



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2021 210 552.1

(51) Int Cl.: **G01R 33/02 (2006.01)**

(22) Anmelddatag: 22.09.2021

G01R 33/07 (2006.01)

(43) Offenlegungstag: 23.03.2023

G01R 35/00 (2006.01)

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 17.05.2023

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung eingetragener Verein,
80686 München, DE**

(74) Vertreter:

**Schoppe, Zimmermann, Stöckeler, Zinkler,
Schenk & Partner mbB Patentanwälte, 81373
München, DE**

(72) Erfinder:

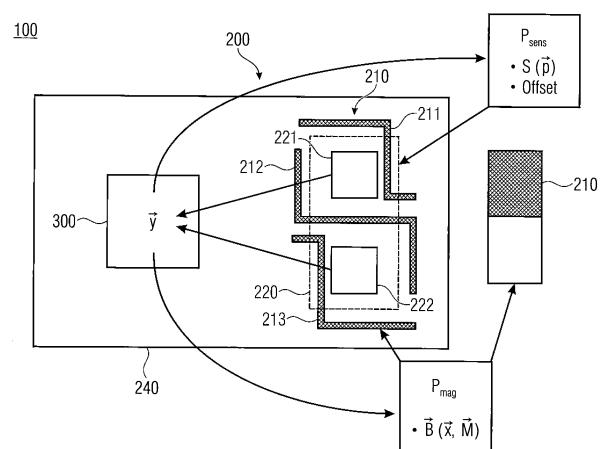
**Cichon, Daniel, 91058 Erlangen, DE; Beran, Philip,
91058 Erlangen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2010 029 668	A1
DE	10 2012 203 001	A1
DE	10 2019 126 872	A1
EP	2 131 205	A1
EP	2 939 601	A2

(54) Bezeichnung: **VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM KALIBRIEREN EINES MAGNETSENSORSYSTEMS
MITTELS EINER INHOMOGENEN MAGNETFELDQUELLE**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung sowie ein Verfahren zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems (200) mit mindestens einer Magnetfeldquelle (210) und einer Magnetfeldsensor-Anordnung (220) mit mehreren einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222). Hierbei wird eine Vielzahl (n_{mess}) von Einzelmessungen durchgeführt, wobei jede Einzelmessung eine von der Anzahl der einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222) abhängige Anzahl (n_y) von Messwerten liefert. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen wird das Magnetfeld der Magnetfeldquelle (210) am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung (220) variiert. Basierend auf den Messwerten und unter Anwendung eines Optimierungs- oder Schätzverfahrens werden ein oder mehrere Magnetfeldsensor-spezifische Parametern (P_{sens}) und/oder Magnetfeldquellen-spezifische Parametern (P_{mag}) ermittelt, die als Korrekturwerte zum Kalibrieren des Magnetsensorsystems (200) genutzt werden. Erfindungsgemäß wird eine Magnetfeldquelle (210) eingesetzt, die ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt.



Beschreibung

[0001] Das hierin beschriebene innovative Konzept betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines Magnet-sensorsystems mit mindestens einer Magnetfeldquelle und einer Magnetfeldsensor-Anordnung mit mehreren einzelnen Magnetfeldsensoren. Das Verfahren zeichnet sich dabei unter anderem dadurch aus, dass der Vorgang des Kalibrierens mit einer inhomogenen Magnetfeldquelle ausführbar ist. Das hierin beschriebene innovative Konzept betrifft außerdem eine Vorrichtung zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems.

[0002] Das hierin beschriebene Verfahren lässt sich insbesondere zur Kalibrierung sogenannter dreidimensional messender Magnetfeldsensoren bzw. 3D-Sensoren nutzen. Dabei handelt es sich um Magnetfeldsensoren, die das Magnetfeld nach Betrag und Richtung in allen drei Raumrichtungen erfassen können.

[0003] Dies ist zu unterscheiden von skalar messenden Sensoren, wie zum Beispiel herkömmliche Hallsensoren, die lediglich den Betrag des Magnetfelds senkrecht zu ihrer Chip-Ebene messen können. Ein 3D-Sensorchip kann beispielsweise drei solcher skalar messender Sensorelemente aufweisen, wobei jedes Sensorelement in jeweils einer bestimmten Vorzugsrichtung messen kann. Hierfür können die drei skalar messenden Sensorelemente innerhalb des 3D-Sensorchips derart ausgerichtet sein, dass jedes Sensorelement das Magnetfeld in je einer Raumrichtung (x-, y- und z-Richtung) erfassst. Während also konventionelle Hallsensoren ausschließlich für jeweils eine Raumrichtung, und insbesondere für senkrecht (z-Achse) zur Chipoberfläche gelegene Magnetfelder empfindlich sind, misst ein 3D-Sensor zusätzlich auch die Magnetfelder, die parallel (x- und y-Achse) zur Chipoberfläche ausgerichtet sind. Somit können mit einem einzigen 3D-Sensorchip alle drei räumlichen Komponenten des Magnetfeldvektors erfasst werden. Ein 3D-Sensor misst somit also nicht nur den Betrag des Magnetfelds sondern auch die Richtung des Magnetfeldvektors. Er kann daher auch als vektoriell messender Magnetfeldsensor bezeichnet werden. Durch die Integration mehrerer 3D-Sensoren auf einem Bauteil können Anwendungen realisiert werden, die robust gegenüber magnetischen Störfeldern sind.

[0004] Beispielsweise können mit mehreren 3D-Sensoren alle sechs Raum-Freiheitsgrade (3x Rotation um x-, y- und z-Achse, 3x Translation entlang x-, y- und z-Achse) gemessen werden.

[0005] Technologiebedingt zeigen integrierte Magnetfeldsensoren jedweder Art jedoch stets verschiedene Messfehler. Zum einen gibt es einen relativ großen Nullpunktfehler (Offset), also ein Signal ohne

dass überhaupt ein Magnetfeld vorhanden ist, und zum anderen gibt es Empfindlichkeitsfehler, die dazu führen, dass ein identisches Magnetfeld bei unterschiedlichen Sensoren zu unterschiedlichen Messwerten führt. Zudem ist bei integrierten Hall-Sensoren die empfindliche Achse des Sensors häufig gegen die ideale Achse verkippt, sodass sich eine unerwünschte Empfindlichkeit auf orthogonale Felder ergibt. Dies wird besonders bei dreidimensional messenden Hall-Sensoren (3D-Sensoren) deutlich.

[0006] Werden beispielsweise Hall-Sensoren in Kombination mit einem Permanentmagneten in einem Positionsmesssystem eingesetzt, so treten weitere Fehlereinflüsse auf. Die Magnetisierungsstärke und -richtung des Magneten unterliegt fertigungsbedingt ebenfalls großen Schwankungen. Ist der Sensor auf einem PCB angebracht, so führen Montagetoleranzen zu weiteren Fehlern in der Positionserfassung.

[0007] Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt eine Kalibrierung von vektoriell (3D) messenden Magnetfeldsensoren mittels homogenen Magnetfeldern, die in unterschiedliche Richtungen und in einer definierten Reihenfolge am Ort des Sensors erzeugt werden. Die Variation der Magnetfelder kann mithilfe von Spulensystemen erfolgen, die ein exakt einstellbares Feld am Ort des Sensors erzeugen [4-7,14]. Um dies zu erreichen, wird ein homogenes Feld verwendet, das mittels einer sogenannten Helmholtz-Spulen-Anordnung mit insgesamt sechs einzelnen Spulen erzeugt wird, was einen hohen technischen Aufwand bedeutet.

[0008] Eine weitere Möglichkeit zur Kalibrierung besteht darin, mittels einer Bewegung des Sensors im Magnetfeld, beispielsweise mittels einer vollständigen Rotation um die Messachsen, eine Variation des Magnetfelds am Ort des Sensors herbeizuführen [1-3,8,9]. Aus den Messwerten können dann mittels analytischer Berechnung oder Ausgleichsrechnung Messfehler wie Offset und Empfindlichkeitsfehler bestimmt werden, welche als Korrekturwerte auf den Messwert angewendet werden. Mit diesem Verfahren sind allerdings nur wenige Parameter bestimmbar. Außerdem ist es eine Voraussetzung, dass sich das zu kalibrierende Gerät nahezu frei im Raum bewegen kann, weshalb dieses Verfahren vorzugsweise für mobile Endgeräte, nicht aber für Anwendungen in der Positions-Sensorik, eingesetzt wird.

[0009] Die DE 10 2012 203 001 A1 schlägt eine weitere Alternative vor. Hier sind mehrere Magnetsensorelemente auf einem Chip integriert. Auf der Oberseite des Chips ist eine weichmagnetische Metallkugel angeordnet. Eine homogene Magnetfeldquelle magnetisiert die Metallkugel, wodurch diese magnetisiert wird und ihrerseits ein Magnetfeld

erzeugt. Durch eine Auswertung des Verlaufs der Magnetfeldlinien in z-Richtung am jeweiligen Sondorelement können dort Abweichungen in x- und y-Richtung detektiert werden. Ausrichtungsfehler beim Ausrichten der Metallkugel gegenüber den Sondorelementen können mittels einer Kalibrierung kompensiert werden.

[0010] Die EP 2 939 601 A1 beschreibt ein Verfahren zum Bestimmen der Position und/oder Orientierung einer magnetischen Komponente gegenüber einem Magnetfelddetektor. Beide sind unabhängig voneinander relativ zu einem statischen Sekundär-Magnetfeld bewegbar. An zwei Positionen werden die Stärke und die Ausrichtung des Magnetfelds der magnetischen Komponente und des statischen Sekundär-Magnetfelds gemessen, um hierüber auf die Position und/oder die Orientierung der magnetischen Komponente zu schließen.

[0011] Die DE 10 2010 029 668 A1 beschreibt ein Verfahren zum Kalibrieren eines dreiachsigen Magnetfeldsensors. Hierfür werden ein Versatz aufgenommener Messwerte des Magnetfeldsensors durch ein überlagertes Signal sowie die Empfindlichkeit des Magnetfeldsensors entlang der ersten Messachsen bestimmt. Dabei umfasst das Bestimmen der Empfindlichkeit Schritte des Bestimmens der Empfindlichkeit des Magnetfeldsensors entlang einer ersten Messachse und des Bestimmens der Empfindlichkeit des Magnetfeldsensors entlang der anderen Messachsen auf der Basis der Empfindlichkeit der ersten Messachse und des bestimmten Versatzes.

[0012] Die DE 10 2019 126 872 A1 beschreibt eine Magnetsensorvorrichtung mit drei Magnetsensoren zum Erfassen eines äußeren Magnetfelds, die in drei Richtungen verlaufen. Die Vorrichtung weist ferner einen Magnetfelderzeugungsbereich auf, der zusätzliche Magnetfeldkomponenten in drei Richtungen erzeugt, die wiederum für Messungen von Haupt- und Querachsempfindlichkeiten der drei Magnetsensoren verwendet werden. Ein Korrekturprozessor verwendet die jeweiligen Messergebnisse zur Korrektur der Erfassungssignale der Magnetsensoren.

[0013] Mittels der oben genannten Verfahren lassen sich jedoch nur die Magnetsensoren selbst kalibrieren, nicht jedoch die zusätzlichen Ungenauigkeiten, die in einem Magnetsensorsystem durch den Magneten selbst verursacht werden. Eine Abhilfe schafft die Vermessung des individuellen Magnetfelds des Magneten, um dessen Ungenauigkeiten zu bestimmen und im fertigen System rechnerisch zu berücksichtigen. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass jeder Sensor und jeder Magnet unabhängig voneinander kalibriert werden müssen und die Korrekturdaten eindeutig der jeweiligen Sensor-Magnet-Paarung zugeordnet werden müssen. Dies

ist mit einem enorm hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden, weshalb dieses Verfahren in der Praxis kaum Anwendung findet.

[0014] Es wäre daher wünschenswert, bisherige Verfahren zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems dahingehend zu verbessern, dass diese innerhalb kurzer Zeit und ohne großen technischen bzw. apparativen Aufwand sehr genaue Kalibrierwerte für die Parameter des gesamten Magnetsensorsystems, einschließlich Magnetfeldquellen-spezifischer Parameter, liefern.

[0015] Erfindungsgemäß wird dies mit einem Verfahren gemäß Anspruch 1 sowie mit einer entsprechenden Vorrichtung gemäß Anspruch 19 erreicht. Weitere Ausführungsformen und vorteilhafte Aspekte dieses Verfahrens sowie der entsprechenden Vorrichtung sind in den jeweils abhängigen Patentansprüchen genannt.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren dient zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems mit mindestens einer Magnetfeldquelle und einer Magnetfeldsensor-Anordnung mit mehreren einzelnen Magnetsensoren. Hierfür wird eine Vielzahl von Einzelmessungen ausgeführt, wobei jede Einzelmessung eine von der Anzahl der einzelnen Magnetsensoren abhängige Anzahl von Messwerten liefert. Bei unterschiedlichen Einzelmessungen, d.h. zwischen zwei Einzelmessungen, wird das Magnetfeld der Magnetfeldquelle am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung variiert. Das heißt, während einer ersten Messung herrscht am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung ein erstes Magnetfeld, und während einer zweiten Messung herrscht am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung ein von dem ersten Magnetfeld unterschiedliches zweites Magnetfeld. Unter der Variation des Magnetfelds ist eine Änderung des Betrags und/oder der Richtung des Magnetfelds zu verstehen, d.h. der Betrag und/oder die Richtung des Magnetfelds kann/können sich zwischen zwei Messungen am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung unterscheiden. Mit dem Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung ist die Magnetfeld-sensitive Fläche der Magnetfeldsensor-Anordnung gemeint, mittels derer die Magnetfeldsensor-Anordnung das Magnetfeld (Betrag und/oder Richtung) misst. Das erfindungsgemäße Verfahren beinhaltet ferner einen Schritt des Bestimmens von ein oder mehreren unbekannten Magnetfeldsensor-spezifischen Parametern, d.h. von Parametern, die die Magnetsensoren betreffen. Alternativ oder zusätzlich kann das erfindungsgemäße Verfahren optional einen Schritt des Bestimmens von Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern beinhalten, d.h. von Parametern, die die Magnetfeldquelle betreffen. Sowohl die unbekannten Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter als auch die unbekannten Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter können basierend auf den zuvor

ermittelten Messwerten sowie unter Anwendung eines Optimierungs- oder Schätzverfahrens bestimmt werden. Es kann vorkommen, dass ein oder mehrere der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter vorab bekannt sind. In diesem Falle müssen diese vorab bekannten Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter nicht erneut ermittelt werden. Stattdessen können die bekannten Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter für die weiteren Schritte der Kalibrierung verwendet werden. Die ermittelten bzw. vorab bekannten Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter und die ermittelten Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter können dann als Korrekturwerte zum Kalibrieren des Magnetsensorsystems genutzt werden, indem diese Korrekturwerte auf zukünftige Messergebnisse des Magnetsensorsystems angewendet werden. Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich dabei unter anderem dadurch aus, dass dieses mit einer Magnetfeldquelle ausgeführt werden kann, die ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt. Im Prinzip erzeugen die meisten Magnetfeldquellen ein inhomogenes Magnetfeld. Das heißt, es können beispielsweise einfache Permanentmagneten zur Durchführung dieses Verfahrens verwendet werden. Es müssen also keine homogenen Magnetfelder mittels aufwändigen und teuren Apparaturen, wie z.B. Helmholtz-Spulen und dergleichen, erzeugt werden. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann im besten Falle komplett auf externe Testgeräte verzichtet werden, da sich das Magnetfeldsensor-System sozusagen mit den eigenen Bordmitteln kalibrieren kann. Das in der Erfindung zur Anwendung kommende Optimierungs- oder Schätzverfahren zur Ermittlung der Kalibrierparameter bzw. Korrekturwerte kann auf einem bereits vorhandenen Controller ablaufen und beispielsweise in einem vorhandenen ASIC des Magnetsensorsystems integriert sein.

