



(10) **DE 10 2011 080 065 A1** 2012.04.19

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 080 065.4**

(22) Anmeldetag: **28.07.2011**

(43) Offenlegungstag: **19.04.2012**

(51) Int Cl.: **H01F 7/08 (2011.01)**

(66) Innere Priorität:

10 2010 048 447.4 **16.10.2010**

10 2010 061 641.9 **30.12.2010**

(72) Erfinder:

Michaelsen, Rainer, 12165, Berlin, DE;
Mecklenburg, Arno, 12165, Berlin, DE; Schneider,
Rainer, 12165, Berlin, DE

(71) Anmelder:

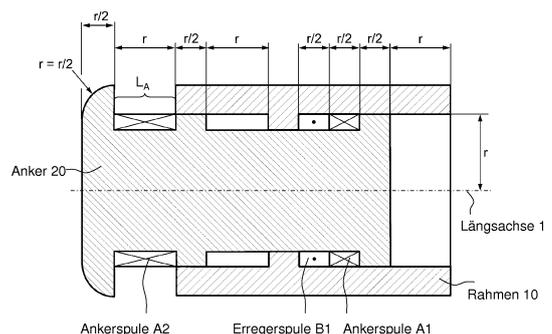
MSM Krystall GbR (vertretungsberechtigte
Gesellschafter: Dr. Rainer Schneider, 12165
Berlin; Arno Mecklenburg, 10999 Berlin), 12165,
Berlin, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Elektromagnetischer Linearaktor**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein elektromagnetischer Linearaktor beschrieben. Gemäß einem Beispiel der Erfindung umfasst der Linearaktor einen Rahmen (Stator), der zumindest teilweise aus weichmagnetischem Material besteht; einen Anker, der zumindest teilweise aus weichmagnetischem Material besteht und der an dem Rahmen derart gelagert ist, dass der Anker entlang einer Längsachse relativ zum Rahmen bewegbar ist. Anker und Rahmen sind derart ausgebildet, dass entlang der Längsachse in einer offenen Position ein Spalt zwischen Anker und Rahmen vorliegt und in einer geschlossenen Position Anker und Rahmen aneinander anliegen, sodass der Spalt geschlossen ist. Eine erste Ankerspule ist mit dem Anker derart verbunden, dass eine auf die erste Ankerspule wirkende Kraft auf den Anker übertragbar ist. Der Linearaktor umfasst des Weiteren Mittel zum Erzeugen eines Erreger-Magnetfeldes, das zumindest teilweise durch Rahmen und Anker geführt und derart gerichtet ist, dass auf die erste Ankerspule, wenn sie bestromt ist, eine Kraft wirkt, die auf den Anker übertragen wird, um den Spalt zu schließen. Rahmen, Anker und Erreger-Magnetfeld sind dabei derart ausgebildet, dass bei geschlossenem Spalt zwischen Rahmen und Anker eine Haltekraft wirkt.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft das Gebiet elektromagnetischer Linearaktoren, beispielsweise zum Spannen und Halten von Federn in Federspeicherantrieben.

Hintergrund

[0002] Die Wirkungsweise von elektromagnetischen Aktoren beruht auf der Wirkung der Lorentzkraft und der Reluktanzkraft (auch Maxwellsche Kraft).

[0003] Aktoren, die in der Art eines Hubmagneten aufgebaut sind, können zum Betätigen von Maschinenhebeln, Ventilen, Schiebern, Schaltern, etc. verwendet werden. Hubmagnete sind Elektromagnete umfassend Anker, Stator und Spule(n). Sie vermögen bei geringer Leistungsaufnahme große Haltekräfte zu erzeugen und sind von einfachem und robustem Aufbau. Bei großen Hübten ist ihre elektrische Effizienz allerdings wegen des mit dem großem Hub verbundenen großen Luftspalts gering. In einfachster Näherung (kein Streufeld, keine Sättigung) ist der zur Erzeugung einer bestimmten Kraft erforderliche Strom proportional zur Länge des Luftspalts, und die Verlustleistung steigt quadratisch mit dem Strom. Die tatsächlichen Verhältnisse sind sogar noch ungünstiger. Wegen der hohen Verlustleistung vermögen langhubige Hubmagnete in der Regel selbst dann nur geringe Anfangskräfte (im Vergleich zur Haltekraft) zu erzeugen, wenn die elektrische Effizienz für die Anwendung unerheblich ist. Die Grenze ist gegeben durch die Strombelastbarkeit. Hubmagnete werden z. B. dann als "langhubig" bezeichnet, wenn der maximale Hub h des Ankers (relativ zum Stator) in der Größenordnung $h = \text{sgrt}(A)$ liegt, wobei A die Querschnittsfläche des Ankers bezeichnet. Die angegebene Definition darf jedoch nur als Richtwert verstanden werden. Im Allgemeinen ist die Realisierung einer über den gesamten Stellweg annähernd konstanten Aktorkraft bei größeren Stellwegen ungleich schwieriger als bei kleinen. Die hohe Haltekraft wirkt nur bei einem Luftspalt von annähernd null.

[0004] Durch geeignete geometrische Auslegung von Anker und Rahmen kann die Kraft-Weg-Kennlinie eines Hubmagneten derart beeinflusst (wird als Kennlinienbeeinflussung bezeichnet) werden, dass die auf den Anker wirkende Reluktanzkraft annähernd unabhängig vom Weg wird. Derartige Aktoren werden als "Proportionalmagnete" bezeichnet. Wenn die Magnetkraft auf den Anker gegen die Rückstellkraft einer Feder wirkt, kann bei geeigneter Auslegung die Position des Ankers annähernd proportional zum Ankerstrom sein. Bei langen Hübten liefern Proportionalmagnete aber nur verhältnismäßig geringe Kräfte. Außerdem können Proportionalmagnete

in angezogenem Zustand nur vergleichsweise kleine Haltekräfte erzeugen (verglichen mit Hubmagneten ohne Kennlinienbeeinflussung).

[0005] Eine andere Art von elektromagnetischen Linearaktoren sind nach Art einer Tauchspule aufgebaut und werden auch als elektrodynamische Aktoren bezeichnet. Im Vergleich zu Hubmagneten sind Tauchspulen empfindlichere und aufwendigere Konstruktionen. Zwar können geeignet konstruierte Tauchspulen über den gesamten Hub nahezu gleich bleibend große (Lorentz-)Kräfte erzeugen, diese müssen aber von der freistehenden und vergleichsweise filigranen Spule aufgenommen werden. Die Kühlung von Tauchspulen kann eine technische Herausforderung darstellen, da die Spule beweglich aufgehängt werden muss und zum Erreichen einer hohen Dynamik möglichst leicht sein soll. (Als Beispiel sei ein elektrodynamischer Lautsprecher genannt). Sie kann daher oftmals nicht mit einer (massiven) Wärmesenke fest verbunden werden. Des Weiteren sind Tauchspulen im Gegensatz zu Hubmagneten nicht in der Lage, bei geringer Leistungsaufnahme (Halte-)Kräfte zu generieren. Für Anwendungen, in denen bei möglichst geringer Leistungsaufnahme eine große (Halte-)Kraft aufrecht erhalten werden soll, sind sie weniger geeignet.

[0006] Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe besteht darin, einen elektrischen Linearantrieb zu finden, der ähnlich hohe Haltekräfte erzeugen kann wie ein Hubmagnet (ohne Kennlinienbeeinflussung), jedoch auch bei langen Hübten über den gesamten Stellweg eine Kraft in der Größenordnung der Haltekraft erzeugen kann.

Zusammenfassung

[0007] Die oben genannte Aufgabe wird durch einen elektromagnetischen Linearaktor gemäß Anspruch 1 gelöst. Unterschiedliche Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0008] Es wird im Folgenden ein elektromagnetischer Linearaktor beschrieben. Gemäß einem Beispiel der Erfindung umfasst der Linearaktor einen Rahmen (Stator), der zumindest teilweise aus weichmagnetischem Material besteht; einen Anker, der zumindest teilweise aus weichmagnetischem Material besteht und der an dem Rahmen derart gelagert ist, dass der Anker entlang einer Längsachse relativ zum Rahmen bewegbar ist. Anker und Rahmen sind derart ausgebildet, dass entlang der Längsachse in einer offenen Position ein Spalt zwischen Anker und Rahmen vorliegt und in einer geschlossenen Position Anker und Rahmen aneinander anliegen, sodass der Spalt geschlossen ist. Eine erste Ankerspule ist mit dem Anker derart verbunden, dass eine auf die erste Ankerspule wirkende Kraft auf den Anker übertragen

bar ist. Der Linearaktor umfasst des Weiteren Mittel zum Erzeugen eines Erreger-Magnetfeldes, das zumindest teilweise durch Rahmen und Anker geführt und derart gerichtet ist, dass auf die erste Ankerspule, wenn sie bestromt ist, eine Kraft wirkt, die auf den Anker übertragen wird, um den Spalt zu schließen. Rahmen, Anker und Erreger-Magnetfeld sind dabei derart ausgebildet, dass bei geschlossenem Spalt zwischen Rahmen und Anker eine Haltekraft wirkt.

[0009] Im Vergleich zu einem normalen Elektromagneten (Hubmagneten ohne Kennlinienbeeinflussung) bieten Linearaktoren gemäß der vorliegenden Erfindung den Vorteil, auch bei langen Hübten über den gesamten Stellweg eine Kraft in der Größenordnung der Haltekraft erzeugen zu können. Dies kann gemäß dem oben erläuterten Beispiel erreicht werden, indem eine oder mehrere auf den Anker gewickelte Spule(n) zusätzlich zu der auf den Anker wirkenden Reluktanzkraft Kraft auf den Anker übertragen, diesen also gleichsam „anschieben“, wenn die Reluktanzkraft des Ankers wegen des weit geöffneten Luftspalts noch gering ist.

[0010] Gemäß einem Beispiel der Erfindung bilden Anker und Rahmen zusammen mit dem Spalt (als sogenannter Luftspalt) einen Magnetkreis, in dem das Erreger-Magnetfeld geführt wird. Dabei kann die erste Ankerspule selbst als Mittel zum Erzeugen eines Erreger-Magnetfeldes dienen, wobei die Ankerspule derart am Anker angeordnet ist, dass sie zumindest teilweise neben dem Luftspalt liegt. Die Ankerspule kann dabei derart am Anker angeordnet sein und Rahmen und Anker können derart ausgestaltet sein, dass in der geöffneten Position des Ankers sich das Erreger-Magnetfeld in radialer Richtung (quer zur Längsachse) konzentriert und die Ankerspule radial durchsetzt.

[0011] Gemäß einem weiteren Beispiel der Erfindung umfassen die Mittel zum Erzeugen des Erregerfeldes neben der ersten Ankerspule eine dieser zugeordnete, mit dem Rahmen mechanisch verbundene Erregerspule, wobei die erste Ankerspule und die zugehörige Erregerspule, wenn sie bestromt sind, für sich gegensinnige Magnetfelder erzeugen. Zumindest in der geöffneten Position führt eine Überlagerung dieser Magnetfelder zu einem radialen (quer zur Längsrichtung) magnetischen Fluss (Erregerfeld), der mit der ersten Ankerspule in Wechselwirkung treten kann. In der geöffneten Position sind die erste Ankerspule und die ihr zugeordnete Erregerspule derart benachbart angeordnet, dass bei bestromten Spulen das Erregerfeld mit der ersten Ankerspule derart in Wechselwirkung tritt, dass auf die erste Ankerspule eine den Spalt schließende Kraft in Längsrichtung wirkt.

[0012] Die am Rahmen angeordneten Erregerspule (n) kann (können) auch durch Permanentmagnete er-

setzt werden. Des Weiteren können mehrere Paare (Ankerspule und zugehörige Erregerspule) in einem Aktor untergebracht sein, beispielsweise im Sinne einer mechanischen Reihenschaltung. Zusätzlich oder alternativ kann eine Ankerspule vorgesehen sein, die – wie oben erwähnt – ihr Erregerfeld selbst erzeugt. Schließlich kann am Rahmen eine Haltespule angeordnet sein, die bei geschlossenem Spalt eine Haltekraft erzeugt. Auch die Haltespule kann durch Permanentmagnete ersetzt werden. Im Folgenden wird, teils synonym, von „Halte-“ und „Zugspulen“ gesprochen. Damit sind immer Spulen gemeint, die dem Zweck dienen, eine Reluktanzkraft auf ein weichmagnetisches bewegliches Teil des Antriebs (normalerweise den Anker) auszuüben. Der Begriff der „Zugspule“ veranschaulicht dies insofern, als dass Reluktanzkräfte auf weichmagnetische Teile stets attraktiv wirken. Der Begriff der Haltespule unterstreicht, dass bei geeigneter Bemessung eine Zugspule den Aktor wider eine Rückstellkraft in einer Position zu halten vermag. Alle Haltespulen im Sinne dieser Erfindung sind Zugspulen.

[0013] Da die Kraft des Aktors über den gesamten in der Größenordnung der Haltekraft liegen kann, ist der Aktor insbesondere zum Spannen von Federn gut geeignet. Die Feder(n) kann (können) dann mittels eines nur geringen Haltestroms oder (bei Verwendung von Permanentmagneten) sogar stromlos im gespannten Zustand gehalten werden.

Kurzbeschreibung der Abbildungen

[0014] Die folgenden Figuren und die weitere Beschreibung soll helfen, die Erfindung besser zu verstehen. Nähere Details, Varianten und Weiterentwicklungen des Erfindungsgedankens werden an Hand von Figuren erläutert, die ein spezielles ausgewähltes Beispiel betreffen. Die Elemente in den Figuren sind nicht unbedingt als Einschränkung zu verstehen, vielmehr wird Wert darauf gelegt, das Prinzip der Erfindung darzustellen.

