

## **Luftspule für rotierende elektrische Maschinen und deren Herstellungsverfahren**

### **Zum Thema: Höchsteffiziente elektrische Maschinen, wie Energiesparmaschinen und höchstdynamische Maschinen**

Die Erfindung betrifft Luftspulen, für rotierende elektrische Maschinen, deren Spulenseiten sich mindestens einseitig der Achse oder Welle nähern. Sie sind vor allem aus Maschinen mit einem Axialfeld in einem ebenen Luftspalt bekannt und sie werden als Scheibenmaschinen u.a. im Bereich der Stellantriebe für Servoeinrichtungen als mechanisch oder elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren und auch seit Kurzem für Generatoren z.B. für kleine Windkraftanlagen eingesetzt. Die Luftspulen verlaufen über beide Pole und haben mehrere Windungen, wobei sie auch Teile einer Wellenwicklung sein können.

Luftspulen, die für Axialfeldbereiche ausgeführt sind, haben z.B. eine Kreissegmentform, eine Kreisform, eine ovale Form oder die Form eines Abschnittes dieser Formen. Sie liegen nebeneinander oder axial verdreht, sich gegenseitig teilweise überlappend, zueinander über einen Kreisumfang verteilt, und sind so Teil einer scheibenförmigen, ein oder mehrschichtigen oder treppenförmigen Wicklung. Sie werden als geschlossene oder offene Spulen und in meander- oder wellenförmigen Wicklungen mit Einfach- oder Mehrfachwindungen verwendet. Die Spulen werden entweder aus Leiterdraht hergestellt, der über einen Wickeldorn zu einer Spule mit Mehrfachwindungen aufgewickelt wird, wobei der Draht entweder direkt auf einen separaten Wickelkörper gewickelt oder mit Draht gewickelt und anschließend vergossen oder unter Verwendung von Backdraht zu einer selbsttragenden Spule verbacken wird, oder die Spulen werden als Flachspulen durch Ausstanzen oder Ätzen oder Ausfräsen hergestellt, wobei der Leiter entweder schneckenförmig (spiralförmig) als Einzelspule beispielsweise in Kreissegmentform oder in Abschnitten einer Kreissegmentform oder in einer kreisförmigen Aneinanderreihung von Kreissegmentformen als meander- oder wellenförmige Wicklung ausgeführt werden.

Definition Spulenseite: Eine Spulenseite ist der wirksame Leiter einer Spule, der im Polflächenbereich einer Polart verläuft, der schräge zur Bewegungsrichtung verlaufen kann, und der so eine wirksame Länge bzw. Leiterkomponente und eine unwirksame Länge bzw. Leiterkomponente enthalten kann.

Aus DE 3231966 A1 ist eine Flachspule bekannt, die segmentförmig in Spiralform oder die Teil von mehreren offenen segmentförmig verlaufenden Spulen einer meanderförmigen Wicklung, auf einer Leiterplatte verläuft. Bei diesen Spulen verlaufen die Spulenseiten zwar, den von

M. Faraday erforschten Idealbedingungen entsprechend, rechtwinklig zur Bewegungsrichtung, wobei aber die Leiter, die die Spulenseiten verbinden, außerhalb der Polflächen angebracht sind und keinen Beitrag zur Energieumwandlung bringen. Zudem verlaufen diese Leiter außerhalb des Feldes schräg zur oder in Bewegungsrichtung, so daß selbst, wenn hier die Polfläche erweitert werden würde, die Leiter nicht den Idealbedingungen entsprechend liegen und damit keine optimale Leiter- und Polflächennutzung haben. Daraus resultieren Effektivitätseinbußen, bezüglich der Maximierung der Drehmomente oder Spannungen, sowie der Leistung. Auch werden bei der Maschine die verkürzende Wirkung der Achsannäherung, der die Spulenseiten verbindenden Leiter, nicht voll ausgenutzt, so daß die verbindenden Leiter im achsnahen Bereich, mit ihrem großen Abstand zur Achse oder Welle relativ lang sind und damit die Kupferverluste innerhalb einer Spule groß sind.

Aus DE 3217283 C2 sind eisenlose Einzelspulen für eine scheibenförmige Gleichstromkollektormaschine bekannt, die kreissegmentförmig oder rund in einer Ebene ausgeführt sind, wobei ein Teil der Leiter außerhalb des Feldes angebracht sind und die Spulenseiten nicht ideal, den Idealbedingungen entsprechend, zur Bewegungsrichtung liegen. Außerdem sind die Spulen als Einzelspulen stramm gewickelt mit großem Kupferfüllfaktor, was zum Nachteil hat, daß die Spulenseiten nicht die volle radiale Länge, die die Maschinen und Polfläche zuläßt, nutzen, bevor sie mit in Bewegungsrichtung verlaufenden, die Spulenseiten verbindenden Leitern, verbunden sind oder in eine andere Spulenseite übergehen, die auf einem anderen Radius liegt und unter dem entgegengesetzten Pol verläuft. So wird nicht die maximale Polfläche genutzt und auch nicht das maximale Drehmoment, die maximale Spannung und Leistung erreicht.

Aus PCT WO 00/30238 sind Luftspulen bekannt, die im Schnitt quer zur Bewegungsrichtung gebogen oder gefaltet sind und sich dabei der Achse oder Welle ein- oder beidseitig mit dem jeweiligen Wickelkopf nähern. Dies sind zwar hochwirksame Spulen, da bei ihnen der Wickelkopf im Umfangsbereich entfällt, aber im achsnahen Bereich der Spulenwindungen ist die Effizienz noch zu verbessern. Wird die Breite der Spulenbündel in Bewegungsrichtung

groß gewählt, ist keine Achsnähe zu erreichen, ähnlich wie bei der Maschine in dem zuvor beschriebenen Patent. Die Maschinenflächennutzung in Achsnähe bleibt so auch hier begrenzt.