[0017] Die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter und die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter weisen jeweils eine bestimmte Anzahl n_{var} an variablen Freiheitsgraden und eine bestimmte Anzahl n_{konst} an konstanten Freiheitsgraden auf. Das Verfahren beinhaltet ferner, dass eine Mindestanzahl an Einzelmessungen durchgeführt wird, wobei diese Mindestanzahl an durchzuführenden Einzelmessungen abhängig ist von

- der Anzahl n_y der mittels der Magnetfeldsensoren ermittelten Messwerte, und
- der Anzahl n_{var} der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter und der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter, und
- der Anzahl n_{konst} der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter und der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter.

[0018] Die erforderliche Mindestanzahl an Einzelmessungen wird derart bestimmt, dass folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$n_{mess} * n_{var} + n_{konst} << n_y * n_{mess}$$

mit

n_{mess} : Anzahl an durchzuführenden Einzelmessungen,

n_y : Anzahl der mittels der Magnetfeldsensoren ermittelten Messwerte pro durchgeführter Einzelmessung, n_{var} : Anzahl der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter,

n_{konst} :

: Anzahl der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter.

[0019] Die vorliegende Erfindung betrifft ferner eine Vorrichtung zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems, wobei das Magnetsensorsystem mindestens eine Magnetfeldquelle und eine Magnetfeldsensor-Anordnung mit mehreren einzelnen Magnetfeldsensoren aufweist. Das Magnetsensorsystem weist eine Kalibriervorrichtung auf. Diese ist ausgestaltet, um eine Vielzahl von Einzelmessungen durchzuführen, wobei jede Einzelmessung eine von der Anzahl der einzelnen Magnetfeldsensoren abhängige Anzahl von Messwerten liefert. Erfindungsgemäß wird bei unterschiedlichen Einzelmessungen, d.h. zwischen zwei Einzelmessungen, das Magnetfeld der Magnetfeldquelle am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung variiert. Die Kalibriervorrichtung ist außerdem ausgestaltet, um basierend auf den Messwerten und unter Anwendung eines Optimierungs- oder Schätzverfahrens, ein oder mehrere Magnetfeldquellen-spezifische Parameter sowie ein oder mehrere unbekannte Magnetfeldsensor-spezifische Parameter zu ermitteln, wobei die ermittelten Parameter als Korrekturwerte zum Kalibrieren des Magnetsensorsystems genutzt werden, indem die Korrekturwerte auf zukünftige Messergebnisse des Magnetsensorsystems angewendet werden. Auch die Vorrichtung zeichnet sich erfindungsgemäß dadurch aus, dass die Magnetfeldquelle ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt. Auch hier wird eine Mindestanzahl an Einzelmessungen durchgeführt, wobei sich die erforderliche Mindestanzahl ebenfalls anhand der oben genannten Ungleichung bestimmen lässt.

[0020] Einige Ausführungsbeispiele sind exemplarisch in der Zeichnung dargestellt und werden nachstehend erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Draufsicht auf eine erfindungsgemäße Vorrichtung zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems gemäß einem Ausführungsbeispiel,

Fig. 2 eine Perspektivansicht einer Kalibriervorrichtung mit Helmholtz-Spulen gemäß dem Stand der Technik,

Fig. 3 ein schematisches Blockschaltbild zur Darstellung des erfindungsgemäßen Verfahrens gemäß einem Ausführungsbeispiel,

Fig. 4A eine schematische Draufsicht auf eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit einer Magnetfeldsensor-Anordnung mit sechs skalar messenden Magnetfeldsensoren gemäß einem Ausführungsbeispiel,

Fig. 4B eine schematische Draufsicht auf eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit einer Magnetfeldsensor-Anordnung mit zwei vektoriell messenden Magnetfeldsensoren gemäß einem Ausführungsbeispiel,

Fig. 5 eine schematische Draufsicht auf eine erfindungsgemäße Vorrichtung gemäß einer ersten Ausführungsform, bei der das inhomogene Magnetfeld zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen variiert wird, indem die Position und/oder die Orientierung der Magnetfeldquelle relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung verändert wird, und

Fig. 6 eine schematische Draufsicht auf eine erfindungsgemäße Vorrichtung gemäß einer zweiten Ausführungsform, bei der das inhomogene Magnetfeld zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen variiert wird, indem Kontaktanschlüsse von Erregerleitern in unterschiedlichen Kombinationen jeweils paarweise miteinander verschaltet werden.

[0021] Im Folgenden werden Ausführungsbeispiele mit Bezug auf die Figuren näher beschrieben, wobei Elemente mit derselben oder ähnlichen Funktion mit denselben Bezugszeichen versehen sind.

[0022] Verfahrensschritte, die im Rahmen der vorliegenden Offenbarung abgebildet bzw. beschrieben sind, können auch in einer anderen als der abgebildeten beziehungsweise beschriebenen Reihenfolge ausgeführt werden. Außerdem sind Verfahrensschritte, die ein bestimmtes Merkmal einer Vorrichtung betreffen mit ebendiesem Merkmal der Vorrichtung austauschbar, was ebenso anders herum gilt.

[0023] Die Erfindung soll zunächst gegenständlich anhand der erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems beschrieben werden. Anschließend folgt eine Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte des erfindungsge-

mäßen Verfahrens zum Kalibrieren des Magnetsensorsystems.

[0024] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung 100 zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems 200. Das Magnetsensorsystem 200 weist mindestens eine Magnetfeldquelle 210 und eine Magnetfeldsensor-Anordnung 220 mit mehreren einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 auf.

[0025] Die Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bzw. die jeweiligen Magnetfeldsensoren 221, 222 kann bzw. können auf einem Substrat 240, wie z.B. einem Komponententräger (PCB: Printed Circuit Board), angeordnet sein. Die einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 können hierbei benachbart zueinander und in unmittelbarer Nähe zueinander angeordnet sein.

[0026] Die Magnetfeldquelle 210 hingegen kann separat von dem Substrat 240 ausgestaltet sein, d.h. die Magnetfeldquelle 210 kann nicht mit dem Substrat 240 verbunden sein, sodass die Magnetfeldquelle 210 relativ zu dem Substrat 240 bzw. zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bewegbar ist. Dies wäre beispielsweise denkbar, wenn es sich bei der Magnetfeldquelle 210 um einen separaten Permanentmagneten handelt. In diesem Fall kann das Magnetfeld (in Betrag und/oder Richtung) am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 variiert werden, indem die Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bewegt wird.

[0027] Alternativ oder zusätzlich wäre es denkbar, dass die Magnetfeldquelle 210 als eine elektromagnetische Quelle ausgestaltet ist. Beispielsweise kann die Magnetfeldquelle 210 in Form einer Erregerleiter-Anordnung ausgestaltet sein. Diese Erregerleiter-Anordnung 210 kann ein oder mehrere Erregerleiter 211, 212, 213 aufweisen, die entsprechend bestromt werden und dadurch ein Elektromagnetfeld erzeugen. Die Magnetfeldquelle 210 kann auf dem Substrat 240 angeordnet sein, indem beispielsweise die einzelnen Erregerleiter 211, 212, 213 in Form von Leiterbahnen auf dem Substrat 240 (z.B. PCB) ausgestaltet sind. In diesem Fall wäre die Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 unbeweglich. Das Magnetfeld der Magnetfeldquelle 210 könnte dann jedoch am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 variiert werden, indem die Erregerleiter 211, 212, 213 unterschiedlich angesteuert werden und dadurch unterschiedliche Elektromagnetfelder (in Betrag und/oder Richtung) erzeugen.

[0028] Das Magnetsensorsystem 200 weist eine Kalibriervorrichtung 300 auf. Die Kalibriervorrichtung 300 kann ebenfalls auf dem Substrat 240 angeordnet sein. Die Kalibriervorrichtung 300 kann beispiels-

weise auf einem bereits vorhandenen Controller ablaufen und beispielsweise in einem vorhandenen ASIC des Magnetsensorsystems 200 integriert sein.

[0029] Die Kalibriervorrichtung 300 ist ausgestaltet, um mit dem Magnetsensorsystem 200 eine Vielzahl von Einzelmessungen auszuführen. Jede Einzelmessung liefert hierbei eine bestimmte Anzahl n_y von Messwerten, die wiederum von der Anzahl der vorhandenen einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 abhängt. Die ermittelten Messwerte können in Form eines Messvektors \vec{y} repräsentiert werden. Der Messvektor \vec{y} kann neben der Anzahl n_y der einzelnen Messwerte auch die Anzahl n_{mess} der durchgeführten Messungen beinhalten

($\dim \vec{y} = n_y * n_{mess}$). Entsprechende Beispiele werden nachfolgend noch näher erläutert.

[0030] Bei den unterschiedlichen Einzelmessungen, d.h. jeweils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen, wird das Magnetfeld der Magnetfeldquelle 210 am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 variiert bzw. verändert. Veränderte bzw. unterschiedliche Magnetfelder werden innerhalb dieser Offenbarung auch als unterschiedliche Magnetfeldkonfigurationen bezeichnet.

[0031] Vorzugsweise kann das Magnetfeld derart variiert werden, dass bei jeder Einzelmessung ein unterschiedliches Magnetfeld am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 vorherrscht. Das heißt, während der Vielzahl durchgeführter Einzelmessungen kann bei jeder Einzelmessung eine unterschiedliche Magnetfeldkonfiguration am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 erzeugt werden, sodass bei den jeweiligen Einzelmessungen nicht ein- und dieselbe Magnetfeldkonfiguration mehrfach kommt.

[0032] Wie zuvor bereits kurz erwähnt wurde, kann eine Variation des Magnetfelds am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 beispielsweise dadurch herbeigeführt werden, dass die Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bewegt wird. Hierfür kann beispielsweise die Position und/oder die räumliche Orientierung der Magnetfeldquelle 210 gegenüber der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 verändert werden. Es ist aber auch denkbar, dass das Magnetfeld elektromagnetisch erzeugt wird und durch unterschiedliche Verschaltung verändert wird. Des Weiteren wäre es auch möglich, die Magnetisierung der Magnetfeldquelle 210 zu ändern, zum Beispiel mittels einer Variation der Temperatur. Entsprechende Ausführungsbeispiele werden nachfolgend noch näher beschrieben.

[0033] Die Kalibriervorrichtung 300 ist ferner ausgestaltet, um basierend auf den während den Einzelmessungen ermittelten Messwerten, und unter

Anwendung eines Optimierungs- oder Schätzverfahrens, ein oder mehrere Magnetfeldquellen-spezifische Parameter P_{mag} sowie ein oder mehrere unbekannte Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} zu ermitteln.

[0034] Zu den zu ermittelnden Magnetfeldsensor-spezifischen Parametern P_{sens} können beispielsweise zählen:

- ein Offset (Nullpunktfehler), und/oder
- die Empfindlichkeit (Volt pro Tesla) jedes einzelnen Magnetfeldsensors 221, 222, ausgedrückt durch eine Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ (s.u.), und/oder
- die Position und/oder die räumliche Orientierung der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bzw. der einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 auf dem Substrat 240 (z.B. PCB), auf dem sie angeordnet sind.

[0035] Zu den zu ermittelnden Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern P_{mag} können beispielsweise zählen:

- die spezifische Magnetisierung der Magnetfeldquelle 210 in den drei Raumrichtungen (M_x, M_y, M_z), ausgedrückt durch den Magnetisierungsvektor \vec{M} , und/oder
- die Temperatur der Magnetfeldquelle 210 als ein skalarer Parameter,
- die Position und/oder die räumliche Orientierung der Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220, ausgedrückt durch den Positionsvektor \vec{x} , und/oder
- von der Position und/oder der räumlichen Orientierung abgeleitete Größen, wie z.B. die Geschwindigkeit und/oder die Beschleunigung der Magnetfeldquelle 210 gegenüber der Magnetfeldsensor-Anordnung 220.

[0036] Ein Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, die oben genannten Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} zu definieren bzw. zu kalibrieren, um darüber eine korrigierte Messung der magnetischen Flussdichte \vec{B} der Magnetfeldquelle 210 zu erhalten. Die magnetische Flussdichte \vec{B} wird dabei vorzugsweise in Abhängigkeit ihrer Position und/oder räumlichen Orientierung und dem Magnetisierungsvektor, ausgedrückt durch den Flussdichtevektor $\vec{B}(\vec{x}, \vec{M})$, beschrieben. Das heißt, die magnetische Flussdichte \vec{B} wird in Abhängigkeit der beiden Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter

- Position und/oder räumliche Orientierung \vec{x} sowie
- spezifische Magnetisierung \vec{M}

dargestellt. Sofern also zumindest diese beiden Parameter \bar{x} und \bar{M} definiert bzw. kalibriert wurden, kann dadurch ein korrigierter Messwert der magnetischen Flussdichte \bar{B} der Magnetfeldquelle 210 ermittelt werden.

[0037] Ein oder mehrere der zu ermittelnden Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} können vorab unbekannt sein. Selbiges gilt für die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} . Es ist aber auch denkbar, dass ein oder mehrere der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} vorab bekannt sind. Auch diesbezüglich werden nachfolgend entsprechende Ausführungsbeispiele noch näher beschrieben.

[0038] Die vorab unbekannten und während den Einzelmessungen ermittelten Parameter, d.h. die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} und/oder die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} , werden als Korrekturwerte zum Kalibrieren des Magnetsensorsystems 200 genutzt, indem diese Korrekturwerte auf zukünftige Messergebnisse des Magnetsensorsystems 200 angewendet werden, was einer Kalibrierung des Magnetsensorsystems 200 mit den ermittelten Daten bzw. Parametern P_{mag} , P_{sens} entspricht.

[0039] Die vorliegende Erfindung zeichnet sich dabei unter anderem dadurch aus, dass die Magnetfeldquelle 210 ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt. Allgemein liefern zunächst alle Magnetfeldquellen ein inhomogenes Feld. Dementsprechend ist es sehr einfach zu erzeugen. Dadurch kann das Magnetsensorsystem 200 mit sehr geringem Aufwand kalibriert werden, indem beispielsweise lediglich ein kleiner Permanentmagnet oder eine einfach zu realisierende Spulenanordnung vorgesehen wird.

