

# Abschlussbericht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Robert Bosch GmbH	<b>Förderkennzeichen:</b> FK: 13N15373
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Quanten-Magnetometer zur Positions- und Lagebestimmung für Intelligente Systeme, Quamapolis	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2021 - 30.09.2024	
<b>Autoren:</b> Dr. Tino Fuchs, Dr. Alexander Fischer, Robert-Bosch-Campus 1, 71272 Renningen	

## Teil I: Kurzdarstellung des Projekts

### 1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojektes Quamapolis war die prototypische Entwicklung eines integrierten, vektoruell messenden Magnetometers auf Basis optisch detektierter Magnetresonanzen (ODMR) von N- Zentren in Diamant und die Demonstration der Anwendung für eine magnetische Indoor Lokalisierung mit einer Auflösung von unter 1 cm.

### 2 Stand der Technik an den angeknüpft wurde

In vorangegangenen Forschungsprojekten wurden Konzepte für die ODMR-Magnetometrie mit NV Zentren in Diamant entwickelt, die vor allem eine Verbesserung des Detektionslimits adressierten und nur am Rand auf die Vektormessfunktion eingingen. In Richtung Sensor-Integration und Miniaturisierung gab es bereits Projekt wie z.B. das BMBF geförderte Projekt MiLiQuant. Eine vollständige Integration aller Komponenten auf einem Leiterplattensubstrat wurde hier noch nicht gezeigt, ebenso wenig eine konkrete Anwendungen im Bereich der magnetischen Lokalisierung. Aktuelle Lokalisierungslösungen auf Basis von Laufzeitmessung von RF-Signalen oder Kamera-basierte Ansätze erreichen im Bereich der Indoor-Lokalisierung lediglich eine Auflösung von etwa 10 cm. Für viele Anwendungen ist dies allerdings nicht ausreichend, z.B. bei der Kartierung von Infrastruktur-Installationen oder der Lokalisierung von z.B. Werkzeugen oder Robotern auf einer Baustelle.

### 3 Ablauf des Vorhabens

In der zentralen Forschung der Robert Bosch GmbH wurden vor allem die Arbeitspakete Systemanforderungen, photonische Integration, Modulintegration auf PCB sowie Aufbau und Benchmarking eines Demonstrators verfolgt und umgesetzt. Nach Erstellung des Anforderungskatalogs an das Sensorsystem wurde gemeinsam mit den Verbundpartnern eine Systemarchitektur entworfen und die Anforderungen an die Komponenten abgeleitet. Als Halbzeitmeilenstein wurde ein Technologie-Demonstrator realisiert, mit dem alle im Projekt zu entwickelnden Technologien gemeinsam auf einer Plattform getestet werden können. Im Arbeitspaket photonische Integration wurden von Bosch folgende Prozesse entwickelt: Kontaktierung Lasermodul, Montage Mikrowellenschaltungsträger, Kontaktierung der Photodioden, Präzisionsbestückung von Diamanten und Permanentmagneten, Bare-Die Bestückung des

Mikrowellen CMOS Chips. Im Arbeitspaket Modulintegration mit effizienter Entwärmung wurden verschiedenen Entwärmungstechnologien bewertet und daraufhin die Verwendung thermischer Vias in der System-PCB ausgewählt, Anforderungen an die Montagetechnologie abgeleitet und Toleranzen berücksichtigt. Für die Integration der Photodioden in die System-PCB wurde speziell eine Kavitäten-Technologie für das Embedding entwickelt und Demonstrator eingesetzt. Im Rahmen der Modulintegration wurde das Layout der System-PCB erstellt, die Herstellung der Platine beauftragt und die Komponentenbestückungen für den Intermediate und den finalen Demonstrator durchgeführt. Im Arbeitspaket Aufbau und Benchmarking wurde ein Testaufbau zur Charakterisierung von Intermediate und finalen Demonstrator konzipiert und realisiert, mit dem die wesentlichen Performance Parameter des NV-Magnetometers bestimmt wurden. Darüber hinaus wurde in diesem Arbeitspaket ein aktives System zur magnetischen Indoor-Lokalisierung ausgelegt, aufgebaut und zunächst mit kommerziell verfügbaren Fluxgate-Magnetometern bezüglich der Genauigkeit der Lokalisierung getestet, wobei sich herausstellte, dass Störeinflüsse durch Wirbelströme die erreichbare Genauigkeit prinzipiell beschränken, und mit diesem Störeinfluss die angestrebte Lokalisierungsgenauigkeit nicht erreichen lässt. Die zweite Hälfte der Projektlaufzeit konzentrierte sich auf die Realisierung des finalen Demonstrators, der alle zum Betrieb notwendigen Komponenten auf einem etwa Scheckkarten großen Schaltungsträger vereint. Dieser Demonstrator konnte im letzten Monat der Projektlaufzeit erfolgreich als vektorfähiges Magnetometer in Betrieb genommen werden.

#### 4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt zeichnete sich durch eine hervorragende Zusammenarbeit zwischen Industrie und akademischen Konsortialpartnern aus. So gab es über die gesamte Projektlaufzeit enge Abstimmungsrunden zu den Arbeitspaketen optische und Modulintegration im Turnus von 2 Wochen, an denen alle Industriepartner und teilweise die akademischen Partner beteiligt waren. Darüber hinaus gab es eine enge Zusammenarbeit mit Würth Elektronik im Kontext der photonischen Integration und Leiterplattenfertigung für die System PCB und den Mikrowellenschaltungsträger. Zwischen Bosch und Q.ant gab es engen Austausch und Zusammenarbeit bei der Integration des Lasers und der Laser-Treiberschaltung für die Demonstratoren. Im Arbeitspaket homogenes Magnetfeld gab es intensiven Austausch und Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart. In halbjährlichem Turnus trafen sich alle Verbundpartner, um sich gegenseitig und dem Projektträger den Fortschritt in den Arbeitspaketen zu berichten.

## Abschlussbericht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Robert Bosch GmbH	<b>Förderkennzeichen:</b> FK: 13N15373
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Quanten-Magnetometer zur Positions- und Lagebestimmung für Intelligente Systeme, Quamapolis	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2021 - 30.09.2024	
<b>Autoren:</b> Dr. Tino Fuchs, Dr. Alexander Fischer, Robert-Bosch-Campus 1, 71272 Renningen	

## Teil II: Ausführliche Darstellung des Projekts

Zielsetzung des Gesamtvorhabens Quamapolis war die Entwicklung und prototypische Realisierung eines kleinbauenden, vektoruell messenden Magnetometers auf Basis von NV-Zentren in Diamant und die anschließende Realisierung eines magnetischen Lokalisierungssystems, das dieses hochempfindliche Magnetometer verwendet, um eine Lokalisierungsgenauigkeit unter 1 cm für Innenräume zu erzielen.

Im Rahmen des Quamapolis Projektes war die zentrale Forschung der Robert Bosch GmbH vorrangig in den Arbeitspaketen AP1 (Anforderungen), AP2 (Photonische Integration), AP6 (Modulintegration) sowie AP8 (Aufbau und Test) engagiert, siehe Abbildung 1 und Abbildung 2.

Zielsetzung des Arbeitspakets AP1 war die Erstellung eines Lastenhefts für das System und die Sub-Module. Das Arbeitspaket AP2 umfasste die Forschung und Entwicklung zur photonischen Integration von Diamant und Laserdiode bezüglich der Definition von AVT-Technologien und Materialien, Festlegen der Substrattechnologie, Definition der Anforderungen an Montagetechnologie inklusive von Toleranzen, sowie die Berücksichtigung der Anforderung an das Wärmemanagement. Im Arbeitspaket AP6 wurden die Erstellung von Integrationskonzepten in Leiterplattentechnologie, Definition und Bewertung von Entwärmungstechnologien für Laserdiode und Diamant sowie die Miniaturisierung auf Sensorebene unter Einsatz von Embedding Technologie bearbeitet. Im Arbeitspaket AP8 wurde das Lokalisierungssystem als Anwendungsfall für das NV-Magnetometer adressiert. Hier erfolgten die Auslegung und das Design des Sendespulensystems, die Konzeption und Umsetzung des Algorithmus zur Positions- und Lagebestimmung, sowie die quantitative Bewertung von Störeinflüssen aus Umgebung.

### 1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Durchführung des Vorhabens diente die Teilvorhabenbeschreibung als Teil des eingereichten Projektantrags als Planungsgrundlage. Das Projekt und die einzelnen Arbeitspakete wurden größtenteils entsprechend des vor Beginn aufgestellten Zeit- und Meilensteinplans abgearbeitet. Bedingt durch Einschränkungen im Rahmen der Corona-Pandemie im Zeitraum 2020-2022 konnten einige der hier geplanten Umsetzungsmaßnahmen aufgrund Home-Office Pflicht bei Bosch nicht im

geplanten Zweitraum umgesetzt werden. Durch die damit entstandenen Verzögerungen musste eine Verlängerung des Projekts um 6 Monate beantragt werden, die durch den Fördergeber auch genehmigt wurde.

Flankiert wurden die Arbeiten durch die regelmäßigen Konsortialtreffen zweiwöchentliche Austauschrunden zu Themen aus AP2, AP6 und AP8 mit Beteiligung der darin involvierten Partner aus Industrie und Academia.

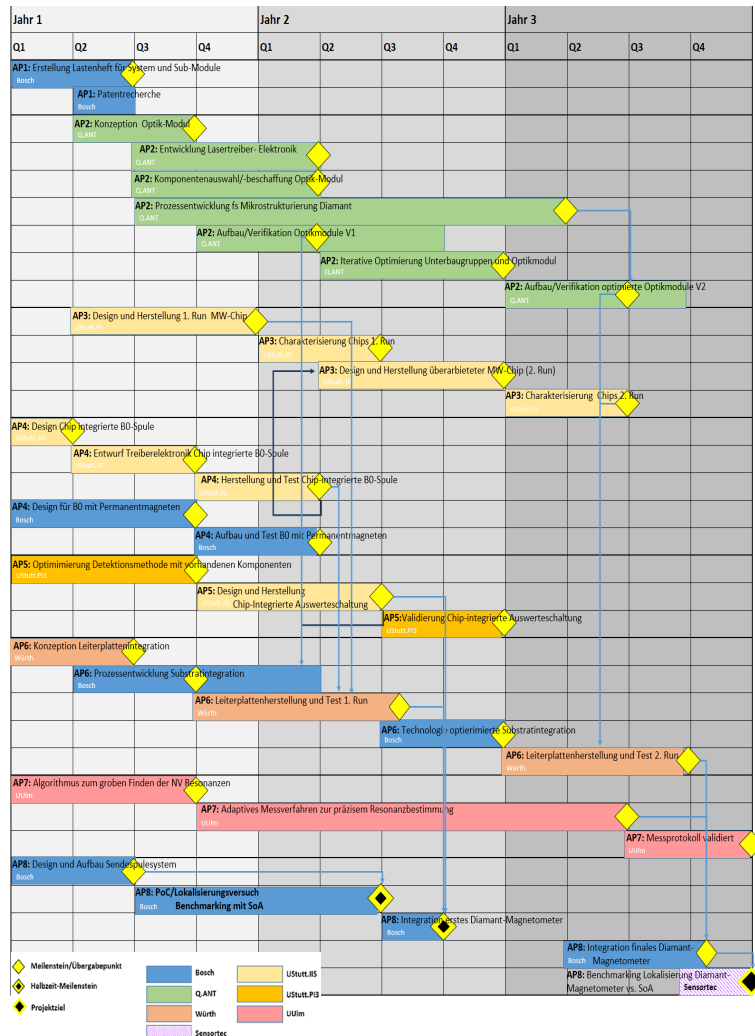


Abbildung 1 Aufgaben und Meilensteinplan zum Quamapolis Verbundprojekt

	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				Σ
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
<b>Projektmanagement</b>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	<b>6</b>
AP 1 Anforderungen, System	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0							<b>11</b>
AP 2 Photonische Integration	1.0	2.5	4.0	4.5	4.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5			<b>22</b>
AP 3 Mikrowellenschaltung		2.0	2.0	1.0	1.0					1.0			<b>7</b>
AP 4 Homogenes Magnetfeld		1.0	1.0		1.0	1.0							<b>4</b>
AP 5 Rauscharme Photodetektoren		2.0	1.0	1.0	2.0					1.0			<b>7</b>
AP 6 Modulintegration PCB		1.0	1.0	0.5	0.5		0.5	0.5	0.5	0.5			<b>5</b>
AP 7 Messprotokoll													<b>0</b>
AP 8 Aufbau und Benchmarking		1.0	2.0	3.0	4.0	4.0				2.0	5.0	3.0	<b>24</b>
<b>Summe</b>													<b>80</b>

Abbildung 2: Ressourcenplan für das Teilvorhaben Bosch in Quamapolis. Angaben in Personenmonaten.

## 2 Erzielte Ergebnisse im Vergleich zu den gesetzten Projektzielen

### 2.1 Arbeitspaket 1: Definition der Anforderungen (6 PM)

#### 2.1.1 Anforderungskatalog, Systemdesign und Anforderungen an Sub-Module

Die Anforderungen an das System wurden für die Leitapplikation Indoor Lokalisierung auf Baustellen gemeinsam mit dem Bosch Geschäftsbereich Power Tools (PT) erhoben. PT hat einen hier mit der D-Tect Produktserie bereits Wall-Scanner am Markt, die perspektivisch mit der Lokalisierungsfunktion ausgestattet werden. Hieraus wurden die in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellten Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Funktion des Quamapolis Magnetometers bzw. Lokalisierungssystems abgeleitet.

#### Anforderungen an Zuverlässigkeit

Temperaturbereich:  $-10\text{ °C} - +50\text{ °C}$   
Feuchtebereich:  $0 - 90\text{ \%rH}$



Abbildung 3: Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Lokalisierungssystems

#### Funktionale Anforderungen

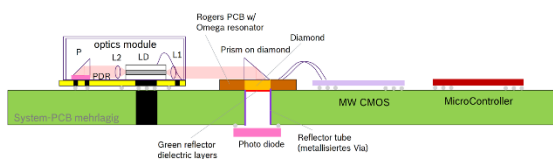
Absolutgenauigkeit Ort:	$\pm 5\text{ mm}$ in der Ebene
Absolutgenauigkeit Winkel:	$0.2^\circ$ (Thermokamera)
Arbeitsbereich:	$\geq 3\text{ m}$ (um Beacon)
Update-Rate:	$\geq 200\text{ Hz}$
Leistungsaufnahme Sensor:	$< 1\text{ W}$
Baugröße:	integrierbar in D-Tect <sup>1)</sup>



Abbildung 4: Anforderungen an die Funktion des Lokalisierungssystems

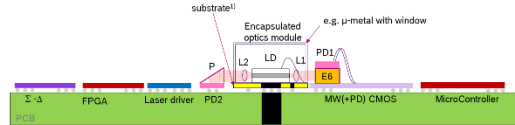
Auf Basis der Anforderungen für das System wurde das Konzept des vollintegrierte und kleinbauenden Magnetometers entwickelt, siehe Abbildung 5. Es wurde ein sogenannter Intermediate Demonstrator als Halbzeitmeilenstein definiert, mit dem die Integration der Komponenten und Sub-Module auf Leiterplattensubstrat getestet werden kann. Für alle Komponenten wurden Anforderungen an Baugröße und Verarbeitbarkeit definiert.

