



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 000 118.1**
(22) Anmeldetag: **09.01.2018**
(43) Offenlegungstag: **11.07.2019**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **25.02.2021**

(51) Int Cl.: **G01R 33/26 (2006.01)**
G01R 33/032 (2006.01)
G01V 3/14 (2006.01)

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:

**Eberhard Karls Universität Tübingen, 72074
Tübingen, DE**

(74) Vertreter:

**Müller-Boré & Partner Patentanwälte PartG mbB,
80639 München, DE**

(72) Erfinder:

**Braun, Daniel, Prof. Dr., 72074 Tübingen, DE;
Fiderer, Lukas, 72076 Tübingen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	8 421 455	B1
US	2005 / 0 206 377	A1
US	2008 / 0 106 261	A1
US	2012 / 0 112 749	A1

BUDKER, Dmitry ; ROMALIS, Michael: Optical magnetometry. In: Nature Physics, Vol. 3, 2007, No. 4, S. 227-234. - ISSN 1745-2473 (P); 1745-2481 (E). DOI: 10.1038/nphys566. URL: <https://www.nature.com/articles/nphys566.pdf> [abgerufen am 2018-06-12]

CHAUDHURY, S., et al. Quantum signatures of chaos in a kicked top. Nature, 2009, 461. Jg., Nr. 7265, S. 768-771.

(54) Bezeichnung: **Quantenchaotischer Magnetfeldsensor und Verfahren zur Messung eines Magnetfeldes**

(57) Hauptanspruch: Magnetfeldsensor (100) zur Messung eines Magnetfelds (B), umfassend:

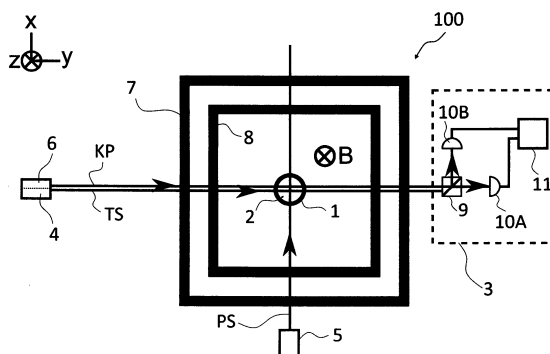
eine Messzelle (1), welche einen Atomdampf (2) umfasst, wobei der Atomdampf (2) ein Spin-System von Spins individueller Atome aufweist;

eine optische Manipulations-Einrichtung, welche ausgelegt ist, durch Emission von Licht das Spin-System in einem Anfangszustand (AZ) zu polarisieren und während eines Messvorgangs des Magnetfelds (B) durch Emission von mindestens einem optischen Kickpuls (KP) einen Zustand des Spin-Systems zu ändern,

wobei der mindestens eine optische Kickpuls (KP) eine chaotische Dynamik des Spin-Systems erzeugt; und eine Sensoreinrichtung, umfassend:

- eine optische Sonde (4), welche ausgelegt ist, einen optischen Teststrahl (TS) durch den Atomdampf (2) zu emittieren, und

- einen optischen Detektor (3), welcher ausgelegt ist, eine Transmission des optischen Teststrahls (TS) durch den Atomdampf (2) zu messen.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Magnetfeldsensor und ein Verfahren zur Messung eines Magnetfeldes.

[0002] Die Erfindung liegt auf dem Gebiet der Messtechnik, insbesondere auf dem Gebiet der quantenmechanischen Messtechnik und der Messtechnik für die Messung magnetischer Felder.

[0003] Einige der genauesten Magnetometer basieren auf der Technik optischer Atomdampf-Magnetometer. Diese Magnetometer umfassen typischerweise einen Dampf von Alkali-Atomen (Rubidium Rb, Cäsium Cs oder Kalium K) in einem Behältnis, zum Beispiel einem Glaskolben. Alkali-Atome haben einen von Null verschiedenen Kernspin I und ein einzelnes Elektron in ihrer Valenzschale. Ihr Grundzustand spaltet sich insbesondere in Hyperfeinstruktur-Niveaus auf, die sich durch einen Gesamtdrehimpuls (Spin) von $j = I \pm 1/2$ auszeichnen. Mit Hilfe eines angelegten Laserstrahls können die Atome in einen gewünschten Zustand gebracht werden. Insbesondere bedeutet dies, dass durch optisches Pumpen der Atomdampf in dem Behältnis polarisiert wird und dadurch ein orientiertes magnetisches Moment aufweist. Ein anliegendes bzw. ein zu messendes Magnetfeld bewirkt eine Präzession des magnetischen Moments des Atomdampfes. Nach einer gewissen Messzeit, in der sich das magnetische Moment im Magnetfeld B dreht bzw. präzediert, wird die Orientierung des magnetischen Moments ausgelesen. Dazu misst man die Transmission (Intensität oder Polarisation) eines Teststrahls durch den Atomdampf. Hierdurch können Informationen über die aktuelle Ausrichtung des Magnetfeldes gewonnen werden, wodurch eine Messung des Magnetfeldes möglich ist. Die Genauigkeit der Messung ist, neben dem Schrotrauschen durch das optische Auslesen, durch quantenmechanische Effekte typischerweise wie folgt beschränkt (Standardabweichung) [siehe Budker, Dmitry, and Michael Romalis, „Optical magnetometry“, Nature Physics 3.4 (2007): pages 227-234]:

$$\delta B = \frac{1}{g \mu_B} \frac{\hbar}{T_{\text{Mess}} \sqrt{NM}} \quad (1)$$

[0004] Hierbei gilt:

μ_B	Bohrsches Magneton
g	Lande-Faktor
\hbar	Planck'sches Wirkungsquantum
T_{Mess}	Messzeit
N	Anzahl der Atome des Atomdampfes
M	Anzahl der Wiederholungen der Messung

Somit liegt es nahe, durch eine Erhöhung der Messzeit T_{Mess} und/oder durch eine Erhöhung der Anzahl von Atomen N die Präzision der Messung zu verbessern bzw. die Standardabweichung δB zu verringern. Wie lange man messen kann bzw. wie groß T_{Mess} gewählt werden kann, ist jedoch durch die Kohärenzzeit beschränkt, die im Wesentlichen durch die Spin-Relaxationseffekte gegeben ist. Diese resultieren aus Stößen der Atome untereinander und Stößen der Atome mit der Wand. Auch die verwendbare Anzahl der Atome N ist beschränkt. Insbesondere führt eine Erhöhung der Anzahl der Atome N zu einer erhöhten Anzahl von Atomkollisionen, wodurch sich die Kohärenzzeit verringert.

[0005] Für die Messung sehr kleiner Magnetfelder ($\sim 10^{-8} \text{T}$; zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld ist um mehr als drei Größenordnungen größer) ist es außerdem möglich in einem Regime zu messen, in dem die negativen Effekte der Spin-Relaxation unterdrückt sind. Für solche „spin-exchange-relaxation-free“ (SERF) Magnetometer kann eine Genauigkeit von $\delta B = 10^{-15} \text{T/Hz}^{1/2}$ erreicht werden.

[0006] US 8 421 455 B1 beschreibt ein Magnetometer und Begleit-Magnetometrieverfahren, umfassend Aussenden von Licht von einer Lichtquelle, Pulsieren des Lichts der Lichtquelle mittels eines Pulsengenerators, Leiten des gepulsten Lichts zu einer Atomkammer, Verwenden eines Feldsensors in der Atomkammer, und Empfangen eines Signals vom Feldsensor mittels eines Signalverarbeitungsmoduls.

[0007] US 2008 / 0 106 261 A1 beschreibt ein hochfrequenzabstimmbares Atommagnetometer zur Detektion der Kernquadrupolresonanz (NQR) aus Festkörpern bei Raumtemperatur, einschließlich des Nachweises stickstoffhaltiger Sprengstoffe, die außerhalb einer Sensoreinheit angeordnet sind. Ein Kalium-Hochfrequenz-Magnetometer mit einer Empfindlichkeit von $0,24 \text{ fT} / \text{Hz}^{1/2}$ ist vorgesehen, das bei 423 kHz arbeitet. Magnetfelder niedriger Intensität werden unter Verwendung eines Alkalimetalldampfes gemessen, indem die magnetische Polarisation des Dampfes erhöht wird, um seine Empfindlichkeit zu erhöhen, dann die magnetische Polarisation des Dampfes untersucht wird, um eine Ausgabe zu erhalten, und Eigenschaften des Magnetfelds niedriger Intensität aus der Ausgabe bestimmt werden.

[0008] US 2005 / 0 206 377 A1 beschreibt ein hochempfindliches Atommagnetometer und Verfahren zum Messen von Magnetfeldern niedriger Intensität bereit, die sich auf die Verwendung eines Alkalimetalldampfes und eines Puffergases beziehen; Erhöhen der magnetischen Polarisation des Alkalimetalldampfes, wodurch die Empfindlichkeit des Alkalimetalldampfes gegenüber einem Magnetfeld geringer Intensität erhöht wird; Untersuchen der magnetischen Polarisation des Alkalimetalldampfes, wo-

bei das Untersuchungsmittel eine Ausgabe von dem Alkalimetaldampf liefert, wobei die Ausgabe Eigenschaften enthält, die sich auf das Magnetfeld geringer Intensität beziehen; und Messmittel, die die Ausgabe empfangen, die Eigenschaften des Magnetfelds niedriger Intensität bestimmen und eine Darstellung des Magnetfelds niedriger Intensität bereitstellen.

[0009] Chaudhury, S., et al.: „Quantum signatures of chaos in a kicked top“ (Nature, 2009, 461. Jg., Nr. 7265, S. 768-771) beschreibt eine experimentelle Verwirklichung eines allgemeinen Paradigmas für Quantenchaos - der Quanten-Kicked-Top - und die Beobachtung direkt im Quanten-Phasenraum von Dynamiken, welche ein chaotisches klassisches Gegenstück haben. Das System beruht auf den kombinierten elektronischen und nuklearen Spins eines einzelnen Atoms und ist daher tief im Quantenregime. Eine gute Übereinstimmung zwischen der Quantendynamik und klassischen Phasenraumstrukturen wird vorgefunden. Da Chaos inhärent ein dynamisches Phänomen ist, wird dynamischen Signaturen wie Sensitivität gegenüber Perturbation oder Erzeugung von Entropie und Verschränkung, für welche nur indirekte Beweise vorhanden sind, besondere Bedeutung beigemessen. Unterschiede in der Sensitivität gegenüber Perturbation in chaotischen verglichen mit üblichen, nichtchaotischen Regimen wird festgestellt und experimentelle Beweise für dynamische Verschränkung als eine Signatur von Chaos werden präsentiert.

[0010] Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Magnetfeldsensor und ein Verfahren zur Messung eines Magnetfeldes mit verbesserter Messgenauigkeit bereitzustellen. Diese Aufgabe wird durch einen Magnetfeldsensor gemäß Anspruch 1 und einem Verfahren gemäß Anspruch 17 gelöst.

[0011] Ein Aspekt betrifft einen Magnetfeldsensor zur Messung eines Magnetfelds. Der Magnetfeldsensor umfasst eine Messzelle, welche einen Atomdampf umfasst, wobei der Atomdampf ein Spin-System von Spins individueller Atome aufweist, und eine optische Manipulations-Einrichtung, welche ausgelegt ist, durch Emission von Licht das Spin-System in einem Anfangszustand zu polarisieren und während eines Messvorgangs des Magnetfelds durch Emission von mindestens einem optischen Kickpuls einen Zustand des Spin-Systems zu ändern, wobei der mindestens eine optische Kickpuls eine chaotische Dynamik des Spin-Systems erzeugt. Der Magnetfeldsensor umfasst ferner eine Sensoreinrichtung, welche eine optische Sonde, welche ausgelegt ist, einen optischen Teststrahl durch den Atomdampf zu emittieren, und einen optischen Detektor, welcher ausgelegt ist, eine Transmission des optischen Teststrahls durch den Atomdampf zu messen, umfasst.

[0012] Die Messzelle kann hierbei ausgebildet sein, so dass ein mit dem Magnetfeldsensor zu messendes Magnetfeld im Wesentlichen von der Messzelle unverändert die Messzelle durchdringen kann. Die Messzelle kann ferner derart ausgebildet sein, so dass das von der optischen Manipulations-Einrichtung emittierte Licht und der von der optischen Manipulations-Einrichtung emittierte optische Kickpuls die Messzelle im Wesentlichen verlustfrei durchdringen können bzw. im Wesentlichen nicht von der Messzelle absorbiert werden. Hierzu kann die Messzelle als Glaszelle ausgebildet sein. Die Messzelle ist ferner vorzugsweise versiegelt ausgebildet bzw. derart ausgebildet, so dass Teile des durch die Messzelle umfassten Atomdampfes nicht in eine Umgebung außerhalb der Messzelle entweichen können.

