

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

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
19. September 2013 (19.09.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/135376 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/000740
- (22) Internationales Anmeldedatum: 13. März 2013 (13.03.2013)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
102012005141.7 13. März 2012 (13.03.2012) DE
102012020927.4 25. Oktober 2012 (25.10.2012) DE
PCT/EP2012/004460 25. Oktober 2012 (25.10.2012) EP
PCT/EP2012/004461 25. Oktober 2012 (25.10.2012) EP
PCT/EP2012/004462 25. Oktober 2012 (25.10.2012) EP
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **BROSE FAHRZEUGTEILE GMBH & CO. KOMMANDITGESELLSCHAFT, WÜRZBURG** [DE/DE]; Ohmstrasse 2a, 97076 Würzburg (DE).
- (72) Erfinder; und
- (71) Anmelder (nur für US): **ZHANG, Sunny** [NL/DE]; Florian-Geyer-Str. 48, 97076 Würzburg (DE). **XU, Jin** [DE/DE]; Industriestrasse 14, 97076 Würzburg (DE). **FIEDERLING, Daniel** [DE/DE]; Zur Luthereiche 18, 97877 Wertheim (DE). **SAWCZUK, Grzegorz, Leszek** [PL/DE]; Fichtstr. 7, 97074 Würzburg (DE).
- (74) Anwalt: **FDST PATENTANWÄLTE**; Zusammenschluss-Nr. 401, Nordostpark 16, 90411 Nürnberg (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ELECTRICAL MACHINE WITH A HIGH LEVEL OF EFFICIENCY

(54) Bezeichnung : ELEKTRISCHE MASCHINE MIT HOHER EFFIZIENZ

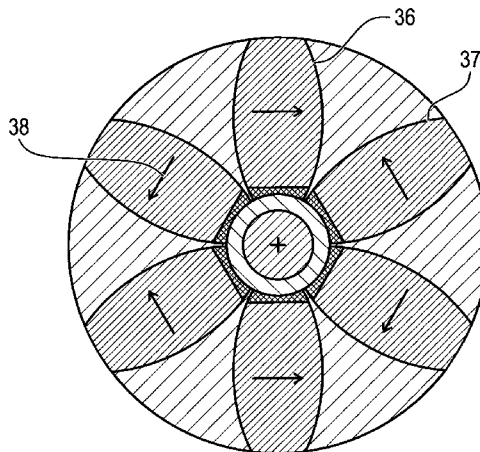


FIG. 13

(57) Abstract: The invention relates to an electrical machine, in particular an electric motor having a stator (2) and also a rotor (1, 1') which is mounted such that it can rotate about a rotor axis (3) and has a rotor body (4), wherein permanent magnets (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) are arranged in holders (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) of the rotor body, said permanent magnets being composed at least partially of a mixed material, wherein the mixture is set in such a way that the mixed material has a remanence field strength B_r of between 0.6 Tesla and 1 Tesla and a coercive field strength H_{cJ} of between 1300 and 2500 kA/m. In addition, provision can be made for permanent magnets (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) or composite bodies (47) to be arranged in holders (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a), and for said permanent magnets or composite bodies to have a contour, the cross-sectional area of said contour which is situated perpendicular to the longitudinal axis (7) being reduced within the respective holder (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) in the direction of the radially further outer end (5b, 6b) of said holder.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2013/135376 A2



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,

RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

Die Erfindung bezieht sich auf eine Elektrische Maschine, insbesondere einen Elektromotor mit einem Stator (2) sowie einem um eine Rotorachse (3) drehbar gelagerten Rotor (1, 1') mit einem Rotorkörper (4), wobei in Aufnahmen (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) des Rotorkörpers Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) angeordnet sind, die wenigstens teilweise aus einem Mischwerkstoff bestehen, wobei die Mischung derart eingestellt ist, dass der Mischwerkstoff eine Remanenzfeldstärke B_r zwischen 0,6 Tesla und 1 Tesla sowie eine Koerzitivfeldstärke H_{cj} zwischen 1300 und 2500 KA/m aufweist. Zudem kann vorgesehen sein, dass in Aufnahmen (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) oder Kompositkörper (47) angeordnet sind, und dass diese eine Kontur aufweisen, deren senkrecht zur Längsachse (7) liegende Querschnittsfläche sich innerhalb der jeweiligen Aufnahme (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) zu deren radial weiter außen liegendem Ende (5b, 6b) hin verringert.

Beschreibung
Elektrische Maschine mit hoher Effizienz

Die Erfindung liegt auf dem Gebiet der Elektrotechnik und ist mit Vorteil bei drehenden elektrischen Maschinen, beispielsweise Elektromotoren und Generatoren einsetzbar.

Die Erfindung bezieht sich konkret auf eine elektrische Maschine, insbesondere einen Elektromotor mit einem Stator sowie einem um eine Rotorachse drehbar gelagerten Rotor mit einem Rotorkörper, wobei in Aufnahmen des Rotorkörpers Permanentmagnete angeordnet sind.

Derartige Maschinen können einerseits als Innenläufer mit einem innenliegenden, von einem Stator umgebenen Rotor ausgebildet sein und andererseits ebenso als Außenläufer mit einem hohlzylindrischen Rotor, in dessen Innerem ein Stator angeordnet ist. Je nachdem ob es sich um eine bürstenlose oder eine bürstenbehaltete Maschine handelt, sind im Rotor Permanentmagnete (bürstenlose Variante) oder im Stator Permanentmagnete und im Rotor Elektromagnete vorgesehen. Grundsätzlich können derartige Maschinen darauf hin optimiert werden, dass im Magnetspalt zwischen Rotor und Stator besonders hohe Magnetfeldstärken erzeugt werden, wodurch große Drehmomente und Leistungsdichten erreichbar sind. Bei derartigen Leistungsmerkmalen und entsprechenden elektrischen Leistungen der Maschinen ist jedoch zunehmend auch wichtig, hohe Betriebstemperaturen zuzulassen, wobei darauf geachtet werden muss, dass auch bei hohen Betriebstemperaturen und den hohen wirkenden magnetischen Feldern sowie entsprechend großen Störfeldern die magnetischen Eigenschaften des Magnetkreises erhalten bleiben, insbesondere dass keine Entmagnetisierung von Permanentmagneten durch Störfelder stattfindet. Zu diesem Zweck sind bestimmte Koerzitivfeldstärken der verwendeten Materialien erforderlich, zumindest in dem Bereich der Permanentmagnete, der erhöhten Störfeldern ausgesetzt ist. Andererseits sind auch hohe Remanenzwerte wünschenswert, da diese mitentscheidend für die Größe des erreichbaren magnetischen Flusses im Magnetkreis sind.

Letztlich sollten entsprechende Materialwerte mit optimal angepassten Geometrien bei der Konstruktion von Rotor und Stator kombiniert werden.

Der vorliegenden Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, eine elektrische Maschine der genannten Art zu schaffen mit Permanentmagneten, die für eine möglichst hohe Leistungsdichte der Maschine sowie eine hohe Standfestigkeit, insbesondere auch bei hohen Temperaturen optimiert sind.

Die Aufgabe wird mit den Merkmalen der Erfindung gemäß Patentanspruch 1 gelöst.

Dabei ist gemäß der Erfindung vorgesehen, dass die Permanentmagnete wenigstens teilweise aus einem Mischwerkstoff bestehen, wobei die Mischung derart eingestellt ist, dass der Mischwerkstoff bei Raumtemperatur eine Remanenzfeldstärke B_r zwischen 0,6 Tesla und 1 Tesla sowie eine Koerzitivfeldstärke H_{cj} zwischen 1300 und 2500 kA/m aufweist. Die Raumtemperatur ist dabei mit 20 Grad Celsius angenommen. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass der Mischwerkstoff durchgehend bei Temperaturen von 20 Grad Celsius bis 120 Grad Celsius, bevorzugt auch bis 180 Grad Celsius eine Remanenzfeldstärke B_r zwischen 0,6 Tesla und 1 Tesla sowie eine Koerzitivfeldstärke H_{cj} zwischen 1300 und 2500 kA/m aufweist.

Eine besonders vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht dabei vor, dass wenigstens einige, insbesondere alle Permanentmagnete wenigstens teilweise aus einem Mischwerkstoff bestehen, der eine Mischung aus einem Ferritwerkstoff und einem seltene Erden aufweisenden Magnetwerkstoff darstellt.

Die genannten Werkstoffe reichen in Bezug auf die Koerzitivfeldstärke und/oder die magnetische Remanenz nicht ganz an bekannte Seltene Erden Werkstoffe, und insbesondere was die Koerzitivfeldstärke angeht, nicht an die Werkstoffe mit Masseanteilen von schweren Seltene Erden heran sowie was die Remanenz angeht, nicht an Werkstoffe, die überwiegend leichte Seltene Erden enthalten. Ande-

rerseits sind die genannten Größen derart einstellbar, dass sich durch geeignete geometrische Anordnung der Permanentmagnete in Ausnehmungen des Rotorkörpers die notwendigen Feldstärken, magnetischen Flüsse sowie in den kritischen Bereichen die notwendigen Koerzitivfeldstärken und die notwendige magnetische Remanenz erzielen lässt, die für eine elektrische Maschine hoher Leistungsfähigkeit und insbesondere thermischer Stabilität und Standfestigkeit erforderlich sind.

Die genannten Größen bezüglich Koerzitivfeldstärke und Remanenz lassen sich besonders vorteilhaft durch einen Mischwerkstoff mit Seltene Erden-Masseanteilen, insbesondere leichten Seltene Erden-Masseanteilen und Anteilen an Ferritwerkstoffen erreichen. Insbesondere können vorteilhaft schwere Seltene Erden-Materialien vollständig weg gelassen sein, d. h. ihr Masseanteil kann gleich Null sein oder wenigstens kleiner als ein Prozent. Damit sind die erforderlichen Materialien verfügbar und relativ erschwinglich.

Insbesondere kann auch vorteilhaft vorgesehen sein, dass sämtliche der Permanentmagnete, die in dem Rotor angeordnet sind, die oben beschriebene Zusammensetzung aus Mischwerkstoffen, insbesondere aus demselben Mischwerkstoff aufweisen. Es kann jedoch auch vorgesehen sein, dass neben der genannten Menge von Permanentmagneten, die aus demselben Mischwerkstoff bestehen, eine zweite Menge von Permanentmagneten verwendet werden, die ebenfalls alle dieselbe stoffliche Zusammensetzung aufweisen und die insbesondere einen höheren Ferritanteil aufweisen als die erste Menge von Permanentmagneten, vorteilhaft ausschließlich aus einem Ferrit bestehen.

Weiter vorteilhaft kann der Mischwerkstoff der ersten Menge von Permanentmagneten bezüglich der Mischungsverhältnisse derart eingestellt sein, dass der Temperaturkoeffizient der Remanenz B_r in einem Temperaturbereich zwischen -50 Grad und 180 Grad Celsius zwischen $-0,11\%/K$ und $0\%/K$ liegt.

Weiter kann vorteilhaft vorgesehen sein, dass der Mischwerkstoff der ersten Menge von Permanentmagneten bezüglich der Mischungsverhältnisse derart einge-

stellt ist, dass der Temperaturkoeffizient der Koerzitivfeldstärke H_{cj} (Beta) in einem Temperaturbereich zwischen -50 Grad und 180 Grad Celsius zwischen -0,5%/K und +0,4%/K liegt.

