



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) **CH** **715 359 B1**

(51) Int. Cl.: *H02K 16/04 (2006.01)*
H02K 7/12 (2006.01)
H02K 1/27 (2022.01)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

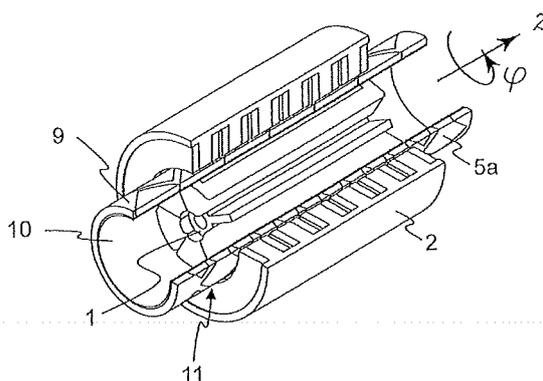
(21) Anmeldenummer:	01129/18	(73) Inhaber:	ETH Zürich, ETH Transfer HG E 47-49 Rämistrasse 101 8092 Zürich ETH-Zentrum (CH)
(22) Anmeldedatum:	19.09.2018	(72) Erfinder:	Spasoje Miric, 8051 Zürich (CH) Marcel Schuck, 8047 Zürich (CH) Arda Tüysüz, 64295 Darmstadt (DE) Johann Walter Kolar, 8044 Zürich (CH)
(43) Anmeldung veröffentlicht:	31.03.2020	(74) Vertreter:	Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 8032 Zürich (CH)
(24) Patent erteilt:	15.02.2022		
(45) Patentschrift veröffentlicht:	15.02.2022		

(54) **Linear-Rotatorischer elektromechanischer Aktuator.**

(57) Ein erfindungsgemässer linear-rotatorischer Aktuator dient zur Bewegung einer Bewegungsvorrichtung (5a) durch Rotation um eine Maschinenachse und Translation entlang der Maschinenachse. Er weist auf:

- einen ersten Stator (1) zum Erzeugen eines um die Maschinenachse drehenden Magnetfeldes;
- einen zweiten Stator (2) zur Bildung eines sich linear und parallel zu Maschinenachse bewegten Magnetfeldes;

wobei die Bewegungsvorrichtung (5a) Permanentmagneten in einer rotationszylindrischen Anordnung aufweist. Dabei bilden die Permanentmagneten eine einlagige Permanentmagnetanordnung (11), wobei die Permanentmagneten in radialer Richtung magnetisiert sind und an einem äusseren Umfang der Bewegungsvorrichtung (5a) sowohl in Richtung parallel zur Maschinenachse wie auch in Umfangsrichtung jeweils ein Muster mit sich abwechselnden Reihen von magnetischen Nord- und Südpolen bilden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der elektrischen Antriebe und elektrischen Aktuatoren und insbesondere auf Aktuatoren für lineare und/oder rotatorische Bewegungen.

[0002] Hochdynamische und präzise Aktuatoren für rotatorische und lineare Bewegungen, nachfolgend als linear-rotatorische Aktuatoren (LRA) bezeichnet, werden in zahlreichen Anwendungen, beispielsweise in Bestückungsautomaten und Werkzeugmaschinen eingesetzt.

Overboom, T. T., et al. „Design and Optimization of a Rotary Actuator for a Two-Degree-of Freedom φ -Module“, in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 6, pp. 2401-2409, November/December 2010, beschreibt deren Einsatz in Bestückungsautomaten. Die Aktuatoren weisen dabei im Allgemeinen einen stationären Teil, nachfolgend als Stator bezeichnet, und einem beweglichen Teil, nachfolgend als Bewegungsvorrichtung bezeichnet auf.

[0003] LRA entstehen durch Kopplung eines Aktuators für lineare Bewegungen, nachfolgend als linearer Aktuator (LA) bezeichnet, und eines Aktuators für rotatorische Bewegungen, nachfolgend als rotatorischer Aktuator (RA) bezeichnet. Diese Aktuatoren können auf mehrere Arten miteinander gekoppelt sein. Die Art der Kopplung lässt sich im Allgemeinen in zwei Gruppen, nämlich mechanische Kopplung und magnetische Kopplung der Aktuatoren einteilen.

[0004] Im Falle mechanischer Kopplung sind der LA und der RA mechanisch miteinander gekoppelt. Zur Realisierung der mechanischen Kopplung gibt es zwei Möglichkeiten: Als erste Möglichkeit wird der gesamte RA inkl. Stator und BV durch den LA bewegt. Alternativ wird umgekehrt der gesamte LA vom RA bewegt. Der Nachteil einer solchen Anordnung sind ein hoher Platzbedarf des Aktuators und eine hohe Masse der bewegten Teile, woraus eine geringe Dynamik des LRA resultiert. Als zweite Möglichkeit verwenden der RA und der LA die gleiche BV, wobei der Stator des RA und der Stator des LA in axialer Richtung zueinander versetzt sind. Der axiale Abstand der Statoren muss mindestens dem gewünschten axialen Hubweg der BV entsprechen. Dies resultiert in einer erhöhten Länge des LRA.

[0005] Im Falle magnetischer Kopplung des LA und des RA können ein kompakterer Aufbau und höhere Dynamik des LRA erreicht werden. Zur Realisierung der magnetischen Kopplung gibt es drei Möglichkeiten: Als erste Möglichkeit weist der LRA nur einen Stator auf. Dieser weist eine Spulenanordnung auf welche die Anforderungen der linearen und rotatorischen Bewegungen erfüllt. Der Stator weist eine zweilagige Anordnung der Windungen auf, wobei eine Windungslage für lineare Bewegungen und die andere Windungslage für rotatorische Bewegungen verwendet wird. Alternativ weist der Stator eine Windungslage mit konzentrierten Spulen auf, in denen superpositionierte Ströme für lineare und rotatorische Bewegungen fließen. Nachteile eines solchen Systems sind eine komplizierte Fertigung des Stators mit einer erhöhten Spulenzahl, eine hohe Komplexität des Umrichters und ein hoher Regelungsaufwand.

