Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

CLUSTERS
4 FUTURE
Innovationsnetzwerke
für unsere Zukunft

Institut für Mikroelektronik Stuttgart

(IMS CHIPS)

Abschlussbericht für das BMFTR-Projekt *QIND*

im Rahmen des Zukunftscluster *QSens*

für den Zeitraum: 01.12.2021 bis 30.11.2024

Projektberichter: Dr. Christian Burwick

Mitberichter: Steffen Epple

Förderkennzeichen: 03ZU1110EB

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03ZU1110EB gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren."

1. Zusammenfassung

IMS CHIPS hatte im Rahmen des Projekts die Aufgabe, gemeinsam mit Partnern einen innovativen, zuverlässigen und robusten Grenzstandsensor auf Basis von Quantensensoren zu entwickeln. Dieser sollte für Prozesse im Temperaturbereich von 250–450 °C sowohl frontbündig im Behälter als auch außerhalb montierbar sein. Ziel war die Identifikation geeigneter Messprinzipien und die Realisierung einer Sensorlösung, wobei IMS CHIPS den Schwerpunkt auf Sensorsteuerung und Signalverarbeitung legte.

Zu Beginn wurde ein konzeptioneller Entwurf mit Blockschaltbild erstellt, der die Signalwege und Schnittstellen klar darstellte. Dies ermöglichte eine effiziente Koordination der Aufgaben innerhalb der Projektpartner und sorgte für eine gute Gesamtsystemübersicht.

Das Gesamtsystem beinhaltete die Entwicklung der folgenden Komponenten:

- **Photodiode**: Nach Evaluation verschiedener Typen wurde eine PIN-Photodiode mit großer aktiver Fläche gewählt – praxistauglich, ausreichend sensitiv und einfacher zu betreiben.
- **Signalverarbeitung**: Entwicklung einer Autobalancing-Schaltung zur Reduktion des Lasergleichtaktrauschens, wodurch die Messgenauigkeit stark verbessert wurde.
- **Lock-in Verstärker**: FPGA-basiert und vollständig integriert, speziell für miniaturisierte Systeme. Simulationsergebnisse belegen eine deutliche Sensitivitätssteigerung.
- **Mikrowellengenerator & Antennen**: Simulation, Design und Optimierung führten zu Antennen mit ausreichender Bandbreite und Feldhomogenität.
- **Software**: Python-basierte Umgebung zur automatisierten Steuerung und Auswertung (ODMR-Messreihen), die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit verbesserte. Zudem Auswahl geeigneter NV-Diamanten durch Messreihenauswertung.

Alle Komponenten wurden möglichst platzsparend realisiert, um die gesamte Steuerungselektronik in einem kompakten Gehäuse unterzubringen, wodurch externe Tischgeräte überflüssig wurden.

Die entwickelten Technologien (insbesondere FPGA-basierte Signalverarbeitung und modulare Elektronik) bilden die Grundlage für weitere Projekte, u. a. im Rahmen der QSens-Initiative. Ziel ist die Weiterentwicklung hin zu einer industriellen Umsetzung der NV-Grenzstandsensorik durch Behälterwandungen. IMS CHIPS konnte im Projekt QIND wichtige technische Meilensteine erreichen, die für künftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich innovativer Quantensensorik nutzbar sind.

2. Projektübersicht

IMS CHIPS erstellte gemeinsam mit den Projektpartnern einen konzeptionellen Entwurf für den Grenzstanddemonstrator und hat den Aufbau des Demonstrators aktiv mitgestaltet. Der Schwerpunkt der Tätigkeiten lag auf der Entwicklung der Steuerungs- und Auswerteelektronik in Kombination mit entsprechender Softwareentwicklung und der Durchführung von Messreihen zur Bewertung des Systems.

Während der Durchführung des Vorhabens sind IMS CHIPS keine Fortschritte anderer Akteure bei der Entwicklung diamantbasierter NV-Sensoren zur Grenzstandmessung durch eine Behälterwand bekannt geworden. Ebenso wurden IMS CHIPS keine alternativen Methoden zur Grenzstandmessung durch eine Behälterwand mit vergleichbarer Leistungsfähigkeit bekannt. Im allgemeinen Bereich der NV-basierten Quantensensorik wurden jedoch, insbesondere auch im Rahmen von QSens, durchaus Fortschritte bei der Überführung in marktfähige Produkte erzielt. Nach eingehender Prüfung können diese Entwicklungen zukünftig teilweise für eine potenzielle Industrialisierung der NV-Grenzstandsensoren berücksichtigt werden.

3. Ausführlicher Tätigkeitsbericht

3.1. Konzeptioneller Entwurf des Grenzstanddemonstrators als Grundlage für die im Projekt getätigten Entwicklungen

Zur systematischen Erfassung und Analyse der funktionalen Zusammenhänge eines NV-Quantensensors (Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum) wurde im Rahmen von Arbeitspaket 2 ein detailliertes Blockschaltbild entwickelt. Im Zentrum des Systems steht der NV-Sensor, dessen quantenmechanische Eigenschaften die Grundlage der Messfunktionalität bilden. Das Blockschaltbild wurde um die elektrische Peripherie ergänzt, um insbesondere die elektrischen Signalpfade, Schnittstellen und Kopplungen zwischen dem NV-Zentrum und den angeschlossenen Auslese- und Steuereinheiten abzubilden. Dadurch ließen sich die Signalschnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten des NV-Quantensensors klar und strukturiert darstellen. Aufgrund einer großen funktionalen Schnittmenge zwischen quantenbasiertem Druck- und Grenzstandsensor, konnte dieses Blockschaltbild auch leicht auf die Druckmesstechnik angewendet werden. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau zur Realisierung des Grenzstandsensors sowie die Hauptverantwortlichen bei der Umsetzung.