Damit ist sichergestellt, dass die magnetischen Eigenschaften bei der ersten Menge von Permanentmagneten im üblichen Betriebsbereich bei Temperaturen bis 180°C in einem optimalen Bereich liegen und wenig temperaturabhängig, insbesondere weniger temperaturabhängig sind als Werkstoffe, die einen höheren Anteil an Seltenen Erden aufweisen.

Im Ergebnis kann eine Stabilität der elektrischen Maschine auch bei erhöhten Betriebstemperaturen bis zu 180°C gegen eine Entmagnetisierung von Permanentmagneten garantiert werden.

Vorteilhaft kann der Mischwerkstoff, aus dem die Permanentmagnete oder wenigstens einige der Permanentmagnete bestehen, ein Ferritpulver und ein Seltene Erden-Pulver enthalten. Der Mischwerkstoff kann als Festkörper aus einer homogenen Mischung eines Ferritpulvers und eines Seltene Erden-Pulvers durch Sintern oder andere bekannte Formungstechniken hergestellt sein. An Stelle einer homogenen Mischung der verschiedenen Pulver kann auch ein Konzentrationsgradient der Mischung, insbesondere des Seltene Erden-Anteils im Gesamtmischwerkstoff oder des Ferritpulvers im Gesamtmischwerkstoff vorliegen, wobei der Gradient einen sprunghaften oder stetig linearen oder nicht-linearen Anstieg der Konzentration eines der Stoffe darstellen kann. Beispielsweise kann der Anteil des Seltene Erden-Pulvers entlang der Längsachse des Permanentmagneten oder der Permanentmagneten von einem radial weiter außen liegenden Bereich zu einem radial weiter innen liegenden Bereich des Permanentmagneten zunehmen oder abnehmen.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung kann vorsehen, dass der Mischwerkstoff durch ein Polymer gebunden ist, beispielsweise durch ein Gießharz. In diesem Fall können die einzelnen Pulver mit einem Polymer anfänglich zu einer Flüssigkeit oder einem Gel vermischt sein und dieses kann in eine Form ge-

gossen und erhärtet werden. Als Gussform kann beispielsweise eine Ausnehmung in Form einer Aufnahme in dem Rotorkörper dienen, in dem der Permanentmagnet nach dem Erhärten verbleibt. Das Gießen kann auch als Druckgussverfahren oder Spritzgussverfahren ausgebildet sein. Das Härten des Polymerwerkstoffes kann durch physikalische Einwirkungen wie Röntgenbestrahlung, Alpha-, Beta- oder Gamma-Bestrahlung oder Wärmeeinwirkung beschleunigt werden.

Während der Herstellung bzw. des Erhärtens des Mischwerkstoffes kann ein Orientierungsmagnetfeld angelegt werden, um einen anisotropen Werkstoff herzustellen.

Die einzelnen Pulver, die die Bestandteile des Mischwerkstoffes bilden, können ihrerseits durch Zerkleinern, insbesondere Zermahlen eines vorher magnetisch orientierten Werkstoffes hergestellt sein.

Insofern kann vorteilhaft das Ferritpulver und/oder das Seltene-Erden-Pulver, insbesondere NdFeB, magnetisch anisotrop ausgestaltet sein.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass der Querschnitt eines oder mehrerer der Permanentmagnete, senkrecht zur Längsachse der jeweiligen Aufnahme betrachtet, sich zu dem radial weiter außen liegenden Ende der jeweiligen Aufnahme im Rotorkörper hin wenigstens abschnittsweise verringert und dass die Permanentmagnete wenigstens an ihrem radial außen liegenden Ende, insbesondere mit ihrer gesamten Außenkontur, formschlüssig mit der jeweiligen Aufnahme zusammenpassen.

Durch diese Form der Permanentmagnete können diese günstig innerhalb der jeweiligen Aufnahme in dem Rotorkörper untergebracht und gehalten werden. Die insbesondere bei hohen Drehzahlen wirkenden starken radialen Fliehkräfte, die auf die Permanentmagnete wirken, werden an den Randflächen der Aufnahmen im Rotorkörper aufgenommen. Ein formschlüssiges Anliegen der Permanentmagnete an den Randflächen der Aufnahmen erlaubt eine homogene Kraftverteilung beim Auftreten von Fliehkräften. Die Tatsache, dass die Querschnittsfläche der Permanentmagnete sich wenigstens abschnittsweise radial nach außen hin ver-

ringert erlaubt es, durch eine entsprechend verjüngend zulaufende Form der Aufnahme eine formschlüssige Festlegung der Permanentmagnete zu erreichen, ohne dass spezielle Rückhalte- Ansätze radial außen an den Aufnahmen in der Nähe des Magnetspaltes vorgesehen werden müssen. Solche Ansätze sind oft besonders anfällig, da sie mit möglichst geringer Materialdicke hergestellt werden, um die Permanentmagnete möglichst dicht an den Magnetspalt heranreichen zu lassen. Dies bringt oft eine mechanische Anfälligkeit der Ansätze am Rand der Aufnahmen mit sich. Solche Probleme werden durch die beschriebene Konstruktion vermieden.

Insbesondere, wenn einer oder mehrere Permanentmagnete im Querschnitt des Rotors eine tonnenförmige Kontur oder eine radial nach außen spitzwinklig zu laufende Kontur aufweisen, können die Fliehkräfte durch eine entsprechend aufgenommene Form der Aufnahmen gut verteilt werden.

Insbesondere, wenn ein oder mehrere Permanentmagnete zum radial inneren Ende hin eine stufenförmige Querschnittserweiterung aufweist/aufweisen und die Querschnittserweiterung auf dem Rand einer entsprechenden Querschnittserweiterung der Aufnahme aufliegt, wird das radiale Herausrutschen der Permanentmagnete aus den Aufnahmen wirksam verhindert.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, dass ein Permanentmagnet in Form eines Kompositkörpers einen radial weiter außen und einen radial weiter innen liegenden Permanentmagneten aufweist und dass der radial weiter innen liegende Permanentmagnet an der Fügestelle zwischen den beiden Permanentmagneten eine größere Querschnittsfläche aufweist, als der radial weiter außen liegende Permanentmagnet.

Diese spezielle Gestaltung erlaubt es, die jeweiligen Permanentmagneten als Kompositkörper, bestehend aus mindestens jeweils zwei Permanentmagneten auszugestalten, wobei die Fügestelle zwischen den Teil-Permanentmagneten eine Auflagefläche für einen entsprechend komplementär ausgebildeten Randbereich der Aufnahme im Rotorkörper bildet, an den der Permanentmagnet bei Rotation

durch die dann wirkenden Fliehkräfte zurückgehalten wird. Der jeweils weiter radial außen liegende der Permanentmagneten ist dann vorteilhaft mit dem inneren Permanentmagneten mechanisch verbunden. Die Verbindung kann durch Kleben, Klemmen oder durch eine formschlüssige Verbindung oder andere Fügetechniken sichergestellt sein. Von den Permanentmagneten, die gemeinsam einen Kompositkörper bilden, können einer oder mehrere, insbesondere zwei, aus einem Mischwerkstoff bestehen, der die erfindungsgemäßen magnetischen Eigenschaften aufweist. Insbesondere können zwei oder alle der Permanentmagnete eines Kompositkörpers aus einem entsprechenden Mischwerkstoff, insbesondere aus demselben Mischwerkstoff bestehen.

Als besonders vorteilhaft erweist es sich, dass zwei zusammengefügte Permanentmagneten wenigstens eines Kompositkörpers zueinander parallele Magnetisierungsrichtungen aufweisen.

Durch diese konstruktive Ausgestaltung lässt sich der magnetische Fluss im Rotorkörper besonders günstig einrichten.

Es kann zudem vorteilhaft vorgesehen sein, dass die Permanentmagnete und/oder Kompositkörper Teil einer V-förmigen Anordnung von Komponenten eines Magnetkreises sind.

Derartige V-förmige Anordnungen von Permanentmagneten in einem Rotor, wobei die Schenkel des V nicht genau radial zur Rotorachse hin verlaufen, sondern sich in einem Punkt treffen, der radial von der Rotorachse ein Stück weit entfernt ist, erlaubt eine besonders effiziente Gestaltung des magnetischen Flusses mit entsprechend hohen Feldstärken und einer hohen Energiedichte der elektrischen Maschine.

Eine besonders vorteilhafte magnetische Ausgestaltung sieht vor, dass die Permanentmagneten und/oder Kompositkörper Teil einer Halbach-Anordnung von Komponenten eines Magnetkreises sind. Die Permanentmagnete der Halbach-Anordnung können entlang des Umfangs des Rotors verteilt sein.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

- Fig. 1 im Querschnitt einen Rotor und einen Teil eines Stators eines Elektromotors,
- Fig. 2 einen weiteren Rotor eines Elektromotors im Querschnitt,
- Fig. 3 in einem Querschnitt eine Permanentmagnetkonfiguration,
- Fig. 4-11 im Querschnitt weitere Permanentmagnetkonfigurationen,
- Fig. 12 im Querschnitt einen weiteren Rotor eines Elektromotors,
- Fig. 13 in einem weiteren Querschnitt einen weiteren Rotor eines Elektromotors mit im Querschnitt tonnenförmigen Permanentmagneten,
- Fig. 14 ein Diagramm mit Parametern von Magnetwerkstoffen,
- Fig. 15 im Querschnitt einen außen liegenden Rotor sowie einen innen liegenden Stator eines Außenläufermotors,
- Fig. 16 im Querschnitt einen Ausschnitt aus einem weiteren Rotor eines Elektromotors,
- Fig. 17 in teilweiser Querschnittsdarstellung einen Teil eines Rotors und eines Stators eines Elektromotors, wobei zwei Permanentmagnete in einer V-Konfiguration dargestellt sind,
- Fig. 18 im schematischen Querschnitt einen Rotor eines Elektromotors, wobei die Permanentmagnete in V-Konfigurationen angeordnet sind,
- Fig. 19 teilweise einen Querschnitt eines Rotors und eines Stators eines Elektromotors mit Permanentmagneten in V-Konfiguration,
- Fig. 20 eine Anordnung wie in Fig. 19 dargestellt mit im Querschnitt zweifach- trapezförmig geformten Permanentmagneten,
- Fig. 21 einen Querschnitt eines Rotors mit im Querschnitt tonnenförmig ausgebildeten Permanentmagneten in Speichenanordnung,
- Fig. 22 eine abgerollte Darstellung eines Rotors mit im Querschnitt tonnenförmigen Permanentmagneten sowie
- Fig. 23 eine abgerollte Darstellung eines Querschnitts eines Rotors eines Elektromotors ähnlich wie Fig. 22, wobei die im Querschnitt tonnen-

förmigen Permanentmagnete zweiteilig tonnenförmig ausgebildet sind.

Fig. 1 zeigt einen Rotor 1 eines Elektromotors, der innerhalb eines Stators 2 um eine Rotorachse 3 drehbar gelagert ist. Im Querschnitt der Fig. 1 ist sichtbar, dass innerhalb des Rotorkörpers 4 sechs Permanentmagnete 5, 6 in Aufnahmen 5a, 6a gehalten sind, wobei die Längsachsen 7 der Aufnahmen radial in Bezug auf die Rotorachse 3 ausgerichtet sind. Es handelt sich bei einer derartigen Konstruktion um eine sogenannte speichenförmige Anordnung der Permanentmagnete. Der Magnetspalt 8 ist in der Fig. 1 übertrieben groß dargestellt. Er wird zwischen dem Stator und der zylindrischen Außenfläche des Rotors 1 gebildet.