[0013] Die Messzelle ist hierbei vorzugsweise nicht auf eine bestimmte Größe bzw. ein bestimmtes Messzellenvolumen beschränkt. Umfasst der Magnetfeldsensors einen Atomdampf mit vorbestimmter Dichte, kann über die Größe der Messzelle bzw. deren Volumen die Anzahl der Atome N eingestellt werden, wodurch die Messgenauigkeit des Magnetfeldsensors, beispielsweise gemäß Gleichung 1, beeinflusst werden kann. Andererseits ist eine möglichst kleine Messzelle vorteilhaft, da hierdurch eine räumliche Auflösung einer Magnetfeldmessung bzw. des Magnetfeldsensors beeinflusst ist. Somit kann die Größe bzw. das Volumen der Messzelle für eine bestimmte Anwendung des Magnetfeldsensors optimiert werden.

[0014] Vorzugsweise kann die Messzelle mit einem variablen Messzellenvolumen ausgebildet sein. Hierbei kann das Volumen vor und/oder während einer Magnetfeldmessung, vorzugsweise in einem vorbestimmten Volumen-Intervall, eingestellt werden. Hierbei kann die Messzelle beispielsweise eine bewegbare Wand, beispielsweise eine Kolbenwand aufweisen, welche relativ zu einem Punkt der Messzelle bewegt werden kann, um ein Volumen der Messzelle zu variieren. Insbesondere kann hierdurch das Volumen der Messzelle vergrößert oder verkleinert werden. Vorzugweise kann hierdurch eine Form des Volumens der Messzelle verändert werden. Vorzugsweise kann das Volumen, dessen Größe und/oder dessen Form, dynamisch durch einen Benutzer des Magnetfeldsensors und/oder durch ein externes Kontrollsystem, beispielsweise basierend auf festgestellten Umwelt- oder Messparametern, eingestellt werden.

[0015] Der Magnetfeldsensor kann ferner vorzugsweise ein Atomdampf-Reservoir umfassen, welches mit der Messzelle verbunden ist, wobei das Atomdampf-Reservoir ausgelegt ist, den Atomdampf zumindest teilweise aufzunehmen. Das Atomdampf-Reservoir ist hierbei vorzugsweise derart mit der Messzelle verbunden, beispielsweise fluidisch ver-

bunden, dass ein Austausch von Atomdampf zwischen der Messzelle und dem Atomdampf-Reservoir ermöglicht ist. Der Magnetfeldsensor kann ferner eine Atomdampf-Austauscheinrichtung, beispielsweise eine Atomdampf-Pumpeinrichtung, umfassen, welche ausgelegt ist, zumindest einen Teil des Atomdampfes von dem Atomdampf-Reservoir in die Messzelle zu bewegen bzw. zu pumpen und/oder zumindest einen Teil des Atomdampfes von der Messzelle in das Atomdampf-Reservoir zu bewegen bzw. zu pumpen. Hierdurch kann insbesondere die Anzahl von Atomen N des Atomdampfes in der Messzelle variiert insbesondere dynamisch variiert werden. Die Anzahl von Atomen N kann hierbei vorzugsweise durch die Atomdampf-Austauscheinrichtung, beispielsweise die Atomdampf-Pumpeinrichtung, dynamisch durch einen Benutzer des Magnetfeldsensors und/oder durch ein externes Kontrollsystem, beispielsweise basierend auf festgestellten Umwelt- oder Messparametern, eingestellt werden.

[0016] Die Messzelle kann ferner mit einer Heizeinrichtung ausgebildet sein, wobei die Heizeinrichtung ausgelegt ist, den Atomdampf auf einer vorbestimmten Temperatur zu halten. Hierzu kann die Heizeinrichtung mindestens ein Heizelement, beispielsweise Heizspulen und/oder Peltier-Elemente und/oder elektromagnetische Heizelemente, umfassen. Hierzu kann die Heizeinrichtung ferner ein mindestens ein Thermometer-Element und mindestens ein Temperaturregelelement umfassen. Das mindestens eine Thermometer-Element ist hierbei ausgelegt, eine Temperatur des Atomdampfes oder eines Objektes, welches auf gekannte Weise thermisch mit dem Atomdampf gekoppelt ist und aus dessen Temperatur die Temperatur des Atomdampfes ermittelt werden kann, zu messen und somit die Temperatur des Atomdampfes zu ermitteln. Die ermittelte Temperatur des Atomdampfes kann an das mindestens eine Temperaturregelelement übermittelt werden, welches ausgelegt ist, basierend auf der ermittelten Temperatur des Atomdampfes das mindestens eine Heizelement derart anzusteuern, dass die Temperatur des Atomdampfes einem vorgegebenen Wert entspricht.

[0017] Der Atomdampf ist in der Messzelle angeordnet bzw. durch diese umgeben. Der Atomdampf ist insbesondere als Messsonde des Magnetfeldsensors, welche empfindlich gegenüber Magnetfeldern ist, ausgebildet, wobei insbesondere Spins von Atomen des Atomdampfes die Messsonde bilden. Empfindlich gegenüber Magnetfeldern ist in diesem Sinne derart zu verstehen, dass eine kleine Variation des Magnetfeldes zu einer, insbesondere messbaren, Änderung einer Dynamik der Spins im Magnetfeld und somit zu einem veränderten Endzustand der Messsonde führt. Eine Empfindlichkeit der Messsonde ist abhängig von der Änderung des Endzustands, wobei je größer die Änderung des End-

zustands ist, desto empfindlicher ist die Messsonde bzw. der Magnetfeldsensor. Insbesondere kann die maximal erreichbare Empfindlichkeit durch einen Überlapp des durch die Variation des Magnetfeldes gestörten quantenmechanischen Endzustands und des unversehrten bzw. ungestörten Anfangszustands quantifiziert werden. Insbesondere steht dieser Überlapp über die Quanten-Fisher-Information in direkter Beziehung zu der erreichbaren Messgenauigkeit.

[0018] Ein Spin-System von Spins individueller Atome ist hierbei als eine Gruppe aus zwei oder mehr Spins zu verstehen. Insbesondere umfasst das Spin-System die Kernspins des Atomdampfes, wobei der Atomdampf die Messsonde des Magnetfeldsensors bildet.

[0019] Die optische Manipulations-Einrichtung ist ausgelegt, durch Emission von Licht das Spin-System in einem Anfangszustand zu polarisieren. Hierbei ist die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt, mindestens ein optisches Polarisationsignal zu emittieren, wobei das mindestens eine optische Polarisationsignal den Atomdampf durchläuft und die Spins des Spin-Systems polarisiert. Der Anfangszustand des Spin-Systems ist hierbei der Zustand des Spin-Systems, nachdem die Spins des Spin-Systems durch die optische Manipulations-Einrichtung polarisiert wurden. Das mindestens eine Polarisationsignal hat bevorzugt eine Frequenz, so dass das mindestens eine Polarisationsignal resonant zu einem ersten elektronischen Übergang der Atome des Atomdampfes ist. Ein elektronischer Übergang ist im Rahmen dieser Beschreibung als eine Änderung eines Energieniveaus eines Elektrons in einem Atom des Atomdampfes zu verstehen.

[0020] Hierbei ist eine vollständige Polarisation des Spin-Systems bevorzugt, jedoch nicht zwingend erforderlich. Eine unvollständige Polarisation führt hierbei zu einer effektiven Reduktion in der zum Messsignal beitragenden Spins bzw. Atome, so dass die Anzahl der Atome des Atomdampfes N durch N_p zu ersetzen ist, wobei p der Gesamtpolarisationsgrad des Spin-Systems ist. Hierbei kann p_i der individuelle Polarisationsgrad eines Spins des Spin-Systems sein, wodurch sich der Gesamtpolarisationsgrad ergibt durch:

$$p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (2)$$

Vorzugsweise weist der Gesamtpolarisationsgrad p des Spin-Systems einen Wert von mindestens 10%, bevorzugt mindestens 50%, weiter bevorzugt mindestens 80%, am meisten bevorzugt mindestens 90% auf.

[0021] Die optische Manipulations-Einrichtung ist ferner ausgelegt, mindestens einen optischen Kickpuls zu emittieren. Der optische Kickpuls ist ausgelegt, durch Elektron-Photon-Wechselwirkung mit dem Spin-System des Atomdampfes zu wechselwirken und somit einen Zustand des Spin-Systems, insbesondere den Anfangszustand des Spin-Systems zu verändern. Bevor die optische Manipulations-Einrichtung den mindestens einen optischen Kickpuls emittiert, kann das Spin-System des Atomdampfes als quantenmechanischer Kreisel beschrieben werden. Dieser ist durch einen Drehimpuls bzw. Spin gegeben, dessen Betrag erhalten bleibt, wobei der quantenmechanische Kreisel insbesondere einen präzedierenden Atom-Spin in einem Magnetfeld beschreiben kann. Durch den mindestens einen optischen Kickpuls wird insbesondere diese reguläre Dynamik der präzedierenden Atom-Spins in einem Magnetfeld gestört. Insbesondere wird bei dem mindestens einen optischen Kickpuls ein Drehimpulszustand bzw. Spin-Zustand je nach Position des Spins in einem Zustandsraum des Spins unterschiedlich stark gedreht. Dies führt zu einer Verzerrung des Zustandes, wodurch die reguläre Dynamik im klassischen Grenzfall chaotisch wird. Ein klassisch chaotisches System ist in dem Rahmen dieser Beschreibung als ein System zu verstehen, dessen zeitliche Entwicklung auf zumindest einem begrenzten Zeitintervall nicht beliebig präzise vorhersagbar ist. Insbesondere werden auch Dynamiken, welche einen gemischt chaotisch-regulären Phasenraum aufweisen, im Rahmen dieser Beschreibung als chaotisch bezeichnet. Somit ist die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt, eine chaotische Dynamik des Spin-Systems zu erzeugen bzw. herzustellen. Der mindestens eine optische Kickpuls weist ferner eine Frequenz derart auf, dass der mindestens eine Kickpuls relativ zu einem elektronischen Übergang der Atome des Atomdampfes verstimmt ist.

[0022] Hierbei wird die chaotische Dynamik des Spin-Systems insbesondere basierend auf dem AC-Stark-Effekt hergestellt. Hierbei kann insbesondere ein Lichtpuls, beispielsweise ein Polarisationsignal und/oder ein Kickpuls und/oder ein Teststrahl, das Spin-System bzw. den Atomdampf einmalig durchqueren. Der Magnetfeldsensor kann ferner eine Lichtleitungseinrichtung aufweisen, welche mindestens einen Lichtpuls derart leitet, dass der mindestens eine Lichtpuls mindestens zweimal das Spin-System bzw. den Atomdampf durchquert. Insbesondere kann durch eine mindestens zweimalige Wechselwirkung des Teststrahls mit dem Atomdampf basierend auf dem Faraday Effekt bzw. basierend auf paramagnetischer Faraday-Rotation der Polarisation eines linear polarisierten Teststrahls eine chaotische Dynamik generiert werden. Hierfür kann die Lichtleitungseinrichtung beispielsweise zumindest teilweise Spiegel und/oder Glasfasern und/oder Wellenleiter aufweisen. Alternativ oder zusätzlich kann die op-

tische Manipulations-Einrichtung ausgelegt sein, gequetschtes Licht zu emittieren. Gequetschtes Licht ist in diesem Sinne als elektromagnetische Strahlung zu verstehen, deren quantenmechanische Unschärfe asymmetrisch geändert wurde. Hierbei kann entweder die Unschärfe der Amplitude der elektromagnetischen Strahlung auf Kosten der Unschärfe der Phase der elektromagnetischen Strahlung oder die Unschärfe der Phase der elektromagnetischen Strahlung auf Kosten der Unschärfe der Amplitude der elektromagnetischen Strahlung geändert werden. Der gequetschte Zustand des gequetschten Lichts kann hierbei durch Wechselwirkung mit dem Spin-System zumindest teilweise auf das Spin-System übertragen werden, wodurch eine chaotische Dynamik des Spin-Systems hergestellt werden kann. Insbesondere kann die optische Manipulations-Einrichtung alternativ oder zusätzlich derart ausgelegt sein, dass diese auf Basis einer effektiven nicht-linearen Wechselwirkung zwischen einzelnen Spins eine chaotische Dynamik des Spin-Systems herstellt.

