Verfahren zum Kalibrieren eines Quantensensors und Quantensensor

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren eines Quantensensors, insbesondere eines Magnetfeldsensors, der einen Kristall mit Farbzentren, insbesondere einen Diamantkristall mit NV-Zentren, aufweist. Die Erfindung betrifft auch einen Quantensensor, umfassend: einen Kristall mit Farbzentren, insbesondere ein Diamantkristall mit NV-Zentren, eine Anregungslichtquelle zur Einstrahlung von Anregungslicht in den Kristall, einen Mikrowellengenerator zum Einkoppeln eines Mikrowellenfeldes in den Kristall, einen Detektor zur Detektion von Fluoreszenzlicht, das beim Anregen der Farbzentren emittiert wird, sowie eine Auswerteeinrichtung zur Bestimmung mindestens einer Messgröße, insbesondere eines Magnetfeldes, anhand des detektierten Fluoreszenzlichts, wobei die Auswerteeinrichtung einen Demodulator, bevorzugt in Form eines Lock-In-Verstärkers, aufweist.

Quantensensoren spielen eine zentrale Rolle in vielen technischen Anwendungsgebieten und können zur Bestimmung verschiedener physikalischer Messgrößen eingesetzt werden. Als Sensorelemente für Quantensensoren werden typischerweise Kristalle verwendet, die mit Farbzentren dotiert sind. Insbesondere kann als Sensorelement ein mit Farbzentren, in der Regel mit Stickstoff-Vakanz-Zentren (nachfolgend als („nitrogen vacancy“, NV)-Zentren bezeichnet), dotierter Diamantkristall verwendet werden. NV-Zentren in Diamant weisen eine charakteristische elektronische Struktur auf, die sich bei einer Veränderung bestimmter Messgrößen, beispielsweise eines äußeren Magnetfeldes, der Temperatur, des Drucks oder des elektrischen Feldes verändert.

In der DE102022201185A1 ist ein Drucksensor beschrieben, der wenigstens eine sensitive Komponente in Form einer auslenkbaren Diamantmembran umfasst, die mindestens ein Teilvolumen aufweist, das mit Farbzentren, bevorzugt mit NV-Zentren, dotiert ist.

Die Farbzentren werden durch Bestrahlung mit Anregungslicht im optischen Bereich und durch Bestrahlung mit einem Mikrowellenfeld mit variierender Frequenz im Mikrowellenbereich angeregt und das dadurch in den Farbzentren induzierte Fluoreszenzlicht wird von einem Detektor erfasst und analysiert.

Die Sensitivität eines solchen Quantensensors hängt von verschiedenen Parametern ab. Es ist nicht einfach, durch theoretische Abschätzung oder Simulation die optimalen Betriebsparameter für einen möglichst sensitiven Betrieb eines Quantensensors, speziell eines Magnetfeldsensors zu finden, da zu diesem Zweck gewisse Annahmen und Vereinfachungen notwendig sind. Auch können die optimalen Betriebsparameter bei unterschiedlichen Geräten desselben Typs von Quantensensor variieren. Eine manuelle Kalibrierung eines Quantensensors ist zeitaufwändig und hat sowohl zeitlich als auch abhängig vom Einsatzort des Quantensensors nur eine begrenzte Gültigkeit.

In dem Artikel „Sensitivity Optimization for NV-Diamond Magnetometry“, John F. Barry et al., Review of Modern Physics 92, no. 1, 2020, 015004, ist beschrieben, dass Quantensensoren in Form von Magnetometern, die auf NV-Zentren in Diamant beruhen, eine Sensitivität aufweisen, die Größenordnungen von den theoretischen Grenzen entfernt liegt. In dem Artikel werden verschiedene Ansätze für die Optimierung der Sensitivität von Magnetometern beschrieben.

In dem Artikel „Fiber-coupled Diamond Magnetometry with an Unshielded 30 pT / $\sqrt{Hz}$ Sensitivity“, S. M. Graham et al., Physical Review Applied 19, no. 4, 044042 wird ein NV-Zentren-Magnetometer mit einer Sensitivität in der Größenordnung von ca. 30 pT /$\sqrt{Hz}$ für einen Frequenzbereich von 10 bis 500 Hz beschrieben. Diese hohe Sensitivität kann u.a. durch die Optimierung der Betriebsparameter einer Mikrowellenquelle und eines Lock-In Verstärkers erreicht werden.

In der CN115128518A ist ein auf NV-Zentren beruhendes hochempfindliches differenzielles magnetisches Erfassungssystem beschrieben, das auf einer Frequenzagilitäts-Mikrowellenmodulationstechnologie basiert. Das Erfassungssystem weist ein Magnetsignal-Kalibrierungsmodul auf, das eine Magnetspule zum Applizieren eines Bias-Magnetfelds umfasst. Das

Erfassungssystem verändert die Stärke des Magnetfeldes, um mehrere Datensätze zu erhalten und verarbeitet die Ausgabedaten differentiell, um thermisches Rauschen zu unterdrücken und die Sensitivität für das magnetische Signal zu verbessern.

In der CN112068046B sind eine Magnetfeld-Messvorrichtung und ein Verfahren zur Magnetfeldmessung beschrieben, die auf NV-Farbzentren beruhen. Bei dem Verfahren wird der Messvorrichtung ein Kalibrationssignal mit einer bekannten Feldstärke und einer bekannten Richtung zugeführt und ein mittels eines Detektionsmoduls detektiertes Fluoreszenzsignal wird mit Hilfe des zugeführten Kalibrationssignals kalibriert.

Aufgabe der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Kalibrieren eines Quantensensors, insbesondere eines Magnetfeldsensors, bereitzustellen, welches den Betrieb des Quantensensors mit einer möglichst hohen Sensitivität ermöglicht.

Gegenstand der Erfindung

Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren der eingangs genannten Art, bei dem der Quantensensor beim Kalibrieren in einem Kalibrationsbetrieb betrieben wird, der folgende Schritte umfasst: a) Automatisiertes Vorgeben einer Mehrzahl von Werten mindestens eines die Sensitivität des Quantensensors beeinflussenden Betriebsparameters, b) Automatisiertes Bestimmen eines Maßes für die Sensitivität des Quantensensors bei der Mehrzahl von Werten des mindestens einen Betriebsparameters, sowie c) Automatisiertes Auswählen eines für die Sensitivität des Quantensensors optimalen Werts des mindestens einen Betriebsparameters. Das Auswählen des (mindestens einen) optimalen Werts erfolgt anhand des Maßes für die Sensitivität des Quantensensors, das in Schritt b) bestimmt wurde.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird der Quantensensor in einem Kalibrationsbetrieb betrieben, bei dem automatisiert optimale Werte von Betriebsparametern bestimmt werden, bei denen die Sensitivität des Quantensensors möglichst hoch bzw. maximal ist. Im Anschluss an den

Kalibrationsbetrieb kann der Quantensensor in einem Messbetrieb mit dem oder den optimierten Werten des mindestens einen Betriebsparameters betrieben werden, die in dem Kalibrationsbetrieb ausgewählt wurden. Der Kalibration des Quantensensors in dem Kalibrationsbetrieb kann vollständig automatisiert erfolgen, d.h. eine manuelle Kalibration des Quantensensors kann entfallen.