Um eine besonders hohe Effizienz eines entsprechenden Elektromotors zu erreichen wird angestrebt, den Magnetspalt 8 / Rotorspalt möglichst klein zu gestalten.

Die Permanentmagnete 5, 6 reichen nicht ganz bis an die zylindrische Außenfläche des Rotors 1 heran, da sie durch Ansätze 9, 10 des Rotorkörpers im Bereich des radial außen liegenden Teils der Aufnahmen 5a, 6a in diesen zurückgehalten werden. Insbesondere bei schneller Rotation wirken auf die Permanentmagnete 5, 6 Fliehkräfte radial nach außen, so dass die Ansätze 9, 10, die jeden einzelnen der Permanentmagnete halten, beträchtlichen Kräften ausgesetzt sind.

Die Fig. 2 zeigt eine Konstellation eines Rotors 1' und eines Stators 2', wobei im Stator 2' im Querschnitt sogenannte Statorzähne 11, 12 dargestellt sind, die jeweils in zwischen ihnen liegenden Statornuten 13, 14 elektrische Wicklungen 15, 16 tragen. Die Wicklungen 15, 16 sind durch eine nicht dargestellte Ansteuerelektronik zur Erzeugung eines rotierenden elektrischen Feldes mit einem zeitlich veränderlichen Strom beaufschlagbar.

Der Rotor 1' trägt in Aufnahmen jeweils speichenartig auf die Rotorachse 3 ausgerichtete Permanentmagnete 5', 6', die jeweils in radialer Richtung zweigeteilt sind und jeweils als Kompositkörper mit einem ersten Teilmagneten 17 und einem zweiten Teilmagneten 18 gebildet sind. Die Permanentmagneten 5', 6' können

beispielsweise mittels Ansätzen wie in der Fig. 1 gezeigt und dort mit 9, 10 bezeichnet in den Aufnahmen zurückgehalten werden oder in diesen durch bekannte Füge-techniken wie beispielsweise Kleben, Löten, Schweißen, Klemmen oder eine formschlüssige Verbindung gehalten sein. Die Permanentmagneten 5', 6' reichen radial bis zur zylindrischen Außenfläche des Rotors und schließen mit dieser bündig ab.

Es kann vorgesehen sein, dass der radial weiter außen in der jeweiligen Aufnahme liegende Teilmagnet 17 aus einer ersten Menge von Permanentmagneten jeweils als Ferritbauteil oder mit einem Anteil an Ferritwerkstoffen ausgebildet ist, während der radial weiter innen liegende Teilmagnet 18, der zu einer zweiten Menge von Permanentmagneten gehört, aus einem Werkstoff besteht, der seltene Erden enthält. Vorteilhaft enthält dieser Teilmagnet vorwiegend leichte seltene Erden, insbesondere einen höheren Teil an leichten seltenen Erden als schwere seltene Erden, weiter vorteilhaft keinen Anteil an schweren seltenen Erden. Beide Teilmagnete können aus je einem, insbesondere aus demselben Mischwerkstoff gemäß der Erfindung bestehen, wobei vorteilhaft der Mischwerkstoff des radial weiter innen liegenden Teilmagneten einen geringeren Anteil an seltene Erden-Elementen enthält als der radial weiter außen liegende Teilmagnet.

Durch die beschriebene Konstellation wird erreicht, dass die Permanentmagnetkonstellation als Ganze in dem Bereich, in dem die größten magnetischen Feldstärken wirken, d.h. in der Nähe des Magnetspaltes, wenigstens überwiegend oder vollständig aus einem Ferritwerkstoff bestehen, der kostengünstig ist und eine ausreichende Koerzitivfeldstärke aufweist, während die hohe magnetische Remanenz von seltene Erden-Werkstoffen bei denjenigen Teilmagneten 18 ausgenutzt wird, die radial weiter innen und von störenden Magnetfeldern weiter entfernt liegen. Auf diese Weise wird verhindert, dass eine Entmagnetisierung im Bereich des Magnetspaltes stattfindet, wobei insgesamt ein minimaler Anteil an Seltene Erden-Werkstoffen eingesetzt wird.

Zur weiteren vorteilhaften Gestaltung der Magnetfelder innerhalb des Rotors / Rotorkörpers ist gemäß Fig. 2 vorgesehen, dass weitere Permanentmagnete 19, 20

einer dritten Menge von Permanentmagneten jeweils zwischen zwei speichenartig benachbarten Permanentmagnetkonstellationen eingesetzt sind. Die Permanentmagnete der dritten Menge können beispielsweise aus einem Ferritwerkstoff, insbesondere ohne Seltene Erden- Anteile bestehen. Auf die möglichen hierdurch erreichten Magnetfeld- bzw. Magnetflusskonstellationen, beispielsweise Halbach-Anordnungen, wird weiter unten näher eingegangen.

Die Fig. 3 bis 11 bezeichnen im Querschnitt Permanentmagnetkonstellationen mit jeweils 2 Permanentmagneten, die jeweils einen ersten Teilmagnet im jeweiligen oberen Bereich der Darstellung und einen zweiten Teilmagnet im jeweiligen unteren Bereich der Darstellung aufweisen. Grundsätzlich sind die Figuren so angelegt, dass der untere Bereich der Darstellung der Rotorachse eines Rotors eines Elektromagneten ferner ist als der obere Bereich. Einer oder beide der jeweils dargestellten Magnete können aus einem Mischwerkstoff bestehen, dessen Mischung derart eingestellt ist, dass der Mischwerkstoff bei Raumtemperatur eine Remanenzfeldstärke B_r zwischen 0,6 Tesla und 1 Tesla sowie eine Koerzitivfeldstärke H_{cj} zwischen 1300 und 2500 KA/m aufweist. Die entsprechenden Permanentmagnetkonstellationen können dabei in einer speichenartigen Anordnung in Bezug auf die Rotorachse eingesetzt sein, jedoch ist auch eine sogenannte V-förmige Konstellation von Permanentmagneten denkbar, auf die weiter unten noch näher eingegangen wird. Die jeweiligen Permanentmagnetkonstellationen sind vorteilhaft in Aufnahmen eines Rotorkörpers untergebracht, die in Bezug auf die Permanentmagnetkonstellationen vorteilhaft formschlüssig ausgebildet sind, d.h. die Permanentmagnetkonstellationen spaltfrei umgeben. Es kann jedoch auch vorgesehen sein, dass die Aufnahmen die jeweiligen Magnetkonstellationen nur in Teilbereichen formschlüssig umgeben, beispielsweise jeweils in den Bereichen, in denen der Querschnitt der Permanentmagnetkonstellation sich in Richtung radial nach außen gesehen verringert.

In der Fig. 3 ist beispielhaft oberhalb der Permanentmagnetkonstellation die Rotorachse 3 eingezeichnet. Der Querschnitt beider Teilmagnete 17, 18 ist rechteckig und gleich groß, so dass die gesamte Magnetkonstellation rechteckig mit gleichbleibendem Querschnitt ausgebildet ist. Die Magnetisierungsrichtungen 21,

22 der beiden Teilmagnete 17, 18 sind durch Pfeile angedeutet wie bei allen übrigen Permanentmagnetkonstellationen der Fig. 3 bis 11 ebenso.

In der Fig. 4 ist bei dem radial inneren Teilmagnet 17' im radial inneren Bereich eine rechteckige Erweiterung 23 vorgesehen, durch die die Magnetkonstellation bei radial wirkenden Fliehkräften in der Aufnahme gehalten wird. Grundsätzlich ist zu bemerken, dass gemäß den Fig. 3, 4, 5, 6, 7 und 11 der radial innen liegende Teilmagnet der Magnetkonstellation in radialer Richtung länger ausgebildet ist als der radial außen liegende Teilmagnet. Gemäß den Fig. 8, 9 und 10 ist die Aufteilung umgekehrt, so dass dort der radial innen liegende Teilmagnet in radialer Richtung kürzer ausgebildet ist als der radial außen liegende Teilmagnet.

Die Fig. 5 zeigt einen trapezförmigen Querschnitt des radial innen liegenden Teilmagneten 24, wobei das Trapez radial nach außen spitz zuläuft. Der radial außen liegende Teilmagnet 18'' ist rechteckig ausgeführt.

Die Fig. 6 zeigt radial innen liegend einen Teilmagneten 25 mit einer rechteckigen Erweiterung 23', wobei der radial außen liegende Teilmagnet 26 im Querschnitt trapezförmig, sich radial nach außen erweiternd, ausgebildet ist.

Die Fig. 7 zeigt den radial innen liegenden Teilmagnet 24' im Querschnitt in trapezförmiger Ausbildung radial nach außen spitz zulaufend, wobei der radial außen liegende Teilmagnet 26' als Trapez, wie in Fig. 6 dargestellt, radial nach innen spitz zulaufend ausgebildet ist.

Alle in den Fig. 4 bis 7 dargestellten Konstellationen weisen Hinterschneidungen auf, die ein radiales Herausrutschen nach radial außen aus einer entsprechend geformten Aufnahme in einem Rotorkörper zuverlässig verhindern.

Die Fig. 8 zeigt einen Querschnitt rechteckige Magnetkonstellation, wobei der radial innen liegende Teilmagnet 27 in radialer Richtung eine geringere Ausdehnung aufweist als der radial außen liegende Teilmagnet 28.

Die Magnetkonstellation der Fig. 9 zeigt im Querschnitt einen rechteckigen radial innen liegenden Teilmagneten 27', wobei der radial außen liegende Teilmagnet 29 im Querschnitt trapezförmig ausgebildet ist und nach radial außen in Bezug auf die Rotorachse 3 spitz zuläuft.

Gemäß der Fig. 10 sind beide Teilmagnete 29' und 30 im Querschnitt trapezförmig ausgebildet, wobei jeweils die Trapeze nach radial außen in Bezug auf den Rotor spitz zulaufen. Zudem ist zwischen dem Teilmagnet 29' und dem Teilmagnet 30 an der Fügefläche ein Ansatz 31 dadurch gebildet, dass die kleinere Deckfläche der Trapezform des Teilmagneten 30 größer ist als die größere Deckfläche der trapezförmigen Querschnittsform des Teilmagneten 29'.

Beim Übergang bzw. an der Fügestelle zwischen dem radial innen liegenden Teilmagneten 30 und dem radial außen liegenden Teilmagneten 29' ist somit eine sprungförmige Verringerung der Querschnittsfläche vorgesehen.

Die Fig. 11 zeigt eine Querschnittskonstellation, bei der der radial innen liegende Teilmagnet 32 rechteckig ausgebildet und der radial außen liegende Teilmagnet 33 trapezförmig ausgebildet ist, wobei der trapezförmige Querschnitt des radial äußeren Teilmagneten 33 radial nach außen spitz zuläuft.

Die in den Fig. 9, 10 und 11 gezeigten Konstellationen weisen, ebenso wie die in den Fig. 4, 5, 6 und 7 gezeigten Konstellationen von radial innen nach radial außen hin eine Querschnittsverringerng auf, die jeweils das Zurückhalten in einer entsprechend geformten Aufnahme eines Rotorkörpers bewirkt.

Zusätzlich zu den in den Fig. 3 bis 11 gezeigten Konstellationen sind selbstverständlich noch andere Querschnittskonstellationen denkbar, bei denen beispielsweise die Begrenzungsflächen der jeweiligen dargestellten Rechtecke und Trapeze durch konvexe oder konkave, beispielsweise auch teilkugelförmig und tonnenförmig ausgebildete Grenzlinien ersetzt sein können.

