimale Schwingungsreduzierung erreicht werden kann. Auf diese Weise kann eine Schwingungskompensationsregelung realisiert werden. Insbesondere kann die Steuereinrichtung so eingerichtet sein, dass mittels des Schwingungssignals die zeitliche Lage des Beginns eines Kompensationszeitintervalls gesteuert wird. Dadurch ist es z.B. möglich, dass automatisch der Zeitpunkt des Beginns einer Abbrems- bzw. Geschwindigkeitssteigerungsbewegung einer Maschinenachse bezogen auf die Phase der Schwingung des Biegeteils optimal getroffen wird, um eine effektive Schwingungsreduktion zu erreichen.

**[0038]** Das Schwingungserfassungssystem kann einen oder mehrere Schwingungssensoren aufweisen. Ein Schwingungssensor kann nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten. Es kann sich beispielsweise um einen optischen Schwingungssensor handeln, der zum Beispiel mit Hilfe eines Lasers die Schwingung des Biegeteils optisch erfasst. Alternativ oder zusätzlich kann ein Kamerasystem mit mindestens einer Zeilen- oder Flächenkamera, ggf. mit angeschlossenem Bildverarbeitungssystem, vorgesehen sein. Gegebenenfalls kann neben der Phasenlage und der Frequenz der Schwingung auch deren Amplitude an einer bestimmten Messstelle am freien Endabschnitt zeitaufgelöst erfasst werden. Es ist auch möglich, mindestens einen induktiven oder kapazitiven Schwingungssensor zu nutzen, um auf elektromagnetischem Wege Schwingungen zu erfassen. Die Auswahl geeigneter Elemente für das Schwingungserfassungssystem sollte berücksichtigen, dass ggf. nicht nur ebene Schwingungen, sondern auch komplexere Schwingungszustände wie Torsionsschwingungen sowie Überlagerungen mehrerer Schwingungskomponenten in unterschiedlichen Richtungen zeitaufgelöst erfasst werden sollten. Ein Schwingungserfassungssystem sollte ggf. in der Lage sein, zweidimensionale und auch dreidimensionale Schwingungsbewegungen zu erfassen und ggf. für mehrere Schwingungskomponenten jeweils spezifische Schwingungssignale zu erzeugen.

**[0039]** Bei manchen Ausführungsformen wird mindestens ein Kraftsensor oder Drehmomentsensor als Schwingungssensor eingesetzt, um die Schwingung bzw. die dabei auftretenden Kräfte zeitaufgelöst zu erfassen. Beispielsweise kann ein Kraftsensor vorgesehen sein, um die am Biegewerkzeug wirksame Biegekraft z.B. zeitaufgelöst und/oder als Funktion des Biegewinkels zu erfassen. An einem Kraftsensor macht sich eine parallel zur Biegerichtung wirksame Schwingungskomponente als periodische Änderung der für den Biegevorgang erforderlichen Kraft bemerkbar, wobei die Kraft relativ gering ist, wenn der freie Abschnitt in Richtung der Biegebewegung (in Vorwärtsrichtung) schwingt und relativ hoch, wenn er entgegen der Biegerichtung (in Rückwärtsrichtung) schwingt.

**[0040]** Analog kann beispielsweise ein Anteil von Torsionsschwingung des freien Endabschnittes durch einen Kraftsensor oder Drehmomentsensor an der Spanneinrichtung (Zange) des Werkstückeinzuges erfasst werden. Auch eine parallel zur Einzugsrichtung wirkende Schwingungskomponente kann mit einem entsprechend ausgelegten Kraftsensor zeitaufgelöst erfasst und zur Überwachung der Schwingung genutzt werden. Gegebenenfalls kann auch die Leistungsaufnahme des zu einer Maschinenachse gehörenden Antriebsmotors überwacht und zur Charakterisierung der Biegeteilschwingung genutzt werden.

**[0041]** Ein einziger Schwingungssensor kann ausreichen, häufig sind auch mehrere Schwingungssensoren vorgesehen, die ggf. eine exaktere Charakterisierung und/oder die Charakterisierung komplexerer Schwingungszustände erlauben.

**[0042]** Die Bewegungsprofile von Bewegungen konventioneller Biegemaschinen zeichnen sich häufig dadurch aus, dass sie einen im Wesentlichen dreieckförmigen oder im Wesentlichen trapezförmigen Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeit haben. Derartige, aus geradlinigen Abschnitten zusammengesetzte Geschwindigkeitsprofile ergeben sich beispielsweise dann, wenn an einer Biegemaschine für eine Maschinenachse nur konstante Beschleunigungen und Maximalgeschwindigkeiten eingegeben werden können, um beispielsweise die Drehbewegung eines Biegewerkzeuges vorzugeben. Bei manchen Biegemaschinen können auch bestimmte Beschleunigungsrampen mit ungleichförmiger Geschwindigkeitsänderung vorgegeben werden. Beispielsweise kann beim Anfahren mit geringer Beschleunigung begonnen werden, um danach die Beschleunigung allmählich zu steigern.

**[0043]** Demgegenüber zeichnen sich Bewegungsprofile von Bewegungen mit aktiver Schwingungskompensation häufig dadurch aus, dass im Kompensationszeitintervall mindestens ein Wechsel zwischen einer Phase mit negativer Beschleunigung, einer nachfolgenden Phase mit positiver Beschleunigung und einer nachfolgenden Phase mit negativer Beschleunigung erzeugt wird. Diese Phasen gehen vorzugsweise kontinuierlich, d.h. ohne abrupten Wechsel zwischen Geschwindigkeitssteigerung und Geschwindigkeitsreduzierung ineinander über, so dass sich im Kompensationszeitintervall beispielsweise ein annähernd sinusförmiger Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeit mit mehrfachem Wechsel zwischen positiver und negativer Beschleunigung ergeben kann.

**[0044]** Häufig ist es vorteilhaft, wenn bei einer solchen durch Ansteuerung einer Maschinenachse erzeugten "Gegenschwingung" die Amplitude der Gegenschwingung allmählich abnimmt. Dadurch kann Schwingungsenergie sukzessive aus dem mit immer geringerer Amplitude schwingenden Endabschnitt abgezogen werden und es kann vermieden werden, dass die Gegenschwingung selbst eine unerwünschte Biegeteilschwingung anregt. Durch frühzeitiges Entgegenwirken können größere Amplituden ggf. verhindert werden.

**[0045]** Bei manchen Ausführungsformen schließt sich ein Kompensationszeitintervall an eine Phase mit konstanter Geschwindigkeit oder konstanter Beschleunigung der Maschinenachse an. Das Kompensationszeitintervall kann z.B. dann enden, wenn der für die Maschinenachse vorgesehene Endpunkt der Bewegung erreicht ist, gegebenenfalls aber auch schon vorher. Bei einer Biegeoperation kann dies beispielsweise bedeuten, dass sich zunächst in der Anfangsphase eine Pendelschwingung aufbauen kann, die in der Endphase der Biegeoperation so gedämpft wird, dass der freie Endabschnitt des Biegeteils am Ende der Bewegung nicht mehr oder nur noch unkritisch wenig schwingt, so dass am Ende der Bewegung nicht mehr bis zum Abklingen einer Schwingung gewartet werden muss, sondern ohne Beruhigungszeit oder nur mit kurzer Beruhigungszeit die nachfolgende Operation eingeleitet werden kann.

**[0046]** Häufig hat ein Bewegungsprofil einer schwingungsrelevanten Bewegung zwischen einem Anfangspunkt und einem Endpunkt in dieser Reihenfolge ein Beschleunigungs-Zeitintervall mit wachsender Bewegungsgeschwindigkeit, ggf. ein Konstantfahrt-Zeitintervall mit im Wesentlichen konstanter Bewegungsgeschwindigkeit, und ein Kompensationszeitintervall, in welchem die Bewegungsgeschwindigkeit definiert schwankt und/oder abfällt, um eine Schwingungsdämpfung zu erreichen.

**[0047]** Es ist auch möglich, die Bewegung einer Maschinenachse über die gesamte Bewegung hinweg so zu steuern, dass die Trägheitskräfte, die auf das freie Ende des Biegeteils wirken, von Anfang an so gering gehalten werden, dass die prinzipiell kaum völlig zu vermeidenden Schwingungen des Biegeteils nur eine relativ geringe Amplitude haben und dadurch den Biegeprozess nicht oder nur unerheblich beeinträchtigen. Bei manchen Ausführungsformen werden hierzu die Bewegungen von Maschinenachsen (eine oder mehrere) so gesteuert, dass ein Bewegungsprofil einer schwingungsrelevanten Bewegung zwischen einem Anfangspunkt und einem Endpunkt der Bewegung einem Bewegungsgesetz folgt, welches im Wesentlichen einer mathematisch glatten Funktion entspricht. Unter einer "glatten Funktion" wird hier eine mathematische Funktion verstanden, die stetig differenzierbar ist, also eine stetige Ableitung besitzt. Anschaulich betrachtet hat der Graph einer stetig differenzierbaren (glatten) Funktion keine Ecken oder Knickpunkte, also Stellen,

an der sie nicht differenzierbar ist. Wenn das Bewegungsprofil einer glatten Funktion entspricht, gibt es weder für die Bewegungsgeschwindigkeit noch für die Beschleunigung der Bewegung abrupte Wechsel (Ecken im Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsprofil). Dadurch können vor allem auch ruckfreie Bewegungsgesetze, d.h. Bewegungsgesetze ohne Beschleunigungssprünge, sichergestellt werden. Es hat sich herausgestellt, dass auf diese Weise bei geeigneter Auslegung des Bewegungsprofils die Ausbildung von störenden Schwingungen von Anfang an gering gehalten werden kann.

**[0048]** Bei manchen Ausführungsformen variiert während der gesamten schwingungsoptimierten Bewegung sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung kontinuierlich, so dass das Bewegungsprofil zwischen Anfangspunkt und Endpunkt keine linearen Abschnitte hat. Es ist jedoch auch möglich, einen Teil des Bewegungsprofils mit einem geradlinigen Abschnitt auszuführen. Beispielsweise kann der Bereich um einen Wendepunkt eines glatten Bewegungsprofils einen geradlinigen Abschnitt aufweisen. Das kann z.B. aus programmieretechnischer Sicht günstig sein.

**[0049]** Es hat sich herausgestellt, dass die Schwingungserregung in der Regel dann besonders gut unterdrückt werden kann, wenn eine Maschinenachse nach einem Bewegungsgesetz bewegt wird, welches einen besonders geringen Beschleunigungskennwert (2. Ableitung des Bewegungsgesetzes) hat. Vorteilhaft kann es auch sein, wenn die Bewegung zusätzlich einen besonders geringen Ruckkennwert (3. Ableitung des Bewegungsgesetzes) hat. Das Bewegungsgesetz kann insbesondere durch mindestens eines der folgenden Bewegungsgesetze in guter Näherung beschreibbar sein: ein Polynom n-ten Grades, insbesondere fünften Grades; eine quadratische Parabel; ein modifiziertes Beschleunigungstrapez.

**[0050]** Während die Dämpfung von Schwingungen als auswirkungsbegrenzende Maßnahme verstanden werden kann, kann man diese aktive Unterdrückung des Aufbaus von Schwingungen als ursachenbegrenzende Maßnahme verstehen. Häufig hat eine Kompensationsbewegung sowohl ursachenbegrenzende als auch auswirkungsbegrenzende Anteile.

**[0051]** Die Erfindung bezieht sich auch auf eine Vorrichtung zur Herstellung von Biegeteilen durch zwei- oder dreidimensionales Biegen eines langgestreckten Werkstücks, insbesondere eines Drahtes oder eines Rohres. Die Vorrichtung hat mehrere Maschinenachsen, eine Steuereinrichtung zur koordinierten Ansteuerung von Bewegungen der Maschinenachsen und mindestens ein Biegewerkzeug zur Durchführung einer Biegeoperation an dem Werkstück, wobei Bewegungen von Maschinenachsen gemäß einem durch die Steuereinrichtung vorgebbaren Bewegungsprofil erzeugbar sind. Die Vorrichtung zeichnet sich dadurch aus, dass sie dafür eingerichtet ist, während einer schwingungsrelevanten Bewegung in mindestens einem Kompensationszeitintervall eine die Schwingungserzeugung verminderte und/oder eine Schwingungsenergie aus einer angeregten Schwingung abziehende Kompensationsbewegung zu erzeugen.

**[0052]** Der Begriff "Biegemaschine" ist im Rahmen dieser Anmeldung weit zu interpretieren in dem Sinne, dass die hergestellten Werkstücke eine oder mehrere Biegungen aufweisen. Biegungen können auf unterschiedliche Weise erzeugt werden. Neben Biegemaschinen, die hauptsächlich biegen, umfasst der Begriff z.B. auch Schenkelfedermaschinen, die unterschiedliche Operationen wie Biegen, Winden, Wickeln, Erzeugen von Schenkeln etc. durchführen können. Die Biegeteile können komplexe Geometrien mit Federabschnitten, Schenkeln und Biegungen aufweisen.

**[0053]** Bei manchen Ausführungsformen werden die Charakteristika der Kompensationsbewegung (z.B. der Bewegungsverlauf, die zeitliche Lage des Beginns einer ungleichförmigen Kompensationsbewegung, Beschleunigungsverlauf etc.) anhand der von der Maschinensoftware rechnerisch ermittelten Eigenfrequenzen der Schwingungen des Biegeteils und Randbedingungen wie Auflage, Reibung, Orientierung etc. für jede Bewegung einer Maschinenachse individuell errechnet. Der Bediener muss also nur einige für das Biegeteil charakteristische Eingaben durchführen. Hierzu gehören z.B. Biegelängen, Biegewinkel, Geradenlängen, Biegeebenen, und andere Geometriedaten sowie Werkstückdaten, z.B. zum Werkstoff, zum Werkstückquerschnitt bzw. -durchmesser und zur Dichte des Werkstücks. Anhand des Materialquerschnitts kann z.B. einfach zwischen drahtförmigen und rohrförmigen Werkstücken unterschieden werden. Die Angabe der Dichte erlaubt eine Berechnung des Trägheitsmoments und damit der Eigenfrequenzen des freien Biegeteilabschnitts.

**[0054]** Bei manchen modernen Biegemaschinen, insbesondere bei solchen mit geregelten Maschinenachsen und Servoantrieben, kann die Erfindung mit den bereits vorhandenen Antrieben und Steuerungen umgesetzt werden. Die Fähigkeit zur Ausführung von Ausführungsformen der Erfindung kann in Form zusätzlicher Programmteile oder Programmmodule in die Steuerungssoftware von computergestützten Steuereinrichtungen implementiert werden.

**[0055]** Daher betrifft ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung ein Computerprogrammprodukt, welches insbesondere auf einem computerlesbaren Medium gespeichert oder als Signal verwirklicht ist, wobei das Computerprogrammprodukt, wenn es in den Speicher eines geeigneten Computers geladen und von einem Computer ausgeführt ist bewirkt, dass der Computer ein Verfahren gemäß der Erfindung bzw. einer bevorzugten Ausführungsform hiervon durchführt.

**[0056]** Diese und weitere Merkmale gehen außer den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich allein oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können. Ausführungsbeispiele sind in den Zeichnungen dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.



## KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

### [0057]

- 5 Fig. 1 zeigt eine Draufsicht auf eine Biegeeinheit einer Einkopfbiegemaschine in schematischer Darstellung;
- Fig. 2 zeigt eine schematische Seitenansicht der Biegeeinheit mit Antrieben für die Maschinenachsen sowie Einrichtungen zur Steuerung und Bedienung der Biegemaschine;
- 10 Fig. 3 zeigt eine Draufsicht auf ein bereits mehrfach gebogenes Werkstück;
- Fig. 4 zeigt schematisch Bewegungen eines zu verbiegenden Werkstücks in verschiedenen Phasen einer Biegeoperation;
- 15 Fig. 5 ist ein Diagramm, welches den Biegewinkel eines Biegestiftes und die Amplitude einer erzeugten Schwingungsbewegung in gemeinsamer Darstellung zeigt;
- Fig. 6 zeigt ein mehrteiliges Diagramm, in dem verschiedene die Schwingung charakterisierende Parameter in Abhängigkeit von der Zeit schematisch dargestellt sind;
- 20 Fig. 7 zeigt ein Messdiagramm eines ersten Versuches einer Biegeoperation mit aktiver Dämpfung der Schwingungsbewegung;
- Fig. 8 zeigt Messdiagramme eines zweiten Versuches einer Biegeoperation mit aktiver Dämpfung der Schwingungsbewegung;
- 25 Fig. 9 zeigt ein Messprotokoll eines Versuches mit zweimaligem Dämpfen;
- Fig. 10 zeigt ein Messprotokoll einer Biegeoperation, bei der die gleichförmige Hauptbewegung der Biegeachse mit einer kleinen, im Wesentlichen sinusförmigen Kompensationsbewegung überlagert ist, die der Schwingung des Biegeteils entgegenwirkt; und
- 30 Fig. 11 zeigt eine Vergleichsübersicht der Wegfunktionen verschiedener Bewegungsgesetze des Biegestiftes bei einer Biegeoperation.

## DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

- [0058] Beim Biegen unterscheidet man unterschiedliche Typen von Biegemaschinen und Biegeverfahren. Häufig sind bekannte computernumerisch gesteuerte Biegemaschinen für Rohr oder Draht für das Ziehbiegeverfahren oder das Abrollbiegeverfahren ausgelegt. Die folgenden Ausführungsbeispiele beziehen sich auf Varianten eines Abrollbiegeverfahrens beim Drahtbiegen mit Hilfe einer als Biegemaschine bezeichneten Vorrichtung zur Herstellung eines Biegeteils.
- 40 [0059] Biegemaschinen unterteilt man grundsätzlich in Einkopfbiegemaschinen und Zweikopfbiegemaschinen, wobei bei beiden Maschinentypen entweder der Biegekopf oder das Werkstück gedreht wird. Ebenso ist entweder das Werkstück oder der Biegekopf senkrecht und parallel zur Werkstückachse positionierbar. Der Begriff "Werkstückachse" bezeichnet hier die Längsachse des langgestreckten Werkstücks unmittelbar am Werkstückeinzug beziehungsweise an einer Zufuhreinheit, also dort, wo das Werkstück eingespannt ist und noch nicht gebogen wurde.
- 45 [0060] Jede Bewegung des Werkstücks kann schwingungskritisch bzw. schwingungsrelevant sein und sollte daher in der Produktionsplanung berücksichtigt werden. Zu den Werkstückbewegungen zählen vor allem der Werkstückvorschub d. h. die Bewegung des Werkstücks parallel zur Werkstückachse, die Werkstückdrehung, d. h. die Drehung des Werkstücks um die Werkstückachse, das Biegen des Werkstücks um eine zur Werkstückachse senkrechte Achse (Biegungsachse) und das Positionieren des Werkstücks durch lineare Translationsbewegungen senkrecht zur Werkstückachse. Außerdem könnte das Zuführen des Rohteils und das Abgeben oder das Übergeben des Werkstücks an eine weitere Bearbeitungsstation schwingungskritisch sein.
- 50 [0061] Einige Aspekte der Schwingungsproblematik werden im Folgenden an Hand des Beispiels einer Einkopfbiegemaschine erläutert, bei der zum Biegen des Drahtes ein Biegekopf relativ zu einem durch eine Zufuhreinheit festgehalten Werkstück (Draht) gedreht wird. Der Biegekopf ist in Richtungen senkrecht zur Werkstückachse positionierbar, die Positionierung in Werkstückachsrichtung wird durch Bewegungen der Zufuhreinheit parallel zur Werkstückachse erreicht.

**[0062]** In Fig. 1 ist eine Draufsicht auf eine Biegeeinheit 100 einer Einkopfbiegemaschine in schematischer Darstellung gezeigt. Figur 2 zeigt eine schematische Seitenansicht der Biegeeinheit mit den zugehörigen Antrieben für die Maschinenachsen sowie Einrichtungen zur Steuerung und Bedienung der Biegemaschine. Die Biegeeinheit hat eine Zufuhreinheit 110, welche der Zufuhr eines noch unverbogenen Werkstücks 120 in den Eingriffsbereich eines Biegewerkzeugs 130 dient, das im Folgenden auch als Biegekopf bezeichnet wird. Die Zufuhreinheit kann beispielsweise einen Greifer oder eine Zange haben oder Vorschubwalzen aufweisen, die einen noch unverbogenen Abschnitt des von einem Werkstückvorrat (z.B. Drahtcoil, Haspel) kommenden und durch eine zwischengeschaltete Richteinheit geführten Werkstücks in Richtung Biegewerkzeug fördert. Durch die Zufuhreinheit werden die Lage und die Orientierung der Werkstückachse 125 des noch unverbogenen Werkstücks festgelegt.

**[0063]** Der als Biegewerkzeug dienende Biegekopf 130 hat einen um eine Zentralachse ZA drehbaren Dornteller 132, an dessen Oberseite zwei mit gegenseitigem Abstand zueinander angeordnet Biegedorne 134, 136 angeordnet sind, sowie einen mit radialem Abstand zur Zentralachse ZA angeordneten Biegestift 138, der um die Zentralachse des Dorntellers 132 schwenkbar ist.

**[0064]** Das Biegewerkzeug (Biegekopf 130) und das Werkstück 125 beziehungsweise die Zufuhreinheit 110 können zueinander beliebig positioniert und orientiert werden. Dazu sind im Allgemeinen meist drei zueinander senkrechte lineare Maschinenachsen sowie eine Drehachse (um die Werkstückachse 125) vorgesehen. Diese Maschinenachsen können am Biegekopf 130 oder an der Zufuhreinheit 110 vorgesehen sein. Meist wird eine Kombination von Werkstückpositionierung und Biegekopfpositionierung eingesetzt. Der Biegekopf ist normalerweise mit zwei oder drei Drehachsen ausgerüstet und kann um eine zur Werkstückachse parallele Achse verschiebbar sein.

**[0065]** Beim Ausführungsbeispiel hat die Biegemaschine ein mit Kleinbuchstaben x, y und z gekennzeichnetes rechtwinkliges Maschinenkoordinatensystem MK mit einer vertikalen z-Achse und horizontalen x- und y-Achsen, wobei die x-Achse parallel zur Werkstückachse 125 verläuft. Von den Koordinatenachsen sind die geregelt angetriebenen Maschinenachsen zu unterscheiden, die jeweils mit Großbuchstaben (z.B. A, B, C, W, Z) bezeichnet werden.

**[0066]** Der Biegekopf 130 in zwei zueinander senkrechten Richtungen senkrecht zur Werkstückachse 125 linear positionierbar und das Werkstück 125 ist um seine Werkstückachse drehbar und in Axialrichtung positionierbar. Eine übliche Bezeichnung der Maschinenachsen wird an Hand von Fig. 2 erläutert. Die Zufuhreinheit 110 (manchmal als Zangenvorschub ausgeführt) ist mit Hilfe einer linearen C-Achse (manchmal als Zangenvorschub bezeichnet) parallel zur Werkstückachse (und damit parallel zur x-Achse) geradlinig verfahrbar. Der Antrieb hierzu erfolgt mit Hilfe eines Servomotors MC. Mit Hilfe der A-Achse (Werkstückdrehachse) ist eine (theoretisch) unbegrenzte Drehung des Werkstücks um die Werkstückachse 125 möglich, wobei hier als Antrieb ein Servomotor MA dient. Die anderen Maschinenachsen sind dem Biegewerkzeug 130 zugeordnet. Der Biegekopf 130 ist mit Hilfe eines Servomotors MW der W-Achse um die (parallel zur z-Achse des Maschinenkoordinatensystems verlaufende) Zentralachse ZA unbegrenzt verdrehbar. Der Biegestift 138 kann mit Hilfe eines Servomotors MY der Y-Achse um die Zentralachse ZA des Biegekopfes unbegrenzt verschwenkt werden. Die Zentralachse ZA definiert dabei der Mittelpunkt der Biegung und wird daher auch als Biegungsachse bezeichnet. Das Biegewerkzeug kann als Ganzes in zwei Richtungen senkrecht zur Werkstückachse linear verfahren werden, nämlich mittels einer parallel zur Zentralachse ZA verlaufenden Z-Achse mit Hilfe eines Motors MZ und mittels einer senkrecht zur Z-Achse verlaufenden B-Achse (nicht gezeigt) mit Hilfe eines (nicht dargestellten) Motors. Die Motoren für Linearbewegungen können jeweils Servomotoren oder elektrische Linearantriebe (Direktantriebe) sein.

**[0067]** Die Drehachse der Biegebewegung verläuft im Beispielsfall in vertikaler Richtung, so dass die B-Achse der horizontalen Positionierung und die Z-Achse der vertikalen Positionierung des Biegekopfes dient. Der Biegekopf kann manuell oder servomotorisch schräg angestellt werden.

**[0068]** Sämtliche Antriebe für die Maschinenachsen sind elektrisch leitend an eine Steuereinrichtung 150 angeschlossen, die u.a. die Leistungsversorgungen für die Antriebe, eine zentrale Rechneinheit und Speichereinheiten enthält. Mit Hilfe der in der Steuereinrichtung aktiven Steuerungssoftware können die Bewegungen sämtlicher Maschinenachsen mit hoher zeitlicher Auflösung variabel gesteuert werden, um z.B. während eines Biegeprozesses Bewegungsgeschwindigkeiten und Beschleunigungen der Biegeachse gezielt zu verändern. Eine an die Steuereinrichtung angeschlossene Anzeige- und Bedieneinheit 160 dient als Schnittstelle zum Maschinenbediener. Dieser kann an der Bedieneinheit bestimmte, für den Biegeprozess relevante Parameter z. B. die gewünschte Biegeteilgeometrie (Geometriedaten) und verschiedene Werkstückeigenschaften (Werkstückdaten) und Werkzeugdaten eingeben, bevor der Biegeprozess beginnt.

**[0069]** Figur 1 illustriert eine beim Biegen auftretende Problematik, die sich daraus ergibt, dass ein freier Endabschnitt des in die Zufuhreinheit eingespannten Werkstücks in Schwingungen versetzt wurde. In der Darstellung von Fig. 1 befindet sich das Werkstück 120 mit Abstand oberhalb des Biegekopfes, der mit Hilfe der Z-Achse nach unten abgesenkt ist, so dass die Werkstückachse 125 oberhalb der Biegedorne 134, 136 verläuft und somit der Draht nicht in Eingriff mit diesen steht. Durch vorangegangene Werkstückbewegungen wurde das Werkstück in Schwingungen versetzt, die eine erhebliche Schwingungskomponente in einer Ebene (Biegeebene) senkrecht zur Biegungsachse ZA haben. Diese Schwingungen sind in Fig. 1 gestrichelt dargestellt. Da die Biegedorne 134, 136 einen gegenseitigen Abstand voneinander haben, der nur geringfügig größer ist als der Werkstückdurchmesser, ist ein Einfädeln des Werkstücks 125 zwischen

die Biegedorne nur dann möglich, wenn die Werkstückschwingungen so weit abgeklungen sind, dass das schwingende Werkstück beim Herauffahren des Biegekopfes ohne Berührung der Biegedorne zwischen diese passt.

**[0070]** In Fig. 3 ist eine ähnliche Darstellung wie in Figur 1 gewählt, jedoch ist hier bereits ein Teil des Werkstücks 120 mit Biegungen versehen worden. Durch das Auskragen des teilweise gebogenen Werkstücks 120 und der damit verbundenen Verlagerung des Massenschwerpunktes M des Werkstücks neigt dieses noch stärker zum Schwingen als das noch nicht gebogene Werkstück in Fig. 1. Da der Massenschwerpunkt des Werkstücks nicht mehr auf der Werkstückachse 125 liegt, können bei jeder mit Werkstückbewegungen verbundenen Positionierung (in Richtung der Werkstückachse und auch senkrecht dazu) sowie bei jeder Orientierung, d. h. bei jeder Drehung um die Werkstückachse, den Biegeprozess störende Schwingung des Werkstücks angeregt werden.

**[0071]** Zur weiteren Erläuterung der Schwingungsproblematik wird nachfolgend ein exemplarischer Biegevorgang bei der Herstellung eines dreidimensional gebogenen Draht-Biegeteils erläutert. Der Biegeablauf kann theoretisch in einzelne Abschnitte untergliedert werden, auch wenn in der Realität mehrere Abschnitte simultan ablaufen können. Beim Einziehen vor Erzeugung der ersten Biegung wird der gerade Draht beispielsweise mit Hilfe von Einzugsrollen (C-Achse) nach vorne in den Bereich des Biegewerkzeugs gefördert. Das Abbremsen des Drahtes ist in der Regel schwingungstechnisch unkritisch, da theoretisch hierdurch noch keine Querschwingungen erzeugt werden. Beim anschließenden Einfädeln fährt der Biegekopf mit Hilfe der Z-Achse nach oben und der Draht wird zwischen die Biegedorne des Biegewerkzeugs eingefädelt. Auch hierbei gibt es in der Regel noch keine Probleme, weil der Draht nicht bzw. nur minimal schwingt. Der Abstand zwischen den beiden Biegedorne ist in der Regel so bemessen, dass er wenige Zehntelmillimeter größer als der Außendurchmesser des Drahtes ist.

**[0072]** In der nachfolgenden Phase des Anfahrens führt beim dargestellten Ausführungsbeispiel der Biegestift eine Schwenkbewegung um die Biegungsachse (Zentralachse ZA) aus (Bewegung der Y-Achse) und die Dornachse (W-Achse) steht fest. Der Biegestift kann beispielsweise mit konstanter Beschleunigung von der Einfädelposition in eine Anlegeposition fahren, in welcher der Biegestift den Draht erstmals berührt.

