



(10) **DE 10 2016 103 325 A1** 2017.08.31

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 103 325.1**

(22) Anmeldetag: **25.02.2016**

(43) Offenlegungstag: **31.08.2017**

(51) Int Cl.: **G01B 7/30** (2006.01)

**G01D 5/20** (2006.01)

**G01P 3/487** (2006.01)

**G01R 33/06** (2006.01)

**G01D 5/245** (2006.01)

**H02P 6/16** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Infineon Technologies AG, 85579 Neubiberg, DE**

(72) Erfinder:

**Ausserlechner, Udo, Dr., Villach, AT**

(74) Vertreter:

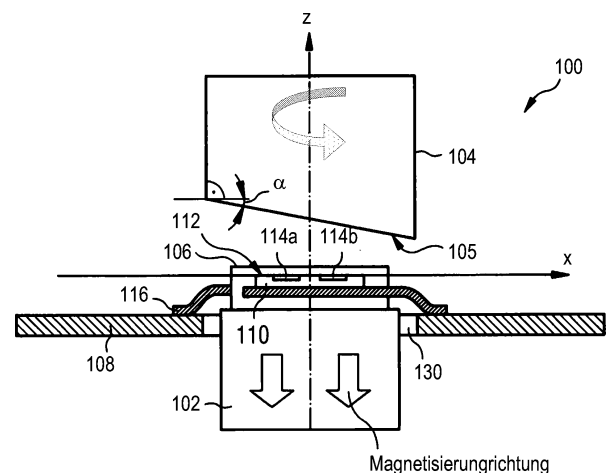
**Westphal, Musgnug & Partner Patentanwälte mit  
beschränkter Berufshaftung, 80331 München, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Magnetischer Winkelpositionssensor**

(57) Zusammenfassung: Es wird hier ein magnetisches Winkelpositionssensorsystem beschrieben. Gemäß einer exemplarischen Ausführungsform umfasst das Winkelpositionssensorsystem eine um eine Rotationsachse rotierbare Welle, wobei die Welle ein weichmagnetisches Wellenendstück hat. Das System umfasst weiter einen Sensorchip, der von dem Wellenendstück in axialer Richtung beabstandet ist und eine Sensorebene definiert, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse liegt. Zumindest vier Magnetfeldsensorelemente sind in dem Sensorchip integriert, wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ersten Richtung empfindlich sind, und wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung empfindlich sind, wobei die erste und die zweite Richtung wechselseitig nicht-parallel und die erste und die zweite Richtung rechtwinklig zur Rotationsachse sind. Des Weiteren umfasst das System eine Magnetfeldquelle, welche das Wellenendstück magnetisiert, wobei das Wellenendstück derart geformt ist, dass ein Magnetfeld in der Sensorebene, welches von der Magnetfeldquelle verursacht wird, mit N-ter Ordnung symmetrisch ist, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist. Das System umfasst auch eine mit den zumindest vier Magnetfeldsensorelementen gekoppelte Schaltungsanordnung, die dazu ausgebildet ist, eine Winkelposition der Welle zu berechnen, indem Ausgangssignale der zumindest vier Magnetfeldsensorelemente kombiniert werden.



**Beschreibung**

## TECHNISCHES GEBIET

**[0001]** Die Erfindung betrifft allgemein Winkelpositionssensoren, welche Magnetfeldsensoren verwenden, um einen Winkelwert zu messen, insbesondere auf der (Dreh-)Achse angeordnete (on-axis) Winkelpositionssensoren, Systeme und Verfahren mit einer Vielzahl von Anwendungen, einschließlich bürstenlose Gleichstrommotoren.

## HINTERGUND

**[0002]** Magnetfeldsensoren können dazu verwendet werden, eine Winkelposition einer Welle oder eines anderen Objekts zu messen. Beispielsweise kann ein Permanentmagnet auf der Welle montiert werden, und ein Magnetfeldsensor kann in der Nähe des Magneten angeordnet werden, um ein Magnetfeld zu messen, das von dem Magneten erzeugt wird, während er mit der Welle rotiert. Wenn der Magnetfeldsensor neben der Welle in einem bestimmten Abstand von der Rotationsachse der Welle montiert ist, wird der Sensor häufig als magnetischer „Off-Axis“-Winkelpositionssensor bezeichnet. Magnetische „Off-Axis“-Winkelpositionssensoren werden häufig dann implementiert, wenn die Stirnseite der Welle nicht zugänglich ist (z.B. aufgrund einer bestimmten Verwendung oder eines bestimmten Zusammenbaus der Welle) und folglich die Sensorelemente nicht auf der Rotationsachse montiert werden können. Umgekehrt wird ein magnetischer „On-Axis“-Winkelpositionssensor an oder nahe einem Ende der Welle und deren Stirnseite zugewandt montiert und ist im Allgemeinen auf einer Linie mit oder symmetrisch zu der Rotationsachse. In einigen Ausführungsbeispielen können magnetische „On-Axis“-Winkelpositionssensoren dafür ausgelegt sein, einen Magnetfeldgradienten zu messen. Zu diesem Zweck kann das Magnetfeld an zwei verschiedenen Punkten gemessen werden, welche auf gegenüberliegenden Seiten der Rotationsachse und symmetrisch zu dieser liegen. Der Gradient kann dann in für viele Anwendungen hinreichender Näherung bestimmt werden, indem die beiden gemessenen Magnetfeldwerte z.B. mittels Subtraktion kombiniert werden.

**[0003]** In vielen Anwendungen besteht in allgemeines Designziel für magnetische Winkelpositionssensoren darin, günstig zu sein und gleichzeitig robust in Bezug auf externe Magnetfelder und anderen Störungen sowie unempfindlich auf Toleranzen beim Zusammenbau. Eine spezielle Anwendung für magnetischen Winkelpositionssensoren ist in bürstenlosen Gleichstrom-(DC-)Motoren (brushless DC motors, BLDC motors) die Detektion der (Winkel-)Position der Welle während der Rotation. BLDC-Motoren stellen eine herausfordernde Umgebung für Magnet-

feldsensoren dar, da diese typischerweise starke, rotierende Magneten sowie Kupferwicklungen aufweisen, die hohe Ströme führen; beides erzeugt zeitvariante Magnetfelder, welche mit dem für die Winkelpositionsmessung verwendeten Magnetfeld interferieren und Messfehler verursachen. Diese magnetischen Störfelder sind in hohem Maße inhomogen, was eine Eliminierung der Auswirkungen dieser Störfelder auf die Winkelpositionsmessung schwierig macht. Im Hinblick auf diese Probleme besteht ein allgemeiner Bedarf an einer Verbesserung bei magnetischen Winkelpositionssensoren.

## ZUSAMMENFASSUNG

**[0004]** Es wird hier ein magnetisches Winkelpositionssystem beschrieben. Gemäß einer exemplarischen Ausführungsform umfasst das Winkelpositionssystem eine um eine Rotationsachse rotierbare Welle, wobei die Welle ein weichmagnetisches Wellenendstück hat. Das System umfasst weiter einen Sensorchip, der von dem Wellenendstück in axialer Richtung beabstandet ist und eine Sensorebene definiert, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse liegt. Zumindest vier Magnetfeldsensorelemente sind in dem Sensorchip integriert, wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ersten Richtung empfindlich sind, und wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung empfindlich sind, wobei die erste und die zweite Richtung wechselseitig nichtparallel und die erste und die zweite Richtung rechtwinklig zur Rotationsachse sind. Des Weiteren umfasst das System eine Magnetfeldquelle, welche das Wellenendstück magnetisiert, wobei das Wellenendstück derart geformt ist, dass ein Magnetfeld in der Sensorebene, welches von der Magnetfeldquelle verursacht wird, mit N-ter Ordnung symmetrisch ist, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist. Das System umfasst auch eine mit den zumindest vier Magnetfeldsensorelementen gekoppelte Schaltungsanordnung, die dazu ausgebildet ist, eine Winkelposition der Welle zu berechnen, indem Ausgangssignale der zumindest vier Magnetfeldsensorelemente kombiniert werden

**[0005]** Gemäß einer weiteren exemplarischen Ausführungsform umfasst das Winkelpositionssystem eine um eine Rotationsachse rotierbare Welle, wobei die Welle ein weichmagnetisches Wellenendstück hat. Das System umfasst weiter einen Sensorchip, der von dem Wellenendstück in axialer Richtung beabstandet ist und eine Sensorebene definiert, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse liegt. Zumindest vier Magnetfeldsensorelemente sind in dem Sensorchip integriert, wobei ein erstes und ein zweites Magnetfeldsensorelement der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und

lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ersten Richtung empfindlich sind. Ein drittes und ein viertes Magnetfeldsensorelement der Magnetfeldsensorelemente sind voneinander beabstandet und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung empfindlich, wobei die erste und die zweite Richtung wechselseitig nicht-parallel und rechtwinklig zur Rotationsachse sind. Das System umfasst des Weiteren eine Magnetfeldquelle, welche das Wellenendstück magnetisiert, wobei das Wellenendstück derart geformt ist, dass ein Magnetfeld in der Sensorebene, welches von der Magnetfeldquelle verursacht wird, mit N-ter Ordnung symmetrisch ist, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist. Das System umfasst auch eine mit den zumindest vier Magnetfeldsensorelementen gekoppelte Signalverarbeitungsschaltung, die dazu ausgebildet ist: ein erstes Signal zu berechnen, das die Differenz der von dem ersten und dem zweiten Magnetfeldsensorelement gemessenen Magnetfeldkomponenten repräsentiert; ein zweites Signal zu berechnen, das die Differenz der von dem dritten und dem vierten Magnetfeldsensorelement gemessenen Magnetfeldkomponenten repräsentiert; und eine Winkelposition der Welle zu berechnen durch Kombinieren von zumindest dem ersten und dem zweiten Signal.

**[0006]** Zusätzlich wird hier eine Elektromotoranordnung, beschrieben. Gemäß einer exemplarischen Ausführungsform umfasst die Elektromotoranordnung einen Stator umfassend zumindest eine Statorspule, einen Rotor umfassend zumindest eine Welle mit einer Stirnseite und einem weichmagnetischen Wellenendstück und eine Leiterplatte (PCB), die derart angeordnet ist, dass sie der Stirnseite der Welle zugewandt ist. Zumindest einen Sensorchip ist an dem PCB befestigt und von dem Wellenendstück beabstandet. Zumindest vier Magnetfeldsensorelemente sind in dem Sensorchip integriert, wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ersten Richtung empfindlich sind, und wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung empfindlich sind, wobei die erste und die zweite Richtung wechselseitig nicht-parallel und die erste und die zweite Richtung sind rechtwinklig zur Rotationsachse sind. Eine Magnetfeldquelle ist vorgesehen, die das Wellenendstück magnetisiert, wobei das Wellenendstück derart geformt ist, dass die Magnetfeldkomponenten in der ersten und der zweiten Richtung mit N-ter Ordnung rotationssymmetrisch sind, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist. Eine Auswerteschaltung ist mit den zumindest vier Magnetfeldsensorelementen gekoppelt und dazu ausgebildet ist, eine Winkelposition der Welle durch Kombinieren von zumindest vier Ausgangssignale der zumindest vier Magnetfeldsensorelemente zu berechnen. Des Weiteren ist auf dem PCB eine Leistungselektronikschaltungsanord-

nung angeordnet, die mit den Statorspulen gekoppelt und dazu ausgebildet ist, den Statorspulen Betriebsstrom zuzuführen

**[0007]** Des Weiteren wird hier ein Verfahren zum Messen der Winkelposition einer Welle beschrieben, die ein weichmagnetisches Wellenendstück aufweist. Gemäß einer exemplarischen Ausführungsform umfasst das Verfahren das Magnetisieren des Wellenendstücks, wobei das Wellenendstück so geformt ist, dass in der Sensorebene, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse liegt, die Magnetfeldkomponenten in einer ersten und einer zweiten Richtung mit N-ter Ordnung rotationssymmetrisch sind, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist. Das Verfahren umfasst weiter das Messen der Magnetfeldkomponenten in der ersten Richtung an zumindest einer ersten und einer zweiten Position in der Sensorebene, wobei die zweite Position ist von der ersten Position verschieden ist, sowie das Messen der Magnetfeldkomponenten in der zweiten Richtung an zumindest einer dritten und einer vierten Position in der Sensorebene, wobei die vierte Position ist von der dritten Position verschieden ist. Des Weiteren umfasst das Verfahren das Berechnen einer Winkelposition der Welle in Bezug auf deren Rotationsachse basierend auf der Differenz der Magnetfeldkomponenten an der ersten und der zweiten Position und auf der Differenz der Magnetfeldkomponenten an der dritten und der vierten Position.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ABBILDUNGEN

**[0008]** Die Erfindung lässt sicher mit Bezug auf die folgenden Abbildungen und Beschreibungen besser verstehen. Die in den Abbildungen dargestellten Komponenten sind nicht notwendigerweise maßstabsgetreu; vielmehr wird Wert darauf gelegt, das der Erfindung zugrundeliegende Prinzip zu erläutern. Des Weiteren bezeichnen in den Abbildungen gleiche Bezugszeichen korrespondierende Teile. Zu den Abbildungen:

**[0009]** Fig. 1 ist eine Schnittansicht, die einen Längsschnitt eines On-Axis-Winkelpositionssensors illustriert.

**[0010]** Fig. 2 illustriert magnetische Störfelder aufgrund hoher Ströme auf der Leiterplatte (PCB).

**[0011]** Fig. 3 illustriert einen Längsschnitt einer On-Axis-Winkelpositionssensoranordnung gemäß einem Ausführungsbeispiel und einen Querschnitt durch eine Welle, welche um die Achse (Axis) rotiert.

**[0012]** Fig. 4 illustriert drei unterschiedliche Beispiele von Wellenendstücken für die Verwendung in einem On-Axis-Winkelpositionssensor.

**[0013]** Fig. 5 illustriert ein anderes Beispiel eines Wellenendstücks für die Verwendung in einem On-Axis-Winkelpositionssensor.

**[0014]** Fig. 6 illustriert einen Längsschnitt einer On-Axis-Winkelpositionssensoranordnung gemäß einem weiteren Beispiel, wobei die Nut in dem Wellenendstück mit einem Permanentmagneten gefüllt ist.

**[0015]** Fig. 7 illustriert ein Beispiel eines Wellenendstücks, das eine Rotationssymmetrie 3. Ordnung aufweist.

**[0016]** Fig. 8 illustriert einen Längsschnitt durch ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Winkelpositionssensoranordnung mit einer flexiblen Feder aus magnetischem Material.

**[0017]** Fig. 9 illustriert – in einer Draufsicht auf die einen Magnetfeldsensor tragende Leiterplatte – zwei exemplarische Implementierungen der in Fig. 7 dargestellten flexiblen Feder.

**[0018]** Fig. 10 illustriert einen Längsschnitt durch ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Winkelpositionssensoranordnung mit einer flexiblen Feder aus magnetischem Material.

**[0019]** Fig. 11 illustriert einen Längsschnitt durch ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Winkelpositionssensoranordnung mit einer flexiblen Feder aus magnetischem Material.

**[0020]** Fig. 12–Fig. 14 illustrieren verschiedene exemplarische Anordnungen magnetischer Sensorelemente zur Verwendung in einem magnetischen Winkelpositionssensor.

**[0021]** Fig. 12–Fig. 16 illustrieren zwei verschiedene Beispiele wie ein On-Axis-Winkelpositionssensor in einem bürstenlosen DC-Motor (BLDC-Motor) verwendet werden kann.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

**[0022]** Die hier beschriebenen Ausführungsbeispiele betreffen Magnetfeldsensoren, die in magnetischen Winkelpositionssensoren mit On-Axis-Anordnungen der Sensorelemente relativ zur Rotationsachse eines Magneten oder eine Welle verwendet werden. In einem Ausführungsbeispiel ist ein magnetischer Winkelpositionssensor in einer On-Axis-Konfiguration relativ zu einer drehbaren Welle montiert. Die Welle umfasst ein Endstück, das aus einem weichmagnetischen Material oder einem Permanentmagneten aufgebaut sein kann. Das Endstück kann eine Stirnseite haben, welche dem Sensor zugewandt ist, und rotationsasymmetrisch in Bezug auf eine Rotationsachse der Welle sein. Der Sensor umfasst zumindest drei Magnetfeldsensorelemente, die

in einer im Allgemeinen rechtwinklig zur Rotationsachse liegenden Ebene angeordnet sind. Die Schaltungsanordnung, die mit den Magnetfeldsensorelementen gekoppelt sind, ist dazu ausgebildet, eine Winkelposition der Welle zu schätzen mittels Kombination der Signale der zumindest drei Magnetfeldsensorelemente. Während es eine Vielzahl von Applikationen für verschiedene Ausführungsbeispiele des Sensors gibt, können manche Ausführungsbeispiele, neben anderen Anwendungen, speziell geeignet für die Verwendung in oder mit MLDC-Motoren sein. Jede hier gemachte bestimmte Bezugnahme auf Richtungen (d.h. nach unten, nach oben, rechts, links, etc.) werden lediglich für die Bezugnahme auf eine Bestimmte Abbildung verwendet und sind in Bezug auf die Patentansprüche nicht einschränkend.

**[0023]** Ein Beispiel eines On-Axis-Winkelpositionssensorsystems **100** ist in Fig. 1 dargestellt. Das Sensorsystem **100** umfasst eine Magnetfeldquelle wie beispielsweise einen Permanentmagneten **102** und ein Sensorgehäuse **106**, welches auf einer Leiterplatte (printed circuit board, PCB) **108** angeordnet ist. Das Sensorgehäuse **106** ist – zumindest teilweise – zwischen dem Permanentmagneten **102** und einem Endstück einer Welle **104** angeordnet, welche dazu ausgebildet ist, um eine Rotationsachse zu rotieren. In Fig. 1 ist die Rotationsachse als z-Achse eines kartesischen Koordinatensystems definiert und die x-y-Ebene liegt rechtwinklig zur Rotationsachse.

**[0024]** In einigen Ausführungsbeispielen umfasst der Permanentmagnet **102** einen Ferritmagnet. Ferritmagneten können günstiger sein als andere Typen von Magneten (z.B. Seltenerd-magnete) und tragen bei zu geringeren Gesamtsystemkosten. Jedoch können in anderen Ausführungsbeispielen Seltenerd-magneten oder andere Typen von Magneten verwendet werden. In manchen Ausführungsbeispielen kann der Magnet **102** sogar weggelassen werden. In diesem Fall hat das Endstück der Welle **104** eine signifikante remanente Magnetisierung. Beispielsweise kann der Magnet **102** einen Sr-Ferrit, einen Ba-Ferrit oder andere Ferrite umfassen sowie AlNiCo, ein Seltenerdmaterial wie beispielsweise NdFeB, oder SmCo oder einige andere geeignete Materialien. Im Allgemeinen umfasst der Magnet **102** ein Material mit einer remanenten Magnetisierung von zumindest **100** mT und ausreichend Koerzitivfeldstärke, um die Stabilität des Magneten **102** sicherzustellen.

