(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT

(12) **Patentschrift**

(10) **DE 197 19 354 C 2**

(51) Int. Cl.[7]: **G 01 B 7/30**
G 01 D 5/20

(21) Aktenzeichen: 197 19 354.4-42
(22) Anmeldetag: 7. 5. 1997
(43) Offenlegungstag: 12. 11. 1998
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 7. 12. 2000

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

DE 197 19 354 C 2

(73) Patentinhaber:
Tyco Electronics Logistics AG, Steinach, CH

(74) Vertreter:
Klunker, Schmitt-Nilson, Hirsch, 80797 München

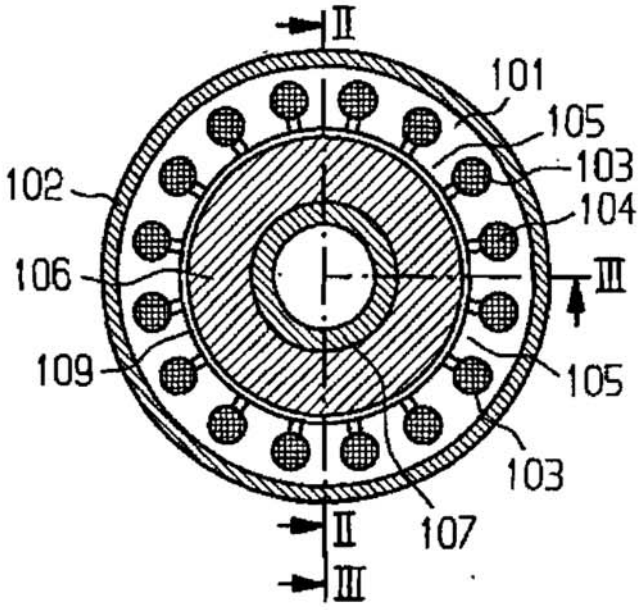
(72) Erfinder:
Logé, Hans, 85630 Grasbrunn, DE; Langen, Achim, Dr., 82049 Pullach, DE; Dr. Hans-Armin Schmid, SERVOWATT, 70839 Gerlingen

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE	36 37 529 C2
DE	31 41 015 C2
DE	1 95 21 300 A1
US	52 43 279
EP	05 22 941 B1
EP	07 09 648 A2

(54) Magneto-elektronischer Winkelsensor, insbesondere Reluktanz-Resolver

(57) Magneto-elektronischer Winkelsensor
– mit einem rotationssymmetrischen, zumindest teilweise ferromagnetischen Stator (101; 201) und einem rotationssymmetrischen, zumindest teilweise ferromagnetischen Rotor (105; 205; 300), die einander unter Bildung eines ringförmigen Luftspaltes (109) gegenüberstehen, wobei sich der magnetische Widerstand im Luftspalt aufgrund einer über den Umfang variierenden Gestaltung des Rotors periodisch ändert,
– mit einem auf dem Rotor (105; 205; 300) oder dem Stator angeordneten Magnetfluß-Sender, der über mindestens ein Polpaar eine vorgegebene Magnetflußverteilung in dem Luftspalt erzeugt,
– mit einem auf dem Stator (101; 201) oder dem Rotor (105; 205; 300) angeordneten Magnetfluß-Empfänger, der über mindestens zwei gegeneinander im Winkel versetzt angeordnete Signalpolpaare die Intensität des Magnetfeldes mißt, wobei aus den beiden Empfänger-Signalen ein Winkelwert für die Relativstellung des Rotors gegenüber dem Stator ableitbar ist,
dadurch gekennzeichnet, daß die Höhe des Luftspaltes (109) zwischen dem Rotor (105; 205; 300) einerseits und dem Stator (101; 201) andererseits über den gesamten Umfang gleichbleibt, während sich die Ausdehnung der den Luftspalt bildenden Rotoroberfläche in axialer Richtung des Rotors (105; 205; 300) mit dem Umfangswinkel nach einer sinusförmigen Funktion verändert, wobei sich die Breite zwischen einer endlichen minimalen Breite (a) und einer maximalen Breite (b) mit mindestens zwei Perioden ändert.



DE 197 19 354 C 2

Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen magneto-elektronischen Winkelsensor, insbesondere Reluktanz-Resolver,

- mit einem rotationssymmetrischen, zumindest teilweise weichmagnetischen Stator und einem rotationssymmetrischen, zumindest teilweise weichmagnetischen Rotor, die einander unter Bildung eines ringförmigen Luftspaltes gegenüberstehen, wobei sich der magnetische Widerstand im Luftspalt aufgrund einer über den Umfang variierenden Gestaltung des Rotors periodisch ändert,
- mit einem auf dem Rotor oder dem Stator angeordneten Magnetfluß-Sender, der über mindestens ein Polpaar eine vorgegebene Magnetflußverteilung in dem Luftspalt erzeugt,
- mit einem auf dem Stator oder dem Rotor angeordneten Magnetfluß-Empfänger, der über mindestens zwei gegeneinander im Winkel versetzt angeordnete Signalpolpaare die Intensität des Magnetfeldes mißt, wobei aus den beiden Empfänger-Signalen ein Winkelwert für die Relativstellung des Rotors gegenüber dem Stator ableitbar ist.

Derartige Winkelsensoren, die auf dem Prinzip einer veränderlichen Magnetflußintensität im Luftspalt zwischen Stator und Rotor basieren, sind in vielfältiger Weise bekannt. Grundsätzlich kommen dabei unterschiedliche Prinzipien zur Erzeugung der magnetischen Durchflutung im Sendeteil und auch unterschiedliche Prinzipien zur Magnetfeldmessung im Empfängerteil in Betracht. Bei Drehmeldern (Resolvern, Synchros), werden elektromagnetische Spulen in Form von Primär- und Sekundärwicklungen verwendet. Daneben kann aber zur Felderzeugung auch ein Dauermagnet eingesetzt werden, während im Empfängerteil magnetfeldabhängige Halbleiterelemente, wie Hall-Elemente oder magnetoresistive Widerstände, für den Signalabgriff in Betracht kommen.

Drehmelder in Form von Resolvern oder Synchros sind seit langem als genaue und robuste Winkelsensoren bekannt. Bei konventionellen aktiven Resolvern trägt der Stator normalerweise die Sekundärwicklungen, während die Primärwicklung auf dem Rotor angeordnet ist. Die Stromzufuhr zu der Rotorwicklung muß dabei entweder über Schleifringe oder berührungslos über einen Transformatorteil mit entsprechenden zusätzlichen Wicklungen erfolgen. Dieser Transformatorteil erhöht somit die Herstellkosten und die Baugröße.

Daneben sind auch bereits sogenannte (passive) Reluktanz-Resolver bekannt, bei denen sowohl die Primärwicklung als auch die Sekundärwicklungen im Stator untergebracht sind, während der Rotor wicklungslos (passiv) lediglich mit weichmagnetischen Teilen den Magnetflußkreis beeinflußt. Durch eine ungleichmäßige Gestaltung des weichmagnetischen Rotors wird so der Magnetfluß zwischen der Primärwicklung und den Sekundärwicklungen im Stator unterschiedlich beeinflußt, woraus sich über die Induktion die Winkelstellung des Rotors ableiten läßt. Solche Reluktanz-Resolver sind wegen des Fehlens eines aktiven, mit Wicklungen versehenen Rotors und der damit verbundenen Einsparung eines Transformatorteils kostengünstiger herzustellen; doch konnte man mit ihnen bisher keine vergleichbare Meßgenauigkeit wie bei den vorher genannten Resolvern mit aktiven Rotoren erreichen.

Ein Reluktanz-Resolver der eingangs genannten Art ist beispielsweise aus der EP-0522941-B1 bekannt. Bei dem dort beschriebenen Resolver wird die Variation des magnetischen Widerstandes durch einen keulen- oder nierenförmigen Rotor erreicht, wobei also die Höhe des Luftspaltes zwischen dem Rotorumfang einerseits und den Statorzähnen andererseits sich mit dem Umfangswinkel stark ändert. Da bei dieser Konstruktion also die Luftspalthöhe in Radialrichtung allein maßgebend für die magnetische Kopplung der verschiedenen Wicklungen ist, wirken sich Toleranzen, insbesondere ein Radialversatz, besonders stark auf die Meßgenauigkeit aus. Daneben sind auch Resolver mit exzentrisch gestaltetem Rotor bekannt.

Aus DE 31 41 015 C2 ist ein Reluktanz-Resolver bekannt, bei welchem der Luftspalt zwischen Rotor und Stator über dem gesamten Umfang gleichbleibt und sich die Reluktanz zwischen Rotor und Stator mit dem Rotationswinkel nach einer sinusförmigen Funktion verändert. Die DE 31 41 015 C2 bezieht sich jedoch nur auf passive Reluktanz-Resolver, nicht aber auch auf aktive Resolver mit auf dem Rotor angeordneter Erregerwicklung. In EP 0 709 648 A2 ist eine Vorrichtung zur Bestimmung der relativen Verdrehung zwischen einem Rotor und einem Stator beschrieben, wobei der Rotor einen Magnetfluß-Sender und der Stator einen Magnetfluß-Empfänger aufweist. Der Magnetfluß-Sender besteht im wesentlichen aus einer Erregerwicklung, deren Windungen in einem sinusförmigen Muster entlang des Rotorumfanges angeordnet sind. Da die Luftspalthöhe zwischen Rotor und Stator entlang des Umfanges nicht konstant ist, weist der aus EP 0 709 648 A2 bekannte aktive Resolver eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber einem radialen Versatz des Rotors auf.

Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, einen Winkelsensor zu schaffen, bei dem die Kopplung zwischen Stator und Rotor mit größerer Genauigkeit möglich ist. Vorzugsweise soll auf diese Weise ein Reluktanzresolver mit erhöhter Genauigkeit geschaffen werden; doch ist auch eine Anwendung auf Resolver mit aktivem Rotor oder auf Winkelsensoren mit anderen magnetoelektronischen Meßprinzipien möglich.

Erfindungsgemäß wird das genannte Ziel dadurch erreicht, daß die Höhe des Luftspaltes zwischen dem Rotor einerseits und dem Stator andererseits über den gesamten Umfang gleichbleibt, während sich die Ausdehnung der den Luftspalt bildenden Rotoroberfläche in axiale Richtung des Rotors mit dem Umfangswinkel nach einer sinusförmigen Funktion verändert, wobei sich die Breite zwischen einer endlichen minimalen Breite (a) und der maximalen Breite (b) mit mindestens zwei Perioden ändert.

Durch eine derartige Änderung der wirksamen Breite der Rotoroberfläche ändert sich ebenfalls der magnetische Widerstand in dem Luftspalt zwischen einem Maximalwert und einem Minimalwert nach einer stetigen Sinusfunktion.

Bei dem erfindungsgemäßen Winkelsensor wird also die Induktion des durch den Sender erzeugten Flusses im Empfänger durch den winkelabhängigen magnetischen Widerstand (die Reluktanz) des Rotors moduliert. Dabei wird im Gegensatz zu herkömmlichen Reluktanz-Resolvern der Luftspalt nicht in seiner Höhe (Abstand zwischen Rotor und Stator), sondern in seiner Breite verändert, wodurch also die Luftspaltfläche entsprechend dem Drehwinkel variiert wird. Diese Änderung der Luftspaltfläche ist weniger empfindlich gegenüber einem radialen Versatz des Rotors (bei konzentrischer Anordnung von Stator und Rotor), und es läßt sich über den gesamten Drehwinkelbereich ein hochgenaues Winkelsignal erzeugen, da der Rotor über den gesamten Umfang dem Stator mit einem engen Luftspalt gegenübersteht, bei dem sich lediglich die Fläche verändert.

Die Erfindung wird bevorzugt bei einem (passiven) Reluktanz-Resolver angewendet, der in an sich bekannter Weise so aufgebaut ist, daß der weichmagnetische Stator

eine vorgegebene Anzahl von Nuten und Zähnen abwechselnd über den Umfang verteilt aufweist, daß in den Nuten des Stators eine Primärwicklung angeordnet ist, welche durch in Reihe geschaltete, abwechselnd gegensinnige Teilwicklungen eine vorgegebene Anzahl von Polpaaren bildet, daß in den Nuten ferner zwei Sekundärwicklungen angeordnet sind, welche gegeneinander im Winkel versetzt sind und durch in Reihe geschaltete, abwechselnd gegensinnige Teilwicklungen jeweils Polpaare bilden, deren Anzahl sich von derjenigen der Primärwicklung um einen ganzzahligen Faktor unterscheidet, wobei der weichmagnetische Rotor die Breite seiner Oberfläche, welche den ringförmigen Luftspalt mit den Zähnen des Stators bildet, mit einer der Speed-Zahl (n) des Winkelsensors entsprechenden Periodenzahl ändert.

Die Speedzahl oder Signalpolpaarzahl n bezeichnet in bekannter Weise die Zahl der vollständigen Perioden, die das an den Sekundärwicklungen abgreifbare elektrische Signal bei einer vollständigen mechanischen Umdrehung (360°) des Rotors durchläuft. Das bedeutet, daß bei einem Ein-Speed-Resolver der elektrische Winkel dem mechanischen Umdrehungswinkel entspricht, während bei einem Drei-Speed-Resolver der elektrische Winkel von 360° bereits bei einer mechanischen Umdrehung von 120° erreicht ist.

In einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Resolvers sind die Primärwicklung und die Sekundärwicklungen jeweils durch einzelne Teilwicklungen gebildet, welche als Einzelspulen mit jeweils gleichen Windungszahlen auf die Zähne des Stators aufgebracht sind. In diesem Fall sind die Pole der Wicklungen jeweils bestimmten Zähnen des Stators zugeordnet.

Bei den einzelnen Teilwicklungen kann man sich einen besonderen Vorteil der erfindungsgemäßen Rotorform zunutze machen. Da durch das Abtasten der sinusförmig sich ändernden Rotorbreite durch den jeweiligen Statorzahn in jedem Fall eine Sinus-Amplitudenfunktion entsteht, die unabhängig von der Nutbreite bzw. von der Zahnbreite ist, ist die Gestaltung der Nuten und Zähne im Stator weniger kritisch als bei herkömmlichen Resolvern. Man kann deshalb relativ große Nutbreiten in Verbindung mit schlankerer Zähnen verwenden, die das Aufstecken einzelner vorgefertigter Spulen ermöglichen. Dadurch ergibt sich eine preisgünstige Herstellungsmöglichkeit der Statorwicklungen.

In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, daß die Teilwicklungen der Primärwicklungen und der Sekundärwicklungen jeweils durch ungleich über den Umfang verteilte Windungen zwischen den einzelnen Nuten gebildet sind, derart, daß die effektiven Windungszahlen in den aufeinanderfolgenden Nuten annähernd einer Sinuskurve mit einer der Polpaarzahl der jeweiligen Wicklung entsprechenden Anzahl von Perioden folgen. Auf diese Weise ergibt sich eine gewichtete Addition der induzierten Spannungen über den Umlaufwinkel des Stators. In diesem Fall ist auch keine direkte Zuordnung zwischen den Wicklungspolen und den Zähnen des Stators erforderlich. Vorzugsweise ist in diesem Fall die Nutenzahl m ein nicht ganzzahliges Vielfaches der Signalpolpaarzahl (Speed-Zahl) n. Das nicht ganzzahlige Verhältnis von Nuten pro Polpaar ist dabei von Vorteil, da dadurch jedes Polpaar eine andere Verteilung aufweist und, da stets alle Pole im Eingriff sind, eine Mittelwertbildung erfolgt.

Der Rotor besitzt vorzugsweise eine amagnetische Welle, insbesondere eine Hohlwelle, auf der ein Rotorkörper in Form eines weichmagnetischen Rings mit sich periodisch ändernder axialer Ausdehnung angeordnet ist. In anderer Ausgestaltung können anstelle eines durchgehenden weichmagnetischen Rings auch einzelne, annähernd linsenförmige Rotorkörper gegeneinander versetzt und möglicherweise teilweise überlappend derart angeordnet sein, daß ihre Luftspaltoberflächen in der Summe eine sich sinusförmig ändernde Ausdehnung quer zur Luftspalthöhe besitzen. Natürlich sind auch diese Einzel-Rotorkörper über einen weichmagnetischen Ringabschnitt untereinander magnetisch leitend verbunden. In jedem Fall kann der jeweilige Rotorkörper aus laminierten feinen Blechen gebildet sein.

Die Erfindung wird nachfolgend an Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigt

Fig. 1 einen erfindungsgemäß gestalteten Reluktanz-Resolver im Querschnitt,

Fig. 2 den Reluktanz-Resolver von **Fig.** 1 in einem Axialschnitt II-II;

Fig. 3 den Rotor aus den **Fig.** 1 und 2 in einer Ansicht III-III, zur Hälfte axial geschnitten;

Fig. 4 eine Abwicklung des Umfangs des Rotors von **Fig.** 3 über 360°;

Fig. 5 eine schematische Darstellung eines 3-Speed-Resolvers mit zwölf Nuten in der Abwicklung über 360°, wobei die räumliche Zuordnung der auf den einzelnen Zähnen angeordneten Einzelspulen zueinander und zum Rotor gezeigt ist;

Fig. 6 eine grundsätzliche Anordnung eines Stators, in dessen Nuten Teilwicklungen mit unterschiedlichen, gemäß einer Sinuskurve verteilten Windungszahlen angeordnet sind;

Fig. 7 eine graphische Darstellung des Verlaufes der Windungszahlen aus **Fig.** 6 über der zugehörigen Nutenzahl;

Fig. 8 und 9 die annähernd sinusförmige Verteilung der Windungszahlen für eine Primärwicklung und zwei Sekundärwicklungen bei einem Resolver gemäß **Fig.** 1;

Fig. 10 den Verlauf der Rotorbreite im Luftspalt bei einem passiven Reluktanz-Resolver;

Fig. 11 die Transformation des Breitenverlaufs gemäß **Fig.** 10 auf einzelne linsenförmige Rotorkörper in einer Abwicklung über 360°;

Fig. 12 ein Eisenblech zur Herstellung eines Rotorkörpers gemäß **Fig.** 11;

Fig. 13 und 14 einen aktiven Rotor mit einer Sendewicklung und erfindungsgemäß gestalteten Zähnen in perspektivischer Darstellung und im Querschnitt (für einen Drei-Speed-Resolver);

Fig. 15 den Breitenverlauf einer erfindungsgemäß gestalteten Rotoroberfläche für einen aktiven Resolver mit einer Periode über den Umfang (für einen Ein-Speed-Resolver);

Fig. 16 die Transformation des Breitenverlaufs von **Fig.** 15 auf getrennte linsenförmige Rotorkörper (für einen Ein-Speed-Resolver);

Fig. 17 die schematische Darstellung eines Statorsegmentes eines erfindungsgemäßen Resolvers mit angedeuteten Umrissen eines linsenförmigen Rotorkörpers;

Fig. 18 ein abgewandeltes Statorsegment mit aufgesteckten Einzelspulen;

Fig. 19 einen Schnitt durch einen Zahn des Statorsegmentes von **Fig.** 18;