**[0073]** Der Biegestift kann bei der ersten Biegung dieser Anlegeposition ohne anzuhalten überfahren, er kann aber z.B. bei Vorliegen von Daten über die Geometrie des Werkzeugs und des Materialdurchmessers auch automatisch angehalten werden, so dass der Umformvorgang mit einer Beschleunigung aus dem Stillstand beginnt. Bei der ersten auf den Draht wirkenden Beschleunigung wird eine Schwingung des über das Biegewerkzeug hinaus stehenden freien Endabschnittes des Drahtes angeregt. In der darauf folgenden Phase wird der Draht weiter beschleunigt, wobei er aufgrund seiner Schwingungen in der Biegeebene periodisch unterschiedlich stark am Biegestift anliegt. Es ist auch möglich, dass das Biegestift seine Endgeschwindigkeit bereits vor dem Anfahren an den Draht erreicht. Falls der Biegewinkel groß genug ist und der Biegestift die für den Biegeprozess vorgegebene maximale Biegegeschwindigkeit erreicht hat, wird nachfolgend mit konstanter Geschwindigkeit gebogen. Im Anschluss daran wird der Draht wieder mit vorgegebener, z.B. mit konstanter Beschleunigung abgebremst, bis der Überbiegewinkel erreicht wird (Abbremsen). Anschließend kehrt der Biegestift (Y-Achse) um und beschleunigt wieder auf eine vorgegebene Geschwindigkeit, wobei sich die Beschleunigung und die Geschwindigkeit von den entsprechenden Werten beim Biegen unterscheiden können. Das Wegfahren kann z.B. in zwei Stufen (erst langsam, danach Schneller) erfolgen. Damit ist die Biegeoperation abgeschlossen. Danach fährt das Werkzeug manchmal aus dem Draht nach unten mit Hilfe der Z-Achse aus (ausfädeln), wobei dieser Schritt auch entfallen kann, z.B. wenn sich die Biegerichtung nicht ändert.

**[0074]** Sollen in einer Biegeebene mehrere Biegungen aufeinanderfolgen, kann diese Abfolge wiederholt werden. Bei der Herstellung von dreidimensional gebogenen Biegeteilen erfolgt mindestens ein Wechsel der Biegeebene. Erfolgt die nächste Biegung in einer anderen Ebene, so wird nach dem Ausfädeln die Zufuhreinheit mit der Hilfe der A-Achse gedreht, so dass sich das Werkstück um seine Werkstückachse dreht. Hierbei kann eine Torsionsschwingung entstehen und zusätzlich kann das bereits gebogene Ende eine Biegschwingung ausführen. Anschließend wird der Draht mit Hilfe der C-Achse (Einzug) nachgefördert. Allerdings ist das Verfahren des Einzuges in dieser Phase wesentlich kritischer als vor der Erzeugung der ersten Biegung, weil der bereits gebogene Draht aufgrund seiner größeren Massenträgheit und gegebenenfalls der Verlagerung seines Schwerpunktes weg von der Werkstückachse wesentlich schwingungsanfälliger ist. Auch das zweite Einfädeln gestaltet sich dementsprechend aufgrund der Werkstückschwingung schwieriger, da der schwingende Draht beim Einfädeln mit den Dornstiften kollidieren kann, so dass die Dornstifte einen schwingungserregenden Impuls an den Draht übertragen können.

**[0075]** Bei unterschiedlichen Biegeprozessen können diese Basisabschnitte unterschiedlich häufig und in anderen Reihenfolgen ablaufen und ggf. wiederholt werden. Es ist zu beachten, dass in jedem Abschnitt eines Biegeprozesses Schwingungen entstehen können, die sich mit den vorher erzeugten Schwingungen überlagern.

**[0076]** Bei manchen Ausführungsformen wird während einer schwingensrelevanten Bewegung einer Maschinenachse in einem Kompensationszeitintervall eine ungleichförmige Kompensationsbewegung der Maschinenachse erzeugt, deren Bewegungsprofil so ausgelegt ist, dass einer Schwingungsbewegung des Biegeteils in kurzer Zeit ein Großteil der Energie entzogen werden kann. Zur Illustration zeigt hierzu Fig. 4 die Bewegungen eines zu verbiegenden Werkstücks in verschiedenen Phasen einer Biegeoperation. Die Teilfiguren zeigen jeweils ein Biegewerkzeug 130 mit zwei feststehenden Biegedornen 134, 136 des Dorntellors sowie mit einem Biegestift 138, der die drehende Relativbewegung beim

Biegen des Drahtes 120 ausführt. Die gestrichelte Linie in der Mitte des Drahtes in Fig. 4A symbolisiert jeweils die Ruhestellung bzw. Null-Lage des Drahtes, also diejenige Orientierung, die die Längsachse des Drahtes bei Abwesenheit äußerer Kräfte einnehmen würde.

**[0077]** Fig. 4A zeigt die Anordnung zum Zeitpunkt  $t=t_1$ . Hier liegt der Draht am Biegestift an und der Draht befindet sich noch in seiner Ruhelage. Nun erfolgt das Beschleunigen des Biegestiftes 138 in Biegerichtung (+Y-Richtung). Dabei biegt sich der Draht aufgrund der Massenträgheit in Richtung des Biegestiftes, also in eine Rückwärtsrichtung entgegen der Bewegungsrichtung des Biegestiftes. Zum Zeitpunkt  $t=t_2$  (Fig. 4B) hat der Draht seine maximale Auslenkung in Rückwärtsrichtung erreicht. In dieser Situation ist der Draht elastisch verformt und die komplette Energie einer entstehenden ebenen Schwingung ist im Draht in Form von potentieller Energie (Federenergie) gespeichert. Nach dem Zeitpunkt  $t=t_2$  beschleunigt der Draht in Vorwärtsrichtung und erreicht zum Zeitpunkt von  $t=t_3$  die in Fig. 4C gezeigte Stellung, in der der Draht die Ruhelage überfährt. In dem Zeitintervall zwischen  $t=t_2$  und  $t=t_3$  wandelt der Draht die gespeicherte potentielle Energie zunehmend in kinetische Energie um. Das freie Ende bewegt sich in dieser Phase schneller als der Biegestift (höhere Winkelgeschwindigkeit) in Vorwärtsrichtung. Zum Zeitpunkt  $t=t_3$  erreicht der freie Endabschnitt seine maximale Schwingungsgeschwindigkeit und überfährt die Ruhelage. Hier liegt die Schwingungsenergie praktisch ausschließlich in Form kinetischer Energie vor. Nach Überfahren der Ruhelage verlangsamt der Draht seine Schwingungsgeschwindigkeit wieder und wandelt die kinetische Schwingungsenergie wieder in Federenergie um, bis der Draht im Zeitpunkt  $t=t_4$  (Fig. 4D) seine maximale Auslenkung in Vorwärtsrichtung erreicht. In diesem Zeitpunkt ist der Draht gleichschnell wie der Biegestift. Danach beginnt die Phase des Rückschwingens entgegen der Biegerichtung, bis der Draht bei der Rückschwingung wieder seine maximale Schwingungsgeschwindigkeit beim Durchtritt durch die Null-Lage (Ruhelage) erreicht. Damit ist die erste Schwingungsperiode abgeschlossen. Während einer Biegeoperation können viele solcher Schwingungsperioden nacheinander ablaufen.

**[0078]** Fig. 5 zeigt ein bei einem Versuch aufgenommenes Messdiagramm, welches diesen Ablauf darstellt. Die schräg verlaufende Gerade mit Sinusanschlüssen repräsentiert den Biegewinkel  $Y$  [°] als Funktion der Zeit  $t$ , die Amplitude der Drahtschwingungen ist durch die sinusförmige Kurve AMP dargestellt. Die Schwingung beginnt beim Anlegen des Biegestiftes bei ca.  $t = 1.50$  s. Hier erfährt der freie Endabschnitt zum ersten Mal eine Beschleunigung in Biegerichtung. Mit der ersten Beschleunigung durch den Biegestift wird die Schwingung angeregt und setzt sich während des Biegens mit etwas wachsender Amplitude fort.

**[0079]** Eine aktive Reduzierung der Amplitude der erzeugten Biegeschwingung wird bei einer Ausführungsform dadurch erreicht, dass die Bewegung des Biegestiftes in Biegerichtung (d.h. Biegewinkel  $Y$  nimmt zu) innerhalb eines ersten Zeitintervalls zwischen einem Zeitpunkt maximaler Auslenkung der Schwingungsbewegung in Vorwärtsrichtung (z.B. bei  $t=t_4$ ) und dem unmittelbar nachfolgendem Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit abgebremst bzw. verzögert wird. Dabei führt der Biegestift bzw. die zugeordnete Maschinenachse (Y-Achse) eine Bremsbewegung mit einer endlichen Beschleunigung aus, die gleichgerichtet mit der Beschleunigung Schwingungsbewegung des Drahtes zu diesem Zeitpunkt ist.

**[0080]** Im Beispielsfall erfolgt das Abbremsen ab dem in Fig. 4D gezeigten Zeitpunkt  $t=t_4$ . Danach wird die Bewegung des Biegestiftes abgebremst. In der Abbildung ist die negative Beschleunigung des Biegestiftes, die für das Abbremsen benötigt wird, durch den Pfeil AB symbolisiert. Dieser zeigt in Richtung der Beschleunigung des Biegestiftes, also nach hinten bzw. entgegen der Bewegungsrichtung (+Y-Richtung) des Biegestiftes. Die Beschleunigung des Drahtes nach dem Zeitpunkt  $t=t_4$  maximaler Auslenkung in Vorwärtsrichtung geht ebenfalls in diese Richtung und ist mit dem Pfeil AD dargestellt. Der Draht strebt in dieser Rückschwingungsphase der Bewegung wieder seine Null-Lage an. Wie anschaulich dargestellt, zeigen beide Beschleunigungen in die gleiche Richtung (gleichgerichtete Beschleunigungen). Das führt dazu, dass die Schwingung des Drahtes gewissermaßen abgefangen wird. Der Biegestift kann immer weiter abbremsen, beispielsweise bis zu einem Zeitpunkt  $t=t_5$  (Figur 4E), in dem sich der Draht nahezu in Ruhe befindet.

**[0081]** Aus schwingungstechnischer Sicht können die Vorgänge im Bereich des ersten Zeitintervalls ab dem Zeitpunkt  $t=t_4$  folgendermaßen verstanden werden. Das Biegewerkzeug, d. h. die Dornstifte und der Biegestift, wirken bis zum Zeitpunkt  $t=t_4$  wie eine feste Einspannung für den Draht. Das Abbremsen des Biegestiftes nach dem Zeitpunkt  $t=t_4$  führt dazu, dass die Einspannung nicht mehr fest ist, sondern elastisch und damit auch dämpfend wirkt. Das Abbremsen des Biegestiftes während der Rückfahrtschwingung des Drahtes erzeugt also eine elastische Einspannung, mit der die Schwingungsenergie zu einem großen Anteil aus dem Draht abgeführt wird.

**[0082]** Beim Biegen mit Überbiegewinkel kann alternativ oder zusätzlich in der Phase der Rückwärtsbewegung des Biegestiftes (Bewegung in -Y-Richtung) nach Erreichen des Überbiegewinkels eine Dämpfung in einem Bereich mit gleichgerichteten Beschleunigungen von Draht und Biegestift erreicht werden. Je nachdem, in welche Richtung der Draht zu einem Zeitpunkt maximaler Auslenkung ausgelenkt ist (Vorwärtsrichtung (+Y-Richtung) oder Rückwärtsrichtung (-Y-Richtung)), wird dazu der Biegestift im anschließenden Zeitintervall entweder positiv beschleunigt oder verzögert, um die Schwingung abzufangen und Schwingungsenergie zur Dämpfung abzuführen.

**[0083]** Es ist auch möglich, den Beginn der Rückwärtsbewegung nach dem Überbiegen mit der Schwingungsbewegung des freien Endabschnitts so zu koordinieren, dass gleich zu Beginn eine Dämpfung eintritt. Hierzu kann bei Bedarf eine Pause steuerbarer Länge im Bereich des Umkehrpunktes vorgesehen sein, um z.B. die Rückwärtsbewegung genau

dann zu starten, wenn der freie Endabschnitt seine Rückwärtsschwingungsphase beginnt.

**[0084]** Für die aktive Dämpfung ist es wichtig, den richtigen Zeitpunkt für den Beginn der dämpfenden Kompensationsbewegung der Maschinenachse (Y-Achse) des Biegestiftes zu treffen. Die elastische Einspannung, die z.B. durch das Abbremsen des Biegestiftes hervorgerufen wird, kann im Beispiel von Fig. 4D nur in eine Richtung elastisch wirken, nämlich entgegen der Biegerichtung. Deshalb kann die Dämpfung nicht zu einem beliebigen Zeitpunkt erfolgen, sondern sollte innerhalb eines Zeitfensters liegen, das derjenigen Phase der Schwingung entspricht, in der sich der Draht in Richtung des Biegestifts bewegt (vgl. Fig. 4D). Dieses Zeitfenster macht nur  $\frac{1}{4}$  der Schwingungsperiode des Biegeteils aus, die absolute Größe des Zeitfensters (in Zeiteinheiten) ist abhängig von der Schwingungsfrequenz, welche im wesentlichen durch die Eigenfrequenz des schwingenden, freien Werkstückabschnitts bestimmt wird. Typische Größen eines Zeitfensters können je nach Größe bzw. Eigenfrequenz des schwingenden Teils (typische Werte z.B. von 0.5 Hz bis 10 Hz) im Bereich von wenigen Millisekunden bis zu einigen Hundertstelsekunden liegen.

**[0085]** Anhand des schematischen Diagramms in Fig. 6 wird nun allgemeiner erläutert, auf welche Weise eine existierende Schwingung durch eine phasenrichtig einsetzende Kompensationsbewegung der aktiven Maschinenachse (hier Y-Achse für Antrieb des Biegestifts) durch Entzug von Schwingungsenergie gedämpft werden kann. In dem mehrteiligen Diagramm sind verschiedene die Schwingung charakterisierende Parameter in Abhängigkeit der Zeit  $t$  (x-Achse) aufgetragen. Die auf der Zeitachse mit Ziffern 1 bis 4 gekennzeichneten senkrechten Striche markieren ausgewählte Zeitpunkte  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  und  $t_4$  der periodischen Schwingung. In der Mitte der Figur ist ein schwingender freier Endabschnitt FE eines bearbeitenden Biegeteils in unterschiedlichen Phasen einer Schwingungsbewegung gezeigt, die der freie Endabschnitt durchläuft, während der Biegestift mit konstanter Winkelgeschwindigkeit in seine Biegerichtung verschwenkt wird. Zum links gezeigten Zeitpunkt  $t_2$  ist der freie Endabschnitt maximal in Rückwärtsrichtung ausgelenkt, durchläuft am unmittelbar nachfolgenden Zeitpunkt  $t_3$  seine Null-Lage in Vorwärtsrichtung (Pfeil nach rechts), um zum Zeitpunkt  $t_4$  die maximale Auslenkung in Vorwärtsrichtung zu erreichen. Danach schwingt der freie Endabschnitt zurück, erreicht zum Zeitpunkt  $t_1$  wieder seine Null-Lage mit maximaler Schwingungsgeschwindigkeit in Rückwärtsrichtung (Pfeil nach links) um schließlich zum nachfolgenden Zeitpunkt  $t_2$  nach einer vollen Schwingungsperiode wieder die maximale Auslenkung in Rückwärtsrichtung zu erreichen usw. Zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_4$  findet eine Bewegung in Vorwärtsrichtung (V) (gleiche Richtung wie Biegestiftbewegung) statt, während zwischen den Zeitpunkten  $t_4$  und  $t_2$  eine Bewegung in Rückwärtsrichtung (R) (entgegen der Biegestiftbewegung) stattfindet.