Die Betriebsparameter, für welche die Mehrzahl von Werten eingestellt bzw. vorgegeben werden, können in der Regel im Wesentlichen kontinuierlich variiert werden. Von den möglichen Werten des jeweiligen Betriebsparameters wird nacheinander eine Mehrzahl von Werten eingestellt, die innerhalb eines vorgegebenen Werte- bzw. Variationsbereichs des Betriebsparameters liegen. Die Werte können in dem vorgegebenen Wertebereich mit einer vorgegebenen Schrittweite festgelegt werden, dies ist aber nicht zwingend erforderlich. Für jeden der Werte wird eine Messzeit vorgegeben, in welcher der Quantensensor mit dem eingestellten Wert des Betriebsparameters betrieben wird. Die Messzeit ist so gewählt, dass die Sensitivität des Quantensensors für den jeweils eingestellten Wert bestimmt werden kann. Die Anzahl der Werte des Betriebsparameters, die eingestellt werden, liegt in der Regel bei fünf oder mehr, bei zehn oder mehr, oder bei hundert oder mehr. Die Anzahl der Werte, die eingestellt werden, kann ggf. aber auch geringer sein.

Bei dem Verfahren kann nur für einen Betriebsparameter die vorgegebene Anzahl von Werten eingestellt und das Maß für die Sensitivität bestimmt werden (eindimensionaler Scan), es ist aber auch möglich, dass die Variation mehrdimensional erfolgt, d.h. für mehrere Betriebsparameter gemeinsam. Jedem eingestellten Wert bzw. jeder Kombination von eingestellten Werten der Betriebsparameter wird der Wert für das Maß der Sensitivität zugeordnet und abgespeichert. Am Ende des Kalibrationsbetriebs wird derjenige Wert des Betriebsparameters oder diejenige Kombination von Werten des Betriebsparameters ausgewählt, bei der die Sensitivität des Quantensensors maximal bzw. optimal ist.

Es versteht sich, dass neben den Betriebsparametern, die bei dem Verfahren eingestellt werden, auch Parameter existieren, welche die Sensitivität des Quantensensors beeinflussen, die aber im Betrieb des Quantensensors nicht oder

nur unzureichend einstellbar sind. Bei diesen Parametern handelt es sich beispielsweise um die Eigenschaften des (Diamant-)Kristalls, beispielsweise um die Konzentration an Farbzentren, Relaxationszeiten, Orientierung, Strain, Verunreinigungen, etc., um die Kollektionseffizienz des Fluoreszenzlichts, um das Rauschen im Strom, das Bias-Magnetfeld (Homogenität, Rauschen), die Homogenität des Mikrowellenfelds, die Pump-Laserstrahlform bzw. –kaustik, und die Pump-Laserwellenlänge. Diese Parameter sollten bereits vorher beim Design des Quantensensors im Hinblick auf die Sensitivität optimiert werden.

Bei einer Variante wird in Schritt a) eine Mehrzahl von Werten eines ersten Betriebsparameters und eine Mehrzahl von Werten eines zweiten Betriebsparameters eingestellt und in Schritt c) wird ein optimaler Wert des ersten Betriebsparameters und ein optimaler Wert des zweiten Betriebsparameters ausgewählt. Bei dieser Variante erfolgt eine zweidimensionale Variation der Werte des ersten und des zweiten Betriebsparameters, d.h. ein zweidimensionaler Scan der Betriebsparameter. Dies ist insbesondere günstig, wenn der erste Betriebsparameter und der zweite Betriebsparameter miteinander zusammenhängen, wie dies beispielsweise bei der (Laser-)Leistung der Anregungslichtquelle und der Mikrowellenleistung des Mikrowellengenerators der Fall ist, die der Quantensensor aufweist, vgl. den Artikel C. Zhang et al., “Diamond magnetometry and gradiometry towards subpicotesla DC field measurement,” Phys. Rev. Applied, vol. 15, no. 6, p. 064075, Jun. 2021, beispielsweise Fig. 3(a). Es versteht sich, dass in Schritt a) zusätzlich auch eine Mehrzahl von Werten eines dritten, vierten, … Betriebsparameters eingestellt werden kann, von denen in Schritt c) ein jeweils optimaler Wert ausgewählt wird.

Bei einer Weiterbildung dieser Variante werden in Schritt a) die Mehrzahl von Werten des ersten Betriebsparameters und die Mehrzahl von Werten des zweiten Betriebsparameters nach einem Teilfaktorplan (engl. „fractional factorial design“) eingestellt. Die Variation von zwei oder mehr Betriebsparametern bzw. Faktoren kann grundsätzlich mit einem vollständigen Faktorplan erfolgen, bei dem alle Kombinationen von Werten des ersten Betriebsparameters und von Werten des zweiten Betriebsparameters iterativ bzw. nacheinander eingestellt werden. Dies ist jedoch schon bei der gemeinsamen Variation von zwei Betriebsparametern sehr

zeitaufwändig. Eine Alternative zu einer Variation der Betriebsparameter mit einem vollständigen Faktorplan stellt die Variation bzw. das Einstellen der Betriebsparameter in einem Teilfaktorplan dar, bei dem nur ein bestimmter Bruchteil der in einem vollständigen Faktorplan enthaltenen Faktorkombinationen eingestellt wird. Die Betriebsparameter bzw. Faktoren werden auf zwei Faktorstufen untersucht, woraus eine mathematische Notation 2^{k-p} resultiert, bei der k für die Anzahl der Faktoren und p für den Bruchteil der durchgespielten Kombinationen von Faktoren steht. Durch die Verwendung eines Teilfaktorplans bei der gemeinsamen Variation der Betriebsparameter können 2-dimensionale und mehrdimensionale Scans der Betriebsparameter beschleunigt werden.

Bei einer alternativen Variante werden die Schritte a) bis c) für einen ersten Betriebsparameter durchgeführt und die Schritte a) bis c) werden nachfolgend unter Vorgabe des ausgewählten optimalen Werts des ersten Betriebsparameters für einen zweiten Betriebsparameter durchgeführt. Es versteht sich, dass die Schritte a) bis c) nachfolgend unter Vorgabe bzw. Einstellung des ausgewählten optimalen Werts des zweiten Betriebsparameters für einen dritten Betriebsparameter durchgeführt werden können, etc. Bei der hier beschriebenen Variante wird zunächst ein eindimensionaler Scan des ersten Betriebsparameters und nachfolgend – mit dem optimierten Wert für den ersten Betriebsparameter – ein eindimensionaler Scan des zweiten Betriebsparameters vorgenommen. Auf diese Weise kann die Zeitdauer des Kalibrationsbetriebs gegenüber der Zeitdauer bei einem zwei- oder mehrdimensionalen Scan der Betriebsparameter reduziert werden.

Bei einer weiteren Variante werden die Schritte a) bis c) für mindestens zwei Betriebsparameter iterativ, d.h. ein- oder mehrmals wiederholt, durchgeführt. Insbesondere für den Fall, dass die Schritte a) bis c) für einen ersten Betriebsparameter durchgeführt werden und die Schritte a) bis c) nachfolgend unter Einstellung des ausgewählten optimierten Werts des ersten Betriebsparameters für einen zweiten Betriebsparameter durchgeführt werden, können anschließend die Schritte a) bis c) unter Einstellung des ausgewählten optimierten Werts des zweiten Betriebsparameters erneut für den ersten Betriebsparameter durchgeführt werden, usw., d.h. die beiden Betriebsparameter können abwechselnd iterativ optimiert werden.

Bei einer Variante ist der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein Anregungslicht-Betriebsparameter von zur Anregung der Farbzentren in den Kristall eingestrahltem Anregungslicht. Wie weiter oben beschrieben wurde, wird der Kristall bzw. werden die Farbzentren des Kristalls mit Anregungslicht angeregt, dessen Eigenschaften einen erheblichen Einfluss auf die Sensitivität des Quantensensors haben.

