

Abschlussbericht zum Verbundprojekt

Quamapolis - Quanten-Magnetometer zur Positions- und Lagebestimmung für Intelligente Systeme

Teilvorhaben: Integration der mikro-optischen Quanten-Sensormodule mit effizienter Entwärmung

Zuwendungsempfänger: Würth Elektronik GmbH & Co. KG (WE)	Förderkennzeichen: 13N15378
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2021 – 30.09.2024	

Das Ziel des Verbundprojektes Quamapolis bestand in der fertigungsgerechten Realisierung eines kompakten Vektormagnetometers auf der Basis von Quanteneffekten in Diamant. Die Kombination aus gezielter Erzeugung eines Referenzmagnetfeldes und vektorieller Magnetfeldmessung ermöglicht eine präzise Lokalisierung (Auflösungen <1 cm) und Positionsbestimmung von Objekten. Die Realisierung eines solchen Systems erfordert die Integration einer Vielzahl von Komponenten, darunter Laserdioden, Diamanten, optische Filter, Fotodetektoren und Schaltungen zur Erzeugung von Mikrowellenfeldern. Die Integration all dieser Komponenten in ein funktionsfähiges System erfolgte erstmalig auf einem Leiterplattensubstrat, wobei die Verwendung von fertigungsgerechter mikrooptischer Aufbau- und Verbindungstechnik eine entscheidende Rolle spielte.

Konzept Gesamtsystem

Die Entwicklung eines Konzepts für die leiterplattenbasierte Hardware-Umsetzung erfolgte unter Berücksichtigung festgelegter Eigenschaften. Die Machbarkeit und Funktionalität dieses Konzepts wurde in mehreren Technologiedemonstratoren evaluiert. Das Grobkonzept des Magnetometer-Messsystems auf Basis optisch detektierter magnetischer Resonanzen von NV-Zentren in Diamant sowie die schematische Darstellung der Hardware sind in Abbildung 1 dargestellt.

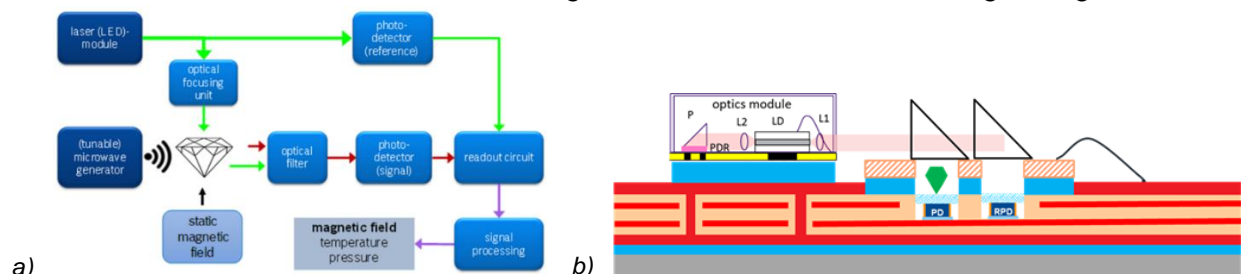


Abbildung 1: Magnetometer-Messsystems (a) sowie Grobkonzept des leiterplattenbasierten Vektormagnetometers (b)

Das Konzept sieht mehrere Bausteine vor, die in geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnologien auf einer Mehrlagen-Leiterplatte zusammengeführt werden. Das System-PCB nimmt die Funktion des Basissystems und Trägers der Komponenten ein. Der Wärmeabtransport erfolgte über Thermovias innerhalb der Leiterplatte und über das Heatsink. Die Fotodiode und die Referenzfotodiode wurden in der Kavität des System-PCB platziert und mit einem optischen Filter beschichtet. Ebenso wurden die Magnete zur Erzeugung des B00-Feldes in der Kavität des System-PCB integriert. Die Resonator-Leiterplatte wurde aus einem keramisch gefüllten PSB-Basismaterial gefertigt und über der Kavität auf die System-PCB aufgeklebt. ASIC wurde über Au-Drahtbonds mit der System-PCB verbunden. Der Diamant wurde in die vorgesehene Öffnung in der Resonator-PCB platziert, die sich direkt über der Fotodiode befindet. Das Lasermodul im Butterfly-Paket wurde mittels Through-hole-Technologie aufgebracht und verlötet. Das optische Alignment zwischen dem Lasermodul und der Fotodiode wurde über die entsprechenden Prismen auf der Resonator-PCB realisiert. Die Steuerungs-Boards wurden über die Steckerleisten mit der System-PCB verbunden.

System-PCB

Die Herstellung von Quantensensoren erfordert Substrate und Bausteine unterschiedlicher Technologien und Materialien. Zudem ist eine möglichst miniaturisierte Bauweise mit der für den Betrieb notwendigen Elektronik von essentieller Bedeutung. In diesem Zusammenhang kommt der System-Leiterplatte eine besondere Funktion zu. Sie dient als zuverlässiges Trägersubstrat und bietet zusätzliche Funktionen wie Abschirmung und Entwärmung an. Es wurden mehrere System-PCBs für Intermediate Demonstratoren gefertigt, die sich in erster Linie durch unterschiedliche Lagenaufbauten und Form bzw. Dimension der Kavität unterscheiden.

Für den ersten Intermediate Demonstrator wurde eine Leiterplatte mit zwei Kavitäten für je eine Fotodiode und Referenzfotodiode aufgebaut. Die Leiterplatte basiert auf dem Standard FR4 Material und enthält vier Kupferlagen (Abb. 2). Auf Grundlage der Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Kavität mindestens so groß sein muss, wie die Omega-Struktur des Resonators (vgl. Kap. Resonator-Leiterplatte). Die Kavitäten für die Fotodioden wurden im zweiten Intermediate Demonstrator vergrößert. Darüber hinaus wurde das Design der System-PCB modifiziert und eine 6-Lagen-Leiterplatte mit den entsprechenden Thermovias im Bereich des Lasermoduls wurde konstruiert und gefertigt (Abb. 3). Es erfolgte keine Integration von Magneten in die Leiterplatten der Demonstratoren 1 und 2.

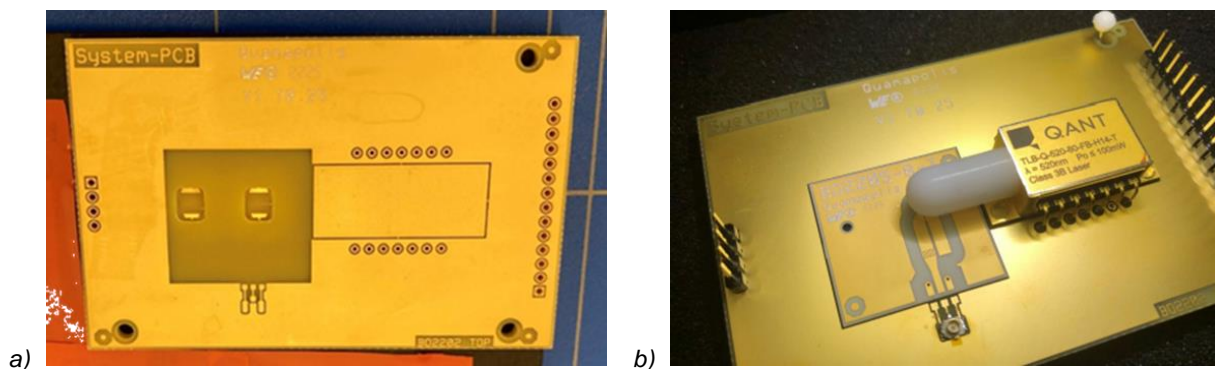


Abbildung 2: System-PCB – 4-Lagenaufbau mit zwei kleinen Kavitäten (a); Intermediate Demonstrator 1 mit Resonator-Leiterplatte und Lasermodul (b)