Die Fig. 12 zeigt beispielsweise im Querschnitt einen Rotor eines Elektromotors mit speichenförmig angeordneten Permanentmagnetkonstellationen/Kompositkörpern, wobei jede einzelne der Permanentmagnetkonstellationen aus jeweils zwei im Querschnitt kreisrunden Teilmagneten 34, 35 besteht, wobei der radial außen angeordnete Teilmagnet 35 jeweils im Querschnitt einen geringeren Durchmesser aufweist als der radial innen liegende Teilmagnet 34. Es kann jedoch auch vorgesehen sein, dass jeweils der außen angeordnete Teilmagnet einen größeren Durchmesser aufweist als der radial innen liegende Teilmagnet jeweils im Querschnitt gesehen. Eine Rückhaltung in entsprechend geformten Aufnahmen der Magnetkonstellationen ist bereits durch die im Querschnitt kreisförmige Ausprägung gegeben.

Auch hier kann vorzugsweise der radial außen gelegene Teilmagnet 35 aus einem Ferrit oder ferrithaltigen Werkstoff und der radial innen liegende Teilmagnet 34 entweder ebenfalls aus einem Ferritwerkstoff oder aus einem seltene Erdenhaltigen Werkstoff oder aus einer Mischung beider Werkstoffe bestehen. Ebenfalls können die Teilmagnete der radial innen liegenden Gruppe 34 aus einem anderen Werkstoff bestehen als die radial außen liegenden Teilmagnete 35.

Die Fig. 13 zeigt im Querschnitt eine Permanentmagnetanordnung eines Rotors mit im Querschnitt jeweils tonnenförmigen Permanentmagneten 36, 37. Dabei ist angedeutet, dass die Magnetisierung, die durch azimuthal ausgerichtete Pfeile 38 angedeutet ist, jeweils bei zwei in einander benachbarten Ausnahmen angeordneten Permanentmagneten 36, 37 entgegengesetzt gerichtet ist.

Die tonnenförmige Querschnittsform der Permanentmagnete 36, 37 bewirkt durch ihre Hinterschneidung in radialer Richtung ebenfalls eine Rückhaltung in entsprechend geformten Aufnahmen des Rotorkörpers. Es können daher Ansätze 9, 10 wie in der Fig. 1 dargestellt vollständig weggelassen werden und die Permanentmagnete und Kompositkörper 34, 35, 36, 37 können bis an die zylindrische Außenfläche des Rotors heranreichen. Damit wird ein geringer Abstand der Permanentmagnete zum Stator und damit eine hohe Effizienz der elektrischen Maschine bzw. eine hohe Leistungsdichte erreicht oder erreichbar.

Die Fig. 15 zeigt zur Abrundung der Erfindung eine Konstellation mit einem innen liegenden Stator 39 und einem Außenläufer in Form eines hohlzylindrischen Rotors 40. Die Rotorachse ist mit 3 bezeichnet und der Rotor 40 ist drehbar um die Rotorachse 3 gelagert.

Innerhalb des Rotorkörpers sind Permanentmagnete 41, 42 dargestellt, die in speichenförmiger Anordnung auf die Rotorachse 3 ausgerichtet sind und radial nach außen im Querschnitt sich verjüngend zulaufen. Die Aufnahmen, in denen die Permanentmagnete 41, 42 enthalten sind, sind entsprechend formschlüssig gestaltet.

Anhand der Fig. 14 soll verdeutlicht werden, dass besonders bei der Verwendung besonderer geometrischer Konstellationen von Permanentmagneten, wie sie in den Figuren dieser Anmeldung dargestellt sind, neben der Verwendung verschiedener Materialien für die Teilmagneten eines einzigen Rotors, insbesondere auch der Verwendung von verschiedenen Materialien für verschiedene Teilmagnete eines Kompositkörpers durch geeignete Materialwahl auch die Zahl der eingesetzten unterschiedlichen Materialien für die verwendeten Permanentmagneten eines Rotors verringert werden kann. Es kommen hierbei dann besonders solche Materialien in Frage, die aus einem Mischwerkstoff bestehen, wobei die Mischung derart eingestellt ist, dass der Mischwerkstoff wenigstens bei Raumtemperatur eine Remanenzfeldstärke B_r zwischen 0,6 Tesla und 1 Tesla aufweist. Alternativ dazu oder zusätzlich kann der Mischwerkstoff die Eigenschaft aufweisen, dass bei Raumtemperatur die Koerzitivfeldstärke H_{cj} zwischen 1300 und 2500 kA/m beträgt. Bei Verwendung eines derartigen Materials, insbesondere wenn Permanentmagneten in Form von Kompositkörpern aus einem Mischwerkstoff eingesetzt werden, können vorteilhaft zwei oder mehrere Teilmagnete eines Kompositkörpers aus dem genannten Werkstoff bestehen. Dieser Werkstoff weist dann im radial innen gelegenen Bereich des Rotors dieselbe Zusammensetzung und dieselben physikalischen Eigenschaften auf wie im radial äußeren Teil des Kompositkörpers und damit auch im Magnetspalt-nahen Bereich dieselbe Zusammensetzung wie im Magnetspalt-fernen Bereich. Solche Werkstoffe können beispielsweise aus Ferri-

ten und ferritähnlichen Stoffen, insbesondere unter Zugabe von seltenen Erden-Metallen hergestellt werden, wobei diese Mischwerkstoffe vorteilhaft frei von schweren seltenen Erden-Materialien sein können. Insgesamt kann somit die Verwendung von seltenen Erden bei Permanentmagneten in einem Rotor reduziert werden. Die erforderlichen oder vorteilhaften Werte für die Remanenzfeldstärke und die Koerzitivfeldstärke können mit einem solchen Material erreicht werden. In der Fig. 14 ist mit dem ersten schraffierten Bereich 43 ein Stoff der Klasse Nd/(Dy/Th)/Fe/B repräsentiert durch seine Werte BH_{max} in kJ pro m^3 , aufgetragen gegenüber der Temperatur. Es zeigt sich dass diese Größe im Bereich einer relativ hohen Betriebstemperatur von 180 bis 200° Celsius eines Motors beträchtlich absinkt. Der dritte schraffierte Bereich 45 zeigt den entsprechenden Parameterbereich von üblichen Ferriten. Der zweite schraffierte Bereich 44 zeigt die erfindungsgemäß eingesetzten Stoffe, die beispielsweise als Mischung zwischen Ferriten und seltenen Erden hergestellt werden können, wobei die Koerzitivfeldstärke und die Remanenz zwischen der von seltene Erden-Werkstoffen und Ferriten liegen, wobei die Temperaturabhängigkeit wesentlich geringer ist als bei den mehr oder ausschließlich seltene Erden enthaltenden Magnetwerkstoffen. Vorteilhaft wird bei entsprechenden Mischwerkstoffen eine Temperaturabhängigkeit zwischen -0,11 und 0 Prozent pro Kelvin bezüglich der Remanenzfeldstärke B_r realisiert. Diese Werte sollten zwischen -50° Celsius und +180° Celsius eingehalten werden.

Zudem kann bezüglich der Koerzitivfeldstärke H_{cj} ein Temperaturkoeffizient von -0,5 bis +0,4 Prozent pro Kelvin, geltend zwischen einer Temperatur von -50° Celsius und +180° Celsius realisiert werden.

Entsprechende Mischwerkstoffe können als polymer gebundene Hybride hergestellt werden, wobei NdFeB in Pulverform mit einem Ferritpulver gemischt werden kann. Insbesondere da die Temperaturabhängigkeit der Koerzitivfeldstärke von NdFeB negativ und die von Ferritpulvern positiv ist, kann durch eine geeignete Mischung ein geringer Temperaturkoeffizient eingestellt werden. Die einzelnen Puder können magnetisch anisotrop durch entsprechende, bekannte Prozesse wie das Mahlen von vormagnetisierten Werkstoffen hergestellt und eingesetzt werden. Dadurch kann der magnetisch verdünnende Effekt des Polymerbindemittels aus-

geglichen werden. Die Herstellung und Bindung der entsprechenden Magnetkörper kann in einem starken magnetischen Gleichfeld stattfinden, um eine entsprechende Ausrichtung anisotroper Pulverwerkstoffe zu erreichen. Es ist zudem möglich, die Formung der Magnetkörper in den Aufnahmen des jeweiligen Rotorkörpers durch Spritzgießen, Hochdruckspritzguss und andere Techniken auszubilden.

Erfindungsgemäße Permanentmagnete können auch durch Sintern von Pulverwerkstoffen, insbesondere einer Mischung von Ferritpulver und einem Seltene Erden enthaltenden Pulver, realisiert werden.

Vorteilhaft kann bei einem verwendeten Mischwerkstoff der Masseanteil von Seltene Erden- Werkstoffen, insbesondere an leichten Seltene Erden -Werkstoffen an der Gesamtmasse zwischen 10 und 50%, weiter vorteilhaft zwischen 20 und 25% liegen. Der Rest des Mischwerkstoffes kann beispielsweise aus Ferriten bestehen oder Ferrite enthalten.

Die für eine entsprechende Leistungsfähigkeit der beschriebenen elektrischen Maschinen notwendigen Feldstärken können durch die genannten Werkstoffe insbesondere dann erreicht werden, wenn geeignete geometrische Konstellationen der Permanentmagnete verwendet werden, gegebenenfalls mit einer optimierten Formung der Einzelmagnete. In diesem Zusammenhang zeigt die Fig. 16 beispielsweise im Querschnitt einen Ausschnitt eines Rotors einer elektrischen Maschine mit zwei Permanentmagneten, die jeweils als Kompositkörper 46, 47 ausgebildet sind, wobei jeder der Kompositkörper 46, 47 aus zwei Teilmagneten 48, 49 besteht. Die Magnetisierungsrichtungen 50, 51 sind jeweils für jeden der Kompositkörper 46, 47 einheitlich und zwischen den Kompositkörpern 46, 47 entgegengesetzt. Die jeweils radial äußeren Teilmagneten 49 bilden typischerweise Permanentmagneten einer ersten Menge, während die radial innen angeordneten Teilmagnete 48 Permanentmagnete einer zweiten Menge bilden. Die stoffliche Zusammensetzung der Permanentmagnete der ersten und der zweiten Menge können gleich oder auch unterschiedlich sein. Zudem ist in der Fig. 16 ein Permanentmagnet 52 einer dritten Menge von Permanentmagneten ersichtlich, wobei dieser zuletzt genannte Permanentmagnet 52 im Querschnitt eine Trapezform

aufweist, die sich zum radial innen liegenden Bereich des Rotors verjüngt. Die Magnetisierungsrichtung 53 des Permanentmagneten 52 ist radial nach außen gerichtet.

Die in der Fig. 16 dargestellten Permanentmagnete bilden einen typischen Ausschnitt aus einer Halbach-Konstellation von Permanentmagneten, die eine besonders starke Flusskonzentration auf einer Seite einer Magnetkonstellation, also typischerweise im Bereich des Magnetspaltes, erzeugt. Zwischen jeweils zwei speichenartig angeordneten Kompositkörpern 46, 47, die jeweils als aus zwei Magneten 48, 49 zusammengesetzte Permanentmagnete ausgebildet sind, ist ein Permanentmagnet 52 in einer entsprechenden Tasche 52a vorgesehen.