Bei einer Weiterbildung ist der Anregungslicht-Betriebsparameter eine Leistung des Anregungslichts oder ein Pulsparameter des Anregungslichts beim gepulsten Betrieb des Quantensensors. Die Sensitivität des Quantensensors wird typischerweise stark durch die (Laser-)Leistung des Anregungslichts bzw. durch den (Laser-)Pumpstrom der Anregungslaserquelle beeinflusst. Die Variation der Laserleistung im Kalibrationsbetrieb erfordert ggf. die Anpassung der Temperaturregelung der Lichtquelle, d.h. es wird ein vorgeschaltetes Kalibrierverfahren für einen z.B. thermoelektrischen Kühler (TEC) abhängig von der Leistung des Anregungslichts durchgeführt, denn sowohl im Kalibrationsbetrieb als auch im Messbetrieb des Quantensensors ist darauf zu achten, dass die Anregungslichtquelle zur Anregung der Farbzentren einen rauscharmen Betriebspunkt erreicht. Dies kann z.B. durch ein Nachregeln der Temperatur oder des Pumpstroms der Anregungslichtquelle erreicht werden. Als Regelsignal kann beispielsweise ein AC-gekoppeltes Signal einer Fotodiode (z.B. einer Monitor-Fotodiode in einem Gehäuse der Anregungslichtquelle) verwendet werden oder auch das demodulierte Signal des Quantensensors selbst.

Bei dem Lichtquellen-Parameter kann es sich auch um einen Pulsparameter des Anregungslichts handeln, falls der Quantensensor gepulst betrieben wird, beispielsweise um die Pulsdauer oder um die Pulsform eines jeweiligen (Laser-)pulses, aber auch um die zeitliche Abfolge der verschiedenen Pulse.

Bei einer weiteren Variante ist der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein Mikrowellen-Betriebsparameter eines in den Kristall eingekoppelten Mikrowellenfeldes. Auch die Eigenschaften des in den Kristall bzw. in die Farbzentren des Kristalls eingekoppelten Mikrowellenfeldes haben einen erheblichen Einfluss auf die Sensitivität des Quantensensors.

Bei einer Weiterbildung dieser Variante ist der Mikrowellen-Betriebsparameter ausgewählt aus der Gruppe umfassend: Leistung des Mikrowellenfeldes, Modulationstiefe des Mikrowellenfeldes und Pulsparameter des Mikrowellenfeldes bei gepulstem Betrieb des Quantensensors. Die Leistung des Mikrowellenfeldes ist aufgrund des Frequenzgangs der das Mikrowellenfeld erzeugenden Struktur, beispielsweise in Form einer Mikrowellen-Antenne bzw. eines Mikrowellen-Kopplers, frequenzabhängig. Für eine Messung/Kalibrierung der das Mikrowellenfeld erzeugenden Struktur, beispielsweise einer Mikrowellen-Antenne, kann durch eine Variation des Bias-Felds (im Fall von Elektromagneten) bzw. durch ein externes Bias-Feld in einem Teststand eine Resonanzkurve für die Mikrowellen-Antenne aufgenommen werden. Diese Tabelle kann dann zur Einstellung der optimalen Leistung des Mikrowellenfeldes verwendet werden, sodass nicht bei jeder (z.B. temperaturabhängigen) Verschiebung des (ODMR-)Spektrums eine neue Kalibration der Leistung des Mikrowellenfelds erforderlich ist.

Als Betriebsparameter kann auch die Modulationstiefe MD des Mikrowellenfeldes eingestellt werden, die definiert ist durch

$$MD = 100\% \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}},$$

wobei A die Amplitude des Mikrowellenfeldes bezeichnet. Alternativ zur Amplitude kann die Frequenz oder die Phase des Mikrowellenfeldes variiert werden, hier bezeichnet A dann die Frequenz bzw. die Phase des Mikrowellenfelds.

Alternativ oder zusätzlich kann die Modulationsfrequenz des Mikrowellenfelds eingestellt bzw. variiert werden. Beim Auffinden des optimalen Werts der Modulationsfrequenz des Mikrowellenfeldes ist besonders zu beachten, dass bei bestimmten Frequenzen Störsignale aus der Umgebung die Empfindlichkeit des Quantensensors in diesen Frequenzbändern beeinträchtigen (z.B. 50 Hz / 60 Hz und 16 Hz Signale aus der Netzspannung bzw. der Versorgung des Bahnverkehrs). Es kann daher sinnvoll sein, den Wertebereich, in dem die Mikrowellenfrequenz eingestellt bzw. variiert wird, entsprechend einzuschränken, indem diese Frequenzbänder und deren Vielfache aus dem Wertebereich der Variation

herausgenommen werden.

Bei dem Mikrowellen-Betriebsparameter kann es sich auch um einen Pulsparameter des Mikrowellenfeldes handeln, wenn der Quantensensor gepulst betrieben wird. Beispielsweise kann es sich um eine Pulsdauer oder um eine Pulsform der Mikrowellenpulse oder um die zeitliche Abfolge der Mikrowellenpulse handeln.

Bei einer weiteren Variante ist der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein Demodulator-Betriebsparameter, insbesondere ein Verstärker-Betriebsparameter eines Lock-In-Verstärkers, einer Auswerteeinrichtung des Quantensensors. Für die Auswertung wird das von einem Detektor detektierte Fluoreszenzsignal mit einem Demodulator demoduliert, beispielsweise mit Hilfe eines Lock-In-Verstärkers. Im Kalibrationsbetrieb wird bei dieser Variante die Sensitivität des Quantensensors anhand des demodulierten Signals bestimmt, sodass die Verstärker-Betriebsparameter des Lock-In-Verstärkers die Sensitivität bzw. das Maß für die Sensitivität beeinflussen. Bei dem bzw. bei den Verstärker-Betriebsparametern kann es sich beispielsweise um die Tiefpass-Bandbreite des Lock-In-Verstärkers, um die Tiefpass-Ordnung bzw. um die spektrale Filterantwort des Lock-In-Verstärkers oder um die Chunk-Breite handeln, sofern es sich um eine Software-Implementation des Lock-In-Verstärkers handelt.

Bei einer weiteren Variante ist der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein diskreter, insbesondere binärer Betriebsparameter des Quantensensors. Ein diskreter, z.B. binärer, Betriebsparameter des Quantensensors kann grundsätzlich nur eine begrenzte Anzahl von Werten annehmen. Der diskrete Betriebsparameter kann daher nicht kontinuierlich variiert werden, wie dies beispielsweise bei der Leistung des Anregungslichts oder bei der Leistung des Mikrowellenfelds der Fall ist. Bei dem diskreten Betriebsparameter kann es sich beispielsweise um die Form der Modulation des Mikrowellenfelds handeln, z.B. ob die Amplitude oder die Frequenz des Mikrowellenfelds moduliert wird. Abhängig von der Bauform des Quantensensors kann es sich um die Orientierung des Offset-Magnetfelds handeln. Ein weiterer diskreter bzw. binärer Betriebsparameter ist die Art des Resonanz-Drives des Quantensensors, d.h. ob es sich um einen single-resonance drive oder um einen double-resonance drive handelt. Beim single-

resonance drive regt das Mikrowellenfeld insbesondere nur den Übergang zwischen Spin-0-Niveau und einem Spin-±1-Niveau eines NV-Zentrums an, während beim double-resonance drive die Übergänge zu beiden Spin±-Niveaus angeregt werden. Auch ob das Hyperfeinstruktur(HFS)-Driving (das bei NV-Zentren bei 2,16 MHz liegt) eingeschaltet oder ausgeschaltet ist, stellt einen diskreten bzw. binären Betriebsparameter dar. Beim HFS-Drive handelt es sich um einen Betriebsmodus, bei dem zusätzlich zu einer zentralen Mikrowellenfrequenz je eine Frequenz über- und unterhalb der zentralen Frequenz angewandt wird, deren Frequenzunterschiede zur Zentralfrequenz der Hyperfeinaufspaltung entsprechen.

