

QGyro

Schlussbericht zum Verbundvorhaben
Quanten-Inertialsensorsystem (QGyro)

Förderkennzeichen: 50 RK 1957

S. Schön, S. Abend, E.v. Hinüber et al.



11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Förderkennzeichen: 50 RK 1957

QGyro

**Schlussbericht zum Verbundvorhaben
Quanten-Inertialsensorsystem (QGyro)**

S. Schön, S. Abend, E.v. Hinüber et al.

4. September 2023

QGyro

Schlussbericht zum Verbundvorhaben Quanten-Inertialsensorsystem (QGyro)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter der Förderungsnummer 50 RK 1957 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Förderkennzeichen (FKZ): 50 RK 1957
Fördername: Quanten-Inertialsensorsystem (QGyro)
Förderkategorie: Verbundvorhaben
Konsortium: Institut für Erdmessung (IfE)
Institut für Quantenoptik (IQO)
iMAR Navigation GmbH
Laufzeit Verbundvorhaben: Oktober 2019 – Dezember 2022

Impressum

Editor

Leibniz Universität Hannover
Institut für Erdmessung (IfE)
Institut für Quantenoptik (IQO)
30167 Hannover

und

iMAR Navigation GmbH
Im Reihersbruch 3
66386 St. Ingbert

Projektleitung

Prof. Dr. Steffen Schön 
Prof. Dr. Ernst M. Rasel 
Dr. Sven Abend 

Koordinierung

Dr. Tobias Kersten 

Autoren

– *Institut für Erdmessung*
Benjamin Tennstedt 
Nikolai Weddig
Tobias Kersten 
Steffen Schön 

– *Institut für Quantenoptik*
Philipp Barbey
Matthias Gersemann 
Sven Abend 
Yueyang Zou
Ashwin Rajagopalan
Mouine Abidi

– *iMAR*
Alexander Löwer
Edgar v. Hinüber

Gestaltung und Satz

Leibniz University Hannover Report Style, Institut für Erdmessung (IfE) by Dr. Tobias Kersten

Version

August 2023

Eine elektronische Version dieser Arbeit ist frei verfügbar unter:

URL: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/14823>

DOI: [10.15488/14705](https://doi.org/10.15488/14705)

Kurzfassung

Das Verbundvorhaben QGyro (Quanten-Inertialsensorsystem) ist ein Teil der High-Tech-Strategie der Bundesregierung und erhält Finanzierung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) mit Unterstützung der Raumfahrtagentur am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR e.V. (Förderkennzeichen 50 RK 1957). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden mithilfe der Quantentechnologie innovative Konzepte für die Navigation von kinematischen Plattformen entwickelt.

Das Hauptziel des Projekts ist die Untersuchung von Hybridansätzen zur Inertialsensorik, bei der Quantensensoren mit klassischen inertialen Messeinheiten kombiniert werden, um Fehler in der Positionsbestimmung zu reduzieren. Ein Hauptaugenmerk lag auf der Entwicklung neuartiger Quantensensoren. Ein erster Ansatz war die Schaffung eines einachsigen, quantenbasierten Inertialsensors als Proof-of-Concept. Dies beinhaltet den Sensorkopf, aber auch die Peripherie, wie Lasersysteme und Elektronik. Darüber hinaus wurden Entwicklungen in Richtung von sechsachsigen quantenbasierten Inertialsensoren angestoßen und Realisierungskonzepte erarbeitet.

Ein weiterer Fokus lag auf der Stabilisierung und aktiven Ausrichtung des entwickelten Messkopfes. Hierzu wurde eine stabilisierte Plattform entworfen und aufgebaut, die Linearbeschleunigungen während der Messzeit des Quantensensors kompensieren kann.

Für die Inertialnavigation bei Kombination von Quanten-Inertialsensoren und klassischer Inertialsensorik wurde der sog. Atom-Strapdown Algorithmus designt und implementiert. Er wurde in umfangreichen Simulationsstudien getestet, optimiert und validiert. Darüber hinaus konnte er auf reale Daten erfolgreich angewandt werden, wobei bei der Generierung des Hybridszenarios die CAI-Beobachtungen mit einer navigation-grade IMU emuliert wurden. Weiterhin wurden Algorithmen zur Ermittlung der Unsicherheiten des Atominterferometers entwickelt und anhand von Prototyp-Messreihen validiert.

Die erfolgreiche Umsetzung wurde in enger Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen an der Leibniz Universität Hannover (Institut für Erdmessung, Institut für Quantenoptik) sowie etablierten Unternehmen wie der iMAR GmbH erreicht. Das Projekt QGyro trägt dazu bei, die High-Tech-Strategie der Bundesregierung im Bereich der Quantentechnologie und Navigation voranzutreiben.

Abstract

The collaborative project QGyro (quantum inertial sensor system) is part of the German Federal Government's High-Tech Strategy and receives funding from the German Federal Ministry of Economics and Climate Protection (BMWK) with support from the Space Agency at the German Aerospace Center DLR e.V. (funding code 50 RK 1957). This research project used quantum technology to develop innovative concepts for the navigation of kinematic platforms.

The main goal of the project is to investigate hybrid approaches for inertial sensors, combining quantum technology with classical inertial measurement devices in order to reduce errors in positioning. A primary focus has been the development of novel quantum sensors. A first approach considered the creation of a single-axis, quantum-based inertial sensor as a proof-of-concept. This includes the sensor head, and also the peripherals, such as laser systems and electronics. Furthermore, developments towards a six-axis quantum-based inertial sensor were initiated and realization concepts were elaborated.

Further focus was on the stabilization and active alignment of the developed sensing head. For this purpose, a stabilized platform was designed and built that can compensate linear accelerations during the measurement time of the quantum sensor.

A so-called Atom Strapdown algorithm was designed and implemented for inertial navigation for the combination of quantum inertial sensors and classical inertial sensors. This algorithm has been tested, optimized and validated in extensive simulation studies. Moreover, a successful application of the algorithm to real data was achieved by emulating the CAI observations with a navigation-grade IMU during the generation of the hybrid scenario. Algorithms for determining the uncertainties of the atomic interferometer were further developed and validated on prototype measurement series.

Successful implementation was achieved in close collaboration with research institutions at Leibniz Universität Hannover (Institute of Geodesy, Institute of Quantum Optics) as well as established companies such as iMAR GmbH. The QGyro project contributes to advancing the German government's high-tech strategy in the field of quantum technology and navigation.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung des Verbundvorhabens	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen zur Vorhabensdurchführung	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.4	Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik zu Vorhabenbeginn	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2	Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens	9
2.1	Herausarbeiten der spezifischen Merkmale eines Atominterferometers (AP1000, IQO)	9
2.1.1	AP1100 - Dynamikbereich und Datenrate	9
2.1.2	AP1200 - Konzepte zur Unterdrückung von Störeinflüssen (Vibrationen)	10
2.1.3	AP1300 - Parameter des Atominterferometers	10
2.2	Validierung des Sensorkopfes (AP2000, IQ)	12
2.2.1	Teststand (AP2100-2500)	12
2.2.2	Demonstrator (AP2600-AP2900)	16
2.3	Konzeptevaluierung für Hybridisierung und Umsetzung (AP3000, iMAR)	21
2.4	Anwendungen in der Navigation (AP4000, IfE)	24
2.4.1	Entwicklung eines stochastischen Beobachtungsmodelles für das Navigationsfilter	24
2.4.2	Entwicklung und Test eines Hybrid-Navigationsfilters	29
2.4.3	Durchführung und Analyse kinematischer Testmessungen	39
2.5	Multi-Achsen-Atominterferometer (AP5000, IQO)	43
2.5.1	AP5100 - Evaluation existierender Konzepte für Multi-Achsen-Anordnungen	43
2.5.2	AP5200 - Entwicklung eines Multi-Achsen-Konzepts	44
2.6	Koordination (AP6000, IfE)	46
3	Zahlenmäßiger Nachweis	49
3.1	Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises	49
3.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	50
3.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	50
3.4	Überführung der Geräte in das Verbundvorhaben QGyroPlus	52
3.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten	52
3.6	Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten	52
3.6.1	Begutachtete Veröffentlichungen	52
3.6.2	Nicht begutachtete Veröffentlichungen	54
3.6.3	Präsentationen und Poster	54
3.6.4	Abschlussarbeiten	55
4	Zusammenfassung und Ausblick	57
	Literatur	61

1

Kurzdarstellung des Verbundvorhabens

1.1. Aufgabenstellung

Die Inertialnavigation ist das Rückgrat für jede hochgenaue Trajektorienbestimmung (Position, Geschwindigkeit, Lage) durch Integration der gemessenen Beschleunigungen und Drehraten in allen drei Raumrichtungen. Die Inertialnavigation ist das autonome Navigationsverfahren *par Excellence* und deshalb besonders attraktiv in Bereichen ohne Sichtverbindungen zu Satelliten, z.B. in Gebäuden, Tunneln oder im Weltraum. Darüber hinaus ist die Inertialnavigation nicht anfällig für Störungen wie Jamming oder Spoofing bei Globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS).

Kritisch ist allerdings bei der Trajektorienbestimmung die Verstärkung des Einflusses von Sensorfehlern und Messrauschen, die zu einem mindestens mit der Zeit quadratisch anwachsenden Positionsfehler führt. Dadurch ist bei bisher verwendeten Inertialsensoren keine Langzeitstabilität der Trajektorie gegeben und sie ist für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsansprüchen nicht direkt einsetzbar: Nach kürzester Zeit werden in Abhängigkeit der Sensorgüte und damit der Sensorkosten bereits sehr große Abweichungen (Größenordnung von Metern in wenigen Sekunden) erreicht. Für sehr genaue Geräte (Navigation Grade Inertial Measurement Units (IMU) mit Sensoroffsets in der Größenordnung von nur $100 \mu\text{g}$ und $0,01 \text{ deg/h}$) sind diese im Kurzzeitbereich bereits 5 m nach 100 s freier inertialer Navigation. Für globale Navigation im terrestrischen Umfeld (Schuler-Oszillation) erreicht man damit zeitabhängige Positionsfehler im Bereich von etwa 1 km/h.

Dieses zeitlich variable Fehlerverhalten kann nur verbessert werden, wenn konventionelle Inertialsensoren, mit anderen Sensoren gestützt werden, üblicherweise mit GPS (GNSS). Diese Art der Hybridnavigation versagt aber überall dort, wo GPS/GNSS nicht zuverlässig verfügbar ist, z.B. in Gebäuden, unter Tage, in Tunneln aber auch in entsprechenden Weltraumapplikationen.

Hier setzt das beantragte Forschungsvorhaben an. Quanteninertialsensoren basieren auf quantenmechanischen Messkonzepten, in denen Beschleunigungen und Rotationen mittels von Materiewellen eingeschlossenen Raumzeit- bzw. räumlichen Flächen bestimmt werden. Sie lassen eine hohe Empfindlichkeit und überragende Langzeitstabilität gegenüber konventionellen Inertialsensoren erwarten. Sie weisen also ein komplementäres Fehlerverhalten zu klassischen Inertialsensoren auf und sind daher prädestiniert für eine **Stützung klassischer Inertialsensoren ohne Einbußen bei der Autonomie des Navigationssystems**.

Gesamtziel des Vorhabens ist gewesen, hochgenaue Quanteninertialsensoren zur Stützung konventioneller Inertialnavigationssensoren zu entwickeln und erstmals für den Einsatz für die autonome Navigation zu testen und somit neue Anwendungsfelder zu eröffnen. Die Hybridisierung von kon-

ventionellen und quantenbasierten Inertialsensoren ist sinnvoll, da so maximale Synergien zwischen beiden Messprinzipien genutzt werden können: Während konventionelle Inertialsensoren eine hohe Bandbreite und große Messbereiche aufweisen, die für Navigation, Verortung und Stabilisierung der meisten bekannten Plattformen ausreichend sind, erfüllt die Genauigkeit und deren zeitliche Verschlechterung oft nicht die gewünschten Eigenschaften. Im Gegensatz dazu zeigen Sensoren auf Basis von Atominterferometrie aufgrund ihrer Funktionsweise eine teilweise extreme Genauigkeit, bei allerdings geringem Messbereich.

Das Verbundvorhaben gliedert sich in den Bereich der Grundlagenforschung ein. Zur erfolgreichen Umsetzung des Gesamtziels eines 6-Achsen-Sensors werden verschiedene Entwicklungsstufen notwendig. Ein erster Schritt ist mit dem erfolgreichen Abschluss des Vorhabens QGyro erreicht worden. Es wurde ein einachsiges System für dynamische Umgebungen als Testaufbau entwickelt und die Konzeptionierung eines Mehrachsensystems vorangetrieben. Dadurch bietet sich für ein Folgevorhaben die Perspektive eines driftfreien 6-Achsen-Sensors.

1.2. Voraussetzungen zur Vorhabensdurchführung

In der HighTech-Strategie der Bundesregierung (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2018) wird verbesserte Navigation durch Quantensensoren als klares Ziel für die Anwendung der Quantentechnologie im Bereich Quantensensorik und Quantenmetrologie benannt. Diese sei entscheidend für „[...] genaue und nicht manipulierbare Navigationssysteme, die auch verwendet werden können, wenn herkömmliches GPS zu Land und Wasser nicht zur Verfügung steht: [...]“ dies wird „[...] für Luft-, Raum- und Schifffahrt sowie für das autonome Fahren wichtig [...]“. Weitere prominente Anwendungen sind „inertiale Messungen von Beschleunigung und Drehraten im Weltraum,“.

Das Positionspapier der deutschen Industrie (VDI, 2017) sowie das Konzeptpapier der nationalen Initiative zur Förderung von Quantentechnologie (QUTEQA, 2017) sieht die Quantentechnologien als eine der Schlüsseltechnologien, die uns eine neuartige technologische Basis zur Verfügung stellen. Als mögliche Leuchtturmprojekte werden dort genannt: Hochpräzise Beschleunigungssensorik für Navigation im Nahbereich sowie Entwicklung von Quantensensoren für Weltraumanwendungen (quantenbasierte Inertialsensoren, ultrapräzise Uhren).

Das in diesem Schlussbericht vorgestellte Vorhaben greift dieses Ziel und die Anforderungen aus Politik und Wirtschaft auf und wird mit den zu entwickelnden Sensoren einen wichtigen Beitrag zum Fortschritt und Ausbau der Expertise in Deutschland auf diesem Feld leisten.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Zentrum dieses Vorhabens stand die Entwicklung quantenbasierter Inertialsensorik. Um der Dynamik in Navigationsanwendungen gerecht zu werden, waren Untersuchungen zur aktiven Regelung des Atominterferometers, einer nachträglichen Korrektur bzw. einer Lageregelung des Messkopfes durch experimentelle Tests notwendig geworden, insbesondere auch in Kombination mit hohen Datenraten. Daher wurde in diesem Vorhaben ein einachsiger Atominterferometer-Sensor (vertikal) entwickelt, der in Kombination mit zusätzlichen, klassischen Sensoren driftfreie Beschleunigungsmessungen mit hoher Datenrate ermöglicht. Der Messkopf ist dabei kompatibel zu Messungen in mehreren Achsen, was zunächst konzeptionell gestützt durch Simulationen weiterentwickelt wurde.

Das Vorhaben gliedert sich in fünf große wissenschaftliche und ein administratives Arbeitspaket inklusive der zugehörigen Unterpakete. Die Tabelle 1.1 stellt diese in einer Graphik zusammen. Hierbei wurden in den Arbeitspaketen die folgenden fünf Ziele verfolgt:

Tabelle 1.1: Liste der geplanten und durchgeführten Arbeits- und Unterarbeitspakete

QGyro Quanten-Inertialsensorsystem			
AP	Sub-AP	Arbeitspaket	Leitung
AP1000		Spezifische Merkmale eines Atominterferometers	IQO
	1100	Dynamikbereich und Datenrate	
	1200	Konzepte zur Unterdrückung von Störeinflüssen (Vibrationen)	
	1300	Parameter des Atominterferometers	
AP2000		Sensorkopfvalidierung	IQO
	2100	Aufbau eines Teststandes	
	2200	Inbetriebnahme des Teststandes	
	2300	Beschleunigungsmessungen im Teststand	
	2400	Korrelation / Hybridisierung im Teststand (IQ, Support: IMAR, IfE)	
	2500	Aktive Regelung im Teststand	
	2600	Aufbau eines Demonstrators	
	2700	Erste Inbetriebnahme des Demonstrators	
	2800	Beschleunigungsmessungen mit dem Demonstrator	
	2900	Andere Betriebsmodi des Atominterferometers	
AP3000		Konzeptevaluierung für Hybridisierung und Umsetzung	iMAR
	3100	Analyse der Anforderungen	
	3200	Umsetzung der Anforderungen (mit IQO, IfE)	
	3300	Auswertung und Optimierung	
AP4000		Anwendungen in der Navigation	IfE
	4100	Verständnis für Rauschprozesse in Quantensensoren	
	4200	Entwicklung eines stochastischen Beobachtungsmodells für das Navigationsfilter	
	4300	Entwicklung der kombinierten Filterlösung	
	4400	Performanceanalyse der kombinierten Filterlösung	
	4500	Entwicklung einer Auswertestrategie für Messungen von Quantensensoren	
	4600	Durchführung kinematischer Testmessungen (mit IQ)	
	4700	Analyse der kinematischen Testmessungen	
	4800	Navigationslösung in Mehrachskonfiguration	
AP5000		Multi-Achsen-Atominterferometer	IQO
	5100	Evaluation existierender Konzepte für Multi-Achsen-Anordnungen	
	5200	Entwicklung eines Multi-Achsen-Konzepts	
AP6000		Koordination	IfE
	6100	Koordination	
	6200	Koordinierung von Experimenten und Forschungsdatenmanagement	

Test und Qualifikation von Schlüsseltechnologien (z.B. aktive Regelung) für Quanteninertialsensoren in einem dedizierten Teststand Parallel zum Aufbau des eigentlichen Demonstrators wurden zunächst Schlüsseltechnologien wie die aktive Regelung eines Atominterferometers (mithilfe kommerzieller Beschleunigungssensoren und Gyrometer) über das Lasersystem und den beweglich gelagerten Retroreflexionsspiegel in einem Teststand für den Demonstrator entwickelt. Der Teststand selbst beinhaltet ein kommerzielles Vakuumsystem und stellt gegenüber dem Demonstrator einen vereinfachten Aufbau dar, der nicht auf Robustheit und Leistungsfähigkeit ausgelegt ist. Die entwickelten und getesteten Komponenten (Spiegelhalter, Regelungselektronik, Software) sollen für den Demonstrator übernommen werden. Die hier etablierte aktive Regelung stellt gegenüber publizierten Atominterferometer eine Neuerung und damit ein Alleinstellungsmerkmal dar.

Entwicklung eines Atominterferometersensorkopfes, der erstmals aktiv geregelt und der auftretenden Dynamik bei Navigationsanwendungen gerecht wird Basierend auf den Vorkenntnissen der Projektpartner wurde ein Demonstrator für einen Quanteninertialsensor konzipiert, aufgebaut und getestet, dessen Sensorkopf für die Anforderungen von Navigationsmessungen mit Hinblick auf Robustheit und Leistungsfähigkeit ausgelegt wurde. Spezielles Augenmerk wurde auf die Datenrate des Demonstrators sowie den Dynamikbereich des Demonstrators gelegt, für den im Teststand Vorentwicklungen stattfinden. Die Kombination von hoher Datenrate und erweiterten Dynamikbereich stellt ein weiteres Alleinstellungsmerkmal dar. Die Arbeiten für den Demonstrator schlossen auch den Aufbau anderer Systemgruppen wie Lasersystems, Kontrollelektronik und Computersteuerung ein.

Entwicklung eines Einachs-Hybridinstruments, das sowohl Langzeitstabilität (durch Quantensensoren) als auch die hohe Messfrequenz und Bandbreite abdeckt (klassisches Inertialsystem) Die Funktionalitäten der hohen Datenrate und des Dynamikbereiches wurden in diesem Vorhaben auf einer Achse entwickelt und untersucht. Die Atominterferometrie bietet dabei eine absolute Messung, während zusätzliche kommerzielle Sensoren höhere Frequenzbereiche abdecken und zur Generierung eines Regelsignals für das Atominterferometer verwendet wurden. In einer entsprechende Machbarkeitsstudie wurde gezeigt, dass das Prinzip auf mehrere Achsen übertragbar ist.

Entwicklung eines neuartigen Messaufbaus und Durchführung von Validierungsmessungen zur Verbesserung des Systems Für die Evaluierung des Systems mussten neuartige Vergleichs- und Testmethoden für Komponenten des Atominterferometers wie für das Hybridsystem entwickelt und erprobt werden. An dem Demonstrator für den Quanteninertialsensor waren Langzeitmessungen zum Nachweis der Stabilität, Messungen mit gezielten Störeinkopplungen und Messungen mit dem bewegten Sensorkopf (über einen Hexapod im Labor) geplant, um die Einsatzfähigkeit zu demonstrieren. Durch Verzögerungen in der Materialbeschaffung und fehlerhafte Lieferungen konnten diese Messungen innerhalb des Vorhabens QGyro nicht abgeschlossen werden und werden im Vorhaben QGyroPlus durchgeführt.

Entwicklung von geeigneten Auswertelgorithmen und Filtermodellen für die Quanteninertialnavigation Für die spätere geräteinterne Software mussten Verfahren der geräteinternen bidirektional gekoppelten Signalverarbeitung erforscht und getestet werden, die einerseits eine robuste Mehrdeutigkeitslösung der Quanteninterferometrie erlaubt und andererseits die Messergebnisse der Quantensensoren verwendet, um die konventionellen Inertialsensoren im System zu verbessern. Hierzu wurde eine Datenfusion durch Optimalfilterung entwickelt, um dem Nutzer die Navigationsdaten für Beschleunigungen und später Drehraten, aber auch eine integrierte Trajektorienlösung für Geschwindigkeit, Position und Lage zur Verfügung zu stellen.

1.4. Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik zu Vorhabenbeginn

Erste Simulationen von Jekeli (2005) auf Basis von Prototypenentwicklung in Stanford (Kasevich und Chu, 1991) zeigen das hohe Potential von Quanteninertialsensoren für die Navigation auf. Schwerpunkt war hier allerdings der Umgang mit der damaligen Limitierung der Duty Cycles der Quantensensoren, welche deshalb mit MEMS¹-Sensoren kombiniert wurden. Diese Studien wurden in zwei Masterarbeiten Canciani (2012) und Willis (2014) weiter betrachtet. Bochkati u. a. (2017) simulierten lediglich den Einfluss des geringen, als weißes Rauschen angenommenen Messrauschens der Quantensensoren. Systematische Abweichungen und nichtweißes Rauschen wurden nicht betrachtet.

Zur Zeit der Antragstellung existierten Anbieter für Lichtpulsatominterferometer in Frankreich (Ménoret u. a., 2018) und den USA (AOSense, 2017). Zusätzlich wurde in Frankreich kürzlich aufbauend auf ersten Demonstrationsmessungen in Kombination mit klassischen Inertialsensoren in einem Flugzeug (Geiger, 2011) ein Start-Up-Unternehmen mit dem Ziel des Baus eines Materiewellensensors als INS gegründet (iXAtom, 2017). Arbeiten aus Frankreich (z.B. Barrett u. a. (2014), Battelier u. a. (2016), Chichet (2017) und Bonnin u. a. (2018)), sowie die Arbeiten am Institut für Quantenoptik (u.a. Abend u. a. (2016)) lassen technische Realisierungen erwarten, bewegen sich aber derzeit nicht im für Navigation anvisierten Empfindlichkeitsbereich. Es ist zu bemerken, dass die zuvor genannten Experimente nicht über einen Demonstrationscharakter hinaus einzuordnen sind und am Institut für Quantenoptik durchgeführte Versuche im Kontext Gravimetrie, Rotationsmessungen und Hybridansätzen durchaus auf Augenhöhe stehen (z.B. Berg u. a. (2015), Abend u. a. (2016) und Richardson u. a. (2020b)). Im Bereich der Quantengravimeter, also ein-Achsen Beschleunigungsmessern zur Ausmessung des Erdschwerefelds werden in der Geodäsie erste Sensoren der Firma muquans derzeit getestet. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass kommerzielle Lösungen für Navigationsanwendungen insbesondere auf Zeitskalen des hier beantragten Projekts nicht zu erwarten sind. Im Gegenteil sollten die hier beabsichtigten durch iMAR unterstützten neuen Ansätze zur Lösung der Kernherausforderungen innerhalb einer möglichen Anschlussförderung des Projekts zum Schulterabschluss mit Firmen wie beispielsweise iXAtom führen.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung erreichten atomare state-of-the-art-Sensoren Empfindlichkeiten von $\sigma = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ Hu u. a. (2013) und bis zu $\sigma = 3 \cdot 10^{-8} \text{ rad/s/Hz}^{1/2}$ (Rotationen, Savoie u. a. (2018a), Dutta u. a. (2016) und Berg u. a. (2015)) mit Langzeitstabilitäten im Bereich von $5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2 @ 1 \cdot 10^5 \text{ s}$ (Freier u. a., 2016) bzw. $3 \cdot 10^{-10} \text{ rad/s} @ 1 \cdot 10^4 \text{ s}$ (Savoie u. a., 2018a) bei Datenraten in der Größenordnung 1 Hz. Weiterhin wurden höhere Datenraten für Beschleunigungen im Bereich 50 Hz–330 Hz mit $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ demonstriert (Rakholia u. a., 2014b). Vergleiche auch Abb. 1.1 für eine Darstellung als Allan-Varianz. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den genannten Arbeiten durchgängig um Laboraufbauten mit teils erheblicher technischer Komplexität sowie mangelnder oder nicht vorhandener Transportabilität handelt. Ebenso sind die erwähnten Apparaturen nicht für dynamische Umgebungen wie in Navigationslösungen verwendbar. Insbesondere leiden existierende Atominterferometer mit hohen Datenraten erheblich unter der für sie ungünstigen Skalierung der Empfindlichkeit T^2 und erreichen deshalb nicht die notwendigen Empfindlichkeitsniveaus. Erste Experimente zur einachsigen Seegravimetrie (Anwendungsziel ist hier explizit die Navigation anhand von Schwerekartierung und nicht basierend auf Trägheitsnavigation) auf einem Schiff (Bidel u. a., 2018) profitieren hauptsächlich von der inertial-stabilisierten Plattform des Projektpartners iMAR und unterstreichen das Potential der Antragsteller. So wird eine starke Synergie von iMARs Expertise gepaart mit den am Institut für Quantenoptik gesammelten Erfahrungen im Feld der Vibrationsisolierung und dynamischen Neigungskontrolle für Retroreflexpiegel.