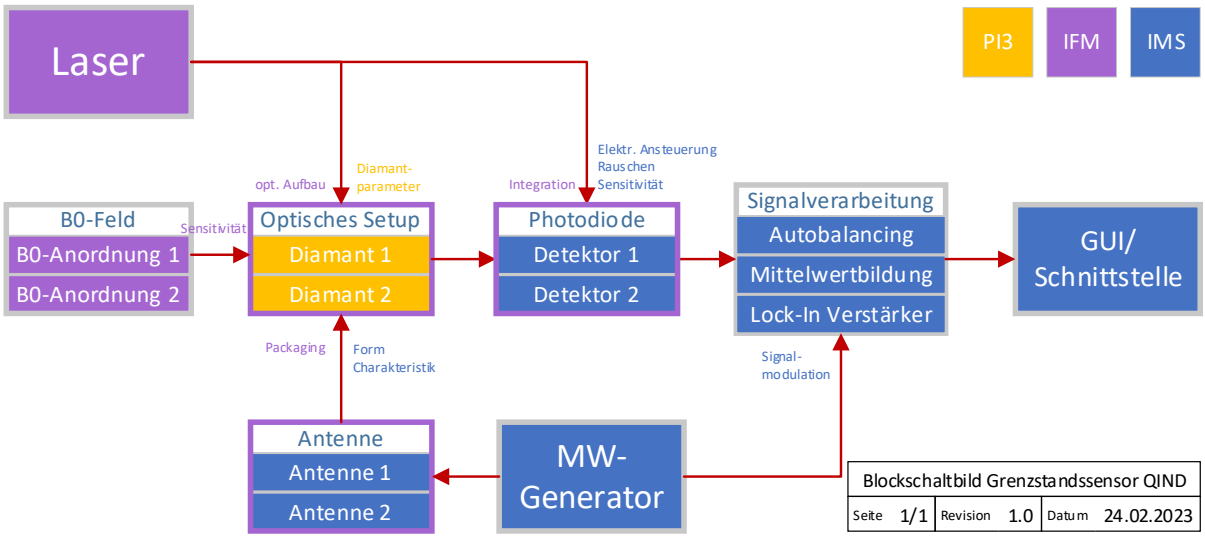


Abbildung 1: Blockschaltbild zur Darstellung der Signalschnittstellen mit Fokus auf den Grenzstandsensor

Dargestellt sind die einzelnen Komponenten, die benötigt wurden, um den Grenzstandsensor zu realisieren. Das zentrale Element bildet der Diamant mit seinen NV-Zentren (gelb dargestellt). Daneben wurde für die Anregung ein Laser, ein B0-Magnetfeld sowie eine

Mikrowelle (MW) im GHz-Bereich mit entsprechender Antenne benötigt. Die elektrischen Messsignale der Photodioden bilden zusammen mit der Mikrowelle die Eingangsgrößen für die nachfolgende elektrische Signalverarbeitung. Die Messergebnisse wurden über eine Schnittstelle für eine graphische Weiterverarbeitung bzw. spätere Auswertung ausgegeben.

Das Blockschaltbild ermöglichte eine klare und strukturierte Darstellung der Vorgehensweise zur Umsetzung der einzelnen Meilensteine und Arbeitspakete durch die jeweiligen Projektpartner. Da bis dato weder Literatur noch praktische Erfahrungen zum Einsatz von NV-basierten Grenzstandsensoren vorlagen, wurde im Rahmen des Projektes entschieden, folgende Aspekte systematisch zu untersuchen:

- NV-Diamanten mit unterschiedlichen Materialeigenschaften
- verschiedene B_0-Magnetfeld-Anordnungen
- diverse Signalverarbeitungsmethoden
- mehrere Antennendesigns zur Mikrowellenanregung des Diamanten

Zum Abschluss des Vorhabens sollte daraus ein optimaler Entwurf für den diamantbasierten NV-Grenzstandsensor abgeleitet werden.

Ergänzend zu den praktischen Entwicklungen im Vorhaben wurden die institutseigenen Kenntnisse durch eine vertiefte Literaturrecherche gezielt erweitert, insbesondere im Hinblick auf die Besonderheiten der elektronischen Steuerung und Auswertung eines NV-Quantensensors.

Die nachstehenden Literaturquellen fanden hierbei besondere Berücksichtigung:

- Stürner F M, Brenneis A, Buck T, Kassel J, Rölver R, Fuchs T, Savitsky A, Suter D, Grimmel J, Hengesbach S, Förtsch M, Nakamura K, Sumiya H, Onoda S, Isoya J, Jelezko F (2021), "Integrated and Portable Magnetometer Based on Nitrogen-Vacancy Ensembles in Diamond" Adv. Quantum Technol., 4: 2000111. https://doi.org/10.1002/qute.202000111
- Sasaki K, Monnai Y, Saijo S, Fujita R, Watanabe H, Ishi-Hayase J, Itoh K M, Abe E (2016), "Broadband, large-area microwave antenna for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond" Rev. Sci. Instrum. 87 (5): 053904. https://doi.org/10.1063/1.4952418
- Chen Z, Shagieva F, Widmann M, Kübler M, Vorobyov V, Kapitanova P, Nenasheva E, Corkill R, Rührle O, Nakamura K, Sumiya H, Onoda S, Isoya J, Wrachtrup J (2021), "Diamond Magnetometry and Gradiometry Towards Subpicotesla DC Field Measurement." Physical Review Applied 15, no. 6, 064075. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.064075
- Babashah H, Losero E and Galland C, (2024) "Integrated coplanar waveguide coil on diamond for enhanced homogeneous broadband NV magnetometry" Open Res Europe 2024, 4:44, https://doi.org/10.12688/openreseurope.16875.1

3.2. Evalution verschiedener Photodioden hinsichtlich ihrer Eignung zum Einsatz im NV-basierten Grenzstandsensors

Um die optischen Signale des Grenzstandsensors aufzunehmen, hatten die von IMS CHIPS ausgewählten Photodioden eine zentrale Bedeutung. Wesentliche Auswahlkriterien waren eine ausreichend hohe Sensitivität, ein geringes Rauschverhalten, sowie eine ausreichend große aktive Fläche. Die Parameter waren angepasst an die Spezifikation des optischen Setups, welches vom Projektpartner Institut für Mikrointegration (IFM) der Universität

Stuttgart bereitgestellt wurde. Hierzu wurden verschiedene Photodioden evaluiert und auf ihre Eignung geprüft. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der evaluierten Photodioden:

Tabelle 1: Übersicht der evaluierten Photodioden zum Einsatz im Grenzstanddemonstrator

Bezeichnung	**Sensitivität @ 700 nm [A/W]**	**Sensitive Fläche [mm²]**	**Dunkel-strom [pA]**	**NEP** $\left[W/\sqrt{Hz}\right]$	**Sonstiges**
Osram SFH 2705	0,575	3,4	200		Spätere Vollintegration inklusive opt. Filter über ams-Prozess möglich
Thorlabs PDA100A-EC	0,45	100		9,73e-13 bis 2,7e-11	Verstärker integriert, keine Systemintegration möglich da Tischgerät
Hamamatsu S2386-18K	0,48	1,21	2	6,8e-16	
Hamamatsu S16392-01CT	0,5	7,67	100		
Hamamatsu S9981-01CT	0,52	1,69	10		
Hamamatsu S12915-33R	0,5	5,76	5	9e-16	
CiS OC808	*0,4*	*100*	*400*	*7e-14*	*Vom Kooperations-partner entwickelt*