**Halbzeitmeilenstein: Intermediate Demonstrator (M18)**



- Diskreter MW Resonator mit Diamant eingebettet
- Diskrete PD Schaltung
- Diskrete Lasertreiber-Schaltung

**Projektziel: Finaler Demonstrator (M36)**



- Diamant auf CMOS mit MW-Striplines
- Integration PD-Schaltung in CMOS
- Integration Lasertreiber-Schaltung in CMOS

**Komponentenliste für den intermediate Demonstrator**

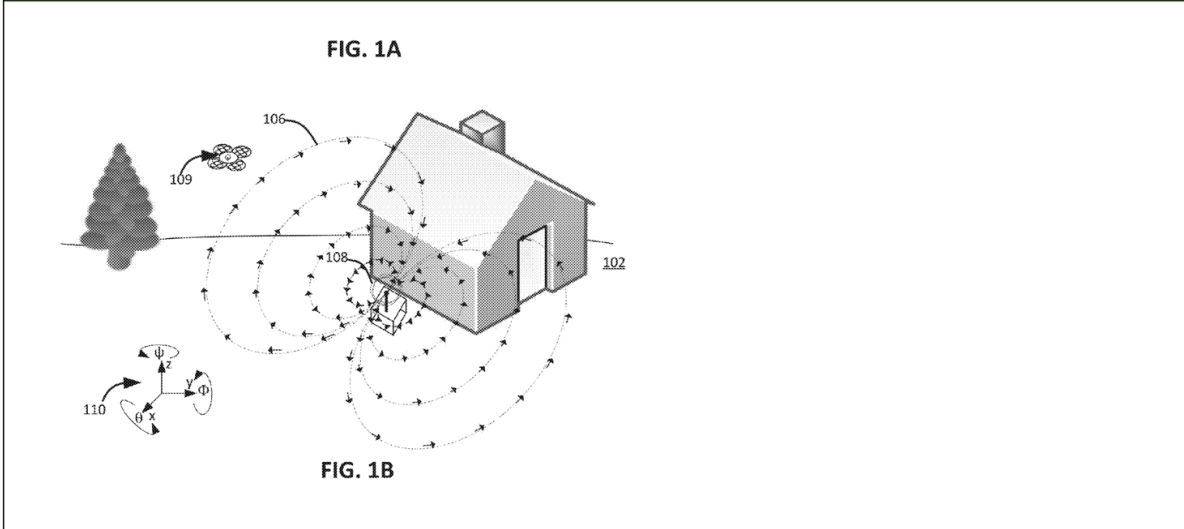
Funktion	Bauteil	Typ	Verantwortung	Footprint [mm x mm]	Package	AVT-Technik
Schaltungsträger	System-PCB	Eigenentwicklung	Würth	55 x 85	n.a.	n.a.
Lichtquelle	Laser-Kopf	Eigenentwicklung	Q.ant	30 x 12.7	14 Pin Butterfly	Durchsteckteil, Anlöten
Ansteuerung Lichtquelle	Laser-Treiber	Eigenentwicklung	Q.ant	50 x 30 (tbd)	Daughterboard	Aufstecken auf System-PCB
Mikrowellengenerierung	MW-Chip	Eigenentwicklung	IIS, Bosch, PI3	4 x 1.5	bare die	Flip-Chip oder PCB embedded
Messum Fluoreszenzlicht	Signal-Photodiode	COTS	IIS, PI3, Bosch	3 x 1.5	bare die	Kleben + Drahtbond (Bosch)
Balanced Detection	Balanced Detector	Eigenentwicklung	IIS, PI3, Bosch	15 x 15	Daughterboard	Aufstecken
AD-Signalwandlung	Sigma-Delta-Wandler	COTS	IIS	1.5 x 1.5	bare die	Flip-Chip oder PCB embedded
Ansteuerung MW	FPGA (Fa. Lattice)	COTS	IIS	9 x 9	z.B. QFN	SMD
Zentrale Steuereinheit	Mikrokontroller	COTS	IIS, RB	5 x 5	z.B. QFN	SMD
Aufspaltung Resonanzen	BO-Feld Generator	Eigenentwicklung	TUD, RB	tbd	3D-Druck Teil	Aufstecken
Ansteuerung BO-Generator	BO-Feld Controller	Eigenentwicklung	TUD, IIS, RB	tbd	Daughterboard	Aufstecken
Passive Components	Cs,	COTS	Würth, IIS, RB, Quant	SMD 0201	SMD 0201	SMD
Sensorelement	Diamant	Extern + PI3	PI3, Bosch, Quant	H: 0.3mm, L/B: 1-3 mm	SMD 0201	Kleben

Abbildung 5: Oben: Konzeptionelle Designs des vollintegrierten Magnetometers. Unten: Komponenten des Magnetometers und Anforderungen an Baugröße und Verarbeitbarkeit.

2.1.2 Patentrecherche

Um die von Bosch und anderen Partnern angestrebten Anwendungen erfolgreich verwerten zu können, wurde zu Projektbeginn eine ausführliche Patentrecherche durchgeführt, die frühzeitig konkurrierende Schutzrechte Dritter identifiziert, um ggf. eine Umgehungslösung oder eine Lizenzvereinbarung aufzusetzen. Bei einer Patentsuche zum Thema Active Magnetic Tracking wurden insgesamt 54 Patentfamilien identifiziert, von denen allerdings nur das Patent US20160377688: Magnetic Field Localization and Navigation von iRobot Corp. (USA), Priority: 2015, die Kommerzialisierung des in Quamapolis adressierten magnetischen Lokalisierungssystems einschränkt. Im oberen Teil von Abbildung 6, welche die Ergebnisse der Patentrecherche zusammenfasst, ist die Fig 1B aus dieser Patentschrift US20160377688 wiedergegeben. Die verwertungseinschränkende Wirkung dieser Schrift wurde als gering eingestuft, da sich diese bereits im ersten Claim auf einen "mobile robot", und nachfolgendspeziell auf "robot lawnmower" bezieht, so dass z.B. die für Bosch wichtige Leitanwendung Lokalisierung von Power Tools nicht gefährdet ist.

## State of the Art- Active Magnetic Field Tracking



### Index

[Active Magnetic Tracking-54 References](#)

### Summary

1. A total of 54 references are observed as relevant for SOA search conducted for Active Magnetic Tracking.
2. PDF copies of every Patent Family can be downloaded by clicking on column D from Patbase Express.
3. Please see Column I for Relevant Excerpts and Notes.
4. Analysis for Non-English Documents is done based on Available English Abstract and Machine Translated Description.
5. These documents are already given in search order form-
  - 1.US2016377688 (S.No- 17)
  - 2.US8013595B (S.No-10)
  - 3.US8121812B (S.No-11)
  - 4.US4737794 (S.No-1)
  - 5.US2006255795 (S.No-7)
  - 6.US2003016006 (S.No-54)

Abbildung 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Patentrecherche

## 2.2 Arbeitspaket 2: Photonische Integration (22 PM)

Die photonische Integration spielt eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung von Vektor-Magnetometern. In diesem Zusammenhang wird zwischen Active Alignment und passiver Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT) unterschieden. Beim Active Alignment optischer Komponenten wird die Justierung in Echtzeit anhand einer optischen Vermessung des Strahlengangs durchgeführt, um höchste Präzision zu gewährleisten. Die Bauteile werden unter kontinuierlicher Kontrolle ihrer optischen Eigenschaften ausgerichtet und zum Beispiel mit UV-härtenden Klebstoffen fixiert, sodass minimale Justage Abweichungen auftreten. Dieses Verfahren bietet eine exzellente optische Performance, ist jedoch aufgrund des zusätzlichen Messaufwands und komplexerer Fertigungsprozesse kostenintensiver. Bei der passiven Aufbau- und Verbindungstechnik erfolgt die Ausrichtung optischer Komponenten ausschließlich über eine präzise optische Erkennung mittels Videosysteme und der mechanischen Bauteiltoleranzen der zu Bestückenden Komponenten, ohne eine optische Echtzeitkontrolle. Diese Methode ist kosteneffizienter und ermöglicht eine schnellere Produktion, erreicht jedoch nicht die höchste optische Präzision, die durch Active Alignment realisierbar ist. Die elektrische und photonische Integration, die auf der passiven Aufbau- und Verbindungstechniken beruht, wurde von Bosch durchgeführt und umfasst die folgenden Herstellungsschritte zur Realisierung des Funktionsdemonstrators im Rahmen des Projekts:

- Lötprozesse auf Systemleiterplatte (Stecker, Lötkomponenten ...), 270°C

- Detektions- und Referenzphotodioden Integration in die Kavität der Systemleiterplatte, ICA-Thermisch-1, 130°C (ICA: Isotropic Conductive Adhesive)
- Magnet Integration in die Kavität der Systemleiterplatte, NCA-Dualhärtend-1 (UV-Vernetzung + Thermisch 80°C) (NCA: Non-Conductive Adhesive)
- NV-Diamant Integration, NCA-Optisch-1 (transparentes UV-Aushärtendes Material)
- Integration MW Resonator auf Systemleiterplatte Kavität, NCA-Thermisch-1, 80 °C
- Laserintegration auf der Systemleiterplatte, ICA-Thermisch-1, 80 °C

Die Herstellschritte wurden gezielt so ausgewählt, dass die höchsten thermischen Belastungen im Rahmen der passiven Aufbau- und Verbindungstechnik minimiert werden. So erfolgt das Löten der Komponenten zu Beginn des Prozesses, während die Laserintegration des Butterfly-Packages möglichst an das Ende der Prozessabfolge folgt. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da das Butterfly-Package bis zu thermischen Belastungen von 80 °C ausgelegt ist.

In den folgenden Abschnitten werden ausschließlich die wesentlichen Prozessschritte zu der passiven Aufbau- und Verbindungstechniken der elektrischen und photonischen Integration behandelt. Die Integration der MW Resonator Leiterplatte auf Systemleiterplatte sowie die Laserintegration wird in den AP2.6 beschrieben.

Die Detektions- und Referenzphotodioden wurden elektrisch über isotrop leitfähigen Klebstoff (ICA) kontaktiert. Die Pad-Metallisierung auf der Rückseite der Dioden erfordert den Einsatz von Abstandhaltern (Spacer), um Kurzschlüsse zu den Messleiterbahnen auf der Systemleiterplatte zu vermeiden. Abbildung 7 zeigt die Systemleiterplatte des finalen Demonstrators mit der Kavität und Position der Detektions- und Referenzphotodioden oben und unten die Package Merkmale der Dioden mit CT-Bilder der Detektions- und Referenzdiode in der Kavität der Systemleiterplatte.

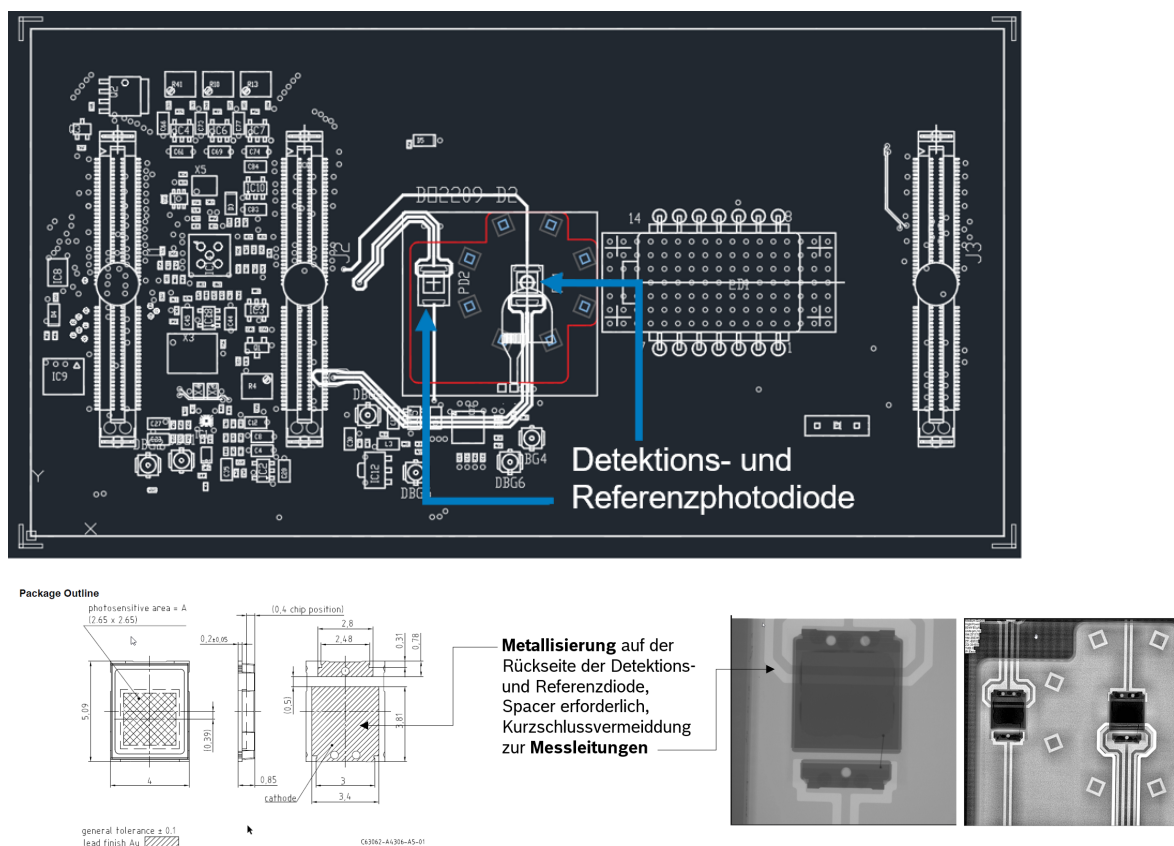


Abbildung 7: Systemleiterplatte mit der Kavität und Position der Detektions- und Referenzphotodioden oben, und unten die Package Outline mit CT-Bilder der Detektions- und Referenzdiode in der Kavität der Systemleiterplatte.

Für die Integration der Magnete in die Kavität der Systemleiterplatte wurde ein Handling- und Bestückungsprozess auf einem Pick-and-Place-Bestückautomaten entwickelt, der auch das Dispensieren eines dualhärtenden NCA umfasst. Die Dosierung, Handling- und Bestückungsprozess für die Integration der Magnete wurde erfolgreich für den Funktionsdemonstrator umgesetzt. Abbildung 8 zeigt links die präzise Dosierung des dualhärtenden NCAs auf dem Magnet-Bondpad und rechts die Integration der Magneten in Halbach-Anordnung in der Kavität der Systemleiterplatte.