**[0086]** Direkt oberhalb der Symbole für den freien Endabschnitt FE zeigt ein Teildiagramm mit gestrichelter Linie die Geschwindigkeit  $V_{MA}$  der bei der Bewegung aktiven Maschinenachse, im Beispielsfall also der Y-Achse für die Verschwenkung des Biegestifts. Die mit  $V_{DIF}$  bezeichnete, sinusförmige durchgezogene Linie repräsentiert die Differenzgeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitsdifferenz  $V_{DIF}$  zwischen der (Winkel)Geschwindigkeit  $V_{FE}$  eines ausgewählten Punktes am freien Endabschnitt FE und der (Winkel)Geschwindigkeit des Biegestifts bzw. der angetriebenen Maschinenachse. Es gilt:  $V_{DIF} = V_{FE} - V_{MA}$ . Es ist ersichtlich, dass der freie Endabschnitt in der Phase der Vorwärtsbewegung (V) zwischen  $t_2$  und  $t_4$  zunächst zunehmend schneller wird als der Biegestift, zum Zeitpunkt  $t_3$  die maximale Geschwindigkeitsdifferenz erreicht und dass danach die Geschwindigkeitsdifferenz bis zum Zeitpunkt maximaler Auslenkung in Vorwärtsrichtung ( $t_4$ ) wieder abnimmt. Danach entwickelt sich eine Geschwindigkeitsdifferenz in umgekehrter Richtung, da bei der Rückwärtsschwingung (R) zwischen  $t_4$  und  $t_2$  die Winkelgeschwindigkeit des freien Endabschnitts jeweils geringer ist als diejenige des Biegestifts, wobei sich eine maximale Geschwindigkeitsdifferenz zum Zeitpunkt  $t_1$  ergibt.

**[0087]** In dem obersten Teildiagramm ist die zeitliche Änderung der Geschwindigkeitsdifferenz  $V_{DIF}$  als Funktion der Zeit dargestellt, also die Differenzbeschleunigung bzw. Beschleunigungsdifferenz  $A_{DIF}$ . Die Differenzbeschleunigung ist ein Maß dafür, in welchem Ausmaß und in welche Richtung der schwingende freie Endabschnitt relativ zu dem sich bewegenden Biegestift beschleunigt wird. Zu jedem Zeitpunkt außerhalb der Zeitpunkte maximaler Schwingungsgeschwindigkeit ( $t_3$  und  $t_1$ ) liegt eine Beschleunigungsdifferenz vor.

**[0088]** Unmittelbar unterhalb der Symbole für den schwingenden freien Endabschnitt sind mit den Buchstaben "P" und "K" die energetischen Verhältnisse symbolisiert. Während zu den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_4$  maximaler Auslenkung in Rückwärtsrichtung bzw. Vorwärtsrichtung die gesamte Schwingungsenergie dieser als ebene Schwingung angenommenen Schwingung in Form potentieller Energie (P) bzw. Federenergie vorliegt, liegt die Schwingungsenergie zu den dazwischenliegenden Zeitpunkten maximaler Schwingungsgeschwindigkeit (bei  $t_3$  und  $t_1$ ) ausschließlich in Form von kinetischer Energie (K) vor. In den dazwischen liegenden Zeitintervallen sind beide Energieformen vorhanden, wobei beispielsweise der Anteil an potentieller Energie noch überwiegt, je näher ein betrachteter Zeitpunkt an einem Zeitpunkt maximaler Auslenkung liegt.

**[0089]** Soll nun in einer beliebigen Phase der Schwingung Schwingungsenergie aus dem schwingenden freien Endabschnitt abgezogen werden, indem die Bewegungsgeschwindigkeit  $V_{MA}$  der Maschinenachse (hier des Biegestifts) durch definierte positive oder negative Beschleunigung stark verändert wird, so ist dies möglich, wenn eine Veränderung der Geschwindigkeit der Maschinenachse, also eine Beschleunigung, derart erzeugt wird, dass sich eine Verringerung der Geschwindigkeitsdifferenz  $V_{DIF}$  zwischen der momentanen Bewegungsgeschwindigkeit  $V_{MA}$  der Maschinenachse und der momentanen Bewegungsgeschwindigkeit  $V_{FE}$  des schwingenden freien Endabschnitts des Werkstücks im Vergleich zur Geschwindigkeitsdifferenz ohne Kompensationsbewegung ergibt. Anders ausgedrückt ist eine Schwin-

gungsdämpfung bzw. ein Schwingungsenergieentzug dann zu erreichen, wenn die Maschinenachse derart positiv oder negativ beschleunigt wird, dass die Beschleunigungsdifferenz  $A_{DIF}$  dem Betrage nach möglichst weit reduziert wird.

**[0090]** In Fig. 6 wird dies für ein erstes Zeitintervall ZI1 unmittelbar nach dem rechts gezeigten Zeitpunkt  $t_4$  erläutert, in welchen der freie Endabschnitt seine maximale Auslenkung in Vorwärtsrichtung erreicht hat und nun beginnt, in Rückwärtsrichtung zurückzuschwingen (vergleiche Fig. 4D). Zum Zeitpunkt  $t_4$  liegt die gesamte Energie in Form von potentieller Energie (Federenergie) vor, die sich beim Zurückschwingen zunehmend in kinetische Energie umwandelt. Wird nun die Bewegung des Biegestifts abgebremst (negative Beschleunigung, Symbol A-), so fängt der seine Geschwindigkeit verlangsamende Biegestift die in Richtung Biegestift verlaufende Schwingungsbewegung des freien Endabschnittes auf und entzieht ihm dadurch Schwingungsenergie. Betrachtet man die Geschwindigkeiten von Biegestift und freiem Endabschnitt, so ist erkennbar, dass sich nach dem Zeitpunkt  $t_4$  während der Rückwärtsbewegung des freien Endabschnitts die Geschwindigkeitsdifferenz  $V_{DIF}$  schnell zu immer negativeren Werten abgesenkt würde, bis der nächste Nulldurchgang erreicht ist. Wird nun die Geschwindigkeit des Biegestiftes in dieser Phase gleichfalls geeignet abgesenkt (negative Beschleunigung), so verringert sich die tatsächliche Geschwindigkeitsdifferenz  $V_{DIF}$  (KOMP) gegenüber derjenigen Geschwindigkeitsdifferenz, die ohne diese Kompensationsbewegung vorliegen würde, drastisch. Im Beispielsfall ist die Absenkung der Biegestiftgeschwindigkeit an die Schwingungsgeschwindigkeit des freien Endabschnitts so angepasst, dass sich nach dem Beginn BK des Kompensationszeitintervalls KZI praktisch eine konstante Geschwindigkeitsdifferenz einstellt, was wiederum einer Abnahme des Betrags der Beschleunigungsdifferenz  $A_{DIF}$  auf nahezu null entspricht. Die praktischen Auswirkungen einer solchen gezielten starken Verzögerung der Biegestiftbewegung werden weiter unten anhand einiger praktischer Beispiele noch erläutert (vgl. Fig. 7 bis 9).

**[0091]** Eine Dämpfung der Schwingung (Entzug von Schwingungsenergie) durch gezielte starke Beschleunigung der sich bewegenden Maschinenachse kann prinzipiell in jeder Phase der Schwingungsbewegung erreicht werden. Im unteren Teil des Diagramms werden die in den jeweiligen Phasen hierzu benötigten Beschleunigungen mit aufwärts bzw. abwärts gerichteten Pfeilen und den Symbolen A+ bzw. A- dargestellt, wobei ein aufwärts gerichteter Pfeil bzw. das Symbol A+ für eine Geschwindigkeitserhöhung (positive Beschleunigung) und ein abwärtsgerichteter Pfeil bzw. A- für eine Verzögerung bzw. negative Beschleunigung steht. Beispielhaft sei hier die Situation in einem zweiten Zeitintervall ZI2 dargestellt, welches zwischen einem Zeitpunkt  $t_1$  maximaler Schwingungsgeschwindigkeit in Rückwärtsrichtung und den unmittelbar nachfolgenden Zeitpunkt  $t_2$  maximaler Auslenkung in Rückwärtsrichtung liegt. Auch in dieser Phase bewegt sich der freie Endabschnitt in Richtung des sich bewegenden Biegestifts, und zwar mit abnehmender Geschwindigkeit. Auch in diesem Bereich kann durch Verzögerung der Biegestiftgeschwindigkeit (A-) die Schwingung in dieser Phase abgefangen und dadurch Schwingungsenergie abgeleitet werden.

**[0092]** Bei geeigneter Wahl der Schwingungsphase ist ein Schwingungsenergieentzug auch durch eine positive Beschleunigung des Biegestifts möglich. Beispielhaft sei hier ein erstes Zeitintervall ZI1 zwischen dem Zeitpunkt  $t_2$  maximaler Auslenkung in Rückwärtsrichtung und dem unmittelbar nachfolgenden Zeitpunkt  $t_3$  maximaler Schwingungsgeschwindigkeit in Vorwärtsrichtung beschrieben. In dieser Phase der Vorwärtsbewegung des freien Endabschnitts kann die Schwingung dadurch "aufgefangen" zu werden, dass der Biegestift positiv beschleunigt (A+) wird und dadurch die Geschwindigkeitsdifferenz zum freien Endabschnitt im Vergleich zur Bewegung ohne diese Beschleunigung verringert wird.

**[0093]** Die gestrichelte Linie unterhalb der die Beschleunigung repräsentierenden Pfeile im unteren Teil des Diagramms kann ebenfalls zur Darstellung der benötigten Beschleunigung des Biegestifts für einen Energieentzug herangezogen werden.

**[0094]** Die Beispiele zeigen, dass durch eine Minimierung des Betrags der Beschleunigungsdifferenz  $A_{DIF}$  zwischen dem Biegestift und dem schwingenden freien Endabschnitt Schwingungsenergie abgezogen und dadurch die Schwingungsamplitude reduziert werden kann. Bei einer Verfahrensvariante wird mit Hilfe einer Regelung der am Biegestift auftretenden Biegekraft erreicht, dass das Auftreten von Schwingungen mit störenden Amplituden kontinuierlich unterdrückt wird. Wird nämlich die Regelung so ausgelegt, dass die Biegekraft während des Biegevorgangs bzw. während einer Phase desselben möglichst konstant bleibt bzw. nur geringe Schwankungen aufweist, so ist dadurch gleichzeitig auch sichergestellt, dass sich zwischen der Bewegung des Biegestiftes und der Schwingungsbewegung des freien Endabschnitts keine starke Beschleunigungsdifferenz ausbilden kann. Da letztendlich die Ausbildung von Beschleunigungsdifferenzen für die Anregung von Schwingungen des freien Endabschnitts verantwortlich ist, kann dadurch auch die Anregung von störenden Schwingungen vermieden werden. Das Ansteigen bzw. Abfallen der Kraft am Anfang bzw. am Ende einer Bewegung ist dabei zu berücksichtigen.

**[0095]** Anhand der Fig. 7 und 8 werden nun die Ergebnisse einiger Biegeoperationen mit aktiver Dämpfung der Schwingungsbewegung erläutert. Fig. 7 zeigt hierzu ein Messdiagramm, welches in gemeinsamer Darstellung den Biegewinkel  $Y$  [°], die Biegegeschwindigkeit  $V$  und die Amplitude AMP der Schwingungsbewegung des freien Endabschnitts als Funktion der auf der Abszisse aufgetragenen Zeit  $t$  (in [s]) zeigt. Als Maß für die Biegegeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit der Drehbewegung der Y-Achse) ist in der Ordinate die zur Biegegeschwindigkeit proportionale Drehzahl  $D$  des Servomotors MY der Y-Achse in [U/min] aufgetragen. Die Schwingungsamplitude AMP ergibt sich aus dem Abstand einer definierten Stelle am freien Endabschnitt des Drahtes in Bezug auf einen optischen Schwingungs-

sensor, der mit einem Laser arbeitet und den Abstand zwischen dem Lasersensor und dem schwingendem Biegeteilabschnitt erfasst. Bei einer freien Länge  $l = 700$  mm des freien Endabschnitts und einem Durchmesser von 6 mm für den zu biegenden Draht ergibt sich bei fester Einspannung eine Eigenfrequenz von ca. 8.89 Hz, so dass eine Schwingungsperiode ca. 112 ms dauert. Für die Dämpfung bleibt also ein Zeitfenster von ca. 28 ms.

**[0096]** Der Verlauf der Biegegeschwindigkeit zeigt zunächst einen relativ geradlinigen Anstieg im Bereich um  $t = 2$  ms, bevor die Biegegeschwindigkeit ihren Maximalwert (entsprechend ca. 500 U/min des Servomotors) bei einer Zeit  $t = 2.02$  erreicht. Diese Biegegeschwindigkeit bleibt dann bis zum Beginn des ersten Zeitintervalls ZI1 im Wesentlichen konstant. Aus dem Amplitudenverlauf ergibt sich, dass der Draht zunächst beim Erstkontakt mit dem danach Biegestift (starke Beschleunigung) eine außerhalb des Messbereichs des Schwingungssensors liegende große Amplitude hat und danach mit im Wesentlichen konstanter Amplitude (ca. 23 mm im Bereich der Messstelle) schwingt. Die maximalen Auslenkungen bei ca.  $t = 2.09$  s,  $t = 2.20$  s und  $t = 2.32$  s entsprechen jeweils den maximalen Auslenkungen in Vorwärtsrichtung, d.h. in Richtung der Bewegung des Biegestiftes. Unmittelbar nach Erreichen der dritten maximalen Auslenkung der Vorwärtsrichtung bei ca.  $t = 2.32$  s wird die Drehzahl des Servomotors durch die Steuereinrichtung innerhalb eines Viertels der Schwingungsperiode im ersten Zeitintervall ZI1 auf ca. 1/5 des Ausgangswertes reduziert, so dass der Biegestift genau in der Phase abbremst, in der der freie Endabschnitt in Richtung Biegestift zurückschwingt. Die Geschwindigkeitskurve im ersten Zeitintervall entspricht etwa einer Geraden mit Sinusanschlüssen mit einer anschließenden kurzen Steigerung der Drehzahl, bevor diese nahezu auf Null abfällt.

**[0097]** Die Auswirkungen dieser Verzögerung der Biegegeschwindigkeit auf die Schwingungsamplitude sind dramatisch. Nach einer Viertel Schwingungsperiode ist die Amplitude des Drahtes von ca. 23.45 mm auf ca. 2.15 mm reduziert, was einer Dämpfung von ca. 90% bzw. einer Reduzierung der vor dem Dämpfen vorliegenden Ausgangsamplitude auf weniger als 10% ihres Wertes entspricht. Die geringe Restamplitude nach dem ersten Zeitintervall (ab ca. 2.35 s) stört den nachfolgenden Abschnitt der Biegeoperation nicht, so dass der Draht ohne Beruhigungszeit weiter bearbeitet werden kann.

**[0098]** Der Beginn des ersten Zeitintervalls ZI1 definiert in diesem Beispiel den Beginn des Kompensationszeitintervalls KZI, in welchem die schwingungsreduzierende Kompensationsbewegung der Maschinenachse (Biegeachse, Y-Achse) durchgeführt wird. Die Kompensationsbewegung ist hier vor allem charakterisiert durch den raschen, drastischen Abfall der Biegegeschwindigkeit (Bewegungsgeschwindigkeit der Y-Achse) um deutlich mehr als 50% der 70% im ersten Zeitintervall. Das erste Zeitintervall wird im Folgenden auch als "Dämpfungszeitintervall" bezeichnet, da hier aufgrund von Schwingungsenergieentzug eine starke Verringerung der Schwingungsamplitude eintritt.