[0015] [Fig. 1](#) zeigt einen elektromagnetischen Linearaktor gemäß einem Beispiel der Erfindung in einer geöffneten Endposition (a) und in einer geschlossenen Endposition (b). In der geöffneten Endposition (a), also am Hubanfang, wird der Magnetkreis überwiegend über den radialen Luftspalt L_B geschlossen (Nebenschluss), wodurch die bestromte Spule, die in Luftspalt L_B untergebracht ist, eine Kraft spürt, die sie auf den Anker überträgt: Die Spule schiebt den Anker in Richtung der geschlossenen Endposition (b). Durch die Ankerbewegung verringert sich aber der axiale Luftspalt L_A , wodurch dessen Reluktanz ab- und der magnetische Fluss durch L_A zunimmt. In der geschlossenen Endposition (b), also bei verschwindendem axialen Luftspalt $L_A \ll L_B$, wirkt die Anordnung schließlich wie ein herkömmlicher Hubmagnet. Natürlich kann auch der „Anker“ anstelle des „Stators“

festgehalten werden, in diesem Fall vertauschen Stator und Anker die Rollen und statt des bewickelten Ankers wird „nur Eisen“ bewegt, was in vielen Fällen einfacher ist. Entscheidend für die Effizienz des Antriebs ist ein hinreichend kleiner Luftspalt L_B , insbesondere muss dieser klein sein in Relation zum voll geöffneten Luftspalt L_A ;

[0016] **Fig. 2** zeigt einen elektromagnetischen Linearaktor gemäß einem weiteren Beispiel der Erfindung in einer geöffneten Endposition (a) und in einer Position während des Stellvorganges (b);

[0017] **Fig. 3** zeigt einen elektromagnetischen Linearaktor, der ähnlich aufgebaut ist wie das Beispiel aus **Fig. 2**, wobei der Aktor in der geschlossenen Endposition (b) gehalten werden kann;

[0018] **Fig. 4** zeigt einen elektromagnetischen Linearaktor gemäß einem weiteren Beispiel der Erfindung in einer geöffneten Endposition (a) und in einer geschlossenen Endposition (b); der Aufbau ähnelt dem Aktor aus **Fig. 3**;

[0019] **Fig. 5** zeigt einen elektromagnetischen Linearaktor zum Spannen eines Federspeichers gemäß einem weiteren Beispiel der Erfindung in einer geöffneten Endposition (a) und in einer geschlossenen Endposition (b); der Aufbau ähnelt dem Aktor aus **Fig. 4**, wobei jedoch die Erreger-Magnetfelder durch Permanentmagneten erzeugt werden;

[0020] **Fig. 6** zeigt einen elektromagnetischen Linearaktor gemäß einem weiteren Beispiel der Erfindung; der Aktor kann als Kombination der Beispiele aus **Fig. 1** und **Fig. 2** angesehen werden;

[0021] **Fig. 7** zeigt einen elektromagnetischen Linearaktor gemäß einem weiteren Beispiel der Erfindung. Der Aktor kann als Kombination der Beispiele aus **Fig. 1** und **Fig. 3** angesehen werden; und

[0022] **Fig. 8** zeigt einen besonders einfach zu fertigenden und besonders robusten Linearaktor. Die Windungen der Spulen werden zumindest teilweise in die Flachgewinde gewickelt (Wobei die Flachgewinde auch durch andere Gewindeformen oder unterbrochene „Rippen“, also eine Vielzahl von Nuten, die von unterbrochenen Stegen gebildet werden, ersetzt werden können. Entscheidend ist, dass die Windungen zumindest teilweise in Vertiefungen im Anker(-werkstoff) gewickelt werden.). Der Antrieb arbeitet vergleichbar zu dem in **Fig. 6** dargestellten, allerdings besitzen die Erregerspule und die zugeordnete Ankerspule, die sich gegenseitig abstoßen können, unterschiedliche Durchmesser (wie beispielsweise auch gemäß **Fig. 4**). Radial befindet sich im Gegensatz zu den zuvor dargestellten Antrieben weichmagnetisches Material zwischen diesen Spulen (siehe das „Flachgewinde“ von Rahmen(1)), welches zuerst

sättigen muss, bevor der Antrieb eine größere Kraft liefern kann.

Detaillierte Beschreibung

[0023] **Fig. 1** ist eine Darstellung eines einfachen Beispiels eines erfindungsgemäßen Linearaktors (**Fig. 1a**: offene Position, **Fig. 1b**: geschlossene Position). Die in **Fig. 1** dargestellte Anordnung ist rotationssymmetrisch (Längsachse **1** als Symmetrieachse). Ein rotationssymmetrischer Aufbau des Aktors ist jedoch nicht zwingend.

[0024] Gemäß dem Beispiel aus **Fig. 1** umfasst der Linearaktor einen Rahmen **10** (im Folgenden auch als „Stator“ bezeichnet) sowie einen Anker **20**. Sowohl Anker **20** als auch Stator **10** bestehen zumindest teilweise aus weichmagnetischem Material, um magnetische Flüsse führen zu können. Der Anker **20** ist an dem Stator **10** derart gelagert, dass der Anker **20** entlang der Längsachse **1** relativ zum Stator **10** bewegbar ist. Anker **20** und Stator **10** sind des Weiteren derart ausgebildet, dass entlang der Längsachse **1** zwischen Anker **20** und Stator **10** in einer offenen Position ein Spalt L_A zwischen Anker **20** und Stator **10** vorliegt und in einer geschlossenen Position Anker **20** und Stator **10** aneinander anliegen, sodass der Spalt L_A geschlossen ist. Mit dem Anker **20** verbunden ist eine erste Ankerspule **A**. Die Verbindung zwischen Ankerspule **A** und Anker **20** ist derart, dass die auf die erste Ankerspule **A** wirkende Kraft auf den Anker **20** übertragbar ist. Eine durch Wechselwirkung zwischen einem Magnetfeld und einem Spulenstrom wirkende Kraft auf die Ankerspule **A** wirkt folglich auch auf den Anker **20** selbst. Der Linearaktor gemäß dem Beispiel aus **Fig. 1** umfasst schließlich Mittel zum Erzeugen eines Erreger-Magnetfeldes, das zumindest teilweise durch Stator und Anker geführt und derart gerichtet ist, dass auf die erste Ankerspule **20**, wenn sie bestromt ist, eine Kraft F_M wirkt, die auf den Anker **20** übertragen wird, um den Spalt L_A zu schließen (siehe **Fig. 1b**). Stator **10**, Anker **20** und Erreger-Magnetfeld sind dabei derart ausgebildet, dass bei geschlossenem Spalt L_A zwischen Stator **20** und Anker **10** eine Haltekraft F_H wirkt.

[0025] Bei der in **Fig. 1** gezeigten selbsterregten Variante dient die Ankerspule **A** selbst als Mittel zum Erzeugen des Erreger-Magnetfeldes. Anker **20** und Stator **10** bilden zusammen mit dem Spalt L_A (als Arbeits-)Luftspalt) einen Magnetkreis, in dem das Erreger-Magnetfeld geführt wird. Die Ankerspule **A** ist dabei zumindest teilweise neben dem Spalt L_A angeordnet, also bereits in der offenen Position (a) teilweise in den Rahmen **10** „eingetaucht“. Insbesondere kann die Ankerspule **A** in einer umlaufenden Nut des Ankers angeordnet sein. Die Ankerspule **A** verläuft in diesem Fall beinahe symmetrisch um die Längsachse **1**. Im vorliegenden Beispiel wird die Länge d_2 des Spalts L_A durch den Abstand zwischen einem Absatz

21 des Ankers **20** und einer dem Absatz gegenüberliegenden Stirnfläche des Stators **10** bestimmt.

[0026] Gemäß den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung umfasst ein elektromagnetischer Linearaktor einen langgestreckten, an einem Rahmen gelagerten und in axialer Richtung (Längsrichtung **1**) bewegbaren Anker sowie mindestens eine Spule zur Erzeugung eines magnetischen Flusses (Erreger-Magnetfeld) derart, dass Anker und Rahmen sich nach Art eines Hubmagneten anziehen. Diese anziehende Kraft ist wie bei "normalen" Hubmagneten die sogenannte Reluktanzkraft, deren axiale Komponente bei konstantem Spulenstrom in Hubmagneten ohne Kennlinienbeeinflussung mit der Luftspalllänge zumindest quadratisch abnimmt (bei der Berücksichtigung des Streufeldes ist die Abnahme noch stärker). Praktisch können bei größeren Arbeitsluftspalten aus diesem Grund mit einem gewöhnlichen Elektromagnet keine großen Kräfte erzeugt werden, bei geschlossenen Arbeitsluftspalten jedoch können große Haltekräfte zwischen dem beweglichen Teil und dem Rahmen wirken. Um über den gesamten Stellweg des beweglichen Ankers eine Kraft in der Größenordnung der Haltekraft des Elektromagneten erzielen zu können, ist mit dem beweglichen Anker eine Ankerspule verbunden, die von dem Erreger-Magnetfeld derart durchsetzt wird bzw. mit diesem derart wechselwirkt, dass – zumindest bei offenem (axialen) Luftspalt L_A – auf die Ankerspule eine zusätzliche Kraft (u. a. Lorentzkraft) wirkt, die in die gleiche Richtung wirkt wie die Reluktanzkraft (auf den Anker). Anders ausgedrückt, bei offenem (axialen) Luftspalt L_A schließt sich das Erregermagnetfeld der Ankerspule A zumindest teilweise über den radialen Luftspalt L_B , was dazu führt, dass die Ankerspule A derart mit dem Erregermagnetfeld durchsetzt wird, dass auf diese eine zusätzliche Kraft wirkt. Bei geeignetem Design von Rahmen, Anker und Ankerspule erzeugt die Ankerspule selbst ein Erreger-Magnetfeld, das sowohl die zur Erzeugung einer Reluktanzkraft nach Art eines Hubmagneten geeignet ist (d. h. zum Halten des Ankers bei geschlossenem Spalt), als auch zur Beschleunigung des Ankers aufgrund der erwähnten zusätzlichen Kraftwirkung bei offenem Luftspalt. Ein Beispiel dafür ist der bereits weiter oben beschriebene Linearaktor gemäß [Fig. 1](#).

[0027] Vereinfacht ausgedrückt umfasst ein Linearaktor gemäß einem Beispiel der Erfindung einen (Elektro-)Hubmagneten, dessen Anker zusätzlich von der auf die Ankerspule wirkenden Kraft angetrieben (verschoben) wird. Hierdurch wird die Bereitstellung großer Kräfte am bereits am Anfang des Stellweges in einfacher Weise ermöglicht. Bei adäquater Bemessung und Bestromung können, verglichen mit Hubmagneten, hohe elektrische Wirkungsgrade und sehr kurze Stellzeiten realisiert werden.

[0028] [Fig. 2](#) betrifft ein weiteres Beispiel der vorliegenden Erfindung, bei dem das Erreger-Magnetfeld zur Beschleunigung einer Ankerspule A und damit des Ankers **20** nicht von einer Ankerspule A allein erzeugt wird (so wie bei dem Beispiel aus [Fig. 1](#)) sondern zusätzlich mit Hilfe einer mit dem Rahmen mechanisch verbundenen Erregerspule B. Der Linearaktor gemäß dem in [Fig. 2](#) dargestellten Beispiel umfasst also ein Paar aus Erregerspule B und Ankerspule A. Der in [Fig. 2](#) dargestellte Aktor kann mit dem Aktor aus [Fig. 1](#) kombiniert (vgl. [Fig. 5](#)) oder eigenständig verwendet werden.

[0029] Gemäß dem Beispiel aus [Fig. 2](#) umfasst der Linearaktor einen Rahmen **10** (Stator) und einen an dem Rahmen gelagerten und axial (d. h. entlang der Längsachs **1**) bewegbaren Anker **20**. Mit dem Anker **20** fest verbunden ist eine Ankerspule A. Die Ankerspule A kann dabei möglichst symmetrisch um die Längsachse **1** des Ankers **20** gewickelt sein. Mit dem Rahmen **10** fest verbunden ist eine der Ankerspule A zugeordnete Erregerspule B. Diese kann koaxial zu der Ankerspule A gewickelt sein. Im Betrieb werden Ankerspule A und Erregerspule B derart bestromt, dass die Spulen A, B gegensinnige Magnetfelder erzeugen. Die Spulen A, B sind in einer offenen (End-)Position des Aktors (siehe [Fig. 2a](#)) nebeneinander (mit möglichst geringem axialen Abstand zueinander) angeordnet, sodass bei elektrisch in Serie (oder auch parallel) geschalteten Spulen die Gesamtinduktivität vergleichsweise gering sein kann, da sich die axialen (d. h. in Bewegungsrichtung) Komponenten der Magnetfelder der Spulen näherungsweise destruktiv überlagern. Die Spulen A, B können auch teilweise ineinander angeordnet sein (vgl. z. B. [Fig. 4](#)). Die radialen Komponenten der Magnetfelder überlagern sich und verursachen einen radialen magnetischen Fluss, der in der Ankerspule A zu einer Kraftwirkung führt. Für eine möglichst gute Überlappung der Magnetfelder müssen die beiden Spulen A, B betragsmäßig die gleiche magnetische Durchflutung erzeugen, was am einfachsten erreicht werden kann, indem zwei Spulen gleicher Windungszahl elektrisch in Serie geschaltet werden. Ganz allgemein wird unter "radial" eine Richtung verstanden, die einen rechten Winkel zur Längsachse des Aktors aufweist (d. h. rechtwinklig zur Bewegungsrichtung liegt), unabhängig davon, ob der Aktor rotationssymmetrisch aufgebaut ist oder nicht. Radial bedeutet also "quer zur Bewegungsachse", unabhängig von der Form des Querschnitts des Aktors.

[0030] Der axiale "Spalt" L_A ist im vorliegenden Beispiel [Fig. 2](#) als Abstand zwischen einer Stirnseite des Ankers **20** und einer korrespondierenden Stirnseite des Rahmens **10** zu verstehen und stellt in dem vorliegenden Beispiel keinen Luftspalt des Magnetkreises dar. Bei der vorliegenden Konstruktion des Aktors liegt bei geschlossenem Spalt ($L_A = 0$) der Anker **20** nicht an dem Rahmen **10** an, und folglich wirkt kei-

ne Haltekraft F_H zwischen Anker **20** und Rahmen **10** in der geschlossenen (End-)Position. Genau genommen handelt es sich bei dem „Spalt“ L_A nicht um einen Luftspalt eines Magnetkreises, da der Rahmen stirnseitig offen ist. Bei stirnseitig geschlossenem Rahmen ist der Spalt L_A auch Luftspalt eines Magnetkreises und es kann eine entsprechende Haltekraft erzeugt und der Anker in der geschlossenen Endposition gehalten werden. Ein derartiges Beispiel ist z. B. in den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) gezeigt. [Fig. 2b](#) zeigt den gleichen Aktor wie in [Fig. 2a](#) jedoch mit kleinerem axialem „Spalt“ L_A und einem radialen Luftspalt L_B mit größerer Querschnittsfläche zwischen den Spulen A, B als in [Fig. 2a](#). Bei dem Beispiel aus [Fig. 2](#) bleibt nämlich entlang der Längsachse **1** zwischen den Spulen A, B ein radialer Luftspalt L_B (d. h. quer zur Längsachse **1**). Bei bestromten Spulen A, B wirkt zwischen Erregerspule B und Ankerspule A eine repulsive Reluktanzkraft, da bei einer Vergrößerung des axialen Abstands der Spulen A, B der effektive Querschnitt des radialen Luftspalts L_B ebenfalls größer wird und folglich die Gesamtinduktivität der Aktoranordnung zunimmt: Mit wachsendem Abstand schwindet die wechselseitige Kompensation der Induktivitäten der beiden Spulen. Zusätzlich spürt aufgrund der von der Erregerspule B (im Zusammenwirken mit dem von Ankerspule A erzeugten Magnetfeld) erzeugten radialen Magnetfeldkomponente die Ankerspule A eine Lorentzkraft, die in die gleiche Richtung wirkt wie die oben erwähnte Reluktanzkraft. Wie bereits weiter oben angemerkt entsteht die radiale Magnetfeldkomponente durch Überlagerung der Felder von Erreger- und Ankerspule A, B.

