

Kurzbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt: Optisch gepumptes Magnetometer basierend auf freier Präzession von Spin-Ausrichtung (FRAPOPM)

Teilvorhaben: Sensorkonzept, Integration Sensorkopf und Benchmarking (Leibniz-IPHT)

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (Leibniz-IPHT)

Förderkennzeichen: 01DS21006

Laufzeit des Vorhabens: 15.04.2021 – 30.09.2024

1. Kurzbericht

Das Verbundprojekt FRAPOPM im Rahmen des Aufrufs WBC2019 des BMBF zwischen dem Leibniz-IPHT in Jena und dem Institut für Physik Belgrad (IPB) in Serbien erforschte eine neuartige Implementierung eines optisch gepumpten Magnetometers (OPM). Dieses basiert auf der Generation und Auslese von Spin-Ausrichtung von in hermetischen Dampfzellen eingeschlossenen atomaren Dämpfen, hier stabilem Cäsium. Die elektronischen Spin-Zustände des Cäsiums werden durch die Einstrahlung von schmalbandigem, spektral abgestimmtem, linear polarisiertem Licht polarisiert. Es wird hierbei nicht wie sonst in OPMs üblich eine Spin-Orientierung, sondern ein höheres Polarisationsmoment, die Spin-Ausrichtung generiert und ausgelesen. Die Wechselwirkung dieses Polarisationszustandes mit dem äußeren, zu messenden Magnetfeld wird über die Änderung der optischen Eigenschaften der Atome detektiert. Das kann mit dem gleichen Lichtstrahl geschehen, welcher zur Generation der Polarisation verwendet wird, indem dessen Lichtleistung gepulst geändert wird, oder mit einem zweiten Lichtstrahl aus einer anderen Quelle. Die Größe des Magnetfeldes ist durch die Oszillationsfrequenz der detektierten abklingenden Signale gegeben und kann so sehr empfindlich, bis unterhalb von $1 \text{ pT/Hz}^{1/2}$, bestimmt werden. Die Projektpartner konnten hier auf bereits etablierte Methoden zur Charakterisierung und Vorarbeiten zum Verständnis der zugrunde liegenden Physik zurückgreifen. Zusätzlich verspricht die Nutzung der Spin-Ausrichtung gegenüber der Spin-Orientierung stark reduzierte systematische Messfehler, z.B. bei Rotation des Sensors gegenüber der Magnetfeldrichtung. Dies konnte erstmals im Projekt durch Messungen im Labor nachgewiesen werden. Die Abhängigkeit der Messung von der Orientierung des Sensors (sog. Richtungsfehler) lag für eine Drehung innerhalb eines Halbraumes unterhalb von 1 pT in einem Magnetfeld von $2 \text{ } \mu\text{T}$ Stärke. Die Messung war dabei begrenzt durch die zeitliche Stabilität des Magnetfeldes innerhalb der magnetischen Abschirmung. Für Magnetfelder im Größenbereich des (mitteleuropäischen) Erdmagnetfeldes (um $50 \text{ } \mu\text{T}$) war die Messung stark durch die technische Herausforderung der Felderzeugung (zeitliche Stabilität, räumliche Homogenität) limitiert.

Es wurden Studien sowohl in glasgeblasenen Zellen mit innerer Paraffin-Antirelaxationsbeschichtung wie auch in miniaturisierten, zusätzlich mit Stickstoff gefüllten Zellen des Leibniz-IPHT durchgeführt. Die experimentellen Resultate wurden durch algebraische und numerische Berechnungen validiert. Für die Experimente in beiden Gruppen wurde eigens eine frei verfügbare Software in Python geschrieben, welche es gestattet, die Systemparameter zu optimieren, indem wichtige Kenngrößen wie Signalgröße, Abklingzeit und magnetometrische Sensitivität direkt aus den Messdaten extrahiert, angezeigt und abgespeichert

werden. Die Resultate zeigten das große Potential des Ansatzes für Anwendungen, in denen der Sensor bewegt im Erdmagnetfeld eingesetzt werden soll, zum Beispiel zur geophysikalischen Prospektion auf mobilen Plattformen.

Im zweiten Teil des Projektes wurde arbeitsteilig zwischen den Projektpartnern ein transportabler Demonstrator, bestehend aus Sensorkopf und maßgeschneiderter Sensorelektronik, aufgebaut, welcher das neue Prinzip anwendet und seine Vorteile in der Anwendung, maßgeblich für die Geophysik, nachweisen sollte. Es wurde eine Methode zum Betrieb des OPM entwickelt, welche die bislang nötigen aber in vielerlei Hinsicht nachteiligen externen Amplitudenmodulatoren vermeidet. Stattdessen wird die Funktionalität über zwei separate Laserdioden, welche entsprechend schnell strommoduliert werden, implementiert. Die technische Herausforderung bestand hierbei, gleichzeitig die Laserfrequenz auf die atomaren Übergänge der Cäsiumatome zu stabilisieren.

Eine zentrale Herausforderung des Sensorkonzepts stellt die gewünschte Signalverarbeitung in Echtzeit dar, wobei die Oszillationsfrequenz des Signals hochgenau bestimmt werden muss. Es wurde hier ein Ansatz basierend auf kommerziellen FPGA-Platinen erfolgreich erprobt. Die Implementierung dieser Algorithmen erwies sich als deutlich schwieriger als angenommen, sodass trotz des sehr zeitigen Beginns der Arbeiten im Projekt eine starke Verzögerung gegenüber der ursprünglichen Projektplanung auftrat. Die Aufbauten des Sensorkopfes konnten gemäß dem erarbeiteten Konzept realisiert werden. Der Unterauftrag des serbischen Partners an eine Firma zur Realisierung der finalen Sensorelektronik konnte nicht fristgerecht vergeben und ebenso nur mit starker Verzögerung fertiggestellt werden. Der Demonstratoraufbau konnte so nur stark verzögert in einer ersten Version zum Projektende fertig gestellt werden, jedoch in der Projektlaufzeit nicht mehr vollständig charakterisiert und in der Anwendung getestet werden. Hier sind zukünftig weitere Arbeiten notwendig.

Die Forschung in FRAPOPM führte zu neuen Ideen und Resultaten auch abseits des ursprünglichen Projektplanes, zum Beispiel dem tiefen theoretischen Verständnis von beobachteten dynamischen Phasenfehlern in Mx-OPMs unter Drehungen. Das erzielte Verständnis der (wie sich zeigte) fundamentalen Limitierungen der Mx-OPMs als eine bereits kommerziell etablierte Implementierung der Sensoren, gibt dem neuen im Projekt untersuchten Ansatz weiteres Gewicht.

Innerhalb des Projektes fanden vier Arbeitsaufenthalte der Partner bei der jeweils anderen Seite statt, durch regelmäßige Online-Meetings konnte der Kontakt beider Gruppen und Institutionen weiter gefestigt werden. Während der Projektlaufzeit konnten zwei Mitarbeitende des Projektes erfolgreich ihre Doktorarbeiten abschließen (Miloš Subotić und Marija Ćurčić) und sind weiterhin in Serbien in der Forschung tätig. Die Doktoranden und Mitarbeitenden hatten Gelegenheit ihre Resultate regelmäßig innerhalb der Projekt-Meetings, aber auch mehrfach vor einem Fachpublikum zu präsentieren. Die Resultate der Arbeiten wurden unter anderem in zwei eigenen eintägigen Projektworkshops präsentiert und diskutiert. Die Ergebnisse wurden in insgesamt 24 Vorträgen (maßgeblich durch die Nachwuchswissenschaftler im Projekt, jedoch auch über sechs eingeladene Vorträge der Projektverantwortlichen beider Seiten), zwei Poster, sowie zwei Publikationen in wissenschaftlichen Journalen (derzeitiger Status: eingereicht) veröffentlicht.

Ausführlicher Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt: Optisch gepumptes Magnetometer basierend auf freier Präzession von Spin-Ausrichtung (FRAPOPM)

Teilvorhaben: Sensorkonzept, Integration Sensorkopf und Benchmarking (Leibniz-IPHT)

Zuwendungsempfänger: Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (Leibniz-IPHT)

Förderkennzeichen: 01DS21006

Laufzeit des Vorhabens: 15.04.2021 – 30.09.2024

Ausführlicher Sachbericht

AP 1: FRAP-OPM im Laboraufbau (Leibniz-IPHT, IPB)

Teilpaket 1.1: Konzeption

Der Laboraufbau wurde jeweils in Jena und Belgrad in allen Einzelkomponenten konzeptioniert und zusammengestellt. Im Jenaer Aufbau wird die Cs-Dampfzelle innerhalb einer fünfzähligen Mu-Metall-Abschirmung platziert, um das äußere Magnetfeld und magnetische Störungen zu unterdrücken. Innerhalb der Schirmung kann das zu messende statische Magnetfeld in Richtung und Größe über ein dreiaxsiges Spulensystem vorgegeben werden. Das für die Messung verwendete Licht (895 nm) wird durch ein kommerzielles Diodenlasersystem bereitgestellt, in einen faserbasierten Amplitudenmodulator eingekoppelt und per Faser zum Experiment geleitet. Die Wellenlänge des Lasers muss hochgenau stabilisiert werden. Dazu wurde ein Aufbau erstellt, um auf den Laser auf dopplerfreie Absorptions-Features der Cäsium-D1-Linie mittels einer Referenzzelle „locken“ zu können. Das Licht wird auf dem optischen Tisch des Experiments aus der Faser ausgekoppelt, linear polarisiert und durchstrahlt die Magnetometerzelle. Das durch die Zelle transmittierte Licht wird durch eine Photodiode detektiert. Der resultierende Fotostrom wird durch einen Transimpedanzwandler in eine proportionale Spannung gewandelt, welche mittels eines USB-Oszilloskops (TiePie HS5) digitalisiert wird. Dieses Oszilloskop dient auch als Signalquelle zur Steuerung des Amplitudenmodulators zum Betrieb des OPMs basierend auf *free spin precession* (FSP) und dem neuen Verfahren *free alignment precession* (FAP).

