

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
23. Mai 2019 (23.05.2019)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2019/096834 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H02K 33/10 (2006.01) H02K 1/02 (2006.01)
H02K 1/34 (2006.01) H02K 1/14 (2006.01)
H02K 29/06 (2006.01) H02K 1/24 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2018/081206

(22) Internationales Anmeldedatum:
14. November 2018 (14.11.2018)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2017 127 021.3
16. November 2017 (16.11.2017) DE

(71) Anmelder: TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
[AT/AT]; Karlsplatz 13, 1040 Wien (AT).

(72) Erfinder: WEILER, Thomas; Margarethenstr. 131/19,
1050 Wien (AT). KRALL, Stephan; Arnsteingasse 10/14,

1150 Wien (AT). BLEICHER, Friedrich; Fünkhgasse 4,
1140 Wien (AT).

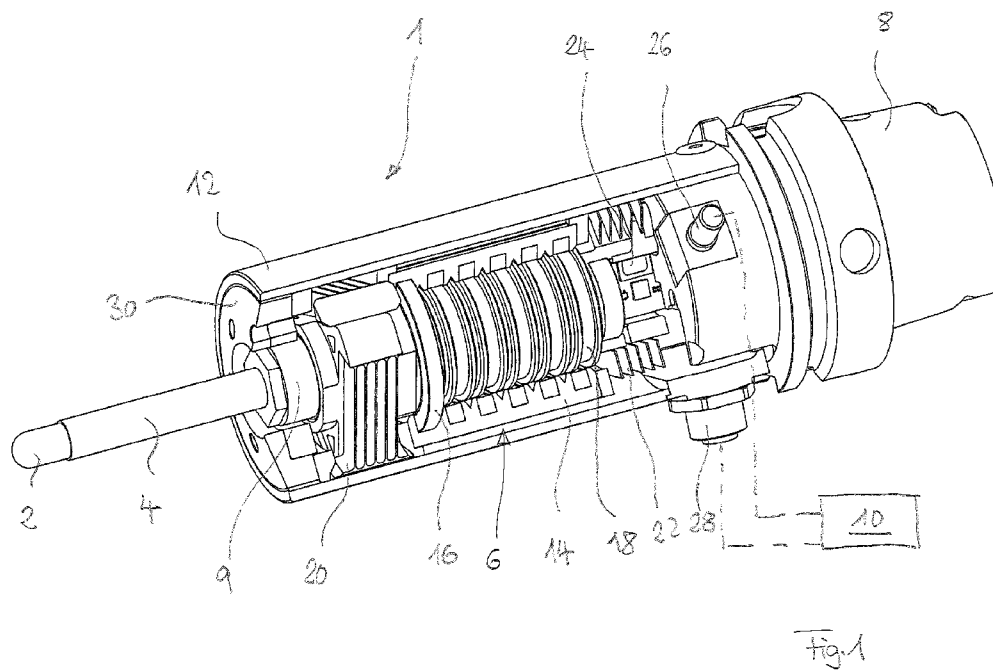
(74) Anwalt: WINTER BRANDL FÜRNISS HÜBNER
RÖSS KAISER POLTE - PARTNERSCHAFT MBB;
Alois-Steinecker-Str. 22, 85354 Freising (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,
SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,

(54) Title: LINEAR RELUCTANCE ACTUATOR AND TOOLS/DRIVES DESIGNED TO COMPRISE SAME

(54) Bezeichnung: RELUKTANZ-LINEARAKTOR UND DAMIT AUSGEFÜHRTE WERKZEUGE/ANTRIEBE



(57) Abstract: The invention relates to a linear reluctance actuator and to a tool designed to comprise such a linear reluctance actuator. In said linear actuator, a stator and a rotor are designed to have profiling that is optimised in terms of reluctance-based power delivery.

(57) Zusammenfassung: Offenbart ist ein Reluktanz-Linearaktor und ein mit einem derartigen Reluktanz-Linearaktor ausgeführtes Werkzeug. Bei dem Linearaktor sind ein Stator und ein Läufer mit einer Profilierung ausgebildet, die in Hinblick auf die reluktanzbasierte Kraftentfaltung optimiert ist.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2019/096834 A1

SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Beschreibung

Reluktanz-Linearaktor und damit ausgeführte Werkzeuge/Antriebe

Die Erfindung betrifft einen Reluktanz-Linearaktor gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 sowie mit einem derartigen Linearaktor ausgeführte Werkzeuge bzw. Antriebe.

Ein derartiges Werkzeug zum Oberflächenhämmern (**Machine Hammer Peening, MHP**) wird üblicherweise in eine Werkzeugmaschine oder einen Roboter eingespannt, so dass das zu bearbeitende Werkstück durch eine Vielzahl einzelner, präziser aneinandergereihter Schläge einer üblicherweise kugelförmigen Werkzeugspitze bearbeitet wird. Dabei kann der Kontakt zwischen der Werkzeugspitze und der Werkstückoberfläche kontinuierlich oder periodisch erfolgen. Bei der periodischen Beaufschlagung einer üblicherweise eingesetzten Hartmetallspitze auf eine Werkstückoberfläche, wird durch einen Linearaktor dieses Werkzeug in Schwingungen mit definierter Schlagfrequenz, Schlagamplitude und Nulldurchgang versetzt. Diese oszillierende Bewegung des Werkzeugs, auch als Stößel bezeichnet, kann dabei durch verschiedene Aktor-Prinzipien bewerkstelligt werden.

Überwiegend mechanisch arbeitende Linearaktoren sind beispielsweise in den Druckschriften DE 20 2015 000 360 U1, WO 2016 136 169 A1, DE 10 2014 107 173 A1, DE 10 2016 000 389 A1, DE 20 2015 003 249 U1, EP 2 851 441 A2, EP 2 851 442 A1 und US 2014 000 7 394 A1 beschrieben.

Die in den Druckschriften DE 10 2009 041 720 A1 und DE 20 2013 002 473 U1 beschriebenen Werkzeuge verwenden einen piezoelektrischen Linearantrieb.

Pneumatische oder mit Kühl-/Schmiermittel betriebene Werkzeuge sind Gegenstand der Druckschriften DE 10 2012 103 111 A1 und DE 20 2009 001 619 U1.

In den Druckschriften DE 10 2006 033 004 A1 und US 4 641 510 A wird der Aufbau, elektromagnetischer bzw. elektrodynamischer Linearantriebe von Umformwerkzeugen erläutert.

Direkt-/indirekt-sonotrodengesteuerte Werkzeuge sind in den Druckschriften US 6 932 876 B1, US 2007 024 4 595 A, US 2015 011 4 074 A und WO 2004 028 739 A1 offenbart.

All diese Linearantriebe haben den Nachteil gemeinsam, dass sie zum Einen einen relativ komplexen Aufbau aufweisen und zum Anderen eine kompakte Ausführung der Umformwerkzeuge erschwert ist. Ein weiterer wesentlicher Nachteil besteht bei all diesen Systemen darin, dass keine Regelung einzelner Schlagprozesse, d. h., eine frei programmierbare Bewegung der Werkzeugspitze (Hammerkopf) realisierbar ist, um gezielt homogene Randschichteigenschaften an der Werkstückoberfläche zu erzeugen.

Neben den vorbeschriebenen Linearantrieben sind im Prinzip auch Reluktanz-Lineraraktoren bekannt, bei denen ein axial verstellbarer Läufer/Aktor in einem Stator geführt ist, wobei der Hub des Läufers/Aktors durch die Reluktanzkraft erzeugt wird. Die Wirkweise derartiger Linearaktoren ist beispielsweise in den Druckschriften „Identification of Some Tubular Topologies of Linear Switched Reluctance Generator for Direct Drive Applications in Oceans Wave Energy Conversion“; R.P.G. Mendes, R.M.R.A. Calado, S.J.P.S. Mariano; Proceedings of the World Congress on Engineering 2014, Vol 1, WCE 2014, Juli 2 – 4, 2014, London, U.K. und „Analysis and Modelling of Linear-Switched Reluctance for Medical Application“, Jean-Francois Llibre, Nicolas Martinez, Pascal Leprinc, Bertrand Nogarede; Actuators 2013, 2, 27 – 44 (www.mdpi.com/journal/actuators) beschrieben.

In der Druckschrift WO 2017/129 249 A1 ist ein mehrphasiger Reluktanz-Linearaktor beschrieben, bei dem ein modular aufgebauter tubularer Stator eine Vielzahl von axial hintereinander liegenden Spulen aufweist, die in durch Radialstege begrenzten Ausnehmungen aufgenommen sind. In diesem Stator ist ein Läufer axial

verschiebbar geführt, der bei diesem Ausführungsbeispiel an seinem Außenumfang eine Vielzahl von ringförmigen Permanentmagneten aufweist, die jeweils in eine Ringnut eingesetzt sind.

Entsprechende Reluktanz-Linearaktoren sind auch in den Druckschriften DE 44 07 385 A1, DE 43 11 664 A1 und WO 85/05507 A1 beschrieben. All diese Systeme sind für vergleichsweise große Hübe ausgelegt, so dass eine mehrphasige Ansteuerung vorgesehen ist und am Stator oder Läufer Permanentmagnete vorgesehen werden.

Aus der US 2010/0243931 A1 ist ein Linearmotorventil bekannt, das einen Ventilsitz in inkrementellen Schritten bewegt.

Die JP S61- 85 059 A offenbart einen Linearpulsmotor, der ein schrittweises Verschieben auf einer stationären Schraube ermöglicht.

In der DE 30 31 273 A1 ist eine elektromagnetische Vorrichtung offenbart, wobei ein Statoraufbau und ein Rotor abwechselnd und in einer Reihenfolge zusammensetzbar sind.

Eine elektromagnetische Stellvorrichtung ist aus der DE 29 31 685 A1 bekannt und auch die DE 30 25 445 A1 zeigt eine Vorrichtung zum Verstellen eines verstellbaren Bauteils.

Der Einsatz dieser Antrieb zum Oberflächenhämmern, bei denen sehr kurze Hübe mit hoher Beschleunigung und vergleichsweise großer Kraft erfolgen sollen, sind nur bedingt geeignet.

Aus der DE 10 2006 033 004 A1 ist eine Klopfvorrichtung bekannt, wobei der Abstand eines Nulldurchgangs einer Schlagfrequenz von einer Werkstückoberfläche durch einen Erregerstrom veränderbar ist.

In der WO 2016/188 672 A1 ist ein Bremssystem offenbart, bei dem eine Pumpe über einen Reluktanz-Linearaktor angetrieben wird, bei dem nur eine Spule verwendet wird. Die Verstellung des Aktors erfolgt gegen die Kraft eines Federelementes

Dem gegenüber liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, einen für kurze Hübe optimierten Reluktanz-Linearaktor und dafür geeignete Anwendungen zu schaffen, der bei einfachem Aufbau eine präzise Regelung des Hubes ermöglicht.

Diese Aufgabe wird im Hinblick auf den Reluktanz-Linearaktor durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst. Zur Lösung gehören auch Anwendungen dieses Reluktanz-Linearaktors bei einem Umformwerkzeug oder einem Ventiltrieb oder einer Einrichtung zur schwingungsunterstützten Bearbeitung von Verbundstoffen oder monolithischen Werkstoffen.

Sonstige vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Erfindungsgemäß hat der Reluktanz-Linearaktor einen tubular ausgebildeten Stator, an dem eine Vielzahl von zueinander axial beabstandeten Spulen in jeweils einer Ausnehmung in einer Innenmantelfläche des Stators angeordnet sind. Die Ausnehmungen sind jeweils axial durch Radialstege begrenzt. In dem Stator ist ein Läufer axial verschiebbar gelagert, der an seinem Außenumfang ein Zahnprofil aufweist, das mit den Radialstegen jeweils einen Luftspalt ausbildet. Der Reluktanz-Linearaktor hat des Weiteren eine Leistungselektronik zum Ansteuern der Spulen, so dass der Läufer in Abhängigkeit von der Ansteuerung aufgrund einer Reluktanzkraft einen geregelten Hub durchführt. Erfindungsgemäß ist das Zahnprofil entsprechend/komplementär zu den Radialstegen ausgebildet, wobei die Radialstege und das Zahnprofil jeweils mit zum Stator bzw. Aktor hin offenen umlaufenden Nuten ausgeführt sind, die bei minimalem Luftspalt etwa einander radial gegenüberliegend angeordnet sind. Durch die erfindungsgemäße Ausgestaltung des Profils der Radialstege und des Zahnprofils wird der magnetische Fluss optimiert, so dass der Hub mit einer hohen Dynamik realisierbar ist. Der erfindungsgemäße Reluktanz-Linearaktor ist zudem ohne Permanentmagneten ausgeführt, wobei der Stator und der Läufer aus

einem magnetisch leitfähigen Werkstoff, vorzugsweise einem weichmagnetischen Material, beispielsweise aus einer Kolbalt-Eisen-Legierung bestehen.

Der Linearaktor ist für Kurzhübe, beispielsweise 1 mm optimiert. Unter „Hub“ wird in der vorliegenden Anmeldung der Weg verstanden, entlang dem eine Antriebskraft in eine definierte Richtung erzeugbar ist. Der Läufer kann sich prinzipiell weiter als diesen Hub bewegen. Am Ende des Hubes durchfährt das System allerdings einen Totpunkt, an dem es zur Umkehrung der Wirkrichtung der nutzbaren Reluktanzkraft kommt.