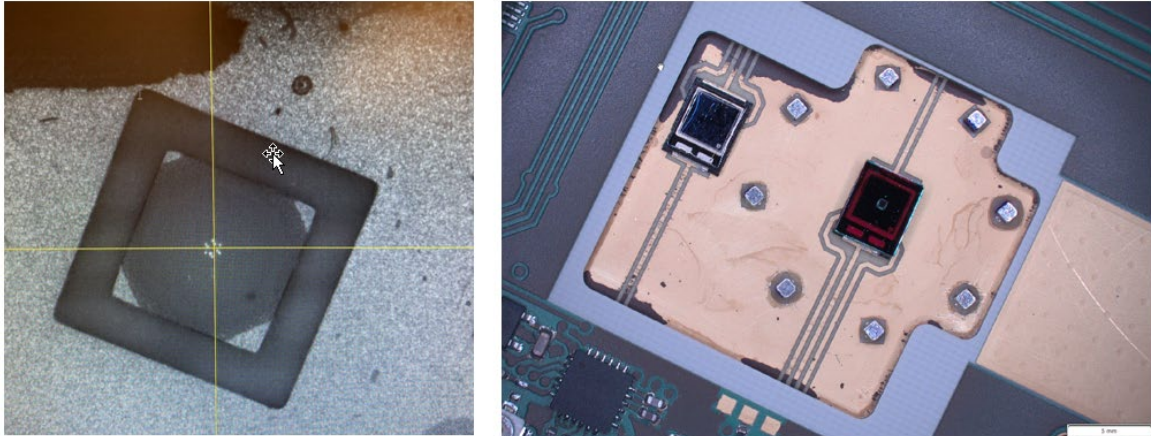


Abbildung 8: Links die präzise Dosierung des dualhärtenden NCA auf dem Magnet-Bondpad und rechts die Integration der Magneten in Halbach-Anordnung in die Kavität der Systemleiterplatte.

Ein Handling- und Pick-and Place Prozess wurde für die Integration des NV-Diamanten mit den Abmessungen  $500 \times 500 \times 500 \mu\text{m}^3$  auf den Grünfilter der Detektionsfotodiode im Rahmen des Projektes untersucht und entwickelt. Das Handling und der Pick-and-Place-Prozess umfasst einen hochpräzisen Stempelprozess sowie die Auslegung des Stempelwerkzeugs für einen nicht leitfähigen, transparenten, UV-aushärtenden Klebstoff (Aushärtung: LED 400, Intensität  $200 \text{ mW}/\text{cm}^2$ , 5 s, typischer Anwendungsbereich für Applikationen: zwischen  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ) um ein minimales Klebstoffvolumen beim Stempeln zu erreichen. Sowohl das Stempeln des minimalen Klebstoffvolumens als auch das gesamte Handling und Pick-and Place Prozess für die NV-Diamanten-Integration wurden erfolgreich für den intermediate und den finalen Demonstrator umgesetzt. Die Abbildung 9 zeigt links den gestempelten nicht leitfähigen, transparenten, UV-aushärtenden Klebstoff auf den Grünfilter der Detektionsfotodiode, in der Mitte Rückseitenausrichtung für die hochgenaue Platzierung des NV-Diamanten, und rechts den platzierten NV-Diamanten auf den Grünfilter der Detektionsfotodiode.

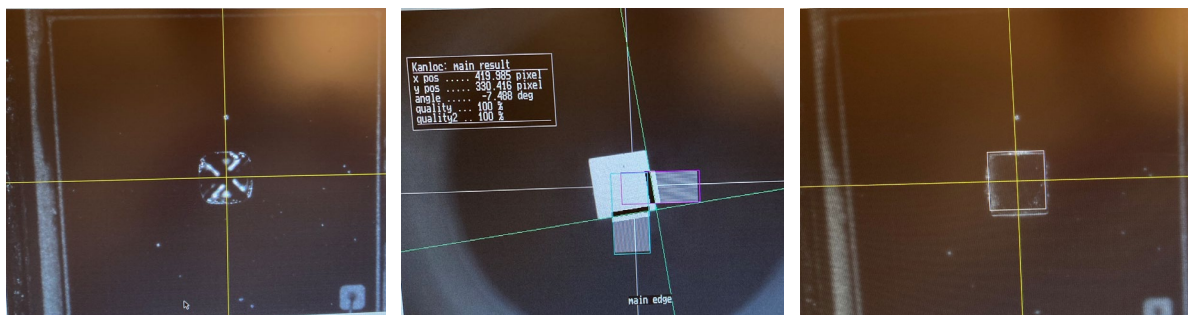


Abbildung 9: Links den gestempelten nicht leitfähigen, transparenten, UV-aushärtenden Klebstoff auf den Grünfilter der Detektionsfotodiode, in der Mitte Rückseitenausrichtung für die hochgenaue Platzierung des NV-Diamanten, und rechts den platzierten NV-Diamanten auf den Grünfilter der Detektionsfotodiode

### 2.3 Arbeitspaket 3: Mikrowellenschaltung (7 PM)

Die Mikrowelle spielt eine entscheidende Rolle bei der Nutzung von NV Zentren in Diamant für die Magnetfeldmessung. Das Magnetfeld der Mikrowelle führt zu einer Manipulation der Spin-Zustände im Grundzustand der NVs, was sich in einer resonanten Änderung der Fluoreszenzleistung ausdrückt und über den Zeman-Effekt mit dem zu messenden Magnetfeld ausdrückt. Um bei dieser ODMR-Messung hohen Kontrast und geringe Linienbreite zu erzielen, die sich beide positiv auf die Sensitivität des Magnetometers auswirken, muss die Mikrowelle nicht nur mit der richtigen Frequenz, sondern auch mit ausreichend Amplitude bereitgestellt werden. Es werden Amplituden von einige 100  $\mu\text{T}$  benötigt. Um dies elektrisch effizient, d.h. mit geringer Leistungsaufnahme zu ermöglichen, bietet es sich an, dafür einen MW-Resonator zu verwenden. Da in Quamapolis ein kompaktes Magnetometer auf einem PCB-Schaltungsträger realisiert werden soll, liegt es nahe, eine planaren Resonator auf einem Hochfrequenz tauglichen Substrat heranzuziehen. Die Bandbreite des Resonators sollte mindestens 50 MHz betragen, um die Resonanzen aller NV-Achsen des Diamanten optimal anregen zu können, wenn für die beabsichtigte Vektormessung ein Bias-Magnetfeld  $B_0$  von 1 mT angelegt wird. Die Auslegung eines planaren Resonators mit diesen Eigenschaften wurde von Bosch bei der Universität Dortmund, Prof. Suter in Auftrag gegeben, da dort schon über Jahrzehnte Erfahrung in der Auslegung solcher MW-Resonatoren vorliegt.

Material: Rogers RO4003,  $h=0.508\text{mm}$ , Cu  $17\mu\text{m}$

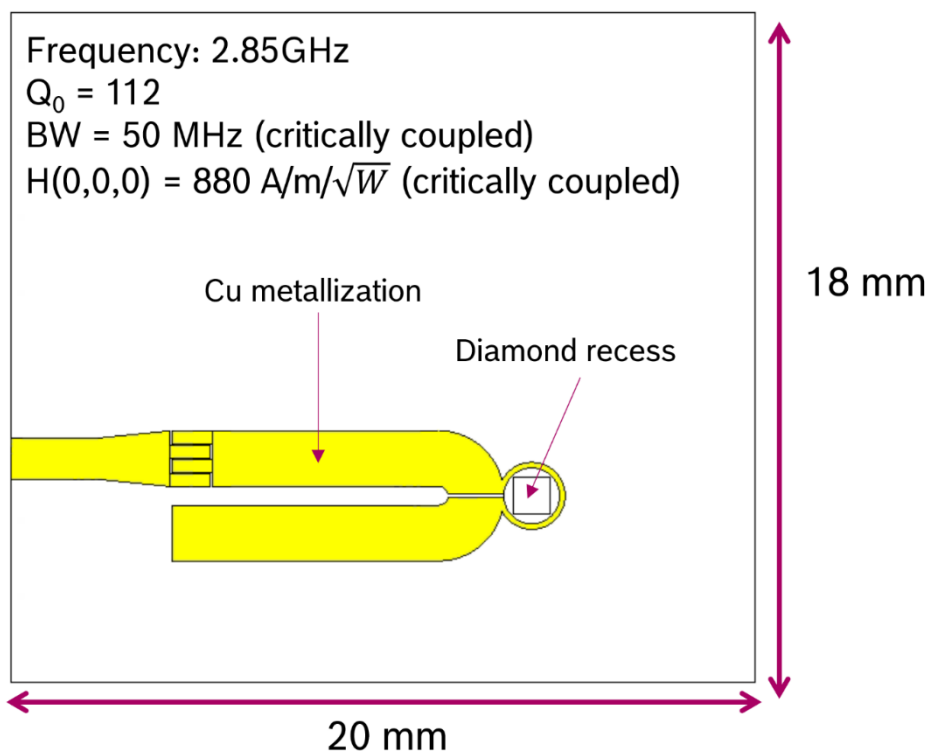


Abbildung 10 Ergebnis der Auslegung des MW-Resonators für Quamapolis durch die Uni Dortmund

Es wurde ein sogenannter Omega-Resonator vorgeschlagen und optimiert. Das Ergebnis der Auslegung ist in Abbildung 10 dargestellt. Der Diamant wird in der Mitte der Omega-Schleife platziert. Eine Interdigital-Struktur im linken Teil der Schaltung dient der Impedanzanpassung auf 50 Ohm. Die Dicke der Cu-Metallisierung, die Dielektrizitätszahl des Substrats, in diesem Fall Rogers RO4003 und die Abstände der Cu-Strukturen beeinflussen maßgeblich die Lage der Resonanz. Da in der

Simulationsrechnung der TU Dortmund nicht die exakten Parameter verfügbar waren, die später in der Herstellung der Resonatoren beim Projektpartner Würth Elektronik vorliegen, musste davon ausgegangen werden, dass mehrere Fertigungsiterationen nötig sind, um begleitend mit der Simulation die Resonanzposition der gefertigten Resonatoren mit der Zielfrequenz von 2.85 GHz in Übereinstimmung zu bringen. Insgesamt waren 3 Fertigungsdurchläufe bei Würth Elektronik notwendig, um die Zielspezifikation zu erreichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 11 dargestellt. Im linken Teil sieht man die von Würth Elektronik gefertigten finalen MW-Substrate und im rechten Teil die von Bosch durchgeführte Messung des  $S_{11}$  Parameters für zwei unterschiedliche Design-Varianten aus der hervorgeht, dass bei 57  $\mu\text{m}$  Spaltmaß im Omega-Resonator und Variante C, die Resonanzfrequenz im aufgebauten Zustand mit der Zielfrequenz (rote gestrichelte Linie) übereinstimmt. Ein MW-PCB mit diesem Design wurde dann jeweils für den Intermediate und auch den Final Demonstrator verwendet.

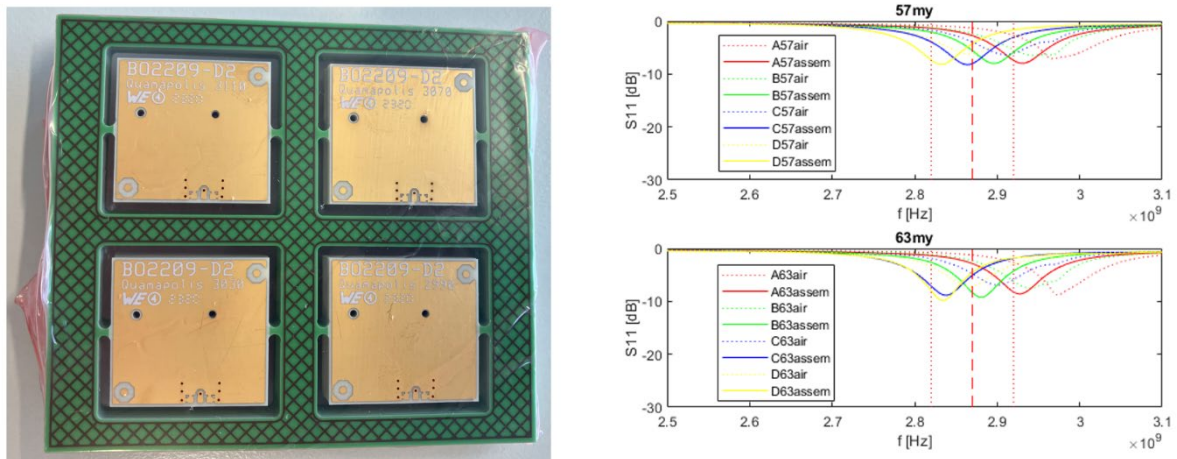


Abbildung 11 Finale MW Resonatoren von Würth Elektronik nach Design von TU Dortmund

## 2.4 Arbeitspaket 4: Homogenes Magnetfeld (4 PM)

Die Auslegung einer Anordnung von Permanentmagneten zur Erzeugung eines sehr homogenen Magnetfelds  $B_0$  im Diamant für die Aufspaltung der Resonanzen aus unterschiedlichen NV-Achsen im Diamant erfolgte durch den Projektpartner Uni Stuttgart, IIS. Es wurde dort ein Halbach-Ringanordnung von 8 Magnetwürfeln der Kantenlänge von 1 mm vorgeschlagen, die zur gewünschten  $B_0$  Feldstärke von 1 mT am Ort des Diamanten führt. Bei Bosch wurde auf Basis der in AP2 entwickelten AVT-Technologie eine solche Magnet-Anordnung realisiert, siehe Abbildung 12 und mit einem kommerziellen Magnetfeldsensor im Labor vermessen. Dazu wurde mit dem Magnetfeldsensor ein Volumenscan in vektorieller Messung durchgeführt, siehe Abbildung 13. Der Betrag des Magnetfelds liegt bei 1.9 mT, der Winkel (My/Mx) beträgt  $21.6^\circ$ , was sehr gut zu den angestrebten  $22.5^\circ$  passt. Die Homogenität bzgl. räumlicher Variation in x, y und z Richtung entspricht der Auslegung.