Luftspulen, die sich einseitig der Achse oder Welle nähern, verlaufen im axialen Schnitt in einem rechtwinklig oder gebogenen oder schräg zur Achse liegenden Luftspalt oder Luftspaltbereich. Alle Betrachtungen der Luftspulen eines rechtwinklig zur Achse liegenden Luftspaltes also eines Axialfeldbereiches im ebenen Luftspalt, können auf solche schräg oder bogenförmig verlaufenden Spulen, mit ein oder beidseitiger Achsannäherung, im nicht ebenen Luftspalt übertragen werden.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zu Grunde, daß sich in jüngster Zeit die Einsatzgebiete der Luftspulenmaschinen aufgrund ihrer guten Eigenschaften, die die Anforderungen an moderne elektrische Maschinen in einem hohen Maße erfüllen, immer mehr ausweiten. Die Effizienz der eingesetzten elektrischen Maschinen wird immer wichtiger. Es werden Antriebe mit hoher Leistung, geringem Durchmesser, mit hoher Dynamik, geringem Gewicht, großem Leistungsgewicht und Leistungsvolumen, sowie hohem Wirkungsgrad verlangt. Im Bereich der Generatoren hat der Durchmesser, das Leistungsvolumen, das Anlaufverhalten und der Wirkungsgrad eine immer größere Bedeutung.

Ein Problem dieser bekannten scheibenförmigen Luftspulenmaschinen und Luftspulenmaschinen mit ein- oder beidseitiger Achsannäherung besteht, allerdings darin, daß die Leistung, das Drehmoment und die Spannung nicht beliebig erhöht werden können, weil dies zu unpraktischen Maschinendurchmessern und Fliehkraftproblemen führt. Deshalb müssen andere Wege gefunden werden eine Steigerung diesbezüglich für diese Maschinen zu erreichen.

Außerdem ergaben neuere Untersuchungen, daß die Anschaffungskosten nur wenige Prozent der Betriebskosten einer elektrischen Maschine ausmachen und 70% des industriellen Stromverbrauches durch elektrische Antriebe entstehen. Dadurch hat ein hoher Wirkungsgrad der Maschinen eine große betriebswirtschaftliche, volkswirtschaftliche und umwelterhaltende Bedeutung. Die Anschaffungs- und Konstruktionskosten der Antriebe spielen in Zukunft kaum mehr eine Rolle, so daß nun auch aufwendigere Konstruktionen und Herstellungsverfahren möglich sind, wenn sie zu energiesparenden Maschinen führen. Hohe

Wirkungsgrade werden erreicht durch optimale Energieumsetzung, was eine effiziente Nutzung der eingesetzten Maschinenmittel voraussetzt.

Um allen diesen Anforderungen gerecht zu werden, muß die zur Verfügung stehende Maschinen- und Polfläche und das eingesetzte Leitermaterial optimal genutzt werden. Dies geschieht bei den bekannten segmentförmigen Spulen oder Spulenabschnitten, die in Luftspaltbereichen oder Luftspalten verlaufen, die sich ein- oder beidseitig der Achse nähern, nur unzureichend. Oft werden sogar nur, wie bei Scheibenläufern, die im mittleren radialen Bereich liegenden Abschnitte der Kreissegmentflächen der Maschinen genutzt. Die Spulen werden aus Leitern, die dicht nebeneinander liegen und/oder zu Bündeln aufgewickelt, ausgeführt. Dabei wird nicht die maximal mögliche Maschinenfläche genutzt und nicht möglichst viel Leiter innerhalb jeder Spule wirksam ins Feld maximalen Ausmaßes gelegt. Insbesondere im Umfangsbereich und/oder im achsnahen Bereich der Maschine, je nach Ausführung, wird Maschinenfläche, die mit magnetischen Polen und wirksamen Leitern gefüllt sein könnte, verschenkt. Auch in den Ecken der jeweiligen Leiterlage der kreissegmentförmigen Maschinenflächenabschnitte geht wertvolle Maschinenfläche ungenutzt verloren, sowie wertvolle, mögliche hocheffektive Leiterlänge.

Beim gängigen Verfahren zur Wicklung von Spulen, mit Hilfe eines Wickeldornes, wird der Draht um einen kantigen Wickelkörper, in der Regel für kreissegmentförmige Spulen mit dreieckigem Querschnitt, der die Spulenform vorgibt, gewickelt. Bei diesem Verfahren schleift sich die Form der Spule ab, je mehr Leiterlagen übereinanderliegen, was sich beim Zusammensetzen in eine kreisförmige Scheibenwicklung zusätzlich nachteilig in der mangelhaften Maschinenflächenausnutzung im achsnahen Bereich und im Umfangsbereich der Segmentform bemerkbar macht. Die Form der gezeichneten Spule 1 in Bild 1 ist hier ein nicht praktisch umzusetzender Idealfall. Bei einer realen Spule sind die Bögen in den Ecken immer ganz stramm ausgeführt, weil die Lagen beim Wickelvorgang hier erhöhtem Druck ausgesetzt sind und im restlichen Bereich die Leiter relativ entspannt nebeneinander liegen. So sind die Verhältnisse einer herkömmlichen Spule noch schlechter als hier dargestellt. Für im Schnitt quer zur Bewegungsrichtung gefaltete Spulen besteht das Problem in ähnlicher Weise.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Möglichkeit und Spulenformen zu finden, die die Maschinenfläche und die darin enthaltene maximal mögliche magnetische Polfläche,

bezogen auf die Leistungs-, Spannungs-, Drehmoment, Wirkungsgradmaximierung und der Maximierung der Kupfernutzung innerhalb jeder Spule, optimal nutzt und die beschriebenen Grenzen der Maschineneigenschaften ausweitet und die genannten Nachteile beseitigt.

Die Lösung der Aufgabe besteht darin, daß die Leiter so gelegt oder gewickelt werden, daß sie die kreissegmentförmigen Teile der Maschinenfläche, in denen die segmentförmigen Spulen oder Spulenabschnitte liegen, aber von ihnen nur teilweise ausgenutzt werden, im Sinne der Faraday'schen Idealbedingungen, die sich aus der Faraday'schen Anschauung und seiner exakten Beschreibung ergeben und die mathematisch ausgedrückt in der Rechtwinkligkeit der Vektoren  $\vec{B}$  und  $\vec{l}$  zueinander bestehen und sich in der Maximierung der Induktion der Ruhe (Motorbedingung)  $\vec{U} = \vec{B} \times \vec{l}$  und der Induktion der Bewegung (Generatorbedingung)  $U = (\vec{v} \times \vec{B})l$  für die Relativbewegung von freien Leitern gegenüber einem sie durchdringenden Magnetfeld ausdrücken, voll ausgenutzt werden und damit eine sich lohnende Maximierung der Polflächen ermöglichen.