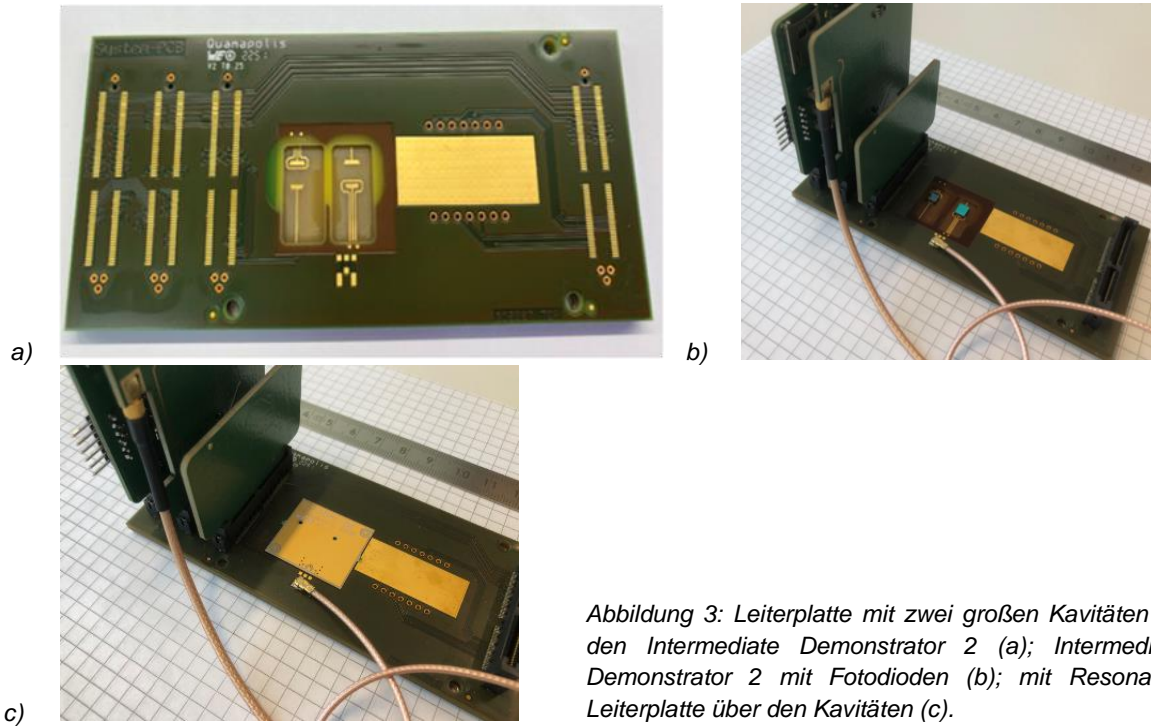


Abbildung 3: Leiterplatte mit zwei großen Kavitäten für den Intermediate Demonstrator 2 (a); Intermediate Demonstrator 2 mit Fotodioden (b); mit Resonator-Leiterplatte über den Kavitäten (c).

Für den dritten Intermediate Demonstrator wurde eine erneute Änderung der Dimensionen der Kavität erforderlich. In der Folge wurde eine 6-Lagen-Leiterplatte mit einer neuen Kavitätskonstruktion und Leiterbahnführung gefertigt, die eine Gesamtdicke von 2,6 mm aufwies (Abb. 4a). Die acht Magnete und die Fotodioden wurden auf der Lage 4 in der 1,4 mm tiefen Kavität platziert. Die Leiterplatte wurde unter anderem für die Kleberevaluierung und die Tests mit Magnetbestückung genutzt. Darüber hinaus erfolgte eine Evaluierung und Konstruktion der für die Bestückung erforderlichen Platzierwerkzeuge (Dimensionen, Form, Platzbedarf) für die jeweilige Komponente unter Verwendung der Leiterplatte (Abb. 4b).

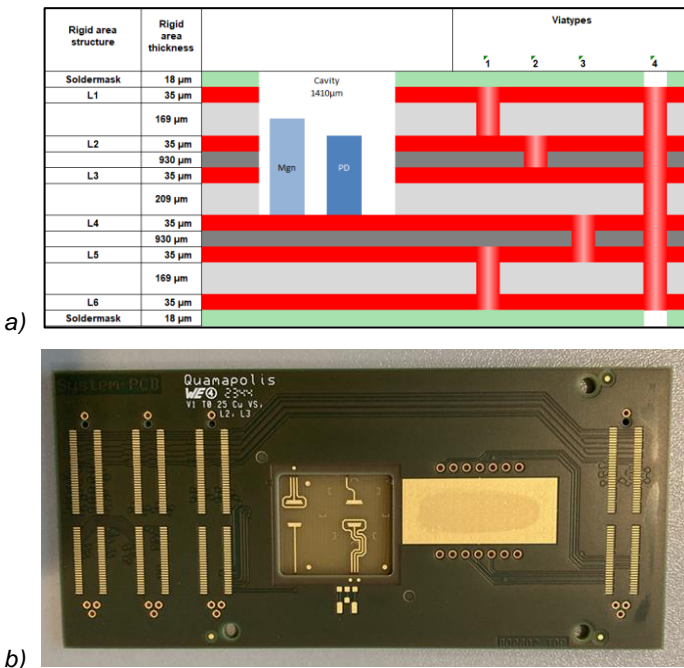


Abbildung 4: Intermediate Demsonatrtor 3 – Lagenaufbau (a); Leiterplatte (b)

Für den finalen Demonstrator wurde schließlich eine 6-Lagen-Leiterplatte im Hybridbau realisiert, wobei die TOP- und BOTTOM Cu-Lagen auf dem keramikgefüllten Substrat platziert wurden, um eine bessere Erzeugung der erforderlichen Resonatoren zu gewährleisten. Der Kern wurde aus FR4 hergestellt und es konnte eine Reduktion der gesamten Dicke auf 1.7 mm bei gleichbleibender Kavitättiefe von 1.4 mm erreicht werden. Die Befestigung von Magneten und Fotodioden erfolgte auf der Kupferlage 5. Die Kavitätsform wurde dahingehend modifiziert, dass lediglich die für die integrierten Komponenten benötigte Bodenfläche berücksichtigt wurde. Unter dem Lasermodul wurden Thermovias platziert, die in einem galvanischen Prozess vollständig mit Kupfer gefüllt wurden. Im Unterschied zum Technologiedemonstrator wurde Lötstopplack auf beide Seiten der Leiterplatte aufgetragen, um die Bestückung zu vereinfachen. Um die Wärme aus dem System zuverlässig zu entfernen, wurde neben den Thermovias ein Aluminium-Heatsink mit Aussparungen für die Lasermodulkontakte entworfen und auf die Rückseite der Leiterplatte aufgeklebt. Um den Einfluss von Nickel auf das Magnetfeld des Gesamtsystems zu eliminieren, wurde eine neuartige, Ni-freie DIG (Direct Immersion Gold) als Endoberfläche appliziert.

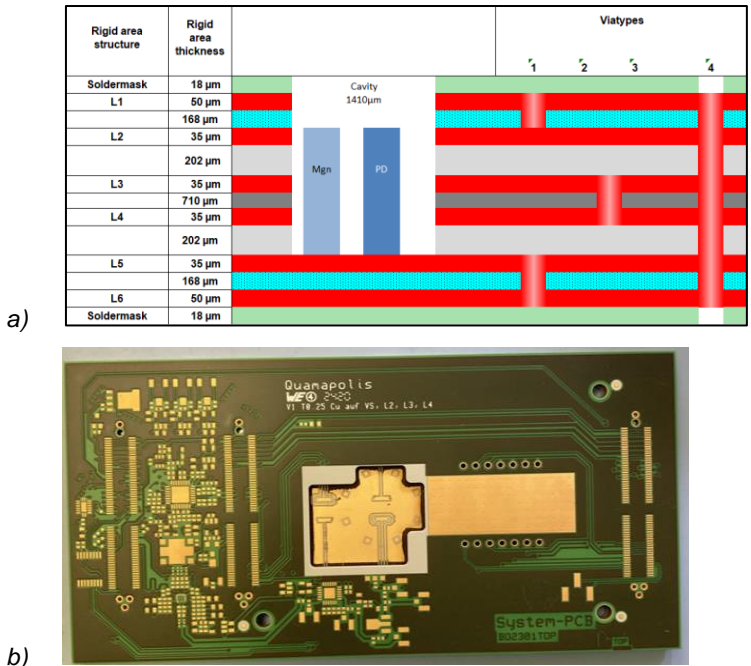


Abbildung 5: Finaler Demonstrator – Hybridler Lagenaufbau (a); Leiterplatte (b)