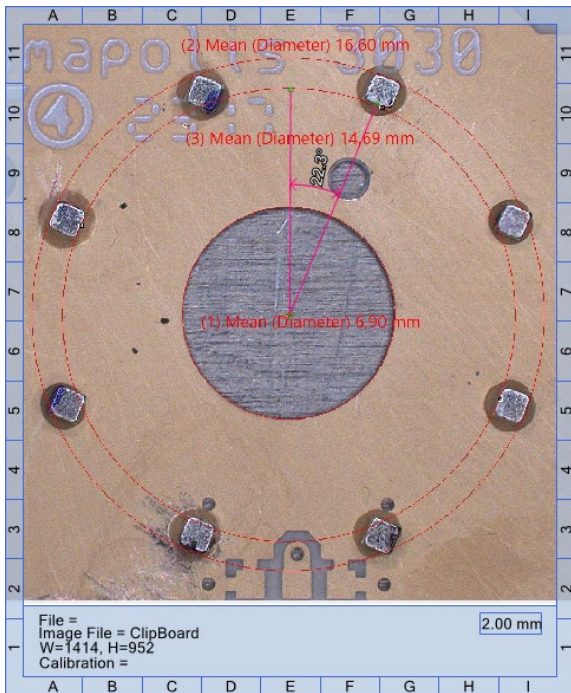


Abbildung 12 Ringanordnung von 8 Permanentmagneten auf Dummy PCB zur Überprüfung der  $B_0$  Feldstärke

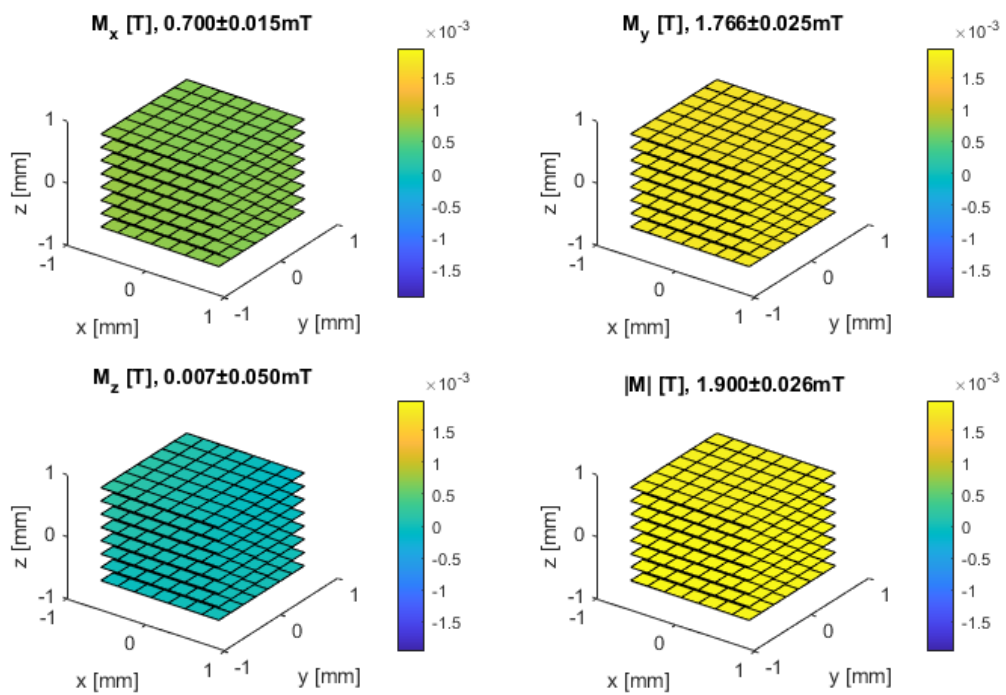


Abbildung 13 Volumenscan in vektorieller Messung für Magnetaordnung aus Abbildung 9

## 2.5 Arbeitspaket 5: Rauscharme Fotodetektoren (7 PM)

Um das volle Potential eines auf Basis optisch detektierter Magnetresonanz arbeitenden NV-Magnetometers zu erschließen, ist es notwendig, dass nur noch das Photonschrotrauschen die Rauscharakteristik der Fluoreszenzdetektion limitiert. Dies stellt hohe Anforderungen an die Fotodetektorschaltung. Eine erhebliche Rauschquelle, die es zu unterdrücken gilt, ist das Intensitätsrauschen der Laserdiode, da sich dieses proportional ins Fluoreszenzrauschen überträgt. Deshalb wurde auf die im Vorgängerprojekt MiLiQuant entwickelte Technik der Balanced Detection zurückgegriffen. Hier wird ein kleiner Teil des Laserlichts über einen Strahlteiler auf eine zweite Photodiode gelenkt, so dass deren Fotospannung etwa der Fotospannung der Photodiode entspricht, die das Fluoreszenzlicht des Diamanten sammelt. Die Fotodetektorschaltung bildet die Differenz der beiden Fotostrome und leitet diese an einen Transimpedanzverstärker (TIA) zur Signalwandlung und Verstärkung weiter, siehe Abbildung 14

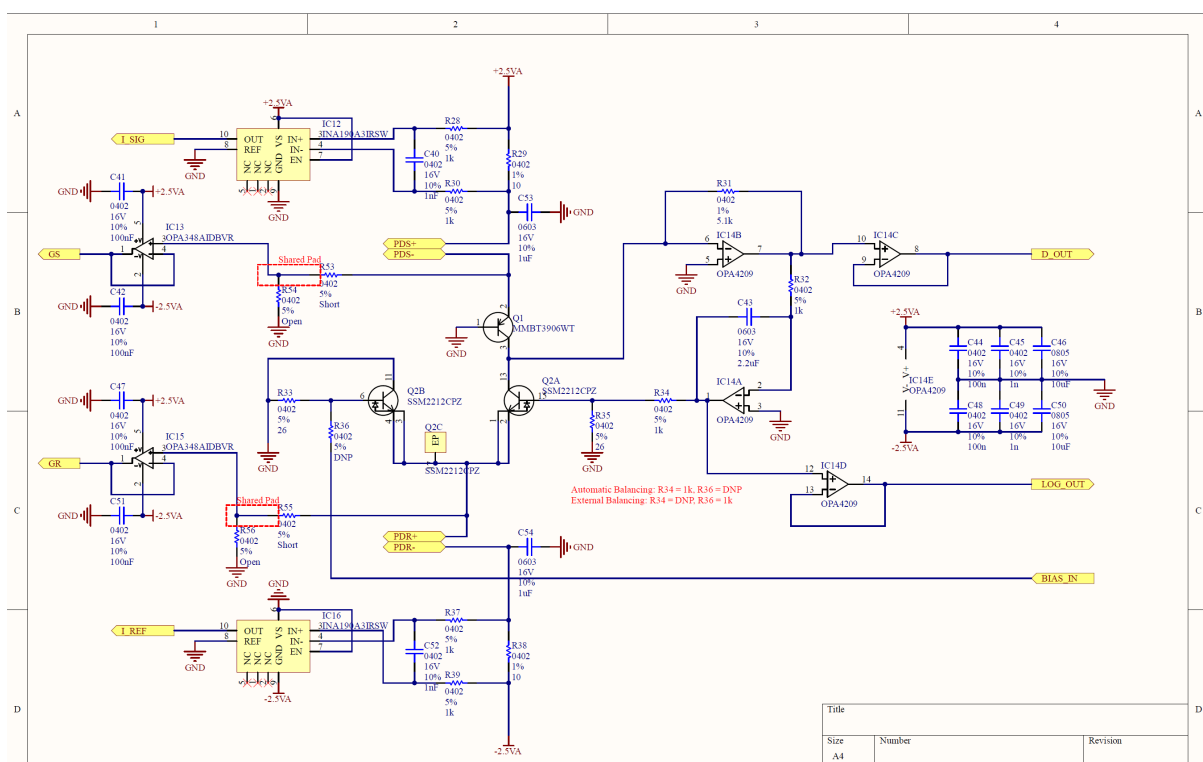


Abbildung 14 Schaltplan des Balanced Fotodetektors

Für Quamapolis waren zwei Änderungen im Design des Fotodetektors ggü. MiLiQuant notwendig. Zum einen sind die Fotodioden nicht mehr auf dem PCB des Detektors integriert, sondern in der Base-PCB verbaut, und zum anderen musste der Formfaktor der Detektor-PCB verringert und an die Abmessungen des Quamapolis-Demonstrators angepasst werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 15 zu sehen. Als Verbesserungen gegenüber der Fotodetektorschaltung in MiLiQuant wurden Frequenzfilter und ein programmierbarer Verstärker sowie ein hochauflösender Analog-Digital-Konverter verwendet.

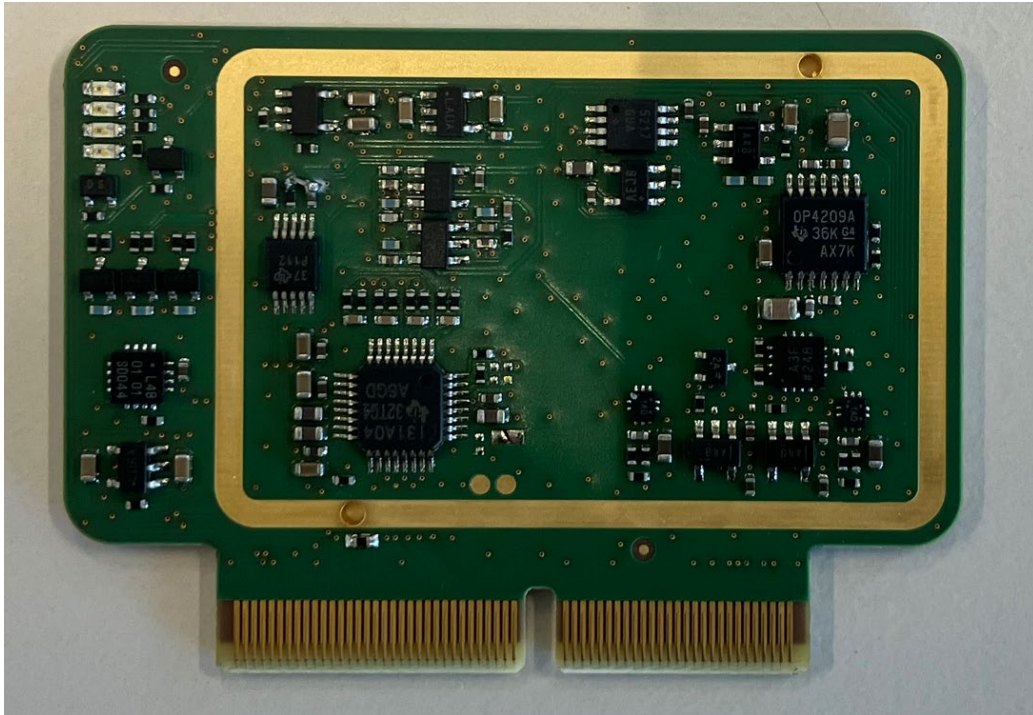


Abbildung 15 Fotodetektor PCB in Quamapolis vor der Bauteilbestückung

## 2.6 Arbeitspaket 6: Modulintegration (5 PM)

Nach der Integration der Detektions- und Referenzfotodioden, der Magnete und des NV-Diamanten in die Kavität der Systemleiterplatte wird anschließend die MW Resonator Leiterplatte sowie das Butterfly-Package auf der Systemleiterplatte integriert.

Für die Integration der MW Resonator Leiterplatte kam ein NCA zum Einsatz, der bei 80 °C aushärtet. Dieser Klebstoff musste präzise auf den Absatz der Kavität dosiert werden. Dabei war es von entscheidender Bedeutung, sowohl die Position der Dosierung als auch das Volumen des NCA sorgfältig einzustellen. Das Ziel war, sicherzustellen, dass kein Material in die Kavität oder auf die Systemleiterplatte gedrückt wurde. Diese Maßnahmen sind erforderlich, um eine optimale Verbindung und Funktionalität zu gewährleisten und mögliche Beeinträchtigungen, wie etwa durch das Verkippen der MW Resonator Leiterplatte, zu vermeiden. Darüber hinaus war eine exakte XY-Ausrichtung erforderlich, um die Öffnung über dem NV-Diamanten in der MW Resonator Leiterplatte für den optischen Pfad korrekt zu positionieren. In der Abbildung 16 ist links die Position der NCA-Dosierung und rechts die exakte XY-Ausrichtung über dem NV-Diamanten in der MW Resonator Leiterplatte zu sehen.

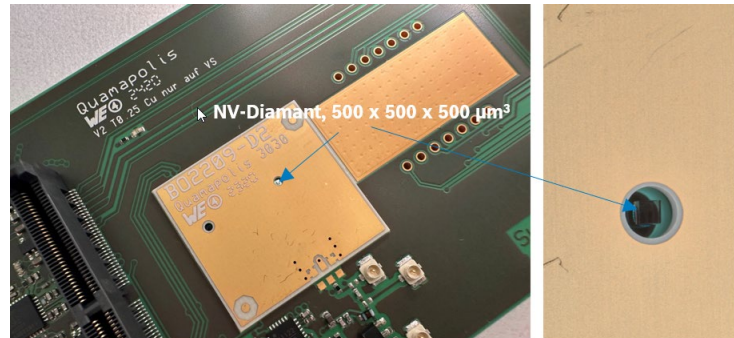
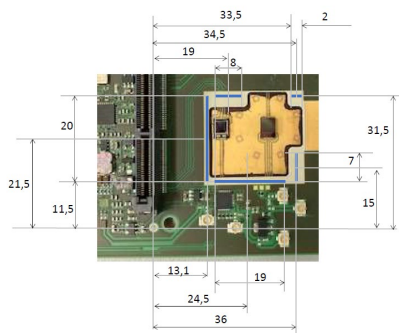


Abbildung 16: Links Position der NCA-Dosierung und rechts die exakte XY-Ausrichtung über dem NV-Diamanten in der MW Resonator Leiterplatte

Im Rahmen der passiven Aufbau- und Verbindungstechnik bei Bosch wurde abschließend das Butterfly-Package mit einem ICA, der bei 80 °C aushärtet auf die Systemleiterplatte integriert. Dabei spielt nicht nur die Fixierung des Butterfly-Package eine entscheidende Rolle, sondern auch die thermische Leitfähigkeit des verwendeten ICA-Materials. Der Einsatz dieses Materials ermöglicht eine effiziente Wärmeleitung vom Butterfly-Package zur Heat Sink auf der Rückseite der Systemleiterplatte. Abbildung 17 veranschaulicht oben den dosierten ICA und unten das bestückte Butterfly-Package auf der Systemleiterplatte.



Abbildung 17: Oben dosierter ICA und unten das bestückte Butterfly-Package auf der Systemleiterplatte

## 2.7 Arbeitspaket 8: Aufbau und Test (24 PM)

### 2.7.1 Lokalisierungssystem

Die erste der beiden zentralen Aufgaben in AP8 war es, die Lokalisierung und Lagebestimmung von Objekten im Raum mit dem in AP7 integrierten Sensormodul als Proof of Concept nachzuweisen. Konkret sollte ein System zur cm-genauen Lokalisierung und °-genauen Bestimmung der Ausrichtung von Objekten für Innenräume demonstriert werden. Damit lässt sich z.B. die Position eines Schlagbohrers im Raum erfassen. Grundlage der Lokalisierung und Lagebestimmung ist ein künstliches, zeitlich kontrolliert veränderliches Magnetfeld, das quasi jedem Punkt im Raum eindeutige magnetischen Koordinaten  $\vec{B}(\vec{r})$  verleiht, siehe Abbildung 18. Durch zeitlich aufgelöste, vektorielle Messung des Magnetfelds am Objekt, sollte sich dessen Position  $\vec{r}$  bestimmen lassen. Die Erzeugung des künstlichen Magnetfelds soll dabei durch ein sogenanntes Beacon-Spulensystem geschehen. Ein solcher Beacon verfügt über 3 unabhängige Spulen, die je ein zeitlich veränderliches B-Feld erzeugen, wobei die Spulen-Ebenen zueinander orthogonal sind, siehe Abbildung 19. Konkret werden die Spulen mit Wechselstrom unterschiedlicher Frequenzen z.B. 110 Hz, 120 Hz und 130 Hz betrieben, so dass gleichzeitig 3 magnetische Karten erzeugt werden. Per FFT des vektoriellen Sensorsignals lassen sich die Beiträge der einzelnen Spulen separieren. Damit erhält man 9 unabhängige Messwerte für den Punkt des Objekts im Raum. Damit lassen sich durch Lösen der algebraischen Gleichungen nicht nur die Raumkoordinaten des Objekts bestimmen, sondern auch seine Neigung d.h. z.B. die 3 Eulerschen Winkel ermitteln. Durch die hohe Empfindlichkeit des NV-Magnetometers wurde vor Projektbeginn abgeschätzt, dass sich im Raum mit einer Dimension von ca. 5 m x 5 m x 3 m eine Lokisierungsauflösung von unter 1 cm und eine Winkelauflösung von wenigen Grad erreichen lässt.