Basierend auf der USB-Schnittstelle des Oszilloskops wurde eigens ein Python-Messprogramm erarbeitet, welches zur Erprobung und Vergleich von FSP und FAP-Prinzip an beiden Versuchsaufbauten (in Belgrad und Jena) verwendet wurde (siehe Abb. 1). Das Programm erlaubt die Konfiguration der zum Amplitudenmodulator gesendeten Parameter wie Steuerspannung, die Einstellung von Modulationsfrequenz, Tastweite (engl. *duty cycle*) und Periodendauern von Pump- und Auslesezyklus, sowie Abtastrate, Eingangskopplung und Eingangsbereich des USB-Oszilloskops. Dort kann ebenso das resultierende Ausgangs- und Eingangssignal betrachtet werden. Weiterhin erlaubt das Programm eine automatisierte Auswertung

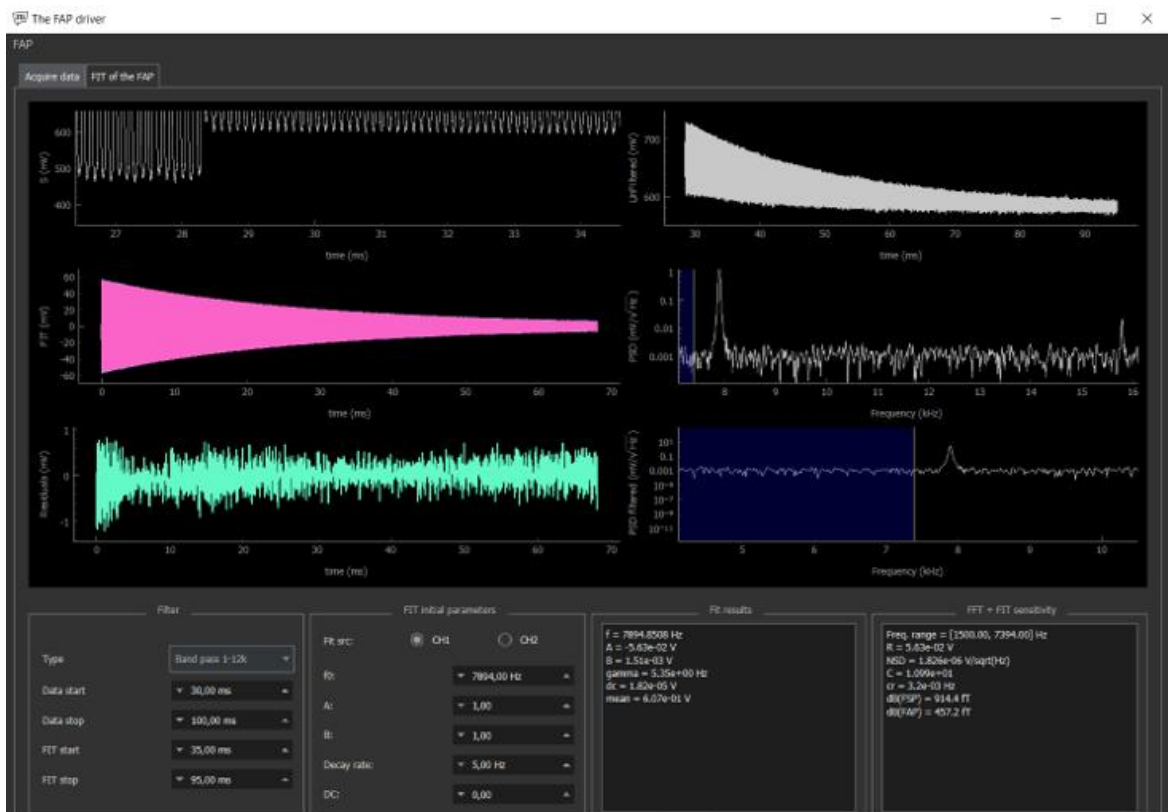
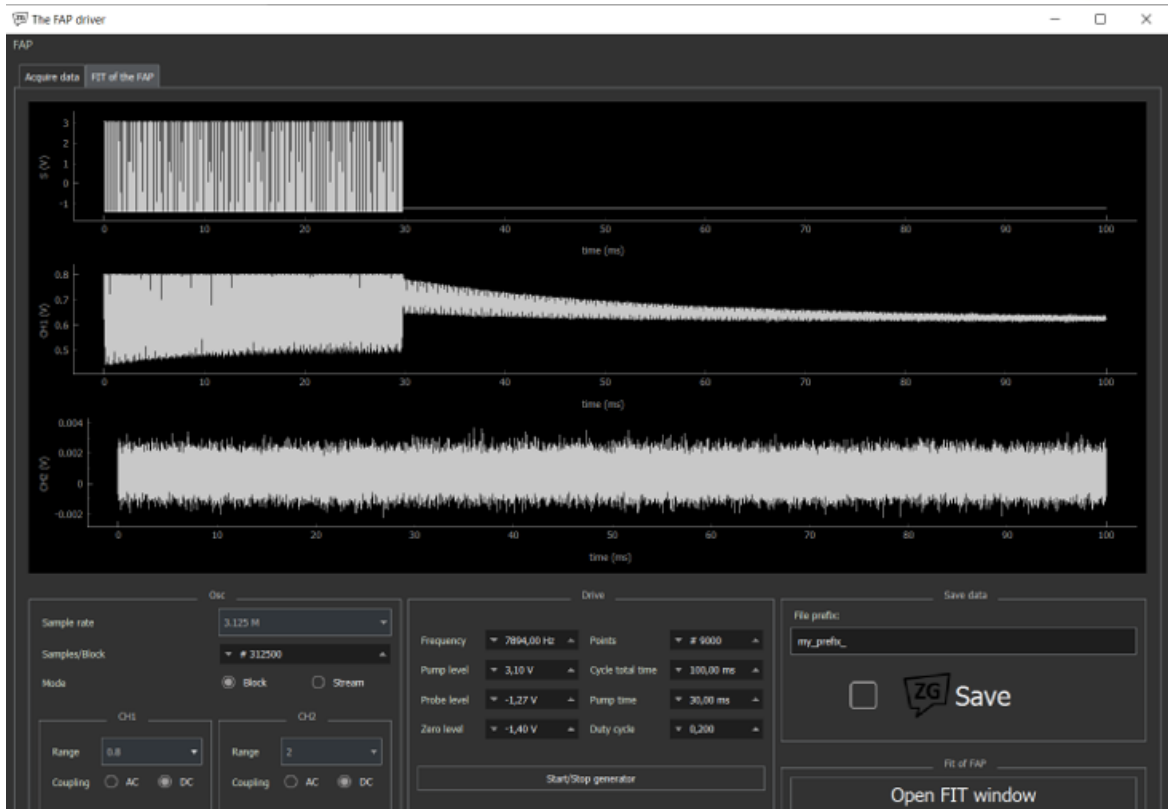


Abbildung 1: Bildschirmausschnitte des Messprogramms. Oben: Konfiguration und Anzeige des Steuersignals an den Amplitudenmodulator, sowie erfasstes Rohsignal. Unten: In Echtzeit gefilterte Daten mit Fitting-Kurve (in rosa) und deren Modellparametern sowie automatisch berechneter FFT.

der aufgenommenen Messdaten, indem das erhaltene Signal durch Kurvenanpassung mit der entsprechenden Signalform (basierend auf Resultaten vorheriger analytischer Rechnungen, TP 2.1) durch eine Levenberg-Marquardt-Routine angepasst („gefittet“) wird. Aus dem Fit können aufschlussreiche Parameter direkt extrahiert werden (Signalamplitude, Lebensdauer der Spinpolarisation /-ausrichtung, Magnetfeldauflösung berechnet im Cramer-Rao-Limit). Das Programm wurde von beiden Gruppen verwendet und sukzessive am Messaufbau weiterentwickelt. Die neueste Version bietet die Option zum synchronisierten Messen von bis zu vier Signalen, sowie die Vereinfachung der Bedienung durch erweiterte Speicheroptionen und beschleunigt die Messungen durch das automatische Verwenden von durch den Fit ermittelter Parameter für die nächste Messung. Das Programm ist frei auf Github (<https://github.com/zoran-grujic/FAP-TiePie>) verfügbar.

Teilpaket 1.2: Laboraufbau Puffergas-Zelle (Leibniz-IPHT)

Nach einiger Vorlaufzeit konnten im zweiten Quartal des Jahres 2022 erste miniaturisierte Puffergaszellen am Leibniz-IPHT realisiert werden, welche mit transparenten leitfähigen Dünnschichten ausgestattet sind und so elektrisch geheizt werden können, ohne dass es zu einem störenden Beschlag der Zellfenster mit metallischem Cäsium kommt. Die Zellen sind weltweit einzigartig. Diese Zellen (siehe Abb. 2 rechts) wurden daraufhin auf ihre Eignung für den Einsatz im *Free-Alignment-Precession*-OPM untersucht. Im Gegensatz zu den bislang verwendeten großen glasgeblasenen Paraffin-beschichteten Zellen sind diese Zellen mit Puffergas (hier Stickstoff) befüllt, wodurch die optischen Eigenschaften dieser Zellen gegenüber der bisher verwendeten deutlich verschieden sind. Durch die verbreiterten optischen Absorptionslinien dieser Zellen bieten diese die Aussicht, in robusten Sensorsystemen einfacher betrieben werden zu können. Die Anforderungen an die Frequenzstabilisierung der Lichtquelle (hier Laserdioden) sind geringer. Gleichzeitig war aber nicht *a priori* klar, ob und wie effizient in diesen Zellen für unser Funktionprinzip benötigte höhere Spinnomente (engl. *spin alignment*) erzeugt und ausgelesen

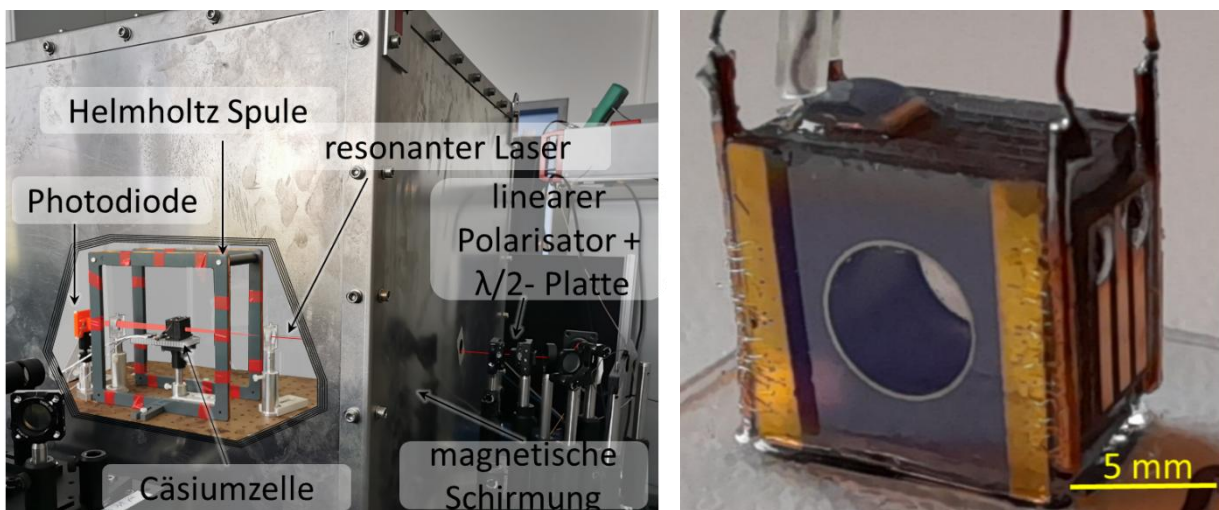


Abbildung 2: Laboraufbau am Leibniz-IPHT zum Studium des *Free Alignment Precession* (FAP) OPM (links) und eine Großaufnahme einer Puffergaszelle mit beheizbaren Fenstern (rechts).

werden können¹. Durch ihre kompakte Größe müssen diese Zellen allerdings (elektrisch) geheizt werden.

