



(11)

EP 3 960 309 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
02.03.2022 Patentblatt 2022/09

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B06B 1/02 ^(2006.01) **B06B 1/04** ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **20193664.8**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
B06B 1/0261; B06B 1/045; B06B 2201/72

(22) Anmeldetag: 31.08.2020

(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
 Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(72) Erfinder:

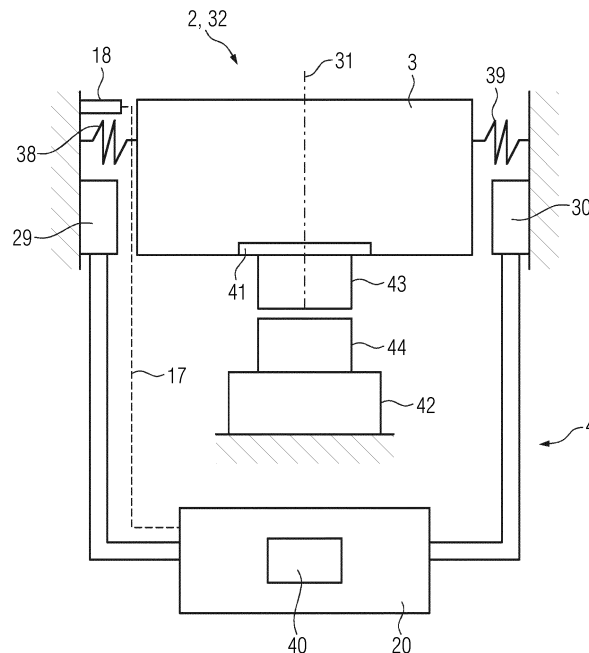
- **Fritsch, Christoph**
96178 Pommersfelden (DE)
- **Richter, Theo**
91301 Forchheim (DE)
- **Streubühr, Martin**
90513 Zirndorf (DE)
- **Wedel, Bernd**
91096 Möhrendorf (DE)

(71) Anmelder: **Siemens Aktiengesellschaft**
80333 München (DE)

(54) **RESONANZVERFAHREN FÜR EIN SCHWINGUNGSSYSTEM, EINEN UMRICHTER, EINE ANREGUNGSEINHEIT UND DAS SCHWINGUNGSSYSTEM**

(57) Die Erfindung betrifft ein Resonanzverfahren (1) für ein Schwingungssystem (2) zum resonanten Schwingen einer Anregungseinheit (4) mit einer Schwingungsmasse (3), aufweisend die Schritte einer Auslenkungserfassung (5) einer Auslenkung (x) der Schwingungsmasse (3), einer Geschwindigkeitsbildung (6) einer Geschwindigkeit (v) der Schwingungsmasse (3) mittels Differenzierung der Auslenkung (x), einer Phasenlageerzeugung (7) einer mechanischen Phasenlage (θ_m) mittels der Auslenkung (x) und der Geschwindigkeit (v), einer Phasenlagekorrektur (8) der mechanischen Phasenlage (θ_m) mittels eines Korrekturwerts (k_ϕ) zu einer korrigierten Phasenlage (θ_k), einer Frequenzbildung (9) einer elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}) mittels zumindest einer P-Reglung auf Basis der korrigierten Phasenlage (θ_k), einer Phasenlagebildung (10) einer elektrischen Phasenlage (θ_{el}) mittels Integration auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}), einer Faktorbildung (11) eines Korrekturfaktors (k_F) mittels einer trigonometrischen Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage (θ_{el}) und einer Sollwertbeaufschlagung (12) eines Anregungssollwerts (13) mit dem Korrekturfaktor (k_F) zur Erzeugung eines korrigierten Anregungssollwerts (14). Ferner betrifft die Erfindung einen Umrichter (20), das Schwingungssystem (2) mit der Anregungseinheit (4) und der Schwingungsmasse (3).

FIG 3



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Resonanzverfahren für ein Schwingungssystem zum resonanten Schwingen einer Anregungseinheit mit einer Schwingungsmasse. Weiterhin betrifft die Erfindung einen Umrichter, die Anregungseinheit und das Schwingungssystem.

[0002] Industrielle Anwendungen mit einer elektromechanischen Anregungseinheit zum Erzeugen von Schwingungen einer Schwingungsmasse, bei denen ein schwingfähiges System, im Weiteren Schwingungssystem genannt, mit der Schwingungsmasse im Bereich einer Resonanzfrequenz angeregt werden soll, bedürfen grundsätzlich einer Ermittlung bzw. Abschätzung dieser Resonanzfrequenz bzw. der Herstellung des Zustands des resonanten Schwingens von Anregungseinheit und der in Schwingungen zu versetzenden Schwingungsmasse, um das Betriebsverhalten des Schwingungssystems energieeffizient, zuverlässig und aufwandsarm steuern bzw. regeln zu können.

[0003] Dabei umfasst die Anregungseinheit üblicherweise Elektromagneten, welche mittels elektrischer Umrichter betreibbar sind, und die Schwingungsmasse basierend auf einer induktiven Energieübertragung in Schwingungen versetzen.

[0004] Selbst geringe Abweichungen beim resonanten Schwingen von Anregungseinheit und Schwingungsmasse können zu erheblichen Einbußen bei der Energieeffizienz/ dem Wirkungsgrad bzw. der Güte des angestrebten Betriebsverhaltens/ der Zuverlässigkeit der jeweiligen Anwendung führen.

[0005] So bedingt die bisher separat zum eigentlichen Betrieb auszuführende Ermittlung der Resonanzfrequenz bzw. des eingeschwungenen, resonanten Schwingungszustands von Anregungseinheit und Schwingungsmasse bei entsprechenden Maschinen und Geräten im Produktionseinsatz oftmals erhebliche Stillstandszeiten, die grundsätzlich einen zusätzlichen Aufwand zum jeweiligen Produktionsprozess erfordern und somit auch nicht zu vernachlässigende Kosten verursachen.

[0006] Ein solches Schwingungssystem wird beispielsweise als Reibschweißmaschine oder Schwingförderer eingesetzt.

[0007] Am Beispiel der Reibschweißmaschine kann der prinzipielle Prozess eines derartigen Schwingungssystems kurz umrissen werden. Zum Verschweißen eines ersten Werkstücks mit einem zweiten Werkstück wird die Schwingungsmasse, welche einen ersten Werkstückträger und das damit verbundenen ersten Werkstück aufweist, mittels einer Anregungseinheit in erzwungene Schwingungen versetzt. Die Schwingungsmasse ist in der Regel mittels einer Federvorrichtung schwingbar gelagert.

[0008] Zur Erzeugung der Reibungswärme für diesen Produktionsprozess wird das erste Werkstück an dem zweiten Werkstück, welches mit einem im Allgemeinen feststehenden zweiten Werkstückträger verbunden ist,

bis zum Verschweißen gerieben.

[0009] Erfolgt diese Anregung mit der Resonanzfrequenz, also in Schwingungsresonanz zwischen Anregungseinheit und Schwingungsmasse, lässt sich die gewünschte Schwingung mit einem besonders niedrigem Energieaufwand erzeugen.