[0006] L. Xu, M. Lin, X. Fu, X. Fu, X. Zhu, C. Zhang and W. Wu, „Orthogonal Magnetic Field Analysis of a Double-Stator Linear-Rotary Permanent Magnet Motor with Orthogonally Arrayed Permanent Magnets“, in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 11, November 2017 beschreibt als zweite Möglichkeit einen magnetisch gekoppelten LRA, der zwei in radialer Richtung zueinander versetzte Statoren aufweist, wobei beispielsweise ein Stator innerhalb der BV und ein Stator ausserhalb der BV angebracht ist. Ein solcher Aktuator wird als Doppel Stator (DS) LRA bezeichnet. Der DS LRA kann mit innerem RA und äusserem LA oder umgekehrt mit innerem LA und äusserem RA implementiert werden. Die bekannte BV eines DS LRA weist einen magnetischen Rückschluss und zwei Gruppen von Permanentmagneten auf. Die eine dieser Gruppen ist Teil des LA, die andere ist Teil des RA. Die Permanentmagnete sind auf der Innenseite und der Aussenseite des magnetischen Rückschlusses (aufweisend ein magnetisch leitendes Material) angebracht. Diese Konstruktion resultiert in einer sperrigen und schweren BV, wodurch die Dynamik des LRA limitiert wird. Eine solche Konstruktion eignet sich daher für Anwendungen mit geringen dynamischen Anforderungen die jedoch ein hohes Drehmoment und hohe Kraft erfordern.

[0007] Anwar Chitayat, Mustanzir Faizullahoy, „System and method to control a rotarylinear actuator“, Patent US7218017 B1 beschreibt als dritte Möglichkeit einen LRA mit zwei in Umfangsrichtung zueinander versetzte Statoren. Die BV weist lediglich eine Lage von Permanentmagneten auf die hinsichtlich ihrer Anordnung sowohl die Anforderungen des LA als auch des RA erfüllen. Nachteile dieser Anordnung liegen in der Asymmetrie in Umfangsrichtung aus der eine dauerhafte an der BV angreifende magnetische Kraft in radialer Richtung und dadurch erhöhter Verschleiss der eingesetzten mechanischen Lager resultiert.

[0008] Aufgabe der Erfindung ist es, einen linear-rotatorischen Aktuator zu schaffen, der gut für hochdynamische Antriebe geeignet ist.

[0009] Die Aufgabe wird gelöst durch einen linear-rotatorischen Aktuator gemäss den Patentansprüchen.

[0010] Der linear-rotatorische Aktuator dient zur Bewegung einer Bewegungsvorrichtung durch Rotation um eine Maschinenachse und Translation entlang der Maschinenachse. Er weist auf:

- einen ersten Stator zum Erzeugen eines um die Maschinenachse drehenden Magnetfeldes;
- einen zweiten Stator zur Bildung eines sich linear und parallel zur Maschinenachse bewegten Magnetfeldes;

wobei die Bewegungsvorrichtung Permanentmagneten in einer rotationszylindrischen Anordnung aufweist. Dabei bilden die Permanentmagneten eine einlagige Permanentmagnetanordnung, wobei die Permanentmagneten in radialer Richtung

magnetisiert sind und an einem äusseren Umfang der Bewegungsvorrichtung sowohl in Richtung parallel zur Maschinenachse wie auch in Umfangsrichtung jeweils ein Muster mit sich abwechselnden Reihen von magnetischen Nord- und Südpolen bilden.

[0011] Mit anderen Worten: es liegen in Richtung parallel zur Maschinenachse abwechselnd Reihen von magnetischen Nordpolen und Südpolen vor, und es liegen in Umfangsrichtung abwechselnd Reihen von magnetischen Nordpolen und Südpolen vor. Die Maschinenachse ist gemeinsame Mittelachse und Längsachse der beiden Statoren.

[0012] Solch eine Bewegungsvorrichtung benötigt keinen aus ferromagnetischem Material bestehenden Kern, also keinen magnetischen Rückschluss, da sich der magnetische Fluss durch den ersten Stator (des rotatorischen Aktuators) und den zweiten Stator (des linearen Aktuators) schliessen kann. Dadurch werden die Masse und das Trägheitsmoment der Bewegungsvorrichtung, im Vergleich zum Stand der Technik, reduziert. Die Magnetanordnung kann dabei eine Flussdichteverteilung erzeugen die sowohl in axialer als auch in Umfangsrichtung alternierendes Verhalten aufweist um sowohl die Anforderungen des linearen Aktuators als auch des rotatorischen Aktuators zu erfüllen.

[0013] In Ausführungsformen kann sich mindestens ein Teil der Permanentmagnetanordnung zu verschiedenen Zeiten, oder auch zur gleichen Zeit, im Wirkungsbereich des ersten Stators und im Wirkungsbereich des zweiten Stators befinden. „Im Wirkungsbereich“ bedeutet hier, dass durch Speisung des jeweiligen Stators eine Kraft respektive ein Moment in der Bewegungsvorrichtung erzeugbar ist.

[0014] In Ausführungsformen weist die Permanentmagnetanordnung rautenförmige Permanentmagneten auf, deren Kanten in einem Winkel von fünfundvierzig Grad zur Maschinenachse und auch zur Umfangsrichtung stehen.

[0015] In Ausführungsformen weist die Permanentmagnetanordnung quaderförmige Permanentmagneten auf, deren Kanten in einem Winkel von null und neunzig Grad zur Maschinenachse und auch zur Umfangsrichtung stehen.

[0016] In Ausführungsformen weist die Permanentmagnetanordnung scheibenförmige respektive kreiszylindrische Permanentmagneten auf.

[0017] Bei allen Ausführungsformen können die Permanentmagneten in der Bewegungsvorrichtung so angeordnet sein, dass ihre Magnetisierung in radialer Richtung der Bewegungsvorrichtung verläuft. D.h. es zeigt bei jedem der Permanentmagneten jeweils der Südpol gegen die Aussenseite der Bewegungsvorrichtung und der Nordpol gegen die Innenseite, oder umgekehrt.