Neben den in der Tabelle gezeigten herkömmlichen PIN-Photodioden, ist auch der Einsatz von Avalanche-Photodioden (APDs) geprüft worden. APDs sind spezielle Halbleiterbauelemente zur Umwandlung von Licht in elektrische Signale - ähnlich wie PIN-Photodioden -, jedoch mit eingebauter Verstärkung durch den so genannten Lawineneffekt. APDs benötigen hierfür jedoch eine sehr präzise Spannungsregelung (typisch 100–400 V) und sind rauschanfälliger. Zugleich zeigen sie meist ein temperaturabhängigeres Verhalten als PIN-Photodioden. Während PIN-Photodioden robuster und einfacher zu betreiben sind, eignen sich APDs für Anwendungen mit hohem Dynamikbereich oder schwachem Lichtsignal, passend für die Anwendung in einem NV-Grenzstandsensor mit schwachen optischen Signalen. Im Rahmen der Evaluation zeigte sich jedoch, dass die Sensitivität der PIN-Photodiode ausreichend ist. Daher wurde aufgrund des unkomplizierteren Betriebs eine PIN-Photodiode als Detektor ausgewählt. Alle PIN-Photodioden zeigen eine ähnliche Sensitivität bei unterschiedlich großen aktiven Flächen. Zum Teil sind deutliche Unterschiede im Dunkelstrom als auch beim Noise Equivalent Power (NEP) der einzelnen PIN-Photodioden zu erkennen.

Da die vom Kooperationspartner IFM entwickelten optischen Übertragungsstrecken den Einsatz von Photodioden mit besonders großen aktiven Flächen erforderten, wurde die Größe der aktiven Fläche zu einem entscheidenden Auswahlkriterium.

Das CiS als Unterauftragnehmer von Endress+Hauser hatte bereits Erfahrungen mit der selbst entwickelten Photodiode OC808 gesammelt und da diese den Anforderungen des Grenzstandsensors entsprach, wurde die Diode OC808 für den Aufbau des NV-Grenzstanddemonstrators ausgewählt.

3.3. Analoges Schaltungsdesign zur Auswertung und Verstärkung der optischen Signale

Um den Grenzstand in einem Tank detektieren zu können, sind die Anforderungen an die Genauigkeit und insbesondere auch an die Signalverarbeitung sehr hoch. Daher wurden von IMS CHIPS im Projektverlauf verschiedene Verfahren untersucht und bewertet, wie diese kombiniert werden können.

Die Filterung von starkem Rauschen, das der Messgröße überlagert ist, stellt eine der größten Herausforderungen in der Signalverarbeitung dar. Mit der naheliegenden Lösung einer Mittelwertbildung über mehrere Messungen, sollte zunächst in einem ersten Schritt das Rauschen minimiert und die Messgröße in den Vordergrund gestellt werden.

Eine wesentliche Quelle für das der Messung überlagerte Rauschen ist der Laser zur Anregung der NV-Zentren im Diamanten. Über einen sogenannten Autobalancing Ansatz, kann der Rauschanteil des Lasers am Sensorsignal minimiert werden. Eine Autobalancing Schaltung besitzt zwei Photodioden.

Eine Photodiode misst die Fluoreszenz der NV-Zentren im Diamanten, mit der anderen Photodiode wird die rauschbehaftete Anregung des Lasers gemessen. Werden nun die beiden Signale der Photodioden in der Schaltung zueinander in Beziehung gesetzt, also ein sogenanntes Autobalancing durchgeführt, ist es möglich das Gleichtaktrauschen des Gesamtsystems auf ein niedrigeres Level zu bringen und somit eine bessere Signalqualität zu erreichen. Langzeitdrift durch Temperaturänderungen oder Laserinstabilitäten können so unterdrückt werden. In der Folge konnten kleinere Messsignale detektiert und die Empfindlichkeit des Sensors erhöht werden. Eine elektrische Bewertung der Autobalancing Schaltung wurde in einem Versuchsaufbau durchgeführt, bei dem die Schaltung mit einem dem Messsignal überlagerten Rauschen ähnlich dem Laserrauschen angeregt und in Relation zum rauschärmeren Ausgangssignal der Autobalancing Schaltung gesetzt wurde. Eine Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses (SNR) von 15 dB im Frequenzbereich kleiner 10^4 Hz konnte erreicht werden.