Die Fig. 17 zeigt im Querschnitt eine Permanentmagnetkonstellation mit zwei Permanentmagneten 54, 55 in V-Anordnung, die in entsprechend V-förmig angeordneten, passenden Ausnehmungen 55a angeordnet sind. Die Permanentmagnete 54, 55 bilden jeweils einen Schenkel eines imaginären V, wobei die Permanentmagnete 54, 55 mit ihren Längsachsen nicht auf die Rotorachse zulaufen. Die Längsachsen der Permanentmagnete schneiden sich vielmehr in einem Punkt, der radial außerhalb der Rotorachse von dieser entfernt liegt. Die Konstellation einer derartigen sogenannten V-förmigen Anordnung von Permanentmagneten ist schematisch in der Übersicht in der Fig. 18 gezeigt. Dort sind vier Paare von V-förmig angeordneten Permanentmagneten 54, 55 sowie die entsprechenden Magnetisierungsrichtungen 56 dargestellt. In der Figur 17 sind zur Verdeutlichung der Gestaltung des magnetischen Flusses die Feldlinien zwischen den Permanentmagneten 54, 55 eingezeichnet. Durch die V-förmige Anordnung der Permanentmagnete 54, 55 ergibt sich eine optimale Felddichte im Bereich des Magnetspaltes zwischen Rotor und Stator. Diese Konstellation kann durch Verwendung der erfindungsgemäßen Mischwerkstoffe optimiert werden.

Die einzelnen Permanentmagnete 54, 55 können in ihrer Längsrichtung auch geteilt sein und aus jeweils zwei Teilmagneten bestehen wie es beim Permanentmagnet 55 durch eine gestrichelte Linie und die Bezeichnung des radial innen liegenden Teilmagneten mit dem Bezugszeichen 57 angedeutet ist. Es können je-

doch auch alle Permanentmagnete homogen aus einem einzigen Werkstoff bestehen. Die V-förmig angeordneten und gegebenenfalls aus mehreren Teilmagneten bestehenden Permanentmagnete/Kompositkörper 54, 55 können auch nach Art der in Figuren 3 bis 11 dargestellten Konstellationen zusammengesetzt sein. Im Übrigen ist in der Fig. 17 die Magnetisierungsrichtung der Permanentmagnete durch die Pfeile 58, 59 angedeutet.

In der Fig. 19 ist eine ähnliche Konstellation im Querschnitt dargestellt wie in der Fig. 17, wobei die einzelnen Permanentmagnete 54', 55' jedoch im Querschnitt tonnenförmig bzw. oval ausgebildet sind. Damit ergibt sich eine gute Rückhaltung in entsprechend geformten Aufnahmen 55'a des Rotorkörpers sowie eine weiter optimierte Feldgestaltung wie weiter unten anhand der Fig. 22, 23 noch näher erläutert wird. Auch die in Figur 19 dargestellten Permanentmagnete können aus jeweils mehreren Teilmagneten einer ersten und zweiten Menge von Permanentmagneten bestehen.

Die Fig. 20 zeigt eine Darstellung entsprechend den Fig. 17 und 19, wobei die Permanentmagnete 54'', 55'' im Querschnitt aus zwei trapezförmigen Vierecken zusammengesetzt sind, deren Basen aneinander angrenzen, wobei die einzelnen Trapezkörper einstückig zusammenhängen oder auch jeweils Teilmagnete darstellen können, die zu einem Kompositkörper zusammengesetzt sind.

Die Magnetisierungsrichtungen sind entsprechend den Fig. 17 und 19 in Form von Pfeilen angedeutet.

Anstelle der dargestellten beiden Trapezkörper können auch jeweils zwei im Querschnitt tonnenförmige Teilmagnete, ein radial innen liegender und ein radial außen liegender Teilkörper, gemeinsam entweder miteinander verbunden oder zumindest aneinander angrenzend einen Kompositkörper bilden.

Die Fig. 21 zeigt beispielhaft eine sogenannte Halbach-Anordnung von Magneten, wobei die einzelnen Teilmagnete 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 der Halbach-Anordnung in Umfangsrichtung aufgereiht sind. Grundsätzlich sind speichenartig

angeordnete Permanentmagnete 60, 61, 62, 63 vorgesehen, wobei ein erstes Paar 60, 61 Magnetisierungsrichtungen aufweist, die aufeinander zugerichtet sind, in der Fig. 21 durch Pfeile repräsentiert. Das benachbarte Paar von Permanentmagneten 62, 63 weist ebenfalls Magnetisierungsrichtungen auf, die aufeinander zugerichtet sind, wobei die Magnetisierungsrichtungen der Permanentmagneten 61 und 62 gegensinnig zueinander und voneinander weg gerichtet gestaltet sind.

Die jeweils zwischen benachbarten Permanentmagneten angeordneten weiteren Permanentmagneten 64, 65, 66 weisen in Umfangsrichtung alternierend jeweils eine radial nach außen und radial nach innen gerichtete Magnetisierungsrichtung auf. Durch diese Gesamtkonstellation wird der magnetische Fluss radial innen bezüglich der Permanentmagnete 60, 61, 62, 63 minimiert und der magnetische Fluss radial außerhalb der Magnete maximiert. Hierdurch ergibt sich im Bereich des Magnetspaltes zwischen Stator und Rotor eine optimierte Magnetfeldstärke.

Zusätzlich zu der optimierten Anordnung und Ausrichtung der Permanentmagnete kann die magnetische Feldstärke bzw. der Fluss auch durch die äußere Formgebung der einzelnen Permanentmagnete optimiert werden. Die Fig. 22 zeigt zur Verdeutlichung eine linear abgerollte Konstellation von zwei in einem zylindrischen Rotor nebeneinander liegenden Permanentmagneten 60, 61. Bei genauer Betrachtung der magnetischen und physikalischen Verhältnisse ergibt sich, dass die Remanenzfeldstärke einer solchen Anordnung mit sinkendem Abstand der Permanentmagnete in Azimutalrichtung, angedeutet durch den Pfeil 67 steigt, sowie mit der Ausdehnung der einzelnen Permanentmagnete in Azimutalrichtung. Zudem kann die Flussdichte dadurch erhöht werden, dass die Fläche, auf der aus dem jeweiligen Permanentmagneten Flusslinien in Azimutalrichtung austreten bzw. in diese eintreten, vergrößert wird. Somit ergibt sich bei der in Fig. 23 dargestellten Variante durch die doppelt tonnenförmige Ausgestaltung der Permanentmagnete 60', 61' eine noch höhere Flussdichte als bei der Konstellation gemäß Fig. 22.

Die bei den obigen Beispielen jeweils einzeln beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Flussdichte innerhalb des Rotorkörpers bzw. zur Gestaltung des ge-

samten magnetischen Flusses sind als Maßnahmen zu verstehen, die untereinander zur Gestaltung eines optimierten, an die jeweiligen Erfordernisse angepassten Rotors kombiniert werden können. Damit kann eine elektrische Maschine gemäß der Erfindung geschaffen werden, die bei einem möglichst geringen Einsatz von seltene Erden-Elementen erlaubt, eine hohe Leistungsdichte und hohe Drehmomente einer elektrischen Maschine zu erreichen.

Bezugszeichenliste

1, 1'	Rotor
2	Stator
3	Rotorachse
4	Rotorkörper
5, 6	Permanentmagnete
5a, 6a	Aufnahmen
5b, 6b	radial außen liegende Enden von 5a, 6a
5c, 6c	radial innen liegende Enden von 5a, 6a
7	Längsachse von 5a
8	Magnetspalt, Rotorspalt
9, 10	Ansätze
11, 12	Statorzähne
13, 14	Statornuten
15, 16	Statorwicklungen
17, 17'	Teilmagnet aus Ferrit
18, 18', 18''	Teilmagnet mit seltenen Erden
19, 20	Permanentmagnete der dritten Menge
21, 22	Magnetisierungsrichtungen
23, 23'	Erweiterung
24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30	Teilmagnet
31	Ansatz
32, 33	Teilmagnet
34, 35	kreisrunde Teilmagnete
35a	Aufnahme
36, 37	tonnenförmige Permanentmagnete
38	Magnetisierungsrichtung
39	innen liegender Stator
40	hohlzylindrischer, außen liegender Rotor
41, 42	Permanentmagnete
43	erster Bereich
44	zweiter Bereich

45	dritter Bereich
46, 47	Kompositkörper
47a	Aufnahme
48, 49	Teilmagnet
50, 51	Magnetisierungsrichtung
52	Permanentmagnet der dritten Menge
52a	Tasche
53	Magnetisierungsrichtung
54, 54', 54'', 55, 55', 55''	Permanentmagnete in V-Anordnung
55a	Aufnahme
55'a	Aufnahme
56	Magnetisierungsrichtung
57	Teilmagnet
58, 59	Magnetisierungsrichtung/Pfeil
60, 60', 61, 61', 62, 63	Permanentmagnete in Speichenanordnung
64, 65, 66	weitere Permanentmagnete
64a	Tasche
67	Azimutalrichtung

Ansprüche

1. Elektrische Maschine, insbesondere Elektromotor mit einem Stator (2) sowie einem um eine Rotorachse (3) drehbar gelagerten Rotor (1, 1') mit einem Rotorkörper (4), wobei in Aufnahmen (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) des Rotorkörpers Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) angeordnet sind, die wenigstens teilweise aus einem Mischwerkstoff bestehen, wobei die Mischung derart eingestellt ist, dass der Mischwerkstoff bei Raumtemperatur eine Remanenzfeldstärke B_r zwischen 0,6 Tesla und 1 Tesla sowie eine Koerzitivfeldstärke H_{cj} zwischen 1300 und 2500 KA/m aufweist.
2. Elektrische Maschine gemäß Patentanspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass wenigstens einige, insbesondere alle Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) wenigstens teilweise aus einem Mischwerkstoff bestehen, der eine Mischung aus einem Ferritwerkstoff und einem seltene Erden aufweisenden Magnetwerkstoff darstellt.
3. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Mischung derart eingestellt ist, dass der Temperaturkoeffizient der Remanenz B_r in einem Temperaturbereich zwischen -50 Grad und 180 Grad Celsius zwischen - 0,11%/Kelvin und 0%/Kelvin liegt.
4. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, 2 oder 3,
dadurch gekennzeichnet,

dass die Mischung derart eingestellt ist, dass der Temperaturkoeffizient der Koerzitivfeldstärke H_{cj} in einem Temperaturbereich zwischen -50 Grad und 180 Grad Celsius zwischen -0,5%/Kelvin und +0,4%/Kelvin liegt.

5. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, 2, 3 oder 4,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Mischwerkstoff ein Ferritpulver und ein seltene Erden- Pulver enthält.
6. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, 2, 3 oder 4,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Mischwerkstoff durch en Polymer gebunden ist.
7. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, 2, 3, 4 oder 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Mischwerkstoff durch Spritzgießen, Hochdruckguss oder Sinterung unter Verwendung eines Ferritpulvers und eines seltene Erden enthaltenden Pulvers hergestellt ist.
8. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5 oder 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Ferritpulver und/oder das seltene Erden Pulver, insbesondere NdFeB, magnetisch anisotrop ausgestaltet ist.
9. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden,
dadurch gekennzeichnet,
dass sich der Querschnitt eines oder mehrerer der Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) zu dem radial weiter außen liegendem Ende (5b, 6b) der jeweiligen Aufnahme (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) hin wenigstens abschnittsweise verringert und dass die Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) wenigstens an ihrem ra-

dial außen liegenden Ende, insbesondere mit ihrer gesamten Außenkontur, formschlüssig mit der jeweiligen Aufnahme (5a, 6a) zusammenpassen.

10. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, dass einer oder mehrere Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) im Querschnitt des Rotors (1, 1') eine tonnenförmige Kontur oder eine radial nach außen spitzwinklig zulaufende Kontur aufweisen.
11. Elektrische Maschine nach Anspruch 1, oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, dass ein oder mehrere Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) zum radial inneren Ende (5c, 6c) der jeweiligen Aufnahme (5a, 6a, 35a, 47a, 55a, 55'a) hin eine stufenförmige Querschnittserweiterung aufweist/aufweisen.
12. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, dass ein Kompositkörper (47) einen radial weiter außen und einen radial weiter innen liegenden Permanentmagneten (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) aufweisen und dass der radial weiter innen liegende Permanentmagnet an der Fügestelle zwischen den beiden Permanentmagneten eine größere Querschnittsfläche aufweist, als der radial weiter außen liegende Permanentmagnet.
13. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, dass zwei zusammengefügte Permanentmagneten wenigstens eines Kompositkörpers (47) zueinander parallele Magnetisierungsrichtungen (21, 22, 38, 50, 51, 53, 56, 58, 59) aufweisen.
14. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) und/oder Kompositkörper (47) Teil einer V-förmigen Anordnung von Komponenten eines Magnetkreises sind.

15. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Permanentmagnete (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) und/oder Kompositkörper (47) Teil einer Halbach- Anordnung von Komponenten eines Magnetkreises sind.

16. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden,

dadurch gekennzeichnet,

dass die erste Menge von Permanentmagneten (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) einen geringeren Masseanteil an seltenen Erden aufweist, als die zweite Menge, insbesondere keinen Anteil an seltenen Erden.

17. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden,

dadurch gekennzeichnet,

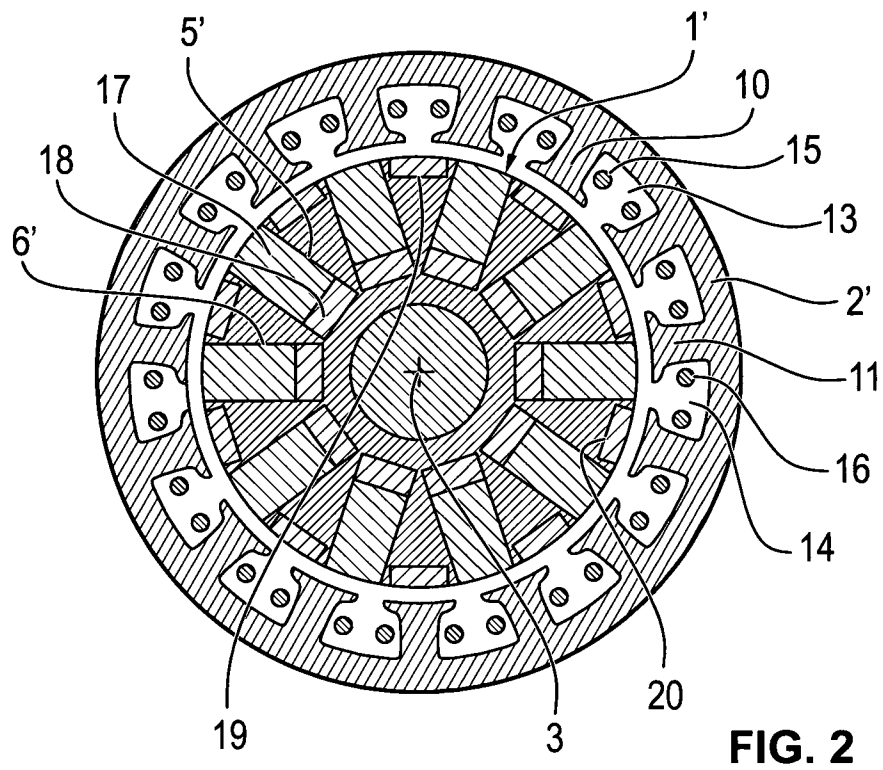
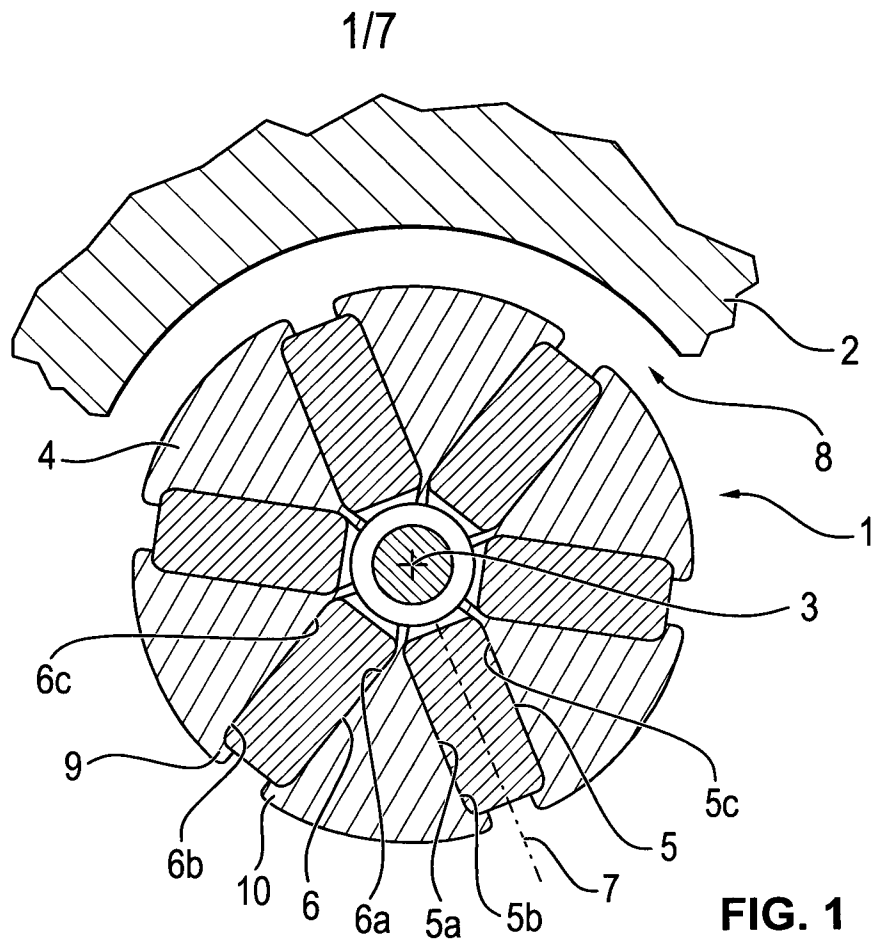
dass die zweite Menge von Permanentmagneten (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57) einen Masseanteil an leichten seltene Erden- Elementen aufweist sowie dass der Masseanteil von schweren seltenen Erde- Elementen geringer ist als der Anteil von leichten seltene Erden- Elementen, insbesondere, dass der Masseanteil von schweren seltenen Erde- Elementen Null ist.

18. Elektrische Maschine nach Anspruch 1 oder einem der folgenden,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Rotor (1, 1') zusätzlich Aufnahmen (5a, 6a) mit Permanentmagneten einer dritten Menge aufweist, wobei die Permanentmagneten (19, 20, 52, 64, 65, 66 der dritten Menge sich von den Permanentmagneten (17, 17', 18, 18', 18'', 24, 24', 25, 26, 27, 28, 29, 29', 30, 32, 33, 34, 35, 48, 49, 57)

der ersten und der zweiten Menge bezüglich der stofflichen Zusammensetzung unterscheiden.