Eine große Herausforderung beim Aufbau bestand in der Realisierung der Kavitäten für die Fotodioden und die Magnete. Es wurde eine maximale Toleranz der Tiefe bzw. Differenz zwischen der Filterkante und der Leiterplatten-Kante von 25 μm festgelegt, die als notwendig erachtet wurde. Zur Erreichung der gewünschten Kavitättiefe wurden PTFE-Einleger getestet, die in den Fertigungsprozess der Leiterplatte integriert wurden. Um die gewünschte Kavitättiefe zu erreichen, wurden unterschiedliche PTFE-Einleger mit einer Stärke zwischen 150 und 300 μm getestet. Es wurde beobachtet, dass bei der Verwendung dünnerer Folien Harzrückstände in der Kavität zurückblieben, was im späteren Prozessverlauf die Abscheidung der Endoberfläche erschwerte. In Abbildung 6a ist ein Produktionspanel mit Kavitätsaussparungen dargestellt. Die Abbildung 6b zeigt einen Ausschnitt desselben Panels, einmal mit und einmal ohne PTFE-Einleger. Die Schlifffbilder der Kavitäten in 6c zeigen den Harzfluss im linken unteren Bereich, der auf die zu dünnen PTFE-Einleger zurückzuführen ist. Die optimalen Ergebnisse wurden mit Folien von 250 μm erzielt.

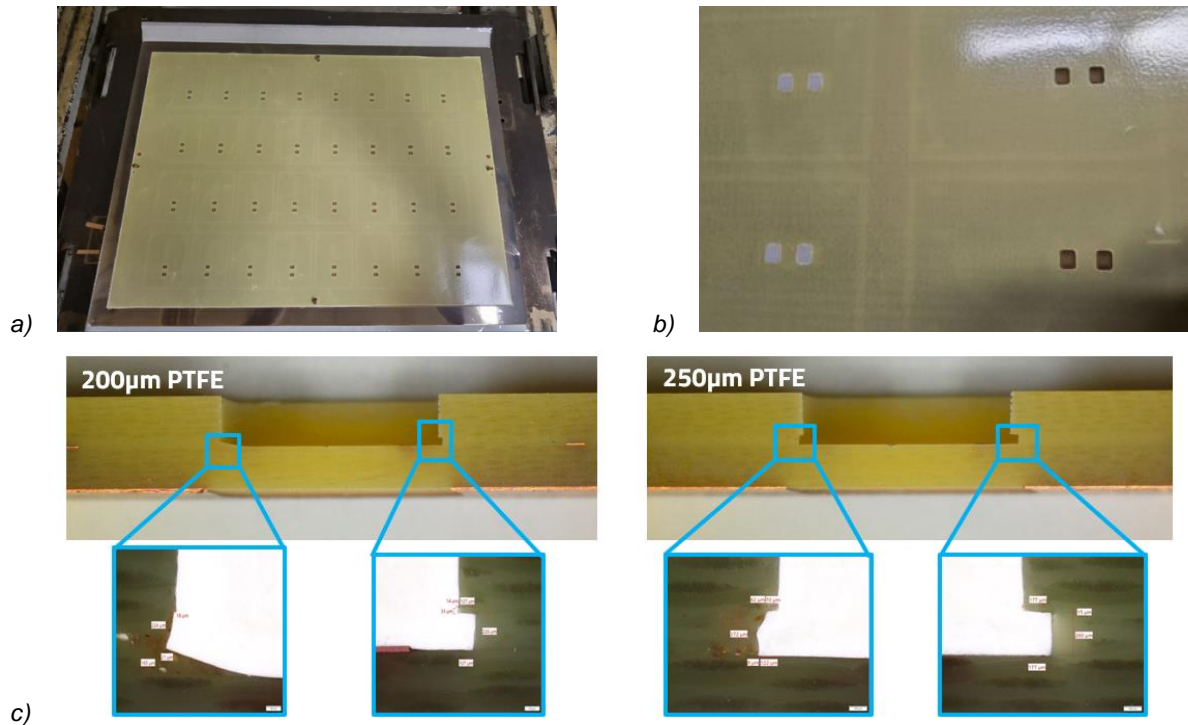


Abbildung 6: a) Produktionspanel mit Kavitätaussparungen (a); Ausschnitt aus dem Produktionspanel mit PTFE-Einlegern (links) und ohne Einleger (b); Schliffbilder der Kavitäten mit – Harzfluss im linken unteren Bereich aufgrund zu dünner PTFE-Einleger

Integration der Magnete

Im Rahmen des Projektes wurde eine Modifikation der Magnete vorgenommen, die eine Anpassung der Magnetplatzierung innerhalb der Leiterplatte sowie auf der Vorder- und Rückseite der Leiterplatte zur Folge hatte. Es wurden diverse 3D-Konstruktionen der System-PCB mit potenziellen Kavitäten erstellt. Mittels dieser 3D-Modelle konnte eine geometrische Planung mit elektronischen, optischen und magnetischen Komponenten inklusive Höhensimulation durchgeführt werden.

In der Abbildung 7 ist die Entwicklung der Konstruktionen, die im Laufe des Projektes stattgefunden hat, dargestellt. Abbildung 7a und b zeigt die Positionen der acht Magneten um die Fotodiode. Bei diesen Varianten wurden für diese Magnete kleinste Kavitäten vorgesehen, die in der Fertigung im relativ weichen FR4 Material kaum zuverlässig zu realisieren sind. Ein signifikanter Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass die Position und die Ausrichtung der Magnete durch die gegenseitige Anziehung konstant bleiben. Die Simulation der angestrebten Resonanz ergab jedoch, dass die Omega-Struktur innerhalb der Kavität liegen muss (vgl. Abb. 7a vs. Abb. 7c). In der Folge musste bereits im zweiten Intermediate Demonstrator das Integrationskonzept für die Magnete überarbeitet werden. Die Abbildung 7c demonstriert, dass die Omega-Struktur innerhalb der Kavität positioniert ist. Die Integration der Magnete ist jedoch nicht realisierbar, da sich die Kanten der Kavitäten mit der Position der Magnete überlagern (Abb. 7d). Die Integration der Magnete auf der vorgesehenen Kupferlage der Leiterplatte wird durch eine große Kavität ermöglicht. Die Omega-Struktur befindet sich ebenfalls innerhalb der Kavität (Abb. 7e+f). Bei dieser Konstruktion ist es essenziell, dass beim Platzieren der Magnete in die Kavität eine starke gegenseitige Anziehung der Magnete berücksichtigt werden muss.