Schon in ersten Tests der Puffergaszelle konnten erstmals *spin alignment precession* Signale gemessen werden. Allerdings führte die nötige elektrische Beheizung der optischen Fenster im Betrieb zu einem erhöhten weißen Rauschniveau und einer deutlich reduzierten Spin-Polarisationslebensdauer. Durch Abschaltung der Heizung nach erfolgreicher Aufheizung lässt sich das erhöhte Rauschen eliminieren (siehe Abb. 3). Auch die Spin-Polarisationslebensdauer steigt an und ist je nach Temperatur vergleichbar mit der Lebensdauer in den mit Paraffin beschichteten Zellen.

Durch eine neu entworfene und zusätzlich in die Magnetfeld-Abschirmung eingebaute Helmholtz-Spule (siehe Abb. 2 links) wurde des Weiteren die Homogenität des statischen Magnetfeldes innerhalb unserer Abschirmung verbessert. Es wurden außerdem in ausführlichen Messungen auch mit anderen Referenzsensoren zusätzliche Rauschquellen in unserer Messumgebung identifiziert und so weit möglich

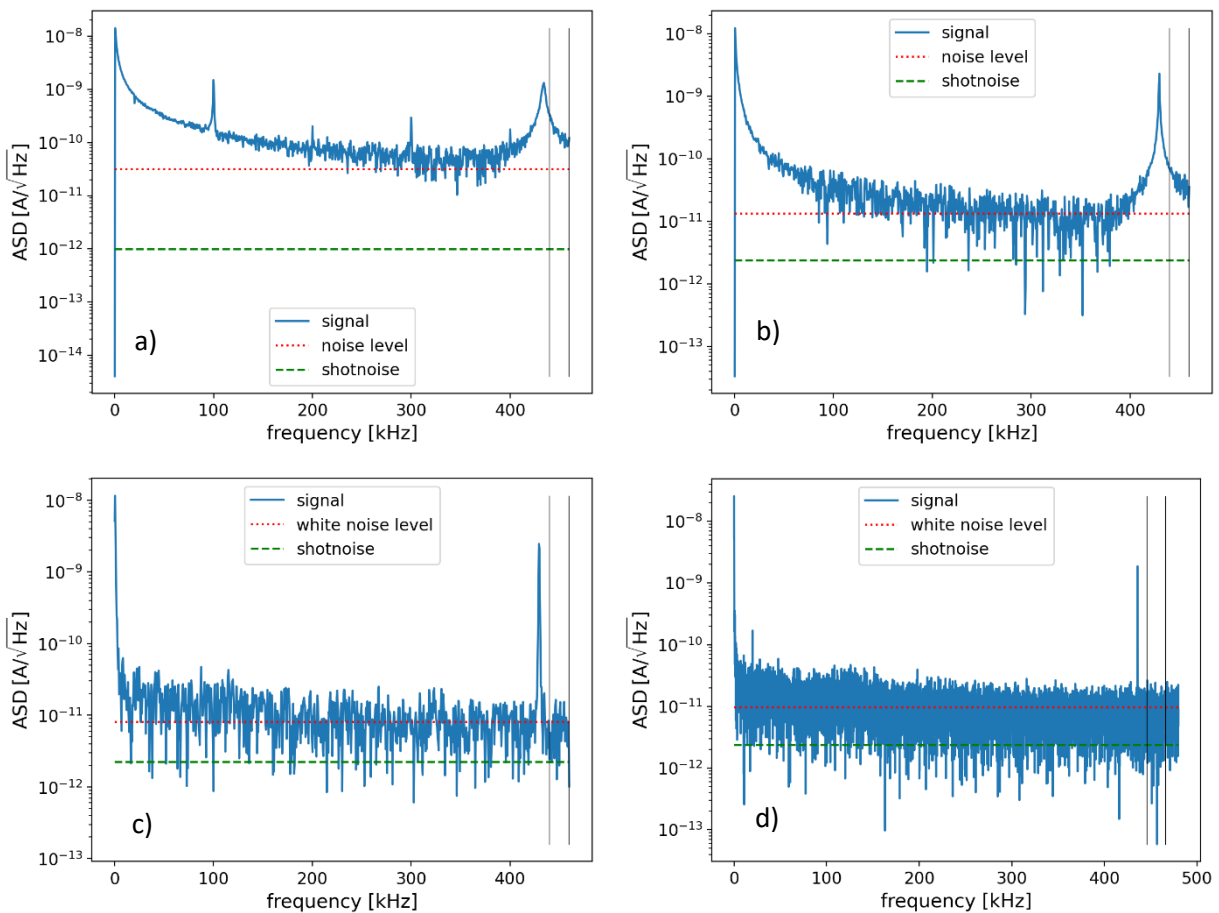


Abbildung 3: Spektrum der Puffergas Zellen (a-c), a) aktive geheizte Zelle mit ca. 80°C, b) nicht aktiv geheizte Zelle bei ca. 70°C und c) nicht aktiv geheizte Zelle ca. 40°C. Im Vergleich zeigt d) das Spektrum einer paraffinbeschichteten Zelle bei Raumtemperatur. Rauschniveau und Signal-zu-Rauschverhältnis sind vergleichbar, wenn der Heizer nicht aktiv ist.

¹ siehe dazu u.a. M. Auzinsh, D. Budker, and S. M. Rochester, *Light-induced polarization effects in atoms with partially resolved hyperfine structure and applications to absorption, fluorescence, and nonlinear magneto-optical rotation*, Phys. Rev. A 80, 053406 (2009).

reduziert bzw. eliminiert (siehe TP 4.1). Es konnte so eine schrotrausch-begrenzte Sensitivität von $1,4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ demonstriert werden, nahe des im Meilenstein 1 avisierten Wertes von $1,0 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Die experimentell bestimmte Auflösung lag bei ca. $3,5 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ und war durch die Stabilität des generierten Magnetfeldes begrenzt, obwohl diese hier bereits $6 \cdot 10^{-8}$ ($3,5 \text{ pT} / 62 \text{ } \mu\text{T}$) betrug. Schon dieser Wert ist nicht mit kommerziell erhältlicher Messtechnik zu erzielen, sondern konnte nur dank einer am Leibniz-IPHT selbstgebauten ultrastabilen Stromquelle zum Betrieb der Magnetfeldspulen realisiert werden.

Es zeigte sich, dass die Puffergas-Zellen eine sehr interessante Alternative zu den paraffinbeschichteten Zellen darstellen. Es wurde daher entschieden, dass die beiden Konzepte bis hin zum Demonstrator zunächst parallel verfolgt werden sollten: das Leibniz-IPHT nutzt für den Demonstrator eigene Puffergaszellen, das IPB arbeitet weiterhin mit Paraffin-Zellen (siehe dazu Arbeitspaket 3). Die Sensorelektronik wird so flexibel ausgelegt, dass beide Arten von Sensoren auslesbar waren.

Teilpaket 1.3: Laboraufbau Paraffin-Zelle (IPB)

Das Teilpaket wurde fast ausschließlich vom serbischen Projektpartner bearbeitet und ist ausführlich in dessen Bericht dokumentiert, insbesondere die Vermessung des Richtungsfehlers des neuen FAP-OPMs. Diese Variante des Laboraufbaus eines FAP-OPM konnte die im Meilenstein 1 anvisierte Sensitivität von $0,88 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ bei 1 Hz demonstrieren.

AP 2: Simulationsrechnungen (IPB, Leibniz-IPHT)

Teilpaket 2.1: Algebraische Spin-Dynamik-Rechnungen (IPB)

Als Startpunkt der Beschreibung der Spin-Dynamik des im Projekt untersuchten FAP-OPM-Regimes wurde das bereits durch Vorarbeiten besser verstandene Mx-Magnetometer gewählt. Im Laufe der parallelen experimentellen Arbeiten am IPB tauchte erneut ein bislang unverstandenes Phänomen bei diesem auf. Aufgrund der Relevanz des Mx-Magnetometers in der Praxis (es gibt bereits zahlreiche kommerzielle Anbieter vor allem für geophysikalische Messungen, also dem auch potentiellen Einsatzfeld eines FAP-OPMs) sollte dieses besser verstanden werden. Im Experiment wurden Phasenfehler beim sog. „echt skalaren“ Mx-OPM beobachtet, welche auftreten, wenn sich die Richtung des zu messenden Magnetfeldes ändert. Dies ist unerwartet, da sich der Messwert eines solchen Sensors nur ändern sollte, wenn sich die Stärke des Magnetfeldes ändert (sog. skalarer Sensor). So wurde abweichend vom eigentlichen Projektplan, auch aufgrund der hohen wissenschaftlichen Relevanz, beschlossen, sich diesem Phänomen mit algebraischen Rechnungen am IPB zu widmen.

Es konnten durch Behandlung des Problems mit Hilfe modifizierter Bloch-Gleichungen analytische Ausdrücke abgeleitet und mit Hilfe von Wolfram Mathematica² gelöst werden. Weitere Details hierzu sind im Bericht des serbischen Partners ausgeführt.

Die Resultate wurden auf Fachtagungen präsentiert und mündeten in ein Manuskript, welches zur Begutachtung eingereicht wurde.

² <https://www.wolfram.com/mathematica/>

Teilpaket 2.2: Dichtematrix-Berechnungen (Leibniz-IPHT)

Es wurden numerische Simulationen in Mathematica unter Verwendung des *atomic matrix density (ADM) package* durchgeführt. Zunächst konnte gezeigt werden, dass in der Simulation die beobachteten Signale des Experiments gut reproduziert werden können, auch wenn das simulierte atomare System stark vereinfacht wird, indem z.B. nur ein einzelner Hyperfeinübergang der Cs-D1-Linie betrachtet wird und auch die Relaxationsprozesse der generierten Spinpolarisation (Orientierung und Ausrichtung) zunächst als uniform und isotrop angenommen werden, um das Modell zu vereinfachen.

