

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Q.ANT GmbH
Handwerkstraße 29
70565 Stuttgart, Germany

Verbundprojekt:
Enabling-Technologien für skalierbare Diamant-Quantensensoren
(QSCALE)
Teilvorhaben:
Q.ANT

Dr. Robert Rölver
Vice President Native Sensing, Q.ANT GmbH

Förderkennzeichen
03ZU1110GE

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZU1110GE gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei beim Autor.

<h1>Projekt QSCALE</h1>	
-------------------------	--

Zuwendungsempfänger: Q.ANT GmbH Handwerkstraße 29 70565 Stuttgart, Germany	Förderkennzeichen: 03ZU1110GE
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: Enabling-Technologien für skalierbare Diamant-Quantensensoren (QSCALE) Teilvorhaben: Q.ANT	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2021 bis 31.10.2024	
Berichtszeitraum 01.01.2021 bis 31.10.2024	
Berichtsdatum 25.02.2025	
Vorgelegt beim Projektträger: Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH 52425 Jülich Ansprechpartner: Dr. Kai Herbertz	
Vorgelegt durch: Dr. Robert Rölver Vice President Native Sensing, Q.ANT GmbH Handwerkstraße 29 Telefon: +49 179 9148600 E-mail: robert.roelver@qant.gmbh	

I. Kurzbericht

Eines der wesentlichen Ziele des QSens-Clusters lag in der Überführung der Quantensensorik in den Markt. Zur Erreichung dieses Ziels sind neben wesentlichen Durchbrüchen im Bereich der Quantenphysik vor allem auch Fortschritte im Bereich der Miniaturisierung und Integration entscheidende Bausteine für eine erfolgreiche wirtschaftliche Nutzung dieser neuartigen Technologie. Das QSCALE-Projekt hat sich dieser Herausforderung angenommen und sich gezielt mit wesentlichen Enabling-Technologien für NV-Zentren-basierte Quantensensoren beschäftigt, um eine industrielle dieses Sensortyps zu ermöglichen. Wesentlich dabei war die Fokussierung auf skalierbare Fertigungstechnologien. Konkret ging es in QSCALE um

mikroelektronische und photonischen Integrationstechnologien, die Entwicklung einer skalierbaren Fertigung des Grundmaterials Diamant sowie erstmals auch um die Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der Aufbau- und Verbindungstechnik von Quantensensoren.

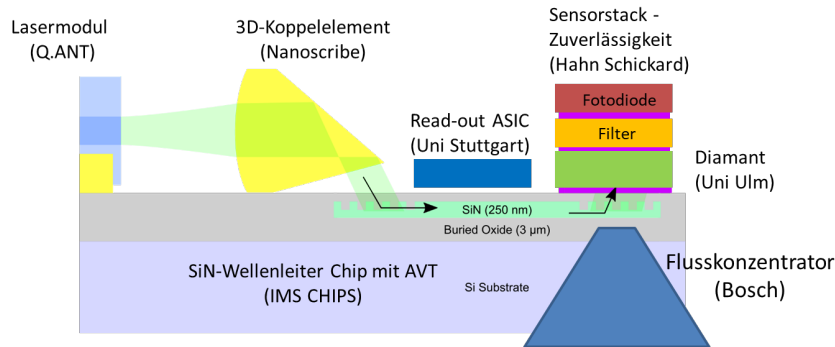


Abbildung 1: Schema des zu Projektbeginn entworfenen Demonstratorsystems sowie der für die Einzelsysteme verantwortlichen Verbundpartner.

Q.ANT hatte im QSCALE Verbundvorhaben mehrere Aufgaben. Ein relativ kleiner Beitrag war die Unterstützung des Partners Hahn-Schickard in der Auswahl und Quantifizierung der optischen Eigenschaften von Polymerwerkstoffen. Diese Versuche dienen als Eignungstest für die Verwendung als Polymerverkapselung in optischen Quantensensoren. Hier konnten mehrere geeignete Polymermaterialien mit geringer Autofluoreszenz als mögliche Werkstoffe gefunden werden. Ein zunächst mit relativ großem Umfang veranschlagtes Arbeitspaket war die Entwicklung laserbasierter Strukturierungstechniken für die Formung von optischen Wellenleitern in Diamanten. Nach der Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen sowie der Entwicklung möglicher Sensorkonzepte basierend auf der Lichtführung in Diamant-Wellenleiterstrukturen wurde jedoch nach einer intensiven Testphase festgestellt, dass die Laserstrukturierung am Ende aufgrund der geringen optischen Qualität der bearbeiteten Oberflächen kein zielführender Prozess für die geplante Sensorentwicklung darstellt.