**[0099]** Bei dem Beispiel von Fig. 7 wird die Dämpfung erst in der dritten Schwingungsperiode nach dem Anlegen eingeleitet. Um bei ansonsten gleichen Randbedingungen eine Dämpfung bereits in der ersten Periode zu erreichen, wären im Beispielsfall größere Vorschübe bzw. Motordrehzahlen notwendig. Gleichzeitig soll aber das Abbremsen nach wie vor in einem sehr engen Zeitfenster, nämlich in einem Viertel der Periodendauer, erfolgen. Das bedeutet, dass der Drehzahlabfall im Dämpfungszeitintervall wesentlich steiler als im Beispiel von Fig. 7 verlaufen sollte. Diese Aufgabe wurde bei Versuchen steuerungstechnisch dadurch gelöst, dass der Drehzahlabfall im Dämpfungszeitintervall, d.h. die Reduzierung der Biegegeschwindigkeit, im Wesentlichen einer  $\sin^2$ -Beschleunigung entspricht, die steuerungsintern relativ einfach generiert werden kann. Neben dem stetigen Kurvenverlauf der  $\sin^2$ -Beschleunigung stellt auch die einfache Handhabung an einer CNC-Steuerung einen Vorteil dar, da CNC-Programme mit einer  $\sin$ -Beschleunigung lediglich aus einem NC-Datensatz bestehen können, der neben der Vorschub- und Wegangaben der Parameter für die  $\sin$ -Beschleunigung beinhaltet.

**[0100]** Fig. 8 zeigt das Messprotokoll bei einer ähnlichen Versuchsanordnung, wie sie auch dem Messprotokoll von Fig. 7 zugrunde lag. Der Unterschied besteht darin, dass bereits während der ersten Periode der Biegeteilschwingung gedämpft wurde und dass im ersten Zeitintervall ZI1 durch die Steuereinrichtung eine Abbremsung der Biegestiftbewegung (Y-Achse) entsprechend einer  $\sin^2$ -Beschleunigung erzeugt wurde. Fig. 8A zeigt die mit einem Kraftsensor am Biegestift erfasste Biegekraft KB [N] als Funktion der Zeit  $t$ . Da es sich hier um eine Schwingung mit starkem Schwingungsanteil in der Biegeebene handelt, ist dieses Kraftsignal proportional zur Amplitude der Schwingung und repräsentiert exakt sowohl die Phasenlage als auch die Frequenz der Schwingung. Fig. 8B zeigt die Kurve für die Schwingungsamplitude AMP und die Biegegeschwindigkeit  $V$ , welche proportional zur Drehzahl  $D$  des der Y-Achse zugeordneten Servomotors MY ist. Dieser beschleunigt zunächst aus dem Stand im Zeitraum zwischen ca.  $t = 2.07$  s und  $t = 2.12$  s gemäß einer  $\sin^2$ -Beschleunigung auf den Maximalwert und verbleibt danach mit geringen Schwankungen im Bereich des Maximalwertes bis zu einem Zeitpunkt innerhalb des ersten Zeitintervalls ZI1 bei ca.  $t = 2.19$  s. Danach wird die Drehgeschwindigkeit des Servomotors der Y-Achse gemäß einer  $\sin^2$ -Beschleunigung innerhalb einer Viertel Schwingungsperiode fast auf Null heruntergefahren. Diese Abbremsbewegung ist gleich gerichtet zur Rückschwingung des Biegeteils und bewirkt eine starke Dämpfung der Schwingungsbewegung, die nach Abschluss des ersten Zeitintervalls ZI1 nur noch eine geringe Restamplitude hat, welche den weiteren Verlauf der Biegeoperation nicht weiter stört. Im Beispielsfall liegt die Amplitude nach dem Dämpfen bei ca. 5.45 mm, was in Anbetracht der sehr kurzen Biegezeit von nur ca. 150 ms ein sehr guter Wert ist.

**[0101]** Die Beispiele aus den Fig. 7 und 8 dienen im Wesentlichen der Veranschaulichung der Möglichkeiten einer

aktiven Dämpfung. Ob im Einzelfall eine sehr starke Dämpfung, wie sie in Fig. 8 exemplarisch gezeigt ist, notwendig und sinnvoll ist, ist bei Auslegung des Biegeprozesses zu entscheiden. Dabei ist unter anderem zu berücksichtigen, dass sehr starke Dämpfungen genau wie sehr starke Beschleunigungen in Einzelfällen bis zur plastischen Verformung eines Biegeteils führen können, was in der Regel vermieden werden soll. Das Abbremsen des Biegestiftes kann auch

im Wesentlichen nach einem linearen Zeitgesetz erfolgen.

**[0102]** Die Fig. 7 und 8 zeigen den Dämpfungseffekt bei einmaliger Anwendung. Es ist auch möglich, während einer Biegeoperation in mehreren zeitlich versetzten Zeitintervallen zu dämpfen. Fig. 9 zeigt hierzu exemplarisch das Messprotokoll eines Versuches mit zweimaligem, zeitversetztem Dämpfen, wobei in jedem ersten Zeitintervall die Drehzahl des Servomotors gemäß einer  $\sin^2$ -Beschleunigung reduziert wird. Ein früher liegendes erstes Zeitintervall ZI1-1 liegt bei diesem Versuch zwischen ca.  $t = 2.22$  s und  $t = 2.25$  s und dient dazu, die anfangs sehr hohe Amplitude auf Werte um ca. 15 mm zu dämpfen. Die Drehzahl des Motors wird nicht auf null reduziert, sondern auf einen endlichen Wert, z.B. etwa 10% bis 20% des Wertes vor dem Abbremsen. Nach einer weiteren Schwingungsperiode wird dann in einem späteren ersten Zeitintervall ZI1-2 im Zeitintervall zwischen ca.  $t = 2.36$  und  $t = 2.38$  s eine weitere Dämpfung gemäß einer  $\sin^2$ -Beschleunigung durchgeführt, wodurch die Amplitude weiter reduziert wird. Durch mehrmaliges Dämpfen sind gegebenenfalls kleinere Restamplituden zu erreichen als bei einmaligem Dämpfen.

**[0103]** Für eine effektive Dämpfung ist es wesentlich, dass die zur Dämpfung führende Beschleunigung bzw. Verzögerung der relevanten Maschinenachse zum richtigen Zeitpunkt einsetzt, so dass das Dämpfungszeitintervall in Bezug auf die Phase der Schwingungsbewegung optimal liegt. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die zeitliche Lage des Dämpfungszeitintervalls an die Schwingung des Biegeteils anzupassen. Der richtige Zeitpunkt kann beispielsweise experimentell ermittelt werden, indem zunächst einige Referenz-Biegeteile einer Serie gebogen und anhand dieser Biegeteile die Phasenlagen der entstehenden Schwingungen und damit auch zeitlichen Lagen günstiger Zeitpunkte für den Beginn von Kompensationsbewegungen bestimmt werden. Die Werte können dann in die Steuerung eingegeben werden. Es ist auch möglich, das Schwingungsverhalten eines Biegeteils für alle Phasen des Biegeprozesses vorab durch Simulation, beispielsweise mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (FEM) zu ermitteln und den Beginn des Kompensationszeitintervalls und/oder andere für die Schwingungskompensation nützliche Steuerungsparameter nach dem Ergebnis dieser Simulation vorab festzulegen. Es ist auch möglich, die kompensierenden Gegenbewegungen hinsichtlich Frequenz und Bewegungsverlauf anhand von rechnerisch von der Maschinensoftware ermittelten Eigenfrequenzen und anderen Randbedingungen wie Auflage, Reibung, Orientierung für jede Bewegung einer Maschinenachse individuell festzulegen.

**[0104]** Bei der anhand von Fig. 2 erläuterten Ausführungsform einer Biegemaschine ist eine Schwingungskompensationsregelung implementiert, die während des Biegevorgangs die Schwingungsbewegungen des Werkstücks mit Hilfe mindestens eines Schwingungssensors erfasst, aus Signalen des Schwingungssensors zumindest die Phasenlage und die Frequenz der Schwingung ermittelt und an die Steuereinrichtung in der Weise rückkoppelt, dass diese die entsprechenden Antriebe der für die schwingungskritischen Bewegungen maßgeblichen Maschinenachsen so steuert, dass die für die Dämpfungswirkung und/oder für eine Schwingungsunterdrückung erforderlichen Beschleunigungen bzw. Verzögerungen zum richtigen Zeitpunkt in Bezug auf die aktuelle Schwingung eingeleitet bzw. erzeugt werden.

**[0105]** Die Ausführungsform hat hierzu einen mit dem Biegestift 138 gekoppelten Schwingungssensor 170 in Form eines Kraftsensors, der die am Biegestift aktuell auftretenden Biegekräfte erfasst und ein dieser Biegekraft proportionales Signal erzeugt, das zur Steuereinrichtung 160 übertragen und von dieser zur Steuerung des Antriebs MY für die Y-Achse verarbeitet werden kann.

**[0106]** Der Zufuhreinheit 110 ist ein Schwingungssensor 180 zugeordnet, der ebenfalls als Kraftsensor ausgelegt ist. Mit dem Schwingungssensor 180 können zum einen die in der Zufuhreinheit auftretenden Kräfte parallel zur Werkstückachse erfasst werden, und ebenfalls diejenigen Kräfte bzw. Drehmomente, die in Richtung einer Verdrehung der Zufuhreinheit um die Werkstückachse wirken. Diese Kräfte bzw. Drehmomente können beispielsweise dann auftreten, wenn das eingespannte Biegeteil einen wesentlichen Anteil an Torsionsschwingungen hat, wie sie beispielsweise beim Drehen eines bereits einmal oder mehrfach gebogenen Werkstücks für den Wechsel der Biegeebene auftreten können. Die Signale des Drehmomentsensors werden zur Steuereinrichtung 150 übertragen und können von dieser zur Ansteuerung des für die Werkstückdrehung verantwortlichen Antriebes der A-Achse (A-Motor) verarbeitet werden, um mit Hilfe von gezielten Drehzahländerungen eine Torsionsschwingung durch eine Ausgleichsbewegung zu dämpfen bzw. zu kompensieren. Analog können die in Längsrichtung des Werkstücks wirkenden Kräfte erfasst, ein dazu proportionales Signal an die Steuereinrichtung in Form eines Schwingungssignals übertragen und von dieser zur Ansteuerung des für die Bewegung der C-Achse verantwortlichen Motors MC verarbeitet werden.

**[0107]** Da über die Schwingungssensoren zumindest die Phase und die Frequenz von Schwingungen oder Schwingungskomponenten des Bauteils in Echtzeit ermittelt werden können, ist auch eine Kompensationsregelung durchführbar, bei der die Steuereinrichtung 150 mit Hilfe eines Schwingungssignals die zeitliche Lage des Beginns eines Kompensationszeitintervalls der betreffenden Maschinenachse steuert. Beispielsweise können die anhand der Fig. 6 bis 8 erläuterten Dämpfungsbewegungen der Biegeachse (Y-Achse) aufgrund von Signalen des Schwingungssensors 170 gesteuert werden, der die Biegekraft am Biegestift erfasst.

**[0108]** Es ist auch möglich, die Schwingungskompensationsregelung so auszulegen, dass ggf. über viele Schwin-



gungsperioden hinweg auf eine möglichst konstante Biegekraft geregelt wird, was gleichbedeutend ist mit der im Zusammenhang mit Fig. 6 erläuterten Minimierung der Beschleunigungsdifferenz. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Phasen der zwangsläufigen Kraftänderung beim Beschleunigen und Verzögern von der Konstantkraftregelung ausgenommen sind und dass generell eine Abhängigkeit von Biegewinkel und vom Biegeverfahren gegeben ist.

**[0109]** Die beschriebenen Möglichkeiten der Dämpfung einer Biegeteilschwingung können als auswirkungsbegrenzende Maßnahmen verstanden werden, die Energie aus einer bereits angeregten Schwingung abziehen und dadurch die Schwingung dämpfen. Zusätzliche Dämpfungen können beispielsweise auch durch Anbringung von Dämpfungselementen (z.B. Biegetisch) und/oder durch das Biegen in einem dichteren Medium eingeführt werden. Eine weitere auswirkungsbegrenzende Maßnahme ist es, den Schwingungen des Biegeteils gezielt entgegenzuwirken. Der Grundgedanke hierbei ist es, das Bewegungsgesetz einer Maschinenachse, beispielsweise der Biegeachse (Y-Achse), mit einer kleinen, mehr oder weniger sinusförmigen Bewegungsfunktion phasenrichtig zu überlagern, die der vorherrschenden Schwingung des Biegeteils entgegenwirkt. Auch bei dieser Variante ist der Antriebsmotor der entsprechenden Maschinenachse das gegensteuernde Element, welches über die Steuereinrichtung auf Basis des NC-Programms betätigt wird.

**[0110]** In Fig. 10 wird eine solche Variante qualitativ dargestellt. Die im Wesentlichen lineare Wegfunktion Y (Biegewinkel) der Y-Achse (Biegeachse) beginnt mit einem Sinusanschluss und geht dann in eine Phase mit gleichförmiger Biegegeschwindigkeit V über. Nach einem Konstantfahrt-Zeitintervall, welches etwa von  $t = 30$  ms bis  $t = 95$  ms läuft, schließt sich ein Kompensationszeitintervall KZI an, in welchem die Bewegungsgeschwindigkeit V periodisch entsprechend einer überlagerten Sinusfunktion um einige Prozente des Absolutwertes der Biegegeschwindigkeit moduliert wird. In der Wegfunktion Y macht sich diese Überlagerung einer Sinusfunktion durch leichte periodische Abweichungen vom geradlinig linearen Verlauf bemerkbar. In der Geschwindigkeitsfunktion V bewirkt die Überlagerung eine sinusförmige Schwankung der Geschwindigkeit um den während der Konstantfahrtphase vorliegenden Geschwindigkeitswert. Aus der Kurve A für die Beschleunigung des Biegewerkzeuges ergibt sich, dass das Kompensationszeitintervall zunächst mit einer positiven Beschleunigung (Geschwindigkeitserhöhung) beginnt und dann mehrere Wechsel zwischen Phasen negativer Beschleunigung und Phasen positiver Beschleunigung folgen. Die Phasenlage der sinusförmigen Bewegung des Biegestifts zur Phasenlage der Schwingung des Werkstücks wird so gewählt, dass diese sich gegenseitig aufheben und damit die Schwingung des Werkstücks ab- bzw. beseitigt wird. Vorzugsweise hat die Gegenschwingung eine abnehmende Amplitude um zu vermeiden, dass durch die Gegenschwingung neue Eigenschwingungen angeregt werden.

**[0111]** Diese Überlagerung von Bewegungsgesetzen kann entweder direkt über den Servomotor MY für die Y-Achse eingebracht werden oder aber durch einen zusätzlichen Antrieb, beispielsweise durch einen Piezoaktor, der unabhängig von der mit dem Motor der Y-Achse erzeugten Bewegung der Biegeachse die sinusförmige wechselnde Kompensationsbewegung des Biegestiftes erzeugt. Die Biegebewegung durch den Antriebsmotor wäre dadurch von der schwingungsdämpfenden Bewegung, welche durch den Piezoaktor erzeugt wird, entkoppelt. Der Piezoaktor wäre als Teil des Antriebs für die Bewegung der Y-Achse anzusehen. Der Antrieb für die Bewegung setzt sich dann aus einem Grobantrieb (Servomotor) und einem hochdynamischen Feintrieb (Piezoaktor) zusammen, die in Kombination wirken.