**[0025]** In dem in Fig. 1 dargestellten Beispiel ist der Magnet **102** in einer axialen Richtung (siehe Pfeile in Fig. 1) magnetisiert. Das heißt, die Orientierung der Magnetisierung des Magneten **102** ist im Allgemeinen parallel zur Rotationsachse der Welle **104** (z-Achse). In anderen Ausführungsbeispielen kann der Magnet **102** in radialer Richtung magnetisiert sein. Der Magnet **102** ist jedoch üblicherweise (jedoch nicht notwendigerweise) rotationssymme-

trisch (d.h. weist sowohl eine geometrische als auch eine magnetische Symmetrie auf, sodass die Geometrie und Magnetisierung nicht von der Winkelposition in Bezug auf die Rotationsachse abhängen). Beispielsweise kann der Magnet **102** wie in dem Beispiel aus **Fig. 1** gezeigt eine zylindrische Form aufweisen. Jedoch können in anderen Ausführungsbeispielen andere Formen und Magnetisierungsrichtungen verwendet werden. Im Allgemeinen ist der Magnet **102** rotationssymmetrisch und stellt während des Betriebs ein Magnetfeld bereit, welches rotationssymmetrisch in Bezug auf die Rotationsachse ist. Die nicht rotationssymmetrische Geometrie des Wellenendstücks der Welle **104** unterbricht jedoch diese Rotationssymmetrie. Aufgrund der resultierenden Asymmetrie kann die Winkelposition der Welle **104** durch den Winkelpositionssensor detektiert werden.

**[0026]** Wie in **Fig. 1** gezeigt umfasst die Welle **104** ein Endstück mit einer Stirnseite (Fläche **105**), die dem Sensorgehäuse **106** gegenüber liegend angeordnet ist. Wie erwähnt ist die Welle **104** im Allgemeinen rotationssymmetrisch, wohingegen die Stirnseite **105** der Welle **104** in Bezug auf die Rotationsachse asymmetrisch sein kann. In dem in **Fig. 1** dargestellten Beispiel ist die Stirnseite **105** in Bezug auf die xy-Ebene um einen Winkel  $\alpha$  geneigt. In einem Ausführungsbeispiel beträgt der Winkel  $\alpha$  rund 15 Grad, obwohl dieser in anderen Ausführungsbeispielen auch größer oder kleiner sein kann. Theoretisch kann der Winkel  $\alpha$  zwischen 0 Grad und 90 Grad liegen, in praktischen Implementierungen kann  $\alpha$  zwischen rund 5 Grad und rund 25 Grad sein. Aufgrund der Tatsache, dass  $\alpha$  größer als 0 Grad ist, hängt die Größe des Luftspalts (in z-Richtung) an einer bestimmten Position in der xy-Ebene im Allgemeinen von der Winkelposition der Welle **104** ab.

**[0027]** In manchen Ausführungsbeispielen umfasst die Welle **104** eisenhaltiges Material wie beispielsweise ein weichmagnetisches Material wie Eisen oder Baustahl (mild steel) mit einer relativen Permeabilität  $\mu_R$  im Bereich von rund 1600 (Stahl) bis 4000 (Eisen). Im Allgemeinen kann die Welle **104** eisenhaltiges Material mit einer relativen Permeabilität von mehr als 100 oder mehr als 1000 aufweisen. In manchen Ausführungsbeispielen umfasst nur das Endstück der Welle magnetisches Material, wohingegen der Rest der Welle **104** hauptsächlich aus nicht-magnetischem Material besteht wie beispielsweise einer Nichteisenlegierung, einem nichtmagnetischen oder gering magnetischem Stahl oder aus einem anderen Material.

**[0028]** Wie in **Fig. 1** gezeigt ist das Sensorgehäuse **106** im Allgemeinen zwischen dem Permanentmagneten **102** und der Stirnseite **105** der Welle **104** angeordnet. Die xy-Ebene ist als jene Ebene definiert, in der innerhalb des Chipgehäuses die Magnetfeldsensorelemente **114a**, **114b** angeordnet sind. Daher

ist der axiale Abstand zwischen der xy-Ebene und der Stirnseite **105** der Welle **104** der effektive Luftspalt des magnetischen Schaltkreises. Das Sensorgehäuse **106** kann im Wesentlichen in einer Linie mit der Rotationsachse angeordnet sein und bildet folglich eine On-Axis-Sensoranordnung. Das Sensorgehäuse **106** umfasst zumindest ein Halbleiterplättchen **110** (semiconductor die), in dem die Magnetfeldsensorelemente **114a**, **114b** integriert sind. Das Halbleiterplättchen **110** liegt im Allgemeinen rechtwinklig zur Rotationsachse (z-Achse) und umfasst eine Hauptseite **112**, welche die empfindliche Ebene (d.h. die xy-Ebene) der Sensorelemente **114a** und **114b** ist. In der Querschnittsdarstellung gemäß **Fig. 1** sind nur zwei Sensorelemente **114a** und **114b** sichtbar. Jedoch umfasst der Winkelpositionssensor zumindest drei Sensorelemente, in manchen Konfigurationen zumindest vier Sensorelemente. In beiden Fällen sind die Sensorelemente wechselseitig voneinander beabstandet, und jedes Sensorelement stellt ein eigenes Sensorsignal bereit, welches die Magnetfeldkomponente in der empfindlichen Richtung des jeweiligen Sensorelements und am Ort des jeweiligen Sensorelements repräsentiert.

**[0029]** In manchen Ausführungsbeispielen ist das Gehäuse **106** ein oberflächenmontiertes Bauelement (surface-mounted device, SMD), in dem das Halbleiterplättchen **110** auf einen Leadframe **116** angeordnet ist. Der Leadframe **116** umfasst Pins, welche auf das PCB **108** aufgelötet sind. In dem Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 1** ist der Permanentmagnet **102** zumindest teilweise innerhalb einer Öffnung **130** in dem PCB **108** angeordnet, sodass der Permanentmagnet **102** eine Rückseite des Gehäuses **106** berühren kann. Die Öffnung wird jedoch in anderen Ausführungsbeispielen, in denen der Permanentmagnet **102** unterhalb des PCBs **108** montiert werden kann, nicht benötigt. Beispielsweise ist in einem Ausführungsbeispiel der Permanentmagnet **102** auf der Rückseite des PCBs **108** montiert. In diesem Zusammenhang ist die Rückseite des Gehäuses jene Seite, welche der Vorderseite gegenüberliegt, und die Vorderseite des Gehäuses **106** ist jede Seite, welche der Stirnseite **105** der Welle zugewandt ist. Es sollte beachtet werden, dass in anderen Ausführungsbeispielen sich der Aufbau des Winkelpositionssensors von dem in **Fig. 1** gezeigten Beispiel unterscheiden kann. Beispielsweise kann ein gehäuseloses Halbleiterplättchen (bare die) auf das PCB montiert werden statt ein Chipgehäuse zu verwenden. In anderen Ausführungsbeispielen können die Sensorelemente **114a** und **114b** in separaten Halbleiterplättchen innerhalb eines oder mehrerer Chipgehäuse angeordnet sein. In manchen Ausführungsbeispielen kann der Permanentmagnet **102** an der Unterseite des PCBs **108** befestigt oder in das Sensorgehäuse **106** integriert sein.

**[0030]** Die Sensorelemente **114** (zusammenfassend für **114a** und **114b**) können entweder auf Ma-

gnettefeldkomponenten in axialer Richtung oder auf Magnetfeldkomponenten in radialer Richtung empfindlich sein. In verschiedenen Ausführungsformen können die Sensorelemente **114** magnetoresistive (MR) Sensorelemente (e.g., AMR, GMR, TMR, CMR und andere), Riesenmagnetoimpedanz-(giant magneto-impedance, GMI)Sensorelemente, Hall-Effekt-Sensorelemente (z.B., vertikale Hall-Sensorelement), MAGFETs, und andere Magnetfeldsensorelemente sowie Kombinationen daraus umfassen, welche geeignet sind, Magnetfeldkomponenten in einer Ebene zu messen, die rechtwinklig zur Rotationsachse der Welle liegt, deren Winkelposition gemessen werden soll. In verschiedenen Ausführungsbeispielen sind die Sensorelemente **114** so orientiert, dass sie entweder auf eine Magnetfeldkomponente in x-Richtung oder in y-Richtung empfindlich sind, wobei die Rotationsachse der Welle als entlang der z-Richtung ausgedehnt definiert ist; die x-, y- und z-Richtung bilden ein kartesisches Koordinatensystem.

**[0031]** Im Allgemeinen können die hier beschriebenen Sensoraufbauten in bürstenlosen Gleichstrom-(BLDC-)Motoren verwendet werden. Derartige BLDC-Motoren benutzen Permanentmagnet zur Magnetisierung des Rotors (Ankers) des BLDC-Motors, wohingegen Statorwicklungen zur Bildung von Spulen verwendet werden, um den Stator zu magnetisieren. Strompulse werden an die Statorspulen angelegt, wobei die Strommuster so ausgelegt sind, dass ein gewünschtes Drehmoment und/oder eine gewünschte Drehung des Rotors erreicht werden. Um ein kompaktes Design des BLDC-Motors zu ermöglichen, werden On-Axis-Winkelpositionssensoren verwendet, wobei die Leiterplatte (PCB), welche die Leistungselektronik trägt, das erwähnte Strommuster erzeugt und üblicherweise auch die Komponenten des Winkelpositionssensors trägt. Exemplarische Ausführungsformen, die die Anwendung eines On-Axis-Winkelpositionssensors in BLDC-Motoren zeigen, sind später in **Fig. 15** und **Fig. 16** dargestellt.

**[0032]** **Fig. 2** illustriert wie magnetische Störfelder die Feldmessung durch die Magnetfeldsensorelemente **114** beeinflussen können. In **Fig. 2** ist nur das Sensorgehäuse **106** zusammen mit einem stromführenden Element **201** (z.B. eine Streifenleitung oder ein Leistungshalbleiterhauelement) gezeigt, das auf dem PCB **108** montiert ist. Der Strom  $i_0$  fließt durch das Element **201** im Wesentlichen parallel zur y-Achse und erzeugt folglich ein Magnetfeld  $H_0$ , das durch die Magnetfeldlinien in **Fig. 1** dargestellt ist. Wie man anhand der Feldlinien sehen kann umfasst das Magnetfeld  $H_0$  eine signifikante Komponente  $H_{0,z}$  in z-Richtung am Ort der Magnetfeldsensorelemente, welche stark inhomogen ist. Diese Magnetfeldkomponente  $H_{0,z}$  kann das Magnetfeld des Permanentmagneten **102** (in **Fig. 2** nicht gezeigt) überlagern und bei der Bestimmung der Winkelposition aus den Sensorsignalen einen Messfehler verursachen.

In der Praxis haben die zur z-Achse rechtwinkligen Magnetfeldkomponenten  $H_{0,x}$  und  $H_{0,y}$  (in der xy-Ebene) einen signifikant kleineren Betrag am Ort der Magnetfeldsensorelemente. Um die Auswirkung der magnetischen Störfelder, die von den durch Leistungshalbleiterbauelemente auf dem PCB **108** erzeugten Strömen erzeugt werden, zu minimieren, werden Magnetfeldsensorelemente **114** verwendet, welche lediglich auf Magnetfeldkomponenten in x- und y-Richtung empfindlich sind und im Wesentlichen unempfindlich auf Magnetfeldkomponenten in z-Richtung (axiale Richtung). Des Weiteren werden Sensorelementpaare verwendet, um eine differentielle Messung zu implementieren, was weiter unten noch erläutert wird (siehe **Fig. 11–Fig. 13**). Die differentielle Messung wird verwendet, um eine Art Gradiometer zu implementieren, welcher den räumlichen Gradienten der gemessenen Magnetfeldkomponenten misst und folglich die Auswirkung homogener magnetischer Störfelder (außerhalb des PCBs **108** oder im BLDC-Motor erzeugt) eliminiert. Eine Kombination der Verwendung von Magnetfeldsensoren, welche im Wesentlichen unempfindlich in axialer (d.h. z-)Richtung sind, mit einem differenziellen Messprinzip ermöglicht eine Winkelpositionsmessung, die robust gegen magnetische Störfelder ist, die auf der Leiterplatte (on board, d.h. durch die Leistungselektronik auf dem PCB **108**) und abseits der Leiterplatte (off board, d.h. im Wesentlichen homogene externe Magnetfelder) erzeugt werden.

**[0033]** In den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen hat das Endstück der Welle **104** eine Rotationssymmetrie bestimmter Ordnung, wobei Rotationssymmetrie N-ter Ordnung (auch N-fache Rotationssymmetrie bezeichnet) bedeutet, dass jede Drehung um einen Winkel von  $360^\circ/N$  das Objekt nicht ändert. N ist eine endliche (von Null verschiedene und nicht unendliche) ganze Zahl größer oder gleich 1. Es sollte beachtet werden, dass eine Symmetrie erster Ordnung eigentlich keine Symmetrie ist, da nur eine volle Umdrehung der Welle um  $360^\circ$  wieder eine unveränderte Geometrie liefert. Im Gegensatz dazu bedeutet eine Symmetrie zweiter Ordnung, dass eine Drehung der Welle um  $180^\circ$  eine unveränderte Geometrie liefert. In dem Beispiel aus **Fig. 3** hat das Endstück der Welle **104** in seiner Stirnseite eine Ausnehmung P (Nut). Die Ausnehmung P hat die Form eines Schlitzes, der geradlinig (z.B. entlang der y-Richtung) durch die Rotationsachse verläuft, was zur Folge hat, dass das Wellenendstück eine Symmetrie zweiter Ordnung aufweist (siehe Schnitt A-A' in **Fig. 3**). Abgesehen von dem Endstück der Welle **104** ist der Aufbau der in **Fig. 3** gezeigten Winkelpositionssensoranordnung beinahe identisch mit dem Beispiel aus **Fig. 1**. Der Permanentmagnet **102** ist jedoch auf der Rückseite der Leiterplatte (PCB) **108** montiert anstatt, wie in **Fig. 1** gezeigt, durch eine Öffnung in der Leiterplatte **108** hindurch auf der Rückseite des Sensorgehäuses **106** angeordnet zu

sein. Das Sensorgehäuse **106** wird auf der Vorderseite des PCBs **108** montiert und umfasst zumindest einen Halbleiterchip **110**, wobei in dem Chip **110** mehrere Magnetfeldsensorelemente **114a**, **114b** integriert sind. Alle Magnetfeldsensorelemente sind empfindlich auf eine Magnetfeldkomponente in der xy-Ebene und unempfindlich auf eine Magnetfeldkomponente in z-Richtung (d.h. axialer Richtung).

**[0034]** In einem alternativen Ausführungsbeispiel, das durch die gekrümmte gestrichelte Linie in **Fig. 3** dargestellt ist (und auch in der weiter unten diskutierten **Fig. 6**), hat die Nut P die Form eines Halbzylinders (halbkreisförmiger Querschnitt) anstatt eines rechteckigen Querschnitts. Beide Ausführungsbeispiele wurden simuliert. In beiden Ausführungsbeispielen ist der Sensorchip **110** in der xy-Ebene bei  $z = 0$  angeordnet und die empfindlichen Magnetfeldsensorelemente sind bei  $z = 0,1\text{mm}$ . Die Rotationsachse ist durch  $x = y = 0$  definiert. In dem ersten Ausführungsbeispiel hat der Permanentmagnet einen Durchmesser von 10 mm, ist koaxial zur Welle **104** angeordnet und hat eine axiale Länge von 5mm (von  $z = -6,5\text{mm}$  bis  $z = -1,5\text{mm}$ ). Die remanente Magnetisierung des Permanentmagneten **102** ist 1 Telsa; sein relative Permeabilität  $\mu_R$  beträgt 1.1. Der Durchmesser der Welle **104** ist 6mm, und die Stirnseite der Welle **104** ist bei  $z = 1\text{mm}$ . Der Luftspalt zwischen Welle und Permanentmagnet beträgt demnach 2,5mm. Die relative Permeabilität  $\mu_R$  der Welle **204** beträgt 1700. Die Breite  $w$  der Nut beträgt 2mm und deren Tiefe 3mm (rechtwinkliger Querschnitt). Mit den obigen Daten können die Magnetfeldkomponenten  $H_x$ ,  $H_y$  in der xy-Ebene (d.h. in der Sensorebene, in der sich die Sensorelemente erstrecken) als  $H_x = a \cdot x / \mu_0$  mit  $a = 56.6\text{ T/m}$  und  $H_y = b \cdot x / \mu_0$  mit  $b = 10\text{ T/m}$  approximiert werden (unter Verwendung linearer Regression in den Simulierten Magnetfelddaten), wobei  $\mu_0$  die Vakuumpemeabilität bezeichnet. In dem zweiten Ausführungsbeispiel ist der Durchmesser des Permanentmagneten 4mm, seine remanente Magnetisierung beträgt 1 Tesla (parallel zur z-Achse magnetisiert), und seine axiale Länge beträgt 4mm (von  $z = -4,2\text{mm}$  bis  $-0,2\text{mm}$ ). Die Welle hat einen Durchmesser von 6mm und die Nut P ist ein Halbzylinder mit Radius von 1,5mm. Die Stirnseite der Welle ist bei  $z = 1,8\text{mm}$ , der Luftspalt beträgt daher 2mm. Anders als beim ersten Ausführungsbeispiel ist die Nut P mit einem anderen Permanentmagneten **102'** gefüllt (wie in dem Beispiel aus **Fig. 6**) mit einer Magnetisierung von  $-1\text{T}$  (parallel zur z-Achse magnetisiert). Die Magnetfeldsensorelemente sind bei  $z = 0,5\text{mm}$ . In dieser Anordnung überlagern sich die Magnetfeldkomponenten in x- und y-Richtung der beiden Permanentmagneten konstruktiv. Die Simulation ergibt eine Approximation von  $H_x = a \cdot x / \mu_0$  mit  $a = 175.4\text{ T/m}$  und  $H_y = b \cdot x / \mu_0$  mit  $b = 102.2\text{ T/m}$ . Demnach macht der zweite Permanentmagnet **102'** die diametrale Magnetfeldkomponente (x- und y-Komponenten) stärker und die axiale Ma-

gnetfeldkomponente (z-Komponente) schwächer. In einer idealen Implementierung sollten die beiden Magneten symmetriert (balanced) sein, um das axiale Magnetfeld in den Sensorelementen verschwinden zu lassen, weil dann kleine Verkippungen der Sensorebene (xy-Ebene) in Bezug auf die Rotationsachse – die aufgrund von Toleranzen beim Zusammenbau unvermeidlich sind – die kleinstmögliche Auswirkung auf die Genauigkeit der Winkelpositionsmessung haben.

**[0035]** Wie oben erwähnt kann die Nut P mit einem zweiten Permanentmagneten **102'** gefüllt sein. Im Allgemeinen ist ein Permanentmagnet an der Welle **104** befestigt (z.B. in der Nut P), sodass er synchron mit der Welle **104** rotiert, und der andere Permanentmagnet (vgl. Permanentmagnet **102** in **Fig. 3**) ist an dem Sensorgehäuse **106** (vgl. **Fig. 1**) oder an dem PCB **108** (vgl. **Fig. 3**) befestigt, sodass er nicht rotiert. Beide Permanentmagneten sind in einer Richtung parallel zur Rotationsachse (z-Richtung) magnetisiert, wobei einer der Permanentmagnete in positiver z-Richtung magnetisiert ist und der andere in negativer z-Richtung. Auf diese Weise addiert sich ihr Magnetfeldbeitrag  $H_x$ ,  $H_y$  in der xy-Ebene. Einer der beiden Permanentmagneten kann weggelassen werden und die Sensoranordnung würde immer noch funktionieren. Ob ein oder zwei Magneten verwendet werden kann vom verfügbaren Platz, den Kosten, der Streufeldrobustheit der umgebenden elektronischen Komponenten, etc., abhängen.