Bei einer weiteren Variante ist der erste Betriebsparameter ein Anregungslicht-Betriebsparameter, insbesondere eine Leistung des Anregungslichts, und der zweite Betriebsparameter ist ein Mikrowellen-Betriebsparameter, insbesondere eine Leistung des Mikrowellenfeldes, oder umgekehrt. Bei der Leistung des Anregungslichts und bei der Leistung des Mikrowellenfeldes handelt es sich um Betriebsparameter, die einen großen Einfluss auf die Sensitivität des Quantensensors haben. Diese beiden Betriebsparameter können wie weiter oben beschrieben durch einen zweidimensionalen Scan oder durch zwei aufeinanderfolgende eindimensionale Scans innerhalb eines jeweils vorgegebenen Wertebereichs variiert werden, wobei im letzten Fall der optimale Wert des Betriebsparameters des ersten eindimensionalen Scans für die Durchführung des zweiten eindimensionalen Scans eingestellt wird. Dies kann iterativ wiederholt werden.

Es ist typischerweise günstig, wenn die Betriebsparameter in der Reihenfolge der Größe ihres Einflusses auf die Sensitivität des Quantensensors optimiert werden, d.h. zunächst sollten diejenigen Betriebsparameter optimiert werden, die den größten Einfluss auf die Sensitivität des Quantensensors haben. In dem Kalibrationsbetrieb können als erster und zweiter Betriebsparameter die Leistung des Anregungslichts und die Leistung der Mikrowellenquelle zunächst optimiert werden und nachfolgend können mit den optimalen Werten dieser beiden Betriebsparameter andere Betriebsparameter optimiert werden, beispielsweise die Modulationstiefe und die Modulationsfrequenz des Mikrowellenfelds. Für den Fall, dass der Quantensensor gepulst betrieben wird, können auch die Pulsparameter, beispielsweise die

Pulsdauer, die Pulsform und die Abfolge der Pulse des Anregungslichts bzw. der Laserpulse und der Mikrowellenpulse optimiert werden. Auch die weiter oben beschriebenen diskreten Betriebsparameter und die Verstärker-Betriebsparameter können in einem oder mehreren nachfolgenden Optimierungsschritten optimiert werden.

Bei einer weiteren Variante wird nach dem Kalibrationsbetrieb das Maß für die Sensitivität des Quantensensors bei dem ausgewählten optimalen Wert des mindestens einen Betriebsparameters erneut bestimmt und mit dem in dem Kalibrationsbetrieb bestimmten Maß für die Sensitivität des Quantensensors verglichen, wobei anhand des Vergleichs bevorzugt über die Durchführung eines erneuten Kalibrationsbetriebs entschieden wird und/oder Veränderungen des baulichen Zustands, insbesondere eine Degradation, des Quantensensors erkannt werden. Nach dem erfolgreichen Kalibrationsbetrieb wird der Messbetrieb aufgenommen. In vorgegebenen zeitlichen Abständen kann im Messbetrieb das Maß für die Sensitivität des Quantensensors bei dem bzw. den ausgewählten optimalen Wert(en) erneut bestimmt werden. Anhand des Vergleichs kann entschieden werden, ob ein erneuter Kalibrationsbetrieb durchgeführt wird. Der erneute Kalibrationsbetrieb bzw. eine Nachkalibrierung kann durchgeführt werden, wenn das Maß für die Sensitivität des Quantensensors bei der erneuten Bestimmung sich um einen vorgegebenen Betrag gegenüber dem Maß für die Sensitivität des Quantensensors verschlechtert, die bei dem Kalibrationsbetrieb bestimmt wurde. Bei dem erneuten Kalibrationsbetrieb können die Wertebereiche bei der Variation der Betriebsparameter typischerweise deutlich kleiner gewählt werden als im Kalibrationsbetrieb und es kann auf ein lokales Optimum hin optimiert werden. Auch ist zu beachten, dass bestimmte Komponenten des Quantensensors Langzeitschwankungen aufweisen, die ebenfalls eine Nachkalibration erforderlich machen können.

Aus dem Vergleich der Sensitivitäten bzw. anhand der Daten, wie stark der optimale Betriebspunkt des Quantensensors mit der Zeit variiert, können ggf. auch Aussagen über den Zustand der Komponenten des Quantensensors getroffen werden, z.B. eine Degradation des Lasers bzw. des Lasersystems. Beispielsweise kann die Drift des optimalen Betriebspunkts bzw. Betriebszustands des Lasersystems der

Anregungslichtquelle, z.B. in Form des optimalen Laserpumpstroms, überwacht werden. Auf diese Weise kann z.B. eine Früherkennung bzw. eine Diagnose bezüglich der Lebensdauer des Quantensensors und eine prädiktive Instandhaltungsfunktion (predictive maintenance function) für einen ggf. erforderlichen Austausch des Lasersystems des Quantensensors sowie ggf. für andere Komponenten des Quantensensors implementiert werden. Auch kann im Fall einer Drift des optimalen Laserpumpstroms ggf. eine Nachjustage erfolgen, sofern das Anregungslicht den Quantensensor in Freistrahlpropagation durchläuft.

Bei einer weiteren Variante wird das Maß für die Sensitivität des Quantensensors über das ODMR Spektrum (Optisch detektierbare Magnetresonanz) anhand der Parameter des Fluoreszenzkontrastes (Resonanztiefe) und der Linienbreite der Resonanz bestimmt. Erfasst wird die Magnetresonanz über den Verlauf der Fluoreszenzlichtintensität bei variierender eingestrahlter Mikrowellenfrequenz. Die Fluoreszenzintensität kann über Demodulation des Lock-In Verstärkersignals erfasst werden.

Nachfolgend wird die Bestimmung der Sensitivität des Quantensensors am Beispiel eines Magnetfeldsensors beschrieben. Es versteht sich, dass die Bestimmung der Sensitivität eines Quantensensors, der zur Bestimmung einer anderen Messgröße ausgebildet ist, auf analoge Weise durchgeführt werden kann.

Die Sensitivität η_B eines Magnetfeldsensors (in T/$\sqrt{Hz}$) kann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$\eta_B = \frac{\sigma\sqrt{t}}{dS/dB},$$

wobei σ die Standardabweichung des Rauschlevels des gemessenen Signals S, t die Messzeit in Sekunden und dS / dB einen Proportionalitätsfaktor bzw. die Änderung des Signals S in Abhängigkeit vom Magnetfeld B beschreibt.