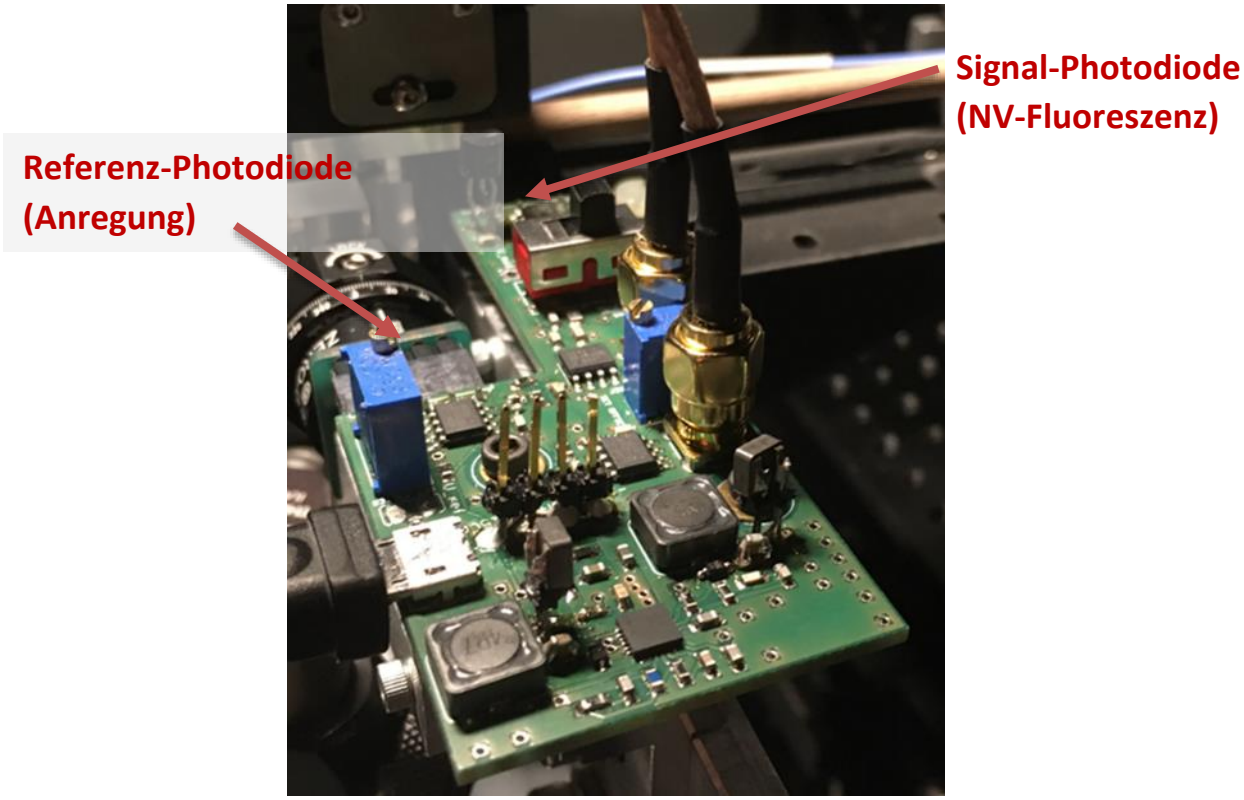
Der Vollständigkeit halber sollte hier auch der Einsatz eines Lock-in-Verstärkers zur Rauschminimierung genannt werden. Mit einem Lock-in-Verstärker ist es möglich, schwache elektrische Wechselsignale in stark verrauschten Umgebungen zu detektieren. Zunächst muss hierfür die zur Anregung des NV-Sensors genutzte Mikrowelle niederfrequent moduliert werden. Der Lock-in-Verstärker demoduliert und filtert dann das Ausgangssignal der Photodioden, indem er als sehr schmalbandiges Bandpassfilter um die Modulationsfrequenz herum arbeitet, so dass jegliches Rauschen bei anderen Frequenzen gefiltert wird.

Diese verschiedenen Ansätze wurden im Rahmen von Arbeitspaket 3 nach Spezifikation des NV-Diamanten und des B0-Magnetfelds evaluiert und bezüglich ihrer Eignung in NV-Quantensensoren charakterisiert. Die Kombination der verschiedenen Ansätze kann zu einer deutlichen Verbesserung der Messgenauigkeit führen und ist somit ein entscheidender Faktor im Aufbau des Grenzstandsensors.

Darüber hinaus wurden am IMS CHIPS mehrere studentische Arbeiten durchgeführt, die sich mit Konzepten zur Implementierung der Signalverarbeitung für Grenzstandsensoren

befassten. Zusammenfassend wurde auf Basis der ausgewählten Photodioden eine Elektronik zur Signalverarbeitung konzipiert und realisiert.

Die Aufgabe der in Abbildung 2 dargestellten Elektronik besteht darin, zunächst die von den Photodioden aufgenommenen Fluoreszenzsignale mit Hilfe eines Transimpedanzverstärkers zu verstärken und anschließend zur Verbesserung des SNR die oben beschriebene Autobalancing-Schaltung in den Demonstrator zu integrieren. In mehreren Iterationen wurde die von IMS CHIPS entwickelte Leiterplatte verbessert, so dass Fortschritte bei der Verstärkung und der Bedienbarkeit erzielt wurden. Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass im Hinblick auf eine Miniaturisierung kein externes Netzteil zur Energieversorgung erforderlich



ist, da diese vollständig über die USB-Schnittstelle realisiert wird. Die Platine wurde zudem so ausgelegt, dass sie eine höhere Flexibilität bietet: Neben der Implementierung des Autobalancing-Verfahrens können Signal- und Referenzphotodiode nun separat erfasst und in

Abbildung 2: Transimpedanzverstärker und Autobalancing-Schaltung zur Auswertung der Photodioden

einer zusätzlichen Signalverarbeitungsstufe individuell vorverarbeitet werden.

3.4. Auswahl von Mikrowellengenerator und Design von GHz-Antennen zur Anregung der NV-Zentren im Diamant

Mit dem Ziel einer miniaturisierten elektronischen Steuerung und Auswertung des NV-Grenzstandsensors wurde der Windfreak SynthUSB3 als Mikrowellengenerator (MW-Generator) ausgewählt. Entscheidungskriterien waren der geringe Bauraum (Größe eines USB-Sticks), sowie eine ausreichende Ausgangsleistung und Frequenzgenauigkeit, bei gleichzeitig einfacher Ansteuerung über eine graphische Oberfläche oder eine serielle Schnittstelle. In Verbindung dazu wurden mehrere GHz-Antennen zur Anregung der NV-Zentren im Diamanten entworfen. Anhand einer Literaturrecherche ist zunächst eine passende Form (Omega-Struktur) für die GHz-Antenne ausgewählt worden. Verschiedene Konfigurationen von GHz-Antennen wurden unter Berücksichtigung der wesentlichen Anforderungen von Resonanzfrequenz, ausreichender Bandbreite und einer ausreichend