[0018] Bei allen Ausführungsformen können die Permanentmagneten gekrümmt sein, so dass bei Anordnung in der Bewegungsvorrichtung ihre inneren und/oder ihre äusseren Flächen jeweils in einer Mantelfläche eines Zylinders um die Längsachse der Bewegungsvorrichtung liegen.

[0019] In Ausführungsformen ist die Bewegungsvorrichtung frei von einem magnetischen Rückschluss.

[0020] In Ausführungsformen sind der erste Stator und der zweite Stator konzentrisch zueinander angeordnet. Der erste und zweite Stator sind also radial zueinander versetzt.

[0021] In Ausführungsformen sind der erste Stator und der zweite Stator in Richtung der Maschinenachse versetzt zueinander angeordnet. Der erste und zweite Stator sind also axial zueinander versetzt.

[0022] In Ausführungsformen weist der linear-rotatorische Aktuator eine Positionierungsvorrichtung mit Öffnungen zur Aufnahme der Permanentmagneten, auf, und eine innerhalb und/oder ausserhalb der Positionierungsvorrichtung angeordnete, rotationszylindrische Unterstützvorrichtung zur mechanischen Stabilisierung der Positionierungsvorrichtung und der Permanentmagneten.

[0023] Im Folgenden wird der Erfindungsgegenstand anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen, welche in den beiliegenden Zeichnungen dargestellt sind, näher erläutert. Es zeigen jeweils schematisch:

Figur 1 Stand der Technik eines linear-rotatorischen Aktuators mit mechanischer Kopplung, wobei die Statoren des linearen Aktuators und des rotatorischen Aktuators axial zueinander verschoben sind und dieselbe Bewegungsvorrichtung verwenden;

Figur 2a-d 3D Zeichnungen und Schnittansichten des Stands der Technik eines linear-rotatorischen Aktuators mit radial zueinander versetzten Statoren die innerhalb und ausserhalb der Bewegungsvorrichtung angebracht sind;

Figur 3 Stand der Technik einer Bewegungsvorrichtung für einen linear-rotatorischen Aktuator mit zwei Statoren. Die Bewegungsvorrichtung weist zwei Gruppen von Permanentmagneten und einen magnetischen Rückschluss auf;

Figur 4a-b eine Anordnung rautenförmiger Permanentmagnete die sowohl die Anforderungen des linearen Aktuators als auch des rotatorischen Aktuators erfüllt;

Figur 5a-b eine Anordnung quaderförmiger Permanentmagnete die sowohl die Anforderungen des linearen Aktuators als auch des rotatorischen Aktuators erfüllt;

Figur 6a-b möglicher Herstellungsprozess der Bewegungsvorrichtung mit einer Lage von Permanentmagneten ohne Rückschluss, exemplarisch für rautenförmige Permanentmagnete. Der Prozess ist analog für quaderförmige Permanentmagnete;

Figur 7 einen linear-rotatorischen Aktuator welcher zwei radial zueinander versetzte Statoren aufweist. Die Bewegungsvorrichtung weist nur eine Lage von Permanentmagneten und keinen magnetischen Rückschluss auf. Die gezeigte Bewegungsvorrichtung weist rautenförmige Permanentmagnete auf. Eine äquivalente Ausführung mit quaderförmigen Permanentmagneten ist möglich;

Figur 8 einen Vergleich der Axialkraft, des Drehmoments, der Axialbeschleunigung und der Umfangsbeschleunigung eines linear-rotatorischen Aktuators mit zwei Statoren und einer herkömmlichen Bewegungsvorrichtung mit den gleichen Eigenschaften eines linear-rotatorischen Aktuators mit zwei Statoren und der vorgestellten Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen und quaderförmigen Permanentmagneten;

Figur 9 einen Vergleich des Rastmoments eines linear-rotatorischen Aktuators mit zwei Statoren und einer herkömmlichen Bewegungsvorrichtung mit dem eines linear-rotatorischen Aktuators mit zwei Statoren und den vorgestellten Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen und quaderförmigen Permanentmagneten;

Figur 10 einen Vergleich der Rastkraft eines linear-rotatorischen Aktuators mit zwei Statoren und einer herkömmlichen Bewegungsvorrichtung mit der eines linear-rotatorischen Aktuators mit zwei Statoren und den vorgestellten Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen und quaderförmigen Permanentmagneten; und

Figur 11 einen linear-rotatorischen Aktuator welcher zwei axial zueinander versetzte Statoren aufweist. Die Bewegungsvorrichtung weist nur eine Lage von Permanentmagneten und keinen Rückschluss auf. Die gezeigte Bewegungsvorrichtung weist rautenförmige Permanentmagnete auf. Eine äquivalente Ausführung mit quaderförmigen Permanentmagneten ist möglich.

[0024] Die in den Zeichnungen verwendeten Bezugszeichen und deren Bedeutung sind in der Bezugszeichenliste zusammengefasst aufgelistet. Grundsätzlich sind in den Figuren gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

[0025] **Figur 1** zeigt den Stand der Technik eines linear-rotatorischen Aktuators (LRA) mit mechanischer Kopplung zwischen einem rotatorischen Aktuator (RA) und einem linearen Aktuator (LA) mittels einer Bewegungsvorrichtung 5. Der RA weist Permanentmagnete 3 auf welche mit einem Stator 1 interagieren um ein an der Bewegungsvorrichtung 5 angreifendes Drehmoment zu generieren. Der LA weist andere Permanentmagnete 4 auf welche mit einem anderen Stator 2 interagieren um eine an der Bewegungsvorrichtung 5 angreifende Kraft in axiale Richtung zu generieren. Zur besseren Sichtbarkeit der Elemente wurde bei der Darstellung der Statoren 1 und 2 ein Winkelsegment ausgespart. Durch die Kopplung beider Aktuatoren können sowohl rotatorische als auch lineare Bewegungen der Bewegungsvorrichtung 5 erzielt werden. Ein Nachteil dieser Anordnung ist die zwingend erforderliche axiale Verschiebung Δz zwischen den Statoren 1 und 2, welche in einer erhöhten Länge des LRA resultiert. Diese Verschiebung ist notwendig um bei axialer Verschiebung der Bewegungsvorrichtung 5 eine konstante axiale Länge zu gewährleisten, über welche die Permanentmagnete 3 mit dem Stator 1 des RA sowie die Permanentmagnete 4 mit dem Stator 2 des LA interagieren.