Im ODMR-Spektrum des detektierten Fluoreszenzlichts eines Magnetometers, das einen Diamantkristall mit NV-Zentren aufweist, ergibt sich die shot-noise-limitierte Sensitivität η_B durch:

$$\eta_B = P \cdot \frac{FWHM}{\gamma_{NV} c_{det} \cdot \sqrt{R}}$$

wobei P einen numerischen Proportionalitätsfaktor bezeichnet, der von der mathematischen Beschreibung der Resonanzkurve abhängt (für eine Lorentz-Kurve gilt: $P = 4 / (3 * \sqrt{3}) = 0{,}77$), FWHM die spektrale Linienbreite (FWHM) der Resonanzkurve, C_{det} den Signalkontrast, R die detektierte Fluoreszenz-Photonenrate und γ_{NV} das gyromagnetische Verhältnis der NV-Zentren bezeichnet (γ_{NV}≈28 GHz/T).
Die Linienbreite FWMH und der Kontrast c_{det} und die Baseline können in bekannter Weise durch einen Fit von (Lorentz-)Resonanzen im ODMR-Spektrum bestimmt werden. Sie hängen auch vom optischen Sättigungsparameter s sowie von der Rabi-Frequenz Ω_R ab. Von der Grundlinie bzw. der Baseline kann auf die detektierte Photonenrate R geschlossen werden.

Alternativ oder zusätzlich kann die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors anhand eines aus dem spektralen Intensitätsverlauf des Fluoreszenzlichts mittels eines Demodulators, beispielsweise eines Lock-In-Verstärkers, demodulierten Signals bestimmt werden. In diesem Fall kann die Sensitivität gemäß folgender Formel bestimmt werden:

$$\eta_B = \frac{V_{NSD}}{\gamma_{NV} \alpha},$$

wobei V_{NSD} die Noise Spectral Density und α die Steigung des demodulierten Signals V_{LIA} des Lock-In-Verstärkers bei einem Nulldurchgang (Zero Crossing Slope, ZCS) bezeichnen und γ_{NV} das gyromagnetische Verhältnis der NV-Zentren ist. Die Noise Spectral Density V_{NSD} ist die Standardabweichung des demodulierten Signals geteilt durch die Wurzel der Noise-Equivalent-Power-Bandbreite des Tiefpass-Filters im Lock-In-Verstärker, vgl. auch den Artikel „https://www.zhinst.com/europe/en/blogs/noise-spectral-density-measured-lock-amplifiers“. Die Nulldurchgangs-Steigung α des demodulierten Signals wird typischerweise durch einen linearen Fit bestimmt. Für die Messung des Magnetfelds kann die Mikrowelle auf eine Resonanzfrequenz bzw. auf einen Nulldurchgang im demodulierten Spektrum eingestellt und das resultierende Signal gemessen werden.

Bei einer Weiterbildung dieser Variante wird als Maß für die Sensitivität des Quantensensors eine spektrale Rauschdichte des demodulierten Signals und/oder eine Nulldurchgangs-Steigung des demodulierten Signals bestimmt. Wie sich aus der Formel für die Sensitivität η_B des demodulierten Signals ergibt, hängt die Sensitivität von der spektralen Rauschdichte V_{NSD} und von der Nulldurchgangs-Steigung ab. Abhängig vom Betriebsparameter, der variiert wird, kann für eine schnelle Messung bzw. Kalibrierung nur eine dieser beiden Größen bestimmt werden.

Bei einer weiteren Weiterbildung wird als Maß für die Sensitivität des Quantensensors ein Kontrast und/oder eine Breite mindestens einer Resonanz im spektralen Intensitätsverlauf des Fluoreszenzlichts und/oder eine Höhe der Grundlinie des spektralen Intensitätsverlaufs des Fluoreszenzlichts bestimmt. Hierbei handelt es sich um Beispiele, wie das Maß für die Sensitivität anhand des spektralen Intensitätsverlaufs des Fluoreszenzlichts bestimmt werden kann.

Ein zweiter Aspekt der Erfindung betrifft einen Quantensensor, insbesondere einen Magnetfeldsensor, der eingangs genannten Art, der eine Kalibrationseinrichtung aufweist, die zur Durchführung des weiter oben beschriebenen Verfahrens ausgebildet ist.

Die Kalibrationseinrichtung kann in Form einer geeigneten Hard- und/oder Software ausgebildet sein und ermöglicht die automatisierte, ggf. mehrfache Durchführung des Kalibrationsbetriebs. Der Quantensensor mit der hier beschriebenen automatisierten Selbstkalibrierung vereinfacht die Produktion. Der Kalibrierbetrieb des Quantensensors kann automatisiert oder manuell von einem Bediener ausgelöst werden, d.h. die Kalibrierung ist auf Knopfdruck ohne Fachwissen vornehmbar, da der gesamte Kalibrierungsvorgang automatisch abläuft. Auch können ggf. breitere Wertebereiche der Betriebsparameter gewählt werden als bei einer manuellen Kalibration. Ein ständiges Monitoring und eine erforderlichenfalls vorgenommene Rekalibrierung stellen sicher, dass der Quantensensor dauerhaft im optimalen Betriebszustand betrieben wird, da kein manuelles „Nachjustieren“ erforderlich ist.

Bei dem Quantensensor kann es sich um einen Magnetfeldsensor handeln, der zur Bestimmung eines Magnetfelds in einem Messvolumen ausgebildet ist, in dem der

Kristall mit den Farbzentren angeordnet ist. Es ist aber auch möglich, dass der Magnetfeldsensor als Gradiometer ausgebildet ist, bei dem das Magnetfeld in zwei oder mehr unterschiedlichen Messvolumina gemessen wird, indem Fluoreszenzlicht aus den zwei oder mehr Messvolumina ausgewertet wird, um einen Magnetfeld-Gradienten zu bestimmen. Bei einem Gradiometer werden typischerweise zwei oder mehr unabhängige Messköpfe verwendet, welche in der Regel die weiter oben beschriebenen Bauteile aufweisen. Bei einem Gradiometer ist es günstig, wenn das weiter oben beschriebene Verfahren für jeden der zwei oder mehr Messköpfe unabhängig voneinander durchgeführt wird, d.h. wenn der weiter oben beschriebene Kalibrierungsbetrieb für beide Messköpfe unabhängig voneinander durchgeführt wird. Manche Kalibrierschritte wie beispielsweise die Kalibrierung der Modulationsfrequenz einer bzw. mehrerer Mikrowellenfelder, können gegebenenfalls für alle Messköpfe gleichzeitig durchgeführt werden.

Für den Fall, dass mit Hilfe des Magnetfeldsensors Vektormagnetometrie durchgeführt werden soll, ist es typischerweise erforderlich, den Kalibriervorgang für alle vier Orientierungen der NV-Zentren teilweise gleichzeitig durchzuführen. Für die Bestimmung der optimalen (Laser-)Leistung sind in diesem Fall alle vier Orientierungen gleichzeitig zu beachten, während die Mikrowellen-Betriebsparameter für jede Orientierung der NV-Zentren gegebenenfalls teilweise einzeln eingestellt werden können.

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter aufgeführten Merkmale je für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Quantensensors in Form eines Magnetfeldsensors,

Fig. 2 die Abhängigkeit der Intensität von Fluoreszenzlicht, das von NV-Zentren eines Diamantkristalls erzeugt wird, von der Frequenz eines Mikrowellenfeldes, sowie

Fig. 3 ein mittels eines Lock-In-Verstärkers demoduliertes Signal in Abhängigkeit von der Frequenz des Mikrowellenfeldes.

In der folgenden Beschreibung der Zeichnungen werden für gleiche bzw. funktionsgleiche Bauteile identische Bezugszeichen verwendet.

