

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
15. August 2024 (15.08.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/165108 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G06N 10/20 (2022.01) G06N 10/40 (2022.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2024/100098

(22) Internationales Anmeldedatum:
05. Februar 2024 (05.02.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 102 767.0
06. Februar 2023 (06.02.2023) DE

(71) Anmelder: **QUANTUM TECHNOLOGIES GMBH**
[DE/DE]; IP-Management, Alte Messe 6, 04103 Leipzig (DE).

(72) Erfinder: **MEIJER, Jan Berend**; Hirschgraben 28, 44892 Bochum (DE). **MENDT, Matthias**; Kantstr. 23, 04275 Leipzig (DE). **GRUNDMANN, Marius**; Trufanowstraße 26, 04105 Leipzig (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: DATABASE-MANAGED GATE CONTROL OF A QUANTUM COMPUTER BASED ON NV CENTRES AND STRONGLY AND WEAKLY COUPLED NUCLEAR SPINS OF NEIGHBOURING ATOMIC NUCLEI

(54) Bezeichnung: DATENBANK GESTEUERTE GATTER-STEUERUNG EINES QUANTENCOMPUTERS BASIEREN AUF NV-ZENTREN UND STARK UND SCHWACH GEKOPPELTEN NUKLEAREN SPINS BENACHBARTER ATOMKERNE

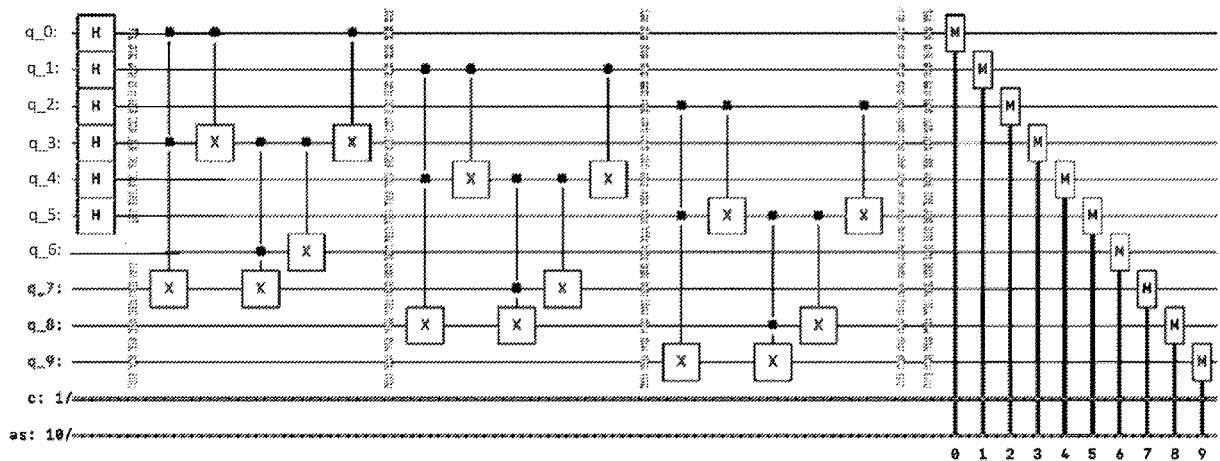


Fig. 10

(57) Abstract: The invention relates to a quantum computer which comprises NV centres in diamond as quantum bits and which comprises nuclear spins strongly bound to NV centres of atomic nuclei strongly coupled to these NV centres as nuclear quantum bits, hereinafter referred to as strong nuclear quantum bits, and which comprises nuclear spins weakly bound to NV centres of atomic nuclei weakly coupled to these NV centres as nuclear quantum bits, hereinafter referred to as weak nuclear quantum bits. The resonance energy for the coupling of these weakly coupled nuclear spins of these atomic nuclei that are weakly coupled to the corresponding NV centre depends only weakly on the particular spin state of the electron configuration of the respective NV centre that is weakly coupled to this nuclear spin. The quantum computer controls nuclear spins that are weakly bound to an NV centre differently than nuclear spins that



WO 2024/165108 A1

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— hinsichtlich der Identität des Erfinders (Regel 4.17 Ziffer i)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

are strongly bound to the NV centre. For this purpose, it preferably has a database of nuclear quantum bits, which provides information as to whether it is a strongly or weakly coupled nuclear quantum bit.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung richtet sich auf einen Quantencomputer, der NV-Zentren in Diamant als Quantenbits umfasst und der stark an NV-Zentren gebundene nukleare Spins stark an diese NV-Zentren gekoppelter Atomkerne als nukleare Quantenbits, die im Folgenden als starke nukleare Quantenbits bezeichnet, umfasst und der schwach an NV-Zentren gebundene nukleare Spins schwach an diese NV-Zentren gekoppelter Atomkerne als nukleare Quantenbits, im Folgenden als schwache nukleare Quantenbits bezeichnet, umfasst. Die Resonanzenergie für die Kopplung dieser schwach gekoppelten nuklearen Spins dieser schwach an das jeweilige NV-Zentrum gekoppelten Atomkerne hängt dabei nur schwach von dem jeweiligen Spinzustand der Elektronenkonfiguration des jeweils mit diesem nuklearen Spin schwach gekoppelten NV-Zentrums ab. Der Quantencomputer steuert schwach an ein NV-Zentrum gebundene nukleare Spins anders an als stark an das NV-Zentrum gebundene nukleare Spins. Hierzu verfügt er bevorzugt über eine Datenbank der nuklearen Quantenbit, die eine Information bereithält, ob es sich um ein stark oder schwach gekoppeltes nukleares Quantenbit handelt.

Datenbank gesteuerte Gatter- Steuerung eines Quantencomputers basieren auf NV-Zentren und stark und schwach gekoppelten nuklearen Spins benachbarter Atomkerne

Zur Priorität

Diese Anmeldung nutzt die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 10 2023 102 767.0 vom 06.02.2023.

Feld der Erfindung

10 Die Erfindung richtet sich auf einen Quantencomputer, der NV-Zentren in Diamant als Quantenbits umfasst und der stark an NV-Zentren gebundene nukleare Spins stark an diese NV-Zentren gekoppelter Atomkerne als nukleare Quantenbits, die im Folgenden als starke nukleare Quantenbits bezeichnet, umfasst und der schwach an NV-Zentren gebundene nukleare Spins schwach an diese NV-Zentren gekoppelter Atomkerne als nukleare Quantenbits, im Folgenden als schwache nukleare

15 Quantenbits bezeichnet, umfasst. Die Resonanzenergie für die Kopplung dieser schwach gekoppelten nuklearen Spins dieser schwach an das jeweilige NV-Zentrum gekoppelten Atomkerne hängt dabei nur schwach von dem jeweiligen Spinzustand der Elektronenkonfiguration des jeweils mit diesem nuklearen Spin schwach gekoppelten NV-Zentrums ab. Der Quantencomputer steuert schwach an ein NV-Zentrum gebundene nukleare Spins anders an als stark an das NV-Zentrum gebundene nukleare

20 Spins. Dabei bedeutet eine schwache Kopplung zwischen dem Elektronenspin der Elektronenkonfiguration eines NV-Zentrums und dem nuklearen Spin eines Atomkerns eines nuklearen Quantenbits, dass die Kopplungsfrequenz niedriger als 10 MHz (B), und/oder niedriger als 5MHz und/oder niedriger als 3MHz und/oder niedriger als 1,5MHz ist. Dabei ist die Koppelfrequenz besonders bevorzugt kleiner als 3MHz.

Allgemeine Einleitung

Aus der DE 10 2020 008 157 B3 ist ein Quantencomputer auf Basis von NV-Zentren bekannt. Aus der DE 10 2022 109 592 A1 ist eine Quantencomputerüberwachungsvorrichtung für einen solchen Quantencomputer bekannt. Aus der DE 10 2022 112 269 A1 ist ein mobiler Quantencomputer
5 bekannt.

Diese Schriften offenbaren jedoch nicht eine optimale Ansteuerung schwach gekoppelter nuklearer Spins durch die NV-Zentren und eine optimale Ansteuerung stark gekoppelter nuklearer Spins durch die NV-Zentren.

Aufgabe

10 Dem Vorschlag liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Lösung für die Ansteuerung der Quantenbits und nuklearen Quantenbits eines Quantencomputers auf Basis von NV-Zentren anzugeben.

Diese Aufgabe wird durch eine unabhängigen Ansprüche gelöst. Weitere Ausgestaltungen sind Gegenstand von Unteransprüchen.

Lösung der Aufgabe einer Gatter Steuerung von NV-Zentren und nuklearen Spins, die mit diesen verkoppelt sind

Im Sinne des hier offengelegten Dokuments bezeichnet das NV-Zentrum die Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums. Der nukleare Spin des Stickstoffatoms des NV-Zentrums wird separat benannt.

5 Kern des Lösungsvorschlags

Der hier vorgelegte Vorschlag betrifft einen Quantencomputer, der NV-Zentren in Diamant als Quantenbits umfasst. Des Weiteren umfasst der Quantencomputer stark an NV-Zentren gebundene nukleare Spins stark an diese NV-Zentren gekoppelter Atomkerne als nukleare Quantenbits, die das hier vorgelegte Dokument im Folgenden als starke nukleare Quantenbits bezeichnet. Außerdem

10 umfasst der der Quantencomputer schwach an NV-Zentren gebundene nukleare Spins schwach an diese NV-Zentren gekoppelter Atomkerne als nukleare Quantenbits, im Folgenden in dem hier vorgelegten Dokument als schwache nukleare Quantenbits bezeichnet. Die Resonanzenergie für die Kopplung dieser schwach gekoppelten nuklearen Spins dieser schwach an das jeweilige NV-Zentrum gekoppelten Atomkerne hängt dabei definitionsgemäß nur schwach von dem jeweiligen Spinzustand

15 der Elektronenkonfiguration des jeweils mit diesem nuklearen Spin schwach gekoppelten NV-Zentrums ab. Vorzugsweise ist der Quantencomputer dazu eingerichtet, einen SWOP des Quantenzustands eines NV-Zentrums mit dem Quantenzustand eines schwach an dieses NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits unter Hartmann-Hahn Bedingungen mittels eines Mikrowellenpulses zur Ansteuerung dieses NV-Zentrums durchzuführen. Des Weiteren

20 ist vorzugsweise der Quantencomputer dazu eingerichtet, einen SWOP des Quantenzustands eines NV-Zentrums mit dem Quantenzustand eines stark an dieses NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits mittels eines Radiowellenpulses unter Nutzung der starken Kopplung zwischen diesem NV-Zentrum und dem stark gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits durchzuführen. Hierzu umfasst der Quantencomputer Mittel zur Erzeugung des

25 Radiowellenpulses und/oder des Mikrowellenpulses, der auf ein oder mehrere NV-Zentren als Quantenbit und/oder ein oder mehrere nukleare Spins als nukleare Quantenbits einwirkt. Außerdem umfasst der vorgeschlagene Quantencomputer Mittel zur Einstellung der magnetischen Flussdichte (B) zur Erfüllung der Hartmann-Hahn Bedingung. Für eine Formatierung des Quantenzustands des Quantencomputers umfasst der Quantencomputer vorzugsweise eine

30 Lichtquelle zur Bestrahlung der NV-Zentren mit Pumpstrahlung der Pumpstrahlungswellenlänge. Für seinen Betrieb umfasst der Quantencomputer bevorzugt eine Steuervorrichtung mit zumindest einen

Speicher. Vorzugsweise ist zumindest zeitweise in dem Speicher (RAM, NVM) ein Quantencomputerprogramm mit OP-Codes und/oder mit Quanten-OP-Codes als OP-Codes abgelegt, um in der Lage zu sein, ein Quantencomputerprogramm ausführen zu können. Die Steuervorrichtung (μC) ist vorzugsweise dazu eingerichtet, das Quantencomputerprogramm im Speicher beispielsweise durch Abruf der OP-Codes und/oder Quanten-Op-Codes aus dem Speicher abzuarbeiten und so Quantencomputerberechnungen durchführen zu können. Für eine zielgerichtete und zeitgerechte Ansteuerung der NV-Zentren als Quantenbits und der nuklearen Spins als nuklearen Quantenbit ist typischerweise die Steuervorrichtung dazu eingerichtet, die Lichtquelle und die Mittel zur Einstellung der magnetischen Flussdichte (B) und die Mittel zur Erzeugung des Radiowellenpulses und/oder des Mikrowellenpulses in Abhängigkeit von den OP-Codes und/oder Quanten-OP-Codes des Quantencomputerprogramms im Speicher zu steuern. Typischerweise umfassen die OP-Codes und/oder Quanten-OP-Codes im Speicher Befehle und/oder Befehlssequenzen für die Manipulation eines stark gebundenen nuklearen Spins mittels einer ersten quantencomputerimplementierten Methode (insbesondere Methode b oder Methode c). Des Weiteren umfassen typischerweise die OP-Codes und/oder Quanten-OP-Codes im Speicher (Befehle und/oder Befehlssequenzen für die Manipulation eines schwach gebundenen nuklearen Spins mittels einer zweiten quantencomputerimplementierten Methode (insbesondere Methode a) umfassen. Dabei ist typischerweise die erste Methode von der zweiten Methode verschieden. Hier greift das hier vorgelegte Dokument auf die nachfolgenden Abschnitte „Quantencomputerimplementiertes Verfahren zur Kopplung schwach gekoppelter nuklearer Spins an ein NV-Zentrum“ und „Quantencomputerimplementiertes Verfahren zur Kopplung stark gekoppelter nuklearer Spins an ein NV-Zentrum“ vor, in denen das hier vorgelegte Dokument diese quantencomputerimplementierten Verfahren näher erläutert. Ein bzw. der Speicher der Steuervorrichtung hält vorzugsweise für einen oder mehrere oder alle nuklearen Spins, bei denen der Quantencomputer dazu eingerichtet ist, diese als nukleare Quantenbits zu nutzen, neben der Resonanzfrequenz zur Kopplung an ein NV-Zentrum als erster Information oder einer funktionsäquivalenten ersten Information wie beispielsweise der korrespondierenden Periodendauer eine zusätzliche, zweite Information, insbesondere als Flag, bereit. Diese zusätzliche zweite Information gibt an, ob es sich um einen stark an ein NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin des betreffenden nuklearen Quantenbits oder einen schwach an das NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin des betreffenden nuklearen Quantenbits handelt. Die Steuervorrichtung des Quantencomputers verwendet dann in Abhängigkeit von dieser zusätzlichen zweiten Information im Falle einer Manipulation des nuklearen Quantenbits die erste Methode oder

die zweite Methode für die Manipulation des nuklearen Quantenbits. Dies beschleunigt die Abarbeitung des Programmcodes des Quantencomputerprogramms im Speicher der Steuervorrichtung des Quantencomputers. Der vorgeschlagene Quantencomputer ermöglicht die zeiteffiziente und schnelle Nutzung schwach und stark gebundener nuklearer Quantenbits.

5 In einer ersten Variante des Quantencomputers hält der Speicher der Steuervorrichtung des Quantencomputers für einen oder mehrere oder alle nuklearen Spins, bei denen der Quantencomputer dazu eingerichtet ist, diese als jeweilige nukleare Quantenbits zu nutzen, neben der Resonanzfrequenz zur Kopplung an ein NV-Zentrum als erster Information oder einer funktionsäquivalenten ersten Information wie beispielsweise der korrespondierenden Periodendauer
10 und neben der zusätzlichen zweiten Information, die angibt, ob es sich um einen stark an ein NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin oder einen schwach an das NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin handelt, eine dritte zusätzliche Information, insbesondere einen Index eines nuklearen Quantenbits bereit, die angibt, an welches NV-Zentrum der betreffende nukleare Spin des betreffenden nuklearen Quantenbits gebunden ist. Dies hat den Vorteil, das bei Angabe eines
15 Indexes eines nuklearen Spins bzw. eines nuklearen Quantenbits im Source-Code oder im ausführbaren Code des Quantencomputerprogramms die Steuervorrichtung des Quantencomputers bei der Ausführung eines quantencomputerimplementierten Verfahren zur Manipulation dieses nuklearen Spins bzw. dieses nuklearen Quantenbits das NV-Zentrum identifizieren kann, mit dem dieser nukleare Spin koppelbar und/oder gekoppelt ist und ermitteln kann mit welchen Signalen
20 und/oder Signalfolgen und mit welchen Signalparametern zum ersten das zugehörige NV-Zentrum manipuliert werden kann, um letztlich den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit über die Manipulation dieses NV-zentrums als elektronisches Quantenbit indirekt im Rahmen der Kopplung zu manipulieren.

In einer zweiten Variante des Quantencomputers umfasst der Inhalt des Speichers der
25 Steuervorrichtung zumindest zeitweise eine Datenbank, die wiederum Datensätze umfasst. Vorzugsweise umfasst die Datenbank ein oder mehrere erste Datensätze, die zumindest als erste Informationen einen Index des NV-Zentrums (kann identisch mit dem Index eines elektronischen Quantenbits sein) und einen Wert einer Resonanzfrequenz zur Manipulation des Quantenzustands des NV-Zentrums umfassen. Diese ersten Datensätze umfassen also bevorzugt erste auf den Spin der
30 Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums bzw. das elektronische Quantenbit bezogene Informationen über die NV-Zentren bzw. elektronischen Quantenbits. Vorzugsweise umfasst die

Datenbank auch zweite Datensätze. Diese ein oder mehreren zweiten Datensätze der Datenbank umfassen vorzugsweise zumindest als zweite auf den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit bezogene Informationen einen Index des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits und eine Resonanzfrequenz zur Kopplung des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits an ein NV-Zentrum und eine zusätzliche zweite Information, ob der nukleare Spin bzw. das nukleare Quantenbit stark oder schwach an das NV-Zentrum gebunden ist umfassen. Die Steuervorrichtung verwendet in Abhängigkeit von dieser weiteren zweiten auf den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit bezogene Information im Datensatz der Datenbank für einen nuklearen Spin bzw. ein nukleares Quantenbit im Falle einer Manipulation nuklearer Spins bzw. des nuklearen Quantenbits die erste Methode oder die zweite Methode für die Manipulation des nuklearen Spins bzw. des nuklearen Quantenbits verwendet. Die Datenbankstruktur der Daten und die Verwendung eines Flags haben den Vorteil, dass die Abarbeitung des Quantencomputerprogrammcodes im Speicher der Steuervorrichtung durch die Steuervorrichtung beschleunigt wird.

In einer dritten Variante des Quantencomputers umfassen darüber hinaus ein oder mehrere weitere Datensätze zumindest als zweite auf den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit bezogene Informationen einen Index des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits und eine Resonanzfrequenz zur Kopplung des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits an ein NV-Zentrum und eine zusätzliche zweite Information, ob der nukleare Spin bzw. das nukleare Quantenbit stark oder schwach an das NV-Zentrum gebunden ist und eine zusätzliche dritte Information, insbesondere den Index des NV-Zentrums, darüber umfasst, mit welchem NV-Zentrum dieser nukleare Spin koppelbar ist

In einer vierten Variante des Quantencomputers umfassen darüber hinaus ein oder mehrere weitere Datensätze zumindest als zweite auf den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit bezogene Informationen einen Index des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits und eine Resonanzfrequenz zur Kopplung des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits an ein NV-Zentrum und eine zusätzliche zweite Information, ob der nukleare Spin bzw. das nukleare Quantenbit stark oder schwach an das NV-Zentrum gebunden ist und eine zusätzliche dritte Information, insbesondere den Index des NV-zentrums, darüber umfasst, mit welchem NV-Zentrum dieser nukleare Spin koppelbar ist und eine zusätzliche vierte Information darüber umfasst, auf welcher Position und/oder in welcher Gruppe von Positionen dieser zumindest eine Atomkern des nuklearen Spins bzw. des

nuklearen Quantenbits sich im Kristallgitter relativ zur Position des zugeordneten NV-Zentrums im Kristallgitter befindet.

In einer fünften Variante des Quantencomputers ist der Quantencomputer vorzugsweise dazu eingerichtet, dass der Quantencomputer für das Auslesen der nuklearen Quantenzustände von n nuklearen Spins von n Atomkernen von n nuklearen Quantenbits, die an ein NV-Zentrum gekoppelt sind, 2^n CROT-Gatter auszuführen, um Kombinationen von Quantenzuständen zu überprüfen. Dabei ist vorzugsweise n eine ganze positive Zahl größer 2. Der Quantencomputer ist in dieser Variante dabei vorzugsweise dazu eingerichtet, den NV-Übergang des NV-Zentrums zu detektieren, wenn sich die n nuklearen Spins der n Atomkerne Kerne der n nuklearen Quantenbits in einem dieser 2^n Kombinationen von Quantenzuständen dieser n Quantenbits befinden.

Definition des Begriffs Gatter

Das hier vorgelegte Dokument definiert den Begriff „Gatter“ im Sinne des hier vorgelegten Dokuments wie folgt:

Gatter im Sinne des hier vorgelegten Dokuments sind Methoden in Form von Prozessschrittfolgen, die zur Manipulation auslesbarer Zustände mit dem Ziel dienen, vollständige Turingmaschinen aus zeitlich sequentiellen oder parallelen Abfolgen dieser Gatter aufzubauen zu können. Eine Turing-Maschine im Sinne des hier vorgelegten Dokuments ist somit eine Abfolge von solchen Gattern, die ein Quantencomputer ausführt und womit der Quantencomputer den Zustand von Quantenbits und/oder nuklearen Quantenbits des Quantencomputers manipuliert und/oder ausliest.

Eine solche vollständige Turingmaschine auf Basis eines solchen Quantencomputers im Sinne des hier vorgelegten Dokuments erlaubt entsprechend der Turing-Church Vermutung die Lösung aller berechenbare Aufgaben. Klassische Computer sind Turing vollständig. Nach dem Gottesman-Knill Theorem ist ein Quanten Computer Turing vollständig, wenn folgende unitäre Gatter realisiert werden können:

1. Clifford Gatter (Paul: X,Y,Z),
2. H Phasengatter S (T) und
3. das 2 Quantenbitgatter CNOT.

Ein Clifford Gatter ist eine Gruppe von Gattern V (V sei Element der Menge der Clifford Gatter) mit der Eigenschaft $U=VWV^+$ mit U und W ebenfalls als Element der Menge der Clifford Gatter.

Im Quantencomputing und in der Quanteninformationstheorie sind die Clifford-Gatter die Elemente der Clifford-Gruppe, einer Menge mathematischer Transformationen, die die n-Qubit-Pauli-Gruppe normalisieren, d. h. Tensor-Produkte von Pauli-Matrizen durch Konjugation auf Tensor-Produkte von Pauli-Matrizen abbilden. Der Begriff wurde von Daniel Gottesman eingeführt und ist nach dem
 5 Mathematiker William Kingdon Clifford benannt.[1] Quantenschaltungen, die nur aus Clifford-Gattern bestehen, können aufgrund des Gottesman-Knill-Theorems effizient mit einem klassischen Computer simuliert werden.