**[0036]** Für die beiden Permanentmagnete können unterschiedliche Magnetwerkstoffe verwendet werden. Der rotierende Permanentmagnet kann beispielsweise aus einem spritzgegossenen (injection molded) magnetischen Material bestehen, in dem magnetische Partikel in einer Polymermatrix eingebettet sind, wohingegen der nichtrotierende Permanentmagnet (Permanentmagnet **102**) ein gesinterter Magnet sein kann, der nicht problemlos in komplexen Geometrien herstellbar ist. Jedoch können gesinterte Magnete sehr hohe remanente Magnetisierungen aufweisen (im Fall von NdFeB-Material kann die Remanenz 1T übersteigen). Im Gegensatz dazu haben kunststoffgebundene oder spritzgegossene Magneten eine geringere remanente Magnetisierung (im Fall von kunststoffgebundenen NdFeB-Magneten kann die remanente Magnetisierung lediglich bis zu 0,6T betragen).

**[0037]** In einem bestimmten Ausführungsbeispiel hat der Sensorchip **110**, in dem die Magnetfeldsensorelemente integriert sind, eine Größe von rund 0,5mm bis 4mm, z.B. 1,5mm, in x-Richtung. Daher ist der Abstand zwischen den Magnetfeldsensorelementen auch in diesem Bereich (Siehe auch **Fig. 11–Fig. 13**). Die Breite  $w$  (entlang der x-Richtung) der Nut P in dem Endstück der Welle **104** kann eine ähnliche Größe aufweisen oder geringfügig breiter sein als der

Chip **110**, z.B. 2mm. Der Wellendurchmesser kann von rund der doppelten Breite der Nut P (z.B. 4mm) bis hin zu – theoretisch – unendlich großen Durchmessern betragen. Die Tiefe  $d$  der Nut (d.h. die axiale Länge entlang der z-Richtung) kann das die halbe Breite der Nut übersteigen (d.h. mehr als 1mm) und z.B. gleich sein wie deren Breite. In diesem Fall ist der Querschnitt (rechtwinklig zur y-Achse in dem Beispiel aus **Fig. 3**) der Nut quadratisch. Tiefere Nuten sind möglich. Jedoch führen tiefere Nuten nicht zu einem magnetischen Verhalten, das sich nennenswert vom magnetischen Verhalten jener Nuten unterscheidet, deren Tiefe gleich deren Breite ist. **Fig. 4** zeigt drei weitere Beispiele von Wellenendstücken, welche unterschiedliche Nuten P aufweisen. In allen drei Beispielen (**Fig. 4a**, **Fig. 4b** und **Fig. 4c**) erstreckt sich die Nut gerade durch die Rotationsachse des Wellenendstücks hindurch. Das Beispiel in **Fig. 4a** hat eine Nut P mit einem V-förmigen Querschnitt, das Beispiel in **Fig. 4b** hat eine Nut P mit einer trapezförmigen Querschnitt, wobei der Querschnitt mit zunehmender Tiefe schmaler wird, und das Beispiel in **Fig. 4c** hat eine Nut P mit einem trapezförmigen Querschnitt, wobei der Querschnitt mit zunehmender Tief breiter wird.

**[0038]** Des Weiteren muss die Nut P nicht notwendigerweise eine konstante Tiefe  $d$  aufweisen. Die Tiefe  $d$  der Nut P kann zur Rotationsachse hin größer werden und hin zum Umfang der Welle kleiner. Auch die Stirnfläche (die Oberfläche der Stirnseite) des Endstücks ist nicht notwendigerweise eine plane Fläche. In dem in **Fig. 5** gezeigten Beispiel weist die Stirnfläche eine Krümmung auf. Beispielsweise kann die Stirnfläche ein Teil einer sphärischen Oberfläche sein, deren Krümmungsmittelpunkt auf der Rotationsachse liegt. Alternativ kann die Stirnfläche ein Teil einer zylindrischen Oberfläche sein, deren Zylinderachse die Rotationsachse mit  $90^\circ$  schneidet. Solche Krümmungen können helfen, das Magnetfeld in einer Weise zu „designen“ dass der Signalpegel der Ausgangssignale der Magnetfeldsensorelemente maximiert wird (oder, im Fall einer differentiellen Messung, dass die Differenz zweier zusammengehörender Ausgangssignale eines Magnetfeldsensorelementpaares maximiert wird). **Fig. 5** illustriert zwei verschiedene Längsschnitte (Schnitt A-A' und Schnitt B-B') und eine Ansicht von unten desselben Wellenendstücks.

**[0039]** Im Allgemeinen ermöglicht ein Wellenendstück mit N-facher Rotationssymmetrie die Messung einer Winkelposition im Intervall  $[0, 360^\circ/N]$ . Die Welle **104** ist jene Komponente der Sensoranordnung, welche im Vergleich zu anderen Komponenten im Allgemeinen am genauesten gefertigt ist. Im Gegensatz dazu kann der Permanentmagnet **102** signifikant weniger genau gefertigt werden als die Welle **104**. Weder die Form des Permanentmagneten **102**, noch dessen Materialhomogenität, noch dessen Magnetisierung (in Bezug auf Betrag, Richtung und Homo-

genität) und deren Stabilität über Zeit und Temperatur sind wohldefiniert. In den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen wird aber der Permanentmagnet **102** lediglich dazu verwendet, das Wellenendstück zu magnetisieren und rotiert nicht. In anderen Worten, der Permanentmagnet **102** definiert nicht die Winkelposition des Magnetfelds; er spannt das Wellenendstück, das die Winkelposition des Magnetfelds definiert, lediglich (magnetisch) vor. Daher haben kleinere Ungenauigkeiten (in Bezug auf die Geometrie und Magnetisierung) des Permanentmagneten **102** keine signifikante Auswirkung auf die Messung der Winkelposition. Aus den oben erläuterten Gründen besteht keine Notwendigkeit, dass der Permanentmagnet **102** eine präzise und komplexe Form und Magnetisierung aufweist, und es kann ein kostengünstiger gesinterter Magnet verwendet werden. Gesinterte Seltenerdmetalle können eine hohe remanente Magnetisierung von mehr als 1 T aufweisen, was vergleichsweise starke Magnetfelder durch die Sensorelemente zur Folge hat und folglich die Robustheit gegen Rauschen und Interferenzen erhöht (d.h. das magnetische Signal-Rausch-Verhältnis ist hoch). Da der Permanentmagnet **102** des Weiteren nicht rotiert, produziert er keine großen rotierenden Magnetfelder, welche andere Elektronikkomponenten stören könnten. Das Wellenendstück kann sehr nahe an dem Sensorchip **110** angeordnet und folglich an den Magnetfeldsensorelementen werden (z.B. 1mm Luftspalt oder sogar weniger, abhängig von der axialen Toleranz der Welle). Der Abstand zwischen relevanten magnetisierten Teilen des Wellenendstücks und der Sensorelemente kann daher vergleichsweise klein sein, was auch den Betrag der gemessenen Magnetfeldkomponenten erhöht.

**[0040]** In den oben beschriebenen Ausführungsbeispielen hat das Wellenendstück eine Rotationssymmetrie zweiter Ordnung (zweifache Rotationssymmetrie), was eine eindeutige Winkelpositionsmessung im Bereich zwischen  $0$  und  $180^\circ$  ermöglicht. Aufgrund der Symmetrie kann die Sensoranordnung nicht zwischen einem Winkel  $\varphi$  und einem Winkel  $\varphi + 180^\circ$  unterscheiden. Eine eindeutige Winkelpositionsmessung im vollen Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  ist jedoch in vielen Anwendungen wie beispielsweise bürstenlose DC-(BLDC-)Motoren nicht notwendig.

**[0041]** Falls jedoch eine eindeutige Winkelpositionsmessung über den vollen Bereich zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  erwünscht ist, kann die Orientierung der remanenten Magnetisierung des rotierenden Permanentmagneten **102'** in Bezug auf die Rotationsachse (z-Achse) wie in dem Beispiel in **Fig. 6** gezeigt schräg sein. Das bedeutet, dass – zusätzlich zu seiner Magnetisierung in z-Richtung (d.h. parallel zur Rotationsachse) – der rotierbare Magnet einen bestimmten (vorzugsweise kleinen) Magnetisierungsbetrag normal zur z-Richtung (d.h. entlang der x-, y- oder einer anderen diametralen Richtung) haben soll. In **Fig. 6**



zeigt der gestrichelte Pfeil im Permanentmagneten **102'** die zuvor erklärte remanente Magnetisierung an, die antiparallel zur z-Richtung liegt, wohingegen der durchgezogene Pfeil die oben erwähnte schräge Magnetisierung anzeigt.

**[0042]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel hat der Permanentmagnet z.B. 80% seiner Magnetisierung entlang der z-Richtung und 20% entlang der x-Richtung (oder eine andere diametrale Richtung wie z.B. die y-Richtung), was eine Neigung von  $14^\circ$  in Bezug auf die Rotationsachse zur Folge hat und zu einem kleinen Magnetfeld  $H_x$  beiträgt, welches im Wesentlichen homogen durch einen Sensorchip verläuft. Das Sensorsystem kann folglich zwischen einem Winkel  $\varphi$  und einem Winkel  $\varphi + 180^\circ$  unterscheiden, indem die Summe und die Differenz der Sensorsignale unterschiedlicher Magnetfeldsensorelemente (siehe **Fig. 6**, Magnetfeldsensorelemente **114a**, **114b**) ausgewertet werden, die in der Sensorebene (xy-Ebene) voneinander beabstandet sind, empfindlich auf Magnetfeldkomponenten orthogonal zur Rotationsachse und unempfindlich auf axiale Magnetfeldkomponenten sind. Das differentielle Signal (z.B.  $H_x(x = x_1, y = 0) - H_x(x = -x_1, y = 0)$ ), das man von einem Magnetfeldsensorelementpaar erhält, kann dazu verwendet werden, eine exakte Winkelposition zu bestimmen, die entweder im Bereich von  $0$  bis  $180^\circ$  oder in dem Bereich von  $180^\circ$  bis  $360^\circ$  liegt. Dieses differentielle Signal ist ein Ergebnis des magnetischen Effekts der Nut und der axialen Magnetisierung beider Magnete. Das Summensignal (e.g.  $H_x(x = x_1, y = 0) + H_x(x = -x_1, y = 0)$ ), das man von einem Magnetfeldsensorelementpaar erhält, kann dazu verwendet werden, zu bestimmen, in welchem der beiden Bereiche der Winkel  $\varphi$  liegt (d.h. ob  $180^\circ$  zu dem zuvor ermittelten Winkel  $\varphi$  addiert werden müssen oder nicht). Dieses Summensignal ist eine Folge der diametralen Magnetisierung des rotierbaren Magneten. Abgesehen von der Form der Nut P und dem weiteren in der Nut angeordneten Permanentmagneten **102'** ist das Beispiel in **Fig. 6** identisch mit dem Beispiel aus **Fig. 3**.

**[0043]** In einem weiteren Ausführungsbeispiel ist die remanente Magnetisierung des rotierenden Permanentmagneten **102'** parallel zur x-Achse (oder eine beliebige andere diametrale Richtung, z.B. y-Richtung) orientiert, was eine Neigung (die im vorherigen Beispiel  $14^\circ$  betrug) von  $90^\circ$  bedeutet. Der nichtrotierende Permanentmagnet **102** ist jedoch nach wie vor parallel zur z-Achse magnetisiert (und erzeugt folglich ein rotationssymmetrisches Magnetfeld). Die remanente Magnetisierung des Permanentmagneten **102'** sollte stark genug sein, dass die resultierende homogene diametrale Feldkomponente stärker ist, als eine beliebige potentielle externe Magnetfeldkomponente in dieser Richtung. Da die diametrale Feldkomponente nur zur Unterscheidung des  $0^\circ$ - $180^\circ$ -Sektors von dem  $180^\circ$ - $360^\circ$ -Sektor verwendet wird,

bestehen keine bestimmten Anforderungen an die Präzision der Magnetisierung.

**[0044]** In einem anderen Beispiel ist das Wellenendstück rotationsunsymmetrisch geformt; das heißt es ist so geformt, dass es eine Rotationssymmetrie erster Ordnung aufweist, sodass eine Messung im vollen Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  möglich ist, auch wenn die Permanentmagneten nur entlang der z-Richtung magnetisiert sind. Verwendet man diesen Ansatz, so kann die Nut P vom Zentrum zum Umfang des Wellenendstücks hin verschoben werden. Alternativ könnte ein Wellenendstück wie in **Fig. 1** gezeigt verwendet werden. Des Weiteren kann die Tiefe der Nut P in einer rotationsunsymmetrischen Weise variieren.

**[0045]** In dem Beispiel gemäß **Fig. 7** ist das Wellenendstück so geformt, dass es eine Rotationssymmetrie dritter Ordnung aufweist. Das heißt, eine eindeutige Winkelpositionsmessung ist in dem Sektor von  $0^\circ$  bis  $120^\circ$  ( $360^\circ/3$ ) möglich. Wie man in der in **Fig. 7** gezeigten Ansicht von unten sehen kann, teilt sich die Nut P im Mittelpunkt der Welle in zwei Äste auf, wodurch eine Y-Form gebildet wird. Im Allgemeinen können die Welle **104** und das Endstück, das eine Symmetrie N-ter Ordnung hat, ein Bauteil sein. In manchen Ausführungsbeispielen ist jedoch das Wellenendstück ein separates Bauteil, welches an der Welle **104** befestigt ist, z.B. mittels Klemmen, Kleben, Presssitz, etc.

**[0046]** In den in **Fig. 8** bis **Fig. 11** gezeigten Beispielen ist das Wellenendstück ein flexibler (elastisch deformierbarer) Teil oder weist einen solchen auf, der an der Welle **104** befestigt ist und folglich synchron mit der Welle rotiert. Der flexible Teil **151** des Wellenendstücks kann so gestaltet sein, dass er ein axiales Spiel oder axiale Toleranzen der Welle **104** ausgleicht. In dem in **Fig. 8** gezeigten Beispiel ist der flexible Teil **151** eine Blattfeder, welche an der Welle **104** mittels eines Ankeres **150** befestigt ist. In einem entspannten Zustand ist die Blattfeder **151** im Wesentlichen flach, rechtwinklig zur Rotationsachse und vor der Stirnseite der Welle **104** angeordnet. Die Rotationsachse der Welle **104** schneidet eine Längsachse der Blattfeder. In den ein **Fig. 8** und **Fig. 9** gezeigten Beispielen, ist die Längsachse der Blattfeder parallel zur x-Achse, und im Allgemeinen erstreckt sich die Längsachse der Blattfeder radial und schneidet die Rotationsachse. Im Allgemeinen illustriert **Fig. 8** einen Längsschnitt entlang der z-Achse und ist im Wesentlichen identisch mit den in **Fig. 3** und **Fig. 6** gezeigten Beispielen abgesehen davon, dass das Wellenendstück aus der Blattfeder **151**, dem erwähnten Ankeres **150** und einem Abstandshalter **152** aufgebaut ist, der zwischen dem Sensorgehäuse **106** und der Blattfeder **152** angeordnet ist.

**[0047]** In einem Ausführungsbeispiel zeigt die Welle ein axiales Spiel von rund  $\pm 1$  mm, und die Blattfeder **151** biegt sich mehr oder weniger, um über den Abstandshalter **152** einen mechanischen Kontakt mit dem Sensorgehäuse **106** zu halten. Das Ankerelement **150** kann dazu ausgebildet sein, die Blattfeder **151** an der rotierenden Welle **104** zu fixieren, sodass die Blattfeder entlang einer axialen Richtung (z-Richtung) flexibel, jedoch in lateralen (d.h. x-, y-)Richtungen vergleichsweise steif ist. Die Blattfeder **151** kann aus einem weichmagnetischen Werkstoff (z.B. Federstahl) bestehen oder einen solchen aufweisen, sodass sie die magnetische Funktion der in den vorherigen Ausführungsbeispielen gezeigten Nut P (siehe **Fig. 1** und **Fig. 3**) übernehmen kann. Alternativ kann die Blattfeder **151** aus einem nichtmagnetischen Federkörper (z.B. bestehend aus Berylliumbronze oder Berylliumkupfer) und einem weichmagnetischem Element aufgebaut sein, welches an dem nichtmagnetischen Federkörper befestigt ist. Der Zweck des flexiblen Elements besteht darin, dass – unabhängig von kleinen axialen Positionsänderungen der Welle – das flexible Element sicherstellt, dass ein weichmagnetischer Teil, der nicht rotationssymmetrisch ist, in einem im Wesentlichen konstanten axialen Abstand zu den Sensorelementen gehalten wird. Dieser nicht rotationssymmetrische, weichmagnetische Teil kann die Feder selbst sein (wie in den **Fig. 8–Fig. 11**) oder ein beliebiger anderer weichmagnetischer Teil, der an dem flexiblen Ende der Feder befestigt ist (nicht dargestellt). Da der axiale Abstand zwischen dem weichmagnetischen Teil und den Sensorelementen im Wesentlichen konstant gehalten wird, kann ein axiales Spiel der Welle nur geringere Auswirkung auf die Winkelpositionsmessung haben und sollte geringere Fehler in dem gemessenen Winkelpositionswert zur Folge haben.

**[0048]** In dem in **Fig. 8** gezeigten Ausführungsbeispiel ist auf der Rotationsachse ein kleiner Abstandshalter **152** an der Blattfeder **151** befestigt. Folglich kann der Abstandshalter **152** synchron mit der Welle **104** um die Rotationsachse rotieren, wobei der Abstandshalter den mechanischen Kontaktpunkt zwischen Wellenendstück und Sensorgehäuse **106** und den axialen Abstand zwischen dem flexiblen Wellenendstück und dem Sensorgehäuse **106** definiert. Der Abstandshalter **152** kann z.B. aus Teflon (Polytetrafluorethylen, PTFE) oder einer anderen Art von Material bestehen, welches eine geringe Reibung zwischen dem Abstandshalter **152** und dem Sensorgehäuse **106** sicherstellt. Das Sensorgehäuse **106** weist im Allgemeinen eine gegossene Komponente auf, welche einen scheuernden Füller beinhaltet. Folglich kann eine geringe Reibung ein Ziel bei der Materialwahl für den Abstandshalter sein. Der Abstandshalter kann magnetisch sein oder nicht; aufgrund seiner Rotationssymmetrie würde der Abstandshalter nicht zu einem Magnetfeld führen, welches abhängig von der Winkelposition variiert.