Die Faraday'schen Anschauungen werden nicht in ihrer Gesamtheit gesehen, so daß sich die daraus ergebenden Idealbedingungen nicht, unter diesem Namen mit dieser Bewertung, bekannt sind und hier als solche definiert sind und es bis jetzt nicht Ziel war sie in ihrer Gesamtheit umzusetzen. Mathematisch gesehen ist die dargestellte Ausdrucksform des Induktionsgesetzes zwar bekannt, aber sie findet in ihrer Gesamtheit keine Beachtung, weil sich die Wissenschaft und Maschinentechnik auf andere Ausdrucksformen des Induktionsgesetzes konzentriert, die vor allem in der Maximierung der Flußänderung  $d\Phi$  pro Zeit  $dt$  innerhalb einer Spulenfläche  $A$  bestehen und sich auf die Verkürzung des Luftspaltes und einer Maschinenverstärkung durch Einsatz von Eisen konzentrieren.

Ein hilfreiches Maß, um den Grad der Umsetzung der Faraday'schen Idealbedingungen zu messen, ist der Spulenausnutzungsgrad  $\xi_{sp}$ , der hier folgendermaßen definiert wird:

$$\xi_{sp} = \frac{l_w}{l} \quad l_w \text{ wirksame Länge der Spule, } l \text{ Gesamtleiterslänge der Spule}$$

Er besagt, wieviel Leiter innerhalb der Spule ideal, den Faraday'schen Idealbedingungen entsprechend, bezogen auf den Gesamtleiter der Spule, im Feld liegt.

Eine verbesserte Umsetzung der Faraday'schen Idealbedingungen innerhalb einer Spule und damit ein erhöhter Spulenausnutzungsgrad und eine effizientere Maschinenflächennutzung wird erreicht, indem die Spulenseiten der äußeren axialen Wicklungslage(n) die reale oder

radial projizierte Kreissegmentform der Maschinenfläche einer Spulenweite voll ausnutzen. So verlaufen sie entweder bis nahe der Umfangs- und der Achsgrenze im wesentlichen radial, bis sie abknicken und um einen sehr kleinen Radius verlaufend, ihre Richtung wechseln, und dabei in Leiter, die im wesentlichen in Bewegungsrichtung verlaufen oder eine andere Spulenseite sind, übergehen, oder die Spulenseiten verlaufen im wesentlichen radial oder radial projiziert von einem axialen Bereich zum Umfangsbereich und darüber hinaus vorzugsweise zum zweiten axialen Bereich und sie in jedem axialen Bereich entsprechend abknicken und um einen sehr kleinen Radius verlaufend, ihre Richtung wechseln, und dabei in Leiter, die im wesentlichen in Bewegungsrichtung verlaufen oder die eine andere Spulenseite sind, übergehen. Die innenliegenden Spulenwindungen oder axialen Spulenlagen, als Einzelleiter oder als Leiterbündel der Spule, werden im Bereich der Spulenseiten vorzugsweise parallel zu den äußeren Spulenseiten nach innen versetzt ausgeführt und folgen diesem, im wesentlichen radialen, Verlauf, so weit, wie die sie umgebende axiale Spulenlage dies zuläßt, um dann ebenfalls in gleicher Weise abzuknicken, oder um einen sehr kleinen Radius zu verlaufen und dabei in die, die Spulenseiten verbindenden, Leiter oder direkt in eine andere Spulenseite überzugehen.

Bei einer Ausgestaltung mit gestanzten, gefrästen oder geätzten Flachspulen und/oder Flachwicklungen wird dies erreicht, indem die Einzelleiter schneckenförmig (spiralförmig) den Kreissegmentbereich der maximal möglichen Maschinen- oder Polfläche ausfüllen und dabei jeder Leiter einzeln, so weit die Maschinenfläche und benachbarte Leiter das zulassen, radial verläuft, bevor er an den, so vorgegebenen Grenzen, im umfangsnahen Bereich und im achsnahen Bereich, seine Richtung wechselt, im umfangsnahen Bereich in Bewegungsrichtung verläuft und im achsnahen Bereich entweder scharfeckig die Richtung auf einen anderen, achsverdrehten Radius wechselt oder auf eine Parallelversetzung zu diesem, oder in dem er hier seine Richtung wechselt oder abknickt und in einen kurzen, die Spulenseiten verbindenden Leiter übergeht, um dann wieder abzuknicken und in eine andere Spulenseite übergeht, die unter dem anderen Pol im wesentlichen auf einem anderen Radius oder bei geringfügiger Abweichung davon, vorzugsweise dazu parallel versetzt, verläuft. Bei einer gestanzten oder geätzten Spule kann die Flächennutzung in den Eckbereichen der Segmentform, innerhalb der Spule, vorteilhafterweise, für jeden Windung einzeln, optimal angepaßt werden.

Bei einer anderen Ausgestaltung, mit von Draht gewickelten Spulen, sind die Spulen im Prinzip in gleicher Weise aufgebaut, vorzugsweise mit dem Unterschied, daß nicht jeder einzelne Leiter soweit wie möglich in den Kreissegmentecken verläuft, sondern ein ganzes Leitungs­bündel, genau gesagt, mehrere axiale Windungslagen. So entstehen zwischen den einzelnen axialen Lagen solcher Leiterbündel in den Segmentecken der Spulenanlage Freiräume, die auch notwendig sind, um Wickelpfosten oder Stifte aufzunehmen und den Wickelvorgang in dieser Weise zu ermöglichen, ohne Maschinenflächenverluste zwischen den im wesentlichen radial, verlaufenden axialen Wicklungslagen in Kauf nehmen zu müssen. Anders gesagt, wird bei gewickelten Spulen die optimale Nutzung erreicht, indem die Leiter um Pfosten, Stifte, Wickelpilze oder ähnliches gewickelt werden, die in kurzen Abständen in den Eckbereichen der jeweiligen Spulenanlage stehen. Damit die Anzahl der Pfosten nicht zu groß wird und sie auch einen ausreichend stabilen Durchmesser haben müssen, ist es zu bevorzugen nur nach mehreren axialen Wicklungslagen Pfosten in den Ecken zu platzieren, um die die Leiter gewickelt werden. Ein Wickelverfahren um Pfosten ist grundsätzlich bekannt, und wird hier in besonderer Weise eingesetzt. Neben der besseren Flächen-, Magnetpol- und Kupfernutzung wird hier das beschriebene Abschleifen der Spulenform vermieden, weil die Spule nur nach wenigen axialen Lagen um neue Stifte gewickelt wird, die den Verlauf der Leiter erneut ideal ausrichten.