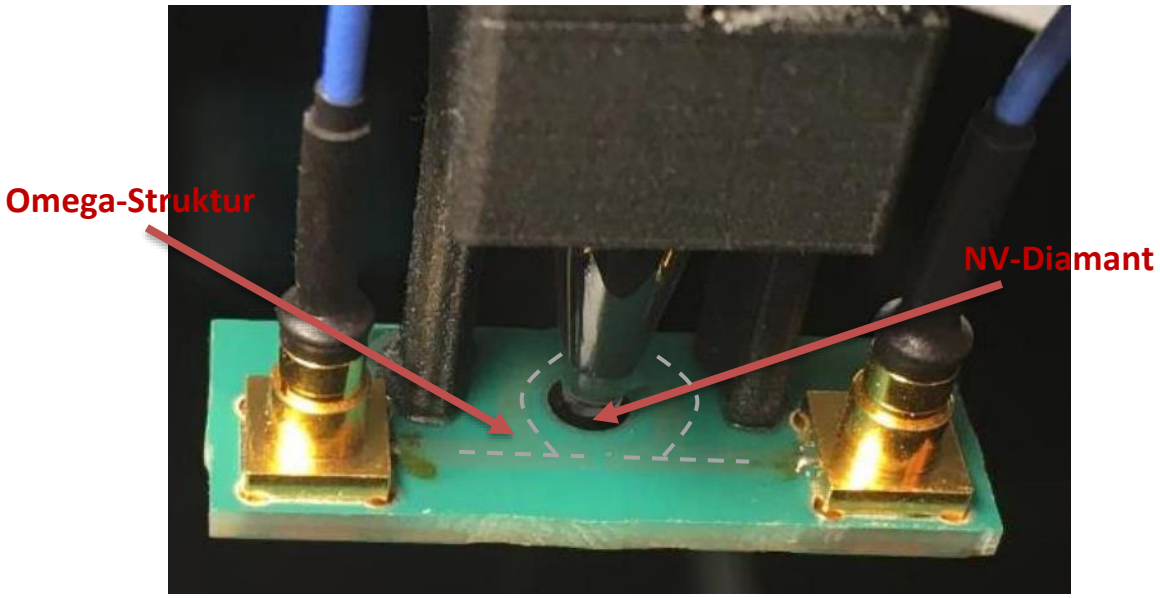


Abbildung 3: Am Grenzstanddemonstrator eingesetzte GHz-Antenne mit Omega-Struktur zur Anregung der NV-Zentren im Diamanten

hohen Homogenität des abgestrahlten Feldes simuliert und anschließend gefertigt. Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine gefertigte GHz-Antenne am Grenzstanddemonstrator. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die mit dem Netzwerkanalysator (Rohde & Schwarz ZNLE18) gemessenen S11-Parameter der entwickelten GHz-Antenne, anhand derer die Effizienz der gefertigten GHz-Antennen bestimmt wurde. Die S-Parameter zeigen zwar eine leichte Verschiebung der Resonanzfrequenz im Vergleich zur gewünschten

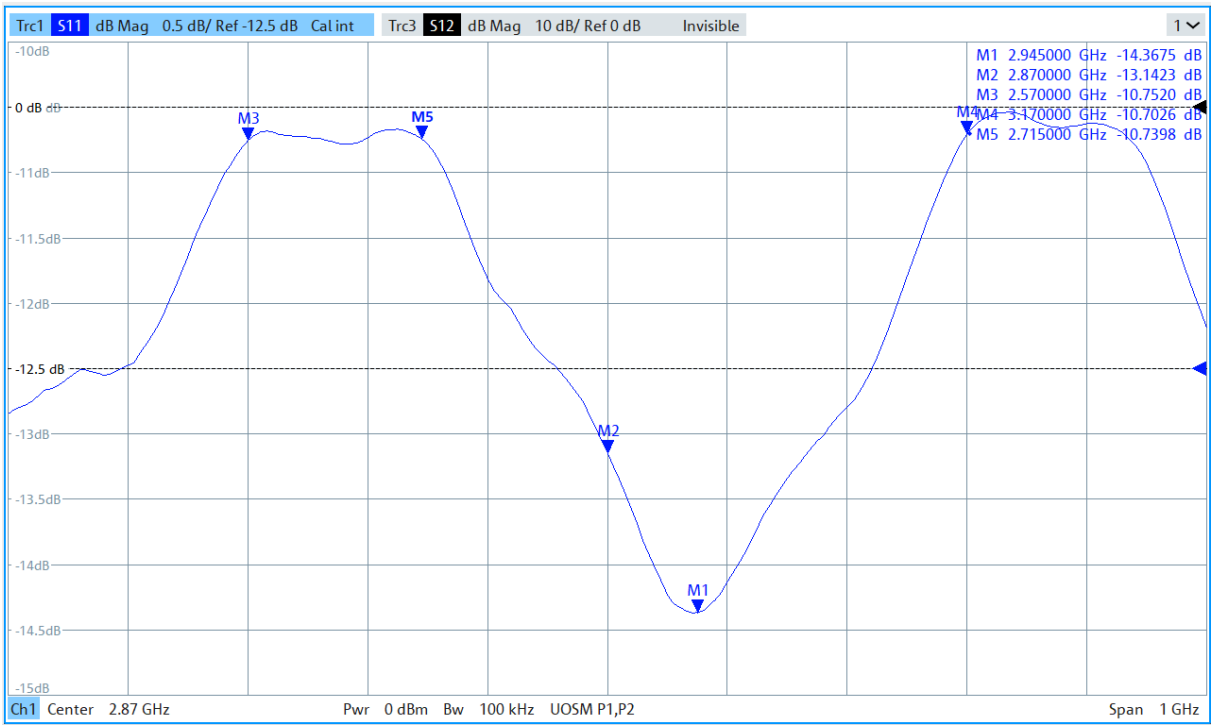


Abbildung 4: S-Parameter Messung der GHz-Antenne, gemessen mit dem R&S ZNLE18 Netzwerkanalysator

Resonanzfrequenz bei 2,87GHz, Praxistests am Grenzstanddemonstrator haben jedoch eine ausreichend starke Bandbreite und Homogenität des Feldes gezeigt.

3.5. Entwicklung einer Python-Umgebung zur Steuerung und Auswertung des NV-Grenzstanddemonstrators

Unter dem projektbezogenen Ziel, der Überführung einer möglichen Table-Top-Realisierung – also dem Einsatz von Tischgeräten zur Steuerung des NV-Sensors – in eine miniaturisierte Signalverarbeitung, wurde für den Grenzstanddemonstrator von IMS CHIPS zusätzlich eine Python-Umgebung zur Steuerung und Auswertung entworfen. Um die volle Funktionalität des Demonstrators umfassend bewerten zu können, sind damit systematisch ODMR-Messungen (Optically Detected Magnetic Resonance) mit unterschiedlichen NV-Diamanten durchgeführt worden. Dabei wurden die wesentlichen Anforderungen berücksichtigt, um einen NV-Diamanten mit optimalen Eigenschaften für die angestrebte Anwendung zu identifizieren.