Dabei sind die Clifford Gatter (Paul: X,Y,Z) redundant. Beispielsweise gilt $X=HZH^+$.

Man kann also auf ein Clifford Gatter (Paul: X,Y,Z) verzichten. Der Stand der Technik bezeichnet diese
 10 drei Gatter 1 bis 3 auch als universelle Gatter. Der Quantencomputer kann diese elementaren Gatter mittels Operationen, die Spin-Rotationen induzieren, nachbilden. Hierbei ist allerdings das Folgende zu beachten:

- a) Das X Gatter stellt eine Spiegelung mit einer positiven Abbildungsdeterminante dar. Der NV-
 15 Zentren basierende Quantencomputer kann kein X-Gatter realisieren. Das X-Gatter ist eine der Pauli-Matrizen, die den Spin um 180° spiegelt. (im Folgenden als Quantenbit-Flip bezeichnet) Allerdings kann der Quantencomputer ein iX -Gatter realisieren. D.h. bei jeder Gatteroperation kommt eine Phasenverschiebung von 90° hinzu (komplexer Faktor i) Bei einem NV-Zentrum führt der Quantencomputer das X-Gatter dadurch aus, dass er ein Mikrowellensignal mit der Resonanzenergie (Resonanzfrequenz) einer definierten zeitlichen
 20 Länge und Amplitude (Rabi-Frequenz= $\gamma_{NV} B$ mit γ_{NV} als gyromagnetische Moment des NV-Zentrums und B die magnetische Komponente der elektromagnetischen Welle, die senkrecht zu der Richtung des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums wirkt) Ein solcher π -Puls hat dann die zeitliche Länge $1/(2\gamma_{NV} B)$ (Das entspricht 180°).
- b) Rotationen besitzen immer eine negative Determinante. Die Rotationen erzeugen also eine
 25 zusätzliche allgemeine Phase, die aber keine Bedeutung besitzt, weil sie nicht messbar sind. Allerdings muss während der Rechnung diese Phase berücksichtigt werden, da sich die Phasen addieren können. Das CROT-Gatter ist eine unitäre Matrize, die den Spin um einen Winkel θ u eine Achsenfläche im vierdimensionalen Raum der Bloch-Kugel dreht. (im Folgenden als Quantenbit-Rotation oder einfach nur CROT bezeichnet) Auch hier kommt bei
 30 jeder Gatteroperation eine Phasenverschiebung hinzu. Bei einem NV-Zentrum führt der

Quantencomputer das CROT-Gatter dadurch aus, dass er ein Mikrowellensignal mit der Resonanzenergie (Resonanzfrequenz) einer definierten zeitlichen Länge und Amplitude ($\gamma_{NV} B$ mit γ_{NV} als gyromagnetische Moment des NV-Zentrums und B die magnetische Komponente der elektromagnetischen Welle, die senkrecht zu der Richtung des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums wirkt) Ein solcher θ -Puls hat dann die zeitliche Länge $1/(2\gamma_{NV} B)$ ($\theta/180^\circ$). Wird die Phase der Mikrowellenansteuerung (bei Kernspins der Radiofrequenzansteuerung) um 90° verschoben, so wechselt die CROT-Ansteuerung, wenn sie zuvor eine Drehung um die X-Achse bewirkte, zu einer Ansteuerung, die eine Drehung um die Y-Achse bewirkt. Die Mikrowellenphasenlage der Mikrowellenansteuerung bestimmt also die Drehachse einer CROT-Operation. Bei nuklearen Spins bestimmt die Radiowellenphasenlage die Drehachse einer CROT-Operation für den nuklearen Spin.

Ein Rotation um 180° in der x-Achse ist somit kein X sondern ein iX Gatter! Genau ergibt sich ein CROT nicht als CNOT sondern als CiNOT. Um einen CNOT zu definieren muss ein zusätzlicher $Z(\pi/2)$ (Clifford Gatter (Paul,Z) mit zeitlicher Länge $\pi/2$) vor oder nach der Ausführung des CROT-Befehls eingefügt werden und auf den konditionellen Partnerquantenbit wirken. Das konditionelle Partnerquantenbit eines NV-Zentrums kann ein nuklearer Spin in der Umgebung des NV-Zentrums sein oder ein anderes NV-Zentrum in der Umgebung des NV-Zentrums sein.

Ein beispielhaftes System zur Erklärung kann beispielsweise ein erstes NV-Zentrum und ein zweites NV-Zentrum und ein drittes NV-Zentrum umfassen, wobei das erste NV-Zentrum und das dritte NV-Zentrum wiederum jeweils mit jeweiligen nuklearen Spins koppeln können, die genau einem dieser beiden beispielhaften NV-Zentren zugeordnet sind. Das erste NV-Zentrum und das zweite NV-Zentrum und das dritte NV-Zentrum sind als lineare Kette angeordnet, wobei das erste NV-Zentrum mit dem dritten NV-Zentrum nur über das zweite NV-Zentrum als Ancilla-bitt koppeln kann und nicht direkt koppeln kann. Wird nun durch eine Quantenoperation der Quantenzustand des zweiten NV-Zentrums in den Zustand $m=0$ gebracht, so entkoppelt diese Quantenoperation das erste NV-Zentrum von dem dritten NV-Zentrum. Wird durch eine andere Quantenoperation der Quantenzustand des zweiten NV-Zentrums in den Zustand $m=+1$ oder $m=-1$ gebracht, so können Quantenoperation das erste NV-Zentrum mit dem dritten NV-Zentrum koppeln.

Eine CROT-Operation um die Z-Achse kann durch eine $-\pi/2$ -Drehung um die Y-Achse und dann ein X-Gatte und dann eine $+\pi/2$ -Drehung um die Y-Achse realisiert werden.

Zu Beginn ist nur die Z-Achse durch die Flussdichte des Magnetfelds festgelegt. Mit der erste CROT-Operation legt der Quantencomputer die X-Achse für das NV-Zentrum willkürlich fest. Diese Referenz ist zwar frei wählbar, muss während einer Quantenberechnung aber Referenz (Phasenstabilität) beibehalten werden.

- 5 Neben der Ausführung dieser Gatter muss der Quantencomputer seine Quantenbits und seine nuklearen Quantenbits zu Beginn einer Berechnung jeweils in einem definierten Anfangszustand versetzen und nach dem Ausführen aller Operationen der Quantencomputer seine relevanten Quantenbits und/oder seine relevanten nuklearen Quantenbits. Sind alle drei Bedingungen erfüllt, kann dieser Quantencomputer beliebige Rechnungen durchführen und gilt dann als Turing-
10 vollständig.

Das Ziel jedes universellen Quantencomputers ist daher die universellen Gatter, so wie die Bedingungen zur Initialisierung und Auslesen der Quantenbits und nuklearen Quantenbits mit hoher Güte zu erreichen.

15 Grundlagen

Der Hamiltonian für NV-Zentren

Der Hamiltonian für NV-Zentren als Quantenbits lautet:

$$H = D \cdot m^2 + \gamma_{NV} \cdot m \cdot B$$

Hierbei stehen

- D für die Nullfeldaufspaltung,
- γ_{NV} für das gyromagnetisches Verhältnis des NV-Zentrums,
- m für die Quantenzahl,
- B für ein externes, auf das NV-Zentrum einwirkendes Magnetfeld in NV-Achse.

- 20 Ist sich das externe auf das NV-Zentrum einwirkende Magnetfeld nicht in Richtung der NV-Achse ausgerichtet, so ist typischerweise m keine gute Quantenzahl aufgrund von Interband-Mixing.

Der Hamiltonian für Atomkerne als nukleare Quantenbits

Der Hamiltonian für Atomkerne als nukleare Quantenbits umfasst einen Zeeman-Anteil und ggf. einen Quadrupolanteil (z.B. ^{14}N). Der Hamiltonian für Atomkerne als nukleare Quantenbits lautet:

$$H = \gamma * I * B + Q * I^2 + H_{\text{NV-Kern}}$$

Hierbei stehen

- γ für das gyromagnetisches Verhältnis,
- I für die magnetische Quantenzahl,
- B für das externe, auf den nuklearen Spin einwirkende Magnetfeld,
- Q Für den Quadrupol Anteil unabhängig von B
- $H_{\text{NV-Kern}}$ Bestimmt die Kopplungsstärke zwischen Kern und NV durch Hyperfein-WW. Der Hyperfeinterm kann in einen parallelen Anteil und senkrechten Anteil gespalten werden. Für die Verschiebung ist nur der parallele Term wichtig.

- 5 Das hier vorgelegte Dokument bezeichnet zur besseren Unterscheidung für Atomkerne deren magnetische Quantenzahl mit dem hier vorgelegten Dokument mit I .

Zur magnetischen Quantenzahl m des negative geladenen NV-Zentrums

Die magnetische Quantenzahl m des negative geladenen NV- Zentrums, kann die drei Werte $-1, 0, +1$ annehmen. Für $m=0$ ist erzeugt das NV-Zentrum kein Magnetfeld! Der Zustand NV_0 hat nur einen

- 10 Single Zustand.

Das hier vorgelegte Dokument benennt als typischen Wert des gyromagnetischen Verhältnisses $\gamma_{\text{NV}} = 28,130 \text{ MHz/mT}$. Das hier vorgelegte Dokument benennt als typischen Wert der Nullfeldaufspaltung $D = 2,87 \text{ GHz}$.

Magnetische Quantenzahl I der Kerne:

- 15 Die NV-Zentren sind in einen Diamantkristall eingebettet der im Wesentlichen Kohlenstoffatome in Form von im Wesentlichen ^{12}C -Isotopen ohne Spin und ohne magnetisches Moment umfasst. Einige wenige Atome im Diamantgitter des Diamantkristalls sind vorzugsweise ^{13}C -Isotope. ^{13}C -Isotope haben die Spin $-1/2$ bzw. $+1/2$. Die ^{13}C -Isotope haben typischerweise kein Quadrupolmoment. Für $m=0$ ist daher bei ^{13}C -Atomkernen, die stark mit dem NV-Zentrum gekoppelt sind, und einem
- 20 geringen externen Magnetfeld die Zeeman Komponente durch das externe magnetische Feld gegenüber der Hyperfein-Wechselwirkung vernachlässigbar. Im Sinne des hier vorgelegten Dokuments ist ein geringes externes Magnetfeld ein Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte

am Ort des betreffenden nuklearen Quantenbits, als am Ort des betreffenden nuklearen Spins, kleiner als 100mT. Da der Atomkern der eines Quantenbits nur einen Dipolanteil besitzt, zeigt der Atomkern des nuklearen Quantenbits typischerweise keine Wechselwirkung mit dem ihm zugeordneten mit dem NV-Zentrum, wenn das NV-Zentrum sich in einem Zustand befindet, in dem es die Quantenzahl $m=0$ aufweist.

Das hier vorgelegte Dokument benennt als typischen Wert für das gyromagnetisches Verhältnis eines Atomkerns eines ^{13}C -Isotops, das der Quantencomputer als nukleares Quantenbit nutzt, $\gamma_{^{13}\text{C}}=10,7 \text{ kHz/mT}$.

Das hier vorgelegte Dokument benennt als typischen Wert für den Quadrupol Anteil Q unabhängig von B eines ^{13}C -Isotops, das der Quantencomputer als nukleares Quantenbit nutzt, $Q=0$.

Der Übergang der Zustände z.B. $m=0$ nach $m=1$ wird durch die Rabi-Frequenz Ω beschrieben. Dabei gilt:

$$\Omega = \gamma * B_0.$$

Hierbei ist B_0 die magnetischen Komponente der in das jeweilige Quantenbit des Quantencomputer eingestrahlten elektromagnetischen HF-Welle (englisch: RF) mit der Resonanzfrequenz, die sich aus der Aufspaltung der Zustände ergibt. Dieses Feld ist ein Vektorfeld. Der Quantencomputer muss die Richtung des Feldes bei der Erzeugung der HF-Welle an die Ausrichtung der Leiterbahn angepasst werden. Der Quantencomputer nutzt zur Ansteuerung der jeweiligen nuklearen Spins der Atomkerne (^{13}C -Isotope) typischer weise RF (Radiofrequenz). Der Quantencomputer nutzt bevorzugt zur Ansteuerung der jeweiligen NV-Zentren MW(Mikrowellen).

Die Stärke der Hyperfeinwechselwirkung abhängig von der Gitterposition der nuklearen Spins relativ zum Stickstoffatom (N) und zur Fehlstelle (V) innerhalb des Diamantgitters. Das hier vorgelegte Dokument benennt für stark gekoppelte Kerne folgende beispielhaften Werte für die Radiofrequenz der elektromagnetischen Strahlung zur Kopplung des NV-Zentrum mit dem nuklearen Spin des jeweils zugeordneten gekoppelten Kerns, den der Quantencomputer als nukleares Quantenbit nutzt, je nach Gitterposition (siehe Figur 2):

126 MHz (J-Position direkt neben dem Stickstoff), 13,8 MHz (A-Position), 13,2 MHz (B-Position), 6.5 MHz (D-Position), 4,2 MHz (E-Position, F-Position), 2,6 MHz (G-Position, H-Position), 0.8 MHz (schwach gekoppelt)

Das hier vorgestellte Dokument weist ausdrücklich darauf hin, dass der Quantencomputer im späteren Betrieb die Zeeman Aufspaltung je nach Ausrichtung der ^{13}C -Isotope relativ zum NV-Zentrum hinzuaddieren oder subtrahieren muss. Das hier vorgestellte Dokument schlägt daher vor, in einer Initialisierungsphase des Quantencomputers die Werte für die Zeemann-Aufspaltung zu ermitteln und diese Werte und/oder die Summen bzw. Differenzwerte in einem Speicher der Steuervorrichtung (μC) des Quantencomputers (QC) abzulegen und für den Betrieb des Quantencomputers (QC) bereitzuhalten. Im Zuge der Ausarbeitung der hier vorgestellten technischen Lehre wurde ermittelt, dass die Zeeman Aufspaltung bei einem Magnetfeld mit einer magnetischen Flussdichte von 50mT am Ort des Paares aus NV-Zentrum und nuklearem Spin typischerweise ca. 0.5 MHz beträgt.

Neben den bereits erwähnten ^{13}C -Kohlenstoff-Isotopen, deren nukleare Spins der Quantencomputer mittels der NV-Zentren basierenden Quantenbits als nukleare Quantenbits nutzen kann, kann der Quantencomputer auch die nuklearen Spins der Stickstoffatome der NV-Zentren als nukleare Quantenbits nutzen.

Das ^{14}N -Stickstoff-Isotop besitzt neben dem Dipolanteil auch einen Quadrupolanteil und wechselwirkt mit der Elektronenspin der Elektronenkonfiguration des zugeordneten NV-Zentrums auch im $m=0$ Zustand dieses NV-Zentrums.

Das hier vorgelegte Dokument benennt als typischen Wert für das gyromagnetisches Verhältnis eines Atomkerns eines ^{14}N -Stickstoff-Isotops, das der Quantencomputer als nukleares Quantenbit nutzt, $\gamma_{14\text{N}}=3,07 \text{ kHz/mT}$.

Das hier vorgelegte Dokument benennt als typischen Wert für den Quadrupol Anteil Q unabhängig von B eines ^{14}N -Stickstoff-Isotops, das der Quantencomputer als nukleares Quantenbit nutzt, $Q.= 4945 \text{ kHz}$

Figur 3 zeigt die Verschiebung der Energieaufspaltung durch Hyperfein-WW hf Zeeman, nZ und Quadrupol Q.

Q= Quadrupol Anteil

hf= Hyperfeinwechselwirkung

nZ=nuklearer Zeeman Aufspaltung

5 Das hier vorgelegte Dokument weist explizit darauf hin, dass für den Zustand des NV-Zentrums mit der Quantenzahl $m=0$ typischerweise keine Hyperfein-Wechselwirkung stattfindet.

Kopplung

Das hier vorgelegte Dokument unterscheidet zwischen stark an das zugeordnete NV-Zentrum über ihren nuklearen Spin gekoppelten Atomkernen und schwach über ihren nuklearen Spin an das NV-Zentrum gekoppelten Atomkernen.

10 Stark an das zugeordnete NV-Zentrum gekoppelte Atomkerne definieren sich durch eine größere Kopplungsstärke (in $\text{MHz}\cdot\text{h}$) gegenüber der Linienbreite der Resonanzlinie des NV-Zentrum beim Übergang von $m=0$ nach $m=1$ (in $\text{MHz}\cdot\text{h}$). h ist das Planck'sche Wirkungsquantum.

Die Einordnung der Kopplungsstärke bezieht sich daher immer auf die minimale Linienbreite der Resonanzlinie des jeweiligen NV-Zentrums. Während die Kopplungsstärke zwischen dem nuklearen Spin des Atomkerns und dem Elektronenspin des NV-Zentrums von der Position des nuklearen Spins des Atomkerns relativ zum NV-Zentrum und vom Abstand des dem nuklearen Spins des Atomkerns zum NV-Zentrum im Kristallgitter des Diamantkristalls zusammenhängt und nicht veränderbar ist, kann die Linienbreite der Resonanzlinie zwischen zwei definierten Zuständen, abhängig von der Amplitude, Zeitdauer der Einwirkung, Form usw. vergrößert werden. Die minimal erreichbare Linienbreite (Lebensdauer der Zustandes) wird beeinflusst durch die Kristalleigenschaften, die Temperatur des Kristalls und die magnetischen Spins im Umfeld des NV-Zentrums und der zugeordneten nuklearen Spins der nuklearen Quantenbits, sowie durch allgemein extern als auch intern alternierende Magnetfelder.

Im Wesentlichen beeinflusst die Hyperfein-Wechselwirkung des NV-Zentrums beeinflusst (Hyperfein-
25 WW) Linienbreite) in einem kleinen oder moderaten Magnetfeld ($<300\text{-}500$ mT abhängig von der Kopplungsstärke) die Kopplungsstärke stark gekoppelter nuklearer Spins von Atomkernen. Die vom Quantencomputer ausgeführten Gatter sind daher direkt abhängig von dem Spin Zustand der mit den nuklearen gekoppelten NV-Zentren. Man bezeichnet diesen Bereich auch als Freezing-Zone. Da Kernspin-Kernspin Quantenbit-Flips, die zu einer Dekohärenz führen können, durch die NV-Zentren mit $m=+1$, $m=-1$ fast vollständig unterdrückt werden (Energieverschiebung zwischen den Spins). Die
30

nuklearen Spins der als nukleare Quantenbits genutzten Atomkerne sind für einen Zustand des ihnen zugeordneten NV-Zentrums mit $m=0$ eingefroren. Für einen solchen Zustand des NV-Zentrums mit $m=0$ kann ein ausreichend starkes externes Magnetfeld diese nuklearen Spin-Quantenbit-Flips verhindern.

- 5 Die direkte Kopplung zwischen den nuklearen Spins der Atomkerne ist gering. Die direkte Kopplung zwischen den nuklearen Spins der Atomkerne ist gering gegenüber der Kopplung zwischen dem jeweiligen Atomkern zugeordneten NV-Zentrum und dem Spin dieses Atomkerns. Die direkte Kopplung zwischen den nuklearen Spins der Atomkerne untereinander erfolgt daher auf langen Zeitskalen μs - Bereich bis ms-Bereich. Bei der Ausarbeitung der technischen Lehre des hier
- 10 vorgestellten Dokuments wurde erkannt, dass der Einfluss der direkten Kopplung zwischen den nuklearen Spins der Atomkerne im Allgemeinen vernachlässigt werden kann.

Für schwach an das jeweilige NV-Zentrum gekoppelten nuklearen Spins solcher schwach gekoppelter Atomkerne der nuklearen Quantenbits ist die Aufspaltung durch die Hyperfein-Wechselwirkung vernachlässigbar gegenüber der Wirkung des externen Magnetfeldes. Die Resonanzenergie für diese

15 schwach gekoppelter Atomkerne der nuklearen Quantenbits ist somit nur schwach von dem Spinzustand des NV-Zentrums abhängig. Die Resonanzenergie für diese schwach gekoppelter Atomkerne der nuklearen Quantenbits ist somit genau dann schwach von dem Spinzustand des NV-Zentrums abhängig, wenn die Aufspaltung durch die Hyperfein-Wechselwirkung vernachlässigbar gegenüber der Wirkung des externen Magnetfeldes auf die Resonanzenergie für diese schwach

20 gekoppelter Atomkerne der nuklearen Quantenbits ist. Die schwachgekoppelten Atomkerne verhalten sich in diesem Punkt also genau umgekehrt als die stark gekoppelten Atomkerne.

Das hier vorgeschlagene Dokument schlägt somit einen Quantencomputer vor, der NV-Zentren in Diamant als Quantenbits umfasst und

- stark an NV-Zentren gebundene nukleare Spins stark an diese NV-Zentren gekoppelter
- 25 Atomkerne als nukleare Quantenbits, die die hier vorgelegte Schrift im Folgenden als starke nukleare Quantenbits bezeichnet, umfasst und
- schwach an NV-Zentren gebundene nukleare Spins schwach an diese NV-Zentren gekoppelter Atomkerne als nukleare Quantenbits, die die hier vorgelegte Schrift im Folgenden als schwache nukleare Quantenbits bezeichnet, umfasst.

Die Resonanzenergie für die Kopplung dieser schwach gekoppelten nuklearen Spins dieser schwach an das jeweilige NV-Zentrum gekoppelte Atomkerne ist somit nur schwach von dem jeweiligen Spinzustand der Elektronenkonfiguration des jeweils mit diesem nuklearen Spin schwach gekoppelten NV-Zentrums abhängig.

- 5 Als schwach an das jeweilige NV-Zentrum gekoppelten nuklearen Spins werden Kernspins gekoppelter Atomkerne nuklearer Quantenbits genannt dessen Hyperfeinwechselwirkung kleiner ist als die Linienbreite der Resonanzlinie des Elektronenspins des NV-Zentrums. In diesem Fall ist ein Auslesen des Kernspins durch ein CNOT-Gatter auf ein NV-Zentrum nicht mehr möglich. Der Spinzustand des NV-Zentrums wird unabhängig vom Zustand der Kernspins geschaltet. Die
- 10 Bezeichnung „schwach gekoppelt“ ist somit abhängig von den Umgebungsparameter und kann durch eine Temperaturänderung, ein externes Magnetfeld oder eine eingestrahlte Mikrowellenleistung gezielt verändert werden. Typischerweise beträgt die Linienbreite der Resonanzlinie 500 kHz . Als schwach gekoppelt werden Atomkerne bezeichnet, deren Hyperfein- und oder Dipolwechselwirkung zu dem NV-Zentrum eine geringere Verschiebung der Resonanzlinie als 500 kHz bewirken.
- 15 Die Resonanzenergie für diese schwach gekoppelter Atomkerne der nuklearen Quantenbits ist ebenfalls nur schwach von dem Spinzustand des NV-Zentrums abhängig. Die Spin-Aufspaltung der Resonanzlinien der schwach gebundenen Kerne werden hauptsächlich durch den Kern-Zeeman-Effekt des äußeren Magnetfeldes bestimmt. Bereits ein externes magnetisches Feld von 23 mT bewirkt für ^{13}C Kerne eine Aufspaltung von 500 kHz durch en Kern-Zeeman Effekt. Um die Kerne
- 20 individuell ansteuern zu können müssen deren Resonanzlinie sich ebenfalls um mindestens eine Linienbreite von den anderen Kerne unterscheiden. Tatsächlich betragen die Linienbreiten der Kernzustände nur wenige 10 kHz, so dass eine individuelle Ansteuerung auch bei sehr geringen Hyperfeinwechselwirkung gelingt.