Daher wurde im weiteren Projektverlauf der Fokus auf die verbleibenden Themen, der simulationsgestützten optischen Auslegung des integrierten Sensorkonzepts sowie der Entwicklung geeigneter Laserquellen für den integrierten Demonstrator gelegt. Abgerundet wurde die Arbeit mit der messtechnischen Unterstützung des Partners IMS im Aufbau und der Inbetriebnahme eines Quantensensor-Demonstrators mit integrierten optischen Wellenleitern.

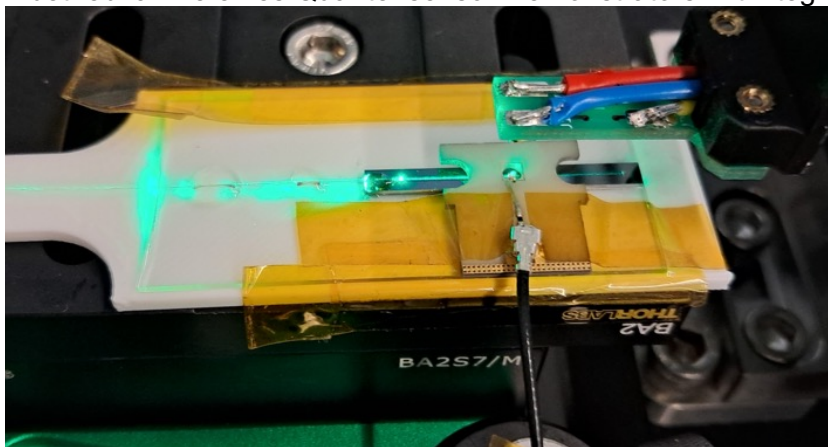


Abbildung 2: Foto des finalen Magnetsensor-Demonstrators während der Inbetriebnahme.

In der Entwicklung des Lasersystems wurde eine rauscharme Kombination von miniaturisierter Lasertreiberelektronik und Lasermodul entwickelt, welche nur um einen Faktor 10 oberhalb des physikalisch limitierenden Photonenschrottauschen liegt. Da zum Test der Chip-integrierten Wellenleiterlösung eine Faserkopplung für das Laserlicht benötigt wurde hat Q.ANT eine effiziente

Faserkopplung für die verfügbaren Freistrahl-Lasermodule mit einer Koppel­effizienz von 45 % aufgebaut.

Zum Test des ersten integrierten Sensorprototyps mit integrierten optischen Wellenleitern hat Q.ANT die in anderen Projekten entwickelte Auswertelektronik und Software zur Verfügung gestellt, um in einem ersten Proof of concept Experiment ein Magnetresonanzspektrum mit Hilfe des integrierten Aufbaues aufnehmen zu können.

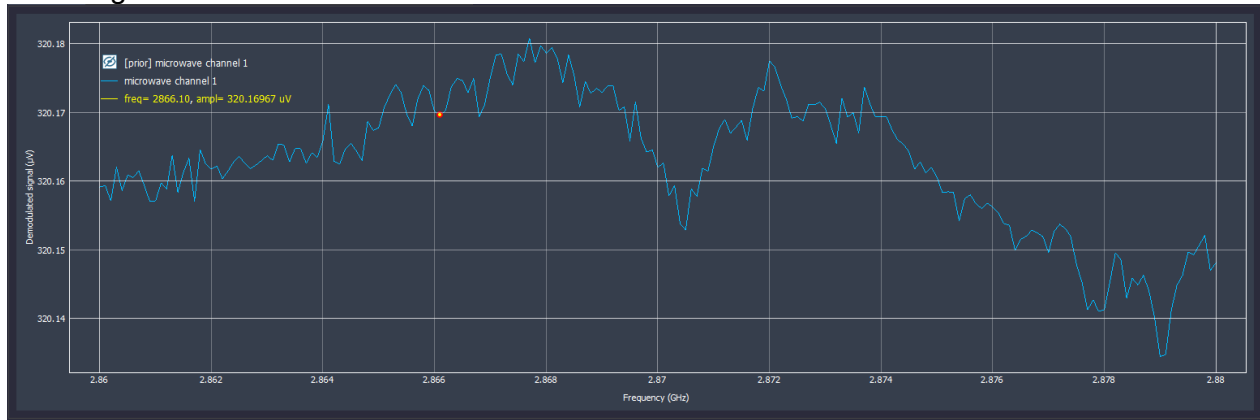


Abbildung 3: Aufgenommenes Magnetresonanzspektrum des finalen Demonstratorsystems als Funktionsnachweis des im QVOL Projekt entwickelten integrierten Sensorkonzepts.

II. Vorhabensergebnisse

An dieser Stelle sei zur Einführung noch einmal kurz der wissenschaftliche Hintergrund sowie die sich daraus ergebende Motivation für das QSCALE Projekt erwähnt.

Zu Beginn des Vorhabens wurden im damals aktuellen Stand der Technik NV-Zentren-basierte Sensoren hauptsächlich im Labor mit diskreter Elektronik bzw. kommerziellen Messgeräten aufgebaut, so dass der Grad der Miniaturisierung und Skalierbarkeit, insbesondere was die zur Ansteuerung und zum Auslesen der NV-Zentren benötigten Elektronik betrifft, sehr gering war.