Es wurden insbesondere zwei verschiedene Betriebsmodi des FAP-OPM untersucht:

1) Rechteck-Modulation des Pumplichtes bei der Larmorfrequenz der Atome. Die resultierenden simulierten Signale enthalten neben dem Gleichanteil Anteile bei der Larmorfrequenz der Atome und bei der zweifachen Larmorfrequenz. Es wurde verifiziert, dass die Abhängigkeit dieser beiden Frequenzkomponenten vom Abstellwinkel des statischen Magnetfeldes verschieden ist und dieser Betriebsmodus daher Richtungsinformation zum Magnetfeldvektor liefern kann. Es wurde gefunden, dass die Auswertung eines solchen zweikomponentigen Signals aufwändiger und mit größerem Fehler behaftet (durch eine höhere Anzahl freier Parameter des Modells, welches zur Anpassung der Mess- wie auch der Simulationsdaten verwendet wird) ist als im zweiten untersuchten Betriebsmodus.

2) Rechteck-Modulation des Pumplichts bei der zweifachen Larmorfrequenz der Atome. Die resultierenden Signale enthalten neben dem Gleichanteil nur einen Anteil bei der zweifachen Larmorfrequenz. Ein solches monochromatisches Signal enthält zwar keine Richtungsinformation zum Magnetfeld, ist aber deutlich effizienter (gerade in der geplanten Echtzeit-Datenanalyse) zu analysieren. Basierend darauf wurde entschieden, den Demonstrator auf diesen Betriebsmodus auszuliegen.

Ursprünglich sollte noch der Einfluß des für den Betriebsmodus verwendeten Hyperfeinübergangs der Cs-D1-Linie auf die Kennzahlen des FAP-OPM sowie eines in seiner Stärke gewichteten gleichzeitigen Betriebs auf mehreren Hyperfeinübergängen studiert werden. Dieser Fall entspricht im Experiment dem Einsatz einer Alkalidampfzelle mit einem Puffergas. Die Höhe des Puffergasdruckes sowie die Abstimmung der Laserfrequenz gibt hierbei die Gewichtung der einzelnen Linien vor. Diese Frage wurde letztlich aber doch experimentell untersucht, indem eine Paraffin-beschichtete Zelle verwendet wurde. Es stellte sich heraus, dass der $F=4$ zu $F'=3$ Übergang zu favorisieren ist, welcher auch bislang verwendet wurde. Es wurde daher aus Zeitgründen und da keine interessanten unerwarteten Phänomene bei Messungen auf den anderen Linien beobachtet wurden, auf weitere Simulationsrechnungen verzichtet.

Die Rechnungen zum FRAP-OPM-Modus sind in Einklang mit experimentellen Daten aus Arbeitspaket 1. Die Resultate wurden auf Fachtagungen publiziert und flossen in die Entwicklung des Programms zur Datenaufnahme und -auswertung ein (siehe AP 1), Meilenstein 2 konnte also erreicht werden.

AP 3: FRAP-OPM Demonstrator (IPB, Leibniz-IPHT)

Teilpaket 3.1: Konzeption (IPB)

Das Konzept des Demonstrators wurde gemeinsam und arbeitsteilig zwischen den Partnern erstellt. Der Demonstrator besteht aus zwei Hauptteilen, dem Sensorkopf und der Sensorelektronik. Der Sensorkopf beinhaltet die Cs-Zellen, Laser und Optiken. Der elektronische Teil besteht aus Lasertreibern und einer Kontroll- und Datenverarbeitungs-Einheit.

Eine zentrale Frage für den Sensorkopf des zu realisierenden FAP-OPMs stellte die zu verwendende Laserlichtquelle dar und wie diese und die nötige Lichtmodulation leistungsfähig genug, aber gleichzeitig robust und so preisgünstig wie möglich realisiert werden könnte. Während in Laboraufbauten in beiden Gruppen leistungsstarke, aber teure Laserdiodensysteme sowie dedizierte Amplitudenmodulatoren zum Einsatz kamen, sollte in einem Demonstrator für den Feldeinsatz aus vielfältigen Gründen (Energieverbrauch, Systemkosten, Systemabmessungen, Systemgewicht, harsche Umgebungsbedingungen, ...) möglichst robuste, kompakte und preiswerte Technik zum Einsatz gebracht werden.

Daher wurden durch das IPB und während des Gastaufenthalts der serbischen Partner am Leibniz-IPHT im Dezember 2022 Versuche mit preiswerten Laserdioden durchgeführt, um zu evaluieren, ob diese ggfs. für den Einsatz im Demonstrator geeignet sein könnten. Es wurde die preiswerte VCSEL-Diode L895VH1 von Thorlabs erprobt. Die Laserdiode (LD) ist sehr kompakt und lässt sich in einen speziell entwickelten Laserkopf integrieren. Dieser erste Laserkopf bestand aus der LD, einem Linsenhalter, einem Peltierelement, einem NTC-Widerstandstemperatursensor, einer unteren Montageplatte, die gleichzeitig als Kühlkörper dient, einem Anschluss und einer Schutzabdeckung - siehe Abb. 4 links. Für die LD wurde ein eigener Treiber selbstentwickelt. Der Treiber besteht aus zwei Hauptkomponenten: Ein PID-basierter Temperaturregler und eine einstellbare Konstantstromquelle mit einem schnellen analogen Modulationseingang (siehe Abb. 4 rechts). Mit diesem Aufbau gelang es, das Absorptionsspektrum der D1-Linie von Cäsium bei 895 nm aufzunehmen. Der Strommodulationseingang wurde für das schnelle Scannen über die vier Cäsium-Absorptionslinien verwendet. Die Eigenschaften des aufgezeichneten Spektrums zeigten, dass der modensprungfreie Abstimmbereich und die spektrale Breite des Laserlichts ausreichend gut sind. Ein Nachteil dieser Laserdiode

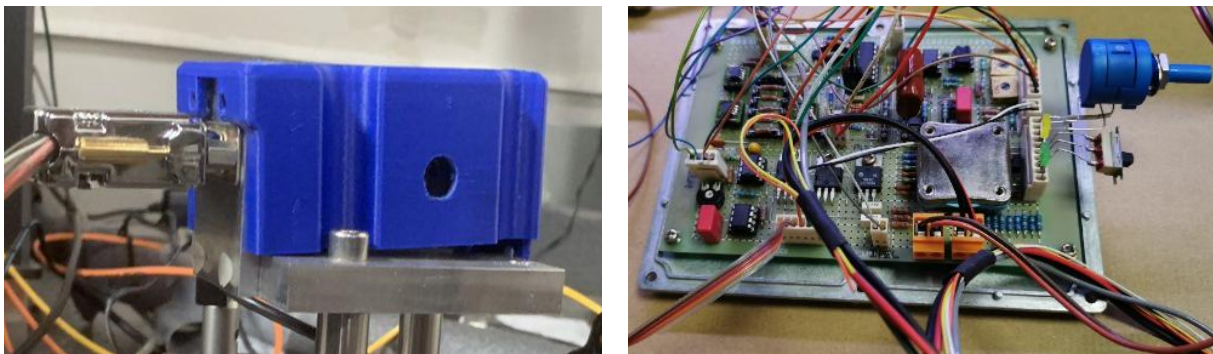


Abbildung 4: Am IPB testweise realisierter Laserkopf mit preiswerter VCSEL-Laserdiode (links) und die am IPB zu dessen Betrieb entworfene und aufgebaute Laserelektronik (rechts).

ist, dass ihr Gehäuse wie bei fast allen anderen Laserdioden aus Kovar besteht und somit stark ferromagnetisch ist. Dies kann beim geplanten Einsatz der Laserdiode nahe bei der Cs-Zelle dazu führen, dass die Leistungsfähigkeit des OPMs durch Magnetfeldgradienten und ungewollte Offsets des Feldwertes (welche sich zudem bei Drehung des Sensors ändern) stark verschlechtert. Eine Lösung wäre es, die Laserdiode ohne Gehäuse zu kaufen und das Gehäuse selbst nichtmagnetisch aufzubauen. Dies überstieg aber die technologischen Fähigkeiten beider Projektpartner. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Lichtausgangsleistung der LD. Die Messungen am Leibniz-IPHT zeigten, dass diese für den Einsatz mit Puffergaszellen des Leibniz-IPHTs nicht ausreicht. Es wurde daher entschieden, dass die preiswerten VCSEL-Laser für das Leibniz-IPHT nicht in Frage kommen, sondern deutlich teurere Laserdioden (z.B. *Photodigm Inc.* DBR-LD) verwendet werden müssen. Zusätzlich wurde basierend auf diesen Ergebnissen entschieden, für den Demonstrator nicht wie ursprünglich geplant das Pump- und Ausleselicht mit Fasern zum Sensorkopf zu führen, sondern die Laserdiode(n) direkt in den Sensorkopf zu verbauen. Die Lichtmodulation soll über Strommodulation der Laserdiode erfolgen. Entsprechend wurde das Konzept für den am Leibniz-IPHT aufzubauenden Demonstrator-Sensorkopf sowie die vom IPB und dessen Unterauftragnehmer zu realisierende Sensorelektronik finalisiert.

Eine zentrale technische Herausforderung war es, die Laserwellenlänge einerseits auf der gewünschten Absorptionslinie des Cäsiums zu halten, andererseits eine für das FAP-Prinzip nötige Amplitudenmodulation des Lichtes während des „Pumpzyklus“ zu bewerkstelligen. Da wir für den Demonstrator auf einen separaten Amplitudenmodulator verzichten wollen (aus Kostengründen und wegen dessen magnetischer Signatur bzw. nötiger Faserkopplung, welche vermieden werden sollte), soll die Modulation über den Laserstrom der Laserdiode implementiert werden. Eine ständige aktive Stabilisierung der Laserwellenlänge über Rückkopplung des Laserstroms ist jedoch beim gepulsten Betrieb des FAP-OPM nicht zu realisieren, da für Pump- und Probe-Zyklus verschiedene Laserleistungen eingestellt werden müssen, welche ebenfalls über Variation des Laserstroms erreicht werden müssen (die Variation des Laserstromes ändert immer Laserfrequenz und -leistung gleichzeitig). Deswegen wurde entschieden zwei separate Laserdioden einzusetzen, welche jeweils im Pump- bzw. im Probezyklus aktiv sein sollen. Die Probe-LD kann mit niedriger Laserleistung kontinuierlich betrieben und damit „einfach“ aktiv wellenlängenstabilisiert werden. Die Pump-LD wird während des Pump-Zyklus mit gepulstem Strom betrieben und während des Probe-Zyklus der Pump-Laserstrom unter die Laserschwelle oder ausreichend weit verstimmt eingestellt. Die Pump-LD kann entweder 1) freilaufend (ohne aktive Wellenlängenstabilisierung) betrieben werden, da diese während der Auslese sowieso ausgeschaltet wird, oder 2) mit zyklischer, langsamer Nachführung des Laserstroms betrieben werden (aufwändigere Implementierung in Elektronik), falls die freilaufende Wellenlängenstabilität des Lasers nicht ausreichen sollte. Die Probe-LD kann während des Pump-Zyklus eingeschaltet und aktiv stabilisiert bleiben, da dieses schwache Licht die Spindynamik nur minimal stört.