Für viele Anwendungen, sowie für den Generatorbetrieb ist es vorteilhaft die Spulen auch in ihrem Flächen­zentrumsbereich mit Leitern auszufüllen, was bei allen Ausgestaltungen leicht durchgeführt werden kann.

In weiteren Ausgestaltungen mit Spulen mit beidseitiger Achsannäherung verlaufen die Spulenseiten im gesamten Umfangsbereich im wesentlichen radial, wobei die Spulenseiten entsprechend der beiden zuvor beschriebenen Ausgestaltungen im achsnahen Bereich dementsprechend verlaufen. Wicklungen mit beidseitiger Achsannäherung bieten durch die ideale Spulenausnutzung im Umfangsbereich schon einen sehr guten Spulenausnutzungsgrad. Die Verbesserung liegt hier einerseits in der besseren Maschinenflächennutzung im Bereich der Achsannäherung, die aber entsprechend der Fig.1 doppelt lohnenswert ist, weil es sich um zwei solcher Luftspaltbereiche pro Spule handelt und andererseits im verbesserten Spulenausnutzungsgrad, wenn in Bewegungsrichtung breite Spulenbündel verwendet werden, und daß diese überhaupt verwendet werden können ohne Maschinenflächeneinbußen und ohne eine Verschlechterung des Spulenausnutzungsgrades.

Die erfindungsgemäßen drahtgewickelten Ausgestaltungen entfaltet ihren Gewinn vor allem in der Anwendung einer weiteren gleichzeitig angemeldeten Erfindung, einer speziellen Spulenwicklung. Denn bei den herkömmlichen Luftspulen besteht das Problem, daß der Anfang des Leiters innerhalb der Spule liegt und das Ende an ihrem Außenumfang der Spule. Hier ist es notwendig das innenliegende Leiterende über das ganze Spulenbündel hinweg z.B. zum axial sitzenden Kommutator zu leiten. Dies wird bisher über den axialen Wickelkopf gemacht, der dann von dem Luftspalt ausgenommen wird, weil sonst der gesamte Luftspalt um die Leiterdicke erweitert werden müßte, was jedoch in beiden Fällen Verluste verursacht. Dieses Problem hat man auch bei den hier vorgestellten, quer zur Bewegungsrichtung ungefalteten, erfundenen Spulen, wenn man die Spuleninnenfläche ohne Luftspalterweiterung nutzen will. Bei gefalteten Spulen besteht dieses Problem zumeist nicht, weil diese Leiterführung in den meisten Ausführungen im Faltbereich stattfinden kann. Durch die gleichzeitig mit dieser eingereichten Patentanmeldung „Luftspule II“, wird dieses Problem auf elegante Weise auch für die ungefalteten Spulen gelöst, indem jeder Spule aus zwei Spulen halber Länge, die deckungsgleich aber entgegengesetzt gewickelt sind, zusammengesetzt wird, wobei die Leiteranfänge innerhalb der beiden Spulenteile miteinander verbunden werden, so daß für die zusammengesetzte und vorteilhafter weise zusammengeklebte Spule, Stromein- und Stromausgang am Umfang der Spule zugänglich sind.

Das Verfahren der Wicklung der, quer zur Bewegungsrichtung, ungefalteten Spulen mit Leiterdraht wird mit einem speziellen Wickeldorn vorgenommen, der einerseits die Spule in axialer Richtung des Wickeldornes beidseitig begrenzt und andererseits in dieser Begrenzung Löcher aufweist, in die die Wickelpfosten oder Wickelstifte während des Wickelvorganges eingesetzt werden oder von außen durchgeschoben werden, wobei die Löcher in den beiden axial gegenüberliegenden Spulenbegrenzungen des Dornes deckungsgleich ausgeführt sind. So sind im Falle der kreissegmentförmigen Spulen, am Anfang des Wickelvorganges drei Pfosten im Zentrum der Spule fest eingebaut oder ein Körper mit dreieckförmiger Schnittfläche ist zwischen den Begrenzungen vorhanden. Während des Wickelvorganges werden die Pfosten lagenweise vom Innenbereich der Spule zum Außenbereich axial eingesetzt oder eingeschoben. Soll die Spule freitragend sein, wird sie durch Erhitzen anschließend verfestigt (verbacken) oder sie wird vergossen.

Der gleiche Wickelvorgang wird, in einer Ausgestaltung dieses Herstellungsverfahrens, auf einem separaten Wickelkörper, auf dem Dorn sitzend, vorgenommen, der die gleichen Löcher

aufweist für die Stifte, wie die axialen Spulenbegrenzungen des Dornes, wobei die Stifte in diesem Fall nach der Wicklung vorzugsweise in der Wicklung bleiben. Um die fertige Spule oder die Spule samt Wickelkörper zu entnehmen, ist die eine axiale Spulenbegrenzung des Dornes abnehmbar.

Der Wickelvorgang für eine Spule, die nur einen umfangsseitigen Abschnitt der Kreissegmentform belegt, wird im Unterschied zur kreissegmentförmigen Spule mit 4 Stiften pro Spulenbündellage vorgenommen. Auch mehr Stifte pro Lage sind in einer anderen Ausgestaltung ausgeführt, um beispielsweise den umfangsseitigen Kreisbogen zu gestalten. Die gleichen Wicklungsverfahren können angewendet werden für die quer zur Bewegungsrichtung gefalteten Spulen mit z.B. beidseitiger Achsannäherung, in dem die Spulen aufgeklappt in einer Ebene auf einem rautenförmigen Wickelgrundkörper gewickelt und anschließend in die Endform gefaltet und gepreßt werden.

Die drahtgewickelten Spulen bieten durch die Löcher, wo beim Wickelvorgang die Stifte platziert waren, die Möglichkeit der effektiven Kühlung, in dem durch die Löcher Kühlmittel während des Betriebes geleitet werden kann, so daß größere Stromdichten erreicht werden können.

### **Figurenbeschreibung**

Einige Ausgestaltungen der Erfindung und eine Herstellungsvorrichtung werden nachfolgend anhand von Zeichnungen beschrieben. Sie zeigen in

Fig. 1 vergleichsweise in der linken Hälfte herkömmliche und in der rechten Hälfte erfindungsgemäße kreissegmentförmige Spulen, mit ihren Polflächen, auf einer kreisförmigen Maschinenfläche angeordnet; und in

Fig. 2 einen axialen Querschnitt durch einen Wickelkörper eines Wickeldornes, mit fertig gewickelter kreissegmentförmiger Spule, und in

Fig. 3 eine Lage einer zweilagigen Leiterplattenwicklung bestehend, aus kreissegmentförmigen Spulen mit effizienter Maschinenflächennutzung; und in

Fig. 4 vergleichsweise in der linken Hälfte herkömmliche und in der rechten Hälfte erfindungsgemäße Spulenabschnitte von gebogenen und/oder gefalteten Spulen, die sich der Achse nähern.