[0023] Die optische Manipulations-Einrichtung kann ferner ausgelegt sein, so dass eine Emissionsrichtung des mindestens einen Polarisationssignals im Wesentlichen orthogonal zu einer Emissionsrichtung des mindestens einen optischen Kickpulses ist. Insbesondere kann die optische Manipulations-Einrichtung ferner ausgelegt sein, so dass mindestens ein Punkt in der Messzelle durch das mindestens eine optische Polarisationsignal und durch den mindestens einen optischen Kickpuls durchlaufen bzw. erreicht wird.

[0024] Insbesondere kann ein Polarisationsvolumen definiert werden, wobei das Polarisationsvolumen alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes umfasst, welche durch das mindestens eine Polarisationsignal polarisiert werden. Hierbei kann das Polarisationsvolumen insbesondere alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes umfassen, welche durch eine Spin-Photon-Wechselwirkung bzw. Elektron-Photon-Wechselwirkung mit dem mindestens einen Polarisationsignal polarisiert werden, und optional alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes umfassen, welche durch eine Spin-Spin-Wechselwirkung bzw. Atom-Atom-Wechselwirkung basierend auf dem mindestens einen Polarisationsignal polarisiert werden.

[0025] Insbesondere kann ein Chaosvolumen definiert werden, wobei das Chaosvolumen alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes umfasst, welche mit dem mindestens einen optischen Kickpuls durch Spin-Photon-Wechselwirkung bzw. Elektron-Photon-Wechselwirkung wechselwirken. Hierbei kann das Chaosvolumen insbesondere alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes umfassen, welche mit dem mindestens einen optischen Kickpuls durch Spin-Photon-

Wechselwirkung bzw. Elektron-Photon-Wechselwirkung wechselwirken, und optional alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes umfassen, welche durch eine Spin-Spin-Wechselwirkung bzw. Atom-Atom-Wechselwirkung basierend auf dem mindestens einen optischen Kickpuls wechselwirken.

[0026] Der Magnetfeldsensor ist hierbei vorzugsweise ausgelegt, so dass eine Schnittmenge zwischen dem Polarisationsvolumen und dem Chaosvolumen mindestens ein Element bzw. einen Spin bzw. ein Atom des Atomdampfes umfasst. Eine Anzahl der Elemente der Schnittmenge kann hierbei die Anzahl der Atome N aus Gleichung 1 repräsentieren.

[0027] Die optische Sonde ist ausgelegt, einen Teststrahl durch die Messzelle bzw. durch den Atomdampf zu emittieren. Hierbei kann die optische Sonde ausgelegt sein, kohärente und/oder monochromatische elektromagnetische Strahlung zu emittieren. Insbesondere kann die optische Sonde als ein Messlaser ausgelegt sein. Vorzugsweise ist die optische Sonde ferner konfiguriert, den Teststrahl mit einer geringen Intensität zu emittieren. Beispielsweise kann die optische Sonde einen Teststrahl mit einer Intensität von mindestens 0.1 mW/cm^2 , bevorzugt von mindestens 0.3 mW/cm^2 , am meisten bevorzugt von mindestens 0.4 mW/cm^2 und von maximal 5 mW/cm^2 , bevorzugt von maximal 1 mW/cm^2 , am meisten bevorzugt von maximal 0.6 mW/cm^2 emittieren. Der optische Teststrahl weist eine Messfrequenz auf, wobei die Messfrequenz in Abhängigkeit einer Resonanz eines elektronischen Übergangs des Atomdampfes bzw. der Messsonde eingestellt ist. Insbesondere ist die Messfrequenz rotverstimmt zu einem elektronischen Übergang des Atomdampfes bzw. der Messsonde.

[0028] Der optische Detektor ist ausgelegt, eine Transmission des Teststrahls durch den Atomdampf bzw. eine physikalische Größe der Transmission des Teststrahls durch den Atomdampf zu messen. Hierzu kann der optische Detektor mindestens eine Photodiode aufweisen. Der optische Detektor ist jedoch nicht auf Photodioden beschränkt, sondern kann mindestens einen beliebigen Photodetektor, beispielsweise einen Photodetektor auf Basis des inneren und/oder des äußeren photoelektrischen Effekts aufweisen. Der optische Detektor kann hierbei vorzugsweise ausgelegt sein, ein optisches Signal bzw. eine Transmission des Teststrahls durch den Atomdampf zu empfangen und in ein elektrisches Datensignal umzuwandeln.

[0029] Vorzugsweise ist der optische Detektor ausgelegt, die Transmission des Teststrahls während der chaotischen Dynamik des Spin-Systems zu messen. Insbesondere wird hierdurch eine verbesserte Messgenauigkeit des Magnetfeldes gegenüber der

Messgenauigkeit eines herkömmlichen Atomdampf-Magnetometers ermöglicht.

[0030] Vorzugsweise umfasst die optische Manipulations-Einrichtung mindestens einen Pumplaser, welcher ausgelegt ist, durch Emission von Licht das Spin-System in einem Anfangszustand zu polarisieren. Insbesondere ist der Pumplaser ausgelegt, das mindestens eine optische Polarisationsignal zu emittieren. Durch den mindestens einen Pumplaser kann insbesondere mindestens ein monochromatisches und kohärentes optisches Polarisationsignal emittiert werden, wodurch eine hohe Messgenauigkeit und zuverlässige Reproduzierbarkeit einer Messung ermöglicht wird. Vorzugsweise ist der mindestens eine Pumplaser konfiguriert, zirkular polarisiertes Licht zu emittieren.

[0031] Vorzugsweise umfasst die optische Manipulations-Einrichtung mindestens einen Kicklaser, welcher ausgelegt ist, den mindestens einen optischen Kickpuls zu emittieren. Durch den mindestens einen Kicklaser kann insbesondere mindestens ein monochromatischer und kohärenter optischer Kickpuls emittiert werden, wodurch eine hohe Messgenauigkeit und zuverlässige Reproduzierbarkeit einer Messung ermöglicht wird. Ferner ermöglicht der mindestens eine Kicklaser eine präzise Ansteuerung bzw. einen kontrollierten Erhalt der chaotischen Dynamik des Atomdampfes bzw. des Spin-Systems. Vorzugsweise ist der mindestens eine Kicklaser konfiguriert, linear polarisiertes Licht zu emittieren.

[0032] Vorzugsweise ist der mindestens eine Kicklaser konfiguriert, den optischen Kickpuls parallel zu dem optischen Teststrahl zu emittieren. Alternativ ist der mindestens eine Kicklaser konfiguriert, so dass sich eine Wegstrecke des Teststrahls und eine Wegstrecke des mindestens einen optischen Kickpulses kreuzen.

[0033] Vorzugsweise ist der Kicklaser bzw. die optische Manipulations-Einrichtung konfiguriert, den Teststrahl zu emittieren bzw. als die optische Sonde ausgebildet sein. Somit kann der Kicklaser bzw. die optische Manipulations-Einrichtung die Rolle der optischen Sonde übernehmen bzw. zusätzlich als optische Sonde ausgebildet sein. Hierfür ist der Kicklaser konfiguriert, Laserlicht mit regelbarer, variabler Intensität zu emittieren. Vorzugsweise kann der Kicklaser hierbei ferner konfiguriert sein, mindestens einen ersten optischen Kickpuls und mindestens einen letzten optischen Kickpuls zu emittieren, wobei der optische Detektor den letzten optischen Kickpuls zumindest teilweise misst, um ein externes Magnetfeld zu messen.

[0034] Alternativ kann die optische Sonde als mindestens ein Kicklaser ausgebildet sein, wobei die op-

tische Sonde hierbei ausgelegt ist, den mindestens einen optischen Kickpuls zu emittieren.

[0035] Vorzugsweise sind der Teststrahl und/oder der mindestens eine optische Kickpuls derart ausgerichtet, dass eine Wechselwirkung, insbesondere basierend auf dem AC-Stark-Effekt, zwischen dem Teststrahl und/oder dem mindestens einen optischen Kickpuls mit den Spins des Spin-Systems bzw. mit den Atomen des Atomdampfes bewirkt wird bzw. auftritt. Vorzugsweise kann die Polarisation der Spins des Spin-Systems bzw. der Atome des Atomdampfes vor der Messung bzw. dem Messvorgang eines Magnetfeldes ausgerichtet werden, um eine solche Wechselwirkung zu gewährleisten.

[0036] Insbesondere kann ein Testvolumen definiert werden, wobei das Testvolumen alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes umfasst, welche mit dem einen optischen Teststrahl durch Spin-Photon-Wechselwirkung bzw. Elektron-Photon-Wechselwirkung wechselwirken.

[0037] Vorzugsweise bildet eine Ausrichtungsrichtung bzw. Ausrichtung des Pumpasers bzw. eine Ausrichtung des mindestens einen Polarisationsignals einen spitzen oder rechten Winkel mit dem externen Magnetfeld bzw. mit dem zu messenden Magnetfeld. Vorzugsweise bildet eine Ausrichtungsrichtung bzw. Ausrichtung der Polarisation des Kicklaseres bzw. eine Ausrichtung der Polarisation des mindestens einen optischen Kickpulses einen spitzen oder rechten Winkel mit dem externen Magnetfeld bzw. mit dem zu messenden Magnetfeld.

[0038] Vorzugsweise umfasst der Magnetfeldsensor mindestens eine Magnetfeldeinrichtung, welche ausgelegt ist, Magnetfeldpulse in der Messzelle zu erzeugen. Hierfür kann die Magnetfeldeinrichtung mindestens eine Magnetfeldspule umfassen, welche um die Messzelle angeordnet ist. Insbesondere ist die Magnetfeldeinrichtung ausgelegt, den Anfangszustand des Spin-Systems bzw. die Spins des Spin-Systems zu drehen bzw. rotieren und/oder somit entlang einer gewünschten Richtung auszurichten. Insbesondere ist die Magnetfeldeinrichtung ausgelegt, den durch die optische Manipulations-Einrichtung polarisierten Anfangszustand des Spin-Systems bzw. die Spins des Spin-Systems zu drehen bzw. rotieren und/oder somit entlang einer gewünschten Richtung auszurichten.

[0039] Vorzugsweise können der mindestens eine Kicklaser, der mindestens eine Pumpaser und die optische Sonde parallel ausgerichtet sein, so dass der mindestens eine Kickpuls, das mindestens eine Polarisationsignal und der mindestens eine Teststrahl im Wesentlichen parallel emittiert werden. Hierdurch kann insbesondere auf eine zusätzliche Drehung bzw. Ausrichtung des Anfangszustands des

Spin-Systems, beispielsweise durch die mindestens eine Magnetfeldeinrichtung, verzichtet werden.

[0040] Vorzugsweise ist die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt, die chaotische Dynamik des Spin-Systems durch Emission von mindestens einem weiteren optischen Kickpuls zu erhalten, wobei die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt ist, den mindestens einen weiteren optischen Kickpuls in im Wesentlichen periodischen Zeitabständen zu emittieren. Der mindestens eine weitere optische Kickpuls kann hierbei insbesondere hinsichtlich Frequenz und/oder Intensität und/oder Dauer identisch zu dem mindestens einen optischen Kickpuls ausgebildet sein. Auch wenn der mindestens eine weitere optische Kickpuls sich von dem mindestens einen optischen Kickpuls unterscheiden kann, sind Ausführungen zu dem mindestens einen optischen Kickpuls in dieser Beschreibung prinzipiell auch auf den mindestens einen weiteren optischen Kickpuls anwendbar, soweit nicht ausdrücklich auf etwas anderes hingewiesen wird.