**[0049]** Der flexible Teil des Wellenendstücks (z.B. die Blattfeder) kann verschiedene Formen haben. Zwei exemplarische Ausführungsformen der Blattfeder **151** sind in den **Fig. 9a** und **Fig. 9b** gezeigt, von denen beide eine Draufsicht auf die Blattfeder zeigen, die mit der Schnittansicht in **Fig. 8** korrespondiert. In dem in **Fig. 9a** gezeigten Ausführungsbeispiel hat die Blattfeder **151** die Form einer kleinen streifenförmigen Platte mit einer Breite  $w_S$ , die in der xy-Ebene kleiner ist als der Sensorchip **110** (Breite  $w_C$ ), sodass die Blattfeder **151** nur einen Teil des Sensorchips **110** überdeckt (siehe Draufsicht in **Fig. 9a**). In dem alternativen Ausführungsbeispiel aus **Fig. 9b** ist die Breite  $w_S$  der Blattfeder **151** größer als der Sensorchip **110** und bedeckt folglich den ganzen Chip. In der Mitte der Blattfeder **151** ist entlang deren Längsachse (x-Achse, siehe **Fig. 9b**) ein Schlitz gebildet, sodass die Rotationsachse durch den Schlitz hindurch verläuft. Die Breite  $w_{SL}$  des Schlitzes kann kleiner sein als die Breite  $w_C$  des Chips (wie es im Beispiel in **Fig. 9** der Fall ist). In diesem Ausführungsbeispiel ist der Effekt des Schlitzes auf das resultierende, von den Magnetfeldsensorelementen im Chip **110** „gesehene“ Magnetfeld sehr ähnlich zu dem Effekt der Nut P in den in **Fig. 3** und **Fig. 6** dargestellten Beispielen. Folglich hat in dem vorliegenden Ausführungsbeispiel in **Fig. 8** und **Fig. 9** das Wellenendstück eine Symmetrie zweiter Ordnung ( $N = 2$ , zweifache Rotationssymmetrie) für eine Winkelpositionsmessung im Bereich von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$ . In anderen Ausführungsbeispielen hat die Blattfeder **151** eine sich verjüngende Geometrie (d.h. deren Breite ist an einem Ende kleiner im Vergleich zum anderen Ende) um eine Symmetrie erster Ordnung zu erreichen und eine Winkelpositionsmessung im Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  zu ermöglichen. Des Weiteren kann die streifenförmige Platte **151** (d.h. die Feder) in **Fig. 9a** breiter und länger und in negative y-Richtung verschoben sein, sodass die obere Kante der Feder bei  $y = 0$  ist und die Feder **151** jenen Teil des Chips überdeckt, für den  $y < 0$  gilt (siehe gepunktete Fläche in **Fig. 9a**). Falls diese Feder ferromagnetisch (d.h. weichmagnetisch) und durch einen am Sensorgehäuse **106** oder am PCB **108** fixierten Permanentmagneten **102** oder durch einen an der Welle fixierten Permanentmagneten **102'** magnetisiert ist, und falls diese Magneten rotationssymmetrisch mit einer rotationssymmetrischen remanenten Magnetisierung sind, dann erzeugt die Feder **151** – am Ort der Magnetfeldsensorelemente – ein Magnetfeld mit einer Symmetrie erster Ordnung ( $N = 1$ ), d.h. deren Magnetfeld auf die Sensorelemente ermöglicht eine eindeutige Messung von Winkeln im Bereich von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ . Das gleiche gilt für einen breiten Streifen in **Fig. 9**, falls die Breite  $w_{SL}$  des Schlitzes breit genug (z.B. breiter als  $w_C/2$ ) und lang genug (z.B. länger als der Chip) ist, und falls der Schlitz hin zur negativen y-Richtung verschoben ist, sodass seine obere Kante an der x-Achse ausgerichtet ist.

**[0050]** In dem Ausführungsbeispiel aus **Fig. 10** ist die Blattfeder **151** um  $90^\circ$  gebogen und direkt an der Welle **104** befestigt, anstatt ein separates Anker-element (wie z.B. das Anker-element **150** in **Fig. 8**) zu verwenden. Beispielsweise kann jener Teil der Blattfeder **151**, der an der Welle **104** befestigt ist, in eine Nut eingeführt sein, welche sich axial in der Mantelfläche der Welle erstreckt, und an die Welle geschraubt, an dieser angeschweißt oder anderweitig fixiert sein. Im Allgemeinen ist es auch möglich, die Blattfeder **152** an der Rotationsachse erhaben auszuarbeiten, anstatt einen separaten Abstandshalter zu befestigen. In diesem Fall ist der Abstandshalter als Ausbeulung (embossment) **152'** implementiert wie in den Beispielen aus **Fig. 10** und **Fig. 11** gezeigt ist. In dem Beispiel in **Fig. 11** hat die Blattfeder eine S-Form und ist an der Stirnseite der Welle **104** befestigt anstatt an der Mantelfläche wie in dem vorherigen Beispiel aus **Fig. 10**. In diesem Fall wird eine zusätzliche Asymmetrie (Symmetrie erster Ordnung) durch eine unsymmetrische Ausnehmung R (recess) in der Stirnseite der Welle **104** erreicht. Der Effekt der Ausnehmung R auf das resultierende, von den Magnetfeldsensorelementen „gesehene“ Magnetfeld ist ähnlich dem Effekt einer geneigten Stirnfläche der Welle wie im Beispiel aus **Fig. 1**. Wie in den vorherigen Ausführungsbeispielen kann ein Permanentmagnet **102** an dem PCB **108** befestigt sein. Zusätzlich oder alternative kann ein anderer Permanentmagnet **102'** an der Welle **104** befestigt sein (in **Fig. 10** als gepunktete Linien gezeigt).

**[0051]** In den hier gezeigten Ausführungsbeispielen ist der Sensorchip **110** näher am Abstandshalter **152** oder an der Ausbeulung **152'** als der Leadframe **116**, was einen geringen Abstand (Luftspalt) zwischen Wellenendstück und der im Sensorchip **110** integrierten Magnetfeldsensorelemente sicherstellt. Eine derartige Anordnung kann helfen, den Pegel des Magnetfelds in den Sensorelementen und den Signaloutput der Magnetfeldsensorelemente zu maximieren. In anderen Ausführungsbeispielen kann der Sensorchip jedoch umgedreht sein, sodass eine freiliegende Metallfläche (die paddle) von dem Abstandshalter **152** oder der Ausbeulung **152'** kontaktiert wird anstatt der Kunststoffteil (Vergussmasse) des Sensorgehäuses. In diesem Fall schützt die Metallfläche das Sensorgehäuse **106** gegen Abnutzung, die von dem rotierenden Abstandshalter oder der rotierenden Ausbeulung verursacht wird. Auch wenn die Metallfläche nicht freiliegen würde (d.h. sie ist mit Vergussmasse bedeckt und folglich ist der Abstandshalter **152** oder die Ausbeulung **152'** in Kontakt mit der scheuernden Vergussmasse), würde sie dennoch den Chip vor der Feder **151** schützen. In alternativen Ausführungsformen kann das Magnetfeldsensorgehäuse **106** auf der Unterseite der PCB montiert sein, während die Welle der Oberseite der Leiterplatte zugewandt ist, und der Abstandshalter **152** kontaktiert die Oberseite des PCBs oder eine Metallplat-

te oder eine ähnliche Struktur, die auf der Oberseite des PCBs montiert ist. In diesem Ausführungsbeispiel besteht keine Reibung zwischen dem rotierenden Abstandshalter und der scheuernden Vergussmasse des Sensorgehäuses, und das Sensorgehäuse ist durch das dazwischenliegende PCB vor dem rotierenden Abstandshalter **152** geschützt.

**[0052]** Im Allgemeinen können die Permanentmagneten auf dem PCB **108** (siehe **Fig. 10** und **Fig. 11**), dem Sensorgehäuse **106** (siehe **Fig. 1**), der Welle **104** (siehe **Fig. 6**), der Blattfeder **151** (z.B. an deren flexiblen Ende) oder zwischen Welle und Feder oder sogar auf dem Anker-element **150** montiert sein. Der Permanentmagnet kann verschiedene Formen aufweisen wie beispielsweise eine Ringform, eine Pillenform, einer Zylinderform, eine Quaderform mit unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen (rein axial oder rein radial oder Kombinationen von axial und diametral bzw. axial und radial). Durch Kombinieren verschiedener Aspekte der oben beschriebenen Ausführungsbeispiele können weitere Ausführungsbeispiele geschaffen werden.

**[0053]** Die folgenden **Fig. 12** bis **Fig. 14** illustrieren unterschiedliche Anordnungen (Layouts) der in mindestens einem Sensorchip **110** integrierten Magnetfeldsensorelemente (siehe z.B. **Fig. 3**, **Fig. 6** und **Fig. 8**). Im Allgemeinen werden in den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen zumindest vier Magnetfeldsensorelemente verwendet, obwohl bei den in **Fig. 12** bis **Fig. 14** gezeigten Ausführungsbeispielen acht oder sechzehn Magnetfeldsensorelemente verwendet werden (wobei im letzterem Fall zwei zusammengehörige Magnetfeldsensorelemente in geringem Abstand voneinander oder aneinander angrenzend angeordnet sind und deren Sensorausgangssignale gemittelt wird, siehe **Fig. 12** und **Fig. 13**). Der Sensorchip **110** definiert eine Sensorebene, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse (z-Achse) angeordnet ist und in der die Magnetfeldsensorelemente angeordnet sind. Im Allgemeinen sind ein erstes und ein zweites der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ersten Richtung (z.B. x-Richtung) empfindlich, und ein drittes und ein viertes der Magnetfeldsensorelemente sind ebenfalls voneinander beabstandet und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung (z.B. y-Richtung) empfindlich. Wie oben erwähnt bilden die x-Richtung, die y-Richtung und die z-Richtung (definiert durch die Rotationsachse) ein kartesisches Koordinatensystem. Die erste Richtung und die zweite Richtung sind nicht parallel und liegen rechtwinklig zur Rotationsachse. Wie oben erwähnt sind die in den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen verwendeten Sensorelemente im Wesentlichen unempfindlich auf Magnetfeldkomponenten rechtwinklig zur Sensorebene (und folglich parallel zur Rotationsachse). In den

hier beschriebenen Ausführungsbeispielen können die einzelnen Magnetfeldsensorelemente beispielsweise entlang eines zur Rotationsachse konzentrischen Kreises mit Radius  $r$  angeordnet sein. An den (oder nahe bei den) Winkelpositionen  $0^\circ$  (d.h. bei  $P_1 = (r, 0)$ ),  $90^\circ$  (d.h. bei  $P_2 = (0, r)$ ),  $180^\circ$  (d.h. bei  $P_3 = (-r, 0)$ ) und  $270^\circ$  (d.h. bei  $P_4 = (0, -r)$ ), sind Magnetfeldsensorelemente vorgesehen, die auf Magnetfeldkomponenten in x- und y-Richtung empfindlich jedoch unempfindlich in z-Richtung sind ( $H_X$ -Sensorelemente und  $H_Y$ -Sensorelemente).

**[0054]** In den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen sind die Sensorelemente **114a**, **114b**, **116a**, **116b**, **118a**, **118b**, **120a**, **120b** empfindlich auf Magnetfeldkomponenten in y-Richtung und werden folglich als  $H_Y$ -Sensorelemente bezeichnet. Gleichmaßen sind die Sensorelemente **115a**, **115b**, **117a**, **117b**, **119a**, **119b**, **121a**, **121b** empfindlich auf Magnetfeldkomponenten in x-Richtung und werden folglich als  $H_X$ -Sensorelemente bezeichnet. Theoretisch sollten die Magnetfeldsensorelemente (z.B. die Sensorelemente **114a**, **114b**, **115a** und **115b** in **Fig. 12**) auf exakt demselben Punkt auf dem Kreis mit Radius  $r$  (an den Positionen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ) bereitgestellt werden, was schwer zu implementieren ist, weil dazu die Magnetfeldelemente gestapelt werden müssten. Das Beispiel aus **Fig. 12** zeigt eine Implementierung, gemäß der zwei  $H_X$ -Sensorelemente und zwei  $H_Y$ -Sensorelemente symmetrisch zu und nahe bei den Winkelpositionen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  auf dem Kreis mit Radius  $r$  angeordnet sind. In **Fig. 12** sind Paare von  $H_Y$ -Sensorelementen **114a**, **114b**, **116a**, **116b**, **118a**, **118b**, und **120a**, **120b** an der x-Achse ausgerichtet (Sensorelemente **114a**, **114b**, **118a**, **118b**) oder haben eine Achse parallel zur x-Achse (Sensorelemente **116a**, **116b**, **120a**, **120b**), und jedes Paar ist symmetrisch zu der jeweiligen Position  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  angeordnet. Die Magnetfeldkomponenten  $H_X$  und  $H_Y$  für eine bestimmte Position  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  kann man mittels Mittelung der Ausgangssignale der Sensorelemente eines jeden Paares erhalten. Beispielsweise werden die Ausgangssignale der  $H_Y$ -Sensorelemente **114a** und **114b** gemittelt, um eine Messung der y-Komponente  $H_Y$  des Magnetfelds an der Position  $P_1$  zu erhalten. Entsprechend werden die Ausgangssignale der  $H_X$ -Sensorelemente **121a** und **121b** gemittelt, um eine Messung der x-Komponente  $H_X$  des Magnetfelds an der Position  $P_4$  zu erhalten. Im Wesentlichen können die Sensorelemente **114a** und **114b** als ein einziges (jedoch verteiltes)  $H_Y$ -Sensorelement an der Position  $P_1$  betrachtet werden. Entsprechend können die Sensorelemente **117a** und **117b** als ein einziges  $H_X$ -Sensorelement an der Position  $P_2$  betrachtet werden, etc. Gemäß einer anderen Implementierung sind die Sensorelemente nicht in Paare „aufgeteilt“, sondern die  $H_X$ - und  $H_Y$ -Sensorelemente werden so nahe an den gewünschten Positionen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  bereitgestellt, dass die Abweichung zwischen der tatsächlichen Sensorposition

und der Sollposition ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$ ) vernachlässigbar ist. Das Beispiel aus **Fig. 13** ist im Wesentlichen das gleiche wie das Beispiel aus **Fig. 12**. Jedoch sind in **Fig. 13** die Positionen  $P_1'$ ,  $P_2'$ ,  $P_3'$  und  $P_4'$ , an denen die Magnetfeldsensorkomponenten  $H_X$  und  $H_Y$  gemessen werden, im Vergleich zu den in **Fig. 12** gezeigten Positionen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  um  $45^\circ$  verschoben. Im Allgemeinen ist der Abstand zwischen verschiedenen Messpositionen auf der Sensorebene zumindest so groß wie (oder zumindest doppelt so groß wie) die größte Abmessung eines einzelnen Magnetfeldsensorelementes.

**[0055]** In dem Beispiel aus **Fig. 14** ist auf dem Kreis mit Radius  $r$  ein Magnetfeldsensorelement an jeder der folgenden Winkelpositionen auf dem Kreis vorgesehen:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $315^\circ$ . Ein  $H_Y$ -Sensorelement wird auf dem Kreis bei einem Winkel von  $0^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $315^\circ$  bereitgestellt ( $H_Y$ -Sensorelemente **114b'**, **116a'**, **114a'** **116b'**). Ein  $H_X$ -Sensorelement wird auf dem Kreis bei einem Winkel von  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $270^\circ$  bereitgestellt ( $H_X$ -Sensorelemente **117b'**, **115a'**, **117a'**, **115a'**). Da lediglich ein Magnetfeldsensorelement an jeder Position vorgesehen ist, können die Magnetfeldsensorelemente exakt auf den gewünschten Positionen platziert werden. Für alle drei in den **Fig. 12** bis **Fig. 14** gezeigten Ausführungsbeispiele besteht in wichtiger Aspekt darin, dass nur  $H_X$ - und  $H_Y$ -Sensorelemente verwendet werden, die eine Empfindlichkeit in einer Richtung rechtwinklig zur Rotationsachse (z-Richtung) haben, jedoch von Magnetfeldkomponenten in z-Richtung nicht beeinflusst werden. Des Weiteren sind die einzelnen Magnetfeldsensorkomponenten derart ausgerichtet, dass sie Magnetfeldkomponenten in x-Richtung und y-Richtung messen und nicht in einer beliebigen radialen Richtung (z.B. entlang der  $45^\circ$ -Line durch Punkte  $P_1'$  und  $P_3'$  in **Fig. 13**). In der Praxis kann es schwierig sein, ein Sensorelement exakt in einer beliebigen radialen Richtung auszurichten, wohingegen es einfacher ist, sie in x- und y-Richtung auszurichten, weil die x- und y-Richtungen parallel zu den Kanten des Chips sind und das übliche Raster ist, gemäß dem elektronische Bauelemente in üblichen Mikroelektroniktechnologien ausgerichtet werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Ausgangssignale der diametral angeordneten Magnetfeldsensorelementpaare **114a'**, **114b'**, **115a'** **115b'**, **116a'**, **116b'**, und **117a'**, **117b'** nicht gemittelt werden, wohingegen in den Beispielen aus den **Fig. 12** und **Fig. 13** die Ausgangssignale korrespondierender Magnetfeldsensorelementpaare **114a**, **114b**, **115a**, **115b**, etc., gemittelt werden, um ein gemittelttes Ausgangssignal zu erhalten.

**[0056]** Es sollte des Weiteren klar sein, dass andere Ausrichtungen der Sensorelemente wie eine radiale oder azimutale Orientierung auch möglich sind, weil man mittels einer einfachen Transformation von Koordinatensystemen ein Feld in einer ersten Richtung

als Kombination von Feldkomponenten in zumindest zwei nicht-parallele andere Richtungen ausdrücken kann. Es ist auch nicht nötig, alle Sensorelemente auf einem Kreis mit Mittelpunkt auf der Rotationsachse zu platzieren wie in dem vorliegenden Ausführungsbeispiel gezeigt (der Mittelpunkt kann als Projektion der Rotationsachse auf die Sensorebene definiert werden). Im Prinzip können die Sensorelemente auf einem regelmäßigen oder sogar unregelmäßigen Raster in der xy-Ebene platziert werden, um die Feldkomponenten  $H_X(x, y)$  oder  $H_Y(x, y)$  oder  $H_R(x, y)$  (d.h. radiale Komponente) oder  $H_{PSI}(x, y)$  (d.h. azimutale Komponente) abzutasten (sample) und die Funktionen  $H_X(x, y)$  oder  $H_Y(x, y)$  oder  $H_R(x, y)$  oder  $H_{PSI}(x, y)$  durch Interpolation oder Approximation wie der Methode der kleinsten Fehlerquadrate oder ähnliche mathematische Methoden zu rekonstruieren.