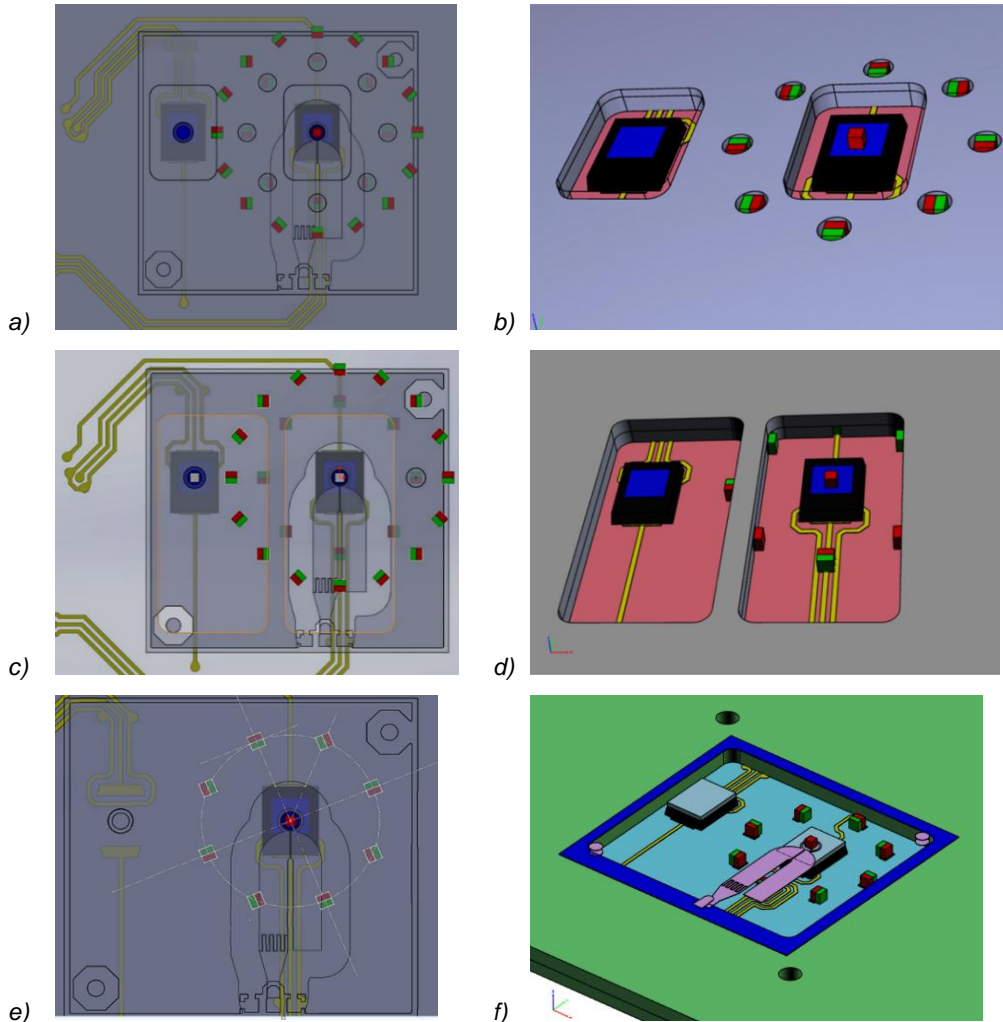


Abbildung 7: Positionierung der Magnete und der Omega-Struktur des Resonators innerhalb der Kavitäten: -zwei kleine Kavitäten für die Fotodioden und acht kleine Kavitäten für die Magnete (a+b); Positionierung der Magnete in den zwei großen Kavitäten (c+d); eine große Kavität mit integrierten Magneten auf der Kupferlage 4 oder 5 (e+f);

Für den Prozess der Integration der Magnete wurde eine spezifische Klebtechnologie ausgewählt. Es wurden verschiedene Klebstoffe evaluiert, wobei die Anforderungen an den Klebstoff eine niedrige Verarbeitungs- und Aushärtetemperatur von maximal 100 °C umfasste. Bei höheren Temperaturen besteht die Gefahr einer Entmagnetisierung der Magnete. Die Aushärtezeit des Klebstoffs ist ein wesentlicher Faktor bei diesem Prozess. Die Magnete weisen eine starke Anziehungskraft auf, sodass sie nacheinander in die Kavität platziert werden müssen. Dabei ist es essenziell, dass sie mit einem gewissen Druck auf den Boden der Kavität gedrückt werden, um eine Verschiebung oder Rotation zu verhindern. Erst nach vollständiger Aushärtung des Klebstoffs kann der nächste Magnet montiert werden. Die signifikant lange Aushärtezeit des Klebstoffs führt zu einer deutlichen Verlängerung des gesamten Montageprozesses.

Im Rahmen der Versuchsreihe wurden zwei Klebstoffe getestet: Ein thermisch aushärtender Klebstoff mit einer Aushärtetemperatur von 90 °C und ein UV-härtender Klebstoff. Bei der Verarbeitung des thermisch aushärtenden Klebstoffes wurde eine erhöhte Blasenbildung beobachtet (Abb. 8a). Beide Klebstoffe wiesen ein starkes Fließverhalten auf, was die Dosierung

erschwerte (Abb. 8a+b). In Abbildung 8c ist die Leiterplatte mit integrierten Magneten für den Intermediate Demonstrator 3 dargestellt. Parallel dazu führte Projektpartner Bosch Versuche mit alternativen Klebstoffen durch. Für den finalen Demonstrator wurde auf den Klebprozess vom Projektpartner Bosch zurückgegriffen.

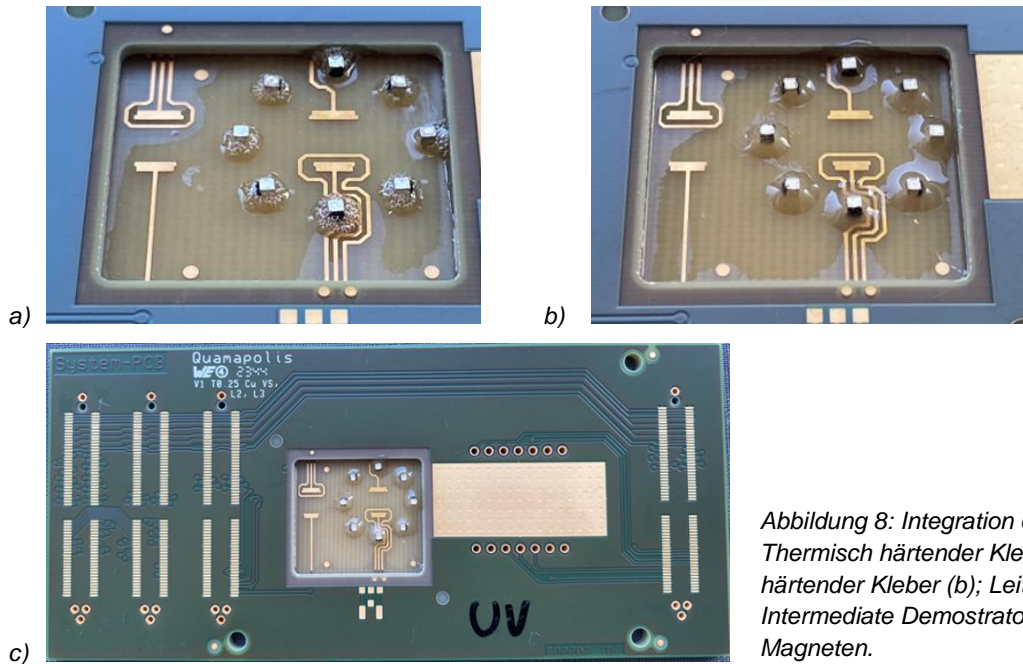
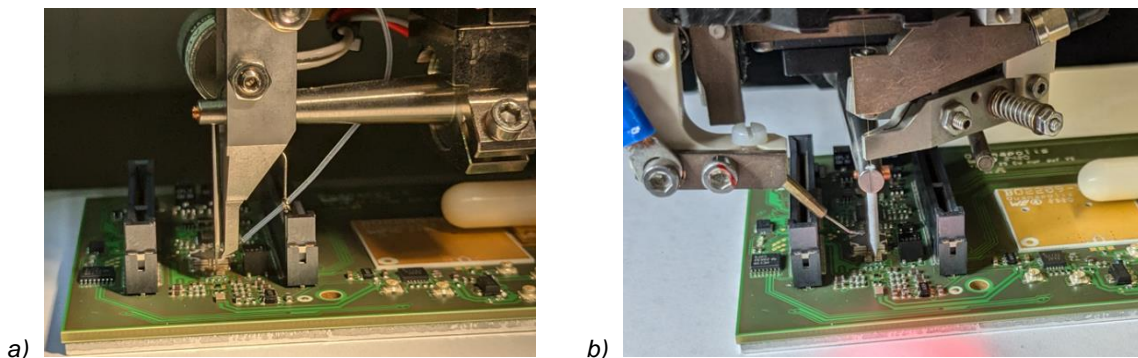


Abbildung 8: Integration der Magnete – Thermisch härtender Kleber (a); UV-härtender Kleber (b); Leiterplatte Intermediate Demonstrator 3 mit integrierten Magneten.