Durch die geometrisch optimierte Formgebung des Läufers und des Stators kommt es zu einer Kraftdichtenmaximierung bei gleichzeitig minimaler Gesamtinduktivität und minimaler Läufermasse. Dies wiederum erlaubt eine hochfrequente Ansteuerung der Spulen/Wicklungen und somit minimale Zykluszeiten. Der erfindungsgemäße Linearaktor kann mit untypisch hohen Stromdichten betrieben werden, wobei dies insbesondere dann zum Tragen kommt, wenn eine intermittierende Betriebsart zugrunde gelegt wird. Selbstverständlich kann der erfindungsgemäße Reluktanz-Linearaktor auch in permanenter Anlage am Werkstück oder einer sonstigen zu betätigenden Einrichtung gehalten werden und zur Erzeugung einer hoch dynamischen regelbaren Kraft verwendet werden.

Durch das erfindungsgemäße Konzept wird eine Minimierung der Gesamtinduktivität des Systems erreicht, und so der Gradient des Stroms in den Spulen maximiert und ggf. auftretende Verlusteffekte, wie beispielsweise leistungsminimierende Eisenverluste durch geometrische und werkstofftechnische Optimierungen minimiert.

Durch die definierte Zahnform mit der vorbeschriebenen korrespondierenden Teilung und Anordnung der Zähne auf der Stator- und Läuferseite kann ein definierter Hub des Läufers erreicht werden, der beispielsweise der Axiallänge eines Zahns entspricht. Die erfindungsgemäße Geometrie maximiert die effektiv wirksame Zahnfläche pro Längeneinheit der Stator-/Läuferkombination unter Berücksichtigung des Bauraums für die Spulen und deren thermischer Belastbarkeit.

Wie vorstehend ausgeführt, erfolgt die Profilierung des Stators und des Läufers vorzugsweise derart, dass der Hub der Axiallänge eines an die Nut angrenzenden Zahn- oder Radialstegsegmentes entspricht.

Die Nuten können beispielsweise V- oder trapezförmig oder mit verrundeten Ecken ausgebildet sein.

Bei einer asymmetrischen Ausbildung der Zahngeometrie kann eine unidirektionale Vorzugsrichtung der Kraftentfaltung vorgegeben werden. Eine derartige Asymmetrie kann beispielsweise durch unterschiedliche Anstellwinkel der Seitenwandungen der Nut ausgebildet werden.

Der Magnetfluss lässt sich weiter optimieren, wenn die Axiallänge der Zahn-/Radialstegsegmente kleiner, vorzugsweise die Hälfte der Breite der Nut am Umfang des Läufers bzw. Stators ist.

Dabei wird es besonders bevorzugt, wenn eine Tiefe der Radialstege, d. h., die Tiefe der Ausnehmung, in der die Spule angeordnet ist, etwa der Breite der Radialstege entspricht.

Die Ansteuerung des Reluktanz-Linearaktors ist besonders einfach, wenn dieser einphasig ausgeführt ist.

Eine präzise Radial- und Axialführung des Läufers ist gewährleistet, wenn dieser über eine Festkörpergelenkanordnung gelagert ist, wobei der Hub aufgrund der Reluktanzkraft in Axialrichtung entgegen einer Rückstellkraft des Festkörpergelenks erfolgt.

Zur Optimierung der Bewegungssteuerung des Läufers ist in den Reluktanz-Linearaktor ein Wegmesssystem integriert, über das die Position des Läufers erfassbar ist und an die Leistungselektronik weitergegeben werden kann.

Der Hammerkopf ist vorzugsweise über ein Spannmittel z.B. eine Spannzange mit dem Linearaktor verbunden, sodass der Hammerkopf entsprechend der vorgegebenen Bearbeitungsaufgabe gewechselt werden kann.

Der erfindungsgemäße Linearantrieb lässt sich beispielsweise bei einem Werkzeug zum Oberflächenhämmern anwenden, wobei am Läufer eine mechanische Schnittstelle für einen Hammerkopf vorgesehen ist und das Umformwerkzeug des Weiteren einen Spannkegel, insbesondere einer im Werkzeugmaschinenbau üblichen Werkzeugaufnahme oder eine sonstige Schnittstelle einer Werkzeugmaschine oder eines Roboters hat.

In diese Werkzeugaufnahme kann dann eine Druckluftversorgung zur Kühlung integriert sein.

Der erfindungsgemäße Reluktanz-Linearaktor lässt sich jedoch auch bei anderen Anwendungen, beispielsweise bei einem Ventiltrieb eines Verbrennungsmotors und/oder zur Betätigung von Servo- und/oder Wegeventilen oder bei der schwingungsunterstützten Bearbeitung von Verbundstoffen oder monolithischen Werkstoffen einsetzen.

Der tubulare Stator kann als monolithisches Bauteil gefertigt sein. Zur Verbesserung der Kühlung und/oder Minimierung der Eisen-/Wirbelstromverluste kann das monolithische Bauteil zusätzlich mit radialen Einschnitten versehen werden. Alternativ kann der Stator auch aus einer Vielzahl von radial zueinander angeordneten Blechpaketen ausgebildet werden.

Ein Zahnprofil des Läufers und/oder Radialstege des Stators können symmetrisch oder asymmetrisch ausgebildet sein. Dies kann beispielsweise durch Zahnflanken mit unterschiedlichen Anstellwinkeln erfolgen.

Die Stromrichtung benachbarter Spulen ist gegenläufig ausgeführt.

Es zeigen:

Figur 1 eine Schnittdarstellung eines Umformwerkzeugs zum Oberflächenhämmern (Oberflächenhammer);

Figur 2 einen Reluktanz-Linearaktor des Oberflächenhammers gemäß Figur 1;

Figur 3 eine Teildarstellung des Linearaktors gemäß Figur 2;

Figur 4 eine Vorderansicht des Linearaktors mit geteiltem Stator gemäß Figur 2;

Figur 5 eine Detaildarstellung des Linearaktors gemäß Figur 4 zur Verdeutlichung geometrischer Verhältnisse;

Figuren 6a, 6b eine Figur 4 entsprechende Darstellung des Linearaktors in einer Ausgangsposition und einer Zielposition mit sich bei einer Bestromung von Spulen einstellenden Feldlinien;

Figuren 7a, 7b eine Detaildarstellung der Feldlinien gemäß den Figuren 6a, 6b;

Figur 8 eine weiter detaillierte Darstellung, in die die bei einer Bestromung der Spulen auftretenden Axial- und Radialkräfte eingezeichnet sind;

Figur 9 eine dreidimensionale Darstellung des Reluktanz-Linearaktors mit Festlagerung;

Figur 10 einen stark schematisierten Regelkreis einer Leistungselektronik des erfindungsgemäßen Oberflächenhammers;

Figur 11 ein Diagramm, in dem der Weg des Läufers in Abhängigkeit von der Zeit in einem Versuchsaufbau dargestellt ist, anhand dessen die Systemauslegung für die unterschiedlichen Applikationen erfolgen kann;

Figur 12 ein weiteres Diagramm, in der die über den Läufer in einem Versuchsaufbau maximal wirkende Reluktanzkraft über der Zeit bei gegebenem Stromimpuls dargestellt ist und

Figuren 13, 14 weitere Ausführungsbeispiele eines erfindungsgemäßen Linearaktors.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand eines Umformwerkzeugs zum Oberflächenhämmern, im Folgenden Oberflächenhammer 1 genannt, erläutert. Dieser hat einen mit einem Schlageinsatz 2 aus Hartmetall oder sonstigen Materialien ausgeführten Hammerkopf 4, der mittels eines erfindungsgemäßen Reluktanz-Linearaktors 6 zum Oberflächenhämmern in periodische Schwingungen versetzt wird oder in kontinuierlicher Anlage an dem zu bearbeitenden Werkstück gehalten werden kann. Der Oberflächenhammer 1 hat des Weiteren eine mechanische Schnittstelle, im vorliegenden Fall einen Hohlchaftkegel 8, über den der Oberflächenhammer 1 in eine entsprechende Werkzeugaufnahme einer Werkzeugmaschine oder eines Roboters eingesetzt werden kann, so dass der Oberflächenhammer 1 während der Bearbeitung über die NC-Achsen der Werkzeugmaschine bzw. des Roboters geführt wird.

Selbstverständlich kann der erfindungsgemäße Reluktanz-Linearaktor 6 – im Folgenden mit Linearaktor abgekürzt – auch bei anderen Anwendungen genutzt werden. So ist es beispielsweise möglich, einen Ventiltrieb eines Verbrennungsmotors mit einem derartigen Linearaktor 6 zu betätigen. Auch die schwingungsunterstützte Bearbeitung von Werkstücken aus keramischen Werkstoffen, Hartmetallen, Glas etc. oder Verbundwerkstoffen oder sonstigen monolithischen Werkstoffen ist mit einem Werkzeug durchführbar, das mit einem derartigen Linearaktor 6 ausgeführt ist. Eine Anwendung bei Ventiltrieben ist ebenfalls denkbar.

Eine zeitdiskrete Regelung des Hubs des Linearaktors 6 erfolgt über eine in Figur 1 angedeutete Leistungselektronik 10, auf deren Aufbau später eingegangen wird.

Der Oberflächenhammer 1 hat ein zylindrisches Gehäuse 12 aus nicht magnetisch leitfähigem Material, an das der Hohlchaftkegel 8 angesetzt ist. Im Inneren des

Gehäuses ist der Linearaktor 6 gelagert, der gemäß der Schnittdarstellung in Figur 1 einen Stator 14 aufweist, in dem eine Vielzahl von Spulen, im vorliegenden Fall sechs Spulen 16 axial versetzt zueinander angeordnet sind. Der Stator 14 hat einen tubularen Aufbau, wobei die Spulen 16 in an einer Innenumfangsfläche 36 mündenden Ausnehmungen aufgenommen sind. Der Stator 14 umgreift mit einem Luftspalt einen Läufer, 18, der bei Bestromung der Spulen 16 aufgrund der Reluktanzkraft einen definierten Hub durchführt, der auf den Hammerkopf 4 übertragen wird.

Der Läufer 18 ist über eine Lageranordnung mit zwei Festkörperlagern 20, 22 geführt, wobei die Lagersteifigkeit in Radialrichtung und in Axialrichtung so gewählt ist, dass die erwünschte hohe Positioniergenauigkeit des Hammerkopfs 4 gewährleistet ist. So muss beispielsweise sichergestellt sein, dass der radiale Luftspalt zwischen Stator 14 und Läufer 18 aufrechterhalten bleibt, so dass der zur Erzeugung einer Reluktanzkraft erforderliche Magnetfeldlinienverlauf gewährleistet ist. Auch die Führung in axialer Richtung muss mit höchster Präzision erfolgen, um den Läufer 18 mit Bezug zum Werkstück führen zu können. Die Festkörperlager 20, 22 sind sowohl in Radialrichtung als auch in Axialrichtung am Gehäuse 12 abgestützt, so dass die beim Oberflächenhämmern entstehenden Reaktionskräfte aufgenommen werden können. Die Verstellung des Läufers 18 erfolgt gegen eine Rückstellkraft der Festkörperlager 20, 22, so dass der Hammerkopf 4 nach Durchführung eines durch die Reluktanzkraft verursachten Hubs wieder in seine Ausgangsposition zurückgestellt wird. Diese Rückstellung muss zum einen sehr genau und zum anderen mit einer vergleichsweise hohen Geschwindigkeit erfolgen, so dass die gewünschte Oszillationsfrequenz, die im Bereich von beispielsweise 0 bis 1000 Hz liegt, gewährleistet ist.

Der Hub des Läufers 18 wird über ein Wegmesssystem 24 erfasst, das beim dargestellten Ausführungsbeispiel im Bereich des oberen, d. h., vom Hammerkopf 4 entfernten Festkörperlagers 22 angeordnet ist und von diesem umgriffen wird. Dieses Wegmesssystem 24 gewährleistet eine exakte Positionierung des Läufers 18 in Abhängigkeit von den über die Leistungselektronik 10 und die Maschinensteuerung vorgegebenen Parametern.

Das Wegmesssystem 24 kann mit einer integrierten Druckluftversorgung zur Wärmeabfuhr ausgeführt sein, so dass die Positioniergenauigkeit auch bei längerem Gebrauch des Oberflächenhammers 1 unabhängig von thermischen Einflüssen bleibt.

Die Stromversorgung des Linearaktors 6 erfolgt über zumindest einen Leistungsanschluss 26. Die Signalübertragung zwischen der Leistungselektronik 10 und dem Wegmesssystem 24 erfolgt über einen Signalanschluss 28.

Die Axialbewegung des Läufers 18 wird beim dargestellten Ausführungsbeispiel über das Festkörperlager 20 auf den Hammerkopf 4 übertragen. Dieser durchsetzt einen Stirnflansch 30 des Gehäuses 12. In diesem Bereich ist auch eine Werkzeugaufnahme 9 zum Spannen des Hammerkopfs 4 am Linearaktor 6 vorgesehen. Rückwärtig ist das Gehäuse 12 über den Hohlchaftkegel 8 abgeschlossen, der beispielsweise als HSK 63 in der an sich bekannten Weise ausgeführt ist, so dass diesbezügliche Erläuterungen entbehrlich sind.

Der weitere Aufbau des Linearaktors 6 wird im Folgenden anhand der Figur 2 bis 5 erläutert.

Figur 2 zeigt eine Einzeldarstellung des Linearaktors aus Figur 1. Man erkennt in dieser Darstellung deutlich den tubularen Aufbau des als Hohlzylinder ausgeführten Stators 14, der mit einem Luftspalt den Läufer 18 umgreift. Beim dargestellten Ausführungsbeispiel ist der Stator 2 aus zwei Statorhälften 32a, 32b ausgeführt, die jeweils aus einem monolithischen Material hergestellt sind. Da der magnetische Fluss durch diese Statorhälften 32a, 32b hindurchgeht, müssen diese aus einem magnetisch leitfähigen Werkstoff hergestellt sein. Zur Erhöhung der Leistung wird jedoch die Verwendung von weichmagnetischen Werkstoffen, insbesondere einer Kobalt-Eisen-Legierung bevorzugt.