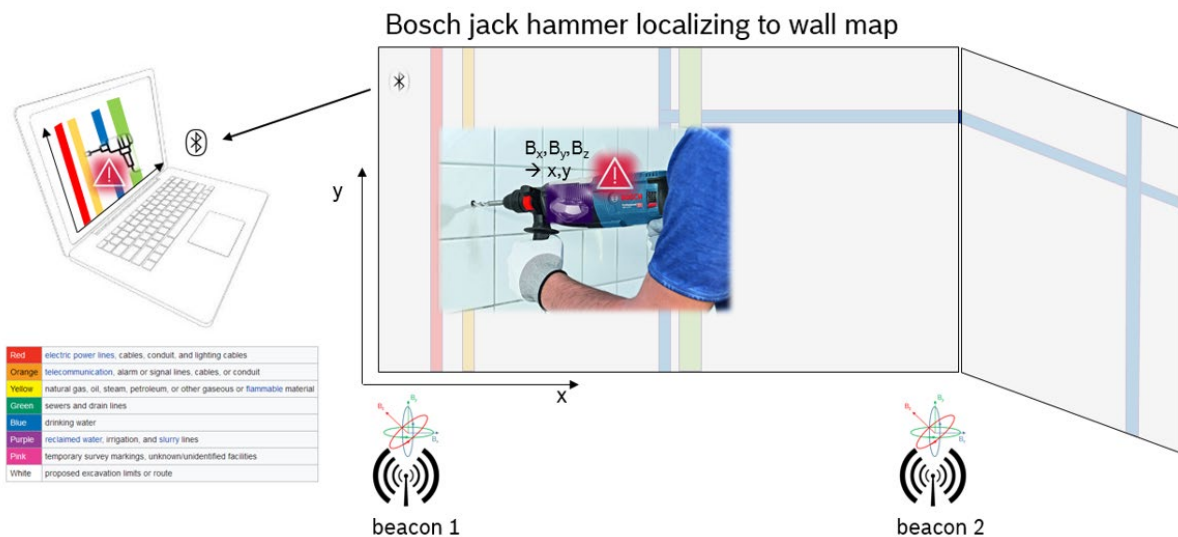


Abbildung 18 Prinzip der magnetischen Positions- und Lagebestimmung

Gemäß Projektplan sollte im ersten Schritt nach der Auslegung des Spulen-Systems (Beacons), ein Proof of Concept der Lokalisierungsfunktion auf Basis kommerziell verfügbarer Magnetfeldsensoren erbracht werden, um mögliche systematische Störeinflüsse zu erkennen.

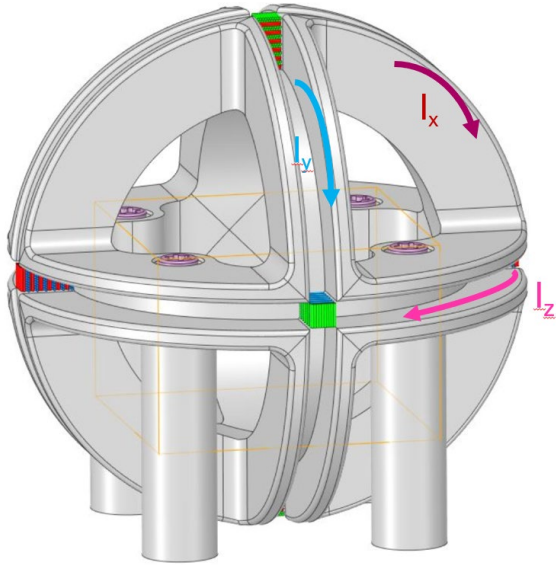


Abbildung 19 CAD-Modell eines Beacons mit 3 orthogonalen Spulenströmen  $I_x$ ,  $I_y$  und  $I_z$

Als mögliche Störquellen wurden Magnetfelder vermutet, die durch Wirbelströme in elektrisch leitfähigen Bauteilen im Raum, z.B. Stahlarmerungen im Beton verursacht werden. Da diese mit genau der gleichen Frequenz auftreten wie die von den Beacon-Spulen erzeugten Felder, sind sie von diesen nicht unterscheidbar und können das Lokalisierungsergebnis systematisch verfälschen, siehe Abbildung 20. Die Amplituden der Wirbelströme und damit deren störende Wirkung skaliert mit der Frequenz des primären Magnetfeldes. Deshalb sollte diese möglichst niedrig, d.h. deutlich unter 1 kHz gewählt werden. Andererseits sollten sie nicht zu niedrig sein, um  $1/f$  Rauschen im Sensor minimal zu halten. Deshalb wurden in der Realisierung Frequenzen im Bereich um 200 Hz gewählt.

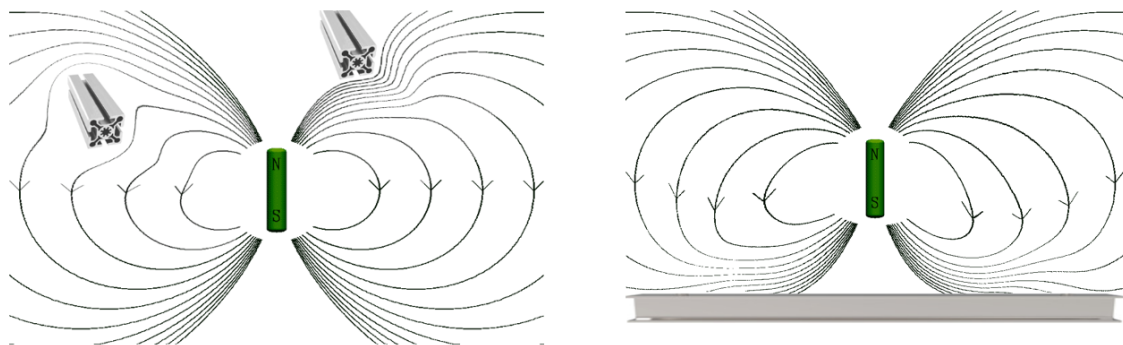


Abbildung 20 Problematik der Feldverzerrung durch leitfähige Objekte in der Nähe zum Objekt bzw. Sensor

Um eine vektorielle Magnetfeldmessung mit hinreichend hoher Empfindlichkeit durch kommerziell verfügbare Magnetometer zu realisieren, wurden 3 Fluxgate Magnetometer des japanischen Herstellers Aichi durch orthogonale Ausrichtung zueinander kombiniert, siehe Abbildung 21.

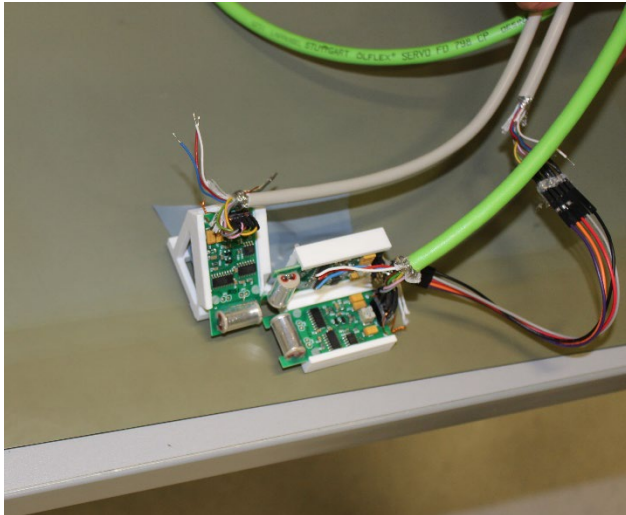


Abbildung 21 Vektorielltes Magnetometer bestehend aus 3 Aichi Fluxgate Sensoren zum Lokalisierungsnachweis

Diese Fluxgate Sensoren haben ein Detektionslimit von etwa 20 pT/VHz und eine Bandbreite bis etwa 200 Hz. Um möglichst genau die Vektorkomponenten des Magnetfelds an einem Punkt zu bestimmen, müssen die 3 Fluxgate Sensoren möglichst nah zueinander aufgebaut werden. Andererseits ist dadurch zu befürchten, dass sie sich gegenseitig stören, durch den Einfluss der Ströme der Auswerteelektroniken. Diesen Nachteil kann das Quamapolis NV Magnetometer überwinden, da hier in einem Diamant der Kantenlänge von etwa 1 mm direkt die vektorielle Information des Magnetfelds gemessen werden kann.

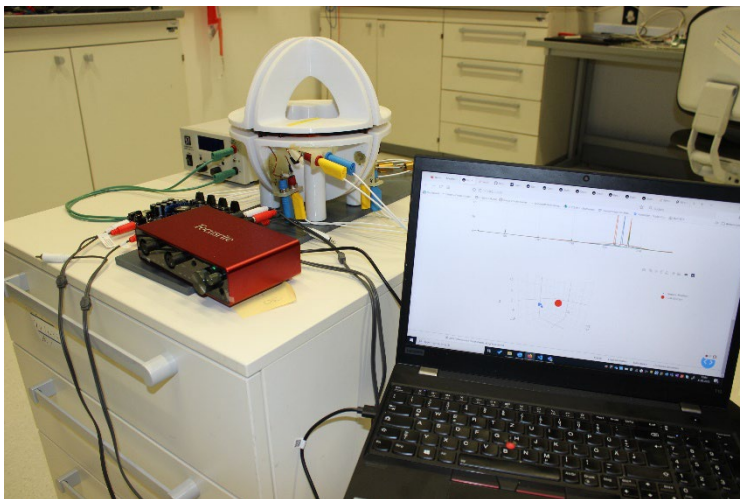


Abbildung 22 Laboraufbau zur Erzeugung des künstlichen Magnetfelds per Beacon Spulensystem.

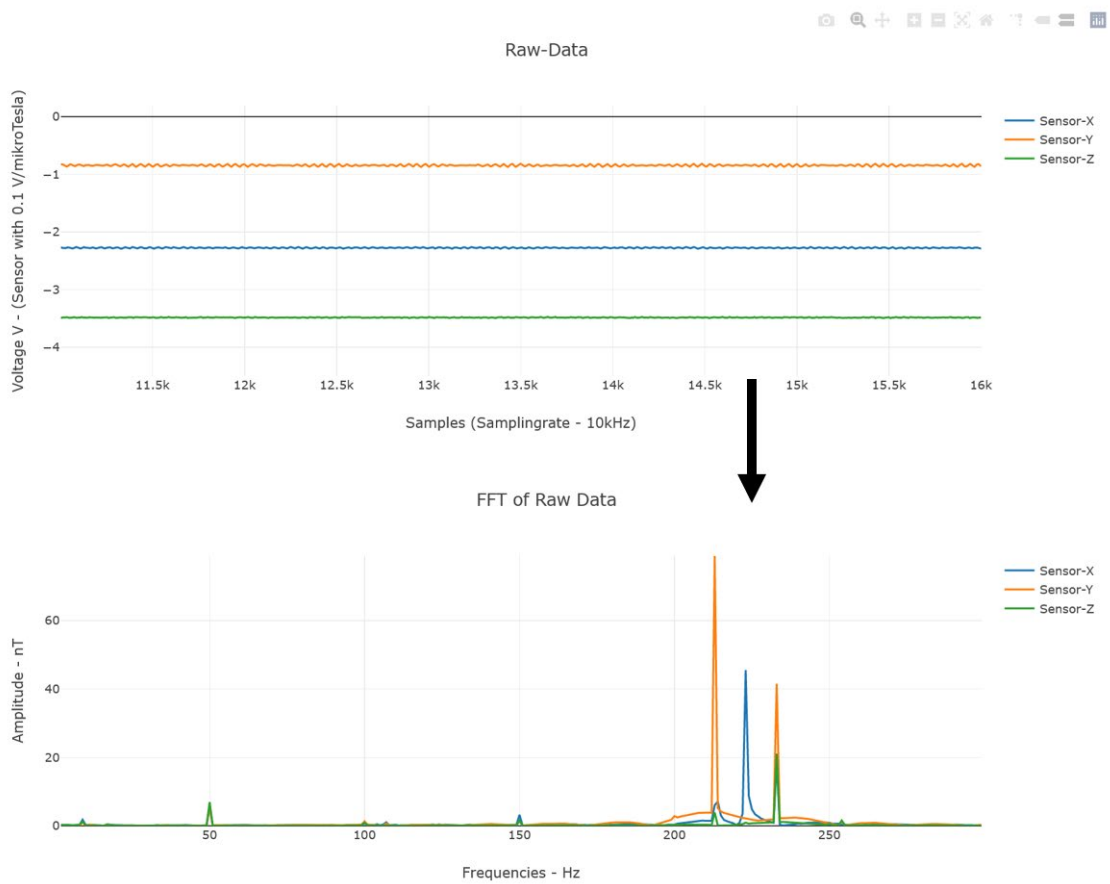


Abbildung 23 Ergebnisse einer Messreihe mit 3 Fluxgate Sensoren und Beacon Spulenfrequenzen von 220, 230 und 240 Hz.

Aus den in Abbildung 23 ermittelten Fourier-Komponenten 3 Fluxgate Sensoren bei jeweils 220, 230 und 240 Hz wurden über einen algebraischen Algorithmus die Magnetfeldkomponenten bei diesen Frequenzen bestimmt und daraus die Position des Sensors ermittelt.

### 3D-Modell

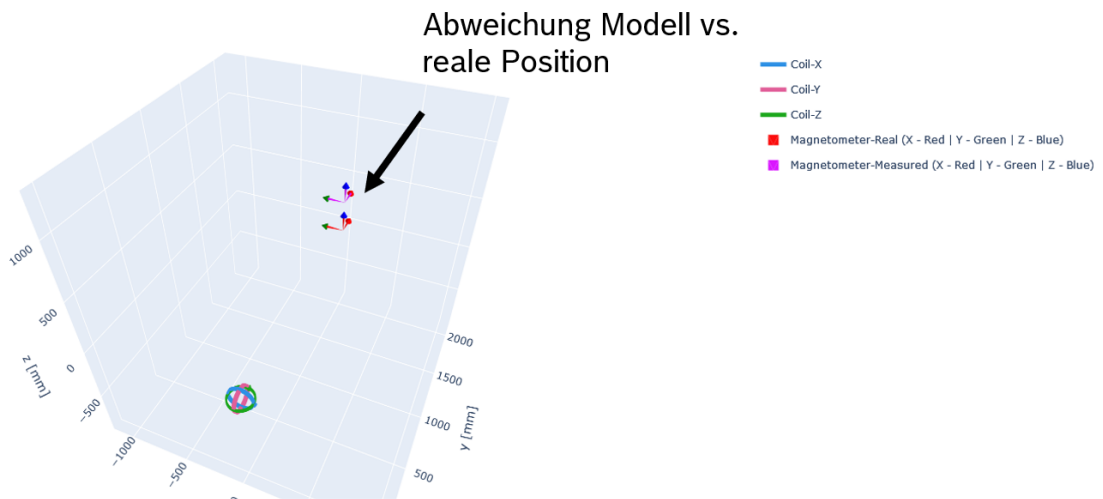


Abbildung 24 Ergebnis des Lokalisierungsalgorithmus, der aus den Magnetfeldkomponenten den Ort des Sensors ermittelt

Ein beispielhaftes Ergebnis ist in Abbildung 24 dargestellt. Es zeigt die Situation, in der das Beacon System am Boden des Raums in einem Abstand von 1.5 m vom Objekt (3x Fluxgate Sensoren) aufgestellt, das ebenfalls in Bodenhöhe platziert wurde. Die Abweichung zwischen realer Position, die per Meterstab ermittelt wurde und der über magnetische Lokalisierung ermittelten Position beträgt etwa 5 cm. Es ist zu vermuten, dass die gegenseitige Störung der Fluxgate Sensoren dazu führte, dass sie nicht das nominelle Detektionslimit zeigten, sondern ein signifikant schlechteres.