Die Anregung der NV-Diamanten wurde mithilfe der von IMS CHIPS entwickelten Sensorsteuerung realisiert und gezielt im Hinblick auf die Erreichung einer maximalen Sensitivität charakterisiert und optimiert. In Abbildung 5 sind beispielhafte Messergebnisse von zwei NV-Diamanten dargestellt, wobei insbesondere wichtige Eigenschaften wie die Linienbreite (FWHM) und der Kontrast hervorgehoben sind. Bereits anhand der visuellen Darstellung lassen sich deutliche Unterschiede in der Performance der gezeigten Diamanten erkennen. Im rechten Teil der Abbildung ist es für den NV-Diamanten J11-K aufgrund der schlechteren Performance nicht möglich, eine Linienbreite oder Kontrast anzugeben, welche nahezu die Anforderungen des Grenzstanddemonstrators erfüllen kann. Simulationen vom IFM haben ergeben, dass für die Detektion eines Grenzstandübergangs zwischen Luft und Wasser, Linienbreiten im kleineren kHz-Bereich notwendig sind. Dies bestätigt, dass die Auswahl eines Diamanten mit entsprechender NV-Konfiguration der entscheidende Faktor im

Sensordesign ist und die Messqualität maßgeblich beeinflusst. Die Optimierung des NV-Diamanten seitens des 3. Physikalischen Instituts (PI3) ist daher essenziell, um eine hohe Signalqualität und damit eine entsprechende Funktionalität des Grenzstanddemonstrators zu ermöglichen.

Im linken Teil der Abbildung 5 sind hingegen die Intensitätsdips des NV-Diamanten X12 über der Frequenz deutlich zu erkennen.

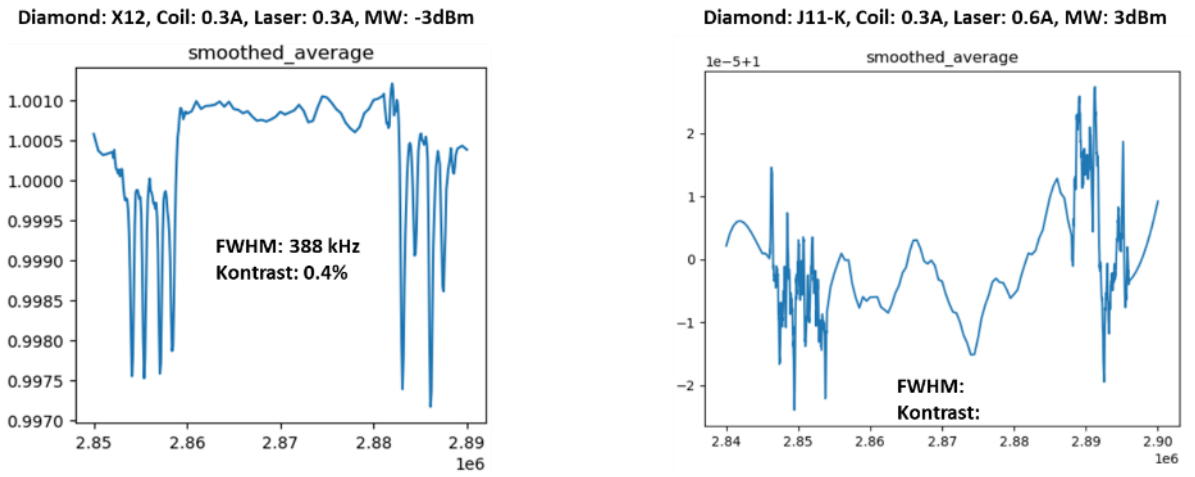


Abbildung 5: Beispielhafte Messergebnisse zweier NV-Diamanten am Grenzstanddemonstrator

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass mit dem von PI3 bereitgestellten (100)-Diamanten X12 die besten Messergebnisse erzielt wurden. Konkret konnte eine minimale Linienbreite von 388 kHz bei einem Kontrast von 0,4 % erreicht werden. Die Standardabweichung der Linienbreite bei NV-Diamant X12 beträgt 24,6 kHz. Zur Beantwortung der zentralen Projektfrage, ob die Applikation des NV-basierten Grenzstandsensors realisierbar ist, wurde eine abschließende Evaluierung des gemeinsam entwickelten Grenzstanddemonstrators vorgenommen. Für die Zielanwendung der Messung eines Grenzstandübergangs Luft/Wasser ist noch eine Verbesserung um den Faktor 2-4 in der Linienbreite beziehungsweise in der Standardabweichung der Linienbreite notwendig. Gemeinsame Evaluationen mit den Projektpartnern haben ergeben, dass dies bei Optimierung des NV-Diamanten, der Adaption des B0-Magnetfelds sowie einer weiteren Miniaturisierung zu einem stärker integrierten Aufbau durchaus möglich ist. Neben einem kompakteren Aufbau bietet eine Integration zugleich die Chance eines besseren SNRs.

Daneben wurde im Rahmen des Projekts die von IMS CHIPS entwickelte Python-Umgebung zur Steuerung und Auswertung des Sensors um weitere Funktionen ergänzt und optimiert. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, wurden nach und nach die Skripte zur Auswertung und Steuerung des Sensors dahingehend verbessert, dass typische ODMR-Messreihen teilautomatisiert durchgeführt werden konnten und die gewonnenen Messdaten gemäß der

Messspezifikation vollautomatisiert ausgewertet wurden. Daneben konnten mit der Python-Umgebung die einzelnen Komponenten zur Steuerung des Grenzstanddemonstrators gesteuert werden.