Abschließend sind Messungen auf mehreren Achsen Gegenstand aktueller Forschung (Barrett u. a., 2019; Chen u. a., 2018; Canuel u. a., 2006a), diese sind jedoch auch weit von der Einsatzbereitschaft auf dynamischen Plattformen entfernt.

¹MEMS: mikro-elektro-mechanische Systeme (geringe Stabilitätsanforderungen)

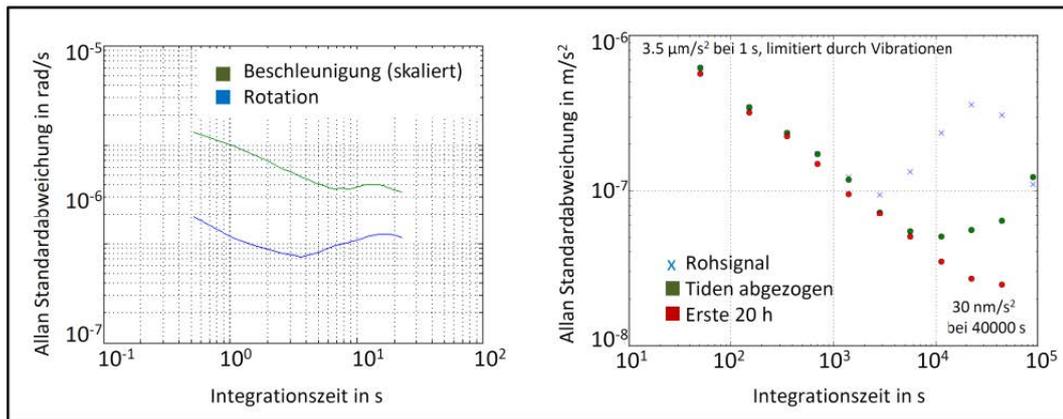


Abbildung 1.1: Allan Standardabweichungen des am IQ untersuchten Gyroskops (links, Berg u. a. (2015)) und Gravimeters (rechts, Schlippert u. a. (2014)) im Einzelspeziesbetrieb. In weiteren Messungen konnten eine Integration des Gyroskops auf 26 nrad/s nach 100 s gezeigt werden. Der abgeschätzte technische Rauschuntergrund des Gravimeters liegt deutlich niedriger als die gezeigte vibrationslimitierte Kurve.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben konnte aufgrund seiner Komplexität nur mit der Beteiligung mehrerer Fachdisziplinen erfolgreich und effizient bearbeitet werden. Wir bauten hier auf die Synergie aus der Expertise der Atominterferometrie und Quantensensorik (Institut für Quantenoptik), das seine gesammelten Erkenntnisse zu Quantensensoren für dieses Vorhaben nutzbar machte, den Erfahrungen in der Entwicklung von Navigationsalgorithmen und Sensortests (Institut für Erdmessung) und der Expertise zur klassischen Inertialsensorik und Stabilisierung (iMAR). Darüber hinaus brachte iMAR als mittelständisches Unternehmen die Expertise der Anwendung inertialer Messtechnik in industriellen Anwendungen in das Projekt ein. Diese Anwendungen umfassen u.a. die Ortung, Navigation und Stabilisierung von Plattformen. Im hier beschriebenen Verbundvorhaben hat iMAR eine inertial stabilisierte Plattform als Trägersystem für die Systemtests realisiert. iMAR hat darüber hinaus den Marktzugang, die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Technologie bei entsprechender Eignung und Serienreife einer Verwertung zuzuführen.

Verbundpartner Am **Institut für Erdmessung der Leibniz-Universität Hannover** (LUH, Prof. Dr. S. Schön) liegen langjährige Erfahrungen im Bereich der hochpräzisen GNSS-Auswertung und Korrektur systematischer Effekte vor. Im **DFG Graduiertenkolleg I.C.Sens** (Integrität und Kollaboration in dynamischen Sensornetzen) werden alternative Methoden zur Beschreibung der Integrität auf Basis von Intervallmathematik untersucht, die Beobachtungsabweichungen durch Fehlerbänder beschreiben. Darüber hinaus werden Filteransätze zur kollaborativen Positionierung und Navigation in Sensornetzen entwickelt, die den Mehrwert der Kollaboration herausarbeiten. Im Rahmen der Vorhaben Venadu (Krawinkel und Schön, 2017) und Venadu 2 (Krawinkel u. a., 2021) wurden erfolgreich Konzepte erforscht, um die Navigationsperformance durch Nutzung externer miniaturisierter Atomuhren (CSAC) zu verbessern. Im Vorhaben QuSI (Tennstedt und Schön, 2021a) wurde eine Simulationsumgebung für Quanteninertialsensoren entwickelt, die zu erwartende deterministische und stochastische Fehler umfasst, und mit der auch die Vorgabe zeitlich korrelierter Rauschprozesse möglich ist.

Die Gruppe **Quantum Sensing am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover** (IQ, Prof. E.M. Rasel, Dr. D. Schlippert, Dr. S. Abend) beschäftigt sich mit ultra-kalten und kondensierten Quantengasen, Atomoptik, Atominterferometrie und optischen Uhren. Mehrere Experimente untersuchen die Atominterferometrie zur Messung inertialer Kräfte, darunter ein Gyroskop (vgl. Abb. 1.1), ein Zwei-Spezies-Gravimeter für einen Test der Universalität des freien Falls, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Erdmessung (LUH) ein Quantengravimeter der nächsten Generation, (vgl. Abb. 1.2), gegenwärtig im Aufbau, und ein Teststand für Atominterferometrie auf langen Basislinien, ebenfalls im Aufbau. Außerdem leitet das IQ die QUANTUS Kollaboration, die die Interferometrie mit Bose-Einstein-Kondensaten unter Schwerelosigkeit im Fallturm in Bremen erforscht. Darauf aufbauend

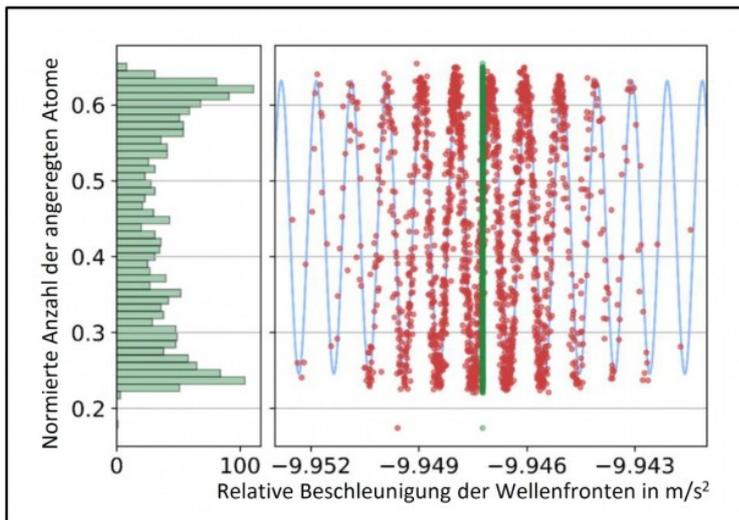


Abbildung 1.2: Voruntersuchungen zur Aufhebung der Mehrdeutigkeit am Gravimeter. Der Vibrationsrauschuntergrund bewirkt, dass sich die Datenpunkte über mehr als eine Flanke der sinusförmigen Antwort des Interferometers verteilen und damit außerhalb des reziproken Bereichs liegen. Durch eine Korrelation mit einem externen Sensor kann die Beschleunigungsphase rekonstruiert werden.

wurde eine Nutzlast für eine Höhenforschungsrakete entwickelt, die das erste Bose-Einstein-Kondensat im Weltraum erzeugen konnte. Gegenwärtig wird an einer Nachfolgemission gearbeitet. Die Mikrogravitationsforschung war weiterhin der Startpunkt für die Studie einer Atominterferometernutzlast für die Mission STE-QUEST mit dem Ziel des Tests der Universalität des freien Falls auf einem Satelliten, ebenfalls geleitet vom IQ. Die Studien der Gruppe umfassen auch die Korrelation von Atominterferometern mit klassischen Sensoren, atomchipbasierte Gravimetrie mit Strahlteilungsprozessen hoher Ordnung in neuen Geometrien, Quellen für Bose-Einstein-Kondensate mit hohem Fluss wie bereits in den Mikrogravitationsexperimenten eingesetzt, Rekordwerte für Strahlteilungsprozesse hoher Ordnung und entsprechende umfangreiche theoretische Betrachtungen.

Die **iMAR Navigation GmbH** mit Sitz in St. Ingbert verfügt über 30 Jahre Erfahrung auf den Gebieten der Konzipierung, Entwicklung und Herstellung, inertialer Mess- und Navigationssysteme für Aufgaben in Vermessung, Verteidigung, Stabilisierung, Führung, Regelung und Spezialanwendungen, für unbemannte und bemannte Plattformen. Details sind unter der Web-Adresse <https://www.imar-navigation.de> zu finden. Anwendungen umfassen u.a. die Navigation von UAVs, die präzise kreiselbasierte Trajektorien-Regelung von Bohrköpfen für die Horizontalbohrtechnik, die Navigation von Target-Drohnen bis hin zur Vermessung der Fahrzeugdynamik (Elchtest, ADAS, hochautomatisiertes Fahren), die Verortung von Pipelinetrajektorien, die Navigation von fahrerlosen Transportsystemen, Systeme zur Strapdown-Fluggravimetrie oder Design und Fertigung komplexer stabilisierter Plattformen oder inertialer Messsysteme für das Laserscanning (LIDAR) mit höchster Genauigkeit. Die Firma iMAR arbeitet seit über 2 Jahrzehnten mit allen Arten konventioneller Inertialsensorik, vom Ringlaser- und Faserkreisel über hemisphärische Resonatorkreisel bis hin zu MEMS Kreiseln und dynamisch abgestimmten mechanischen Kreiseln. Das Gebiet der Quanteninertialsensorik ist für iMAR ein neues Gebiet, auf dem entsprechendes anwendungsorientiertes Wissen aufbauen werden soll.

2

Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens

Atominterferometer liefern vielversprechende Möglichkeiten zur Erfassung präziser Beschleunigungsmessungen. Jedoch ist die Konfiguration an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendungsbereiche anzupassen. Die Datenrate, der Dynamikbereich und die Freifallzeit sind entscheidende Faktoren, die gesondert betrachtet werden müssen. Eine flexible Anpassung der Freifallzeit ermöglicht eine optimale Sensitivität für verschiedene Umgebungsdynamiken. Generell haben Atominterferometer das Potenzial, präzise Messungen durchzuführen, doch sie erfordern gleichfalls eine sorgfältige Abstimmung zum Erzielen der optimalen Ergebnisse.

Der erste Unterabschnitt (2.1) widmet sich der Definition und Festlegung des Arbeits- bzw. Dynamikbereiches neuer Quantensensoren (AP1100-1200), den Anforderungen an die Empfindlichkeit und Konzepte zur Unterdrückung von Störeinflüssen. Diese Erkenntnisse fließen in die wesentlichen Parameter ein, die das zu entwickelnde System definieren. In Abschnitt (2.2) wird die Validierung des Sensorkopfs beschrieben. Dies beinhaltet den Aufbau und die Inbetriebnahme des sog. *Teststandes* (einachsiger Beschleunigungsmesser) sowie die Entwicklung des sog. *Demonstrators*, eines Drei-Achsen-Beschleunigungsmessers. Um die Dynamiken während der Messung kompensieren zu können, ist eine stabilisierte Plattform notwendig. Deren Design und Aufbau wird in Abschnitt (2.3) erläutert. In Abschnitt (2.4) werden die entwickelten Filter für die Navigation präsentiert. Dies beinhaltet alternative und innovative Ansätze des sog. Atom-Strap-Down-Algorithmus, die Test und Validierung mit simulierten wie auch realen Daten aus älteren Experimenten des IQO bzw. mit emulierten CAI-Daten durch eine hochgenaue IMU. Abschließend werden in Abschnitt (2.5) auf Multi-Achs-Systeme und deren Herausforderungen eingegangen.

2.1. Herausarbeiten der spezifischen Merkmale eines Atominterferometers (AP1000, IQO)

2.1.1. AP1100 - Dynamikbereich und Datenrate

Atominterferometer haben das Potenzial für Beschleunigungsmessungen aufgrund ihrer hohen Langzeitstabilität und Empfindlichkeit eingesetzt zu werden. Allerdings muss die Konfiguration des Atominterferometers auf die Anwendung angepasst werden. Hierfür sind vor allem die Datenrate, der Dynamikbereich und die Empfindlichkeitsanforderungen wichtig. Zwischen der Empfindlichkeit und dem Dynamikbereich des Quantensensors besteht ein inverser Zusammenhang; daher muss

hier ein Kompromiss eingegangen werden. In der inertialen Navigation ist die vorrangige Aufgabe des Quantensensors, eine über lange Zeit stabile Referenz für klassische Sensoren zu bieten. Aus diesem Grund muss die Datenrate nicht hoch sein, da der klassische Sensor bei hoher Datenrate über kurze Zeit stabil messen kann. In diesem Fall ist die bevorzugte Datenrate 1 Hz. Eine hierzu passende Freifallzeit ist $T = 30 \text{ ms}$. Längere Freifallzeiten würden die Empfindlichkeit erhöhen, können jedoch auch zu einer Nichteinhaltung der Datenrate führen. Die 2π -Periode und damit der Dynamikbereich des Atominterferometers ist für $T=30 \text{ ms}$ gleich $4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$. Die Einzelschussempfindlichkeit beträgt $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^2$.

Generell kann man annehmen, dass für dynamische Anwendungen Freifallzeiten von $T=30 \text{ ms}$ nicht überschritten werden sollten, da dynamische Effekte wie Querschleunigungen zu einem lateralen Versatz des Atom-Ensembles gegenüber den Laserstrahlen führen würden und so den interferometrischen Kontrast reduzieren oder sogar ganz verschwinden lassen. Für Rotationen kommt hier nur die aktive Kompensation infrage, da der Kontrastverlust durch nicht idealen Überlapp der Wellenpakete schon bei deutlich kleineren Freifallzeiten so stark ist, dass dies zum vollständigen Kontrastverlust führen würde. Strap-down wären die Freifallzeiten auf den Bereich von 1–3 ms zu reduzieren, was damit die Sensitivität des Interferometers um zwei Größenordnungen verringert. In ruhigen Umgebungen lassen sich die Freifallzeiten natürlich länger wählen. Eine weitere nützliche Methode ist es, dass sich die Freifallzeit bei jedem Schuss des Atominterferometers neu festlegen lässt, somit kann die Sensitivität des Atominterferometers auf die Dynamik der Umgebung angepasst werden, ohne Änderungen am System durchzuführen.

2.1.2. AP1200 - Konzepte zur Unterdrückung von Störeinflüssen (Vibrationen)

Hochfrequente Vibrationen können die Beschleunigungsmessung des Atominterferometers stören. Wird durch Vibrationen die Phase um mehr als der 2π Dynamikbereich beeinflusst, so wird die Eindeutigkeit des Signals aufgehoben, vgl. Abb. 1.2. Um dies zu verhindern, kann mit einem klassischen Sensor die Bewegung des Referenzspiegels des Atominterferometers gemessen werden. Dieses Signal kann verwendet werden, um hochfrequente Bewegungen zu erfassen und zu kompensieren. Dies hilft, die Phase des Atominterferometers eindeutig zu bestimmen. Hierdurch kann der Dynamikbereich des hybriden Sensors auf mehrere g erweitert werden. Im Vorhaben stehen mehrere kommerzielle Sensoren, z.B. Nanometrics Titan, Honeywell QA2000 und Innalabs AI.Q.20xx zur Verfügung. Der Sensor von Nanometrics hat das niedrigste am Markt erhältliche Eigenrauschen mit -150 dBm@150 Hz, sowie eine dynamische Bandbreite von 166 dB und ist in der Atominterferometrie weit verbreitet, aufgrund seiner Größe von mehr als 100 cm^3 Volumen ist er jedoch für dieses Projekt nicht gut geeignet. Für kurze Zeiten T können auch die anderen genannten Sensoren verwendet werden. Für die maximale Freifallzeit ist dies jedoch nicht sicher und es muss untersucht werden, ob sie den Sensor von Nanometrics ersetzen können.

2.1.3. AP1300 - Parameter des Atominterferometers

Die Parameter, die für Atominterferometer zur Messung von Beschleunigungen und Rotation benutzt werden sollen, um eine entsprechende Sensitivität zu liefern, lassen sich direkt den Publikationen von Gersemann u. a. (2020b) und Schubert u. a. (2021b) entnehmen. Hierbei handelt es sich um Betrachtungen, denen Atominterferometergeometrien zugrunde liegen, die von uns in den Publikationen vorgeschlagen worden sind und hier in den entsprechenden Sektionen der Arbeitspakete vorgestellt werden, in denen sie erarbeitet worden sind. Hier lässt sich erkennen, dass sich unterschiedliche Parameter für verschiedene Einsatzzwecke ergeben, abhängig von der angestrebten Sensitivität. Insbesondere gilt es aber zu beachten, dass je größer die Sensitivität auf Beschleunigungen wird, desto stärker steigen die Anforderungen an eine Hybridisierung.

In Tabelle 2.1 sind die Empfindlichkeitsgrenzen eines dualen BEC¹-Interferometers pro Schuss dargestellt, basierend auf den Parametern Atomzahl N , Pulstrennzeit T , Kontrast C , Trenngeschwindigkeit v_{sep} und Impuls $\hbar k_{\text{eff}}$, der innerhalb der Mach-Zehnder-Sequenz übertragen wird. Die Parametersätze sind durch den erreichbaren Raum-Zeit-Bereich des Interferometers begrenzt, der durch den Interferometrie-Strahlendurchmesser d begrenzt ist. Außerdem werden die Parameter für zwei Anwendungen, eine für Navigationszwecke und eine für die Erfassung der Erdrotation, vorgestellt und die entsprechenden Empfindlichkeiten pro Zyklus angegeben.

Tabelle 2.1: Empfindlichkeitsgrenzen eines dualen BEC-Interferometers pro Schuss

Sensor Features	Strahl- durch- messer d	N	T	C	v_{sep}	$\hbar k_{\text{eff}}$	Beschleu- nigungs- sensor Limit $1/(\sigma_{\text{qp}} k_{\text{eff}} T^2)$	Rotations- sensor Limit $1/(\sigma_{\text{qp}} k_{\text{eff}} v_{\text{sep}} T^2)$
	[mm]		[ms]		[$\hbar k/m$]	[$\hbar k$]	[m/s^2]	[rad/s]
Testaufbau	6.6 ^a	$1.5 \cdot 10^4$	5	0.64	4	2	$3.1 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Navigation	15 ^b	$1 \cdot 10^5$	25	0.50	32	16	$7.9 \cdot 10^{-8}$	$4.2 \cdot 10^{-7}$
Erdbeobachtung	50 ^b	$1 \cdot 10^6$	125	0.50	32	96	$1.7 \cdot 10^{-10}$	$8.8 \cdot 10^{-10}$

^aGaußscher Strahldurchmesser $2w_0$, ^bFlat-Top Strahldurchmesser

Tabelle 2.2: Vergleich unseres Multi-Loop-Schemas mit einem Vier-Puls-Interferometer und Leistungsabschätzung.

Sensor Features	N	k	T	n	C	A	t_c	S	D	Sensitivität
		[$2\pi/780\text{nm}$]	[ms]			[m^2]	[s]	[m]	[m]	[rad/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$]
1: Multi-Loop	10^5	40	10	10	1	$4.6 \cdot 10^{-5}$	1.6	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-8}$
1: Vier-Puls	10^5	350	10	-	1	$4 \cdot 10^{-5}$	1.24	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-8}$
2: Multi-Loop	$4 \cdot 10^5$	20	250	10	1	$3.6 \cdot 10^{-1}$	11.8	$3 \cdot 10^{-2}$	0.7	$5.5 \cdot 10^{-12}$
2: Vier-Puls	$4 \cdot 10^5$	28	189	-	1	$2.1 \cdot 10^{-2}$	2.8	$3.1 \cdot 10^{-2}$	0.7	$4.2 \cdot 10^{-11}$
Kompakt	$5.9 \cdot 10^4$	40	10	6	0.53	$2.8 \cdot 10^{-5}$	1.44	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$
Hohe Sensitivität	$2.9 \cdot 10^5$	20	250	4	0.66	$1.4 \cdot 10^{-1}$	5.8	$3 \cdot 10^{-2}$	0.7	$1.7 \cdot 10^{-11}$

Tabelle 2.1 hingegen stellt die erreichbare Sensitivität dar, wenn nur Rotationen gemessen werden sollen und die Sagnac Fläche weiter gesteigert werden soll. Wir gehen dabei auf der Basis von Rubidiumatomen (siehe Steck (2001)), einer Anzahl von N detektierten Atomen, einer effektiven Wellenzahl k , einer Pulsseparationszeit T und einem Kontrast C und n Schleifen aus. A bezeichnet die effektiv eingeschlossene Fläche, welche mit n skaliert. Sowohl bei der Berechnung von A als auch bei der Empfindlichkeit werden endliche Pulsdauern vernachlässigt. Der maximale Abstand der Trajektorien ist durch S gegeben. Für die Abschätzung der Falldistanz D im Hinblick auf ein kompaktes Szenario berücksichtigen wir eine zusätzliche Zeit von 6 ms für den Impulstransfer. Unsere Interferometer-Zykluszeit wird mit t_c bezeichnet, und wir geben die Empfindlichkeit in der Schuss-Rausch-Grenze gemäß Gl. (2.3) an. In den ersten vier Zeilen vergleichen wir Multi-Loop-Interferometer mit Vier-Puls-Geometrien ohne Relaunch, wobei wir die Unterschiede in den Parametern in Blau hervorheben und Atomverluste und Kontrastminderung aufgrund unvollkommener Strahlteiler vernachlässigen. Für die unteren beiden Zeilen nehmen wir ein einfaches Modell an, bei dem der Kontrast für mehrere Schleifen $C(n)$ vom Kontrast für eine einzelne Schleife $C(1)$ abhängt und als $C(n) = C(1)^n$ skaliert. Darüber hinaus reduziert unser Modell die Anzahl der nachgewiesenen Atome um einen Faktor l^{n-1} mit $l = 0.9$ für zusätzliche Schleifen, um Ineffizienzen in den Atom-Licht-Wechselwirkungen zu berücksichtigen.

¹BEC: Bode-Einstein-Kondensat

2.2. Validierung des Sensorkopfes(AP2000, IQ)

Im Rahmen des Verbundprojektes QGyro werden zwei Systeme für die Erforschung der Quantennavigation aufgebaut. Der Teststand ist ein Einachsen-Beschleunigungsmesser mit einem kompakten kommerziellen Vakuumsystem im Zentrum des Sensorkopfes, während der Demonstrator auf einem maßgeschneiderten Vakuumsystem basiert und Mehrachsen-Messungen ermöglicht.