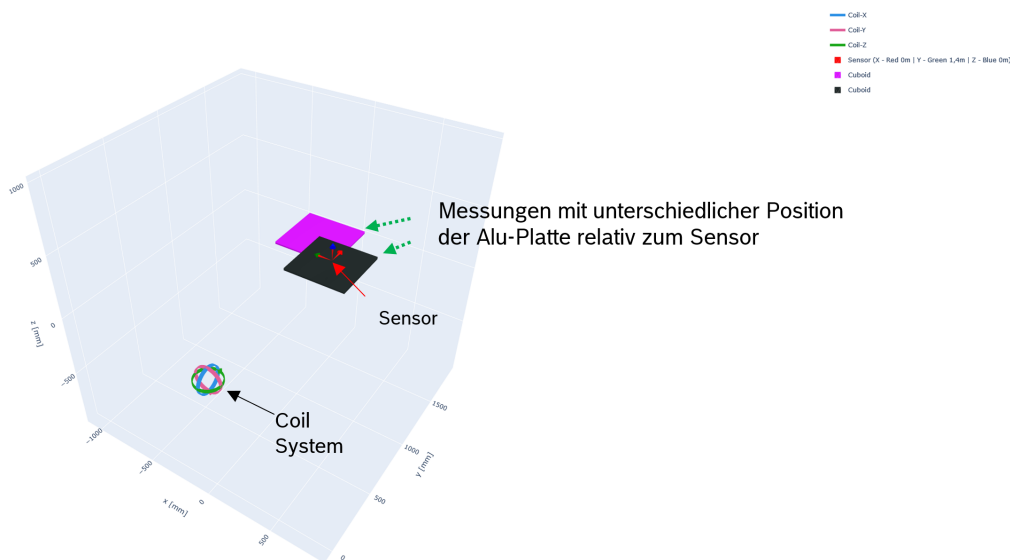


Abbildung 25 Modell des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Einflusses von Wirbelströmen

Um den Einfluss von Wirbelströmen auf die Lokalisierungsgenauigkeit zu untersuchen, wurde unter die Anordnung der 3 Fluxgate Sensoren eine Aluminiumplatte gebracht und zwei Situationen vermessen. Zum einen, wenn die Sensoranordnung mittig zur Platte angebracht ist, und damit maximal durch Wirbelströme gestört wird, und zum anderen, wenn es in der Ecke der Platte angebracht ist, wo die Störung deutlich geringer sein sollte, siehe Abbildung 25.

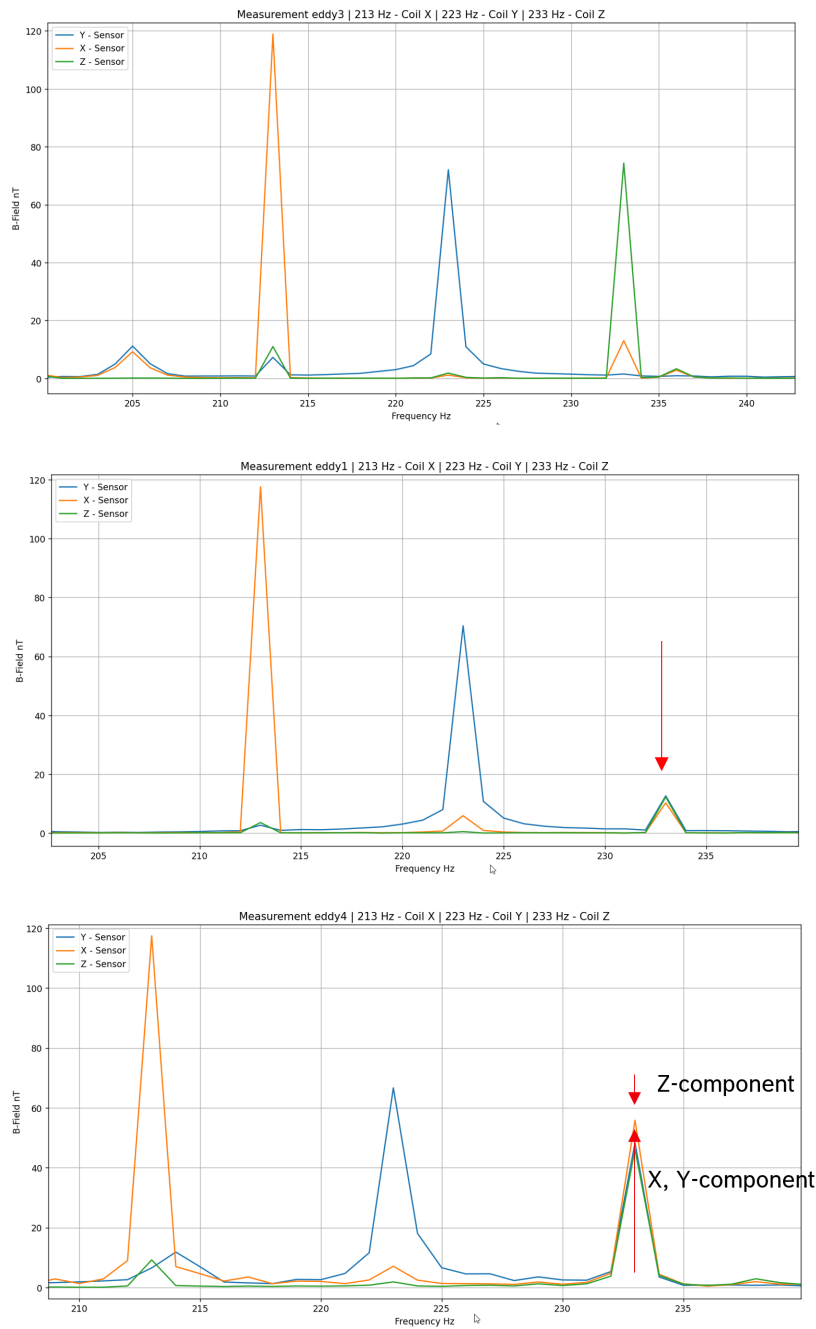


Abbildung 26 Ergebnis der vektoriellen Magnetfeldmessung für 3 Situationen (oben: ohne Aluminium-Platte, mittig: Sensor mittig auf Aluminium-Platte, unten: Sensor in Ecke der Aluminium-Platte)

Das Ergebnis der Messungen zum Einfluss von Wirbelströmen ist in Abbildung 26 dargestellt. Man erkennt für die Situation der mittleren Ausrichtung von Sensor zur Aluminium-Platte, dass die z-Komponenten des gemessenen Signals deutlich reduziert sind, während übrige Komponenten unverändert bleiben. Dieser Effekt ist deutlich schwächer, wenn der Sensor in der Ecke der Platte positioniert wird, doch im Vergleich zum Situation ohne Aluminium-Platte sieht man insbesondere bei der Frequenzkomponente von 233 Hz erhebliche Unterschiede, die einer genauen Lokalisierung im Wege stehen. Bei der Ermittlung der Position aus dem durch Wirbelströme gestörten Feldes, wurden

Abweichungen von über 20 cm festgestellt. Da dies deutlich von der angestrebten Genauigkeit abweicht und damit der Zielanwendung im Wege steht, wurde auf ein Proof of Concept mit dem NV-Magnetometer verzichtet, da der Effekt nicht durch den Sensor selbst, sondern die Art und Weise der Lokalisierung verursacht wird. Die Hoffnung, dass der Effekt der Wirbelströme bei Frequenzen unter 1 kHz nicht limitierend ist, hat sich nicht erfüllt. Um sicher zu gehen, dass der beobachtete Störeffekt tatsächlich auf Wirbelströme im Aluminium zurückzuführen ist, wurden FEM-Simulationen dazu durchgeführt. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 27 dargestellt. Hier ist der Betrag des Magnetfeldes in Abhängigkeit von der Höhe über der Aluminium-Platte als grüne Kurve dargestellt. Zum Vergleich ist als blaue Kurve die Situation beschrieben, in der der Platte die Leitfähigkeit von Luft zugeordnet wurde. Man sieht für Abstände unter 0.5 m erhebliche Abweichungen durch das Vorhandensein der Aluminium-Platte. Da 0.5 m bereits 10% der Raumgröße ausmacht, ist die Einschränkung der Nutzbarkeit der Lokalisierung für einen Endanwender nicht mehr akzeptabel.

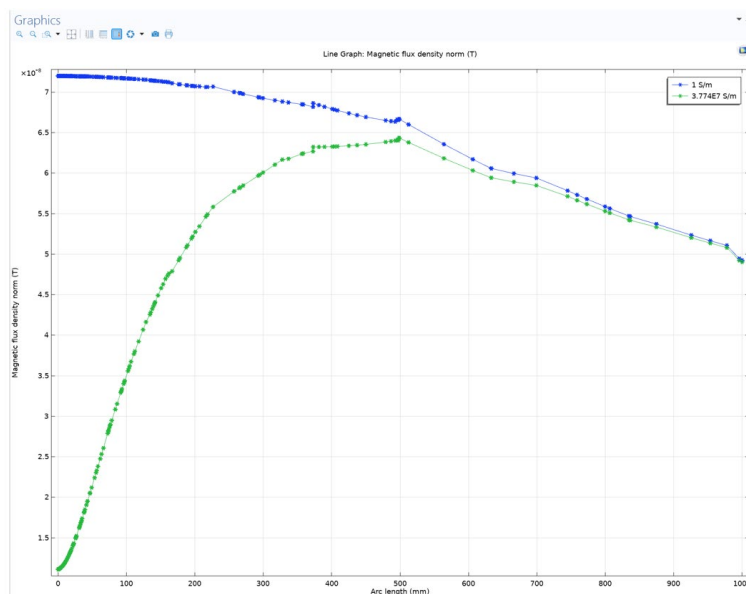


Abbildung 27 FEM-Simulation der feldverzerrenden Wirkung einer Aluminiumplatte.

### 2.7.2 Demonstrator NV Vektormagnetometer

Die zweite zentrale Aufgabe in AP8 war die Realisierung und die Charakterisierung eines Demonstrators für ein NV-basiertes Vektormagnetometer, das die Voraussetzungen für eine cm-genaue Lokalisierung erfüllt, d.h. ein rauschäquivalentes Detektionslimit von etwa 50 pT/√Hz aufweist. Hier fließen insbesondere die Ergebnisse der Projektpartner aus den Arbeitspaketen AP2 bis AP6 ein. Innerhalb der Konzeptphase von Quamapolis wurde im Konsortium festgelegt, zur Projekthalbzeit einen Technologiedemonstrator als Intermediate Demonstrator zu realisieren, der die wesentlichen Schritte der Aufbau- und Verbindungstechnik abbildet und eine ODMR-Messung zulässt. In diesem Intermediate Demonstrator waren die  $B_0$ -Feld Magnete noch nicht Bestandteil des Sensors, sondern wurden extern bereitgestellt. Auch der Laser und der Lasertreiber waren hier nicht integrierter Bestandteil der Sensor-PCB ebenso wie der Mikrowellen-Mischer, der das Basisband des FPGA (0 – 50 MHz) mit der Frequenz des Local Oscillators von 2.87 GHz mischt. Der Laboraufbau zur Charakterisierung des Intermediate Demonstrators ist in Abbildung 28 dargestellt.

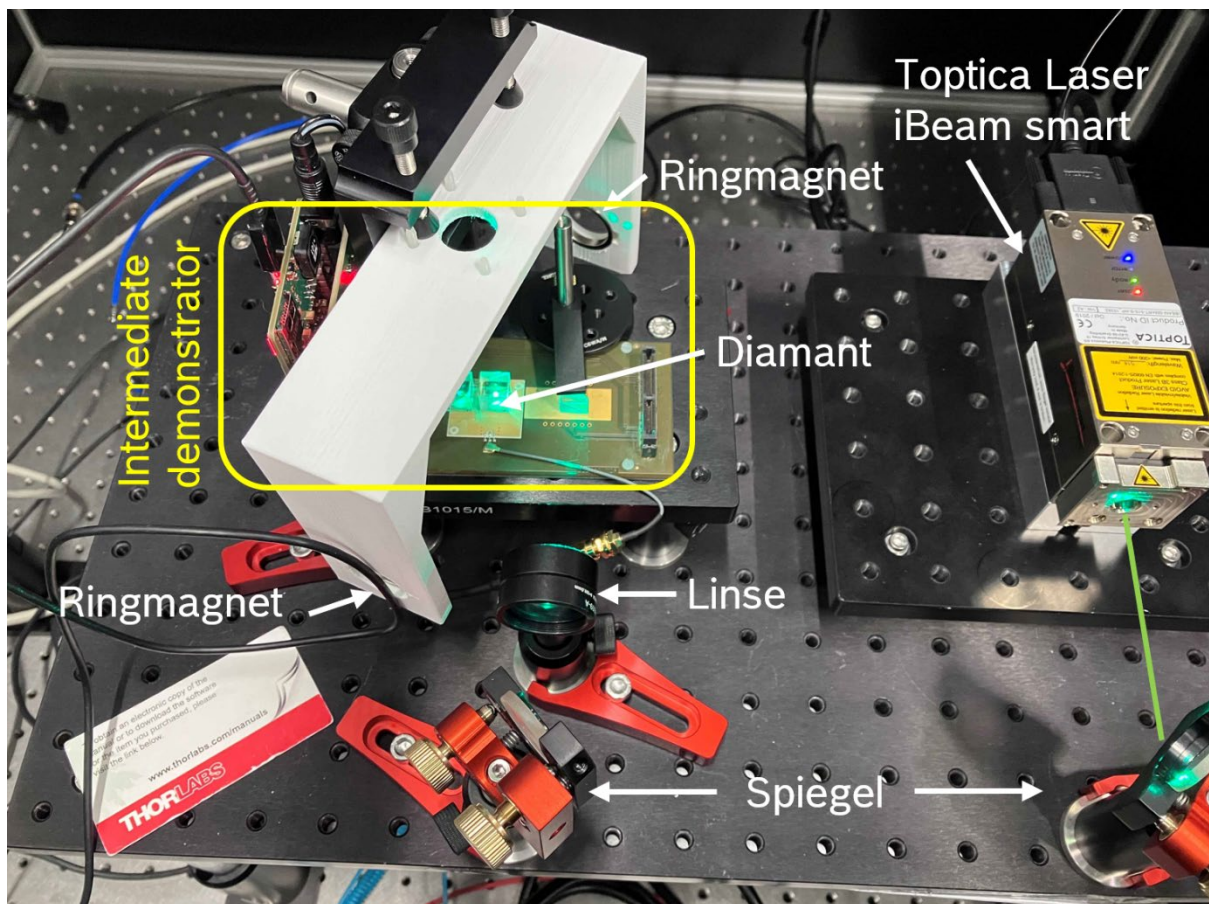


Abbildung 28: Versuchsaufbau zur ODMR Messung mit dem Intermediate Demonstrator.