Der axial bewegliche Läufer 18 ist aus einem magnetisierbaren Werkstoff, vorzugsweise ebenfalls aus einer Kobalt-Eisen-Legierung ausgebildet. Die Verwendung einer derartigen Legierung für den Stator 14 und den Läufer 18 hat den Vorteil, dass diese Legierungen eine hohe Permeabilität sowie eine geringe

Koerzitivfeldstärke und Remanenz bei gleichzeitig höchster Sättigungsinduktion aufweisen.

Zur Verbesserung der Kühlwirkung und zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten sind in den Außenumfang der Statorhälften 32a, 32b Radialeinschnitte 34 ausgebildet, die jedoch im Abstand zu einer Innenumfangsfläche 36 des Stators 14 enden. Ebenso kann der Läufer 18 in der gleichen Art und Weise aufgebaut werden.

Die beiden Statorhälften 32a, 32b sind über geeignete Verbindungsmittel miteinander verbunden. Selbstverständlich ist auch eine einstückige Ausbildung des Stators 14 möglich.

Figur 3 zeigt den Linearaktor 6 in einem Längsschnitt, der durch die Trennebene der beiden Statorhälften 32a, 32b hindurchgeht, wobei der Läufer 18 nicht geschnitten ist.

In dieser Darstellung gut sichtbar sind die vorgenannten sechs Spulen 16, die in Axialrichtung beabstandet in dem Stator 14 zur Innenumfangsfläche 36 hinweisend aufgenommen sind. Die Radialeinschnitte 34 erstrecken sich bis in den Bereich der Spulen 16, so dass diese während des Betriebs, beispielsweise durch die Druckluftversorgung gekühlt werden und des Weiteren Wirbelstromverluste minimiert sind.

Die Endabschnitte des Läufers 18 sind gemäß der Darstellung in Figur 3 radial zurückgesetzt, so dass Nabenabschnitte 38, 40 ausgebildet werden, die passgenau mit den Festkörperlagern 20, 22 verbunden sind, so dass der Läufer 18 über diese Festkörperlager 20, 22 exakt in Radial- und Axialrichtung geführt ist.

Gemäß der Darstellung in Figur 3 sind die Innenumfangsfläche des Stators 14 sowie die in Wirkverbindung mit dem Stator 14 stehende Umfangsfläche des Läufers 18 mit einer Profilierung ausgeführt, über die der Magnetfeldlinienverlauf optimiert ist. Dies wird anhand der folgenden Figuren näher erläutert.

Figur 4 zeigt eine Vorderansicht der Anordnung gemäß Figur 3, wobei die Spulen/Wicklungen 16 bestromt dargestellt sind. Diese Spulen 16 können, parallel oder seriell miteinander verschaltet sein, wobei dies in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Betriebsspannung erfolgt. Erfindungsgemäß werden die Spulen einphasig mit Gleichstrom beaufschlagt. Wie in Figur 4 dargestellt, ist die Stromrichtung benachbarter Spulen 16 gegenläufig.

Die Spulen 16 sind jeweils in einer Ausnehmung 42 des Stators 14 aufgenommen. Diese Ausnehmungen 42 sind beim dargestellten Ausführungsbeispiel als umlaufende Nuten ausgeführt, in die die Spulen 16 eingesetzt werden und dann mit dem jeweiligen Leistungsanschluss 26 verbunden werden. Die Ausnehmungen 42 sind jeweils durch Radialstege 44, 46 begrenzt, wobei bei den innenliegenden Spulen 16 ein Radialsteg 46 jeweils zwei Spulen zugordnet ist. Bei den beiden in Axialrichtung außenliegenden Spulen 16a, 16b ist entsprechend dann nur noch stirnseitig ein „halber“ Radialsteg 45a, 45b vorgesehen.

Zur Optimierung der magnetischen Flussdichte an der Stator-Innenumfangsfläche 36 sind die durch die Radialstege gebildeten Zähne profiliert, wobei bei dem erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel diese Profilierung durch jeweils eine Ringnut 48 ausgebildet ist. Beim dargestellten Ausführungsbeispiel ist diese Ringnut 48 V-förmig ausgebildet. Zum einfacheren Verständnis ist dieses Zahnprofil in Figur 5 vergrößert dargestellt, wobei einige wesentliche Geometrieparameter eingezeichnet sind.

Gemäß dieser Darstellung sind die Ringnuten 48 jeweils mittig in den jeweiligen Radialstegen 44, 46 ausgebildet. Die axial außenliegenden Radialstege 45a, 45b sind dann jeweils entsprechend nur mit einer Schrägfläche (entsprechend einer Seitenfläche der Ringnut) ausgeführt. Die Seitenflächen 50a, 50b der Ringnuten 48 schließen mit der Horizontalen in Figur 5 jeweils den gleichen Winkel ein, so dass ein symmetrisches Zahnprofil entsteht. Die Tiefe und der Nutwinkel sind so gewählt, dass die verbleibenden Radialstegsegmente 52, 54 eine Axiallänge z_h aufweisen, die der Hälfte der Öffnungsweite der Ringnut 48 entspricht. Diese Öffnungsweite entspricht dann dem Maß $2z_h$. Dementsprechend beträgt die gesamte Axiallänge eines Radialstegs dann

gemäß Figur 5 $4z_h$. Die Axiallänge der Ausnehmung 42 beträgt ebenfalls $4z_h$, so dass sich eine symmetrische Teilung der Ausnehmungen 42 und der benachbarten Radialstege 44, 46 ergibt. Wie in Figur 5 des Weiteren eingezeichnet, hat die Radialtiefe der Ausnehmungen 42 ($R_{ss} - R_{sl}$) ebenfalls das Maß $4z_h$.

Gemäß den Figuren 4 und 5 ist die Zahngeometrie des Läufers 18 kompatibel oder komplementär zu diesen Vorgaben ausgeführt. Bei dem beschriebenen Ausführungsbeispiel ist die Zahngeometrie des Läufers 18 asymmetrisch ausgeführt. Das Zahnprofil des Läufers 18 hat gemäß den Darstellungen in den Figuren 4 und 5 eine Vielzahl von Zähnen, von denen in der Darstellung gemäß Figur 5 beispielhaft zwei mit den Bezugszeichen 56, 58 versehen sind. Die Breite dieser Zähne 56, 58 ist wiederum mit dem Maß $4z_h$ ausgeführt, d. h., die Breite der Zähne 56, 58 entspricht der Breite der Radialstege 44, 46.

Zahnflanken 57, 59 der Zähne 56, 58 sind zur Horizontalen unterschiedlich angestellt, wobei der Anstellwinkel der rückwärtigen Zahnflanke 57 größer ist, als derjenigen der hammerkopfseitigen Zahnflanke 59.

Jeder der Zähne 56, 58 ist mit einer etwa trapezförmigen Umfangsnut 60 ausgeführt, deren sich in Axialrichtung erstreckende Öffnungsweite dann wiederum dem Maß $2z_h$ entspricht. Bei dieser Öffnungsweite der etwa trapezförmigen Umfangsnut 60 verbleiben wiederum beidseitig Zahnsegmente 64, 66 deren Axiallänge dem Maß z_h entspricht. Die Seitenwandungen 62a, 62b haben zur Horizontalen in Figur 5 unterschiedliche Anstellwinkel, so dass sich ein asymmetrisches Nutprofil ergibt. Dabei sind die zum Hammerkopf 4 weisenden, in Figur 5 untenliegenden Seitenwandungen 62b zur Horizontalen etwas steiler angestellt als die andere Seitenwandung 62a. Durch diese asymmetrische Zahngeometrie wird eine unidirektionale Vorzugsrichtung im Hinblick auf die Entfaltung der Reluktanzkraft bewirkt. Selbstverständlich ist diese Zahngeometrie dann beim Einbau zu berücksichtigen, so dass stets darauf zu achten ist, dass die Seitenwandungen 62b jeweils in Ausfahrriechtung des Läufers 18 bzw. zum Hammerkopf 4 hinweisend montiert sind.

Gemäß der Darstellung in Figur 5 entspricht der Abstand der Zähne 56, 58 wiederum dem Maß $4z_h$, so dass auch die Verzahnung des Läufers 18 die gleiche Teilung wie diejenige des Stators 14 aufweist. Auch die sonstigen, in Figur 5 eingezeichneten Abmessungen RS_z , RL_z , RL_i , RL_A und RS_A sind derart aufeinander abgestimmt, dass durch die entstehende Geometrie die effektiv wirksame Zahnfläche pro Längeneinheit der Läufer-/Statorkombination unter Berücksichtigung des Bauraums der notwendigen Wicklungen/Spulen 16 und deren thermischer Belastbarkeit optimiert ist.

Wie vorstehend ausgeführt, entsteht zwischen dem stehenden Stator 14 und dem axial beweglichen Läufer 18 ein definierter Luftspalt, der in der Darstellung gemäß Figur 5 mit einer gepunkteten Struktur herausgehoben ist.

In den Figuren 4 und 5 ist der Linearaktor 6 in seiner Ausgangsposition dargestellt, die der Läufer 18 bei spannungslosem Festkörperlager 20, 22 mit Bezug zum Stator 14 einnimmt. D. h., die Radialstegsegmente 52, 54 sind mit Bezug zu den jeweils benachbarten Zahnsegmenten 64, 66 axial versetzt, (siehe insbesondere Figur 5).

In der Ausgangsposition ist somit der Läufer 18 mit Bezug zum Stator 14 in axialer Richtung um eine Zahnhöhe, die einer Axiallänge eines Radialstegsegments 52, 54 bzw. eines Zahnsegments 64, 66 entspricht, versetzt. Dieser Versatz, der beim dargestellten Ausführungsbeispiel das Maß z_h hat, entspricht dem maximalen Hub des erfindungsgemäßen Linearaktors 6, der beispielsweise 1 mm betragen kann.

Wird nun gemäß Figur 6a eine Gleichspannung an die Spulen 16 angelegt, so führt dies zum Aufbau des magnetischen Flusses und des Stromes. Zu Beginn der Ansteuerung ist gemäß der Darstellung in Figur 6a der magnetische Widerstand maximal – dieser Zustand ist in der Darstellung gemäß Figur 7a nochmals vergrößert dargestellt. Da das System bei der Bestromung der Spulen 16 immer nach einem minimalen magnetischen Widerstand (Reluktanz) strebt und in der dargestellten Ausgangsposition der größte magnetische Widerstand wirkt, entsteht eine Reluktanzkraft, die den Läufer 18 in Richtung des minimalen magnetischen Widerstands beaufschlagt, der sich bei einer Überdeckung der Radialzähne einstellt. Es

entsteht eine in Figur 8 dargestellte axial wirkende Vortriebskraft $F_{R,Z}$ (Reluktanzkraft in axialer Richtung) welche aufgrund der reluktanzoptimierten Zahngeometrie vergleichsweise groß ist. Wie in Figur 8 eingezeichnet, entsteht des Weiteren noch eine Radialkraft $F_{R,R}$, den Läufer in Radialrichtung beaufschlagt – diese Radialkräfte werden jedoch von der Festkörperlagerung kompensiert.

Die Festkörperlager 20, 22 sind so ausgelegt, dass der Läufer 18 durch die Reluktanzkraft $F_{R,Z}$ bei hoher Positioniergenauigkeit entgegen der Rückstellkraft der Festkörperlager 20, 22 verstellt werden kann. Diese Verstellung des Läufers 18 erfolgt gemäß den Darstellungen in den Figuren 6b und 7b solange, bis die Relativposition erreicht ist, in der der minimale magnetische Widerstand bei gleichzeitig maximaler Gesamtinduktivität vorliegt.

Dieser Zustand wird in der in den Figuren 6b, 7b dargestellten Zielposition erreicht, in der die Zahnsegmente 64, 66 mit Bezug zu den entsprechenden Radialstegsegmenten 52, 54 ausgerichtet sind, so dass eine maximale Überlappung dieser Bereiche entsteht – es stellt sich entsprechend die maximale Feldliniendichte ein, wobei die in Radialrichtung wirkenden Kräfte $F_{R,R}$ maximal und die in Axialrichtung wirkenden Kräfte minimal sind. Dabei bleibt der radiale Luftspalt ΔR während des gesamten Bewegungsablaufs konstant. Der effektive Luftspalt, d. h., der Grad der Überdeckung, die Reluktanz, die Induktivität und der magnetische Fluss ändern sich jedoch mit axialer Bewegung des Läufers 18.

Die zu Beginn wirkende Reluktanzkraft ist somit von der vektoriellen Ausrichtung der Flusslinien und somit von der Zahngeometrie, dem Fluss sowie der Relativposition beider Komponenten (Stator 14, Läufer 18) abhängig.