**[0057]** Die folgende Beschreibung behandelt einen Algorithmus, der dazu verwendet werden kann, eine Winkelposition der Welle aus den Ausgangssignalen der Magnetfeldsensorelemente abzuleiten, die gemäß den in **Fig. 12** bis **Fig. 14** gezeigten Layouts angeordnet sind. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Winkelposition zu bestimmen, und lediglich einige wenige Beispiele (für zweifache Symmetrie, d.h.  $N = 2$ ) werden als eine umfangreiche Klasse von Algorithmen diskutiert. Im Allgemeinen können die hier beschriebenen Ausführungsbeispiele eine Schaltungsanordnung beinhalten, die mit den (zumindest vier) in dem Sensorchip **110** integrierten Magnetfeldsensorelementen gekoppelt ist und die dazu ausgebildet ist, eine Winkelposition der Welle durch Kombinieren der Ausgangssignale der Magnetfeldsensorelemente zu berechnen. Ein gemeinsamer Aspekt dieser Ansätze besteht darin, dass zwei oder mehr Ausgangssignale der Magnetfeldsensorelemente so kombiniert werden, dass man zwei Signale erhält, welche (1) eine definierte Amplitudenbeziehung haben (z.B. gleiche Amplitude), (2) einen definierten Phasenversatz aufweisen (z.B.  $90^\circ$ ) und (3) unempfindlich gegen homogene magnetische Störfelder sind. Die letzte Eigenschaft kann man erreichen, indem man eine differentielle Messung verwendet. Das heißt, die Ausgangssignale eines  $H_X$ -Sensorelementpaars (oder eines  $H_Y$ -Sensorelementpaars) werden subtrahiert, um ein differentielles Signal zu erhalten, in dem jene Signalkomponenten, die von einem homogenen Störfeld kommen, sich gegenseitig aufheben. In dem Beispiel aus **Fig. 14** können differentielle Signale von einem Sensorelementpaar erhalten werden, die voneinander beabstandet an zwei diametral gegenüberliegenden Positionen auf dem Kreis mit Radius  $r$  liegen (d.h. **114a'** und **114b'**, **115a'** und **115b'**, **116a'** und **116b'**, etc.). Statt einer Subtraktion kann eine gewichtete Summe der Ausgangssignale verschiedener Magnetfeldsensorelemente verwendet werden (wobei negative Gewichtungsfaktoren möglich sind). Wie erwähnt müssen die Magnetfeldsensorelemente nicht notwendi-

gerweise auf einem Kreis angeordnet sein. Im Allgemeinen werden Magnetfeldkomponenten in der ersten Richtung (z.B. x-Richtung) an zumindest einer ersten und einer zweiten Position in der Sensorebene gemessen (z.B. Positionen  $P_1$  und  $P_3$  in dem Beispiel aus **Fig. 12**). Des Weiteren werden Magnetfeldkomponenten in der zweiten Richtung (z.B. y-Richtung) an zumindest einer dritten und vierten Position in der Sensorebene gemessen (z.B. Positionen  $P_2$  und  $P_4$  in dem Beispiel aus **Fig. 12**). Die gesuchte Winkelposition der Welle in Bezug auf deren Rotationsachse kann dann basierend auf der Differenz der Magnetfeldkomponenten an der ersten und der zweiten Position und auf der Differenz der Magnetfeldkomponenten an der dritten und der vierten Position berechnet werden. Die erwähnten Differenzen werden dazu verwendet, die oben erwähnte differentielle Messung zu implementieren. Das Winkelpositionssystem kann daher als eine Art Gradiometer betrachtet werden.

**[0058]** Bezugnehmend auf **Fig. 12** erhält man ein Signal  $S_{COS}$ , das proportional zum Cosinus der doppelten Winkelposition  $\varphi$  ( $S_{COS} \sim \cos(2\varphi)$ ) ist, indem man  $(H_X(0^\circ) - H_X(180^\circ)) - (H_Y(90^\circ) - H_Y(270^\circ))$  berechnet. Ein Signal  $S_{SIN}$ , das proportional zum Sinus der doppelten Winkelposition  $\varphi$  ( $S_{SIN} \sim \sin(2\varphi)$ ) ist, erhält man, indem man  $(H_Y(0^\circ) - H_Y(180^\circ))$  berechnet. Ein weiteres Signal  $S_{SIN}'$ , das proportional zum Sinus der doppelten Winkelposition ist, erhält man, indem man  $(H_X(90^\circ) - H_X(270^\circ))$  berechnet. Das Cosinus-Signal  $S_{COS}$  und ein beliebiges der beiden Sinus-Signale  $S_{SIN}$ ,  $S_{SIN}'$  können verwendet werden, um die Tangensfunktion  $\tan(2\varphi)$  (Verhältnis  $S_{SIN}/S_{COS}$  oder  $S_{SIN}'/S_{COS}$ ) der Winkelposition  $2\varphi$  zu berechnen, aus der die gesuchte Winkelposition berechnet werden kann, als Arkustangens von z.B.  $S_{SIN}/S_{COS}$ . Beispielsweise kann der CORDIC-Algorithmus verwendet werden, um die Arkustangensfunktion zu implementieren. Bei Verwendung des Layouts aus **Fig. 12** erhält man die Magnetfeldkomponente  $H_Y(0^\circ)$  durch Mittelung der Ausgangssignale der Magnetfeldsensorelemente **114** und **114b**. Das gleiche wird gemacht für die  $H_X$ -Komponente und andere Positionen der Magnetfeldsensorelemente. Der Faktor 2 in den Ausdrücken  $\cos(2\varphi)$ ,  $\sin(2\varphi)$  und  $\tan(2\varphi)$  treten als Folge der erwähnten zweifachen Symmetrie des Aufbaus auf, und die Winkelposition kann nur in einem Bereich von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  eindeutig bestimmt werden, was ausreichend ist, wenn der On-Axis-Winkelpositionssensor zur Steuerung bestimmter Typen von BLDC-Motoren verwendet wird.

**[0059]** Bei Verwendung des Layouts gemäß dem Beispiel aus **Fig. 13** können das Signal  $S_1$  und  $S_2$  gemäß

$$S_1 = (H_X(45^\circ) - H_X(225^\circ)) + (H_Y(315^\circ) - H_Y(135^\circ))$$

und

$$S_2 = (H_X(135^\circ) - H_X(315^\circ)) + (H_Y(45^\circ) - H_Y(225^\circ))$$

berechnet werden, wobei die Summe aus  $S_1$  und  $S_2$  gleich  $A \cdot \sin(2\varphi)$  und die Differenz  $S_1 - S_2$  gleich  $A \cdot \cos(2\varphi)$  ist. Ähnlich wie im vorherigen Beispiel kann die Winkelposition  $\varphi$  hergeleitet werden als  $1/2 \cdot \arctan((S_1 + S_2)/(S_1 - S_2))$ .

**[0060]** Bei Verwendung des Layouts gemäß dem Beispiel aus **Fig. 14** können ein Sinussignal  $S_{\text{SIN}}$  und ein Cosinussignal  $S_{\text{COS}}$  gemäß

$$S_{\text{SIN}} = (H_X(270^\circ) - H_X(90^\circ)) - (H_Y(0^\circ) - H_Y(180^\circ))$$

und

$$S_{\text{COS}} = \sqrt{2} \cdot SC - S_{\text{SIN}},$$

wobei  $SC = (H_X(225^\circ) - H_X(45^\circ)) - (H_Y(315^\circ) - H_Y(135^\circ))$ . Wie erwähnt betreffen die oben diskutierten Beispiele eine zweifache Symmetrie des Wellenendstücks. Es sei darauf hingewiesen, dass ähnliche Ausdrücke für Signale gefunden werden können, die für Messaufbauten mit einer Symmetrie erster Ordnung oder dritter oder höherer Ordnung geeignet sind. In den obigen Gleichungen werden die Positionen  $P_1, P_1', P_2, P_2', P_3, P_3', P_4,$  und  $P_4'$  durch korrespondierende Winkel repräsentiert ( $0^\circ$  bezeichnet  $P_1$ ,  $45^\circ$  bezeichnet  $P_1'$ ,  $90^\circ$  bezeichnet  $P_2$ ,  $135^\circ$  bezeichnet  $P_2'$ ,  $180^\circ$  bezeichnet  $P_3$ ,  $225^\circ$  bezeichnet  $P_3'$ ,  $270^\circ$  bezeichnet  $P_4$  und  $315^\circ$  bezeichnet  $P_4'$ ). Zusammen mit dem Radius  $r$  definieren die Winkel eindeutig die zugehörigen Messpunkte  $P_1, P_1', P_2, P_2', P_3, P_3', P_4,$  und  $P_4'$ .

**[0061]** Wie oben erwähnt kann eine zweifache Symmetrie des Wellenendstücks in zumindest machen Anwendungen ausreichend sein, in denen die Rotationsbewegung von BLDC-Motoren gesteuert werden soll. **Fig. 15** und **Fig. 16** illustrieren zwei verschiedene Beispiele, wie ein On-Axis Winkelpositionssensor in einem bürstenlosen DC-(BLDC-)Motoranordnung angeordnet werden kann. **Fig. 15** ist eine Schnittansicht eines Teils eines BLDC-Motors, wobei die Schnittebene durch die Rotationsachse der Welle **104** verläuft. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass **Fig. 15** nicht maßstabsgetreu ist und als schematische Skizze zu betrachten ist. Auch in **Fig. 15** gezeigt sind die Permanentmagneten (PM) **217** und **218**, welche direkt oder indirekt an der Welle **104** entlang deren Umfang befestigt sind. Die Welle **104** kann an zumindest zwei Lagern gelagert sein, wobei Lager **214** im dargestellten Beispiel ein Kugellager ist. Jedoch können abhängig von der tatsächlichen Implementierung auch andere Typen von Lagern ebenso verwendet werden. Die Welle **104** und die an der Welle befestigten PMs bilden den Rotor (Anker) des Motors. Der Stator **201** des Motors weist Spulen **211** und **212** auf, welche mit Strom versorgt werden, um die Drehbewegung des Motors zu steuern.

**[0062]** Wie in den oben beschriebenen Beispielen hat das Wellenendstück eine Ausnehmung **P** ähnlich zu dem in **Fig. 3** und **Fig. 4** gezeigten Beispielen, wobei ein Permanentmagnet **102'** an der Welle **104** befestigt ist ähnlich wie in dem oben unter Bezugnahme auf **Fig. 6** diskutierten Beispiel. Zur Realisierung eines kompakten Designs sind die Magnetfeldsensoren (in **Fig. 15** durch den Sensorchip **106** repräsentiert), die zum Aufbau eines On-Axis-Winkelpositionssensors verwendet werden, auf dem PCB **108** zusammen mit der Leistungselektronik angeordnet, die zur Erzeugung des den Statorspulen **211, 212** zugeführten Betriebsstroms verwendet wird.

**[0063]** Wie man in **Fig. 15** sehen kann, ist das PCB direkt der Stirnseite der Welle **104** zugewandt (d.h. dem Wellenendstück), und die Magnetfeldsensorelemente sind in dem vorliegenden Beispiel auf dem PCB **108** symmetrisch zur Rotationsachse wie in den **Fig. 12** bis **Fig. 14** angeordnet. Die elektrischen Kontakte **C** (Lötkontakte, Pins) der Statorspulen **211, 212** stehen vom Stator zum PCB **108** hin hervor, was eine direkte elektrische Verbindung zwischen den Spulen **211, 212** und dem PCB **108** ermöglicht. Das PCB **108** kann an einer inneren Oberfläche eines Motorgehäuses **H**, die dem Stator **210** des Motors zugewandt ist, gelagert sein.

**[0064]** Das Beispiel aus **Fig. 16** entspricht im Wesentlichen dem vorherigen Beispiel aus **Fig. 15**, abgesehen davon dass der am Wellenendstück befestigte Permanentmagnet **102'** weggelassen wurde und stattdessen, ähnlich dem in **Fig. 3** gezeigten Beispiel, ein Permanentmagnet **102** an der Rückseite des PCBs **108** angeordnet ist. Es versteht sich, dass eine beliebige andere Winkelpositionssensoranordnung in einem BLDC-Motoranordnung wie in **Fig. 15** und **Fig. 16** gezeigt verwendet werden kann.

**[0065]** Das PCB **108** trägt den Sensorchip **106** sowie auch die Leistungsbaulemente **215, 216**, welche den (gesteuerten) Laststrom bereitstellen, der den Statorspulen **211, 212** zugeführt wird. Der Abstand zwischen den Magnetfeldsensorelementen (in Sensorchip **106**) und den Leistungsbaulementen **215, 216**, oder zwischen den Magnetfeldsensorelementen und den Laststromleitungen auf dem PCB **108** ist oft vergleichsweise klein (z.B. weniger als 10 mm oder 20 mm), sodass das Magnetfeld, das von den Stromleitungen oder den Leistungsbaulementen erzeugt wird, an den Positionen der Magnetfeldsensorelemente stark inhomogen ist. Daher ist ein gewöhnlicher Gradiometer nicht ausreichend, um die Auswirkung der magnetischen Störfelder, die von den Laststromleitungen und den Leistungsbaulementen verursacht werden, zu eliminieren. Jedoch befinden sich die Laststromleitungen und die Leistungsbaulemente (zumindest näherungsweise) an der gleichen z-Position (d.h. der gleichen axialen Position) wie die Magnetfeldsensorelemente (und folglich schnei-

den die Magnetfeldlinien die Sensorelemente wie in **Fig. 2** gezeigt beinahe vertikal). Die Winkelpositionsmessung wird sehr robust gegen diese Störungen, falls die Magnetfeldsensorelemente nicht auf diese Magnetfeldkomponenten in z-Richtung reagieren. Daher beinhalten die hier beschriebenen Ausführungsbeispiele Gradiometer-Aufbauten, welche empfindlich auf Magnetfeldkomponenten in x- oder y-Richtung sind.

**[0066]** Obwohl die Erfindung mit Bezug auf eine oder mehrere Implementierungen beschrieben und dargestellt wurde, können an den dargestellten Beispielen Änderungen und/oder Modifizierungen vorgenommen werden, ohne den Geist und den Umfang der beigefügten Ansprüche zu verlassen. Insbesondere bezüglich der verschiedenen Funktionen, die von den oben beschriebenen Komponenten oder Strukturen (Einheiten, Baugruppen, Vorrichtungen, Schaltungen, Systemen, usw.) ausgeführt werden, sollen die Bezeichnungen (einschließlich des Bezugs auf ein „Mittel“), die verwendet werden, um solche Komponente zu beschreiben, auch jeder anderen Komponente oder Struktur entsprechen, die die spezifizierte Funktion der beschriebenen Komponente ausführt (d.h. die funktional gleichwertig ist), auch wenn sie der offenbarten Struktur, die in den hier dargestellten beispielhaften Implementierungen der Erfindung die Funktion ausführt, nicht strukturell gleichwertig ist.

**[0067]** Des Weiteren, obwohl ein bestimmtes Merkmal der Erfindung nur in Bezug auf eine von mehreren Implementierungen offenbart wurde, können solche Eigenschaften mit einer oder mehreren Eigenschaften der anderen Implementierungen kombiniert werden, falls wünschenswert oder vorteilhaft für eine beliebige oder bestimmte Anwendung. Des Weiteren, insoweit Bezeichnungen wie „einschließlich“, „einschließen“, „aufweisend“, „hat“, „mit“ oder Variationen derselben entweder in der detaillierten Beschreibung oder in den Ansprüchen verwendet werden, sollen solche Bezeichnungen einschließlich verstanden werden, ähnlich der Bezeichnung „umfassen“.

### Patentansprüche

1. Ein magnetisches Winkelpositionssensorsystem umfassend:  
eine um eine Rotationsachse rotierbare Welle, die Welle hat ein weichmagnetisches Wellenendstück;  
einen Sensorchip, der von dem Wellenendstück in axialer Richtung beabstandet ist und eine Sensorebene definiert, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse liegt;  
zumindest vier in dem Sensorchip integrierte Magnetfeldsensorelemente, wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ers-

ten Richtung empfindlich sind, und wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung empfindlich sind; die erste und die zweite Richtung sind wechselseitig nicht-parallel und die erste und die zweite Richtung sind rechtwinklig zur Rotationsachse;

eine Magnetfeldquelle, welche das Wellenendstück magnetisiert, wobei das Wellenendstück derart geformt ist, dass ein Magnetfeld in der Sensorebene, welches von der Magnetfeldquelle verursacht wird, mit N-ter Ordnung symmetrisch ist, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist; und

eine mit den zumindest vier Magnetfeldsensorelementen gekoppelte Schaltungsanordnung, die dazu ausgebildet ist, eine Winkelposition der Welle zu berechnen, indem Ausgangssignale der zumindest vier Magnetfeldsensorelemente kombiniert werden.

2. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 1, wobei die zumindest vier Magnetfeldsensorelemente in der Sensorebene um einen Mittelpunkt herum angeordnet sind, der durch eine Projektion der Rotationsachse auf die Sensorebene definiert ist.

3. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei die Magnetfeldquelle zumindest einen Permanentmagneten umfasst.

4. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 3, wobei der Sensorchip in einem Chipgehäuse angeordnet ist, der an einer Leiterplatte befestigt ist, und wobei der zumindest eine Permanentmagnet am Chipgehäuse oder an der Leiterplatte oder am Wellenendstück befestigt ist.

5. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Magnetfeldquelle einen ersten Permanentmagneten und zumindest einen zweiten Permanentmagneten umfasst; wobei der Sensorchip in einem Chipgehäuse angeordnet ist, der an einer Leiterplatte befestigt ist, und wobei der erste Permanentmagnet am Chipgehäuse oder an der Leiterplatte oder am Wellenendstück befestigt ist.

6. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei das Wellenendstück zumindest eine in deren Stirnfläche angeordnete Nut oder zumindest einen an der Stirnfläche angeordneten Vorsprung aufweist, wobei die Nut oder der Vorsprung so geformt sind, dass das Wellenendstück eine Rotationssymmetrie N-ter Ordnung aufweist, wobei N eine endliche Ganzzahl ist.

7. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Wel-

lenendstück eine Feder aufweist, die synchron mit der Welle rotiert, wobei die Feder im Wesentlichen in einer axialen Richtung der Rotationsachse nachgiebig ist.

8. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 7, wobei die Feder im Wesentlichen nichtnachgiebig in Richtungen rechtwinklig zur Rotationsachse ist.

9. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 7 oder 8, wobei die Feder zwischen dem Sensorchip und einer Stirnseite des Wellenendstücks angeordnet ist, und wobei die Feder auf einem Chipgehäuse des Sensorchips über einen Abstandshalter gelagert ist.

10. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 9, wobei der Abstandshalter an der Feder befestigt ist oder durch eine Ausbeulung der Feder gebildet wird, und wobei die Feder dazu ausgebildet ist, eine axiale Kraft auf das Chipgehäuse auszuüben.

11. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die zumindest vier Sensorelemente symmetrisch entlang eines koaxial zur Rotationsachse liegenden Kreises verteilt sind.

12. Ein magnetisches Winkelpositionssensorsystem umfassend:  
eine um eine Rotationsachse rotierbare Welle, die Welle hat ein weichmagnetisches Wellenendstück;  
einen Sensorchip, der von dem Wellenendstück in axialer Richtung beabstandet ist und eine Sensorebene definiert, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse liegt;  
zumindest vier in dem Sensorchip integrierte Magnetfeldsensorelemente, wobei ein erstes und ein zweites Magnetfeldsensorelement der zumindest vier Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ersten Richtung empfindlich sind, und wobei ein drittes und ein viertes Magnetfeldsensorelement der zumindest vier Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung empfindlich sind, wobei die erste und die zweite Richtung wechselseitig nicht-parallel und die erste und die zweite Richtung rechtwinklig zur Rotationsachse sind;  
eine Magnetfeldquelle, welche das Wellenendstück magnetisiert, wobei das Wellenendstück derart geformt ist, dass ein Magnetfeld in der Sensorebene, welches von der Magnetfeldquelle verursacht wird, mit N-ter Ordnung symmetrisch ist, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist; und

eine mit den zumindest vier Magnetfeldsensorelementen gekoppelte Signalverarbeitungsschaltung, die dazu ausgebildet ist:

ein erstes Signal zu berechnen, das die Differenz der von dem ersten und dem zweiten Magnetfeldsensorelement gemessenen Magnetfeldkomponenten repräsentiert;

ein zweites Signal zu berechnen, das die Differenz der von dem dritten und dem vierten Magnetfeldsensorelement gemessenen Magnetfeldkomponenten repräsentiert;

eine Winkelposition der Welle zu berechnen durch Kombinieren von zumindest dem ersten und dem zweiten Signal.

13. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 12, wobei die zumindest vier Sensorelemente symmetrisch entlang eines koaxial zur Rotationsachse liegenden Kreises verteilt sind.

14. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß Anspruch 13, wobei ein erster Teil der Magnetfeldsensorelemente entlang eines ersten Kreises angeordnet sind, und wobei ein zweiter Teil der Magnetfeldsensorelemente entlang eines zweiten Kreises angeordnet sind, und wobei der erste und der zweite Kreis koaxial zur Rotationsachse liegen und unterschiedliche Radien aufweisen.

15. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß einem der Ansprüche 12 bis 14, wobei das erste und das zweite Magnetfeldsensorelement diametral in Bezug auf die Rotationsachse angeordnet sind; und/oder wobei das dritte und das vierte Magnetfeldsensorelement diametral in Bezug auf die Rotationsachse angeordnet sind.

16. Das magnetische Winkelpositionssensorsystem gemäß einem der Ansprüche 12 bis 15, wobei eine erste Kante des Sensorchips in der ersten Oberfläche parallel zu der ersten Richtung angeordnet ist, und eine zweite Kante des Sensorchips in ersten Oberfläche parallel zu der zweiten Richtung angeordnet ist.

17. Eine Elektromotoranordnung, die aufweist:  
einen Stator umfassend zumindest eine Statorspule;  
einen Rotor umfassend zumindest eine Welle mit einer Stirnseite und einem weichmagnetischen Wellenendstück;  
eine Leiterplatte (PCB), die derart angeordnet ist, dass sie der Stirnseite der Welle zugewandt ist, zumindest einen Sensorchip der an dem PCB befestigt und von dem Wellenendstück beabstandet ist; zumindest vier in dem Sensorchip integrierte Magnetfeldsensorelemente, wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer ers-



ten Richtung empfindlich sind, und wobei zwei der Magnetfeldsensorelemente voneinander beabstandet sind und lediglich auf Magnetfeldkomponenten in einer zweiten Richtung empfindlich sind; die erste und die zweite Richtung sind wechselseitig nicht-parallel und die erste und die zweite Richtung sind rechtwinklig zur Rotationsachse;

eine Magnetfeldquelle, welche das Wellenendstück magnetisiert, wobei das Wellenendstück derart geformt ist, dass die Magnetfeldkomponenten in der ersten und der zweiten Richtung mit N-ter Ordnung rotationssymmetrisch, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist; und

eine mit den zumindest vier Magnetfeldsensorelementen gekoppelte Auswerteschaltung, die dazu ausgebildet ist, eine Winkelposition der Welle durch Kombinieren von zumindest vier Ausgangssignale der zumindest vier Magnetfeldsensorelemente zu berechnen;

eine auf dem PCB angeordnete Leistungselektronikschaltungsanordnung, die mit den Statorspulen gekoppelt und dazu ausgebildet ist, den Statorspulen Betriebsstrom zuzuführen.

18. Ein Verfahren zum Messen der Winkelposition einer Welle, die ein weichmagnetisches Wellenendstück aufweist; das Verfahren umfasst:

Magnetisieren des Wellenendstücks, wobei das Wellenendstück so geformt ist, dass in der Sensorebene, welche im Wesentlichen rechtwinklig zur Rotationsachse liegt, die Magnetfeldkomponenten in einer ersten und einer zweiten Richtung mit N-ter Ordnung rotationssymmetrisch sind, wobei N eine endliche Ganzzahl  $\geq 1$  ist;

Messen der Magnetfeldkomponenten in der ersten Richtung an zumindest einer ersten und einer zweiten Position in der Sensorebene, die zweite Position ist von der ersten Position verschieden;

Messen der Magnetfeldkomponenten in der zweiten Richtung an zumindest einer dritten und einer vierten Position in der Sensorebene, die vierte Position ist von der dritten Position verschieden;

Berechnen einer Winkelposition der Welle in Bezug auf deren Rotationsachse basierend auf der Differenz der Magnetfeldkomponenten an der ersten und der zweiten Position und auf der Differenz der Magnetfeldkomponenten an der dritten und der vierten Position.

19. Das Verfahren gemäß Anspruch 18, wobei das Messen der Magnetfeldkomponenten aufweist:

Bereitstellen eines ersten Sensorsignals unter Verwendung von zumindest einem ersten Magnetfeldsensorelement, das dazu ausgebildet ist, Magnetfeldsensorkomponenten in der ersten Richtung an der ersten Position zu messen;

Bereitstellen eines zweiten Sensorsignals unter Verwendung von zumindest einem zweiten Magnetfeldsensorelement, das dazu ausgebildet ist, Magnet-

feldsensorkomponenten in der ersten Richtung an der zweiten Position zu messen;

Bereitstellen eines dritten Sensorsignals unter Verwendung von zumindest einem dritten Magnetfeldsensorelement, das dazu ausgebildet ist, Magnetfeldsensorkomponenten in der zweiten Richtung an der dritten Position zu messen; und

Bereitstellen eines vierten Sensorsignals unter Verwendung von zumindest einem vierten Magnetfeldsensorelement, das dazu ausgebildet ist, Magnetfeldsensorkomponenten in der zweiten Richtung an der vierten Position zu messen.

20. Das Verfahren gemäß Anspruch 19, wobei das Berechnen der Winkelposition der Welle aufweist:

Berechnen eines fünften Signals, das die Differenz zwischen dem ersten und dem zweiten Sensorsignals repräsentiert;

Berechnen eines sechsten Signals, das die Differenz zwischen dem dritten und dem Vierten Sensorsignals repräsentiert; und

Berechnen einer Winkelposition basierend auf dem fünften und sechsten Signal.