Der in den **Fig.** 1 und 2 im Schnitt gezeigte Drehmelder oder Resolver ist als Hohlwellen-Resolver ausgebildet. Er besitzt einen Stator **101** in einem ringförmigen Gehäuse **102**. In den Stator **101** sind über den Umfang verteilt Nuten **103** eingearbeitet, welche mit Wicklungen **104** versehen sind. Die Wicklungen sind als Primärwicklung und als Sekundärwicklungen geschaltet, was im einzelnen später noch erläutert werden wird. Zwischen den Nuten **103** bildet der Stator Zähne **105**. Innerhalb des Stators **101** ist koaxial ein Rotor **106** angeordnet. Dieser besteht aus einer Hohlwelle **107** aus nichtferromagnetischem Material und einem ringförmigen, weichmagnetischen Rotorkörper **108**, dessen Außenumfang mit dem Innenumfang des Stators einen engen Luftspalt **109** bildet. Wie in der teilweise geschnittenen

Draufsicht von **Fig.** 3 und in der Abwicklung von **Fig.** 4 zu sehen ist, besitzt der Rotorkörper zwar über den gesamten Umfang eine gleichbleibende Höhe h, wodurch auch die Höhe des Luftspaltes **109** über den gesamten Umfang gleich bleibt, jedoch eine variable Breite. Diese Breite B des Rotorkörpers ändert sich über den Umfang des Rotors mit dem Winkel φ nach einer Sinusfunktion zwischen einer minimalen Breite a und einer maximalen Breite b, z. B. nach der folgenden Beziehung:

$$B(\varphi) = (b-a) \cdot \sin^2 \left(\frac{\varphi \cdot n}{2} \right) + a ,$$

wobei n die Speedzahl des Resolvers ist.

Im vorliegenden Beispiel handelt es sich um einen 3-Speed-Resolver, also mit einer Speedzahl oder Signalpolpaarzahl n = 3; dementsprechend hat auch der Breitenverlauf des Rotorkörpers **108** drei Perioden über den Gesamtumfang von 360 Winkelgraden.

Die Schaltung und Funktion eines Drehmelders mit einem Rotor gemäß den **Fig.** 3 und 4 wird anhand von **Fig.** 5 allgemein erläutert, wobei im Beispiel von **Fig.** 5 der Stator anders als in **Fig.** 1 nur zwölf Nuten und zwölf Zähne besitzt. Die Primärwicklung und die Sekundärwicklungen sind bei dem Beispiel von **Fig.** 5 als Einzelspulen mit jeweils gleichen Windungszahlen auf die einzelnen Zähne gesetzt. Es gibt hierbei also eine genaue Zuordnung der einzelnen Zähne zu den durch die Wicklungen gebildeten Magnetpole.

Fig. 5 zeigt also im oberen Teil schematisch die Abwicklung eines Stators **201** mit zwölf Nuten **203**, über denen jeweils die Nutenzahl **1** bis **12** angegeben ist, und mit zwölf dazwischen gebildeten Zähnen **205**. Auf jedem Zahn sind zwei Teilwicklungen in Form von Einzelspulen angeordnet, nämlich eine Primärspule S_{prim} und eine oder zwei Sekundärspulen S_{sec} (Zeile 5.1).

Es handelt sich bei dem dargestellten Beispiel um eine sog. Sparschaltung, wobei also jeder Zahn nur entweder eine Sinuswicklung oder eine Kosinuswicklung trägt. In gleicher Weise wäre es aber möglich, jeden Zahn mit jeweils einer Sinus- und einer Kosinuswicklung zu versehen. Das würde bedeuten, daß jeweils auf zwei benachbarten Zähnen zwei gleichsinnige Sekundärwicklungen säßen, so daß die Speedzahl gleich bliebe. Mit einer solchen Wicklungsanordnung ließe sich eine höhere Störsicherheit erzielen.

Die Verschaltung der Einzelspulen ist in den Zeilen 5.2 und 5.4 über der Winkelteilung (Zeile 5.5) gezeigt:

Die Zeile 5.2 zeigt die Primärwicklung (Erregerwicklung). Sie besteht aus vier mal drei in Reihe geschalteten Spulen S_{prim} mit jeweils gleicher Windungszahl, jedoch wechselt von Spule zu Spule der Wickelsinn (durch Pfeile dargestellt). Bei diesem Beispiel mit einem 3-Speed-Resolver (Signalpolpaarzahl 3) besitzt die Erregung also sechs Polpaare, d. h. doppelt so viele wie die Signalpolpaarzahl.

In Zeile 5.4 sind die Sekundärwicklungen S_{sec}, also die Sinus-Wicklung und die Kosinus-Wicklung, dargestellt. Pro Polpaar bestehen sie aus jeweils zwei gegensinnig gewickelten Spulen mit gleicher Windungszahl, die räumlich über einen Winkel von 180°/n (n = Signalpolpaarzahl) angeordnet sind. Die Sinus-Wicklung ist gegenüber der Kosinus-Wicklung um einen Winkel von 90°/n verschoben; ihre Einzelspulen sind also jeweils abwechselnd zwischen den Kosinus-Spulen angeordnet. An der Primärwicklung liegt die Erregerspannung U_E mit einer üblichen Wechselstromfrequenz an. An den Sekundärwicklungen werden die Sinus-Spannung U_{sin} und die Kosinus-Spannung U_{cos} als Winkelsignale abgegriffen.

In Zeile 5.3 ist der Rotor **105** dargestellt. Die weichmagnetische, über den Umfang dreimal (entsprechend der Speed-Zahl n = 3) sinusförmig in ihrer Breite an- und abschwellende Rotorpolfläche bewirkt eine variable Kopplung zwischen den einzelnen Primär- und Sekundärspulen. In **Fig.** 5.3 ist der Rotorkörper **105** (etwas abweichend von **Fig.** 4) in einer Rotorlage von 0° gezeigt: Das Spulenpaar c^+ erfährt eine maximale Kopplung K_{max}, während die Kopplung K_{min} bei dem Spulenpaar c^- minimal ist; damit ist Kosinus 0° = +1. Die Kopplungen in den Spulenpaaren s^+ und s^- sind dagegen gegensinnig gleich stark; die in den entsprechenden Sekundärspulen induzierten Spannungen sind somit gleich groß und heben sich auf: sin0° = 0. Wird der Rotor verdreht bzw. in der Abwicklung in Pfeilrichtung verschoben, so nehmen die Kopplungen der Spulenpaare von c^- und s^+ zu, während sie bei c^+ und s^- abnehmen. $U_{cos} = U_{c+} - U_{c-}$ verringert sich somit, während $U_{sin} = U_{s+} - U_{s-}$ positiv wird.

Die Zeile 5.5 zeigt die zugehörige Abwicklung des vollen Winkelbereichs von 0° bis 360°. Wie erwähnt, ist im Beispiel von **Fig.** 5 ein 3-Speed-Resolver gezeigt. Für andere Signalpolpaarzahlen ist die Winkelzuordnung entsprechend anzupassen.

Um nun die Genauigkeit der Winkelmessung noch zu verbessern, kann anstelle der genauen Zuordnung von Magnetpolen zu Statorzähnen mit stets gleichen Einzelspulen auf den Zähnen auch eine andere Verteilung der Wicklungen gewählt werden. So hat es sich als zweckmäßig erwiesen, anstelle der in **Fig.** 5 gezeigten diskreten Pole zu sinusverteilten Wicklungen überzugehen und damit auch im Stator eine Sinus-Maßverkörperung zu schaffen. Hierzu werden statt der eben beschriebenen Primär-Sekundär-Spulenpaare, die auf mechanischen Einzelpolen (Zähnen) sitzen, sinusförmige Wicklungsverteilungen benutzt. So ist es zum Beispiel möglich, in einem Stator mit 16 Nuten, wie in **Fig.** 1 gezeigt, die verschiedenen Wicklungen so zu verteilen, daß drei oder sechs Polpaare mit näherungsweise sinusförmiger Verteilung der Windungszahlen und somit auch einer entsprechend sinusförmigen Verteilung des magnetischen Flusses bzw. der induzierten Spannungen entstehen, obwohl die Zahl 16 weder durch 3 noch durch 6 teilbar ist. Das nicht ganzzahlige Verhältnis von Nuten pro Polpaar ist sogar von Vorteil, da auf diese Weise jedes Polpaar eine andere Verteilung aufweist und, weil stets alle Pole im Eingriff sind, eine Mittelwertbildung für die Flußverteilung und Spannungskurven erfolgt.

Eine vereinfachte Art der Realisierung einer Sinusverteilung für eine Wicklung ist in **Fig.** 6 und 7 gezeigt. Zur Vereinfachung ist in **Fig.** 6 ein Satz parallel angeordneter Teilwicklungen gezeigt. Die Nuten sind durchlaufend von 1 bis 16 (Nutenzahl N) numeriert. So ist von der Nut **1** zur Nut **15** eine Teilwicklung mit der Windungszahl w = 39, von der Nut **2** zur Nut **14** eine Teilwicklung mit 30 Windungen, von der Nut **13** zur Nut **3** eine Teilwicklung mit 16 Windungen usw. angeordnet. Trägt man gemäß **Fig.** 7 die einzelnen Windungszahlen über der Nutabwicklung auf, so läßt sich durch die einzelnen Punkte dieser Windungszahlen eine Sinuskurve mit drei Polpaaren ziehen. Würde man die einzelnen Punkte jeweils mit Geraden verbinden, so ergäbe sich natürlich eine von der Sinusform relativ stark abweichende Form, doch ergibt sich für den Magnetfluß und für die abzugreifenden Spannungen wegen der bereits erwähnten Mittelwertbildung über alle Polpaare eine brauchbare Sinusverteilung. Eine solche, in der Praxis für einen Stator gemäß **Fig.** 1 erreichbare Wicklungsverteilung ist in **Fig.** 8 für die Primärwicklung und in **Fig.** 9 für die Sekundärwicklungen (Sinus und Kosinus) gezeigt. Hierfür ist es zweckmäßig, von der parallelen Anordnung einzelner Spulen gemäß **Fig.** 6 abzugehen und auch die Teilwicklungen über verschiedene Nuten zu verteilen. Im Prinzip ist nämlich nur die effektive Anzahl der Windungen in den einzelne Nuten, d. h., die

Summe der in eine Nut hineinführenden Windungen abzüglich der Summe der aus der Nut herauskommenden Windungen, maßgebend. Wie die effektiven Nutwindungszahlen gebildet werden, ist dagegen lediglich für den Fertigungsprozeß von Bedeutung, da manche Wickelschemata für bestimmte Wickelverfahren besser geeignet sind als andere.