Aufgrund der während dieser Bewegung erheblichen Radial- und Axialkräfte ist entsprechend eine hinreichend steife Lagerung erforderlich, die bei dem erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel durch die beiden Festkörperlager 20, 22 gewährleistet ist. In Figur 9 ist der eigentliche Linearaktor 6 mit den beiden Festkörperlagern 20, 22 dargestellt. Wie erläutert, sind diese am Gehäuse 12 abgestützt, wobei die Radialabstützung jeweils über drei Radialstützen 70, 72, 74

erfolgt, die in Radialrichtung sehr steif ausgeführt sind, so dass der radiale Luftspalt während der vorbeschriebenen Verstellung des Läufers 8 beibehalten werden kann. In Axialrichtung (vertikal in Figur 9) sind die beiden Festkörperlager 20, 22 so ausgebildet, dass sie eine Axialverstellung des Läufers 18 ermöglichen. Diese Axialverstellbarkeit wird beispielsweise durch eine Lamellen-/Balkenstruktur 76 ermöglicht, die in Radialrichtung sehr steif ist und die Axialbeweglichkeit erlaubt. Diese Steifigkeit der Lamellen-/Balkenstruktur 76 in Radialrichtung wird durch geeignete Wahl des Widerstandsmoments gegen Biegung erzielt.

In der Ausgangsposition sind die beiden Festkörperlager 20, 22 spannungsfrei. Wird nun der Läufer 18 in Axialrichtung verstellt, so wirkt die Reluktanzkraft auch auf die Lagerung. Diese Kraft bewirkt in Axialrichtung eine elastische Verformung der Festkörperlager 20, 22, so dass die Verstellung des Läufers 18 gegen die dabei entstehende axiale Rückstellkraft des Festkörperlagers 20, 22 erfolgt. Wird nun die Spule bei Erreichen des vorgespannten Hubs stromlos geschaltet, so erfolgt die Rückstellung des Läufers 18 über die Lagerung.

Im Falle des Oberflächenhämmerns findet beim Auftreffen des Hammerkopfs 4 auf die Werkstückoberfläche (in der Regel ein metallisches Werkstück) eine elasto-plastische Umformung an der Werkstückoberfläche statt. Die elastische Komponente wirkt dann zusätzlich zur Rückstellkraft der Festkörperlagerung auf den Läufer 18.

Grundsätzlich kann jedoch auch die Rückstellung des Linearaktors 6 in seine Ausgangsposition über sonstige externe Kraftkomponenten erfolgen, die beispielsweise mechanisch, elektromagnetisch, magnetisch, pneumatisch, piezoelektrisch etc. aufgebracht werden. Sowohl der Hub als auch die Rückstellbewegung können über die Leistungselektronik 10 gezielt geregelt werden. Für den Fall, dass eine deterministische Rückstellung erfolgen soll, kann diese auch über einen entgegenwirkenden zusätzlichen Antrieb erfolgen.

Der Grundaufbau der Leistungselektronik 10 ist in Figur 10 dargestellt. In dieser Darstellung angedeutet ist der Oberflächenhammer 1 mit dem integrierten Wegmesssystem 24.

Wie erläutert, kommt es aufgrund der geometrisch optimierten Formgebung der Antriebskomponenten und der unüblichen einphasigen Ausführung zu einer Kraftdichtenmaximierung, was wiederum eine hochfrequente Ansteuerung der Spulen 16 und entsprechend minimale Zykluszeiten des Systems ermöglicht. Die damit einhergehenden benötigten hohen Stromstärken bei gleichzeitig hoher Schaltfrequenz können mit herkömmlichen Servoverstärkern nicht oder nur mit größten Schwierigkeiten erzeugt werden. Dementsprechend ist die in Figur 10 dargestellte Leistungselektronik 10 in Hinblick auf die Ansteuerung des erfindungsgemäßen Linearaktors 6 optimiert. Zum Aufbau der Leistungselektronik 10 kann teilweise auf Standardmodule, wie beispielsweise einen digitalen Signalprozessor zur Realisierung der notwendigen Rechenoperationen, sensorische Komponenten zur Positions- und Strommessung sowie DC-DC-Wandler zur Spannungsversorgung zurückgegriffen werden. Der eingesetzte digitale Signalprozessor verarbeitet als integrierter Logikbaustein die ein- und ausgehenden Signale und steuert die Treiber der Leistungselektronik 10. Die zugehörige Software für den digitalen Signalprozessor beinhaltet die komplette Schaltungslogik der Aktoreinheit und muss situationsgerecht Schaltinformationen an eine Treiberstufe senden. Die Leistungselektronik 10, welche in diesem Beispiel für den Anwendungsfall Oberflächenhämmern ausgelegt ist, kann Spitzenströme bis zu 1 000 A bei Schaltfrequenzen im Bereich von 100 kHz bereitstellen. Die Maximalspannung beträgt beim dargestellten Ausführungsbeispiel etwa 60 VDC. Alle Messwerte und Sollwertvorgaben werden an den, auf einem digitalen Signalprozessorbasierenden Achsregler geleitet, der somit eine Rolle als zentrale Logikeinheit übernimmt. Die angebundene Treiberstufe hat die Aufgabe, die Logik-Signale des digitalen Signalprozessors für die Ansteuerung der Leistungstransistoren in der Endstufe aufzubereiten. Hierbei ist die erzielbare Dynamik des Schaltvorgangs von Bedeutung, da sich die resultierende Schaltzeit der Endstufe maßgeblich auf die zu erwartende Gesamt-Performance auswirkt. Die Endstufe ist so ausgelegt, dass die geforderten Ströme durch einen induktiven Verbraucher mit hoher Dynamik geschaltet werden können. Eine Voraussetzung hierbei ist, dass die benötigte elektrische Energie über einen entsprechend dimensionierten Kondensator zur Verfügung gestellt wird. Dieser Kondensator soll eine möglichst geringe parasitäre Induktivität aufweisen, um die Anstiegszeit des Stroms zum Einschaltzeitpunkt nicht

negativ zu beeinflussen. Der Strom, welcher letztendlich zum Linearaktor fließt, wird über einen Strom-Sensor, beispielsweise einem Hallsensor, gemessen. Diese Messung ist für die Dosierung der gewünschten Schlagenergie erforderlich.

Das vorbeschriebene Wegmesssystem gibt ein Signal an die Leistungselektronik 10 weiter, welche hieraus die exakte Position und Geschwindigkeit des Läufers 18 ermittelt. Das Bereitstellen einer niederimpedanten Stromversorgung kann beispielsweise durch einen Kondensator erfolgen, welche mittels eines externen Netzteils geladen wird.

Die Leistungselektronik 10 ermöglicht des Weiteren eine Kommunikation mit einer Werkzeugmaschinen-/Robotersteuerung, sodass der Oberflächenhammer 1 entlang der gewünschten Bewegungsbahn zur Bearbeitung des Werkstücks geführt werden kann.

Die Funktion der Leistungselektronik 10 und des Oberflächenhammers 1 sei nochmals anhand der Figuren 11 und 12 verdeutlicht. Figur 11 zeigt ein Diagramm, in dem die Position des Läufers 18, ab Bestromung der Spulen 16, über der Zeit in einem Versuchsaufbau dargestellt ist. In Figur 11 dargestellt sind zwei Kurvenverläufe, die sich bei unterschiedlichen Stromniveaus in den Spulen 16 einstellt. Bei maximalen Strömen lässt sich entsprechend eine sehr hohe Endgeschwindigkeit des Läufers 18 und des Hammerkopfs 4 durch die hierbei erzielbare maximale Beschleunigung erreichen. Bei Verringerung der Spulenströme werden entsprechend die Bewegungsgeschwindigkeit des Hammerkopfs 4 und somit des Läufers 18 und dessen Beschleunigung verringert – dementsprechend kann sowohl die Frequenz als auch die Geschwindigkeit und somit der Impuls des Hammerkopfs exakt geregelt werden.

Figur 12 zeigt einen typischen Kraftverlauf, der sich bei einer derartigen Ansteuerung des des Linearaktors 6 in einem Versuchsaufbau einstellt. Zur Zeit null befindet sich der Hammerkopf 4 oder genauer gesagt der Läufer 18 in seiner Ausgangsposition. Bei einer Bestromung der Spulen 16 erfährt der Läufer 18 eine Reluktanzkraft, die in diesem Versuchsaufbau nach einer Zeit von etwa 307 μs einen maximalen Wert von 700 N erreicht. Dieser Kraftaufbau lässt sich über die Leistungselektronik weitestgehend beeinflussen, sodass die Oberflächenbearbeitung

sehr präzise erfolgen kann. Bei Stromlosschalten der Spulen 16 bewegt sich dann der Läufer 18 aufgrund der Rückstellkraft der Festkörperlageranordnung und der elastischen Komponente beim Oberflächenhämmern relativ schnell wieder in seiner Ausgangsposition zurück. Aus dem dargestellten Kraft-Zeit Diagramm ist sofort ableitbar, dass sich ein Oberflächenhämmern mit sehr hoher Frequenz und entsprechender hoher Maximalkraft bei sehr kompakten Aufbau eines Oberflächenhammers realisieren lässt – derartige Parameter lassen sich mit herkömmlichen Lösungen nicht realisieren.

In Figur 13 ist eine Variante des vorbeschriebenen Linearaktors 6 gezeigt, bei dem der Stator 14 oder genauer gesagt dessen Statorhälften 32a, 32b aus einem monolithischen Bauteil ohne die Radialschlitze ausgeführt sind.

Figur 14 zeigt eine Variante, bei der der Stator 14 aus einer Vielzahl von in Radialrichtung angeordneten Statorblechen 80 ausgebildet ist, die gemeinsam den tubularen Stator 14 ausbilden.

Im Übrigen entsprechen die Ausführungsbeispiele gemäß den Figuren 13 und 14 dem vorbeschriebenen Ausführungsbeispiel, sodass weitere Erläuterungen entbehrlich sind.

Offenbart ist ein Reluktanz-Linearaktor und ein mit einem derartigen Reluktanz-Linearaktor ausgeführtes Werkzeug. Bei dem Linearaktor sind ein Stator und ein Läufer mit einer Profilierung ausgebildet, die in Hinblick auf die reluktanzbasierte Kraftentfaltung optimiert ist.

Bezugszeichen:

- 1 Oberflächenhammer
- 2 Hartmetalleinsatz
- 4 Hammerkopf
- 6 Reluktanz-Linearaktor
- 8 Hohlschaftkegel (HSK)
- 9 Werkzeugaufnahme
- 10 Leistungselektronik
- 12 Gehäuse
- 14 Stator
- 16 Spule
- 18 Läufer
- 20 Festkörperlager
- 22 Festkörperlager
- 24 Wegmesssystem
- 26 Leistungsanschluss
- 28 Signalanschluss
- 30 Stirnflansch
- 32 Statorhälfte
- 34 Radialeinschnitt
- 36 Innenumfangsfläche
- 38 Nabenabschnitt
- 40 Nabenabschnitt
- 42 Ausnehmung
- 44 Radialsteg
- 46 Radialsteg
- 48 Ringnut
- 50 Seitenfläche
- 52 Radialstegsegment
- 54 Radialstegsegment
- 56 Zahn
- 57 Zahnflanke

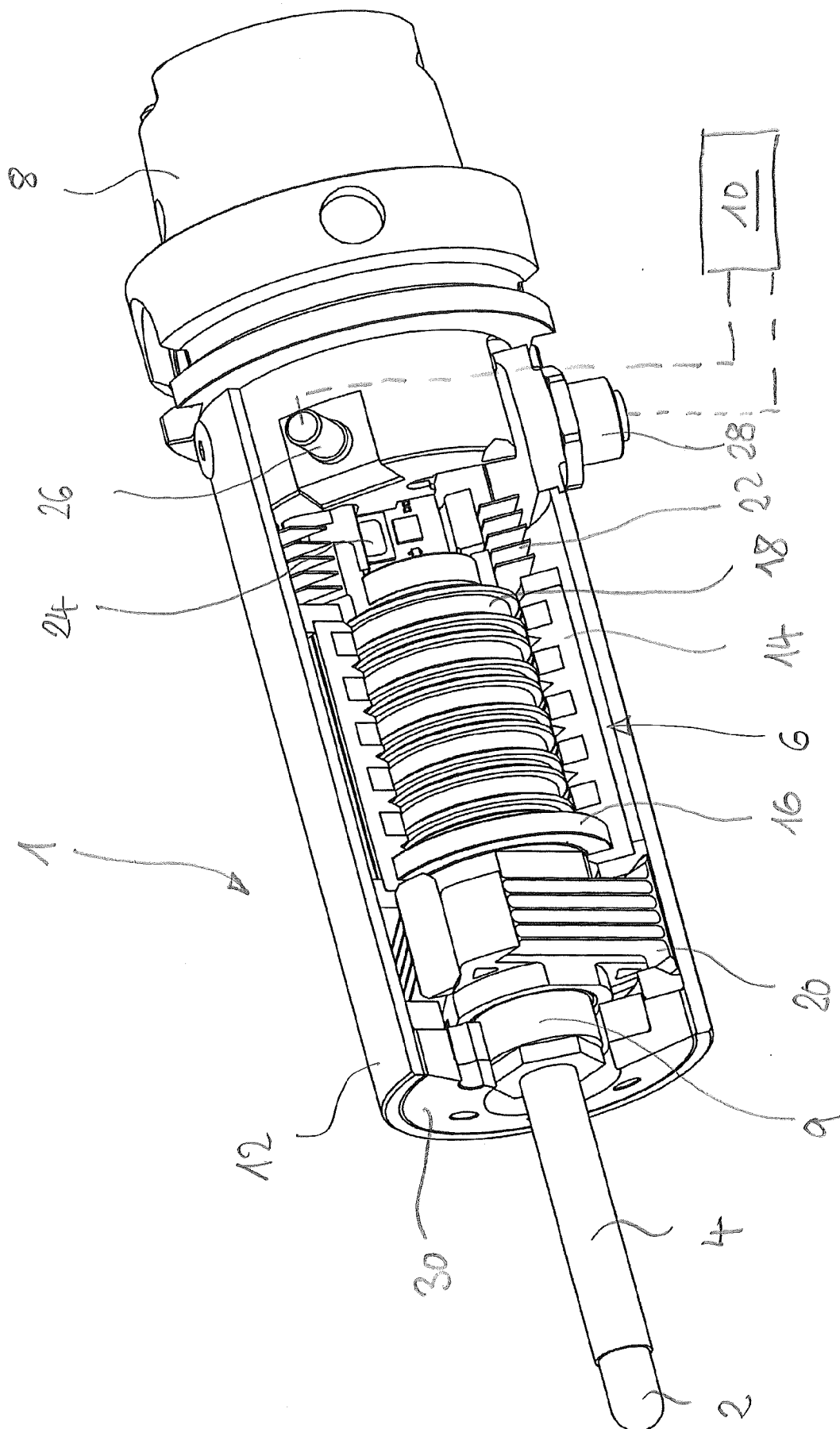
- 58 Zahn
- 59 Zahnflanke
- 60 Umfangsnut
- 62 Seitenwandung
- 64 Zahnsegment
- 66 Zahnsegment
- 70 Radialstrebe
- 72 Radialstrebe
- 74 Radialstrebe
- 76 Lamellenstruktur
- 80 Statorblech