Es folgen 12 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

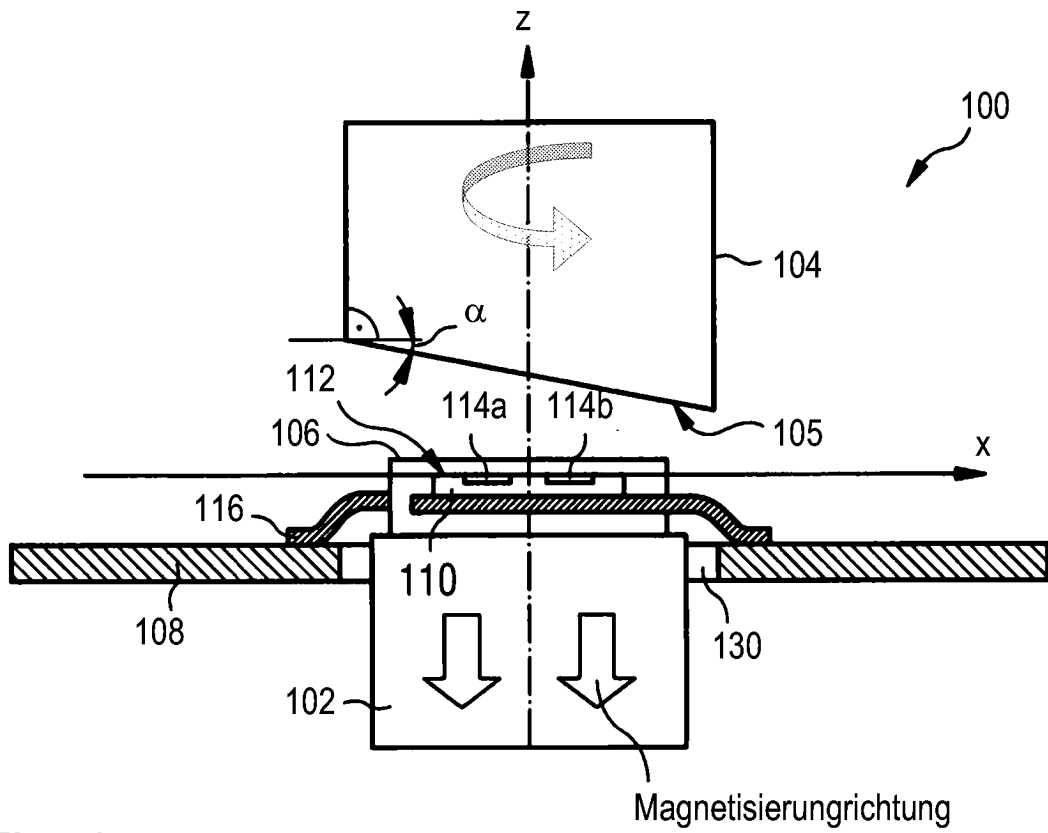


Fig. 1

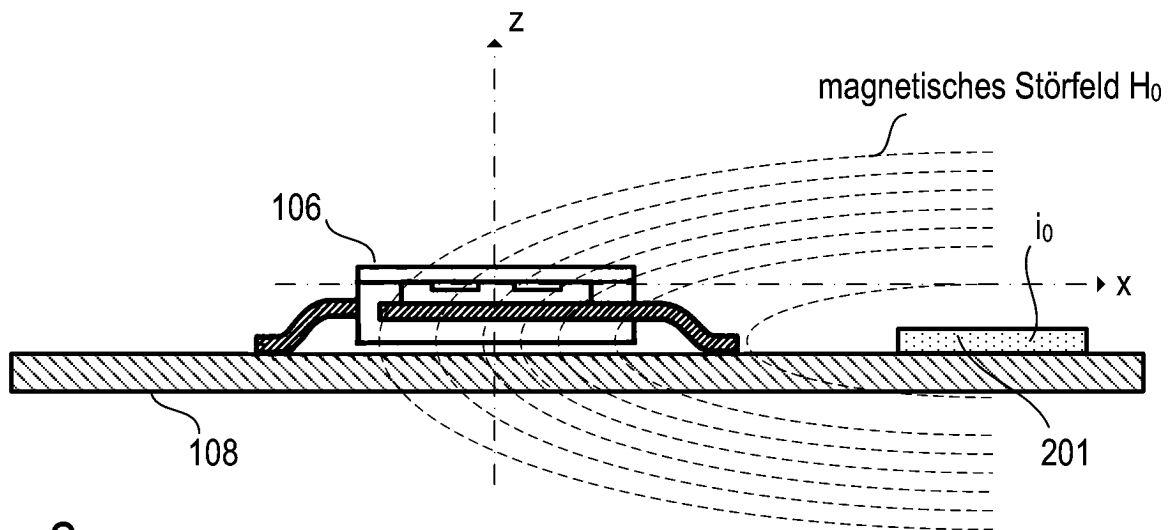


Fig. 2

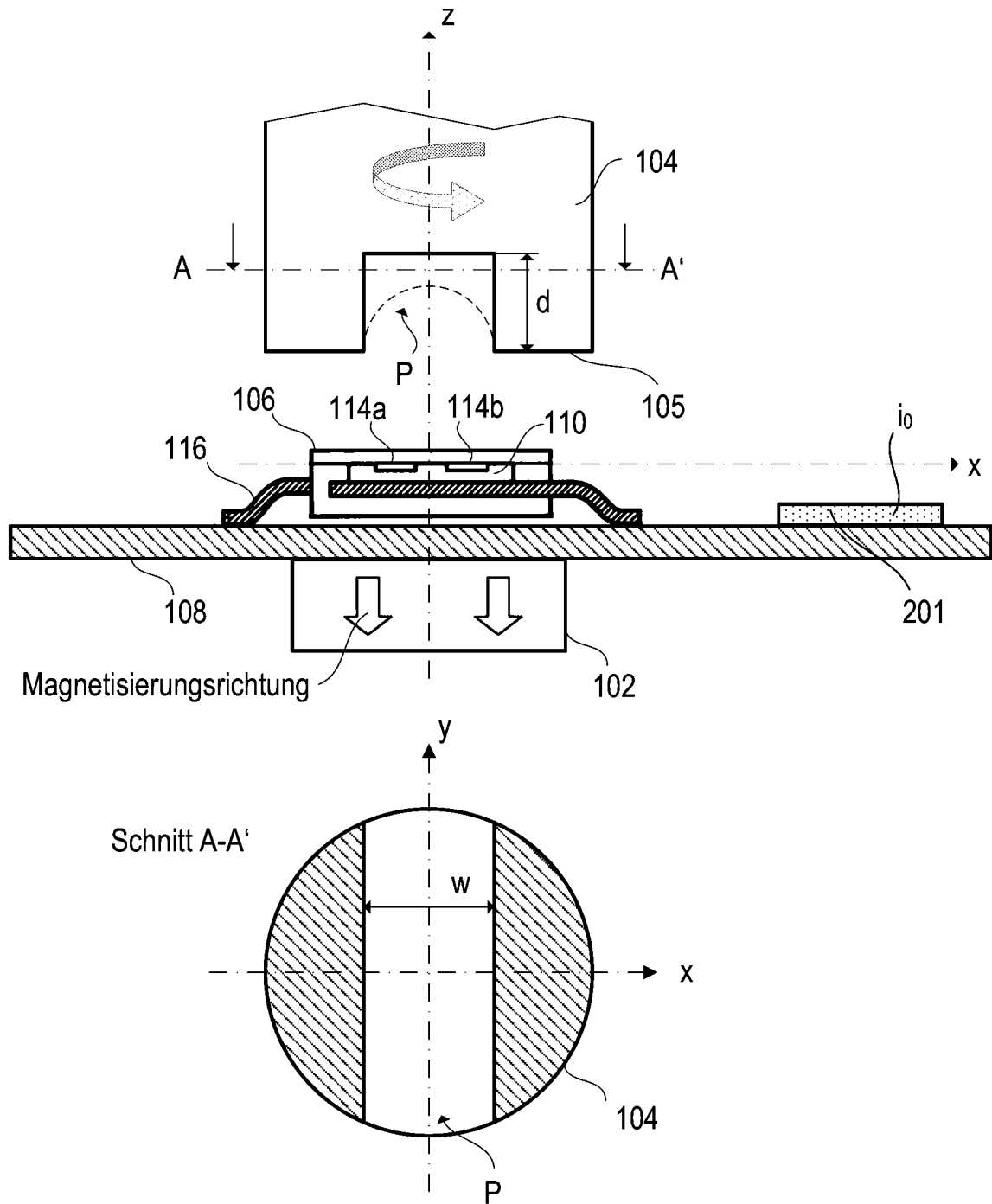


Fig. 3

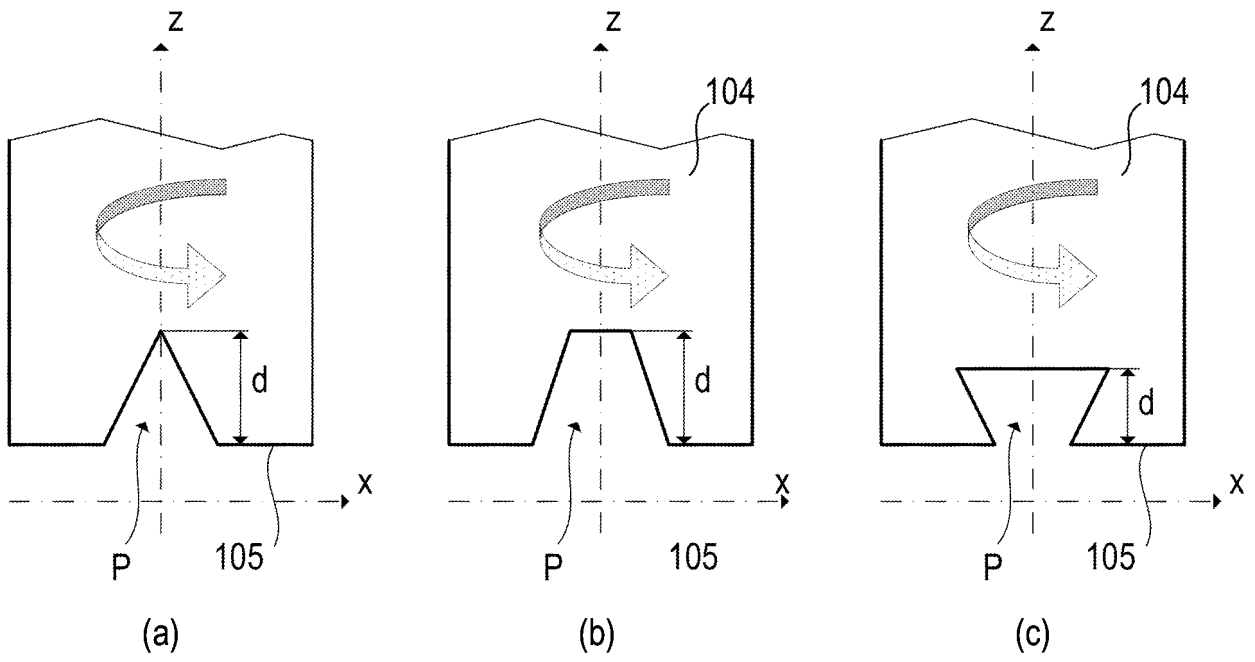


Fig. 4

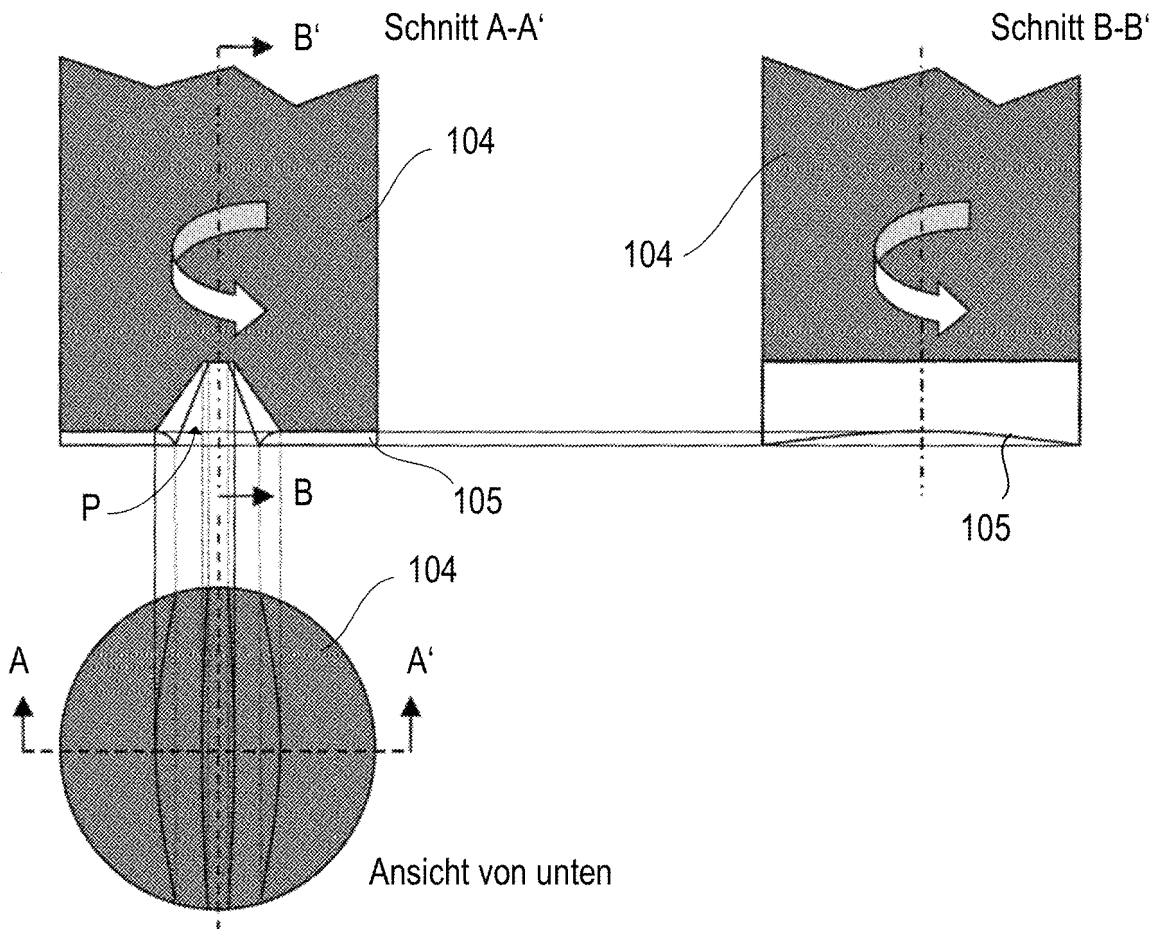


Fig. 5

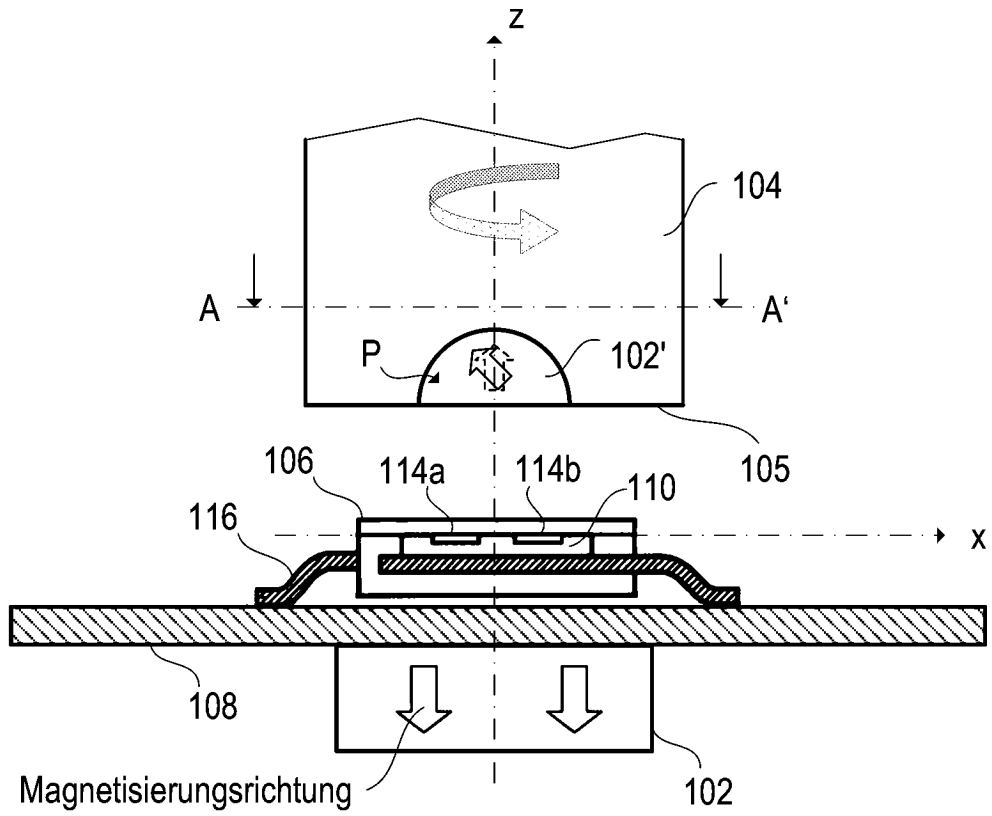


Fig. 6

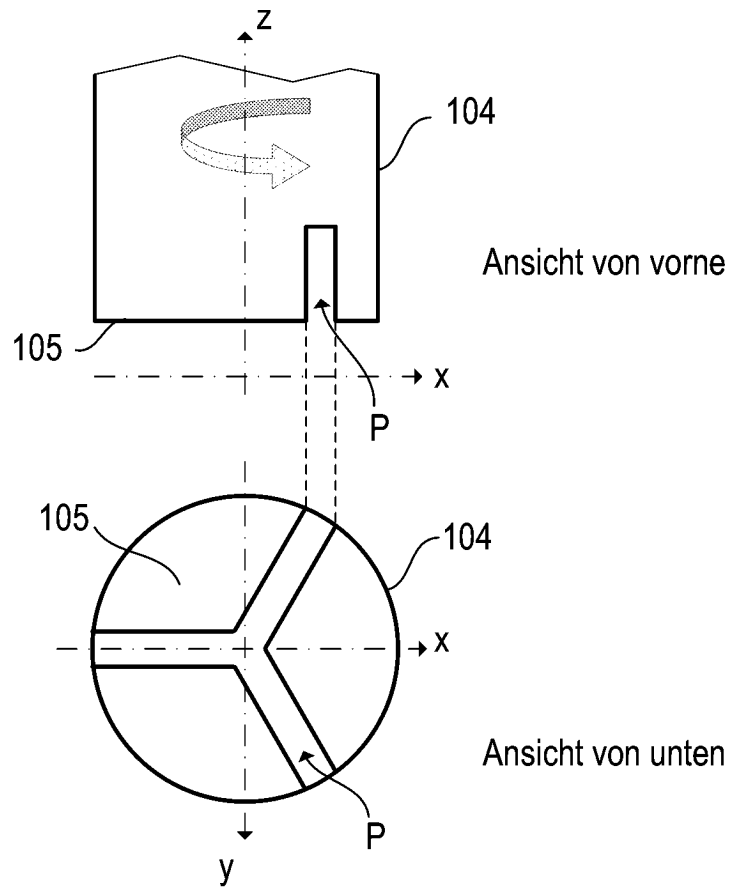


Fig. 7

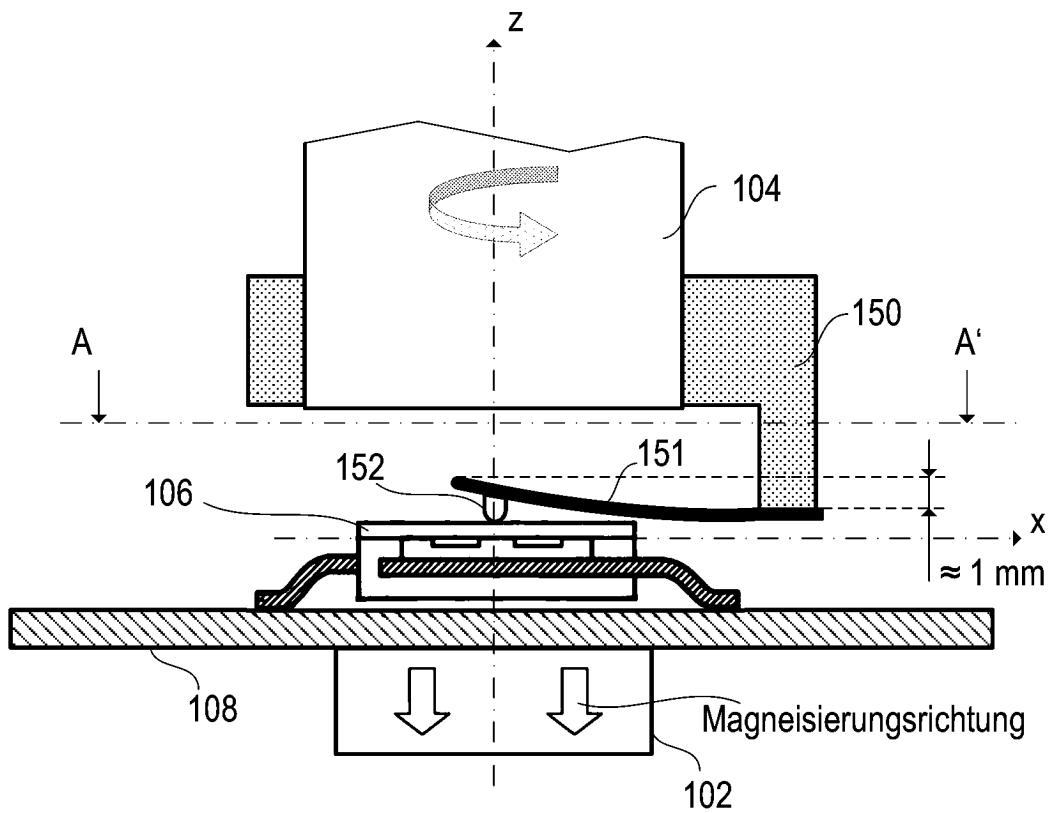
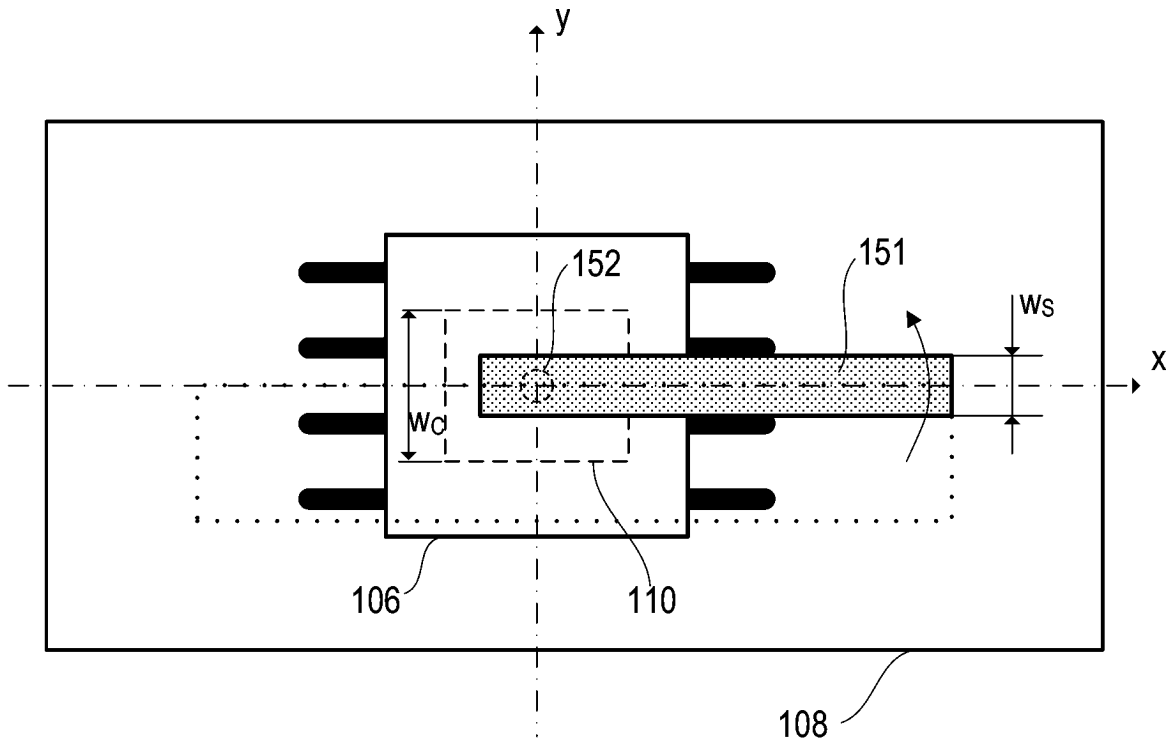
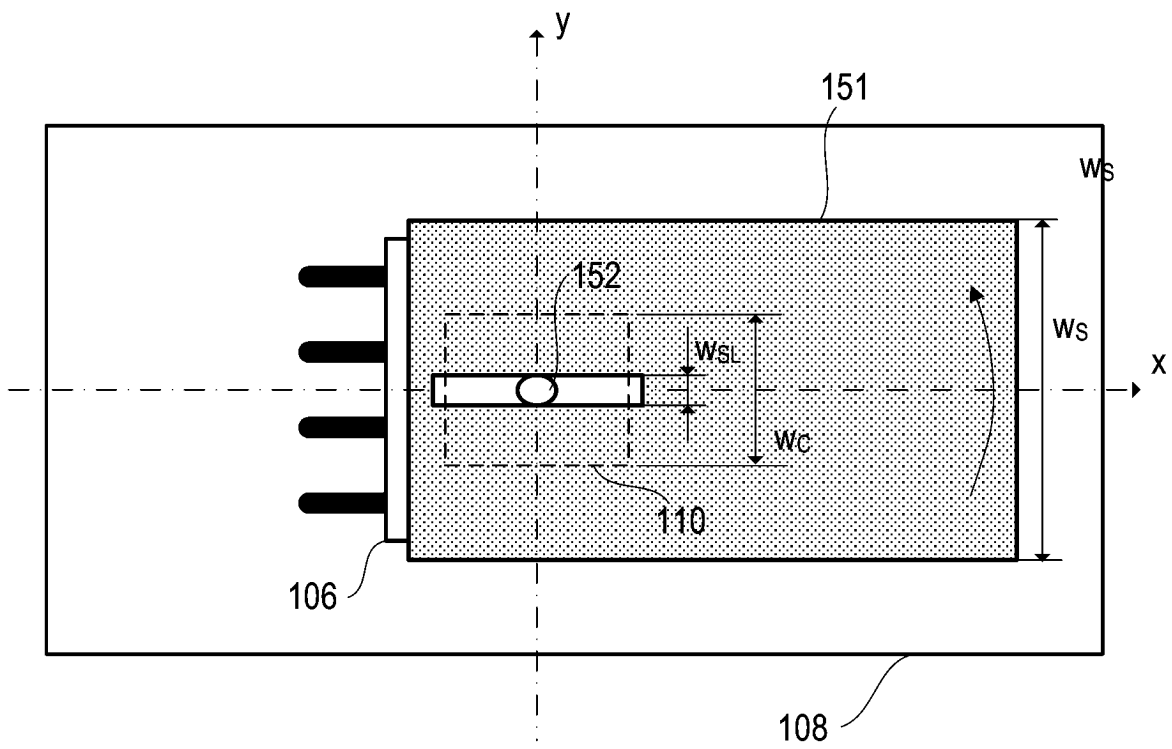


Fig. 8

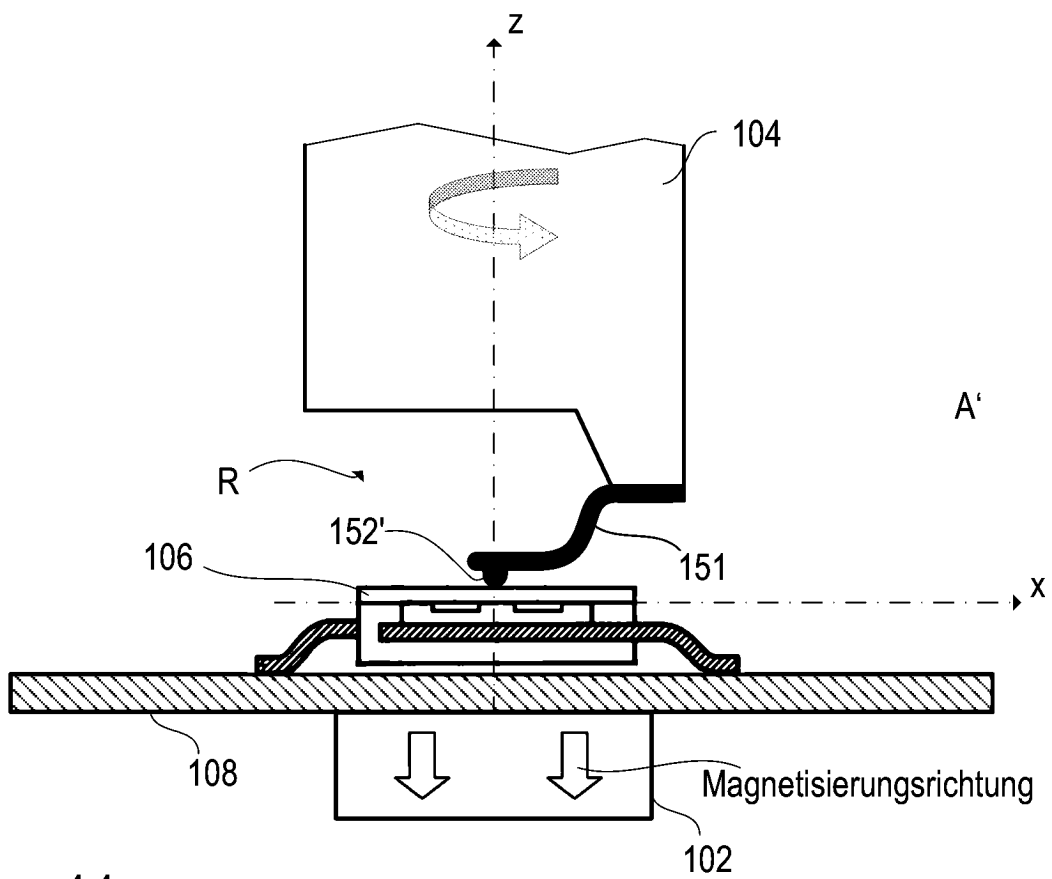
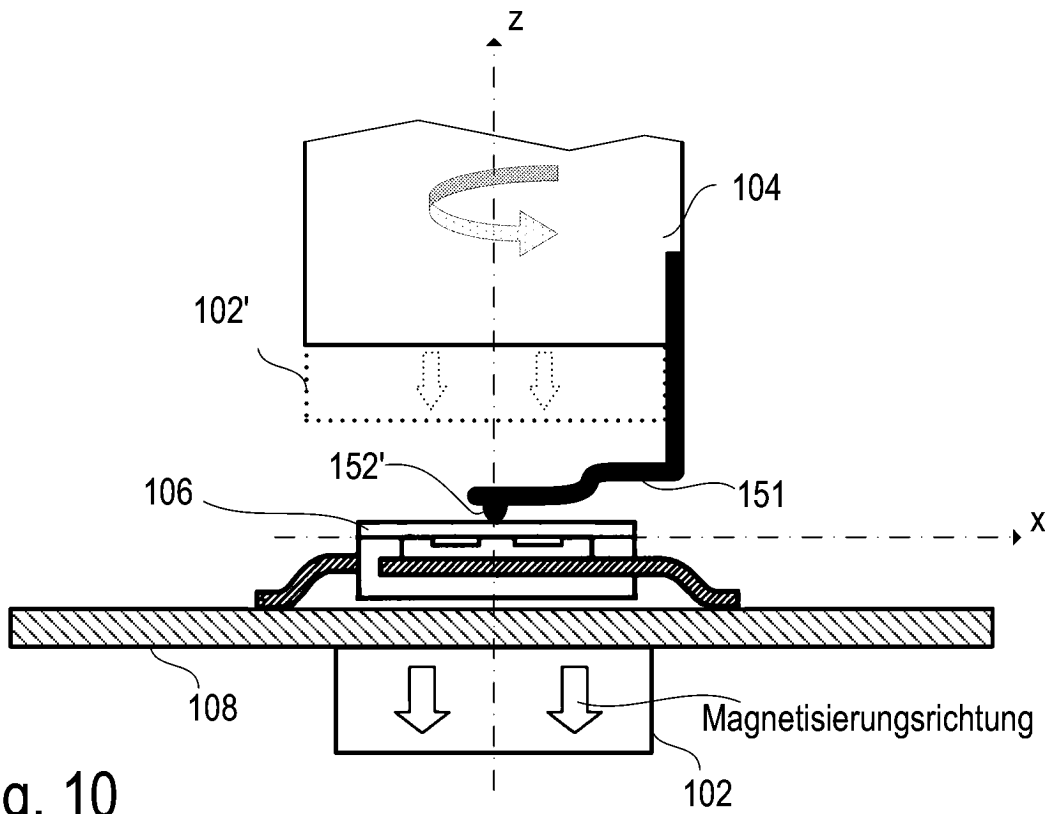