Q.ANTs Beitrag im QSCALE Projekt fokussierte sich im Wesentlichen auf das Arbeitspaket photonische Integration.

Ziel dieses Arbeitspakets war der Aufbau eines integrierten Demonstrators bei dem die einzelnen Systeme wie Anregungspfad, Diamant-Quantensensor und Komponenten für das Auslesen des optischen Signals zu einem kompakten Gesamtsystem zusammengeführt wurden.

Im Rahmen dieser Demonstrator Entwicklung konzentrierten sich die Arbeiten bei Q.ANT auf

- Die Strukturierung von Diamanten zur Herstellung photonischer Wellenleiter
- Die simulative Auslegung des Optiksystems
- Die Bereitstellung eines rauscharmen Lasersystems inkl. optischer Schnittstelle (Faserkopplung) zur optischen Anregung der NV-Zentren in Diamanten
- Umsetzung des finalen integrierten Demonstratorsystems in Zusammenarbeit mit dem Partner IMS CHIPS

Alle Vier genannten Teilaspekte sowie die einzelnen Arbeitsergebnisse zu diesen Teilaufgaben sollen im Folgenden im Detail dargestellt werden.

Diamant-Strukturierung:

In dieser Teilaufgabe sollte mit Hilfe eines Femtosekunden-Lasersystems mit ultravioletter Emission der geeignete Parameterbereich zur Mikrostrukturierung der Diamanten implementiert werden. Ziel war es, Strukturierungstiefen von $>20\ \mu\text{m}$ bei gleichzeitiger geringer Seitenwandraugigkeit zu erreichen. Ein thermisches Post Processing zur Minimierung der Seitenwandraugigkeiten in Sauerstoffatmosphäre sollte ebenso evaluiert werden wie ein zweistufiges Ablationsverfahren, bei dem in einem ersten Schritt mit hohen Pulsenergien eine hohe Strukturtiefe erzeugt werden und in einem zweiten Schritt mit veränderten Pulsparametern- und Energien eine Glättung der Oberflächen und ggf. eine Ablation Carbonisierter Diamantoberflächen erreicht werden sollte.

Teil dieses Arbeitspakets war außerdem die Konzeptionierung verschiedener Sensorgeometrien mit integrierten Diamant-Wellenleitern, welche zu entsprechenden Schutzrechtsanmeldungen geführt haben (vgl. Abschnitt Schutzrechtsanmeldungen).

Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Konzept eines gradiometrischen Sensors aus integrierten Diamant-Wellenleiterstrukturen.

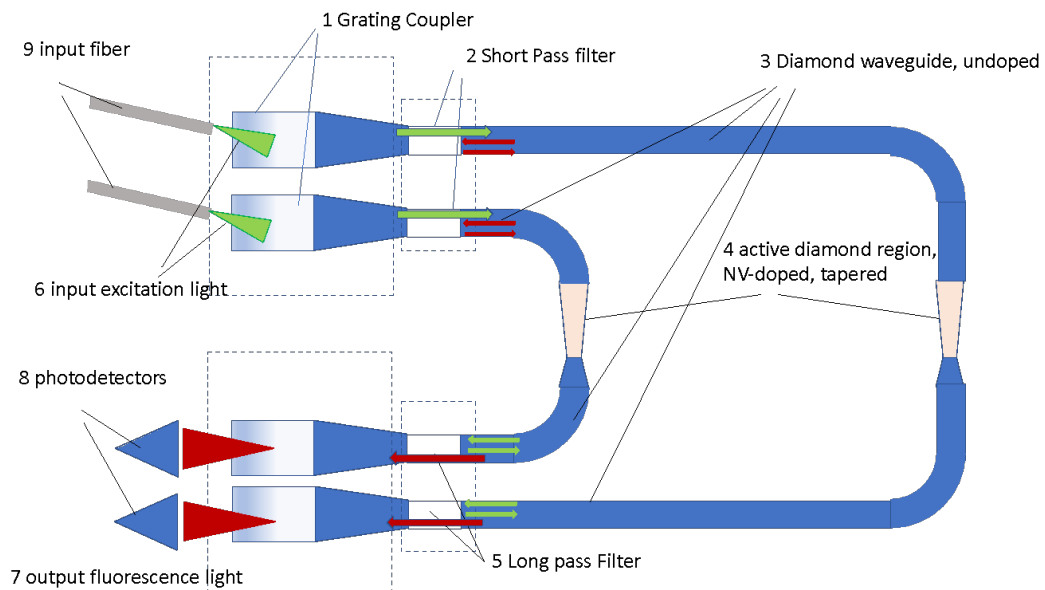


Abbildung 4: Konzeptskizze eines Gradiometerischen integrierten Sensorkonzepts bei dem die magnetfeldempfindlichen Diamant-Gradiometerarme mit Diamant-basierten Wellenleitern angeregt und betrieben werden.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der gemachten Vorversuche zur laserbasierten Diamantstrukturierung.