Fig. 1 zeigt einen Magnetfeldsensor 1 (Magnetometer), der einen Kristall 2 aufweist, bei dem es sich um einen Diamantkristall handelt, der mit Farbzentren 2a in Form von NV-Zentren dotiert ist, die in Fig. 1 durch Punkte angedeutet sind. Der Magnetfeldsensor 1 weist einen Mikrowellengenerator 5 zum Einkoppeln eines Mikrowellenfeldes 5a in den Kristall 2 auf. Der Mikrowellengenerator 5 umfasst zu diesem Zweck einen Signalgenerator 3, der ein elektrisches Wechselfeld mit einer Leistung P_M erzeugt, das einem Mikrowellenkoppler 4 zugeführt wird.

Zur Bestimmung der Stärke eines Magnetfeldes B wird der Kristall 2 zusätzlich zu der Einkopplung des Mikrowellenfelds 5a mit Anregungslicht 6 einer Anregungslichtquelle 7 bestrahlt, die das Anregungslicht 6 mit einer Leistung P_A erzeugt. Das Anregungslicht 6 weist Wellenlängen im Bereich zwischen 500 nm und 600 nm auf. Bei der Bestrahlung der Farbzentren 2a emittieren diese Fluoreszenzlicht 8, das von einem Detektor 9 in Form einer Fotodiode detektiert wird. Eine Auswerteeinrichtung 10, die einen Lock-In-Verstärker 11 umfasst, dient zur Bestimmung der Stärke des Magnetfelds B in dem Kristall 2. Die Bestimmung des Magnetfeldes B erfolgt auf an sich bekannte Weise, vgl. beispielsweise den eingangs zitierten Artikel „Sensitivity Optimization for NV-Diamond Magnetometry“, von John F. Barry et al., der durch Bezugnahme in seiner Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

Um die optimalen Betriebsparameter für einen möglichst sensitiven Betrieb des Magnetfeldsensors 1 zu bestimmen, wird der Magnetfeldsensor 1 vor dem eigentlichen Messbetrieb in einem Kalibrationsbetrieb betrieben, bei dem mehrere

Schritte eines Kalibrationsverfahrens durchgeführt werden. Für die Durchführung des Kalibrationsbetriebs weist die Auswerteeinrichtung 10 eine Kalibrationseinrichtung 12 auf, bei der es sich typischerweise um eine geeignete Software und/oder Hardware bzw. um ein Computerprogrammprodukt handelt, das zur Durchführung der Verfahrensschritte des Kalibrationsverfahrens ausgebildet ist.

Das Kalibrationsverfahren umfasst folgende Schritte:

a) Automatisiertes Einstellen einer Mehrzahl von Werten mindestens eines die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors 1 beeinflussenden Betriebsparameters,
b) Automatisiertes Bestimmen eines Maßes für die Sensitivität η_B des Quantensensors bei der Mehrzahl von Werten des mindestens einen Betriebsparameters, sowie
c) Automatisiertes Auswählen eines für die Sensitivität η_B des Quantensensors optimalen Werts des mindestens einen Betriebsparameters. Das Auswählen des (mindestens einen) optimalen Werts erfolgt anhand des Maßes für die Sensitivität, das in Schritt b) bestimmt wurde.

Bei dem Kalibrationsverfahren werden automatisiert optimale Werte von Betriebsparametern bestimmt, bei denen die Sensitivität des Magnetfeldsensors 1 möglichst groß bzw. maximal ist. Im Anschluss an den Kalibrationsbetrieb kann der Magnetfeldsensor in einem Messbetrieb mit dem oder den optimierten Werten des mindestens einen Betriebsparameters betrieben werden, die in dem Kalibrationsbetrieb ausgewählt wurden. Die Kalibration des Magnetfeldsensors 1 in dem Kalibrationsbetrieb kann vollständig automatisiert erfolgen, d.h. eine manuelle Kalibration kann entfallen.

Die Betriebsparameter, für welche die Mehrzahl von Werten eingestellt werden, können in der Regel im Wesentlichen kontinuierlich variiert werden. Von den möglichen Werten des jeweiligen Betriebsparameters wird nacheinander eine Mehrzahl von Werten eingestellt, die innerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs des Betriebsparameters liegen. Die Werte können in dem vorgegebenen Wertebereich mit einer vorgegebenen Schrittweite festgelegt werden, dies ist aber nicht zwingend erforderlich.

Bei dem Verfahren kann ein zwei- oder mehrdimensionaler Parameterscan durchgeführt werden, bei dem in Schritt a) eine Mehrzahl von Werten eines ersten Betriebsparameters und eine Mehrzahl von Werten eines zweiten Betriebsparameters eingestellt werden und bei dem in Schritt c) ein optimaler Wert des ersten Betriebsparameters und ein optimaler Wert des zweiten Betriebsparameters ausgewählt werden. Bei den optimalen Werten der zwei (oder mehr) Betriebsparameter ist die Sensitivität des Magnetfeldsensors 1 maximal. Um den Kalibrationsprozess zu beschleunigen, kann in Schritt a) die Mehrzahl von Werten des ersten Betriebsparameters und die Mehrzahl von Werten des zweiten Betriebsparameters nach einem Teilfaktorplan eingestellt werden.

Alternativ können bei dem Verfahren die Schritte a) bis c) für einen ersten Betriebsparameter durchgeführt werden und die Schritte a) bis c) können nachfolgend unter Einstellung des ausgewählten optimierten Werts des ersten Betriebsparameters für einen zweiten Betriebsparameter durchgeführt werden. In diesem Fall wird zunächst eine erste Dimension bzw. ein erster Betriebsparameter optimiert und der optimale Parameterwert der ersten Dimension wird festgehalten. Von diesem optimierten Arbeitspunkt aus wird der Parameterwert der zweiten Dimension bzw. des zweiten Betriebsparameters optimiert.

Bei dem bzw. einem der Betriebsparameter kann es sich beispielsweise um einen Anregungslicht-Betriebsparameter des zur Anregung der Farbzentren 2a in den Kristall 2 eingestrahlten Anregungslichts 6 handeln, beispielsweise um die Leistung P_A des Anregungslichts 6 oder um einen Pulsparameter des Anregungslichts 6 beim gepulsten Betrieb des Magnetfeldsensors 1. Bei dem Betriebsparameter oder einem der Betriebsparameter kann es sich auch um einen Mikrowellen-Betriebsparameter P_M, MD, f_{MW} , … des in den Kristall 2 eingekoppelten Mikrowellenfeldes 5a handeln, beispielsweise um die Leistung P_M des Mikrowellenfeldes 5a, eine Modulationstiefe MD des Mikrowellenfeldes 5a, eine Modulationsfrequenz f_{MW} des Mikrowellenfeldes 5a oder Pulsparameter des Mikrowellenfeldes 5a bei gepulstem Betrieb des Magnetfeldsensors 1.

Bei dem Betriebsparameter oder einem der Betriebsparameter kann es sich auch um

einen Demodulator-Betriebsparameter, genauer gesagt um einen Verstärker-Betriebsparameter des Lock-In-Verstärkers 11 der Auswerteeinrichtung 10 des Magnetfeldsensors 1 handeln, beispielsweise um die Tiefpass-Bandbreite des Lock-In-Verstärkers, um die Tiefpass-Ordnung bzw. um die spektrale Filterantwort des Lock-In-Verstärkers oder um die Chunk-Breite.