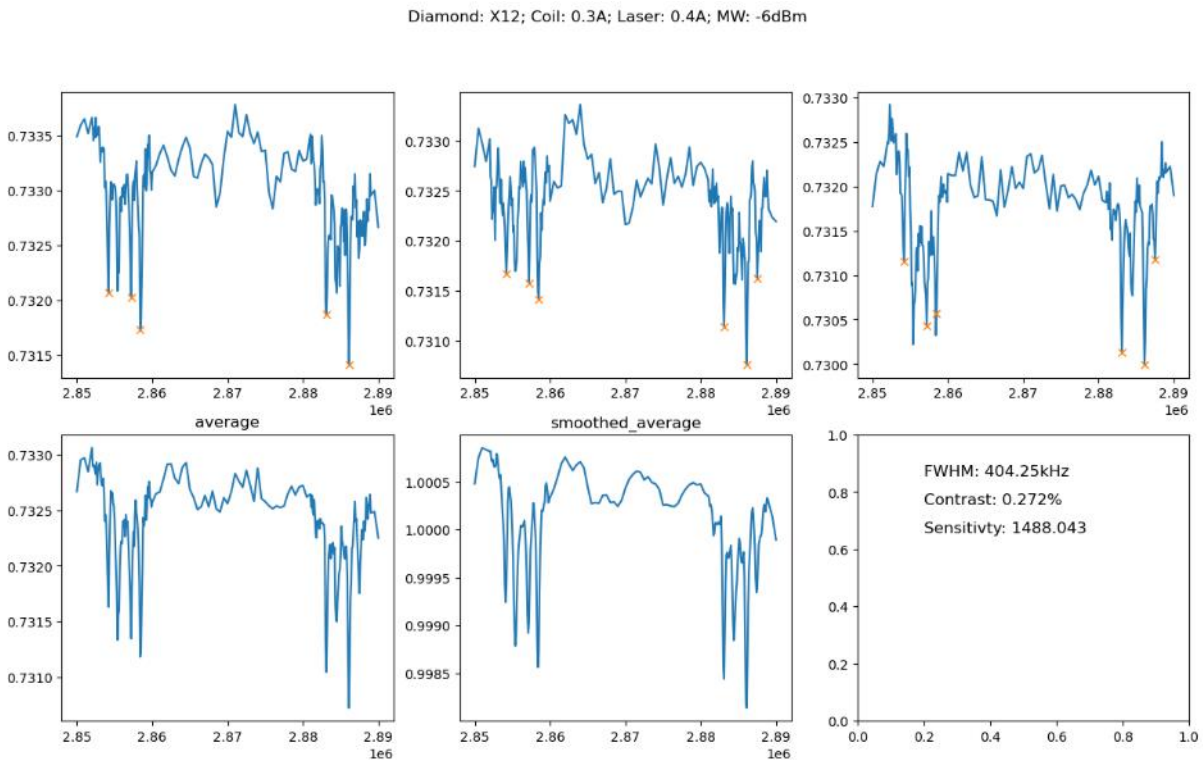


Abbildung 6: Automatisierte Auswertung einer Messreihe am NV-Diamanten X12

ODMR-Intensitätsdips werden automatisch erkannt, Mittelwerte aus verschiedenen Messungen gebildet, die Kurven geglättet und relevante Kennzahlen automatisiert berechnet. Dadurch wird der Aufwand für die Messdurchführung erheblich reduziert und die Fehleranfälligkeit durch den hohen Automatisierungsgrad deutlich verringert. Insgesamt konnten dadurch zuverlässigere und bessere Ergebnisse erzielt werden.

3.6. Miniaturisierung der Steuerungs- und Auswerteelektronik

Gemeinsam mit der Python-Umgebung bildete ein Xilinx Artix-7 FPGA auf einem Digilent Cmod A7-35T Evaluationsboard das Herzstück der integrierten Sensorsteuerung und -auswertung. Mit dem FPGA wurden die analogen Messdaten aus der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Signalverarbeitungselektronik über einen externen Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert und einer ersten Signalvorverarbeitung unterzogen. Bei der Auswahl des ADCs wurden zwei Varianten evaluiert und getestet. Ein schneller 12-bit SAR ADC (Digilent PMOD AD1) wurde einem langsamen 24-bit ADC (Digilent PMOD AD5) mit Sigma-Delta Modulator gegenübergestellt. Durch die Sigma-Delta Modulation lassen sich deutlich genauere Messergebnisse erzielen, da diese Technik eine hohe Auflösung und Genauigkeit über einen weiten Dynamikbereich ermöglicht. Allerdings ist die Signalverarbeitung bei Sigma-Delta Modulatoren im Vergleich zu anderen Verfahren, wie etwa der sukzessiven Approximation, langsamer. Ein Sigma-Delta ADC arbeitet nach dem Prinzip der Rauschformung und Überabtastung, um analoge Signale in digitale Daten umzuwandeln. Hierbei wird das Eingangssignal zunächst grob quantisiert, und der dabei entstehende Fehler

durch eine Rückkopplungsschleife kompensiert. Diese Schleife enthält einen Integrator, der das Signal kontinuierlich verarbeitet und das Rauschen in höhere Frequenzbereiche verschiebt, wo es anschließend durch ein Tiefpassfilter gefiltert werden kann. Das Ergebnis ist eine präzise Digitalisierung mit einem hohen SNR, ideal für Anwendungen, die Genauigkeit und Stabilität erfordern. Da der Grenzstandübergang von Luft zu Wasser im Tank in der Zielanwendung in der Regel ein langsamer Prozess ist, kann die geringere Verarbeitungsgeschwindigkeit zugunsten einer höheren Messgenauigkeit zunächst akzeptiert werden.

Um den nächsten Schritt der Miniaturisierung zu erreichen, wurde wie in Abbildung 7 dargestellt eine Messbox aufgebaut, die alle elektrischen Komponenten des Sensors zusammenfasst und die notwendigen Schnittstellen zur Außenwelt besitzt. Dadurch ist die gesamte Elektronik in einem kompakten Gehäuse integriert und arbeitet vollständig unabhängig von externen Tischgeräten. Über einen USB-Anschluss kann die Messbox an einen Computer zur Datenübertragung und Energieversorgung angeschlossen und der NV-Grenzstandsensor angesteuert und ausgelesen werden.

Abbildung 7: Messbox zur elektronischen Steuerung und Auswertung des NV-Grenzstandsensors

3.7. Design eines integrierten FPGA-basierten Lock-in-Verstärkers zur Verbesserung der Sensitivtät des NV-Sensors

Basierend auf den Erkenntnissen der ODMR-Messreihen wurde festgestellt, dass ein Lock-In Verstärker nochmals einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Sensitivität haben könnte. Für QSens-Projekte mit Fokus auf miniaturisierte Systemarchitekturen sind konventionelle Lock-In Tischgeräte (z.B. Zürich Instruments MFLI) jedoch ungeeignet, da deren Bauraum und Leistungsaufnahme in einem produktreifen NV-Sensor nicht umsetzbar sind. Daher sind im Rahmen des Projekts mehrere Vorkehrungen zur Einbeziehung eines vollständig FPGA-basierten, integrierten Lock-in-Verstärkers gestartet worden. In der entworfenen Messbox ist Platz vorgesehen, den digitalen Lock-in-Verstärker vollständig zu integrieren, die Codeentwicklung sowie dessen Evaluierung sind erfolgreich abgeschlossen. **Fehler!**