[0026] **Figur 2** zeigt den Stand der Technik eines LRA mit zwei radial zueinander verschobenen Statoren mit Querschnittsansichten AA' und BB' (vgl. **Figur 2a**). In dieser Anordnung weisen der LA und der RA je einen Stator auf. Je eine Gruppe von Permanentmagneten welche in der Bewegungsvorrichtung 5 radial zueinander verschoben angebracht ist wird für den LA und den RA verwendet.

[0027] **Figur 2b** zeigt eine Teilansicht des Aktuators. Ein innerhalb der Bewegungsvorrichtung 5 angebrachter RA mit Stator 1 weist Spulen 6 auf und wird von der Bewegungsvorrichtung 5 umschlossen. Ein ausserhalb der Bewegungsvorrichtung 5 angebrachter LA mit anderem Stator 2 weist andere Spulen 7 auf und umschliesst die Bewegungsvorrichtung 5. Zur besseren Sichtbarkeit der Elemente wurde bei der Darstellung des Stators 2, der Statorspulen des LA 7, der Statorspulen des RA 6 und der Bewegungsvorrichtung 5 ein Winkelsegment ausgespart.

[0028] Die Bewegungsvorrichtung 5 kann sowohl translatorische Bewegungen in axialer Richtung z einer Maschinenachse als auch rotatorische Bewegungen in Umfangsrichtung ϕ um die Maschinenachse ausführen. Die Bewegungsvorrichtung 5 weist einen, zumeist aus ferromagnetischem Material bestehenden, Kern 8 sowie innere Permanentmagnete 3 auf der Innenseite des Kerns 8 und äussere Permanentmagnete 4 auf der Aussenseite des Kerns 8 auf. Der Kern 8 wirkt als magnetischer Rückschluss.

[0029] Die entlang der Maschinenachse über die Länge der Bewegungsvorrichtung 5 ausgedehnten auf der Innenseite des Kerns 8 angebrachten inneren Permanentmagnete 3 sind so angeordnet, dass sie mit den Spulen 6 des inneren Stators 1 interagieren, wodurch sich der RA ergibt (vgl. transversale Schnittansicht AA' in **Figur 2c**).

[0030] Die entlang der Umfangsrichtung der Bewegungsvorrichtung 5 ausgedehnten auf der Aussenseite des Kerns 8 angebrachten äusseren Permanentmagnete 4 sind so angeordnet, dass sie mit den Spulen 7 des äusseren Stators 2 interagieren, wodurch sich der LA ergibt (vgl. longitudinale Schnittansicht BB' in **Figur 2d**).

[0031] Der Stator des RA 1 und der Stator des LA 2 sind mechanisch miteinander verbunden. Diese Verbindung ist der Deutlichkeit halber nicht dargestellt.

[0032] **Figur 3** zeigt den Stand der Technik für den Aufbau einer Bewegungsvorrichtung 5 für den in **Figur 2** dargestellten LRA. Die Bewegungsvorrichtung 5 weist die äusseren Permanentmagnete 4, den als magnetischer Rückschluss wirkende Kern 8 sowie die inneren Permanentmagnete 3 auf. Aus diesem Aufbau resultieren eine hohe Masse und ein hohes Trägheitsmoment der Bewegungsvorrichtung 5. Dies macht eine solche Bewegungsvorrichtung 5, und damit den in **Figur 2** dargestellten LRA, ungeeignet für Anwendungen mit hohen dynamischen Anforderungen. Eine Reduktion der Masse und des Trägheitsmoments führt zu geringen Dicken der Permanentmagnete, was die Herstellung der Bewegungsvorrichtung 5 erschwert. Um dieses Problem zu beheben und um eine hohe Dynamik mit einem LRA mit zwei Statoren zu erzielen, ist eine nichttriviale Modifikation der Geometrie der Bewegungsvorrichtung notwendig.

[0033] Ein Drehmoment T' des LRA wird durch Interaktion der Permanentmagnete 3 des RA mit dem Stator 1 des RA generiert. Dazu alterniert die von den inneren Permanentmagneten 3 des RA generierte magnetische Flussdichte in Umfangsrichtung der Bewegungsvorrichtung 5. Um dies zu ermöglichen, alterniert die Magnetisierung der inneren Permanentmagnete 3 des RA in Umfangsrichtung der Bewegungsvorrichtung 5 zwischen einem magnetischen Nordpol und einem magnetischen Südpol.

[0034] Eine in axialer Richtung wirkende lineare Kraft F des LRA wird durch Interaktion der äusseren Permanentmagnete 4 des LA mit dem Stator 2 des LA generiert. Dazu alterniert die von den äusseren Permanentmagneten 4 des LA generierte magnetische Flussdichte in axialer Richtung der Bewegungsvorrichtung 5. Um dies zu ermöglichen, alterniert die Magnetisierung der äusseren Permanentmagnete 4 des LA in axialer Richtung der Bewegungsvorrichtung 5 zwischen magnetischem Nordpol und magnetischem Südpol.

[0035] Im Folgenden sind Beispiele zur Ausführung der Erfindung beschrieben.

[0036] Die in **Figur 4** gezeigte Anordnung weist rautenförmige Permanentmagnete auf. **Figur 4a** zeigt deren zylinderförmige Anordnung als Bewegungsvorrichtung. **Figur 4b** zeigt eine abgerollte Darstellung der Anordnung. Es ist eine simultane Abwechslung zwischen magnetischen Nordpolen N und magnetischen Südpolen S der Permanentmagnete sowohl in Umfangsrichtung φ als auch in axialer Richtung z sichtbar.