Die Sinusform des Rotorkörpers kann nicht nur in der in den **Fig.** 4 und 5 gezeigten Gestalt, sondern auch auf andere Weise erreicht werden. So ist es beispielsweise möglich, anstelle des durchgehend an- und abschwellenden Bandkörpers jeweils annähernd linsenförmige Einzelkörper zu verwenden, die jeweils allein oder einander überlappend gemeinsam die gewünschte Breite der Polfläche des Rotors ergeben.

Um eine optimale Wirkung zu erzielen, wird die Sinusfunktion für die Breite des Rotorkörpers unterschiedlich gewählt, je nach dem, ob es sich um einen aktiven Rotor (mit Wicklungen) oder um einen passiven Rotor, bei dem alle Wicklungen im Stator liegen, handelt. **Fig.** 10 zeigt den Verlauf der Rotorbreite nach der Funktion

$$X = \sin^2 \left(\frac{\varphi \cdot n}{2} \right)$$

aufgetragen über einem vollständigen Kreisumfang 2π, wie er für einen passiven Rotor in einem Reluktanz-Resolver zweckmäßig ist. Es handelt sich dabei um einen Drei-Speed-Resolver (n = 3), wobei der passive Rotor drei vollständige Perioden des Sinusverlaufs über den Umfang von 2π besitzt. Da der passive Resolver keine negativen Polbereiche hat, liegt der gesamte Sinusverlauf auf der positiven Seite der Nullachse. Der Öffnungswinkel der einzelnen ferromagnetischen Bereiche ist in diesem Fall $\alpha = 0°$.

In **Fig.** 11 ist die Transformation der Kurve von **Fig.** 10 auf einzelne linsenförmige Rotorkörper **208** schematisch dargestellt. Es ergeben sich also drei Rotorkörper **208**, die über den Umfangsverlauf von $\varphi = 2\pi$ auf einer Rotorwelle **207** angeordnet sind. Diese Einzel-Rotorkörper **208** ergeben aneinandergereiht den Kurvenverlauf von **Fig.** 10. Dieser ist im Prinzip so wie in **Fig.** 4 dargestellt, wobei lediglich die Mindestbreite a in **Fig.** 11 nicht berücksichtigt ist. Diese könnte jeweils am Rand an die dargestellten Rotorkörper **208** angefügt werden. Aufgrund des Öffnungswinkels $\alpha = 0°$ der einzelnen Rotorkörper **208** ergibt sich, daß die Fläche und der Verlauf dieser Rotorkörper **208** identisch ist mit den jeweils dazwischenliegenden Luft-Abschnittsflächen **209**. Das heißt, daß die ferromagnetischen Abschnitte **208**, die den Luftspalt gegenüber dem Stator bilden, als auch die dazwischenliegenden Luftabschnitte **209** an jeder Stelle die gleiche Länge l in Umfangsrichtung als auch an ihren Enden den gleichen Öffnungswinkel $\alpha = 0°$ aufweisen. So ist es möglich, einen derartigen Rotor aus lauter feinen Blechen **210** zu schichten, die an ihrem Umfang die vorstehenden ferromagnetischen Abschnitte **208** mit der Umfangslänge bzw. einem Umfangswinkel von 60° aufweisen, während die zwischenliegenden zurückgesetzten Luft-Abschnitte **209** denselben Winkelbereich von 60° einnehmen. Bei dem im Beispiel gezeigten Drei-Speed-Resolver handelt es sich also um drei gleiche ferromagnetische Abschnitte **208** und entsprechend drei gleiche Luftabschnitte **209**. Durch leicht versetzte Aufeinanderstapelung einer Vielzahl derartiger Bleche **210** ergibt sich der in **Fig.** 11 gezeigte Formverlauf der linsenförmigen Rotorkörper **208**. Wie bereits vorher erwähnt, können der oder die Rotorkörper natürlich auch durch andere Bearbeitung gewonnen oder zum Feinabgleich nachträglich bearbeitet werden. Auch im Fall einer solchen Bearbeitung wird die Luftspalthöhe gegenüber dem Stator nicht angetastet, vielmehr die Polfläche des Rotors in der Breite verändert.

Wie eingangs bereits erwähnt wurde, kann ein erfindungsgemäß gestalteter Rotor auch mit Wicklungen versehen werden, so daß er als aktiver Rotor, vorzugsweise als Sender, mit einem entsprechenden Stator zusammenwirken kann. In den **Fig.** 13 und 14 ist schematisch in perspektivischer Darstellung und in einem Schnitt der Aufbau eines derartigen Rotors gezeigt. Dieser Rotor **300** besitzt eine Rotor-Hohlwelle **301**, auf der ein ferromagnetischer Rotorkörper **302** durch Nuten **303** in einzelne Zähne **304** unterteilt ist. Diese Zähne **304** sind wiederum nach einer Sinusfunktion, die später noch genauer erläutert wird, so geformt, daß ihre dem Luftspalt zugewandte Polfläche sich mit dem Winkel periodisch ändert. Jeder Zahn **304** trägt eine Teilwicklung **306**, wobei die Wicklungen der aufeinanderfolgenden Zähne **304** jeweils abwechselnd entgegengesetzt gewickelt sind. In der Zeichnung sind die Wicklungen nur schematisch angedeutet, außerdem ist der jeweilige Wickelsinn in **Fig.** 13 durch Pfeile angezeigt. Die einzelnen Zähne **304** besitzen im Bereich der Nuten Hinterschneidungen **306**, in denen die Wicklungen gehalten werden. Durch die sinusförmige Gestaltung der Zähne sind die Nuten verhältnismäßig breit, so daß eine automatische Bewicklung möglich ist.

Ansonsten besitzt der Rotor **300** zur Stromzuführung für die Wicklungen **305** einen Transformatorteil **307** mit einer Transformatorwicklung **308**. Derartige Transformatorteile sind bei Drehmeldern üblich, so daß eine genauere Darstellung oder Beschreibung hier nicht erforderlich ist. Der Rotor **300** wird mit einem entsprechenden Stator, etwa gemäß **Fig.** 1, verbunden, wobei in diesem Fall, wenn der Rotor die Primärwicklung trägt, der Stator nur die Sekundärwicklungen des Empfängers aufzunehmen hat. Theoretisch wäre natürlich auf eine umgekehrte Anordnung – mit Senderwicklung auf dem Stator und Empfängerwicklungen auf dem Rotor – denkbar, doch ist eine derartige Verteilung wegen der aufwendigen Stromzuführung zum Rotor unwirtschaftlich.

Die optimale Sinusform der Rotoroberfläche bei dem aktiven Rotor gemäß den **Fig.** 13 und 14 ist in den **Fig.** 15 und 16 gezeigt. Der Einfachheit halber ist in den **Fig.** 15 und 16 der Breitenverlauf für einen Ein-Speed-Resolver gezeigt, während in den **Fig.** 13 und 14 ein Drei-Speed-Resolver dargestellt ist. Bei diesem aktiven Rotor ändert sich die Rotorbreite am Luftspalt nach der Beziehung $X = \sin\varphi$ bzw. bei einem Mehrspeed-Resolver $X = \sin n\varphi$. Eine Periode des Breitenverlaufs hat dabei jeweils einen positiven und einen negativen Bereich, wobei der Öffnungswinkel $\alpha = 45°$ ist. Transformiert man diese Form gemäß **Fig.** 16 auf einzelne linsenförmige Rotorkörper, so erkennt man, daß diese Rotorkörper **304** eine etwas andere Gestalt als die Rotorkörper **208** von **Fig.** 11 besitzen. Zwischen den einzelnen Rotorkörpern **304** liegt jeweils ein Luft-Abschnitt **303**, der in diesem Fall auch in der Fläche eine andere Form besitzt und kleiner ist als die benachbarten ferromagnetischen Rotorkörper. Der Unterschied ist dadurch bedingt, daß bei diesem aktiven Rotor die Rotorkörper abwechselnd mit entgegengesetzten Wicklungen versehen werden, so daß jeweils zwei benachbarte Rotorkörper ein Polpaar ergeben. Bei dem in **Fig.** 16 eingestellten Ein-Speed-Rotor sind also zwei Rotorkörper **304** vorhanden, während bei einem Drei-Speed-Rotor entsprechend sechs Rotorkörper zur Erzeugung von drei Polpaaren vorhanden sind, wie in den **Fig.** 13 und 14 gezeigt.

Die Funktion des Rotors gemäß **Fig.** 13 und 14 ergibt sich ohne weiteres aus der vorhergehenden Beschreibung. Die aus den Teilwicklungen **305** zusammengesetzte Primärwicklung des Rotors wird mit einem Sendesignal einer bestimmten Frequenz beaufschlagt, wobei im Stator wie in herkömmlichen Drehmeldern entsprechende Sekundärsignale abgegriffen und ausgewertet werden können. Durch

die erfindungsgemäße sinusförmige Flächenverteilung der dem Luftspalt zugewandten Rotoroberflächen, d. h. der Zahn-Oberflächen, wird jedoch das Rotorsignal entsprechend moduliert, wodurch sich eine genauere Abtastung der Winkelstellung vornehmen läßt.