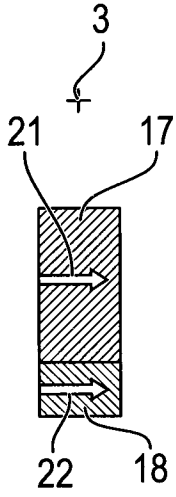


FIG. 3

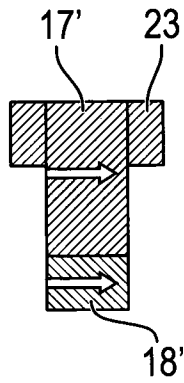


FIG. 4

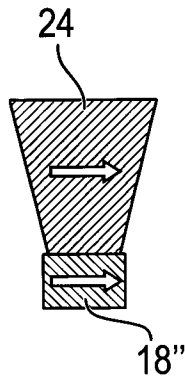


FIG. 5

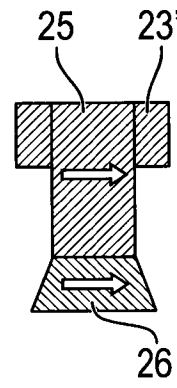


FIG. 6

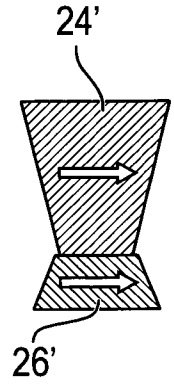


FIG. 7

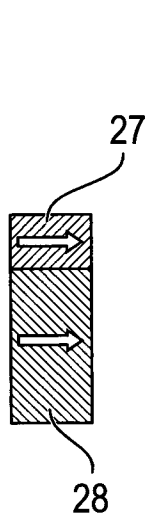


FIG. 8

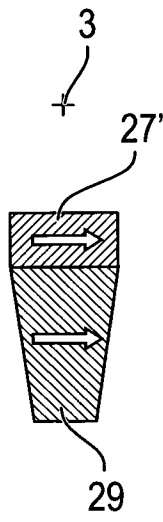


FIG. 9

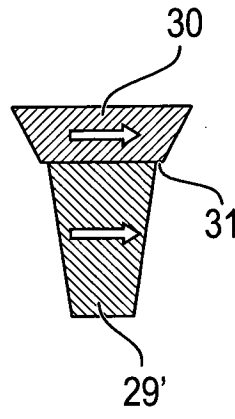


FIG. 10

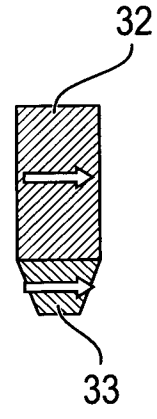


FIG. 11

3/7

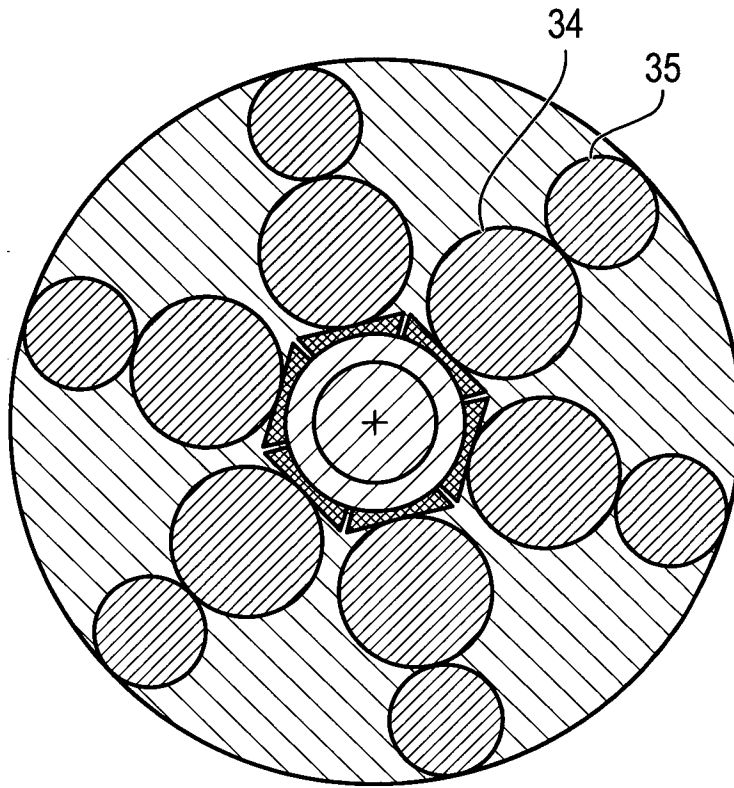


FIG. 12

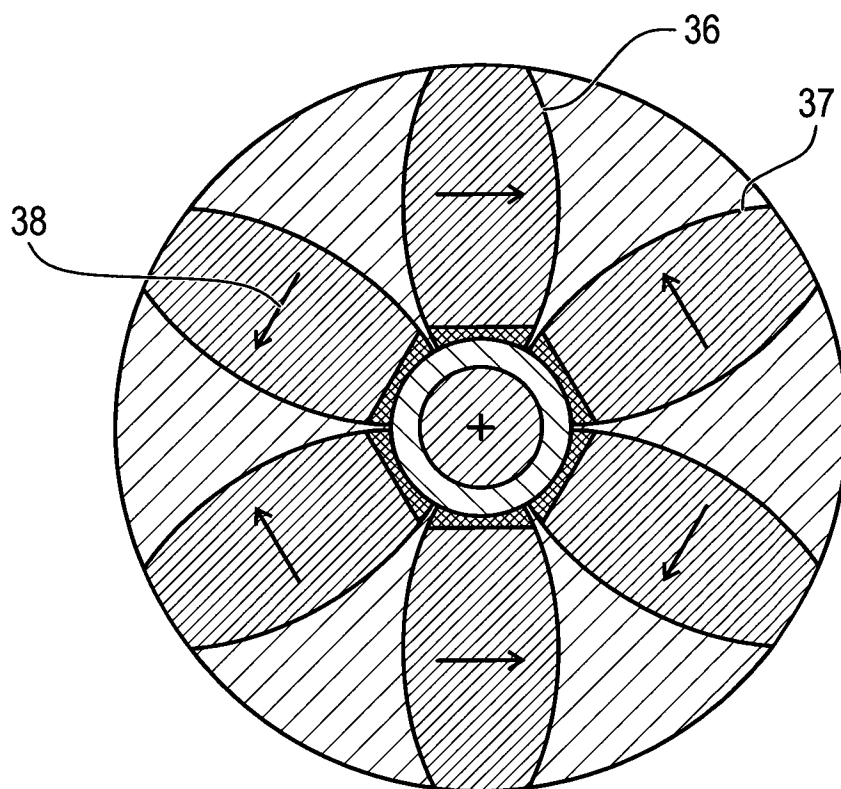


FIG. 13

4/7

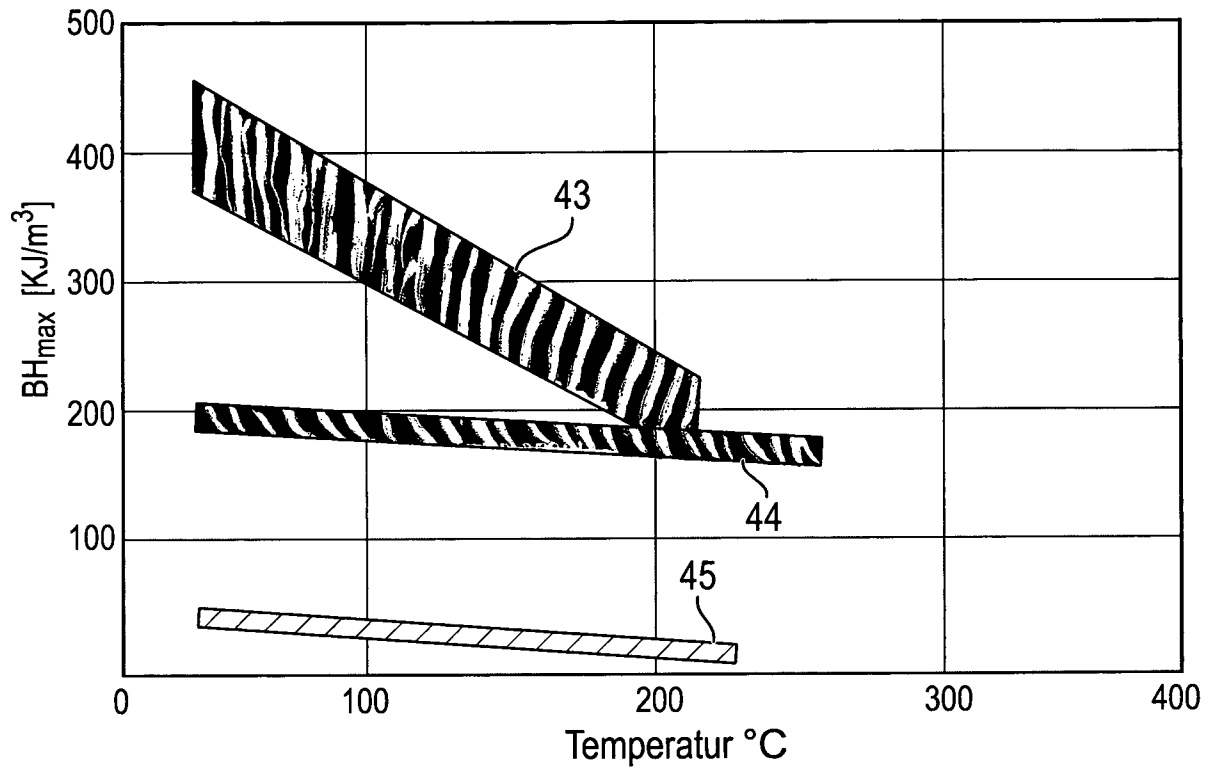


FIG. 14

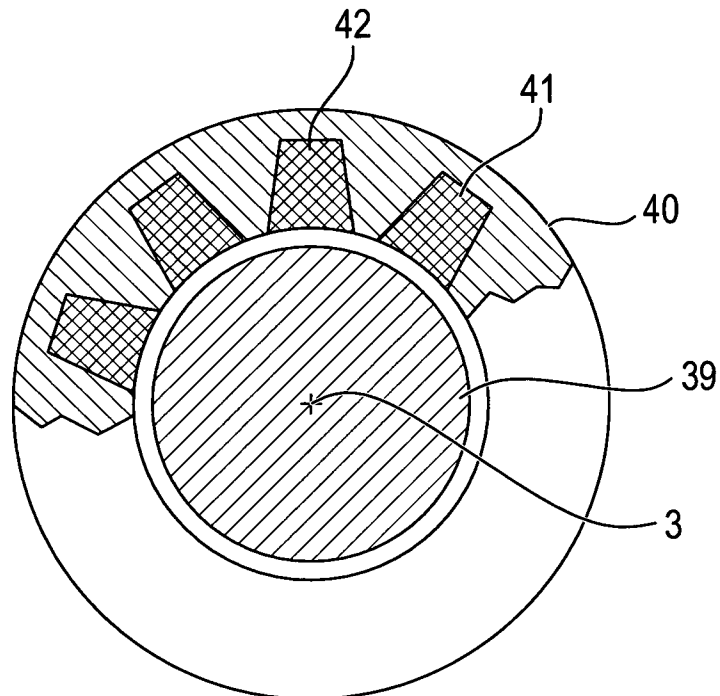
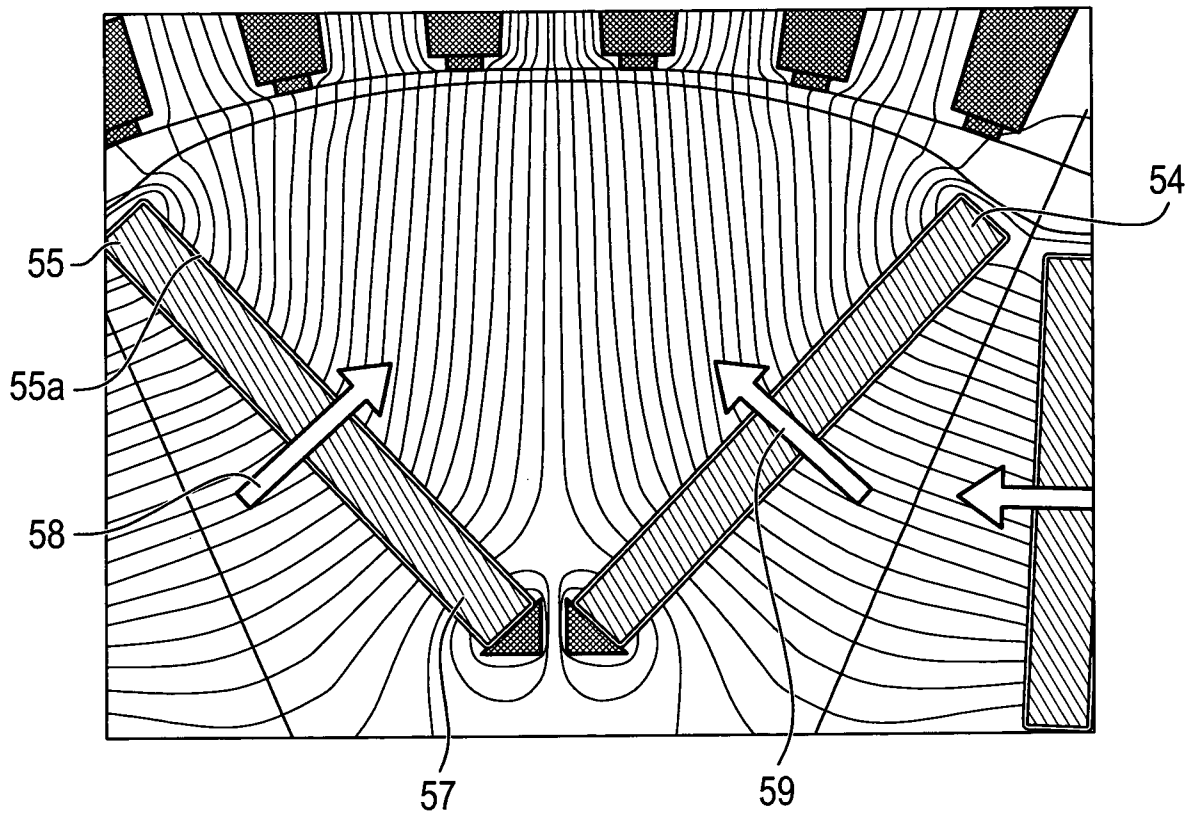
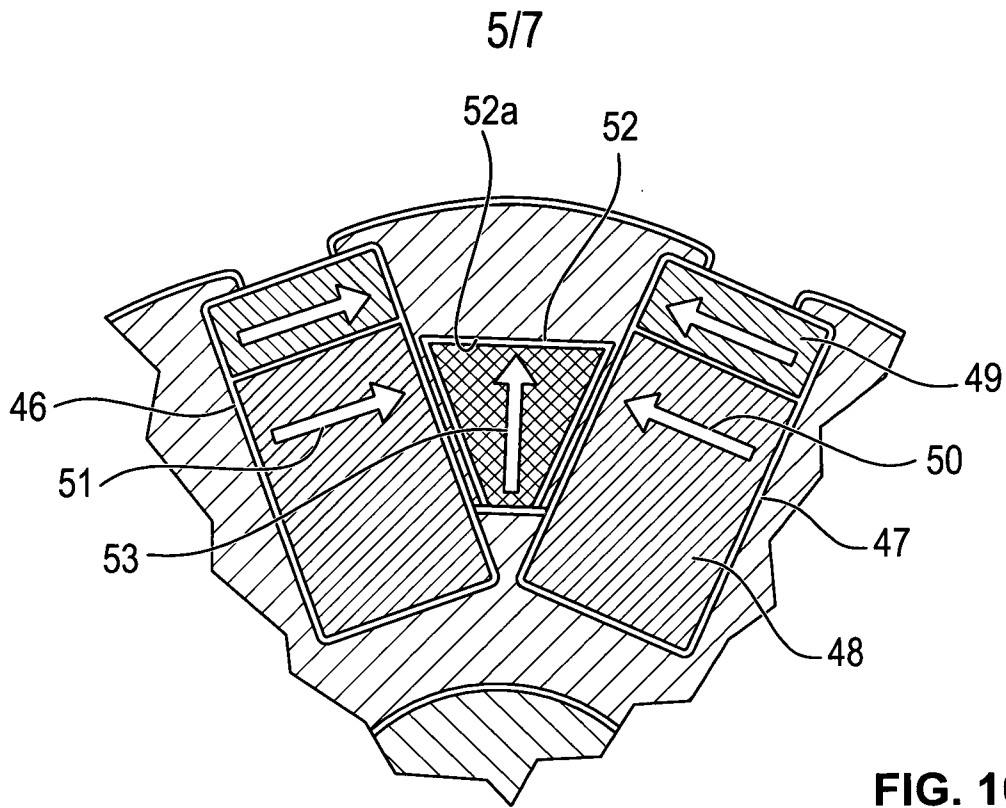