Initialisierung

- 25 Die Initialisierung der NV-Zentren erfolgt über einen Laserpuls als Pumpstrahlung mit einer definierten zeitlichen Länge und Intensität. Diese zeitliche Länge hängt von der Einkopplung des Laser-Lichtes des Lasers ab und damit von der Tiefe der NV-Zentren im Substrat von der Oberfläche des Diamantkristalls aus gemessen. Außerdem beeinflussen die Fokussierungsbedingungen die Intensität der Pumpstrahlung des Lasers am Ort des jeweiligen NV-Zentrums. Da das NV-Zentrum
- 30 einen Dipol bildet, ist der Polarisationswinkel ein weiterer bestimmender Faktor. Das NV-Zentrum

(gebildet aus einem Stickstoffatom N- und einer Fehlstelle V) definiert eine NV-Zentrums-Achse. Bei der Ausarbeitung der technischen Lehre dieses Dokuments wurde linear polarisiertes Licht als Pumpstrahlung für die NV-Zentren eingesetzt. Sowohl die lineare Polarisation des eingestrahlten Lichtes sollte bevorzugt senkrecht zur NV-Zentrumsachse stehen. Ein Ansprechen mit zirkular polarisiertem Licht ist auch möglich, wenn der Pointing-Vektor des Lichts parallel zur Achse des NV-Zentrums steht. In dem Fall können zwei Drehungen gleichzeitig ausgeführt werden. Die vom NV-Zentrum ggf. abgestrahlte Fluoreszenzstrahlung weist typischerweise eine lineare Polarisation mit einer Polarisationsrichtung senkrecht zur NV-Zentrumsachse auf. Vorzugsweise ist die Mikrowellenstrahlung zur Manipulation des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums linear polarisiert, wobei auch hier die Polarisationsrichtung vorzugsweise senkrecht zur NV-Zentrumsachse steht. Wie zuvor kann auch hier eine Manipulation mit zirkularpolarisierten elektromagnetischen Wellen (Mikrowelle) erfolgen, deren Pointing-Vektor parallel zur NV-Zentrumsachse liegt. In dem Fall kann die Anregung von $m=-1$ nach $m=0$ von der Anregung von $m=0$ nach $m=+1$ unterschieden werden. Dies kann über eine Cross-Bar-Struktur über dem betreffenden NV-Zentrum mit geeignet phasenverschobenen modulierten Strömen erreicht werden.

Eine Manipulation eines Paares aus NV-Zentrum und einem nuklearen Spin kann bei geeigneter Lage und Orientierung des nuklearen Spins relativ zum NV-Zentrum mit zirkularpolarisierten elektromagnetischen Wellen (Radiowelle) erfolgen, deren Pointing-Vektor parallel zur NV-Zentrumsachse liegt. In dem Fall kann die Anregung von $m=-1$ nach $m=0$ von der Anregung von $m=0$ nach $m=+1$ unterschieden werden. Dies kann über eine Cross-Bar-Struktur über dem betreffenden NV-Zentrum mit geeignet phasenverschobenen modulierten Strömen erreicht werden. Kerne mit Spin $I=1/2$ oder $I=-1/2$ kann die Manipulation mit linearpolarisierten elektromagnetischen Wellen erfolgen. Bei zirkularpolarisierten elektromagnetischen Wellen reagiert der Kern mit Spin $I=1/2$ oder $I=-1/2$ nur auf den entsprechenden linear polarisierten Anteil.

Eine verbesserte Ein- und Auskopplung des Lichtes kann beispielsweise durch μ Linsen oder Pillars erfolgen. Bevorzugt weist der Quantencomputer zwischen der Oberfläche des Diamantkristalls und der Lichtquelle für die Erzeugung der Pumpstrahlung, also beispielsweise zwischen der Oberfläche des Diamantkristalls und dem Laser zur Erzeugung des Laserpulses optische Funktionselemente, wie Linsen, Spiegel, Blenden, photonische Kristalle, optische Funktionselemente der diffraktiven und/oder digitalen Optik, Bragg-Filter, Filter, Lichtwellenleiter, Wellenkoppler, Zirkulatoren, Richtkoppler, Anpassschichten etc. auf, die die Einkopplung und/oder Auskopplung verbessern.

Die Resonanzlinienbreite des Zustandes des jeweiligen NV-Zentrums wird durch die eingestrahlte Leistung beeinflusst. Um eine optimale Linienbreite zu erreichen, sollte die Leistung 10 μ Watt erfahrungsgemäß nicht überschreiten. Eine Laser Pulsdauer von 3-10 μ s hat sich bei der Ausarbeitung der technischen Lehrer in experimentellen Versuchen als in dem verwenden
5 beispielhaften Aufbau optimal für die Initialisierung der NV-Zentren erwiesen.

Die Initialisierung der als nukleare Quantenbits des Quantencomputers verwendeten nuklearen Spins der betreffenden Atomkerne kann der Quantencomputer auf sehr unterschiedliche Arten vornehmen. Gemäß der technischen Lehre des hier vorgelegten Dokuments erscheinen derzeit folgende beispielhaften Methoden am erfolgversprechendsten:

- 10 a) SWOP des Quantenzustands des NV-Zentrums mit dem Quantenzustand des nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits unter Hartmann-Hahn Bedingungen (Erklärung folgt),
b) CROT auf den Quantenzustand des NV-Zentrums des Quantenbits, CROT auf das den Quantenzustand des nuklearen Kerns des Atomkerns des nuklearen Quantenbits und Laserpulse zur Re-Initialisierung des Quantenzustand der Elektronenkonfiguration des NV-
15 Zentrums (Einseitiger SWOP)
c) Quantenbit-Flips im ESLAC (excited-state level anti-crossing) und GSLAC (ground-state level anticrossing) (Hyperpolarisation) (Erklärung folgt).

Initialisierung schwach gekoppelter nuklearer Spins, die als nukleare Quantenbits benutzt werden

- 20 Beim ersten Verfahren a) überträgt bei einem SWOP des Quantenzustands des NV-Zentrums mit dem Quantenzustand des nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits unter Hartmann-Hahn Bedingungen der Quantencomputer unter einer Hartmann-Hahn (HH) Bedingung, die Information des Quantenzustands des NV-Zentrums auf den Quantenzustand des nuklearen Spins des betreffenden jeweiligen Atomkerns. Hierbei setzt der Quantencomputer das NV-Zentrum durch ein
25 Clifford Gatter (Paul: Y) als $(\pi/2)$ -Puls und anschließenden Clifford Gatter (Paul: X). Dies führt dazu, dass die Ausrichtung des Spins des Elektrons des NV-Zentrums mit einer Rabi-Frequenz (Spinlock) rotiert. Die Rabi-Frequenz wird durch Einstellung des Magnetfelds so eingestellt, dass die Rabi-Frequenz in Resonanz mit der Lamor-Frequenz des nuklearen Spins des Atomkerns liegt, so dass ein definierter Spin-Spin-SWAP (Spin-Austausch) stattfinden kann. Der Übergang des Spin-Spin-Swaps ist

dabei wieder durch eine Zeitkonstante als Kopplungskonstante gekennzeichnet. Damit wird ein teilweiser Spin-Spin-Swap steuerbar. (z.B. 50% Spin-Austausch).

Dieses Verfahren ist besonders wirksam für die Kopplung zwischen NV-Zentren und schwach an diese gekoppelte nukleare Spins.

5 Quantencomputerimplementiertes Verfahren zur Kopplung schwach gekoppelter nuklearer Spins an ein NV-Zentrum

Methode a

Das hier vorgelegte Dokument schlägt also einen Quantencomputer vor, der NV-Zentren als Quantenbits umfasst und stark an NV-Zentren von Quantenbits gekoppelte stark gekoppelte nukleare Spins als stark gekoppelte nukleare Quantenbits umfasst und schwach an NV-Zentren von Quantenbits gekoppelte schwach gekoppelte nukleare Spins als schwach gekoppelte nukleare Quantenbits umfasst, wobei der Quantencomputer dazu eingerichtet ist, ein NV-Zentrum eines Quantenbits mit einem schwach gekoppelten nuklearen Spins als schwach gekoppelten nuklearen Quantenbit dadurch zu koppeln, dass er mittels eines Clifford Gatter (Pauli Y) als $(\pi/2)$ -Puls und durch Einstellung des Magnetfelds und/oder durch Einstellung der Amplitude der Mikrowellenstrahlung des Y-Clifford Gatters die Rabi-Frequenz des Elektronenspins mit der Larmor-Frequenz des nuklearen Spins im Wesentlichen in Übereinstimmung bringt, wobei im Wesentlichen bedeutet, dass dies einen Spin-Spin-Austausch ermöglicht. Das hier vorgelegte Dokument schlägt vor, in der jeweiligen Konstruktion des jeweiligen Quantencomputers im Rahmen einer Nacharbeit die notwendige Präzision jeweils zu bestimmen.

Anschließend re-initialisiert der Quantencomputer das NV-Zentrum durch einen Laserpuls der Pumpstrahlung der Lichtquelle (Laser). Dieses Verfahren ist für schwach an das NV-Zentrum gekoppelte nukleare Spins schwach gekoppelter Atomkerne geeignet.

25 Quantencomputerimplementiertes Verfahren zur Kopplung stark gekoppelter nuklearer Spins an ein NV-Zentrum

Methode b

Das zweite Verfahren b) dient zum Initialisieren stark an das NV-Zentrum gekoppelter nuklearer Spins von Atomkernen nuklearer Quantenbits: Der Quantencomputer führt ein CNOT auf das NV-Zentrum in Abhängig vom Quantenzustand des stark gekoppelten nuklearen Spins des stark gekoppelten Atomkerns des nuklearen Quantenbits durch. Sollte sich der Quantenzustand des stark gekoppelten

nuklearen Spins des stark gekoppelten Atomkerns des nuklearen Quantenbits im falschen Quantenzustand befinden, findet der Übergang statt. Sollte sich der Quantenzustand des stark gekoppelten nuklearen Spins des stark gekoppelten Atomkerns des nuklearen Quantenbits nicht im falschen Quantenzustand befinden, findet der Übergang nicht statt. Sollte sich der Quantenzustand des stark gekoppelten nuklearen Spins des stark gekoppelten Atomkerns des nuklearen Quantenbits im falschen Quantenzustand befinden, kann das CNOT auf den nuklearen Spin des stark gekoppelten Atomkerns des nuklearen Quantenbits stattfinden und der Quantencomputer dreht den stark gekoppelten nuklearen Spin des stark gekoppelten Atomkerns des nuklearen Quantenbits mittels Manipulation durch das NV-Zentrum des Quantenbits. Anschließend initialisiert der Quantencomputer das NV-Zentrum durch einen Laserpuls.

Methode c

Im dritten Verfahren c) führt der Quantencomputer werden Spinflips im „exciting state anti level crossing“ (ESLAC) durch. Der Quantencomputer stellt eine magnetische Flussdichte ein, bei der sich im angeregten Zustand des NV-zentrums die Quantenzustände mit $m=0$ und mit $m=-1$ energetisch entartet sind. Die nuklearen Spins der Atomkerne der nuklearen Quantenbits heben diese Entartung jedoch auf und es können dann Spin-Spin Flips zwischen den nuklearen Spins der Atomkerne der nuklearen Quantenbits des Quantencomputers und dem Spin der jeweiligen Elektronenkonfiguration des jeweiligen NV-Zentrums stattfinden. Diese Spin-Flips führen zu einer Polarisation der nuklearen Spins der Atomkerne der nuklearen Quantenbits, die mit diesem NV-Zentrum koppeln. In Abhängigkeit vom Magnetfeld kann diese Polarisation dabei positiv (spin-up) oder negativ (spin-down) sein. Leider gelingt diese Art der Initialisierung derzeit nur bei stark gekoppelten Kernen.

Um die Polarisation zu erreichen, muss der Quantencomputer die magnetische Flussdichte des Magnetfelds optimal zu Achse des jeweiligen NV-Zentrums (z-Achse) ausrichten. Hierzu stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Die einfachste ist, dass der Quantencomputer die Lichtintensität des NV-Zentrums unter Änderung der Ausrichtung des Flussdichte des Magnetfelds maximiert, wobei der Quantencomputer den Betrag der Flussdichte konstant hält. Bevorzugt ermittelt der Quantencomputer die Ausrichtung der magnetischen Flussdichte mittels der Resonanzlinie des NV-Übergangs beispielsweise vom Quantenzustand $m=0$ zu $m=1$ der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums. Dies kann der Quantencomputer mit Ramsey-Sequenzen erreichen.

Auslesen

Der Quantencomputer liest die Quantenzustände eines NV-Zentrums und der diesem NV-Zentrum zugeordneten nuklearen Spins mittels des NV-Zentrums durch. Dabei unterscheidet der Quantencomputer, ob sich das NV-Zentrum in $m=0$ oder $m=\pm 1$ Quantenzustand befindet.

- 5 Befindet sich das NV-Zentrum im $m=-1$ oder $m=+1$ Quantenzustand kann der Quantencomputer mittels eines Laserpuls der Lichtquelle als Pumpstrahlungsquelle mit Pumpstrahlungswellenlänge λ_{pmp} das NV-Zentrum anregen. Der angeregte Zustand des NV-Zentrums kann nun jedoch über zwei Wege zerfallen: In 70% der Fälle und mit einer Lebensdauer von ca. 10ns erfolgt die Abregung des angeregten Zustands des NV-Zentrums in dem $m=0$ Grundzustand durch Aussendung eines Photons.
- 10 In diesem Fall regt der Laser als Lichtquelle als Pumpstrahlungsquelle mit Pumpstrahlungswellenlänge λ_{pmp} den Quantenzustand des NV-Zentrums sofort wieder an. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 30% führt dann das NV-Zentrum einen verbotenen Interbandübergang vom Triplet $S=1$ zum Singulett $S=0$ Zustand durch. Dieser Quantenzustand ist metastabil und mit einer Lebensdauer von ca. 100-300ns um eine Größenordnung länger stabil als der direkte Zerfall in den
- 15 Grundzustand. Nach dieser Zeit zerfällt der Quantenzustand des NV-Zentrums zurück in den Triplet-Zustand ($m=0$). Dieser Übergang des Quantenzustands des NV-Zentrums findet strahlungslos statt.
- Für den $m=0$ Zustand ist dieser Übergang zum Singulett unterdrückt, das NV-Zentrum fällt unter Aussendung eines Photon mit der Wellenlänge 636-700 nm zurück in den Grundzustand bei $m=0$ und wird durch den Laser fortwährend wieder angeregt.
- 20 Da der metastabile Zustand um ca. eine Größenordnung zeitlich länger stabil ist als der strahlende Übergang, kann zwischen $m=0$ und $m=\pm 1$, aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Photonen pro Laserpuls, unterschieden werden. Der durch den Quantencomputer beobachtbare Kontrast ergibt sich aus dem Verhältnis der beiden verschiedenen Lebensdauern und entspricht einem Faktor 10-30 für die ersten 300-500 ns. Pro Laserpuls kann der Quantencomputer ca. 0.8 Photonen -unter idealen
- 25 Bedingungen- für den Quantenzustand $m=0$ des NV-Zentrums bestimmen. Die Anzahl der Photonen für $m=-1$ oder $m=+1$ beträgt unter diesen Bedingungen < 0.1 Photonen pro Laserpuls. Der Quantencomputer führt daher vorzugsweise jede Messung eines Quantenzustands eines NV-Zentrums ca. 1000-5000mal wiederholt durch, um die notwendige Anzahl an Ergebnissen für eine sichere statistische Auswertung und für eine sichere Ermittlung eines Quantenzustands zu erreichen.
- 30 Die optimale Laserleistung bei der Abstrahlung der Laserpulse durch die Lichtquelle

(Pumpstrahlungsquelle) ermittelt der Quantencomputer in einer Initialisierungsphase vorzugsweise durch Ermittlung einer Sättigungskurve und Extraktion dieser optimalen Laserleistung.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Kontrast zu erhöhen. Eine erste Methode basiert auf der Möglichkeit den nuklearen Spin des ^{14}N -Stickstoff-Atomkerns des NV-Zentrums zu nutzen (Dieser steht dann nicht mehr als Qubit zur Verfügung). Im ESLAC findet ein Flip zwischen dem nuklearen Spin des ^{14}N -Stickstoff-Atomkerns des NV-Zentrums und dem Elektronenspin der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums statt. Dieser Flip führt zu einer Umwandlung des Quantenzustands der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums vom Quantenzustand mit $m=-1$ zum Quantenzustand mit $m=0$ oder vom Quantenzustand mit $m=0$ zum Quantenzustand mit $m=+1$. Ist der nukleare Spin des ^{14}N -Stickstoff-Atoms des NV-Zentrums im $I=-1$ Zustand werden somit 2 Flips benötigt um den nuklearen Spin des ^{14}N -Stickstoff-Atoms des NV-Zentrums in den stabilen $I=+1$ zu überführen. Bindet man das ^{14}N als Ancilla Qubit ein, so vergrößert diese Einbindung die Dunkelphase des NV-Zentrums um einen Faktor 3 und erhöht damit den Kontrast zwischen den Quantenzuständen der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums mit $m=0$ gegenüber $m=-1$ ebenfalls um das Dreifache pro Laserpuls.

Das Auslesen der Quantenzustände der nuklearen Spins der Atomkerne der nuklearen Quantenbits führt der Quantencomputer im zweiten Schritt über ein vorgeschaltetes primitives CROT Gatter für das NV-Zentrum abhängig von den jeweiligen Kernzuständen s.u.

Der Quantencomputer führt bevorzugt eine Quantencomputerberechnung mehrfach zur Fehlerkorrektur durch. Hierbei sollte der Quantencomputer die CROT alternierend in stochastisch oder zumindest jeweils bei jeder neuen Quantencomputerberechnung neu festgelegten Reihenfolge ausführen, um die Fidelity zu erhöhen. Alle Quantenzustände stark gekoppelter Spins von Atomkernen starkgekoppelter nuklearer Quantenbits überprüft der Quantencomputer bevorzugt mittels einer entsprechende CROT-Operation des NV-Zentrums. Bevorzugt steuert der Quantencomputer mehrere Frequenzen gleichzeitig an. Die entsprechenden Signale können durch Fourier-Transformation mehrerer Signale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich, anschließender Summierung im Frequenzbereich zu eine, Summensignal und Rücktransformation in den Zeitbereich berechnet und dann entsprechend am Ort des NV-Zentrums erzeugt werden. Der Quantencomputer benötigt somit für das Auslesen der nuklearen Quantenzustände von 3 nuklearen Spins von 3 Atomkernen dreier nuklearer Quantenbits $2^3=8$ CROT-Gatter um Kombinationen von Quantenzuständen zu überprüfen. Befinden sich die Kerne in einem dieser 2^3 Kombinationen von

Quantenzuständen dieser drei Quantenbits, so erfolgt der NV-Übergang des NV-Zentrums und kann als solcher detektiert werden.

Gatter für NV-Kern Systeme mit stark gekoppelten Kernen

Systeme mit stark an die Elektronenkonfiguration eines NV-Zentrums gekoppelten nuklearen Spins von Atomkernen der nuklearen Quantenbits des Quantencomputers sind die Gatter Operationen der gekoppelten nuklearen Spins der Atomkerne der nuklearen Quantenbits immer abhängig von dem Quantenzustand des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums und umgekehrt. Dagegen sind die Operationen der stark gekoppelten nuklearen Spins der Atomkerne der nuklearen Quantenbits nicht zwingend abhängig von dem Zustand anderer stark gekoppelter nuklearer Spins der Atomkerne der nuklearen Quantenbits.

Die sich hieraus ergebene primitive Gatter sind daher immer konditionelle Rotationen:

- a) $CROT_K$ der Kerne in Abhängigkeit vom NV.
- b) $CROT_{NV}$ des NV-Zentrum abhängig von allen Quantenzuständen aller stark gekoppelter nuklearer Spins der Atomkerne stark gekoppelter nuklearer Quantenbits.

Definiert die Achse des NV-zentrums (NV-Achse) die z-Achse, können die Rotationen über die x-Achse und y-Achse erfolgen. Eine Rotation in y zeichnet sich durch eine Phasenverschiebung um 90° gegenüber x Rotationen aus. Die Phasenlage wird, wie oben beschrieben, durch die ersten Gatter definiert

(Die Lage des Koordinatensystem ist symmetrisch um die z-Achse und damit beliebig.)

Eine Rotation über die z-Achse wird durch eine Kombination von 3 Rotationen erreicht $CROT_z(\theta) = CROT_y(-\pi/2) CROT_x(\theta) CROT_y(\pi/2)$ wie bereits oben beschrieben.

Mit den beiden primitiven Gattern kann der Quantencomputer nun alle universellen Gatter erzeugen:

Dies soll an den folgenden Beispielen dargestellt werden:

Annahme: Magnetfeld B in z-Richtung mit $B=51$ mT (ESLAC). Es sollen sich zwei ^{13}C -Atomkerne auf dem 3. Gitterplatz (13.8 MHz) und 5. Gitterplatz (4.2 MHz) relativ zum NV-Zentrum befinden.

Außerdem kann die Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums mit einem ^{14}N - Stickstoffkern Kern des NV-zentrums koppeln.

Der Quantencomputer verwendet den Spinzustand der Elektronenkonfiguration der NV-Zentrums für $m=0$ und $m=-1$. Der Quantencomputer verwendet die nuklearen Quantenzustände des ^{14}N -

5 Stickstoffatoms des NV-Zentrums mit nuklearen Quantenzuständen $I=0$ und $I=+1$ als nukleares Quantenbit. Der Quantencomputer verwendet die nuklearen Quantenzustände des ^{13}C -Isotops im Umfeld des NV-Zentrums mit nuklearen Quantenzuständen $I=-1/2$ und $+1/2$ als weitere nukleare Quantenbits. Der Quantencomputer führt die Initialisierung des Spinzustands der Elektronenkonfiguration der NV-Zentrums und der nuklearen Quantenzustände der nuklearen Spins
10 der nuklearen Quantenbits durch den Laserpuls der Pumpstrahlungsquelle **LD** mit Pumpstrahlungswellenlänge λ_{pmp} aus.