[0037] Die in **Figur 5** gezeigte Anordnung weist quaderförmige Permanentmagnete auf. **Figur 5a** zeigt deren zylinderförmige Anordnung als Bewegungsvorrichtung, **Figur 5b** zeigt eine abgerollte Darstellung der Anordnung. Die simultane Abwechslung zwischen magnetischen Nordpolen N und magnetischen Südpolen S der Permanentmagnete sowohl in Umfangsrichtung φ als auch in axialer Richtung z ist sichtbar.

[0038] Anstelle der in **Figur 5** gezeigten quaderförmigen Permanentmagnete kann die Bewegungsvorrichtung auch scheibenförmige respektive kreiszylindrische Permanentmagnete in der in **Figur 5** dargestellten Anordnung aufweisen. Die Abwechslung zwischen magnetischen Nordpolen N und magnetischen Südpolen S der Permanentmagnete sowohl in Umfangsrichtung φ als auch in axialer Richtung z liegt auch in dieser Anordnung vor.

[0039] Die verschiedenen Anordnungen von Permanentmagneten werden zusammenfassend als Permanentmagnetanordnung 11 bezeichnet.

[0040] Zur Realisierung einer Bewegungsvorrichtung 5a mit den in **Figur 4** und **Figur 5** gezeigten Permanentmagnetanordnung 11 kann diese neben den gezeigten Permanentmagneten eine mechanische Unterstützung aufweisen. **Figur 6a** zeigt beispielhaft einen möglichen Herstellungsprozess der Bewegungsvorrichtung für rautenförmige Permanentmagnete. Der Prozess ist äquivalent für quaderförmige Permanentmagnete. Hierzu werden die in der vorgesehenen Form vorliegenden Permanentmagnete mithilfe einer Positionierungsvorrichtung 9 positioniert. Die Positionierungsvorrichtung 9 wird über eine aus nicht ferromagnetischem Material bestehende Unterstützungsvorrichtung 10 gestülpt. Die Positionierungsvorrichtung 9 weist Öffnungen zur Aufnahme der Permanentmagneten auf. Um eine geringe Masse der Bewegungsvorrichtung zu erzielen, kann die Unterstützungsvorrichtung 10 hohl mit geringer Wandstärke, beispielsweise aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff, ausgeführt werden. Die dauerhafte Fixierung der genannten Komponenten kann beispielsweise durch Klebeverbindungen erfolgen. **Figur 6b** zeigt eine beispielhafte Realisierung der derart hergestellten Bewegungsvorrichtung.

[0041] **Figur 7** zeigt einen kompletten LRA mit zwei Statoren, welcher die vorgestellte Bewegungsvorrichtung 5a mit den in **Figur 4** oder **Figur 5** dargestellten Anordnungen 11 von Permanentmagneten aufweist. Die gezeigte Bewegungsvorrichtung 5a weist rautenförmige Permanentmagnete auf. Eine äquivalente Ausführung mit quaderförmigen Permanentmagneten ist möglich. Die Bewegungsvorrichtung 5a ist im radialen Spalt zwischen dem (hier inneren) Stator des RA 1 und dem (hier äusseren) Stator des LA 2 angebracht und ersetzt die inneren Permanentmagnete 3 des RA, die äusseren Permanentmagnete 4 des LA und den Kern 8 der in **Figur 3** dargestellten herkömmlichen Bewegungsvorrichtung 5. Zur beweglichen Lagerung der Bewegungsvorrichtung können beispielsweise kontaktbehafte mechanische Lager (Gleitlager, Rollenlager, Kugellager), kontaktlose mechanische Lager (Gaslager) und/oder Magnetlager eingesetzt werden.

[0042] **Figur 8** zeigt einen Vergleich zwischen dem in **Figur 2** dargestellten LRA mit zwei Statoren und einer herkömmlichen Bewegungsvorrichtung 5 und dem in **Figur 7** dargestellten LRA mit zwei Statoren und den vorgestellten Bewegungsvorrichtungen 5a gem. **Figur 6**. Der Vergleich wurde für gleiche Gesamtverluste in den Spulen 6 des RA und

den Spulen 7 des LA durchgeführt. Die Leistungsfähigkeit beider LRA wird anhand von vier Kenngrößen verglichen, welche in **Figur 8** mit den Bezugszeichen K, D, AB, und UB referenziert sind. Dabei handelt es sich um die Kraft in axiale Richtung K, das Drehmoment um die Maschinenachse D, die Beschleunigung in axialer Richtung AB und die Beschleunigung in Umfangsrichtung UB. Die Ergebnisse sind für die vorgestellte Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen Permanentmagneten RB und für die vorgestellte Bewegungsvorrichtung mit quaderförmigen Permanentmagneten QB dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit einer herkömmlichen Bewegungsvorrichtung HB eine höhere Kraft K und ein höheres Drehmoment D erzielt werden können. Dennoch ist die, für eine Anwendung relevante, erzielbare Beschleunigung in axialer Richtung AB und die Beschleunigung in Umfangsrichtung UB mit den vorgestellten Bewegungsvorrichtungen (RB und QB) höher. Diese Vorteile resultieren aus der vergleichsweise geringen Masse und dem vergleichsweise geringen Trägheitsmoment der vorgestellten Bewegungsvorrichtungen. Weitere Vorteile der vorgestellten Bewegungsvorrichtungen sind eine vereinfachte Herstellbarkeit, der verringerte Einsatz von permanentmagnetischem Material durch Nutzung des erzeugten Magnetfeldes von beiden Seiten (radial innerhalb und ausserhalb der Bewegungsvorrichtung) sowie der Wegfall des Kerns.

[0043] Wichtige Eigenschaften elektrischer Maschinen sind das auftretende Rastmoment und die auftretende Rastkraft. Diese sollten möglichst gering sein, beispielsweise um nichtlineare Drehmomentbildung und nichtlineare Kraftbildung zu minimieren.