Fig. 1: Zeigt verschiedene kreissegmentförmige Spulen für Axialfeldbereiche, die kreisförmig als Teil einer Scheibenwicklung angeordnet sind. Zum Vergleich der Flächennutzung sind herkömmlich gewickelte Spulen 1 auf der linken Kreishälfte und deren Polfläche 13 zusammen mit der erfundenen gewickelten Spule 3 und deren Polfläche 10 auf der rechten Kreisfläche angeordnet. Bei den herkömmlichen Spulen sind die großen ungenutzten Bereiche 7, 8 der Polfläche gut sichtbar, wobei die Leiter in diesen Bereichen bogenförmig oder in Bewegungsrichtung verlaufen und damit, selbst, wenn die Pole diese gesamte Spulenfläche abdecken, eine geringe Wirksamkeit aufweisen, weil ihre maximal wirksame Länge im achsnahen Bereich nur in einem Punkt der Maschinendrehung wirksam wird und im Umfangsbereich nur im Bereich der in Bewegungsrichtung verlaufenden geraden Leiter. Hingegen bei den erfindungsgemäßen Spulen 3, verlaufen die Leiter in den Ecken der Kreissegmentform im wesentlichen weiter gerade und sind damit hochwirksam, wobei die Kreissegmente der Maschinenfläche in den Ecken voll genutzt werden, so wie auch die maximal möglichen Polflächen bis hin in den achsnächsten Bereich.

Weiterhin ist eine Wirksamkeitsberechnung (z.B. Spannungserzeugung im Generatorbetrieb) für die Spulenseiten des äußeren Spulenbündels eingezeichnet. Der Gewinn an wirksamer Leiterlänge ist im achsnahen Bereich zwar größer als im Umfangsbereich, dafür sind die Umfangsgeschwindigkeiten dort größer, so daß hier auch nur kurze Gewinne von wirksamen Leiterlängen eine wesentliche Steigerung der Effizienz der Maschine zur Folge haben. So liefert beispielsweise beim äußeren Spulenbündel 31 der Spule 3 der herkömmlich genutzte Polbereich 13 bzw. Maschinenflächenbereich 58,3% der Spannung, wohin gegen der erfindungsgemäße Spulenaufbau zur Folge hat, daß im relativ langen Leitergewinn des achsnahen Bereiches 19,76% und im relativ kurzen Leitergewinn des Umfangsbereiches 21,94% der Gesamtspannung dieses Spulenstranges erzeugt werden, und dies über die volle Polweite. Dies entspricht vergleichsweise einem Gewinn von 70% gegenüber dem entsprechenden äußeren Spulenbündel der herkömmlichen Spule 1 mit der Polfläche 13. Der Spulenausnutzungsgrad der herkömmlichen Spule 1 mit der Polfläche 13 beträgt  $\xi_{Sp} = 0,42$  und bei Verwendung der Polfläche 14 aus Fig.4  $\xi_{Sp} = 0,59$ . Der Spulenausnutzungsgrad steigert sich erheblich durch die Verwendung der Spule 3 mit der Polfläche 10 zu  $\xi_{Sp} = 0,74$ . Hinzu kommt, daß wesentlich mehr Maschinenfläche auch effizienter genutzt wird. Werden die Spulen 1 und 3 spulenbündelweise verglichen werden, ergibt dies, daß das äußere Spulenbündel, welches bei der Spule 3 bis zum achsnahen Bereich 31 reicht und welches bei der Spule 1 einen weiten Bogen außerhalb der Polflächen vollzieht, bei der Spule 3 eine 2,31

mal so große Leistung ergibt wie bei der Spule 1. Das zweite Spulenbündel, welches als nächstes daran anschließend innen liegt, erreicht bei der Spule 3 (Spulenbündel 32) noch eine 1,78 fache Leistung gegenüber dem gleichen Spulenbündel der Spule 1.

Das dritte Spulenbündel 33, welches dann als nächstes daran anschließend innen liegt, ist bei beiden Spulen 1 und 3 gleich, so daß es gleich große Leistung erbringt.

Insgesamt hat die Spule 3 eine ca. 1,65 fach größere Leistung als Spule 1, wobei 1,9 mal so viel Polfläche belegt wird und 1,57 mal so viel Leiter innerhalb der gleichen Maschinenfläche genutzt wird. Bei der Spule 4, die ein viertes Spulenbündel im Zentrum nutzt, steigt die Leistungsamplitude noch einmal um 21,4% gegenüber der Leistungsamplitude von Spule 1, so daß sich bei Spule 4 eine 1,84 fache Leistungsamplitude einstellt, ohne daß zusätzliche Polfläche verwendet werden muß.

Außerdem wird in Fig.1 eine Ausgestaltung der Erfindung mit der Spule 11 gezeigt. Die Verbesserungen treffen hier in abgeschwächter Form zu.

Einfachheitshalber sind die Lagen der Spulen 3 und 11 hier, sowie auch in Bild 2, nicht spiralförmig gezeichnet, sondern konzentrisch.

Fig.2: Zeigt einen Querschnitt durch die Spulenhalterung eines Wickeldornes 16, zwischen einer fertig gewickelten Spule 3 und Halterungsrahmen, der als axiale Spulenbegrenzung wirkt und abnehmbar ausgeführt ist (hier nicht sichtbar), wobei der Betrachter in axialer Richtung des Wickeldornes blickt. Hier sind die Stifte 17 der Wickelvorrichtung gut sichtbar, um die die Spulen mit jeweils mehreren axialen Lagen gewickelt sind, wobei der andere Halterungsrahmen 19 sichtbar ist.

Fig.3: Zeigt beispielhaft erfindungsgemäße flächenförmige Spulen 6, die durch ausstanzen, ätzen oder ausfräsen entstanden sein könnten, für eine zweilagige Wicklung, wobei hier nur die obere Lage sichtbar ist. Die andere Spulenlage ist ähnlich aufgebaut, wobei zwischen den Lagen Durchkontaktierungen 7 bestehen. Gut sichtbar ist hier die Vollaussnutzung der Ecken der kreissegmentförmigen Maschinen- und Polflächen (ähnlich wie Polfläche 10 in Bild 1) im Umfangsbereich und in Achsnähe. Hier wird für jeden einzelnen Leiter das Optimum gemäß der Aufgabe der Erfindung erreicht.