Es ergeben sich somit folgende Gatteroperationen durch Rotation um einen Winkel θ in der Bloch Kugel. θ ist durch die Amplitude und der Länge des RF- bzw. MW-Feldes (und damit der Rabi-Frequenz) definiert. Die Leiterbahnen- und Polarisationsrichtung sowie das Magnetfeld seien optimal
15 eingerichtet. Im ESLAC sind das ^{14}N -Stickstoff-Atom als nukleares Quantenbit auf $I=+1$ und die ^{13}C -Kohlenstoffisotope als nukleare Quantenbits auf $I=+1/2$ polarisiert.

Typische Periodendauern der Rabi-Oszillation für 200mV Eingang und 40dB Verstärkung sind wie folgt:

	NV	300ns
20	$^{13}\text{C}_1$ mit 13.8 MHz	13 μs
	$^{13}\text{C}_2$ mit 4,2 MHz	70 μs
	^{14}N bei 2.94MHz	40 μs

Aus diesen Werte und den oben genannten Grundlagen ergeben sich nun folgende primitive Gatter:

25 Für die nuklearen Quantenbits für das zugeordnete NV-Zentrum im $m=-1$ Quantenzustand ergeben sich folgen RF Puls Frequenzen:

$^{13}\text{C}_1$ CROT mit 13.3 MHz ($\pi=7\mu\text{s}$)

$^{13}\text{C}_2$ CROT mit 4.7 MHz ($\pi=35\mu\text{s}$)

^{14}N CROT mit 2.94 MHz ($\pi=20\mu\text{s}$)

Für die nuklearen Quantenbits für das zugeordnete NV-Zentrum im $m=0$ Quantenzustand ergeben sich folgende RF Puls Frequenzen:

^{14}N : CROT mit 5.1 MHz ($\pi=20\mu\text{s}$).

^{13}C : Zustand kann nicht verändert werden.

5

Für das NV-Zentrum sind 8 Resonanzenergien entsprechend der Kombination für die Spinzustände der gekoppelten nuklearen Spins der nuklearen Quantenbits zu berücksichtigen. Die sich hieraus ergebenden Frequenzen für den MW-Puls sind notwendig um den Quantenzustand der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums von $m=0$ nach $m=-1$ zu treiben. Dabei sind die Rabi-Frequenz unabhängig von dem Kernzuständen und die Pulslängen für alle Kern-Spinzustände der gekoppelten nuklearen Quantenbits identisch. Die hier angegebene Zustände entsprechenden Kernzuständen für $^{13}\text{C}_{-1}$, $^{13}\text{C}_{-2}$, ^{14}N .

10

Die folgende Tabelle gibt beispielhafte CROT-Frequenzen (MHz) für verschiedene Kernspin Zustände an, wie sie bei der Ausarbeitung der technischen Lehre dieser Offenlegung ermittelt wurden:

15

$|000\rangle$ 1400,0 MHz

$|001\rangle$ 1397,06 MHz

$|010\rangle$ 1404,7 MHz

$|011\rangle$ 1401,76 MHz

$|100\rangle$ 1413,2 MHz

20

$|101\rangle$ 1410,26 MHz

$|110\rangle$ 1417,9 MHz

$|111\rangle$ 1414,96 MHz

Da die Linienbreite der Resonanz des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums mit ca. 0.5 MHz kleiner ist als der frequenzmäßige Abstand der Resonanzen, können alle Übergänge ohne Crossover durchgeführt werden. Nutzt man sehr große Amplituden also kurze Pulse, führt dies dagegen zu einer starken Verbreiterung der Resonanzlinie (um bis zu 6 MHz).

25

Mit diesem Pulsen können bei einer Frequenz von 1402 MHz somit die Übergänge $|000\rangle$ $|001\rangle$ $|010\rangle$ und $|011\rangle$ gleichzeitig verändert werden. Ebenfalls können die Resonanzlinien für $|100\rangle$, $|101\rangle$ $|110\rangle$ und $|111\rangle$ mit einem Puls der Frequenz 1414 MHz dieser Breite getrieben werden. Durch optimale Pulskontrolle kann ein Übersprechen verringert werden.

30

Die universale Gatter lassen sich nun als Kombination der primitive Gatter darstellen:

Für das Quantenbit des NV-Zentrums (Single Gate)

- 5 $iX(\theta)$ (bzw. iX) wird durch die Summe aller CROT() bzw. durch zwei starke -Pulse mit beispielsweise 1402 und 1414 MHz gebildet. Die Länge definiert dabei den Drehwinkel bei gleicher Amplitude.
- $iY(\theta)$ (bzw. iY) wie X nur die Pulse versetzt mit einer 90° Phase.
- $iZ(\theta)$ gegeben durch $Y(-\pi/2) X(\theta) Y(\pi/2)$
- 10 H (Hadamard) ist gegeben durch $Y(\pi/2) Z(\pi)$
- S (Phasendrehung um $\pi/4$) ist gegeben durch $Z(\pi/4)$

2 Qubit Gate

- 15 CiNOT(NV, Kern) Die Teilsumme der jeweilige Drehungen des nicht abhängigen Qubits (4x CROT um die gleiche Achse mit der passenden Frequenz)
- CCiNOT(NV, Kern) Die jeweilige Teilsumme der nicht abhängigen Qubits (2xCROT)
- CCCiNOT(NV, Kern): ein CROT für $|000\rangle$
- CNOT(NV, Kern): $Z(\pi/2)$ CiNOT(NV, Kern)

20 Für die nuklearen Quantenbits ergeben sich folgende Gatter

Single Gate

iX : CROT für $m=-1$ des NV-Zentrums

Falls m nicht bekannt ist:

- 25 iX : CROT, X_{NV} , CROT, X_{NV} für $m=-1$ des NV-Zentrums
- iY : X mit einer 90° Phasenverschiebung der Radiowelle für $m=-1$ des NV-Zentrums
- $iZ(\theta)$ gegeben durch $Y(-\pi/2) X(\theta) Y(\pi/2)$ für $m=-1$ des NV-Zentrums
- H (Hadamard) ist gegeben durch $Y(\pi/2) Z(\pi)$ für $m=-1$ des NV-Zentrums
- S (Phasendrehung um $\pi/4$) ist gegeben durch $Z(\pi/4)$ für $m=-1$ des NV-Zentrums

2 Qubit

CiNOT(Kern, NV) ist ein primitiv Gatter CROT (180°) für $m=-1$ des NV-Zentrums.
Für $m=0$ wird das Gatter nicht ausgeführt.

5

CiNOT(Kern_1, Kern_2) erfolgt immer über das NV-Zentrum. Es handelt sich um einen Hadamard auf den nuklearen Spin des Kern_1, CROT auf das NV-Zentrum 2π , Hadamard auf Kern_1

10 CiNOT (Kern_1,Kern_2). CiNOT(Kern_1, NV), CiNOT(NV,Kern_2), CiNOT(Kern1, NV)
für $m=-1$

Oder falls der Zustand des NVs nicht bekannt ist:

CiNOT(Kern_1,Kern_2). CiNOT(Kern_1,NV), CiNOT(NV_Kern_2) CiNOT(Kern_1, NV), iX_NV,
CiNOT(Kern_1,NV), CiNOT(NV,Kern_2) CiNOT(Kern_1,NV), iX_NV

15 SWAP(NV,Kern) CiNOT(Kern,NV) CiNOT_Y(NV,Kern)Z($\pi/2$) CiNOT(Kern,NV)

Damit sind alle universellen Gatter definiert.

Quantencomputer

Dieses Dokument nutzt die in der DE 10 2020 101 784 B3 beschriebene technischen Lehre einen Quantencomputer. Figur 1 der DE 10 2020 101 784 B3 zeigt schematisch vereinfacht einen solchen
20 Quantencomputer. Die hier vorgelegte Schrift beschreibt einen Quantencomputer mit optischer Auslesung. Alternativ oder ergänzend dazu beschreibt die hier vorgelegte Schrift einen Quantencomputer mit elektrischer Auslesung. Basis des hier vorgestellten Quantencomputers sind Quantenpunkte. Bevorzugt umfassen die Quantenpunkte paramagnetische Zentren in einem Substrat. Bevorzugt umfasst das Substrat Diamant. Bevorzugt umfassen die paramagnetischen
25 Zentren NV-Zentren und/oder SiV.-Zentren und/oder TR1-Zentren. Der hier vorgestellte Quantencomputer weist dabei bevorzugt eine optische Vorrichtung auf. Die optische Vorrichtung dient gemäß der technischen Lehre der hier vorgelegten Schrift zum Ersten bevorzugt der

Bestrahlung von Quantenpunkten und damit der paramagnetischen Zentren mit Pumpstrahlung. Zum Zweiten dient die optische Vorrichtung bevorzugt der Extraktion von Fluoreszenzstrahlung der Quantenpunkte. Bevorzugt dient somit die optische Vorrichtung der Extraktion von Fluoreszenzstrahlung paramagnetischer Zentren. Bevorzugt dient somit die optische Vorrichtung der Extraktion von Fluoreszenzstrahlung von NV-Zentren. Ein optisches Funktionselement der Vorrichtung ist somit bevorzugt ein paramagnetisches Zentrum in einem Kristall, insbesondere ein NV-Zentrum in einem Diamantkristall und/oder ein SiV-Zentrum in einem Diamantkristall und/oder ein G-Zentrum in einem Siliziumkristall oder ein paramagnetisches Zentrum in einem Mischkristall aus Elementen der IV. Hauptgruppe des Periodensystems. In diesem Zusammenhang verweist die hier vorgelegte Schrift auf das deutsche Patent DE 10 2020 101 784 B3, dessen technische Lehre vollumfänglicher Teil dieser Offenlegung, soweit dies entsprechend dem Recht des Staates, in dem eine Nationalisierung einer internationalen Anmeldung des Inhalts der hier vorgelegten Schrift erfolgt, dies zulässt.

Das hier vorgelegte Dokument beschreibt einen Quantencomputer **QC**, der vorzugsweise NV-Zentren in Diamant als Quantenbits umfasst. Hierbei stehen die NV-Zentren in Diamant auch für andere paramagnetische Zentren mit äquivalenten Eigenschaften. Auch sind andere Materialien denkbar.

Der Quantencomputer **QC** nutzt stark an die Quantenbits, hier in Form von NV-Zentren, gebundene nukleare Spins von stark an diese Quantenbits – die NV-Zentren - gekoppelten Atomkernen als nukleare Quantenbits, die das hier vorgelegte Dokument auch als starke nukleare Quantenbits bezeichnet.

Der Quantencomputer **QC** nutzt schwach an die Quantenbits, hier in Form von NV-Zentren, gebundene nukleare Spins von schwach an diese Quantenbits – die NV-Zentren - gekoppelten Atomkernen als nukleare Quantenbits, die das hier vorgelegte Dokument auch als schwache nukleare Quantenbits bezeichnet.

Die Resonanzenergie für die Kopplung dieser schwach gekoppelten nuklearen Spins dieser schwach an das jeweilige Quantenbit – hier das jeweilige NV-Zentrum - gekoppelten Atomkerne hängt dabei nur schwach von dem jeweiligen Spinzustand der Elektronenkonfiguration des jeweils mit diesem nuklearen Spin schwach gekoppelten Quantenbits – hier des NV-Zentrums - ab. Der Quantencomputer **QC** ist vorzugsweise dazu eingerichtet, einen SWOP des Quantenzustands eines Quantenbits – hier des NV-Zentrums - mit dem Quantenzustand eines schwach an dieses Quantenbit

– hier dieses NV-Zentrum - gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits unter Hartmann-Hahn Bedingungen mittels eines Mikrowellenpulses zur Ansteuerung dieses Quantenbits – hier dieses NV-Zentrums - durchzuführen. Der Quantencomputer **QC** ist vorzugsweise dazu eingerichtet, einen SWOP des Quantenzustands eines Quantenbits – hier eines NV-Zentrums - mit dem Quantenzustand eines stark an dieses Quantenbit – hier dieses NV-Zentrum - gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits mittels eines Radiowellenpulses unter Nutzung der starken Kopplung zwischen diesem Quantenbit – hier diesem NV-Zentrum - und dem stark gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits durchzuführen. Der Quantencomputer **QC** umfasst bevorzugt Mittel **MW/RF-AWFG, MWA** zur Erzeugung des Radiowellenpulses und/oder des Mikrowellenpulses. Der Quantencomputer **QC** umfasst bevorzugt Mittel **MGx, MGy, MGz, MSx, MSy, MSz, MFSx, MFSy, MFSz** zur Einstellung der magnetischen Flussdichte **B** zur Erfüllung der Hartmann-Hahn Bedingung. Der Quantencomputer **QC** umfasst bevorzugt eine Lichtquelle **LD** zur Bestrahlung der Quantenbits – hier der NV-Zentren - mit Pumpstrahlung **LB** der Pumpstrahlungswellenlänge λ_{pmp} . Der Quantencomputer **QC** umfasst typischerweise eine Steuervorrichtung **μ C**, die zumindest einen Speicher **RAM, NVM** umfasst. In dem Speicher **RAM, NVM** ist vorzugsweise ein Quantencomputerprogramm mit OP-Codes und mit zumindest einem Symbol für einen Quanten-OP-Codes als OP-Code abgelegt. Dies bedeutet auch, dass typischerweise zumindest einer der Speicher **RAM, NVM** dazu eingerichtet ist, dass dort ein Quantencomputerprogramm mit OP-Codes und mit zumindest einem Symbol für einen Quanten-OP-Codes als OP-Code abgelegt wird. Die Steuervorrichtung **μ C** ist vorzugsweise dazu eingerichtet, das Quantencomputerprogramm abzuarbeiten. Die Steuervorrichtung **μ C** ist typischerweise dazu eingerichtet, die Lichtquelle **LD** und die Mittel **MGx, MGy, MGz, MSx, MSy, MSz, MFSx, MFSy, MFSz** zur Einstellung der magnetischen Flussdichte **B** und die Mittel **MW/RF-AWFG, MWA** zur Erzeugung des Radiowellenpulses und/oder des Mikrowellenpulses in Abhängigkeit von den OP-Codes und/oder Quanten-OP-Codes des Quantencomputerprogramms zu steuern. Die Quanten-OP-Codes im Speicher **RAM, NVM** umfassen typischerweise CROT-Befehle für die Manipulation eines stark gebundenen nuklearen Spins. Im Sinne dieser Schrift umfassen die Quanten-OP-Codes im Speicher **RAM, NVM** CROT-Befehle für die Manipulation eines stark gebundenen nuklearen Spins, wenn diese Quanten-OP-Codes zumindest eine CROT-Operation zumindest eines Quantenbits und/oder zumindest eines nuklearen Quantenbits bei Ausführung umfassen. Ein Quanten-OP-Code im Sinne des hier vorgelegten Dokuments ist ein Op-Code, der bei Ausführung durch den Quantencomputer **QC** und/oder die Steuervorrichtung **μ C** eine Manipulation und/oder Auslesung zumindest eines Quantenbits und/oder nuklearen

Quantenbits zur Folge hat. Typischerweise umfassen die Quanten-OP-Codes im Speicher **RAM, NVM** CROT-Befehle für die Manipulation eines schwach gebundenen nuklearen Spins eines schwach an ein Quantenbit gebundenes nukleares Quantenbit. Ein Speicher **RAM, NVM** der Steuervorrichtung μC ist vorzugsweise dazu eingerichtet für einen oder mehrere oder alle nuklearen Spins, bei denen der

5 Quantencomputer **QC** dazu eingerichtet ist, diese als nukleare Quantenbits zu nutzen, eine Information, insbesondere als Flag, bereitzuhalten, die angibt, ob es sich um einen stark an ein Quantenbit – hier ein NV-Zentrum - gebundenen nukleares Quantenbit – hier in Form eines nuklearen Spins - oder einen schwach an ein Quantenbit – hier ein NV-Zentrum - gebundenen nukleares Quantenbit – hier in Form eines nuklearen Spins – handelt. Der Speicher **RAM, NVM** der

10 Steuervorrichtung μC hält vorzugsweise für einen oder mehrere oder alle nuklearen Spins, bei denen der Quantencomputer **QC** dazu eingerichtet ist, diese als nukleare Quantenbits zu nutzen, eine Information bereit, die angibt, an welches Quantenbit – hier NV-Zentrum - der betreffende nukleare Spin als nukleares Quantenbit gebunden ist. Die Steuervorrichtung μC führt einen CROT-OP-Code und/oder eine CROT-Operation eines nuklearen Quantenbits – hier eines nuklearen Spins -

15 vorzugsweise in Abhängigkeit von diesen Informationen, die sich im Speicher **RAM, NVM** befinden, aus.

Vorzugsweise umfasst der Speicher **RAM, NVM** für zumindest ein nukleares Quantenbit vorzugsweise in Form einen nuklearen Spin eines Atomkerns, den der Quantencomputer **QC** als nukleares Quantenbit benutzt, eine Information darüber, mit welchem Quantenbit – hier NV-

20 Zentrum – dieses nukleare Quantenbit - hier in Form dieses nuklearen Spins - koppelbar ist. Der Speicher **RAM, NVM** umfasst vorzugsweise für zumindest diesen einen nuklearen Spin eines Atomkerns, den der Quantencomputer **QC** als nukleares Quantenbit benutzt, eine Information darüber, auf welcher Position und/oder in welcher Gruppe von Positionen dieser zumindest eine Atomkern sich im Kristallgitter relativ zur Position des als Quantenbit genutzten, zugeordneten

25 paramagnetischen Zentrums- hier des zugeordneten NV-Zentrums - im Kristallgitter befindet.

Vorzugsweise ist der Quantencomputer **QC** dazu eingerichtet, dass der Quantencomputer **QC** für das Auslesen der nuklearen Quantenzustände von n nuklearen Spins von n Atomkernen von n nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC**, die an ein Quantenbit – hier ein NV-Zentrum - gekoppelt sind, 2^n CROT-Gatter auszuführen, um Kombinationen von Quantenzuständen zu überprüfen. Dabei

30 ist vorzugsweise n eine ganze positive Zahl größer 2. Der Quantencomputer **QC** ist vorzugsweise dazu eingerichtet, den Übergang des Quantenzustands des Quantenbits – hier den NV-Übergang des NV-

Zentrums - zu detektieren, wenn sich die n nuklearen Spins der n Atomkerne Kerne der n nuklearen Quantenbits in einem dieser 2^n Kombinationen von Quantenzuständen dieser n Quantenbits (Quantenbits und nukleare Quantenbits als Gemeinschaft) befinden.

Vorteil

- 5 Der hier vorgestellte Quantencomputer kann durch unterschiedliche Ansteuerung von schwach und stark an die NV-Zentren gekoppelten nuklearen Spins von Atomkernen nuklearer Quantenbits eine höhere Anzahl von Quantenbits bei verbesserter Fidelity realisieren. Die Vorteile sind hierauf aber nicht beschränkt.

Liste der Figuren

- 10 Figur 1
zeigt den oben beschriebenen beispielhaften verlegbaren Quantencomputer QC schematisch vereinfacht.
- Figur 2
zeigt die verschiedenen Positionen der koppelnden nuklearen Spins.
- 15 Figur 3
zeigt die Verschiebung der Energieaufspaltung durch Hyperfein-WW hf Zeeman, nZ und Quadrupol Q.
- Figur 4
zeigt eine vorschlagsgemäße Pulssequenz zur Charakterisierung eines Quantenbits in Form eines NV-
- 20 Zentrums.
- Figur 5
zeigt die Pulssequenz für ein Ramsey- oder Hahn-Echo.
- Figur 6
zeigt ein Beispiel für die Ansteuerung eines stark an das NV-Zentrum des Quantenbits gekoppelten, nuklearen Spins des Atomkerns eines nuklearen Quantenbits.
- 25

Figur 7

zeigt ein Beispiel für die Ansteuerung eines schwach an das NV-Zentrum des Quantenbits gekoppelten, nuklearen Spins des Atomkerns eines nuklearen Quantenbits.

Figur 8

- 5 zeigt beispielhaft einen Bernstein-Vazirani-Code in der Quantencomputerprogrammbeschreibungssprache Quiskit.

Figur 9

zeigt den Source-Code des Beispiels der Figur 8 (BV-Code) in Form beispielhafter Assembler Op-Codes, die der Quantencomputer QC ausführt.

10 Figur 10

zeigt das Beispiel einer Addition von 2^m mal 3 Bit Werten.

Beschreibung der Figuren

Die Figuren erläutern den Vorschlag schematisch und vereinfacht. Die Offenlegung der hier vorgelegten Schrift ist nicht auf die Figuren begrenzt und umfasst auch andere Kombinationen.

15 Figur 1

Figur 1 zeigt den in der DE 20 2023 101 056 U1 beispielhaft beschriebenen beispielhaften verlegbaren Quantencomputer **QC** schematisch vereinfacht. Das hier vorgelegte Dokument verzichtet auf eine Wiederholung der Beschreibung der DE 20 2023 101 056 U1 an dieser Stelle und verweist zum Verständnis auf die DE 20 2023 101 056 U1 und die durch Prioritätsinanspruchnahme mit der DE 20 2023 101 056 U1 verbundenen Dokumente

20

Figur 2

Figur 2 zeigt die verschiedenen Positionen der koppelnden nuklearen Spins.

Für die Kopplungsstärken der koppelnden nuklearen Spins der nuklearen Quantenbits wurden bei der Ausarbeitung der hier vorgestellten technischen Lehre folgende Kopplungsstärken gefunden.

25

Nummer	Position	Kopplungsstärke
1	J-Position direkt neben dem Stickstoff	126 MHz
2	A-Position	13,8 MHz
3	B-Position	13,2 MHz
4	C-Position	Bei der Ausarbeitung nicht benutzt
5	D-Position	6.5 MHz
6	E-Position	4,2 MHz
7	F-Position	4,2 MHz
8	G-Position	2,6 MHz
9	H-Position	2,6 MHz
10	schwach gekoppelt	0.8 MHz

Figur 3

Figur 3 zeigt die Verschiebung der Energieaufspaltung durch Hyperfein-WW hf Zeeman, nZ und Quadrupol Q. Hierbei bedeuten:

Q= Quadrupol Anteil

5 hf= Hyperfeinwechselwirkung

nZ=nuklearer Zeeman Aufspaltung

Figur 4

10 Figur 4 zeigt eine vorschlagsgemäÙe Pulssequenz zur Charakterisierung eines Quantenbits in Form eines NV-Zentrums.

Die Pulssequenz beginnt mit einem Laserpuls der Lichtquelle **LD**. Die zeitliche Dauer und die Amplitude des Laser-Pulses hängen von den optischen Gegebenheiten innerhalb des Quantencomputers **QC** ab. Das hier vorgelegte Dokument empfiehlt, diese Werte mittels einer Reihe von Experimenten an der konkreten Quantencomputervorrichtung zu ermitteln.

15 Nach dem Laser-Puls folgt in dem hier vorgelegten Beispiel ein CROT θ Signal über die Mikrowelle als Mikrowellenburst mit der Mikroellenfrequenz und der Dauer τ_{MW} zum Ansprechen des betreffenden NV-Zentrums. Das CROT- θ -Signal dreht den Elektronenspin der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums um den Winkel θ .