[0031] Eine intuitivere Betrachtung geht vom magnetischen Druck aus, womit eine grobe Analogie zur Wärmekraftmaschine hergestellt werden kann: Man betrachte die Ankerspule A als Kolben und das Magnetfeld B, welches sich zwischen den Spulen A, B im radialen Luftspalt L_B befindet, als Arbeitsgas mit dem (magnetischen) Druck $B^2/(2\mu_0)$, das entspannt wird und dabei Arbeit verrichtet. In einfacher Näherung und bei nicht zu großen Strömen gilt: Bei konstantem Spulenströmen durch Ankerspule A und Erregerspule B führt eine Verdoppelung des effektiven radialen Luftspalt-Querschnitts durch Verschieben der Ankerspule A zu einer Halbierung der Flussdichte im radialen Luftspalt. Die Energiedichte des Magnetfeldes geht aber proportional mit B^2 , sodass nach der Verschiebung das Magnetfeld zwischen den Spulen nur mehr die Hälfte seiner ursprünglichen Feldenergie enthält (doppeltes Volumen, ein Viertel Energiedichte). Die Energiedifferenz kann als Arbeit verrichtet werden. In diesem Bild ist unmittelbar klar, dass für einen effizienten Antrieb der Abstand zwischen Erreger- und Ankerspule B, A am Anfang des Stellweges möglichst gering sein muss – bei höherer Kompression werden auch Wärmekraftmaschinen effizienter.

[0032] Bei Erreichen des Endes des Stellweges noch verbliebene magnetische Feldenergie könnte nach bekannten elektrischen Schaltungen verwendet werden, um beispielsweise einen Kondensator zu laden oder direkt eine oder mehrere weitere Spulen, insbesondere Zugspulen, zu versorgen (im Bild der Wärmekraftmaschine entspricht eine solche Beschaltung etwa der Restenergienutzung durch einen Turbolader).

[0033] Weniger bildlich als die oben beschriebene Analogie zu einer Wärmekraftmaschine aber physikalisch exakter ist die Betrachtung des magnetischen Druckgradienten („magnetic tension force“), welcher die Gestalt $(B \cdot \nabla)B/\mu_0$ besitzt und die Dimension Nm^{-3} aufweist. Durch diesen Druckgradienten wirkt, neben der Lorentzkraft, eine Kraft zwischen den Spulen A, B derart, dass der Druckgradient kleiner wird – was einer „Begradigung“, und damit Verkürzung, der magnetischen Feldlinien entspricht. Die von dieser Kraft verrichtete Arbeit entstammt dem Magnetfeld selbst – im Gegensatz zur Lorentzkraft, die über das Magnetfeld lediglich vermittelt wird. Im Unterschied zur Reluktanzkraft in Elektromagneten wirkt die „magnetic tension force“ nicht parallel sondern antiradial (die Feldlinien „gerade ziehend“) zu den Feldlinien.

[0034] [Fig. 3](#) zeigt ein zu dem Beispiel aus [Fig. 2](#) sehr ähnliches Ausführungsbeispiel, bei dem bei geschlossenem axialen Spalt L_A (siehe [Fig. 3b](#)) der Anker **20** an dem Rahmen **10** nach Art eines Hubmagneten mit Hilfe einer magnetischen Haltekraft F_H gehalten werden kann. Dazu weist der Rahmen **10** stirnseitig einen Anschlag auf, an dem eine korrespondierende Stirnseite des Ankers bei geschlossenem Spalt L_A anliegt. Im einfachsten Fall (d. h. ohne Kennlinienbeeinflussung) hat der Rahmen **10** die Form eines auf einer Seite stirnseitig geschlossenen Hohlzylinders und der Anker **20** die Form eines in den Hohlzylinder des Rahmens **10** eingepassten Zylinders. Es sind jedoch auch andere als rotationssymmetrische Querschnitte (quer zur Längsachse **1**) möglich sowie Anker-Ankergegenstück-Systeme anstelle ebener Stirnflächen.

[0035] Anders als in dem Beispiel aus [Fig. 2](#) sind Ankerspule A und Erregerspule B in Nuten angeordnet, die jeweils in der Oberfläche des Ankers **20** bzw. des Rahmens **10** angeordnet sind. Die Nuten verlaufen dabei beispielsweise in Umfangsrichtung normal zur Längsachse **1**. Die Nut, in der die Ankerspule A verläuft kann dabei breiter sein als die Ankerspule A selbst, sodass daneben ein Gleitlagerwerkstoff **30** Platz finden kann, der das Gleitverhalten zwischen Anker **20** und Rahmen **10** verbessert. Beispielsweise ist der Gleitlagerwerkstoff **30** ein selbstschmierender und elektrisch isolierender Kunststoff. Alternativ kann die Nut im Anker **20** vollständig mit der Ankerspule A ausgefüllt sein (einschl. Vergussmasse). Ausgehend von der offenen Endposition des Li-

nearaktors (siehe **Fig. 3a**) ist die Nut im Anker **20** so breit, dass bei einer kleinen Verschiebung des Ankers ein radialer Luftspalt zwischen Ankerspule A und Erregerspule B bleibt in ähnlicher Weise wie bei dem Beispiel aus **Fig. 2**. Der Begriff Luftspalt ist dabei nicht so zu verstehen, dass sich im Spalt tatsächlich Luft befindet, wesentlich ist vielmehr, dass das Material im Luftspalt nicht weichmagnetisch ist. Am Hubende (bzw. kurz davor) kann (so wie im Beispiel der **Fig. 3b**) auch der radiale Luftspalt L_B geschlossen werden. Folglich bleibt nur mehr ein (am Hubende verschwindender) axialer Luftspalt L_A , der dann (nach dem Schließen des radialen Luftspaltes) aufgrund der Reluktanzkraftwirkung (verursacht durch das Magnetfeld der Ankerspule A und der Haltespule C) geschlossen und im geschlossenen Zustand gehalten wird. Ankerspule A und Haltespule C werden dazu gleichsinnig bestromt. Das sukzessive Schließen des radialen Luftspaltes L_B ist bei gegensinnig bestromten Spulen A, B übrigens von einer Reluktanzkraft begleitet, welche an der in Bewegungsrichtung hinten liegende Flanke der Nut angreift, in der Ankerspule A untergebracht ist – und die ebenfalls zum Schließen von L_A beiträgt.

[0036] Um am Ende des Stellwegs die Kraft auf den Anker **20** zu erhöhen und um bei geschlossenem axialen Spalt L_A eine hohe Haltekraft F_H bei möglichst geringer Leistungsaufnahme zu gewährleisten, kann im oder am Rahmen **10** eine weitere Erregerspule C angeordnet sein. Im vorliegenden Beispiel ist die Haltespule C ebenfalls in einer Nut des Rahmens **10** angeordnet in gleicher Weise wie die Erregerspule B. Für die Funktion des Aktors ist die Haltespule C nicht zwingend notwendig. Bei geeigneter Auslegung, kann das für die Erzeugung der Haltekraft F_H notwendige Erregerfeld auch von der Ankerspule A erzeugt werden, in diesem Fall sollte der Steg zwischen der Nut, in der die Ankerspule A angeordnet ist, und der Stirnseite des Ankers **20** deutlich kleiner (als die in der korrespondierenden **Fig. 2a** dargestellte Länge $r/2$) sein (oder auch null). Alternativ kann das für die Haltekraft F_H notwendige Erregerfeld auch durch im Rahmen **10** angeordnete Permanentmagneten erzeugt werden (vgl. Beispiel aus **Fig. 5**). Die Haltespule C für sich betrachtet wirkt im Wesentlichen wie die Spule eines gewöhnlichen Elektro-Hubmagneten.

[0037] Das Beispiel in **Fig. 4** ist im Wesentlichen gleich aufgebaut wie das Beispiel aus **Fig. 3**. Beim vorliegenden Beispiel sind Ankerspule A und Erregerspule B coaxial und in der offenen (End-)Position zumindest teilweise ineinander angeordnet, sodass sich die Spulen A, B in axialer Richtung teilweise überlappen. Eine derartige Anordnung kann eine sehr niedrige Anfangsinduktivität aufweisen, wobei die Spulen A und B in Serie oder parallel geschaltet sein können. Im vorliegenden Fall ist die Ankerspule A ebenfalls in einer den Anker **20** umlaufenden

Nut angeordnet. Anders als im Beispiel gemäß **Fig. 3** ist die Ankerspule jedoch über den ganzen Nutquerschnitt verteilt und es ist kein separater Gleitlagerwerkstoff **30** (vgl. **Fig. 3**) zur Bildung einer Gleitfläche vorgesehen. Wie in **Fig. 4a** (offene Endposition des Aktors) zu sehen ist, "sieht" die Erregerspule B während der Bewegung einen radialen Luftspalt L_B solange sich die Erregerspule B und die Ankerspule sich (in axialer Richtung) überlappen. Bei zunehmender Verschiebung des Ankers **20** (siehe **Fig. 4b**) bewegt sich auch die Nut der Ankerspule A weiter. Sobald sich die Nuten von Ankerspule A und Erregerspule B nicht mehr (in axialer Richtung) überlappen, "sieht" die Erregerspule B keinen radialen Luftspalt L_B mehr und das Feld der Erregerspule B wird über Anker **20** und Rahmen **10** kurzgeschlossen (vgl. **Fig. 4b**). Dieses Kurzschließen des radialen Luftspaltes L_B geschieht bei genauerer Betrachtung kontinuierlich wegen der lokalen Sättigung des Eisens. Erst wenn Anker-Eisen und Stator-Eisen sich hinreichend überlappen (ca. $r/2$), ist der magnetische Kurzschluss (nahezu) perfekt. Währenddessen kommt die Ankerspule A in den Einflussbereich der weiteren Erregerspule C (Haltespule), deren Erreger-Magnetfeld gleichsinnig zu dem Feld der Ankerspule A ist und die den Anker **20** bis zur Endposition des Ankers (Stirnseite des Ankers berührt innere Stirnfläche des Rahmens) zieht. In dieser Endposition wird der Anker **20** dann aufgrund des Feldes der Spulen A und C gehalten (Haltekraft F_H).

[0038] Wie bereits erwähnt können Ankerspule A und Erregerspule B derart gewickelt sein, dass sich im geöffneten Ausgangszustand (siehe z. B. **Fig. 3a** oder **Fig. 4a**) deren Induktivitäten (aufgrund einer destruktiven Überlagerung der jeweiligen Magnetfelder) weitgehend kompensieren, sodass die Gesamtanordnung (mit parallel oder in Serie geschalteten Spulen A, B) eine sehr niedrige Anfangsinduktivität besitzt, was den Vorteil mit sich bringt, dass auch bei moderaten Betriebsspannungen eine sehr hohe Dynamik (also kurze absolute Stellzeiten) erreicht werden können.

[0039] **Fig. 5** zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel, das ähnlich aufgebaut ist, wie das Beispiel aus **Fig. 4**. Anders als bei dem Aktor gemäß **Fig. 4** sind Erregerspule B und Haltespule C durch entsprechende Permanentmagnete B' bzw. C' ersetzt. Die Permanentmagnete B', C' sind derart am oder im Rahmen **10** angeordnet, dass sie ein ähnliches Magnetfeld erzeugen, wie die bestromten (Erreger-)Spulen B bzw. C bei dem Beispiel in **Fig. 4**. Im vorliegenden Fall sind die Permanentmagnete B' und C' als Teil des Rahmens **10** ausgeführt. Die Permanentmagnete, könnten jedoch auch – wie in dem Beispiel aus **Fig. 3** – in Nuten angeordnet sein, welche die Innenseite des Rahmens **10** in Umfangsrichtung umlaufen. Des Weiteren können die Permanentmagnete auch an der Innenseite des Rahmens (analog zur Erregerspule B

aus [Fig. 2](#)) befestigt sein. (Ebenfalls ist möglich, die „Rollen“ von Rahmen und Anker zu vertauschen und die Permanentmagnete am Anker und dafür die bisherige Ankerspule am Rahmen zu befestigen.) Die Permanentmagnete B', C' haben in dem dargestellten Beispiel die Form eines Hohlzylinders. Die Permanentmagnete können jedoch auch aus mehreren Einzelmagneten zusammengesetzt sein. Zusätzlich zu den vorhergehenden Linearaktoren ist im vorliegenden Beispiel eine Variante gezeigt, bei der durch die Bewegung des Linearaktors eine Feder **50** gespannt und in gespanntem Zustand gehalten wird. Auch wenn nicht in jedem Beispiel dargestellt, kann jedes der gezeigten Ausführungsbeispiele verwendet werden, um eine Feder zu spannen. Des Weiteren kann jeder der dargestellten Aktoren (ggf. mit geringer Adaption der Konstruktion) die Feder in gespanntem Zustand halten. Bei allen Ausführungsformen außer dem Beispiel aus [Fig. 2](#) ist dies mit geringer elektrischer Leistungsaufnahme oder sogar leistungslos (vgl. [Fig. 5](#)) möglich. Auf diese Art lassen sich sehr einfach aufgebaute "Federspeicher" realisieren.

[0040] Die Ankerspule A wird derart mit Strom gespeist, dass (würde man die Felder jeweils für sich betrachten) das resultierende Magnetfeld der Ankerspule entgegengesetzt gerichtet ist zu dem Erreger-Magnetfeld des Permanentmagneten B'. Wie an vorangegangenen Beispielen beschrieben führt die Überlagerung der Magnetfelder von Ankerspulen A und Permanentmagnet B' zu einer radialen Feldkomponente, die in der Ankerspule eine Kraftwirkung zur Folge hat, welche die Ankerspulen A und Permanentmagnet B' auseinander treibt. Folglich wirkt in der geöffneten Endposition (siehe [Fig. 5a](#)) eine Kraft auf die Ankerspule A, die zusammen mit der auf den Anker wirkenden Reluktanzkraft über den gesamten Stellweg groß genug ist, um die (Druck-)Feder **50** zu spannen und den Anker gegen die Federkraft in die geschlossene Endposition zu bewegen (siehe [Fig. 5b](#)). In der geschlossenen Endposition wirkt aufgrund des Erregerfeldes des Haltemagneten C' sowie aufgrund des Magnetfeldes der Ankerspule A eine Haltekraft F_H , welche den Anker in der geschlossenen Endposition und somit die Feder gespannt hält. Bei geeigneter Dimensionierung kann der Anker auch stromlos gegen die Federkraft gehalten werden allein aufgrund des Erregerfeldes des Haltemagneten C'. Bei umgekehrter Bestromung („Gegenerregung“) der Ankerspule A kann das Magnetfeld des Haltemagneten C' durch das Feld von Ankerspule A kompensiert werden und die Haltekraft F_H auf den Anker **20** verschwindet (bzw. wird kleiner als die Federkraft). Die Feder **50** kann sich entspannen, wodurch der Aktor wieder in die Ausgangsposition (siehe [Fig. 5a](#)) bewegt wird. Zusätzlich wirkt eine Lorentzkraft auf die Ankerspule A, jedoch in entgegengesetzter Richtung wie beim Spannen der Feder, also zur Öffnung des axialen Luftspalts hin, was den Anker **20** zusätzlich beschleunigt.