[0040] Im Vergleich dazu zeigt **Fig. 2** rein beispielhaft eine Apparatur, wie sie bisher im Stand der Technik zur Kalibrierung von Magnetsensorsystemen zur Anwendung kommt. Hierbei handelt es sich um eine Helmholtzspulen-Anordnung 10, die im direkten Größenvergleich mit einem Komponententräger 20, auf dem die Magnetfeldsensoren angeordnet sind, gezeigt ist. Die Helmholtzspulen-Anordnung 10 erzeugt homogene Magnetfelder, die in unterschiedliche Richtungen und in einer definierten Reihenfolge am Ort der Magnetfeldsensoren wirken. Die Variation der Magnetfelder kann mithilfe der jeweiligen Helmholtzspulen erfolgen, die jeweils ein exakt einstellbares Feld am Ort des Magnetfeldsensors erzeugen. Bisher werden im Stand der Technik also homogene Felder verwendet, um ein Magnetsensorsystem zu kalibrieren. Dieses homogene Magnetfeld wird mittels einer Helmholtzspulen-Anordnung 10 mit insgesamt sechs einzelnen Spulen erzeugt, was einen hohen technischen Aufwand bedeutet.

[0041] Im Gegensatz dazu wird erfindungsgemäß ein inhomogenes Magnetfeld zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems 200 verwendet. Wie eingangs erwähnt wurde, reicht hierfür bereits ein kleiner Permanentmagnet aus, sodass der Aufwand zur Kalibrierung deutlich minimiert werden kann, was sich natürlich auch in deutlich reduzierten Produktionskosten widerspiegelt. Darüber hinaus kann die erfindungsgemäße Vorrichtung *in situ*, d.h. am Einsatzort (z.B. Fahrzeug) des Magnetsensorsystems 200, sowie im laufenden Betrieb des Magnetsensorsystems 200 zur Kalibrierung desselben eingesetzt werden. Auch dies ist mit einer großen Helmholtzspulen-Anordnung, wie sie bisher verwendet wird, natürlich nicht möglich.

[0042] **Fig. 3** zeigt rein der Vollständigkeit halber noch ein Blockdiagramm zur Veranschaulichung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0043] In Block 301 wird eine Vielzahl n_{mess} von Einzelmessungen durchgeführt, wobei jede Einzelmessung eine von der Anzahl der einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 abhängige Anzahl n_y von Messwerten liefert, wobei das Magnetfeld der Magnetfeldquelle 210 zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen variiert wird, sodass bei unterschiedlichen Einzelmessungen das Magnetfeld der Magnetfeldquelle 210 am Ort der Magnetfeldsensoren-Anordnung 220 jeweils unterschiedlich ist. Erfindungsgemäß wird eine Mindestanzahl an Einzelmessungen durchgeführt, wobei sich die erforderliche Mindestanzahl nach folgender Ungleichung bestimmt:

$$n_{\text{mess}} * n_{\text{var}} + n_{\text{konst}} \ll n_y * n_{\text{mess}}$$

[0044] Hierbei beschreiben die Variable n_{mess} die Anzahl an durchzuführenden Einzelmessungen, die Variable n_y die Anzahl der mittels der Magnetfeldsensoren ermittelten Messwerte pro durchgeföhrter Einzelmessung, die Variable n_{var} die Anzahl der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter, und die Variable n_{konst} die Anzahl der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter.

[0045] In Block 302 werden ein oder mehrere unbekannte Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} und optional zusätzlich ein oder mehrere Magnetfeldquellen-spezifische Parameter P_{mag} ermittelt, und zwar basierend auf den Messwerten der Magnetfeldsensoren 221, 222 sowie unter Anwendung eines Optimierungs- oder Schätzverfahrens. Diese ermittelten Parameter P_{sens} , P_{mag} werden dann jeweils als Korrekturwerte zum Kalibrieren des Magnetsensorsystems 200 genutzt, indem diese Korrek-

turwerte auf zukünftige Messergebnisse des Magnetsensorsystems 200 angewendet werden.

[0046] Auch das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass es mit einer Magnetfeldquelle 210 ausgeführt wird, die ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt.

[0047] Das Verfahren eignet sich besonders gut zur Kalibrierung von Magnetfeldsensor-Anordnungen, die das Magnetfeld vektoriell, d.h. nach Betrag und Richtung, bestimmen können. Hierfür kann die Magnetfeldsensor-Anordnung 220 gemäß einer denkbaren Ausführungsform (**Fig. 4A**) mindestens sechs skalar messende Magnetfeldsensoren 221, ..., 226 aufweisen, wobei jeder Magnetfeldsensor 221, ..., 226 genau eine Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit aufweist, entlang derer der jeweilige Magnetfeldsensor 221, ..., 226 empfindlich für ein Magnetfeld ist, sodass ein skalar messender Magnetfeldsensor 221, ..., 226 das Magnetfeld in genau einer Raumrichtung messen kann.

[0048] Hierbei kann es sich beispielsweise um einzelne Hall-Sensoren handeln, die jeweils senkrecht zur Chip-Ebene sensiv sind für das Magnetfeld. In dieser Richtung weisen sie also eine Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit auf. Die mindestens sechs skalar messenden Magnetfeldsensoren 221, ..., 226 (z.B. Hall-Sensoren) können in einer jeweils 90°-Raumkonfiguration zueinander angeordnet sein, sodass sie, je nach ihrer jeweiligen Chip-Orientierung, das Magnetfeld in unterschiedliche Raumrichtungen messen können. Ein einzelner skalar messender Magnetfeldsensor misst zwar immer nur den Betrag des Magnetfelds, abhängig von der relativen Raumkonfiguration bzw. der jeweiligen Chip-Orientierung (90° Versatz zueinander). Mit mindestens drei bzw. sechs skalar messenden Magnetfeldsensoren 221, ..., 226, die in der oben genannten 90°-Raumkonfiguration zueinander angeordnet sind, kann zusätzlich auch die Richtung des Magnetfelds bestimmt werden, d.h. es kann also das magnetische Vektorfeld nach Betrag und Richtung bestimmt werden.

[0049] Gemäß einer alternativen Ausführungsform (**Fig. 4B**) kann die Magnetfeldsensor-Anordnung 220 mindestens zwei vektoriell messende 3D-Magnetfeldsensoren 221, 222 aufweisen, wobei jeder 3D-Magnetfeldsensor 221, 222 genau drei Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeiten aufweist, entlang derer der jeweilige Magnetfeldsensor 221, 222 empfindlich für ein Magnetfeld ist. Das heißt, ein 3D-Magnetfeldsensor 221, 222 kann das Magnetfeld jeweils in allen drei Raumrichtungen messen.

[0050] Im Gegensatz zu einem einzelnen skalar messenden Magnetfeldsensor kann ein 3D-Magnetfeldsensor sowohl den Betrag als auch die Richtung

des Magnetfelds bestimmen. Hierbei reichen zwei dieser 3D-Magnetfeldsensoren aus. Ein einzelner 3D-Magnetfeldsensor kann drei einzelne skalar messende Magnetfeldsensoren beinhalten, die wiederum in einer entsprechenden 90°-Raumkonfiguration zueinander angeordnet sind, um in allen drei Raumrichtung (Magnetfeld in x-, y- und z-Richtung) messen zu können.

[0051] Nachfolgend werden denkbare Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens näher beschrieben, wobei zunächst ein Beispiel erläutert wird, bei dem das Magnetfeld variiert wird, indem die Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bewegt wird (**Fig. 5**). Anschließend wird ein weiteres Beispiel beschrieben, bei dem das Magnetfeld variiert wird, indem die Magnetfeldquelle 210 Erregerleiter 221, 222 aufweist, die unterschiedlich verschaltet werden (**Fig. 6**). Die nachfolgenden Ausführungen gelten hierbei aber natürlich stets für beide Varianten.

[0052] Alle hierin beschriebenen Ausführungsformen haben jedoch gemeinsam, dass eine Magnetfeldquelle genutzt wird, die ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt, und dass die Magnetfeldquelle am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 variiert (z.B. bewegt oder verändert) wird.

[0053] Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es prinzipiell vorteilhaft, wenn die geometrische Form der Magnetfeldquelle 210 bis auf wenige Parameter vorab bekannt ist. Insbesondere ist es von Vorteil, wenn die äußere Form der Magnetfeldquelle 210 bekannt ist. Im Falle eines Permanentmagneten kann beispielsweise bekannt sein, ob es sich um einen quaderförmigen oder einen zylindrischen Magneten handelt. Die genauen Abmessungen der Magnetfeldquelle 210, wie beispielsweise die Kantenlänge oder der Radius, können ebenso wie die spezifische Magnetisierung der Magnetfeldquelle 210 unbekannte Parameter sein. Besonders bei der Magnetisierung ist dies ein Vorteil, weil diese starken Fertigungstoleranzen unterliegt und meist nicht exakt in die gewünschte Richtung zeigt (Schiefmagnetisierung).

[0054] Gemäß Ausführungsformen der Erfindung können also von den Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern P_{mag} beispielsweise zumindest

- die Abmessungen der Magnetfeldquelle (210), und/oder
- der Magnetisierungsvektor (\vec{M}) der Magnetfeldquelle (210)

vor der Durchführung der Einzelmessungen unbekannt sein, womit die entsprechenden Freiheitsgrade der jeweiligen unbekannten Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} variabel wären (die variab-

len und konstanten Freiheitsgrade werden weiter unten noch näher beschrieben).

[0055] Sofern zumindest die äußere geometrische Form (Quader, Zylinder, etc.) der Magnetfeldquelle 210 bekannt ist, kann das zu erwartende Magnetfeld mathematisch bestimmt werden. Außerdem kann ein mathematisches Modell der zu erwartenden Fehler-/Nichtidealitäten, d.h. der einzelnen individuellen Offsets, Empfindlichkeiten und Positionen bzw. Orientierungen der jeweiligen Magnetfeldsensoren 221, 222, erstellt werden.

[0056] Nun können die Einzelmessungen ausgeführt werden, wobei zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen das Magnetfeld der Magnetfeldquelle 210 variiert wird. Pro Einzelmessung werden mehrere Messwerte ermittelt, abhängig von der Anzahl der Magnetfeldsensoren 221, 222. Sofern das Magnetfeld variiert wird, indem die Magnetfeldquelle 210 zwischen zwei Einzelmessungen an unterschiedlichen Punkten im Raum positioniert wird, werden die jeweiligen Messwerte der einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 dementsprechend an unterschiedlichen Punkten des Parameterraumes aufgenommen und abgespeichert.

[0057] Ist eine ausreichend große Anzahl an Einzelmessungen durchgeführt und eine ausreichende Anzahl an Messpunkten ermittelt worden, so kann ein Optimierungs- oder Schätzalgorithmus gestartet werden, der sowohl die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} der Magnetfeldquelle 210 als auch die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bestimmt. Sowohl die unbekannten Parameter der Modelle des Magnetfelds als auch die modellierten Fehler bzw. Nichtidealitäten der Magnetfeldsensoren 221, 222 können während der Durchführung der Einzelmessungen konstant aber auch variabel sein.

[0058] Die erfindungsgemäße minimale Anzahl an durchzuführenden Einzelmessungen bzw. Messpunkten ergibt sich aus dem Grenzfall eines linearen Gleichungssystems mit nur unabhängigen Gleichungen mit einer bestimmten Anzahl von Konstanten n_{konst} sowie Variablen n_{var} . Anhand einer Vielzahl n_{mess} von Einzelmessungen können die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} und/oder die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} bestimmt werden.

[0059] Werden bestimmte Voraussetzungen bzw. Mindestanforderungen an die Anzahl der Einzelmessungen sowie an die Variation des Magnetfelds erfüllt, so ist das dabei entstehende nichtlineare Gleichungssystem in einem begrenzten Bereich eindeutig lösbar. Dieses nichtlineare Gleichungssystem enthält ein oder mehrere Konstanten und Variablen, die den zuvor erwähnten bekannten und/oder unbe-

kannten Magnetfeldsensor-spezifischen Parametern P_{sens} und Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern P_{mag} entsprechen. Um die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} sowie die Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern P_{mag} zu ermitteln, kann das nichtlineare Gleichungssystem gelöst werden, beispielsweise mittels des oben genannten Optimierungs- oder Schätzalgorithmus.

[0060] Die Lösbarkeit des nichtlinearen Gleichungssystems, d.h. die Beobachtbarkeit des Systems, ist gegeben, sofern eine ausreichende Anzahl n_y an Messwerten der einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 pro Einzelmessung sowie eine ausreichende Anzahl von Einzelmessungen n_{mess} an unterschiedlichen Positionen (zur Variation des Magnetfelds) zur Verfügung stehen. Hierbei gilt erfindungsgemäß

$$n_{mess} * n_{var} + n_{konst} \ll n_y * n_{mess}. \quad (1)$$

[0061] Wenn beispielsweise vier 3D-Magnetfeldsensoren verwendet werden, dann erhält man pro Einzelmessung insgesamt $n_y = 4 * 3 = 12$ Messwerte, denn jeder einzelne 3D-Magnetfeldsensor liefert jeweils drei Messwerte pro Einzelmessung. Wenn insgesamt $n_{mess} = 6$ Einzelmessungen durchgeführt werden, dann erhält man insgesamt $6 * 12 = 42$ Messwerte.

[0062] Mit Verweis auf die obige Ungleichung (1) kann also festgehalten werden, dass sowohl die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} als auch die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} jeweils eine bestimmte Anzahl n_{var} an variablen Freiheitsgraden und eine bestimmte Anzahl n_{konst} an konstanten Freiheitsgraden aufweisen können.

[0063] Erfindungsgemäß ist demnach vorgesehen, dass eine Mindestanzahl an Einzelmessungen durchgeführt wird, wobei diese Mindestanzahl an durchzuführenden Einzelmessungen abhängig ist von

- der Anzahl n_y der mittels der Magnetfeldsensoren 221, 222 ermittelten Messwerte, und
- der Anzahl n_{var} der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} und der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} , und
- der Anzahl n_{konst} der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} und der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} .

[0064] Falls die unbekannten Parameter P_{sens} und P_{mag} definiert sind, und falls bekannt sein sollte wie viele Magnetfeldsensoren 221, 222 verwendet werden, dann lässt sich mit Ungleichung (1) auch die

Anzahl der erforderlichen Einzelmessungen ermitteln.

[0065] Neben dieser o.g. Minimalanforderung ist die Beobachtbarkeit des Systems entscheidend. Diese verbessert sich dadurch, dass das Magnetfeld möglichst stark variiert wird, z.B. indem die Messpunkte (Position und/oder Orientierung der Magnetfeldquelle 210 relativ zur Magnetfeldsensor-Anordnung 220) möglichst verteilt sind, und/oder indem möglichst viele Parameter P_{sens} , P_{mag} bei jeder Einzelmessung konstant sind. Dies ist bei einigen Parametern wie der Empfindlichkeitsmatrix per se gegeben, kann aber auch zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass sich die Magnetfeldquelle 210 durch die Art der Befestigung in nur einigen Freiheitsgraden bewegen kann. Ein solches Beispiel soll nachfolgend unter Bezugnahme auf **Fig. 5** näher erläutert werden.

[0066] **Fig. 5** zeigt zunächst eine erfindungsgemäße Vorrichtung 100 zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems 200. Das Magnetsensorsystem 200 weist einen Komponententräger bzw. ein Substrat 240 in Form einer Leiterplatte (PCB: Printed Circuit Board) auf. Auf dem Substrat 240 sind zwei Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B montiert, wobei jede Magnetfeldsensor-Anordnung 220A, 220B jeweils zwei 3D-Magnetfeldsensoren aufweist. Die Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B weisen jeweils ein Gehäuse auf, weshalb die darin untergebrachten einzelnen 3D-Magnetfeldsensoren in **Fig. 5** nicht zu erkennen sind.