[0044] **Figur 9** zeigt einen Vergleich des auftretenden Rastmoments RM der herkömmlichen Bewegungsvorrichtung HB, der vorgestellten Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen Permanentmagneten RB und der vorgestellten Bewegungsvorrichtung mit quaderförmigen Permanentmagneten QB in Abhängigkeit des Polarwinkels φ . Für den Vergleich wurde eine Anzahl von magnetischen Polen innerhalb des RA von 10 gewählt. Das auftretende Rastmoment wurde für eine Rotation von $\varphi = 0$ bis $\varphi = 36^\circ$ ermittelt. Es ist ersichtlich, dass das Rastmoment sowohl für die Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen Permanentmagneten RB als auch für die Bewegungsvorrichtung mit quaderförmigen Permanentmagneten QB signifikant kleiner ist als für die herkömmliche Bewegungsvorrichtung HB, was einen weiteren Vorteil der vorgestellten Bewegungsvorrichtungen darstellt.

[0045] **Figur 10** zeigt einen Vergleich des auftretenden Rastkraft RK der herkömmlichen Bewegungsvorrichtung HB, der vorgestellten Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen Permanentmagneten RB und der vorgestellten Bewegungsvorrichtung mit quaderförmigen Permanentmagneten QB in Abhängigkeit der Axialposition z. Für den Vergleich wurde eine Anzahl von magnetischen Polen innerhalb des LA von 8 gewählt. Das auftretende Rastmoment wurde für eine axiale Verschiebung von $z = -7$ mm bis $z = 7$ mm ermittelt. Es ist ersichtlich, dass die Rastkraft sowohl für die Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen Permanentmagneten RB als auch für die Bewegungsvorrichtung mit quaderförmigen Permanentmagneten QB signifikant kleiner ist als für die herkömmliche Bewegungsvorrichtung HB, was einen weiteren Vorteil der vorgestellten Bewegungsvorrichtungen darstellt.

[0046] **Figur 11** zeigt eine weitere Ausführungsform der Erfindung in Form eines LRA mit axial zueinander versetzten Statorn für den RA 1 und den LA 2, und mit einer Bewegungsvorrichtung gemäss **Figur 6**. Die gezeigte Bewegungsvorrichtung weist rautenförmige Permanentmagnete auf. Eine äquivalente Ausführung mit quaderförmigen Permanentmagneten ist möglich. Da die vorgestellten Anordnungen der Permanentmagnete in der Bewegungsvorrichtung die Anforderungen des RA und des LA erfüllen, kann das resultierende Magnetfeld mit dem Stator des RA 1 und mit dem Stator des LA 2 interagieren. Dadurch entfällt die Notwendigkeit eines Axialabstands Δz (vgl. **Figur 1**) zwischen den beiden Statorn, wodurch sich ein kompakterer Aufbau des LRA ergibt.

BEZUGSZEICHENLISTE

[0047]

- | | |
|----|---|
| 1 | Stator des rotatorischen Aktuators (RA) |
| 2 | Stator des linearen Aktuators (LA) |
| 3 | Permanentmagnete des rotatorischen Aktuators (RA) |
| 4 | Permanentmagnete des linearen Aktuators (LA) |
| 5 | Bewegungsvorrichtung (gesamt, inkl. Magnete) |
| 5a | Bewegungsvorrichtung mit einlagiger Magnetanordnung |
| 6 | Statorspulen des rotatorischen Aktuators (RA) |
| 7 | Statorspulen des linearen Aktuators (LA) |
| 8 | Kern der Bewegungsvorrichtung |
| 9 | Positionierungsvorrichtung |
| 10 | Unterstützungsvorrichtung |
| 11 | Permanentmagnetanordnung |
| N | Magnetischer Nordpol |
| S | Magnetischer Südpol |
| HB | Herkömmliche Bewegungsvorrichtung (Stand der Technik) |
| RB | Bewegungsvorrichtung mit rautenförmigen Permanentmagneten |
| QB | Bewegungsvorrichtung mit quaderförmigen Permanentmagneten |
| RM | Rastmoment |

Patentansprüche

1. Linear-rotatorischer Aktuator zur Bewegung einer Bewegungsvorrichtung (5a) durch Rotation um eine Maschinenachse und Translation entlang der Maschinenachse, aufweisend
 - einen ersten Stator (1) zum Erzeugen eines um die Maschinenachse drehenden Magnetfeldes;
 - einen zweiten Stator (2) zur Bildung eines sich linear und parallel zu Maschinenachse bewegten Magnetfeldes;wobei die Bewegungsvorrichtung (5a) Permanentmagneten in einer rotationszylindrischen Anordnung aufweist; **dadurch gekennzeichnet, dass** die Permanentmagneten eine einlagige Permanentmagnetanordnung (11) bilden, wobei die Permanentmagneten in radialer Richtung magnetisiert sind und an einem äusseren Umfang der Bewegungsvorrichtung (5a) sowohl in Richtung parallel zur Maschinenachse wie auch in Umfangsrichtung jeweils ein Muster mit sich abwechselnden Reihen von magnetischen Nord- und Südpolen bilden.
2. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss Anspruch 1, wobei mindestens ein Teil der Permanentmagnetanordnung (11) zu verschiedenen Zeiten im Wirkungsbereich des ersten Stators (1) und im Wirkungsbereich des zweiten Stators (2) anordenbar ist, oder wobei mindestens ein Teil der Permanentmagnetanordnung (11) im Wirkungsbereich des ersten Stators (1) und im Wirkungsbereich des zweiten Stators (2) angeordnet ist.
3. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss Anspruch 1 oder 2, wobei die Permanentmagnetanordnung (11) rautenförmige Permanentmagneten aufweist, deren Kanten in einem Winkel von fünfundvierzig Grad zur Maschinenachse und auch zur Umfangsrichtung stehen.
4. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss Anspruch 1 oder 2, wobei die Permanentmagnetanordnung (11) quaderförmige Permanentmagneten aufweist, deren Kanten in einem Winkel von null und neunzig Grad zur Maschinenachse und auch zur Umfangsrichtung stehen.
5. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss Anspruch 1 oder 2, wobei die Permanentmagnetanordnung (11) kreiszylinderförmige Permanentmagneten aufweist.
6. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Bewegungsvorrichtung (5a) frei von einem magnetischen Rückschluss ist.
7. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der erste Stator (1) und der zweite Stator (2) konzentrisch zueinander angeordnet sind.
8. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei der erste Stator (1) und der zweite Stator (2) in Richtung der Maschinenachse versetzt zueinander angeordnet sind.
9. Linear-rotatorischer Aktuator gemäss einem der vorangehenden Ansprüche, aufweisend eine Positionierungsvorrichtung (9) mit Öffnungen zur Aufnahme der Permanentmagneten, und eine innerhalb und/oder ausserhalb der Positionierungsvorrichtung (9) angeordnete, rotationszylindrische Unterstützvorrichtung (10) zur mechanischen Stabilisierung der Positionierungsvorrichtung (9) und der Permanentmagneten.