Drahtbonden ASIC

Der ASIC für die Mikrowellenanregung wurde mittels Drahtbonden auf die System-Leiterplatte montiert. Die neue DIG-Oberfläche soll laut Hersteller sowohl für Aluminium- als auch für Drahtbonden geeignet sein. Mit beiden Drähten wurden Testreihen durchgeführt. In den Versuchen konnten beide Drähte zuverlässig gelötet werden. Im finalen Demonstrator konnte der Aluminiumdraht jedoch nicht verarbeitet werden. Die sperrige Konstruktion der Al-Drahtbondanlage ließ dies nicht zu, da die Steckleisten für die Steuerplatinen die Drahtführung behinderten (Abb. 9a). Die Drahtführung am Au-Drahtbonder erfolgt auf der gegenüberliegenden Seite (Abb. 9b). Der ASIC wurde mit 25 µm Golddraht auf die Leiterplatte gelötet (Abb. 9c). Anschließend wurden die Drähte mit einer Polyurethanvergussmasse vergossen (Abb. 9d).



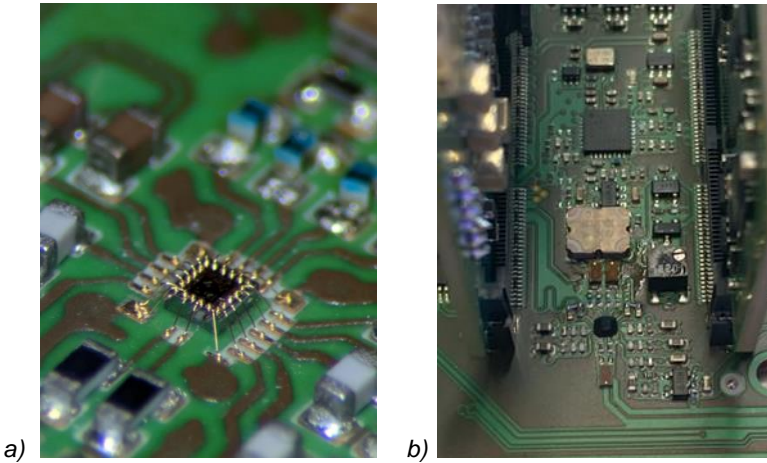
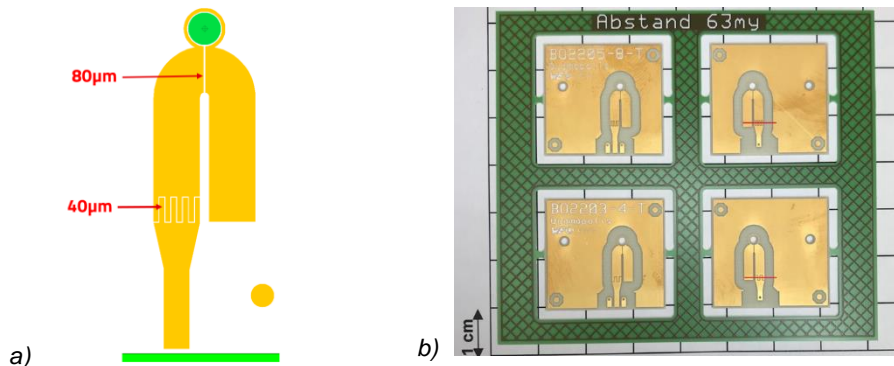


Abbildung 9: Aluminium-Drahtbonden (a); Gold-Drahtbonden (b); ASIC auf der Leiterplatte des finalen Demonstrators (c); Verguss mit Polyurethan (d).

Resonator-PCB

Zur Erzeugung einer Hochfrequenzanregung im Diamantmodul wird eine separate Leiterplatte, die sogenannte Resonator-Leiterplatte, hergestellt. Die verwendeten Substrate müssen die hierfür erforderlichen Eigenschaften wie Hochfrequenzfähigkeit und hohe Dielektrizitätskonstante erfüllen. Das Layout sieht eine doppelseitige Leiterplatte mit feinen Isolationsabständen von 40 bzw. 80 μm zwischen den Kupferstrukturen vor (Abb. 10a). Die Evaluierung der geeigneten Materialien, der Resonatorstruktur, der Isolationsabständen zwischen den Leiterbahnen sowie der Platzierposition erfolgte in mehreren interaktiven Schritten.

Im ersten Versuch sollte festgestellt werden, ob die Resonator-Leiterplatte „face down“ d.h. mit der Omega Struktur nach unten oder „face up“ mit der Omega-Struktur nach oben über der Kavität zu platzieren ist. Dazu wurden zwei spiegelsymmetrische Leiterplatten mit identischen Kupferstrukturen hergestellt. Zusätzlich wurde die Anzahl der so genannten Kämmen variiert - es wurden eine Vier- und eine Acht-Kamm-Struktur realisiert. Nach der Herstellung der Leiterplatte wurde festgestellt, dass aufgrund fertigungstechnischer Einschränkungen der gewünschte Abstand von 40 μm zwischen den Kupferstrukturen nicht realisiert werden konnte. Mit Standardverfahren konnte ein Abstand von 63 μm erreicht werden. Mit dieser Erkenntnis konnte die nächste Layoutanpassung durchgeführt werden.



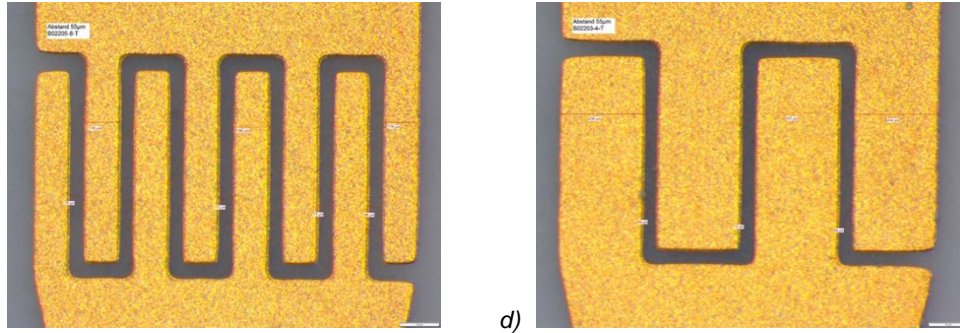


Abbildung 10: Omega-Resonator Layout (a); Leiterplatten nutzen mit spiegelsymmetrische Leiterplatten mit Acht-Kamm-Struktur (oben) und Vier-Kamm-Struktur (unten) (b); Acht- bzw. Vier-Kamm Strukturen (c+d).

Die Messergebnisse der ersten Variante beim Projektpartner Bosch ergaben, dass die Resonator-Leiterplatte in „face down“ Orientierung zu positionieren ist. Zudem führte eine höhere Anzahl an Kämmen zu besseren Resultaten. In der darauffolgenden Optimierungsstufe wurde sowohl das Omega-Layout als auch die Öffnung für die Diamantenplatzierung angepasst. Auch von dieser Variante wurden zwei Leiterplatten mit acht bzw. zwölf Kämmen gefertigt.