Patentansprüche

1. Reluktanz-Linearaktor mit einem tubular ausgebildeten Stator (14), an dem eine Vielzahl von zueinander beabstandeten Spulen (16) in jeweils einer umlaufenden Ausnehmung (42) einer Innenumfangsfläche (36) des Stators (14) angeordnet sind, wobei die Ausnehmungen (42) axial durch Radialstege (44, 45, 46) begrenzt sind, und mit einem Läufer (18), der axial verschiebbar gelagert ist und an seinem magnetisch wirksamen, dem Stator 14 zugewandten Umfang ein Zahnprofil aufweist, das mit den Radialstegen (44, 45, 46) jeweils einen Luftspalt ausbildet und mit einer Leistungselektronik (10) zum Ansteuern der Spulen (10), sodass der Läufer (18) in Abhängigkeit von der Ansteuerung aufgrund der Reluktanzkraft einen regelbaren Hub durchführt, dadurch gekennzeichnet, dass das Zahnprofil komplementär zu den Radialstegen (44, 45, 46) ausgebildet ist, wobei diese und das Zahnprofil jeweils mit zum Stator (14) beziehungsweise zum Läufer (18) hin offenen ringförmigen Nuten (48, 60) ausgebildet sind, die bei minimalem Luftspalt etwa einander radial gegenüberliegend angeordnet sind, und dass der Stator (14) und der Läufer (18) aus magnetisch leitfähigem oder weichmagnetischem Werkstoff hergestellt sind, wobei der Hub etwa einer Axiallänge (z_h) eines an die Nut (48, 60) angrenzenden Zahn- oder Radialstegsegments (52, 54, 56, 58; 64, 66) entspricht.
2. Linearaktor nach einem der vorherigen Patentansprüche, wobei die Nuten (48, 60) etwa V- oder trapezförmig oder mit verrundeten Ecken ausgebildet sind.
3. Linearaktor nach Patentanspruch 2 oder 3, wobei Umfangsnuten (60) asymmetrisch zur unidirektional optimierten Kraftentfaltung optimiert sind.
4. Linearaktor nach einem der vorherigen Patentansprüche, wobei eine Axiallänge (z_h) der Zahn-/Radialstegsegmente (52, 54, 64, 66) kleiner, vorzugsweise die Hälfte der lichten Weite der Nuten (48, 50) am Umfang des Läufers (18) beziehungsweise des Stators (14) ist.

5. Linearaktor nach Patentanspruch 5, wobei eine Tiefe der Radialstege (52, 54) beziehungsweise der Ausnehmungen (42) etwa der Gesamtbreite ($4z_h$) der Radialstege (44, 45, 46) beziehungsweise der Zähne (56, 58) entspricht.
6. Linearaktor nach einem der vorherigen Patentansprüche, wobei die Leistungsversorgung einphasig ausgeführt ist.
7. Linearaktor nach Patentanspruch 1 oder dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, wobei der Läufer (18) in Radial- und Axialrichtung mittels einer Festkörpergelenkanordnung gelagert ist, wobei der Hub aufgrund der Reluktanzkraft in Axialrichtung entgegen einer Rückstellkraft der Festkörperlageranordnung erfolgt.
8. Linearaktor nach einem der vorherigen Patentansprüche, mit einem Wegmesssystem zum Erfassen einer Position des Läufers (18) und zur Abgabe eines Signals an die Leistungselektronik (10).
9. Linearaktor nach einem der vorherigen Patentansprüche, wobei der Stator (14) und / oder der Läufer (18) zumindest teilweise aus einem weichmagnetischen Material, beispielsweise einer Kobalt-Eisen-Legierung besteht.
10. Linearaktor nach einem der vorherigen Patentansprüche, wobei der Stator (14) und / oder der Läufer (18) geschlitzt oder aus Blechpaketen ausgeführt sind, zur Minimierung von Eisenverlusten und/oder zur Optimierung der Kühlmedienzufuhr zu den im Stator (14) eingesetzten Wicklungen.
11. Werkzeug, insbesondere zum Oberflächenhämmern, mit einem Linearaktor (6) nach einem der vorherigen Patentansprüche, wobei am Linearaktor (6) eine Werkzeugaufnahme (9) für einen Hammerkopf (4) vorgesehen ist und mit einer Werkzeugmaschinenschnittstelle, insbesondere einer im Werkzeugmaschinenbau üblichen Schnittstelle, beispielsweise einem Hohlschaftkegel (8) für eine HSK-Werkzeugaufnahme einer Werkzeugmaschine oder eines Roboters.

12. Werkzeug nach Patentspruch 12, wobei ein Wegmesssystem (24) und/oder eine Druckluftversorgung zur Kühlung in die mechanische Schnittstelle zu einer Werkzeugmaschine oder zu einem Roboter integriert ist.
13. Ventilantrieb zur Betätigung von Servo- und/oder Wegeventilen (Hydraulik, Pneumatik), mit einem Linearaktor (6) nach einem der Ansprüche 1 bis 12.
14. Ventilantrieb eines Verbrennungsmotors mit einem Linearaktor (6) nach einem der Patentansprüche 1 bis 12.