2.2.1. Teststand (AP2100-2500)

Aufbau des Teststandes (AP2100)

Im Rahmen des AP2100 wurde ein Sensorkopf-Teststand aufgebaut. Hierfür wurden größtenteils kommerzielle Komponenten verwendet. Der Sensorkopf besteht aus einer Vakuumkammer von ColdQuanta, die mit weiteren optischen und elektrischen Komponenten (z. B. Strahlformungsoptik von Asphericon, Magnetspulen, Photodioden) verbunden wurde, um eine eindimensionale Beschleunigungsmessung zu ermöglichen. Der ca. 50 cm × 30 cm × 50 cm große Sensorkopf ist über Fasern und Kabel mit einem Laser- und Elektronikrack verbunden. Das Lasersystem besteht aus zwei NKT Basik, einem NKT Boostik und einem NKT Harmonik, sowie weiteren optischen Elementen, die in Abb. 2.1 gezeigt sind. Als Echtzeitkontrollsystem wurde ein ARTIQ/Sinara System aufgesetzt. Dies übernimmt die zeitliche Steuerung von Messesequenzen, stellt Radiofrequenzen/Mikrowellen bereit und kann analoge Signale ausgeben (zum Steuern des ColdQuanta Stromtreibers) und aufzeichnen (z.B. Photodioden). Ein Gesamtüberblick des Systems ist in Abb. 2.2 zu sehen. Die kompakte und robuste Bauweise ermöglicht einen einfachen Transport.

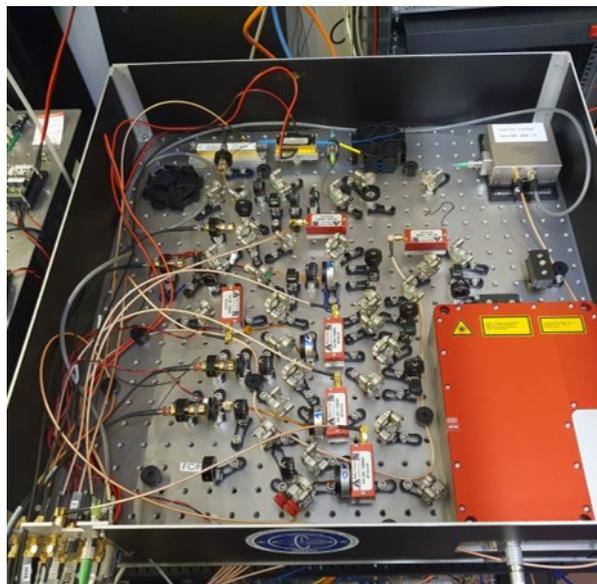


Abbildung 2.1: Vollständig aufgebaute Lasersystem. Unten rechts ist die Frequenzverdopplung von NKT zu sehen. Hierauf folgen mehrere optische Komponenten, wie Strahlteiler und akustooptische Modulatoren zum Aufteilen und Manipulieren des Laserstrahls.

Die Charakterisierung der optischen Strahlformen an mehreren Stellen des Sensorkopfes ist in Abb. 2.3 gezeigt und zeigt eine ausreichende Qualität für die magneto-optische Falle und die Interferometrie. Die Uniformität des Interferometriestrahls auf dem Prozentlevel ist essenziell, dass das Interferometer auch unter parasitären lateralen Beschleunigungen betrieben werden kann. Von besonderem Interesse ist das Zylinderprofil des senkrechten Lichtstrahls, welcher für die Interferometrie verwendet wird.



Abbildung 2.2: Vollständigen Atominterferometeraufbau mit Sensorkopf und zugehörigen Elektronik- und Laserracks.

Inbetriebnahme des Teststandes (2200)

Zur Erzeugung von kalten Atomen wird ein Vakuumsystem von ColdQuanta verwendet. Dies beinhaltet eine 2D-MOT Zelle, welche einen Strahl vorgekühlter Rubidiumatome bereitstellen kann. Hierfür wird zusätzlich Licht aus dem Lasersystem, sowie eine Stromquelle zum Beheizen des Dispensers benötigt. In Abb. 2.4 ist das Innere der 2D-MOT Zelle während des erfolgreichen Betriebes gezeigt.

Diese vorgekühlten Atome werden in einer 3D-MOT gesammelt und weiter gekühlt. Hierfür wird neben Licht aus dem Lasersystem auch Strom für die 3D-MOT Spulen benötigt. Eine Wolke aus kalten Atomen in der 3D-MOT ist in Abb. 2.5 gezeigt. Die Laderate der 3D-MOT wurde über eine Photodiode gemessen und beträgt nach Optimierung der Lichtleistung, Verstimmung der Lichtfrequenz und des magnetischen Quadrupolgradienten $5 \cdot 10^9$ Atome/s.

Im Rahmen der Projektlaufzeit hat die Inbetriebnahme des Teststandes leider einen erhöhten Zeitaufwand eingenommen, da zum einen die Lieferzeit der kommerziellen Vakuumanlage deutlich länger als gedacht in Anspruch genommen hat, zum anderen die Inbetriebnahme der Quelle komplexer als gedacht zu bewerkstelligen war. So musste zum Beispiel die Optik der 2D-MOT und die Stromtreiber noch einmal beim Hersteller überarbeitet werden, da diese Fehlfunktionen aufwiesen. Zum anderen nahm die Stabilisierung des Lasersystems und die Auswahl der Laser und Komponenten zur Frequenzmodulation eine erheblich größere Zeit in Anspruch, weil kommerziell verfügbare Komponenten nur bedingt für unseren Einsatz angepasst sind. Dem trägt das Projekt QGyro+ Rechnung, indem erheblich enger mit den Firmen zusammengearbeitet werden kann, um die Subsysteme besser an unseren Einsatz anzupassen.

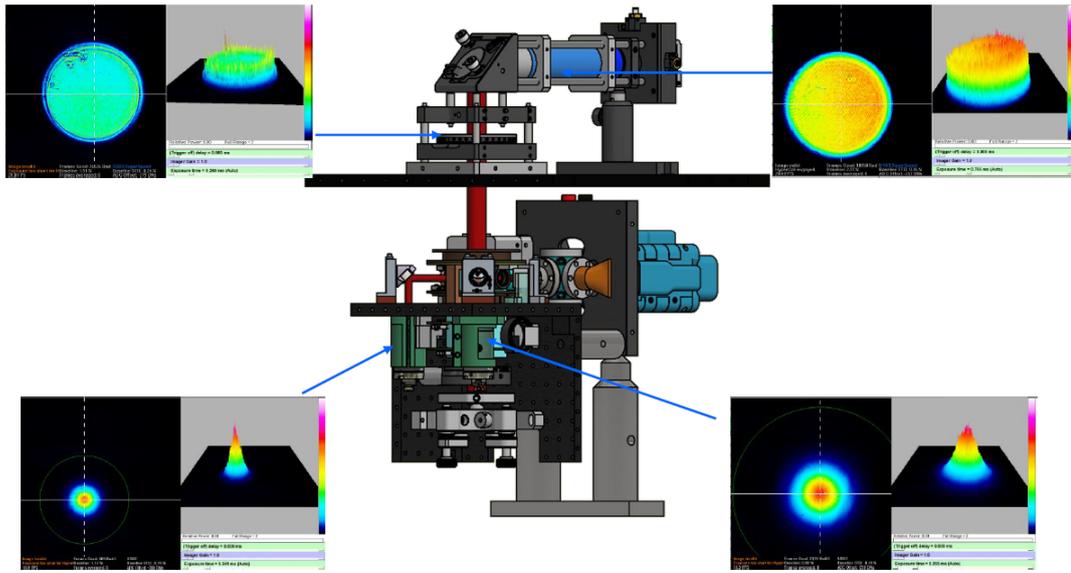


Abbildung 2.3: In den einzelnen Bildausschnitten ist die Charakterisierung der Lichtstrahlen an unterschiedlichen Stellen des Sensorkopfes gezeigt, welcher in der Mitte als CAD-Zeichnung dargestellt ist. Oben rechts und oben links ist das Strahlprofil direkt hinter dem Zylinderprofilstrahlformer und zusätzlich hinter dem Flüssigkristallverzögerer gezeigt, unten links und unten rechts ist das Strahlprofil der 3D-MOT Strahlen gezeigt.

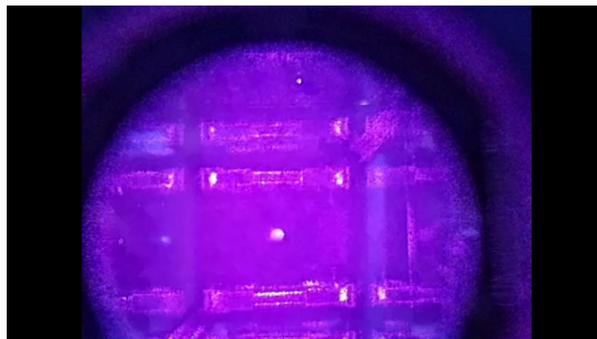


Abbildung 2.4: Blick durch das hintere Fenster der 2D-MOT Zelle während des Betriebes. Der helle Punkt in der Mitte ist ein Strahl aus vorgekühlten Rubidiumatomen.

Beschleunigungsmessungen im Teststand (AP2300)

Durch die Verzögerung der Auslieferung des kommerziellen Vakuumsystems und Komplikationen bei der Inbetriebnahme, wurden im Rahmen von QGyro sämtliche Beschleunigungsdaten, die auf Quantenmessungen basieren und für die Hybridisierung/Algorithmen zum Einsatz gekommen sind, in einem laborbasierten Prototypen-Beschleunigungsmesser generiert, damit die sämtliche Arbeitspakete bearbeitet werden konnten. Die Beschleunigungsmessungen im Teststand werden im Anschluss an die Projektlaufzeit nachgeholt.

Korrelation / Hybridisierung im Teststand (AP2400)

Die Eindeutigkeit des Signals kann durch Nachkorrektur der Atominterferometerdaten mit den in AP1200 erarbeiteten Konzepten während der Datenauswertung erreicht werden, Abb. 2.6. Durch eine Nachkorrektur würde sich jedoch die Datenrate massiv verringern. Eine Echtzeit-Vorsteuerung des Interferometrielasers erlaubt eine hohe Datenrate und ermöglicht auch eine eindeutige Bestimmung des Interferometersignals. Um eine hohe Effizienz bei der Unterdrückung von Vibrationsrauschen zu erreichen, muss der klassische Sensor gut mit dem Retroreflexspiegel verbunden werden. Andernfalls

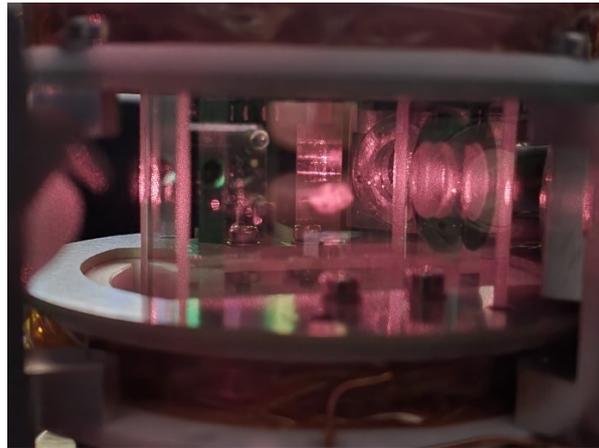


Abbildung 2.5: In der Mitte des Bildes ist eine rötlich leuchtende Wolke aus kalten Rubidiumatomen gefangen in einer 3D-MOT zu sehen.

reduziert sich die Korrelationseffizienz aufgrund der unbekanntenen mechanischen Transferfunktion zwischen dem Spiegel und dem klassischen Akzelerometer. Wir haben den Einbau eines miniaturisierten opto-mechanischen Resonators (OMR) direkt auf dem Retroreflexspiegel zur Vibrationsrauschunterdrückung in Richardson u. a. (2020a) demonstriert.

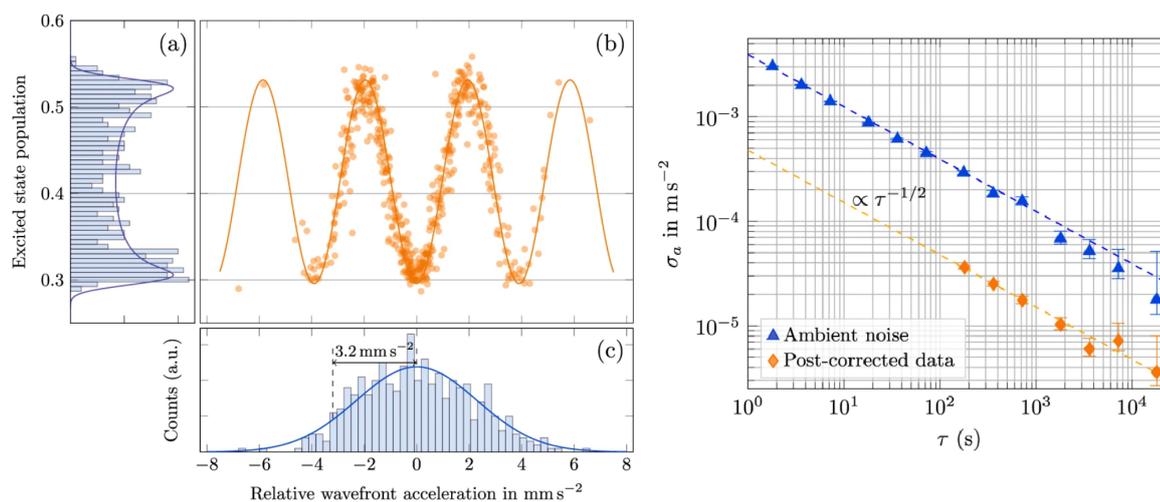


Abbildung 2.6: Die linke Abbildung zeigt die Rekonstruktion des Interferometriemusters in einer dynamischen Umgebung. Rechts ist die Allan-Varianz zu sehen, die eine Verbesserung der Sensitivität zeigt (Richardson u. a., 2020a).

Aktive Regelung im Teststand (AP2500)

Zur Vorbereitung und Planung der Echtzeit-Korrektur der Laserphase wurde eine vorläufige Version mit dem ARTIQ/Sinara Experimentkontrollsystem erstellt und getestet. Es wurde eine realistische Datenausgabe eines klassischen Akzelerometers mit Beschleunigungswerten aus Richardson u. a. (2020b) simuliert. Dies wurde in das Echtzeit-Vorsteuersystem geführt, welches aus den simulierten Daten erfolgreich die Korrektur der Laserphase berechnen konnte. Dieser Test zeigt, dass das ARTIQ/Sinara System zur Vorsteuerung der Laserphase verwendet werden kann. In Abb. 2.7 sind die Residuen der Beschleunigung zwischen Nachkorrektur und Echtzeitkorrektur dargestellt und zeigen eine gute Übereinstimmung. Einzelne Ausreißer und eine konstante Verschiebung benötigen jedoch weitere Untersuchung.

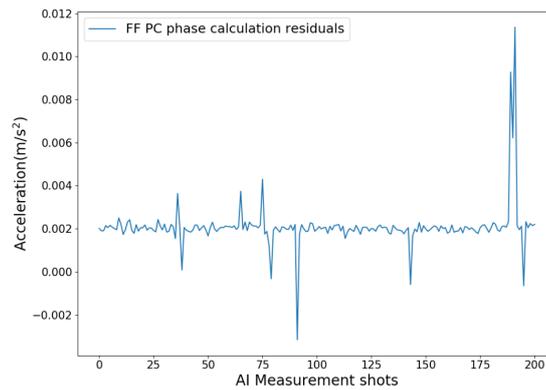


Abbildung 2.7: Vergleich der Residuen der über Nachkorrektur und Echtzeitkorrektur berechneten Beschleunigung zur Vibrationsrauschunterdrückung. Damit ist eine grundsätzliche Funktionalität der simulierten Echtzeitkorrektur gezeigt.

2.2.2. Demonstrator (AP2600-AP2900)

Aufbau eines Demonstrators (AP2600)

Im Gegensatz zum Teststand wird beim Demonstrator keine voll-kommerzielle Vakuumapparatur genutzt, sondern eine Kombination aus kommerzieller Atomstrahlquelle in Form einer 2D+MOT und einer individuell gefertigten Hauptkammer genutzt, vgl. Abb. 2.8. Für die Atomquelle wird eine kommerzielle Atomstrahlquelle von ColdQuanta verwendet, die sich von der 2D+MOT des Teststandes in der Form unterscheidet, dass dort keine Permanentmagneten zum Einsatz kommen, sondern Magnetfeldspulen. Dies hat den Vorteil, dass die Spulen während der Interferometrie abgeschaltet werden können und sich die Atomquelle somit innerhalb des Magnetschildes befinden kann. In der Hauptkammer wird ein Atomchip, der im Rahmen des QGyro+ Projektes von unseren Projektpartnern am IMPT gefertigt wird, zum Einsatz kommen. Der Atomchip wird auf einem Trägersystem aus Kupfer in der Vakuumkammer montiert, an dessen Ende sich ein CF-40 Würfel befindet. Dieser Würfel erfüllt verschiedene Aufgaben und beherbergt sowohl die elektrischen Durchführungen zum Atomchip, die Ionen-Getter-Pumpe sowie das Vakuumventil zur Evakuierung des Gesamtsystems.

Erste Inbetriebnahme des Demonstrators (AP2700)

Das Lasersystem des Demonstrators wurde vollständig in der Förderphase von QGyro beschafft und konnte bereits in Betrieb genommen werden. Der Aufbau des Lasersystems unterteilt sich in zwei verschiedene Untergruppen: Kühlung und Manipulation, vgl. Abb. 2.9 und Abb. 2.10. Für die Kühlung der Atome kommen zum ersten Mal im QGyro Projekt modulare Laser von NKT Photonics der Serie Acoustik zum Einsatz, die den Vorteil haben, dass sie deutlich kompakter aufgebaut werden können, als die herkömmlichen 19" Rack Module. Für die Aufteilung der Laserstrahlen kommt ein rackfähiges Breadboard zum Einsatz, welches ursprünglich an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für transportable Uhren entwickelt wurde. Dieses beherbergt alle Freistrahalkomponenten und die Einkopplungen in die optischen Fasern, die zum Experimentkopf führen.

Da im Demonstrator Bragg-Strahlteiler und Bloch-Gitter analog zum Zwillingsgitter eingesetzt werden sollen, wie es in Gebbe u. a. (2021b) vorgestellt wurde, ist ein komplexeres Lasersystem erforderlich. Als Laserquellen kommen hier zwei Einheiten des NKT Harmonik Lasers zum Einsatz, von denen eine Einheit für den Teststand genutzt wird. Die Laser selbst arbeiten jedoch nicht bei der Wellenlänge der Rubidium D2-Linie, sondern jeweils etwa 100 GHz entweder blau oder rot zum Übergang verstimmte, um spontane Übergänge zu unterdrücken und AC-Stark Verschiebungen zu kompensieren, analog zur Veröffentlichung von Kim u. a. (2020).

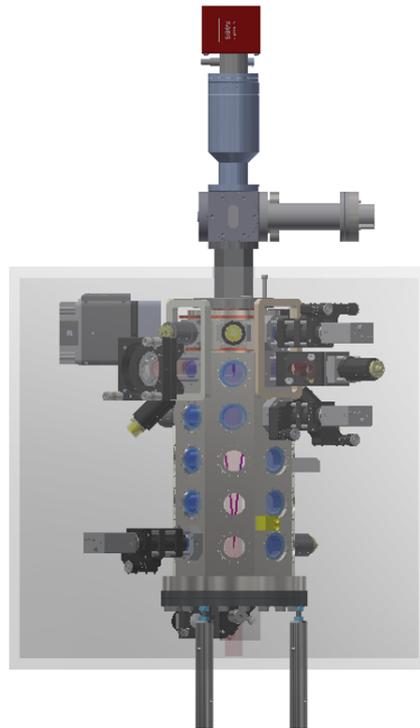


Abbildung 2.8: Schema des Vakuumsystems des Demonstrators.

Für das Steuersystem des Demonstrators werden exakt die gleichen ARTIQ/Sinara Komponenten verwendet, die bereits im Teststand zum Einsatz kommen. Dies erlaubt eine deutliche beschleunigte Inbetriebnahme, da keine neuen Komponenten charakterisiert werden müssen. Eine Änderung betrifft die stabile Referenz von SpectraDynamics, bei der statt eines 6,8 GHz Ausgangs ein 6,9 GHz Ausgang zum Einsatz kommt und ein zusätzlicher 1 GHz Ausgang vorhanden ist. Diese Änderungen ermöglichen eine einfachere Frequenzgeneration, um den Hyperfeinübergang des Rubidiums anzusprechen. Der zusätzliche Ausgang ermöglicht die direkte Stabilisierung der DDS für verringertes Phasenrauschen.

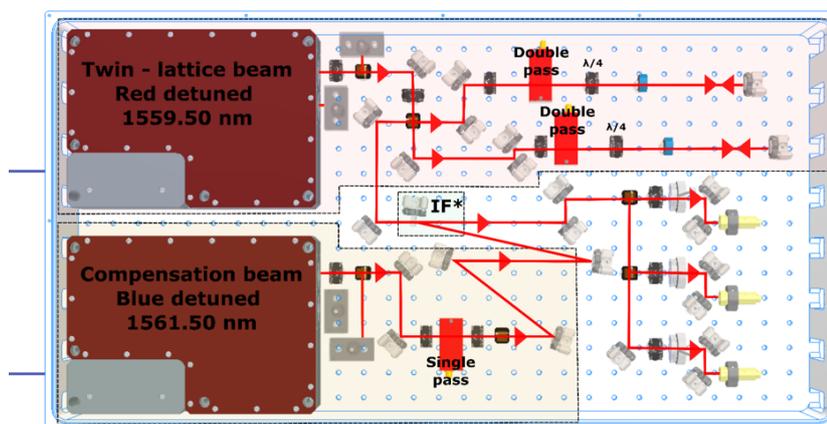


Abbildung 2.9: Schema der Gittersektion für das Lasersystem des Demonstrators.

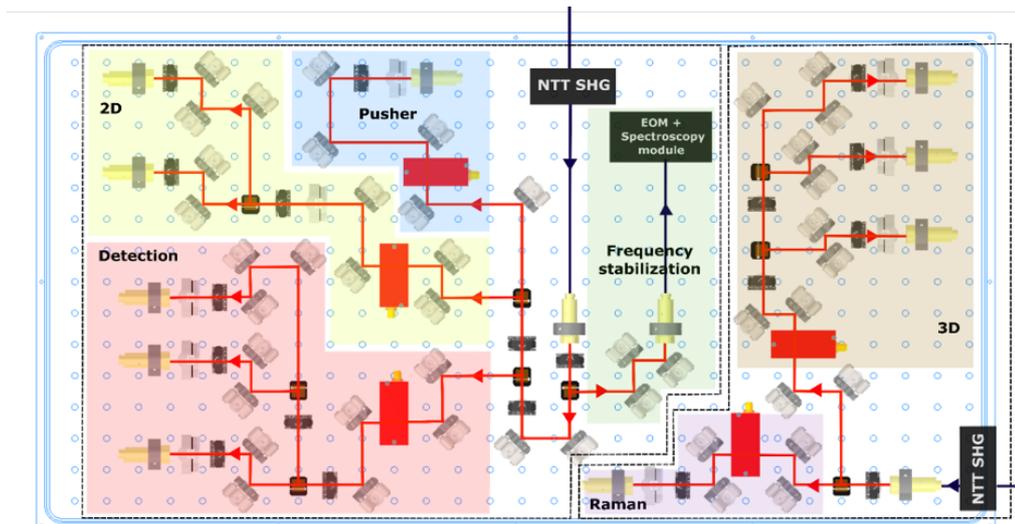


Abbildung 2.10: Schema der Kühlsektion für das Lasersystem des Demonstrators.

Messungen im Demonstrator (AP2800)

Im Rahmen eines Umwidmungsantrages wurden hoch-stabile Stromtreiber von High Finesse beschafft, die im Demonstrator nicht nur die Spulenpaare, sondern auch im weiteren Fortschritt den Atomchip versorgen sollen. Diese sind bereits in weiteren Experimenten am IQ zum Einsatz gekommen und können daher direkt genutzt werden. Die Funktionstests aller Stromtreiber sind abgeschlossen, dabei konnten sie sogar über die Spezifikationen hinaus bei leicht höheren Strömen und Spannungen betrieben werden.

Betriebsmodi des Atominterferometers (AP2900)

In der ursprünglichen Konzeptionierung des Demonstrators war es vorgesehen, Drei-Achsen-Beschleunigungsmessungen mit dem Demonstrator durchzuführen. Basierend auf den Erkenntnissen aus der Veröffentlichung von Schubert u. a. (2021b) wurde dieses Konzept aber im Laufe des Projektvorhabens angepasst, um sich auf gezielter hochgenaue Rotationsmessung konzentrieren zu können. Im Laufe der Projektlaufzeit von QGyro ist eine Publikation von Templier u. a. (2022b) erschienen, in der die Drei-Achsen-Beschleunigungsmessungen untersucht worden ist. Dort wurde maßgeblich herausgefunden, dass residuelle Rotationsraten eine Limitierung darstellen, es also nötig ist auch Rotationen zu messen.