[0010] Diese Resonanzfrequenz des Schwingungssystems wird maßgeblich durch die Schwingungsmasse, welche hier das erste Werkstück umfasst, und der schwingungsfähigen Lagerung der Schwingungsmasse, also der Federsteifigkeit der verwendeten Federvorrichtung bestimmt.

[0011] Da das erste Werkstück zur Schwingungsmasse beiträgt, ist nach einem Werkstückwechsel des ersten Werkzeugs, sofern sich insbesondere die Masse des ersten Werkstücks ändert, ein erneutes Bestimmen der Resonanzfrequenz, also des resonanten Schwingungszustands von Anregungseinheit und Schwingungsmasse zwingend und mit erheblichem Aufwand erforderlich.

[0012] Andernfalls arbeitet das Schwingungssystem insbesondere energetisch nicht optimal, wodurch sich dessen Wirkungsgrad stark verringert bzw. ggf. auch die gewünschte Schwingamplitude nicht erreicht werden kann und die geforderte Schweißqualität eher mangelhaft wird.

[0013] Bisherige Anwendungen, wie die des Reibschweißens, verwenden überwiegend präoperative Methoden zur Ermittlung/Abschätzung der Resonanzfrequenz, um anschließend damit die Schwingungsmasse mittels der Anregungseinheit anzuregen und den geforderten resonanten Schwingungszustand von Anregungseinheit und Schwingungsmasse zu erreichen.

[0014] So wird die gesuchte Resonanzfrequenz mittels eines eigenständigen Hochlaufversuchs vor dem eigentlichen Produktionsprozess ermittelt und danach damit betrieht, bis eine erneuter Hochlaufversuch aufgrund des Einsatzes eines neuen ersten Werkstücks notwendig wird oder zwischenzeitlich auftretende unerwünschte Abweichungen beim Produktionsprozess eine Korrektur notwendig machen.

[0015] Das bedeutet, dass hier die Anregung der Schwingung nur auf Basis der durch den Hochlaufversuch ermittelten Frequenz erfolgt, welche die im tatsächlichen Produktionsprozess geforderte Resonanzfrequenz für den resonanten Schwingungszustand von Anregungseinheit und Schwingungsmasse, welche sich aufgrund von Verschleiß, Temperaturunterschieden, Materialabtrag etc. auch während des Betriebs im Produktionsprozess ändern kann, oftmals nur unzureichend trifft.

[0016] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Resonanzverfahren, einen Umrichter, eine Anregungseinheit und ein Schwingungssystem vorzuschlagen, welche einen erforderlichen resonanten Schwingungszustand zur resonanten Schwingung von der Anregungseinheit mit einer Schwingungsmasse des Schwingungssystems während des Produktionsbetriebs kontinuierlich ermitteln und das Schwingungssystem da-

mit betrieben wird.

[0017] Die Aufgabe wird durch ein Resonanzverfahren mit den in Anspruch 1 angegebenen Merkmalen, durch einen Umrichter nach den in Anspruch 9 angegebenen Merkmalen, durch eine Anregungseinheit mit dem Umrichter nach den in Anspruch 12 angegebenen Merkmalen und ein Schwingungssystem mit der Anregungseinheit nach den in Anspruch 14 angegebenen Merkmalen gelöst.

[0018] Für die Lösung der Aufgabe wird ein Resonanzverfahren für ein Schwingungssystem zum resonanten Schwingen einer Anregungseinheit mit einer Schwingungsmasse vorgeschlagen, aufweisend die Schritte einer Auslenkungserfassung einer Auslenkung der Schwingungsmasse, einer Geschwindigkeitsbildung einer Geschwindigkeit der Schwingungsmasse mittels Differenzierung der Auslenkung, einer Phasenlageerzeugung einer mechanischen Phasenlage mittels der Auslenkung und der Geschwindigkeit, einer Phasenlagekorrektur der mechanischen Phasenlage mittels eines Korrekturwerts zu einer korrigierten Phasenlage, einer Frequenzbildung einer elektrischen Kreisfrequenz mittels zumindest einer P-Reglung auf Basis der korrigierten Phasenlage, einer Phasenlagebildung einer elektrischen Phasenlage mittels Integration auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz, einer Faktorbildung eines Korrekturfaktors mittels einer trigonometrischen Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage und einer Sollwertbeaufschlagung eines Anregungssollwerts mit dem Korrekturfaktor zur Erzeugung eines korrigierten Anregungssollwerts.

[0019] Das Verfahren basiert in vorteilhafter Weise auf der gedanklichen Einschränkung der Bewegungsfreiheit (dem Freiheitsgrad) der Schwingungsmasse und auf deren Resonanzfrequenz (hier der elektrischen Kreisfrequenz) gegenüber der Anregungseinheit.

[0020] Die Istposition der mittels der Auslenkungserfassung erfassten Auslenkung der Schwingungsmasse wird dazu in einen Vektor überführt, die Abszisse ist die erfasste Auslenkung und die Ordinate ist die mittels der Geschwindigkeitsbildung gebildete Geschwindigkeit der Schwingungsmasse als Differenzierung der Auslenkung gemäß der Formel

$$v(t) = \frac{dx}{dt}$$

wobei v die Geschwindigkeit, x die erfasste Auslenkung und t die Zeit ist.

[0021] Die durch die Phasenlageerzeugung erzeugte mechanische Phasenlage ergibt sich beispielsweise vorteilhaft mittels einer arctan2-Funktion auf Basis der Auslenkung und der Geschwindigkeit gemäß der Formel

$$\theta_m = \arctan2(x, v)$$

wobei θ_m die mechanische Phasenlage, v die Geschwin-

digkeit und x die Auslenkung ist.

[0022] In bevorzugter Weise wird als Geschwindigkeit eine normierte Geschwindigkeit zur Erzeugung der mechanischen Phasenlagen gewählt.

[0023] Mittels der Phasenlagekorrektur der mechanischen Phasenlage ergibt sich kontinuierlich in vorteilhafter Weise durch einen Korrekturwert die korrigierte Phasenlage.

[0024] Für die Frequenzbildung der elektrischen Kreisfrequenz kann anstatt der P-Reglung (mit Verstärkungsanteil K_p) auch eine PI-Reglung (mit Verstärkungsanteil K_p und Integralanteil I) oder auch eine PID-Reglung (mit Verstärkungsanteil K_p , Integralanteil I und Differenzierungsanteil D) auf Basis der korrigierten Phasenlage eingesetzt werden, was die P-Reglung qualitativ im Sinne mehr Regelungsqualität erhöhen kann.

[0025] Die sich bildende elektrische Kreisfrequenz ist dabei auch als aktuelle Schwingfrequenz (angeforderte Resonanzfrequenz) bzw. letzte aktuelle Schwingfrequenz (letzte angeforderte Resonanzfrequenz) zu verstehen. Ein gezieltes Einlernen der Regelung ist somit nicht notwendig.