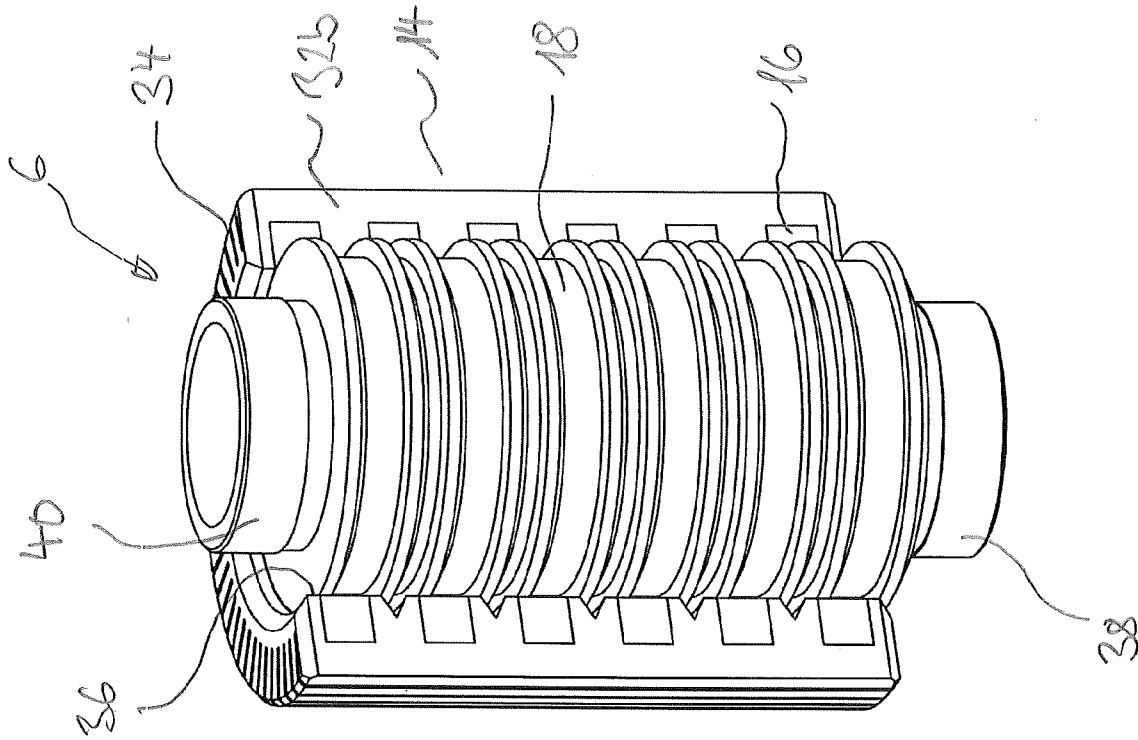


Fig. 3

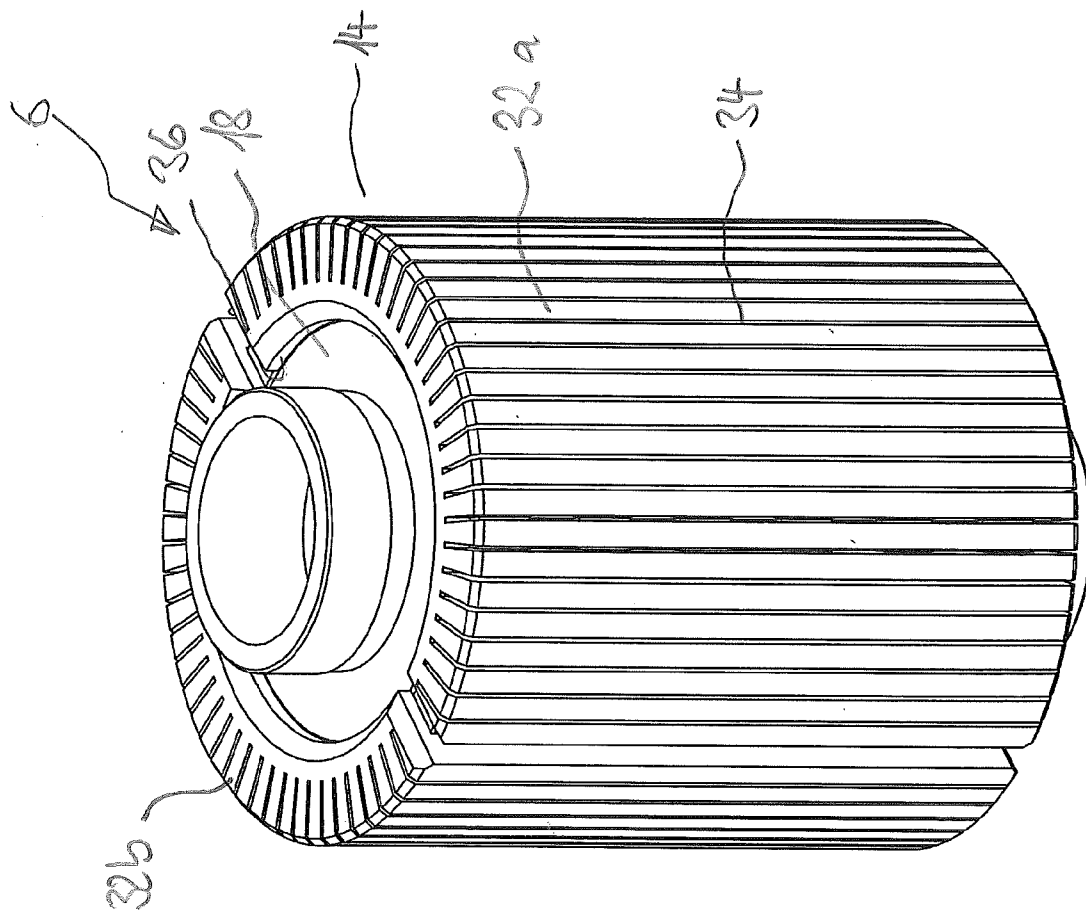


Fig. 2

Fig. 4

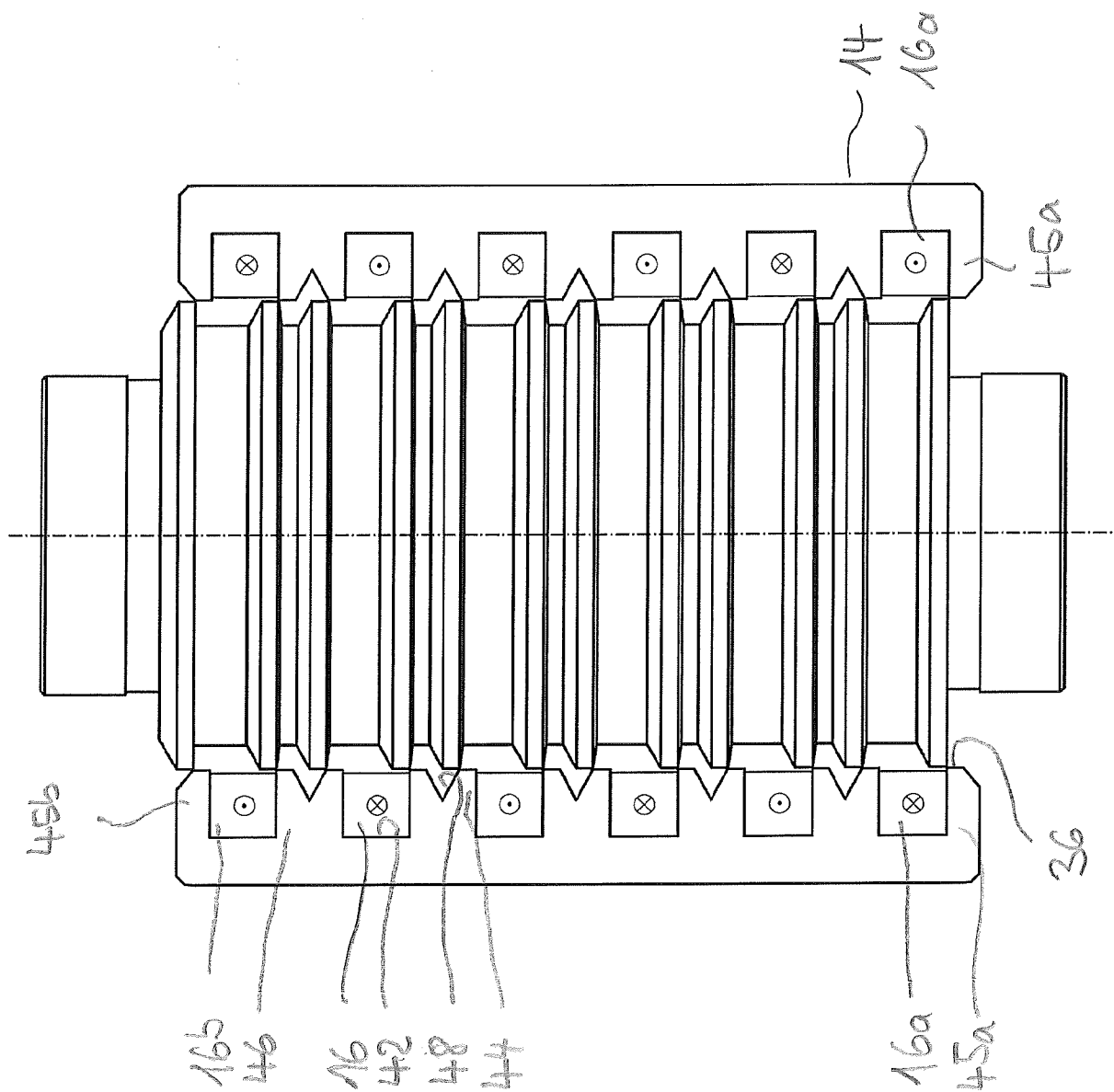
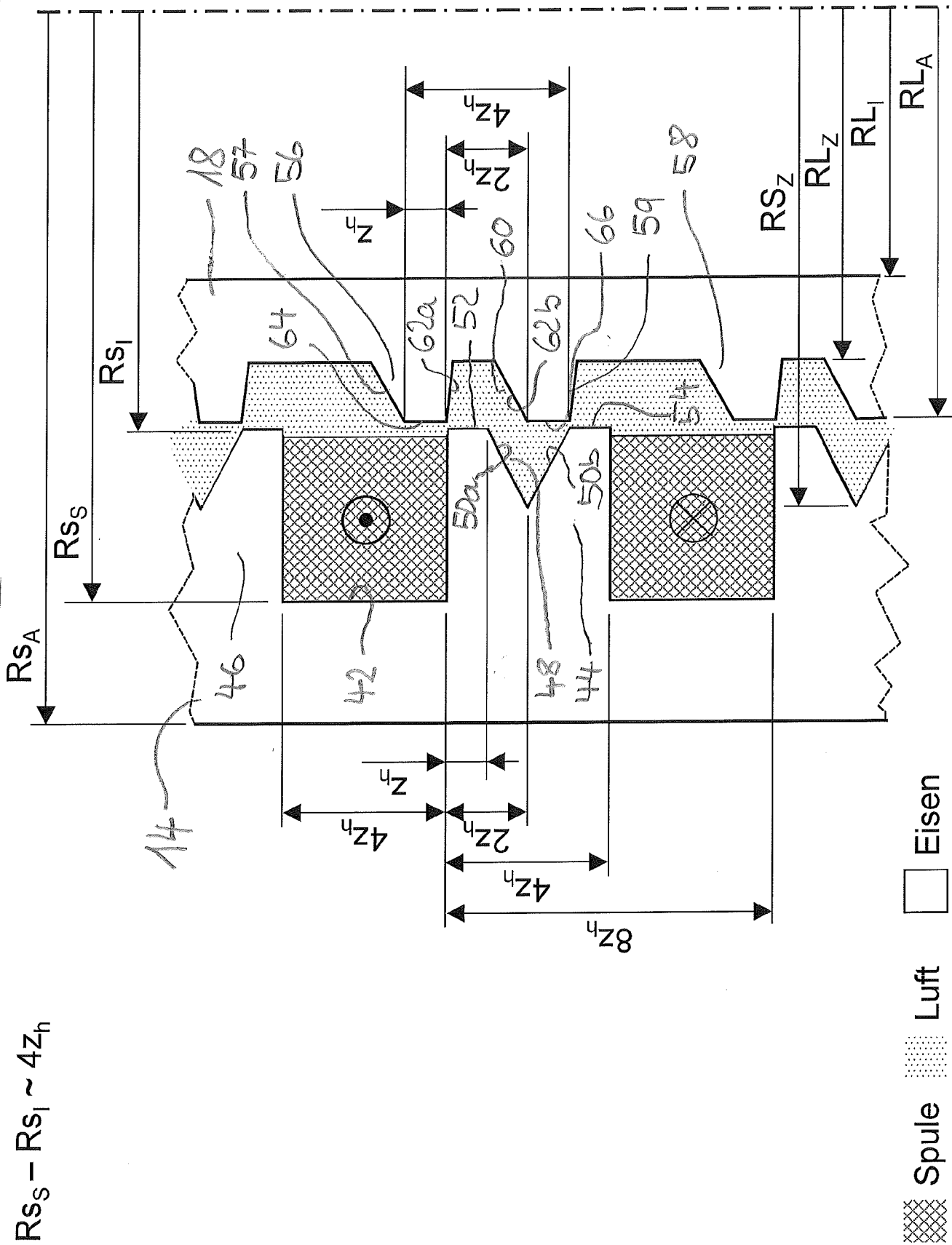


Fig. 5



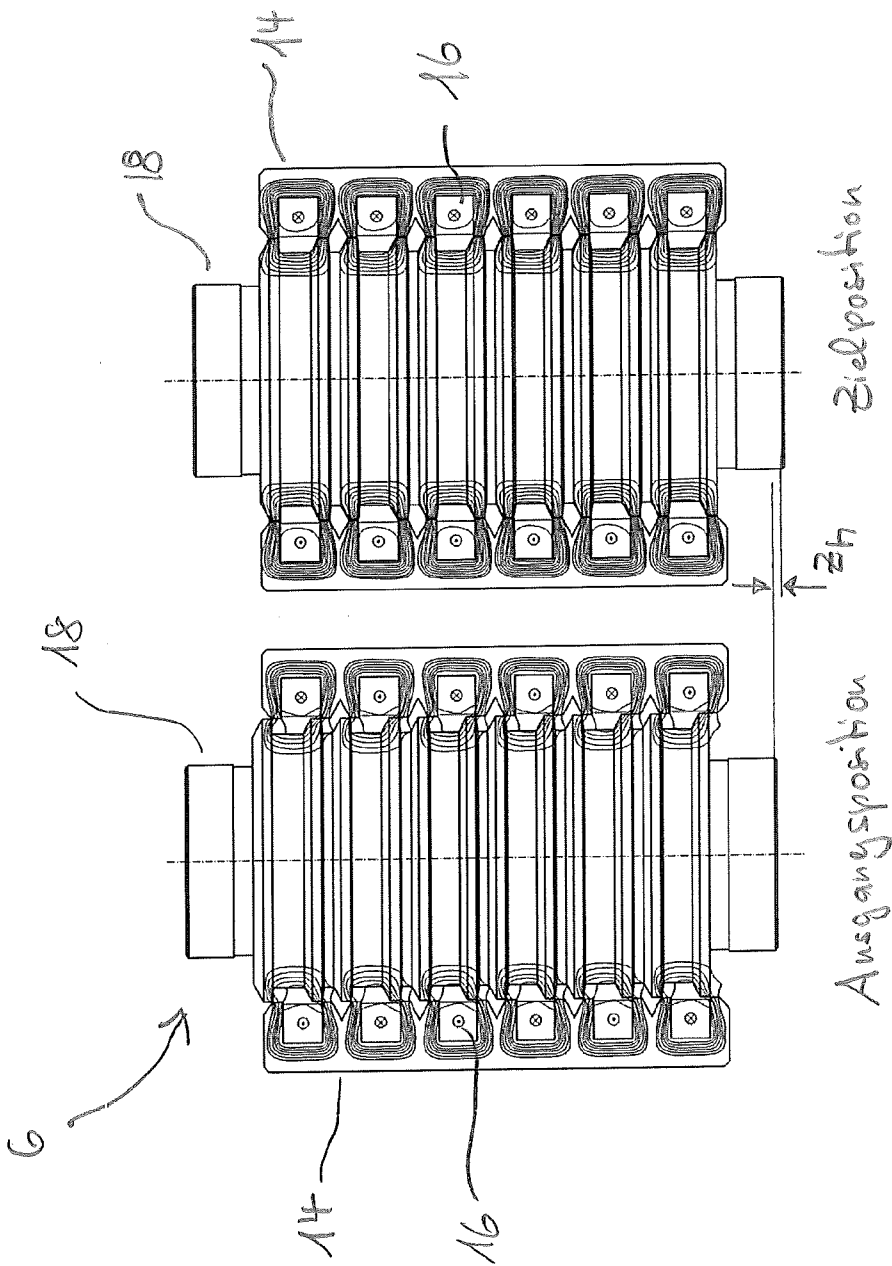


Fig. 6b

Fig. 6a

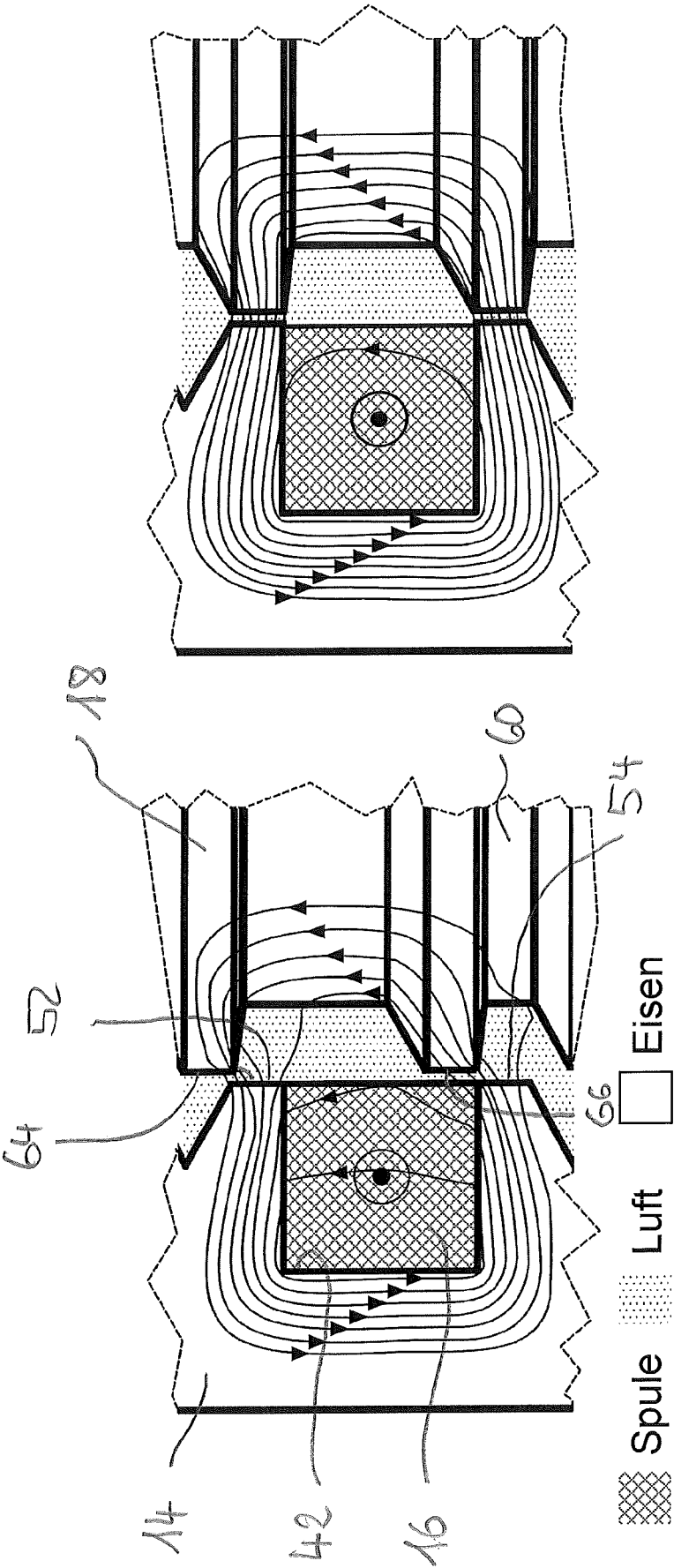
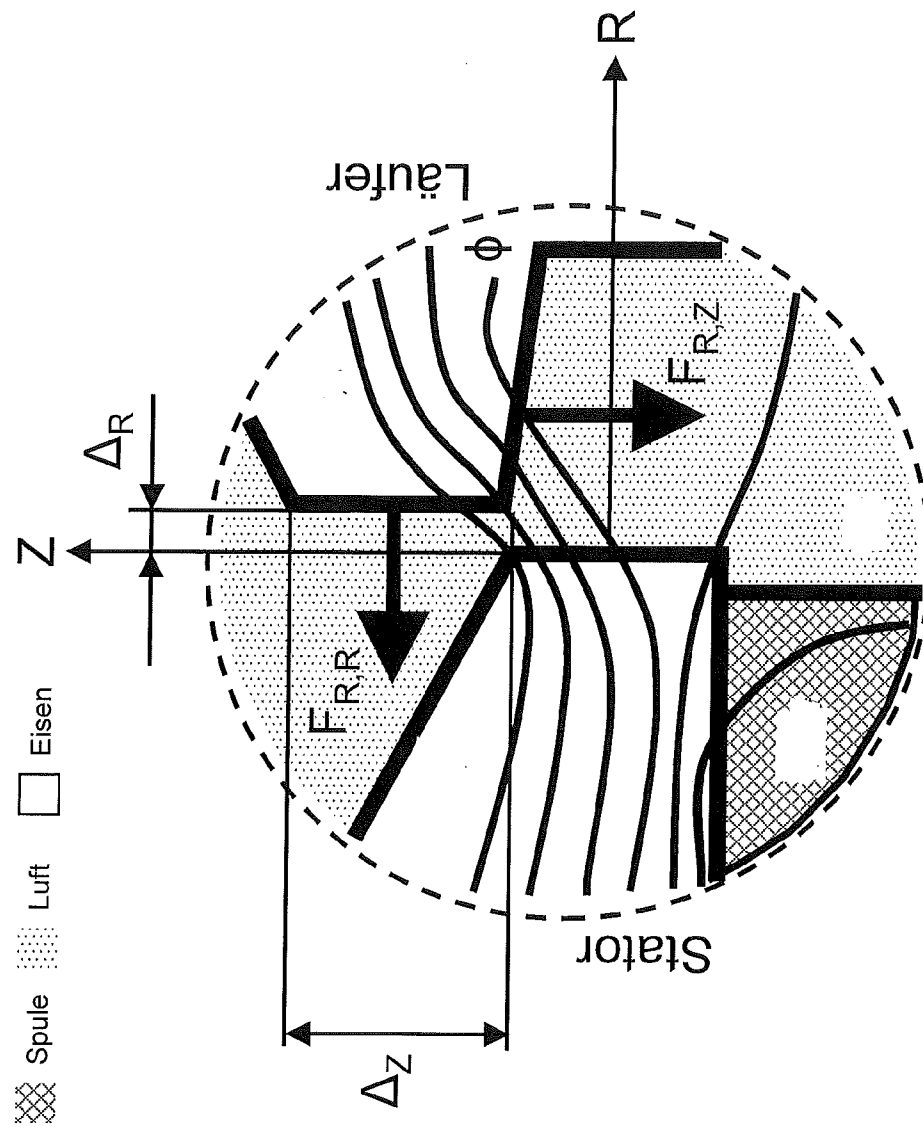