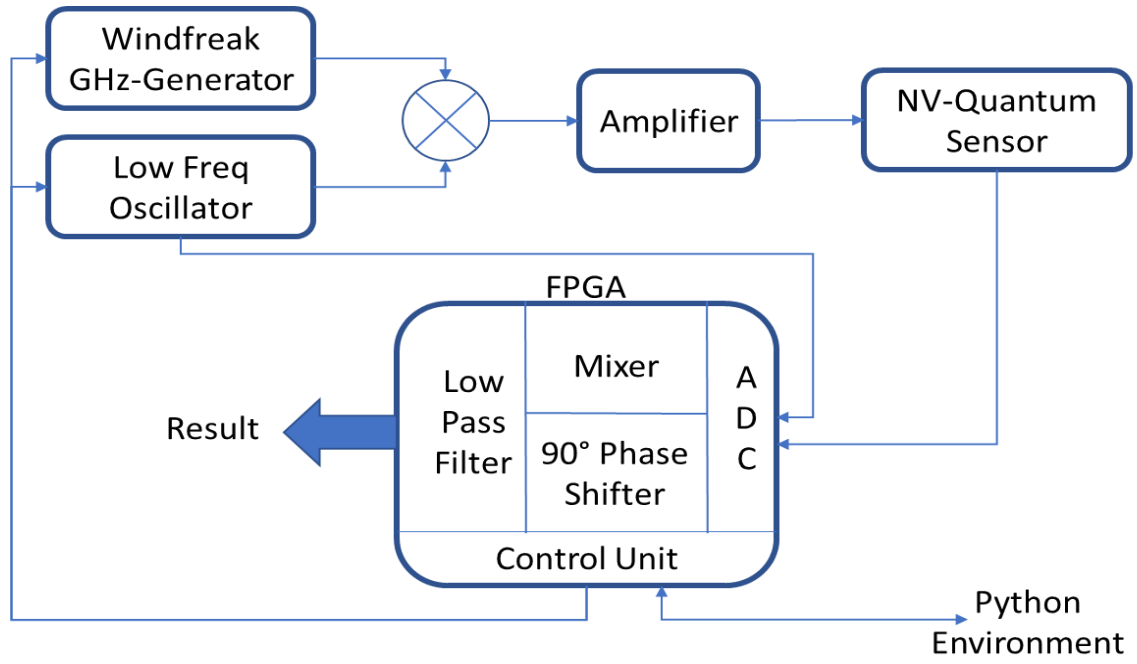


Abbildung 8: Blockschaltbild des FPGA-basierten Lock-in-Verstärkers mit allen notwendigen

Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

Abbildung 8 zeigt ein Blockschaltbild des FPGA-basierten Lock-in-Verstärkers mit allen notwendigen Zusatzkomponenten zur Modulation des Mikrowellensignals. Für die notwendige niederfrequente Modulation des Mikrowellengenerators wurde der Waveform Click Oszillator von MikroE verwendet und anhand des Mini Circuits ZFM-4212+ Mixer mit der GHz-Mikrowelle des Windfreak SynthUSB3 moduliert. Optional können anhand des rauscharmen Mini Circuits ZX60-63GLN+ Verstärkers einzelne Signale verstärkt werden. Für die Verarbeitung der Ausgangssignale wurde der oben erwähnte 12-bit SAR ADC eingesetzt, sodass folgend der auf dem FPGA implementierte Lock-in-Verstärker die Daten auswerten kann. Der von IMS CHIPS auf dem FPGA realisierte VHDL-Code besteht im Wesentlichen aus einem Mixer zur Demodulation, einer 90° Phasenverschiebung mittels Hilbert Transformation, sowie einem digitalen Tiefpassfilter. Zur Steuerung der Einzelkomponenten wurde daneben

auf dem FPGA eine digitale Steuerungseinheit realisiert, mit der das Lock-in System mit allen externen Komponenten gesteuert werden kann.

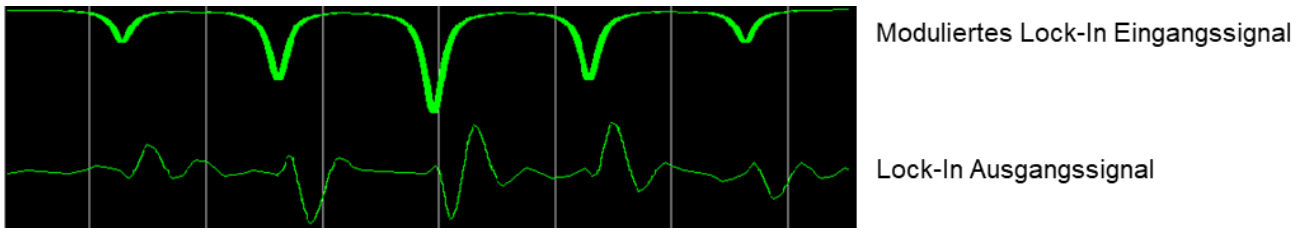


Abbildung 9: Simulationsergebnisse des vollständig FPGA-basierten Lock-in-Verstärkers

Wie Abbildung 9 zeigt, wurden bereits erfolgreiche Integrationstests basierend auf einer Simulation durchgeführt. Das Lock-In-Ausgangssignal, das als rauschreduzierte Ableitung des Eingangssignals interpretiert werden kann, ermöglicht die eindeutige Identifikation der Fluoreszenzintensitätsminima (Dips) in Abhängigkeit von der Mikrowellenfrequenz. Diese Signalbearbeitung führt zu einer signifikanten Steigerung der Messgenauigkeit, da die charakteristischen Resonanzstellen des NV-Zentrums präzise lokalisiert werden können. Eine wissenschaftliche Veröffentlichung des FPGA basierten Lock-In Verstärkers für den Grenzstandsensor ist geplant. Die im Rahmen von QIND seitens IMS CHIPS erlangten Ergebnisse, insbesondere der FPGA basierte digitale Lock-In Verstärkers können in weiteren QSens-Projekten der zweiten Phase, etwa QHMI2, evaluiert und verwertet werden, sodass insgesamt eine verbesserte Signalverarbeitung unter realen Einsatzbedingungen ermöglicht wird.

Abschließend lässt sich sagen, dass die von IMS CHIPS im Rahmen des QIND-Projekts verantworteten Entwicklungsarbeiten vollständig umgesetzt wurden. Dazu zählen die Konzeption des Grenzstanddemonstrators, die Auswahl und Evaluation geeigneter Photodioden, das analoge Schaltungsdesign sowie die Entwicklung von Mikrowellenantennen zur NV-Anregung. Ergänzt wurde dies durch die Miniaturisierung der Steuerungselektronik, das Design eines integrierten Lock-in-Verstärkers und die Implementierung einer umfassenden Python-Umgebung zur Steuerung und Auswertung. Die entwickelten Komponenten wurden in einem funktionsfähigen Demonstrator integriert. Mit diesem wurden aussagekräftige ODMR-Messungen durchgeführt und die Sensorperformance iterativ optimiert.

Das entworfene FPGA-basierte Steuerungs- und Auswertesystem bildete einen wichtigen Meilenstein und bietet Potential für weiterführende Anwendungen in der nächsten Phase von QSens.