[0026] Für die Phasenlagebildung der elektrischen Phasenlage wird in vorteilhafter Weise die elektrische Kreisfrequenz integriert.

[0027] Die Faktorbildung des Korrekturfaktors erfolgt mittels der trigonometrischen Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage, beispielsweise durch eine Sinus-Funktion gemäß der Formel

$$k_F = \sin(\theta_{el})$$

wobei k_F der Korrekturfaktor und θ_{el} die elektrische Phasenlage ist.

[0028] Mittels der Sollwertbeaufschlagung wird der Anregungssollwerts als elektrischer Wert für eine schwingungserzeugende Kraft der Anregungseinheit zur Anregung der Schwingungsmasse mit dem Korrekturfaktor vorteilhaft korrigiert, derart, dass für die zu erzielende resonante Schwingung von Anregungseinheit und Schwingungsmasse ein korrigierter elektrischer Wert für die schwingungserzeugende Kraft als korrigierter Anregungssollwert erzeugt wird.

[0029] Mit diesem korrigierter Anregungssollwert wird beispielsweise ein Elektromagnet von der Anregungseinheit elektrisch angeregt, was die entsprechende resonante Schwingung von Anregungseinheit und Schwingungsmasse erzeugt.

[0030] Vorteilhafte Ausgestaltungsformen des Resonanzverfahrens sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0031] Bei einer ersten vorteilhaften Ausgestaltungsform des Resonanzverfahrens weist das Resonanzverfahren den Schritt Geschwindigkeitsnormierung der Geschwindigkeit mittels der elektrischen Kreisfrequenz zu einer normierten Geschwindigkeit auf, wobei die Geschwindigkeit durch die elektrische Kreisfrequenz divi-

diert wird.

[0032] Um die Geschwindigkeit in vorteilhafter Weise auf die elektrische Kreisfrequenz abzubilden, wird die Geschwindigkeit auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz in die normierte Geschwindigkeit überführt gemäß der Formel

$$v_n(t) = \frac{1}{\omega_{el}} * \frac{dx}{dt}$$

wobei v_n die normierte Geschwindigkeit, ω_{el} die elektrische Kreisfrequenz, x die Auslenkung und t die Zeit ist.

[0033] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform des Resonanzverfahrens ist zur Phasenlagekorrektur der Korrekturwert die rückgeführte elektrische Phasenlage und wird vorzugsweise die rückgeführte elektrische Phasenlage von der mechanischen Phasenlage subtrahiert.

[0034] Somit stellt sich aus Sicht der Regelung eine ausgeglichene Phasenlage ein, wobei die mechanische Phasenlage solange korrigiert wird, bis die korrigierten Phasenlage einen Wert von annähernd 0 annimmt.

[0035] Die in einer Regelungsschleife zur mechanischen Phasenlage als Korrekturwert zurückgeführte elektrische Phasenlage kann auch unter Berücksichtigung der Vorzeichen der mechanischen Phasenlage und der elektrischer Phasenlage auf die mechanische Phasenlage addiert werden.

[0036] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform des Resonanzverfahrens wird zur Verfahrensinitalisierung eine initiale Kreisfrequenz vorgegeben oder die letzte bekannte elektrische Kreisfrequenz verwendet.

[0037] Um das Resonanzverfahren z.B. bei dessen Start zu initialisieren, kann bei der Verfahrensinitalisierung bevorzugt die initiale Kreisfrequenz als z.B. ein Parameter vorgegeben werden, welcher auch schon der gewünschten Resonanzfrequenz entsprechen kann.

[0038] Es ist ebenso vorteilhaft möglich, z.B. bei Störungen oder einem Neuaufsetzen der Regelung nach einem Ausfall des Resonanzverfahrens, auf die letzte bekannt elektrische Kreisfrequenz zurückzugreifen.

[0039] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform des Resonanzverfahrens ist die mechanische Phasenlage insbesondere zwischen einer Auslenkungsamplitude der Auslenkung und der Geschwindigkeit oder zwischen einer Auslenkungsamplitude der Auslenkung und der Auslenkung bestimmt.

[0040] Die Auslenkungsamplitude kann ermittelt werden gemäß der Formel

$$x_a = \sqrt{x^2 + v^2}$$

wobei x_a die Auslenkungsamplitude, x die Auslenkung und v die Geschwindigkeit ist.

[0041] In bevorzugter Weise wird als Geschwindigkeit

die normierte Geschwindigkeit zur Ermittlung der Auslenkungsamplitude gewählt.

[0042] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform des Resonanzverfahrens wird zur Auslenkungserfassung ein Auslenkungssignal von einer Auslenkungsmessvorrichtung erfasst und das Auslenkungssignal in Abhängigkeit vom Einbauort der Auslenkungsmessvorrichtung gegenüber der Schwingungsmasse um einen Gleichanteil korrigiert, wobei der Gleichanteil durch einen Gleichanteilparameter vorgegeben oder durch einen Gleichanteilhochpass ermittelt wird.

[0043] Die Auslenkungsmessvorrichtung misst dabei die Auslenkung der Schwingungsmasse gegenüber einer Ruheposition der Schwingungsmasse und stellt die Auslenkung in dem Auslenkungssignal für eine Weiterverarbeitung dem Resonanzverfahren bereit.

[0044] Mittels des Gleichanteilparameter oder des Gleichanteilhochpasses kann eine Korrektur des mit dem Auslenkungssignal behafteten Auslenkungsmesswerts der Auslenkung bzgl. des Einbauortes der Auslenkungsmessvorrichtung vorgenommen werden.

[0045] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform des Resonanzverfahrens ist der Anregungssollwert ein Sollstrom und der korrigierte Anregungssollwert ein korrigierter Sollstrom.

[0046] Der Anregungssollwert als elektrischer Wert für die schwingungserzeugende Kraft und der korrigierte Anregungssollwert als korrigierter elektrischer Wert für die schwingungserzeugende Kraft zur Ansteuerung der Elektromagneten, z.B. mittels eines elektrischen Umrichters, ist jeweils in vorteilhafter Weise als Sollstrom zur Erzeugung einer kraftbildenden Schwingungsanregung ausgebildet. Grundsätzlich ist dazu jeweils auch eine entsprechende Sollspannung geeignet.

[0047] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform des Resonanzverfahrens wird zur Störungsüberwachung die elektrische Kreisfrequenz auf Störungen beim resonanten Schwingen von Anregungseinheit und Schwingungsmasse überwacht.

[0048] Die elektrische Kreisfrequenz kann dazu in vorteilhafter Weise durch eine Frequenzuntergrenze auf eine Unterschreitung der elektrischen Kreisfrequenz und oder eine Frequenzobergrenze auf eine Unterschreitung der elektrischen Kreisfrequenz überwacht werden.