Als externer Laser diente der Toptica iBeam smart, der über Spiegel und Linse auf das erste Prisma des Intermediate Demonstrators gelenkt wurde. Es wurden CW-Messungen bei etwa 20 mW Laserleistung durchgeführt, was in etwa einem Viertel der Leistung des Lasers vom Projektpartner Q.ant entspricht, der im finalen Demonstrator zum Einsatz gebracht wurde. Das  $B_0$  Magnetfeld wurde mit einem Paar aus Ringmagneten im gegenseitigen Abstand von etwa 16 cm erzeugt. Das  $B_0$  Feld am Ort des Diamanten beträgt in der Anordnung etwa 1 mT, was dem Wert im finalen Demonstrator nahe kommt, das dort mit einer Halbach Anordnung aus 8 würfelförmigen Permanentmagneten erzeugt wird. Als MW-Mischer wurde ein Bauteil des Herstellers Mini Circuits verwendet. Mit dem auf der PCB des Intermediate Demonstrators integrierten FPGA-Board wurde für die ODMR-Messung eine Frequenzmodulation der Mikrowelle erzeugt, und das gemessene Signal der Photodiode mit dieser Frequenz demoduliert. Durch diese bewährte Modulations-/Demodulationstechnik wird das  $1/f$  Rauschen während der ODMR-Messung effektiv unterdrückt. In einer sogenannten Sweep-Messung wird die Mittenfrequenz des Basisbands, um das die Frequenzmodulation stattfindet, linear von 0 MHz auf maximal 50 MHz variiert. Das demodulierte Signal zeigt dann Spannungseinbrüche für die Frequenzen des Basisbands, die mit einer der NV-Resonanzen übereinstimmen, siehe Abbildung 29. Man erkennt hier sehr schön alle 24 ODMR-Resonanzen, die sich aus den 3 Hyperfine-Komponenten zu jeder der 4 NV-Achsen zusammensetzen, und es hier jeweils Resonanzen zu den Übergängen  $m_s=0$  auf  $m_s=-1$  sowie  $m_s=0$  und  $m_s=+1$  gibt.

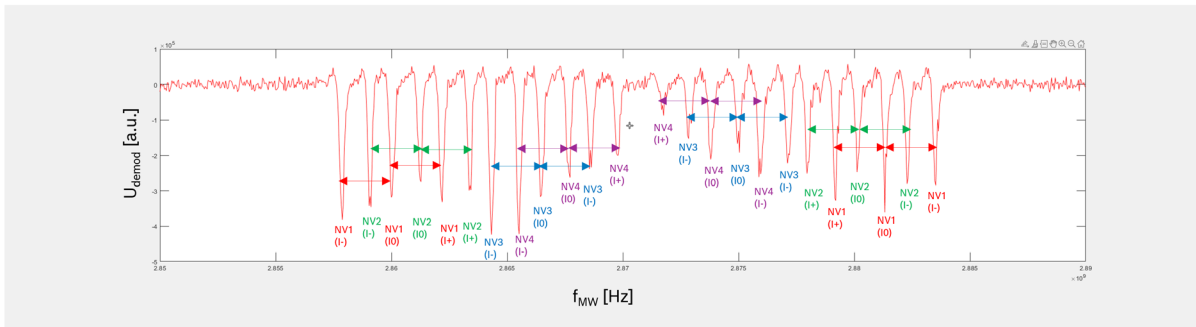
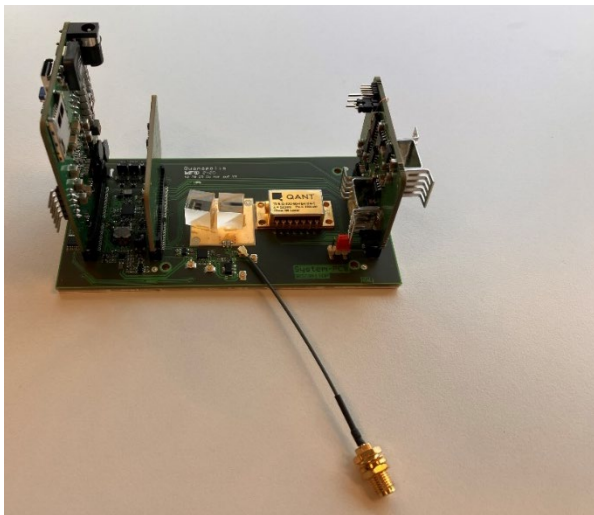


Abbildung 29: Ergebnis der ODMR Messung am Intermediate Demonstrator

Die Resonanzen in Abbildung 29 sind wie beabsichtigt durch  $B_0$  hinreichend gut aufgespalten, nur zwischen den Achsen NV3 und NV4 gibt es einen teilweisen Überlapp. Prinzipiell ist der Intermediate Demonstrator anhand der gemessenen Stärke und Aufspaltung der Resonanzen in der Lage, eine vektorielle Magnetfeldmessung zu ermöglichen. Die bei durchgeführter Änderung von  $B_0$  hergerufenen Resonanzverschiebungen im ODMR-Spektrum ließen auf ein Detektionslimit von etwa 8 nT/VHz schließen. Die Verbesserung auf den Zielwert von 50 pT/VHz im finalen Demonstrator sollte durch Steigerung der Laserleistung von 20 mW auf 80 mW und vor allem durch den auf geringes Rauschen optimierten Laser vom Projektpartner Q.ant herbeigeführt werden.

Der kurz vor Ende der Projektlaufzeit fertig gestellte finale Demonstrator ist in Abuilding 30 dargestellt. Er beinhaltet alle für die Magnetometer-Funktion notwendigen Komponenten. Das Basis-PCB hat in etwa die angestrebte Grundfläche in der Größe einer Scheckkarte. Aufgrund eines Defekts im MW-Mischer vom Projektpartner Uni Stuttgart, IIS musste auf eine extern MW-Quelle zurückgegriffen werden, um ODMR Messungen möglich zu machen. Dazu wurde ein BNC-Kabel mit SMA Stecker angebracht, das in Abuilding 30 zu sehen ist.



Abuilding 30 Finaler Demonstrator nach Integration aller Komponenten.

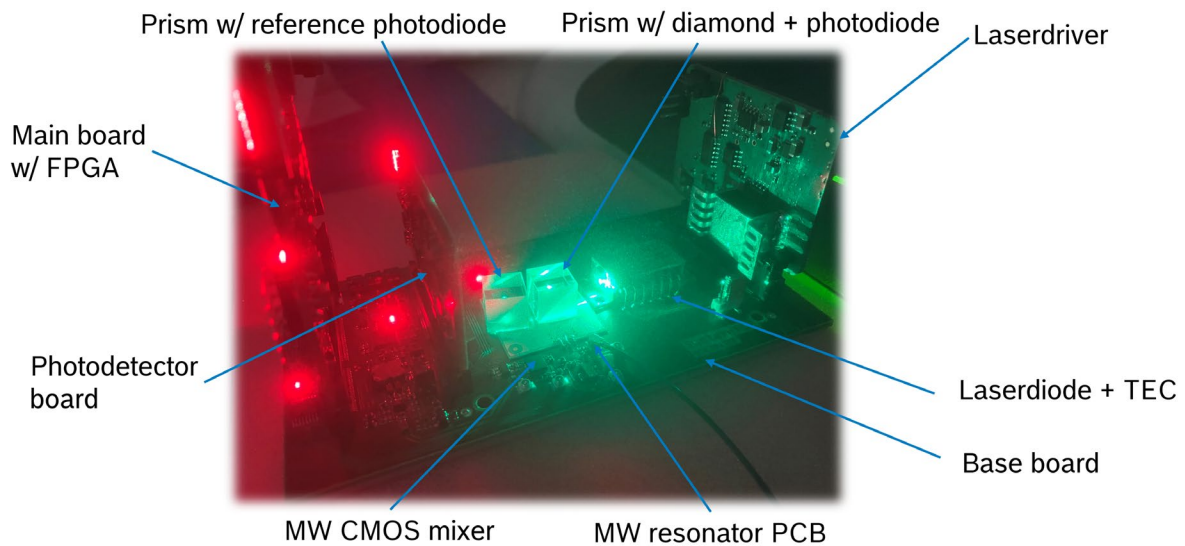


Abbildung 31 Finaler Demonstrator im Sensorbetrieb mit Beschriftung der wesentlichen Komponenten

Bis auf den MW-Mischer, waren nach Systemintegration alle Komponenten voll funktional, und der Messbetrieb konnte gestartet werden, siehe Abbildung 31. In gleicher Weise wie am Intermediate Demonstrator erläutert, wurden per Frequenzmodulation der Mikrowelle und Demodulation des detektierten Fluoreszenzlichts ODMR Spektren aufgenommen, siehe Abbildung 32. Dieses in den letzten Tagen der Projektlaufzeit aufgenommenen Spektrum zeigt 12 statt 24 Resonanzen. Es deutet darauf hin, dass die Richtung des  $B_0$  Felds im finalen Demonstrator entgegen der Auslegung nicht die gleiche ist wie im Intermediate Demonstrator, so dass die Resonanzen von jeweils 2 Achsen überlappen. Wie es zu dieser Abweichung gekommen ist, konnte nicht aufgeklärt werden, denn nach den Vorergebnissen aus Abbildung 9 und Abbildung 10 war das Feld der Halbach-Anordnung bzgl. der des Koordinatensystems der PCB in Übereinstimmung mit der Auslegung. Es steht zu vermuten, dass der im finalen Demonstrator verwendete Diamant nicht die gewünschten [100] Oberflächen aufzeigte, die in der Auslegung von  $B_0$  angenommen wurden.

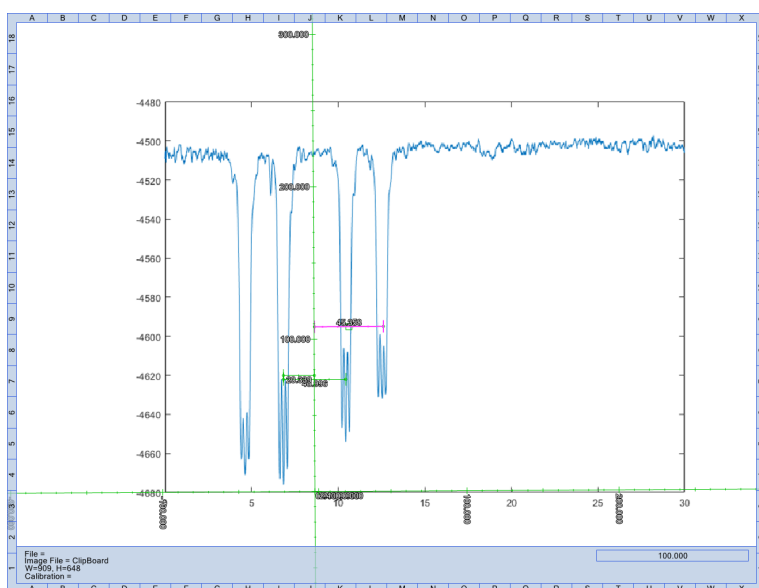


Abbildung 32 ODMR Spektrum des finale Demonstrators bei Betrieb mit externer MW Quelle

Da sowohl die Magnete der Halbach-Anordnung als auch der Diamant fest auf der Basis-PCB des finalen Demonstrators verklebt wurden, war es nicht möglich, nachträglich die gewünschte und für die Vektormessfunktion notwendige Korrektur in der Richtung des  $B_0$  Feldes herbeizuführen. Weiterhin ist es vor Projektende nicht mehr gelungen, das Detektionslimit des finalen Demonstrators zu bestimmen, denn dazu wäre es notwendig gewesen, alle 24 Resonanzen überlappungsfrei aufzuspalten.

### 3 Verwendung der Projektmittel (wichtigste Positionen)

Es wurden primär Personalkosten (zzgl. Verwaltungskostenzuschläge) abgerechnet. Darüber hinaus sind etwa 40 TEUR für Fremdleistungen angefallen, die sich auf Layout-Erstellungen und die Auslegung eines Mikrowellenresonators etwa hälftig aufteilten. Daneben sind etwa 80 TEUR Materialkosten angefallen. Die größten Positionen umfassten spezielle elektronische Komponenten wie Hochfrequenz-Schaltungsträger und optische Bauteile wie spezielle NV-dotierte Diamanten. Das Restbudget wurde überwiegend für kleinere Einzelpositionen ausgegeben.

### 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Da für das Projekt ein festes Budget vorgegeben war, wurde von Anfang an darauf geachtet, die Arbeiten zu priorisieren.

Oberstes Ziel und roter Faden war es, vektormessfähiges NV-Magnetometer mit einem Detektionslimit von etwa 50 pT/VHz für indoor-Lokalisierung zu entwickeln, das auf auf einem Schaltungsträger der Größe einer Scheckkarte Platz findet. Dazu wurden aufbauend aus der Erfahrung früherer Prototypen neue, verbesserte Lösungskonzepte erarbeitet und bewertet, bevor es in die eigentliche Umsetzung der Zielvariante ging. Zur Risikominimierung wurde gleich zu Beginn der Vorhabens ein Technologie-Demonstrator als Halbzeitmeilenstein definiert. Durch diese Partitionierung wurde sichergestellt, dass im Rahmen des vorgegebenen und angemessenen Budget- und Zeitrahmen die gesteckten Projektziele erreicht werden konnten.

Bei Projektstart hat Bosch bereits über mehrjährige Erfahrung der Entwicklung von NV-Diamant Magnetometern verfügt, jedoch fehlte es an Expertise in der Nutzung der vektoriellen Magnetfeldmessung für die Positions- und Lagebestimmung. Deshalb wurde zu Beginn, bevor Demonstratoren aus Quamapolis vorlagen, ein solches Lokalisierungssystem auf Grundlage kommerziell erhältlicher Magnetometer entworfen, aufgebaut und charakterisiert. Die gewonnenen Ergebnisse zeigten jedoch, dass Wirbelströme in metallischen Objekten im Raum zu einer systematischen Verzerrung der Magnetfeldumgebung führen, die es unmöglich machen, die in Quamapolis angestrebte sub-Zentimeter Lokalisierungsgenauigkeit zu erreichen.

Die Arbeit konzentrierte sich daher in der zweiten Projektphase komplett auf die Realisierung des finalen Demonstrators, bei dessen Umsetzung die Erkenntnisse aus dem Technologiedemonstrator konsequent und erfolgreich umgesetzt wurden.