Auf dieses CROT θ Signal folgt wieder ein Laserpuls mit der Pumpstrahlung mit der Pumpstrahlungswellenlänge. Dabei erfasst der Fotodetektor **PD** die Intensität der Fluoreszenzstrahlung des NV-Zentrums. Der Quantencomputer **QC** kann beispielsweise die detektierten Photonen zählen und einen Zähler um jeweils einen Zähler Schritt erhöhen, wenn er ein Photon der Fluoreszenzstrahlung detektiert. Der Quantencomputer **QC** vermisst nun für jeweils eine zeitliche Dauer τ_{MW} die Anzahl der in einem vorgegebenen Zeitraum detektierten Photonen. In Abhängigkeit von der zeitlichen Dauer τ_{MW} des Mikrowellenbursts ergibt sich eine sinusförmige Verteilung der Zähler Schritte: Die Rabi-Oszillation. Ist die Rabi-Frequenz bekannt, so kann ein Mikrowellenpuls vorgegebener zeitlicher Dauer τ_{MW} den Elektronenspin der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums um einen vorgebbaren Winkel θ drehen. Der Winkel ergibt sich dann als $\theta = \pi(\tau_{MW}/\tau_{MW\pi})$. Hierbei ist $\tau_{MW\pi}$ die halbe zeitliche Periodendauer der Rabi-Oszillation.

Bevorzugt speichert die Steuervorrichtung **μC** des Quantencomputers **QC** die Periodendauer oder die halbe zeitliche Periodendauer oder die Rabi-Frequenz in einem ihrer Speicher für die Verwendung bei der Ansteuerung des NV-Zentrums ab.

Auf diese Weise kann der Quantencomputer **QC** den Mikrowellenburst für die Ausführung eines X-Gatters oder eines H-Gatters oder eines CROT-Gatters definieren.

Diese Routinen benötigt man zur Charakterisierung des Systems des Quantencomputers **QC**.

Figur 5

Figur 5 zeigt die Pulssequenz für ein Ramsey- oder Hahn-Echo.

Nach der Initialisierung des NV-Zentrums mittels eines Laserpulses der Lichtquelle **LD** definiert ein erster $(\pi/2)$ -CROT-Befehl um die X-Achse mittels eines entsprechenden Mikrowellenbursts die X-Achse. Es folgt ein π -CROT-Befehl um die x-Achse mittels eines entsprechenden zweiten Mikrowellenbursts. Nach einer Zeit τ seit dem zeitlichen Beginn des ersten Mikrowellenpulses erfolgt ein $-\pi$ -CROT-Befehl um die x-Achse mittels eines entsprechenden dritten Mikrowellenbursts. Dabei ist die Mikrowellenphase des dritten Mikrowellenbursts zur Mikrowellenphase des ersten Mikrowellenbursts um 180° phasenversetzt. Die Messungen werden nun für verschiedene Zeiten τ durchgeführt. Es ergibt sich das Schwingungssignal, das die Zeitkonstante T_2 aufweist. Dies ist die gesuchte T_2 Zeit.

Diese Routinen benötigt man zur Charakterisierung des Systems des Quantencomputers **QC**.

Figur 6

Figur 6 zeigt ein Beispiel für die Ansteuerung eines stark an das NV-Zentrum des Quantenbits gekoppelten, nuklearen Spins des Atomkerns eines nuklearen Quantenbits. Die Ansteuerung erfolgt im ESLAC.

- 5 Nach der Initialisierung des NV-Zentrums mittels eines Laserpulses der Lichtquelle **LD** definiert ein erster π -CROT-Befehl um die X-Achse mittels eines entsprechenden Mikrowellenbursts die X-Achse. Dieser Befehl koppelt den nuklearen Spin des ^{13}C -Isotops mit dem NV-Zentrum.

- Nach dem Laser-Puls folgt in dem hier vorgelegten Beispiel ein CROT θ Signal über die Radiowelle als Radiowellenburst mit der Radiowellenfrequenz und der Dauer τ_{RF} zum Ansprechen des betreffenden NV-Zentrums. Das CROT- θ -Signal dreht den nuklearen Spin des ^{13}C -Isotops, das mit dem NV-Zentrum gekoppelt ist, um den Winkel θ .
- 10

Auf dieses CROT θ Signal folgt ein π -CROT-Befehl um die X-Achse mittels eines entsprechenden Mikrowellenbursts, der das NV-Zentrum und das ^{13}C -Isotop wieder voneinander entkoppelt.

- Auf diesen π -CROT-Befehl um die X-Achse folgt wieder ein Laserpuls mit der Pumpstrahlung mit der Pumpstrahlungswellenlänge. Dabei erfasst der Fotodetektor **PD** die Intensität der Fluoreszenzstrahlung des NV-Zentrums. Der Quantencomputer **QC** kann beispielsweise die detektierten Photonen zählen und einen Zähler um jeweils einen Zähler schritt erhöhen, wenn er ein Photon der Fluoreszenzstrahlung detektiert. Der Quantencomputer **QC** vermisst nun für jeweils eine zeitliche Dauer τ_{RF} die Anzahl der in einem vorgegebenen Zeitraum detektierten Photonen. In
- 15
- Abhängigkeit von der zeitlichen Dauer τ_{RF} des Radiowellenbursts ergibt sich eine sinusförmige Verteilung der Zähler schritte: Die Rabi-Oszillation. Ist die Rabi-Frequenz bekannt, so kann ein Radiowellenpuls vorgegebener zeitlicher Dauer τ_{RF} den nuklearen Spin des ^{13}C -Atomkerns um einen vorgebbaren Winkel θ drehen. Der Winkel ergibt sich dann als $\theta = \pi(\tau_{\text{RF}}/\tau_{\text{RF}\pi})$. Hierbei ist $\tau_{\text{RF}\pi}$ die halbe zeitliche Periodendauer der Rabi-Oszillation.
- 20

- Bevorzugt speichert die Steuervorrichtung **μC** des Quantencomputers **QC** die Periodendauer oder die halbe zeitliche Periodendauer oder die Rabi-Frequenz in einem ihrer Speicher für die Verwendung bei der Ansteuerung des ^{13}C -Isotops über das NV-Zentrum ab.
- 25

Auf diese Weise kann der Quantencomputer **QC** den Radiowellenburst für die Ausführung eines X-Gatters oder eines H-Gatters oder eines CROT-Gatters definieren.

In dem Beispiel ist die Kopplungsstärke des nuklearen Spins des ^{13}C -Isotops mit dem NV-Zentrum 13,3MHz.

- 5 Diese Routinen benötigt man zur Charakterisierung des Systems des Quantencomputers **QC**.

Figur 7

Figur 7 zeigt ein Beispiel für die Ansteuerung eines schwach an das NV-Zentrum des Quantenbits gekoppelten, nuklearen Spins des Atomkerns eines nuklearen Quantenbits.

- 10 Beim dem Verfahren überträgt der Quantencomputer **QC** unter einer Hartmann-Hahn (HH) Bedingung, die Information des Quantenzustands des NV-Zentrums auf den Quantenzustand des nuklearen Spins des betreffenden jeweiligen Atomkerns.

Nach der Initialisierung des NV-Zentrums mittels eines Laserpulses der Lichtquelle **LD** definiert ein erster $\pi/2$ -CROT-Befehl um die X-Achse mittels eines entsprechenden Mikrowellenbursts die X-Achse. Dieser $\pi/2$ -CROT-Befehl ist in der Figur 7 mit Mikrowelle1 bezeichnet.

- 15 Anschließend führt der Quantencomputer **QC** ein CROT um die Y-Achse durch. Dies ist der sogenannte Spinlock. Dies führt dazu, dass die Ausrichtung des Spins des Elektrons des NV-Zentrums mit einer Rabi-Frequenz (Spinlock) rotiert. Der Quantencomputer **QC** stellt die Rabi-Frequenz durch Einstellung des Magnetfelds **B** so ein, dass die Rabi-Frequenz in Resonanz mit der Lamor-Frequenz des nuklearen Spins des Atomkerns liegt. Der Quantencomputer **QC** nutzt für die Einstellung des
20 Magnetfelds bevorzugt das erste Magnetfelderzeugungsmittel **MGx** und/oder das zweite Magnetfelderzeugungsmittel **MGy** und/oder das dritte Magnetfelderzeugungsmittel **MGz**.

- Dadurch, dass dann die Rabi-Frequenz des NV-Zentrums in Resonanz mit der Lamor-Frequenz des nuklearen Spins des Atomkerns liegt, kann ein definierter Spin-Spin-SWAP (Spin-Austausch) stattfinden. Der Übergang des Spin-Spin-Swaps ist dabei wieder durch eine Zeitkonstante als
25 Kopplungskonstante gekennzeichnet. Damit wird ein teilweiser Spin-Spin-Swap steuerbar. (z.B. 50% Spin-Austausch). Die Spinlockzeit τ_{SL} steuert diesen Übergang.

Die Figur 7 zeigt beispielhaft eine Sequenz zum Koppeln eines schwach an das NV-Zentrum gekoppelten nuklearen Spins eines ^{13}C Isotops als nuklearer Spin eines nuklearen Quantenbits.

Die Kopplungsstärke liegt in dem Beispiel der Figur 7 bei 1,803 MHz. Dieses Signal ist in der Figur 23 mit Mikrowelle 2 bezeichnet.

Dieses Verfahren unter Hartmann-Hahn (HH) Bedingung ist besonders wirksam für die Kopplung zwischen NV-Zentren und schwach an diese gekoppelte nukleare Spins.

- 5 Dieser Befehl koppelt den schwach gekoppelten nuklearen Spin des ^{13}C -Isotops mit dem NV-Zentrum.

Auf dieses Spinlock-Signal folgt ein $\pi/2$ -CROT-Befehl um die X-Achse mittels eines entsprechenden Mikrowellenbursts, der das NV-Zentrum und das ^{13}C -Isotop wieder voneinander entkoppelt. Dieser $\pi/2$ -CROT-Befehl ist in der Figur 7 ebenfalls mit Mikrowelle 1 bezeichnet, da er typischerweise bei der gleichen Kopplungsfrequenz wie der vorausgehende erste $\pi/2$ -CROT-Befehl erfolgt.

- 10 Die Übermittlung des Mikrowelle 1-Signals und des Mikrowelle 2 Signals erfolgt bevorzugt über ein und dieselbe Mikrowellenleitung. Die hier gewählte Darstellung dient nur zur Darstellung der zeitlichen Abfolge der Mikrowellensignale unterschiedlicher Funktionalität.

Auf diesen $\pi/2$ -CROT-Befehl um die X-Achse folgt wieder ein Laserpuls mit der Pumpstrahlung mit der Pumpstrahlungswellenlänge. Dabei erfasst der Fotodetektor **PD** die Intensität der

- 15 Fluoreszenzstrahlung des NV-Zentrums. Der Quantencomputer **QC** kann beispielsweise die detektierten Photonen zählen und einen Zähler um jeweils einen Zähler schritt erhöhen, wenn er ein Photon der Fluoreszenzstrahlung detektiert. Der Quantencomputer **QC** vermisst nun für jeweils eine zeitliche Dauer τ_{SL} der Spinlock-Zeit die Anzahl der in einem vorgegebenen Zeitraum detektierten Photonen. In Abhängigkeit von der zeitlichen Dauer τ_{SL} der Spinlock-Zeit ergibt sich eine sinusförmige
- 20 Verteilung der Zähler schritte: Die Rabi-Oszillation. Ist die Rabi-Frequenz bekannt, so kann eine Spinlock-Zeit vorgegebener zeitlicher Dauer τ_{SL} den schwach gebundenen nuklearen Spin des ^{13}C -Atomkerns um einen vorgebbaren Winkel θ drehen. Der Winkel ergibt sich dann als $\theta = \pi(\tau_{\text{SL}}/\tau_{\text{SL}\pi})$. Hierbei ist $\tau_{\text{SL}\pi}$ die halbe zeitliche Periodendauer der Rabi-Oszillation.

- Bevorzugt speichert die Steuervorrichtung **μC** des Quantencomputers **QC** die Periodendauer oder die
- 25 halbe zeitliche Periodendauer oder die Rabi-Frequenz in einem ihrer Speicher für die Verwendung bei der Ansteuerung des schwach gebundenen nuklearen Spins des ^{13}C -Isotops über das NV-Zentrum ab.

Auf diese Weise kann der Quantencomputer **QC** den Spinlock-Mikrowellenburst für die Ausführung eines X-Gatters oder eines H-Gatters oder eines CROT-Gatters auf den schwach gebundenen nuklearen Spin des schwach gebundenen nuklearen Quantenbits definieren.

5 In dem Beispiel ist die beispielhafte Kopplungsstärke des nuklearen Spins des ^{13}C -Isotops mit dem NV-Zentrum 1,803MHz.

Diese Routinen benötigt man zur Charakterisierung des Systems des Quantencomputers **QC**.

Figur 8

Figur 8 zeigt beispielhaft einen Bernstein-Vazirani-Code in der Quantencomputerprogrammbeschreibungssprache Quiskit (Figur 8a)

10 Die Steuervorrichtung μC oder ein anderer Prozessor übersetzt mit Hilfe eines Transpilers diese Standardgatter in CROT-Befehle. (Figur 8b).

Zur besseren Kompaktheit sind die CROT Befehle mit dem Buchstaben R bezeichnet. Der zweite Buchstabe nach dem R bezeichnet die Drehachse. Der Wert in Klammern bezeichnet den Drehwinkel.

q_0 bezeichnet in der Figur 8b einen ersten nuklearen Spin eines ersten nuklearen Quantenbits.

15 q_1 bezeichnet in der Figur 8b einen zweiten nuklearen Spin eines zweiten nuklearen Quantenbits.

q_2 bezeichnet in der Figur 8b den Elektronenspin der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums als Quantenbit.

Figur 9

Figur 9 zeigt den Source-Code des Beispiels der Figur 8 (BV-Code) in Form beispielhafter Assembler
20 Op-Codes, die der Quantencomputer **QC** ausführt. Die Quanten-Op-Codes sind in einem für Menschen lesbaren Text-File angegeben. Ein Quanten-Op-Code im Sinne des hier vorgelegten Dokuments ist ein Op-Code, bei dessen Ausführung der Quantencomputer **QC** zumindest ein Quantenbit des Quantencomputers **QC** manipuliert. Vorzugsweise kodiert der Transpiler die CROT-Op-Codes durch binäre Zahlen eines Maschinencodes. Die beispielhafte Syntax des Beispiels der Figur
25 9 sieht einen Op-Code pro Zeile vor. Diese einfachen Befehle in Form dieser Op-Codes veranlassen den Quantencomputer QC einfache, ausführbare Pulse zu erzeugen.

Die Quanten-OP-Codes der Figur 9 sind:

- NV_1_X1: Initialisierung der X-Achse durch einen π -Mikrowellenpuls auf das NV-Zentrum als Quantenbit (CROT mit 180°)
- qn1_CXNOT: CROT um 180° mit X Drehachse auf das nukleare Quantenbit 1 (π -Puls) (hier das ^{14}N -Stickstoffatom des NV-Zentrums), wenn NV m=1 ist.
5 (q_1 in Figur 8b)
- qn1_CHYNOT: CROT um 90° mit Y Drehachse auf das nukleare Quantenbit 1 ($\pi/2$ -Puls) (hier das ^{14}N -Stickstoffatom des NV-Zentrums), wenn NV m=1 ist.
(q_1 in Figur 8b)
- qn2_3/2CXNOT: CROT um 270° mit X Drehachse auf das nukleare Quantenbit 2 ($3\pi/2$ -Puls) (hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist), wenn NV m=1 ist. .
10 (q_0 in Figur 8b)
- qn2_CHYNOT: CROT um 90° mit Y Drehachse auf das nukleare Quantenbit 2 ($\pi/2$ -Puls) (hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist), wenn NV m=1 ist.
(q_0 in Figur 8b)
- 15 NV_1_X2: CROT des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums um π mit Drehachse X mit viel Mikrowellenleistung also unabhängig von Zustand des nuklearen Quantenbits 1 (hier das ^{14}N -Stickstoffatom des NV-Zentrums) (q_2 in Figur 8b),
- 20 NV_1_X3: CROT des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums um π mit Drehachse X abhängig von Zustand des nuklearen Quantenbits 2 (hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist), wenn der nukleare Spin des ^{13}C -Isotops down ist (q_2 in Figur 8b).
- 25 NV_1_RY2: CROT des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums um $\pi/2$ mit Drehachse Y abhängig von Zustand des nuklearen Quantenbits 2 (hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist),

- wenn der nukleare Spin des ^{13}C -Isotops down ist
(q_2 in Figur 8b).
- NV_1_RY3: CROT des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums
um $\pi/2$ mit Drehachse Y abhängig von Zustand des nuklearen Quantenbits 2
5 (hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist),
wenn der nukleare Spin des ^{13}C -Isotops up ist
(q_2 in Figur 8b).
- NV_1_Y3 CROT des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums
10 um π mit Drehachse Y abhängig von Zustand des nuklearen Quantenbits 2
(hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist),
wenn der nukleare Spin des ^{13}C -Isotops down ist
(q_2 in Figur 8b).
- NV_1_RY2: CROT des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums
15 um $\pi/2$ mit Drehachse Y abhängig von Zustand des nuklearen Quantenbits 2
(hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist),
wenn der nukleare Spin des ^{13}C -Isotops down ist
(q_2 in Figur 8b).
- NV_1_RY3: CROT des Elektronenspins der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums
20 um $\pi/2$ mit Drehachse Y abhängig von Zustand des nuklearen Quantenbits 2
(hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist),
wenn der nukleare Spin des ^{13}C -Isotops up ist
(q_2 in Figur 8b).
- qn1_CXNOT: CROT um 180° mit X Drehachse auf das nukleare Quantenbit 1 (π -Puls)
25 (hier das ^{14}N -Stickstoffatom des NV-Zentrums), wenn NV m=1 ist.
(q_1 in Figur 8b)
- qn1_CHYNOT: CROT um 90° mit Y Drehachse auf das nukleare Quantenbit 1 ($\pi/2$ -Puls)
(hier das ^{14}N -Stickstoffatom des NV-Zentrums), wenn NV m=1 ist.
(q_1 in Figur 8b)

qn2_3/2CXNOT: CROT um 270° mit X Drehachse auf das nukleare Quantenbit 2 ($3\pi/2$ -Puls)
(hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist), wenn NV $m=1$ ist. .
(q_0 in Figur 8b)

5 qn2_CHYNOT: CROT um 90° mit Y Drehachse auf das nukleare Quantenbit 2 ($\pi/2$ -Puls)
(hier ein ^{13}C -Isotop, das an das NV-Zentrum gekoppelt ist), wenn NV $m=1$ ist.
(q_0 in Figur 8b)

Figur 10

Figur 10 zeigt das Beispiel einer Addition von 2m mal 3 Bit Werten. Für die Realisierung verwendet
der Algorithmus viele Toffoli-Gatter (CCNOT Gatter). Im Gegensatz zu Quantencomputern auf Basis
10 supraleitender Quantenbits kommt der hier vorgestellte Quantencomputer mit
Einzelgatteroperationen aus. Quantencomputer auf Basis supraleitender Quantenbits benötigen bis
zu 23 Quantengatter um ein einziges Toffoli-Gatter (CCNOT Gatter) zu realisieren.

Der hier vorgestellte Quantencomputer realisiert die Toffoli-Gatter (CCNOT Gatter) mit NV- ^{14}N - ^{13}C
Kopplungen der entsprechenden Spins.

15 Glossar

Quantencomputerprogramm und Quantenoperation und Quanten-Op-Code

Ein Quantencomputerprogramm ist im Sinne der hier vorgestellten Schrift ein Programm, das
mindestens eine Quantenoperation umfasst und von einer Steuervorrichtung μC eines verlegbaren
Quantencomputers **QC** ausgeführt wird. Bevorzugt kodieren ein oder mehrere binäre Daten im
20 Speicher **NVN, RAM** der Steuervorrichtung μC des verlegbaren Quantencomputers **QC** eine solche
Quantenoperation. Beispielsweise kann es sich um ein vorbestimmtes Datenwort handeln. Eine
Quantenoperation im Sinne der hier vorgelegten Schrift manipuliert zumindest den Quantenzustand
zumindest eines Quantenpunkts der Quantenpunkte **NV1, NV2, NV3** der Quantenbits des
verlegbaren Quantencomputers **QC** und/oder manipuliert zumindest den Quantenzustand zumindest
25 eines Kernquantenpunkts der Kernquantenpunkte **CI1₁, CI1₂, CI1₃, CI2₁, CI2₂, CI2₃, CI3₁, CI3₂, CI3₃** des
der nuklearen Quantenbits (Kernquantenbits) des verlegbaren Quantencomputers **QC**. Das
Datenwort, das eine solche Quantenoperation symbolisiert bezeichnet die technische Lehre der hier
vorgelegten Schrift auch als Quanten-Op-Code. Ein Quantencomputerprogramm umfasst somit

zumindest einen Quanten-Op-Code. Der Quanten-Op-Code kann auch mehrere Datenwörter umfassen.

unwesentliche Phasendrehung

Eine unwesentliche Phasendrehung des Zustandsvektors eines Quantenpunkts eines Quantenbits des Quantencomputers **QC** im Sinne dieser Offenlegung ist eine Phasendrehung, die für den Betrieb und die Funktionstüchtigkeit als unwesentlich oder korrigierbar betrachtet werden kann. Sie kann daher in erster Näherung als gleich Null angenommen werden.

ZPL-Tabelle

Die Tabelle ist nur eine beispielhafte Zusammenstellung einiger möglicher paramagnetischer Zentren. Diese können als elektronische Quantenbits benutzt werden. Das hier vorgelegte Dokument empfiehlt die Verwendung von NV-Zentren als paramagnetische Zentren von Quantenpunkten von Quantenbits des Quantencomputers **QC** besonders. Die funktionaläquivalente Nutzung anderer paramagnetischer Zentren in anderen Materialien des Kristalls des Substrats **D** ist ausdrücklich möglich. Die Pumpstrahlungswellenlängen λ_{pmp} der Pumpstrahlung **LB** sind ebenfalls beispielhaft. Andere Pumpstrahlungswellenlängen λ_{pmp} sind in der Regel möglich, wenn sie kürzer als die Wellenlänge der anzuregenden ZPL sind.