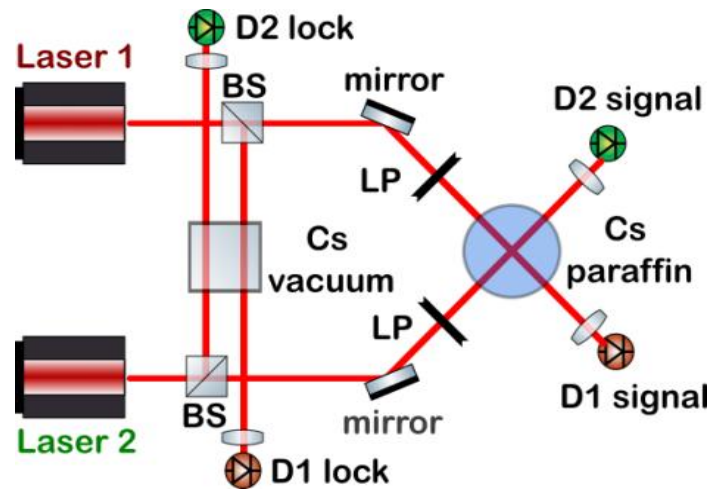


Abbildung 5: Finalisiertes Konzept für den Sensorkopf des IPB, basierend auf einer paraffinbeschichteten Zelle. Es sind Pump- und ein Probelaser jeweils bei Cs D1- bzw. Cs D2-Linie vorgesehen, sowie eine separate Alkalizelle zur Frequenzstabilisierung der Laser. BS: Strahlteiler, LP: Linearpolarisator.

Das IPB baute basierend auf den dort verfügbaren paraffin-beschichteten Zellen einen Sensorkopf auf, sodass die Sensorelektronik vor Ort evaluiert werden kann. Das Leibniz-IPHT baute unabhängig davon einen Sensorkopf basierend auf den eigenen mikrofabrizierten Zellen auf. Das Konzept der Sensorelektronik wurde so ausgelegt, dass beide Sensorköpfe im Demonstrator implementiert werden können.

In Abb. 5 ist das Konzept des Sensorkopfes des IPB dargestellt. Es sieht eine zusätzliche Vakuum-Cs-Zelle zur Frequenzstabilisierung der Wellenlängen beider Laser vor. Der Laser 1 wird zum optischen Pumpen mittels Frequenz-Modulation (FM) nahe der doppelten Larmor-Frequenz verwendet, um eine Spin-Ausrichtung im Cs-Dampf zu erzeugen. Das Licht von Laser 2 dient als schwacher Auslesestrahl zum Nachweis der Ausrichtung des Cs-Dampfes. Die Thorlabs-Diode L895VH1 hat sich auch im passiven Betrieb sehr wellenlängenstabil erwiesen, so dass eine aktive Non-Stop-Stabilisierung nicht erforderlich ist. Die Wellenlängenkontrolle des Lasers 1 muss auch während der Pumpphase durchgeführt werden, während er in der Probephase von allen Cs-Absorptionslinien verstimmt wird. D1- und D2-Signaldetektoren werden an das DAQ-System angeschlossen, um den Pumpvorgang zu überwachen bzw. die Larmor-Frequenz zu ermitteln. Die D1- und D2-Lock-Detektoren werden für die Erkennung der entsprechenden Wellenlängenverstimmung des Lasers verwendet.

Meilenstein 3, die vollständige Konzeption des Demonstrators konnte damit erreicht werden, war allerdings durch verschiedene Umstände (z.B. Mitarbeiterwechsel am IPB und Leibniz-IPHT, Cyberangriff Leibniz-IPHT) gegenüber der ursprünglichen Zeitplanung des Projektes stark verzögert.

Teilpaket 3.2: Sensorkopf (Leibniz-IPHT)

Der Sensorkopf des Demonstrators wurde um eine miniaturisierte Puffergaszelle des Leibniz-IPHT herum aufgebaut. Es kommt ein Pump-Probe-Schema zum Einsatz, wobei jede der beiden Aufgaben (Präparation und Auslese der Spinausrichtung) durch Licht aus je einer verschiedenen Laserdiode bewerkstelligt wird. Die Laserdioden sind dabei ohne Fasern in Freistrah-Geometrie integriert. Der Aufbau ist in Abb. 6 dargestellt.

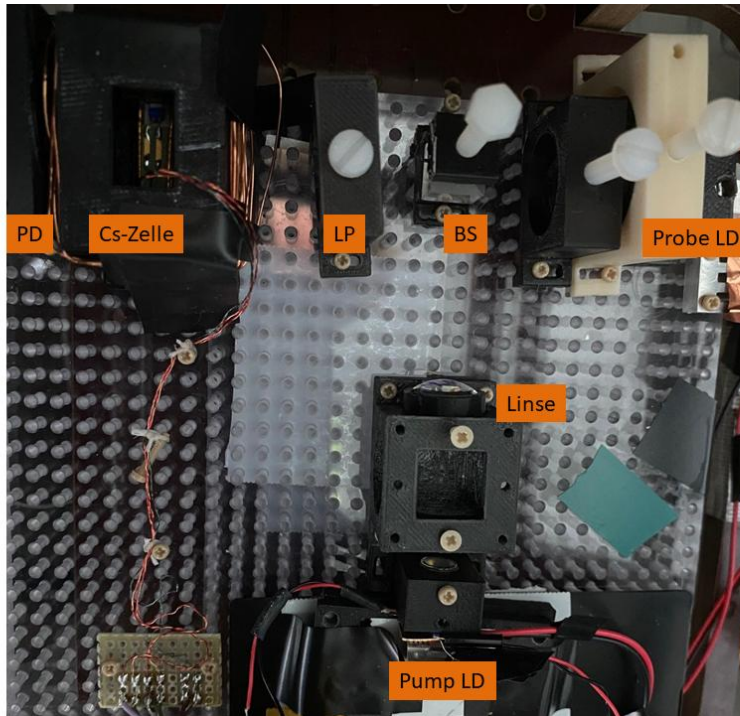


Abbildung 6: Innerer Aufbau des Sensorkopfes des Leibniz-IPHT. Die Funktionselemente werden in 3D-gedruckten Halterungen gefasst und auf einem Brett aus Polycarbonat angeordnet. Licht von Pump- und Probe-Laserdioden (LD) werden per Strahlteiler (BS) vereinigt, linear polarisiert (LP) und parallel durch die Cs-Zelle geführt. Das durch die Zelle transmittierte Licht wird durch eine Photodiode (PD) detektiert. Die Cs-Zelle wird über ITO-Dünnschichtheizer temperiert, die Temperatur über einen PT100-Widerstand ausgelesen.

Teilpaket 3.3: Sensorelektronik (IPB)

Das Konzept der Sensorelektronik wurde gemeinsam erarbeitet. Es ist mit seinen Schnittstellen zum Sensorkopf ist in Abb. 7 skizziert. Abb. 8 zeigt das Schema der Sub-Einheit zur Datenverarbeitung und -analyse maßgeblich basierend auf einem

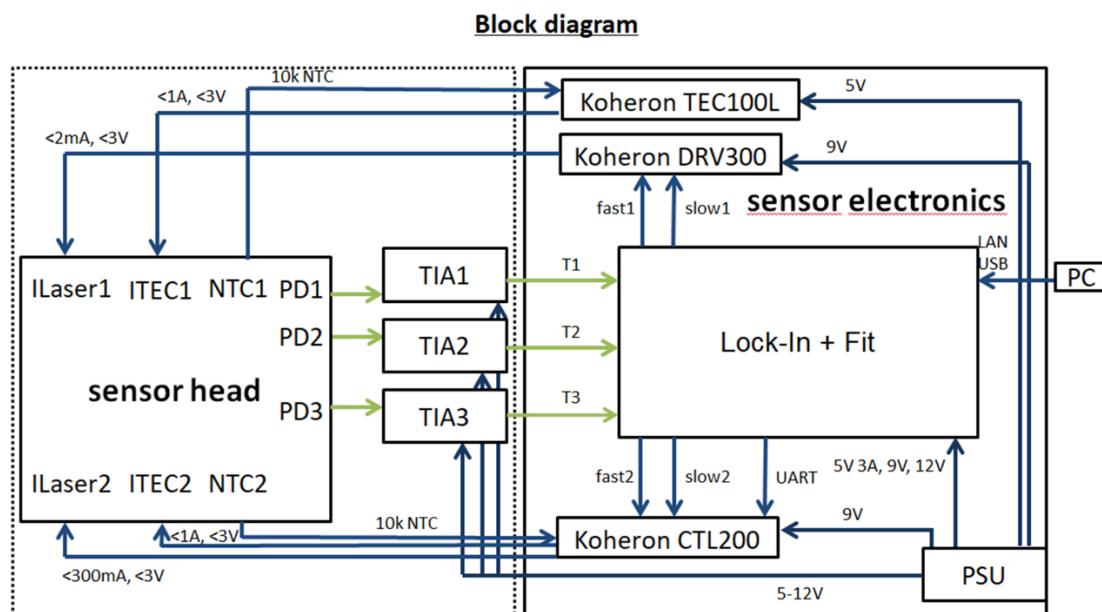


Abbildung 7: Blockdiagramm der Sensorelektronik mit Schnittstellen zum Sensorkopf.