Fig. 7b

Fig. 7a

Fig. 8



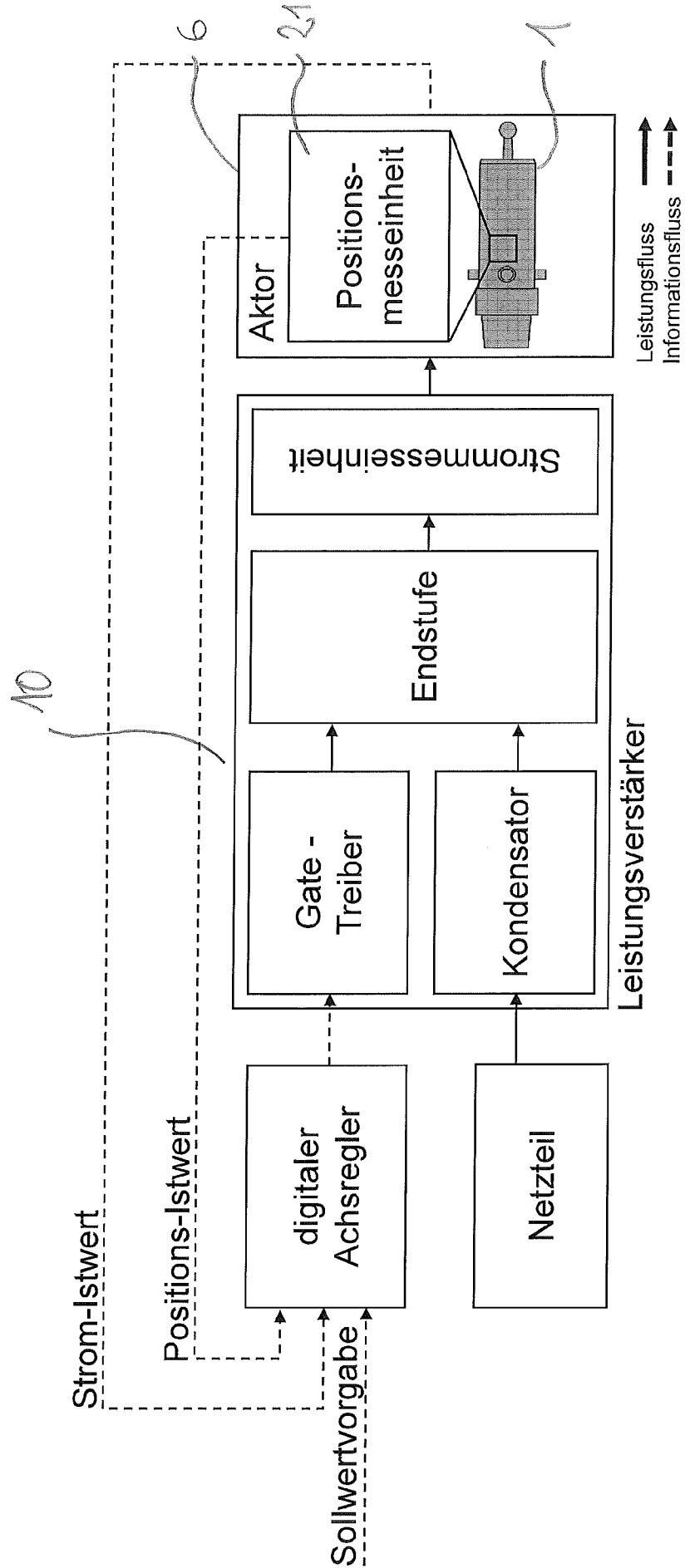


Fig.10

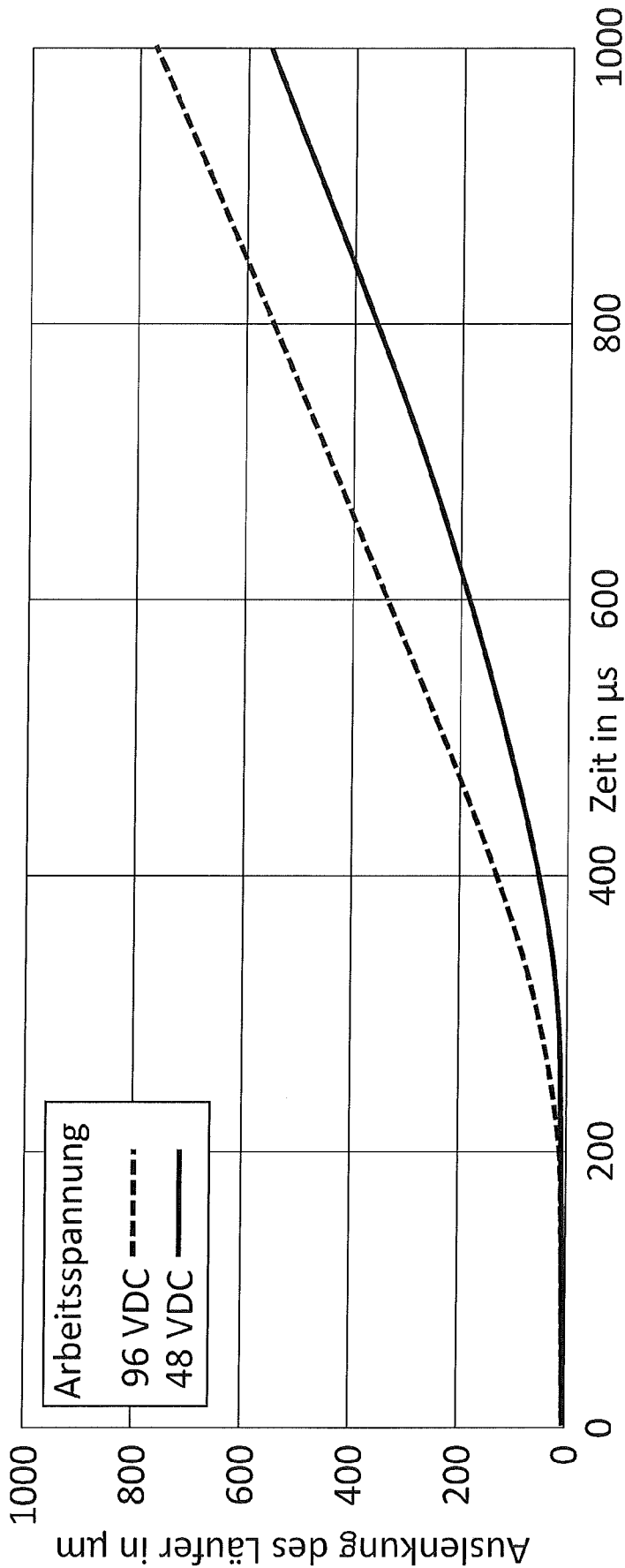


Fig.11

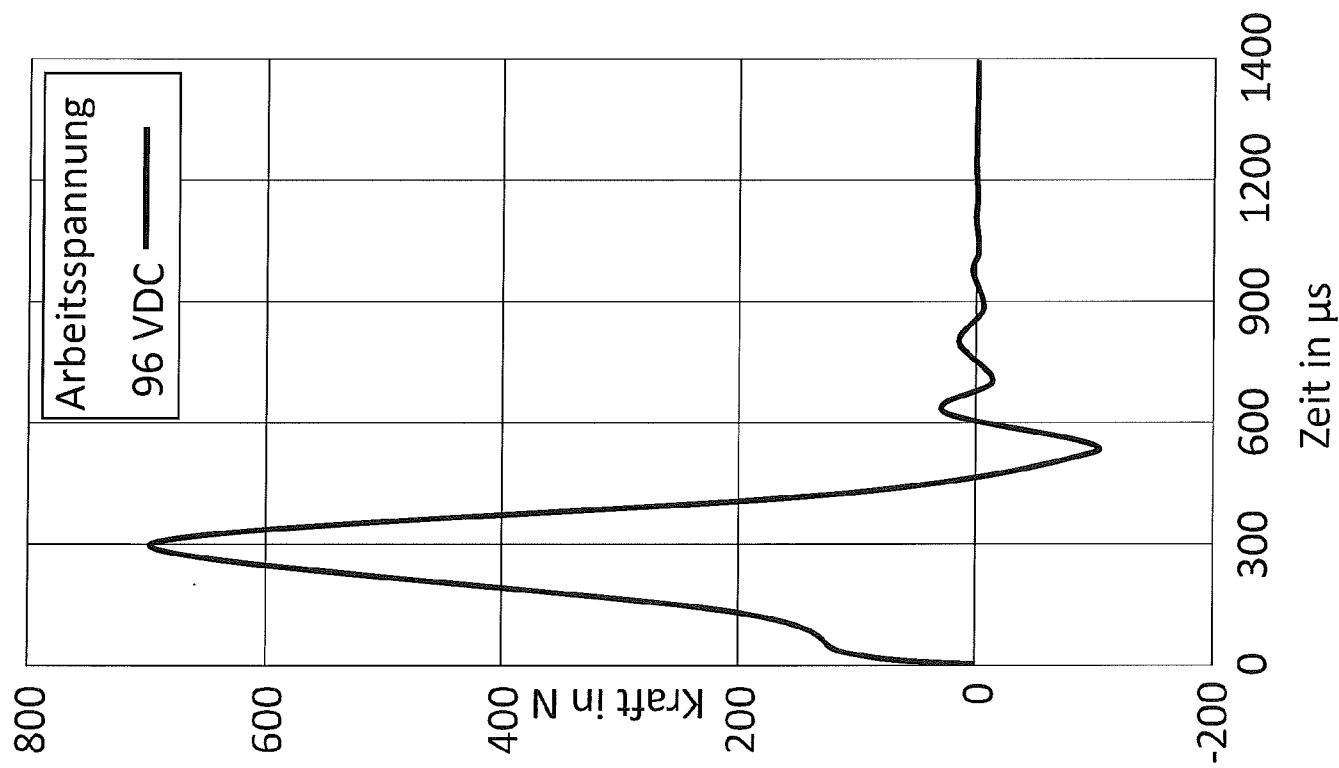


Fig.12

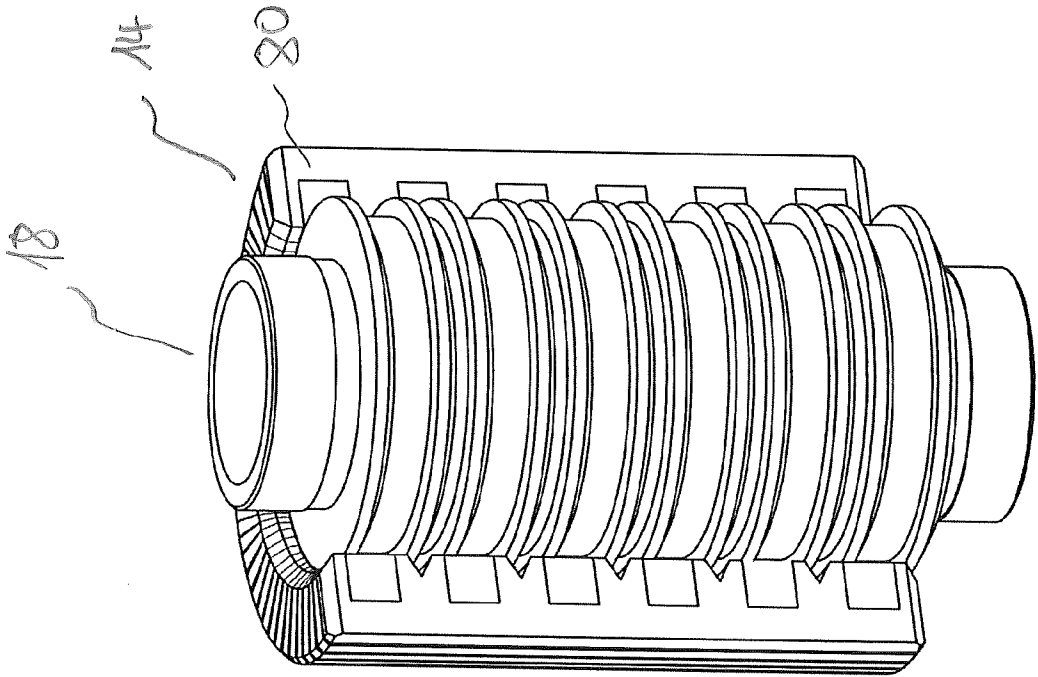


Fig. 14

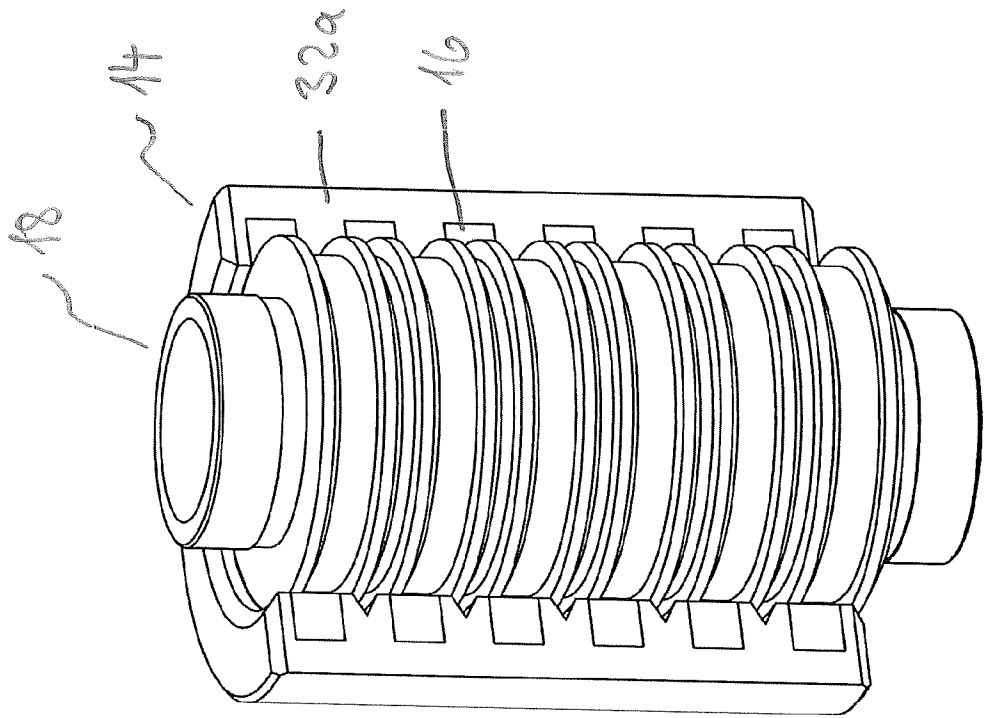


Fig. 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2018/081206

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02K 33/10(2006.01)i; **H02K 1/34**(2006.01)i; **H02K 29/06**(2006.01)n; **H02K 1/02**(2006.01)n; **H02K 1/14**(2006.01)n;
H02K 1/24(2006.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 4238699 A (SEILLY ALEC H [GB]) 09 December 1980 (1980-12-09) the whole document	1-14
Y	US 2008252150 A1 (GRUNDL ANDREAS [DE] ET AL) 16 October 2008 (2008-10-16) paragraphs [0034], [0067] - [0073]	1-14
Y	DE 4407385 A1 (JENOPTIK JENA GMBH [DE]) 07 September 1995 (1995-09-07) column 1, lines 26-28	1-14
Y	EP 2884637 A1 (OPTOTUNE AG [CH]) 17 June 2015 (2015-06-17) paragraph [0025] - paragraph [0027]; figure 4	1-14
Y	US 4748362 A (HEDLUND GUNNAR [SE]) 31 May 1988 (1988-05-31) column 4, line 5 - line 16; figure 3	3
Y	US 2002175586 A1 (HILL WOLFGANG [DE]) 28 November 2002 (2002-11-28) paragraphs [0013] - [0015]	9
Y	US 4543502 A (JARRET JACQUES H [FR] ET AL) 24 September 1985 (1985-09-24) column 3, line 15 - line 18	9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

13 February 2019

Date of mailing of the international search report

22 February 2019

Name and mailing address of the ISA/EP

**European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands**

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Mazagão Guerreiro, R

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2018/081206

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 4375793 A (SEILLY ALEC H [GB] ET AL) 08 March 1983 (1983-03-08) column 1, line 4 - line 20; figure 1	13,14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2018/081206

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	4238699	A	09 December 1980	AR	242464	A1	31 March 1993
				AU	523507	B2	29 July 1982
				BG	36639	A3	16 December 1984
				BR	7904991	A	29 April 1980
				CA	1116681	A	19 January 1982
				DD	145354	A5	03 December 1980
				DE	2931685	A1	21 February 1980
				ES	483126	A1	01 September 1980
				FR	2432758	A1	29 February 1980
				HU	182969	B	28 March 1984
				IN	151816	B	06 August 1983
				IT	1122666	B	23 April 1986
				MX	146899	A	02 September 1982
				PL	217598	A1	28 July 1980
				RO	78715	A	24 March 1982
				SU	1041047	A3	07 September 1983
				TR	21031	A	23 May 1983
				US	4238699	A	09 December 1980
US	2008252150	A1	16 October 2008	CN	101204000	A	18 June 2008
				DE	102005017483	A1	19 October 2006
				EP	1869753	A1	26 December 2007
				JP	2008536462	A	04 September 2008
				US	2008252150	A1	16 October 2008
				WO	2006108524	A1	19 October 2006
DE	4407385	A1	07 September 1995	NONE			
EP	2884637	A1	17 June 2015	EP	2884637	A1	17 June 2015
				EP	3080899	A1	19 October 2016
				US	2016306183	A1	20 October 2016
				WO	2015086166	A1	18 June 2015
US	4748362	A	31 May 1988	AT	385614	B	25 April 1988
				AU	582560	B2	06 April 1989
				BR	8407229	A	26 November 1985
				CA	1254608	A	23 May 1989
				CH	669484	A5	15 March 1989
				DE	3490616	C2	03 August 1989
				DE	3490616	T	09 January 1986
				DK	352185	A	02 August 1985
				ES	8608747	A1	16 June 1986
				FI	88231	B	31 December 1992
				FR	2557393	A1	28 June 1985
				GB	2162699	A	05 February 1986
				IT	1179885	B	16 September 1987
				JP	S61500825	A	24 April 1986
				SE	442368	B	16 December 1985
				SU	1426476	A3	23 September 1988
				US	4748362	A	31 May 1988
				WO	8502951	A1	04 July 1985
US	2002175586	A1	28 November 2002	CN	1261992	A	02 August 2000
				DE	19728172	A1	28 January 1999

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2018/081206

Patent document cited in search report				Publication date (day/month/year)		Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
				EP	1000458	A1	17 May 2000
				JP	2002507380	A	05 March 2002