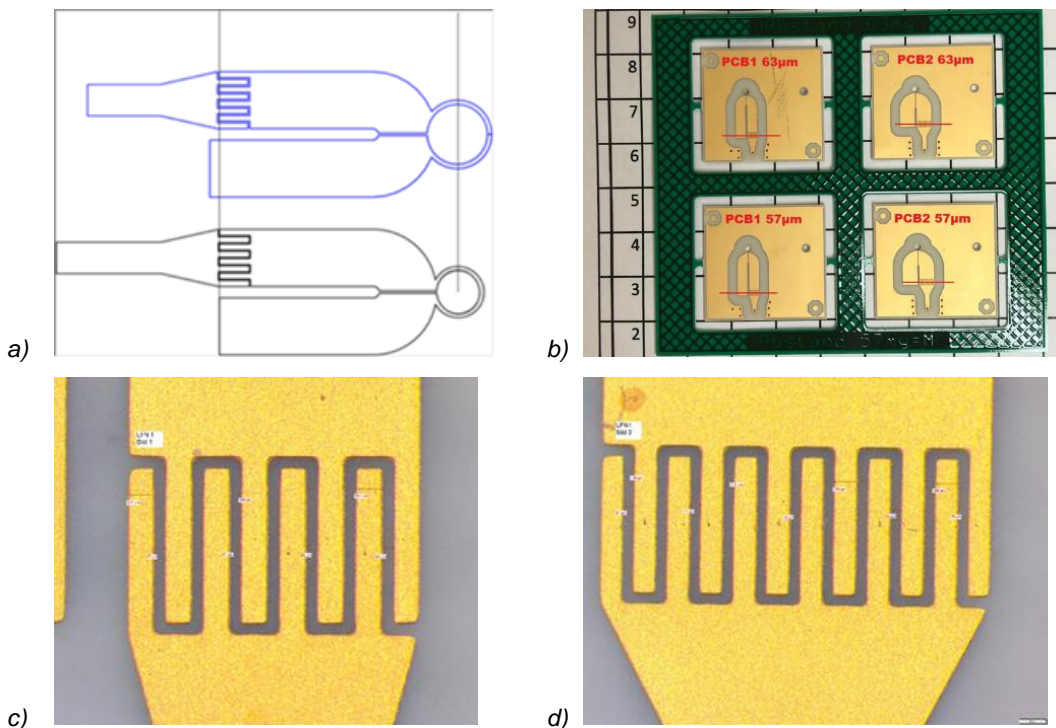


Abbildung 11: Optimiertes Layout für die Positionierung des Diamanten (a); Omega-Resonator-Leiterplatten mit Acht-Kamm-Struktur (links oben und unten) sowie Zwölf Kamm-Struktur (rechts oben und unten); in rot sind die gemessenen Isolationsabstände dargestellt (b); Acht- bzw. Zwölf-Kamm-Strukturen mit dem Isolationsabstand von $63 \mu\text{m}$ (c+d).

In einer Versuchsreihe wurde ein Unterätzungsausgleich zwischen 50 bis $60 \mu\text{m}$ variiert und die jeweiligen Leiterplatten entsprechend hergestellt. Ziel dieser Variation des Unterätzungsausgleichs war die Evaluierung des minimal möglichen Isolationsabstands im nass-chemischen Ätzprozess, der zuverlässig abgebildet werden kann. Die Abbildung 12 zeigt einige

Messergebnisse der Isolationsabstände im Kammbereich anhand von Schliiffbildern. Im Verlaufe der Auswertung wurde jeweils der Abstand am "Kopf" und am "Fuß" der Leiterbahn gemessen. Mit dem Unterätzungsungleich von 50 µm konnte eine minimale Distanz zwischen ca. 14 und 30 µm ermittelt werden. Die Untersuchung des Schliiffs offenbart, dass in einigen Fällen Kurzschlüsse aufgetreten sind, wie in Abbildung 12 oben dargestellt. Der Unterätzungsungleich von 57 µm ermöglichte die Realisierung von Abständen von ca. 56 bis 65 µm (Abb. 12, Mitte). Die Auswertung ergab keine Identifizierung von Kurzschlüssen. Beim Unterätzungsungleich von 63 µm wurden verlässliche Abstände ohne Kurzschlüsse zwischen 64 und 67 µm gemessen (Abb. 12, unten). Die Auswertung der Ergebnisse ergab, dass im nass-chemischen Ätzverfahren der minimalste Isolationsabstand im Bereich der Kamm-Struktur zwischen 56 und 67 µm abgebildet werden kann.

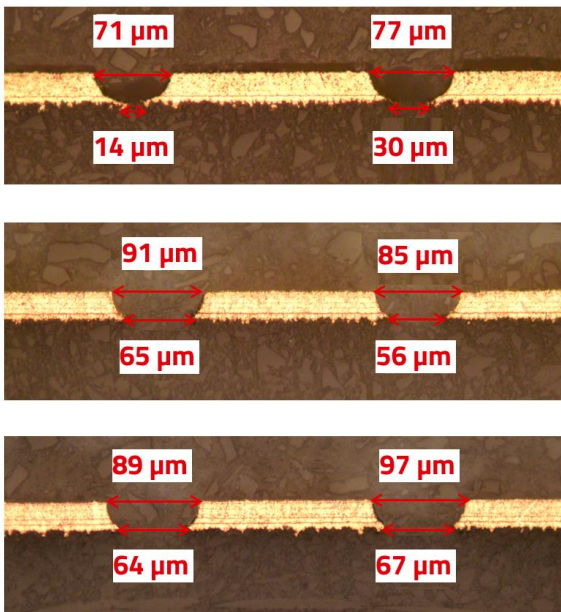


Abbildung 12: Versuchsreihe zur Evaluation des minimalen Isolationsabstandes zwischen Kupferstrukturen (Messung jeweils am „Kopf“ und am „Fuß“ der Leiterbahn).

Nach den Tests der ersten und der zweiten Variante der Resonator-PCB wurde seitens der Partner eine dritte Variante ausgelegt und bei Würth Elektronik unter Berücksichtigung der bis zu diesem Zeitpunkt gewonnenen Erkenntnisse gefertigt. Als Basissubstrat wurde keramikgefülltes Rogers-Material verwendet, wobei die Leiterbahnabstände von 80 µm am "Kopf" und 60 µm am "Fuß" der Leiterbahn bei diesem Fertigungsdurchlauf eingehalten werden konnten. Diese Variante findet im finalen Aufbau des Demonstrators Verwendung (Abb. 13).

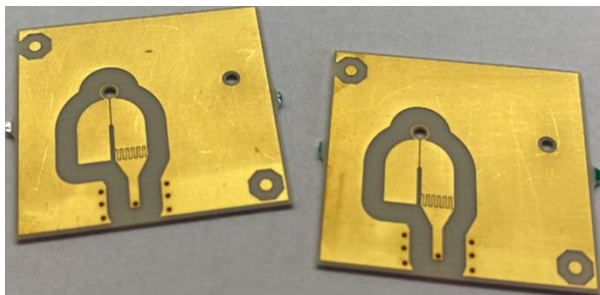


Abbildung 13: Finale Resonator-Leiterplatte

Parallel zu den oben beschriebenen Ätzversuchen wurde eine Testreihe konzipiert, die darauf abzielte, feine Isolationsabstände bis zu 40 µm durch Einsatz von Lasertechnologie zu realisieren.

In den initialen Versuchen führte die Bestrahlung des Kupfers mit dem Laserstrahl nach dem Durchbruch des Materials zu einer Schädigung des darunterliegenden FR4-Materials. In den darauffolgenden Experimenten wurden Prozessparameter wie Laserpower, Fokus, Pulsdauer und Frequenz variiert. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem Laserbeam von 25 μm und einer Kanalbreite von 44 μm Beschädigungen an FR4 auftraten (Abb. 14a und 14d). Es konnte jedoch eine Verbesserung erzielt werden, indem die Laserstrahlstärke reduziert und der Laserkanal auf 90 μm erweitert wurde (Abb. 14b und 14e). Bei weiterer Erweiterung des Laserkanals auf 177 μm und gleichbleibender Laserpower und Laserbeam wurde die Überlappung der Laserbahnen nicht optimal gewählt, was an der raueren Oberflächentopographie im Schliffbild zu erkennen ist (Abb. 14c und 14f). Es wurde zwar ein Ergebnismaximum zwischen der Laserkanalbreite (entspricht dem Isolationsabstand) und Tiefe ohne Beschädigung des FR4-Polymers erzielt, obwohl die gewünschten 40 μm Strukturen nicht realisiert werden konnten. Aufgrund der positiven Ergebnisse bei der nass-chemischen Strukturierung wurden weitere Lasertests eingestellt.