[0041] In [Fig. 6](#) ist als weiteres Ausführungsbeispiel ein Linearaktor dargestellt, der im Wesentlichen als Kombination (mechanische Hintereinanderschaltung) der den in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) dargestellten Aktoren angesehen werden kann. Demnach hat der Aktor aus [Fig. 6](#) zwei Ankerspulen A1 und A2 und eine Erregerspule B1, wobei das Spulenpaar A1 und B1 dem Paar aus Ankerspule A bzw. Erregerspule B aus dem Beispiel aus [Fig. 2](#) entspricht und die (selbsterregte) Ankerspule A2 der Ankerspule A aus dem Beispiel aus [Fig. 1](#). In einer geschlossenen Endposition wirkt eine Haltekraft F_H zwischen Anker **20** und Rahmen **10** in gleicher Weise wie bei dem Beispiel aus [Fig. 1](#). Während des linearen Stellvorganges sorgt – verglichen mit dem Beispiel aus [Fig. 1](#) – das zusätzliche Spulenpaar (Erregerspule B1, Ankerspule A1) für eine zusätzliche elektromagnetische Kraftwirkung auf die Ankerspule A1 und somit auf den Anker **20**.

[0042] Als Kombination der Ausführungsbeispiele aus den [Fig. 1](#) und [Fig. 3](#) kann der magnetische Linearaktor gemäß [Fig. 7](#) angesehen werden, welcher eine besonders hohe magnetische Kraft über den gesamten Stellweg zur Verfügung stellen und, wegen der hohen volumenspezifischen Kraft, eine kurze Stellzeit aufweisen kann. Die Ankerspule A2 hat die gleiche Funktion wie in den vorhergehenden Beispielen aus [Fig. 1](#) oder [Fig. 6](#). Die Haltespule C hat die gleiche Funktion wie in dem Beispiel aus [Fig. 3](#). Die Spulenpaare A1, B1 sowie A3, B3 haben ebenso jeweils die gleiche Funktion wie die Spulen A bzw. B in dem Beispiel aus [Fig. 3](#). Der elektromagnetische Linearaktor gemäß [Fig. 7](#) kann also als mechanische Reihenschaltung des Aktors gemäß [Fig. 1](#) und des Aktors gemäß [Fig. 3](#) gesehen werden, wobei im Vergleich zum Aktor aus [Fig. 3](#) das Paar aus Erregerspule B und Ankerspule A bei dem Aktor gemäß [Fig. 7](#) zweimal vorgesehen ist. Um die elektromagnetischen Kräfte bei gleich bleibender Aktorquerschnittsfläche weiter zu erhöhen, können theoretisch beliebig viele Paare aus Ankerspule und korrespondierender Erregerspule vorgesehen sein. Wie bei dem Beispiel aus [Fig. 3](#) füllen die Ankerspulen A1 und A3 nicht den gesamten Querschnitt der zugehörigen Nuten im Anker **20**. In den Nuten ist neben der jeweiligen Ankerspule A1, A3 und unter der zugehörigen Erregerspule B1, B2 ein Gleitlagerwerkstoff angeordnet, beispielsweise ein Kunststoff. Dieser dient einerseits zum Füllen der Nut, was Einfluss auf den Kraftverlauf hat, und andererseits kann der Gleitlagerwerkstoff als Teil des Gleitlagers dienen, welches Anker **20** und Rahmen **10** bilden.

[0043] Die Ankerspule A1 und die Haltespule C sind im Betrieb derart bestromt, dass die resultierenden Magnetfelder gleich gerichtet sind. Die Ankerspule A3 ist so bestromt, dass deren Magnetfeld umgekehrt orientiert ist zu dem Feld der Ankerspule A1. Schließlich sind die Erregerspulen B1 und B3 so

bestromt, dass deren Magnetfelder in der geöffneten Ausgangsposition des Aktors die Magnetfelder der zugehörigen Ankerspulen A1 und A3 annähernd kompensieren, sodass eine niedrige Gesamtinduktivität erzielt werden kann. Elektrisch sind die Spulen B1, A1 und B3, A3 beispielsweise paarweise in Serie geschaltet und bilden niederinduktive Teilschaltungen. Parallel dazu (oder separat versorgt) sind die Spulen A2 und C geschaltet. Diesbezüglich gilt das zu den [Fig. 2](#) bis [Fig. 4](#) Gesagte entsprechend. Der axiale Abstand der Ankerspulen A1 und A3 ist so bemessen, dass in der geschlossenen Endposition des Ankers **20** die Ankerspule A3 in und unmittelbar neben der Erregerspule B1 zu liegen kommt. In gleicher Weise ist der Abstand zwischen der Erregerspule B1 und der Haltespule C so bemessen, dass in der geschlossenen Endposition des Ankers **20** die Ankerspule A1 in oder nahe der Haltespule C zu liegen kommt. In der geschlossenen Endposition sorgen die Erreger-Magnetfelder der Haltespule C sowie der Ankerspule A2 für eine ausreichende Ankerkraft, um den Anker **20** gegen eine eventuelle Rückstellkraft (z. B. Federkraft) an dem Rahmen **10** zu halten.

[0044] Allen Ausführungsbeispielen gemeinsam ist, dass der Anker **20** ein entlang einer Längsachse **1** ausgedehntes und in dem Rahmen **10** axial geführtes weichmagnetisches Bauteil sein kann. Die Ankerspulen A, A1, A2, A3 können entweder in einer in Umfangrichtung den Anker umlaufenden Nut versenkt (vgl. [Fig. 1](#), [Fig. 3–Fig. 5](#) und [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#)) sein oder entlang des Umfangs des Ankers aufgewickelt (vgl. [Fig. 2](#) und [Fig. 6](#)) sein. Die Spulen können dabei aus elektrisch isoliertem Profildraht (mit z. B. rechteckigem Profil) gewickelt sein. Die Ankerspulen können gemäß bekannten Verfahren mit einem Gießharz vergossen sein, wobei das Gießharz ein Pulver umfassen kann. Das Pulver kann dabei aus Keramikmaterial bestehen, beispielsweise aus einem Material mit hoher thermischer Leitfähigkeit, oder aus einem anderen Material mit entsprechend hoher thermischer Leitfähigkeit.

[0045] Ganz allgemein kann festgehalten werden, dass Anker **20** und Rahmen **10** sowie die Erregerspulen B, B1, B3 (sowie Spule A im selbsterregten Fall) derart ausgestaltet sein sollen, dass das resultierende Erreger-Magnetfeld (bzw. die resultierenden Erreger-Magnetfelder), mit dem (bzw. den) die Ankerspule A, A1, A3 in Wechselwirkung tritt, durch eine entsprechende geometrische Ausgestaltung des Magnetkreises auf die Ankerspule(n) konzentriert wird, wobei in der offenen Endposition des Aktors das Erregerfeld die Ankerspulen radialer durchsetzen, um eine axiale Kraftwirkung zu erzielen (da die Spulenströme in Umfangsrichtung fließen).

[0046] Wie bereits erwähnt, kann das Magnetfeld, mit dem die Ankerspule A in Wechselwirkung tritt, durch die Ankerspule A selbst erzeugt werden (vgl.

[Fig. 1](#) mit hinreichend weit geöffnetem axialen Luftspalt L_A , so dass der Nebenfluss Ankerspule A radial durchsetzt und antreibt). Alternativ kommen als Mittel zum Erzeugen des Erreger-Magnetfeldes am Rahmen befestigte Erregerspulen B, B1, B3 (vgl. [Fig. 3](#)) oder entsprechende Permanentmagnete B' (vgl. [Fig. 5](#)) in Betracht.

[0047] Die Erregerspulen B, B1, B3, können in radialer Richtung größer sein (z. B. größerer Durchmesser) als die korrespondierenden Ankerspulen A, A1, A3, sodass Anker- und Erregerspulen zumindest teilweise ineinander schiebbar sind. Anker **20** und Rahmen **10** können dabei so übereinander gleiten, dass radiale Luftspalte abhängig von der Ankerposition geschlossen werden (vgl. [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#)). Alternativ können Ankerspule A und Erregerspule B auch annähernd gleich groß sein (vgl. [Fig. 2](#) und [Fig. 6](#)). In diesem Fall können in der geöffneten Endposition des Aktors Ankerspule und zugehörige Erregerspule unmittelbar nebeneinander angeordnet sein.

[0048] Für den Anker und/oder den Rahmen sollten weichmagnetische Materialien mit möglichst hoher Sättigungspolarisation und möglichst hoher relativer Permeabilität verwendet werden. Die elektrische Leitfähigkeit von Anker und Rahmen sollte – um Wirbelstromverluste gering zu halten – möglichst gering sein. Zu diesem Zweck können – ähnlich wie bei Transformatoren – die Werkstoff(e) für den Anker und/oder den Rahmen zur Unterdrückung von Wirbelströmen laminiert werden ("Elektroblech") oder aus einem Pulververbundwerkstoff bestehen oder mit Schlitzen versehen werden. Die Stromzuführung (d. h. das Kabel) für die Ankerspule(n) kann durch eine axiale Bohrung aus dem Anker **20** herausgeführt sein. Die Stromzuführung kann dabei durch verdrehte Drähten oder eine Litze gewährleistet werden. Als Material hierfür kommt z. B. Beryllium-Bronze in Frage.

[0049] Wie bereits erwähnt sollten Ankerspulen mit korrespondierenden Erregerspulen in Serie oder parallel geschaltet und derart ausgelegt und angeordnet sein, dass am Anfang des Stellwegs sich die jeweiligen Magnetfelder weitgehend kompensieren, sodass die Induktivität der Anordnung am Anfang des Stellwegs entsprechend gering ist. Ein gewisser axialer Versatz muss zwischen korrespondierenden jedoch bleiben, sonst verschwindet die Antriebskraft oder ändert ihr Vorzeichen.

[0050] Die auf den Anker **20** wirkende magnetische Kraft kann über einen Stab **21** (Stange) aus dem Rahmen **10** herausgeführt werden, um eine mechanische Ankopplung an weitere Maschinenelemente zu ermöglichen. Der Aktor kann derart mit einer Feder **50** (siehe [Fig. 5](#) oder Feder [Fig. 8](#)) kombiniert werden, dass er diese spannen und in gespanntem Zustand gegen die Wirkung der Federkraft in einer

Endposition (d. h. am Ende des Stellweges) halten kann. Durch ein Abschalten oder eine Reduktion des für das Halten des Ankers **20** in der Endposition verantwortlichen Magnetfeldes kann der Federspeicher bedarfsweise auslösen werden, was ein Zurückschnellen des Aktors in die geöffnete Ausgangsposition zur Folge hat. Bei der Verwendung eines Permanentmagneten kann die Feder leistungslos in der gespannten Position gehalten werden. Zum Auslösen des Federspeichers wird das Feld des Permanentmagneten (vgl. Magnet C' in [Fig. 5](#)) durch ein entgegengesetzt orientiertes Feld einer Spule zumindest teilweise kompensiert, sodass die Haltekraft F_H kleiner wird als die Federkraft und die Feder in die Ausgangsposition zurückschnellt. Außerdem kann der Anker **20** beim Zurückschnellen zusätzlich über die auf die Ankerspule(n) wirkende(n) elektromagnetischen Kräfte beschleunigt werden, was noch kürzere Stellzeiten ermöglicht.

[0051] In Kombination mit einer Feder eignen sich die dargestellten Linearaktoren, vorbekannte Federspeicherantriebe, beispielsweise in elektrischen Schaltern, vorteilhaft zu ersetzen (kurze Stellzeiten, hohe Kräfte, geringe Zahl beweglicher Teile). Dies trifft insbesondere auf solche Antriebe zu, die mit paarweise angeordneten Spulen ausgerüstet sind, von denen jeweils eine mechanisch mit dem Anker (Ankerspule) und die andere mit dem Stator (Erregerspule) verbunden ist.

[0052] Diese Bauweise besitzt Vorzüge, wegen derer sie besonders für hochdynamische Antriebe geeignet ist:

- Am Hubanfang sind besonders große Kräfte darstellbar
- Am Hubanfang können sich die Induktivitäten der einander zugeordneten (einander abstoßenden) Spulen weitgehend kompensieren, was einfach durch gleiche Windungszahl und Reihenschaltung erreicht werden kann. Dies führt, verglichen mit herkömmlichen Hubmagneten, zu einem weitaus schnelleren Kraftaufbau (kleinere Totzeit).

[0053] Bei den in [Fig. 3](#), [Fig. 4](#) und [Fig. 7](#) offenbarten Ausführungen der Erfindung sind die genannten Vorzüge jedoch mit Nachteilen verbunden, welche für einige an sich wirtschaftlich interessante Anwendungen Ausschlusskriterien darstellen können:

1. Induktivität

1.1. Die gewünscht-niedrige Anfangsinduktivität kann beim Einschalten der Antriebe zu hohen Stromanstiegsraten führen, was z. B. in vielen Halbleiterschaltern (bspw. Thyristoren) zum Auftreten lokaler Überhitzungen (sog. "Hot Spots") führen kann. (Elektro-)mechanische Schalter können während des Prellens durch Funken-/Bogen-

entladungen zerstört werden oder vorschnell verschleifen. Um eine Beschädigung der Schalter sicher zu vermeiden, müssen diese entweder größer dimensioniert werden, was zusätzliche Kosten verursacht. Oder es muss eine Induktivität mit geschlossenem Magnetkreis und hochpermeablem Kernwerkstoff mit dem Antrieb in Reihe geschaltet werden ("magnetic switch protection"), was gleichfalls Kosten verursacht und zudem die ESR des elektrischen Kreises erhöht.

2. Innenliegende Nut

[0054] Es werden am Stator befestigte (Erreger-)Spulen, die abstoßend auf am Anker befestigte (Anker-)Spulen wirken können, beispielsweise in innenliegenden Nuten eingebracht. Diese Anordnung (s. [Fig. 3](#), [Fig. 4](#) und [Fig. 7](#)) ist vorteilhaft, wenn es darum geht, bei gegebenem Ankerradius eine möglichst große Kraft über einen besonders langen Hub zu erzeugen. Daneben ist sie aber auch mit Nachteilen behaftet:

2.1. Es kann für die am Stator befestigten Erregerspulen im Allgemeinen nicht auf einen Spulenkörper verzichtet werden, was den effektiven (radialen) Luftspalt (L_B) erhöht und damit einerseits den erforderlichen Querschnitt des Antriebs (und damit dessen Masse und den Materialeinsatz) erhöht und andererseits dessen „Kraftkonstante“ (gemeint ist $F = F(x, I)$ mit $F =$ Antriebskraft, $x =$ Hublage und $I =$ Stromstärke) mindert.

2.2. Bei in innenliegenden Nuten angeordneten (Stator-)Erregerspulen besteht in langhubigen Ausführungen die Gefahr, dass eine Kante des Ankers bei der Hubbewegung auf eine Kante der innenliegenden Stator-Nut trifft. Diese Gefahr ist besonders mit Hinblick auf ein zunehmendes Spiel des Antriebs infolge von Verschleiß zu berücksichtigen. Dem kann zwar begegnet werden, indem mit besonders hochwertigen Werkstoffen, großer Fertigungsgenauigkeit und/oder mit vergleichsweise großen radialen (parasitären) Luftspalten gearbeitet wird. Diese Maßnahmen bedingen aber entweder Mehrkosten oder sie schmälern die Effizienz des Antriebs.