**[0112]** Bei manchen Ausführungsformen sind alternativ oder zusätzlich ursachenbegrenzende Maßnahmen vorgesehen, also solche Maßnahmen, die dazu geeignet sind, eine übermäßige Schwingungserregung von vornherein zu vermeiden. Vorzugsweise ist dabei vorgesehen, dass ein Bewegungsprofil einer schwingungsrelevanten Bewegung, beispielsweise der Drehbewegung des Biegestiftes beim Biegen, zwischen einem Anfangspunkt und einem Endpunkt der Bewegung einem Bewegungsgesetz folgt, welches einer mathematisch glatten Funktion entspricht. Das kann insbesondere bedeuten, dass sowohl das Geschwindigkeitsprofil der gesamten Bewegung als auch das Beschleunigungsprofil der gesamten Bewegung frei von Knickpunkten bzw. Eckpunkten ist, so dass diese Funktionen stetig differenzierbar sind.

**[0113]** Bei der praktischen Umsetzung dieses Ansatzes wurden u.a. verschiedene normierte Bewegungsgesetze untersucht, wie sie beispielsweise in der VDI-Richtlinie 2143 Blatt 1 mit dem Titel "Bewegungsgesetze für Kurvenbetriebe" aufgeführt sind. Der Inhalt dieser VDI-Richtlinie wird insoweit durch Bezugnahme damit zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht. Für Versuchsreihen wurde eine Draht mit 6 mm Durchmesser und 700 mm freier Länge in einer Biegezeit von 330 ms um einen Biegewinkel von  $35^\circ$  gebogen, wobei das Richten durch Anlegen des Biegestiftes am Draht mit einer Vorspannung von  $2^\circ$  als Störgröße ausgeschlossen wurde. Als Kriterium für das Ausmaß der Schwingungserregung beim Vergleich der Bewegungsgesetze untereinander wurde die Größe der Schwingungsamplitude vor Erreichen einer ersten Stelle mit hoher Beschleunigungsänderung gewählt. Fig. 10 zeigt eine Vergleichsübersicht der Wegfunktion verschiedener verwendeter Bewegungsgesetze, wobei auf der Abszisse die zur Biegezeit proportionale Anzahl von Stützpunkten und auf der Ordinate der Biegewinkel Y [°] aufgetragen ist. Als Vergleichsprofile, die herkömmliche Bewegungsprofile repräsentieren, sind ein lineares Bewegungsprofil (Kurve L), eine Gerade mit Parabelanschlüssen (Kurve GP) und eine Gerade mit geneigten Sinusanschlüssen (Kurve GS) dargestellt. Diese haben jeweils lange Abschnitte mit konstanter Geschwindigkeit (geradlinige Wegfunktion), in welchen die Beschleunigung den Wert Null annimmt.

**[0114]** Bei den anderen dargestellten Bewegungsprofilen ändern sich Bewegungsgeschwindigkeit und Beschleunigung kontinuierlich zwischen dem Anfangspunkt und dem Endpunkt der dargestellten Bewegung, wobei die Geschwindigkeitsfunktion zwischen Anfangspunkt und Endpunkt einen Maximalwert erreicht und die Beschleunigungsfunktion

zwischen Anfangspunkt und Endpunkt einen Nulldurchgang von positiven zu negativen Beschleunigungen durchläuft. Beim Beispiel liegt ein Wendepunkt WP der Wegfunktion (Geschwindigkeitsmaximum) etwa mittig zwischen Anfangswinkel ( $0^\circ$ ) und Endwinkel ( $35^\circ$ ). Der Beschleunigungsverlauf ist zu Beginn der Bewegung mit sehr geringer Steigung sanft verrundet, mit Geschwindigkeitssteigerungen, die in der Anfangsphase (ausgehend vom Anfangspunkt) deutlich geringer sind als bei der Geraden (L) und auch geringer als bei der Geraden mit Sinusanschluss.

[0115] Zu diesen mathematisch glatten Bewegungsprofilen gehören: das Polynom fünften Grades, die quadratische Parabel (Kurve QP), das modifizierte Beschleunigungstrapez (Kurve MB), die einfache Sinuide (Kurve ES), die modifizierte Sinuide, der harmonische Bewegungsablauf, das gestreckte Polynom fünften Grades, die gestreckte, geneigte Sinuide und die geräuscharme Cosinus-Kombination. Fig. 10 zeigt, dass sich die Wegfunktionen dieser Bewegungsgesetze nur minimal voneinander unterscheiden, weshalb nur wenige der glatten Kurven explizit bezeichnet sind.

[0116] Bei verschiedenen Versuchen zeigte sich, dass vor allem ein Bewegungsprofil entsprechend einem modifizierten Beschleunigungstrapez (Kurve MB) und das Bewegungsprofil entsprechend einer quadratischen Parabel (Kurve QP) sehr geringe Schwingungsamplituden erzeugten, die um ein Vielfaches unterhalb derjenigen Schwingungsamplituden lagen, die sich bei konventionellen Bewegungen entsprechend der Geraden mit geneigten Sinusanschlüssen (Kurve GS) oder der Gerade mit Parabelanschlüssen (Kurve GP) ergab. Während letztere bei einer Versuchsreihe beispielsweise mit Amplituden von über 40 mm außerhalb des Messbereichs des lasergestützten Amplitudenmessung lagen, ergaben sich für die glatten Bewegungsprofile durchgängig Amplitudenwerte unterhalb von 15 mm, in der Regel sogar von ca. 10 mm oder weniger.

[0117] Für die Bewertung der Tauglichkeit verschiedener Bewegungsgesetze für die Schwingungsvermeidung beim Drahtbiegen oder Rohrbiegen kommen vor allem zwei Vergleichswerte in Betracht, nämlich der Beschleunigungskennwert ( $C_a$ ) und der Ruckkennwert ( $C_j$ ). Der Beschleunigungskennwert ist der Maximalwert der zweiten Ableitung des normierten Bewegungsgesetzes. Der Ruckkennwert verkörpert dagegen den Maximalwert der dritten Ableitung des normierten Bewegungsgesetzes. Der Ruckkennwert ergibt sich demnach durch Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit. Tabelle A zeigt die  $C_a$ - und  $C_j$ -Werte einiger der in den Versuchen verwendeten Bewegungsgesetze.

Tabelle A

Bewegungsgesetz	$C_a$	$C_j$	ruckfrei
Einfache Sinuide	4.93	$\infty$	Nein
Polynom 5. Grades	5.78	60	Ja
Quadratische Parabel	4	$\infty$	Nein
Mod. Beschleunigungstrapez	4.89	61.4	Ja
Mod. Sinuide	5.53	69.5	Ja
Geneigte Sinuide	6.28	39.5	Ja

[0118] Die Versuche zeigten, dass vor allem die Bewegungsgesetze mit geringer normierter Beschleunigung ( $C_a$ -Wert) sehr geringe Schwingungsamplituden erzeugten. Das sind hier das modifizierte Beschleunigungstrapez (Kurve MB) und die quadratische Parabel (Kurve QP). Das gute Abschneiden der Parabel zeigt auch, dass die normierte Ruckfunktion ( $C_j$ -Wert) gegenüber dem Beschleunigungskennwert eine untergeordnete Rolle spielt. Die Bedeutung des normierten Beschleunigungswertes für die Schwingungsvermeidung veranschaulicht, dass die Massenträgheit und die damit verbundenen Beschleunigungen für den Peitscheneffekt maßgeblich verantwortlich sind und dass die Schwingungserzeugung teilweise unterdrückt werden kann, wenn über die gesamte Bewegung zwischen Anfangspunkt und Endpunkt nur relativ kleine Beschleunigungen durch die entsprechende Maschinenachse erzeugt werden.

[0119] Wesentliche Aspekte der Erfindung wurden hier anhand einiger Ausführungsbeispiele aus dem Bereich des Drahtbiegens erläutert, da die problematische Schwingungserzeugung, die häufig auch als "Peitscheneffekt" bezeichnet wird, beim Drahtbiegen wesentlich stärker in Erscheinung tritt als beim Rohrbiegen. Dies rührt vor allem daher, dass bei einem Vergleich der Masse eines Rohres mit der Masse eines Drahtes bei gleichem Außendurchmesser und gleicher Dichte das Rohr einen wesentlichen Gewichtsvorteil und damit wesentlich geringere Massenträgheit besitzt, wodurch auch die Trägheitskräfte, die bei den gleichen Beschleunigungen wirken, entsprechend geringer sind. Gleichwohl können beim Rohrbiegen aufgrund von Werkstückschwingungen Probleme entstehen. Die am Beispiel des Drahtbiegens erläuterten Lösungsansätze sind grundsätzlich in analoger Weise auch beim Rohrbiegen oder beim Biegen anderer langgestreckter Werkstücke nutzbar.

[0120] Die Schwingungskompensation kann sowohl bei den für die Positioniervorgänge und Orientierungsvorgänge genutzten Maschinenachsen, als auch für die bei der Biegeoperation aktiven Maschinenachsen (Biegeachsen) genutzt werden. Ein Einsatz ist auf Einkopfmaschinen, Zweikopf- oder Mehrkopfmaschinen und auch auf Mehrstationenmaschi-

nen mit drehendem Biegekopf oder drehendem Werkstück möglich. Zusätzliche Maßnahmen, die beispielsweise die Freiheitsgrade von Schwingungen begrenzen (beispielsweise Tischplatten) oder die eine Schwingung dämpfen, können vorgesehen sein. So können beispielsweise Halterungen, Stützen oder Greifer vorgesehen sein, die das gebogene Werkstück führen und somit die Ausbildung von Schwingungen verhindern.

5

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Biegeteils durch zwei- oder dreidimensionales Biegen eines langgestreckten Werkstücks, insbesondere eines Drahtes oder eines Rohres, bei dem durch koordinierte Ansteuerung der Bewegungen von Maschinenachsen einer mittels einer Steuereinrichtung numerisch gesteuerten Biegemaschine in einem Biegeprozess mindestens ein Abschnitt des Werkstücks durch eine oder mehrere Zufuhroperationen in eine Ausgangsstellung im Eingriffsbereich eines Biegewerkzeugs bewegt und mit Hilfe des Biegewerkzeugs in mindestens einer Biegeoperation durch Biegen umgeformt wird,  
wobei die Bewegungen der Maschinenachsen jeweils gemäß einem durch die Steuereinrichtung der Biegemaschine vorgebbaren Bewegungsprofil erzeugt werden und mindestens eine zu einer Schwingung des freien Endabschnitts des Biegeteils führende schwingungsrelevante Bewegung umfassen,  
**dadurch gekennzeichnet,**  
**dass** während einer schwingungsrelevanten Bewegung in mindestens einem Kompensationszeitintervall eine die Schwingungserzeugung vermindernde und/oder eine Schwingungsenergie aus dem schwingenden Endabschnitt abziehende Kompensationsbewegung erzeugt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, worin eine bei einer schwingungsrelevanten Bewegung aktive Maschinenachse so gesteuert wird, dass zu Beginn des Kompensationszeitintervalls eine positive oder negative Beschleunigung derart erzeugt wird, dass sich eine Verringerung einer Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der momentanen Bewegungsgeschwindigkeit der Maschinenachse und der korrespondierenden momentanen Bewegungsgeschwindigkeit des schwingenden freien Endabschnitts des Werkstücks im Vergleich zur Geschwindigkeitsdifferenz ohne die Kompensationsbewegung ergibt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, worin eine bei einer schwingungsrelevanten Bewegung aktive Maschinenachse so gesteuert wird, dass ein Beginn eines Kompensationszeitintervalls (KZI) bezogen auf den zeitlichen Verlauf der Schwingungsbewegung innerhalb eines ersten Zeitintervalls (ZI1) zwischen einem Zeitpunkt maximaler Auslenkung der Schwingungsbewegung und dem unmittelbar nachfolgenden Zeitpunkt maximaler Schwingungsgeschwindigkeit liegt.
4. Verfahren nach Anspruch 3, worin die maximale Auslenkung eine maximale Auslenkung in Vorwärtsrichtung der Bewegung der Maschinenachse ist und die Kompensationsbewegung der Maschinenachse mit einer Phase negativer Beschleunigung beginnt, wobei vorzugsweise eine Kompensationsbewegung mit negativer Beschleunigung zeitlich kurz vor Erreichen des Endpunktes der Bewegung derart beginnt, dass die Maschinenachse nach der negativen Beschleunigung den Endpunkt ohne nochmalige substantielle positive Beschleunigung unmittelbar anstrebt.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, worin die maximale Auslenkung eine maximale Auslenkung in Rückwärtsrichtung der Bewegung der Maschinenachse ist und die Kompensationsbewegung der Maschinenachse mit einer Phase positiver Beschleunigung beginnt, wobei vorzugsweise eine Kompensationsbewegung mit positiver Beschleunigung in einer Bewegungsphasen der Maschinenachse stattfindet, in der die Bewegung der Maschinenachse schneller wird, insbesondere in der Anfangsphase einer Biegeoperation.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin die Maschinenachse eine Rotationsachse für eine Drehbewegung eines Teils des Biegewerkzeugs (130) ist, wobei vorzugsweise die Biegegeschwindigkeit in einem ersten Zeitintervall (ZI1) um mindestens 50 % reduziert wird.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin unter Verwendung von Geometriedaten eines Biegeprozesses und Werkstückdaten Eigenfrequenzdaten errechnet werden, die eine oder mehrerer Eigenfrequenzen des schwingungsfähigen freien Endabschnitts des Werkstücks für eine oder mehrere aufeinanderfolgende Phasen, insbesondere für alle Phasen des Biegeprozesses repräsentieren, wobei vorzugsweise worin die zeitliche Lage des Beginns eines Kompensationszeitintervalls unter Verwendung der Eigenfrequenzdaten und Daten über die Phasenlage der Schwingung zu einem zeitlich früher liegenden, definierten Referenzzeitpunkt gesteuert wird, wobei

vorzugsweise der Referenzzeitpunkt der Zeitpunkt des Beginns einer Beschleunigungsbewegung nach einem Rastpunkt der Bewegung einer Maschinenachse, insbesondere der Beginn der Beschleunigungsbewegung eines Biegestifts nach einem Anlegen des Biegestifts an das Werkstück, ist.