[0041] Vorzugsweise weist eine Intensität des optischen Kickpulses eine Rechtecksfunktion und/oder eine Dreiecksfunktion und/oder eine nicht-lineare Funktion auf. Hierunter ist zu verstehen, dass, falls die Intensität des optischen Kickpulses eine Rechtecksfunktion aufweist, die Intensität während einer gesamten Kicklänge im Wesentlichen zu Beginn der Kicklänge auf etwa 100% einer Kicklaserintensität eingestellt und bis zum Ende der Kicklänge auf etwa 100% einer Kicklaserintensität gehalten wird. Ferner ist zu verstehen, dass, falls die Intensität des optischen Kickpulses eine Dreiecksfunktion aufweist, die Intensität während einer gesamten Kicklänge von etwa 0% der Kicklaserintensität im Wesentlichen linear auf etwa 100% der Kicklaserintensität erhöht und anschließend bis zum Ende der Kicklänge von etwa 100% der Kicklaserintensität im Wesentlichen linear auf etwa 0% der Kicklaserintensität reduziert wird. Hierbei kann die Intensität des optischen Kickpulses zwischen der im Wesentlichen linearen Erhöhung und der im Wesentlichen linearen Reduktion der Intensität auf etwa 100% der Kicklaserintensität gehalten werden. Ferner ist zu verstehen, dass, falls die Intensität des optischen Kickpulses eine nicht-lineare Funktion aufweist, die Intensität während einer gesamten Kicklänge von etwa 0% der Kicklaserintensität im Wesentlichen nicht-linear auf etwa 100% der Kicklaserintensität erhöht und/oder anschließend bis zum Ende der Kicklänge von etwa 100% der Kicklaserintensität im Wesentlichen nicht-linear auf etwa 0% der Kicklaserintensität reduziert wird. Hierbei kann die Intensität des optischen Kickpulses zwischen der Erhöhung und der Reduktion der Intensität auf etwa 100% der Kicklaserintensität gehalten werden. Die Kicklänge ist im Rahmen der Erfindung als Lasereinstrahldauer des Kicklasers pro optischem Kickpuls bzw. pro Messperiode zu verstehen.

Die Kicklaserintensität repräsentiert eine eingestellte maximale Einstrahlungsintensität des Kicklasers.

[0042] Vorzugsweise ist der optische Detektor ausgelegt, eine Intensität und/oder eine Polarisation der Transmission des Teststrahls zu messen. Auf Basis der Intensität und/oder der Polarisation der Transmission des Teststrahls kann das externe Magnetfeld berechnet bzw. abgeschätzt werden.

[0043] Vorzugsweise umfasst der Atomdampf Alkali-Atome, bevorzugt ^{133}Cs Atome. Alkali-Atome weisen ein einzelnes freies Elektron in der Valenzschale auf, und eignen sich daher besonders als Atomdampf des Magnetfeldsensors.

[0044] Vorzugsweise kann der Atomdampf mindestens ein Schutzgas, bevorzugt Helium und/oder Stickstoff umfassen. Insbesondere kann Helium als ein Puffergas wirken, und somit eine Diffusion bzw. Kollisionen des Atomdampfes mit den Wänden der Messzelle reduzieren bzw. eine Beeinträchtigung des Spin-Systems durch Kollisionen bzw. Drehimpulstransfers mit den Wänden der Messzelle reduzieren. Insbesondere kann Stickstoff als ein Schutzgas wirken, und somit Strahlungswechselwirkungen zwischen den Atomen des Atomdampfes bzw. innerhalb des Spin-Systems reduzieren.

[0045] Vorzugsweise weist der Atomdampf eine Dichte von mindestens etwa 10^4 Atomen/cm³, bevorzugt von mindestens etwa 10^9 Atomen/cm³, und/oder von maximal etwa 10^{15} Atomen/cm³, bevorzugt von maximal etwa 10^{11} Atomen/cm³ auf.

[0046] Vorzugsweise ist der Anfangszustand ein hyperfeiner Zustand oder ein gemischter Zustand hyperfeiner Zustände des Spin-Systems.

[0047] Vorzugsweise ist die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt, den Anfangszustand durch ein zirkular polarisiertes Lichtfeld zu polarisieren und/oder zu erzeugen.

[0048] Vorzugsweise weist der Magnetfeldsensor ein Gesamtvolumen auf, wobei das Gesamtvolumen gemäß dem Anwendungsbereich skalierbar ist. Somit kann eine Chip-basierte Ausbildung des Magnetfeldsensors ein Gesamtvolumen von mindestens 0.01cm^3 , bevorzugt mindestens 0.1cm^3 , weiter bevorzugt mindestens 1cm^3 und maximal 10cm^3 , bevorzugt 5cm^3 , weiter bevorzugt 2cm^3 aufweisen. Das Gesamtvolumen kann jedoch der Anwendung angepasst werden. Somit kann der Magnetfeldsensor fahrzeuggestützt und/oder flugzeuggestützt und/oder drohnengestützt und/oder satellitengestützt ausgebildet sein.

[0049] Ein weiterer Aspekt betrifft ein Verfahren zur Messung eines Magnetfelds, umfassend ein Bereit-

stellen einer Messzelle, welche einen Atomdampf umfasst, wobei der Atomdampf ein Spin-System von Spins individueller Atome aufweist. Das Verfahren umfasst ferner ein Polarisieren des Spin-Systems in einem Anfangszustand mittels einer optischen Manipulations-Einrichtung. Das Verfahren umfasst ferner ein Erzeugen einer chaotischen Dynamik des Spin-Systems durch ein Ausgeben von mindestens einem optischen Kickpuls von der Manipulations-Einrichtung auf das Spin-System. Das Verfahren umfasst ferner ein Erzeugen eines optischen Teststrahls von einer optischen Sonde durch den Atomdampf. Das Verfahren umfasst ferner ein Messen einer Transmission des optischen Teststrahls durch den Atomdampf von einem optischen Detektor, welcher den optischen Teststrahl empfängt.

[0050] Die Messzelle und/oder die optische Manipulations-Einrichtung und/oder die optische Sonde und/oder der optische Detektor können hierbei gemäß des oben beschriebenen Magnetfeldsensors ausgebildet sein.

[0051] Vorzugsweise umfasst das Verfahren ferner ein Rotieren des Anfangszustands, nach dem Polarisieren des Spin-Systems und vor dem Erzeugen der chaotischen Dynamik, durch Erzeugen mindestens eines Magnetfeldpulses durch mindestens eine Magnetfeldeinrichtung. Hierdurch kann ein kontrollierter und gut definierter Anfangszustand vor der Emission des mindestens einen optischen Kickpulses ermöglicht werden. Die Magnetfeldeinrichtung kann hierbei gemäß des oben beschriebenen Magnetfeldsensors ausgebildet sein.

[0052] Vorzugsweise umfasst das Verfahren ferner ein Rotieren eines Zustands des Spin-Systems, nach dem Erzeugen des optischen Teststrahls und vor dem Messen der Transmission, durch Erzeugen mindestens eines Magnetfeldpulses durch mindestens eine Magnetfeldeinrichtung. Hierdurch kann das Spin-System in einen optimalen Endzustand zur Auslesung bzw. Messung der Transmission des optischen Teststrahls durch den Atomdampf von einem optischen Detektor rotiert werden. Die Magnetfeldeinrichtung kann hierbei gemäß des oben beschriebenen Magnetfeldsensors ausgebildet sein.

[0053] Ein erstes exemplarisches Ausführungsbeispiel, im Folgenden „Beispiel 1“ genannt, wird beschrieben und mit einer Referenz-Messmethode bzw. Referenzmethode verglichen.

[0054] Eine Messzelle bzw. Glaszelle beinhaltet ein Tröpfchen ^{133}Cs -Metall, welches eine Dichte von etwa $2 \cdot 10^{10}/\text{cm}^3$ aufweist und ein Spin-System bildet, wobei das Cäsium eine Atomwolke bzw. einen Atomdampf bildet.

[0055] Ein Pumplaser ist auf die Glaszelle gerichtet und auf den D1 elektronischen Übergang des ^{133}Cs -Atomdampfes gestimmt. Insbesondere polarisiert der Pumplaser den Atomdampf bzw. das Spin-System zu Beginn des Messvorgangs entlang der X-Achse. Der Pumplaser ist hierbei auf eine Frequenz von 335.116048807 THz (resonant zum D1-Übergang) eingestellt und konfiguriert, zirkular polarisiertes Licht zu emittieren.

[0056] Zur Beschreibung des Anfangszustandes des Spin-Systems in einem mathematischen Zustandsraum werden Kugelkoordinaten mit Polarwinkel $\theta \in [0, \pi)$, von der positiven Z-Achse aufgetragen, und Azimutalwinkel $\varphi \in [0, 2\pi)$, von der positiven X-Achse aufgetragen, verwendet.

[0057] Für die Realisierung der Referenzmessung ist die Messdynamik durch die Präzession des Spin-Systems im Magnetfeld (in Z-Richtung) gegeben. Nach einem Messvorgang wird der Zustand ausgelesen. In der betrachteten Realisierung erfolgt dies mittels Polarisationsmessung, wobei eine Polarisations-ebene eines linear polarisierten rotverstimmteten Teststrahls, welcher von einem Messlaser emittiert wird, gedreht und anschließend über Photodioden gemessen wird.

[0058] Der Messlaser ist für Beispiel 1 und die Referenzmethode auf eine Frequenz eingestellt, welche rotverstimmt zu einem D2-Übergang von ^{133}Cs ist, und konfiguriert linear polarisiertes Licht bzw. einen linear polarisierten Teststrahl zu emittieren. Eine Intensität des Teststrahls ist auf 0.5 mW/cm^2 eingestellt.

[0059] Der Magnetfeldsensor aus Beispiel 1 umfasst ferner Magnetfeldspulen, welche um die Glaszelle angeordnet sind. Die Magnetfeldspulen sind ausgelegt, einen Magnetfeldpuls zumindest in der Glaszelle zu erzeugen. Da ein polarisierter Zustand des Spin-Systems im Magnetfeld präzediert, kann der Zustand des Spin-Systems somit in eine gewünschte Position rotiert werden. Dies wird in dem in Beispiel 1 verwendeten Messverfahren vor einer Messdynamik gemacht. Die Messdynamik wird im Folgenden näher beschrieben.

[0060] Das Spin-System und der D1 elektronische Übergang von ^{133}Cs haben die folgenden Eckdaten im Rahmen von Beispiel 1:

$l = 7/2$, der Kernspin;

$f = 3, 4$, Hyperfeinstruktur-Quantenzahlen des Grundzustands;

$f = 3, 4$, Hyperfeinstruktur-Quantenzahlen des angeregten Zustands;

$g(f = 3) = -1/4$; $g(f = 4) = 1/4$, gyromagnetisches Verhältnis;

$\Gamma = 4.561257 \text{ MHz}$, natürliche Linienbreite des D1 Übergangs;

$\Delta_{\text{ground}} = 9.192631770 \text{ GHz}$, Hyperfeinaufspaltung des Grundzustands;

$\Delta_{\text{excited}} = 1167.680 \text{ MHz}$, Hyperfeinaufspaltung des angeregten Zustands;

$I_{\text{sat}} = 2.498122 \text{ mW/cm}^2$, Sättigungsintensität für stark verstimmtetes π -polarisiertes Licht.

[0061] Für die Realisierung des Magnetfeldsensors wird die Realisierung der Referenzmessung durch einen Kicklaser ergänzt, welcher ausgelegt ist, parallel zum Messlaser mindestens einen optischen Kickpuls in das Spin-System einzustrahlen. Laserlicht des Kicklasers ist in X-Richtung linear polarisiert und rotverstimmt zum D1-Übergang. Der mindestens eine optische Kickpuls kann in vorbestimmten Zeitabständen, bevorzugt periodisch wiederholt werden. Wie in der Referenzmessung wird der Zustand ausgelesen und somit das Magnetfeld gemessen bzw. abgeschätzt.