[0049] Für die Lösung der Aufgabe wird weiterhin ein Umrichter vorgeschlagen, welcher ein Erfassungsmittel, ausgebildet zur Auslenkungserfassung einer Auslenkung der Schwingungsmasse, ein erstes Bildungsmittel, ausgebildet zur Geschwindigkeitsbildung einer Geschwindigkeit der Schwingungsmasse mittels Differenzierung der Auslenkung, ein Erzeugungsmittel, ausgebildet zur Phasenlageerzeugung einer mechanischen Phasenlage mittels der Auslenkung und der Geschwindigkeit, ein Korrekturmittel, ausgebildet zur Phasenlagekorrektur der mechanischen Phasenlage mittels eines Korrekturwerts zu einer korrigierten Phasenlage, ein zweites Bildungsmittel, ausgebildet zur Frequenzbildung einer elektrischen Kreisfrequenz mittels zumindest einer P-Reglung

auf Basis der korrigierten Phasenlage, ein drittes Bildungsmittel, ausgebildet zur Phasenlagebildung einer elektrischen Phasenlage mittels Integration auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz, ein viertes Bildungsmittel, ausgebildet zur Faktorbildung eines Korrekturfaktors mittels einer trigonometrischen Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage und ein Beaufschlagungsmittel, ausgebildet zur Sollwertbeaufschlagung eines Anregungssollwerts mit dem Korrekturfaktor zur Erzeugung eines korrigierten Anregungssollwerts aufweist.

[0050] Bei einer ersten vorteilhaften Ausgestaltungsform des Umrichters weist der Umrichter ein Normierungsmittel auf, ausgebildet zur Geschwindigkeitsnormierung der Geschwindigkeit mittels der elektrischen Kreisfrequenz zu einer normierten Geschwindigkeit, wobei die Geschwindigkeit durch die elektrische Kreisfrequenz dividierbar ist.

[0051] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform des Umrichters ist zur Phasenlagekorrektur als Korrekturwert die rückgeführte elektrische Phasenlage vorgesehen und ist vorzugsweise die rückgeführte elektrische Phasenlage von der mechanischen Phasenlage subtrahierbar.

[0052] Grundsätzlich ist der Umrichter dazu ausgebildet, das oben dargestellt erfindungsgemäße Resonanzverfahren auszuführen.

[0053] Für die Lösung der Aufgabe wird ebenfalls eine Anregungseinheit vorgeschlagen, welche mindestens einen Elektromagneten zur Anregung der Schwingungsmasse, den erfindungsgemäßen Umrichter zum Betrieb des mindestens einen Elektromagneten und eine Auslenkungsmessvorrichtung zur Messung der Auslenkung der Schwingungsmasse gegenüber einer Ruheposition der Schwingungsmasse aufweist.

[0054] Die mittels der Auslenkungsmessvorrichtung gemessene Auslenkung wird durch ein Auslenkungssignal an das Erfassungsmittel des Umrichters zur Auslenkungserfassung übertragen.

[0055] Bei einer vorteilhaften Ausgestaltungsform der Anregungseinheit weist die Anregungseinheit zumindest ein Federelement auf, wobei das zumindest eine Federelement mit der Schwingungsmasse verbunden ist.

[0056] Denkbar sind hier auch Lösungen mit zwei oder mehreren Federelementen, mittels derer die Schwingungsmasse schwingbar gelagert ist.

[0057] Für die Lösung der Aufgabe wird auch ein Schwingungssystem vorgeschlagen, welches die erfindungsgemäße Anregungseinheit und die Schwingungsmasse aufweist.

[0058] Bei einer vorteilhaften Ausgestaltungsform des Schwingungssystems ist das Schwingungssystem als Reibschweißvorrichtung oder als Transportvorrichtung hergerichtet.

[0059] Transportvorrichtung sind z.B. Fördervorrichtungen zum Materialtransport (sogenannte Rüttler oder Schwingförderer), welche ihr Transportgut durch in Schwingungen gesetzte Transportbänder befördern.

[0060] Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merk-

male und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, werden klarer und deutlicher verständlich im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele, die im Zusammenhang mit den Figuren näher erläutert werden. Es zeigt:

FIG 1 ein Struktogramm des erfindungsgemäßen Resonanzverfahrens,

FIG 2 eine schematische Regelungsdarstellung des erfindungsgemäßen Resonanzverfahrens und

FIG 3 eine schematische Darstellung einer Reibschweißvorrichtung mit dem erfindungsgemäßen Umrichter, der erfindungsgemäßen Anregungseinheit und dem erfindungsgemäßen Schwingungssystem.

[0061] Die FIG 1 zeigt ein Struktogramm des erfindungsgemäßen Resonanzverfahrens 1 mit Verfahrensschritten für ein resonantes Schwingen einer Anregungseinheit mit einer Schwingungsmasse.

[0062] Während der Auslenkungserfassung 5 wird eine Auslenkung der Schwingungsmasse erfasst. Ein dazu von einer Auslenkungsmessvorrichtung erfasstes Auslenkungssignal kann in Abhängigkeit vom Einbauort der Auslenkungsmessvorrichtung gegenüber der Schwingungsmasse um einen Gleichanteil korrigiert werden, wobei der Gleichanteil durch einen Gleichanteilparameter 34 vorgegeben oder durch einen Gleichanteilhochpass 19 ermittelt werden kann.

[0063] Mittels Differenzierung der Auslenkung wird bei der Geschwindigkeitsbildung 6 eine Geschwindigkeit der Schwingungsmasse gebildet, wobei die Geschwindigkeit auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz in eine normierte Geschwindigkeit überführt wird, indem die Geschwindigkeit durch die elektrische Kreisfrequenz dividiert wird.

[0064] Bei der Phasenlageerzeugung 7 wird eine mechanische Phasenlage auf Basis der Auslenkung und der Geschwindigkeit erzeugt.

[0065] Über die Phasenlagekorrektur 8 wird die mechanische Phasenlage durch einen Korrekturwert in eine korrigierte Phasenlage gewandelt. Der Korrekturwert ist dabei die in einer Regelungsschleife rückgeführte elektrische Phasenlage, wobei vorzugsweise die rückgeführte elektrische Phasenlage von der mechanischen Phasenlage subtrahiert wird.

[0066] Eine Frequenzbildung 9 einer elektrischen Kreisfrequenz erfolgt mittels zumindest einer P-Reglung auf Basis der korrigierten Phasenlage. Für die Frequenzbildung 9 kann die P-Reglung auch als PI-Reglung oder auch als PID-Reglung ausgebildet sein.

[0067] Für eine Verfahrensinitialisierung 16 kann eine initiale Kreisfrequenz vorgegeben werden oder die letzte bekannte elektrische Kreisfrequenz verwendet werden.

[0068] Weiterhin kann zu einer Störungsüberwachung 33 die elektrische Kreisfrequenz auf Störungen beim re-

sonanten Schwingen von Anregungseinheit und Schwingungsmasse überwacht werden. Typische Störungen können ihre Ursache z.B. in mechanischen Defekten beim Schwingen der Schwingungsmasse haben, so dass sich die geforderte elektrische Kreisfrequenz zu gering oder zu hoch werden kann und das Resonanzverfahren ggf. abgebrochen werden muss.