Bei dem Betriebsparameter oder einem der Betriebsparameter kann es sich auch um einen diskreten Betriebsparameter des Magnetfeldsensors 1 handeln, beispielsweise um die Form der Modulation des Mikrowellenfelds, z.B. ob die Amplitude oder die Frequenz des Mikrowellenfelds 5a moduliert wird. Abhängig von der Bauform des Magnetfeldsensors 1 kann es sich auch um die Orientierung des Offset-Magnetfelds handeln. Ein weiterer diskreter bzw. binärer Betriebsparameter ist die Art des Resonanz-Drives oder ob das Hyperfeinstruktur(HFS)-Driving eingeschaltet oder ausgeschaltet ist.

Die Optimierung des Magnetfeldsensors 1 kann beispielsweise auf die nachfolgend beschriebene Weise erfolgen:

Zunächst wird als erster Betriebsparameter die Leistung P_A des Anregungslichts 6 optimiert und es wird ein optimierter Wert $P_{A,OPT}$ der Leistung P_A des Anregungslichts 6 bestimmt. Nachfolgend wird als zweiter Betriebsparameter die Leistung P_M des Mikrowellenfeldes 5a optimiert, d.h. es wird ein optimaler Wert $P_{M,OPT}$ der Leistung P_M des Mikrowellenfeldes 5a bestimmt. Es ist auch möglich, dass die Leistung P_A des Anregungslichts 6 und die Leistung P_M des Mikrowellenfeldes 5a in umgekehrter Reihenfolge optimiert werden. Auch können die Leistung P_A des Anregungslichts 6 und die Leistung P_M des Mikrowellenfeldes 5a gemeinsam in Form eines 2-dimensionalen Parameterscans, ggf. unter Verwendung eines Teilfaktorplans, optimiert werden. Ebenso können beide Parameter abwechselnd iterativ optimiert werden.

In einem nachfolgenden Schritt wird zunächst der Betriebsparameter der Modulationstiefe MD des Mikrowellenfeldes 5a optimiert, bevor in einem weiteren Schritt die Modulationsfrequenz f_{MW} des Mikrowellenfeldes 5a optimiert wird. Im Fall eines gepulsten Betriebs des Magnetfeldsensors 1 kann die Dauer, die Form und die

Abfolge der Pulse des Anregungslichts 6 und des Mikrowellenfeldes 5a optimiert werden. Nachfolgend können diejenigen Betriebsparameter optimiert werden, die einen geringeren Einfluss auf die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors 1 haben, beispielsweise die diskreten Betriebsparameter und die Verstärker-Parameter des Lock-In-Verstärkers 11.

Nachfolgend wird das automatisierte Bestimmen des Maßes für die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors 1 in Schritt b) des weiter oben beschriebenen Kalibrationsverfahrens im Einzelnen beschrieben.

Fig. 2 zeigt schematisch die Abhängigkeit der Intensität I des von dem Detektor 9 detektierten Fluoreszenzlichts 8 des Magnetfeldsensors 1 von der Frequenz f_{MW} des eingestrahlten Mikrowellenfeldes 5a. In Folge einer magnetischen Resonanz weist die Intensität I des Fluoreszenzlichts 8 ein Minimum M gegenüber einem Hintergrundwert I_B auf. Aus der Frequenz f_{min} des Minimums M ist dabei das Magnetfeld B am Ort des Kristalls 2 bestimmbar. Die wesentlichen Parameter umfassen den Fluoreszenzkontrast C_{det} und die Halbwertsbreite *FWHM* der Magnetresonanz sowie der Hintergrundwert I_B. Die Photon-Shot-Noise limitierte Sensitivität η_B, bzw. das kleinste theoretisch messbare Magnetfeld B_{min}, ergibt sich aus der Formel

$$B_{min} = \frac{\eta_B}{\sqrt{\tau}}$$

wobei τ die Integrationszeit ist. Die Photon-Shot-Noise limitierte Sensitivität η_B kann aus der in Fig. 2 gezeigten frequenzabhängigen Intensität I des Fluoreszenzlichts 8 durch einen Fit mit einer Lorentz-Resonanzkurve bestimmt werden.

Fig. 3 zeigt ein mittels eines Demodulators in Form eines Lock-In-Verstärkers 11 aus dem detektierten Fluoreszenzlicht 8 erzeugtes demoduliertes Signal V_{LIA} in Abhängigkeit von der Frequenz f_{MW}. Wie in Fig. 3 zu erkennen ist, weist das demodulierte Signal V_{LIA} eine dispersive Form auf und ist um die jeweilige Resonanzfrequenz f_{min} linear. Aus dem demodulierten Signal V_{LIA} kann die Nulldurchgangs-Steigung α des linearen Bereichs durch einen linearen Fit bestimmt werden. Die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors 1 kann anhand des demodulierten Signals V_{LIA} gemäß folgender Formel bestimmt werden:

$$\eta_B = \frac{V_{NSD}}{\gamma_{NV}\alpha},$$

wobei V_{NSD} die spektrale Rauschdichte (Noise Spectral Density) und γ_{NV} das gyromagnetische Verhältnis der NV-Zentren bezeichnen. Die Noise Spectral Density V_{NSD} ist die Standardabweichung des demodulierten Signals V_{LIA} geteilt durch die Wurzel der Noise-Equivalent-Power-Bandbreite des Tiefpass-Filters im Lock-In-Verstärker 11.

Das Maß für die Sensitivität η_B kann auf die in Zusammenhang mit Fig. 2 oder in Zusammenhang mit Fig. 3 beschriebene Weise bestimmt werden. Es ist auch möglich, als Maß für die Sensitivität η_B den Mittelwert aus den beiden in Fig. 2 und Fig. 3 bestimmten Messgrößen zu verwenden. Um einen möglichst schnellen Kalibrationsbetrieb zu realisieren, kann – insbesondere in bestimmten Parameterbereichen – als Maß für die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors 1 nur die spektrale Rauschdichte V_{NSD} des demodulierten Signals V_{LIA} und/oder die Nulldurchgangs-Steigung α des demodulierten Signals V_{LIA} bestimmt werden.

Nach dem Abschluss des Kalibrationsbetriebs wird der Magentfeldsensor 1 mit den optimalen Werten $P_{A,OPT}$, $P_{M,OPT}$, … im Messbetrieb betrieben. Nach der Kalibration kann in bestimmten Abständen die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors 1 bei dem ausgewählten optimalen Wert $P_{A,OPT}$, $P_{M,OPT}$, … des mindestens einen Betriebsparameters P_A, P_M, … erneut bestimmt und mit dem in dem Kalibrationsbetrieb bestimmten Maß für die Sensitivität η_B verglichen werden. Wenn sich herausstellt, dass sich die Sensitivität η_B des Magnetfeldsensors 1 um einen vorgegebenen Wert verschlechtert hat, kann eine Nachkalibrierung erfolgen, d.h. der Magnetfeldsensor 1 kann erneut im Kalibrationsbetrieb betrieben werden. Bei der Nachkalibrierung können die Wertebereiche für die Variation der Betriebsparameter deutlich kleiner gewählt werden und es kann auf ein lokales Optimum optimiert werden. Auch können aus den Daten, wie stark der optimale Betriebspunkt in Abhängigkeit von der Zeit variiert, ggf. Aussagen über den Zustand von Systemkomponenten, beispielsweise der Anregungslichtquelle 7, z.B. eine Drift des optimalen Laserarbeitspunkts, getroffen werden. Auf diese Weise kann eine Früherkennung eines ggf. erforderlichen Austauschs der Anregungslichtquelle 7 des

Magnetfeldsensors 1 oder von anderen Komponenten des Magnetfeldsensors 1 erfolgen.