[0067] Das hier gezeigte Ausführungsbeispiel weist also eine erste Magnetfeldsensor-Anordnung 220A mit jeweils zwei einzelnen (nicht dargestellten) 3D-Magnetfeldsensoren sowie eine zweite Magnetfeldsensor-Anordnung 220B mit ebenfalls jeweils zwei einzelnen (nicht dargestellten) 3D-Magnetfeldsensoren auf. Dieses Ausführungsbeispiel weist also insgesamt vier 3D-Magnetfeldsensoren auf.

[0068] Das Magnetsensorsystem 200 weist außerdem eine, ebenfalls auf dem Substrat 240 angeordnete, Kalibriervorrichtung 300 auf. Hierbei kann es sich beispielsweise um einen auf dem PCB 240 montierten ASIC handeln (ASIC: Application Specific Integrated Circuit). Die Kalibriervorrichtung 300 steuert den Ablauf der Messungen und dient der Signalverarbeitung.

[0069] Das Magnetsensorsystem 200 weist ferner eine Magnetfeldquelle 210 auf. In diesem Fall handelt es sich, rein beispielhaft, um einen quaderförmigen Permanentmagneten. Die Magnetfeldquelle 210 ist in diesem Beispiel nicht parallel zum Substrat 240 (z.B. PCB) ausgerichtet, sondern ist in zwei Achsen um je 45° geneigt. Dies stellt sicher, dass möglichst alle Komponenten der 3D-Magnetfeldsensoren innerhalb der Magnetfeldsensor-Anordnungen

220A, 220B ausgesteuert werden. Dadurch kann die Qualität der Auswertung verbessert werden.

[0070] Die Magnetfeldquelle 210 ist außerdem relativ zu den Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B beweglich. Die Magnetfeldquelle 210 kann beispielsweise entlang von zumindest einer ihrer drei Translationsachsen (x-, y-, z-Achse) translatorisch verschoben werden. Alternativ oder zusätzlich kann die Magnetfeldquelle 210 um zumindest eine ihrer drei Rotationsachsen (x-, y-, z-Achse) gedreht werden.

[0071] In dem hier gezeigten Beispiel ist die Magnetfeldquelle 210 derart eingespannt bzw. fixiert, dass sie sich nur entlang von genau einer Translationsachse hin und her bewegen kann (angedeutet mit den Pfeilen 261, 262). Entlang dieser Strecke wird also der Permanentmagnet 210, zwischen zwei Einzelmessungen, relativ zur Leiterplatte 240 bzw. den darauf angeordneten Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B bewegt, um dadurch zwischen den jeweiligen Einzelmessungen das Magnetfeld zu variieren.

[0072] Während der Bewegung der Magnetfeldquelle 210 werden in diesem nicht-limitierenden Beispiel eine Anzahl von $n_{\text{mess}} = 6$ Einzelmessungen durchgeführt. Es kann beispielsweise an sechs unterschiedlichen Positionen der Magnetfeldquelle 210 (relativ zur Magnetfeldsensor-Anordnung 220) jeweils eine Einzelmessung durchgeführt werden. Bei jeder Einzelmessung wird eine Anzahl von Messwerten generiert, die von der Anzahl der zum Einsatz kommenden Magnetfeldsensoren abhängig ist.

[0073] Wie eingangs erwähnt wurde, sind in diesem Beispiel zwei Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B vorhanden, wobei jede Magnetfeldsensor-Anordnung 220A, 220B jeweils zwei 3D-Magnetfeldsensoren aufweist, und wobei jeder 3D-Magnetfeldsensor pro Einzelmessung jeweils drei Messwerte liefert. Man erhält mit dieser Anordnung also pro Einzelmessung insgesamt eine Anzahl von $n_y = 2 * 2 * 3 = 12$ Messwerte (2 Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B * 2 3D-Sensoren * 3 Messwerte pro 3D-Sensor).

[0074] Wie ebenfalls bereits erwähnt wurde, werden in diesem Beispiel insgesamt sechs Einzelmessungen durchgeführt, d.h. $n_{\text{mess}} = 6$. Somit kann ein Messvektor \vec{y} der Größe $\text{dim}(\vec{y}) = n_y * n_{\text{mess}} = 2 * 2 * 3 * 6 = 72$ gebildet werden (2 Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B * 2 3D-Sensoren * 3 Messwerte pro 3D-Sensor * 6 Einzelmessungen). Zusammen mit dem Modell $\vec{B}(\vec{x}, \vec{M})$ der Magnetfeldquelle 210 sowie einer Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ für die individuellen Empfindlichkeiten der einzelnen Magnetfeldsensoren, und der zusätz-

lichen Annahme, dass kein Nullpunktfehler (Offset) vorhanden ist, können die Messungen wie folgt beschrieben werden:

$$S(\vec{p}) \cdot \vec{B}(\vec{x}, \vec{M}) = \vec{y} \quad (2)$$

[0075] Das heißt, mit Gleichung (2) können anhand des Messvektors \vec{y} die Magnetsensorspezifischen Parameter P_{sens} und die Magnetquellen-spezifischen Parameter P_{mag} ermittelt werden. Dabei ist die Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ ein Magnetsensor-spezifischer Parameter P_{sens} , und das Modell der magnetischen Flussdichte $\vec{B}(\vec{x}, \vec{M})$ enthält Magnetquellenspezifische Parameter P_{mag} .

[0076] Die Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ drückt die jeweiligen individuellen Empfindlichkeiten der einzelnen (3D-)Magnetfeldsensoren 221, 222 aus. Die Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ ist eine Dreh- und Skalierungs-Matrix, die dafür sorgt, dass der x-Magnetfeldsensor auch nur die x-Komponente B_x des Magnetfelds misst, der y-Sensor entsprechend nur B_y und der z-Sensor nur B_z misst. Außerdem sorgt die Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ dafür, dass jede Komponente bei identischer magnetischer Erregung auch das gleiche Ausgangssignal liefert.

[0077] Wie zuvor unter Bezugnahme auf **Fig. 4B** bereits erläutert wurde, weist jeder 3D-Magnetfeldsensor genau drei Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeiten auf, entlang derer der jeweilige 3D-Magnetfeldsensor empfindlich für ein Magnetfeld ist, sodass jeder 3D-Magnetfeldsensor das Magnetfeld in allen drei Raumrichtungen messen kann. Dies kommt daher, dass ein 3D-Magnetfeldsensor drei skalar messende Sensorelemente aufweisen kann, die sich innerhalb des jeweiligen 3D-Magnetfeldsensors exakt an der gleichen Stelle befinden können. Diese einzelnen skalar messenden Sensorelemente können wiederum jeweils genau eine Vorzugsrichtungsempfindlichkeit (x-, y- und z-Richtung) aufweisen. Es kommt jedoch noch hinzu, dass jeder dieser drei einzelnen skalar messenden Sensorelemente (z.B. mit einer Vorzugsrichtungsempfindlichkeit in z-Richtung) jeweils auch einen gewissen Anteil der anderen beiden Sensorelementen (z.B. in x- und y-Richtung) misst. Der letztere Anteil wird auch als Querempfindlichkeit bezeichnet. Somit weist die Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ für jeden 3D-Magnetfeldsensor $3 * 3 = 9$ Elemente für die Empfindlichkeit auf.

[0078] Die Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ beinhaltet somit in unserem Beispiel mit vier vektoriell messenden 3D-Magnetfeldsensoren $4 * 3 * 3 = 36$ unbekannte Konstanten. Die MatrixElemente sind unbekannt, da die einzelnen Sensorempfindlichkeiten unbekannt sind. Es handelt sich hierbei um Konstan-

ten, d.h. um konstante Freiheitsgrade, da die Empfindlichkeiten eines Sensors sich im Wesentlichen nicht ändern, zumindest in dem Zeitraum während eines Kalibrierorgangs.

[0079] Es können also mittels Gleichung (2) ein oder mehrere unbekannte Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} ermittelt werden. Hierzu zählen, unter anderem, die soeben beschriebenen Sensorempfindlichkeiten, und zwar die individuelle Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit (z.B. in z-Richtung) eines jeweiligen Magnetfeldsensors, aber zusätzlich auch eine individuelle Querempfindlichkeit eines jeweiligen Magnetfeldsensors auf Magnetfelder, die nicht der Vorzugsrichtungsempfindlichkeit entsprechen (also z.B. in x- und y-Richtung). Die Querempfindlichkeiten können also Magnetfeldkomponenten sein, die orthogonal zur Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit stehen (vgl. x-, y- und z-Komponenten).

[0080] Mit der hierin beschriebenen Methode kann auch ein Offset als ein weiterer Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} ermittelt werden. Alternativ oder zusätzlich kann mittels dem erfindungsgemäßen Verfahren die Position und/oder die Orientierung der einzelnen Magnetfeldsensoren bezüglich des Substrats 240 bzw. Komponententrägers, auf dem sie montiert sind, als ein Magnetfeldsensor-spezifischer Parameter P_{sens} ermittelt werden.

[0081] Zusammenfassend können also die mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens zu bestimmenden unbekannten Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} mindestens einen Parameter aus der folgenden Gruppe beinhalten:

- einen Nullpunktfehler (Offset)
- eine individuelle Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit eines einzelnen Magnetfeldsensors 221, 222
- eine individuelle Querempfindlichkeit eines einzelnen Magnetfeldsensors 221, 222 auf Magnetfelder die nicht der Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit des jeweiligen Magnetfeldsensors 221, 222 entsprechen
- die Position und Orientierung der einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 bezüglich des Komponententrägers 240, auf dem sie montiert sind.

[0082] Im obigen Beispiel gemäß Gleichung (2) können, neben den Magnetfeldsensor-spezifischen Parametern P_{sens} , auch Magnetfeldquellen-spezifische Parameter P_{mag} bestimmt werden. Als Beispiel hierfür sei das in Gleichung (2) angegebene Modell der magnetischen Flussdichte $\vec{B}(\vec{x}, \vec{M})$ der Magnetfeldquelle 210 genannt. Die magnetische Flussdichte \vec{B} wird hier in Abhängigkeit von der Position und/oder

Orientierung (Vektor \vec{x}) der Magnetfeldquelle 210 relativ zur Magnetfeldsensor-Anordnung 220A, 220B sowie in Abhängigkeit des individuellen Magnetisierungsvektors \vec{M} angegeben.

[0083] Zur Erinnerung: In diesem nicht-limitierenden Beispiel gemäß **Fig. 5** war die Magnetfeldquelle 210 derart fixiert bzw. eingespannt, dass sie sich lediglich entlang von genau einer Translationsachse, z.B. entlang der x-Achse, bewegen konnte (siehe **Fig. 5**, Bezugszeichen 261, 262). Das heißt, lediglich ein Freiheitsgrad (Translation in x-Richtung) ist variabel. Die anderen fünf Freiheitsgrade (Translation entlang y- und z-Achse sowie Rotation um x-, y- und z-Achse) waren aufgrund der Fixierung der Magnetfeldquelle 210 nicht variabel, d.h. konstant. In Gleichung (2) beschreibt der Vektor \vec{x} die unbekannte Position der Magnetfeldquelle 210 und besteht in diesem nicht limitierenden Beispiel somit also aus fünf Konstanten und einer Variablen.

[0084] Der Magnetisierungsvektor \vec{M} beschreibt die Magnetisierung der Magnetfeldquelle 210 und weist Komponenten in x-, y- und z-Richtung auf, d.h. M_x , M_y und M_z . Der Magnetisierungsvektor \vec{M} beschreibt also wie stark und in welcher Richtung die Magnetfeldquelle 210 magnetisiert ist. Die Magnetisierung der Magnetfeldquelle 210 ist in der Regel unbekannt, aber konstant. Das heißt, der Magnetisierungsvektor \vec{M} ist unbekannt und geht in Gleichung (2) mit weiteren drei Konstanten $(M_x, M_y$ und $M_z)$ in das Gleichungssystem ein.

$\vec{B}(\vec{x}, \vec{M})$ ist eine nichtlineare Funktion und kann für die, im vorliegenden Beispiel quaderförmige, Magnetfeldquelle 210 analytisch bestimmt werden [12]. Die Bedingung aus Gleichung (1) ist also mit $6 * 1 + 5 + 36 + 3 < 72$ erfüllt ($n_{\text{mess}} = 6$ Einzelmessungen * $n_{\text{var}} = 1$ Variable + $n_{\text{konst1}} = 5$ Konstanten der Position (2x Translation) und Orientierung (3x Rotation) + $n_{\text{konst2}} = 36$ konstante Matrixelemente der Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p}) + n_{\text{konst3}} = 3$ konstante Komponenten M_x , M_y und M_z des Magnetisierungsvektors \vec{M}).

[0085] Bei all diesen Parametern handelt es sich um Magnetfeldquellen-spezifische Parameter P_{mag} , die mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmt werden können. Als ein weiterer denkbarer Magnetfeldquellen-spezifischer Parameter P_{mag} könnten auch die Abmessungen der Magnetfeldquelle 210 bestimmt werden.

[0086] Zusammenfassend können also die mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens ermittelbaren Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} mindestens einen Parameter aus der folgenden Gruppe beinhalten:

- eine Position der Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220, d.h. Translation entlang x-, y- und z-Richtung
- eine Orientierung der Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220, d.h. Rotation um x-, y- und z-Achse
- der spezifische Magnetisierungsvektor \vec{M} der Magnetfeldquelle, d.h. die spezifische Magnetisierung der Magnetfeldquelle in allen drei Raumrichtungen M_x , M_y , M_z
- die Abmessungen der Magnetfeldquelle 210.

[0087] Das nichtlineare Gleichungssystem mit den Parametern \vec{x} , \vec{M} und \vec{p} kann nun mit einem geeigneten nichtlinearen Optimierungs- oder Schätzverfahren beispielsweise einem Unscented Kalman-Filter gelöst werden [13]. Dieser Algorithmus kann von der Kalibriervorrichtung 300 ausgeführt werden. Um geeignete Startwerte für den Algorithmus zu generieren, können Erregerleiter genutzt werden, die in den Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B integriert sind. Damit kann ein definiertes Feld an der Stelle der Magnetfeldsensoren 221, 222 erzeugt werden, was einen bereits auf etwa 10 Prozent genauen Wert für die Empfindlichkeiten liefern kann [10]. Des Weiteren kann eine Lokalisierung (Ort und Lage) der Magnetfeldquelle 210 mit idealen Parametern aus der Sensor- bzw. Magnetspezifikation als Startwert der Schätzung dienen.

[0088] Gemäß einer entsprechenden Ausführungsform beinhaltet das erfindungsgemäße Verfahren die folgenden Schritte:

[0089] Aufstellen eines nichtlinearen Gleichungssystems

$$S(\vec{p}) \cdot \vec{B}(\vec{x}, \vec{M}) = \vec{y}$$

beinhaltend:

- einen Messvektor \vec{y} , der die mittels der Magnetfeldsensoren 221, 222 während den Einzelmessungen ermittelten Messwerte enthält,
- ein mathematisches Modell zur Beschreibung des inhomogenen Magnetfelds $\vec{B}(\vec{x}, \vec{M})$ der Magnetfeldquelle 210 als einen zu bestimmenden Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} , der jeweils eine bestimmte Anzahl an variablen Freiheitsgraden n_{var} und/oder konstanten Freiheitsgraden n_{konst} aufweist, und
- ein mathematisches Modell $S(\vec{p})$ zur Beschreibung der individuellen Empfindlichkeiten der einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 der Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B als einen zu bestimmenden unbekannten Mag-

netfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} , wobei der Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} eine von der Anzahl der Magnetfeldsensoren abhängige Anzahl n_{konst} an unbekannten konstanten Freiheitsgraden aufweist.