- 5 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin ein zeitlicher Verlauf der Schwingungsbewegung mittels mindestens eines Schwingungserfassungssystems erfasst wird, das vorzugsweise mindestens einen Schwingungssensor aufweist, der ein mindestens die Phasenlage und die Frequenz der Schwingungsbewegung repräsentierendes Schwingungssignal erzeugt, wobei vorzugsweise die Steuereinrichtung das Schwingungssignal zur Steuerung des Bewegungsprofils der die Kompensationsbewegung ausführenden Maschinenachse verarbeitet, insbesondere derart, dass die Steuereinrichtung mittels des Schwingungssignals die zeitliche Lage des Beginns eines Kompensationszeitintervalls steuert.
- 10 9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin im Kompensationszeitintervall mindestens ein Wechsel zwischen einer Phase mit negativer Beschleunigung, einer nachfolgenden Phase mit positiver Beschleunigung und einer nachfolgenden Phase mit negativer Beschleunigung erzeugt wird, wobei die Phasen vorzugsweise ohne abrupten Wechsel zwischen Geschwindigkeitssteigerung und Geschwindigkeitsreduzierung ineinander übergehen, insbesondere derart, dass sich im Kompensationszeitintervall ein annähernd sinusförmiger Verlauf der Bewegungsgeschwindigkeit mit mehrfachem Wechsel zwischen positiver und negativer Beschleunigung ergibt, vorzugsweise mit abnehmender Amplitude.
- 15 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin eine bei einer schwingungsrelevanten Bewegung aktive Maschinenachse so gesteuert wird, dass ein Bewegungsprofil der schwingungsrelevanten Bewegung zwischen einem Anfangspunkt und einem Endpunkt der Bewegung einem Bewegungsgesetz folgt, welches im Wesentlichen einer mathematisch glatten Funktion entspricht, so dass für die Bewegungsgeschwindigkeit und für die Beschleunigung der Bewegung keine abrupte Wechsel, insbesondere keine Sprünge, stattfinden, wobei vorzugsweise während der gesamten schwingungsoptimierten Bewegung sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung kontinuierlich variiert, wobei insbesondere die Geschwindigkeitsfunktion zwischen Anfangspunkt und Endpunkt einen Maximalwert erreicht und die Beschleunigungsfunktion zwischen Anfangspunkt und Endpunkt einen Nulldurchgang von positiven zu negativen Beschleunigungen durchläuft und/oder wobei ein Beschleunigungsverlauf zu Beginn der Bewegung mit sehr geringer Steigung sanft verrundet beginnt.
- 20 11. Vorrichtung zur Herstellung eines Biegeteils durch zwei- oder dreidimensionales Biegen eines langgestreckten Werkstücks (120), insbesondere eines Drahtes oder eines Rohres, wobei die Vorrichtung mehrere Maschinenachsen, eine Steuereinrichtung (160) zur koordinierten Ansteuerung von Bewegungen der Maschinenachsen und mindestens ein Biegewerkzeug (130) zur Durchführung einer Biegeoperation an dem Werkstück (120) aufweist, wobei Bewegungen von Maschinenachsen gemäß einem durch die Steuereinrichtung vorgebbaren Bewegungsprofil erzeugbar sind, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Vorrichtung dafür eingerichtet ist, während einer schwingungsrelevanten Bewegung in mindestens einem Kompensationszeitintervall eine die Schwingungserzeugung verminderte und/oder eine dem Werkstück Schwingungsenergie entziehende Kompensationsbewegung zu erzeugen.
- 25 12. Vorrichtung nach Anspruch 11, worin die Steuereinrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10 konfiguriert ist.
- 30 13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, worin die Vorrichtung zur Erfassung eines zeitlichen Verlauf der Schwingungsbewegung ein Schwingungserfassungssystem aufweist, das vorzugsweise mindestens einen an die Steuereinrichtung (160) angeschlossenen, vorzugsweise als Kraftsensor zur Erfassung der am Biegewerkzeug (130) wirksamen Biegekraft ausgebildeten, Schwingungssensor (170, 180) aufweist, der ein mindestens die Phasenlage und die Frequenz der Schwingungsbewegung repräsentierendes Schwingungssignal erzeugt, wobei vorzugsweise die Steuereinrichtung dafür eingerichtet ist, das Schwingungssignal zur Steuerung des Bewegungsprofils der die Kompensationsbewegung ausführenden Maschinenachse zu verarbeiten, insbesondere derart, dass die Steuereinrichtung mittels des Schwingungssignals die zeitliche Lage des Beginns eines Kompensationszeitintervalls (KZI) steuert.
- 35 14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 13, **gekennzeichnet durch** eine Schwingungskompensationsregelung, die dafür konfiguriert ist, während mindestens einer schwingungsrelevanten Bewegung die Schwingungsbewegungen des Werkstücks (120) mit Hilfe mindestens eines, vorzugsweise als Kraftsensor zur Erfassung der am Biegewerkzeug (130) wirksamen Biegekraft ausgebildeten, Schwingungssensors (170, 180) zu erfassen, aus Signalen des Schwingungssensors zumindest die Phasenlage und die Frequenz der Schwingung zu ermitteln und
- 40 45 50 55

an die Steuereinrichtung (150) derart rückzukoppeln, dass die Steuereinrichtung einen oder mehrere Antriebe der für die schwingungsrelevanten Bewegungen maßgeblichen Maschinenachsen so steuert, dass die für einen Schwingungsenergieentzug und/oder für eine Schwingungsunterdrückung erforderlichen positiven oder negativen Beschleunigungen zum richtigen Zeitpunkt in Bezug auf die Phase der Schwingungsbewegung eingeleitet werden.

- 5
15. Computerprogrammprodukt, welches insbesondere auf einem computerlesbaren Medium gespeichert oder als Signal verwirklicht ist, wobei das Computerprogrammprodukt, wenn es in den Speicher eines geeigneten Computers geladen und von einem Computer ausgeführt ist bewirkt, dass der Computer ein Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10 durchführt.
- 10

15

20

25

30

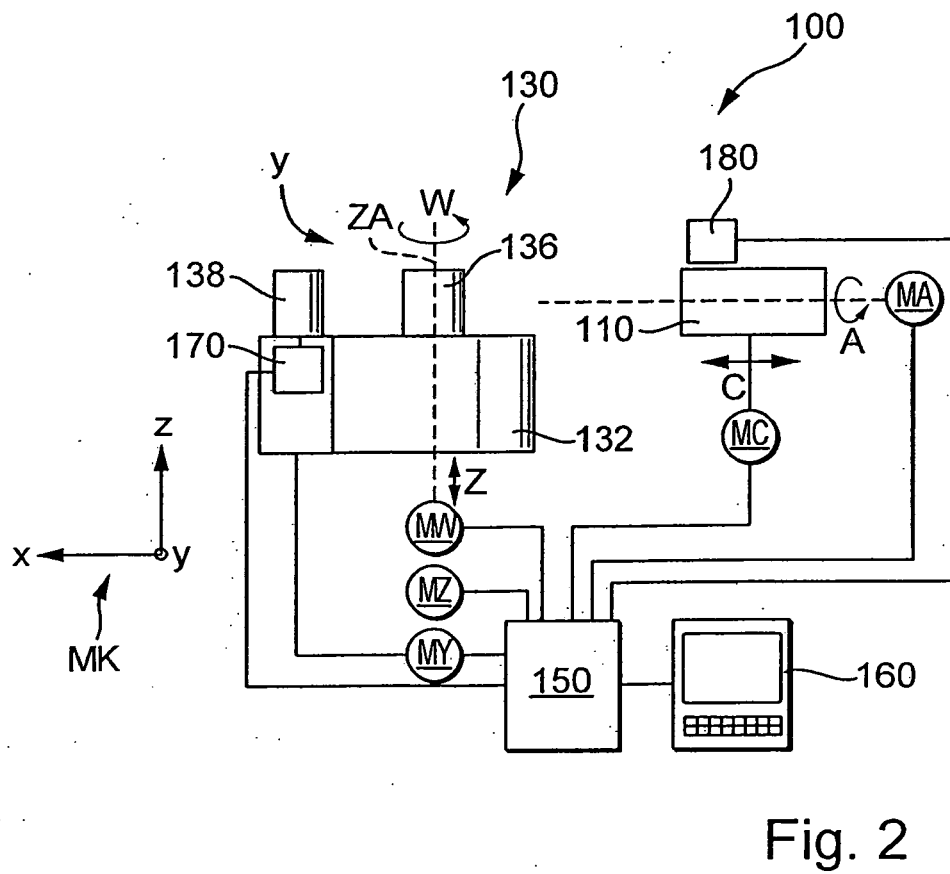
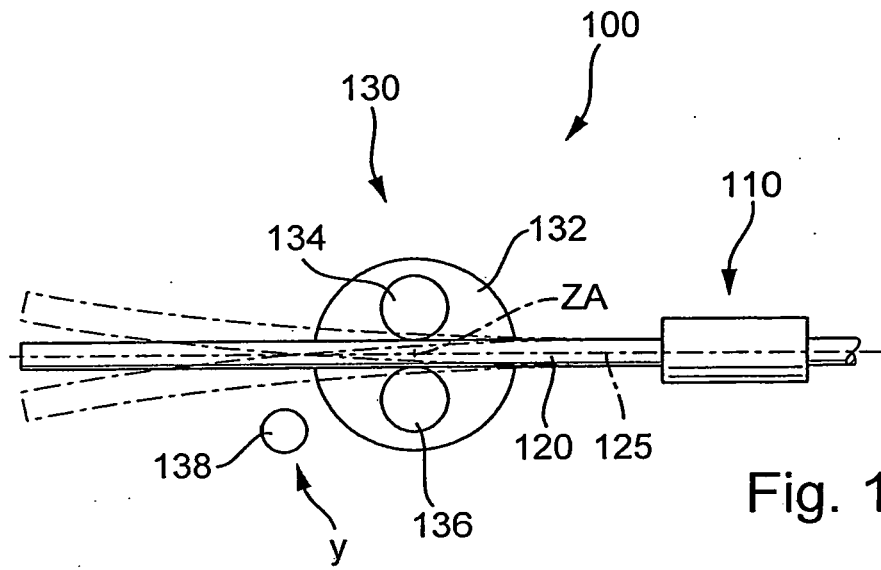
35

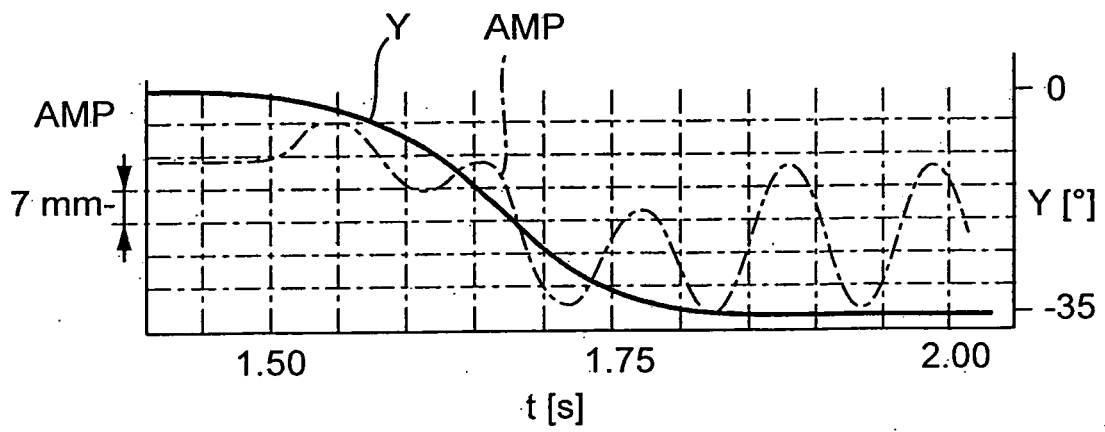
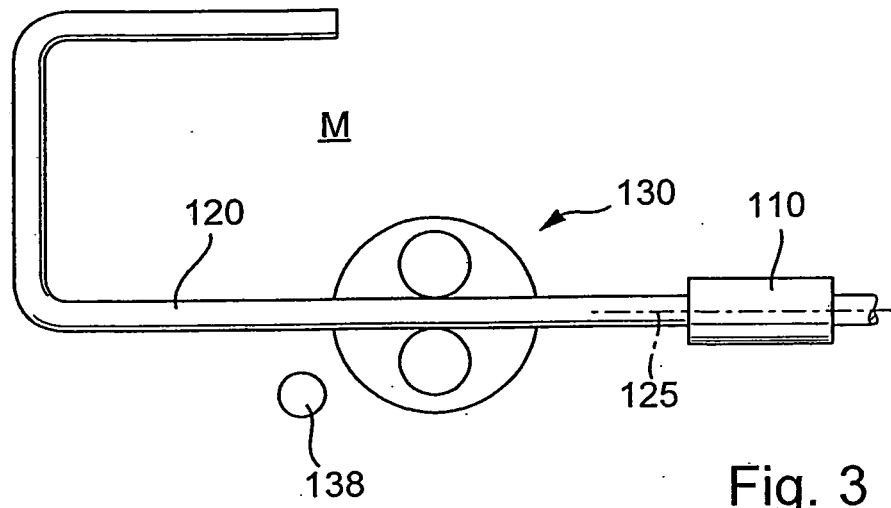
40