Bei einer anderen Ausführung als Wicklung eines Elektromotors, ist es vorteilhaft, um keine Spulenfläche zu verschenken, nötige Magnetfeldsensoren außerhalb des Spulenbereiches umfangsseitig anzubringen, die dort das Streufeld sensieren.

Fig.4: zeigt in ähnlicher Weise wie Fig.1 einen Vergleich von Spulenbereichen, die sich der Achse nähern, zwischen herkömmlich gefalteten Spulen 23 und der erfindungsgemäßen Spule 21. Hier ist der Gewinn ausschließlich im achsnahen Bereich der Spulenwindungen und in der Maschinenflächennutzung zu sehen. Zum Beispiel liefert das äußere Spulenbündel des dargestellten Spulenabschnittes der Spule 21 im gewonnenen axialen Bereich ca. 20% seiner Leistung und das entspricht einem Spannungszuwachs von ca. 25% gegenüber dem gleichen Spulenbündel der Spule 22 mit der Polform 14. Der Spulenausnutzungsgrad des dargestellten Spulenabschnittes der Spule 22 mit der Polfläche 14 liegt bei  $\xi_{Sp} = 0,82$  und bei der Spule 21 bei  $\xi_{Sp} = 0,98$ .

Außerdem wird der Spulenabschnitt der Spule 20 gezeigt, für den die Vorteile in abgeschwächter Form gelten.

Zusammenfassung:

Die Patentanmeldung beinhaltet eine hochwirksame Spulengestaltung von Flachspulen und mit Draht gewickelten Luftspulen oder Teilen davon, die sich in, der Achse oder Welle annähernden, Luftspaltbereichen befinden, und die Herstellung solcher drahtgewickelter Spulen. Bei den Luftspulen ist der Leiter, gemäß den Faraday'schen Idealbedingungen für die Energieumsetzung zwischen Leiter und Magnetfeld, ins Feld gelegt, unter Berücksichtigung der maximalen Maschinenflächennutzung und damit der Maximierung der Polfläche innerhalb der Maschinenfläche und des wirksamen Leiters im Feld, womit sich die Effizienz der Maschine beträchtlich steigert. Kern der Erfindung ist, daß die Spulenseiten im real oder projiziert kreissegmentförmigen Flächenbereich der Maschine im wesentlichen radial und dabei so weit wie möglich bis zum äußersten Rand dieser Fläche gerade und im wesentlichen radial verlaufen, und dies sowohl im Außenumfang als auch im achsnahen Bereich.

Figur zur Zusammenfassung: Fig.: 1

### Patentansprüche

1. Luftspule (3), für rotierende elektrische Maschinen, deren Spulenseiten im Luftspalt sich mindestens einseitig der Achse oder Welle nähern und bei diesen elektrischen Maschinen sich vorzugsweise magnetische Pole alternierend im gleichen Abstand um eine Achse (24) oder Welle (1) gruppieren, die rechtwinklig zum Luftspalt vorzugsweise axial magnetisiert sind und die axial den Luftspulen gegenüberliegen, die ebenfalls konzentrisch in etwa im gleichen Abstand zur Achse angebracht sind, wie die magnetischen Pole (10 oder 13 oder 14), und axial gesehen die magnetischen Pole im wesentlichen die gleiche Fläche abdecken, wie die Luftspulen, die vom Magnetfeld der Pole durchdrungen werden, und die magnetischen Pole relativ zu den Spulen (3) rotieren, und jede Luftspule bei maximaler Energieumsetzung gleichzeitig im Wirkungsbereich beider, mindestens einseitig von der Spule angebrachter, entgegengesetzter magnetischer Pole verläuft, sie als ganze Spule oder Spulenteil in Kreissegmentform, Dreiecksform oder eines Abschnittes davon, als Einzelspule oder als Spule innerhalb einer wellenförmigen oder meanderförmigen Wicklung ausgeführt ist, wobei die Spulenseiten im sich der Achse oder Welle annäherndem Bereich, im wesentlichen radial oder radial projiziert verlaufen, dadurch gekennzeichnet, daß die Luftspule (3) so ausgeführt ist, daß die äußeren Spulenseiten jeder Spule, mindestens als Einzelleiter, an ihren beiden Enden, ihren, im wesentlichen radialen oder radial projizierten, Verlauf kontinuierlich bis zum äußeren, achsseitigen und umfangsseitigen Randbereich oder bis zu den beiden äußeren achsseitigen Randbereichen, der zur Verfügung stehenden Maschinenfläche oder eines Abschnittes von ihr, fortsetzen, und sie an diesem Randbereich durch einen scharfen Knick oder Richtungswechsel in Leiter übergehen, die jeweils zwei Spulenseiten miteinander verbinden und die im wesentlichen in Bewegungsrichtung verlaufen, und/oder die Spulenseiten im Achsbereich einen sehr scharfen Knick oder eine enge Kurve vollziehen und danach direkt im wesentlichen auf einen anderen Radius oder auf einer Projektion von diesem verlaufen, der bei maximaler Energieumsetzung im Wirkbereich des entgegengesetzten Poles (10 oder 13 oder 14) liegt, und die in Umfangsrichtung, benachbart liegenden Spulenseiten der Spule in ähnlicher Weise verlaufen, so weit die sie umgebenden Spulenseiten oder axialen Spulenseitenbündel das zulassen und die Grenze für deren Ausdehnung bilden.