[0090] Das Verfahren beinhaltet ferner das Lösen des nichtlinearen Gleichungssystems unter Anwendung des Optimierungs- oder Schätzverfahrens, wobei als Ergebnis mindestens der unbekannte Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} , und alternativ oder zusätzlich der Magnetfeldquellen-spezifische Parameter P_{mag} erhalten wird, der bzw. die dann als Korrekturwert/e des Magnetsensorsystems 200 genutzt wird bzw. werden.

[0091] Gemäß dem in **Fig. 5** gezeigten nicht-limitierenden Ausführungsbeispiel beinhaltete der Schritt des Variierens des Magnetfelds der Magnetfeldquelle 210, dass die Position und/oder die Orientierung der Magnetfeldquelle 210 zwischen den Einzelmessungen variiert wird, wobei die Magnetfeldquelle 210 bewegt wird und die Magnetfeldsensor-Anordnung 220 statisch bleibt.

[0092] Der Begriff „statisch“ bezieht sich hierbei auf das Bezugssystem der Umgebung. Das heißt, die Magnetfeldquelle 210 wird bewegt, während das Substrat 240 (z.B. PCB) nicht bewegt wird.

[0093] Mathematisch lässt sich das Bezugssystem natürlich wechseln, womit zum Beispiel eine Bewegung der Magnetfeldquelle 210 im Sensorskoordinatensystem äquivalent zu einer Bewegung der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 im Magnetkoordinatensystem wäre. In diesem Falle handelt es sich um eine reine Relativbewegung der Magnetfeldquelle 210 gegenüber der Magnetfeldsensor-Anordnung 220, wobei es hier keine wesentliche Rolle spielt, welches der beiden Elemente 210, 220 beweglich bzw. unbeweglich ist. Je nach Art der Relativbewegung können dabei variable und konstante Freiheitsgrade vorkommen.

[0094] Aus Gleichung (1) geht hervor, dass die Anzahl n_{var} der variablen Freiheitsgrade multiplikativ in die Gleichung eingeht, während hingegen die Anzahl n_{konst} der konstanten Freiheitsgrade lediglich additiv in die Gleichung eingeht. Das heißt, eine größere Anzahl n_{var} an variablen Freiheitsgraden hat eine deutlich größere Auswirkung auf das lineare Gleichungssystem als eine größere Anzahl n_{konst} an konstanten Freiheitsgraden. Somit ist es vorteilhaft, möglichst viele konstante Freiheitsgrade zu haben.

[0095] So weist beispielsweise die Magnetfeldquelle 210 drei Freiheitsgrade bezüglich ihrer Position (Translation entlang x-, y-, z-Achse) und drei Freiheitsgrade bezüglich ihrer Orientierung (Rotation um x-, y-, z-Achse) auf.

[0096] Wie in dem Beispiel in **Fig. 5** diskutiert wurde, war hier die Magnetfeldquelle 210 derart fixiert bzw. eingespannt, dass lediglich eine Bewegung entlang einer einzigen Translationsachse möglich war, d.h. es gab nur einen einzigen variablen Freiheitsgrad. Die übrigen fünf Freiheitsgrade waren, aufgrund der gewählten Fixierung der Magnetfeldquelle 210, konstant.

[0097] Dementsprechend können also denkbare Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung vorsehen, dass die Magnetfeldquelle 210 gegenüber der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 derart fixiert wird, dass beim Variieren der Position und/oder der Orientierung der Magnetfeldquelle 210 zwischen den Einzelmessungen mindestens ein Freiheitsgrad bezüglich der Position (Translation entlang x-, y-, z-Achse) und/oder mindestens ein Freiheitsgrad bezüglich der Orientierung (Rotation um x-, y-, z-Achse) konstant bleibt. Wie eingangs erwähnt, ist es vorteilhaft, wenn möglichst viele Freiheitsgrade konstant bleiben.

[0098] Alternativ zu dem in **Fig. 5** abgebildeten Beispiel wäre es aber prinzipiell auch denkbar, die Magnetfeldquelle 210 auf definierten Kurven bzw. Bahnen zu bewegen und diese geeignet zu beschreiben, um so die Zahl der variablen Freiheitsgrade, d.h. der unbekannten kinematischen Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} (z.B. Position und/oder Orientierung und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der Magnetfeldquelle 210 bei der Variation des Magnetfelds), möglichst klein zu halten.

[0099] Gemäß einem dementsprechenden Ausführungsbeispiel wäre es also denkbar, zum Zwecke der Variation des Magnetfelds der Magnetfeldquelle 210, die Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 an unterschiedlichen Messpositionen entlang einer definierten und bekannten Bahn zu platzieren.

[0100] Alternativ hierzu wäre es denkbar, die Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 an beliebigen und nicht vorab vorgegebenen Messpositionen zu platzieren, wodurch aber natürlich wieder die Anzahl n_{var} der variablen Freiheitsgrade ansteigt. Dies könnte dann jedoch wiederum durch eine entsprechend große Anzahl n_{mess} an durchzuführenden Einzelmessungen kompensiert werden, damit Gleichung (1) wieder erfüllt wäre.

[0101] Bei undefinierten Bewegungen müssten also bei jeder Einzelmessung alle sechs mechanischen Freiheitsgrade (3x Rotation, 3x Translation) bestimmt werden. Es sind also mehr Variablen aber dafür weniger Konstanten zu bestimmen. Sind aber genug Einzelmessungen an unterschiedlichen Posi-

tionen durchgeführt worden, so ist Gleichung (1) wieder erfüllt und es kann auch in diesem Fall erfundungsgemäß kalibriert werden. Es müsste nur sichergestellt werden, dass sich die Messungen, die in den Algorithmus eingehen, möglichst unterscheiden, damit das Gleichungssystem lösbar ist. Man könnte hierzu beispielsweise die Feldstärken vergleichen und eine gewisse prozentuale Änderung bei jeder Messung fordern. Voraussetzung ist aber, dass sich die Magnetfeldquelle 210 auch deutlich bewegt.

[0102] In dem obigen Ausführungsbeispiel waren von den ein oder mehreren Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern P_{mag} zumindest

- die Abmessungen der Magnetfeldquelle 210, und/oder
- der Magnetisierungsvektor \vec{M} der Magnetfeldquelle 210

vor der Durchführung der Einzelmessungen unbekannt.

[0103] In einem alternativen Ausführungsbeispiel der Erfindung kann die Magnetfeldquelle 210 exakt definiert sein und ohne unbekannte Parameter P_{mag} berechnet werden. Das heißt, ein oder mehrere der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter P_{mag} können vor der Durchführung der Einzelmessungen bekannt sein.

[0104] Hierzu kann beispielsweise ein zuvor vermessener Referenzmagnet bei bekannter Temperatur und bekanntem Magnetisierungsvektor \vec{M} als Magnetfeldquelle 210 benutzt werden. Das heißt, die Abmessungen der Magnetfeldquelle 210, und/oder der Magnetisierungsvektor \vec{M} der Magnetfeldquelle 210 sind somit bekannt.

[0105] Dabei kann die Anzahl der zu bestimmenden Freiheitsgrade derart verringert werden, dass zur Kalibrierung der Empfindlichkeitsmatrix des Magnetsensorsystems 200 nur wenige Variationen notwendig sind. Sind zudem die Position und/oder die Orientierung der Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 bekannt, genügen für eine beliebige Anzahl an vektoriell messenden 3D-Magnetsensoren 221, 222 genau drei Messungen, da für jeden vektoriell messenden Sensor gilt:

$$n_{konst} = n_y * 3 = n_{konst} * n_{mess} = 9. \quad (3)$$

[0106] Ein nicht limitierendes Beispiel für diese Ausführungsform wäre eine Kalibrierung eines Arrays (= Magnetfeldsensor-Anordnung 220) von 3D-Magnetfeldsensoren 221, 222 mittels Platzierung eines Referenzmagneten (= Magnetfeldquelle 210) in einer Halterung, die den Magneten 210 an einem

definierten Ort und in einer definierten Lage relativ zu dem Magnetfeldsensor-Array 220 fixiert. Die relative Lage der Magnetfeldquelle 210 zum Sensorarray 220 wäre dann bekannt, sodass anhand des Magnetfelds am Ort der 3D-Magnetfeldsensoren 221, 222 eine Kalibrierung der Sensorfehler durchgeführt werden könnte. Um drei unabhängige Messungen zu bekommen, kann nun die Magnetfeldquelle 210 in ihrer Halterung um zwei ihrer Achsen gedreht werden. Alternativ oder zusätzlich könnte das Array 220 translatorisch in drei Schritten verschoben werden. Dieses Ausführungsbeispiel wäre auch mit einer Magnetfeldsensor-Anordnung 220 mit genau einem 3D-Magnetfeldsensor 221 durchführbar.

[0107] **Fig. 6** zeigt eine weitere nicht limitierende Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Hier wird für die Kalibrierung des Magnetsensorsystems 200 das inhomogene Magnetfeld einer Erregerleiteranordnung 210 mit mehreren Erregerleitern 211, 212 genutzt. Das heißt, in diesem Ausführungsbeispiel ist die Magnetfeldquelle 210 in Form einer Erregerleiteranordnung ausgestaltet.

[0108] Auch in diesem Ausführungsbeispiel sind zwei Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B auf dem Substrat 240 angeordnet, wie es zuvor unter Bezugnahme auf **Fig. 5** beschrieben wurde. Prinzipiell wäre eine einzelne Magnetfeldsensor-Anordnung ausreichend, um das erfundungsgemäße Verfahren ausführen zu können. Sofern also im Rahmen der vorliegenden Offenbarung von einer Magnetfeldsensor-Anordnung 220 die Rede ist, können darunter die beispielhaft abgebildeten zwei Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B, oder aber noch mehrere Magnetfeldsensor-Anordnungen, verstanden werden. Somit gilt alles, was mit Bezug auf eine Magnetfeldsensor-Anordnung 220 im Allgemeinen gesagt wird, jeweils analog sowohl für die erste Magnetfeldsensor-Anordnung 220A als auch für die zweite Magnetfeldsensor-Anordnung 220B.

[0109] Um das inhomogene Feld möglichst definiert gegenüber den Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B zu erzeugen, können die einzelnen Erregerleiter 211, 212 direkt auf dem Substrat 240 (z.B. PCB bzw. Platine) aufgebracht werden. Die Erregerleiter 211, 212 können sich hierfür außerdem in der Nähe der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 befinden.

[0110] Die Erregerleiteranordnung 210 kann einen ersten Erregerleiter 211 aufweisen, der auf einer ersten Seite 271 des Substrats 240 (z.B. erste Platinenoberfläche bzw. Platinenoberseite) angeordnet sein kann. Die Erregerleiteranordnung 210 kann ferner einen zweiten Erregerleiter 212 aufweisen, der auf einer gegenüberliegenden zweiten Seite 272 des Substrats 240 (z.B. zweite Platinenoberfläche bzw. Platinenunterseite) angeordnet sein kann. Die Erre-

gerleiter 211, 212 können außerdem mittels einer Durchkontaktierung 280 an mindestens einer Stelle des Substrats 240 galvanisch miteinander verbunden sein.

[0111] Jeder der beiden Erregerleiter 211, 212 kann jeweils zwei Kontaktierungsanschlüsse 281, 282, 283, 284 aufweisen, an denen eine Strom- bzw. Spannungsquelle angeschlossen werden kann. Hierbei kann es sich vorzugsweise um eine Konstantstromquelle bzw. eine Gleichspannungsquelle handeln. Es wäre aber auch denkbar, dass Wechselstrom- bzw. Wechselspannungsquellen zum Einsatz kommen.

[0112] Um nun die unterschiedlichen Magnetfelder für die jeweiligen Einzelmessungen zu erzeugen, können nacheinander die vier Kontaktierungsanschlüsse 281, 282, 283, 284 jeweils paarweise an eine Strom- bzw. Spannungsquelle angeschlossen werden. Das heißt, an den Kontaktierungsanschlüssen 281, 282, 283, 284 kann in unterschiedlichen Kombinationen ein (konstanter) Strom angelegt werden, um dadurch inhomogene Magnetfelder im Bereich der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 zu erzeugen. Es handelt sich in diesem Ausführungsbeispiel also sozusagen um eine Kalibrieranordnung mit schaltbaren Erregerleitern 211, 212, wobei die Variation des Magnetfelds der Magnetfeldquelle 210 (am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220) durch das paarweise miteinander Verschalten der Kontaktierungsanschlüssen 281, 282, 283, 284 der Erregerleiter 211, 212 bewirkt werden kann.

[0113] Auch bei dieser Ausführungsform gilt die Minimalbedingung aus Gleichung (3), sodass die Erregerleiter 211, 212 so angesteuert werden sollten, dass mindestens drei unterschiedliche Magnetfelder nacheinander erzeugt werden. Aufgrund der beschriebenen paarweisen Verschaltung ergeben sich zunächst einmal zwölf unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten, wovon sich jeweils zwei nur durch die Richtung des Stromflusses unterscheiden. Somit verbleiben im Wesentlichen sechs unabhängige Kombinationen. Die Minimalbedingung aus Gleichung (3) wäre somit erfüllt. Es sind drei redundante Messungen vorhanden, die dazu genutzt werden können, um die Genauigkeit zu verbessern, oder neben der Empfindlichkeitsmatrix weitere Parameter zu bestimmen.

[0114] Damit sich die erzeugten Magnetfelder bei den Einzelmessungen stärker voneinander unterscheiden, wodurch die Beobachtbarkeit bzw. die Genauigkeit der Kalibrierung verbessert wird, kann sich die Symmetrie, d.h. die geometrische Form, der Erregerleiter 211, 212 voneinander unterscheiden. In dem nicht-limitierenden Beispiel aus **Fig. 6** ist hierfür beispielsweise der zweite Erregerleiter 212 auf der Unterseite 272 des Substrats 240 kürzer

ausgestaltet als der erste Erregerleiter 211 auf der Oberseite 271 des Substrats 240. Mit einer derartigen unsymmetrischen Anordnung der einzelnen Erregerleiter 211, 212 führen die sechs unabhängigen Verschaltungs-Kombinationen der Kontaktierungsanschlüsse 281, 282, 283, 284 zu einem eindeutig lösbarer Gleichungssystem.

[0115] Das Magnetfeld der Erregerleiter-Anordnung 210 lässt sich analytisch in Abhängigkeit der Sensorreigenschaften berechnen. Die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} der Empfindlichkeit und der Verkippung bzw. der Versatz der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 können somit über einen Schätz-/Optimierungsalgorithmus bestimmt werden. Bei dem Versatz der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 handelt es sich im Wesentlichen um die Position und Ausrichtung der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 auf dem Substrat 240 (z.B. PCB bzw. Platine), d.h. um eine Abweichung, die aufgrund von Montagetoleranzen beim Auflöten der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 zustande kommen kann.