[0069] Bei der Phasenlagebildung 10 einer elektrischen Phasenlage erfolgt eine Integration auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz.

[0070] Während der Faktorbildung 11 eines Korrekturfaktors kommt eine trigonometrische Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage zum Einsatz und der Korrekturfaktor korrigiert während einer Sollwertbeaufschlagung 12 einen Anregungssollwerts auf einen korrigierten Anregungssollwerts.

[0071] In FIG 2 wird eine schematische Reglungsdarstellung des erfindungsgemäßen Resonanzverfahrens 1 gezeigt. Dabei kann das Resonanzverfahren 1 von einem Umrichter, insbesondere von einer Regelungseinheit des Umrichters, ausgeführt werden.

[0072] Ein Erfassungsmittel 21 ist zur Auslenkungserfassung 5 einer Auslenkung x der Schwingungsmasse ausgebildet. Ein als Auslenkung x von einer Auslenkungsmessvorrichtung erfasstes Auslenkungssignal wird, in Abhängigkeit vom Einbauort der Auslenkungsmessvorrichtung gegenüber der Schwingungsmasse, durch ein Hochpassmittel 37 von einem Gleichanteilhochpass 19 um einen Gleichanteil korrigiert.

[0073] Ein erstes Bildungsmittel 22 differenziert die Auslenkung x mittels der Geschwindigkeitsbildung 6 zu einer Geschwindigkeit v der Schwingmasse. Die Geschwindigkeit v wird weiterhin durch ein Normierungsmittel 35 in einer Geschwindigkeitsnormierung 15 auf Basis einer zurückgeführten elektrischen Kreisfrequenz ω_{el} in eine normierte Geschwindigkeit v_n überführt, indem die Geschwindigkeit v durch die elektrische Kreisfrequenz ω_{el} dividiert wird.

[0074] Ein Erzeugungsmittel 23 ist zur Phasenlageerzeugung 7 einer mechanischen Phasenlage θ_m ausgebildet, was auf Basis der Auslenkung x und der Geschwindigkeit v erfolgt.

[0075] Ein Korrekturmittel 24 ist zur Phasenlagekorrektur 8 der mechanischen Phasenlage θ_m ausgebildet, wobei die mechanische Phasenlage θ_m mittels eines Korrekturwerts k_θ in eine korrigierte Phasenlage θ_k überführt wird. Als Korrekturwert k_θ wird eine rückgeführte elektrische Phasenlage θ_{el} eingesetzt, wobei die rückgeführte elektrische Phasenlage θ_{el} von der mechanischen Phasenlage θ_m subtrahiert wird.

[0076] Ein zweites Bildungsmittel 25 ist zur Frequenzbildung 9 der elektrischen Kreisfrequenz ω_{el} mittels hier einer P-Reglung, welche auch eine PI-Reglung oder eine PID-Reglung sein kann, auf Basis der korrigierten Phasenlage θ_k ausgebildet. Die elektrischen Kreisfrequenz ω_{el} wird an dieser Stelle zum Normierungsmittel 35 für die Geschwindigkeitsnormierung 15 zurückgegeben.

[0077] Von einem Initialisierungsmittel 36 kann zur

Verfahrensinitialisierung 16 eine initiale Kreisfrequenz ω_{in} vorgegeben werden.

[0078] Durch ein drittes Bildungsmittel 26 erfolgt eine Phasenlagebildung 10 der elektrischen Phasenlage θ_{el} mittels Integration auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz ω_{el} . Die elektrischen Phasenlage θ_{el} wird an dieser Stelle zum Korrekturmittel 24 für die Phasenlagekorrektur 8 zurückgeführt.

[0079] Von einem vierten Bildungsmittel 27 wird eine Faktorbildung 11 eines Korrekturfaktors k_F mittels einer trigonometrischen Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage θ_{el} durchgeführt.

[0080] Ein Beaufschlagungsmittel 28, ausgebildet zur Sollwertbeaufschlagung 12 eines Anregungssollwerts 13 in Form eines Sollstroms I_s mit dem Korrekturfaktor k_F , erzeugt einen korrigierten Anregungssollwerts 14 in Form eines korrigierten Sollstroms I_{sk} . Mit diesem korrigierten Sollstroms I_{sk} wird insbesondere ein Elektromagnet betrieben, welcher von der Anregungseinheit umfasst ist und die Schwingungsmasse zum resonanten Schwingen anregt.

[0081] Mittels FIG 3 wird eine schematische Darstellung einer Reibschweißvorrichtung 32 mit dem erfindungsgemäßen Umrichter 20, der erfindungsgemäßen Anregungseinheit 4 und dem erfindungsgemäßen Schwingungssystem 2 dargestellt.

[0082] Das Schwingungssystem 2 ist hier beispielhaft als Reibschweißvorrichtung 32 mit der Anregungseinheit 4 und einer Schwingmasse 3 ausgebildet.

[0083] An der Schwingungsmasse 3 ist ein erstes Befestigungsmittel 41 für ein erstes Werkstück 43 angeordnet. Die Schwingungsmasse 3 mit dem ersten Befestigungsmittel 41 und dem ersten Werkstück 43 ist schwingungsfähig gelagert.

[0084] Unmittelbar gegenüber dem ersten Werkstück 43 ist ein zweites Werkstück 44 mit einem zweiten Befestigungsmittel 42 verbunden. Das zweite Werkstück 44 am zweiten Befestigungsmittel 42 ist dabei gegenüber dem ersten Werkstück 43 fest fixiert und nicht schwingbar gelagert.

[0085] Die Anregungseinheit 4 zur Schwingungsanregung der Schwingmasse 3 umfasst den Umrichter 20, einen Elektromagnet 29, einen weiteren Elektromagneten 30, eine erstes und zweites Federelement 38, 39 zur schwingungsfähigen Lagerung der Schwingungsmasse 3, eine Auslenkungsmessvorrichtung 18 sowie ein von der Auslenkungsmessvorrichtung 18 an den Umrichter 20 übermitteltes Auslenkungssignal, welches einen gemessenen Istwert der Auslenkung aufweist.

[0086] Die Messung der Auslenkung mittels der Auslenkungsmessvorrichtung 18 erfolgt gegenüber einer Ruheposition 31 der Schwingungsmasse 3.

[0087] Mittels des Umrichters 20, insbesondere mittels der Regelungseinheit 40 des Umrichters 20, ist das erfindungsgemäße Reglungsvorgehen ausführbar.

[0088] Im Betrieb der Reibschweißvorrichtung 32 wird das am ersten Befestigungsmittel 41 der Schwingungsmasse 3 befestigte erste Werkstück 43 in resonante

Schwingungen mit der Anregungseinheit 4 versetzt. Das in Schwingungen versetzte erste Werkstück 43 reibt sich an dem fest fixierten und nicht schwingbaren zweiten Werkstück 44, wobei Reibungswärme entsteht und beide Werkstücke 43,44 miteinander energieeffizient und in hoher Herstellungsqualität verschweißt werden.