[0062] Externe Parameter und Einstellungen des Kicklasers sind wie folgt:

- Verstimmung des Kicklasers zum D1-Übergang:

$$\Delta = -\Delta_{\text{excited}} / 2 = -583.84 \text{ MHz};$$

- Kicklaserintensität: $I_{\text{Kick}} \approx 0.1 \text{ mW/cm}^2$;

- Kicklaserfrequenz: $335.116048807 \text{ THz} - 583.84 \text{ MHz}$;

- zu messendes Magnetfeld: $B = 4 \cdot 10^{-14} \text{ T}$;

- Ausrichtung des anfänglichen polarisierten Zustands: $\theta = \pi/2 \text{ rad}$; $\varphi = \pi/2 \text{ rad}$ (so dass Anfangszustand in y-Richtung zeigt);

- Periodendauer (Kick und Präzession): $r = 1 \text{ ms}$;

- Dauer eines einzelnen Kicks: $T_{\text{Kick}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;

- Rotationswinkel des Zustands um die Z-Achse unmittelbar vor der Polarisationsmessung: $\vartheta = \pi/2 \text{ rad}$;

- Temperatur: $T = 21 \text{ }^\circ \text{C}$;

- Radius der Messzelle: $r = 1.5 \text{ cm}$;

- (optimale) Anzahl der Perioden der Messdynamik: $N_{\text{Kick}} = 87354$;

- (optimale) Anzahl der Perioden für die Referenzmessung: $N_{\text{Ref}} = 144056$;

- Dichte des Atomdampfes $2 \cdot 10^{10} \text{ Atome/cm}^3$

[0063] Eine Messung des zu messenden Magnetfelds mittels eines wie oben beschriebenen Magnet-

feldsensors erfolgt gemäß der folgenden Schritte in der angegebenen Reihenfolge:

1. Polarisieren der Spins des Spin-Systems in einem Anfangszustand durch Emission von mindestens einem Polarisierungssignals durch den Pumplaser;
2. Rotieren des Anfangszustands durch Emission von mindestens einem Magnetfeldpuls über die mindestens eine Magnetfeldspule;

Beginn der Messdynamik

3. Durchführen einer Messdynamik über N_{Kick} Perioden. Hierbei besteht jede Periode aus einer Präzessionszeit der Spins und einem darauffolgenden optischen Kickpuls der Länge T_{Kick} ;

Ende der Messdynamik

4. Rotieren des Zustands des Spin-Systems um einen Winkel ϑ nach der Messdynamik durch Emission von mindestens einem Magnetfeldpuls über die mindestens eine Magnetfeldspule;
5. Auslesen bzw. Messen eines Endzustands des Spin-Systems mittels Polarisationsmessung;
6. Wiederholen des Messverfahrens von Schritt **1** bis Schritt **5**, wobei die Wiederholung beliebig oft wiederholt werden kann;
7. Schätzung bzw. Berechnung des zu messenden Magnetfeldes aus den Messergebnissen, beispielsweise mittels einer Maximum-Likelihood-Methode.

[0064] Eine Messung des zu messenden Magnetfelds mittels der Referenzmethode erfolgt gemäß der folgenden Schritte in der angegebenen Reihenfolge:

1. Polarisieren der Spins des Spin-Systems in einem Anfangszustand durch Emission von mindestens einem Polarisierungssignals durch den Pumplaser;
2. Rotieren (optional) des Anfangszustands durch Emission von mindestens einem Magnetfeldpuls über die mindestens eine Magnetfeldspule;

Beginn der Messdynamik

3. Durchführen einer Messdynamik über N_{Ref} Perioden, lediglich bestehend aus einer Präzessionszeit der Spins;

Ende der Messdynamik

4. Rotieren (optional) des Zustands des Spin-Systems um einen Winkel ϑ nach der Messdynamik durch Emission von mindestens einem Magnetfeldpuls über die mindestens eine Magnetfeldspule;

5. Auslesen bzw. Messen eines Endzustands des Spin-Systems mittels Polarisationsmessung;

6. Wiederholen des Messverfahrens von Schritt **1** bis Schritt **5**, wobei die Wiederholung beliebig oft wiederholt werden kann;

7. Schätzung bzw. Berechnung des zu messenden Magnetfeldes aus den Messergebnissen, beispielsweise mittels einer Maximum-Likelihood-Methode.

[0065] Im Vergleich zwischen einem Messverfahren unter Verwendung von optischen Kickpulsen mit dem Referenzverfahren unter vergleichbaren Konditionen kann eine etwa 68% Verbesserung in der Messgenauigkeit gegenüber der Referenzmethode festgestellt werden. Die detaillierten Simulationsergebnisse sind **Fig. 2** und der korrespondierenden Figurenbeschreibung zu entnehmen.

[0066] Die Erfindung wird nachfolgend durch in Figuren illustrativ dargestellten exemplarischen Ausführungsformen weiter beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1: Eine schematische Darstellung einer Messdynamik zur Messung eines Magnetfeldes auf Basis von optischen Kickpulsen;

Fig. 2: Eine schematische Darstellung eines Magnetfeldsensors mit einer optischen Manipulations-Einrichtung;

Fig. 3: Eine graphische Darstellung der Messgenauigkeit für verschiedene Magnetfeld-Messmethoden basierend auf Beispiel 1.

[0067] **Fig. 1** eine schematische Darstellung einer Messdynamik zur Messung eines Magnetfeldes auf Basis von optischen Kickpulsen **KP**. Hierbei umschließt eine Messzelle einen Atomdampf in einem Anfangszustand **AZ**. Der Anfangszustand **AZ** kann ein polarisierter Anfangszustand **AZ** sein. Die Messzelle und der von der Messzelle umfasste Atomdampf in dem Anfangszustand **AZ** werden einem externen Magnetfeld ausgesetzt. Hierdurch findet eine Präzession $\mathbf{R}_z(\alpha)$ der Spins des Atomdampfes statt. Diese (reguläre) Präzession $\mathbf{R}_z(\alpha)$ wird mindestens einmal von einem optischen Kickpuls **KP** unterbrochen. Je nach Position eines Spins des Atomdampfes in einem Zustandsraum des Spins wird ein Drehimpulszustand des Spins unterschiedlich stark gedreht, wodurch eine chaotische Dynamik hergestellt wird. Die optischen Kickpulse **KP** können hierbei periodisch bzw. in identischen Zeitabständen oder aperiodisch bzw. in unterschiedlichen Zeitabständen emittiert werden. Nach einer vorbestimmten Anzahl von optischen Kickpulsen **KP** erreicht das System eine Endzustand **EZ**, welcher mittels einer Intensitäts- und/oder Polarisationsmessung eines durch den Atomdampf emittierten Teststrahls ausgelesen bzw. gemessen wird. Die Messdynamik kann beliebig oft

wiederholt werden, wobei das externe Magnetfeld auf Basis der gemessenen Werte berechnet bzw. geschätzt wird. Dies kann beispielsweise mittels einer Maximum-Likelihood-Methode erreicht werden.

[0068] Fig. 2 eine schematische Darstellung eines beispielhaften Magnetfeldsensors **100** mit einer optischen Manipulations-Einrichtung. Der Magnetfeldsensor **100** ist hierbei schematisch in einer X-Y-Ebene angeordnet, ist aber nicht auf eine solche Anordnung beschränkt. Hierbei ist ein zu messendes, externes Magnetfeld **B** exemplarisch parallel zu der Z-Achse ausgerichtet. Das externe Magnetfeld **B** durchdringt hierbei den Magnetfeldsensor **100**, wobei der Magnetfeldsensor **100** vorzugsweise das externe Magnetfeld **B** im Wesentlichen nicht verändert. Im Wesentlichen ist im Rahmen dieser Beschreibung als umfassend geringer herstellungs- und umweltbedingter Abweichungen zu verstehen.

[0069] Der Magnetfeldsensor **100** umfasst ferner eine Messzelle **1**, wobei die Messzelle **1** exemplarisch zentral innerhalb des Magnetfeldsensors **100** angeordnet ist. Insbesondere durchdringt das externe Magnetfeld **B** die Messzelle **1**, wobei die Messzelle **1** vorzugsweise das externe Magnetfeld **B** im Wesentlichen nicht verändert. Die Messzelle **1** kann hierbei insbesondere kugelförmig oder zylinderförmig ausgebildet sein. Die Messzelle **1** kann aus einem für elektromagnetische Strahlung transparenten Material ausgebildet sein, wobei das für elektromagnetische Strahlung transparente Material insbesondere derart ausgebildet ist, so dass das für elektromagnetische Strahlung transparente Material insbesondere für elektromagnetische Strahlung bzw. Laserlicht einer optischen Manipulations-Einrichtung bzw. eines Pumpasers **5** und eines Kicklasers **6**, und/oder einer optischen Sonde **4** transparent ist, welche nachfolgend weiter beschrieben sind.

[0070] Die Messzelle **1** umfasst bzw. umgibt einen Atomdampf **2**. Hierbei kann die Messzelle **1** derart ausgebildet sein, dass keine chemischen Reaktionen zwischen der Messzelle **1** bzw. einer Messzellenwand und dem Atomdampf **2** stattfinden können. Die Messzelle **1** ist vorzugsweise versiegelt ausgebildet bzw. derart ausgebildet, dass Teile des durch die Messzelle **1** umfassten Atomdampfes **2** nicht in eine Umgebung außerhalb der Messzelle **1** entweichen können. Die Messzelle **1** ist vorzugsweise derart ausgebildet, dass Teile des durch die Messzelle **1** umfassten Atomdampfes **2** nicht in ein Material der Messzelle **1** eindringen können und/oder dass Teile des durch die Messzelle **1** umfassten Atomdampfes **2** sich nicht in einem Material der Messzelle **1** einlagern bzw. interkalieren können.

[0071] Der Atomdampf **2** ist in der Messzelle **1** angeordnet bzw. durch diese umgeben. Der Atomdampf **2** ist insbesondere als Messsonde des Magnetfeld-

sensors **100**, welche empfindlich gegenüber Magnetfeldern **B** ist, ausgebildet, wobei insbesondere Spins von Atomen des Atomdampfes **2** die Messsonde bilden. Der Atomdampf **2** umfasst vorzugsweise Alkali-Atome, bevorzugt ¹³³Cs Atome, wobei auch andere Atome von dem Atomdampf **2** umfasst sein können. Insbesondere kann der Atomdampf **2** ein Gemisch von Atomen von mindestens zwei unterschiedlichen Elementen und/oder von mindestens zwei unterschiedlichen Isotopen umfassen.

[0072] Der Atomdampf **2** kann mindestens ein Schutzgas, bevorzugt Helium und/oder Stickstoff umfassen, wobei das mindestens eine Schutzgas beispielsweise eine Diffusion bzw. Kollisionen der Atome des Atomdampfes **2** mit den Wänden der Messzelle **1** reduziert bzw. eine Beeinträchtigung des Spin-Systems durch Kollisionen bzw. Drehimpulstransfers mit den Wänden der Messzelle **1** reduziert und/oder Strahlungswechselwirkungen zwischen den Atomen des Atomdampfes **2** bzw. innerhalb des Spin-Systems reduziert. Alternativ kann die Messzelle **1** auf zumindest einer Oberfläche der Messzelle **1**, insbesondere innerhalb der Messzelle **1**, mit mindestens einer Schutzschicht beschichtet sein, wobei die mindestens eine Schutzschicht beispielsweise eine Diffusion bzw. Kollisionen der Atome des Atomdampfes **2** mit den Wänden der Messzelle **1** reduziert bzw. eine Beeinträchtigung des Spin-Systems durch Kollisionen bzw. Drehimpulstransfers mit den Wänden der Messzelle **1** reduziert und/oder die Messzelle **1** von Beschädigungen und Abnutzung schützt. Die mindestens eine Schutzschicht kann mindestens einen Schutzfilm auf Basis von Paraffin und/oder mindestens einen Schutzfilm auf Basis von Alkenen, beispielsweise 1-Nonadezen (siehe z.B. US 2012 / 0 112 749 A1), aufweisen.

[0073] Der Atomdampf **2** kann eine Dichte von mindestens etwa 10^4 Atomen/cm³, bevorzugt von mindestens etwa 10^9 Atomen/cm³, und von maximal etwa 10^{15} Atomen/cm³, bevorzugt von maximal etwa 10^{11} Atomen/cm³ aufweisen. Insbesondere kann der Atomdampf **2** eine variable Dichte aufweisen, wobei die Dichte des Atomdampfes **2** durch bzw. über den Magnetfeldsensor **100** eingestellt werden kann.

[0074] Der Magnetfeldsensor **100** umfasst eine optische Manipulations-Einrichtung. Die optische Manipulations-Einrichtung ist ausgelegt, durch Emission von Licht das Spin-System in dem Anfangszustand **AZ** zu polarisieren. Hierbei ist die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt, mindestens ein optisches Polarisationsignal **PS** zu emittieren, wobei das mindestens eine optische Polarisationsignal **PS** den Atomdampf **2** durchläuft und die Spins des Spin-Systems polarisiert. Hierfür kann die optische Manipulations-Einrichtung mindestens einen Polarisationslaser bzw. einen Pumpaser **5** aufweisen, wobei der mindestens eine Pumpaser **5** ausgelegt ist,

das mindestens eine Polarisationsignal **PS** zu emittieren. Der mindestens eine Pumplaser **5** ist insbesondere derart ausgebildet, dass das mindestens eine Polarisationsignal **PS** bevorzugt eine Frequenz hat, so dass das mindestens eine Polarisationsignal **PS** resonant zu einem ersten elektronischen Übergang der Atome des Atomdampfes **2** ist. Der Pumplaser **5** kann hierbei insbesondere ausgelegt sein, eine vollständige oder eine partielle Polarisation der Spins des Spin-Systems zu bewirken. Vorzugsweise weist der Gesamtpolarisationsgrad p des Spin-Systems einen Wert von mindestens 10%, bevorzugt mindestens 50%, weiter bevorzugt mindestens 80%, am meisten bevorzugt mindestens 90% auf.