[0116] Im Gegensatz zum Stand der Technik [11], können nicht nur die Freiheitsgrade bestimmt werden, die die Lage der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 definieren, d.h. die Lage (Position und/oder Orientierung) der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 als ein Magnetfeldsensor-spezifischer Parameter P_{sens} . Vielmehr können mit der vorliegenden Erfindung zusätzliche Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} bestimmt werden, wie z.B. die magnetischen Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-Anordnung 220, d.h. die Empfindlichkeiten der einzelnen Magnetfeldsensoren 221, 222 der Magnetfeldsensor-Anordnung 220. Neben der Empfindlichkeit (Empfindlichkeitsmatrix $S(\bar{p})$) kann als ein weiterer zusätzlicher Magnetfeldsensor-spezifischer Parameter P_{sens} der Offset bestimmt werden. Die Vorgehensweise ist wie oben beschrieben, d.h. es kann ein mathematisches Modell des Aufbaus unter Einbeziehung ein oder mehrerer Magnetfeldsensor-spezifischer Parameter P_{sens} berechnet werden und in einem Optimierungsalgorithmus schrittweise an die Messungen angefittet werden. Zudem ist es nicht zwingend notwendig, ein wechselseitiges Magnetfeld anzulegen, welches in [11] erforderlich ist. Grundsätzlich lässt sich diese Ausprägung auch auf einem IC integrieren, um die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter P_{sens} (z.B. Empfindlichkeit und/oder Offset) zu bestimmen.

[0117] Die Variation des inhomogenen Magnetfelds der Magnetfeldquelle 210 am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220, jeweils zwischen zwei Einzelmessungen, kann also erfindungsgemäß auf unterschiedliche Art und Weise erreicht werden.

[0118] Gemäß einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens kann dies beispiels-

weise mittels einer Veränderung der Position und/oder Lage der Magnetfeldquelle 210 relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 erreicht werden. Dies kann beispielsweise mittels einer definierten Bewegung der Magnetfeldquelle 210, z.B. im Rahmen eines End-of-Line Tests, oder mittels einer unter Umständen undefinierten Bewegung im Betrieb erreicht werden. Letztere würde dazu führen, dass das Messsystem erst nach einer bestimmten Anfangsphase seine endgültige Genauigkeit erreicht.

[0119] Gemäß einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens kann die Variation des inhomogenen Magnetfelds der Magnetfeldquelle 210 am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 beispielsweise mittels einer unterschiedlichen Verschaltung von Erregerleitern 211, 212 einer Erregerleiteranordnung 210 erreicht werden.

[0120] Beide Ausführungsformen der Erfindung können dabei eine Anordnung mehrerer Magnetfeldsensoren (mindestens zwei vektoriell messende 221, 222 (**Fig. 4B**) oder sechs skalar messende 221, ..., 226 (**Fig. 4A**) Sensoren sowie einer magnetischen Quelle 210 aufweisen, welche im Bereich der Magnetfeldsensoren 211, 212 ein inhomogenes Feld erzeugt.

[0121] Mit der hierin beschriebenen Erfindung ist es ohne großen technischen Aufwand möglich, sehr genaue Kalibrierwerte für die Parameter (Magnetfeldsensor-spezifische Parameter P_{sens} und/oder Magnetfeldquellen-spezifische Parameter P_{mag}) eines Magnetsensorsystems 200 (z.B. mit ein oder mehreren Hall-Sensoren) zu bestimmen. Das erfindungsgemäße Verfahren verbessert somit die Genauigkeit von magnetfeldbasierten Messsystemen 200. Es ist hierzu lediglich ein kleiner Permanentmagnet oder eine sonstige Quelle 210 eines inhomogenen Magnetfelds erforderlich, die in geeigneter Weise bewegt oder geschaltet werden kann. Die Kalibrierung kann somit mit sehr geringem apparativen Aufwand erfolgen, was wiederum einen deutlichen Kostenvorteil bedeuten kann.

[0122] In vielen Anwendungen kann mit der Erfindung die Kalibrierung vollständig im eingebauten Zustand (*in situ*) erfolgen. Ein magnetischer Serientest einzelner Magnetfeldsensor-Anordnungen 220 sowie eines kompletten Magnetsensorsystems 200 (mit ein oder mehreren Magnetfeldsensor-Anordnungen 220A, 220B) kann dadurch entfallen. Außerdem können weitere Einflussfaktoren kompensiert werden, die erst beim Aufbau entstehen, beispielsweise eine Verkippung der Magnetfeldsensor-Anordnung 220 auf dem Substrat 240 (z.B. PCB) oder des PCBs 240 gegenüber dem Referenzkoordinatensystem in der Endanwendung. Die Temperaturabhängigkeit der Parameter P_{sens} und/oder P_{mag} , insbe-

sondere der Empfindlichkeitsmatrix $S(\vec{p})$ und der Offsets, kann mit diesem Ansatz während des Betriebs nachgeführt werden. Dieser deutliche Mehrwert gegenüber dem Stand der Technik ist einer der wichtigsten Vorteile.

[0123] Die Erfindung kann in allen Anwendungen von Magnetfeldsensoren eingesetzt werden, um diese zu kalibrieren, beispielsweise in der Stromsensorik oder der Qualitätssicherung für magnetische Komponenten.

[0124] Besondere Vorteile ergeben sich außerdem in Positionssensorik-Anwendungen, bei welchen eine hohe Genauigkeit gefordert ist, und insbesondere in Positionssensorik-Anwendungen, bei denen vektoriell messende Hall-Sensoren zum Einsatz kommen. Beispiele hierfür wären die Erkennung von Unwuchten in Waschmaschinen oder in PC-Eingabegeräten.

[0125] Anstelle des analytischen Modells könnte auch ein künstliches neuronales Netz genutzt werden, um die hierin beschriebene erfindungsgemäße Kalibrierung durchzuführen.

[0126] Die oben beschriebenen Ausführungsbeispiele stellen lediglich eine Veranschaulichung der Prinzipien des hierin beschriebenen innovativen Konzepts dar. Es versteht sich, dass Modifikationen und Variationen der hierin beschriebenen Anordnungen und Einzelheiten anderen Fachleuten einleuchten werden. Deshalb ist beabsichtigt, dass das hierin beschriebene Konzept lediglich durch den Schutzaufang der nachstehenden Patentansprüche und nicht durch die spezifischen Einzelheiten, die anhand der Beschreibung und der Erläuterung der Ausführungsbeispiele hierin präsentiert wurden, beschränkt sei.

[0127] Obwohl manche Aspekte im Zusammenhang mit einer Vorrichtung beschrieben wurden, versteht es sich, dass diese Aspekte auch eine Beschreibung des entsprechenden Verfahrens darstellen, sodass ein Block oder ein Bauelement einer Vorrichtung auch als ein entsprechender Verfahrensschritt oder als ein Merkmal eines Verfahrensschrittes zu verstehen ist. Analog dazu stellen Aspekte, die im Zusammenhang mit einem oder als ein Verfahrensschritt beschrieben wurden, auch eine Beschreibung eines entsprechenden Blocks oder Details oder Merkmals einer entsprechenden Vorrichtung dar.

[0128] Einige oder alle der Verfahrensschritte können durch einen Hardware-Apparat (oder unter Verwendung eines Hardware-Apparats), wie zum Beispiel einen Mikroprozessor, einen programmierbaren Computer oder einer elektronischen Schaltung durchgeführt werden. Bei einigen Ausführungsbeispielen können einige oder mehrere

der wichtigsten Verfahrensschritte durch einen solchen Apparat ausgeführt werden.

[0129] Je nach bestimmten Implementierungsanforderungen können Ausführungsbeispiele in Hardware oder in Software oder zumindest teilweise in Hardware oder zumindest teilweise in Software implementiert sein. Die Implementierung kann unter Verwendung eines digitalen Speichermediums, beispielsweise einer Floppy-Disk, einer DVD, einer BluRay Disc, einer CD, eines ROM, eines PROM, eines EPROM, eines EEPROM oder eines FLASH-Speichers, einer Festplatte oder eines anderen magnetischen oder optischen Speichers durchgeführt werden, auf dem elektronisch lesbare Steuersignale gespeichert sind, die mit einem programmierbaren Computersystem derart zusammenwirken können oder zusammenwirken, dass das jeweilige Verfahren durchgeführt wird. Deshalb kann das digitale Speichermedium computerlesbar sein.

[0130] Manche Ausführungsbeispiele umfassen also einen Datenträger, der elektronisch lesbare Steuersignale aufweist, die in der Lage sind, mit einem programmierbaren Computersystem derart zusammenzuwirken, dass eines der hierin beschriebenen Verfahren durchgeführt wird.

[0131] Allgemein können Ausführungsbeispiele als Computerprogrammprodukt mit einem Programmcode implementiert sein, wobei der Programmcode dahin gehend wirksam ist, eines der Verfahren durchzuführen, wenn das Computerprogrammprodukt auf einem Computer abläuft.

[0132] Der Programmcode kann beispielsweise auch auf einem maschinenlesbaren Träger gespeichert sein.

[0133] Andere Ausführungsbeispiele umfassen das Computerprogramm zum Durchführen eines der hierin beschriebenen Verfahren, wobei das Computerprogramm auf einem maschinen-lesbaren Träger gespeichert ist. Mit anderen Worten ist ein Ausführungsbeispiel des hierin beschriebenen Verfahrens somit ein Computerprogramm, das einen Programmcode zum Durchführen eines der hierin beschriebenen Verfahren aufweist, wenn das Computerprogramm auf einem Computer abläuft.

[0134] Ein weiteres Ausführungsbeispiel des hierin beschriebenen Verfahrens ist somit ein Datenträger (oder ein digitales Speichermedium oder ein computerlesbares Medium), auf dem das Computerprogramm zum Durchführen eines der hierin beschriebenen Verfahren aufgezeichnet ist. Der Datenträger oder das digitale Speichermedium oder das computerlesbare Medium sind typischerweise greifbar und/oder nicht flüchtig.

[0135] Ein weiteres Ausführungsbeispiel des hierin beschriebenen Verfahrens ist somit ein Datenstrom oder eine Sequenz von Signalen, der bzw. die das Computerprogramm zum Durchführen eines der hierin beschriebenen Verfahren darstellt bzw. darstellen. Der Datenstrom oder die Sequenz von Signalen kann bzw. können beispielsweise dahin gehend konfiguriert sein, über eine Datenkommunikationsverbindung, beispielsweise über das Internet, transferiert zu werden.

[0136] Ein weiteres Ausführungsbeispiel umfasst eine Verarbeitungseinrichtung, beispielsweise einen Computer oder ein programmierbares Logikbauelement, die dahin gehend konfiguriert oder angepasst ist, eines der hierin beschriebenen Verfahren durchzuführen.

[0137] Ein weiteres Ausführungsbeispiel umfasst einen Computer, auf dem das Computerprogramm zum Durchführen eines der hierin beschriebenen Verfahren installiert ist.

[0138] Ein weiteres Ausführungsbeispiel umfasst eine Vorrichtung oder ein System, die bzw. das ausgelegt ist, um ein Computerprogramm zur Durchführung zumindest eines der hierin beschriebenen Verfahren zu einem Empfänger zu übertragen. Die Übertragung kann beispielsweise elektronisch oder optisch erfolgen. Der Empfänger kann beispielsweise ein Computer, ein Mobilgerät, ein Speichergerät oder eine ähnliche Vorrichtung sein. Die Vorrichtung oder das System kann beispielsweise einen Datei-Server zur Übertragung des Computerprogramms zu dem Empfänger umfassen.

[0139] Bei manchen Ausführungsbeispielen kann ein programmierbares Logikbauelement (beispielsweise ein feldprogrammierbares Gatterarray, ein FPGA) dazu verwendet werden, manche oder alle Funktionalitäten der hierin beschriebenen Verfahren durchzuführen. Bei manchen Ausführungsbeispielen kann ein feldprogrammierbares Gatterarray mit einem Mikroprozessor zusammenwirken, um eines der hierin beschriebenen Verfahren durchzuführen. Allgemein werden die Verfahren bei einigen Ausführungsbeispielen seitens einer beliebigen Hardwarevorrichtung durchgeführt. Diese kann eine universell einsetzbare Hardware wie ein Computerprozessor (CPU) sein oder für das Verfahren spezifische Hardware, wie beispielsweise ein ASIC.

Bezugszeichenliste

- [1] EP0225493 A3
- [2] EP0382290 A1
- [3] US9885574 BB
- [4] doi:10.1109/ISEMC.1995.523521

- [5] doi:10.1109/TGE.1978.294576
- [6] doi:10.1088/0957-0233/14/5/319
- [7] doi:10.1109/TIM.2014.2302240
- [8] doi:10.1109/19.377852
- [9] EP1518131A1
- [10] doi:10.1166/sl.2009.1074
- [11] WO20002220 A1
- [12] doi:10.1063/1.1883308
- [13] DE102015203686 A1
- [14] US2017261565 AA

Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems (200) mit mindestens einer Magnetfeldquelle (210) und einer Magnetfeldsensor-Anordnung (220) mit mehreren einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222), wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

Durchführen einer Vielzahl (n_{mess}) von Einzelmessungen, wobei jede Einzelmessung eine von der Anzahl der einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222) abhängige Anzahl (n_y) von Messwerten liefert, wobei zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen das Magnetfeld der Magnetfeldquelle (210) am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung (220) variiert wird,

Ermitteln, basierend auf den Messwerten und unter Anwendung eines Optimierungs- oder Schätzverfahrens, von ein oder mehreren unbekannten Magnetfeldsensor-spezifischen Parametern (P_{sens}) und/oder von ein oder mehreren Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern (P_{mag}), die jeweils als Korrekturwerte des Magnetsensorsystems (200) genutzt werden, indem diese Korrekturwerte auf zukünftige Messergebnisse des Magnetsensorsystems (200) angewendet werden, wobei das Verfahren mit einer Magnetfeldquelle (210) ausgeführt wird, die ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) und die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) jeweils eine bestimmte Anzahl (n_{var}) an variablen Freiheitsgraden und eine bestimmte Anzahl (n_{konst}) an konstanten Freiheitsgraden aufweisen, und

wobei das Verfahren ferner beinhaltet, dass eine Mindestanzahl an Einzelmessungen durchgeführt wird, wobei diese Mindestanzahl an durchzuführenden Einzelmessungen abhängig ist von

- der Anzahl (n_y) der mittels der Magnetfeldsensoren (221, 222) ermittelten Messwerte, und
- der Anzahl (n_{var}) der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) und der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}), und

• der Anzahl (n_{konst}) der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) und der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) und wobei sich die erforderliche Mindestanzahl an Einzelmessungen derart bestimmt, dass folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$n_{mess} * n_{var} + n_{konst} \ll n_y * n_{mess}$$

mit

n_{mess} : Anzahl an durchzuführenden Einzelmessungen, n_y : Anzahl der mittels der Magnetfeldsensoren (221, 222) ermittelten Messwerte pro durchgeföhrter Einzelmessung,

n_{var} : Anzahl der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}),

n_{konst}

: Anzahl der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Verfahren mit einer Magnetfeldsensor-Anordnung (220) durchgeführt wird, die mindestens sechs skalar messende Magnetfeldsensoren (221, ..., 226) aufweist, wobei jeder Magnetfeldsensor (221, ..., 226) genau eine Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit aufweist, entlang derer der jeweilige Magnetfeldsensor (221, ..., 226) empfindlich für ein Magnetfeld ist, sodass jeder skalar messende Magnetfeldsensor (221, ..., 226) das Magnetfeld in genau einer Raumrichtung messen kann, oder mindestens zwei 3D-Magnetfeldsensoren (221, 222) aufweist, wobei jeder 3D-Magnetfeldsensor (221, 222) genau drei Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeiten aufweist, entlang derer der jeweilige 3D-Magnetfeldsensor (221, 222) empfindlich für ein Magnetfeld ist, sodass jeder 3D-Magnetfeldsensor (221, 222) das Magnetfeld in allen drei Raumrichtungen messen kann.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die zu ermittelnden unbekannten Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) mindestens einen Parameter aus der folgenden Gruppe beinhalten:

- einen Nullpunktfehler (Offset),
- eine individuelle Vorzugsrichtungs-Empfindlichkeit eines einzelnen Magnetfeldsensors (221, 222),
- eine individuelle Querempfindlichkeit eines einzelnen Magnetfeldsensors (221, 222) auf Magnetfelder, die unterschiedlich zur Vorzugsrichtungs-Emp-

findlichkeit des jeweiligen Magnetfeldsensors (221, 222) sind,

- die Position und/oder Orientierung der einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222) bezüglich des Komponententrägers, auf dem sie montiert sind.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) mindestens einen Parameter aus der folgenden Gruppe beinhalten:

- eine Position der Magnetfeldquelle (210) relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung (220),
- eine Orientierung der Magnetfeldquelle (210) relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung (220),
- der spezifische Magnetisierungsvektor (\bar{M}) der Magnetfeldquelle (210), der die spezifische Magnetisierung der Magnetfeldquelle (210) in allen drei Raumrichtungen ($\bar{M}_x, \bar{M}_y, \bar{M}_z$) beschreibt,
- die Abmessungen der Magnetfeldquelle (210).