Material des Kristalls des Substrats D	Störstellenzentrum	ZPL	beispielhafte Pumpstrahlungswellenlänge (λ_{pmp})	Referenz
Diamant	NV-Zentrum		520nm, 532nm	
Diamant	SiV-Zentrum	738 nm	685 nm	/2/, /3/, /4/
Diamant	GeV-Zentrum	602 nm	532 nm	/4/, /5/
Diamant	SnV-Zentrum	620 nm	532 nm	/4/, /6/

	Diamant	PbV-Zentrum	520 nm, 552 nm 715 nm	450 nm 532 nm	/4/, /7/ /4/, /7/ /7/
	Diamant	ST1-Zentrum	555 nm	532 nm	/15/
5	Diamant	TR12-Zentrum	471 nm	410 nm	/16/
	Silizium	G-Zentrum	1278,38 nm	637 nm	/8/
	Siliziumkarbid	V _{Si} -Zentrum	862 nm(V1) 4H, 858,2 nm(V1') 4H 917 nm(V2) 4H, 865 nm(V1) 6H, 887 nm(V2) 6H, 907 nm(V3) 6H	730 nm 730 nm 730 nm 730 nm 730 nm 730 nm	/1/, /9/, /10/ /1/, /9/, /10/ /1/, /9/, /10/ /1/, /9/, /10/ /1/, /9/, /10/ /1/, /9/, /10/
	Siliziumkarbid	DV-Zentrum	1078–1132 nm 6H	730 nm	/9/
	Siliziumkarbid	V _C V _{Si} -Zentrum	1093–1140 nm 6H	730 nm	/9/
15	Siliziumkarbid	CAV-Zentrum	648.7 nm 4H, 6H, 3C 651.8 nm 4H, 6H, 3C 665.1 nm 4H, 6H, 3C 668.5 nm 4H, 6H, 3C 671.7 nm 4H, 6H, 3C	730 nm 730 nm 730 nm 730 nm 730 nm	/9/ /9/ /9/ /9/
20			673 nm 4H, 6H, 3C 675.2 nm 4H, 6H, 3C 676.5 nm 4H, 6H, 3C	730 nm 730 nm 730 nm	/9/ /9/ /9/
	Siliziumkarbid	N _C V _{Si} -Zentrum	1180 nm-1242 nm 6H	730 nm	/9/, /13/, /14/

Sonstiges

- 25 Die obige Beschreibung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und beschränkt diese Offenbarung nicht auf die gezeigten und/oder beschriebenen Beispiele. Andere Variationen zu den offengelegten Beispielen können von denjenigen, die über gewöhnliche Fachkenntnisse auf dem

Gebiet verfügen, anhand der Zeichnungen, der Offenbarung und der Ansprüche verstanden und ausgeführt werden. Die unbestimmten Artikel "ein" oder "eine" und dessen Flexionen schließen eine Vielzahl nicht aus, während die Erwähnung einer bestimmten Anzahl von Elementen nicht die Möglichkeit ausschließt, dass mehr oder weniger Elemente vorhanden sind. Eine einzige Einheit kann die Funktionen mehrerer in der Offenbarung genannter Elemente erfüllen, und umgekehrt können mehrere Elemente die Funktion einer Einheit erfüllen. Zahlreiche Alternativen, Äquivalente, Variationen und Kombinationen sind möglich, ohne dass der Anwendungsbereich der vorliegenden Offenbarung verlassen wird. Soweit nichts anders angegeben ist, können sämtliche Merkmale der vorliegenden Erfindung frei miteinander kombiniert werden. Dies betrifft die gesamte hier vorgelegte Schrift und zwar insbesondere auch jede Aussage und jede Kombination aus Substantiv und Adjektiv in der hier vorgelegten Schrift. Auch die in der Figurenbeschreibung beschriebenen Merkmale können, soweit nichts anderes angegeben ist, als Merkmale der Erfindung frei mit den übrigen Merkmalen kombiniert werden. Ein Beschränkung einzelner Merkmale der Ausführungsbeispiele auf die Kombination mit anderen Merkmalen der Ausführungsbeispiele ist dabei ausdrücklich nicht vorgesehen. Außerdem können gegenständliche Merkmale der Vorrichtung umformuliert auch als Verfahrensmerkmale Verwendung finden und Verfahrensmerkmale umformuliert als gegenständliche Merkmale der Vorrichtung. Eine solche Umformulierung ist somit automatisch mit offenbart. Die jeweils geltende Beanspruchung ergibt sich aus den jeweils geltenden Ansprüchen.

In der vorausgehenden detaillierten Beschreibung wird auf die beigefügten Zeichnungen verwiesen. Die Beispiele in der Beschreibung und den Zeichnungen sollten als illustrativ betrachtet werden und sind nicht als einschränkend für das beschriebene spezifische Beispiel oder Element zu betrachten. Aus der vorausgehenden Beschreibung und/oder den Zeichnungen und/oder den Ansprüchen können durch Abänderung, Kombination oder Variation bestimmter Elemente mehrere Beispiele abgeleitet werden. Darüber hinaus können Beispiele oder Elemente, die nicht wörtlich beschrieben sind, von einer fachkundigen Person aus der Beschreibung und/oder den Zeichnungen abgeleitet werden.

Bezugszeichenliste

	AS	Abschirmung;
	B	magnetische Flussdichte;
	BENG	erste Energiereserve;
5	BENG2	zweite Energiereserve;
	CI1	erster Kernquantenpunkt des ersten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers QC . Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften ersten Kernquantenpunkt CI1 eines nuklearen Quantenbits des Quantencomputers QC um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat D , wobei das Substrat D im Bereich des Kernquantenpunkts CI1 des nuklearen Quantenbits des Quantencomputers QC bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4.;
10		
15		
	CI ₁	erster Kernquantenpunkt CI₁ des ersten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU QUALU1 des Quantencomputers QC mit einem stark an den ersten Quantenpunkt NV1 gebundenen ersten nuklearen Spin eines beispielhaften ersten ¹³ C-Kohlenstoffisotops (für den beispielhaften Fall, dass der erste Quantenpunkt ein NV-Zentrum in Diamant ist). Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften ersten Kernquantenpunkt CI₁ des ersten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU QUALU1 des Quantencomputers QC um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat D , wobei das Substrat D im Bereich des Kernquantenpunkts CI₁ bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der erste Kernquantenpunkt CI₁ des
20		
25		

ersten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der erste Kernquantenpunkt **CI1₁** des ersten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der erste Kernquantenpunkt **CI1₁** des ersten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

CI1₂

zweiter Kernquantenpunkt **CI1₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** mit einem stark an den ersten Quantenpunkt **NV1** gebundenen zweiten nuklearen Spin eines zweiten beispielhaften ¹³C-Kohlenstoffisotops (für den beispielhaften Fall, dass der erste Quantenpunkt ein NV-Zentrum in Diamant ist). Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften zweiten Kernquantenpunkt **CI1₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des Kernquantenpunkts **CI1₂** des nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der zweite Kernquantenpunkt **CI1₂** des zweiten Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der zweite Kernquantenpunkt **CI1₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der zweite Kernquantenpunkt **CI1₂**

des zweiten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

CI1₃

5

dritter Kernquantenpunkt **CI1₃** des dritten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** mit einem schwach an den ersten Quantenpunkt **NV1** gebundenen dritten nuklearen Spin eines dritten beispielhaften ¹³C-Kohlenstoffisotops (für den beispielhaften Fall, dass der erste Quantenpunkt ein NV-Zentrum in Diamant ist). Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften dritten Kernquantenpunkt **CI1₃** des dritten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des Kernquantenpunkts **CI1₃** des dritten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der dritte Kernquantenpunkt **CI1₃** des dritten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der dritte Kernquantenpunkt **CI1₃** des dritten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der dritte Kernquantenpunkt **CI1₃** des dritten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

10

15

20

25

CI2

30

zweiter Kernquantenpunkt des zweiten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC**. Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften zweiten Kernquantenpunkt **CI2** des zweiten nuklearen

Quantenbits des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des Kernquantenpunkts **CI2** des zweiten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4.;

5

CI2₁

erster Kernquantenpunkt **CI2₁** des ersten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** mit einem stark an den zweiten Quantenpunkt **NV2** gebundenen ersten nuklearen Spin eines ersten beispielhaften ¹³C-Kohlenstoffisotops (für den beispielhaften Fall, dass der zweite Quantenpunkt **NV2** ein NV-Zentrum in Diamant ist). Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften ersten Kernquantenpunkt **CI2₁** des ersten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des ersten Kernquantenpunkts **CI2₁** des ersten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der erste Kernquantenpunkt **CI2₁** des ersten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der erste Kernquantenpunkt **CI2₁** des ersten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** an den zweiten Quantenpunkt **NV2** des zweiten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der erste Kernquantenpunkt **CI2₁** des ersten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** an den zweiten

10

15

20

25

30

Quantenpunkt **NV2** des zweiten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

CI2₂

zweiter Kernquantenpunkt **CI2₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** mit einem stark an den zweiten Quantenpunkt **NV2** gebundenen zweiten nuklearen Spin eines zweiten beispielhaften ¹³C-Kohlenstoffisotops (für den beispielhaften Fall, dass der zweite Quantenpunkt **NV2** ein NV-Zentrum in Diamant ist). Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften zweiten Kernquantenpunkt **CI2₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des zweiten Kernquantenpunkts **CI2₂** des zweiten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der zweite Kernquantenpunkt **CI2₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der zweite Kernquantenpunkt **CI2₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** an den zweiten Quantenpunkt **NV2** des zweiten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der zweite Kernquantenpunkt **CI2₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** an den zweiten Quantenpunkt **NV2** des zweiten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

CI2₃

dritter Kernquantenpunkt **CI2₃** des dritten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** mit einem stark an den zweiten Quantenpunkt **NV2** gebundenen dritten nuklearen

Spin eines dritten beispielhaften ^{13}C -Kohlenstoffisotops (für den beispielhaften Fall, dass der zweite Quantenpunkt **NV2** ein NV-Zentrum in Diamant ist). Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften dritten Kernquantenpunkt **CI2₃** des dritten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des dritten Kernquantenpunkts **CI2₃** des dritten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der dritte Kernquantenpunkt **CI2₃** des dritten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der dritte Kernquantenpunkt **CI2₃** des dritten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** an den zweiten Quantenpunkt **NV2** des zweiten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der dritte Kernquantenpunkt **CI2₃** des dritten nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU **QUALU2** des Quantencomputers **QC** an den zweiten Quantenpunkt **NV2** des zweiten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

CI3 dritter Kernquantenpunkt des dritten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC**. Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften dritten Kernquantenpunkt **CI3** des dritten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des Kernquantenpunkts **CI3** des dritten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment

umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4;

CI3₁

erster Kernquantenpunkt **CI3₁** des ersten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC**. Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften ersten Kernquantenpunkt **CI3₁** des ersten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des ersten Kernquantenpunkts **CI3₁** des ersten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der erste Kernquantenpunkt **CI3₁** des ersten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 und in der Figur 2 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der erste Kernquantenpunkt **CI3₁** des ersten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** an den dritten Quantenpunkt **NV3** des dritten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der erste Kernquantenpunkt **CI1₁** des ersten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

CI3₂

zweiter Kernquantenpunkt **CI3₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC**. Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften zweiten Kernquantenpunkt **CI3₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des zweiten Kernquantenpunkts **CI3₂** des zweiten nuklearen Quantenbits

des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4.

5 Der zweite Kernquantenpunkt **CI3₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 und in der Figur 2 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet. Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der zweite Kernquantenpunkt **CI3₂** des zweiten Quantenbits der dritten

10 QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** an den dritten Quantenpunkt **NV3** des dritten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der zweite Kernquantenpunkt **CI1₂** des zweiten nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des

15 ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

CI3₃ dritter Kernquantenpunkt **CI3₃** des dritten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC**. Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften dritten Kernquantenpunkt **CI3₃** des dritten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3**

20 des Quantencomputers **QC** um ein Isotop mit einem magnetischen Kernmoment in dem Substrat **D**, wobei das Substrat **D** im Bereich des dritten Kernquantenpunkts **CI3₃** des dritten nuklearen Quantenbits des Quantencomputers **QC** bevorzugt im Wesentlichen oder noch mehr bevorzugt absolut keine Isotope mit einem magnetischen Kernmoment umfasst. Die hier vorgelegte Schrift verweist in diesem Zusammenhang

25 auf die technische Lehre der bereits zitierten DE 10 2020 007 977 B4. Der dritte Kernquantenpunkt **CI3₃** des dritten nuklearen Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** ist in der Figur 3 und in der Figur 2 zur besseren Übersicht nicht eingezeichnet.

30 Der Leser sollte davon ausgehen, dass in der Figur 3 der dritte Kernquantenpunkt **CI3₃** des dritten Quantenbits der dritten QuantenALU **QUALU3** des Quantencomputers **QC** an den dritten

Quantenpunkt **NV3** des dritten Quantenbits des Quantencomputers **QC** so angekoppelt ist, wie in der Figur 2 der erste Kernquantenpunkt **CI1₁** des ersten Quantenbits der ersten QuantenALU **QUALU1** des Quantencomputers **QC** an den ersten Quantenpunkt **NV1** des ersten Quantenbits des Quantencomputers **QC** angekoppelt ist;

5

	CIF	erste Kameraschnittstelle;
	CIF2	zweite Kameraschnittstelle;
	CM1	erste Kamera;
	CM2	zweite Kamera;
10	CPU	Rechnerkern;
	D	Substrat;
	DBIF	Datenschnittstelle;
	DBS	dichroitischer Spiegel;
15	DEV	Energieversorgung von übrigen Vorrichtungsteilen des Quantencomputers QC , wobei dies typischerweise auch Vorrichtungsteile mit anderen Bezugszeichen betrifft. Zur besseren Übersicht sind die Energieversorgungsleitungen der übrigen Vorrichtungsteile des Quantencomputers QC in der Figur 1 nicht eingezeichnet;
	EXDB	externer Datenbus;
20	EV	Energieversorgung;
	f_{HF}	Mikrowellen- und/oder Radiowellenfrequenz;
	FL	Fluoreszenzstrahlung;
	GDX	X-Steuervorrichtung für die translatorische Positioniervorrichtung in X-Richtung XT ;

	GDY	Y-Steuervorrichtung für die translatorische Positioniervorrichtung in Y-Richtung YT ;
	GH	Gehäuse;
5	GPS	Navigationssystem oder Vorrichtung zur Positionsbestimmung und/oder Ausrichtungsbestimmung des Quantencomputers QC . Das Navigationssystem kann ggf. auch translatorische Geschwindigkeiten und/oder Rotationsgeschwindigkeiten des Quantencomputers QC bestimmen und an den rechnerkern CPU der Steuervorrichtung μC des Quantencomputers QC über den internen Datenbus INTDB melden. Das
10		Navigationssystem kann ggf. auch translatorische Beschleunigungen und/oder Rotationsbeschleunigungen des Quantencomputers QC bestimmen und an den rechnerkern CPU der Steuervorrichtung μC des Quantencomputers QC über den internen Datenbus INTDB melden;
	HeCLCS	Closed Loop Helium Gas Cooling-System;
15	INTDB	interner Datenbus der Steuervorrichtung μC ;
	KV	verlegbare Kühlvorrichtung;
	λ_{fl}	Fluoreszenzstrahlungswellenlänge;
	λ_{pmp}	Pumpstrahlungswellenlänge;
	LB	Pumpstrahlung;
20	LD	Lichtquelle;
	LDRV	Lichtquellentreiber;
	LDV	Ladevorrichtung;
	LM	Leuchte mit einem Leuchtmittel;
	μC	Steuervorrichtung;
25	MDBIF	interne Datenschnittstelle MDBIF ;

	MFSx	erste Magnetfeldsteuerung;
	MFSy	zweite Magnetfeldsteuerung;
	MFSz	dritte Magnetfeldsteuerung;
5	MGx	erstes Magnetfelderzeugungsmittel, das bevorzugt eine magnetische Flussdichte B_x erzeugt, die bevorzugt im Wesentlichen eine Richtung aufweist, die bevorzugt der ersten Richtung, also beispielsweise der Richtung der X-Achse, entspricht;
10	MGy	zweites Magnetfelderzeugungsmittel, das bevorzugt eine magnetische Flussdichte B_y erzeugt, die bevorzugt im Wesentlichen eine Richtung aufweist, die bevorzugt der zweiten Richtung, also beispielsweise der Richtung der Y-Achse, entspricht;
15	MGz	drittes Magnetfelderzeugungsmittel, das bevorzugt eine magnetische Flussdichte B_z erzeugt, die bevorzugt im Wesentlichen eine Richtung aufweist, die bevorzugt der dritten Richtung, also beispielsweise der Richtung der Y-Achse, entspricht;
	MSx	Magnetfeldsensor für die magnetische Flussdichte B_x in Richtung der X-Achse;
	MSy	Magnetfeldsensor für die magnetische Flussdichte B_y in Richtung der Y-Achse;
20	MSz	Magnetfeldsensor für die magnetische Flussdichte B_z in Richtung der Z-Achse;
	mWA	Mikrowellen- und/oder Radiowellenantenne;
25	MW/RF-AWFG	Mikrowellen- und/oder Radiowellenfrequenzgenerator zur Erzeugung weitestgehend frei vorgegebbarer Wellenformen (Englisch: Arbitrary-Wave-Form-Generator);
	NV1	erster Quantenpunkt des ersten Quantenbits des Quantencomputers QC . Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften ersten Quantenpunkt

		NV1 um ein paramagnetisches Zentrum in dem Substrat D . Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften ersten Quantenpunkt NV1 um ein NV-Zentrum oder um ein SiV-Zentrum oder ein ST1-Zentrum in dem Substrat D ;
5	NV2	zweiter Quantenpunkt des zweiten Quantenbits des Quantencomputers QC . Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften zweiten Quantenpunkt NV2 um ein paramagnetisches Zentrum in dem Substrat D . Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften zweiten Quantenpunkt NV2 um ein NV-Zentrum oder um ein SiV-Zentrum oder ein ST1-Zentrum in dem Substrat D ;
10		
	NV3	dritten Quantenpunkt des dritten Quantenbits des Quantencomputers QC . Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften dritten Quantenpunkt NV3 um ein paramagnetisches Zentrum in dem Substrat D . Bevorzugt handelt es sich bei dem beispielhaften dritten Quantenpunkt NV3 um ein NV-Zentrum oder um ein SiV-Zentrum oder ein ST1-Zentrum in dem Substrat D ;
15		
	NVM	nicht flüchtiger Speicher;
	OS	optisches System;
	OSZ	Taktgeber des Rechnerkerns CPU der Steuervorrichtung μC des Quantencomputers QC ;
20		
	PD	Fotodetektor;
	PM	Permanentmagnet;
	PV	Positioniervorrichtung für den Permanentmagneten PM ;
	PVC	Steuervorrichtung für die Positioniervorrichtung PV für den Permanentmagneten PM ;
25		
	PWR	Energieversorgung der Ladevorrichtung LDV ;
	QC	Quantencomputer;

- 5 QUALU1 erste QuantenALU. Die beispielhafte erste QuantenALU besteht aus einem ersten Quantenpunkt **NV1** der Quantenbits des Quantencomputers **QC** und einem ersten Kernquantenpunkt **CI1₁** der nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU des Quantencomputers **QC** und einem zweiten Kernquantenpunkt **CI1₂** der nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU des Quantencomputers **QC** und einem dritten Kernquantenpunkt **CI1₃** der nuklearen Quantenbits der ersten QuantenALU des Quantencomputers **QC** (Figur 2);
- 10 QUALU2 zweite QuantenALU. Die beispielhafte zweite QuantenALU besteht aus einem zweiten Quantenpunkt **NV2** der Quantenbits des Quantencomputers **QC** und einem ersten Kernquantenpunkt **CI2₁** der nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU des Quantencomputers **QC** und einem zweiten Kernquantenpunkt **CI2₂** der nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU des Quantencomputers **QC** und einem dritten Kernquantenpunkt **CI2₃** der nuklearen Quantenbits der zweiten QuantenALU des Quantencomputers **QC** (Figur 2);
- 15
- 20 QUV Quantencomputerüberwachungsvorrichtung. Der vorschlagsgemäße Quantencomputer **QC** weist bevorzugt eine Quantencomputerüberwachungsvorrichtung **QUV** auf, die den Quantencomputer **QC** überwacht, während er Quantencomputer **QC** ein Quantencomputerprogramm mit einem Quantencomputerprogrammablauf ausführt;
- 25 ÜOSZ Überwachungstakterzeugung **ÜOSZ**. Bevorzugt versorgt die Überwachungstakterzeugung **ÜOSZ** der die Quantencomputerüberwachungsvorrichtung **QUV** des Quantencomputers **QC** typischerweise die die Quantencomputerüberwachungsvorrichtung **QUV** des Quantencomputers **QC** mit einem Takt zum Betrieb des die
- 30 Quantencomputerüberwachungsvorrichtung **QUV** des Quantencomputers **QC**;

	RAM	flüchtiger Speicher;
	S0	Empfängerausgangssignal;
	S5	Sendesignal;
	SDB	Steuerdatenbus;
5	SRG	erste Energieaufbereitungsvorrichtung, insbesondere ein Spannungswandler oder ein Spannungsregler oder ein Stromregler;
	SRG2	zweite Energieaufbereitungsvorrichtung, insbesondere ein Spannungswandler oder ein Spannungsregler oder ein Stromregler;
	ST	Temperatursensor;
10	STM	halbdurchlässiger Spiegel;
	TS	Trennvorrichtung;
	ÜOSZ	Überwachungstakterzeugung der Quantencomputerüberwachungsvorrichtung QUV des Quantencomputers QC ;
15	V	Verstärker;
	WFG	Wellenformgenerator;
	XT	translatorische Positioniervorrichtung in X-Richtung;
	YT	translatorische Positioniervorrichtung in Y-Richtung;

Liste der zitierten Schriften

Sofern im Rahmen der Nationalisierung einer internationalen Folgeanmeldung es das Recht des jeweiligen Rechtssystems des Staates, in dem die Nationalisierung der internationalen Anmeldung der hier vorgelegten Schrift erfolgt, eine Offenbarung per Referenz erlaubt ist, ist der Inhalt der folgenden Schriften vollumfänglicher Teil der hier vorgelegten Offenlegung.,

5 CN 103 855 907 B, CN 108 831 576 B, CN 20 634 1126 U, DE 1 240 967 B, DE 1 564 070 B1, DE 2 124 465 B2, DE 7 219 216 U, DE 69 411 078 T2, DE 19 602 875 A1, DE 19 738 066 A1, DE 19 957 669 A1, DE 19 782 844 538 B1, DE 10 2014 225 346 A1, DE 10 2018 127 394.0, DE 10 2019 130 114.9, DE 10 2019 120 076.8, DE 10 2019 121 137, DE 10 2020 125 189 A1
 10 DE 10 2020 101 784 B3, DE 10 2020 007 977 B4, DE 10 2020 008 157 B3, DE 10 2021 110 964.7, DE 20 2021 101 169 U1, DE 20 2023 101 056 U1, EP 2 874 292 B1, EP 2 986 852 B1, EP 3 007 350 B1, EP 3 075 064 A1, EP 3 093 966 B1, EP 3 279 603 B1, EP 3 345 290 B1, EP 3 400 642 B1, EP 3 646 452 B1, EP 3 863 165 A1, RU 126 229 U1, RU 2 566 620 C2, RU 2014 143 858 A, US 5 443 657 A, US 5 859 484 A, US 8 552 616 B2, US 2016 377 029 A1, US 2018 226 165 A1,
 15 US 2019 368 464 A1, US 2021 147 061 A1, WO 2009 103 974 A1, WO 2014 031 037 A2, WO 2016 100 008 A2, WO 2019 143 396 A2, WO 2021 159 117 A1, https://de.wikipedia.org/wiki/Daisy_Chain, <https://en.wikipedia.org/wiki/Cryocooler>, <https://www.youtube.com/watch?v=j0SZirc7TO8>,