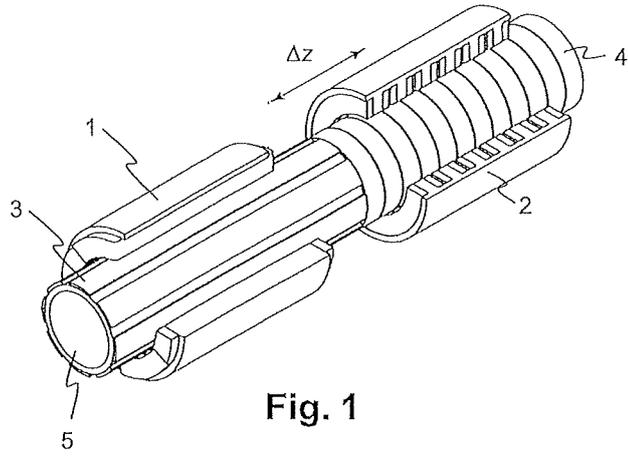


Fig. 1

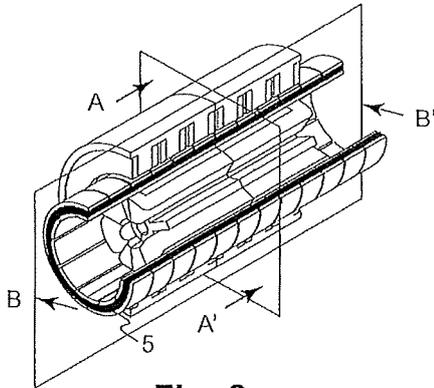


Fig. 2a

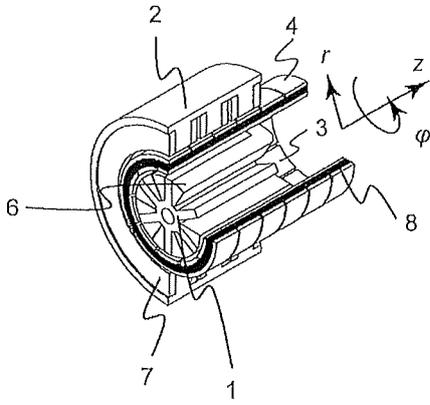


Fig. 2b

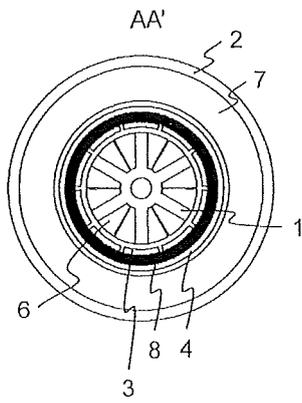


Fig. 2c

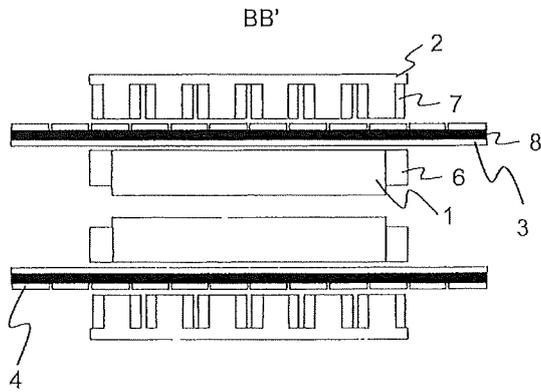


Fig. 2d

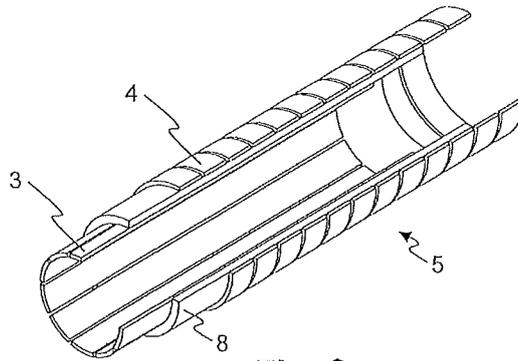


Fig. 3

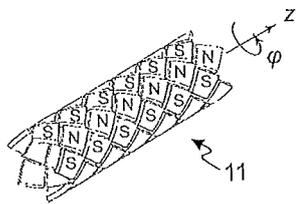


Fig. 4a

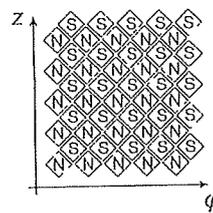


Fig. 4b

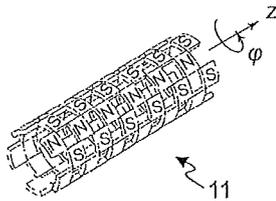