				US	2002175586	A1	28 November 2002
				WO	9901924	A1	14 January 1999
US	4543502	A	24 September 1985	EP	0123617	A2	31 October 1984
				FR	2544926	A1	26 October 1984
				JP	S6020756	A	02 February 1985
				US	4543502	A	24 September 1985
US	4375793	A	08 March 1983	DE	3025445	A1	15 January 1981
				ES	8101700	A1	16 December 1980
				FR	2461097	A1	30 January 1981
				GB	2058992	A	15 April 1981
				IT	1131860	B	25 June 1986
				JP	S5614817	A	13 February 1981
				US	4375793	A	08 March 1983

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H02K33/10 H02K1/34 ADD. H02K29/06 H02K1/02 H02K1/14 H02K1/24		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) H02K		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	US 4 238 699 A (SEILLY ALEC H [GB]) 9. Dezember 1980 (1980-12-09) das ganze Dokument -----	1-14
Y	US 2008/252150 A1 (GRUNDL ANDREAS [DE] ET AL) 16. Oktober 2008 (2008-10-16) Absätze [0034], [0067] - [0073] -----	1-14
Y	DE 44 07 385 A1 (JENOPTIK JENA GMBH [DE]) 7. September 1995 (1995-09-07) Spalte 1, Zeilen 26-28 -----	1-14
Y	EP 2 884 637 A1 (OPTOTUNE AG [CH]) 17. Juni 2015 (2015-06-17) Absatz [0025] - Absatz [0027]; Abbildung 4 ----- -/-	1-14
☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
13. Februar 2019		22/02/2019
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Mazagão Guerreiro, R

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	US 4 748 362 A (HEDLUND GUNNAR [SE]) 31. Mai 1988 (1988-05-31) Spalte 4, Zeile 5 - Zeile 16; Abbildung 3 -----	3
Y	US 2002/175586 A1 (HILL WOLFGANG [DE]) 28. November 2002 (2002-11-28) Absätze [0013] - [0015] -----	9
Y	US 4 543 502 A (JARRET JACQUES H [FR] ET AL) 24. September 1985 (1985-09-24) Spalte 3, Zeile 15 - Zeile 18 -----	9
Y	US 4 375 793 A (SEILLY ALEC H [GB] ET AL) 8. März 1983 (1983-03-08) Spalte 1, Zeile 4 - Zeile 20; Abbildung 1 -----	13,14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2018/081206

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 4238699	A	09-12-1980	AR 242464 A1 31-03-1993
		AU 523507 B2 29-07-1982	
		BG 36639 A3 16-12-1984	
		BR 7904991 A 29-04-1980	
		CA 1116681 A 19-01-1982	
		DD 145354 A5 03-12-1980	
		DE 2931685 A1 21-02-1980	
		ES 483126 A1 01-09-1980	
		FR 2432758 A1 29-02-1980	
		HU 182969 B 28-03-1984	
		IN 151816 B 06-08-1983	
		IT 1122666 B 23-04-1986	
		MX 146899 A 02-09-1982	
		PL 217598 A1 28-07-1980	
		RO 78715 A 24-03-1982	
		SU 1041047 A3 07-09-1983	
		TR 21031 A 23-05-1983	
		US 4238699 A 09-12-1980	
US 2008252150	A1	16-10-2008	CN 101204000 A 18-06-2008
		DE 102005017483 A1 19-10-2006	
		EP 1869753 A1 26-12-2007	
		JP 2008536462 A 04-09-2008	
		US 2008252150 A1 16-10-2008	
		WO 2006108524 A1 19-10-2006	
DE 4407385	A1	07-09-1995	KEINE
EP 2884637	A1	17-06-2015	EP 2884637 A1 17-06-2015
		EP 3080899 A1 19-10-2016	
		US 2016306183 A1 20-10-2016	
		WO 2015086166 A1 18-06-2015	
US 4748362	A	31-05-1988	AT 385614 B 25-04-1988
		AU 582560 B2 06-04-1989	
		BR 8407229 A 26-11-1985	
		CA 1254608 A 23-05-1989	
		CH 669484 A5 15-03-1989	
		DE 3490616 C2 03-08-1989	
		DE 3490616 T 09-01-1986	
		DK 352185 A 02-08-1985	
		ES 8608747 A1 16-06-1986	
		FI 88231 B 31-12-1992	
		FR 2557393 A1 28-06-1985	
		GB 2162699 A 05-02-1986	
		IT 1179885 B 16-09-1987	
		JP S61500825 A 24-04-1986	
		SE 442368 B 16-12-1985	
		SU 1426476 A3 23-09-1988	
		US 4748362 A 31-05-1988	
		WO 8502951 A1 04-07-1985	
US 2002175586	A1	28-11-2002	CN 1261992 A 02-08-2000
		DE 19728172 A1 28-01-1999	
		EP 1000458 A1 17-05-2000	
		JP 2002507380 A 05-03-2002	
		US 2002175586 A1 28-11-2002	
		WO 9901924 A1 14-01-1999	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2018/081206

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 4543502	A	24-09-1985	EP 0123617 A2 31-10-1984
		FR 2544926 A1 26-10-1984	
		JP S6020756 A 02-02-1985	
		US 4543502 A 24-09-1985	
US 4375793	A	08-03-1983	DE 3025445 A1 15-01-1981
		ES 8101700 A1 16-12-1980	
		FR 2461097 A1 30-01-1981	
		GB 2058992 A 15-04-1981	
		IT 1131860 B 25-06-1986	
		JP S5614817 A 13-02-1981	
		US 4375793 A 08-03-1983	