20 P. Balasubramanian, M. H. Metsch, Reddy, R. Prithvi, J. Lachlan, N. B. Manson, M. W. Doherty, F. Jelezko, "Discovery of ST1 centers in natural diamond" *Nanophotonics*, Vol. 8, Nr. 11, 2019, Seiten 1993-2002. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0148>

Castelletto and Alberto Boretti, "Silicon carbide color centers for quantum applications" *2020 J. Phys. Photonics* 2 022001

25 Carlo Bradac, Weibo Gao, Jacopo Forneris, Matt Trusheim, Igor Aharonovich, "Quantum Nanophotonics with Group IV defects in Diamond", DOI: 10.1038/s41467-020-14316-x, arXiv:1906.10992

Ovidiu Calin, "Deep Learning Architectures: A Mathematical Approach (Springer Series in the Data Sciences)", Springer; 1st ed. 2020 Edition (14. Februar 2021), ISBN-10: 3030367231, ISBN-13: 978-3030367237

- Franklin R. Chang Diaz, F. Wall y Baitty, Jared P. Squire, Richard H. Goulding, Edgar A. Bering, Roger D. Bengtson, "The *Vasimr Engine: Project Status and Recent Accomplishments* ", herunterladbar am 09.01.2022 von <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20110011201/downloads/20110011201.pdf>.
- J. Davidsson, V. Ivády, R. Armiento, N. T. Son, A. Gali, I. A. Abrikosov, "First principles predictions of magneto-optical data for semiconductor point defect identification: the case of divacancy defects in 4H-SiC", *New J. Phys.*, 2018, 20, 023035
- J. Davidsson, V. Ivády, R. Armiento, T. Ohshima, N. T. Son, A. Gali, I. A. Abrikosov "Identification of divacancy and silicon vacancy qubits in 6H-SiC", *Appl. Phys. Lett.* 2019, 114, 112107
- J. Foglszinger, A. Denisenko, T. Kornher, M. Schreck, W. Knolle, B. Yavkin, R. Kolesov, J. Wrachtrup
10 "ODMR on Single TR12 Centers in Diamond" arXiv:2104.04746v1 [physics.optics]
- M. Hollenbach, Y. Berencén, U. Kentsch, M. Helm, G. V. Astakhov "Engineering telecom single-photon emitters in silicon for scalable quantum photonics" *Opt. Express* 28, 26111 (2020), DOI: 10.1364/OE.397377, arXiv:2008.09425 [physics.app-ph]
- V. Ivády, J. Davidsson, N. T. Son, T. Ohshima, I. A. Abrikosov, A. Gali, "Identification of Si-vacancy
15 related room-temperature qubits in 4H silicon carbide", *Phys. Rev.B*, 2017, 96,161114
- Takayuki Iwasaki, Yoshiyuki Miyamoto, Takashi Taniguchi, Petr Siyushev, Mathias H. Metsch, Fedor Jelezko, Mutsuko Hatano, "Tin-Vacancy Quantum Emitters in Diamond", *Phys. Rev. Lett.* 119, 253601 (2017), DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.253601, arXiv:1708.03576 [quant-ph]
- Rasmus Høy Jensen, Erika Janitz, Yannik Fontana, Yi He, Olivier Gobron, Ilya P. Radko, Mihir Bhaskar,
20 Ruffin Evans, Cesar Daniel Rodríguez Rosenblueth, Lilian Childress, Alexander Huck, Ulrik Lund Andersen, "Cavity-Enhanced Photon Emission from a Single Germanium-Vacancy Center in a Diamond Membrane", arXiv:1912.05247v3 [quant-ph] 25 May 2020
- Hugo K. Messerle (Autor), „Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation (UNESCO Energy Engineering Series)“, John Wiley & Sons Ltd (1. August 1995), ISBN-10: 0471942529, ISBN-13: 978-
25 0471942528.
- Steven Praver (Herausgeber), Igor Aharonovich (Herausgeber), „Quantum Information Processing with Diamond: Principles and Applications“, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical

Materials, Band 63, Woodhead Publishing, 8. Mai 2014 , ISBN-10 : 0857096567, ISBN-13 : 978-0857096562

Marina Radulaski, Matthias Widmann, Matthias Niethammer, Jingyuan Linda Zhang, Sang-Yun Lee, Torsten Rendler, Konstantinos G. Lagoudakis, Nguyen Tien Son, Erik Janzén, Takeshi Ohshima, Jörg Wrachtrup, Jelena Vučković, "Scalable Quantum Photonics with Single Color Centers in Silicon Carbide", Nano Letters 17 (3), 1782-1786 (2017), DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b05102, arXiv:1612.02874

Petr Siyushev, Milos Nesladek, Emilie Bourgeois, Michal Gulka, Jaroslav Hruby, Takashi Yamamoto, Michael Trupke, Tokuyuki Teraji, Junichi Isoya, Fedor Jelezko, "Photoelectrical imaging and coherent spin-state readout of single nitrogen-vacancy centers in diamond", Science 363, 728–731 (2019) 15 February 2019

Akinori Tanaka, Akio Tomiya, Koji Hashimoto, „Deep Learning and Physics (Mathematical Physics Studies)“ 21. Februar 2021, Herausgeber: Springer; 1st ed. 2021 Edition, ISBN-10: 9813361077, ISBN-13: 978-9813361072

Björn Tegetmeyer, "Luminescence properties of SiV-centers in diamond diodes" Promotionsschrift, Universität Freiburg, 30.01.2018

Matthew E. Trusheim, Noel H. Wan, Kevin C. Chen, Christopher J. Ciccarino, Ravishankar Sundararaman, Girish Malladi, Eric Bersin, Michael Walsh, Benjamin Lienhard, Hassaram Bakhru, Prineha Narang, Dirk Englund, "Lead-Related Quantum Emitters in Diamond" Phys. Rev. B 99, 075430 (2019), DOI: 10.1103/PhysRevB.99.075430, arXiv:1805.12202 [quant-ph]

Vasily Y. Ushakov (Autor), „Electrical Power Engineering: Current State, Problems and Perspectives (Green Energy and Technology)“, Taschenbuch – 18. August 2018, Springer; 1st ed. 2018 Edition (18. August 2018), ISBN-10: 3319872850, ISBN-13: 978-3319872858.

C. Wang, C. Kurtsiefer, H. Weinfurter, and B. Burchard, "Single photon emission from SiV centres in diamond produced by ion implantation" J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 39(37), 2006

S. A. Zargaleh, S. Hameau, B. Eble, F. Margailan, H. J. von Bardeleben, J. L. Cantin, W. Gao , "Nitrogen vacancy center in cubic silicon carbide: a promising qubit in the 1.5µm spectral range for photonic quantum networks" Phys. Rev.B, 2018, 98, 165203

S. A. Zargaleh et al "Evidence for near-infrared photoluminescence of nitrogen vacancy centers in 4H-SiC" Phys. Rev.B, 2016, 94, 060102

Patentansprüche

1. Quantencomputer (QC),

wobei der Quantencomputer (QC) jeweilige elektronische Spins der jeweiligen
Elektronenkonfigurationen von jeweiligen NV-Zentren in Diamant als jeweilige
Quantenbits umfasst und

wobei der Quantencomputer (QC) jeweils stark an den jeweiligen elektronischen Spin einer
jeweiliger Elektronenkonfiguration eines jeweiligen NV-Zentrums der NV-Zentren
jeweils gebundene nukleare Spins stark an diese jeweiligen NV-Zentren gekoppelter
jeweiliger Atomkerne als nukleare Quantenbits, im Folgenden als starke nukleare
Quantenbits bezeichnet, umfasst und

wobei der Quantencomputer (QC) jeweils schwach an den jeweiligen elektronischen Spin
einer jeweiliger Elektronenkonfiguration eines jeweiligen NV-Zentrums der NV-
Zentren jeweils gebundene nukleare Spins schwach an diese jeweiligen NV-Zentren
gekoppelter jeweiliger Atomkerne als nukleare Quantenbits, im Folgenden als
schwache nukleare Quantenbits bezeichnet, umfasst und

wobei die Resonanzenergie für die Kopplung dieser schwach gekoppelten nuklearen Spins
dieser schwach an das jeweilige NV-Zentrum gekoppelten Atomkerne nur schwach
von dem jeweiligen Spinzustand der Elektronenkonfiguration des jeweils mit
diesem nuklearen Spin schwach gekoppelten NV-Zentrums abhängt und

wobei der Quantencomputer (QC) dazu eingerichtet ist, einen SWOP des Quantenzustands
eines NV-Zentrums der NV-Zentren mit dem Quantenzustand eines schwach an
dieses NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits
unter Hartmann-Hahn Bedingungen mittels eines Mikrowellenpulses zur
Ansteuerung dieses NV-Zentrums (Methode A) durchzuführen und

wobei der Quantencomputer (QC) dazu eingerichtet ist, einen SWOP des Quantenzustands
eines NV-Zentrums der NV-Zentren mit dem Quantenzustand eines stark an dieses
NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spins eines nuklearen Quantenbits mittels
eines Radiowellenpulses unter Nutzung der starken Kopplung zwischen diesem NV-
Zentrum und dem stark gebundenen nuklearen Spin eines nuklearen Quantenbits
(Methode B) durchzuführen, und

wobei der Quantencomputer (QC) Mittel (MW/RF-AWFG, MWA) zur Erzeugung des
Radiowellenpulses und/oder des Mikrowellenpulses umfasst und

wobei der Quantencomputer (QC) Mittel (MGx, MGy, MGz, MSx, MSy, MSz, MFSx, MFSy, MFSz) zur Einstellung der magnetischen Flussdichte (B) zur Erfüllung der Hartmann-Hahn Bedingung umfasst und

wobei der Quantencomputer (QC) eine Lichtquelle (LD) zur Bestrahlung der NV-Zentren mit Pumpstrahlung (LB) der Pumpstrahlungswellenlänge (λ_{pmp}) umfasst und

5 wobei der Quantencomputer (QC) eine Steuervorrichtung (μC) umfasst und wobei die Steuervorrichtung (μC) zumindest einen Speicher (RAM, NVM) umfasst und wobei in dem Speicher (RAM, NVM) ein Quantencomputerprogramm mit OP-Codes und/oder mit Quanten-OP-Codes als OP-Codes zumindest zeitweise abgelegt ist

10 und

wobei die Steuervorrichtung (μC) dazu eingerichtet ist, dieses Quantencomputerprogramm abzuarbeiten, und

wobei die Steuervorrichtung (μC) dazu eingerichtet ist, die Lichtquelle (LD) und die Mittel (MGx, MGy, MGz, MSx, MSy, MSz, MFSx, MFSy, MFSz) zur Einstellung der

15 magnetischen Flussdichte (B) und die Mittel (MW/RF-AWFG, MWA) zur Erzeugung des Radiowellenpulses und/oder des Mikrowellenpulses in Abhängigkeit von den OP-Codes und/oder Quanten-OP-Codes des Quantencomputerprogramms zu steuern, und

wobei die OP-Codes und/oder Quanten-OP-Codes im Speicher (RAM, NVM) Befehle

20 und/oder Befehlssequenzen für die Manipulation eines stark gebundenen nuklearen Spins mittels einer ersten quantencomputerimplementierten Methode (insbesondere der Methode B) umfassen und

wobei die OP-Codes und/oder Quanten-OP-Codes im Speicher (RAM, NVM) Befehle

25 und/oder Befehlssequenzen für die Manipulation eines schwach gebundenen nuklearen Spins mittels einer zweiten quantencomputerimplementierten Methode (insbesondere der Methode A) umfassen und

wobei die erste Methode von der zweiten Methode verschieden ist

wobei ein Speicher (RAM, NVM) der Steuervorrichtung (μC) für einen oder mehrere oder

30 alle nuklearen Spins, bei denen der Quantencomputer (QC) dazu eingerichtet ist, diese als nukleare Quantenbits zu nutzen, neben der Resonanzfrequenz zur Kopplung an ein NV-Zentrum oder einen dazu funktionsäquivalenten Wert als erster Information eine zusätzliche zweite Information, insbesondere als Flag,

bereithält, die angibt, ob es sich um einen stark an ein NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin des betreffenden nuklearen Quantenbits oder einen schwach an das NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin des betreffenden nuklearen Quantenbits handelt, und

5 wobei die Steuervorrichtung (μC) in Abhängigkeit von dieser zusätzlichen zweiten Information im Falle einer Manipulation des nuklearen Quantenbits die erste Methode oder die zweite Methode für die Manipulation des nuklearen Quantenbits verwendet.

2. Quantencomputer (QC) nach Anspruch 1,

10 wobei der Speicher (RAM, NVM) der Steuervorrichtung (μC) für einen oder mehrere oder alle nuklearen Spins, bei denen der Quantencomputer (QC) dazu eingerichtet ist, diese als jeweilige nukleare Quantenbits zu nutzen, neben der ersten Information und neben der zusätzlichen zweiten Information, die angibt, ob es sich um einen stark an ein NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin oder einen schwach an das NV-Zentrum gebundenen nuklearen Spin handelt, eine dritte zusätzliche
15 Information, insbesondere einen Index eines nuklearen Quantenbits bereithält, die angibt, an welches NV-Zentrum der betreffende nukleare Spin des betreffenden nuklearen Quantenbits gebunden ist.

3. Quantencomputer nach Anspruch 2,

20 wobei der Inhalt des Speichers (RAM, NVM) der Steuervorrichtung (μC) zumindest zeitweise eine Datenbank umfasst und

wobei die Datenbank im Speicher (RAM, NVM) Datensätze umfasst und

wobei ein oder mehrere erste Datensätze dieser Datensätze zumindest die ersten, auf den Spin der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums bzw. das elektronische

25 Quantenbit bezogene Informationen

- einen Index des NV-Zentrums (kann identisch mit dem Index eines elektronischen Quantenbits sein),
- eine Resonanzfrequenz zur Manipulation des Quantenzustands des NV-Zentrums oder eine dazu funktionsäquivalente erste Information

30 umfassen und

wobei ein oder mehrere zweite Datensätze dieser Datensätze zumindest als zweite auf den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit bezogene Informationen

- einen Index des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits und
- eine Resonanzfrequenz zur Kopplung des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits an ein NV-Zentrum oder eine dazu funktionsäquivalente erste Information und
- eine zusätzliche zweite Information, ob der nukleare Spin bzw. das nukleare Quantenbit stark oder schwach an das NV-Zentrum gebunden ist

umfassen und

wobei die Steuervorrichtung (μC) in Abhängigkeit von dieser weiteren zweiten Information im Datensatz der Datenbank für einen nuklearen Spin bzw. ein nukleares Quantenbit im Falle einer Manipulation des nuklearen Spins bzw. des nuklearen Quantenbits die erste Methode oder die zweite Methode für die Manipulation des nuklearen Spins bzw. des nuklearen Quantenbits verwendet.

4. Quantencomputer nach Anspruch 3,

wobei ein oder mehrere weitere Datensätze zumindest als zweite auf den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit bezogene Informationen

- einen Index des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits und
- eine Resonanzfrequenz zur Kopplung des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits an ein NV-Zentrum und
- eine zusätzliche zweite Information, ob der nukleare Spin bzw. das nukleare Quantenbit stark oder schwach an das NV-Zentrum gebunden ist und
- eine zusätzliche dritte Information, insbesondere den Index des NV-Zentrums, darüber umfasst, mit welchem NV-Zentrum dieser nukleare Spin koppelbar ist

umfassen.

5. Quantencomputer nach Anspruch 3 oder 4,

wobei ein oder mehrere weitere Datensätze zumindest als auf den nuklearen Spin bzw. das nukleare Quantenbit bezogene Informationen

- einen Index des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits und

- eine Resonanzfrequenz zur Kopplung des nuklearen Spins bzw. nuklearen Quantenbits an ein NV-Zentrum oder eine dazu funktionsäquivalente erste Information und
- 5 - eine zusätzliche zweite Information, ob der nukleare Spin bzw. das nukleare Quantenbit stark oder schwach an das NV-Zentrum gebunden ist und
- eine zusätzliche dritte Information, insbesondere den Index des NV-Zentrums, darüber umfasst, mit welchem NV-Zentrum dieser nukleare Spin koppelbar ist und
- 10 - eine zusätzliche vierte Information darüber umfasst, auf welcher Position und/oder in welcher Gruppe von Positionen dieser zumindest eine Atomkern des nuklearen Spins bzw. des nuklearen Quantenbits sich im Kristallgitter relativ zur Position des zugeordneten NV-Zentrums im Kristallgitter befindet
- 15 umfassen.

6. Quantencomputer nach einem der Ansprüche 3 bis 5,

- wobei ein oder mehrere erste Datensätze dieser Datensätze zumindest die ersten, auf den Spin der Elektronenkonfiguration des NV-Zentrums bzw. das elektronische Quantenbit bezogene Informationen zusätzlich einen Wert einer Larmor-Frequenz zur Manipulation des Quantenzustands des NV-Zentrums oder eine dazu funktionsäquivalente fünfte Information umfassen.
- 20

7. Quantencomputer nach Anspruch 1 bis 6

- wobei der Quantencomputer dazu eingerichtet ist, dass der Quantencomputer für das Auslesen der nuklearen Quantenzustände von n nuklearen Spins von n Atomkernen von n nuklearen Quantenbits, die an ein NV-Zentrum gekoppelt sind, 2^n CROT-Gatter auszuführen, um Kombinationen von Quantenzuständen zu überprüfen, und wobei n eine ganze positive Zahl größer 2 ist und
- 25
- wobei der Quantencomputer dazu eingerichtet ist, den NV-Übergang des NV-Zentrums zu detektieren, wenn sich die n nuklearen Spins der n Atomkerne Kerne der n nuklearen Quantenbits in einem dieser 2^n Kombinationen von Quantenzuständen dieser n Quantenbits befinden.
- 30