2. Luftspule, für rotierende elektrische Maschinen, nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule als Einzelspule aus Draht gewickelt oder Teil einer meanderförmigen oder wellenförmigen Drahtwicklung ist.
3. Luftspule, für rotierende elektrische Maschinen, nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß von der Spule mehrere axiale Spulenlagen, als Spulenbündel, schichtweise die maximale radiale Ausdehnung vollziehen, und die Leiter aus rundem, flachem oder eckigem Spulendraht bestehen.
4. Luftspule, für rotierende elektrische Maschinen, nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule als Flachspule eine spiralförmige Einzelspule (6) oder Teil einer meanderförmigen oder wellenförmigen Flachwicklung ist, und die Flachspulen oder -wicklungen durch Fräsen, Ausstanzen oder Ätzen (galvanisch) hergestellt sind.
5. Luftspule, für rotierende elektrische Maschinen nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß jeder einzelne Leiter einer Flachspule (6) die maximale radiale Ausdehnung vollzieht, und vorzugsweise die Spulenfläche oder mindestens ein Abschnitt davon, geschnitten in Bewegungsrichtung, im wesentlichen mit Leiter ausgefüllt sind.
6. Herstellungsverfahren zum Wickeln von Luftspulen aus Leiterdraht, für rotierende elektrische Maschinen, nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule auf einen Wickeldorn (16) gewickelt wird, dessen Wickelgrundkörper eine kreissegmentförmige oder kreissegmentabschnittsförmige oder rautenförmige Querschnittsfläche im Radialschnitt hat oder Stifte (17), die so angeordnet sind, daß sie beim Wickelvorgang eine solche Querschnittsfläche in der Mitte der Spule freihalten, und dieser Wickelgrundkörper des Dornes von zwei axial zueinander versetzten Körpern (19), vorzugsweise in Plattenform, begrenzt ist, die über dessen Querschnittsfläche hinaus ragen, und einen Wickelraum begrenzen zur Aufnahme der zu wickelnden Spule oder eines entnehmbaren Wickelkörpers als Träger für die zu wickelnde Spule, wobei die bevorzugt plattenförmigen Begrenzungen (19), sowie auch der entnehmbare Wickelkörper, wenn er verwendet wird, axial deckungsgleich sind und Löcher aufweisen, in die beim Wickelvorgang lagenweise vom Innenbereich der Spule zum Außenbereich dieser, Wickelstifte oder -pfosten (17) axial eingesetzt oder durchgeschoben werden, um die ein oder mehrere Spulenlagen gewickelt werden, bevor wieder eine Lage Stifte in die Ecken der nächst größeren

kreissegmentförmigen Spulenfläche eingesetzt oder eingeschoben werden, wobei die Leiter, die die radialen Kanten der Segmentflächen, oder deren Projektion, bilden, und zu verschiedenen Leiterlagen gehören, durch den Versatz der Wickelpfosten (17) der verschiedenen Lagen, gerade verlaufen und parallel versetzt zueinander liegen.

7. Herstellungsverfahren zum Wickeln von Luftspulen aus Leiterdraht, für rotierende elektrische Maschinen, nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule (3) oder (11) direkt auf dem Dorn oder nachdem sie vorfixiert ist und vom Dorn, durch Abnehmen einer Begrenzung (19), entfernt wurde, zu einer selbsttragenden Spule verbacken wird oder sie vergossen wird.

8. Herstellungsverfahren zum Wickeln von Luftspulen aus Leiterdraht, für rotierende elektrische Maschinen, nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Spule z.B. (3,11,20 oder 21) auf dem Dorn vorfixiert wird, vom Dorn, durch Abnehmen einer Begrenzung (19), genommen wird, und anschließend durch eine formgebende Einrichtung dem, in und/oder quer zur Bewegungsrichtung, gebogenen oder gefalteten Luftspalt entsprechend in Form gebracht wird, und sie anschließend die Endfixierung vorzugsweise durch verbacken erhält oder sie vergossen wird.