[0075] Die optische Manipulations-Einrichtung ist ausgelegt, mindestens einen optischen Kickpuls **KP** zu emittieren. Der optische Kickpuls **KP** ist insbesondere ausgelegt, durch Elektron-Photon-Wechselwirkung mit dem Spin-System des Atomdampfes **2** zu wechselwirken und somit einen Zustand des Spin-Systems, insbesondere den Anfangszustand **AZ** des Spin-Systems zu verändern. Somit ist die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt, eine chaotische Dynamik des Spin-Systems zu erzeugen bzw. herzustellen. Der mindestens eine optische Kickpuls **KP** weist vorzugsweise eine Frequenz auf, welche niedriger ist als das mindestens eine Polarisationsignal **PS**.

[0076] Vorzugsweise umfasst die optische Manipulations-Einrichtung mindestens einen Kicklaser **6**, welcher ausgelegt ist, den mindestens einen optischen Kickpuls **KP** zu emittieren. Durch den mindestens einen Kicklaser **6** kann insbesondere mindestens ein monochromatischer und kohärenter optischer Kickpuls **KP** emittiert werden. Ferner ermöglicht der mindestens eine Kicklaser **6** insbesondere eine präzise Ansteuerung des Zustands bzw. einen kontrollierten Erhalt der chaotischen Dynamik des Atomdampfes **2** bzw. des Spin-Systems. Vorzugsweise ist der mindestens eine Kicklaser **6** konfiguriert, linear polarisiertes Licht zu emittieren.

[0077] Die optische Manipulations-Einrichtung ist insbesondere ausgelegt, so dass eine Polarisationsrichtung des mindestens einen Polarisationssignals **PS** im Wesentlichen orthogonal zu einer Emissionsrichtung des mindestens einen optischen Kickpulses **KP** ist. Insbesondere kann die optische Manipulations-Einrichtung vorzugsweise ausgelegt sein, so dass mindestens ein Punkt in der Messzelle **1** durch das mindestens eine optische Polarisationsignal **PS** und durch den mindestens einen optischen Kickpuls **KP** durchlaufen bzw. erreicht wird. Beziehungsweise können der Pumplaser **5** und der Kicklaser **6** insbesondere ausgerichtet sein, so dass sich das Polarisationsignal **PS** und der mindestens eine optische Kickpuls **KP** an einem Punkt innerhalb der Messzelle **1** kreuzen können.

[0078] Insbesondere kann ein Polarisationsvolumen definiert werden, wobei das Polarisationsvolumen alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes **2** umfasst, welche durch das mindestens eine Polarisationsignal **PS** polarisiert werden. Ferner kann insbesondere ein Chaosvolumen definiert werden, wobei das Chaosvolumen alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes **2** umfasst, welche mit dem mindestens einen optischen Kickpuls **KP** durch Spin-Photon-Wechselwirkung bzw. Elektron-Photon-Wechselwirkung wechselwirken. Der Magnetfeldsensor **100** ist hierbei vorzugsweise ausgelegt, so dass eine Schnittmenge zwischen dem Polarisationsvolumen und dem Chaosvolumen mindestens ein Element bzw. einen Spin bzw. ein Atom des Atomdampfes **2** umfasst.

[0079] Der Magnetfeldsensor **100** umfasst eine Sensoreinrichtung, wobei die Sensoreinrichtung eine optische Sonde **4** umfasst. Die optische Sonde **4** ist ausgelegt, einen Teststrahl **TS** durch die Messzelle **1** bzw. durch den Atomdampf **2** zu emittieren.

[0080] Hierbei kann die optische Sonde **4** insbesondere ausgelegt sein, kohärente und/oder monochromatische elektromagnetische Strahlung zu emittieren. Insbesondere kann die optische Sonde **4** als ein Messlaser ausgelegt sein. Vorzugsweise ist die optische Sonde **4** ferner konfiguriert, den Teststrahl **TS** mit einer geringen Intensität zu emittieren. Der optische Teststrahl **TS** weist vorzugsweise eine Messfrequenz auf, wobei die Messfrequenz in Abhängigkeit einer Resonanz eines elektronischen Übergangs des Atomdampfes **2** bzw. der Messsonde eingestellt ist.

[0081] Die Sensoreinrichtung umfasst ferner einen optischen Detektor **3**, wobei der optische Detektor **3** ausgelegt ist, eine Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2** bzw. eine physikalische Größe der Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2** zu messen. Hierzu kann der optische Detektor **3** exemplarisch einen Signalteiler **9** aufweisen, welcher ausgelegt ist, ein von dem Signalteiler empfangenes optisches Signal bzw. die Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2** in insbesondere zwei, vorzugsweise gleiche, Signalteile aufzuteilen. Ein erstes Signalteil wird an eine erste Photodiode **10A** und ein zweites Signalteil wird an eine zweite Photodiode **10B** geleitet, welche das jeweils empfangene Signalteil in ein erstes bzw. zweites elektrisches Datensignal umwandeln und dieses an eine Auswertungseinheit **11** leiten. Der optische Detektor **3** ist jedoch nicht auf Photodioden beschränkt, sondern kann mindestens einen beliebigen Photodetektor, beispielsweise einen Photodetektor auf Basis des inneren und/oder des äußeren photoelektrischen Effekts aufweisen. Die Auswertungseinheit **11** empfängt jeweils das erste und zweite Datensignal und bestimmt, basierend auf dem ersten und zweiten Datensignal das externe Magnet-

feld **B**. Hierbei ist der optische Detektor **3** vorzugsweise ausgelegt, die Transmission des Teststrahls **TS** während der chaotischen Dynamik des Spin-Systems zu messen.

[0082] Der optische Detektor **3** kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Position der Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2**, an welcher die Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2** auf den optischen Detektor trifft, zu bestimmen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Position der optischen Sonde **4** bestimmen bzw. ermitteln. Alternativ kann die Position der optischen Sonde **4** in dem Magnetfeldsensor gespeichert sein. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der Position der optischen Sonde **4** und der Position der Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2**, an welcher die Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2** auf den optischen Detektor **3** trifft, einen Strahlenverlauf des Teststrahls **TS** bestimmen. Vorzugsweise kann der Magnetfeldsensor **100** eine Sonden-Positionseinheit umfassen, welche ausgelegt ist, eine Position und/oder eine Ausrichtung der optischen Sonde **4** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf dem ermittelten Strahlenverlauf des Teststrahls **TS** die Sonden-Positionseinheit ansteuern, um eine Positions-Kalibrierung der optischen Sonde **4** bzw. eine Kalibrierung/Anpassung des Strahlenverlaufs des Teststrahls **TS** zu ermöglichen.

[0083] Der optische Detektor **3** kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Polarisation der Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2** zu messen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Sonden-Polarisationseinheit aufweisen, welche ausgelegt ist, eine Polarisation des Teststrahls **TS** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der gemessenen Polarisation des Teststrahls **TS** die Sonden-Polarisationseinheit ansteuern, um eine Polarisations-Kalibrierung der optischen Sonde **4** zu ermöglichen.

[0084] Der optische Detektor **3** kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Intensität der Transmission des Teststrahls **TS** durch den Atomdampf **2** zu messen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Sonden-Intensitätseinheit aufweisen, welche ausgelegt ist, eine Intensität des Teststrahls **TS** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der gemessenen Intensität des Teststrahls **TS** die Sonden-Intensitätseinheit ansteuern, um eine Polarisations-Kalibrierung der optischen Sonde **4** zu ermöglichen.

[0085] Die Sensoreinrichtung kann ferner einen optischen Polarisationsignal-Detektor umfassen, wobei der optische Polarisationsignal-Detektor ausgelegt ist, eine Transmission des Polarisationssignals

PS durch den Atomdampf **2** bzw. eine physikalische Größe der Transmission des Polarisationssignals **PS** durch den Atomdampf **2** zu messen.

[0086] Der optische Polarisationsignal-Detektor kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Position der Transmission des Polarisationssignals **PS** durch den Atomdampf **2**, an welcher die Transmission des Polarisationssignals **PS** durch den Atomdampf **2** auf den optischen Polarisationsignal-Detektor trifft, zu bestimmen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Position des Pumplasers **5** bestimmen bzw. ermitteln. Alternativ kann die Position des Pumplasers **5** in dem Magnetfeldsensor **100** gespeichert sein. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der Position des Pumplasers **5** und der Position der Transmission des Polarisationssignals **PS** durch den Atomdampf **2**, an welcher die Transmission des Polarisationssignals **PS** durch den Atomdampf **2** auf den optischen Polarisationsignal-Detektor trifft, einen Strahlenverlauf des Polarisationssignals **PS** bestimmen. Vorzugsweise kann der Magnetfeldsensor **100** eine Pumplaser-Positionseinheit umfassen, welche ausgelegt ist, eine Position und/oder eine Ausrichtung des Pumplasers **5** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf dem ermittelten Strahlenverlauf des Polarisationssignals **PS** die Pumplaser-Positionseinheit ansteuern, um eine Positions-Kalibrierung des Pumplasers **5** bzw. eine Kalibrierung/Anpassung des Strahlenverlaufs des Polarisationssignals **PS** zu ermöglichen.

[0087] Der optische Polarisationsignal-Detektor kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Polarisation der Transmission des Polarisationssignals **PS** durch den Atomdampf **2** zu messen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Pumplaser-Polarisationseinheit aufweisen, welche ausgelegt ist, eine Polarisation des Polarisationssignals **PS** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der gemessenen Polarisation des Polarisationssignals **PS** die Pumplaser-Polarisationseinheit ansteuern, um eine Polarisations-Kalibrierung des Pumplasers **5** zu ermöglichen.

[0088] Der optische Polarisationsignal-Detektor kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Intensität der Transmission des Polarisationssignals **PS** durch den Atomdampf **2** zu messen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Pumplaser-Intensitätseinheit aufweisen, welche ausgelegt ist, eine Intensität des Polarisationssignals **PS** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der gemessenen Intensität des Polarisationssignals **PS** die Pumplaser-Intensitätseinheit ansteuern, um eine Polarisations-Kalibrierung des Pumplasers **5** zu ermöglichen.

[0089] Die Sensoreinrichtung kann ferner einen optischen Kickpuls-Detektor umfassen, wobei der optische Kickpuls-Detektor ausgelegt ist, eine Transmission eines optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2** bzw. eine physikalische Größe der Transmission des optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2** zu messen.

[0090] Der optische Kickpuls-Detektor kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Position der Transmission des optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2**, an welcher die Transmission des optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2** auf den optischen Kickpuls-Detektor trifft, zu bestimmen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Position des Kicklasers **6** bestimmen bzw. ermitteln. Alternativ kann die Position des Kicklasers **6** in dem Magnetfeldsensor **100** gespeichert sein. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der Position des Kicklasers **6** und der Position der Transmission des optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2**, an welcher die Transmission des optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2** auf den optischen Kickpuls-Detektor trifft, einen Strahlenverlauf des optischen Kickpulses **KP** bestimmen. Vorzugsweise kann der Magnetfeldsensor **100** eine Kicklaser-Positionseinheit umfassen, welche ausgelegt ist, eine Position und/oder eine Ausrichtung des Kicklasers **6** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf dem ermittelten Strahlenverlauf des optischen Kickpulses **KP** die Kicklaser-Positionseinheit ansteuern, um eine Positions-Kalibrierung des Kicklasers **6** bzw. eine Kalibrierung/Anpassung des Strahlenverlaufs des optischen Kickpulses **KP** zu ermöglichen.

[0091] Der optische Kickpuls-Detektor kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Polarisation der Transmission des optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2** zu messen.

[0092] Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Kicklaser-Polarisationseinheit aufweisen, welche ausgelegt ist, eine Polarisation des optischen Kickpulses **KP** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der gemessenen Polarisation des optischen Kickpulses **KP** die Kicklaser-Polarisationseinheit ansteuern, um eine Polarisations-Kalibrierung des Kicklasers **6** zu ermöglichen.