Anhand der **Fig.** 17 bis 19 soll noch schematisch ein allgemeiner Vorteil der erfindungsgemäßen Rotorgestaltung erläutert werden. **Fig.** 17 zeigt schematisch ein Segment eines Stators **401** mit einzelnen Zähnen **402**, die am Luftspalt die Breite D besitzen, während die zwischenliegenden Nuten **403** jeweils am Luftspalt eine Breite von d aufweisen. Auf den Zähnen sind Wicklungen **404** angeordnet, die in entsprechend aufwendiger Technik durch die engen Nuten **403** eingefädelt werden müssen. Außerdem ist in **Fig.** 17 schematisch der Sinusverlauf eines linsenförmigen Rotorkörpers **408** angedeutet, der erfindungsgemäß entweder gemäß **Fig.** 11 oder gemäß **Fig.** 16 gestaltet ist, je nach dem, ob es sich um einen aktiven oder passiven Rotor handelt. Es gilt nämlich die folgende Aussage grundsätzlich für beide Rotorformen. Durch das Abtasten eines Zahnes **402** an dem Breitenverlauf des Rotorkörpers **408** mit seiner Sinusfunktion entsteht in der Spule um den Zahn ein sinusförmiger Amplitudenverlauf, und zwar unabhängig von der Nutbreite d bzw. der Zahnbreite D. Das heißt, daß die Nut nicht in dem Maße wie bei herkömmlichen Resolvern als Fehler in das Empfängersignal eingeht. Es besteht deshalb auch nicht mehr der Zwang, wie bisher die Nut möglichst klein zu machen, um dadurch den Nutfehler gering zu halten.

Daraus ergibt sich, daß mit der erfindungsgemäßen Rotorgestaltung breitere Nuten und entsprechend schlankere Zähne im Stator verwendet werden können, so daß auf diese schlankeren Zähne vorgefertigte Spulen in einfacher Weise aufgeschoben werden können. Eine derartige Gestaltung ist wiederum schematisch in **Fig.** 18 gezeigt. Der Rotorkörper **501** besitzt gegenüber **Fig.** 17 schlankere, gleichmäßige Zähne **502** mit verhältnismäßig geringer Breite D, während dazwischen breitere Nuten **503** mit größerer Breite d vorgesehen sind. Auf diese Zähne **502** sind entsprechend vorgefertigte Spulen **504** aufgeschoben. Der Stator **501** ist in einem Gehäuse **505** angeordnet.

Fig. 19 zeigt eine praktische Möglichkeit, die vorgefertigten Spulen **504** von **Fig.** 18 zu kontaktieren. Wie in dem Schnitt von **Fig.** 19 dargestellt ist, wird auf das Gehäuse **505** über dem Rotorkörper **501** und über alle Spulen **504** eine scheibenförmige Leiterplatte **506** angeordnet, welche mit Lötpunkten **507** zur Kontaktierung der Wicklungsenden **508** versehen ist.

Patentansprüche

1. Magneto-elektronischer Winkelsensor
   - mit einem rotationssymmetrischen, zumindest teilweise ferromagnetischen Stator (**101**; **201**) und einem rotationssymmetrischen, zumindest teilweise ferromagnetischen Rotor (**105**; **205**; **300**), die einander unter Bildung eines ringförmigen Luftspaltes (**109**) gegenüberstehen, wobei sich der magnetische Widerstand im Luftspalt aufgrund einer über den Umfang variierenden Gestaltung des Rotors periodisch ändert,
   - mit einem auf dem Rotor (**105**; **205**; **300**) oder dem Stator angeordneten Magnetfluß-Sender, der über mindestens ein Polpaar eine vorgegebene Magnetflußverteilung in dem Luftspalt erzeugt,
   - mit einem auf dem Stator (**101**; **201**) oder dem Rotor (**105**; **205**; **300**) angeordneten Magnetfluß-Empfänger, der über mindestens zwei gegeneinander im Winkel versetzt angeordnete Signalpolpaare die Intensität des Magnetfeldes mißt, wobei aus den beiden Empfänger-Signalen ein Winkelwert für die Relativstellung des Rotors gegenüber dem Stator ableitbar ist,

dadurch gekennzeichnet, daß die Höhe des Luftspaltes (**109**) zwischen dem Rotor (**105**; **205**; **300**) einerseits und dem Stator (**101**; **201**) andererseits über den gesamten Umfang gleichbleibt, während sich die Ausdehnung der den Luftspalt bildenden Rotoroberfläche in axialer Richtung des Rotors (**105**; **205**; **300**) mit dem Umfangswinkel nach einer sinusförmigen Funktion verändert, wobei sich die Breite zwischen einer endlichen minimalen Breite (a) und einer maximalen Breite (b) mit mindestens zwei Perioden ändert.

2. Winkelsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der ferromagnetische Stator (**101**; **201**) eine vorgegebene Anzahl von Nuten (**103**; **203**) und Zähnen (**105**; **205**) abwechselnd über den Umfang verteilt aufweist,
daß in den Nuten (**103**; **203**) des Stators (**101**; **201**) eine Primärwicklung (S_{prim}) angeordnet ist, welche durch in Reihe geschaltete, abwechselnd gegensinnige Teilwicklungen eine vorgegebene Anzahl von Polpaaren bildet,
daß in den Nuten (**103**; **203**) ferner zwei Sekundärwicklungen (S_{sec}) angeordnet sind, welche gegeneinander im Winkel versetzt sind und durch in Reihe geschaltete, abwechselnd gegensinnige Teilwicklungen jeweils Signalpolpaare bilden, deren Anzahl sich von derjenigen der Primärwicklung um einen ganzzahligen Faktor unterscheidet, und
daß der weichmagnetische Rotor (**105**; **205**) die Breite seiner Oberfläche, welche den ringförmigen Luftspalt (**100**) mit den Zähnen (**105**) des Stators (**101**; **201**) bildet, mit einer der Signalpolpaarzahl des Winkelsensors entsprechenden Periodenzahl ändert.

3. Winkelsensor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Breite B der Rotoroberfläche sich mit dem Umfangswinkel φ nach der Beziehung $B = (b - a) \sin^2(\varphi \cdot n/2) + a$ ändert wobei n die Signalpolpaarzahl des Winkelsensors ist.

4. Winkelsensor nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilwicklungen (S_{prim}, S_{sec})als Einzelspulen mit jeweils gleichen Windungszahlen auf die Zähne (**205**) des Stators (**201**) aufgebracht sind.

5. Winkelsensor nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilwicklungen (T1 bis T7) der Primärwicklung und der Sekundärwicklungen durch ungleich über den Umfang verteilte Windungen zwischen den einzelnen Nuten gebildet sind, derart, daß die effektiven Windungszahlen in den aufeinanderfolgenden Nuten stufenartig annähernd einer Sinuskurve mit einer der Polpaarzahl der jeweiligen Wicklung entsprechenden Anzahl der Perioden folgen.

6. Winkelsensor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Nutenzahl ein nicht ganzzahliges Vielfaches der Polpaarzahlen der Primärwicklung bzw. der Sekundärwicklungen ist.

7. Winkelsensor nach einem der Ansprüche 2 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Rotor eine nichtferromagnetische Welle (**107**) besitzt, auf der ein Rotorkörper (**108**) in Form eines ferromagnetischen Rings angeordnet ist.

8. Winkelsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der ferromagnetische Stator eine vorgegebene Anzahl von Nuten und Zähnen über den Umfang verteilt aufweist,
daß der ferromagnetische Rotor eine vorgegebene An-

zahl von Nuten und Zähnen über den Umfang verteilt aufweist, welche mit den Zähnen des Stators den ringförmigen Luftspalt bilden,
daß in den Nuten des Rotors eine Primärwicklung angeordnet ist, welche durch in Reihe geschaltete, abwechselnd gegensinnige Teilwicklungen eine vorgegebene Anzahl von Polpaaren bildet,
daß in den Nuten des Stators mindestens zwei Sekundärwicklungen angeordnet sind, welche gegeneinander um einen vorgegebenen Winkel versetzt sind und jeweils durch in Reihe geschaltete, abwechselnd gegensinnige Teilwicklungen Signalpolpaare bilden, deren Anzahl sich von derjenigen der Primärwicklung um einen ganzzahligen Faktor unterscheidet,
wobei die Zähne des Rotors durch gegeneinander versetzte Rotorkörper gebildet sind.

9. Winkelsensor nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Rotor eine nicht-ferromagnetische Welle (**207**) besitzt, auf der mehrere Rotorkörper (**208**) gegeneinander versetzt und teilweise überlappend angeordnet sind.

10. Winkelsensor nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der oder die Rotorkörper (**108**; **208**) aus laminierten, in parallelen Radialebenen liegenden feinen Blechen gebildet ist bzw. sind.

11. Winkelsensor nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der oder die Rotorkörper aus einem verlustarmen Nickel-Eisen-Material besteht bzw. bestehen.

12. Winkelsensor nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der oder die Rotorkörper an seinen bzw. ihrem Außenkonturen punktuelle Ausnehmungen zum Ausgleich von Toleranzen und/oder Ungleichmäßigkeiten des Magnetmaterials aufweisen.

13. Winkelsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Sender eine in den Rotor oder den Stator integrierte Dauermagnet-Anordnung dient.

14. Winkelsensor nach Anspruch 1 oder 13, dadurch gekennzeichnet, daß als Empfänger eine durch das Magnetfeld im Luftspalt steuerbare Halbleiter-Anordnung dient.