Es versteht sich, dass das weiter oben beschriebene Verfahren zum Kalibrieren des Magnetfeldsensors 1 auch bei Quantensensoren durchgeführt werden kann, die zur Bestimmung von anderen Messgrößen als der Stärke des Magnetfelds B dienen, beispielsweise bei Quantensensoren, die zur Bestimmung der Temperatur, des Drucks, etc. ausgebildet sind. Anstelle eines Diamantkristalls mit NV-Zentren kann der Quantensensor auch einen anderen Kristall mit Farbzentren aufweisen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Kalibrieren eines Quantensensors, insbesondere eines Magnetfeldsensors (1), der einen Kristall (2) mit Farbzentren (2a), insbesondere einen Diamantkristall mit NV-Zentren, aufweist,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Quantensensor beim Kalibrieren in einem Kalibrationsbetrieb betrieben wird, der folgende Schritte umfasst:
a) Automatisiertes Einstellen einer Mehrzahl von Werten mindestens eines die Sensitivität (η_B) des Quantensensors beeinflussenden Betriebsparameters (P_A, P_M, MD, f_{MW}, …),
b) Automatisiertes Bestimmen eines Maßes für die Sensitivität (η_B) des Quantensensors bei der Mehrzahl von Werten des mindestens einen Betriebsparameters (P_A, P_M, MD, f_{MW}, …), sowie
c) Automatisiertes Auswählen eines für die Sensitivität (η_B) des Quantensensors optimalen Werts ($P_{A,OPT}$, $P_{M,OPT}$, …) des mindestens einen Betriebsparameters (P_A, P_M, MD, f_{MW}, …).

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem in Schritt a) eine Mehrzahl von Werten eines ersten Betriebsparameters (P_A) und eine Mehrzahl von Werten eines zweiten Betriebsparameters (P_M) eingestellt werden und bei dem in Schritt c) ein optimaler Wert ($P_{A,OPT}$) des ersten Betriebsparameters (P_A) und ein optimaler Wert ($P_{M,OPT}$) des zweiten Betriebsparameters (P_M) ausgewählt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem in Schritt a) die Mehrzahl von Werten des ersten Betriebsparameters (P_A) und die Mehrzahl von Werten des zweiten Betriebsparameters (P_M) nach einem Teilfaktorplan eingestellt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Schritte a) bis c) für einen ersten Betriebsparameter (P_A) durchgeführt werden und bei dem die Schritte a) bis c) nachfolgend unter Einstellung des ausgewählten optimierten Werts des ersten Betriebsparameters (P_A) für einen zweiten Betriebsparameter (P_M) durchgeführt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Schritte a) bis c) für mindestens zwei Betriebsparameter (P_A, P_M, MD, f_{MW}, …) iterativ durchgeführt werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein Anregungslicht-Betriebsparameter (P_A) von zur Anregung der Farbzentren (2a) in den Kristall (2) eingestrahltem Anregungslicht (6) ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6 , bei dem der Anregungslicht-Betriebsparameter eine Leistung (P_A) des Anregungslichts (6) oder ein Pulsparameter des Anregungslichts (6) beim gepulsten Betrieb des Quantensensors ist.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein Mikrowellen-Betriebsparameter (P_M, MD, f_{MW}, …) eines in den Kristall (2) eingekoppelten Mikrowellenfeldes (5a) ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem der Mikrowellen-Betriebsparameter ausgewählt ist aus der Gruppe umfassend: Leistung (P_M) des Mikrowellenfeldes (5a), Modulationstiefe (MD) des Mikrowellenfeldes (5a), Modulationsfrequenz (f_{MW}) des Mikrowellenfeldes (5a), modulierte Größe (Frequenz, Phase oder Amplitude) des Mikrowellenfeldes (5a) und Pulsparameter des Mikrowellenfeldes (5a) bei gepulstem Betrieb des Quantensensors.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein Demodulator-Betriebsparameter, insbesondere ein Verstärker-Betriebsparameter eines Lock-In-Verstärkers (11), einer Auswerteeinrichtung (10) des Quantensensors ist.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Betriebsparameter oder einer der Betriebsparameter ein diskreter, insbesondere binärer Betriebsparameter des Quantensensors ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 11, bei dem der erste Betriebsparameter ein Anregungslicht-Betriebsparameter, insbesondere eine Leistung (P_A) des Anregungslichts (6), ist und bei dem der zweite Betriebsparameter ein Mikrowellen-Betriebsparameter, insbesondere eine Leistung (P_M) des Mikrowellenfeldes (5a), ist, oder umgekehrt.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem nach dem Kalibrationsbetrieb das Maß für die Sensitivität (η_B) des Quantensensors bei dem ausgewählten optimalen Wert ($P_{A,OPT}$, $P_{M,OPT}$, ...) des mindestens einen Betriebsparameters (P_A, P_M, ...) erneut bestimmt und mit dem in dem Kalibrationsbetrieb bestimmten Maß für die Sensitivität (η_B) des Quantensensors verglichen wird, wobei anhand des Vergleichs bevorzugt über die Durchführung eines erneuten Kalibrationsbetriebs entschieden wird und/oder Veränderungen des baulichen Zustands, insbesondere eine Degradation, des Quantensensors erkannt werden.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Maß für die Sensitivität (η_B) des Quantensensors anhand eines spektralen Intensitätsverlaufs ($I(f_{MW})$) von beim Anregen der Farbzentren (2a) erzeugtem Fluoreszenzlicht (8) und/oder anhand eines aus dem spektralen Intensitätsverlauf ($I(f_{MW})$) des Fluoreszenzlichts (8) von einem Demodulator, insbesondere von einem Lock-In-Verstärker (11), erzeugten demodulierten Signals (V_{LIA}) bestimmt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, bei dem als Maß für die Sensitivität (η_B) des Quantensensors (1) eine spektrale Rauschdichte des demodulierten Signals (V_{LIA}) und/oder eine Nulldurchgangs-Steigung (α) des demodulierten Signals (V_{LIA}) bestimmt wird.

16. Verfahren nach Anspruch 14, bei dem als Maß für die Sensitivität (η_B) des Quantensensors (1) ein Kontrast (C_{det}) und/oder eine Breite (FWHM) mindestens einer Resonanz im spektralen Intensitätsverlauf ($I(f_{MW})$) des Fluoreszenzlichts (8) und/oder eine Höhe der Grundlinie des spektralen Intensitätsverlaufs ($I(f_{MW})$) des Fluoreszenzlichts (8) bestimmt wird.

17. Quantensensor (1), insbesondere Magnetfeldsensor, umfassend:
einen Kristall (2) mit Farbzentren (2a), insbesondere ein Diamantkristall mit NV-Zentren,
eine Anregungslichtquelle (7) zur Einstrahlung von Anregungslicht (6) in den Kristall (2),
einen Mikrowellengenerator (5) zum Einkoppeln eines Mikrowellenfelds (5a) in den Kristall (2),
einen Detektor (9) zur Detektion von Fluoreszenzlicht (8), das beim Anregen der Farbzentren (2a) emittiert wird, sowie
eine Auswerteeinrichtung (10) zur Bestimmung mindestens einer Messgröße, insbesondere eines Magnetfeldes (B), anhand des detektierten Fluoreszenzlichts (8), wobei die Auswerteeinrichtung (10) einen Demodulator, bevorzugt in Form eines Lock-In-Verstärkers (11), aufweist,
gekennzeichnet durch
eine Kalibrationseinrichtung (12), die zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche ausgebildet ist.