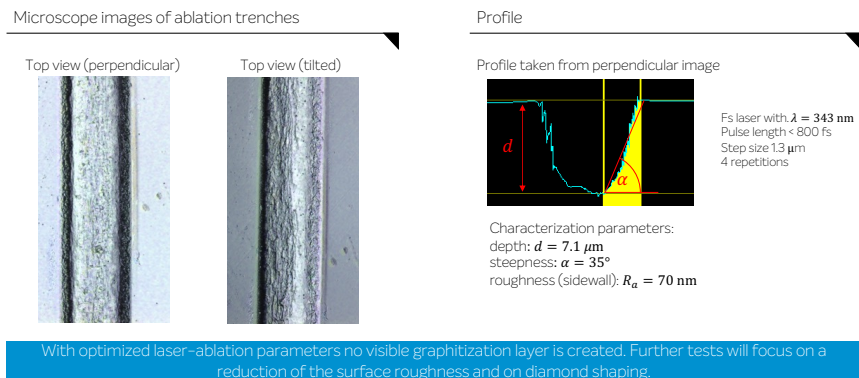


Abbildung 5: Ergebnisse der Diamantstrukturierung mittels gepulster Laserablation.

Zwar konnten Strukturiefen von 7 μm erzeugt werden, aber die verbliebenen Oberflächenrauigkeiten auch nach einer Prozessoptimierung haben zu der Entscheidung geführt, diese Arbeiten nicht weiter zu verfolgen.

Simulative Auslegung des Optiksystems:

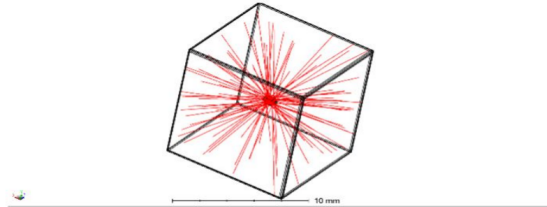


Abbildung 6: Ray-Tracing Modell der Fluoreszenzeigenschaften eines NV-dotierten Diamanten.

Für die optische Simulation wurde das Zemax Simulationssoftwaretool verwendet. Um die Fluoreszenzeigenschaften des Diamanten zu simulieren wurde die Möglichkeit der Fluorescence-Scattering Funktion in Zemax verwendet und die Streuparameter mit Hilfe von experimentellen Daten gewonnen an vorhandenem Diamantmaterial abgeglichen. Abbildung 6 zeigt das Raytracing Modell eines mit grünem Laser angeregten NV-dotierten Diamanten. Der gewonnene Wert für die gesamte emittierte Fluoreszenzleistung diente dann als Bewertungsgrundlage für die später entwickelten Optikkonzepte, wo durch Quotientenbildung aus der am Detektor ankommenden Fluoreszenzleistung und der gesamten emittierten Fluoreszenz eine Effizienz des optischen Systems als Vergleichsparameter für die verschiedenen optischen Designs abgeleitet werden konnte.

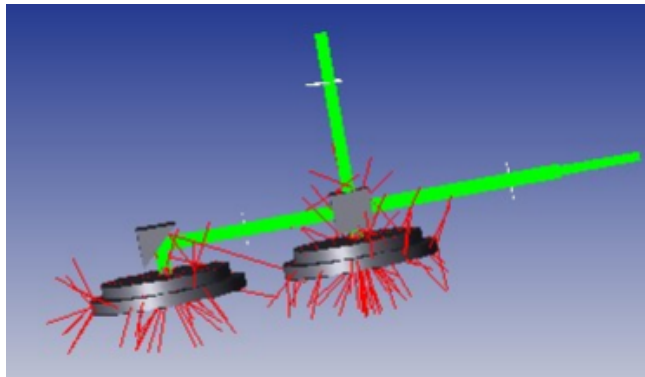


Abbildung 7: Ray-Tracing Modell eines ersten optischen Modells des integrierten Sensors.

Beam Radius (mm)	Power Detected 1 (mW)	Power Detected 2 (mW)	Conversion Efficiency (%)
0.1	1.31	1.37	2.4
0.2	1.28	1.35	2.3
0.275*	1.16	1.26	2.2
0.3	1.12	1.20	2.1
0.4	0.92	1.02	1.7
0.5	0.74	0.83	1.4

Abbildung 8: Tabelle der erreichbaren Fluoreszenzdetektion (optische Leistung am Detektor) sowie der Einsamelleffizienz im Vergleich zur Gesamtleistung der emittierten Fluoreszenz. Die eingestrahlte optische Anregungsleistung beträgt in allen Fällen 100 mW, der Strahldurchmesser des Anregungsstrahls wurde zwischen 0,1 und 0,5 mm variiert.