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.[7]: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

FIG 1

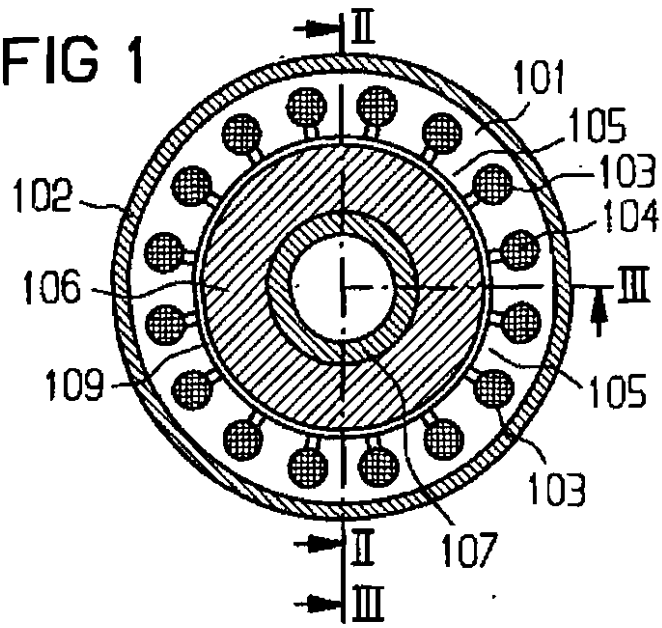


FIG 2

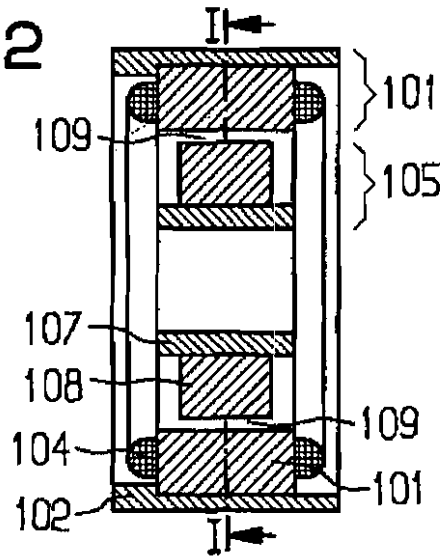
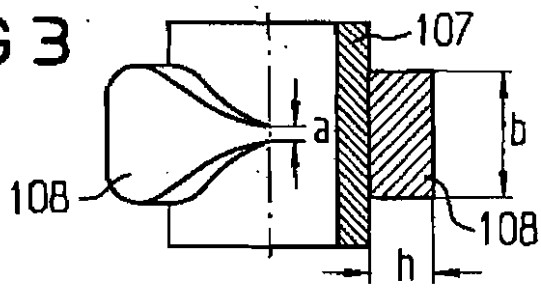


FIG 3



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.[7]: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

FIG 4

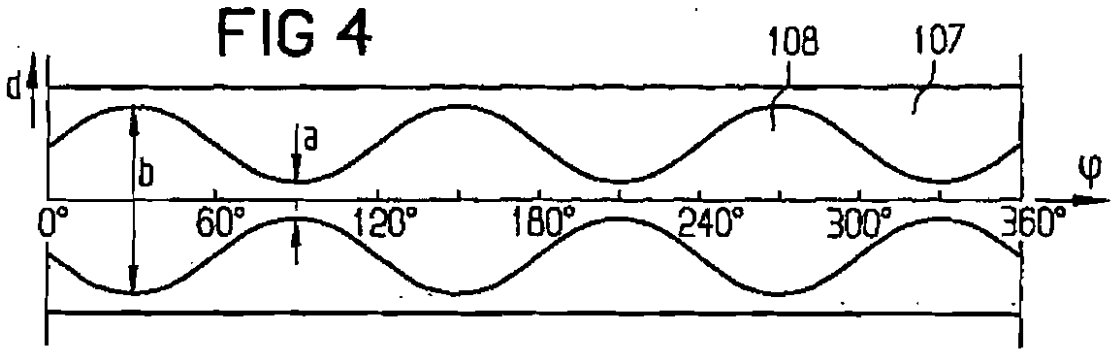


FIG 6

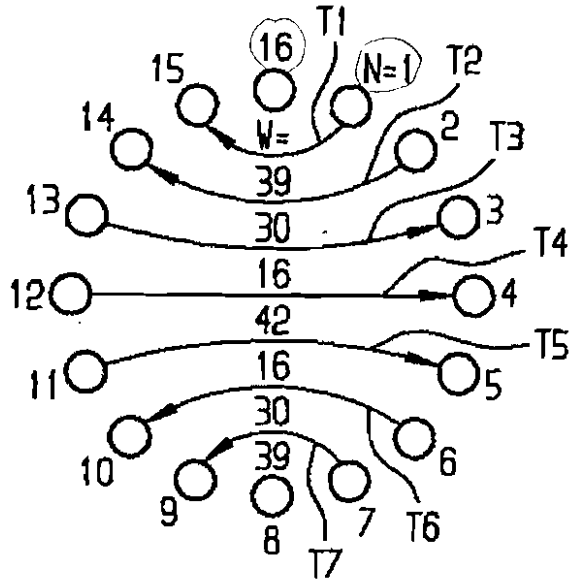
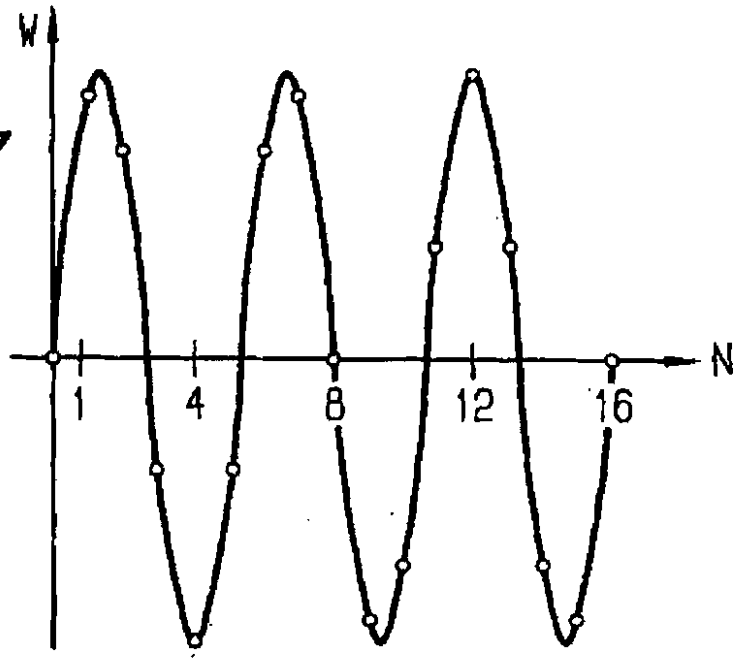
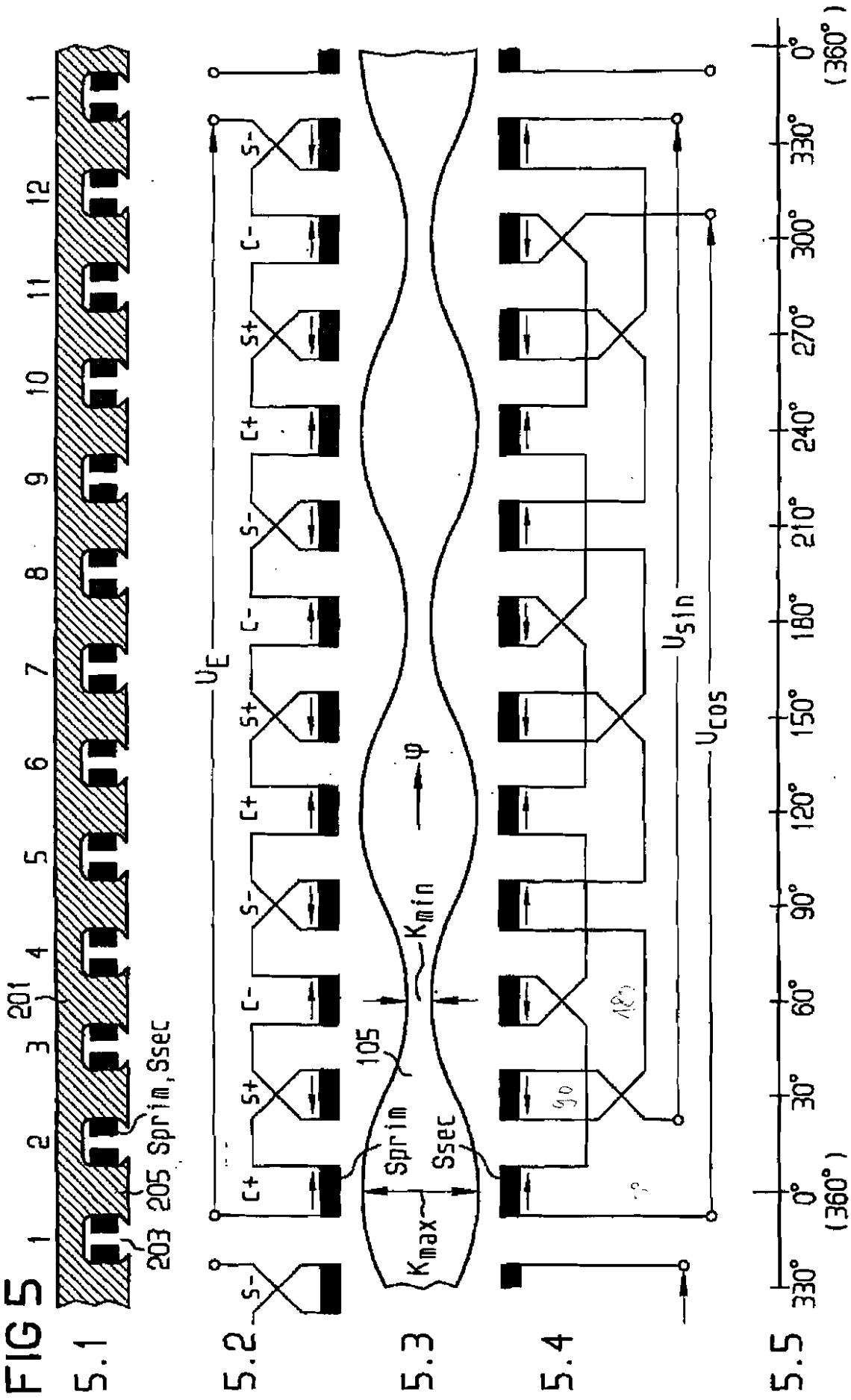