Bisherige atomare Gyroskope setzten allesamt thermische Atome ein, also arbeiten mit atomaren Quellen, die bis zur optischen Melasse gekühlt wurden. Als Atominterferometergeometrie kommen entweder Mach-Zehnder Atominterferometer aus zwei gegenläufigen Richtungen zum Einsatz oder aber Doppel-Diamant-Geometrien, die mit einer Atomfontäne arbeiten. Der Einsatz dieser Quellen bringt einige Einschränkungen mit sich. Zum einen kommt ein Startmechanismus zum Einsatz, der nicht kohärent ist, also nicht innerhalb des Interferometers zum Einsatz kommen kann. Durch Strahlteilung senkrecht zur Driftgeschwindigkeit der Atome führt dies entweder dazu, dass die Lichtfelder der Strahlteiler größer werden oder aber mehrere Lichtfelder als Strahlteiler zum Einsatz kommen müssen. In der Veröffentlichung von Schubert u. a. (2021b) haben wir nun ein Schema vorgestellt, welches den Startmechanismus von Abend u. a. (2016) mit dem Doppelgitter Atominterferometer von Gebbe u. a. (2021b) kombiniert, um eine neues Gyroskop zu realisieren, welches nur ein einziges Strahlteilerlichtfeld benötigt. Der große Vorteil ist hier die Skalierbarkeit, die durch den Einsatz von Bose-Einstein Kondensaten als atomare Quellen ermöglicht wird. Das Konzept des Demonstrators wurde in der Projektlaufzeit so ausgearbeitet, dass sich die Messungen von zwei senkrechten Rotationsachsen (Gyrokompas) sowie aller drei Beschleunigungsachsen mit hoher Genauigkeit realisieren lassen.

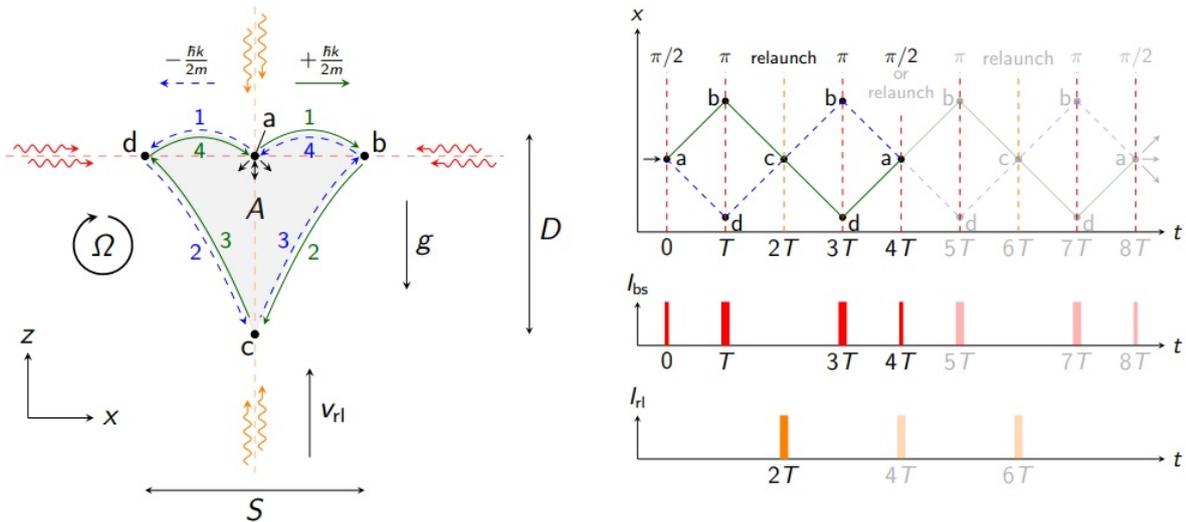


Abbildung 2.11: Schema des Multi-Loop Gyroskops.

Im Folgenden wollen wir unser neues Konzept vorstellen. Die Rotationsmessung in Atominterferometern basiert auf dem bekannten Sagnac-Effekt, der mit der durch die Materiewellen eingeschlossenen Flächen skaliert:

$$\Delta\phi_{\text{Sagnac}} = n \cdot 4(\vec{k} \times \vec{g})\vec{\Omega}T^3 \tag{2.1}$$

Die Fläche, die in einem solchen Gyroskop eingeschlossen wird, errechnet sich mit:

$$A = n \cdot \frac{\hbar k}{m} gT^3. \tag{2.2}$$

Die Geometrie selbst ist in Abb.2.11 links dargestellt und wird im Folgenden Schritt für Schritt beschrieben. Zunächst wird unterhalb des Atomchips ein Atom-Ensemble in Form eines BECs erzeugt und anschließend mit dem orangen Lichtfeld nach oben geschossen, so wie es in Abend u. a. (2016) erläutert wurde. Vor dem Start können alle vorbereitenden Schritte, wie z.B. eine adiabatische Passage oder Delta-Kick-Kollimation, durchgeführt werden. Nachdem das gestartete Ensemble eine bestimmte Position a erreicht hat, erfolgt eine horizontale Strahlteilung mit dem roten retro-reflektierten Lichtfeld, das mit dem Wellenpaket wechselwirkt und zwei einzelne Wellenpakete bildet, die mit einem Impuls von $p = \pm\hbar k/(2m)$ auseinander driften. Nach der Driftzeit T wird das horizontale Lichtfeld erneut gepulst, was den Impuls der Atome umkehrt. Nun werden die äußersten Positionen b und d der Geometrie erreicht und die Atome fallen weiter, bis sie nach einer Zeit $2T$ die Ausgangsposition c des ersten Neustarts erreichen. Hier, am tiefsten Punkt der Interferometergeometrie, wird ihr Impuls wieder umgekehrt. Den Bahnen der ersten Schleife wieder nach oben folgend, erreichen die Atome nach der Zeit $3T$ wieder die Positionen d und b der horizontalen Impulsumkehr und werden zurück zur Ausgangsposition der ersten Aufspaltung geleitet. Nach der Zeit $4T$ ist damit die zweite Schleife abgeschlossen und es eröffnen sich zwei mögliche Ausgänge. Entweder wird das Interferometer durch eine abschließende Strahlteilung geschlossen, oder alle vorherigen Operationen werden wiederholt, um eine weitere Schleife $2n$ zu bilden.

Das Raum-Zeit-Diagramm der Sequenz ist in Abb. 2.11 rechts dargestellt und visualisiert die einzelnen Schritte und Zeitabläufe der Implementierung von zwei Schleifen ($n = 1$) und die mögliche Erweiterung auf vier Schleifen ($n = 2$). Analog zur Berechnung der Schuss-Rausch-Grenze eines einzelnen experimentellen Laufs ($n=1$) kann die potenziell erreichbare Rotationsempfindlichkeit für längere Messzeiten der gemessenen Phasenverschiebung aus folgender Gleichung abgeschätzt werden

$$\sigma_{\Omega}(t) = \frac{1}{C\sqrt{N} \cdot n \cdot (2kgT^3)} \sqrt{\frac{t_{\text{prep}} + n \cdot 4T + t_{\text{det}}}{t}}. \tag{2.3}$$

Hier steht N für die detektierte Atomzahl, t_{prep} für die Präparationszeit, t_{det} für die Detektionszeit und t für die Integrationszeit.

Das vorgestellte Verfahren geht implizit davon aus, dass der Geschwindigkeitsvektor des Neustarts parallel zur Schwerkraft ausgerichtet ist, was im Falle einer nicht idealen Ausrichtung zu unerwünschten Phasenverschiebungen führen kann. Aufgrund der inhärenten Symmetrie werden viele andere unerwünschte Verschiebungen bereits unterdrückt, aber dennoch können Timing-Jitter oder Schwerkraftgradienten die Empfindlichkeit der Messung beeinträchtigen. Eine detaillierte Analyse der verschiedenen Anforderungen an diese Parameter findet sich in Schubert u. a. (2021a). Die wichtigsten Vorteile dieses Systems lassen sich stichpunktartig wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Durch Wählen der Zeit T kann die Fläche A eingestellt werden, um entweder größere oder kompaktere Sensoren zu betreiben.
- ▶ Die Fläche A ist durch die bei den kohärenten Atom-Licht-Wechselwirkungen eingprägten Geschwindigkeiten gut definiert.
- ▶ Die Geometrie erfordert nur eine einzige Strahlenteilungszone für alle Operationen im Zusammenhang mit dem Interferometer.
- ▶ Durch die Wahl eines geeigneten n kann das Konzept auf mehrere Schleifen erweitert werden, die nur durch technische Verlustmechanismen begrenzt sind.
- ▶ Wie in anderen Veröffentlichungen gezeigt wurde, kann das Konzept auch auf die Messung der lokalen Gravitationsbeschleunigung (Peters u. a., 1999; Kasevich und Chu, 1991) oder von Neigungen (Ahlers u. a., 2016) erweitert werden.

2.3. Konzeptevaluierung für Hybridisierung und Umsetzung (AP3000, iMAR)

Die Konzeptevaluierung für die Hybridisierung sowie die Umsetzung umfasst die Arbeiten der iMAR. In den folgenden Abschnitten sind die Unter-Arbeitspakete AP3100 - AP3300 gemeinsam abhandelt, da sie in direkter Abhängigkeit zueinander stehen.

Mit Abschluss der Konzeptentwicklung des Teststandes konnte die Notwendigkeit der Stabilisierung auf das Interferometer selbst samt Referenzsensorik sowie eine kurzzeitstabile MEMS IMU eingegrenzt werden. Um die Sensitivität des Quanteninterferometers gegenüber lateraler Dynamik in realistischen Bewegungsszenarien untersuchen zu können, wurde neben einer obligatorischen Stabilisierung der rotatorischen Komponenten auch eine laterale Stabilisierung im Plattformkonzept berücksichtigt.

Um die Dimensionen des Teststandes, sowohl im Hinblick auf das Gewicht als auch bei den Abmessungen, in einem transportfähigen und auf einem Hexapod anregbaren Rahmen zu halten, muss die laterale Kompensation auf eine Achse (x-Achse als Hauptrichtung des Systems) beschränkt werden. Den größten Einfluss hierbei generiert die notwendige Regelstrecke, die direkt von der maximalen Regelbeschleunigung und der maximalen Freifallzeit abhängt. Mit Einschränkung dieser Parameter auf eine maximale Beschleunigung von $a_{max} < 20 \text{ m/s}^2$ und eine maximale Freifallzeit $T_{max} < 50 \text{ ms}$ ergibt sich eine maximale Mess-Strecke von $s_{meas} = 5 \text{ cm}$. Diese erfordert, unter Berücksichtigung des notwendigen Bremsweges und einer beidseitigen Regelung aus der Ruhelage, einen lateralen Verfahrweg von mindestens $s_{travel} > 20 \text{ cm}$. Zur lateralen Kompensation wurde ein Lineartisch A 20-B-225 der Fa. Schunk samt 33 N m Aktuator gewählt, der die genannten Anforderungen mit hinreichender Lagewinkelstabilität erfüllen kann. Weiterhin wurden die möglichen rotatorischen Freiheitsgrade auf wenige Grad eingegrenzt, um die Vorgaben der Plattformgröße zu erfüllen und die Kabelführung zu erleichtern. Aufgrund des notwendigen Bauraumes entlang des Lineartisches konnte außerdem eine 90° Rotation um die y-Achse realisiert werden. Hierdurch kann die laterale Kompensation in die Erdschwere hinein gedreht werden.

Durch die Verwendung einer Linearachse kommt es zu einer dynamischen Verschiebung des Nutzlastschwerpunktes, die durch gegenläufig ausgelenkte Ausgleichsgewichte kompensiert werden muss. Die Nutzlast ist auf das Doppelte des Gewichts des Quanteninterferometers ausgelegt.

Um der notwendigen Genauigkeit der Rotationskompensation von etwa 10 mrad um die x- und y-Achse gerecht zu werden und eine nicht perfekt austarierte Nutzlast zu berücksichtigen, wurde das System mit hochgenauen Harmonic-Drive-Getriebe-Antrieben konzipiert. Eine Kompensation um die Erdschwere ist nicht notwendig, da diese sowie hochfrequenter Verdrehungen kleinerer Amplituden durch die Laserphase und den Spiegel des Interferometers selbst kompensiert werden können - das System reduziert sich somit auf eine Tip-Tilt-Plattform mit Linearachse.

Durch die parallele Konzeptentwicklung und -Umsetzung der stabilisierten Plattform und des Teststandes wurde bei der Plattform eine hochvariable Konstruktion aus Alu-Profilen realisiert, die dauerhaft Änderungen an Schwerpunkt- und Achsenlage zulässt. Durch Aluminium-Platten werden im finalen Stand die offenen Schubfelder geschlossen und eine hinreichende Systemsteifigkeit für die geplante Dynamikbandbreite erreicht. Das Drehzentrum der Plattform ist auf die mittlere Position der Atomwolke im freien Fall in der Nulllage der Linearachse abgestimmt.

In Abb. 2.13 ist die Funktion der stabilisierten Plattform schematisch dargestellt. Herzstück der Steuerung ist die iSCU (iMAR Stabilization Control Unit), die die Lagedaten des absoluten "Reference Frame" und dem relativen SStabilization frame zusammenführt und extern vom Anwender und oder des Interferometers getriggert werden kann. Die Regelung erfolgt nach einem mehrstufigen Konzept. Die laterale Kompensation erfolgt event-getriggert zu jedem Schuss des Quanteninterferometers für 50 ms. Im Anschluss kehrt das System in seinen Nullpunkt zurück. Die rotatorischen Bewegungsanteile werden kontinuierlich kompensiert, um die Messachse dauerhaft in der Erdschwere zu halten. Die laterale Kompensation erfolgt immer aus der relativen Ruhelage heraus, da das Interferometer

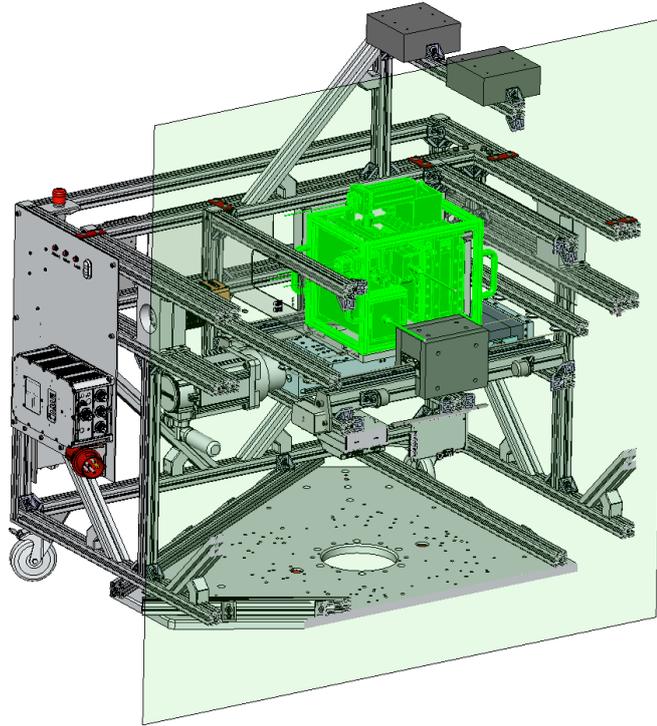


Abbildung 2.12: Schnitt durch die Konstruktionszeichnung der stabilisierten Plattform x-z-Ebene. Der Quanteninertialsensor ist in grün markiert. Dimensionen etwa $150\text{ cm} \times 130\text{ cm} \times 150\text{ cm}$ (LxBxH), Nutzlast etwa 80 kg

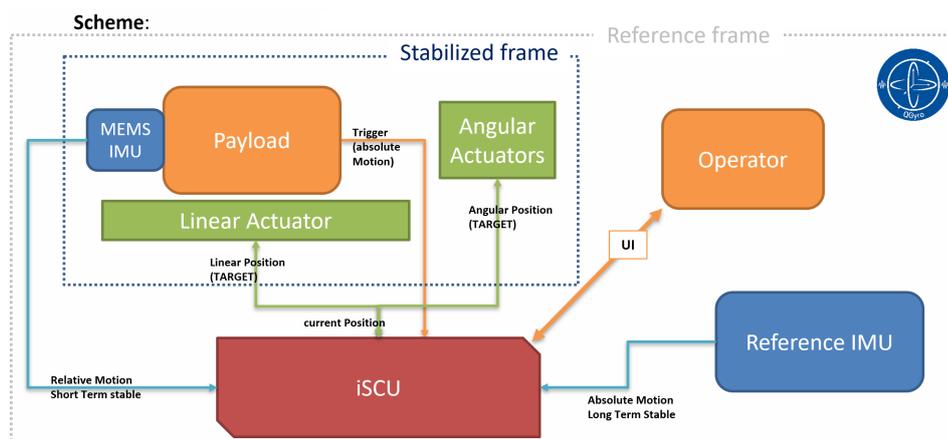


Abbildung 2.13: Schema der stabilisierten Plattform

nur Geschwindigkeitsänderungen erfährt. Eigeninduziertes Bewegungsrauschen in die stabilisierte Plattform wird nur durch den Abbremsvorgang der Linearachse erwartet, die in den verbleibenden 950 ms Vorbereitungszeit auf den nächsten Triggerimpuls hinreichend abklingen können. Die Regelung der Lagewinkelstabilisierung folgt einem hybriden Konzept, das zunächst als reiner Feedback-Regler agiert, bei hohen Beschleunigungen aber in eine Feed-Forward-Loop wechseln kann.

Das Fine-Tuning der Plattform Parametrierung sowie die abschließende Auswuchtung der inneren Achsen müssen im finalen Aufbauzustand mit eingesetztem Teststand unter Berücksichtigung der Steifigkeit der Verkabelung durchgeführt werden. Da die Integration des Teststandes in die stabilisierte Plattform noch nicht abgeschlossen werden konnte, werden diese Umfänge im Anschlussvorhaben QGyroPlus fortgeführt, da die Erkenntnisse, die aus dem Teststand gewonnen werden, die Auslegung der stabilisierten Plattform für multiachsiale Quanteninterferometrie des Anschlussvorhabens beeinflussen werden.

2.4. Anwendungen in der Navigation (AP4000, IfE)

Die Arbeiten des IfE im Rahmen von AP4000 wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Performance eines Atominterferometers für Navigationsanwendungen analytisch zu diskutieren und simulativ zu überprüfen. Der Bericht hierüber gliedert sich dabei in drei Teile, die die einzelnen Unter-Arbeitspakete abdecken.

Im ersten Teil liegt ein großer Fokus auf der Arbeit mit experimentellen CAI-Rohdaten und einer entsprechenden Analyse dieser im Hinblick auf ihre stochastischen Eigenschaften (umfasst AP4100). Die Implementation der Ergebnisse zur Verwendung in einem Kalman-Filter wird im Anschluss diskutiert (AP4200). Abschließend wird die Auswertung für Online-Messungen besprochen und ein entsprechender Ausblick für die Fehlererkennung gegeben (AP4500).

Im zweiten Teil geht es um die Entwicklung eines Navigationsfilters. Hierbei wird die Kombination von CAI mit high-rate IMUs diskutiert und die Implementation des Navigationsfilters in der Simulationsumgebung vorgestellt (AP4300). Die entwickelten mathematischen Formeln sind dabei so allgemein gefasst, dass sie beliebige CAI-Zielsysteme unterstützen und die Integration von Mehrachs-Konzepten berücksichtigt werden kann (AP4800). In einem darauf folgenden Teil werden diverse Erweiterung des kinematischen Zustandsvektors diskutiert und die Performance sowohl analytisch als auch simulativ demonstriert (AP4400).

Zuletzt werden die vorbereitenden Arbeiten für die Analyse kinematischer Messungen mit dem Teststand vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die entwickelten Programmtools zur Steuerung des Hexapods eingegangen und die Möglichkeiten und Spezifikationen des Gerätes vorgestellt (AP4600). Weiterhin wird das entwickelte Navigationsfilter beispielhaft anhand einer Trajektorie validiert (AP4700). Dabei werden zwei IMUs im Filter kombiniert, wobei die höhergradige IMU zur Emulierung eines CAI verwendet wird.

2.4.1. Entwicklung eines stochastischen Beobachtungsmodelles für das Navigationsfilter

Zur Entwicklung des Beobachtungsmodells standen teilweise Ergebnisse aus dem QuSI Projekt (Tennstedt und Schön, 2021a) zur Verfügung. Das Ziel innerhalb QGYROS ist nun vorwiegend die Auswertung von Prototyp Messungen. Dabei wurde ein Datensatz verwendet, bei dem Beobachtungen des Atominterferometers, sowie zugehörige Beschleunigungsdaten eines experimentellen und an den Retroreflektorspiegel gekoppelten optomechanischen Resonators zur Rekonstruktion der Phasen vorliegen (Richardson u. a., 2020b). Dieses Experiment wird im nachfolgenden als *ATLAS* bezeichnet.

Das CAI Fehlerverhalten lässt sich allgemein in systematische Fehler, sowie deterministische und stochastische Unsicherheiten unterteilen. Eine nähere Charakterisierung wurde in verschiedenen Werken vorgenommen, z.B. Gauguet u. a. (2008) und Berg u. a. (2015). Eine kompakte Übersicht und Diskussion der Einflüsse auf die Navigation folgte in Tennstedt u. a. (2019).

Für die Dauer einer Messung bei Navigationsanwendungen sind eher kurze Zeiten typisch, z.B. 20ms, und in diesen kurzen Zeiträumen überwiegt das weiße Rauschverhalten stark (Gauguet u. a., 2008; Freier u. a., 2016).

Für die Beobachtung p des Atominterferometers wird nun das folgende Modell angesetzt,

$$p = A \cos(\phi_0 + \phi_{in}) + p_0, \quad (2.4)$$

also ein Kosinus-Signal, welches das Fringe-Muster repräsentiert. Hierbei ist A die Amplitude und p_0 der Offset in Y-Richtung. Die Phase ϕ_0 stellt einen weiteren Offset dar, der gezielt über die Lasersteuerung eingestellt werden kann. Für eine maximale Sensitivität des Sensors gegenüber der Phasenverschiebung wird dabei oft ein Wert von $\pi/2$ angepeilt (mid-fringe). Die Phasenverschiebung ϕ_{in} wird durch inertielle

Einflüsse auf die Atome erzeugt. Um den funktionalen Zusammenhang zwischen Phasenverschiebung und inertialen Einflüssen herzustellen, eignet sich das sogenannte *midpoint-line* Modell, (Antoine und Borde, 2003). Bei einer symmetrischen Pulsfolge wird davon ausgegangen, dass sich die räumlich-zeitliche Ausbreitung der Atomzustände über ihre Mittellinie beschreiben lassen, siehe Abb. 2.14. Die Phasenverschiebung hängt von der relativen Position $x(t_i)$ der Atome zum Zeitpunkt t_i der

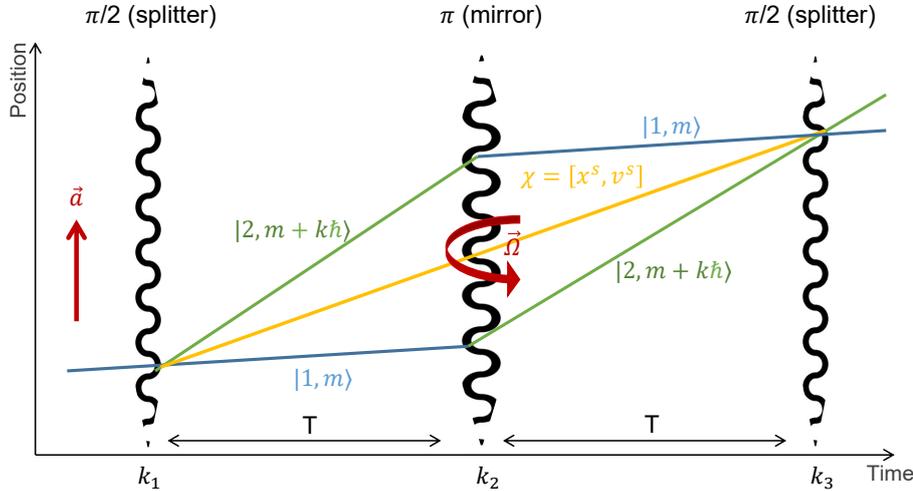


Abbildung 2.14: Prinzip des CAI in Mach-Zehnder Pulsfolge. Die beiden energetischen Zustände sind in blau (Zustand 1, Impuls m) und grün (Zustand 2, Impuls $m + \hbar k$) dargestellt. Durch den höheren Impuls legen die Atome im Zustand zwei bis zum Spiegelpuls eine größere Strecke zurück und spannen daher zusammen mit denen im Zustand 1 eine Fläche auf. Da sich bei einer symmetrischen Pulsfolge die Positionen beim zweiten Strahlteiler-Puls wieder überschneiden, bietet sich für die Modellierung der meisten kinematischen Anwendungen die Beschreibung der Position über die Mittellinie (*midpoint-line* Modell) an.

Interaktionen mit dem i -ten Laserpuls ab. Es entspricht bei einer Mach-Zehnder Pulsfolge mit Strahlteiler-Spiegel-Strahlteiler

$$\phi(t_3) = k_1 x(t_1) - 2k_2 x(t_2) + k_3 x(t_3). \quad (2.5)$$

Besteht der inertielle Einfluss auf die Atome während der Flugzeit einer Beschleunigung, so kann diese über eine entsprechende Umstellung der Gleichung extrahiert werden:

$$a = \frac{1}{kT^2} \arccos(2p - 1) \quad (2.6)$$

Diese Rechnung funktioniert nur, wenn die zusätzliche Phasenverschiebung im Bereich $\pm \frac{\pi}{2}$ liegt. Somit sollte das Argument des Kosinus im Intervall $\in [0, \pi]$ liegen.