[0093] Der optische Kickpuls-Detektor kann vorzugsweise ausgelegt sein, eine Intensität der Transmission des optischen Kickpulses **KP** durch den Atomdampf **2** zu messen. Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Kicklaser-Intensitätseinheit aufweisen, welche ausgelegt ist, eine Intensität des optischen Kickpulses **KP** zu variieren. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** basierend auf der gemessenen Intensität des optischen Kickpulses **KP** die

Kicklaser-Intensitätseinheit ansteuern, um eine Polarisations-Kalibrierung des Kicklasers **6** zu ermöglichen.

[0094] Insbesondere kann ein Testvolumen definiert werden, wobei das Testvolumen alle Spins des Spin-Systems bzw. Atome des Atomdampfes **2** umfasst, welche mit dem einen optischen Teststrahl **TS** durch Spin-Photon-Wechselwirkung bzw. Elektron-Photon-Wechselwirkung wechselwirken. Der Magnetfeldsensor **100** ist hierbei vorzugsweise ausgelegt, so dass eine Schnittmenge zwischen dem Polarisationsvolumen, dem Testvolumen und dem Chaosvolumen mindestens ein Element bzw. einen Spin bzw. ein Atom des Atomdampfes **2** umfasst. Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** ausgebildet sein, den Strahlenverlauf des Teststrahls **TS** und/oder den Strahlenverlauf des Polarisationssignals **PS** und/oder den Strahlenverlauf des mindestens einen optischen Kickpulses **KP** derart zu kalibrieren, dass eine Schnittmenge zwischen dem Polarisationsvolumen, dem Testvolumen und dem Chaosvolumen mindestens ein Element bzw. einen Spin bzw. ein Atom des Atomdampfes **2** umfasst.

[0095] Der mindestens eine Kicklaser **6** ist vorzugsweise konfiguriert, den optischen Kickpuls **KP** parallel zu dem optischen Teststrahl **TS** zu emittieren. Alternativ ist der mindestens eine Kicklaser **6** konfiguriert, so dass sich eine Wegstrecke des Teststrahls **TS** und eine Wegstrecke des mindestens einen optischen Kickpulses **KP** kreuzen. Hierbei sind der Teststrahl **TS** und/oder der mindestens eine optische Kickpuls **KP** vorzugsweise derart ausgerichtet, dass eine Wechselwirkung, insbesondere basierend auf dem Faraday-Effekt, zwischen dem Teststrahl **TS** und/oder dem mindestens einen optischen Kickpuls **KP** mit den Spins des Spin-Systems bzw. mit den Atomen des Atomdampfes **2** bewirkt wird bzw. auftritt. Vorzugsweise kann die Polarisation der Spins des Spin-Systems bzw. der Atome des Atomdampfes **2** vor der Messung bzw. dem Messvorgang eines Magnetfeldes **B** ausgerichtet werden, um eine solche Wechselwirkung zu gewährleisten.

[0096] Vorzugsweise bildet eine Ausrichtungsrichtung bzw. Ausrichtung des PumpLasers **5** bzw. eine Ausrichtung des mindestens einen Polarisationssignals **PS** einen spitzen oder rechten Winkel mit dem externen Magnetfeld **B** bzw. mit dem zu messenden Magnetfeld **B**. Vorzugsweise bildet eine Polarisationsrichtung bzw. Ausrichtung des Kicklasers **6** bzw. eine Ausrichtung des mindestens einen optischen Kickpulses **KP** einen spitzen oder rechten Winkel mit dem externen Magnetfeld **B** bzw. mit dem zu messenden Magnetfeld **B**.

[0097] Insbesondere kann der Magnetfeldsensor **100** derart ausgelegt sein, dass der Kicklaser **6** bzw. die optische Manipulations-Einrichtung konfiguriert,

den Teststrahl **TS** zu emittieren. Mit anderen Worten umfasst der Magnetfeldsensor **100** insbesondere keine separate optische Sonde **4**, wobei stattdessen der Kicklaser **6** ausgelegt ist, den mindestens einen optischen Kick **KP** und den Teststrahl **TS** zu emittieren. Somit kann der Kicklaser **6** bzw. die optische Manipulations-Einrichtung die Rolle der optischen Sonde **4** übernehmen bzw. zusätzlich als optische Sonde **4** ausgebildet sein. Hierfür ist der Kicklaser **6** konfiguriert, Laserlicht mit regelbarer, variabler Intensität zu emittieren. Vorzugsweise kann der Kicklaser **6** hierbei ferner konfiguriert sein, mindestens einen ersten optischen Kickpuls **KP** und mindestens einen letzten optischen Kickpuls **KP** zu emittieren, wobei der optische Detektor **3** den letzten optischen Kickpuls **KP** zumindest teilweise misst, um ein externes Magnetfeld **B** zu messen.

[0098] Der Magnetfeldsensor **100** umfasst vorzugsweise mindestens eine Magnetfeldeinrichtung **7**, welche ausgelegt ist, Magnetfeldpulse in der Messzelle **1** zu erzeugen. Hierfür kann die Magnetfeldeinrichtung **7** mindestens eine Magnetfeldspule umfassen, welche um die Messzelle **1** angeordnet ist. Insbesondere ist die Magnetfeldeinrichtung **7** ausgelegt, den Anfangszustand **AZ** des Spin-Systems bzw. die Spins des Spin-Systems zu drehen bzw. rotieren und/oder somit entlang einer gewünschten Richtung auszurichten. Insbesondere ist die Magnetfeldeinrichtung **7** ausgelegt, den durch die optische Manipulations-Einrichtung polarisierten Anfangszustand **AZ** des Spin-Systems bzw. die Spins des Spin-Systems zu drehen bzw. rotieren und/oder somit entlang einer gewünschten Richtung auszurichten. Insbesondere kann die Magnetfeldeinrichtung **7** ausgelegt sein, den Anfangszustand **AZ** des Spin-Systems bzw. die Spins des Spin-Systems zu drehen bzw. rotieren, so dass die Polarisationsrichtung des mindestens einen Polarisationssignals **PS** im Wesentlichen orthogonal zu der Emissionsrichtung des mindestens einen optischen Kickpulses **KP** ist.

[0099] Der Magnetfeldsensor **100** kann vorzugsweise eine Heizeinrichtung **8** aufweisen, wobei die Heizeinrichtung **8** ausgelegt ist, die Messzelle **1** zu heizen und somit den Atomdampf **2** auf einer vorbestimmten Temperatur zu halten. Hierzu kann die Heizeinrichtung **8** mindestens ein Heizelement, beispielsweise Heizspulen und/oder Peltier-Elemente und/oder elektromagnetische Heizelemente, umfassen. Hierzu kann die Heizeinrichtung ferner ein mindestens ein Thermometer-Element und mindestens ein Temperaturregelelement umfassen. Das mindestens eine Thermometer-Element ist hierbei ausgelegt, eine Temperatur des Atomdampfes **2** oder eines Objektes, welches auf gekannte Weise thermisch mit dem Atomdampf **2** gekoppelt ist und aus dessen Temperatur die Temperatur des Atomdampfes **2** ermittelt werden kann, zu messen und somit die Temperatur des Atomdampfes **2** zu ermitteln. Die ermittelte Tem-

peratur des Atomdampfes **2** kann an das mindestens eine Temperaturregelelement übermittelt werden, welches ausgelegt ist, basierend auf der ermittelten Temperatur des Atomdampfes **2** das mindestens eine Heizelement derart anzusteuern, dass die Temperatur des Atomdampfes **2** einem vorgegebenen Wert entspricht.

[0100] Fig. 3 zeigt beispielhaft eine graphische Darstellung der Messgenauigkeit für verschiedene Magnetfeld-Messmethoden basierend auf Beispiel 1. Insbesondere ist hierbei der minimale Fehler bzw. die Messgenauigkeit (Standardabweichung) δB pro $\sqrt{\text{Hz}}$, mit dem ein Magnetfeld pro 1 cm^3 Volumen des Atomdampfes gemessen werden kann, (a) für eine Polarisationsmessung auf Basis von periodischen optischen Kickpulsen (Werte durch eine punktiert-gestrichelte Linie gekennzeichnet) und für (b) eine Magnetfeldmessung auf Basis einer Referenzmethode (Werte durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet) dargestellt und kontrastiert. Die X-Achse repräsentiert hierbei die Messzeit T_{Mess} , welche hierbei in diskreten Schritten angegeben ist, welche der Zahl der emittierten optischen Kickpulse der Länge τ entsprechen.

[0101] Hierbei wurde die Messgenauigkeit ΔB auf Basis der Fisher-Information berechnet:

$$\Delta B = \frac{1}{\sqrt{N' F_i}} \quad (3)$$

Hierbei ist N' die Anzahl der Atome des Atomdampfes, welche bei einer Dichte von $2 \cdot 10^{10}$ Atomen/ cm^3 in 1 cm^3 enthalten sind, $N' = 2 \cdot 10^{10}$, und $F_i = F/T_{\text{Mess}}$ die zeitskalierte Fisher-Information ist, wobei F die Fisher-Information und T_{Mess} eine Dauer der Messdynamik repräsentiert. Aus der Simulation ergeben sich die jeweiligen Minimalwerte für die Standardabweichung δB für (a) $\delta B_a = 3.68 \cdot 10^{-18}$, (b) $\delta B_b = 1.15 \cdot 10^{-17}$. Die jeweiligen Minimalwerte sind in Fig. 3 durch horizontale bzw. der X-Achse parallele Balken gekennzeichnet. Für einen Vergleich der Fälle (a) und (b) ist der minimale Fehler um etwa 68% gegenüber der Referenzmethode reduziert.

[0102] Der Begriff „im Wesentlichen“ ist im Sinne dieser Beschreibung als umfassend geringer herstellungs- und umweltbedingter Abweichungen zu verstehen.

[0103] Die Erfindung ist nicht auf die oben in der Beschreibung und in den Zeichnungen

Bezugszeichenliste

100	Magnetfeldsensor
1	Messzelle
2	Atomdampf
3	Optischer Detektor
4	Optische Sonde
5	Pumplaser
6	Kicklaser
7	Magnetfeldeinrichtung
8	Heizeinrichtung
9	Signalteiler
10A	Erste Photodiode
10B	Zweite Photodiode
11	Auswertungseinheit
B	Externes bzw. zu messendes Magnetfeld
PS	Polarisationssignal
KP	Optischer Kickpuls
TS	Optischer Teststrahl
AZ	Anfangszustand
EZ	Endzustand
R_z(α)	Präzession

Patentansprüche

1. Magnetfeldsensor (100) zur Messung eines Magnetfelds (B), umfassend:
eine Messzelle (1), welche einen Atomdampf (2) umfasst, wobei der Atomdampf (2) ein Spin-System von Spins individueller Atome aufweist;
eine optische Manipulations-Einrichtung, welche ausgelegt ist, durch Emission von Licht das Spin-System in einem Anfangszustand (AZ) zu polarisieren und während eines Messvorgangs des Magnetfelds (B) durch Emission von mindestens einem optischen Kickpuls (KP) einen Zustand des Spin-Systems zu ändern,
wobei der mindestens eine optische Kickpuls (KP) eine chaotische Dynamik des Spin-Systems erzeugt;
und
eine Sensoreinrichtung, umfassend:
- eine optische Sonde (4), welche ausgelegt ist, einen optischen Teststrahl (TS) durch den Atomdampf (2) zu emittieren, und
- einen optischen Detektor (3), welcher ausgelegt ist, eine Transmission des optischen Teststrahls (TS) durch den Atomdampf (2) zu messen.

2. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei der optische Detek-

tor (3) ausgelegt ist, die Transmission des Teststrahls (TS) während der chaotischen Dynamik des Spin-Systems zu messen.

3. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die optische Manipulations-Einrichtung mindestens einen Pumplaser (5) umfasst, welcher ausgelegt ist, durch Emission von Licht das Spin-System in einem Anfangszustand (AZ) zu polarisieren.

4. Magnetfeldsensor (100) nach Anspruch 3, wobei der mindestens eine Pumplaser (5) konfiguriert ist, zirkular polarisiertes Licht zu emittieren.

5. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die optische Manipulations-Einrichtung mindestens einen Kicklaser (6) umfasst, welcher ausgelegt ist, den mindestens einen optischen Kickpuls (KP) zu emittieren, oder wobei die optische Sonde (4) als mindestens ein Kicklaser (6) ausgebildet ist und zusätzlich ausgelegt ist, den mindestens einen optischen Kickpuls (KP) zu emittieren.