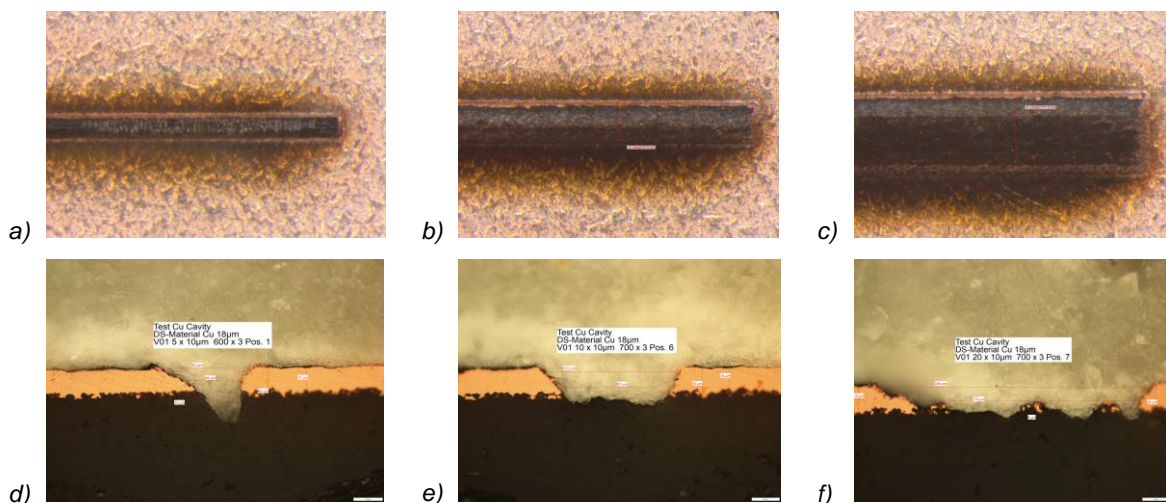


Abbildung 14: Ergebnisse der Laserstrukturierung mit einem Laserbeam von 25 μm – Kanalbreite 44 μm (a); Kanalbreite 90 μm (b); Kanalbreite 177 μm (c); Schliffbild zu a (d); Schliffbild zu b (e); Schliffbild zu c (f).

Wie in Abbildung 1 dargestellt, muss der Diamant in der dafür vorgesehenen Öffnung der Resonanzleiterplatte positioniert werden. Die Positionierung der Diamanten erfolgte bei Würth Elektronik mithilfe einer halbautomatischen Labor-Placer-Anlage. Für diese Pick-and-Place-Versuche stellte der Partner Q.ANT einige Diamantbausteine zur Verfügung. Im ersten Prozessschritt, der als "Pick" bezeichnet wird, werden zwei Bilder übereinandergelegt: das vom Bauteil und das vom Platzier-Tool. Im zweiten Prozessschritt, der als "Place" bezeichnet wird, werden die Bilder vom Bauteil und dem Substrat übereinandergelegt und optisch aufeinander abgestimmt. In beiden Fällen findet die optische Kontrolle am Bildschirm statt. Die ersten Versuche haben gezeigt, dass die aktuelle Optik für die kontrastschwachen Diamanten nicht geeignet ist, was zu einem ungenauen Abgleich der Bilder führt. Um den Kontrast zu erhöhen, wurden verschiedene farbige Unterlagen getestet. Der beste Kontrast wurde auf weißem Untergrund erzielt. Jedoch ist auf dem Bild eine starke Schattenbildung vom Diamantbaustein zu erkennen. In der Folge konnte die Schärfe der Darstellung nicht richtig eingestellt werden. Einige Ergebnisse sind in Abbildung 15 dargestellt. Für den finalen Demonstrator wurden die Diamant-Bausteine manuell beim Partner Q.ANT aufgebracht.

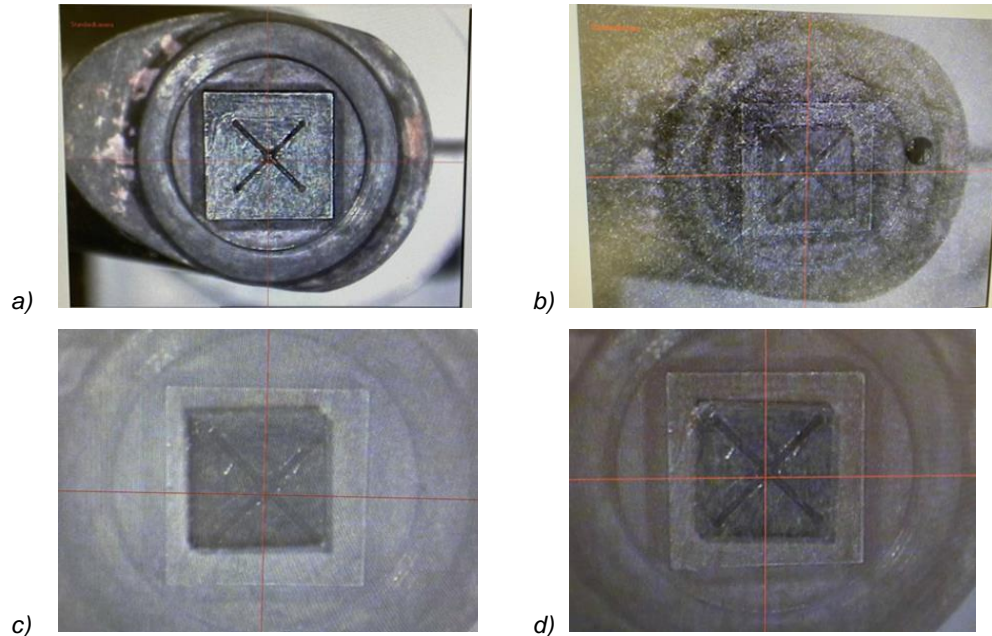


Abbildung 15: Bildschirmfotos vom Placing-Tool mit dem transparenten Diamanten auf unterschiedlich farbigen Unterlagen – Place-Tool scharfgestellt, womit der Diamant nicht sichtbar wird (a); Diamant scharfgestellt auf einem schwarzen Untergrund (b); Diamant scharfgestellt auf einem weißen Untergrund (c); Diamant scharfgestellt auf einem roten Untergrund (d).

Finaler Demonstrator

Die Endmontage des Demonstrators erfolgte bei den Projektpartnern Würth Elektronik, Bosch und Q.ANT. Die Inbetriebnahme wurde vom Partner Q.ANT durchgeführt. Abbildung 16 zeigt einige Bilder des finalen Demonstrators. Die Nachweisgrenze von $\sim 50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ sowie die cm-genaue Lokalisierung konnten leider nur teilweise realisiert werden ($1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ beim Intermediate Demonstrator). Die technologischen Projektziele, darunter die CMOS-Integration der MW-Schaltung, die Leiterplattenintegration aller optischen und magnetischen Komponenten inklusive Resonanzleiterplatte unter Verwendung fertigungskompatibler Techniken sowie der Nachweis der Vektorfunktionalität für die Lokalisierungsanwendung und die Miniaturisierung des Gesamtsystems, konnten erfolgreich realisiert werden.

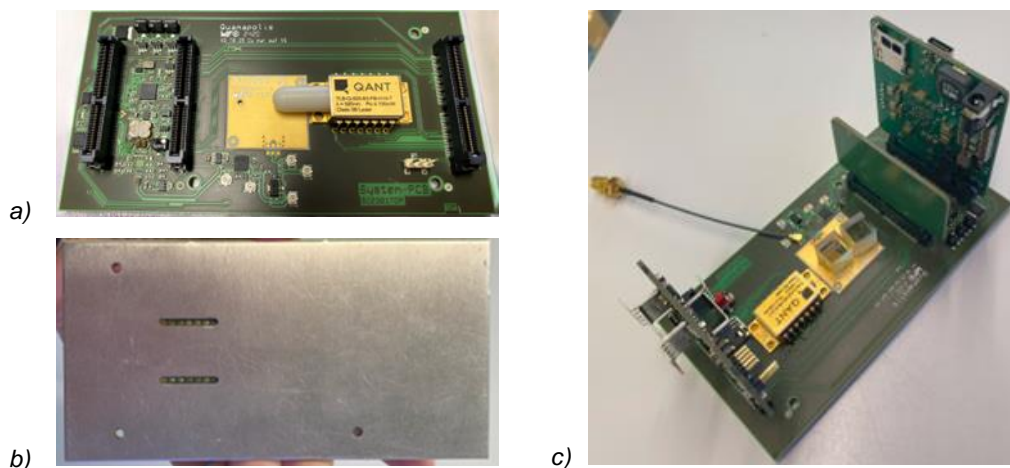


Abbildung 16: Finaler Quamapolis Demonstrator – Vorderseite inkl. Resonator-Leiterplatte (a); Rückseite mit Aluminium-Heatsink (b); Aufbau mit Steuerungsleiterplatten und optischen Komponenten (c).