Für die Analyse der Unsicherheiten des Atominterferometers wird zunächst die Beobachtungsgleichung 2.4 herangezogen und wie folgt um die additiven Rauschprozesse δA , $\delta \phi$ und δp erweitert,

$$p = (A + \delta A) \cdot \cos(\phi + \delta \phi) + (p_0 + \delta p). \quad (2.7)$$

Grundsätzlich lassen sich die Unsicherheiten anhand dieser Gleichung in Detektions-Rauschen (δA , δp) und Phasenrauschen ($\delta \phi$) unterteilen. Ersteres stellt die Unsicherheiten des Messverfahrens dar, z.B. der fluoreszenzbasierenden Bildgebung. Das Phasenrauschen hingegen kann vielerlei systematische und stochastische Ursachen haben, wie zuvor aufgeführt.

Zur Identifikation der einzelnen Prozesse können für einen initialen Datensatz zunächst über eine einfache Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate oder ein EKF-Framework, vgl. Tennstedt u. a. (2021b), die Parameter A , p_0 und ϕ gewonnen werden.

Die Reproduktion der Zustandsvarianzen über das Filter funktioniert nur mäßig gut. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Abhängigkeit der Zustandsvarianzen von den Einstellungen des Beobachtungs- und Prozessrauschens (\mathbf{R} , bzw. \mathbf{Q}_k). Beides gilt jedoch als unbekannt und kann nur näherungsweise angenommen werden. Insbesondere ist das Beobachtungsrauschen \mathbf{R} selbst Teil der zu bestimmenden Parameter.

Die im Projekt entwickelte Lösung umfasst speziell für die Schätzung der Unsicherheiten ein Maximum Likelihood Estimation (MLE) Verfahren. Dabei werden zunächst die Erwartungswerte der Parameter A , p_0 und $\delta\phi$ über das *least-squares* Verfahren ermittelt, und im Anschluss die Residuen der Beobachtung über das MLE ausgewertet, sodass die Unsicherheiten der Parameter ermittelt werden können.

Die Likelihood L einer Varianz σ_i^2 eines Samples x_i , unter der für den Residuenprozess getroffenen Annahme $\mu_i = E[x_i] = 0$, lautet

$$L(\sigma_i|x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}\right). \quad (2.8)$$

Die Varianz der Beobachtung kann über Varianzfortpflanzung der Unsicherheiten der einzelnen Parameter gewonnen werden,

$$\sigma^2 = \left|\frac{\partial p}{\partial \phi}\right|^2 \cdot \sigma_\phi^2 + \left|\frac{\partial p}{\partial p_0}\right|^2 \sigma_{p_0}^2 + \left|\frac{\partial p}{\partial A}\right|^2 \cdot \sigma_A^2. \quad (2.9)$$

Die einzelnen Ableitungen entsprechen denen der Beobachtungsmatrix von zuvor. Die Varianz σ_i^2 einer einzelnen Messung mit Index i , Gl. (2.10), besteht aus den Varianzen des Offsets, σ_p^2 , der Phase σ_ϕ^2 , sowie der Amplitude σ_A^2 .

$$\sigma_i^2 = A^2 \cdot \sin(\phi_i)^2 \cdot \sigma_\phi^2 + \sigma_{p_0}^2 + \cos(\phi_i)^2 \cdot \sigma_A^2 \quad (2.10)$$

Die kombinierte Likelihood von M Samples entspricht dem Produkt der Likelihoods der einzelnen Samples,

$$L(\sigma|\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^M \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{x_i^2}{\sigma_i^2}\right). \quad (2.11)$$

Für größere numerische Stabilität kann das Likelihood in die logarithmische Form gebracht werden,

$$\ln L(\sigma|\mathbf{x}) = -\frac{M}{2} \ln 2\pi + \sum_{i=1}^M \left(-\ln \sigma_i - \frac{x_i^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (2.12)$$

Aus dem numerisch problematischen Produkt von Exponentialfunktionen wird somit eine Summe, und auch sehr kleine Werte einzelner Samples können prozessiert werden.

Da die Varianzen σ_i^2 individuell von der Phasenverschiebung ϕ_i abhängen, vgl. Gl. (2.10), lässt sich das Maximum der Gleichung leider nicht geschlossen darstellen und analytisch berechnen. Eine Möglichkeit der Lösung ist eine Brute-Force Methode, bei der die Varianzen in einem adäquaten Parameterraum variiert werden. Das Likelihood wird dabei für jede Kombination berechnet und das Maximum kann leicht gefunden werden. In Abb. 2.15 sind die Ergebnisse für einige simulierte Datensätze dargestellt.

Die Darstellungen sollen hier primär dem Nachweis der Funktionsweise der Likelihood-Methode dienen. Statt der systematischen Variation der Parameter lässt sich die Brute-Force Methode auch über ein Monte-Carlo Sampling realisieren. Generell liefert das Verfahren zwar brauchbare Ergebnisse, ist aber naturgemäß sehr langsam und rechenintensiv. Eine elegantere Lösung ist die Verwendung eines Gradientenaufstiegsverfahrens. Hierzu wird ausgehend von einem Arbeitspunkt in der Maximum-Likelihood Gleichung 2.12 zunächst die Ableitung bzgl. aller Zustände θ_k gebildet und die Richtung des größten Anstiegs bestimmt. In einem zweiten Schritt wird dann entlang dieses maximalen Anstiegs ein Inkrement des Zustandsvektors berechnet und auf die zuletzt berechnete Schätzung addiert, gewichtet mit einem Faktor β , der als Schrittweite agiert.

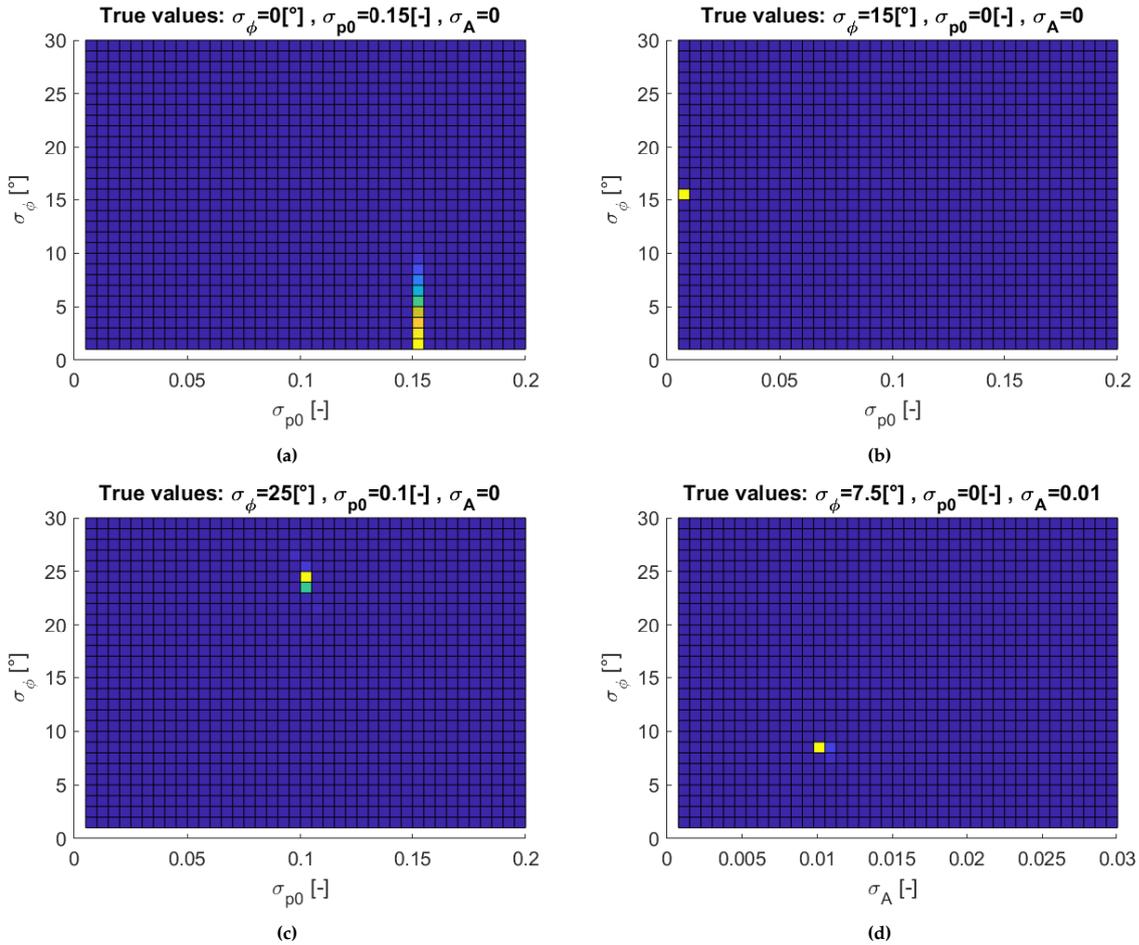


Abbildung 2.15: Bestimmung des Maximum Likelihood über ein Brute-Force Verfahren. Der Betrag des Likelihoods ist farblich kodiert, wobei blau einem sehr geringen Wert und gelb dem größten Wert entspricht. Die Fringe-Signale wurden simuliert, wobei verschiedene Parameter mit den jeweils im Titel angegebenen Werten verrauscht sind. Die Unsicherheiten für σ_{p0} und σ_A sind einheitenlos. Oben links: Rauschen p_0 . Oben rechts: Rauschen in ϕ . Unten links: Rauschen in ϕ und p_0 . Unten rechts: Rauschen in ϕ und A .

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + \beta J \quad (2.13)$$

wobei $J = [\partial \ln L / \partial \hat{\theta}]$ ein Vektor mit den Ableitungen der Log-Likelihood Funktion bzgl. der einzelnen Zustände ist, wie in Gleichungen (2.14) - (2.16) dargestellt.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_{p0}} = \sum_{i=1}^M \left(-\frac{\sigma_{p0}}{\sigma_i^2} + x_i^2 \frac{\sigma_{p0}}{\sigma_i^4} \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_\phi} = \sum_{i=1}^M \left(-\frac{A^2 \sin(\phi_i)^2 \sigma_\phi}{\sigma_i^2} + x_i^2 \frac{A^2 \sin(\phi_i)^2 \sigma_\phi}{\sigma_i^4} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_A} = \sum_{i=1}^M \left(-\frac{\cos(\phi_i)^2 \sigma_A}{\sigma_i^2} + x_i^2 \frac{\cos(\phi_i)^2 \sigma_A}{\sigma_i^4} \right) \quad (2.16)$$

Die Berechnung kann nun so lange wiederholt werden, bis der Unterschied zweier aufeinander folgender Schätzungen $\hat{\theta}_{k-1} - \hat{\theta}_k$ unterhalb eines bestimmten Grenzwertes liegt. Die Schrittweite β ist prinzipiell beliebig, kann aber über die inverse Hesse-Matrix definiert werden um eine intelligente Adaption zu

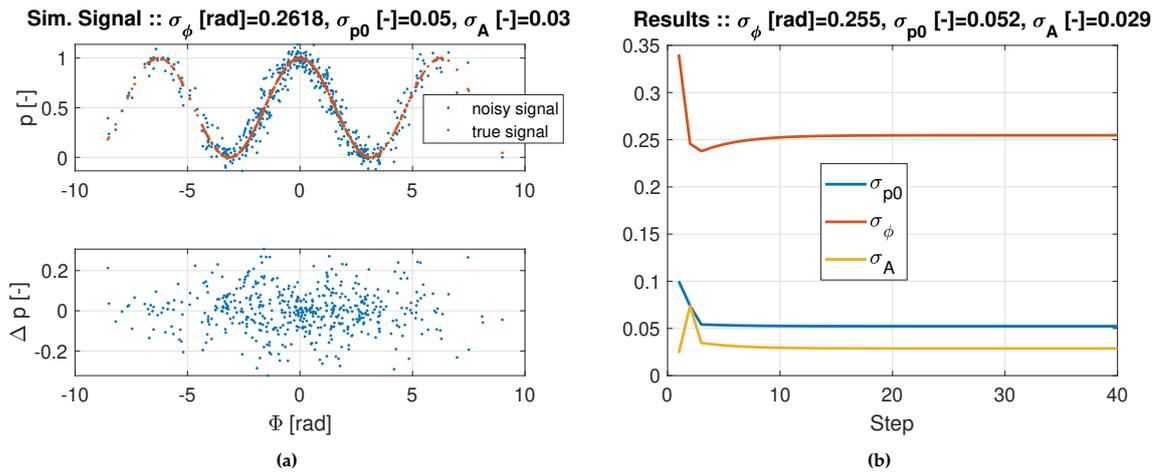


Abbildung 2.16: Simuliertes Beispiel eines Fringe-Signals. (a) Referenzsignal in rot. Blau: verrauschtes Signal. Es wurden 500 Samples generiert. Die Parameter für die einzelnen Unsicherheiten der Fringe-Parameter sind im Titel aufgeführt. Unten: Residuenprozess aus dem die Unsicherheiten geschätzt werden. (b) Schätzung der Varianzkomponenten mittels Gradientenaufstiegsverfahren. Die Standardabweichung konvergiert nach etwa 10 Iterationen und die finalen Resultate (siehe Titel) entsprechen bis auf minimale Abweichungen den simulierten Werten.

ermöglichen,

$$\beta = \left(\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} \right)^{-1}. \quad (2.17)$$

Die Initialisierung für $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ kann mit den Werten aus der letzten MLE Schätzung erfolgen. Die zusammengesetzte Unsicherheit der CAI Beobachtung σ_p kann dann aus der Schätzung rekonstruiert,

$$\sigma_p^2 = A^2 \cdot \sin(\phi)^2 \cdot \hat{\sigma}_\phi^2 + \hat{\sigma}_{p0}^2 + \cos(\phi)^2 \cdot \hat{\sigma}_A^2, \quad (2.18)$$

und auf die Hauptdiagonale der Messunsicherheits-Matrix \mathbf{R} eingesetzt werden.

Während das Maximum-Likelihood Verfahren generell eine gute Methode zur Rekonstruktion der Varianzen darstellt, sind die folgenden Nachteile zu nennen:

- ▶ Die Schätzung ist naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten können mit der Anzahl der Samples reduziert werden. Das bedeutet, dass eine gewisse Anzahl an Samples notwendig ist um die Parameter sinnvoll zu schätzen.
- ▶ Beim MLE handelt es sich nicht um ein erwartungstrees Verfahren. Die geschätzte Varianz ist im allgemeinen mit einem Offset zur wahren Varianz versehen. Auch dieser Offset verringert sich mit steigender Anzahl der Samples.
- ▶ Da das Gradientenaufstiegsverfahren rekursiv ist, besteht die Gefahr in einem lokalen Maximum hängen-zubleiben. Dieses Problem kann allerdings damit größtenteils vermieden werden, dass als Startparameter jeweils die zuletzt geschätzten Varianzen verwendet werden.

Da zumindest die ersten beiden Nachteile bei größeren Datenmengen nicht ins Gewicht fallen, ist darauf zu achten die Schätzung der Unsicherheiten mit einer entsprechenden Menge an Samples pro Zeitintervall durchzuführen.

Zum Test des Algorithmus wird ein Fringe-Signal simuliert und mit additivem weißen Rauschen in den drei Parametern beaufschlagt. In Abb. 2.16 ist sowohl das simulierte Signal dargestellt, als auch die über das Gradientenaufstiegsverfahren geschätzten Parameter für σ_A , σ_ϕ , σ_{p0} .

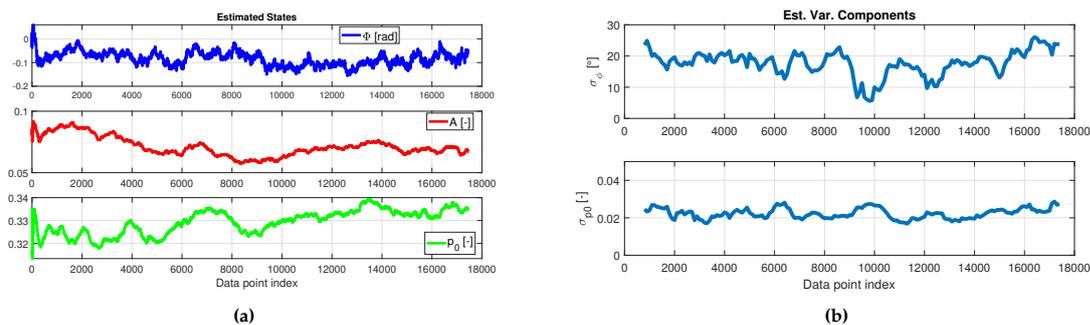


Abbildung 2.17: Parameterschätzung anhand des experimentellen ATLAS-Datensatzes in k -up Richtung der Laser. (a) Schätzung der Parameter des Fringe-Musters über das EKF. Die Phasenverschiebung zeigt neben den kurzperiodischen Schwankungen einen systematischen Offset auf, der aus diversen äußeren Einflüssen, bspw. Magnetfelder, resultieren könnte. Die Parameter Amplitude A und Offset p_0 des Kosinus-Signals unterliegen einer langperiodischen Drift. (b) Schätzung der Standardabweichungen der Phasenverschiebung σ_ϕ und Offset σ_{p_0} der CAI-Messung.

Es ist gut zu sehen, dass alle drei Parameter gut rekonstruiert werden können. Die Anzahl der Iterationen könnte sogar noch reduziert, oder mit einem Schwellwert zum Abbruch versehen, werden um den Rechenaufwand zu verringern.

Die Algorithmen lassen sich ohne großen Aufwand mit den realen Interferometerdaten verwenden. Dazu wird das Filter zur Schätzung der Fringe-Parameter mit jeder neuen CAI-Messung durchgeführt. Erste Tests ergaben dabei, dass die Unsicherheit der Amplitude in den meisten Fällen auf einen Wert gleich Null konvergiert. Aus diesem Grund wird bei der Analyse des ATLAS-Datensatzes auf die Schätzung von σ_A verzichtet.

Am realen ATLAS-Datensatz angewandt ergeben sich die folgenden Resultate. Dabei wird ein gleitendes Fenster mit 700 Datenpunkten Breite angesetzt. Die Berechnung der Unsicherheiten erfolgt alle 100 Messungen. In k -up Richtung liegen die geschätzten Unsicherheiten für den Offset für die Gesamtdaten bei $(0,0224 \pm 0,0028)$ –, die für die Phase bei $(17,712 \pm 4,035)^\circ$. Die zeitliche Veränderung ist in Abb. 2.17 dargestellt. Die Standardabweichung der Phase unterliegt einer größeren Streuung, wobei die kleinsten Werte in der Nähe der 10000. Messung auftreten. Für die k -down Richtung (nicht grafisch dargestellt) ergeben sich ähnliche Resultate. Hier liegt die geschätzte Unsicherheit für den Offset im Mittel bei $(0,0238 \pm 0,0042)$ –, die für die Phase ist $(18,515 \pm 2,867)^\circ$.

2.4.2. Entwicklung und Test eines Hybrid-Navigationsfilters

Im Abschnitt zuvor wurde erläutert, dass das Atominterferometer durch die sinusförmige Messgleichung und des durch die Mehrdeutigkeitsproblematik limitierten Dynamikbereiches eine Kopplung mit geeigneten Sensoren mit größerer Bandbreite und Datenrate anzustreben ist.

Im Rahmen des QuSI Projektes (Tennstedt und Schön, 2021a) wurde zuerst eine adaptierte Hybridlösung vorgestellt. Diese wurde im QGyro Projekt sukzessive erweitert, sodass sich nun unter gewissen Voraussetzungen die theoretisch durch die Sensitivität des Atominterferometers gegebene Genauigkeitssteigerung auch simulativ durch die Hybrid-Navigationslösung erreichen lässt.

Die Hybridlösung, vgl. Abb. 2.18, folgt zwei Grundgedanken. Der erste ist die Prädiktion der Interferometerphasenverschiebung mit Hilfe einer konventionellen IMU. In diesem Schritt können die Mehrdeutigkeiten des Interferometers aufgelöst, und somit eine Prädiktion der CAI-Beobachtung ermöglicht werden. Sobald die CAI Beobachtung dann vorliegt, kann diese zur Korrektur der Fehler der konventionellen IMU verwendet und gleichzeitig die Strapdown-Navigationslösung des kinematischen Zustandes verbessert werden.

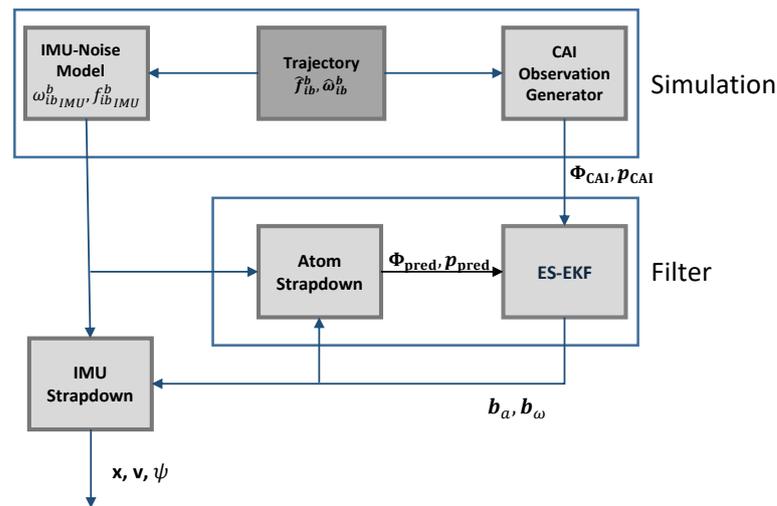


Abbildung 2.18: Integration des Atom Strapdown in einer Filter- und Simulationsumgebung. Die CAI Messung (Phasenverschiebung und/oder Atompopulation) wird anhand der Daten der konventionellen IMU präzidiert und im Anschluss mit den tatsächlichen CAI Beobachtungen fusioniert.

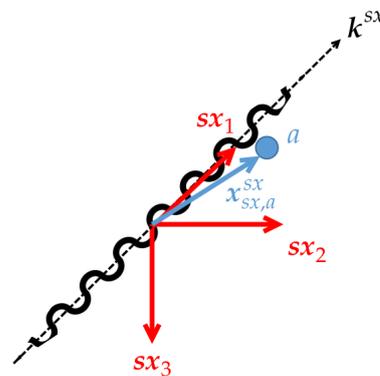


Abbildung 2.19: Positionsvektor $x_{sx,a}^{sx}$ welcher auf das Wellenpaket im CAI-Sensorrahmen sx zeigt. Die Achse sx_1 entspricht der *forward* Richtung. In diesem Fall ist die Achse parallel zum Laserfeld und somit der sensitiven Achse k^{sx} des Sensors (schwarze gepunktete Linie) ausgerichtet. Die sx_3 zeigt in Richtung des Schwerevektors (*down*) und sx_2 vervollständigt das rechtshändige System.

Die beiden Schritte, die Phasenprädiktion im Rahmen der entwickelten *Atom-Strapdown* Methode, und die Implementation des Algorithmus im Rahmen eines Navigationsfilters werden nun nachfolgend erläutert. Im Anschluss folgt eine Diskussion der Beobachtbarkeit und Stabilität des Systems.

Einführung Atom Strapdown

Statt der eindimensionalen Betrachtung für die Messung eines Atominterferometers auf einer Achse wird nun ein 3-dimensionaler Formalismus erarbeitet. Weiterhin wird für jede Raumachse des körperfesten Koordinatensystems einer zu navigierenden Plattform jeweils ein Atominterferometer mit entsprechendem Sensor-Rahmen s eingeführt. Es gibt also ein System für die x -Richtung, sx , und zwei weitere für die verbleibenden Raumachsen, sy und sz . Der Index j wird nun eingeführt, um den jeweiligen Sensor-Rahmen zu identifizieren. Die allgemeine Bezeichnung für den Sensor-Rahmen ist also s_j , mit $j \in [x, y, z]$. Der Positionsvektor vom Ursprung des Sensor-Rahmens s_j zum Zentrum des Wellenpaketes a wird fortan als $x_{s_j,a}^{s_j}$ bezeichnet. Der entsprechende effektive Wellenvektor ist dann beispielsweise für den Sensor mit Rahmen sx und entsprechender sensitiver Achse $k^{sx} = [k, 0, 0]^T$.

Der Ursprung des s-Rahmens wird an der Stelle definiert, an der das Wellenpaket in die freie räumliche Verbreitung entlassen wird. Die Position zum Zeitpunkt t_1 ist dementsprechend gleich Null und Gl. (2.5) kann auf zwei Terme reduziert werden, die dann nur noch von den Positionen zum Zeitpunkt des Spiegel- und des zweiten Strahlteiler-Pulses abhängen.

$$\phi^{sj} = -2\mathbf{k}^{sj} \cdot \mathbf{x}_{s_j,a}^{sj}(t = T) + \mathbf{k}^{sj} \cdot \mathbf{x}_{s_j,a}^{sj}(t = 2T), \quad (2.19)$$

wobei T der Interrogationszeit zwischen den Laserpulsen entspricht.