6. Magnetfeldsensor (100) nach Anspruch 5, wobei der mindestens eine Kicklaser (6) konfiguriert ist, den optischen Kickpuls (KP) parallel zu dem optischen Teststrahl (TS) zu emittieren.

7. Magnetfeldsensor (100) nach Anspruch 5 oder 6, wobei der mindestens eine Kicklaser (6) konfiguriert ist, linear polarisiertes Licht zu emittieren.

8. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei der Magnetfeldsensor (100) mindestens eine Magnetfeldeinrichtung (7) umfasst, welche ausgelegt ist, Magnetfeldpulse in der Messzelle (1) zu erzeugen.

9. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt ist, die chaotische Dynamik des Spin-Systems durch Emission von mindestens einem optischen Kickpuls zu erhalten, wobei die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt ist, den mindestens einen optischen Kickpuls in im Wesentlichen periodischen Zeitabständen zu emittieren.

10. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei eine Intensität des optischen Kickpulses (KP) eine Rechteckfunktion oder eine Dreieckfunktion und/oder eine nicht-lineare Funktion aufweist.

11. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei der optische Detektor (3) ausgelegt ist, eine Intensität und/oder eine Polarisation der Transmission des Teststrahls (TS) zu messen.

12. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei der Atomdampf (2) Alkali-Atome, bevorzugt ^{133}Cs Atome, umfasst.

mindestens eines Magnetfeldpulses durch mindestens eine Magnetfeldeinrichtung (7).

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

13. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei I der Atomdampf (2) mindestens ein umfasst.

14. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei der Atomdampf (2) eine Dichte von mindestens etwa 10^4 Atomen/cm³, bevorzugt von mindestens etwa 10^9 Atomen/cm³, und/oder von maximal etwa 10^{15} Atomen/cm³, bevorzugt von maximal etwa 10^{11} Atomen/cm³ aufweist.

15. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei der Anfangszustand (AZ) ein hyperfeiner Grundzustand des Spin-Systems ist.

16. Magnetfeldsensor (100) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die optische Manipulations-Einrichtung ausgelegt ist, den Anfangszustand (AZ) durch ein zirkular polarisiertes Lichtfeld zu erzeugen.

17. Verfahren zur Messung eines Magnetfelds (B), umfassend:

Bereitstellen einer Messzelle (1), welche einen Atomdampf (2) umfasst, wobei der Atomdampf (2) ein Spin-System von Spins individueller Atome aufweist; Polarisieren des Spin-Systems in einem Anfangszustand (AZ) mittels einer optischen Manipulations-Einrichtung;

Erzeugen einer chaotischen Dynamik des Spin-Systems durch ein Ausgeben von mindestens einem optischen Kickpuls (KP) von der Manipulations-Einrichtung auf das Spin-System;

Erzeugen eines optischen Teststrahls (TS) von einer optischen Sonde (4) durch den Atomdampf (2); und Messen einer Transmission des optischen Teststrahls (TS) durch den Atomdampf (2) von einem optischen Detektor (3), welcher den optischen Teststrahl (TS) empfängt.

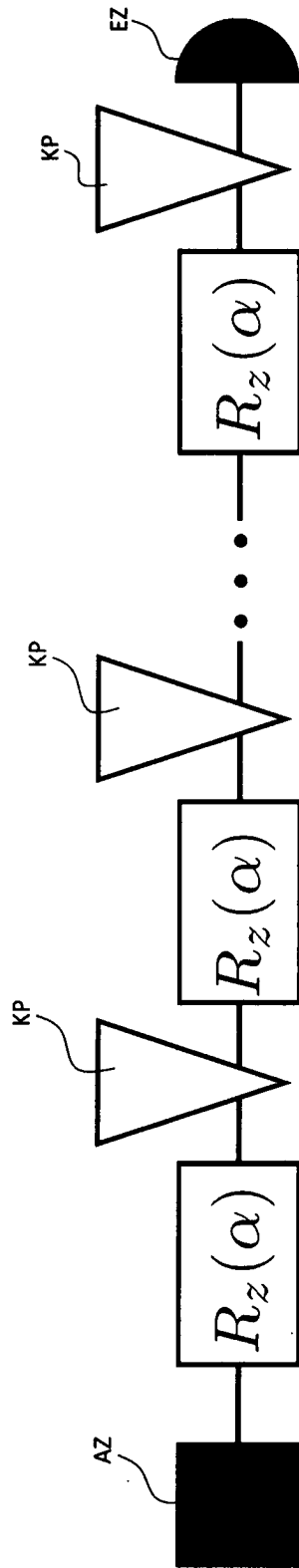
18. Verfahren zur Messung eines Magnetfelds (B) nach Anspruch 17, ferner umfassend:

Rotieren des Anfangszustands (AZ), nach dem Polarisieren des Spin-Systems und vor dem Erzeugen der chaotischen Dynamik, durch Erzeugen mindestens eines Magnetfeldpulses durch mindestens eine Magnetfeldeinrichtung (7).

19. Verfahren zur Messung eines Magnetfelds (B) nach einem der Ansprüche 17 bis 18, ferner umfassend:

Rotieren eines Zustands des Spin-Systems, nach dem Erzeugen des optischen Teststrahls (TS) und vor dem Messen der Transmission, durch Erzeugen

Anhängende Zeichnungen



Figur 1

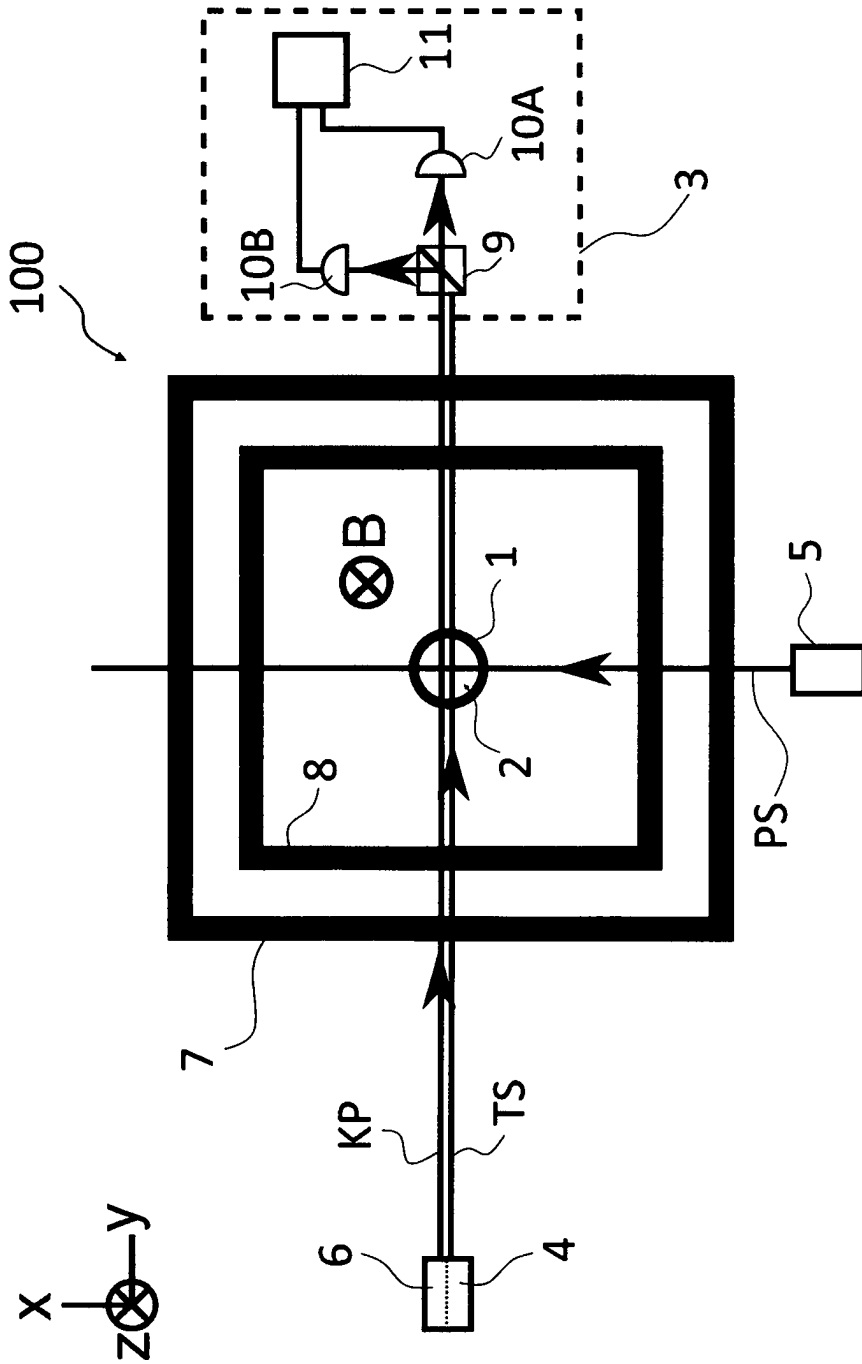
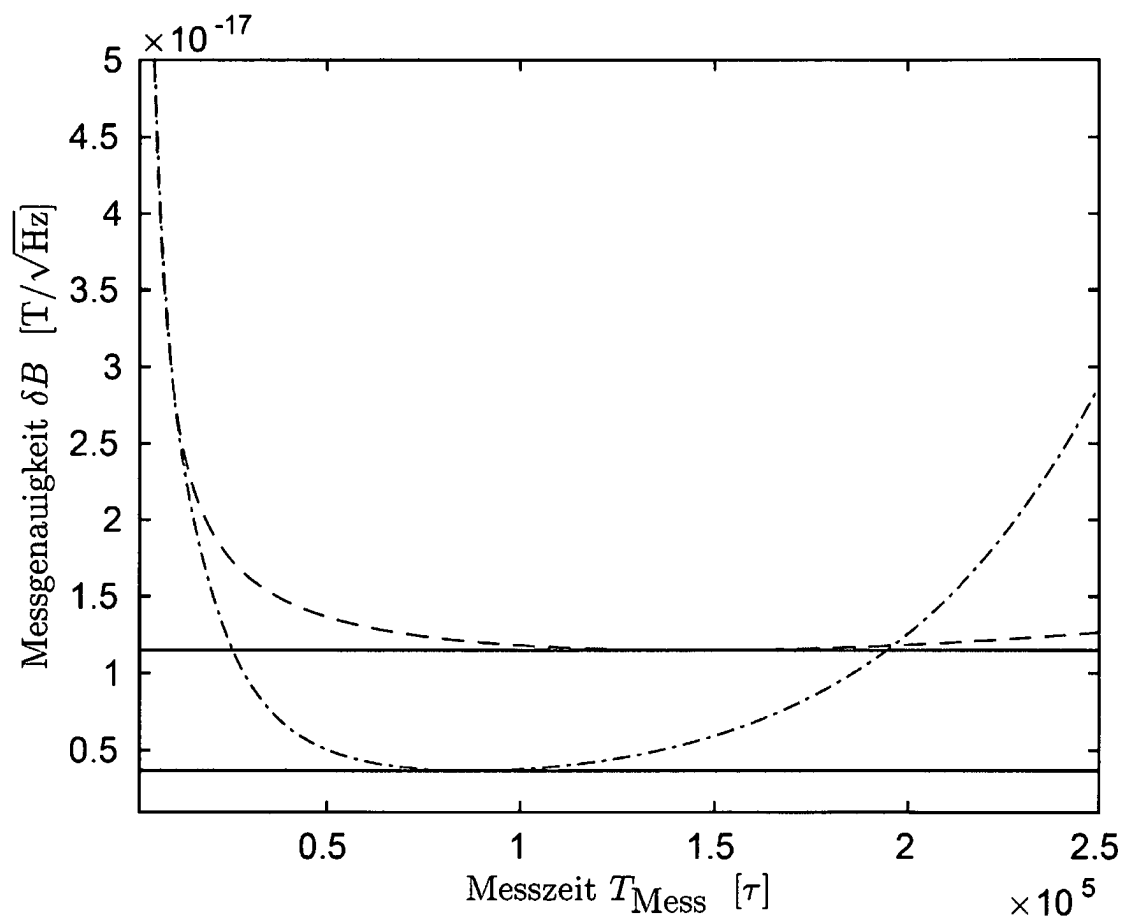


Figure 2



Figur 3