45

50

55





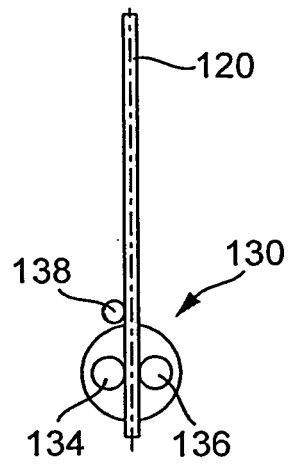


Fig. 4A

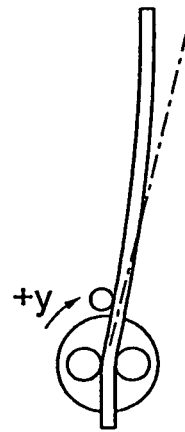


Fig. 4B

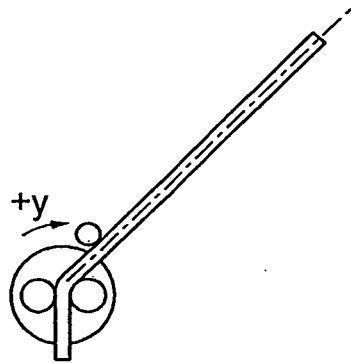


Fig. 4C

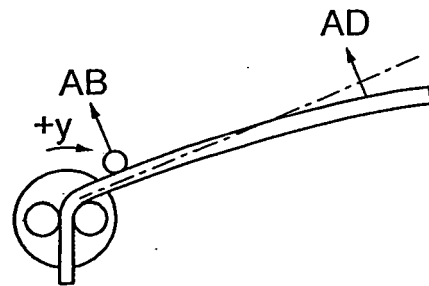


Fig. 4D

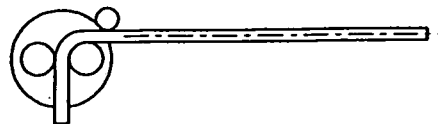


Fig. 4E



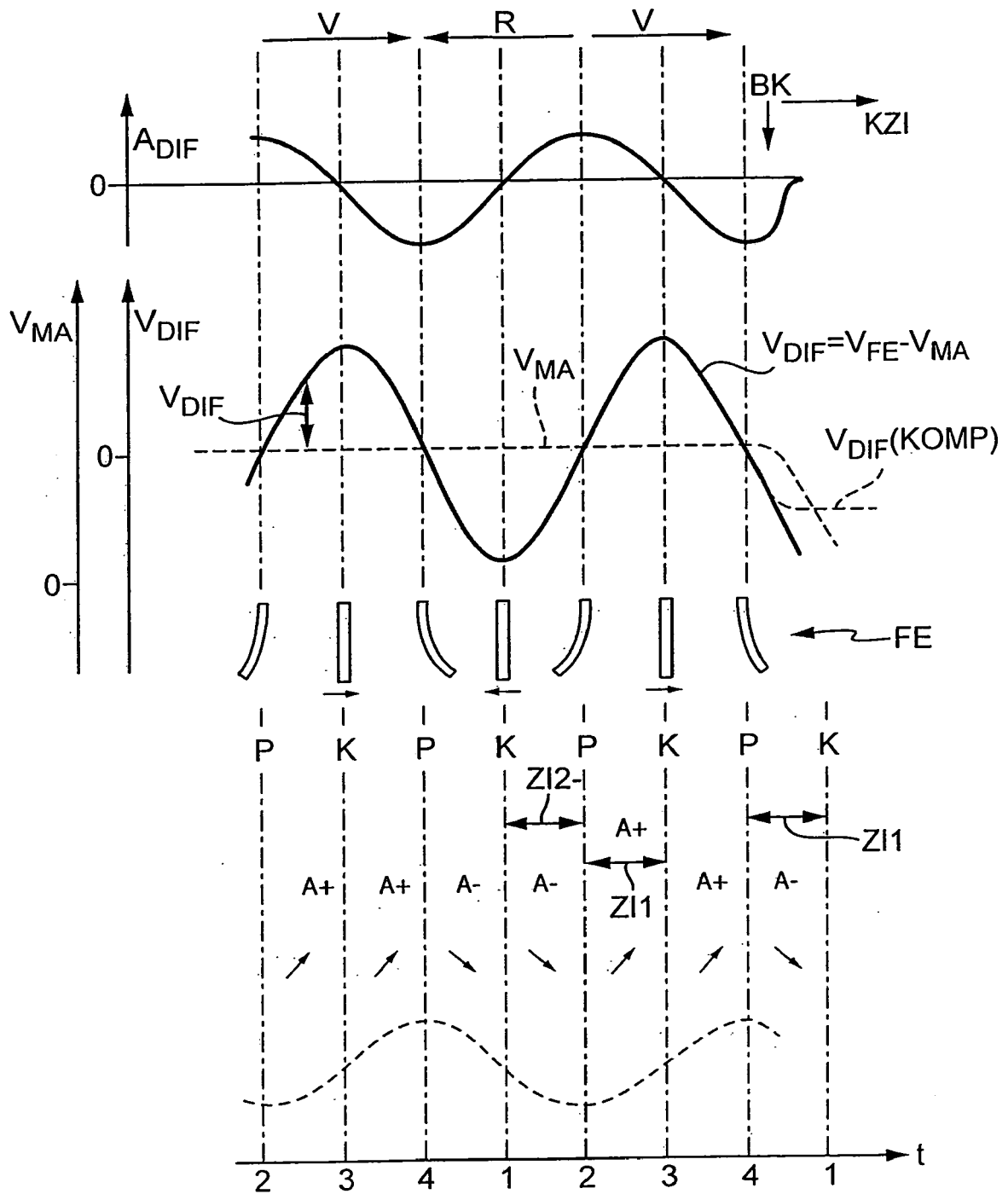


Fig. 6.

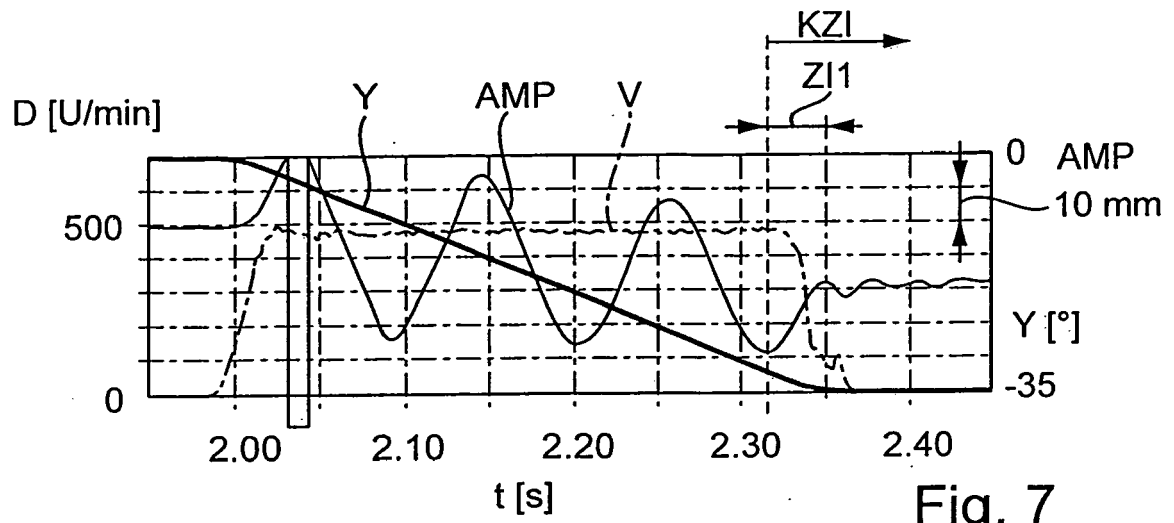


Fig. 7

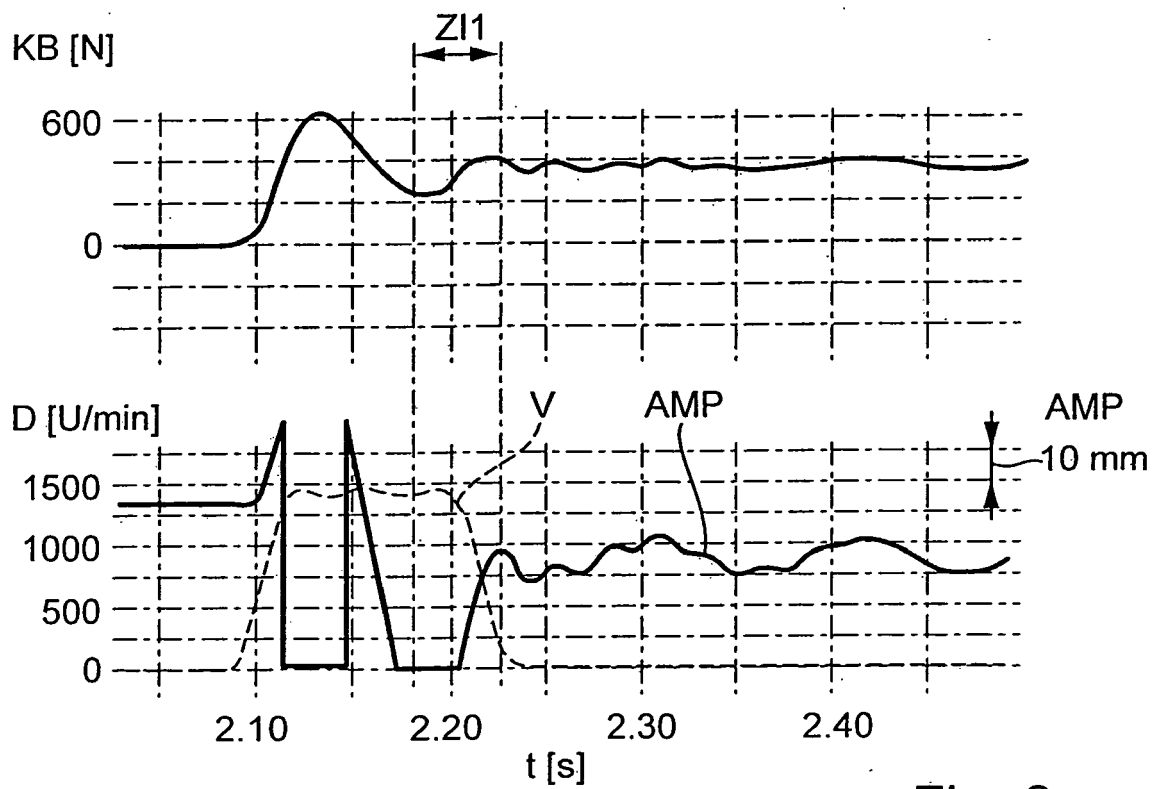


Fig. 8

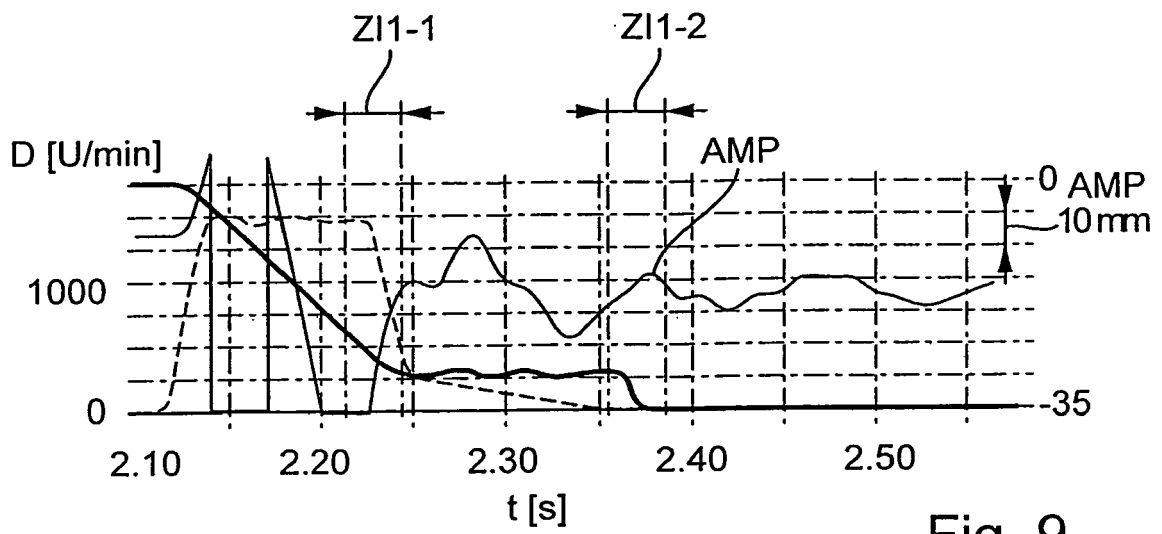


Fig. 9

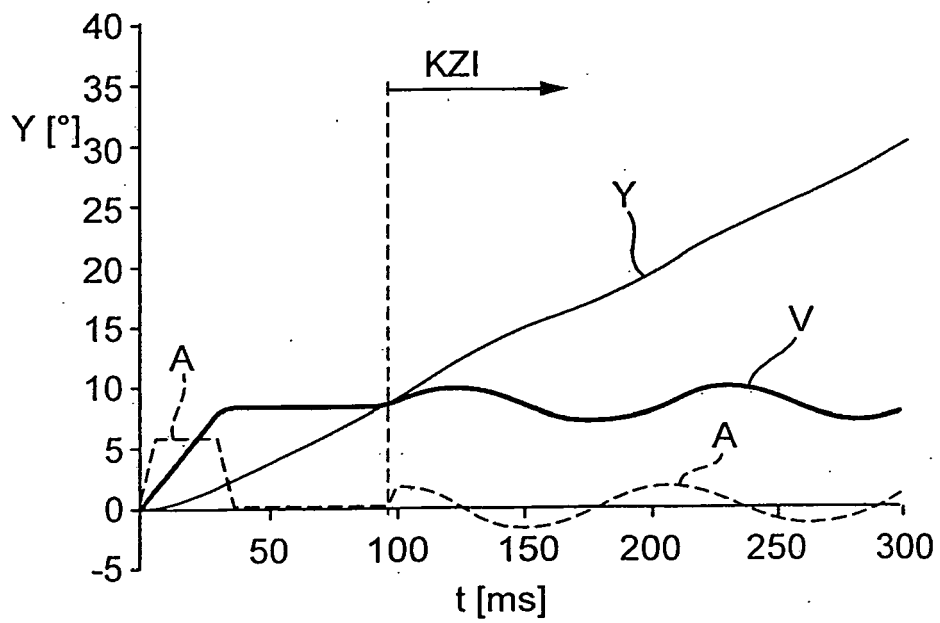


Fig. 10

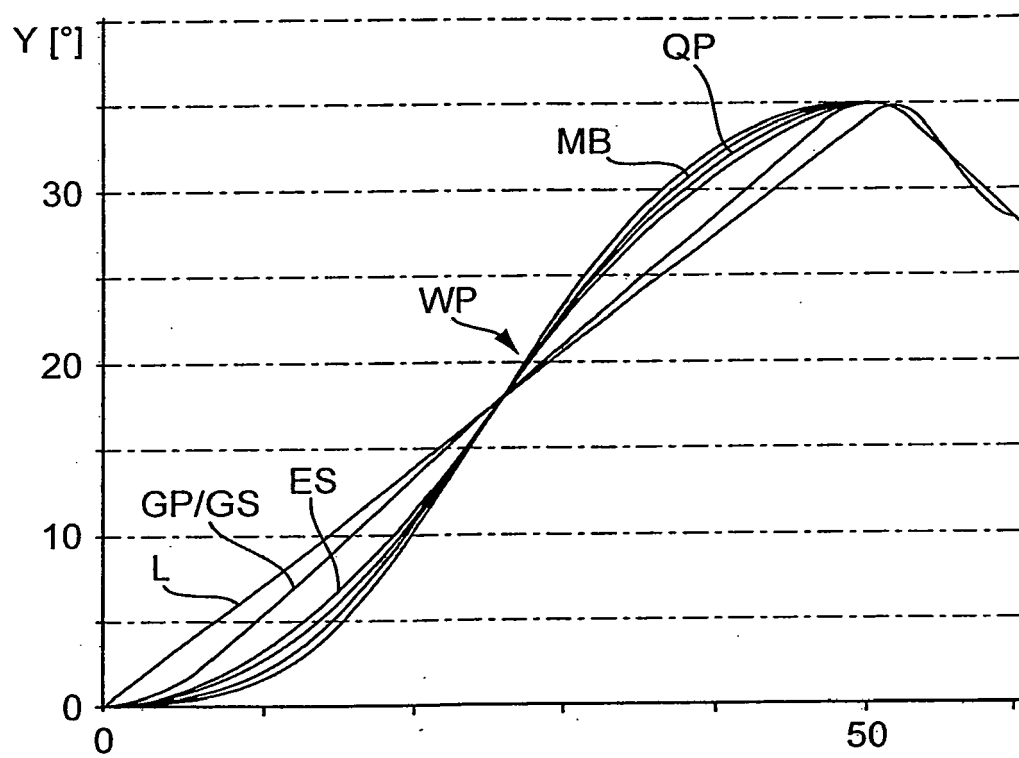


Fig. 11



## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung  
EP 10 01 5530

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	DE 198 30 962 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 13. Januar 2000 (2000-01-13) * Spalte 1, Zeile 3 - Zeile 12 * * Spalte 2, Zeile 52 - Zeile 65; Abbildungen 1,2 *	1,11	INV. B21F1/00 B21D7/12
A	DE 198 35 190 A1 (MEGATRONIC SCHWEISMASCHINENBAU [DE]) 17. Februar 2000 (2000-02-17) * Spalte 1, Zeile 3 - Zeile 56; Abbildungen 1-6 *	1,11	
A	JP 2009 214160 A (MIZUSHIMA GENERAL SERVICE KK) 24. September 2009 (2009-09-24) * Zusammenfassung; Abbildungen 1-7 *	1	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			B21F B21D
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>München</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>11. Mai 2011</b>	Prüfer <b>Ritter, Florian</b>
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

 1  
EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 10 01 5530

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

11-05-2011

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 19830962	A1	13-01-2000	KEINE	
DE 19835190	A1	17-02-2000	KEINE	
JP 2009214160	A	24-09-2009	KEINE	

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82