Die Bewegungs-Differentialgleichungen für die Position $\mathbf{x}_{s_j,a}^{sj}$ und Geschwindigkeit $\mathbf{v}_{s_j,a}^{sj}$ des Wellenpaketes lauten wie folgt:

$$\dot{\mathbf{x}}_{s_j,a}^{sj} = \mathbf{v}_{s_j,a}^{sj} \quad (2.20)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_{s_j,a}^{sj} = -\left(\mathbf{f}_{i,s_j}^{sj} - 2\boldsymbol{\Omega}_{i,s_j}^{sj} \mathbf{v}_{s_j,a}^{sj}\right) + \mathbf{g}^{sj}. \quad (2.21)$$

Hierbei sind \mathbf{f}_{i,s_j}^{sj} und \mathbf{g}^{sj} die spezifischen Kräfte und der Schwerevektor, während der Term $2\boldsymbol{\Omega}_{i,s_j}^{sj} \mathbf{v}_{s_j,a}^{sj}$ die Corioliskraft verkörpert, welche auf die Atome im rotierenden System wirkt, sobald sie sich mit einer Geschwindigkeit ungleich null relativ dazu bewegen. Die schiefsymmetrische Matrix $\boldsymbol{\Omega}_{i,s_j}^{sj} = [\boldsymbol{\omega}_{i,s_j}^{sj} \times]$ beinhaltet die Drehraten, die im System s_j gegenüber dem Inertialrahmen registriert werden.

Die inertialen Größen werden nun mit einer Inertialmesseinheit (inertial measurement unit, IMU) erfasst, und liegen in einem b-Rahmen vor. Dieser ist so definiert, dass sein Koordinatenursprung im Zentrum der IMU liegt, während die \mathbf{b}_1 Achse in Fahrtrichtung der zu navigierenden Plattform zeigt, die \mathbf{b}_3 Achse in Richtung des Schwerevektors. Die \mathbf{b}_2 Achse komplettiert das rechtshändige System. Für diese Achskonvention ist auch die Bezeichnung *forward - right - down* gängig.

Zwischen dem b-Rahmen und dem Sensor-Rahmen ist nun eine räumliche Distanz \mathbf{x}_{b,s_j}^b , oder auch Hebelarm, vorhanden. Die Transformationen der Kräfte und Drehraten vom b- zu einem beliebigen s-Rahmen lauten wie folgt,

$$\mathbf{f}_{i,s_j}^{sj} = \mathbf{f}_{i,b}^{sj} + \mathbf{f}_{b,s_j}^{sj} = \mathbf{C}_b^{sj} \mathbf{f}_{i,b}^b - \mathbf{C}_b^{sj} \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b (\boldsymbol{\Omega}_{ib}^b \mathbf{x}_{b,s_j}^b) - \mathbf{C}_b^{sj} \dot{\boldsymbol{\Omega}}_{ib}^b \mathbf{x}_{b,s_j}^b. \quad (2.22)$$

Die bei der Transformation auftretenden Scheinkräfte sind der Zentrifugalterm $\boldsymbol{\Omega}_{ib}^b (\boldsymbol{\Omega}_{ib}^b \mathbf{x}_{b,s_j}^b)$ und der Euler Term $\dot{\boldsymbol{\Omega}}_{ib}^b \mathbf{x}_{b,s_j}^b$, welcher durch eine zeitliche Änderung der Drehraten entsteht.

Für die Transformation der Drehraten gilt einfach

$$\boldsymbol{\Omega}_{i,s_j}^{sj} = \boldsymbol{\Omega}_{i,b}^{sj} + \boldsymbol{\Omega}_{b,s_j}^{sj} = \mathbf{C}_b^{sj} \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b. \quad (2.23)$$

Die Matrix \mathbf{C}_b^{sj} stellt ein mögliches Misalignment dar, also eine Rotation zwischen den Systemen.

Da davon ausgegangen werden kann, dass das körperfeste System b und die Sensor-Rahmen alle auf einer festen Plattform verbaut sind und keine Änderung der Distanz \mathbf{x}_{b,s_j}^b erfolgt, muss bei der Transformation der spezifischen Kräfte kein Coriolis Term $\boldsymbol{\Omega}_{ib}^b \dot{\mathbf{x}}_{b,s_j}^b$ berücksichtigt werden. Ferner können durch das gleiche Argument die Kräfte und Drehraten zwischen den Systemen zu null gesetzt werden,

$$\mathbf{f}_{b,s_j}^{sj} = \mathbf{0}, \quad \boldsymbol{\Omega}_{b,s_j}^{sj} = \mathbf{0}. \quad (2.24)$$

Mehrachs-Modell

Aktuelle Entwicklungen in QGyroPlus sehen einen Aufbau, cf. Kapitel.2.5, vor, bei dem die drei räumlichen Atominterferometer eine einzelne Atomquelle nutzen, siehe auch Gersemann u. a. (2020b)

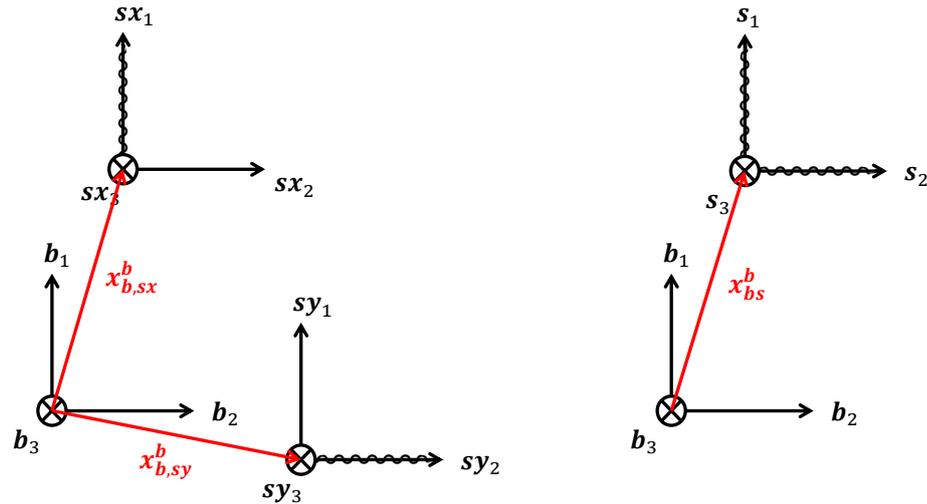


Abbildung 2.20: Sensorrahmen, wie sie im Atom Strapdown Modell definiert werden. Der b -Rahmen verkörpert die Plattform und entspricht dem Rahmen, in welchem einfachheitshalber die IMU misst. Links: Generalisierter Fall. Zwei Sensorsysteme sx und sy sind dargestellt, wobei jede einzelne sensitiv für genau eine durch eine schwarze Wellenlinie dargestellte räumliche Richtung ist. Mit einem dritten System sz das sensitiv für die b_3 Richtung ist, könnten in diesem Fall alle räumlichen Achsen durch Messungen abgedeckt werden. Rechts: Mehrachs-Schema. Durch Nutzung einer einzelnen Atomquelle und drei orthogonal ausgerichteten Interrogationslasern lassen sich Beschleunigungsmessung auf allen räumlichen Achsen realisieren.

und Abb. 2.21. Auf diese Weise genügt es, einen einzelnen s -Rahmen im Modell zu führen. Jede einzelne Achse zeichnet sich dann durch die Richtung des k -Vektors und die initiale Geschwindigkeit der Wellenpakete aus, sodass für den kompletten 6-DOF Sensor insgesamt sechs verschiedene Beobachtungen vorliegen und entsprechend viele Phasenprädiktionen mit individuellen Startparametern berechnet werden müssen. Die Startposition der Wellenpakete entspricht jeweils dem Ursprung des s -Rahmens. Weiterhin gilt für die folgende Diskussion $C_b^s = I$ als Einheitsmatrix. In diesem Mehrachs-Modell werden die Wellenpakete gleich nach erfolgter Präparation durch einen initialen Splitter-Puls in zwei Ensembles gespalten, die dann durch die Impulsübertragung in entgegengesetzte Richtungen bewegt werden. Auf diese Weise ist es möglich, über die Messung der Phasenverschiebung beider Ensembles am Ende der Interferometriefolge zwischen den durch lineare Beschleunigungen und Drehraten induzierten Phasenbeiträge zu differenzieren.

Die messbaren inertialen Einflüsse lassen sich in drei verschiedene Kategorien gliedern. Die Auswirkung dieser unterschiedlichen Einflüsse auf die Position des Wellenpaketes, x_{acc}^s durch lineare Beschleunigungen, x_{rot}^s durch den Corioliseffekt infolge einer Rotation, sowie einem Mischterm x_{mix}^s der durch die Änderung des Rotationsvektors während der Messung resultiert, werden nun im Detail betrachtet. Die endgültige Atomposition entspricht immer der Summe aus den drei Termen,

$$\mathbf{x}_{sa}^s = \mathbf{x}_{acc}^s + \mathbf{x}_{rot}^s + \mathbf{x}_{mix}^s. \quad (2.25)$$

Diese werden nun im Einzelnen betrachtet.

Die Auswirkung einer linearen Beschleunigung auf die Atomposition im s -Rahmens aus Sicht des b -Rahmens berechnet sich wie folgt:

$$\mathbf{x}_{acc}^s = \iint_0^t \left[-\mathbf{f}_{ib}^s + \mathbf{g}^s + \boldsymbol{\Omega}_{ib}^s (\boldsymbol{\Omega}_{ib}^s \mathbf{x}_{bs}^s) + \dot{\boldsymbol{\Omega}}_{ib}^s \mathbf{x}_{bs}^s \right] dt^2. \quad (2.26)$$

Neben dem Schwerevektor \mathbf{g}^s sind nun drei Terme involviert. Die spezifischen Kräfte \mathbf{f}_{ib}^s selbst, sowie die Zentrifugalkräfte $\boldsymbol{\Omega}_{ib}^s (\boldsymbol{\Omega}_{ib}^s \mathbf{x}_{bs}^s)$ und der Euler-Term $\dot{\boldsymbol{\Omega}}_{ib}^s \mathbf{x}_{bs}^s$.

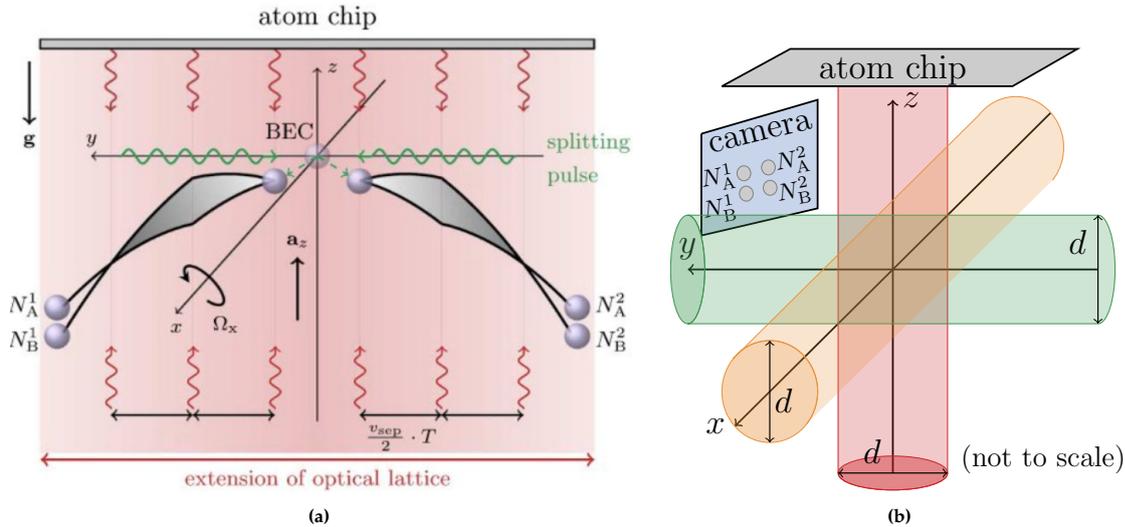


Abbildung 2.21: Aus einem einzigen Bose-Einstein-Kondensat (BEC) können zwei simultane Interferometer erzeugt werden, die zur Unterscheidung von Rotationen und Beschleunigungen eingesetzt werden können. (a): Durch die gleichzeitige Beobachtung zweier Ensembles mit entgegengerichteter Startgeschwindigkeit kann zwischen den Phaseinflüssen aufgrund linearer Beschleunigungen und Rotationen unterschieden werden (differenzielle Architektur); (b): Die differenzielle Architektur kann auf drei Raumachsen mit einer einzigen Atomquelle erweitert werden, indem die sensitive Achse mit den Interrogationslasern manipuliert wird (Gersemann u. a., 2020b).

Die durch eine Rotation des s-Rahmens resultierende Atomposition ist

$$\mathbf{x}_{rot}^s = \iint_0^t [2\Omega_{ib}^s \mathbf{v}_{s,a}^s] dt^2. \quad (2.27)$$

Treten Beschleunigungen und Drehraten gleichzeitig auf, wie es bei terrestrischen Anwendungen in der Regel der Fall ist, ist ein Korrekturterm erforderlich, um die veränderte Orientierung des s-Rahmens während des Integrationsintervalls nachzubilden. Dieser zusätzliche Coning/Sculling Mischterm (Savage, 1998), wird nachfolgend mit dem Untertitel *mix* geführt. Die Position der Atome im s-Rahmen kann in einem solchen Fall wie folgt beschrieben werden:

$$\mathbf{x}_{mix}^s = \iint_0^t \left[\int_0^t \Omega_{ib}^s dt \right] \left[\mathbf{g}^s - \mathbf{f}_{ib}^s + \Omega_{ib}^s (\Omega_{ib}^s \mathbf{x}_{bs}^s) + \dot{\Omega}_{ib}^s \mathbf{x}_{bs}^s \right] dt^2. \quad (2.28)$$

Die Gleichung ähnelt der aus der linearen Beschleunigung, unterscheidet sich aber durch den zusätzlichen Faktor $\int \Omega_{ib}^s dt$, welcher die relative Orientierungsänderung beschreibt.

Das Atominterferometer zeichnet sich weiterhin durch Sensitivität gegenüber Schweregradienten und Gravitationswellen aus. Diese fallen jedoch nur bei deutlich längeren Atomflugzeiten ins Gewicht, sodass im Rahmen dieses Projektes auf eine Modellierung verzichtet wird. Eine Erweiterung der Gleichungen für die Phasenverschiebung, z.B. anhand der Ergebnisse in Bongs u. a. (2006), ist jedoch möglich und relativ einfach zu realisieren.

Error State Extended Kalman Filter

Für die Implementation der Phasenprädiktion in das Framework eines Hybridfilters gelten die folgenden Überlegungen:

- Das Atominterferometer benötigt Zeit um die Atome zu präparieren. In dieser Zeit ist das Gerät blind für inertielle Einflüsse. Weiterhin kann der beschränkte Dynamikbereich zum Verlust des

Zielfringes und der korrekten Kosinusflanke der CAI-Messgleichung führen. Hierfür wurde das Prädiktionsmodell entwickelt, sodass diese Mehrdeutigkeit z.B. über eine konventionelle IMU aufgelöst werden kann;

- ▶ Die IMU wird weiterhin im Rahmen eines Strapdown-Algorithmus genutzt, um den kinematischen Zustand zu berechnen. Während der Messungen des Atominterferometers wird gleichzeitig die Phasenprädiktion mittels des Atom Strapdown durchgeführt. Biases in den Signalen der Beschleunigungsmesser und Gyroskope wirken sich dabei sowohl auf den konventionellen Strapdown und die Berechnung des kinematischen Zustands, als auch auf die Phasenprädiktion aus.
- ▶ Das Atominterferometer liefert eine Beobachtung, mit der sich die prädizierte Phase korrigieren lässt. Folglich ermöglicht die CAI Beobachtung auch eine Korrektur des IMU Fehlerhaushaltes. Mithilfe des korrigierten Bias lässt sich einerseits die Phasenprädiktion verbessern, in dem systematische Effekte und langperiodische korrelierte Rauschprozesse korrigiert und die Residuen der gefilterten CAI-Beobachtung stark reduziert werden. Dies wiederum verringert einen potenziellen Linearisierungsfehler des Atominterferometers. Gleichzeitig kann die Strapdown-Navigationslösung des kinematischen Zustands des Fahrzeugs sukzessive verbessert werden.

Basierend auf diesen Überlegungen wird der Zustandsvektor für das Hybrid-Navigationsfilter daher wie folgt angesetzt.

$$\mathbf{x}_p = [\mathbf{x}_{eb}^n, \mathbf{v}_{eb}^n, \mathbf{b}_a, \mathbf{b}_g]^T. \quad (2.29)$$

Hierbei ist \mathbf{x}_{eb}^n die Position, und \mathbf{v}_{eb}^n die Geschwindigkeit im Navigations-Rahmen. Die Biases der Beschleunigungs- \mathbf{b}_a und Drehratenmessungen \mathbf{b}_g der konventionellen IMU werden hier stellvertretend für das Fehlermodell der IMU geführt.

Die wesentlichen Unterschiede zur Berechnungsstrategie aus dem QuSI-Projekt, die ursprünglich in Tennstedt und Schön (2021a) vorgestellt wurde, liegen in den folgenden Punkten:

- ▶ Die Prädiktion der Phase wurde durch die Entwicklung des Atom Strapdown stark verallgemeinert. Berücksichtigt werden nun beliebige Zielsysteme und eine entsprechende räumliche Verteilung der Sensoren. Dies macht es möglich, komplexe mehrachsige Architekturen und Setups von CAI und konventioneller Sensorik auszuwerten und die Modellierung systematischer Abweichungen zu vereinfachen.
- ▶ Anstatt wie in Tennstedt und Schön (2020) die Geschwindigkeits- und Winkelfehler rekursiv über das Filter zu schätzen, ist nun eine Korrektur verschiedener IMU-Fehlergrößen möglich, was wiederum das Tracking der Zielphase stark verbessert.
- ▶ Die Modellierung der CAI Unsicherheiten anhand der Messung selbst macht die Evaluierung der Filterlösung bei verschiedenen Trajektorien wesentlich realitätsgetreuer.

Die folgenden zwei Szenarios, inklusive der Modelle und der Ergebnisdiskussion, wurden parallel als Artikel beim NAVIGATION Journal eingereicht (Tennstedt u. a., 2023). Für einen besseren Einblick in die Filtergleichungen sei auf diesen Artikel verwiesen. Eine Diskussion mit reduziertem Zustandsvektor mit Betrachtung von Beschleunigungs-Biases wurde veröffentlicht in Tennstedt u. a. (2022b).

Die Performance wird nun anhand dreier verschiedener Szenarien demonstriert. Im ersten Szenario wird eine Trajektorie simuliert mit Dynamiken, die aus einer Analyse verschiedener IMU-Datensätzen gewonnen wurden (Weddig u. a., 2022). Dabei werden fünf verschiedene Abschnitte mit unterschiedlichen dynamischen Bedingungen untersucht, z.B. statische Bedingungen in Abschnitt 1, Oszillationen (z.B. in Folge von Motor-Vibrationen) in Abschnitt 2, eine Rechtskurve in Abschnitt 3, sowie Überlagerungen aus verschiedenen Effekten in den verbleibenden zwei Abschnitten. Sämtliche IMU-Signale werden dabei mit weißem Rauschen und einem Random-Walk beaufschlagt. Die Trajektorie ist in Abb. 2.22 dargestellt, die Rauschprozesse für eine Monte-Carlo Realisierung in Abb. 2.23.

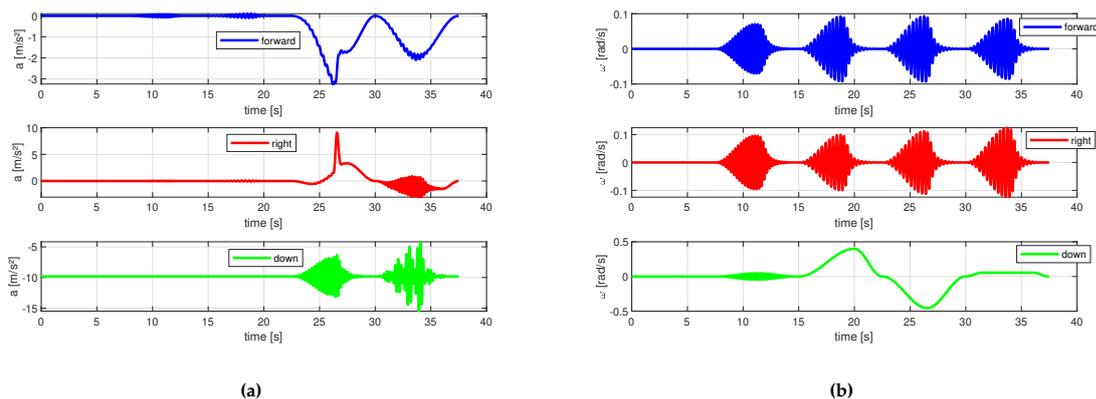


Abbildung 2.22: Auf Basis experimenteller IMU-Daten (vgl. Weddig u. a. (2022)) wurden Trajektorien für Beschleunigungen (links) und Drehraten (rechts). Verschiedene Manöver mit einer Dauer von je 7.5 Sekunden sind vorhanden, bspw. eine stationäre Phase zu Beginn, gefolgt von Oszillationen der Beschleunigung, einer Rechtskurve sowie einer Linkskurve mit Beschleunigungs-Spitze.

Ein geringer Hebelarm von 10 cm in z-Richtung wird zwischen den beiden Sensoren angebracht. Die Interrogationszeit des Atominterferometers beträgt 25 ms, die Datenrate der IMU beträgt 200 Hz.

In einem zweiten Szenario werden die gleichen Parameter für Atominterferometer und IMU verwendet. Bei der Trajektorie handelt es sich jedoch um eine langsame S-Kurve, die innerhalb von etwa 50 Sekunden befahren wird. Dabei treten keine sprunghaften Änderungen der Beschleunigungen und Drehraten auf.

Die Abbildungen 2.24 zeigen zwei interessante Ergebnisse. Zum ersten lässt sich der Geschwindigkeitsfehler mit der Hybrid-Filterlösung um einen Faktor von über 100 reduzieren. Dies ist bei Szenario eins über die ersten 23 Sekunden der Fall, als auch während der gesamten Simulation bei Szenario zwei. Bei der empirischen Standardabweichung lässt sich eine ähnliche Verbesserung erzielen. Bei Szenario 1 offenbart sich ab der 23. Sekunde bis zu Sekunde 26 eine starke Verschlechterung der gefilterten Lösung. Dies ist genau der Moment, in dem sowohl bei den Beschleunigungen ein Peak von 3 m/s^2 in x , bzw. 9 m/s^2 in y -Richtung auftreten, bei gleichzeitiger Drehrate in z -Richtung und Oszillationen auf allen Achsen, vgl. Abb. 2.22.

Zunächst ist zu sagen, dass die Dynamiken über die konventionelle IMU gut aufgelöst werden können und die Rauschprozesse, welche zu einer Differenz zwischen den Beobachtungen des Interferometers und der IMU führen, liegen auch innerhalb des dynamischen Bereichs des Atominterferometers. Dies wird dadurch gestützt, dass die Hybridlösung in den ruhigen Abschnitten eine deutliche Verbesserung bringt. Eine Erklärung für den großen Fehler verbirgt sich in den Transformationen der Beschleunigungen zwischen dem b- und dem Sensorrahmen. Die Kopplung nahezu aller Achsen über die Kreuzprodukt-Terme führen zu einem Skalierungseffekt der Unsicherheiten, sobald größere Dynamiken auftreten. Die Abb. 2.23 (d) zeigt ganz deutlich, dass bei der Sekunde 26 die Unsicherheit des geschätzten Gyroskop-Bias insbesondere in x - und y -Richtung ansteigt. Die größere Unsicherheit in den Drehraten führt im Umkehrschluss zu einer Verschlechterung der Navigationslösung selbst, wie in dem resultierenden Geschwindigkeitsfehler deutlich wird. Ein drittes Szenario sieht die Anwendung der Hybrid-Filterlösung auf einem Satelliten vor. Hier wird allerdings nur eine kurze Zusammenfassung gegeben; eine detaillierte Beschreibung der Simulation wurde durch HosseiniArani u. a. (2022b) veröffentlicht. In diesem Szenario wird ein elektrostatisches Akzelerometer (EA) als high-rate Sensor verwendet, mit einer Datenrate von 1 Hz. Die Unsicherheiten werden auch hier als eine Kombination von weißem, Flicker- und Random-Walk Rauschen modelliert. Das Atominterferometer ist mit weißem Rauschen und einer Atom-Flugzeit von zehn Sekunden implementiert. Die Gesamtdauer der Simulation beträgt 86400 Sekunden, also einen vollen Tag.