Abbildung 7 zeigt ein erstes Design, welches an dem oben gezeigten Optikkonzept für den integrierten Sensor angelehnt ist, bestehend aus beam splitters die das grüne Anregungslicht auf den Diamanten und auf den Referenzkanal verteilen. Die optische Leistung am Detektor beträgt bei einem Ausgangsradius des Anregungslaserstrahls von $100\mu\text{m}$ 1,3 mW (Abbildung 8). Durch Optimierung dieses ersten Designs durch das Einfügen weiterer optischer Elemente wie eines dichroischen Filter zur Rückreflektion des nach oben abgestrahlten roten

Fluoreszenzlichts sowie einer weiteren Linse, kann die Effizienz auf 32 % gesteigert werden was einer eingesammelten Fluporeszenzleistung am Detektor von 7 mW entspricht (Abbildung 9, Abbildung 10).

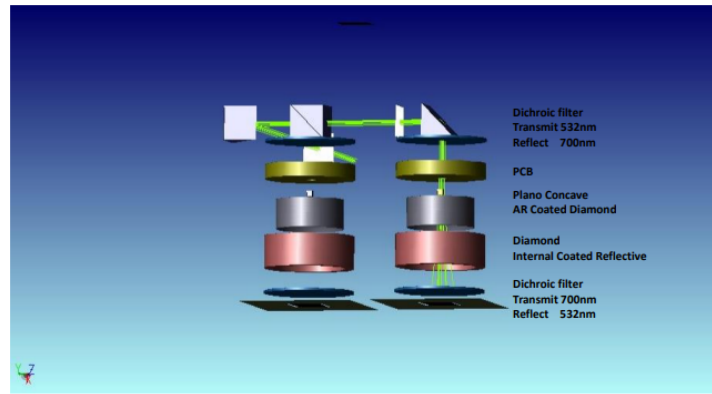


Abbildung 9: Ray-Tracing Modell eines optimierten Sensorkonzepts mit zusätzlichen optischen Elementen.

Beam Radius (mm)	Power Detector 1 (mW)	Power Detector 2 (mW)	Total Conversion Efficiency %	Optics Collection Efficiency %
0.19*	7.77	7.46	13.8	32.26

Abbildung 10: Aufstellung der optischen Leistung der fluoreszenz am Detektor sowie der daraus resultierenden Sammeleffizienz des Fluoreszenzlichts.

Lasersystem und Faserkopplung:

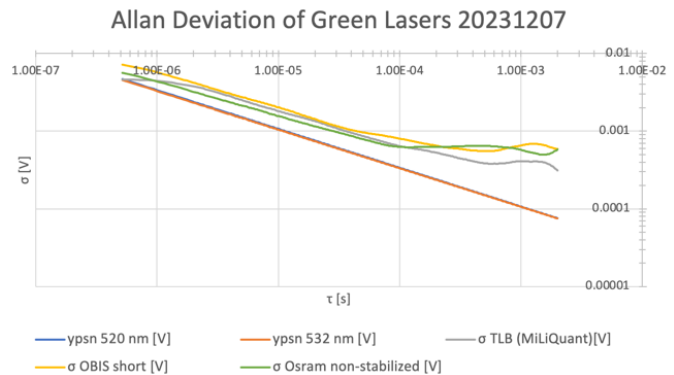
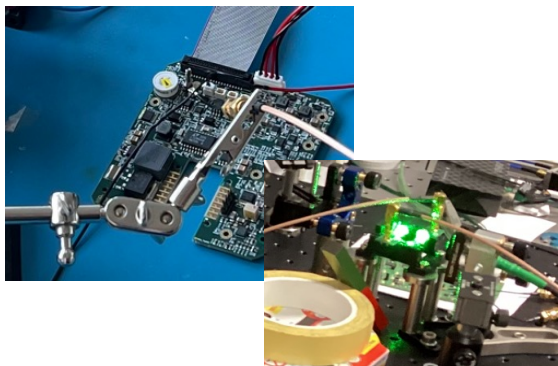


Abbildung 11: Bilder des aufgebauten Lasersystems sowie Daten zur Rauschanalyse verschiedener Lasersysteme.

Zu Projektstart hat Q.ANT sich zunächst auf die Charakterisierung verschiedener Lösungen zur Bereitstellung einer rauscharmen Laserquelle fokussiert. Während die Entwicklung entsprechender Lasertreiber-Elektronik und Lasermodule in anderen Projekten (vgl. QSENS Projekt QVOL) unternommen wurde fokussierte sich der Q.ANT Beitrag für das QSCALE Projekt auf die optische Charakterisierung der für den integrierten QSCALE Demonstrator in Frage kommenden Lasermodule. Abbildung 11 zeigt Fotos der verwendeten Lasermodule sowie vergleichende Rauschmessungen für verschiedene Kombinationen von Lasertreibern und Laserdioden. Für das QSCALE Projekt wurde schließlich der als TLB bezeichnete Laser für die weiteren Arbeiten verwendet, dessen Rauschlevel sich weniger als Faktor 10 oberhalb des physikalisch limitierenden Schrotrauschen bewegt.