FIG. 15



6/7

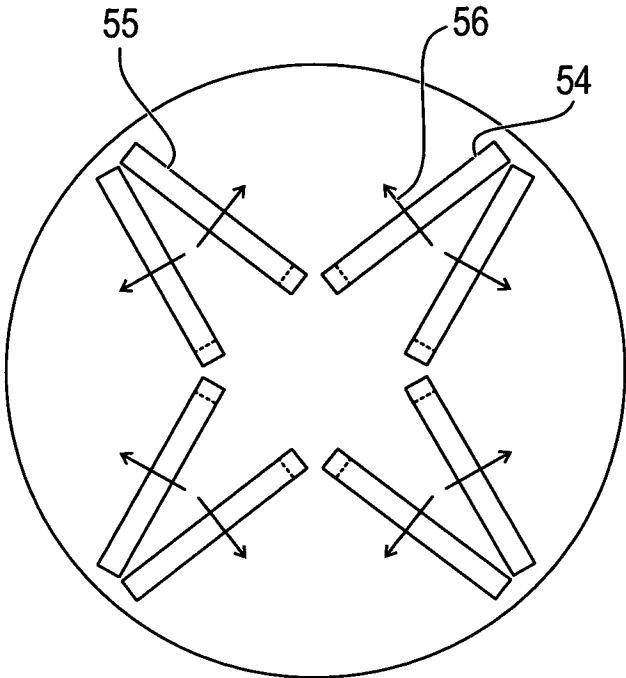


FIG. 18

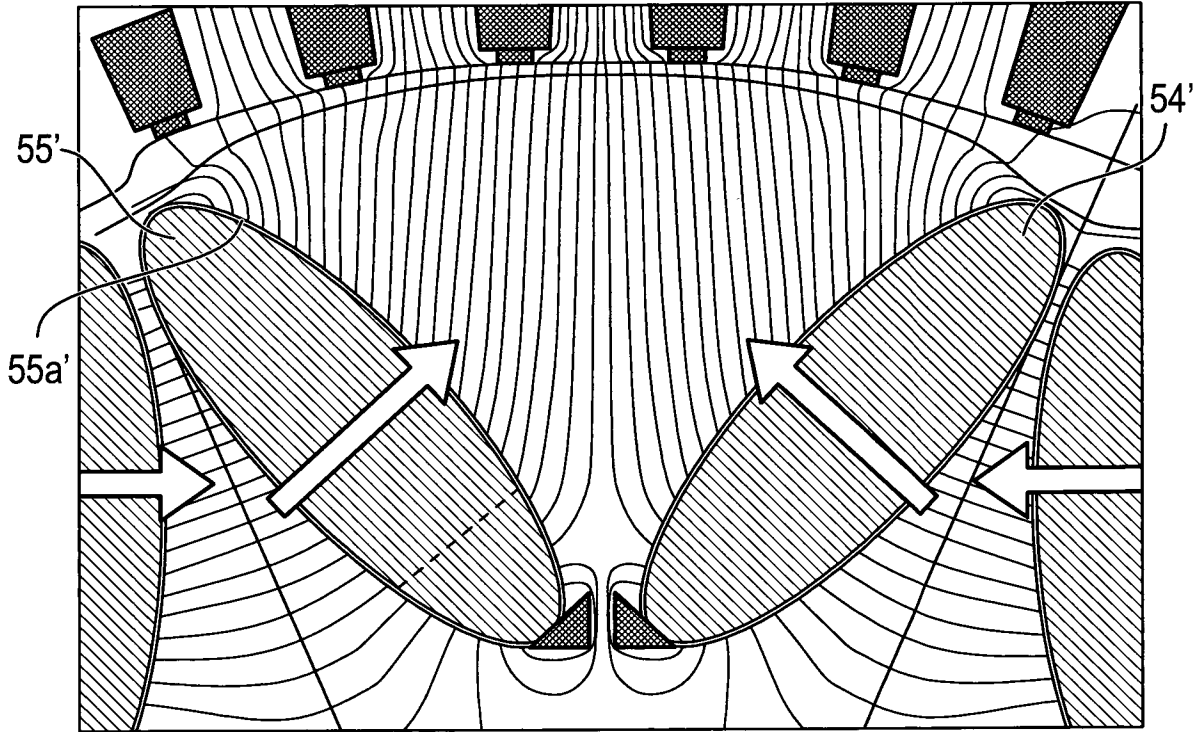


FIG. 19

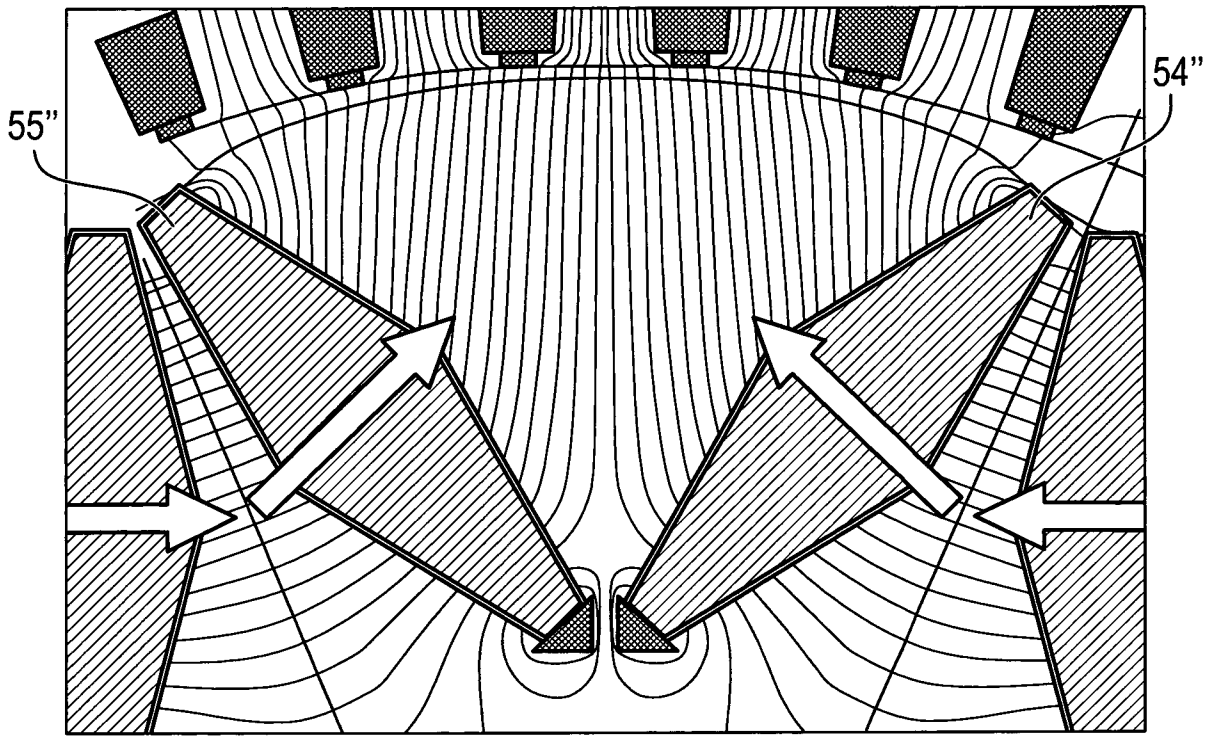


FIG. 20

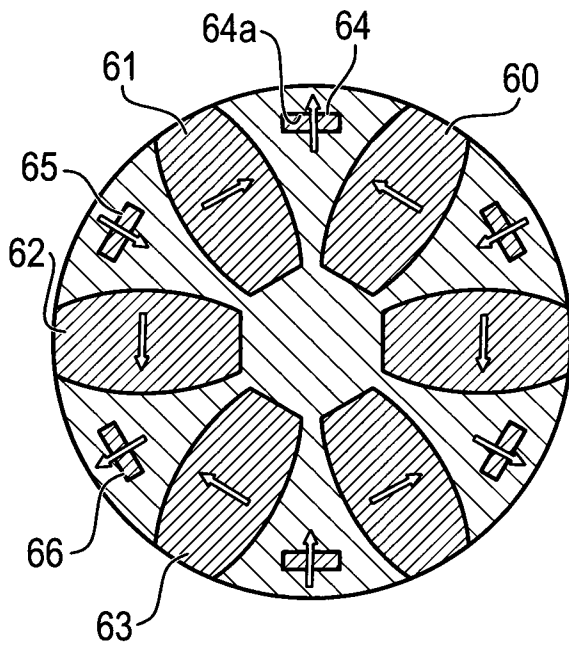


FIG. 21

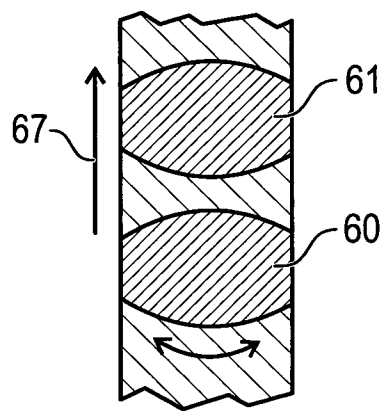


FIG. 22

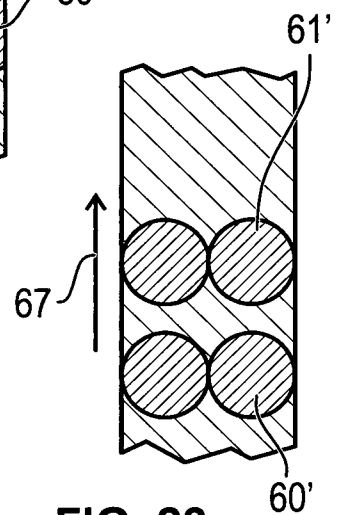


FIG. 23