Patentansprüche

1. Resonanzverfahren (1) für ein Schwingungssystem (2) zum resonanten Schwingen einer Anregungseinheit (4) mit einer Schwingungsmasse (3), aufweisend die Schritte

- Auslenkungserfassung (5) einer Auslenkung (x) der Schwingungsmasse (3),
- Geschwindigkeitsbildung (6) einer Geschwindigkeit (v) der Schwingungsmasse (3) mittels Differenzierung der Auslenkung (x),
- Phasenlageerzeugung (7) einer mechanischen Phasenlage (θ_m) mittels der Auslenkung (x) und der Geschwindigkeit (v),
- Phasenlagekorrektur (8) der mechanischen Phasenlage (θ_m) mittels eines Korrekturwerts (k_θ) zu einer korrigierten Phasenlage (θ_k),
- Frequenzbildung (9) einer elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}) mittels zumindest einer P-Regelung auf Basis der korrigierten Phasenlage (θ_k),
- Phasenlagebildung (10) einer elektrischen Phasenlage (θ_{el}) mittels Integration auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}),
- Faktorbildung (11) eines Korrekturfaktors (k_F) mittels einer trigonometrischen Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage (θ_{el}) und
- Sollwertbeaufschlagung (12) eines Anregungssollwerts (13) mit dem Korrekturfaktor (k_F) zur Erzeugung eines korrigierten Anregungssollwerts (14).

2. Resonanzverfahren (1) nach Anspruch 1, aufweisend den Schritt Geschwindigkeitsnormierung (15) der Geschwindigkeit (v) mittels der elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}) zu einer normierten Geschwindigkeit (v_n), wobei die Geschwindigkeit (v) durch die elektrische Kreisfrequenz (ω_{el}) dividiert wird.

3. Resonanzverfahren (1) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei zur Phasenlagekorrektur (8) der Korrekturwert (k_θ) die rückgeführte elektrische Phasenlage (θ_{el}) ist und vorzugsweise die rückgeführte elektrische Phasenlage (θ_{el}) von der mechanischen Phasenlage (θ_m) subtrahiert wird.

4. Resonanzverfahren (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Verfahrensinitialisierung (16) eine initiale Kreisfrequenz (ω_{in}) vorgegeben oder die letzte bekannte elektrische Kreisfre-

quenz (ω_{el}) verwendet wird.

5. Resonanzverfahren (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die mechanische Phasenlage (θ_m) zwischen einer Auslenkungsamplitude (x_a) der Auslenkung (x) und der Geschwindigkeit (v) oder als Phasenlage zwischen einer Auslenkungsamplitude (x_a) der Auslenkung (x) und der Auslenkung (x) bestimmt ist.

6. Resonanzverfahren (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Auslenkungserfassung (5) ein Auslenkungssignal (17) von einer Auslenkungsmessvorrichtung (18) erfasst und das Auslenkungssignal (17) in Abhängigkeit vom Einbauort der Auslenkungsmessvorrichtung (18) gegenüber der Schwingungsmasse (3) um einen Gleichanteil korrigiert wird, wobei der Gleichanteil durch einen Gleichanteilparameter (34) vorgegeben oder durch einen Gleichanteilhochpass (19) ermittelt wird.

7. Resonanzverfahren (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Anregungssollwert (13) ein Sollstrom (I_s) und der korrigierte Anregungssollwert (14) ein korrigierter Sollstrom (I_{sk}) ist.

8. Resonanzverfahren (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Störungsüberwachung (33) die elektrische Kreisfrequenz (ω_{el}) auf Störungen beim resonanten Schwingen von Anregungseinheit (4) und Schwingungsmasse (3) überwacht wird.

9. Umrichter (20), aufweisend

- ein Erfassungsmittel (21), ausgebildet zur Auslenkungserfassung (5) einer Auslenkung (x) der Schwingungsmasse (3),
- ein erstes Bildungsmittel (22), ausgebildet zur Geschwindigkeitsbildung (6) einer Geschwindigkeit (v) der Schwingungsmasse (3) mittels Differenzierung der Auslenkung (x),
- ein Erzeugungsmittel (23), ausgebildet zur Phasenlageerzeugung (7) einer mechanischen Phasenlage (θ_m) mittels der Auslenkung (x) und der Geschwindigkeit (v),
- ein Korrekturmittel (24), ausgebildet zur Phasenlagekorrektur (8) der mechanischen Phasenlage (θ_m) mittels eines Korrekturwerts (k_θ) zu einer korrigierten Phasenlage (θ_k),
- ein zweites Bildungsmittel (25), ausgebildet zur Frequenzbildung (9) einer elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}) mittels zumindest einer P-Regelung auf Basis der korrigierten Phasenlage (θ_k),
- ein drittes Bildungsmittel (26), ausgebildet zur Phasenlagebildung (10) einer elektrischen Phasenlage (θ_{el}) mittels Integration auf Basis der elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}),

- ein viertes Bildungsmittel (27), ausgebildet zur Faktorbildung (11) eines Korrekturfaktors (k_F) mittels einer trigonometrischen Funktion auf Basis der elektrischen Phasenlage (θ_{el}) und
 - ein Beaufschlagungsmittel (28), ausgebildet zur Sollwertbeaufschlagung (12) eines Anregungssollwerts (13) mit dem Korrekturfaktor (k_F) zur Erzeugung eines korrigierten Anregungssollwerts (14).
- 10
10. Umrichter (20) nach Anspruch 9, aufweisend ein Normierungsmittel (35), ausgebildet zur Geschwindigkeitsnormierung (15) der Geschwindigkeit (v) mittels der elektrischen Kreisfrequenz (ω_{el}) zu einer normierten Geschwindigkeit (v_n), wobei die Geschwindigkeit (v) durch die elektrische Kreisfrequenz (ω_{el}) dividierbar ist.
- 15
11. Umrichter (20) nach einem der Ansprüche 9 oder 10, wobei zur Phasenlagekorrektur (8) als Korrekturwert (k_θ) die rückgeführte elektrische Phasenlage (θ_{el}) vorgesehen ist und vorzugsweise die rückgeführte elektrische Phasenlage (θ_{el}) von der mechanischen Phasenlage (θ_m) subtrahierbar ist.
- 20
- 25
12. Anregungseinheit (4), aufweisend
- mindestens einen Elektromagneten (29) zur Anregung der Schwingungsmasse (3),
 - einen Umrichter (20) nach einem der Ansprüche 9 bis 11 zum Betrieb des mindestens einen Elektromagneten (29) und
 - eine Auslenkungsmessvorrichtung (18) zur Messung der Auslenkung (x) der Schwingungsmasse (3) gegenüber einer Ruheposition (31) der Schwingungsmasse (3).
- 30
- 35
13. Anregungseinheit (4) nach Anspruch 12, aufweisend zumindest ein Federelement (38), wobei das zumindest eine Federelement (38) mit der Schwingungsmasse (3) verbunden ist.
- 40
14. Schwingungssystem (2), aufweisend eine Anregungseinheit (4) nach einem der Ansprüche 12 oder 13 und die Schwingungsmasse (3).
- 45
15. Schwingungssystem (2) nach Anspruch 14, hergerichtet als Reibschweißvorrichtung (32) oder als Transportvorrichtung.
- 50
- 55