Um für Testaufbauten eine flexible Lichteinkopplung in das integrierte Sensormodul zu ermöglichen wurde bei Q.ANT Lösung zur Kopplung des Laserlichts von Freistrahldioden in eine Single Mode Faser konzipiert und aufgebaut (Abbildung 12, Abbildung 13). Durch diesen Aufbau konnte eine Kopplungseffizienz von 50 % erreicht werden, so dass aus einer Freistrah- TO-Can

Laserdiode mit 100 mW optischer Ausgangsleistung im Freistrahlmodus 50 mW optische Leistung am Faserausgang erzielt werden konnte.

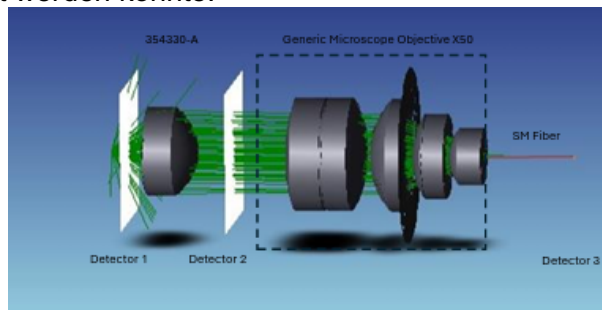


Abbildung 12: Optisches Modell der entwickelten Faserkopplung für Freistrahll-Laserquellen.

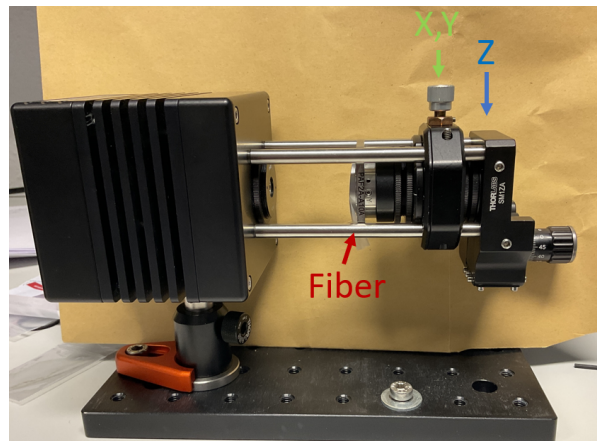


Abbildung 13: Aufbau der Faserkopplung.

Da das ursprünglich geplante Arbeitspaket „Diamant-Laserstrukturierung“ aufgegeben wurde, wurde alternativ dennoch die Möglichkeit evaluiert, klassisch, mittels schleifen geformte Diamantstrukturen zu testen die eine verbesserte Fluoreszenzausbeute am Photodetektor ermöglichen. Hierzu wurden pyramidenförmige Diamanten hergestellt und die Verbesserung der Fluoreszenzausbeute mittels Lichtleistungsmessung vermessen. Die pyramidenförmigen Diamanten verbesserten dabei die Lichtausbeute von 1,7 mW auf 3,3 mW in dem in Abbildung 14 gezeigten Aufbau.

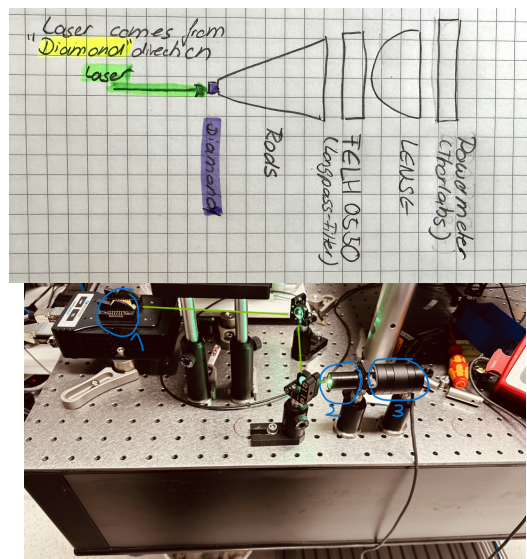


Abbildung 14: Skizzierung und realer Aufbau zur charakterisierung der direkionalen Fluoreszenzemission verschiedener Diamantformen in Richtung eines Detektors.