(a)



(b)

Fig. 9





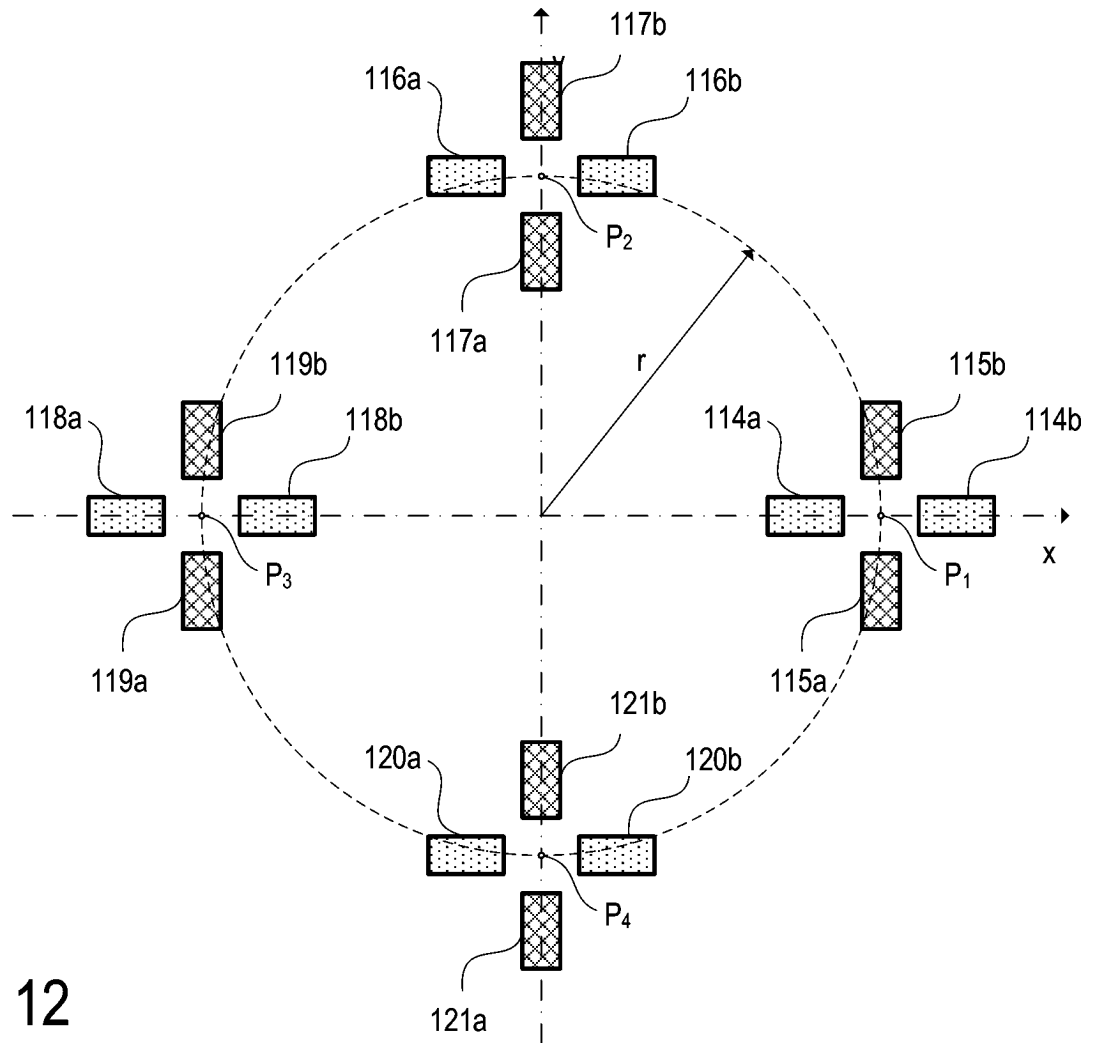


Fig. 12

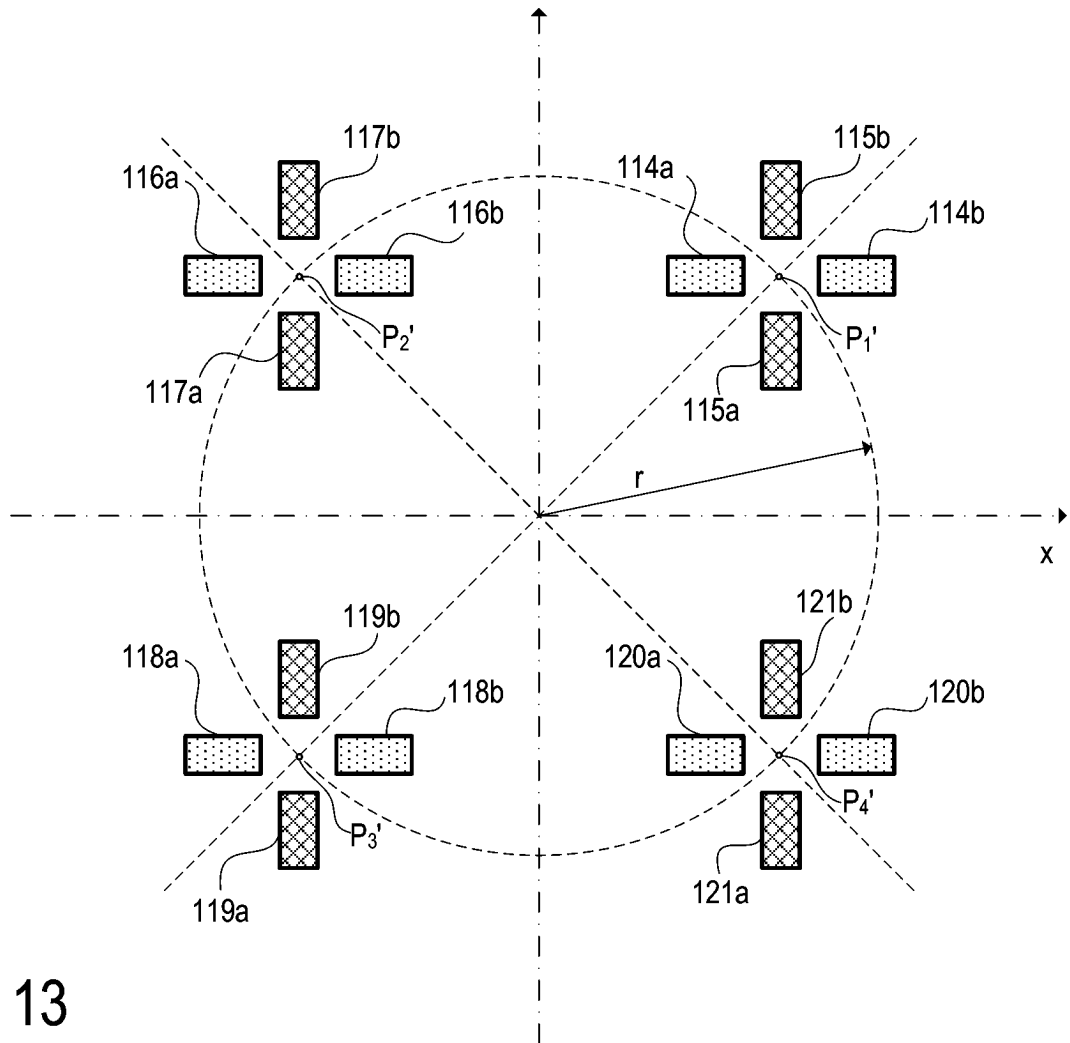


Fig. 13

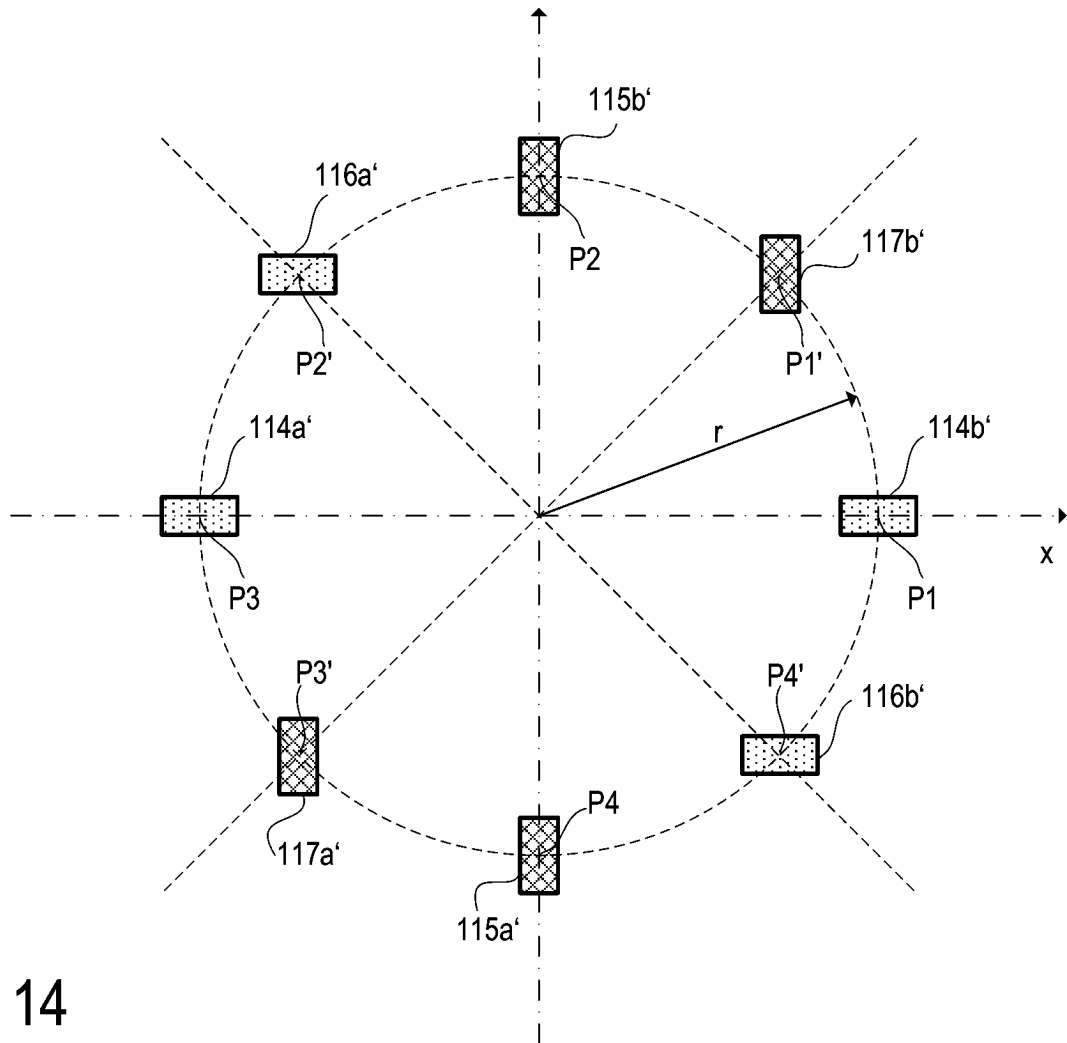


Fig. 14

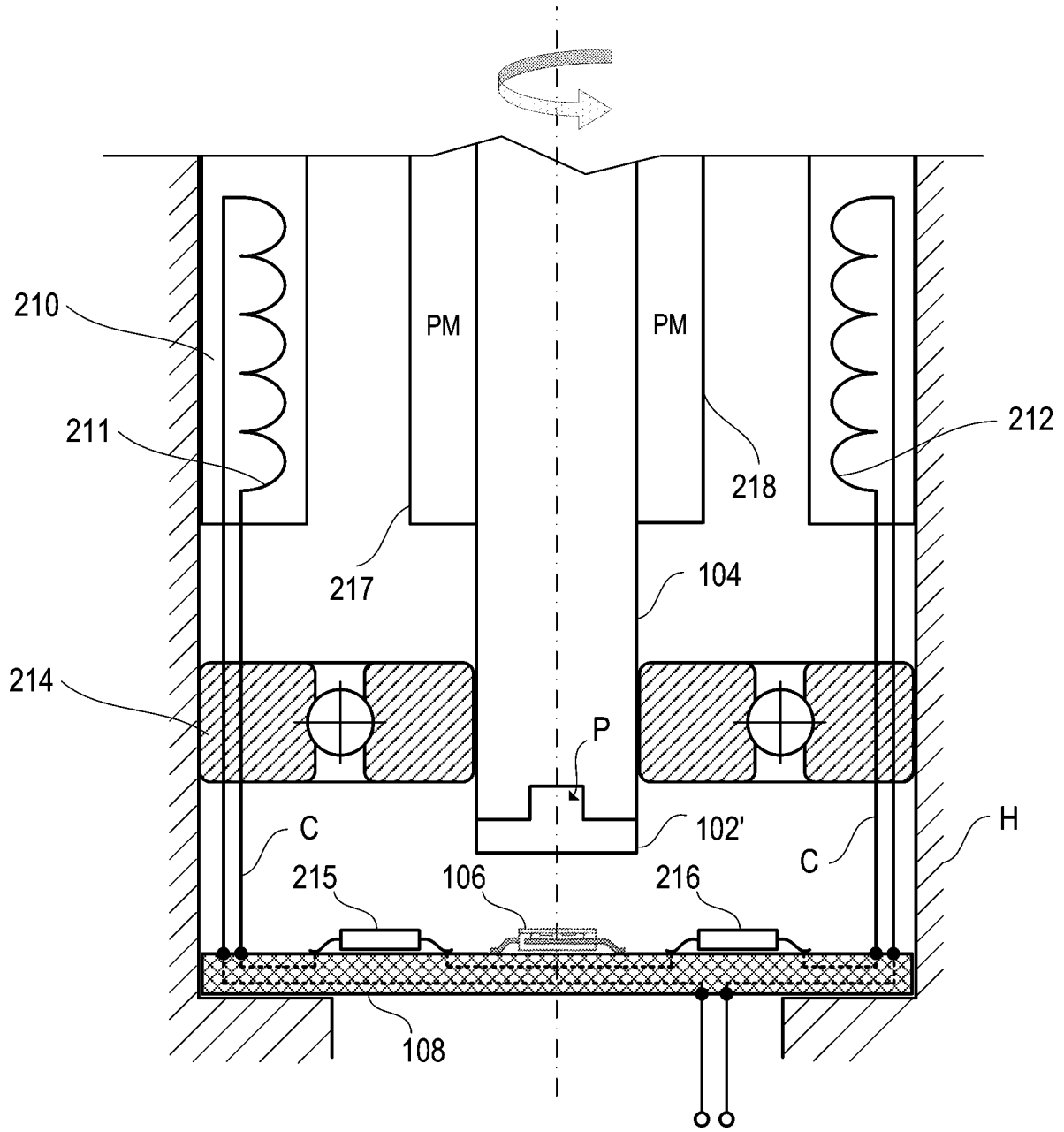


Fig. 15

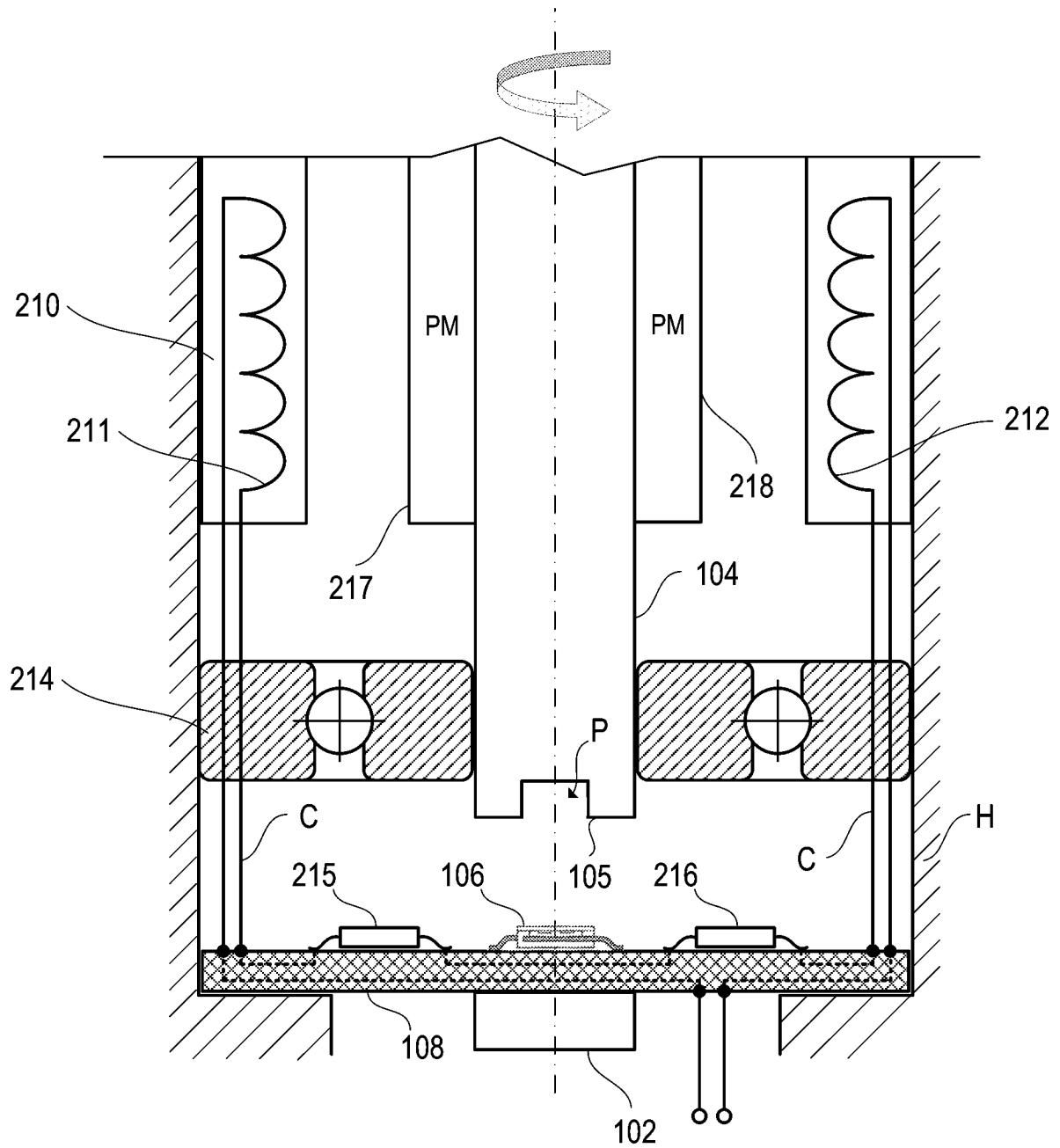


Fig. 16