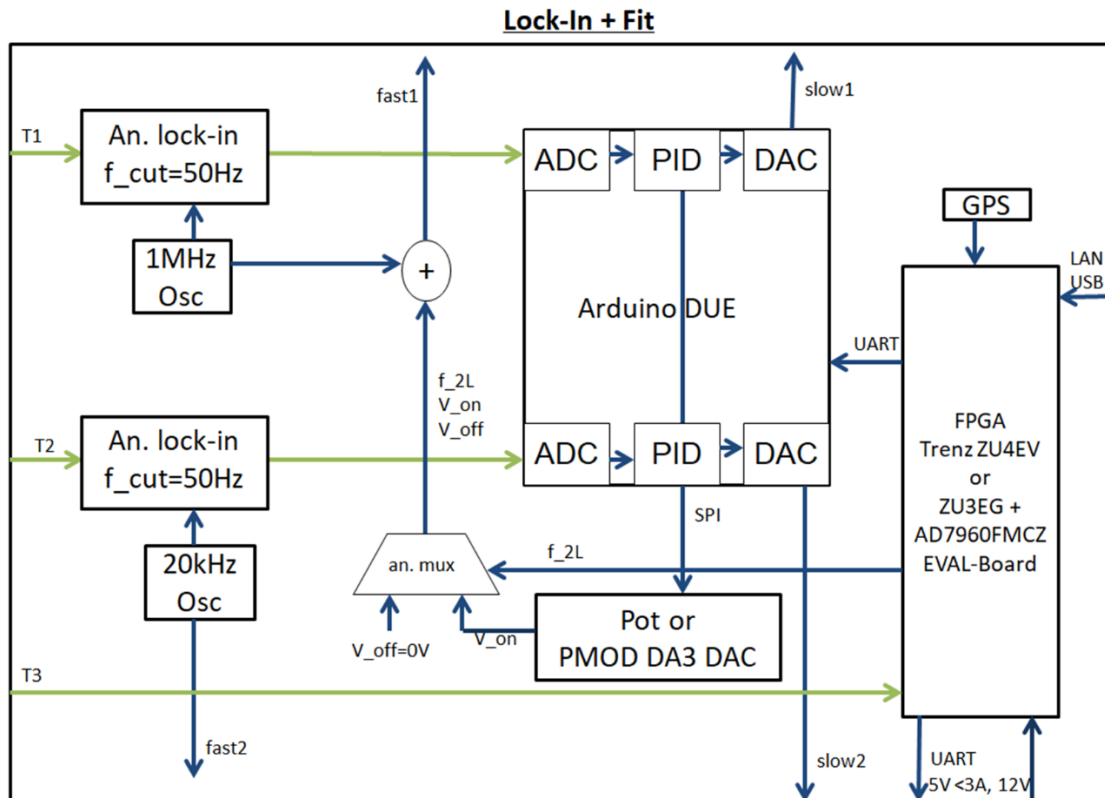


Abbildung 8: Blockdiagramm der Sensorelektronik mit Schnittstellen zum Sensorkopf

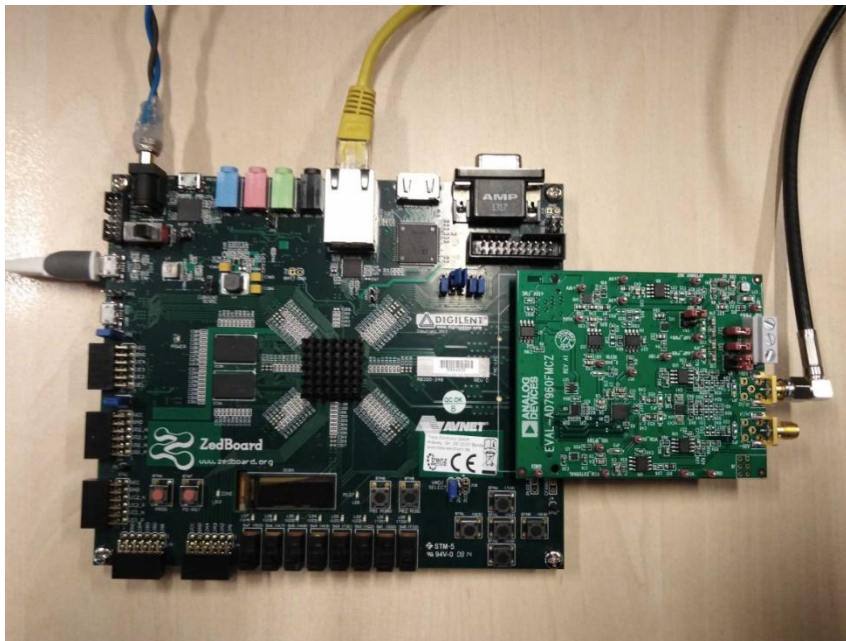


Abbildung 9: Digilent ZedBoard mit Zynq-7000 FPGA SoC als Testumgebung für die Algorithmen zur Echtzeit-Analyse der FAP-Signale. An das ZedBoard ist das kleinere AD-Wandler-Board mit AD7960 angefügt.

FPGA-Board. Die Sensorelektronik wurde maßgeblich durch die Firma Syrmia³ realisiert, in Unterauftrag des Instituts für Physik Belgrad. So weit wie möglich wurden kommerziell erhältliche Sub-Komponenten verwendet, um Kosten und

³ <https://www.syrmia.com/>

Tabelle 1. Liste der für den Demonstrator ausgewählten Elektronik-Komponenten.

Baustein	Beschreibung	Verwendung / Aufgabe
AD7960	18b 5MSPS SAR ADC	Aufzeichnung OPM-Signal
XCZU4CG-SFVC784-1-I	FPGA + ARM Prozessor	Bestimmung der Larmorfrequenz aus dem OPM-Signal, Kontrolle von AD und DA-Wandler
AD7476A	12b 1MSPS 2-channel ADC	Aufzeichnung Lock-In-Signale (Laserfrequenzstabilisierung)
AD5541A	16b 1MSPS DAC	Signalerzeugung für Lock-In und OPM-Modulation
ATSAM3X8EA-AU	ARM microcontroller	PID-Regler für Lock-In-Signal (Laserfrequenzstabilisierung)
OPA857	125MHz tTransimpedance amplifier	Transimpedanzverstärker für OPM-Signal
ADA4625-1	18MHz Transimpedance amplifier	Transimpedanzverstärker für Lock-In- Signale
TPS7A94EVM-046	Ultralow noise high PSRR LDO	Rauscharme Spannungsreferenz
ZED-F9P-01B	GPS receiver	Positionsdaten per GPS; 10MHz-Referenzsignal, absolute Zeitstempel der Daten
ADF4351	PLL clock generator	GPS-synchronisierter Oszillator

Entwicklungsaufwand zu reduzieren. Es enthält die beiden unabhängigen Treiber für die beiden Laser und die Funktionalität für eine aktive Frequenzstabilisierung der Laser. Der größte Entwicklungsaufwand lag erwartungsgemäß in der nötigen Echtzeit-Verarbeitung der Messsignale basierend auf einer schnellen FPGA-Logik.

Es wurde daher entschieden, mit diesen Entwicklungen bereits vor der Umsetzung der Sensorelektronik zu beginnen. Zu diesem Zweck wurden Algorithmen zunächst auf am IPB verfügbaren Plattformen, wie dem *Digilent ZedBoard*, entwickelt (Abb. 9). Es wurden zwei verschiedene Ansätze zur Frequenzbestimmung des Signals untersucht, erstens basierend auf einer nichtlinearen Kurvenanpassung der Daten und zweitens auf einer adaptierten Lock-In-Technik. Die letztere Technik zeigte sich bzgl. Realisierbarkeit in FPGA deutlich besser geeignet und lieferte vergleichbare Leistung wie die erste Methode. Es wurde daher entschieden, die zweite Methode im Demonstrator zu verwenden.

Die Firma Syrmia (Unterauftragnehmer des IPB) sollte den Auftrag zur Erstellung der Sensorelektronik des Demonstrators basierend auf dem finalisierten Lastenheft (Tabelle 1 zeigt beispielhaft die ausgewählten Elektronik-Komponenten) am 15.09.2023 starten. Der Vertrag konnte vom IPB jedoch erst am 30.11.2023 an die

Firma Syrmia gegeben werden. Trotz des Vorlaufs bei der Entwicklung der Algorithmen konnte die Firma die im Vertrag vereinbarten fünf Monate Bearbeitungszeit nicht einhalten. Eine erste Version der Sensorelektronik wurde im Februar 2025 von Syrmia an das IPB übergeben (Abb. 10). Die Charakterisierung der Elektronik im Zusammenspiel mit dem Sensorkopf des IPB bzw. des Leibniz-IPHT konnte darum im Projekt nicht mehr abgeschlossen werden. Meilenstein 4 ist somit zwar stark verspätet realisiert, es fehlt aber die Aussage zur Einhaltung der spezifizierten Parameter des Gesamtsystems.



Abbildung 10: Die von der Fa. Syrmia doo realisierte Sensorelektronik. Die Komponenten sind in einem PC-Gehäuse angeordnet. Die Elektronik wird vollständig von einem Akkupack (in blau) gespeist und ist somit transportabel.

AP 4: Evaluierung und Benchmarking (IPB, Leibniz-IPHT)

Teilpaket 4.1: Laboraufbau (Leibniz-IPHT)

Um die Leistungsfähigkeit des untersuchten Sensorsystems zu prüfen, war es erforderlich, die Bedingungen und Limitierungen des Laboraufbaus genau zu verstehen und diesen so weit zu verbessern, dass das Rauschen vom Sensor selbst und möglichst nicht der Messumgebung limitiert ist. Es stellte sich heraus, dass die vorhandene in der Schirmung integrierte Spule sowohl von der Homogenität her, im Besonderen aber vom Rauschlevel her die erzielbare Sensorleistung limitiert (siehe Abb. 11 links). Durch Verwendung einer neuen, für diesen Zweck gebauten Spule konnte das mit dem Sensor gemessene weiße Rauschen um den Faktor 3 reduziert werden. Weitere Optimierungen eliminierten elektromagnetische Interferenz (engl. *pick up*) im Bereich von 300 bis 500 kHz.

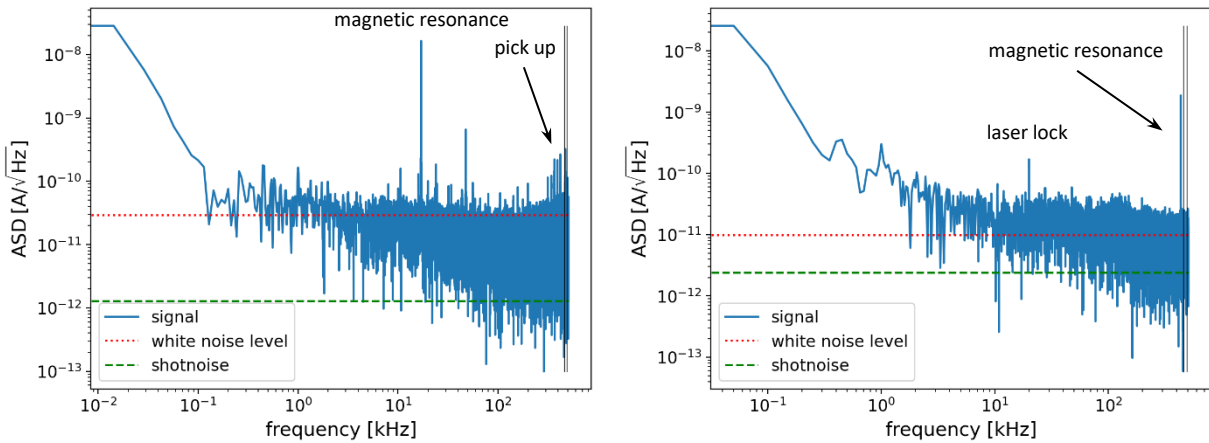


Abbildung 11: Verbesserung des Rauschniveaus, links vorher zu rechts nachher, durch Verwendung eines neuen Spulensystems (siehe Abb. 2) und die Reduzierung von *pick up* im Laboraufbau.