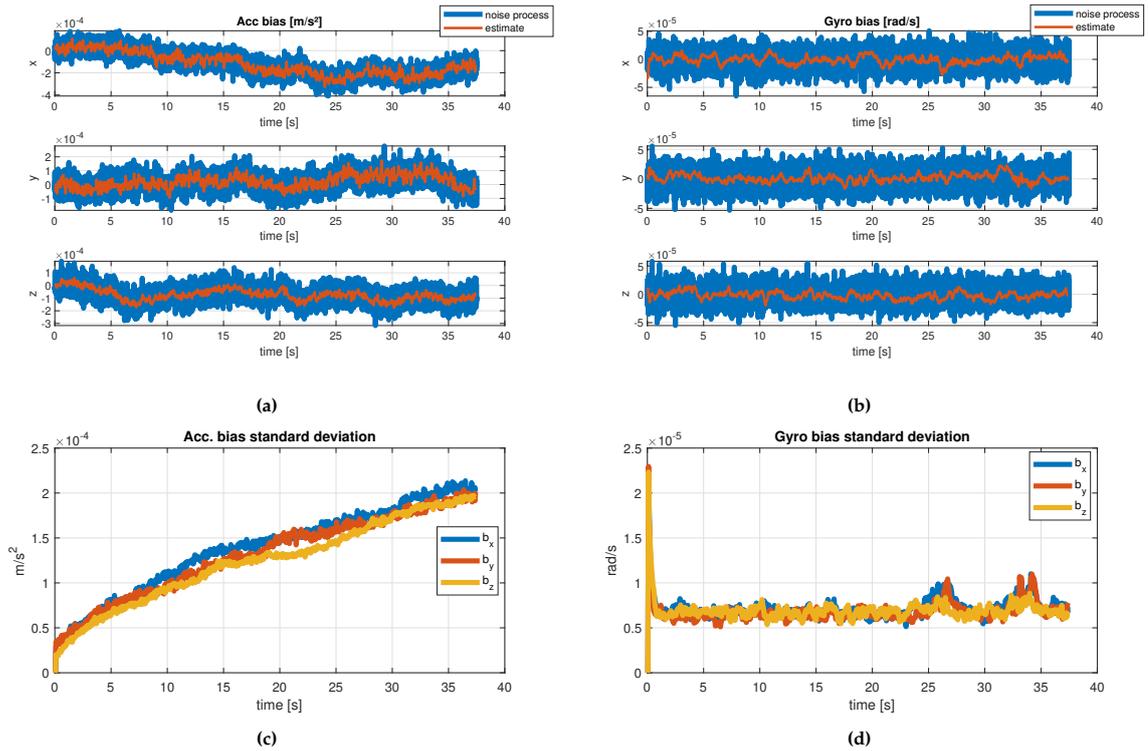


Abbildung 2.23: Ergebnisse für die gefilterten Biases. (a) und (b): Rauschprozess der auf die Beschleunigungs- und Gyro-Biases addiert wurde (blaue Linien) und die geschätzten Bias-Zustände (rote Linien) für eine der simulierten Instanzen. (c) und (d): empirische Standardabweichung für die simulierten Instanzen für den geschätzten Beschleunigungs- (c) und Gyroskop-Bias (d).

Die Ergebnisse in Abb. 2.25 zeigen, dass die Hybridlösung auch für diesen Fall anwendbar ist. Der Bias des EA kann gut reproduziert werden. Im niederen Frequenzbereich zeigt sich außerdem die hervorragende Langzeitstabilität der Lösung, welche den Eigenschaften des Atominterferometers zu verdanken ist.

Beobachtbarkeit und Stabilität

Die folgenden Erweiterungen des Zustandsvektors werden nun betrachtet: Beschleunigungs-Bias \mathbf{b}_a , Gyroskop-Bias \mathbf{b}_g , Misalignment γ_b^s und Hebelarm \mathbf{x}_{sb}^s

$$\mathbf{X} = [\mathbf{b}_a, \mathbf{b}_g, \gamma_b^s, \mathbf{x}_{sb}^s]^T \quad (2.30)$$

Es wird angenommen, dass keine zeitliche Änderung der Zustände stattfindet. Somit gilt

$$\dot{\mathbf{b}}_a = 0, \quad \dot{\mathbf{b}}_g = 0, \quad \dot{\gamma}_b^s = 0, \quad \dot{\mathbf{x}}_{sb}^s = 0. \quad (2.31)$$

und die zugehörige Transitionsmatrix $\mathbf{F} = \mathbf{I}_{12 \times 12}$, eine Einheitsmatrix mit 12 Dimensionen. Man beachte, dass $\mathbf{I} - [\gamma_b^s \times] = \mathbf{C}_b^s$ der in den Gl. (2.22) und (2.23) eingeführten Rotationsmatrix zwischen den Systemen \mathbf{b} und \mathbf{s} entspricht.

Weiterhin stehen die Beobachtungen des zuvor vorgestellten differentiellen CAI zur Verfügung,

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{p}_A, \mathbf{p}_B]^T, \quad (2.32)$$

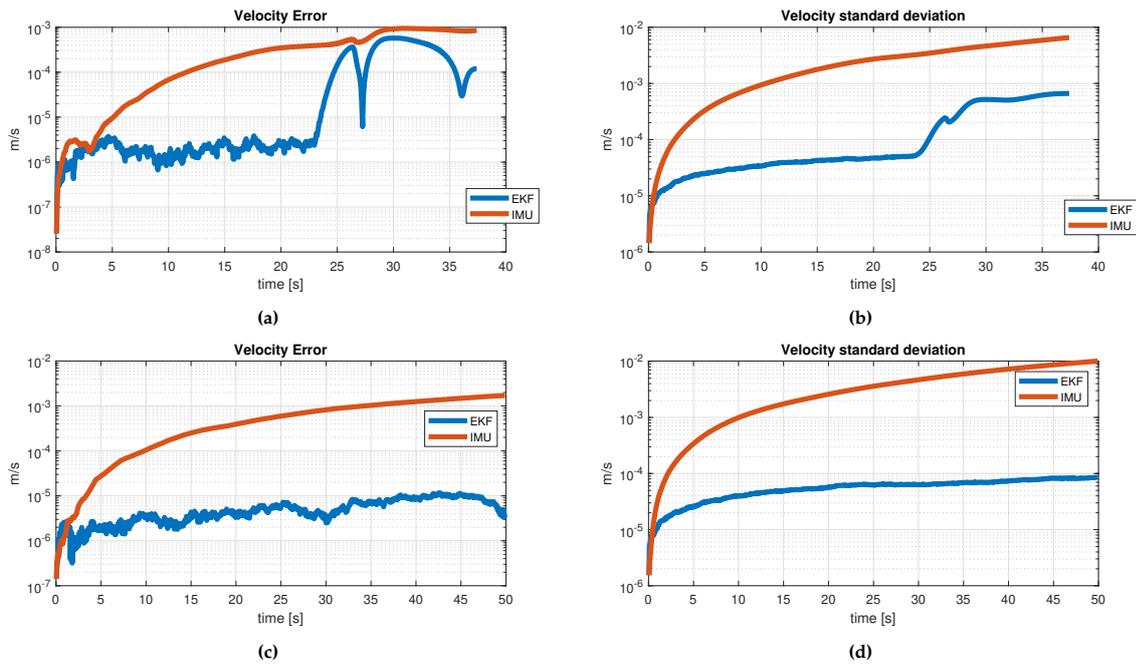


Abbildung 2.24: Ergebnisse der gefilterten Geschwindigkeit im Vergleich zur IMU-Lösung. Dargestellt ist der Betrag der 3D-Geschwindigkeitsvektoren. (a): Δv_{eb}^n Geschwindigkeitsfehler der hybriden EKF-Lösung (blau) und der IMU Strapdown-Lösung (rot) bzgl. der simulierten Referenztrajektorie. (b): empirische Standardabweichung bei 100 Monte-Carlo-Instanzen. (c) und (d): Geschwindigkeitsfehler und empirische Standardabweichung für eine Trajektorie mit geringen Dynamiken.

mit $\mathbf{p}_A = [p_{Ax}, p_{Ay}, p_{Az}]$ und $\mathbf{p}_B = [p_{Bx}, p_{By}, p_{Bz}]$. Die aus den partiellen Ableitungen $\partial Y / \partial X$ resultierende Beobachtungsgleichung \mathbf{H} ergibt

$$\mathbf{H}^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial b_a} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_A) & \frac{\partial}{\partial b_a} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_B) \\ \frac{\partial}{\partial b_s} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_A) & \frac{\partial}{\partial b_s} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_B) \\ \frac{\partial}{\partial \gamma_b^s} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_A) & \frac{\partial}{\partial \gamma_b^s} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_B) \\ \frac{\partial}{\partial l} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_A) & \frac{\partial}{\partial l} \frac{1}{2} \cdot \cos(\Phi_B) \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Auch wenn das Beobachtungsmodell nichtlinear ist, kann die Beobachtbarkeitsmatrix \mathbf{O} mit gewissen Einschränkungen verwendet werden, um zumindest grundsätzlich zu prüfen, ob sich einzelne Zustände über die Beobachtungen erreichen lassen. Ansätze über stückweise-lineare Betrachtung nichtlinearer Gleichungen sind bspw. in Goshen-Meskin und Bar-Itzhack (1992) zu finden, werden hier aber nicht weiter verfolgt.

$$\mathbf{O} = \begin{pmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H} \cdot \mathbf{F} \\ \mathbf{H} \cdot \mathbf{F}^2 \\ \dots \\ \mathbf{H} \cdot \mathbf{F}^{n-1} \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Jede Zeile der Matrix stellt einen weiteren Filterschritt dar. Die Spalte der Matrix entspricht den jeweiligen Zuständen. Sobald nach n Filterschritten ein Eintrag ungleich null vorliegt, ist die jeweilige Beobachtung sensitiv für den entsprechenden Zustand. Im Umkehrschluss gilt dieser Zustand dann als beobachtbar. Da die Transitionsmatrix \mathbf{F} eine Einheitsmatrix ist, lassen sich auch nach mehreren (n) sukzessiven Filterschritten keine neuen Beobachtungen über das Systemmodell erzeugen. Für eine einfache Analyse genügt es daher, die Beobachtungsmatrix \mathbf{H} selbst anstelle der Beobachtbarkeitsmatrix \mathbf{O} zu betrachten.

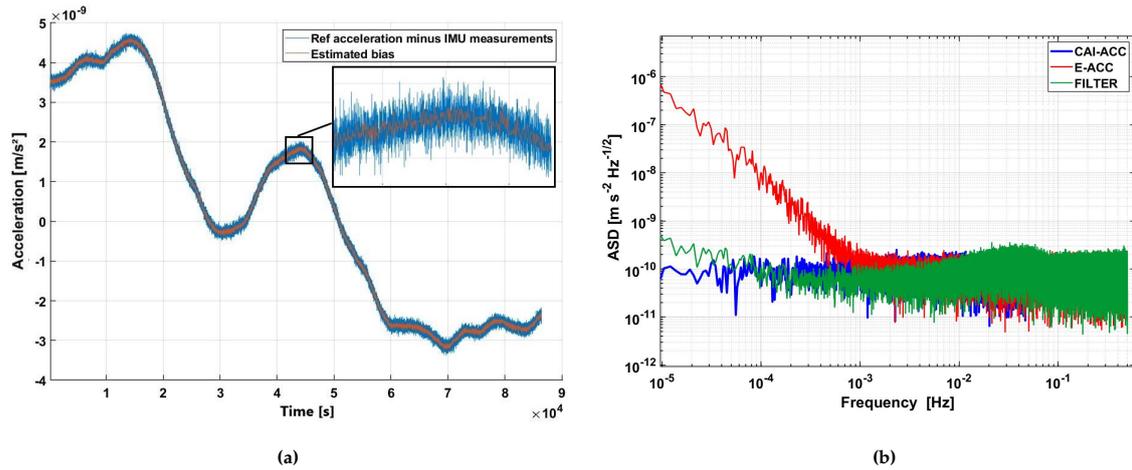


Abbildung 2.25: Am Beispiel der Kopplung eines elektrostatischen Akzelerometers mit einem Atominterferometer für eine hypothetische GRACE-typische Mission lässt sich die überlegene Langzeitstabilität des Atominterferometers gut demonstrieren. (a) Schätzung des Bias (rot) verglichen mit der Differenz der Signale beider Sensoren (blau). (b) Die hybride Filterlösung (grün) profitiert von dem vorwiegend weißem Rauschverhalten des Atominterferometers (blau). Das elektrostatische Akzelerometer (rot) driftet im niedrigen Frequenzbereich stark (HosseiniArani u. a., 2022b).

Mit den in Tennstedt und Schön (2021b) veröffentlichten Ableitungen ergibt sich die komplette Beobachtungsmatrix schließlich zu:

$$\mathbf{H}^T = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_A^T & \mathbf{K}_B^T \\ \mathbf{L}_A^T & -\mathbf{L}_B^T \\ \mathbf{K}_A[\mathbf{f}_{ib}^s \times]T + \mathbf{L}_A[\boldsymbol{\omega}_{ib}^s \times]T & \mathbf{K}_B[\mathbf{f}_{ib}^s \times]T - \mathbf{L}_B[\boldsymbol{\omega}_{ib}^s \times]T \\ \mathbf{K}_A[\boldsymbol{\omega}_{ib}^s \times]^2 T & \mathbf{K}_B[\boldsymbol{\omega}_{ib}^s \times]^2 T \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

mit $\mathbf{K}_i = -\frac{1}{2}T \cdot \text{diag}(\mathbf{k}^s)$, $\mathbf{L}_i = -T \cdot \text{diag}(\mathbf{k}^s) \cdot [\bar{\mathbf{v}}_{sa}^s \times]$, $i \in \{A, B\}$. Zur Vereinfachung ist der effektive Wellenvektor \mathbf{k}^s in diesem Zusammenhang mit den einzelnen Wellenzahlen für die drei Raumrichtungen, $\mathbf{k}^s = [k_x, k_y, k_z]^T$, besetzt.

Die Beobachtbarkeit lässt sich hiermit leicht zusammenfassen. Der Beschleunigungs-Bias ist grundsätzlich auf allen Raumachsen beobachtbar. Der Gyro-Bias ist von der mittleren Drift-Geschwindigkeit der Atome $\bar{\mathbf{v}}_{sa}^s$ abhängig. Diese muss jeweils senkrecht zur Messachse auftreten. Weiterhin ist für den typischen Betrieb des Atominterferometers als Gyroskop eine Driftgeschwindigkeit Voraussetzung, da bei fehlender Relativgeschwindigkeit der Atome im Sensorrahmen kein Corioliseffekt und somit keine Empfindlichkeit für die Rotation des Rahmens senkrecht zur sensitiven Achse vorliegt.

Für die Bestimmung des Hebelarms \mathbf{x}_{bs}^s in eine bestimmte Raumrichtung ist eine Drehrate auf einer der senkrecht dazu liegenden Achsen erforderlich. Dies ist leicht nachvollziehbar, da eine reine Translationsbewegung des Sensors im Zielsystem auf einen beliebigen Punkt einer starren Plattform gleichmäßig wirkt. Bei einer Rotation treten jedoch Scheinkräfte auf, die mit der Distanz x_{bs}^s vom Rotationszentrum zusammenhängen. Man beachte, dass die Matrix 2.35 gewissermaßen die Minimalkonfiguration für die Beobachtbarkeit darstellt. Bei gleichzeitigem Auftreten von Beschleunigungen und Drehraten tritt beispielsweise ein Coning-Term, vgl. Gl. 2.28, auf, welcher eine zusätzliche Sensitivität für die Zustandsgrößen einführt.

Basierend auf diesen Ergebnissen ist es nun möglich, die Stabilitätseigenschaften des Systems zu prüfen. Ist diese gegeben, lassen sich die vergleichsweise komplexen Filtergleichungen in ein sogenanntes Steady-State-System umformulieren. Bei einem stabilen System konvergieren die Zustandsvarianzen im Filter auf einem stationären Wert, und der Verstärkungsfaktor kann, natürlich abhängig vom Beobachtungsmodell, als konstant betrachtet werden. Dieser Umstand ermöglicht relativ einfach analytische Aussagen über die Performance der Hybridlösung (Tennstedt u. a., 2021b).

Tabelle 2.3: Resultate für Steady-State Varianzen P_∞ verschiedener Settings. Der Parameter Q stellt die Rauschdichte des jeweiligen konventionellen Sensors bezogen auf das Filterintervall dar. Die Werte für R sind einheitenlos. A: Satellit mit elektrostatischem Beschleunigungsmesser, B: Servo-Beschleunigungsmesser einer navigation-grade IMU, C: Typisches Ringlaser-Gyroskop und Varianz der gefilterten Drehraten, (Tennstedt u. a., 2021b).

ID (Time)	Q		R	P _∞	
	Parameter	Einheit		Parameter	Parameter
A (10 s)	$1 \cdot 10^{-20}$	$[\text{m/s}^2]^2$	$1,024 \cdot 10^{-3}$	$4,82 \cdot 10^{-20}$	$[\text{m/s}^2]^2$
B (0,04 s)	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$[\text{m/s}^2]^2$	$1,024 \cdot 10^{-3}$	$8,25 \cdot 10^{-10}$	$[\text{m/s}^2]^2$
C (0,04 s)	$4 \cdot 10^{-16}$	$[\text{rad/s}]^2$	$1,024 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-14}$	$[\text{rad/s}]^2$

Diese analytische Berechnung der Steady-State Varianzen ist nur mit der Annahme von unkorrelierten Zuständen möglich. Bei Korrelationen, bspw. durch Kreuzkopplung der Koordinatenachsen oder durch verbleibende systematische Effekte in der differentiellen Interferometer-Architektur, ist eine analytische Lösung sehr schwierig und numerische Verfahren zur Berechnung empfehlenswert.

Die Tabelle 2.3 zeigt verschiedene Szenarien für Kombinationen von konventioneller Sensorik und einem Atominterferometer. Die Steady-State Varianz P_∞ ist dabei das Resultat nach einer CAI-Messung. Szenario A entspricht einem Setting auf einem Satelliten mit großer Atom-Flugzeit von zehn Sekunden. Das konventionelle Gerät ist ein elektrostatisches Akzelerometer mit vergleichsweise kleiner Varianz des Signals. Durch die große CAI Messzeit und die damit quadratisch skalierte Sensitivität, erreicht die Steady-State Varianz am Ende immer noch einen vergleichbaren Wert, der allerdings auch über längere Mittelungszeiten stabil gehalten werden kann (HosseiniArani u. a., 2022b).

Das Prozessrauschen in Szenario B entspricht dem Servo-Beschleunigungsmesser einer navigation-grade IMU. Das CAI Messintervall ist hier stark verringert aufgrund des reduzierten Bewegungsraumes für die Atome, wie es bei Atominterferometern für mobile terrestrische Anwendung typisch sein wird. Auch mit der verringerten Messzeit kann die Steady-State Varianz der Hybridlösung verglichen mit der der konventionellen IMU um etwa den Faktor 3 verbessert werden.

Im Szenario C wird, im Gegensatz zu den ersten zwei Fällen, die Steady-State Varianz der gefilterten Drehraten betrachtet. Das Prozessrauschen entspricht hier den Unsicherheiten eines Ringlaser-Gyroscopes. Die Steady-State Varianz P_∞ ist in diesem Fall etwas geringer als die des Prozessrauschen Q für den Filterschritt. Für längere Zeiten profitiert die Hybridlösung aber auch hier von der stark verbesserten Langzeitstabilität.

Diese Analyse lässt sich leicht um langperiodische Effekte erweitern, in dem ein längerer Zeitraum betrachtet wird. Sowohl die Werte in R als auch in Q können dann ggf. aufgrund von Flicker- und Random-Walk Rauscheinflüssen angepasst werden.

2.4.3. Durchführung und Analyse kinematischer Testmessungen

Für den Teststand wurden ursprünglich die Planung, Durchführung und Auswertung kinematischer Testmessungen im Projekt vorgesehen. Da der Teststand noch nicht betriebsbereit ist, konnte eine entsprechende Auswertung der Signale des Atominterferometers nicht durchgeführt werden. Um dennoch den entwickelten Navigationsalgorithmus und das Hybridfilter anhand realer Daten zu evaluieren, wurde eine hochwertige navigation-grade IMU, (iMAR GmbH, 2017), verwendet und aus deren Rohdaten die CAI-Signale entsprechend der Formeln aus dem vorherigen Abschnitt emuliert. Als *konventionelle* IMU wird eine tactical-grade MEMS IMU, (Parker Lord, 2015), eingesetzt. Im weiteren Verlauf wird nun die im Projekt weiterentwickelte Steuerungssoftware für den Hexapod vorgestellt, mit der Trajektorien durch Vorgabe von Endeffektor-Koordinaten definiert werden können. Des Weiteren wird die für das kinematische Experiment gewählte Trajektorie beschrieben. Abschließend folgt die Auswertung des Experimentes, in dem die Signale der MEMS-IMU und des emulierten CAI in das Hybridfilter eingespeist werden.

Tabelle 2.4: Spezifische Parameter des Hexapods

Parameter	Wert	Einheit
Arbeitsraum X, Y, (Z)	$\pm 50 (\pm 25)$	mm
Arbeitsraum $\theta_x, \theta_y, (\theta_z)$	$\pm 15 (\pm 30)$	°
Auflösung Einzelaktuator	0.017	μm
Min. Schrittweite X, Y, (Z)	1 (0.5)	μm
Min. Schrittweite $\theta_x, \theta_y, \theta_z$	5	μrad
Wiederholgenauigkeit X, Y, (Z)	$\pm 0.5 (\pm 0.4)$	μm
Wiederholgenauigkeit $\theta_x, \theta_y, (\theta_z)$	$\pm 7 (\pm 12)$	μrad
Max. Geschwindigkeit X, Y, Z	2.5	mm/s
Max. Geschwindigkeit $\theta_x, \theta_y, \theta_z$	30	mrad/s

Hexapod H-840.G1 von Physik Instrumente

Der Hexapod H-840.G12 von Physik Instrumente ist mit einem Getriebeantrieb ausgestattet, was eine für die Größenordnung des Gerätes vergleichsweise hohe Haltekraft und Betriebslast ermöglicht. Die wichtigsten Parameter sind in der Tab. 2.4 zusammengefasst.

Signalfluss und Steuerung

Der generelle Programmablauf ist in Abb. 2.26 dargestellt. Zur Steuerung des Hexapods wird die Python-Schnittstelle *PiPython* verwendet, die von Physik Instrumente zur Verfügung gestellt wird. Diese ermöglicht einerseits die Übertragung von Befehlen an den Hexapod-Controller, wie dem MOV Befehl, der den Hexapod dazu veranlasst, die übergebenen Endeffektor-Koordinaten anzusteuern. Andererseits liefert der Hexapod Prozessdaten, wie etwa die aktuelle Ist-Position des Endeffektors. Ein interner programmierbarer Datenrecorder ist ebenfalls implementiert, der bis zu 10240 Zeilen speichern kann. Sollte die Dauer des Experimentes dieses Limit überschreiten, wurden Methoden entwickelt, die ein zyklisches Auslesen innerhalb einer Haupt-Programmschleife ermöglichen.

Es ist nicht möglich, dem Controller des Hexapods externe Zeitsignale einzuspeisen. Um eine Synchronisation verschiedener Geräte zu ermöglichen, wird deshalb der interne GNSS²-Receiver der LORD MicroStrain IMU verwendet. Die Kommunikation erfolgt mittels der *Pyserial* Bibliothek und einer im Projekt entwickelten MEMS-Schnittstelle, in der entsprechende Methoden implementiert wurden, um die Daten direkt aus dem Datenstrom der IMU zu lesen.

Weitere Hilfsmodule sind der *Data Converter* zum Einlesen von Trajektorien aus Textdateien oder .mat files, und zum Exportieren der Prozessdaten. Bei Bedarf kann weiterhin der *Plotter* verwendet werden, um die ausgelesenen Daten von Hexapod und IMU in entsprechenden Diagrammen darzustellen.