FIG 7



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.7: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.7: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

FIG 8

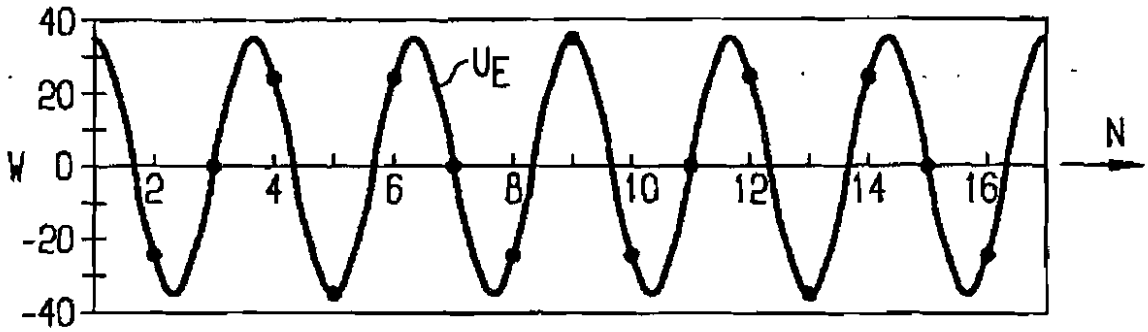
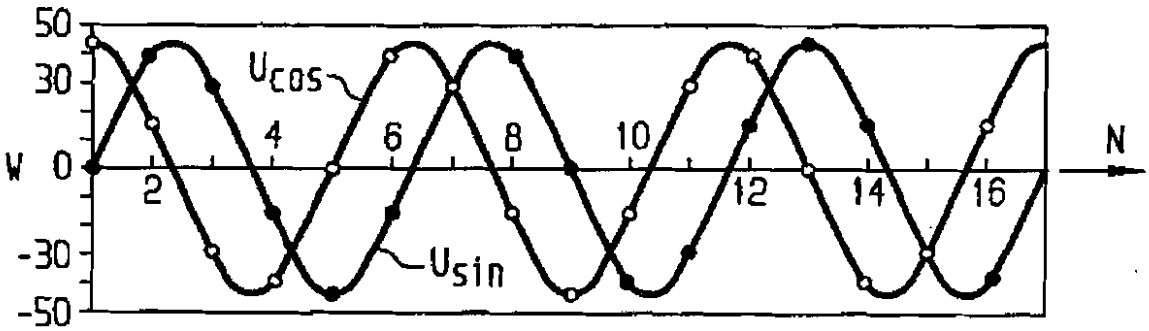


FIG 9



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.7: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

FIG 10

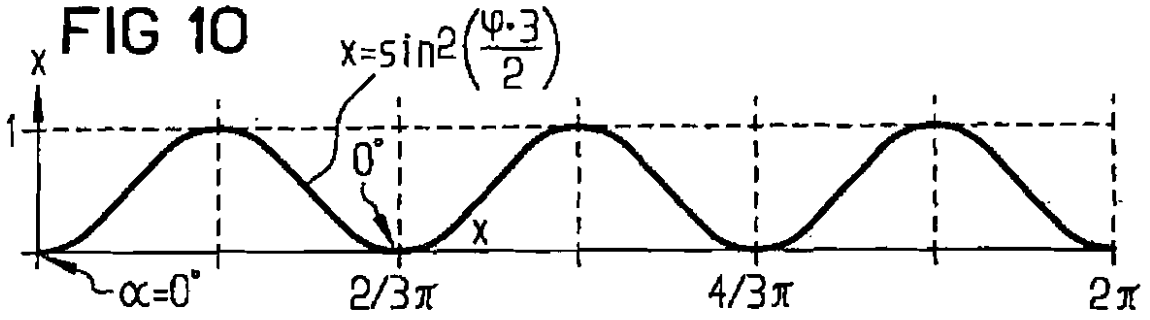


FIG 11

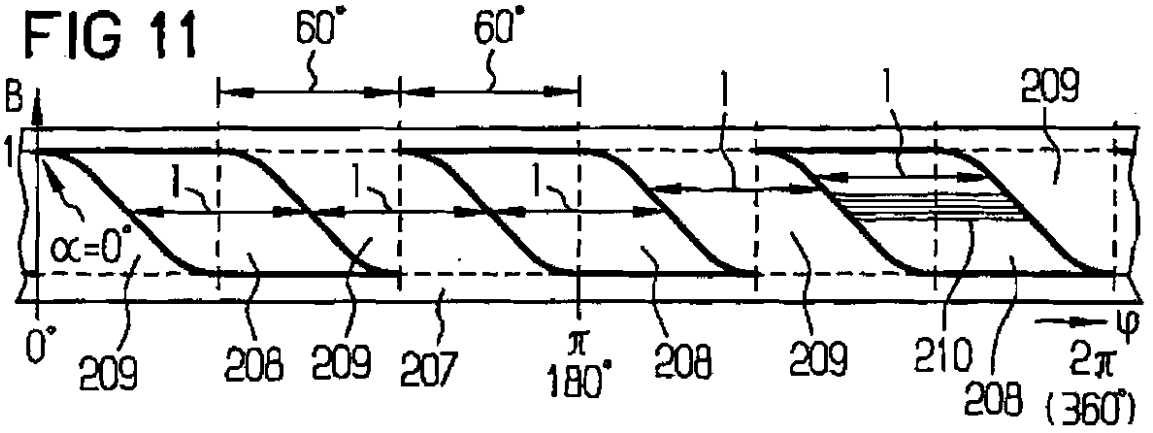
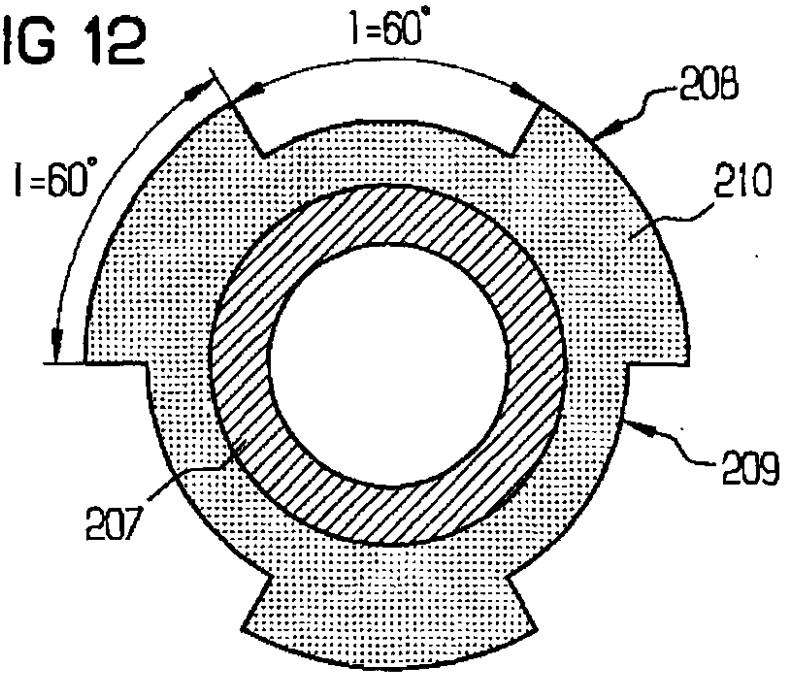


FIG 12



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.[7]: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