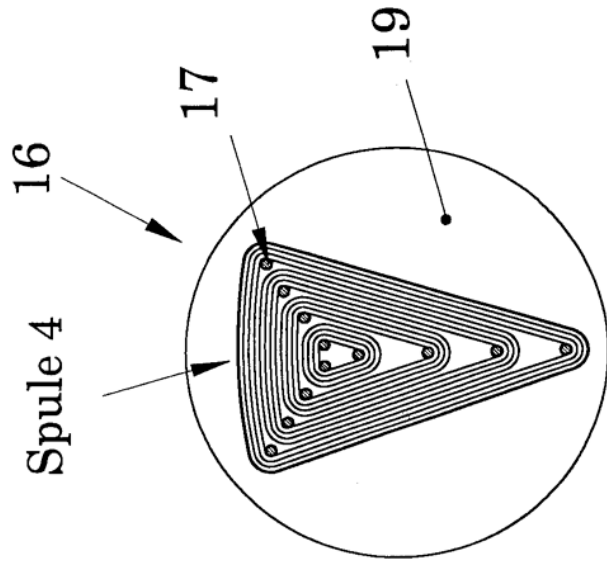


Fig. 2

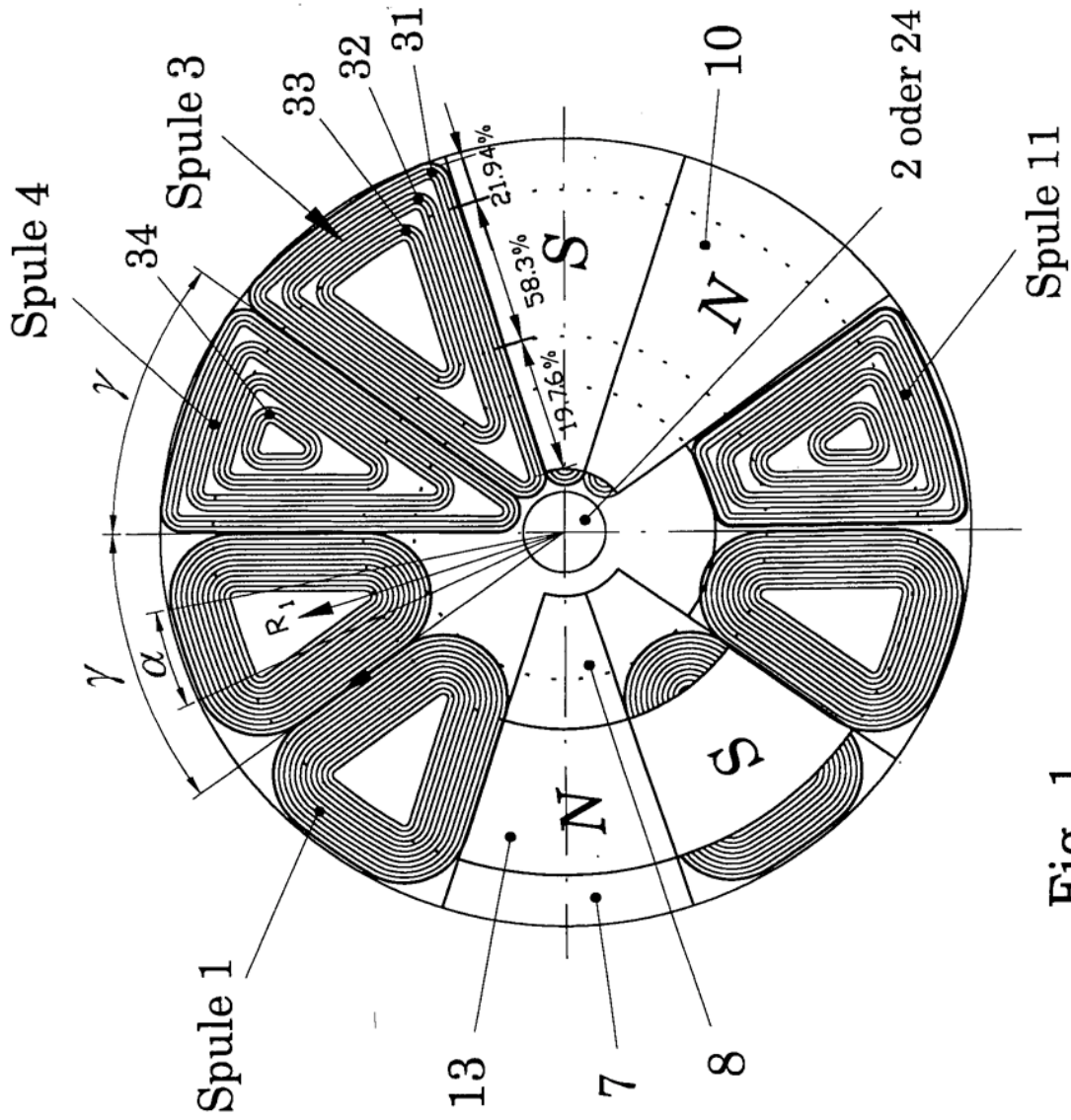


Fig. 1

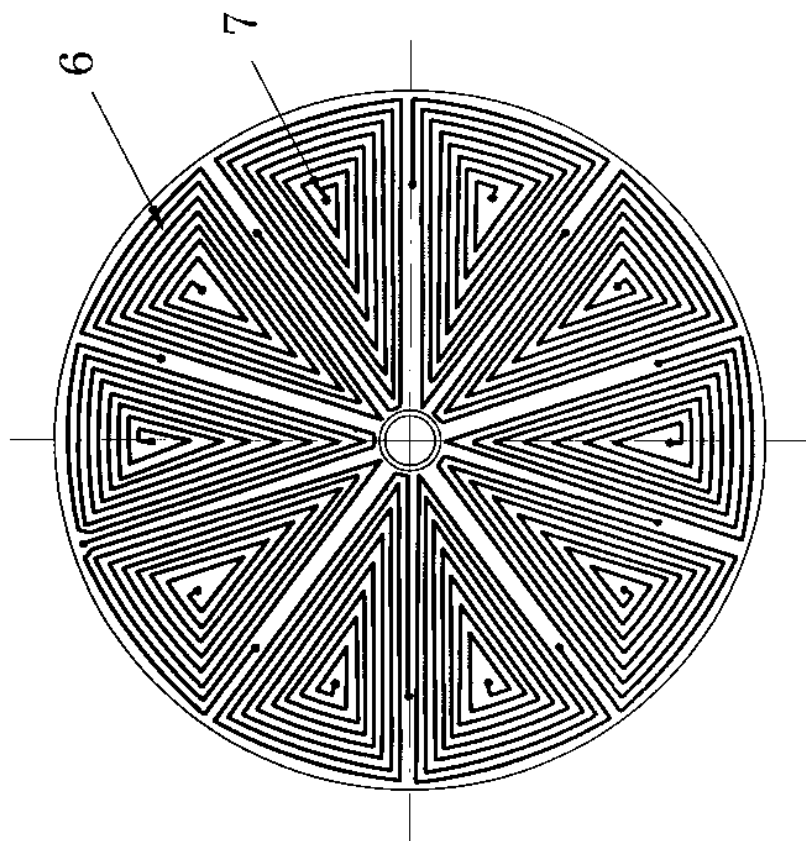


Fig. 3

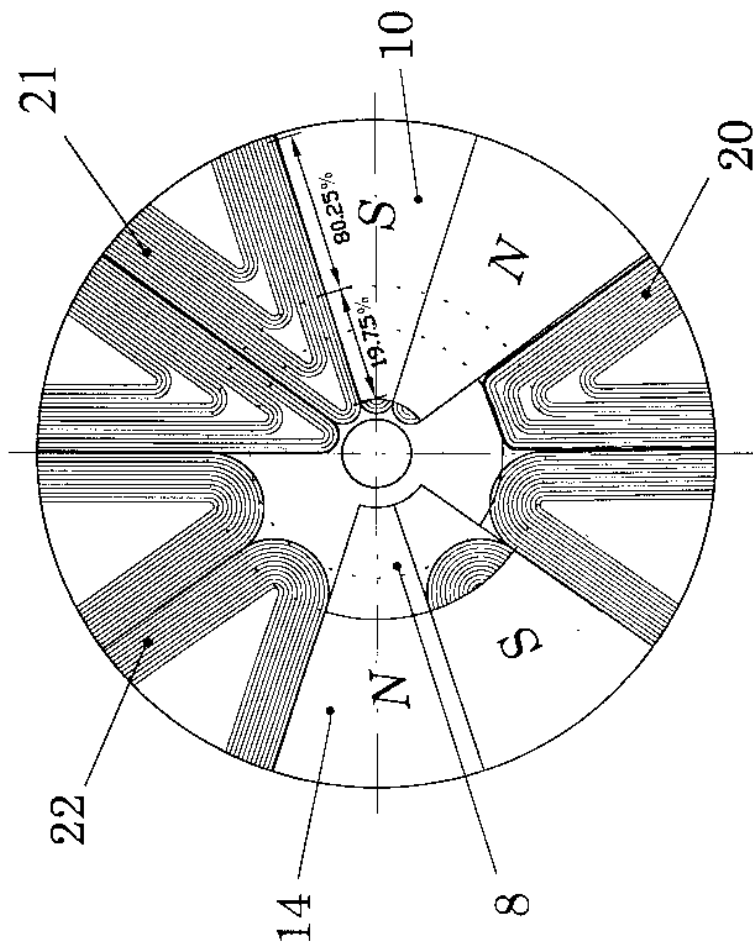


Fig. 4