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren ferner die folgenden Schritte aufweist, Aufstellen eines nichtlinearen Gleichungssystems

$$S(\bar{p}) \cdot \bar{B}(\bar{x}, \bar{M}) = \bar{y}$$

beinhaltend:

einen Messvektor (\bar{y}), der die mittels der Magnetfeldsensoren (221, 222) während den Einzelmessungen ermittelten Messwerte enthält, ein mathematisches Modell zur Beschreibung des inhomogenen Magnetfelds ($\bar{B}(\bar{x}, \bar{M})$) der Magnetfeldquelle (210) als einen zu bestimmenden Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}), der jeweils eine bestimmte Anzahl an variablen Freiheitsgraden (n_{var}) und/oder konstanten Freiheitsgraden (n_{konst}) aufweist,

ein mathematisches Modell ($S(\bar{p})$) zur Beschreibung der individuellen Empfindlichkeiten der einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222) der Magnetfeldsensor-Anordnung (220) als einen zu bestimmenden unbekannten Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}), wobei der Magnetfeldsensor-spezifische Parameter (P_{sens}) eine von der Anzahl der Magnetfeldsensoren abhängige Anzahl (n_{konst}) an unbekannten konstanten Freiheitsgraden aufweist, und

Lösen des nichtlinearen Gleichungssystems unter Anwendung des Optimierungs- oder Schätzverfahrens, wobei als Ergebnis mindestens der unbekannte Magnetfeldsensor-spezifische Parameter (P_{sens}) erhalten wird, der dann als Korrekturwert zum Kalibrieren des Magnetsensorsystems (200) genutzt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei der Schritt des Variierens des Magnetfelds der Magnetfeldquelle (210) beinhaltet, dass die Position und/oder die Orientierung der Magnetfeldquelle (210) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen variiert wird, wobei die Magnetfeldquelle (210) bewegt wird und die Magnetfeldsensor-Anordnung (220) statisch bleibt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei der Schritt des Variierens des Magnetfelds der Magnetfeldquelle (210) beinhaltet, dass die Position und/oder die Orientierung der Magnetfeldquelle (210) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen variiert wird, wobei entweder die Magnetfeldquelle (210) relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung (220) an unterschiedlichen Messpositionen entlang einer definierten Bahn platziert wird, oder wobei die Magnetfeldquelle (210) relativ zu der Magnetfeldsensor-Anordnung (220) an beliebigen und nicht vorab vorgegebenen Messpositionen platziert wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7,

wobei die Magnetfeldquelle (210) drei Freiheitsgrade bezüglich ihrer Position (Translation entlang x-, y-, z-Achse) und drei Freiheitsgrade bezüglich ihrer Orientierung (Rotation um x-, y-, z-Achse) aufweist,

wobei die Magnetfeldquelle (210) gegenüber der Magnetfeldsensor-Anordnung (220) derart fixiert wird, dass beim Variieren der Position und/oder der Orientierung der Magnetfeldquelle (210) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einzelmessungen mindestens ein Freiheitsgrad bezüglich der Position und/oder mindestens ein Freiheitsgrad bezüglich der Orientierung konstant bleibt.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei von den ein oder mehreren Magnetfeldquellen-spezifischen Parametern (P_{mag}) zumindest

- die Abmessungen der Magnetfeldquelle (210), und/oder
- der Magnetisierungsvektor (\bar{M}) der Magnetfeldquelle (210) vor der Durchführung der Einzelmessungen unbekannt sind.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei ein oder mehrere der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) vor der Durchführung der Einzelmessungen bekannt sind.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei als einer der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) die Position der

Magnetfeldsensor-Anordnung (220) relativ zu der Magnetfeldquelle (210) bekannt ist.

12. Verfahren nach Anspruch 10 in Kombination mit 11,
wobei als Mindestanzahl an durchzuführenden Einzelmessungen genau drei Einzelmessungen ausreichend sind,
die entweder mittels einer Drehung der Magnetfeldquelle (210) um mindestens zwei ihrer drei Rotationsachsen,
oder mittels drei translatorischen Bewegungen der Magnetfeldsensor-Anordnung (220) relativ zu der Magnetfeldquelle (210) erzielbar sind.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das inhomogene Magnetfeld mittels eines quaderförmigen Permanentmagneten als Magnetfeldquelle (210) erzeugt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12,
wobei das inhomogene Magnetfeld mittels einer Erregerleiteranordnung als Magnetfeldquelle (210) erzeugt wird, wobei die Erregerleiteranordnung (210) zusammen mit der Magnetfeldsensor-Anordnung auf einem gemeinsamen Substrat (240) angeordnet ist,
wobei die Erregerleiteranordnung (210) einen ersten Erregerleiter (211) und einen zweiten Erregerleiter (212) aufweist, und wobei der erste und der zweite Erregerleiter (211, 212) unterschiedliche Symmetrien aufweisen.

15. Verfahren nach Anspruch 14,
wobei sowohl der erste Erregerleiter (211) als auch der zweite Erregerleiter (212) jeweils zwei Kontaktierungsanschlüsse (281, 282; 283, 284) aufweisen, sodass die Erregerleiteranordnung (210) insgesamt vier unterschiedliche Kontaktierungsanschlüsse (281, 282, 283, 284) aufweist,
wobei der Schritt des Variierens des Magnetfelds der Magnetfeldquelle (210) beinhaltet, dass nacheinander unterschiedliche zwei der insgesamt vier Kontaktierungsanschlüsse (281, 282, 283, 284) paarweise kontaktiert werden, wobei sich beim Kontaktieren unterschiedlicher Paare von Kontaktierungsanschlüssen (281, 282, 283, 284) unterschiedliche inhomogene Magnetfelder erzeugen lassen.

16. Verfahren nach Anspruch 15, wobei der Schritt des Kontaktierens beinhaltet, dass ein Gleichspannungssignal bzw. ein Konstantstromsignal an den jeweiligen Kontaktierungsanschlüssen (281, 282, 283, 284) angelegt wird.

17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren am Einsatzort des Magnetsensorsystems (200) sowie im eingebauten

Zustand des Magnetsensorsystems (200) durchführbar ist.

18. Computerlesbares digitales Speichermedium mit einem darauf gespeicherten Programmcode zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wenn das Programm auf einem Computer abläuft.

19. Vorrichtung (100) zum Kalibrieren eines Magnetsensorsystems (200),
wobei das Magnetsensorsystem (200) mindestens eine Magnetfeldquelle (210) und eine Magnetfeldsensor-Anordnung (220) mit mehreren einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222) aufweist,
wobei das Magnetsensorsystem (200) ferner eine Kalibriervorrichtung (300) aufweist, die ausgestaltet ist, um
eine Vielzahl (n_{mess}) von Einzelmessungen durchzuführen, wobei jede Einzelmessung eine von der Anzahl der einzelnen Magnetfeldsensoren (221, 222) abhängige Anzahl (n_y) von Messwerten liefert, wobei bei unterschiedlichen Einzelmessungen das Magnetfeld der Magnetfeldquelle (210) am Ort der Magnetfeldsensor-Anordnung (200) unterschiedlich ist, und
um basierend auf den Messwerten und unter Anwendung eines Optimierungs- oder Schätzverfahrens ein oder mehrere unbekannte Magnetfeldsensor-spezifische Parameter (P_{sens}) und/oder ein oder mehrere Magnetfeldquellen-spezifische Parameter (P_{mag}) zu ermitteln, wobei die ermittelten Parameter (P_{sens} , P_{mag}) als Korrekturwerte des Magnetsensorsystems (200) genutzt werden, indem die Korrekturwerte auf zukünftige Messergebnisse des Magnetsensorsystems (200) angewendet werden,
wobei die Magnetfeldquelle (210) ein inhomogenes Magnetfeld erzeugt,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) und die Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) jeweils eine bestimmte Anzahl (n_{var}) an variablen Freiheitsgraden und eine bestimmte Anzahl (n_{konst}) an konstanten Freiheitsgraden aufweisen, und
wobei die Kalibriervorrichtung (300) ferner dazu ausgestaltet ist, um eine Mindestanzahl an Einzelmessungen durchzuführen, wobei diese Mindestanzahl an durchzuführenden Einzelmessungen abhängig ist von

- der Anzahl (n_y) der mittels der Magnetfeldsensoren (221, 222) ermittelten Messwerte, und
- der Anzahl (n_{var}) der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) und der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}), und
- der Anzahl (n_{konst}) der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}) und der Magnetfeldsensor-spezifischen

Parameter (P_{sens})

und wobei sich die erforderliche Mindestanzahl an Einzelmessungen derart bestimmt, dass folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$n_{\text{mess}} * n_{\text{var}} + n_{\text{konst}} << n_y * n_{\text{mess}}$$

mit

n_{mess} : Anzahl an durchzuführenden Einzelmessungen,

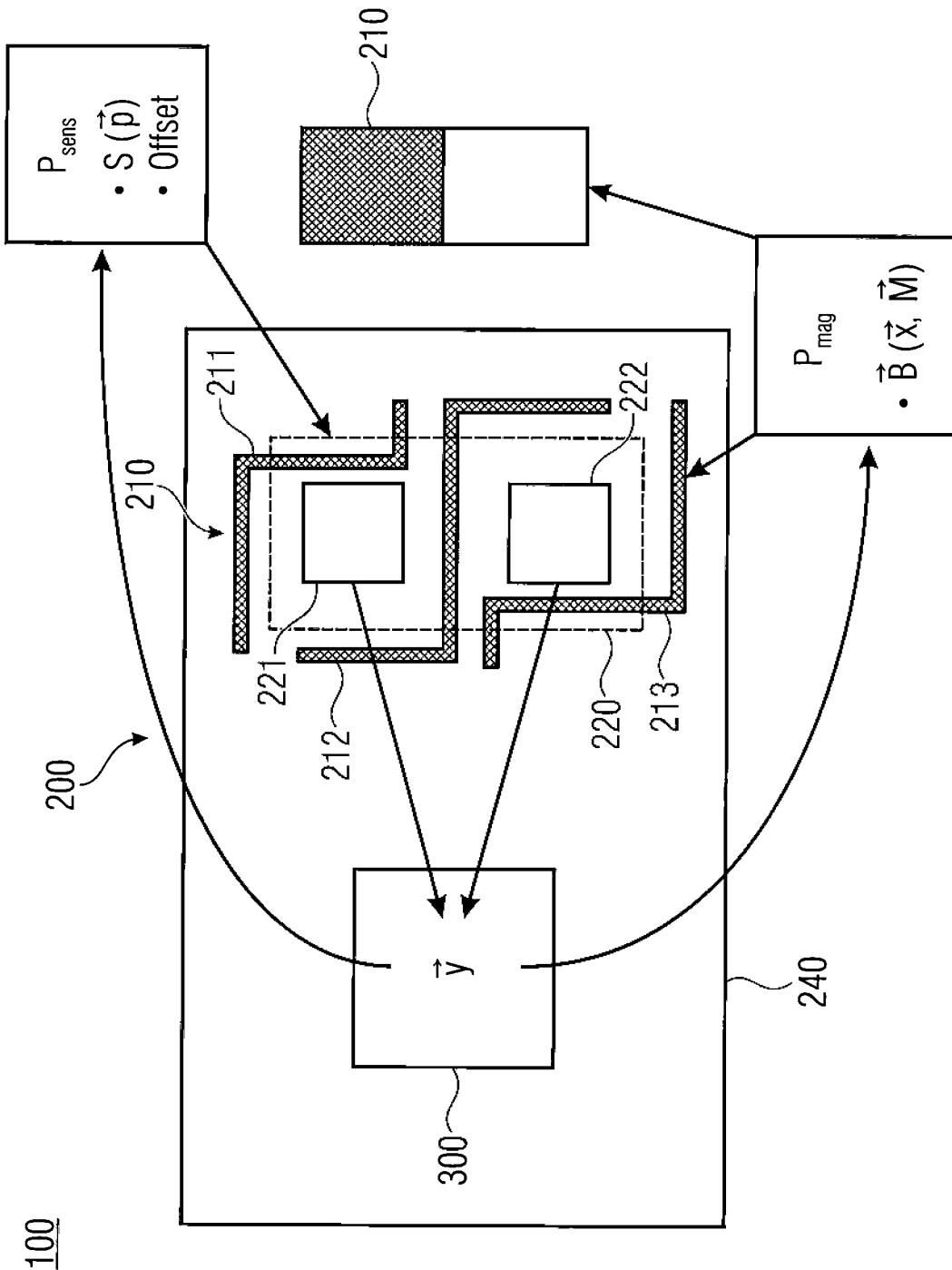
n_y : Anzahl der mittels der Magnetfeldsensoren (221, 222) ermittelten Messwerte pro durchgeführter Einzelmessung, n_{var} : Anzahl der variablen Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}),

n_{konst} :