[0055] Neben den vorstehend erläuterten Nachteilen, die in manchen Ausführungen unserer Erfindung gegeben sein können, gibt es einen weiteren Nachteil, welcher alle in [Fig. 1](#) bis [Fig. 7](#) dargestellten Ausführungsbeispiele betrifft:

Es treten (große) Kräfte am (weichen) Kupfer auf. Diese Kräfte müssen im Regelfall von Vergussmassen aufgenommen und auf Stator bzw. Anker übertragen werden. Insbesondere mit Hinblick auf die vergleichsweise kleinen Stirnflächen der Spulen (und die glatten Nuten) sind damit verbundene technische Herausforderungen dem Fachmann evident.

[0056] Sämtliche genannte Nachteile können durch Anordnungen, wie sie in [Fig. 8](#) dargestellt sind, vermieden werden. [Fig. 8](#) zeigt dies beispielhaft für einen Antrieb mit einer auf den Anker gewickelten ersten Ankerspule A sowie einer (Stator-)Erregerspule B und einer dieser Erregerspule B zugeordneten zweiten Ankerspule A1:

Der Rahmen ist aus mehreren weichmagnetischen Teilen zusammengesetzt, wobei derjenige Teil, in welchem der Anker sich bewegt (Rahmen(1)), mit einer außenliegenden anstelle einer innenliegenden Nut versehen ist. In diese Nut wird die der zweiten Ankerspule A1 zugeordnete Erregerspule B gewickelt. Die außenliegende Nut wird sodann mit weiterem weichmagnetischen Material magnetisch umschlossen, in [Abb. 8](#) geschieht dies mittels des Bauteils Rahmen(2).

[0057] Die Abbildung stellt den Antrieb in seiner Hubanfangslage dar, die Windungen sind nicht eingezeichnet. Wie zu sehen ist, wird durch die außenliegende Nut in der Hubanfangslage eine Art „weichmagnetischer Brücke“ zwischen den sich überlappenden Spulen (Erregerspule B, zweite Ankerspule A1) gebildet. Damit es zwischen diesen Spulen zu einer nicht-verschwindenden repulsiven Wechselwirkung kommen kann, müssen diese natürlich gegensinnig bestromt werden. Der Strom induziert in der „weichmagnetischen Brücke“ einen magnetischen Fluss, was wegen der hohen relativen Permeabilität weichmagnetischer Werkstoffe zu einer hohen Anfangsinduktivität des Antriebs führt (es ist vorteilhaft, die einander zugeordneten Spulen mit ungefähr gleicher Windungszahl zu wickeln und in Reihe zu schalten). Die hohe Anfangsinduktivität erlaubt dem zum Schalten des Antriebs verwendeten Schalter, vollständig leitend zu werden, bevor ein großer Strom durch die Antriebsspulen fließt. Dies schont den Schalter (s. o.).

[0058] Der Antrieb setzt sich in Bewegung, wenn die „weichmagnetische Brücke“, in der Bewegungsrichtung magnetisch durchflossen, gesättigt ist. Er wirkt dann wie andere erfindungsgemäße Antriebe in Kombination mit einem Proportionalmagneten (die Ankerbewegung verkürzt in Bewegungsrichtung die Feldlinien in der gesättigten „weichmagnetischen Brücke“).

[0059] Darüber hinaus gleitet nach [Fig. 8](#) der Anker in einem kontinuierlichen, rohrähnlichen Gebilde; es besteht nicht mehr die Möglichkeit, dass „Kante auf Kante“ trifft. Der parasitäre (radiale) Luftspalt kann nach [Abb. 8](#) in einfacher Weise klein gehalten werden.

[0060] Damit sind alle oben stehenden Probleme beseitigt mit Ausnahme der Kraftübertragung „vom Kupfer auf das Eisen“. Dieser letzten Aufgabe wird entsprechend [Fig. 8](#) begegnet, indem in die außenliegenden Nuten an Anker und Stator entweder (Flach-

)Gewinde geschnitten oder eine Vielzahl kleiner weiterer Nuten eingebracht werden (die Nuten werden beispielsweise durch eine Vielzahl paralleler, in Umfangsrichtung unterbrochener und den Umfang umlaufender Stege gebildet). Der Wickeldraht wird ganz oder teilweise in diese kleineren Nuten bzw. das (Flach-)Gewinde gewickelt, anschließend wird wie zuvor vergossen. Dies ermöglicht einerseits eine Verteilung der auf das Kupfer wirkenden Kraft auf Flanken der Nuten bzw. der Gewinde, ggf. wird die Vergussmasse mit dem Anker regelrecht verzahnt. Andererseits tritt ein Teil der Kraft gar nicht mehr als (Lorentz-)Kraft am Kupfer sondern vielmehr als sog. Magnetischer Querdruck an den Flanken der Nuten bzw. der Gewinde auf, und damit an einem viel robusteren Teil, nämlich am Anker selbst, der üblicherweise aus einer Eisenlegierung besteht. Zusätzlich werden die in den Nuten/Gewinden liegenden Wicklungen beim Betrieb elektromagnetisch in selbige gepresst – dieser Effekt wird vielfach in üblichen rotierenden elektrischen Maschinen ausgenutzt. Isolationsprobleme zwischen Wicklung und „Eisen“ können durch bekannte Maßnahmen wie bspw. die Verwendung eines geeigneten Lackdrahts (insb. Polyamidimid-isolierter Kupferlackdraht und insb. Profildraht) und/oder geeigneter Vergussmasse von jedem Fachmann sicher vermieden werden. Als zusätzliche Maßnahme zur Isolation des Ankers gegenüber den Spulen kann selbstverständlich auch der Anker nach bekannten Verfahren mit elektrisch isolierenden Schichten versehen werden, beispielsweise durch Tauchen, Bedampfen, Anodisieren etc.. Dabei kann die Auftragung der isolierenden Schichten nach bekannten Maßnahmen auf die elektrisch relevanten Bereiche beschränkt werden; es kann aber auch der gesamte Anker beschichtet werden und die Schicht gleichsam als Teil des Gleitlagers dienen, die Anker und Rahmen(1) bilden können, sofern keine separate Bauch- oder Stangenlagerung vorgenommen wird (die beispielsweise mit weichmagnetischem Lagermetall gebildet wird).

[0061] Wie bereits erwähnt, sind die oben beschriebenen, erfindungsgemäßen Antriebe gute geeignet, in Kombination mit Federn bekannte Federspeicherantriebe in elektrischen Leistungsschaltern zu ersetzen (als Direktantriebe): Dies gilt für alle Ausführungsbeispiele. Besonders interessant ist im Zusammenhang die Möglichkeit, die Antriebe direkt in die Gasräume von Hochspannungs-Leistungsschaltern einzubauen oder in die (Vakuum-)Röhren von Nieder- und Mittelspannungs-Leistungsschaltern. Dies ermöglicht den Verzicht auf aufwendige Dichtungen (z. B. Drehdichtungen für SF6-isolierte Hochspannungsleistungsschalter oder Metallfaltenbälge im Fall von Vakuumschaltröhren) und reduziert stark die Anzahl beweglicher Teile, was einerseits kostensparend ist und andererseits der Zuverlässigkeit zu Gute kommt. Durch die im Vergleich zu herkömmlichen Magnetantrieben weitaus höhere Dynamik sind erfin-

dungsgemäße Antriebe besonders für synchronisierte Schalter (also Schalten im Nulldurchgang des Stromes) geeignet, und zwar auch für solche, bei denen die Antriebe in herkömmlicher Weise außerhalb der Gas- bzw. Vakuumräume angeordnet sind.

[0062] Abschließend werden ein Schaltzyklus und eine vorteilhafte Beschaltung anhand des Beispiels des in [Fig. 8](#) dargestellten Antriebes beschrieben:

Der Antrieb besitzt drei Spulen, nämlich eine erste Ankerspule A sowie eine Erregerspule B und eine der Erregerspule B zugeordnete zweite Ankerspule A1. Die Erregerspule B und die zweite Ankerspule A1 besitzen beispielsweise die gleiche Windungszahl und werden so in Reihe geschaltet, dass sie gegensinnige Magnetfelder erzeugen. Zum ersten Betätigen des Antriebes wird vorzugsweise ein Kondensator geladen und über die in Reihe geschalteten Spulen A1, B entladen, zum Beispiel mit Hilfe eines Thyristors, und zwar während der Anker sich in der Hubanfangslage befindet – der zur ersten Ankerspule A gehörende axiale Arbeitsluftspalt ist also zuerst voll geöffnet. Dabei führt die allseitige Umschließung von Erregerspule B und Ankerspule A1 mit weichmagnetischem Werkstoff durch Anker, Rahmen(1) und Rahmen(2) zunächst zu einer hohen Induktivität (geschlossener Magnetkreis) und damit zu einer kleinen initialen Stromanstiegsrate. Dies schont den Thyristor. Der durch Erregerspule B und zweite Ankerspule A1 induzierte magnetische Fluss führt bald zu einer partiellen Sättigung des Magnetkreises im Bereich des geringsten (effektiven) Querschnitts, also der von Stator(1) gebildeten „weichmagnetischen Brücke“ (in [Fig. 8](#) als Flachgewinde der Erregerspule B ausgebildet). Zur Veranschaulichung mag man sich zwei magnetische Teilkreise vorstellen, nämlich einen um Erregerspule B und einen um die zweite Ankerspule A1, welche mit der „weichmagnetischen Brücke“ einen gemeinsamen Pfad teilen. Durch die partielle Sättigung wird der Magnetkreis sehr schnell geöffnet, die Induktivität der Reihenschaltung (A1, B) nimmt rapide ab und der Strom stark zu. Infolge der Sättigung entsteht an Anker und zweite Ankerspule A1 eine Kraft, die den Anker gegen die Druckfeder so bewegt, dass der axiale Luftspalt des Magnetkreises der bisher nicht betrachteten ersten Ankerspule A, einer Zugspule, geschlossen wird. Ankerspule A kann mit den anderen Spulen in Reihe oder parallel geschaltet werden, wobei eine Reihenschaltung die Dynamik des Antriebs mindert. Ankerspule A kann auch mit einer anderen Leistungsquelle versorgt oder mit einem weiteren Schalter/Thyristor verzögert bestromt werden. Bei Erreichen der Hubendlage wird der axiale Arbeitsluftspalt über Ankerspule A kleiner als der durch die Wickelhöhe von Ankerspule A (ungefähr) gegebene radiale Luftspalt, und Anordnung wirkt zunehmend wie ein konventioneller Hubmagnet (vgl. [Fig. 1](#)); ein Strom durch Ankerspule A erzeugt also eine Haltekraft, wenn der Anker sich der geschlossenen Endposition nähert (nicht abgebildet).

[0063] Diese Haltekraft vermag bei sinnvoller Auslegung die dargestellte Druckfeder gespannt zu halten. Damit der Antrieb nicht, von der Druckfeder angetrieben, sofort zurückschnappt, sondern länger in der Endlage gehalten werden kann, sind bei der Leistungsversorgung Mittel vorzusehen, Ankerspule A entsprechend mit Strom zu versorgen. Eine Unterbrechung des Stromes führt dann zur federgetriebenen Rückstellung des Antriebes in die Hubanfangslage (geöffnete Endposition). Selbstverständlich kann ein Antrieb nach [Fig. 8](#) zusätzlich mit einer Haltespule C ausgerüstet werden wie im Beispiel aus [Fig. 7](#), sodass die andauernd darstellbare Haltekraft gegen die Feder bei gleichbleibendem Antriebsquerschnitt ungefähr verdoppelt werden kann. Im Bereich von Haltespule C wirkt die Anordnung wie ein bekannter Elektro- bzw. Hubmagnet, und entsprechend können bei der Ausgestaltung des Antriebs vielfältige bekannte Bauweisen von Elektromagneten Anwendung finden (bspw. Anker-Ankergegenstück-Systeme, Druckrohre, Mittel zum Dämpfen von Wirbelströmen, Kurzschlusswicklungen etc.).

Patentansprüche

1. Elektromagnetischer Linearaktor umfassend:
 - einen Stator (10), der zumindest teilweise aus weichmagnetischem Material besteht;
 - einen Anker (20), der zumindest teilweise aus weichmagnetischem Material besteht und der an dem Stator (10) derart gelagert ist, dass der Anker (20) entlang einer Längsachse (1) relativ zum Stator (10) bewegbar ist, wobei Anker (20) und Stator (10) derart ausgebildet sind, dass entlang der Längsachse (1) in einer geöffneten Position ein Spalt (L_A) zwischen Anker (20) und Stator (10) vorliegt und in einer geschlossenen Position Anker (20) und Stator (10) aneinander anliegen, sodass der Spalt (L_A) geschlossen ist;
 - eine erste Ankerspule (A), die mit dem Anker (20) derart verbunden ist, dass eine auf die erste Ankerspule (A) wirkende Kraft auf den Anker (20) übertragbar ist; und
 - Mittel zum Erzeugen eines Erreger-Magnetfeldes (A, B, C), das zumindest teilweise durch Stator (10) und Anker (20) geführt und derart gerichtet ist, dass auf die erste Ankerspule (A), wenn sie bestromt ist, eine Kraft wirkt, die auf den Anker (20) übertragen wird, um den Spalt (L_A) zu schließen, wobei Stator, Anker und Erreger-Magnetfeld weiter derart ausgebildet sind, dass bei geschlossenem Spalt (L_A) zwischen Stator (10) und Anker (20) eine Haltekraft wirken kann.
2. Linearaktor gemäß Anspruch 1, bei dem Anker (20) und Stator (10) zusammen mit dem Spalt (L_A) als Luftspalt einen Magnetkreis bilden, in dem das Erreger-Magnetfeld geführt wird; die erste Ankerspule (A) selbst als Mittel zum Erzeugen eines Erreger-Magnetfeldes dient, wobei die Ankerspule (A) derart am Anker (20) angeordnet ist, dass sie in der geöffneten

Position teilweise in Längsrichtung neben dem (Arbeits-)Luftspalt (L_A) liegt, also in den Stator (**10**) eintaucht.

3. Linearaktor gemäß Anspruch 1, bei dem Anker (**20**) und Stator (**10**) zusammen mit dem Spalt (L_A) als axialen (Arbeits-)Luftspalt einen Magnetkreis bilden, in dem das Erreger-Magnetfeld geführt wird; die erste Ankerspule (A) selbst als Mittel zum Erzeugen eines Erreger-Magnetfeldes dient, wobei die Ankerspule (A) derart am Anker (**20**) angeordnet ist und Rahmen und Anker derart ausgestaltet sind, dass in der geöffneten Position des Ankers (**20**) sich das Erreger-Magnetfeld in radialer Richtung quer zur Längsachse konzentriert und die Ankerspule radiale durchsetzt.

4. Linearaktor gemäß Anspruch 2 oder 3, bei dem der Anker (**20**) entlang der Längsachse gleitend in dem Stator (**10**) geführt ist und bei dem der Anker (**20**) einen Anschlag aufweist, an dem bei geschlossenem Luftspalt (L_A) eine Stirnfläche des Stators (**10**) anliegt, sodass ein nahezu geschlossener Magnetkreis gebildet wird, der das Erregerfeld führt.

5. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 2 bis 4, bei dem die Ankerspule (A) um die Längsachse des Ankers (**20**) herum geführt ist.

6. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, der weiter eine zweite Ankerspule (A1) umfasst, die mit dem Anker (**20**) derart verbunden ist, dass eine auf die zweite Ankerspule (A1) wirkende Kraft auf den Anker (**20**) übertragbar ist, wobei das Mittel zum Erzeugen des Erreger-Magnetfeldes neben der zweiten Ankerspule (A1) eine dieser zugeordnete und mit dem Stator (**10**) mechanisch verbundene Erregerspule (B1) aufweist, wobei die zweite Ankerspule (A1) und die ihr zugeordnete Erregerspule (B1), wenn sie bestromt sind, gegensinnige Magnetfelder erzeugen, die sich zumindest in der geöffneten Position überlagern und so ein Erregerfeld mit einer quer zur Längsachse orientierten Feldkomponente bilden, und wobei in einer offenen Position die zweite Ankerspule (A1) und die ihr zugeordnete Erregerspule (B1) derart benachbart angeordnet sind, dass bei bestromten Spulen die quer zur Längsachse orientierte Feldkomponente mit der zweiten Ankerspule (A1) derart wechselwirkt, dass auf die zweite Ankerspule (A1) eine den Spalt (L_A) schließende Kraft in Längsrichtung wirkt.

7. Linearaktor gemäß Anspruch 6, der weiter eine dritte Ankerspule (A3) umfasst, die mit dem Anker (**20**) derart verbunden ist, dass eine auf die dritte Ankerspule (A3) wirkende Kraft auf den Anker (**20**) übertragbar ist, wobei das Mittel zum Erzeugen des Erreger-Magnetfeldes neben der dritten Ankerspule (A3) eine die-

ser zugeordnete und mit dem Stator (**10**) mechanisch verbundene Erregerspule (B3) aufweist, wobei die dritte Ankerspule (A3) und die ihr zugeordnete Erregerspule (B3), wenn sie bestromt sind, gegensinnige Magnetfelder erzeugen, die sich zumindest in der geöffneten Position überlagern und so ein Erregerfeld mit einer quer zur Längsachse orientierten Feldkomponente bilden, und wobei in einer offenen Position die dritte Ankerspule (A3) und die ihr zugeordnete Erregerspule (B3) derart benachbart angeordnet sind, dass bei bestromten Spulen die quer zur Längsachse orientierte Feldkomponente des Erregerfeldes der dritten Ankerspule (A3) und der ihr zugeordneten Erregerspule (B3) mit der dritten Ankerspule (A3) derart Wechselwirken kann, dass auf diese eine den Spalt (L_A) schließende Kraft in Längsrichtung wirkt.

8. Linearaktor gemäß Anspruch 7, bei dem in geschlossener Position die dritte Ankerspule (A3) unmittelbar neben oder in der der zweiten Ankerspule (A1) zugeordneten Erregerspule (B1) liegt.

9. Linearaktor gemäß Anspruch 7 oder 8, bei dem die zweite Ankerspule (A1) und die dritte Ankerspule (A3), wenn sie bestromt sind, für sich gegensinnige Magnetfelder erzeugen.

10. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 2 bis 5, der weiter eine zweite Ankerspule (A) umfasst, die mit dem Anker (**20**) derart verbunden ist, dass eine auf die zweite Ankerspule (A) wirkende Kraft auf den Anker übertragbar ist, wobei das Mittel zum Erzeugen des Erreger-Magnetfeldes neben der zweiten Ankerspule (A) zumindest einen dieser zugeordneten und mit dem Stator mechanisch verbundenen Permanentmagneten (B') aufweist, wobei in einer offenen Position die zweite Ankerspule (A) und der ihr zugeordnete Permanentmagnet (B') derart angeordnet sind, dass bei bestromter zweiter Ankerspule (A) das Magnetfeld des Permanentmagneten (B') und das der zweiten Ankerspule (A) zumindest in der geöffneten Position sich überlagern und so ein Erregerfeld mit einer quer zur Längsachse orientierten Feldkomponente bilden, welche mit der zweiten Ankerspule (A) derart wechselwirkt, dass auf die zweite Ankerspule (A) eine den Spalt (L_A) schließende Kraft in Längsrichtung wirkt.

11. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 2 bis 10, bei dem Anker (**20**) und Stator (**10**) derart ausgestaltet sind, dass in der geschlossenen Position das Erregerfeld/die Erregerfelder, das/die quer zur Längsachse verläuft/verlaufen, magnetisch zumindest annähernd kurzgeschlossen ist/sind (also radiale Luftspalte L_B geschlossen sind).

12. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, bei dem die Mittel zum Erzeugen des Erregerfeldes eine weitere Erregerspule (C) aufweisen („Halte-

spule"), die mechanisch mit dem Stator (10) verbunden ist und die in Längsrichtung derart angeordnet ist, dass der Anker in offener Position nicht oder nur teilweise in die weitere Erregerspule (C) eintaucht und in geschlossener Position
 der Anker (20) als Eisenkern der weiteren Erregerspule (C) dient, oder
 der Anker (20) mit der weiteren Erregerspule (C) derart gekoppelt ist, dass beim Bestromen der weiteren Erregerspule (C) eine Haltekraft zwischen Anker (20) und Stator (10) wirkt, oder
 der Anker zusammen mit dem Stator die weitere Erregerspule (C) magnetisch kurzschließt.

13. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, bei dem die Mittel zum Erzeugen des Erregerfeldes zumindest einen weiteren Permanentmagneten (C') aufweisen, der mechanisch mit dem Stator (10) verbunden ist und derart angeordnet ist, dass der weitere Permanentmagnet (C') in geschlossener Position eine Haltekraft zwischen Anker (20) und Stator (10) bewirkt, wobei in geschlossener Position zumindest eine Ankerspule (A) derart zu liegen kommt und mit dem Permanentmagneten (C') so magnetisch gekoppelt ist, dass durch ein entsprechendes Bestromen der Ankerspule (A) oder einer weiteren am Rahmen angeordneten Spule das Magnetfeld des Permanentmagneten (C') ganz oder teilweise kompensiert werden kann, sodass die Haltekraft reduziert wird oder ganz verschwindet und/oder auf zwischen Ankerspule (A) und Permanentmagnet (C') eine den axialen (Arbeitsluft-)Spalt (L_A) öffnende, abstoßende Kraft zwischen Ankerspule (A) und Permanentmagnet (C') erzeugt werden kann.

14. Linearaktor gemäß Anspruch 1, bei dem das Mittel zum Erzeugen des Erregerfeldes neben der ersten Ankerspule (A) eine dieser zugeordnete und mit dem Stator mechanisch verbundene Erregerspule (B) umfasst, wobei die erste Ankerspule (A) und die Erregerspule (B), wenn sie bestromt sind, für sich gegensinnige Magnetfelder erzeugen, welche sich überlagern und so ein Erregerfeld mit einer quer zur Längsachse orientierten Feldkomponente bilden, und bei dem in einer offenen Position die erste Ankerspule (A) und die ihr zugeordnete Erregerspule (B) derart benachbart angeordnet sind, dass bei bestromten Spulen die quer zur Längsachse orientierte Feldkomponente des Erregerfeldes mit der ersten Ankerspule (A) derart wechselwirkt, dass auf die erste Ankerspule (A) eine den axialen Spalt (L_A) schließende Kraft in Längsrichtung wirkt.

15. Linearaktor gemäß Anspruch 14, bei dem der Stator (10) einen Anschlag aufweist, an dem der Anker (20) in geschlossener Position anliegt.

16. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 14 und 15, bei dem das Mittel zum Erzeugen des Erregerfeldes eine weitere Erregerspule (C) aufweist,

die mechanisch mit dem Stator (10) verbunden ist und die in Längsrichtung derart angeordnet ist, dass der Anker (20) in offener Position nicht oder nur teilweise in die weitere Erregerspule (C) eintaucht und in geschlossener Position:
 der Anker (20) als Eisenkern der weiteren Erregerspule (C) dient, oder
 der Anker (20) mit der weiteren Erregerspule (C) derart gekoppelt ist, dass beim Bestromen der weiteren Erregerspule (C) eine Haltekraft zwischen Anker (20) und Stator (10) wirkt, oder
 der Anker zusammen mit dem Stator die weitere Erregerspule (C) magnetisch kurzschließt.

17. Linearaktor gemäß Anspruch 16, bei dem die erste Ankerspule (A) in geschlossener Position unmittelbar benachbart zu der weiteren Erregerspule (C) liegt.

18. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 14 bis 17, bei dem zwischen Anker (20) und Stator (10) ein radialer Luftspalt (L_B) besteht, der in axialer Richtung durch die Position von Ankerspule (A) und zugehöriger Erregerspule (B) begrenzt wird.

19. Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 14 bis 16, bei dem zwischen Anker (20) und Stator (10) ein radialer Luftspalt (L_B) besteht, der in axialer Richtung durch die Position von Ankerspule (A) und zugehöriger Erregerspule (B) begrenzt wird, wobei Anker und Stator derart ausgestaltet sind, dass der radiale Luftspalt in geschlossener Position magnetisch kurzgeschlossen ist.

20. Linearaktor gemäß Anspruch 1, bei dem das Mittel zum Erzeugen des Erregerfeldes neben der ersten Ankerspule (A) zumindest einen dieser zugeordneten, mit dem Stator mechanisch verbundenen Permanentmagneten (B') umfasst, wobei die erste Ankerspule (A) und der zumindest eine Permanentmagnet (B'), wenn die Ankerspule bestromt ist, gegensinnige Magnetfelder erzeugen können, die sich in der geöffneten Position überlagern und so ein Erregerfeld mit einer quer zur Längsachse orientierten Feldkomponente bilden, und bei dem in der geöffneten Position die erste Ankerspule (A) und der ihr zugeordnete Permanentmagnet (B') derart angeordnet sind, dass bei bestromter erster Ankerspule die quer zur Längsachse orientierte Feldkomponente des Erregerfeldes mit der ersten Ankerspule (A) derart wechselwirkt, dass auf die erste Ankerspule (A) eine den Spalt (L_A) schließende Kraft in Längsrichtung wirkt.

21. Linearaktor gemäß Anspruch 20, der einen mit dem Stator (10) fest verbundenen weiteren Permanentmagneten aufweist (C'), der ein Erregermagnetfeld erzeugt, welches derart gerichtet ist, dass bei geschlossenem axialen Spalt eine magnetische Haltekraft zwischen Anker (20) und Stator (10) wirkt.

22. Linearaktor gemäß Anspruch 20 oder 21, bei dem die Permanentmagneten Bestandteil des Stators (**10**) sind.

23. Linearaktor gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem Anker-, und Erregerspule(n) (A, B) in Umfangsrichtung um die Längsachse des Linearaktors gewickelt sind.

24. Linearaktor gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Ankerspule(n) in einer den Anker (**20**) in Umfangsrichtung umlaufenden Nut angeordnet sind und/oder bei dem die Erregerspule(n) in einer den Stator (**10**) in Umfangsrichtung umlaufenden Nut angeordnet sind.

25. Linearaktor gemäß Anspruch 24, bei dem zumindest eine Ankerspule (A) die zugehörige Nut nicht vollständig ausfüllt und der verbleibende Raum in der Nut mit einem Gleitlagerwerkstoff (**30**) gefüllt ist, wobei bei einer Bewegung des Linearaktors der Gleitlagerwerkstoff (**30**) an einer Innenfläche des Stators (**10**) gleitet.

26. Linearaktor gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche gekennzeichnet dadurch, dass die Windungen der Spulen (wie es in (rotierenden) Synchronmotoren allgemein üblich ist) ganz oder teilweise in Nuten im weichmagnetischen Werkstoff untergebracht sind. Als „Nuten“ können hierbei die Gänge eines (Flach-)Gewindes dienen oder eine Mehrzahl unterbrochener Rippen, zum Beispiel parallele Stege.

27. Linearaktor gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche gekennzeichnet dadurch, dass er mindestens eine am Stator befestigte Erregerspule besitzt und dass der Stator aus mehreren weichmagnetischen Teilen zusammengesetzt ist, von denen zumindest eines als Rohr ausgebildet ist, in welchem der Anker geführt wird. Dabei wird die am Stator befestigte Erregerspule von außen auf ein als Rohr ausgebildetes Stator-Teil gewickelt, beispielsweise in eine Nut. Das Rohr ist im Bereich der Wicklung so dünnwandig, dass es in Richtung der Ankerbewegung wesentlich weniger magnetischen Fluss führen kann als der Anker selbst, ohne zumindest teilweise zu sättigen. Die auf das Rohr gewickelte Erregerspule ist mit einem oder mehreren weiteren Stator-Teilen derart umgeben, dass mit dem Rohr ein geschlossener Magnetkreis gebildet wird, dessen magnetischer Pfad überall einen größeren Querschnitt besitzt als der minimale Querschnitt des bewickelten Rohres. Bei wachsendem Strom in der Erregerspule muss also, in Abwesenheit des Ankers, zuerst der mit der Erregerspule bewickelte Teil des Rohres sättigen.

28. Linearaktor nach Anspruch 26 gekennzeichnet dadurch, dass der Anker mit einer der am Stator be-

festigten Erregerspule zugeordneten Ankerspule bewickelt ist, wobei der minimale Ankerquerschnitt im Bereich der Wicklung der Ankerspule liegt und ungefähr gleich oder kleiner ist als der minimale Querschnitt des Stators außerhalb der Erregerspule.

29. Vakuumschaltröhre gekennzeichnet dadurch, dass ein Antrieb nach einem der vorangegangenen Ansprüche im Vakuum der Schaltröhre angeordnet ist und gebraucht wird, den elektrischen Kontakt zu öffnen und/oder zu schließen.

30. Hochspannungsleistungsschalter gekennzeichnet dadurch, dass ein Antrieb nach einem der vorangegangenen Ansprüche im Gasraum des Schalters angeordnet ist und gebraucht wird, den elektrischen Kontakt zu öffnen und/oder zu schließen.

31. Hochspannungsleistungsschalter der mindestens einen Federspeicherantrieb aufweist mit einer Feder und einen Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 1 bis 28 zum Spannen der Feder und Halten der Feder in gespanntem Zustand.