FIG 1

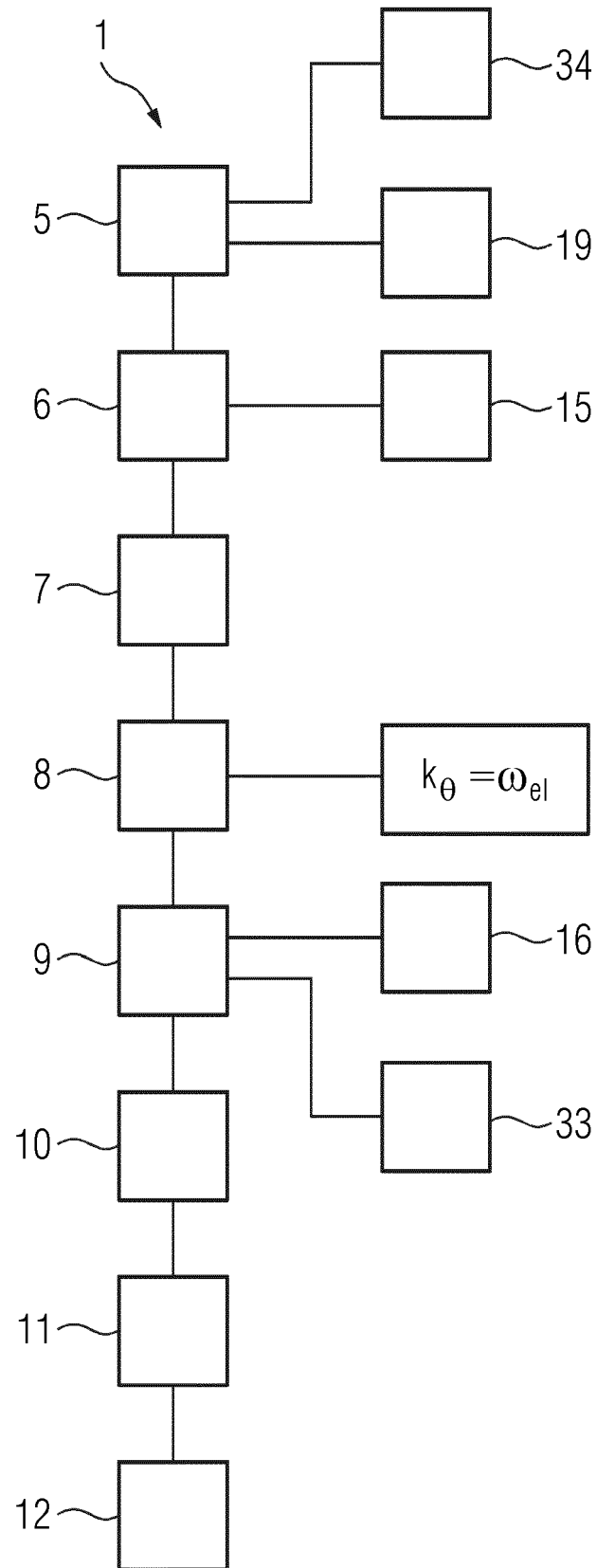


FIG 2

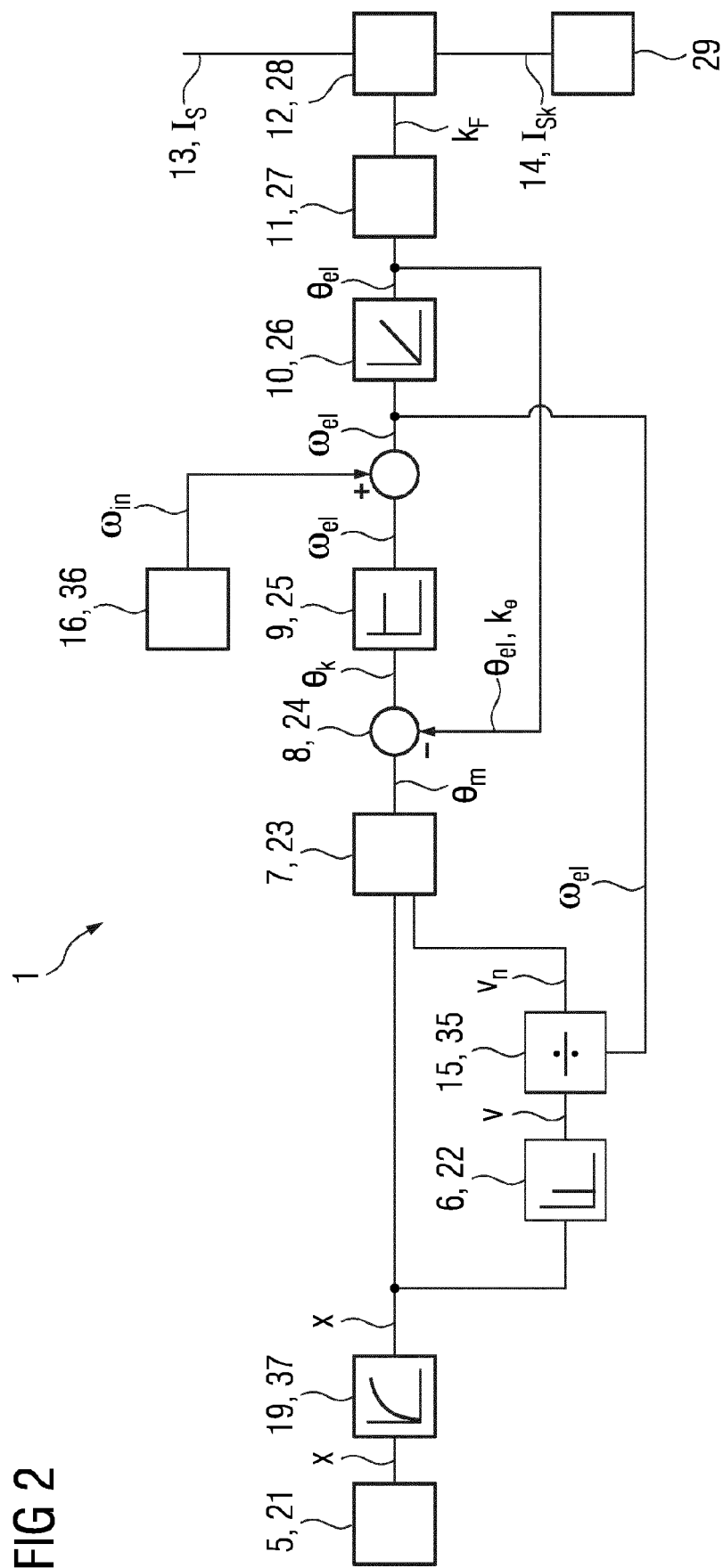
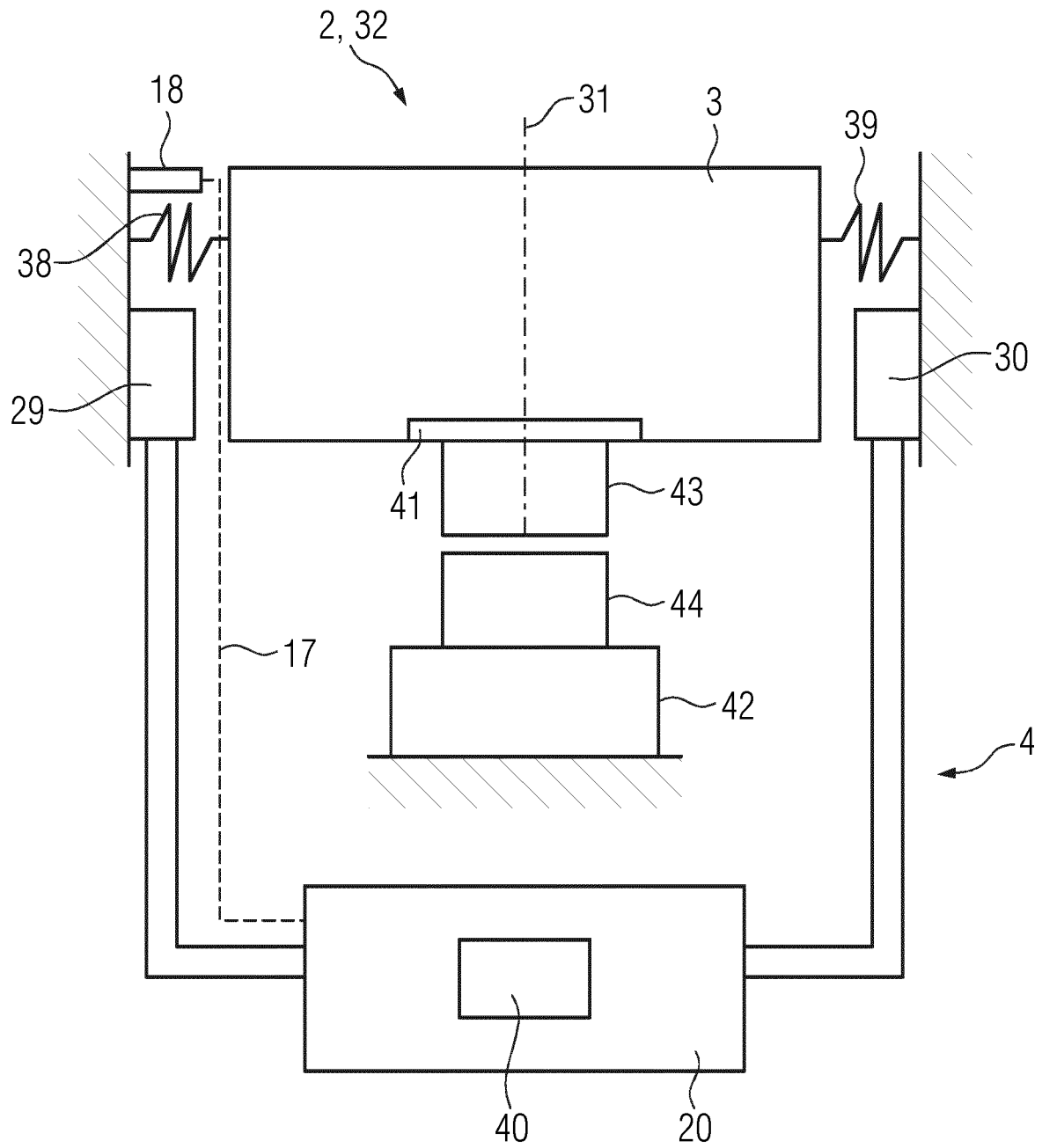


FIG 3





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 20 19 3664

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X A	DE 10 2011 119949 A1 (NORTHROP GRUMMAN LITEF GMBH [DE]) 6. Juni 2013 (2013-06-06) * Anspruch 1 * * Absatz [0002] * * Absatz [0022] - Absatz [0029] * * Absatz [0036] * * Absatz [0057] - Absatz [0058] * * Absatz [0114] * * Abbildungen 1, 3A *	1-5,7-15 6	INV. B06B1/02 B06B1/04
X	US 2019/165247 A1 (CALDWELL SCOTT [US]) 30. Mai 2019 (2019-05-30) * Ansprüche 1, 11 * * Absatz [0013] * * Abbildung 2 *	1	
X	US 7 148 636 B2 (MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD [JP]) 12. Dezember 2006 (2006-12-12) * Anspruch 1 * * Spalte 8, Zeile 28 - Zeile 38 * * Spalte 12, Zeile 38 - Zeile 67 * * Abbildung 1 *	1	
A	EP 1 216 760 A2 (DIGITEC S R L [IT]) 26. Juni 2002 (2002-06-26) * Ansprüche 1-3 * * Absatz [0004] - Absatz [0007] * * Absatz [0010] - Absatz [0011] * * Abbildung 1 *	1	
A	DE 40 01 367 A1 (BRANSON ULTRASCHALL [DE]) 19. September 1991 (1991-09-19) * Anspruch 1 * * Spalte 2, Zeile 17 - Zeile 24 * * Abbildungen 1, 2 *	1,15	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 24. Februar 2021	Prüfer Tympel, Jens
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 : nichtschriftliche 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	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