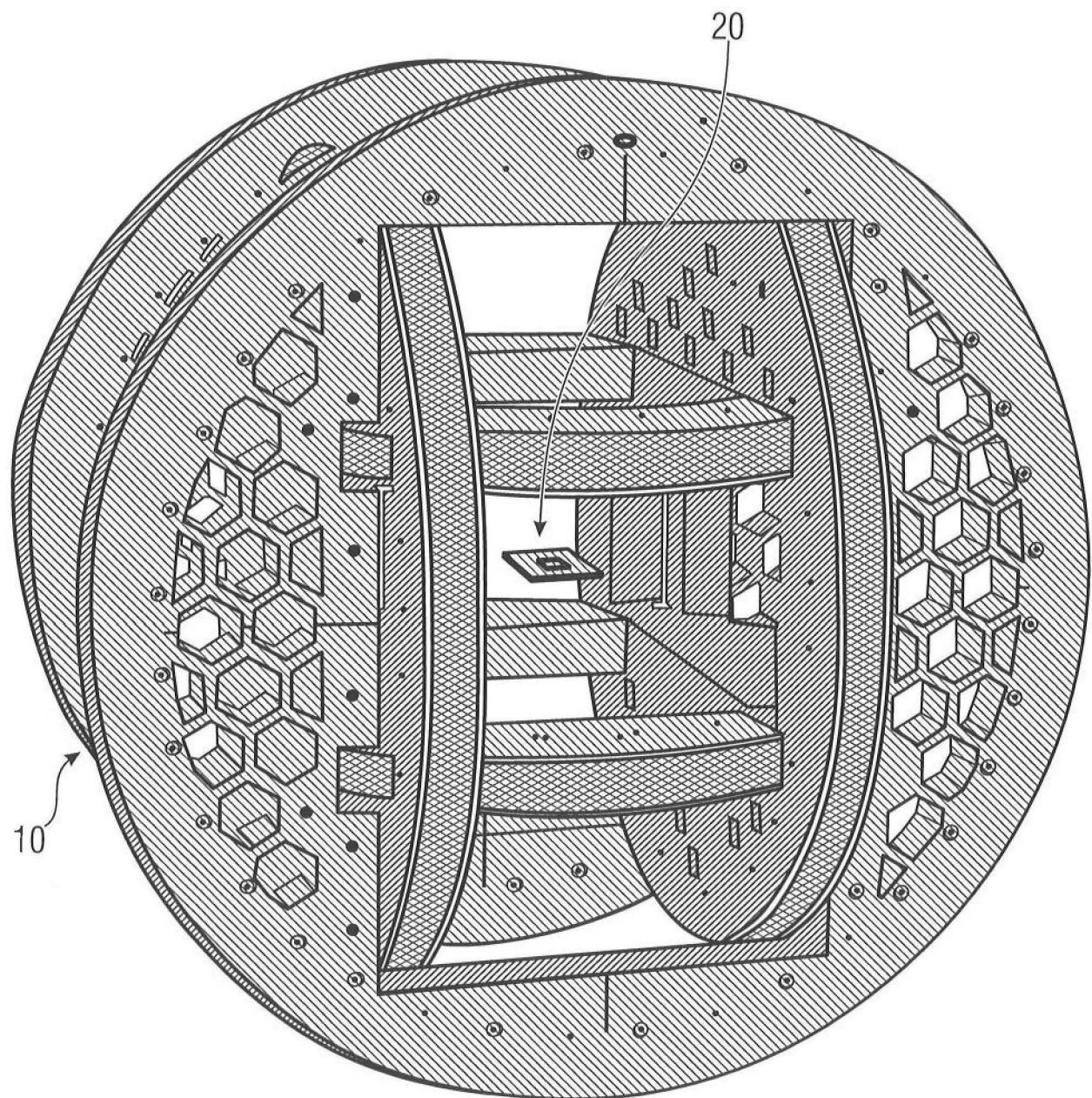
: Anzahl der konstanten Freiheitsgrade der Magnetfeldsensor-spezifischen Parameter (P_{sens}) und/oder der Magnetfeldquellen-spezifischen Parameter (P_{mag}).

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

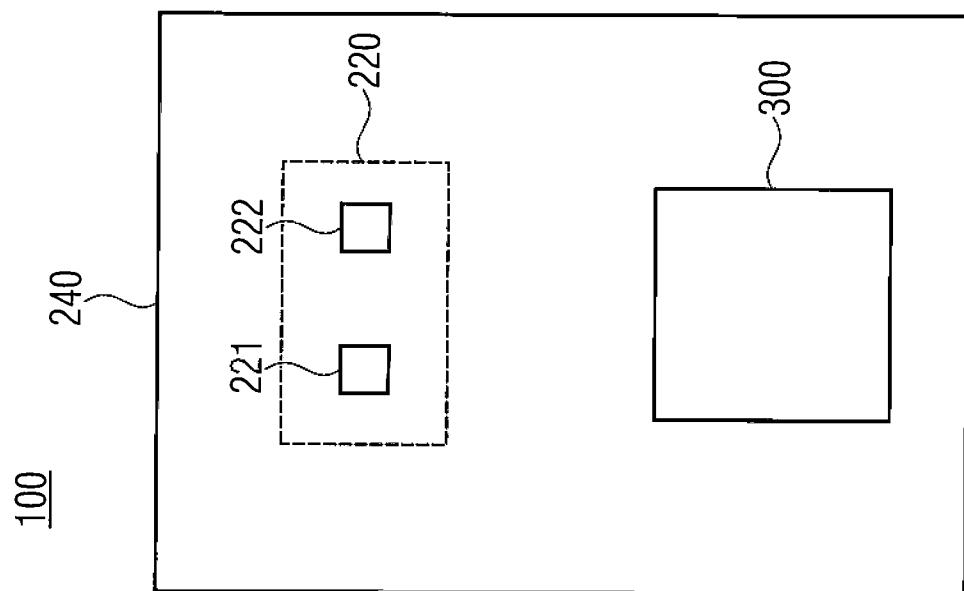
Anhängende Zeichnungen



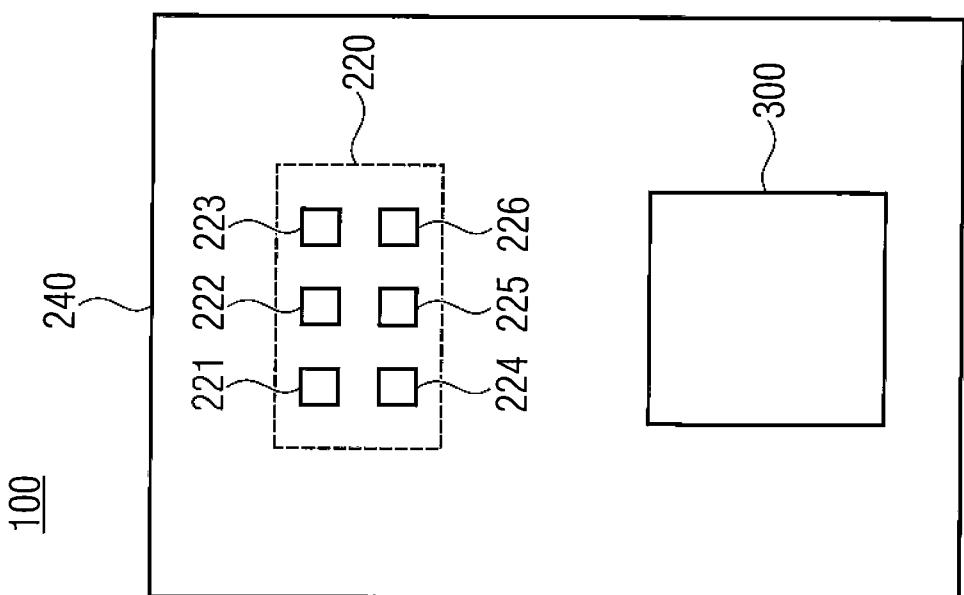
Figur 1



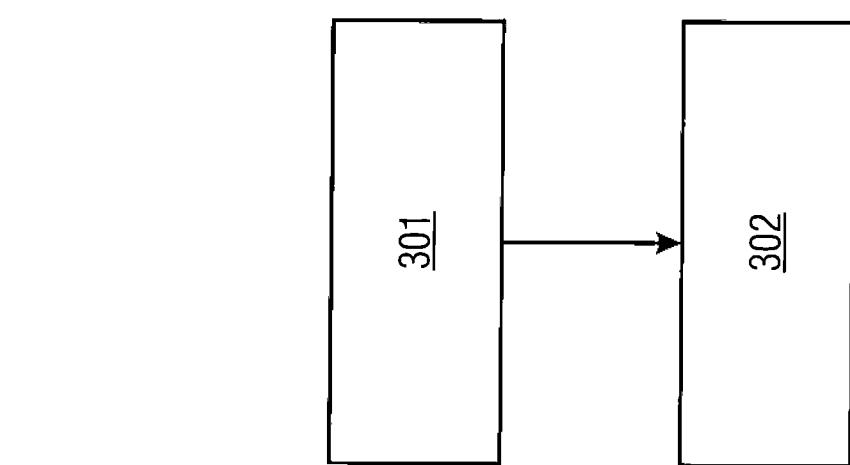
Figur 2



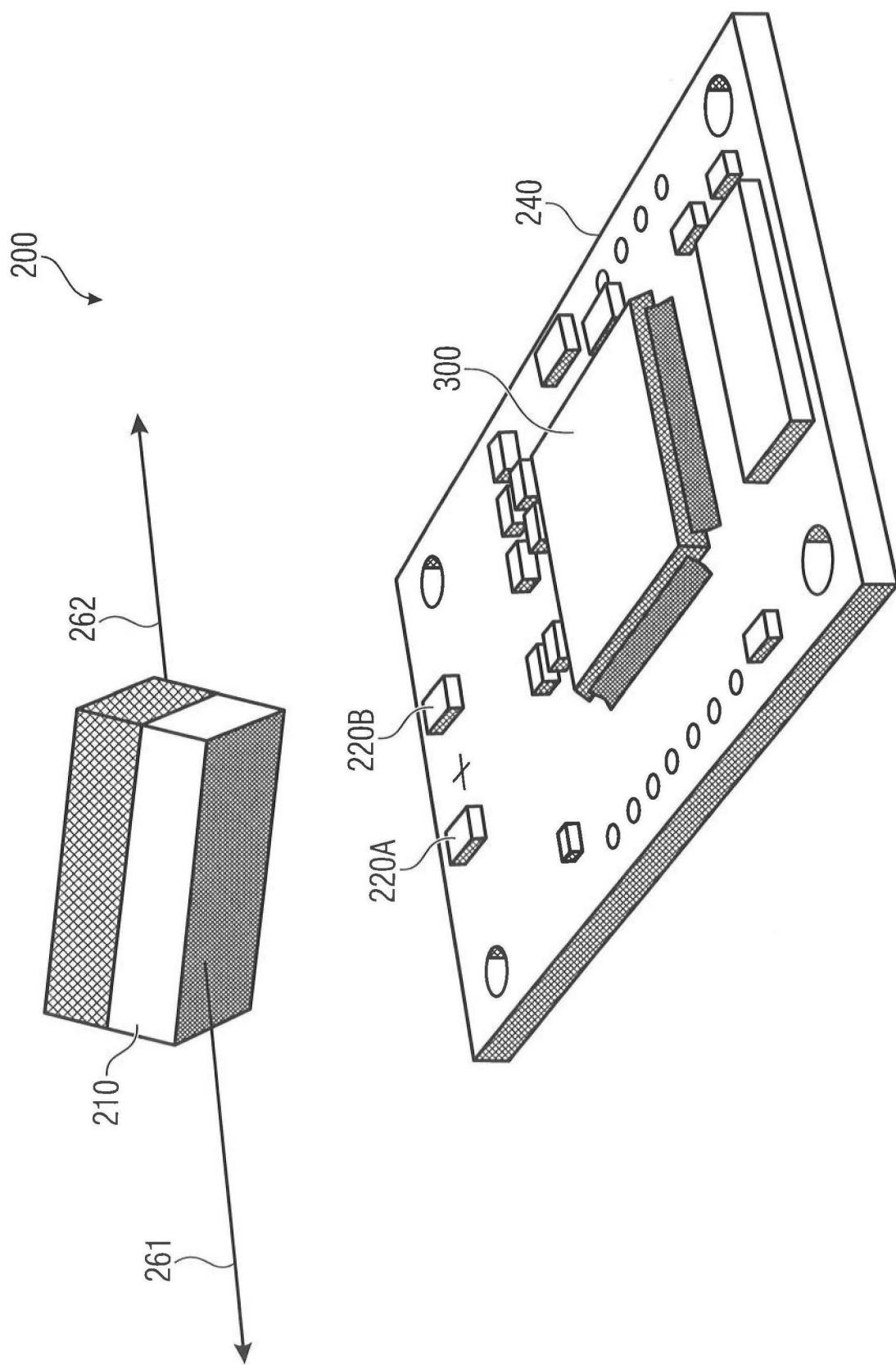
Figur 4B



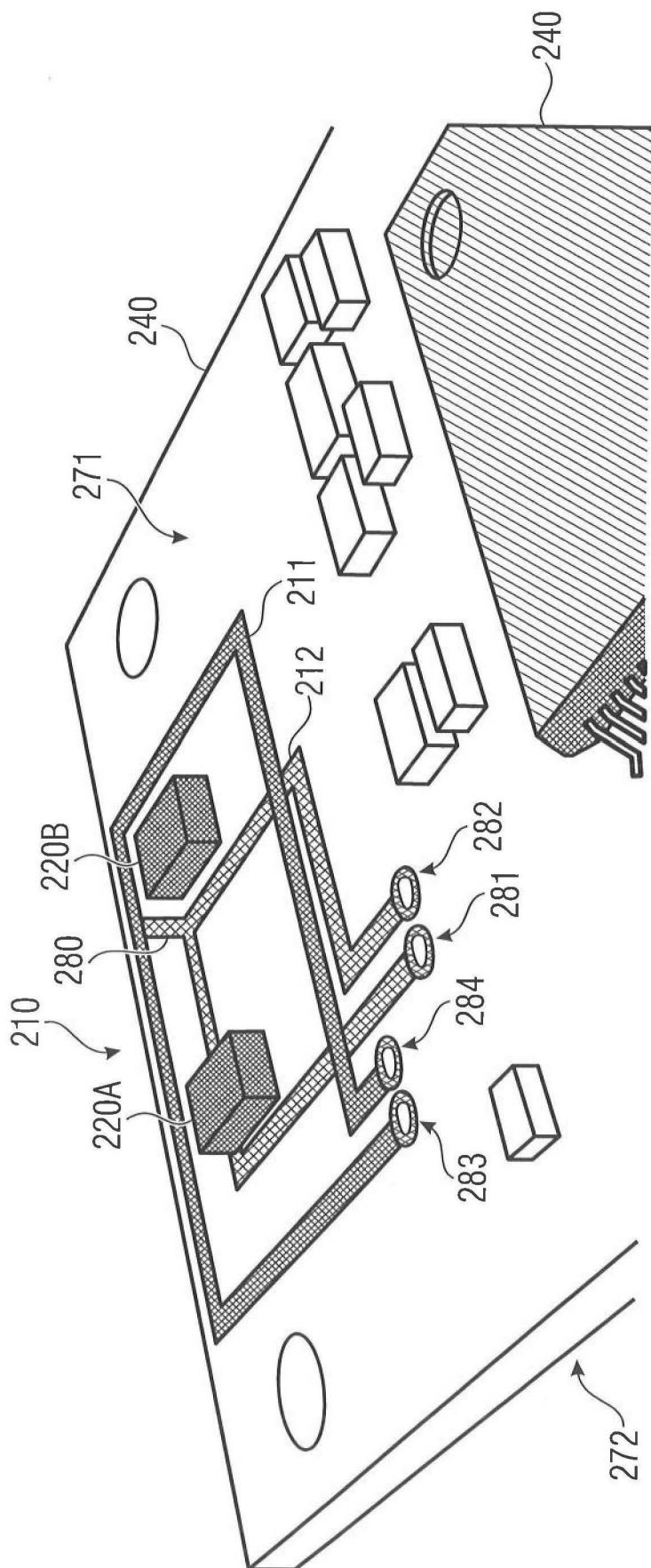
Figur 4A



Figur 3



Figur 5



Figur 6