32. Federspeicherantrieb umfassend eine Feder und einen Linearaktor gemäß einem der Ansprüche 1 bis 28 zum Spannen der Feder und Halten der Feder in gespanntem Zustand.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

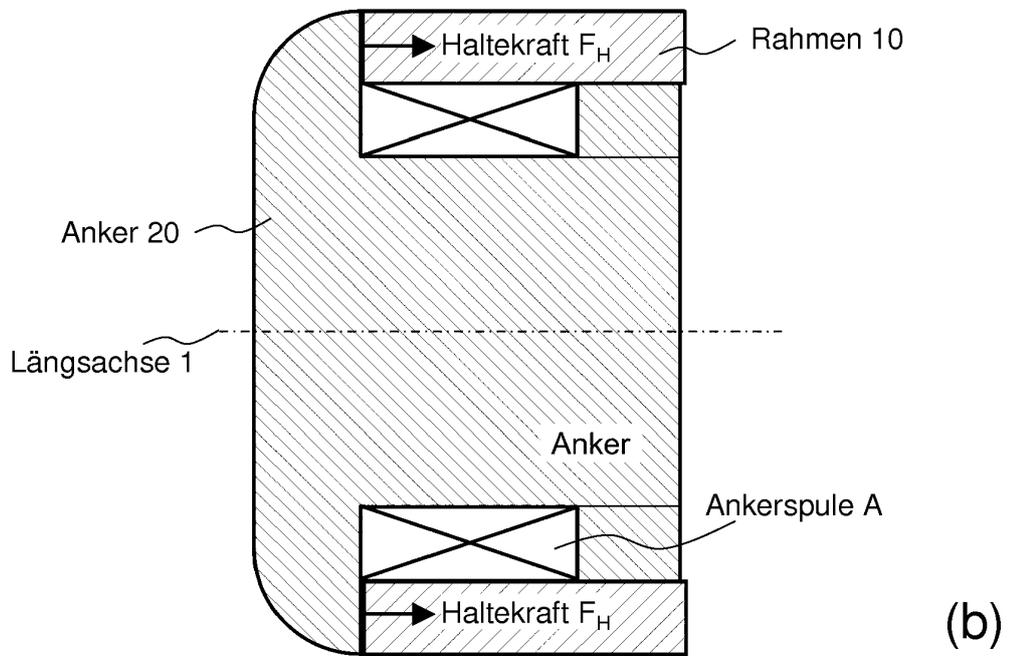
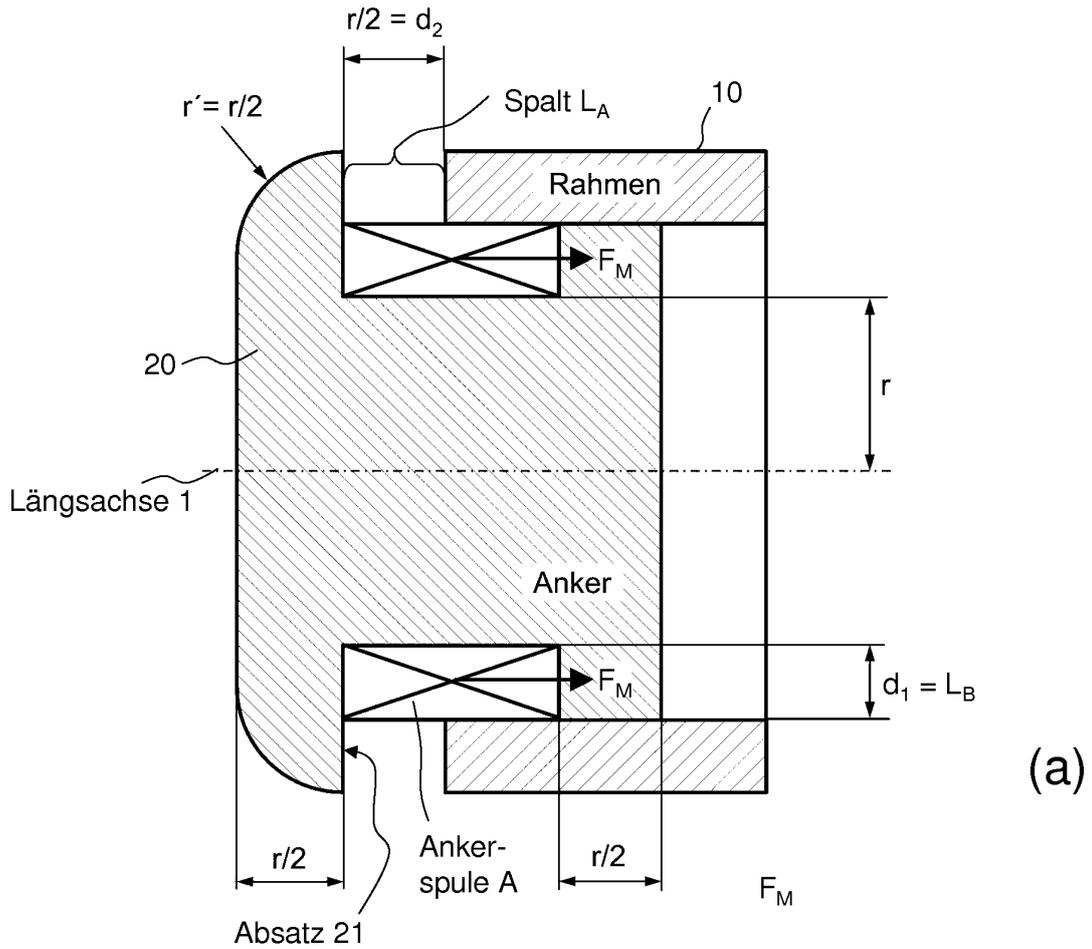
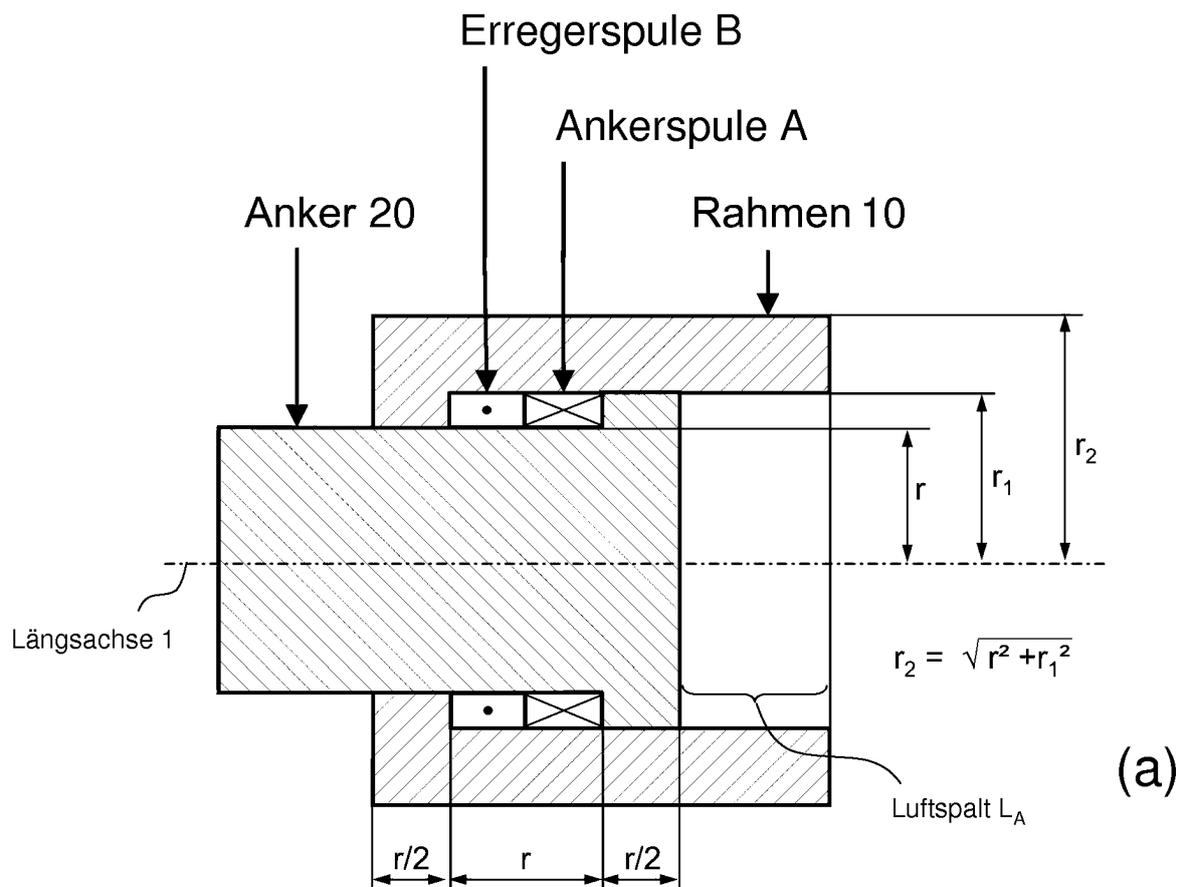
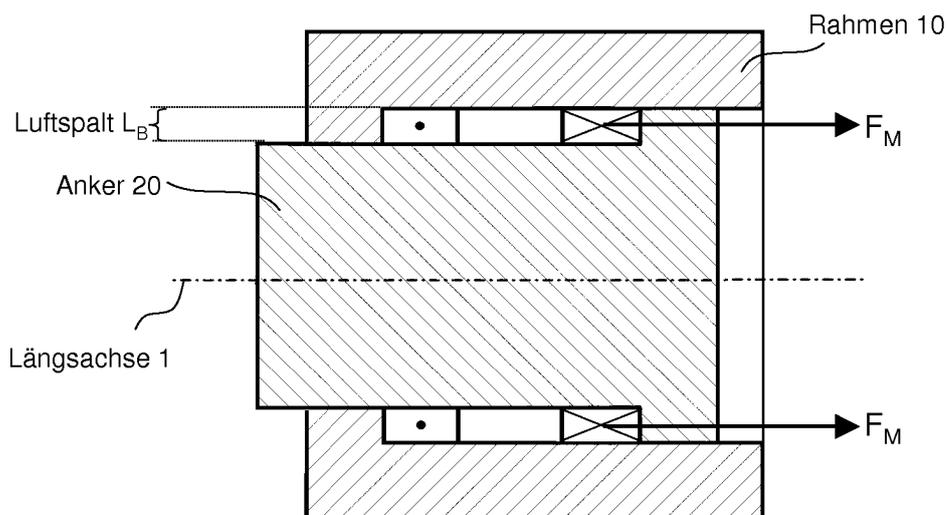


Fig. 1

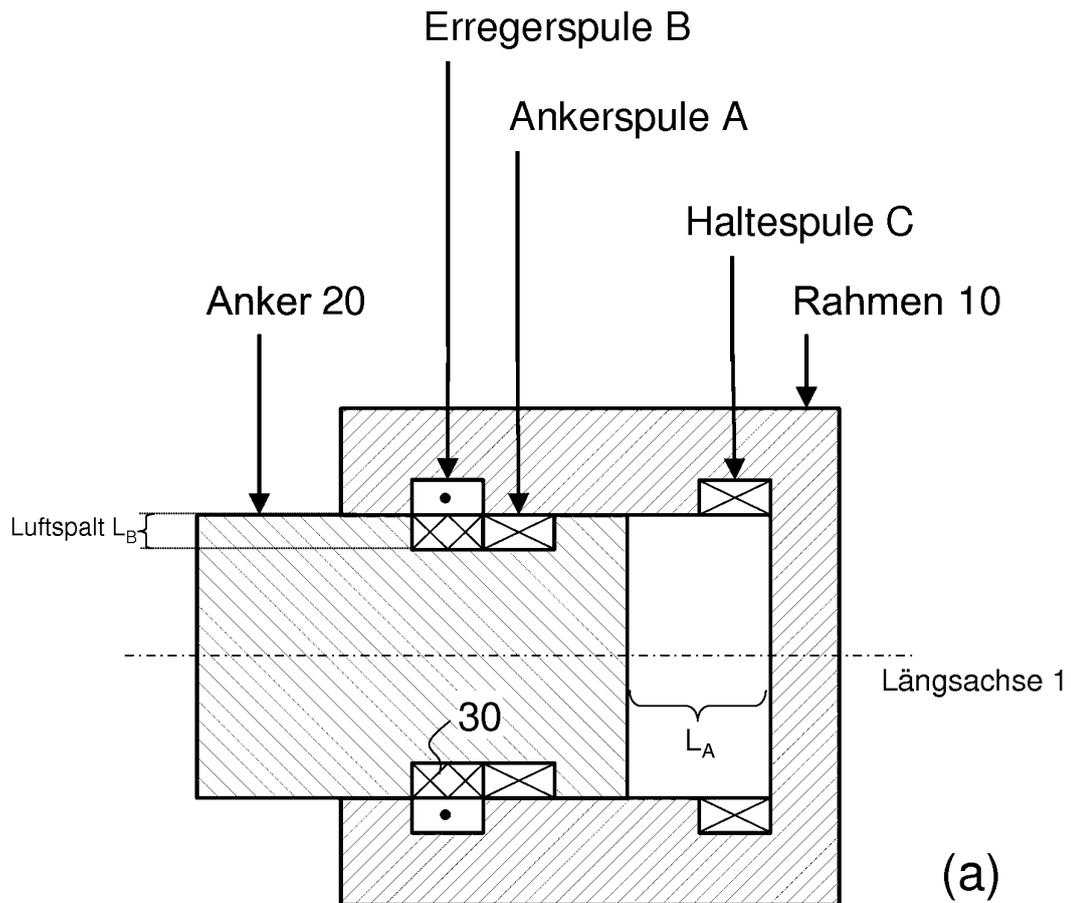


(a)



(b)