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

EP 20 19 3664

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente 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.

24-02-2021

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
15	DE 102011119949 A1	06-06-2013	AU 2012344309 A1	12-06-2014
			BR 112014013062 A2	13-06-2017
			CA 2854091 A1	06-06-2013
			CN 103988051 A	13-08-2014
			DE 102011119949 A1	06-06-2013
			EP 2786096 A2	08-10-2014
			IL 232589 A	29-03-2018
20			JP 5890533 B2	22-03-2016
			JP 2014533841 A	15-12-2014
			KR 20140081893 A	01-07-2014
			RU 2014119152 A	10-02-2016
			US 2015211857 A1	30-07-2015
			WO 2013079139 A2	06-06-2013
25			ZA 201403101 B	27-01-2016
	US 2019165247 A1	30-05-2019	CN 109791973 A	21-05-2019
			DE 112018000083 T5	18-04-2019
			JP 2019534772 A	05-12-2019
30			US 2019165247 A1	30-05-2019
			WO 2019018181 A1	24-01-2019
	US 7148636 B2	12-12-2006	CN 1477767 A	25-02-2004
			JP 3540311 B2	07-07-2004
35			JP 2004056994 A	19-02-2004
			KR 20030094038 A	11-12-2003
			US 2004108824 A1	10-06-2004
	EP 1216760 A2	26-06-2002	EP 1216760 A2	26-06-2002
			IT BS20000131 A1	24-06-2002
40	DE 4001367 A1	19-09-1991	DE 4001367 A1	19-09-1991
			EP 0481125 A2	22-04-1992
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

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