Umsetzung des integrierten Demonstrators

Um zumindest in Teilen das Konzept eines integrierten Sensorsystems zu demonstrieren, wurde gemeinsam mit Nanoscribe, dem IMS und Q.ANT ein photonisch integrierter Sensor aufgebaut (Abbildung 15). Dieser Sensor beinhaltet eine von Q.ANT aufgebaute Laseranregung mit Faserausgang, ein gemeinsam von IMS und Nanoscribe aufgebaute Chip mit integrierten Wellenleitern und Grating Kopplern zur Lichtverteilung in den Diamanten und in einen Referenzkanal, optischen Filtern sowie diskret als Leiterplatte implementierter Mikrowellenantenne. Q.ANT steuerte zudem die Sensorelektronik inkl. Software bei, um erste magnetisch-Empfindliche Resonanzspektren aufnehmen zu können.

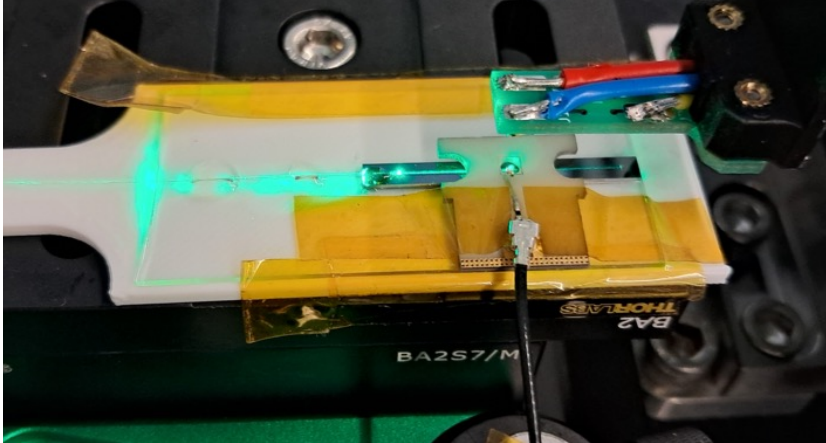


Abbildung 15: Foto des finalen Magnetsensor-Demonstrators während der Inbetriebnahme.

Abbildung 16 zeigt das aufgenommene ODMR Spektrum in dem die Magnetresonanz bei 2,97 GHz als Signaleinbruch des balancierten Detektorsignals zu erkennen ist, womit die Funktionalität des integrierten Ansatzes mit mikroelektronisch gefertigten Wellenleitersystemen erstmals gezeigt werden konnte.

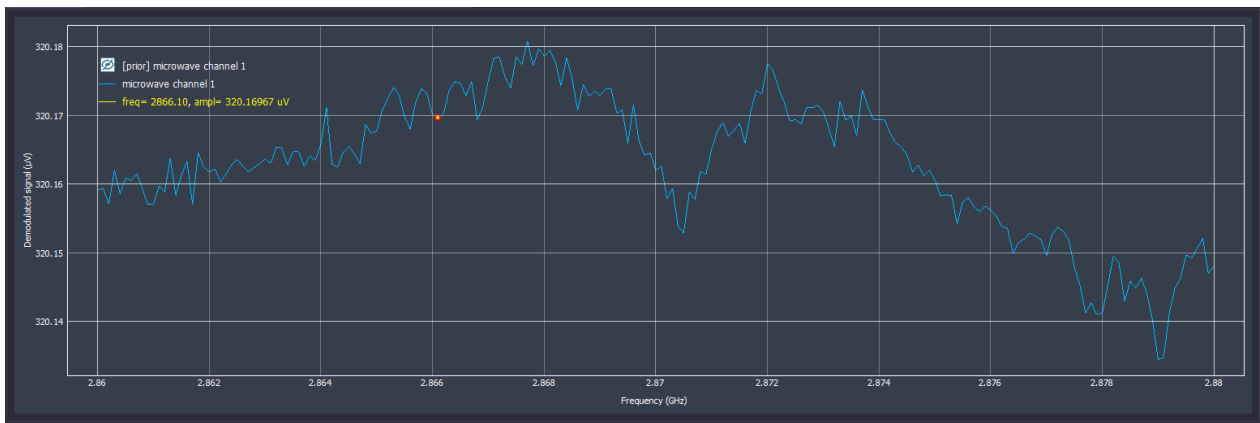


Abbildung 16: Aufgenommenes Magnetresonanzspektrum des finalen Demonstratorsystems als Funktionsnachweis des im QVOL Projekt entwickelten integrierten Sensorkonzepts.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- o vgl. eingereichtes Dokument Zahlenmäßiger Verwendungsnachweis als Teil der Abschlussdokumentation.