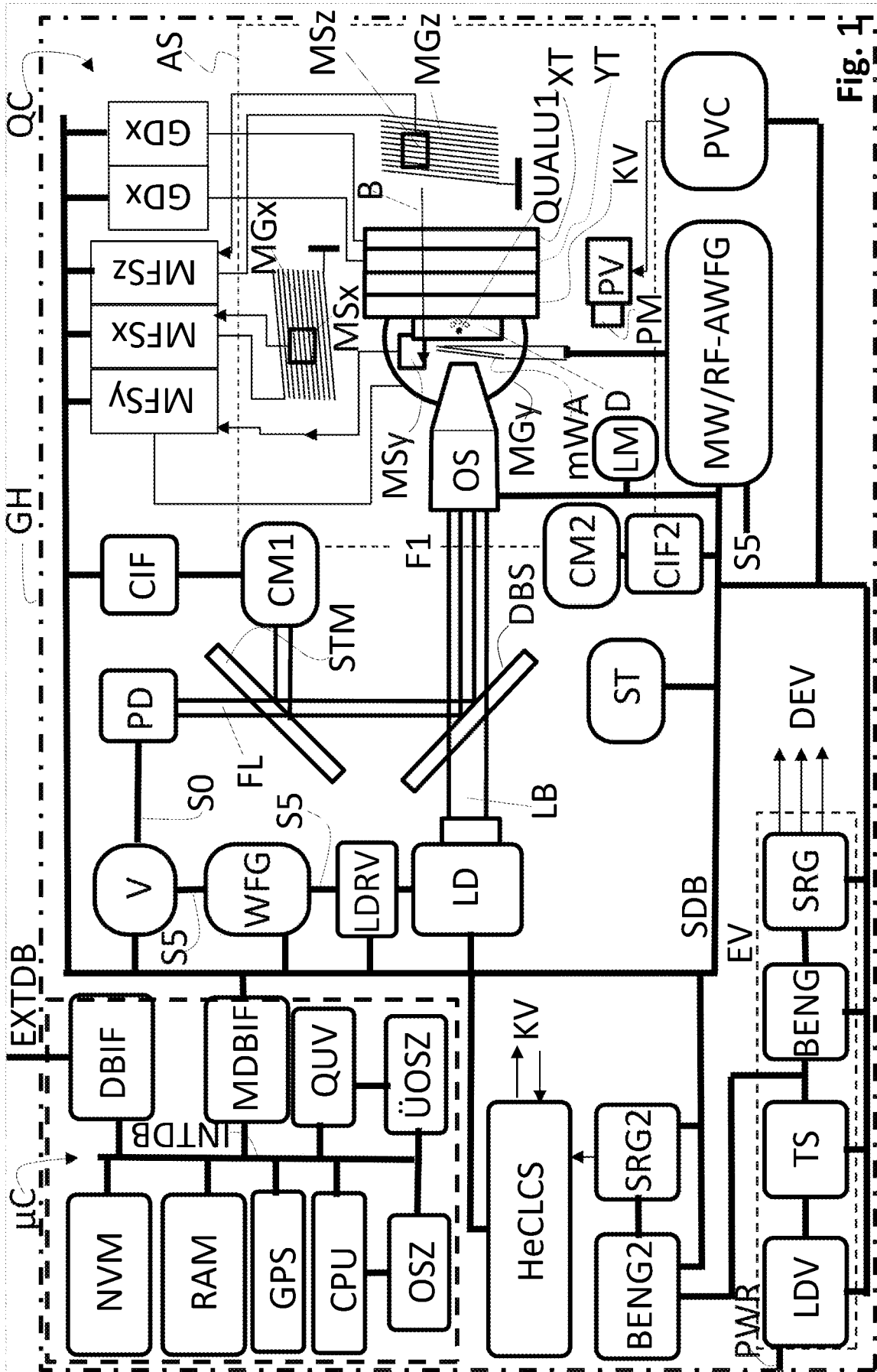


Fig. 1

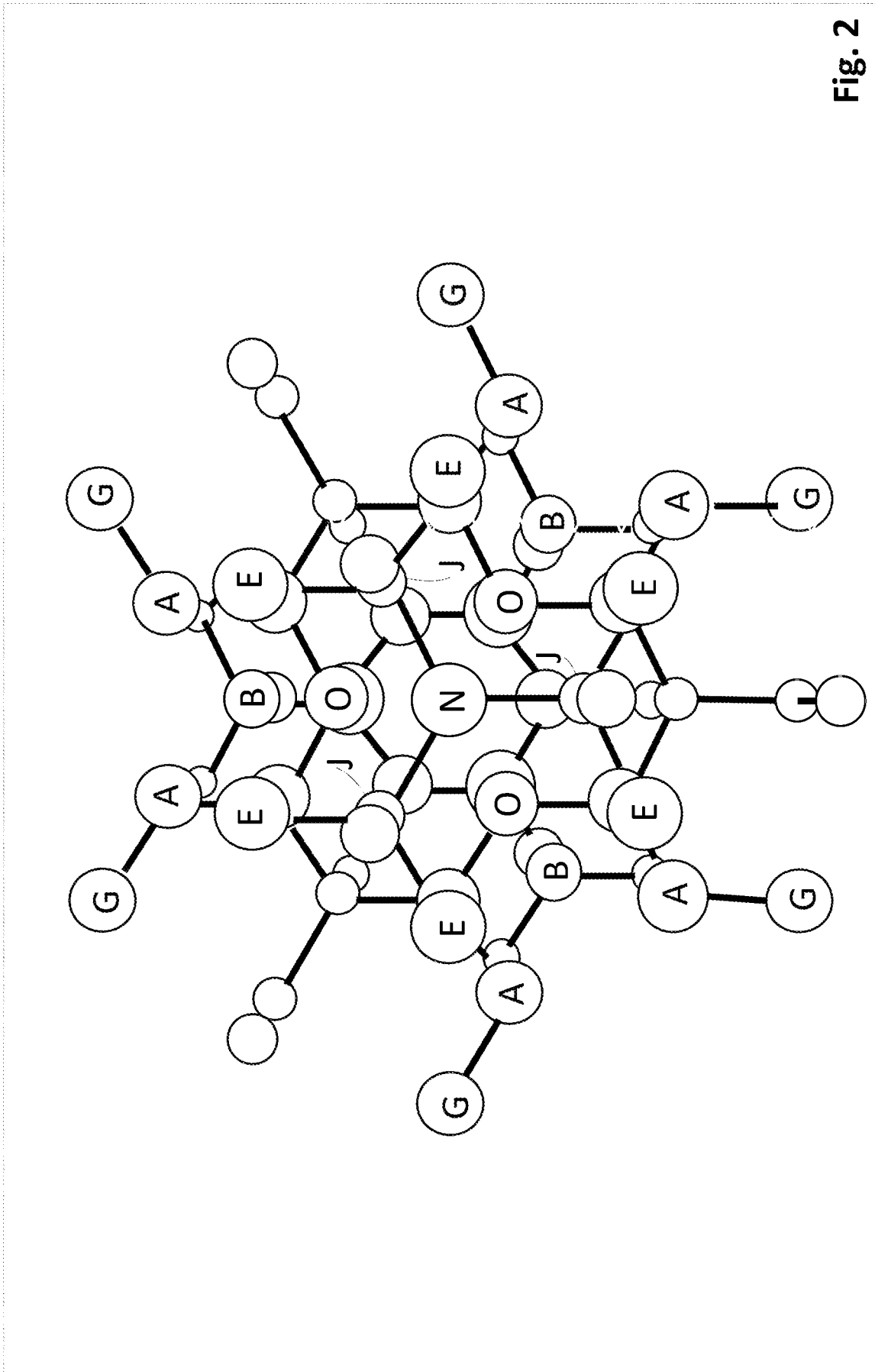


Fig. 2

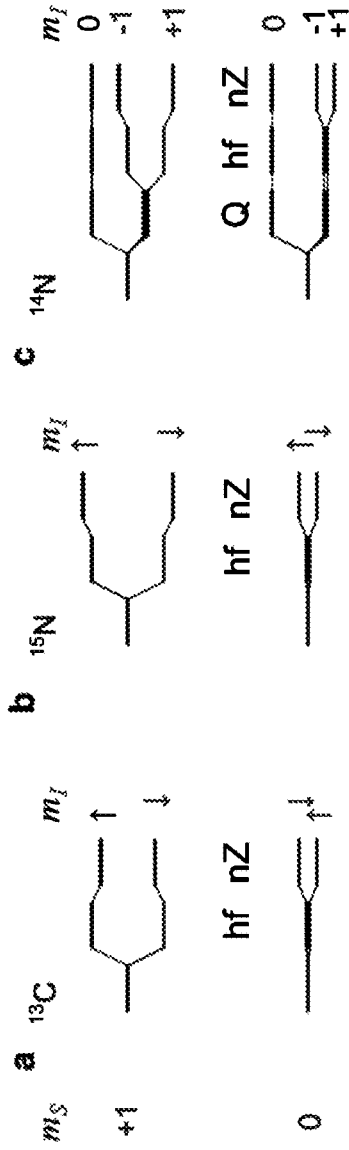
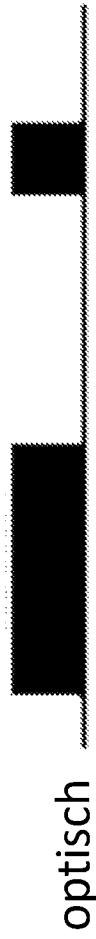


Fig. 3

Rabi-Oszillation

Initialisierung



Mikrowelle

τ_{MW}

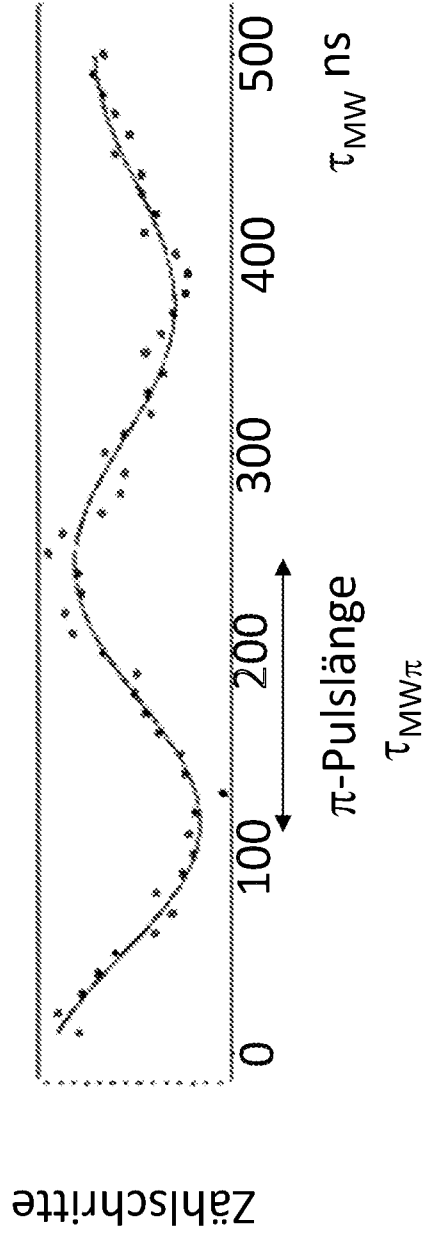


Fig. 4

Ramsey und Hahn Echo

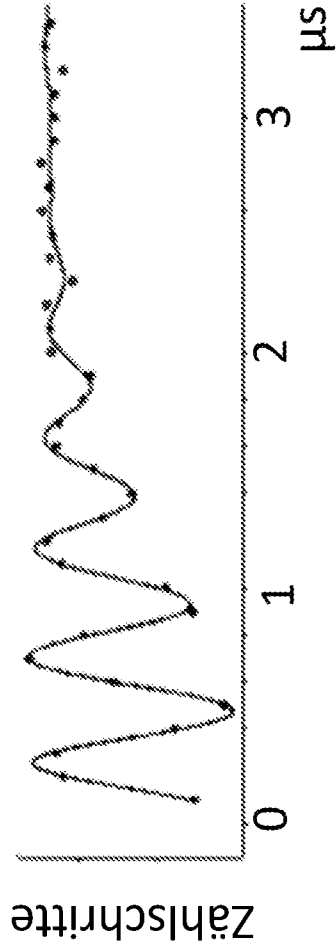
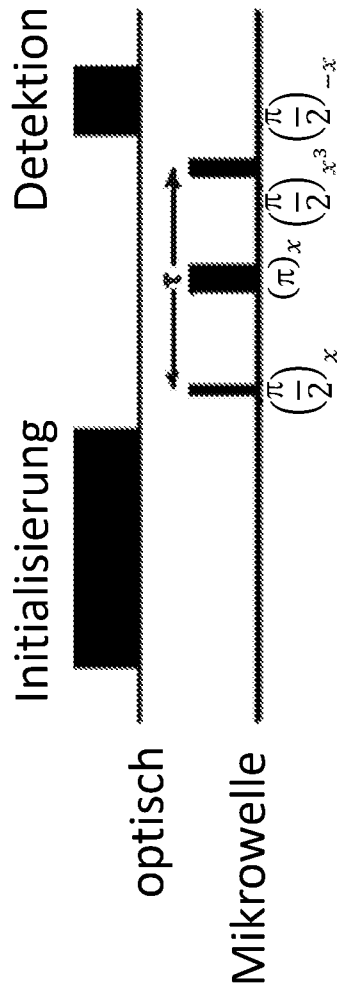


Fig. 5

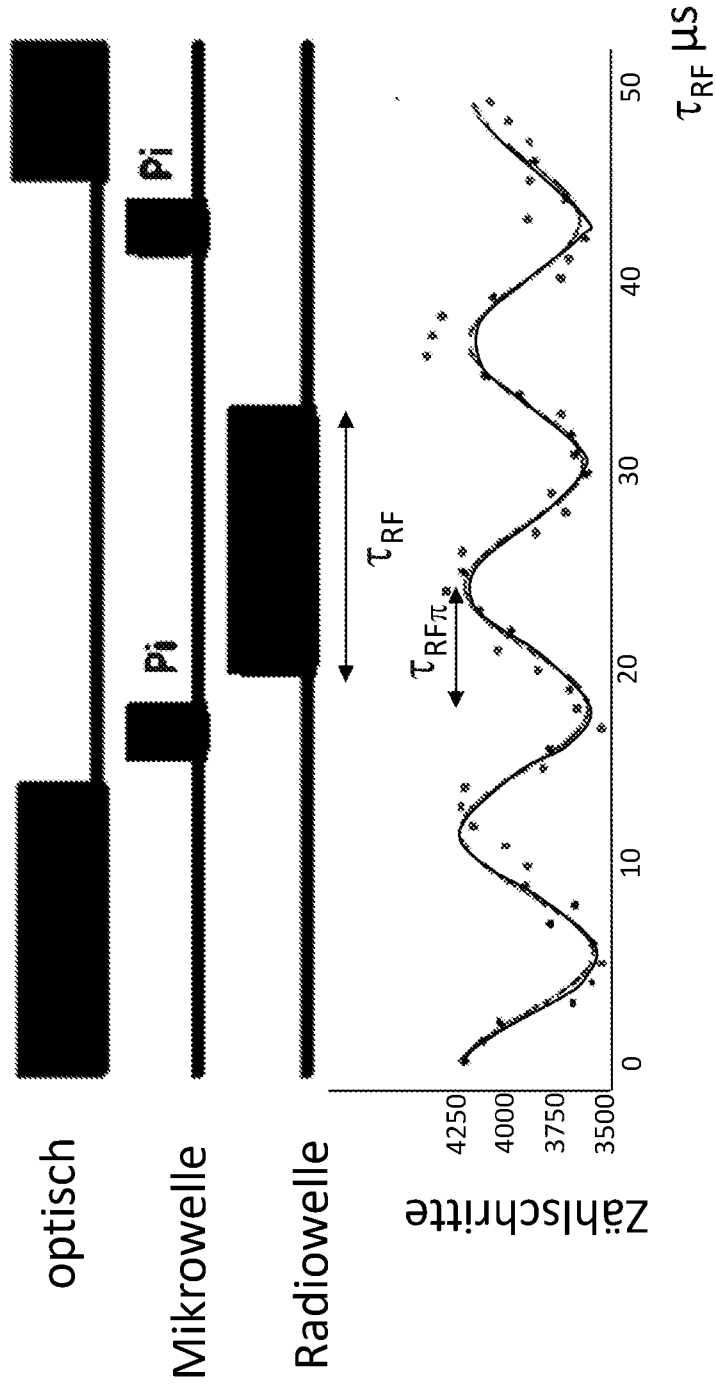


Fig. 6

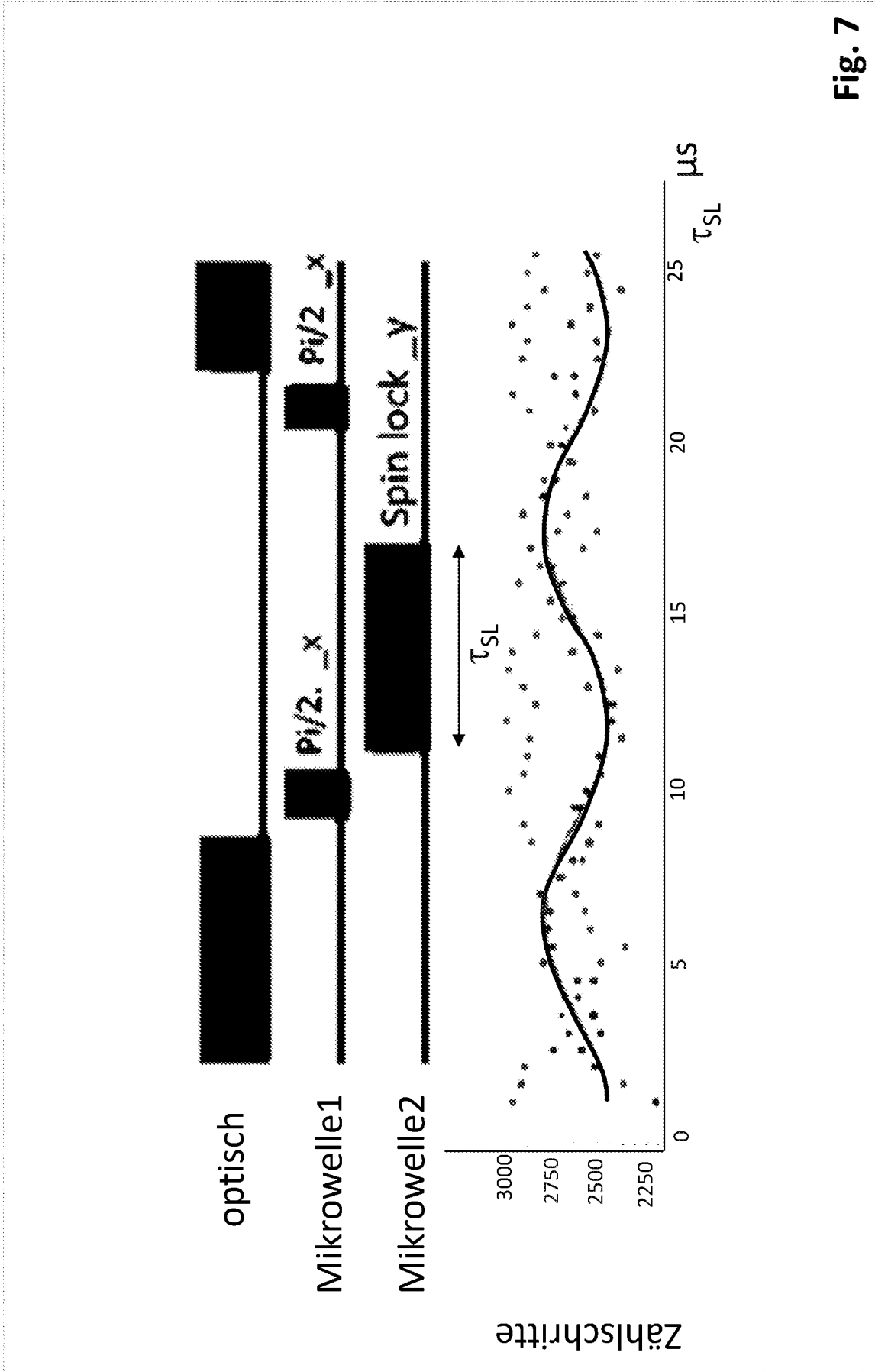


Fig. 7

Assembler Code

```
RV_1_X1  
qn1_CXNOT  
qn1_CHYNOT  
qn2_3/2CXNOT  
qn2_CHYNOT  
RV_1_X2  
RV_1_X3  
RV_1_RV2  
RV_1_RV3  
RV_1_Y3  
RV_1_RV2  
RV_1_RV3  
qn1_CXNOT  
qn1_CHYNOT  
qn2_CXNOT  
qn2_CHYNOT
```

Fig. 9

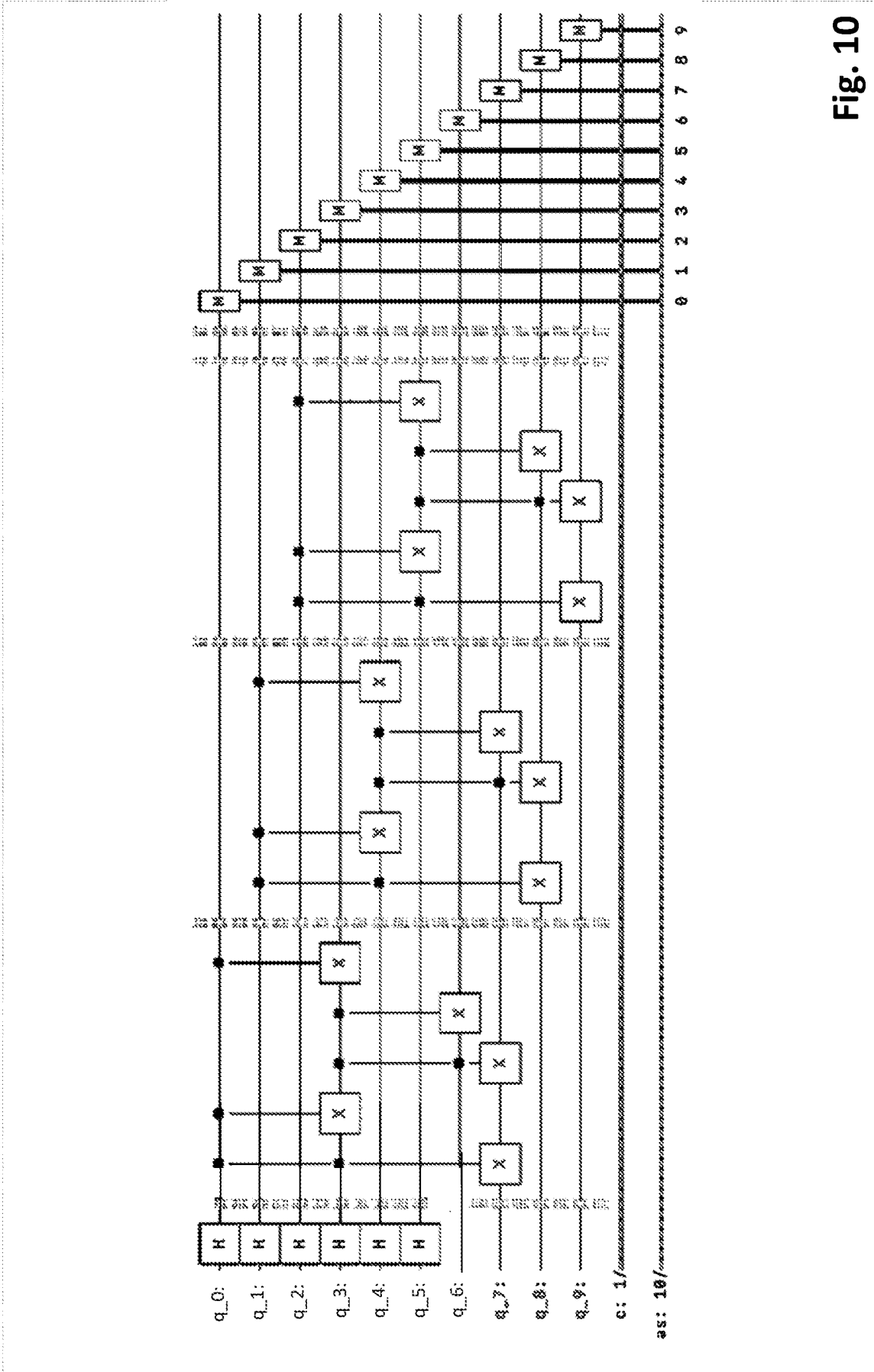


Fig. 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/DE2024/100098

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G06N 10/20</i> (2022.01)i; <i>G06N 10/40</i> (2022.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G06N Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	DE 102022112269 A1 (QUANTUM TECH UG HAFTUNGSBESCHRAENKT [DE]) 24 November 2022 (2022-11-24) paragraph [0009] - paragraph [0010] paragraph [0015] - paragraph [0038] paragraph [0062] paragraph [0088] - paragraph [0092] paragraph [0117] paragraph [0137] - paragraph [0139] figure 1	1-7
Y	US 11531076 B2 (UNIV CALIFORNIA [US]) 20 December 2022 (2022-12-20) column 13, paragraph 1 - paragraph 2	1-7
A	US 2016061914 A1 (JELEZKO FEDOR [DE] ET AL) 03 March 2016 (2016-03-03) paragraph [0074] - paragraph [0076]	1-7
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 13 June 2024		Date of mailing of the international search report 21 June 2024
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands (Kingdom of the) Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Bohn, Patrice Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/DE2024/100098

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
DE 102022112269 A1	24 November 2022	NONE	
US 11531076 B2	20 December 2022	US 2021364583 A1	25 November 2021
		WO 2019089961 A1	09 May 2019
US 2016061914 A1	03 March 2016	EP 2790031 A1	15 October 2014
		EP 2984499 A1	17 February 2016
		US 2016061914 A1	03 March 2016
		US 2019391216 A1	26 December 2019
		WO 2014166883 A1	16 October 2014

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2024/100098

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G06N10/20 G06N10/40

ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

G06N

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	DE 10 2022 112269 A1 (QUANTUM TECH UG HAFTUNGSBESCHRAENKT [DE]) 24. November 2022 (2022-11-24) Absatz [0009] - Absatz [0010] Absatz [0015] - Absatz [0038] Absatz [0062] Absatz [0088] - Absatz [0092] Absatz [0117] Absatz [0137] - Absatz [0139] Abbildung 1 -----	1 - 7
Y	US 11 531 076 B2 (UNIV CALIFORNIA [US]) 20. Dezember 2022 (2022-12-20) Spalte 13, Absatz 1 - Absatz 2 -----	1 - 7
A	US 2016/061914 A1 (JELEZKO FEDOR [DE] ET AL) 3. März 2016 (2016-03-03) Absatz [0074] - Absatz [0076] -----	1 - 7

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

13. Juni 2024

Absdtedatum des internationalen Recherchenberichts

21/06/2024

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Bohn, Patrice

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2024/100098

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 102022112269 A1	24-11-2022	KEINE	

US 11531076 B2	20-12-2022	US 2021364583 A1	25-11-2021
		WO 2019089961 A1	09-05-2019

US 2016061914 A1	03-03-2016	EP 2790031 A1	15-10-2014
		EP 2984499 A1	17-02-2016
		US 2016061914 A1	03-03-2016
		US 2019391216 A1	26-12-2019
		WO 2014166883 A1	16-10-2014