Fig. 2



 : tragfähiger Gleitlagerwerkstoff, bzw. selbstschmierender Kunststoff

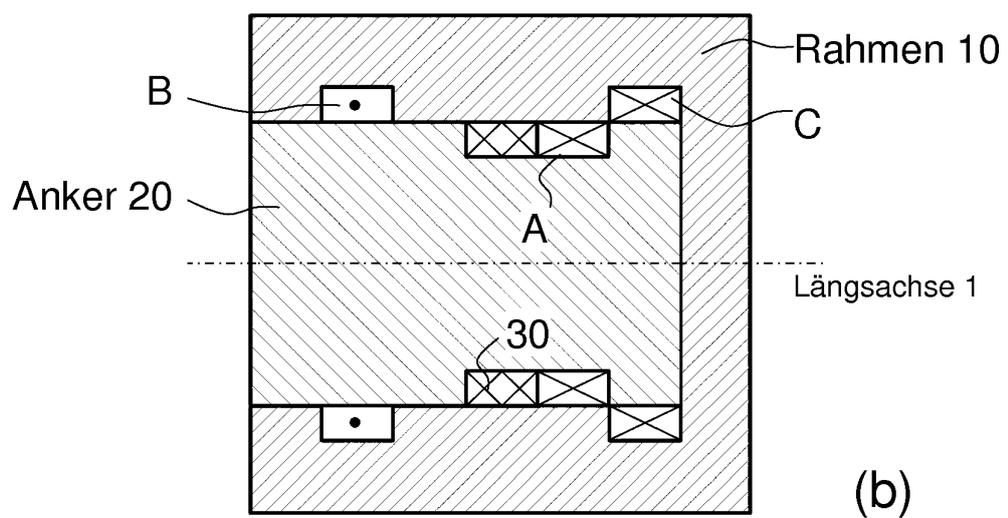


Fig. 3

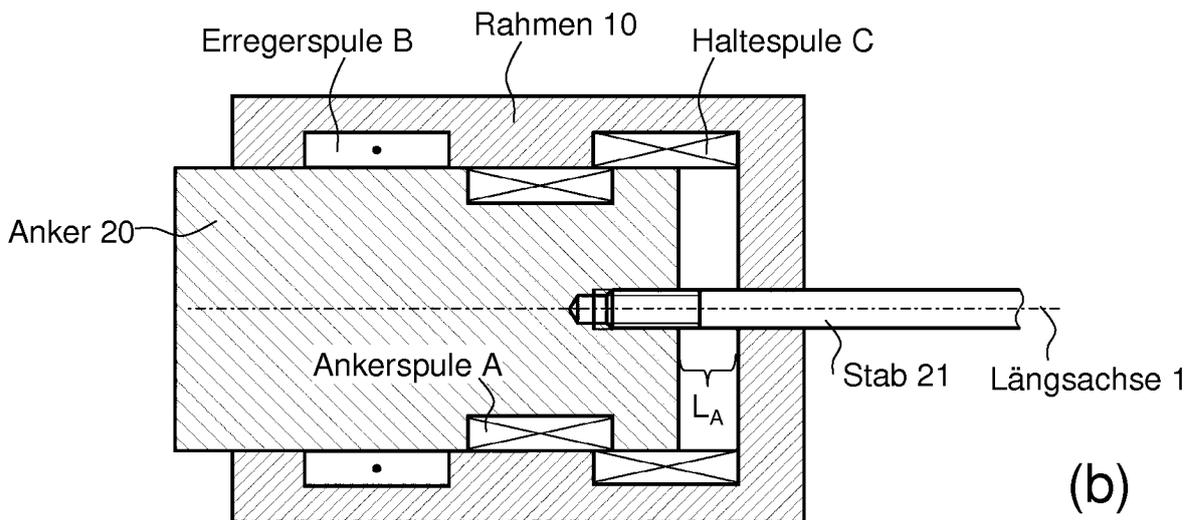
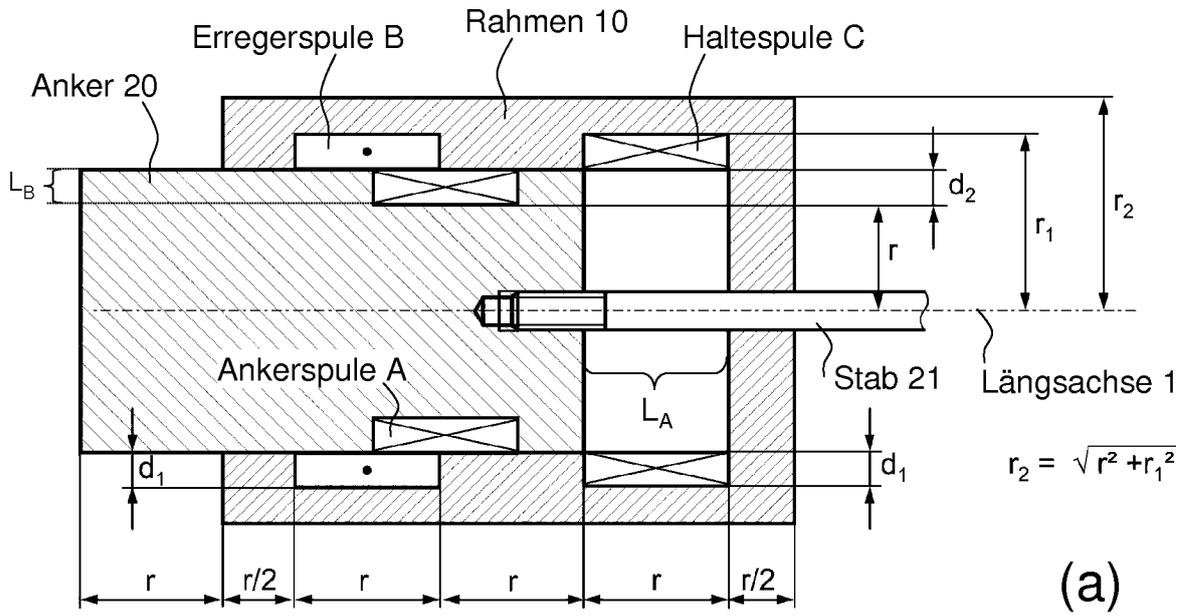


Fig. 4

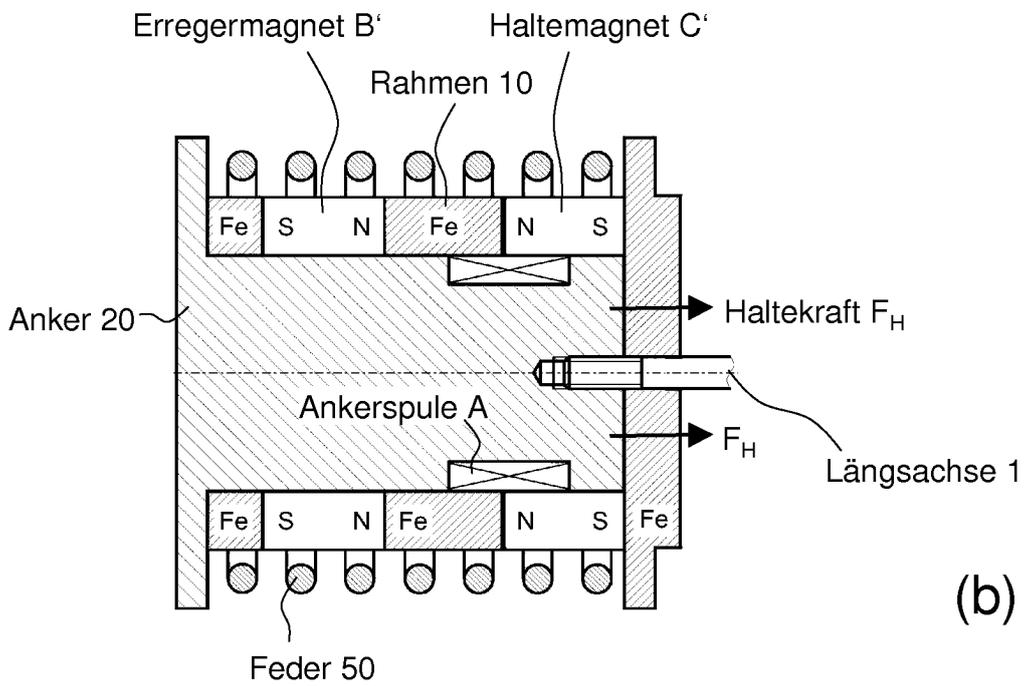
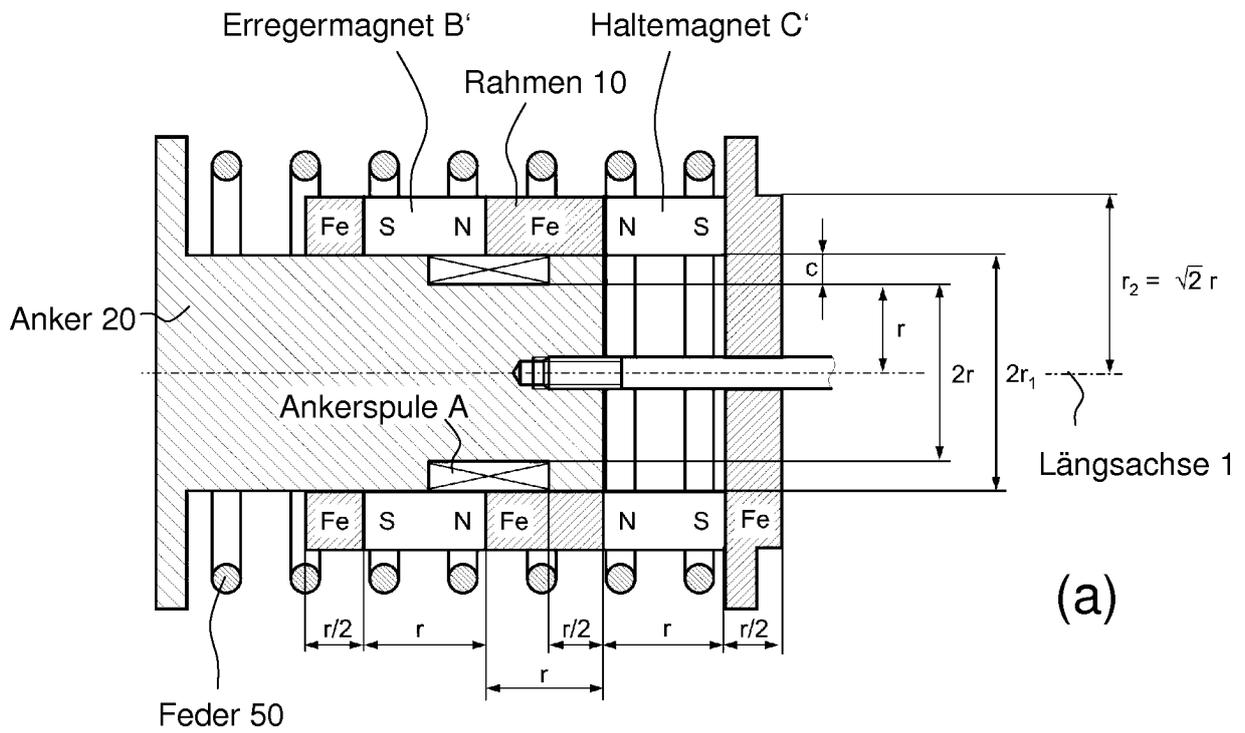


Fig. 5

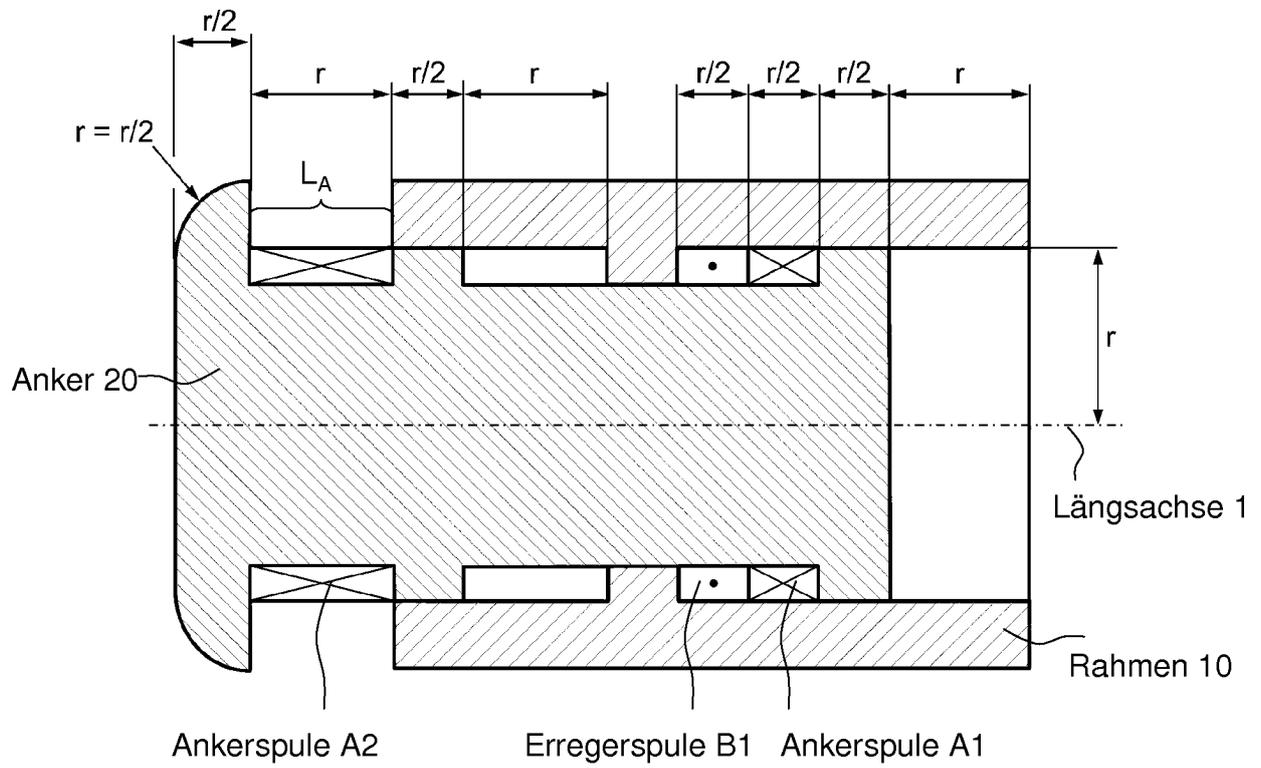


Fig. 6

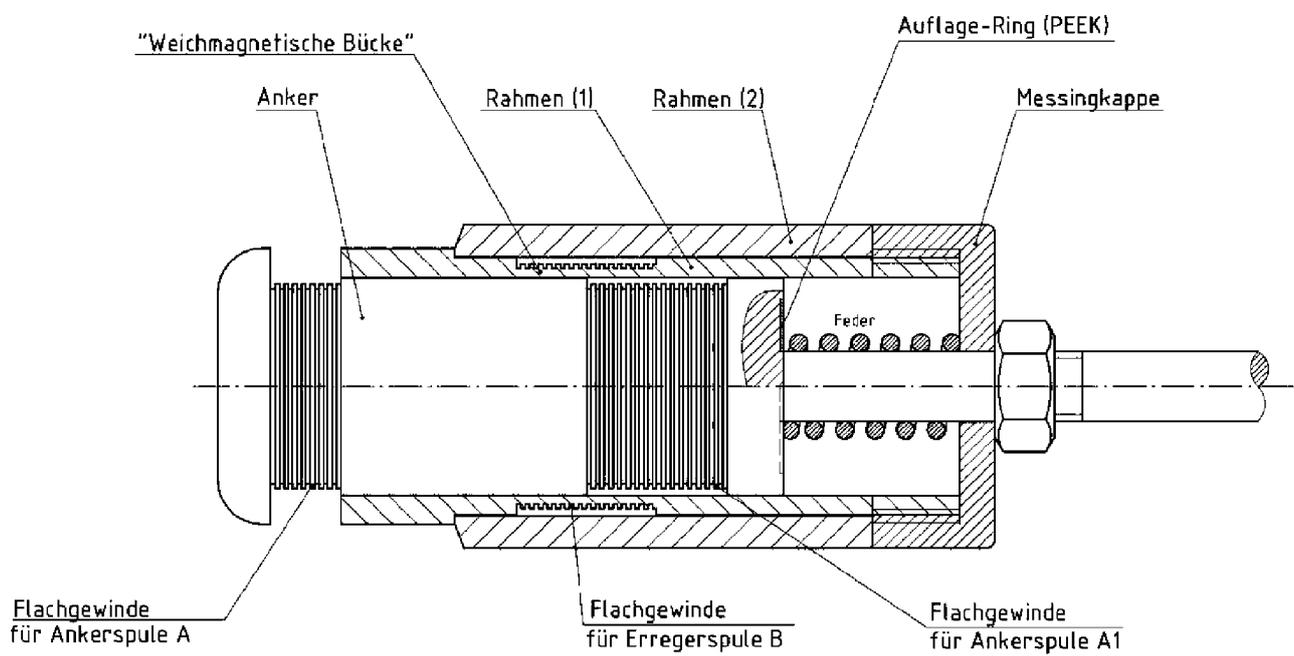


Fig. 8