Durch die beschriebenen Optimierungen war es möglich, eine schrotrausch-be-grenzte Auflösung des Sensors nach Methode von Cramer Rao⁴ von $0,88 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$, bei einer dem Erdmagnetfeld äquivalenten Feldstärke, zu erzielen (Messung in Abb. 12). Wir konnten damit den Meilenstein 1 des AP 1 erfolgreich demonstrieren.

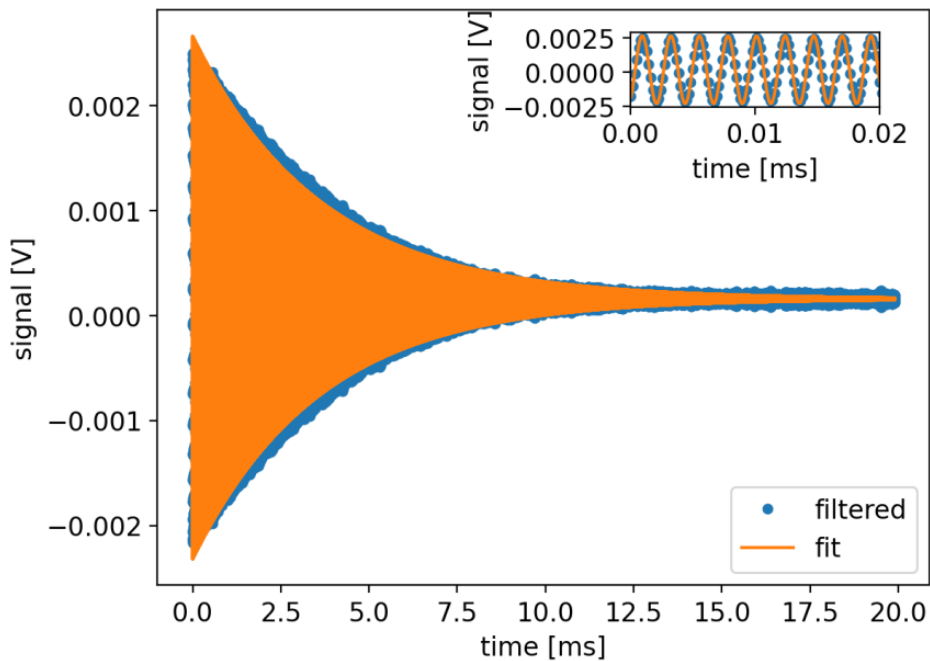


Abbildung 12: *Free alignment precession* (FAP) Signal in einem Magnetfeld von $62 \mu\text{T}$ Stärke, blau das bandpass-gefilterte Messsignal, in orange der Fit des entsprechenden Modells, der Einschub rechts oben zeigt die ersten $20 \mu\text{s}$ des Signals.

Neben dem Rauschniveau ist die Rotationsinvarianz eine für den später geplanten bewegten Einsatz des Sensors eine entscheidende Größe. Diese untersuchten wir

⁴ siehe dazu C. Gemmel, W. Heil, S. Karpuk, et. al, Ultra-sensitive magnetometry based on free precession of nuclear spins, Eur. Phys. J. D 57, 303 (2010)

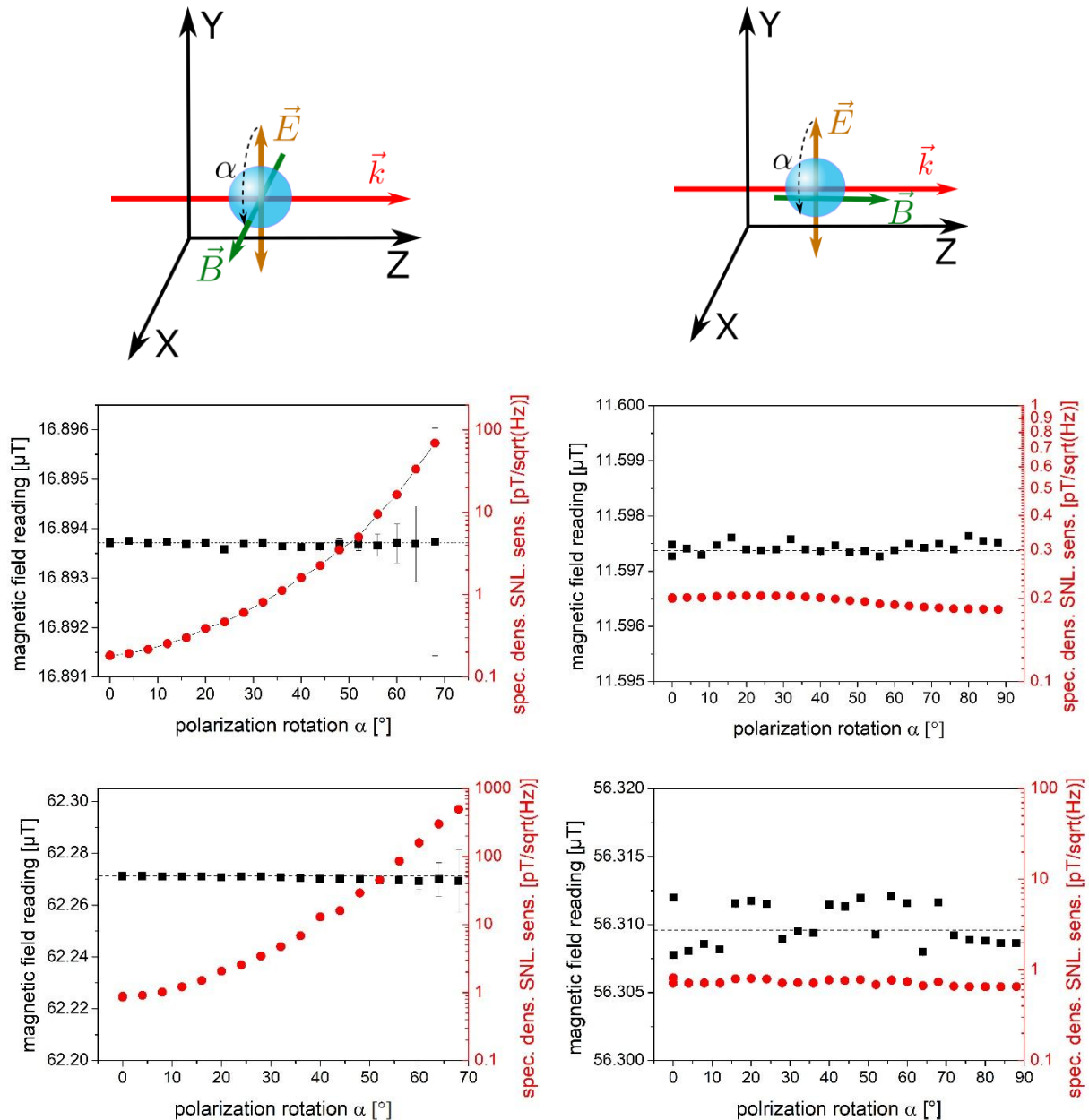


Abbildung 13: Messung der Rotationsinvarianz durch simuliertes Rotieren des Sensors im Magnetfeld. Links: Rotation in der Ebene Magnetfeld \vec{B} – Lichtpolarisation \vec{E} , rechts: Rotation in senkrechter Richtung um das Magnetfeld \vec{B} wobei das Magnetfeld in Ausbreitungsrichtung des Lichtes zeigt. Beide Messungen wurden in zwei Bereichen verschieden starker Magnetfelder durchgeführt. Die gemessene Empfindlichkeit ist im Bereich des größeren Magnetfeldes gegenüber den Messungen in kleinerem Magnetfeld beeinträchtigt. Die Ursache hierfür ist vermutlich der mit der Magnetfeldgröße zunehmende Magnetfeldgradient über der Messzelle.

im Labor des Leibniz-IPHT, indem durch Rotation der Lichtpolarisation relativ zur Magnetfeldrichtung, eine Rotation des Sensors in einem festen Magnetfeld simuliert wurde (siehe Abb. 13). Hier wurden zwei Fälle erforscht: die Rotation des Lichtpolarisationsvektors in einer den Magnetfeldvektor enthaltenden Ebene und die Rotation der Lichtpolarisation senkrecht um den Magnetfeldvektor herum. Der erste Fall zeigt die Abnahme der Empfindlichkeit für den Fall, dass die Polarisation und das Magnetfeld (anti-)parallel ausgerichtet sind. Im zweiten Fall bleibt die Empfindlichkeit

konstant. In beiden Fällen ist die systematische Veränderung des gemessenen Magnetfelds mit dem Rotationswinkel sehr klein. Die statistische Aussagekraft wurde durch zeitliche Magnetfeldfluktuationen limitiert, welche ein längeres Ausmitteln der zufälligen Schwankungen nicht noch genauer möglich machten.

Teilpaket 4.2: Demonstrator (Leibniz-IPHT)

Wie oben beschrieben, konnte der Demonstrator aufgrund massiver Verzögerungen bei der Erstellung der Sensorelektronik innerhalb des Projektes nicht mehr als Gesamtsystem evaluiert werden. Es sind weitere Arbeiten nötig, welche nicht mehr während der Projektlaufzeit durchgeführt werden konnten. Meilenstein 5, die Erprobung des Demonstrators im Feldeinsatz konnte nicht erreicht werden.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projektverlauf wurde eine Umwidmung von 61.527,36 EUR aus der Position Techniker in die Position Wissenschaftler notwendig. Insbesondere durch geringere Ausgaben bei Reisen und Workshops war im Vorhaben ein Minderbedarf zu verzeichnen. Alle weiteren Details sind dem zahlenmäßigen Nachweis zu entnehmen.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Vorhaben FRAPOPM und die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen. Es wurden wie weiter oben im Bericht dargelegt die Projektziele im Wesentlichen erreicht.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die eingereichten Manuskripte müssen noch bis zur endgültigen Annahme zur Publikation durch die Journale begleitet werden. Die erzielten Resultate zeigen ein großes Potential des Ansatzes für die Anwendung in ungeschirmtem, bewegtem Einsatz der Sensorik. Die Charakterisierung des Gesamtsystems in seinem Zusammenspiel sollte abgeschlossen werden, zunächst in magnetisch geschirmter Umgebung, um die Limitierungen der aktuellen Implementation zu identifizieren. Anschließend sollten die Erprobungen in der Anwendung durchgeführt werden. Aus diesen Erkenntnissen können weitere technische Verbesserungen resultieren, die dann zum Beispiel in einer zweiten Iteration zur Weiterentwicklung hin zu einem prototypischen System führen könnten. Hierzu könnten industrielle Partner für das Konsortium eines Nachfolgeprojektes angesprochen werden. Aus dem Projekt resultierten neue Ideen zu Sensorprinzipien, welche nun in laufende Vorhaben der Gruppe des Leibniz-IPHT eingeflossen sind und noch einfließen.