Fig. 5a

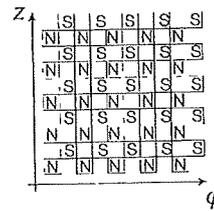


Fig. 5b

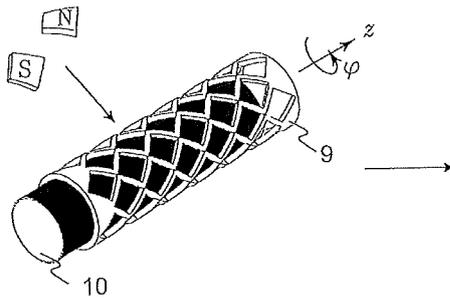


Fig. 6a

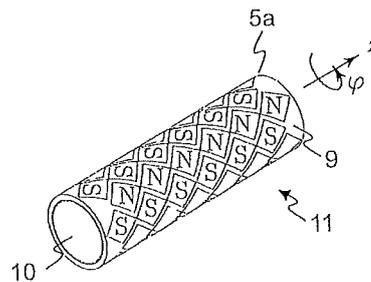


Fig. 6b

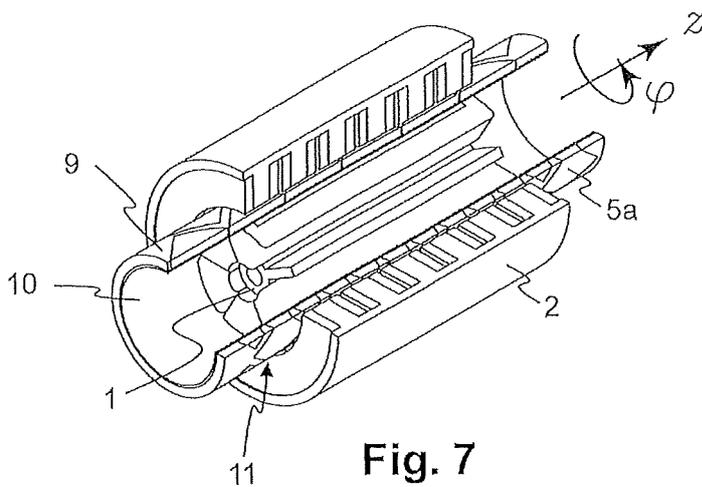


Fig. 7

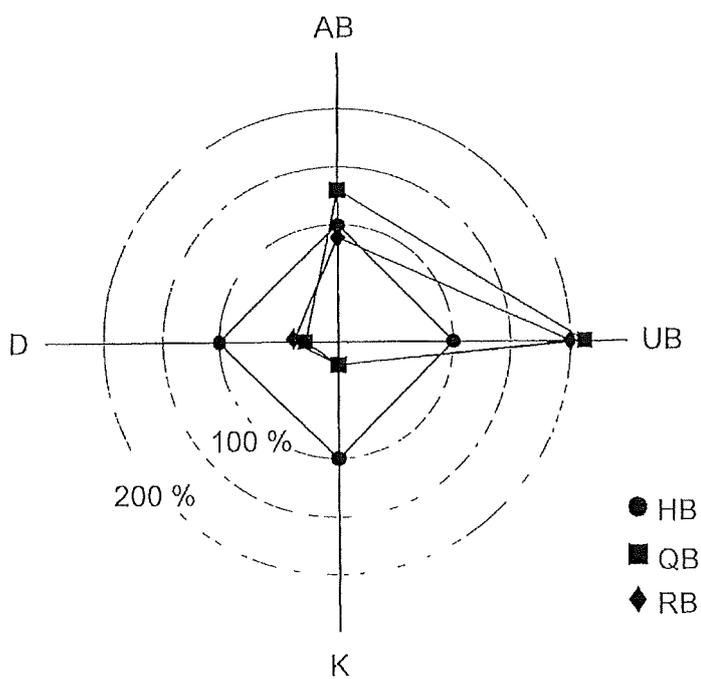


Fig. 8

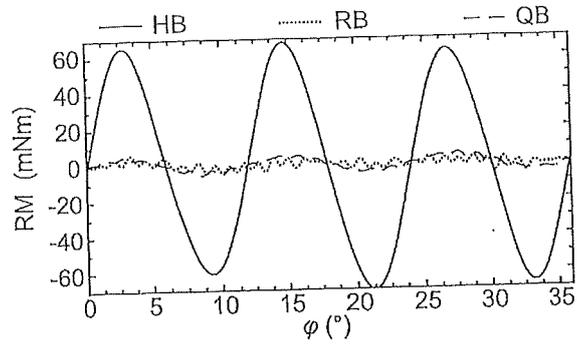


Fig. 9

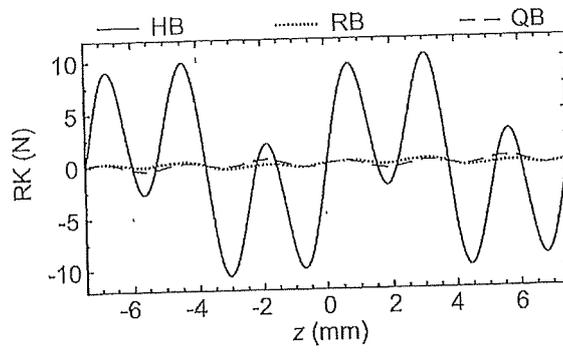


Fig. 10

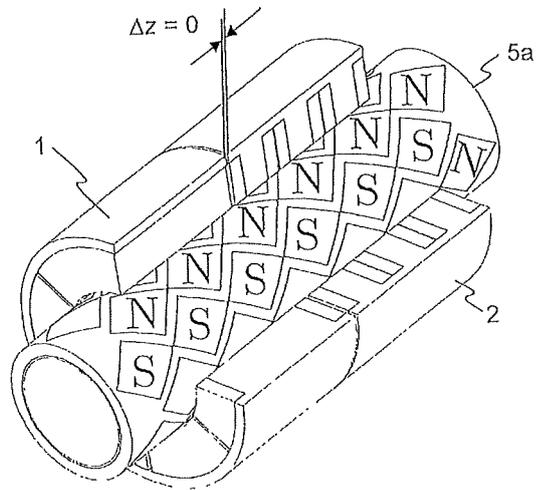


Fig. 11