Alle Beträge in Euro (€)

1	2	3	4
Position Gesamtvorkalkulation	Entstandene Kosten insgesamt bis einschl. 2024	Anerkannte Kosten insgesamt bis einschl. 2024	Gesamtvorkalkulation
0813	11.402,95		7.500,00
0823	0,00		0,00
0837	216.062,50		210.461,29
0838	790,30		3.500,00
0847	0,00		0,00
0848	0,00		0,00
0850	0,00		0,00
0856	0,00		0,00
0860	0,00		0,00
Summe:	228.255,75		221.461,29

Die oben beschriebenen Entwicklungen haben insgesamt zu einem Personaleinsatz von 216.000 € (Pos. 0837) geführt und lagen damit leicht über der Gesamtvorkalkulation. Gleiches gilt für die Materialkosten (Pos. 813) mit einem leichten Plus gegenüber der Vorkalkulation. Es sind aufgrund der hauptsächlich Remote durchgeführten Projekttreffen weniger Reisekosten angefallen als ursprünglich geplant (Pos. 838). Insgesamt wurden gegenüber der Vorkalkulation knapp 7.000 € mehr Budget benötigt als ursprünglich eingeplant.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

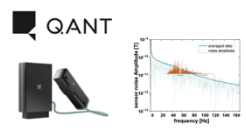



Die Projektarbeiten haben, wie im ausführlichen Bericht zu den Vorhabensergebnissen beschrieben, die laufende Magnetsensor Produktentwicklung bei Q.ANT wesentlich unterstützt.

Direkter Nutzen aus den Arbeiten im QVOL Projekt ergab sich aus dem Aufsatz der optischen Simulationsumgebung für die Auslegung Diamant basierter, optisch ausgelesener Quantensensoren die die Grundlage für die weitere Entwicklung bei Q.ANT in diesem Bereich gelegt hat.

Dieses Wissen und diese Fähigkeiten haben QANT dabei unterstützt, marktfähige Produkte zu entwickeln und werden im Rahmen von Sensor-Produktverkäufen verwertet werden. Die in diesem Arbeitspaket erzielten Entwicklungsergebnisse versetzten Q.ANT in die Lage, Quantensensoren mit bisher unerreichbaren Empfindlichkeiten anzubieten. Dieser Performance Vorteil gegenüber dem bisherigen Stand der Technik ermöglicht neuartige Anwendungen wie die Messung von Biosignalen des menschlichen Körpers was z. B. eine neue Art der Mensch-Maschine Interaktion ermöglicht.

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Abbildung 17 zeigt die Einschätzung der von Q.ANT entwickelten Quantensensortechnologie und Prototypen im Vergleich zu anderen verfügbaren Sensoren im Bereich der Magnetfeld-Detektion. Nur die Diamant-Magnetometrie ist in der Lage höchste Empfindlichkeit auch in ungeschirmter Umgebung und ohne zusätzliche Temperiermaßnahmen (kryogene Kühlung oder Heizbetrieb) zu gewährleisten.

	NV Diamond	SQUIDS	OPMs	TMR
Sensing technology				
Sensitivity	1 pT/√Hz ¹ ✓	1 fT/√Hz ✓	20 fT/√Hz ✓	1 pT/√Hz ✓
Bandwidth	3 kHz ✓	1 MHz ² ✓	300 Hz ✓	1 kHz ✓
Dynamic range	>3 μT • Up to 1 mT possible ✓	1 nT ³ • Shielded room required ✗	200 nT • Shielded room required ✗	100 nT • Shielded room required ✗
Working temperature	20 °C ✓	- 270 °C • limited working distance • cryo cooling required ✗	150 °C • Limited working distance to skin ✗	20 °C ✓
References	Gizzi, L., ... Röfler, R., Jag-Lauber, K., "Nitrogen-vacancy centers for prosthesis control", Biophotonics in Exercise Science, Sports Medicine, Health Monitoring Technologies, and Wearables V (Vol. 12838, pp. 92-101), SPIE (2024)	www.megin.com Appl. Phys. Lett. 110, 072603 (2017)	www.fieldline.com www.quspin.com	www.neuranics.com https://eprints.gla.ac.uk/223336/2/223336.pdf

1. Photon shotnoise limited sensitivity of the current sensor, sensitivity in operation is 20 pT/√Hz due to technical noise, topic addressed in ongoing development; 2. The bandwidth should exceed 1 kHz to enable accurate frequency resolution of biosignals as a valuable source of information e.g. on force applied by an excited muscle; 3. Dynamic range should exceed the earth magnetic field value of around 50 μT to enable operation in unshielded environment

Abbildung 17: Vergleich von Sensortechnologien und Sensorprodukten zur hochempfindlichen Magnetfeldmessung.

Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen mit Projektbezug wurden von Q.ANT vorgenommen:

- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA) Workshop "Quantum leaps in mechanical engineering - Quantum Sensing" in Ulm, 20.06.2023, Vortragstitel "Starting up with Quantum Sensors."

- European Photonic Industry Consortium (EPIC) Technology Meeting on “Industrial Quantum Photonics Technology”, 12.10.2023, Vortragstitel: “Quantum Sensors”
- Hannover Messe 2023, Messepräsentation (Messestand) und Vortrag: „How Quantum Magnetic Field Sensors enable a new type of Human-Machine-Interface”