FIG 13

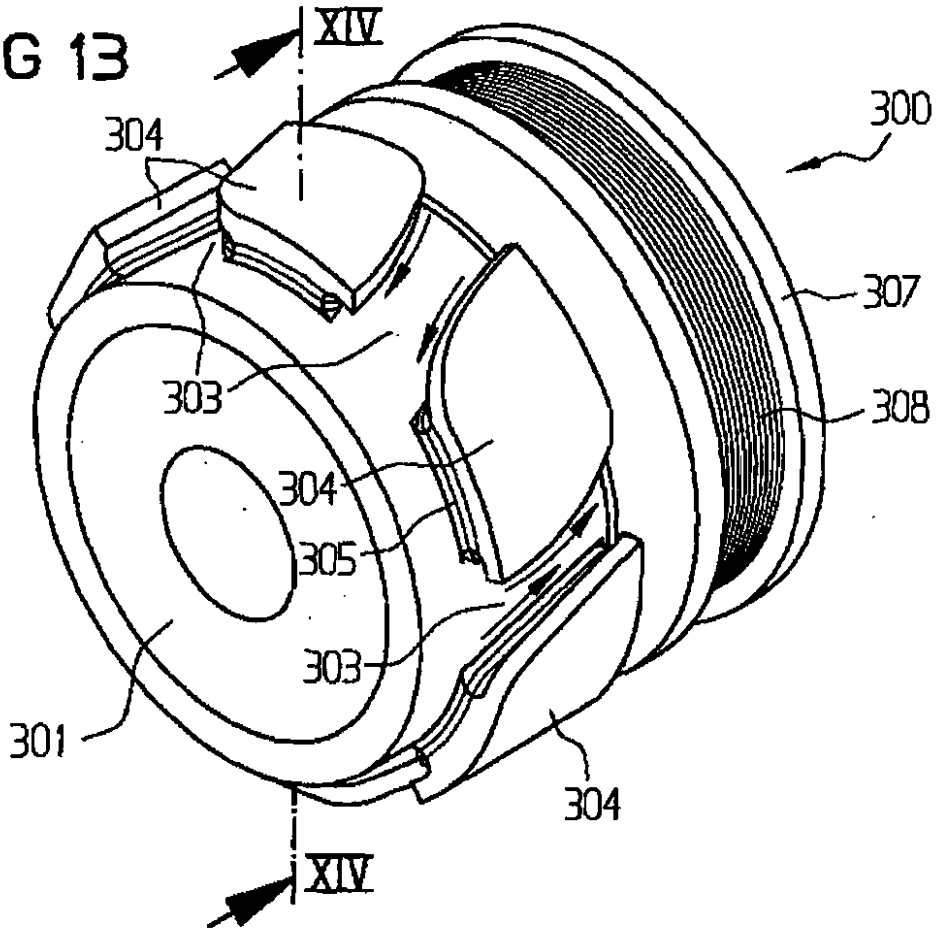
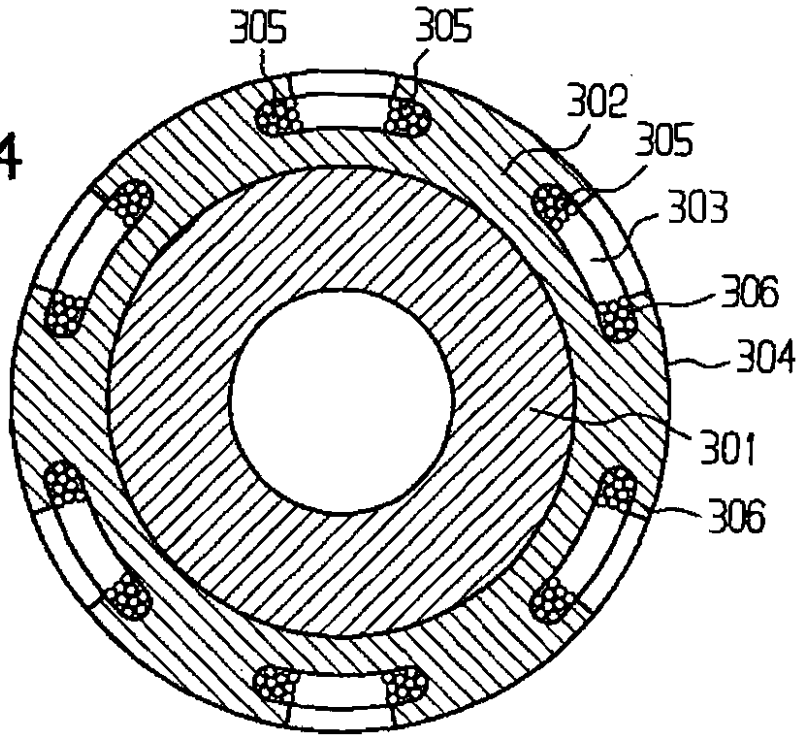


FIG 14



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.[7]: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

FIG 15

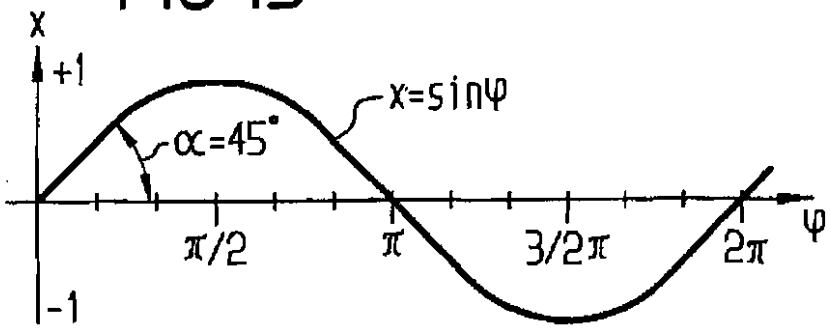
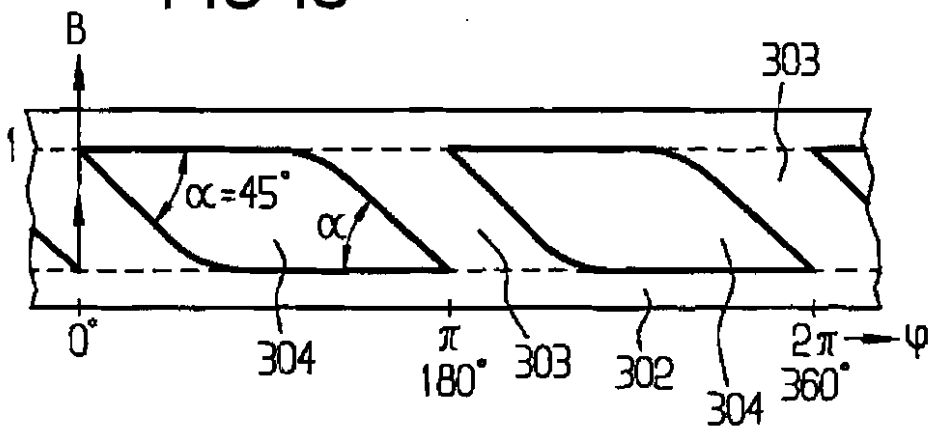


FIG 16



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.[7]: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

FIG 17

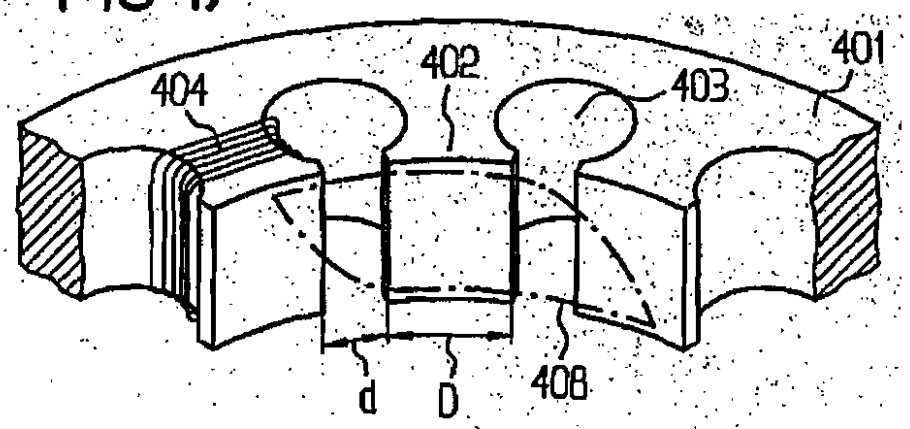
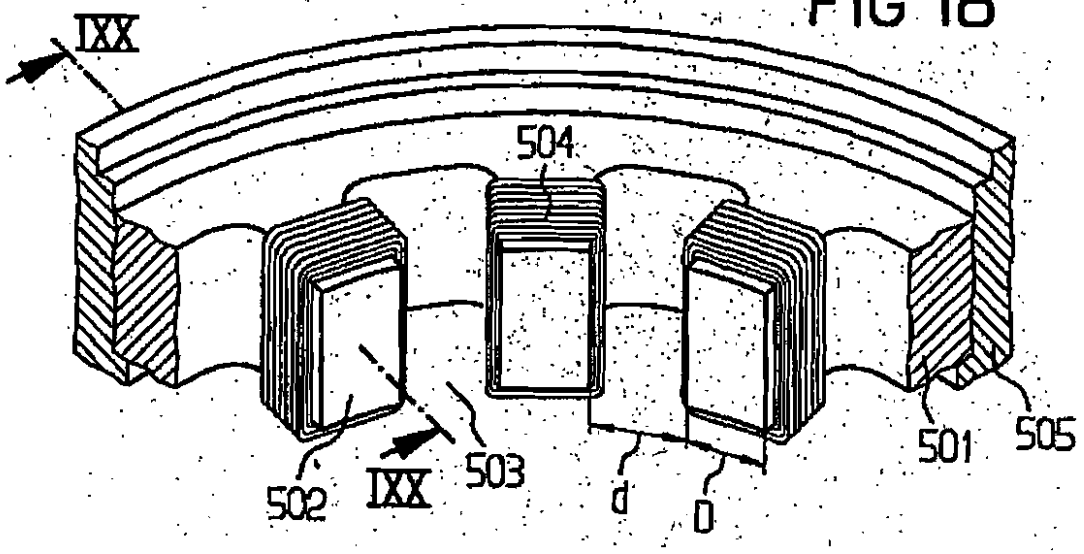


FIG 18



Nummer: DE 197 19 354 C2
Int. Cl.[7]: G 01 B 7/30
Veröffentlichungstag: 7. Dezember 2000

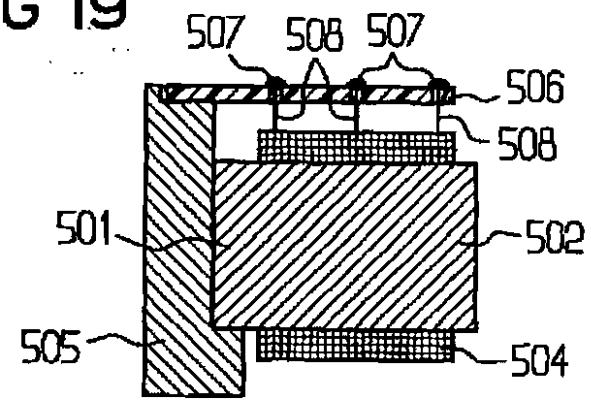



FIG 19