Kurzbericht zum Verbundprojekt Quamapolis - Quanten-Magnetometer zur Positions- und Lagebestimmung für Intelligente Systeme

Zuwendungsempfänger: Würth Elektronik GmbH & Co. KG (WE)	Förderkennzeichen: 13N15378
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2021 – 30.09.2024	

Das Ziel des Verbundprojektes Quamapolis bestand in der fertigungsgerechten Realisierung eines kompakten Vektormagnetometers auf der Basis von Quanteneffekten in Diamant. Die Kombination aus gezielter Erzeugung eines Referenzmagnetfeldes und vektorieller Magnetfeldmessung ermöglicht eine präzise Lokalisierung (Auflösungen <1 cm) und Positionsbestimmung von Objekten. Die Realisierung eines solchen Systems erfordert die Integration einer Vielzahl von Komponenten, darunter Laserdioden, Diamanten, optische Filter, Fotodioden und Schaltungen zur Erzeugung von Mikrowellenfeldern. Die Integration all dieser Komponenten zu einem funktionsfähigen System wurde erstmals auf einem Leiterplattensubstrat realisiert, wobei der Einsatz fertigungsgerechter mikrooptischer Aufbau- und Verbindungstechnik eine entscheidende Rolle spielte.

In einem ersten Schritt wurde ein Konzept für eine PCB-basierte Hardware-Implementierung unter Berücksichtigung definierter Eigenschaften entwickelt, das Substrate und Komponenten unterschiedlicher Technologien, AVT-Methoden und Materialien umfasst. Die Machbarkeit und Funktionalität dieses Konzepts wurde in mehreren Technologiedemonstratoren evaluiert. Die Konzeptbausteine umfassen eine Systemleiterplatte, die als Träger für alle Komponenten dient, sowie Packages für Magnete und Photodioden. Es wurden mehrere System-PCBs für Zwischendemonstratoren hergestellt, die sich im Wesentlichen durch unterschiedliche Lagenaufbauten und Form bzw. Dimension der Kavität unterscheiden. Der Lagenaufbau und die Integrationsdesignregeln wurden von Würth Elektronik erstellt. Das Layout für die Systemleiterplatte wurde vom Partner Bosch entwickelt.

Für den ersten Zwischendemonstrator wurde eine Leiterplatte mit zwei Kavitäten für jeweils eine Fotodiode und eine Referenz-Fotodiode aufgebaut. Die Leiterplatte basiert auf dem Standardmaterial FR4 und enthält vier Kupferlagen. Die Kavitäten für die Fotodioden wurden im zweiten Zwischendemonstrator vergrößert. Außerdem wurde das Design der Systemleiterplatte modifiziert, und eine 6-Lagen-Leiterplatte mit den entsprechenden Thermovias im Bereich des Lasermoduls konstruiert und gefertigt. Für den dritten Zwischendemonstrator war eine erneute Änderung der Kavitätsabmessungen erforderlich. So wurde eine 6-lagige Leiterplatte mit neuem Kavitätsdesign und Leiterbahnführung mit einer Gesamtdicke von 2,6 mm gefertigt. Die acht Magnete und die Fotodioden wurden auf der Lage 4 in der 1,4 mm tiefen Kavität positioniert.

Für den finalen Demonstrator wurde schließlich eine 6-lagige Leiterplatte in Hybridbauweise realisiert, wobei die Kupferlagen TOP- und BOTTOM auf dem keramikgefüllten Substrat platziert wurden, um eine bessere Erzeugung der benötigten Resonanzen zu gewährleisten. Der Kern wurde aus FR4 gefertigt und es konnte eine Reduzierung der Gesamtdicke auf 1,7 mm bei gleichbleibender Kavitätestiefe von 1,4 mm erreicht werden. Die Befestigung der Magnete und Fotodioden erfolgte auf der Kupferlage 5. Die Form der Kavität wurde so modifiziert, dass nur die

für die integrierten Komponenten benötigte Bodenfläche berücksichtigt wurde. Unterhalb des Lasermoduls wurden Thermovias platziert, die in einem galvanischen Prozess vollständig mit Kupfer gefüllt wurden. Im Gegensatz zum Technologiedemonstrator wurde die Leiterplatte beidseitig mit Lötstopplack versehen, um die Bestückung zu vereinfachen. Um die Wärme zuverlässig aus dem System abzuführen, wurde neben den Thermovias ein Aluminiumkühlkörper mit Aussparungen für die Lasermodulkontakte entworfen und auf die Rückseite der Leiterplatte geklebt. Um den Einfluss von Nickel auf das Magnetfeld des Gesamtsystems zu eliminieren, wurde eine neuartige Ni-freie Endoberfläche DIG (Direct Immersion Gold) aufgebracht.

Für die Integration der Magnete wurde eine Klebtechnologie gewählt. Zwei Klebstoffe wurden evaluiert - ein thermisch härtender Klebstoff mit einer Aushärtetemperatur von 90 °C und ein UV-härtender Klebstoff, da die Anforderungen an den Klebstoff eine niedrige Verarbeitungs- und Aushärtetemperatur von maximal 100 °C beinhalteten. Bei höheren Temperaturen bestand die Gefahr der Entmagnetisierung der Magnete. Parallel dazu führte der Projektpartner Bosch Versuche mit alternativen Klebstoffen durch. Dabei konnten bessere Ergebnisse bei der Integration der Magnete erzielt werden. Für den finalen Demonstrator wurde auf das Klebverfahren des Projektpartners Bosch zurückgegriffen. Das Layout für die Orientierung der Magnete auf drei Lagen (Zwischendemonstrator 2 und 3) und später die Optimierung für die Integration der acht Magnete auf einer Lage (Enddemonstrator) wurden im Vorfeld vom Partner Universität Stuttgart entwickelt.

Zur Erzeugung der Hochfrequenzanregung im Diamantmodul wurde eine separate Leiterplatte, die sogenannte Resonator-Leiterplatte, hergestellt. Das Layout wurde vom Partner Bosch und dem assoziierten Partner Universität Dortmund entwickelt und sieht eine doppelseitige Leiterplatte mit feinen Isolationsabständen von 40 bzw. 80 µm zwischen den Kupferstrukturen vor. Aufgrund fertigungstechnischer Einschränkungen konnte der gewünschte Abstand von 40 µm zwischen den Kupferstrukturen nicht realisiert werden. Mit Standardätzverfahren konnte ein Abstand von 63 µm erreicht werden. Parallel zu den beschriebenen Ätzversuchen wurde eine Versuchsreihe konzipiert, die zum Ziel hatte, feine Isolationsabstände bis 40 µm mittels Lasertechnologie zu realisieren. Zwar konnte die gewünschte Tiefe des Laserkanals ohne Vorschädigung des Polymers erreicht werden. Die gewünschten 40 µm Strukturen konnten jedoch nicht realisiert werden. In mehreren Iterationsschritten wurde schließlich die finale Resonator-Leiterplatte nasschemisch aufgebaut. Die AVT hierfür von der Resonator-Leiterplatte auf die Systemleiterplatte wurde vom Partner Bosch übernommen.

Eine weitere Aufgabe von Würth Elektronik in Quamapolis war die Positionierung des Diamanten in der dafür vorgesehenen Öffnung der Resonanzleiterplatte. Dieser AVT-Schritt wurde mit einem halbautomatischen Labor-Placer durchgeführt. Für diese Pick-and-Place-Versuche stellte der Partner Q.ANT einige Diamantbausteine zur Verfügung. Bereits in den ersten Versuchen zeigte sich, dass die derzeitige Optik der Anlage für die kontrastarmen Diamanten nicht geeignet ist. Für den finalen Demonstrator wurden die Diamantbausteine beim Partner Q.ANT manuell aufgebracht. In einem der letzten AVT-Schritte hat Würth Elektronik die ASICs für die Mikrowellenanregung mittels Drahtbonden auf der System-Leiterplatte aufgebaut. Der ASIC wurde mit 25 µm Golddraht auf die nickelfreie DIG-Oberfläche gebondet. Anschließend wurden die Drähte mit einer Polyurethanvergussmasse vergossen.