## 5 Fortschritt auf dem Gebiet an anderen Stellen

Bezüglich der Miniaturisierung von Diamant-Magnetometern gab es in den letzten Jahren im Wesentlichen nur die Veröffentlichung [1] einer chinesischen Forschergruppe, die ein ähnliches Ziel verfolgen, wie es in Quamapolis definiert war: ein miniaturisierter, vektorfähiger Diamant-Magnetfeldsensor. Das in [1] vorgestellte Magnetometer hat zwar einen ähnlich kompakten Aufbau von Lasermodul, Mikrowellen-Resonator, Fotodiode und Longpass-Filter wie in Abbildung 33 dargestellt, doch ist hier auf dem Format einer Scheckkarte nur der Sensorkopf enthalten. Die für den Betrieb erforderliche Mikrowellenanregung muss von extern bereitgestellt werden ebenso wie die Auswerteschaltung für die Fluoreszenzdetektion. Zudem erreicht der Demonstrator nur ein Detektionslimit von 2.25 nT/√Hz.

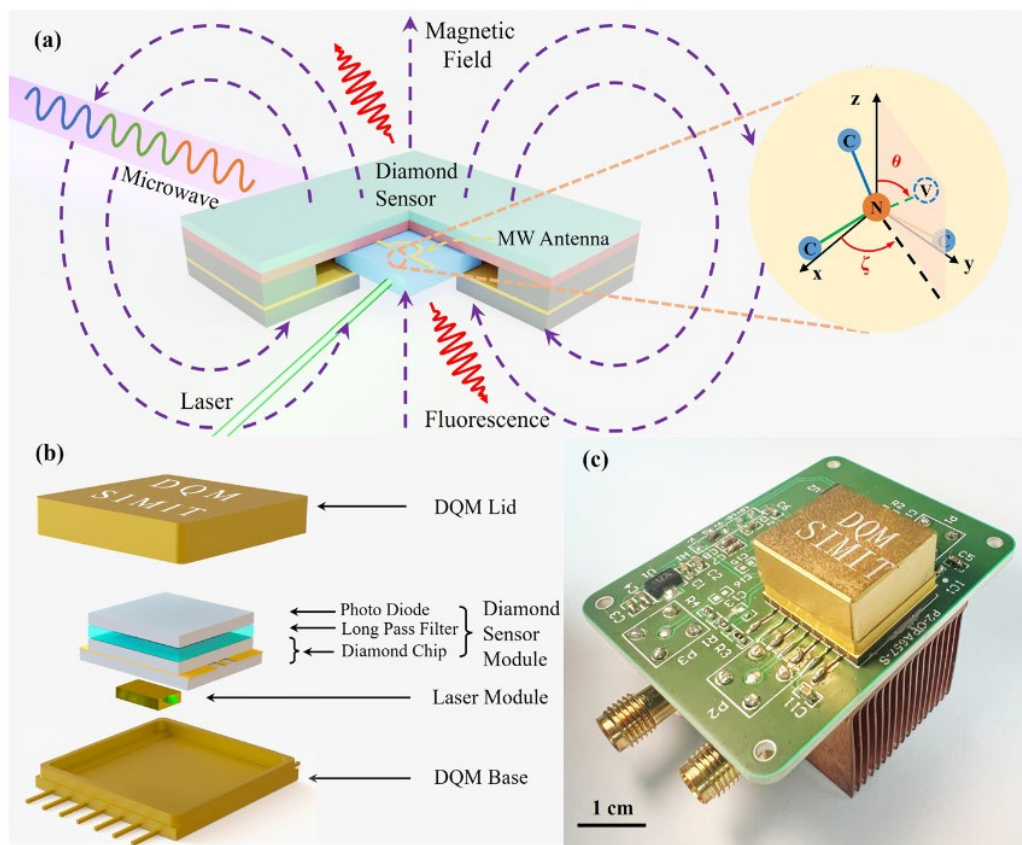


Abbildung 33 [1] Figure 1, Architecture of vector magnetometry with physical packaged diamond quantum sensor.

[1] Peng et al, „A highly integrated three-axis vector diamond quantum magnetometer with a compact electrical package,, Appl. Phys. Lett. 126, 081101 (2025)

## 6 Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden durch Bosch keine Projektergebnisse publiziert.

## Abschlussbericht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Robert Bosch GmbH	<b>Förderkennzeichen:</b> FK: 13N15373
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Quanten-Magnetometer zur Positions- und Lagebestimmung für Intelligente Systeme, Quamapolis	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2021 - 30.09.2024	
<b>Autoren:</b> Dr. Tino Fuchs, Dr. Alexander Fischer, Robert-Bosch-Campus 1, 71272 Renningen	
<b>Vertraulich</b>	

### Teil III: Erfolgskontrollbericht

#### 1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Forschung und Entwicklung bei Bosch im Bereich der NV Diamant Magnetometer hat sehr von der Förderung des BMBFs und dem wissenschaftlichen Austausch im Rahmen des Quamapolis Projektes profitiert. In allen Arbeitspaketen, in den Bosch engagiert war, konnten große Fortschritte erzielt werden.

In Arbeitspaket 2 wurde das photonischen Integrationskonzept für ein stark miniaturisiertes NV-Magnetometer erarbeitet und die Prozesse zu präzisen und gleichzeitig robusten Positionierung von Photodioden, Diamant und Permanentmagneten in der Kavität eines mehrlagigen Leiterplattensubstrats optimiert. Hierfür wurden in Vorversuchen die geeigneten Materialien und Prozessparameter herausgearbeitet, und es wurde konsequent darauf geachtet, dass alle Prozesse auf Anlagen durchgeführt werden, die im Prinzip für eine spätere Serienfertigung tauglich sind.

In Arbeitspaket 3 wurde ein Mikrowellenresonator ausgelegt, der die energieeffiziente Versorgung der NV-Zentren erlaubt, und dabei gewährleistet, dass ausreichend Amplitude, Homogenität und Bandbreite zu Verfügung steht, um eine vektorielle Messung zu ermöglichen.

Im Arbeitspaket 4 wurde eine Halbach-Anordnung von Ringmagneten ausgelegt und realisiert, die es erlaubt, ein  $B_0$  Feld zur Resonanzaufspaltung mit einer Stärke von etwa 1.5 mT homogen über das Volumen des Diamanten bereitzustellen. Die gemessene räumliche Verteilung des  $B_0$  Feldes bestätigte die Erfüllung der Anforderungen an dieses Feld.

In Arbeitspaket 5 wurde kompakte balancierte Fotodetektorschaltung ausgelegt und realisiert, die es erlaubt, den Sensor nahe am Photonenschrotrauschen auszulesen, was eine notwendige Voraussetzung dafür war, das angestrebte Detektionslimit von etwa 50 pT/VHz erreichbar zu machen.

In Arbeitspaket 6 wurde ein Entwärmungskonzept für die Integration des Lasermoduls entwickelt, das durch thermische Vias im Leiterplattensubstrat die Verlustwärme des Lasers effektiv abtransportiert, so dass insbesondere der NV-Diamant keine nennenswerte Erwärmung im Sensorbetrieb erfährt.

In Arbeitspaket 8 wurde magnetisches Lokalisierungssystem konzipiert, aufgebaut und mit kommerziell verfügbaren Magnetfeldsensoren in Betrieb genommen. Es konnte gezeigt werden, dass die in einen Raum eingepprägten Magnetfelder bereits bei einer Frequenz von etwa 200 Hz durch Wirbelströme in elektrisch leitfähigen Objekten derart gestört werden, dass eine Lokalisierung im Sub-Zentimeter-Bereich ohne Fehlerkorrekturmaßnahmen nicht möglich ist. Ebenfalls in Arbeitspaket 8 konnte die volle Funktionalität des Intermediate und des finalen Demonstrators als vektorfähiges Magnetometer charakterisiert werden.

## 2 Fortschreibung des Verwertungsplans

Gleich zu Beginn der Laufzeit des Projektes wurde von der Robert Bosch GmbH ein Patent mit dem Titel „Sensor device for magnetic field measurement by means of optical magnetic resonance measurement“ angemeldet. Das Schutzrecht ist unter dem Aktenzeichen WO2022207480A1 veröffentlicht.

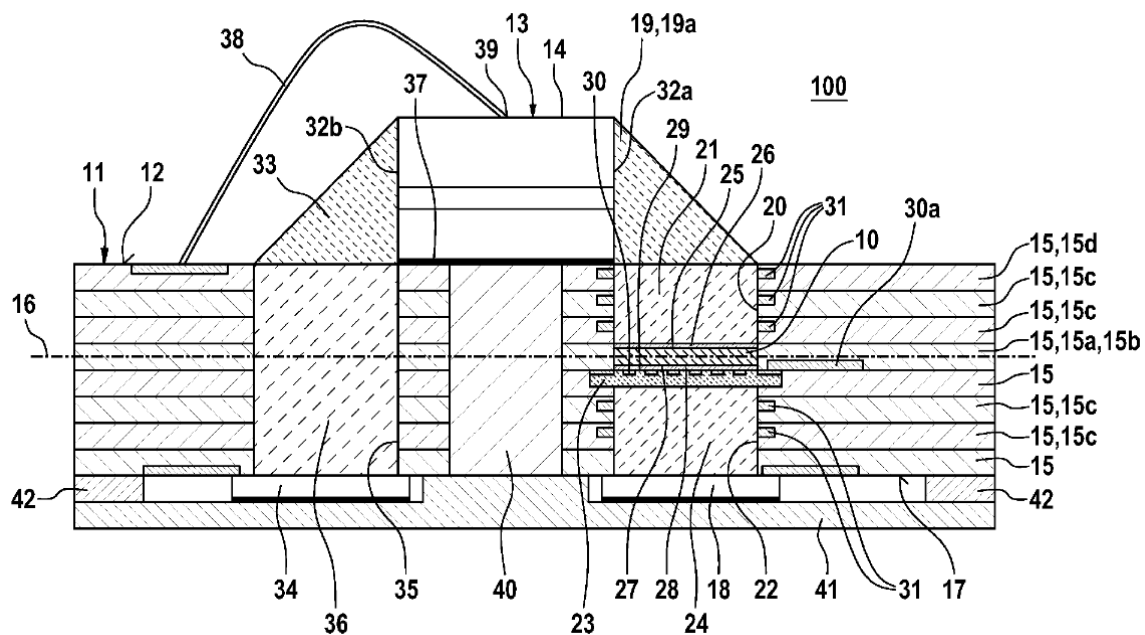


Abbildung 34 WO2022207480A1, Abbildung aus Abstract

Die Patentansprüche betreffen einen stark miniaturisierten, vollständig Leiterplatten integrierten Sensorkopf eines NV-Diamant-Magnetfeldsensors, bei dem der Diamant in die PCB eingebettet wird und die Erzeugung des  $B_0$  Magnetfelds zur Aufspaltung der ODMR-Resonanzen durch ein Helmholtz-Spulenpaar realisiert ist, das sich auf die verschiedenen Ebenen des mehrlagigen Substrats verteilt, siehe Abbildung 34. Das Patent ermöglicht eine spätere Kommerzialisierung der in Quamapolis erzielten Forschungsergebnisse zu einem hochintegrierten, vektorfähigen Quantenmagnetfeldsensor.

Die im Projekt geleistete Entwicklungsarbeit ist Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Kommerzialisierung von Quantensensoren. Der weitere Verwertungsplan bei der Firma Bosch erachtet mehrere Anwendungsfelder vom Gesundheitssektor über magnetische Navigation bis hin zur Exploration von Bodenschätzen anhand magnetischer Signaturen als zielführend.

Im Januar 2022 hat Bosch intern ein Startup zur Kommerzialisierung von Quantensensoren auf der Basis von NV-Zentren in Diamant etabliert. Ein Team von etwa 30 Mitarbeitern verfolgt dabei sowohl Marktanalyse und Business Plan als auch die Überführung der in der Konzernforschung erarbeiteten Proof of Concepts in eine skalierbare, industrielle Fertigung von NV basierten Magnetometern.

Ein besonders großes Marktpotential zeigt sich im Healthcare Bereich wie z.B. bei der medizinischen Früherkennung, der Gesundheitszustandsüberwachung oder der medizinischen Diagnostik.

Neben Quantenmagnetometer könnten bald auch driftstabile Quantendrehratensensoren bei Weltraumanwendungen eine Rolle spielen. Insbesondere könnten sie zur genauen Ausrichtung von kleinen Kommunikationssatelliten auf ein terrestrisches Signal entscheidende Vorteile bringen. Konstellationen von Mini-Kommunikationssatelliten sind ein vielversprechender Weg einen weltweiten, infrastrukturunabhängigen Zugang zum Internet zu schaffen. Bosch ist Teil des Verbundprojektes QYRO, das sich zum Ziel gesetzt hat, einen auf dem Quanteneffekt der Kernspinresonanz basierenden, weltraumtauglichen und hochgenauen Drehraten-sensor zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Satellitenausrichtung präzise geregelt werden kann. QYRO ist eines der vom BMBF-geförderten Leuchtturmprojekte mit einer Laufzeit von 5 Jahren. Es ist geplant, innerhalb von 3 Jahren nach Projektende die Produktentwicklung eines weltraumtauglichen Sensors abzuschließen und den New-Space-Markt mit seinen vielversprechenden Anwendungen und attraktiven Marktchancen adressieren zu können. Mittelfristig ist eine erweiterte Verwertung der QYRO-Technologie auch im Automobilbereich für Anwendungen wie das autonome Fahren denkbar

Bosch wird weiterhin seine Ergebnisse im Bereich der Quantensensorentwicklung auf entsprechenden Konferenzen und Messen vorstellen und veröffentlichen. Das Bosch interne Startup nutzte bereits zweimal die Quantum Effects Messe in Stuttgart, um den aktuellen Stand und die Vision der Entwicklung von Quantensensoren einer breiten Öffentlichkeit bekannt zu machen.

Aus diesen Aktivitäten ist bereits ein breites informelles Netzwerk aus potenziellen Kunden, möglichen Zulieferern und industriellen und akademischen Entwicklungspartnern entstanden, welches die Grundlage für die spätere Produktentwicklung und den späteren kommerziellen Markterfolg bildet.

### 3 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Das in Arbeitspaket 8 zu entwickelnde Lokalisierungssystem auf Basis eines vektoriell messenden NV-Magnetometers, das sub-Zentimeter Genauigkeit erreicht, konnte im Rahmen des Projekts nicht realisiert werden. Im Rahmen einer Voruntersuchung wurde ein magnetisches Lokalisierungssystem aufgebaut, und mit kommerziell verfügbaren Fluxgate Magnetometern ausgerüstet. Hier wurden 3 Fluxgate Sensoren kombiniert, um die vektorielle Messung zu realisieren. Es ist gelungen, mit diesem System die Lokalisierung eines Objekts im Innenraum mit etwa 2 cm Genauigkeit nachzuweisen, doch beim Test auf die Störanfälligkeit durch die Anwesenheit metallischer Gegenstände zeigte sich, dass Abweichungen von deutlich über 10 cm auftreten, die durch Wirbelströme im metallischen Störobjekt hervorgerufen werden. Da diese systematische Störung auch die Lokalisierungsgenauigkeit des NV-Magnetometers gravierend limitieren würde, wurde die dahingehende Systementwicklung nicht zu Ende geführt.

### 4 Einhaltung von Kosten und Zeitplan

Dank des detailliert ausgearbeiteten Projektplans im Antrag zu diesem Teilvorhaben konnten fast alle Projektziele innerhalb des gesteckten Budgetrahmens und innerhalb der Projektlaufzeit erreicht werden. Eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate wurde notwendig durch Corona bedingte Reduzierung der Arbeitszeiten in 2021 und Anfang 2022.