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden inzwischen Studien auf Basis von optischem Pumpen mittels linear polarisierten Lichts bzw. der Auslese von Spin-Ausrichtung in Puffergaszellen publiziert^{5,6}.

⁵ A. A. Fomin, M. Yu. Petrov, A. S. Pazgalev, G. G. Kozlov, and V. S. Zapasskii, *Optically driven spin-alignment precession*, Phys. Rev. A 108, 043109 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevA.108.043109

⁶ L.M. Rushton, L. Elson, A. Meraki, and K. Jensen, *Alignment-Based Optically Pumped Magnetometer Using a Buffer-Gas Cell*, Phys. Rev. Applied 19, 064047 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.19.064047

Die Arbeiten analysieren Resultate aus Laboraufbauten und vollziehen den Schritt zum Demonstrator (noch) nicht.

Das Funktionsprinzip ist nicht nur auf Grund seiner sehr guten Richtungsinvarianz interessant, sondern auch weil es nur sehr geringe systematische Verschiebungen unter Rotationen aufweist, sondern auch auf der absoluten Skala sehr präzise ist. Darin liegt das starke Interesse begründet, welches es für Experimente zu fundamentaler Physik hat, bei denen das Magnetfeld auf absoluter Skala möglichst genau kontrolliert oder gemessen werden muss. Es gibt hierzu aktuell Arbeiten des TUCAN-Experimentes⁷ in Kanada und einer Entwicklung speziell für das PanEDM-Experiment⁸ in Grenoble, Frankreich. Beide Ansätze arbeiten aufgrund der Anforderungen hinsichtlich elektromagnetischer Felder mit faserbasierter Ankopplung des Sensor Kopfes. Für den in diesem Projekt geplanten mobilen Einsatz erscheint dies aufgrund zu erwartender mechanischer und thermischer Störeinflüsse nicht geeignet.

Aufenthalte, erfolgte oder geplante Veröffentlichungen, „Outreach“

Arbeitsaufenthalte

- Zoran Grujić und Saša Topić am Leibniz-IPHT, 05.12.2021 bis 11.12.2021
- Jonas Hinkel am IPB, 14.11.2022 bis 25.11.2022
- Theo Scholtes am IPB, 20.11.2022 bis 25.11.2022
- Zoran Grujić und Aleksandra Milenković am Leibniz-IPHT, 04.12.2022 bis 15.12.2022
- Marija Ćurčić am Leibniz-IPHT, 04.12.2022 bis 10.12.2022
- Zoran Grujić und Miloš Subotić am Leibniz-IPHT, 27.11.2023 bis 09.12.2023

Seminarvorträge

- Z. D. Grujić: ***The measurement of neutron Electrical Dipole Moment and accurate magnetometry***, Abteilungsseminar am Leibniz-IPHT, 10.12.2021

Organisierte Workshops

- “FRAPOPM special session” und in-Person Projekttreffen beim 15. Photonics Workshop, Kopaonik, Serbien, 16.03.2022
- “FRAPOPM special session” und in-Person Projekttreffen beim 16. Photonics Workshop, Kopaonik, Serbien, 15.03.2023

Eingeladene Vorträge

- A. Jaufenthaler, D. Baumgarten: ***Low dead time, wide bandwidth optically pumped magnetometer for unshielded magnetorelaxometry of magnetic nanoparticles***, 15th Photonics Workshop, Kopaonik, Serbien, 16.03.2022.

⁷ W. Klassen et al., *Demonstration of magnetically silent optically pumped magnetometers for the TUCAN electric dipole moment experiment*, Eur. Phys. J. C 84, 1181 (2024). DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13544-5

⁸M. Rosner et al., *A highly drift-stable atomic magnetometer for fundamental physics experiments*, Appl. Phys. Lett. 120, 161102 (2022). DOI: 10.1063/5.0083854

Konferenzbeiträge der Projektmitarbeiter

8. PHOTONICA in Belgrad, Serbien (23.08.-27.08.2021)

- **S. Topić, Z. D. Grujić: Search for topological defects of bosonic ultralight field with optically pumped magnetometer: design, calibration, and sensitivity of the Belgrade GNOME station** (Vortrag).

15. Photonics Workshop in Kopaonik, Serbien (12.03.-16.03.2022)

- **T. Scholtes, J. Hinkel, F. Wittkämper, G. Oelsner, R. IJsselsteijn, V. Schultze, A. Chwala, R. Stolz: Optically pumped magnetometers for unshielded applications** (Eingeladener Vortrag).
- **Z. D. Grujić: Why do we need accurate magnetometers and how to realize them** (Eingeladener Vortrag).
- **J. Hinkel, T. Scholtes, R. Stolz: Optically pumped magnetometers in high background fields** (Vortrag).
- **S. Topić: New bounds on ultralight bosonic ALP matter mass and SM fermion coupling strengths from Science run 5 of GNOME OPM network** (Vortrag).
- **M. Subotić, Z. D. Grujić: Algorithms for Estimating Frequency from Dumped Sinusoidal Signal** (Vortrag).
- **A. B. Bunjac, Z. D. Grujić, S. Topić, T. Scholtes, J. Hinkel: DC Transverse Magnetic Field Scan in True Scalar Cs Magnetometers** (Vortrag).
- **M. Ćurčić, A. Bunjac, S. Topic, J. Hinkel, T. Scholtes, Z. D. Grujić: All-optical Cs magnetometer based on free alignment precession** (Vortrag).

16. Photonics Workshop in Kopaonik, Serbien (12.03.-15.03.2023)

- **Z. D. Grujić, M. M. Ćurčić, A. Milenkovic, J. Hinkel, T. Scholtes: Heading error of Free Alignment Precession optically pumped magnetometer** (Eingeladener Vortrag).
- **T. Scholtes, J. Grix, J. Hampel, A. Chwala, F. Bauer, R. Stolz: A compact pump-probe optically pumped magnetometer system** (Eingeladener Vortrag).
- **J. Hinkel, T. Scholtes, Z. D. Grujić, R. Stolz: Optically pumped magnetometer aiming for highest accuracy** (Vortrag).
- **T. Kügler, F. Wittkämper, T. Scholtes, R. Stolz: Functionalization of microfabricated cesium vapor cells for optically pumped magnetometers** (Vortrag).
- **M. M. Ćurčić, A. Milenković, J. Hinkel, T. Scholtes, Z. D. Grujić: Response of a scalar M_x magnetometer to modulation the of transverse magnetic field** (Vortrag).
- **A. Milenković, M. M. Ćurčić, J. Hinkel, T. Scholtes, Z. D. Grujić: Affordable VCSEL diode laser for high resolution spectroscopy of cesium D_1 line** (Vortrag).
- **M. Subotić, Z. D. Grujić: Frequency Estimating Device for Optically Pumped Magnetometer** (Vortrag).
- **A. B. Bunjac, Z. D. Grujić, M. M. Ćurčić, T. Scholtes, J. Hinkel: Analysis of the dynamic RF projection phase in True Scalar Cs Magnetometers** (Vortrag).

9. PHOTONICA in Belgrad, Serbien (28.08.-01.09.2023)

- **M. M. Ćurčić, A. Milenković, A. Bunjac, T. Scholtes, Z. Grujić:** *Experimental and theoretical study of the phase response of Mx magnetometer to modulating transversal magnetic field* (Vortrag).
- **Z.D. Grujić, M. Ćurčić, A. Milenković, J. Hinkel, T. Scholtes:** *Measurement of the heading error of a free alignment precession magnetometer* (Vortrag).

17. Photonics Workshop in Kopaonik, Serbien (10.03.-14.03.2024)

- **T. Scholtes:** *Recent developments in optical magnetometry* (Eingeladener Vortrag).
- **Z. D. Grujić, M. Ćurčić, A. Kocić, T. Scholtes:** *On prospects of the free alignment precession based optically pumped magnetometer* (Eingeladener Vortrag).
- **T. Kügler, F. Wittkämper, T. Scholtes, H. Schneidewind, R. Stolz:** *Structured indium tin oxide heating layers on microfabricated alkali vapor cells for optical magnetometry* (Vortrag).
- **M. Subotić, Z. D. Grujić:** *Lock-in Frequency Estimation Algorithm for Optically Pumped Magnetometer* (Vortrag).
- **M. M. Ćurčić, A. Kocić, Z. D. Grujić, T. Scholtes:** *Experimental and theoretical study of the dynamic phase projection error of Mx magnetometer – Progress report* (Vortrag).

Hot Atomic Vapor Workshop in Stuttgart, (30.09.-02.10.2024)

- **Z. D. Grujić, M. Ćurčić, A. Kocić, T. Scholtes:** *Phase projection errors in rf-driven optically pumped magnetometers* (Poster).
- **G. Hellmann, F. Wittkämper, A. Jaufenthaler, Z. D. Grujić, T. Scholtes, R. Stolz:** *Towards a magnetically pulsed free-spin-precession magnetometer* (Poster).

18. Photonics Workshop in Kopaonik, Serbien (10.03.-14.03.2025)

- **M. M. Ćurčić, A. Kocić, T. Scholtes, Z. D. Grujić:** *Free alignment precession based magnetometer with optical re-pumping* (Vortrag).
- **A. Kocić, M. M. Ćurčić, T. Scholtes, Z. D. Grujić:** *Stabilization of laser wavelength for improved performance in Cs-based optically pumped magnetometers* (Vortrag).

Publikationen in wissenschaftlichen Journalen

- **Z. D. Grujić, M. Ćurčić, A. Kocić, A. Weis, T. Scholtes:** *Phase projection errors in rf-driven optically pumped magnetometers*, submitted to Physical Review Applied, preprint: arXiv:2409.20446.
- **V. Schultze, T. Scholtes, F. Wittkämper, R. Stolz,** *Dead-Zone-free Optically Pumped Magnetometer with Small Heading Error*, submitted to IEEE Sensors.

Jena, den 30.04.2025

Dr. Theo Scholtes