Durchführung der Experimente

Das Labor ist mit einem optischen Tisch ausgestattet, der bei Bedarf über pneumatische Dämpfer vom Laborboden entkoppelt werden kann. Auf dem Tisch wurde eine Absolutmessung der lokalen Schwere durchgeführt, welche als Referenz Verwendung findet.

$$g = (9\,812\,607\,305 \pm 18) \frac{\text{nm}}{\text{s}^2} \quad (2.36)$$

Für die kinematischen Experimente ist die Vorgabe von Beschleunigungsprofilen erforderlich. Zu diesem Zweck bietet es sich an, die Neigungswinkel des Hexapods zu variieren und so unter Kenntnis

²GNSS: Global Navigation Satellite System

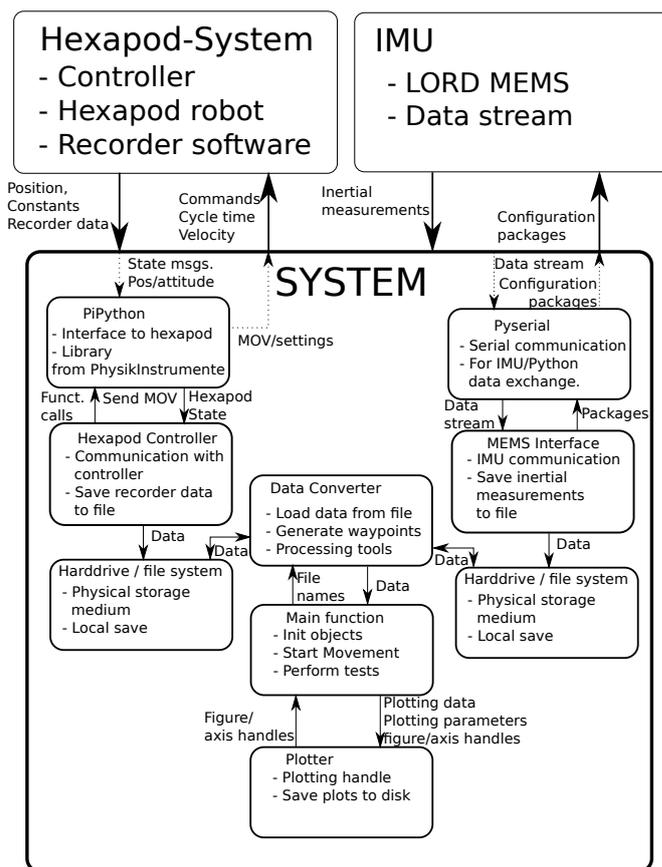


Abbildung 2.26: Signalfluss der Hexapod-Steuerung.

des lokalen Schwerewertes eine Trajektorie zu generieren. Entsprechend der kleinsten Schrittweite für die Winkel von 5 μ rad und den kombinierten Unsicherheiten lassen sich so theoretisch mindestens die folgenden Änderungen der Schwere erzeugen:

$$\Delta g = g(1 - \cos(\theta)) = (0,1227 \pm 0,2404) \frac{\text{nm}}{\text{s}^2} \tag{2.37}$$

Die Schrittweite kann an die Sensitivitätsschwelle des Teststandes angepasst werden, sodass die Unsicherheiten nicht ins Gewicht fallen. Eine solch präzise Vorgabe ist für die erste Evaluierung mit den beiden konventionellen IMUs nicht erforderlich.

Die Algorithmen wurden anhand zweier Experimente evaluiert. Ein statisches, bei dem primär die Stabilität des Filters getestet und ein erster grundsätzlicher Einblick in die Performance des hybriden Systems und seine Fähigkeit zur Korrektur systematischer Fehler gewonnen werden kann, sowie ein kinematisches Experiment. Für letzteres wurde die folgende Trajektorie, cf. Abb. 2.27, generiert. Die beiden Neigungswinkel werden dabei über 145 Sekunden lang phasenverschoben bis zu einem Maximalwert von 3,75° variiert.

Die Ergebnisse für das statische Experiment sind in Abb. 2.29 dargestellt. Die Positions- und Geschwindigkeitsdrift kann um einen Faktor von etwa 30 verglichen mit der MEMS-Lösung verbessert werden,

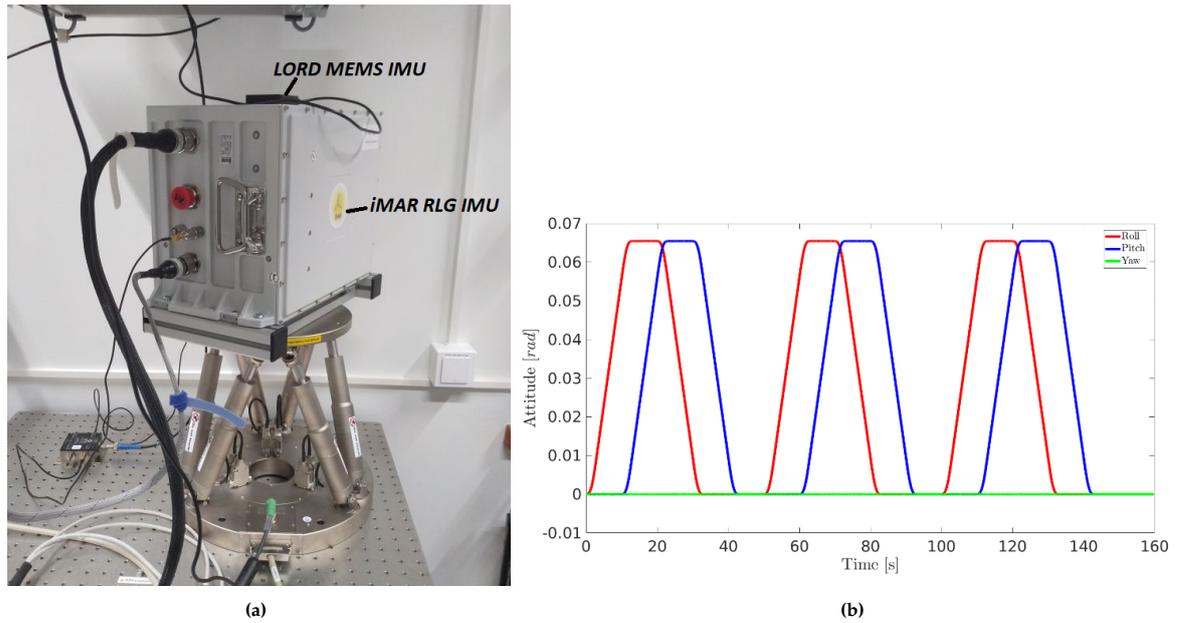


Abbildung 2.27: Hexapod-Experiment. (a) Experimenteller Aufbau. Die iMAR IMU ist fest mit dem Hexapod verschraubt. Die MEMS IMU ist mit gleich ausgerichteten Achsen wiederum darauf befestigt. Ein GNSS Signalteiler wird verwendet, um die Messungen beider IMUs mit identischen Zeitstempeln zu versehen. (b) Trajektorie: zyklische Variation der Neigungswinkel (Weddig u. a., 2021).

während die Standardabweichung der Lösung um den Faktor 2–3 verbessert werden kann. Die Drift der Orientierung kann ebenfalls deutlich reduziert werden.

Ähnliche Verbesserungen können auch bei der dynamischen Trajektorie erzielt werden. Hier sind jedoch insbesondere bei der Orientierung systematische Effekte zu sehen, die mit der Dynamik der Trajektorie korrelieren. Üblicherweise hängen solche Systematiken in der Orientierung mit einem Misalignment zum Zielsystem zusammen, welches hier nicht kalibriert wurde. Die lineare Drift der Lösung wird dennoch deutlich reduziert. Für eine detaillierte Analyse sei an dieser Stelle auf Weddig u. a. (2021) verwiesen.

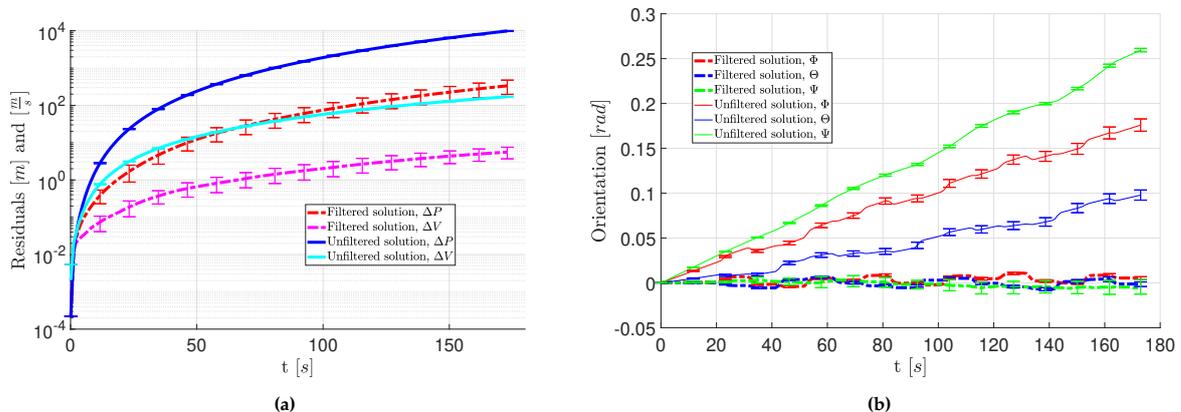


Abbildung 2.28: Performance Verbesserung durch Nutzung eines emulierten Quantensensors. Links: Vergleich der hybriden Positions- und Geschwindigkeitslösung und der ungefilterten Strapdown-Lösung mit der MEMS-IMU. Die Fehlerbalken stellen die 1σ Standardabweichung dar. Rechts: die berechnete Orientierung wurde ebenfalls verbessert (Weddig u. a., 2021).

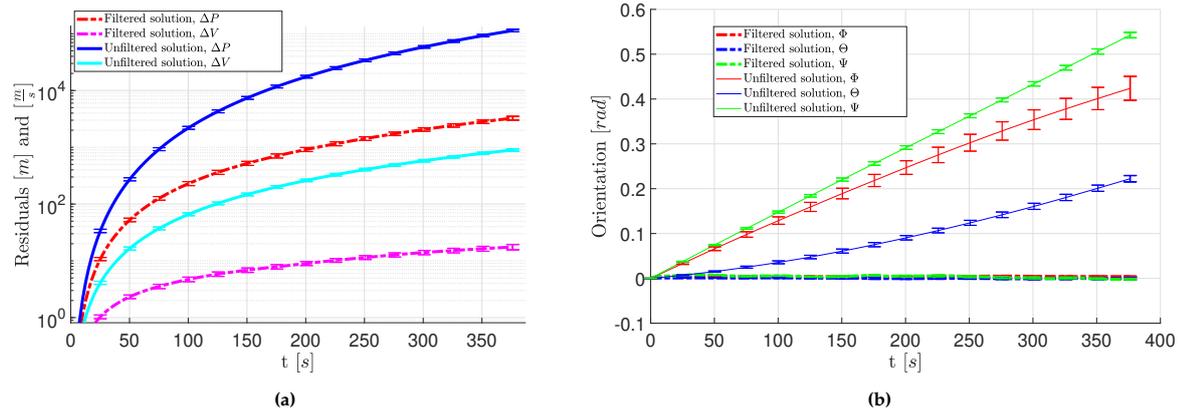


Abbildung 2.29: Links: Vergleich der hybriden Positions- und Geschwindigkeitslösung und der ungefilterten Strapdown-Lösung mit der MEMS-IMU. Rechts: die berechnete Orientierung wurde ebenfalls verbessert (Weddig u. a., 2021).

2.5. Multi-Achsen-Atominterferometer (AP5000, IQO)

2.5.1. AP5100 - Evaluation existierender Konzepte für Multi-Achsen-Anordnungen

Die meisten Messungen, die mit Atominterferometern durchgeführt werden, sind von Natur aus eindimensional ausgelegt, d.h. es wird jeweils nur eine einzige Rotations- und/oder Beschleunigungsachse gemessen. Für eine vollständige Trägheitsnavigation ist es jedoch notwendig, die dreidimensionale Flugbahn eines bewegten Körpers rekonstruieren zu können. Daher bildet nur die gleichzeitige Messung von Beschleunigungen und Rotationen in drei zueinander orthogonalen Richtungen die Grundlage für eine vollständige Inertialmesseinheit. Es gibt bereits verschiedene Konzepte, die dieses Problem angehen wie zum Beispiel in Barrett u. a. (2019). Diese Inertialmessungen werden oft gepulst betrieben, besitzen daher eine geringere Bandbreite als beispielsweise für die Navigation geeignete mechanische Geräte und leiden unter niedrigen Wiederholraten. Dies führt auch zu Totzeiten, in denen keine Inertialmessungen durchgeführt werden können. Es gibt Bestrebungen, dieses Problem durch ein gemeinsames Abfrageschema (Dutta u. a., 2016; Savoie u. a., 2018a) oder das erneute Einfangen der Atome nach der Interferometersequenz (Rakholia u. a., 2014a) zu umgehen, aber sie gehen mit einer erhöhten Geräte- und Sequenzkomplexität einher.

Ein weiteres Problem in dynamischen oder seismisch verrauschten Umgebungen, wie sie typischerweise in Navigationsszenarien anzutreffen sind, besteht darin, dass der Einfluss von Trägheitseffekten, die auf die Materiewellen einwirken, und ihre Phasenreferenz nicht voneinander zu unterscheiden sind. Infolgedessen trägt seismisches Rauschen erheblich zur Instabilität von Quanten-Inertialsensoren bei und ist oft eine dominante Rauschquelle, die andernfalls die Interferometerauslesung aufgrund von Phasenmehrdeutigkeiten behindern würde. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, können auch die sogenannten klassischen Sensoren eingesetzt werden. Zum Beispiel in Form eines Beschleunigungssensors, der auf der Basis einer Masse arbeitet, die an einer Federaufhängung montiert ist und deren Bewegung erfasst werden kann. Diese Sensoren weisen in der Regel eine größere Bandbreite auf, leiden aber unter langfristigen Verzerrungen und Skalenfaktor-Driften. Sie können verwendet werden, um die Bewegung der Inertialreferenz zu verfolgen und die Phasenantwort des Atominterferometers zu korrigieren. Kürzlich hat eine neue Klasse optomechanischer Sensoren mit kleinem Formfaktor gezeigt, dass sie dieselbe Aufgabe erfüllen können (Richardson u. a., 2020b). Da gezeigt wurde, dass Atominterferometer mit den richtigen Eingangsparametern und Einstellungen prinzipiell hochempfindliche Inertialmessungen liefern können, liegt es nahe, das Beste aus einem klassischen und einem Quantensensor zu kombinieren und in einer Hybridlösung zu verwenden (Lautier u. a., 2014; Tennstedt und Schön, 2021a; Cheiney u. a., 2018). Diese Hybridisierung ermöglicht die Korrektur einer Reihe von systematischen Fehlern, Offsets und möglichen Driften, was zu einer größeren Bandbreite mit erhöhter Bias-Stabilität und Genauigkeit führt.

Bei der Entwicklung eines navigationskompatiblen Sensors muss berücksichtigt werden, dass in dynamischen Umgebungen das eingesetzte Atomensemble, insbesondere bei Verwendung eines anfänglichen symmetrischen Spaltimpulses, empfindlich auf Dopplerverschiebungen reagiert, die sich aus der relativen Geschwindigkeit zwischen den frei fallenden Atomen und dem sich bewegenden Referenzrahmen ergeben. Dies wird in der Regel durch Anwendung eines phasenkontinuierlichen Chirps kompensiert, um die Übergangsrisonanzbedingung aufrechtzuerhalten, wenn die Atome in Richtung ihrer Inertialreferenz beschleunigen oder sich von ihr entfernen. Erfährt das System jedoch mehrere Translationsbeschleunigungen, muss die Laserfrequenz von Zyklus zu Zyklus geändert werden. Nur wenn die auftretenden Beschleunigungen, die von den klassischen Sensoren gemessen werden, annähernd bekannt sind, kann ihnen durch Anpassung der verwendeten Laserfrequenzen entgegengewirkt werden. Dies kann durch eine Echtzeitlösung realisiert werden (Templier u. a., 2022b).

Außerdem können die vom Interferometer definierten Atomflugbahnen die Breite des Laserstrahls verlassen, wenn die erfahrene Beschleunigung zu hoch ist, sodass es unmöglich ist, das Interferometer zu schließen und die Phaseninformation zu extrahieren. Ein weiterer nachteiliger Effekt ergibt sich aus möglichen Rotationen, die die Richtung der strahlteilenden Lichtpulse ändern, so dass sich die Wellenpakete beim letzten Puls nicht überlappen und das Interferometer nicht geschlossen werden kann, was zu einem Verlust des interferometrischen Kontrasts führt. Eine bereits angewandte Lösung ist die Verwendung eines Kippspiegels als Inertialreferenz, die gezeigt hat, dass der Einfluss der durch die Erdrotation verursachten Corioliskraft eliminiert werden kann (Lan u. a., 2012). Alternativ, z.B. bei stärkeren Rotationen, kann eine Inertialplattform, auch gyroskopische Plattform genannt, verwendet werden, um den Sensor trotz der dynamischen Veränderungen in einer festen Orientierung im Raum zu halten. Der Ansatz ist hier ähnlich wie bei den Beschleunigungssensoren, indem die absoluten Messungen des klassischen Gyroskops den Input für die Orientierung der Inertialplattform liefern würden, während das Atominterferometer die restlichen Rotationskomponenten messen und korrigieren würde.

Bei der praktischen Entwicklung einer navigationskompatiblen (hybriden) Quanteninertialmesseinheit müssen viele weitere Herausforderungen berücksichtigt werden, die in statischen Laboraufbauten nicht vorhanden sind. Dies beginnt bei der Kompaktheit, die für Anwendungen an Bord entscheidend ist, aber auch die Verringerung der Komplexität und des Energieverbrauchs ist eine wichtige Überlegung für zukünftige Instrumente. Ein Konzept für ein Gerät, das aus dreiachsigen hybridisierten Beschleunigungsmessern und Gyroskopen besteht, wobei die atomaren Sensoren die klassischen Sensoren korrigieren, wird im folgenden Abschnitt erörtert.

2.5.2. AP5200 - Entwicklung eines Multi-Achsen-Konzepts

$$\phi_a = \frac{1}{2}(\phi_1(\vec{v}) + \phi_2(-\vec{v})), \text{ and} \quad (2.38)$$

$$\phi_r = \frac{1}{2}(\phi_1(\vec{v}) - \phi_2(-\vec{v})), \quad (2.39)$$

$$\phi_a = \vec{k}_{\text{eff}} \cdot \vec{a}T^2 + \phi_L \phi_r = 2\vec{k}_{\text{eff}} \cdot \left(\vec{\Omega} \times \frac{\vec{v}_{\text{sep}}}{2} \right) T^2. \quad (2.40)$$

Um ein Multi-Achsen Interferometer für Navigationszwecke zu betreiben, bedarf es eines entsprechenden Konzepts. Die schrittweise Abfolge, welche im Folgenden erläutert wird, basiert auf einer Erweiterung des dualen BEC-Interferometers aus Abb. 2.21. Nach der Erzeugung eines BEC durch eine Atomchipfalle wird das Ensemble freigesetzt und mit einer adiabatischen Passage werden die Atome in einen nichtmagnetischen Zustand überführt. Es wird dann mithilfe der doppelten Bragg-Beugung erster Ordnung symmetrisch aufgespalten und bewegt sich anschließend in Form von zwei Wellenpaketen getrennt voneinander entlang der Richtung des Aufspaltungspulses. Jedes Wellenpaket mit einer

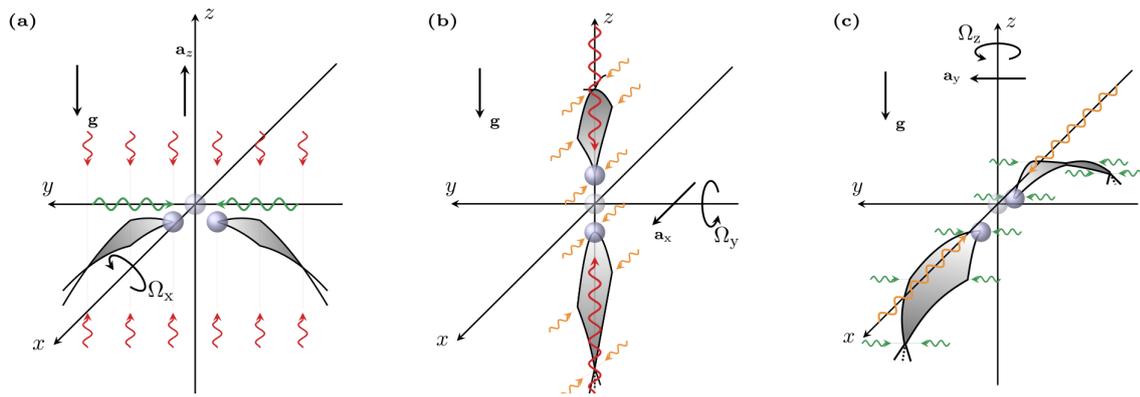


Abbildung 2.30: Drei senkrecht zueinander ausgerichtete optische Gitter in Rot (z-Achse), Grün (y-Achse) und Orange (x-Achse) bilden eine Erweiterung des dualen BEC-Schemas, um nacheinander alle drei Komponenten von $\vec{\Omega}$ und \vec{a} zu erfassen. Das Vorhandensein einer konstanten Beschleunigung, zum Beispiel durch die Schwerkraft \vec{g} in Richtung der z-Achse, wirkt auf die Trajektorien. (a) Dieses Schema zeigt die Anfangstrajektorien aus Abb. 2.21. Die Ausgangsphase ist empfindlich gegenüber Beschleunigungen a_z und Rotationen Ω_x (b) Durch den Einsatz eines Doppel Bragg-Beugungsprozesses zur Erzeugung zweier anfänglicher Wellenpakete entlang der z-Achse und eines zusätzlichen optischen Gitters (orangefarbene Pfeile) entlang der x-Achse entstehen zwei Interferometer, die insgesamt empfindlich auf Ω_y und a_y reagieren. (c) Um auch die restlichen Komponenten Ω_z und a_z zu messen, wird die Richtung der anfänglichen Aufspaltung wieder geändert, um die anfänglichen Wellenpakete entlang der x-Achse zu erzeugen. (angepasst von Gersemann u. a., 2020b)

Geschwindigkeit von $v = 4\hbar k/m$, wobei \hbar die reduzierte Planck-Konstante und m die Atommasse bezeichnet. Diese beiden einzelnen Wellenpakete können durch ein gemeinsames optisches Gitter abgefragt werden, das sich orthogonal in der Art von drei aufeinanderfolgenden Bragg-Prozessen erster Ordnung bewegt, um eine Mach-Zehnder-Sequenz zu realisieren. Das Gitter selbst wird durch Retro-Reflexion eines Lichtstrahls von einer reflektierenden Beschichtungsoberfläche eines Atomchips oder eines Spiegels gebildet. Während die Lichtpulse zeitlich durch T getrennt sind, wird eine zusätzliche Zeit τ_{det} benötigt, damit sich die atomaren Wellenpakete trennen können, bevor ihre Populationen $N_{A,B}^{1,2}$ durch Absorptionsdetektion auf dem Bildschirm einer CCD-Kamera nachgewiesen werden können.

Um sechs Freiheitsgrade mit diesem Konzept zu messen, genauer gesagt Ω_x , Ω_y und Ω_z , sowie a_x , a_y und a_z , muss es wie folgt weiterentwickelt werden. In der einleitenden Konfiguration im vorigen Abschnitt wurde erklärt, wie man die Menge von Ω_x und a_z messen kann, indem man zwei Wellenpakete entlang der y-Achse erzeugt. Dieses kann durch zwei weitere Sätze erweitert werden, die Ω_y und a_x bzw. Ω_z und a_y messen, wie in Abb. 2.30 gezeigt. Wenn diese drei Sätze kombiniert werden und nacheinander alle drei Komponenten von $\vec{\Omega}$ und \vec{a} messen, bilden sie eine vollständige Quanten-Trägheitsmesseinheit. Wie man sieht, funktioniert dies, wenn drei senkrecht ausgerichtete optische Gitterlichtfelder verwendet werden, idealerweise in einer symmetrischen Konfiguration. Um zunächst das allgemeine Konzept näher zu erläutern, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass sich das ursprüngliche Atomensemble in Ruhe befindet und keine (konstanten) Beschleunigungen oder Drehungen vorhanden sind. Da in dieser Konfiguration alle drei Achsen durch strahlteilende Lichtfelder belegt sind, kann die Absorptionsabbildung der Endpopulation jedes Ausgangsports mit einem zusätzlichen Lichtfeld außerhalb der Achse, aber dennoch mit einer einzigen CCD-Kamera für alle drei Geometrien durchgeführt werden. Um einen zusätzlichen optischen Zugang zu vermeiden, kann die Beleuchtung der Atome für die Fluoreszenzdetektion anstelle der Absorptionsdetektion auch über einen der vorhandenen optischen Zugänge erfolgen.

Die Messung kann potenziell in einem einzigen Durchgang durchgeführt werden, aber es muss berücksichtigt werden, dass die einzelnen Beugungsordnungen parasitär interagieren können. Die vorgesehene Arbeitsweise einer sechsachsigen Inertialmessung ist daher sequentiell, was dazu beiträgt, Probleme im Zusammenhang mit dem Übersprechen zwischen Beugungsprozessen entlang verschiedener Messachsen zu vermeiden.

Um die genaue Funktionsweise der Mehrachsenoperationen zu verstehen, werden die einzelnen Schritte im Folgenden näher erläutert. Zunächst erzeugt die Doppelbeugung erster oder höherer Ordnung zwei Wellenpakete, die jeweils eine Geschwindigkeit von $\vec{v}_{\text{sep}}/2$ haben und sich senkrecht zur jeweiligen zu messenden Beschleunigungskomponente bewegen. Für eine Vergrößerung der Interferometrieflächen A_i und damit der erreichbaren Rotationsphasenempfindlichkeit kann es vorteilhaft sein, bei dieser Aufspaltung mehr Impuls zu übertragen. Um während dieses Vorgangs konstante Gittertiefen zu erreichen, ohne die Gesamtlaserleistung ändern zu müssen, ist die Nutzung nicht-gaußförmiger Strahlprofile mit homogenen Intensitätsverteilungen interessant. Nach der anfänglichen Aufspaltung der Wellenpakete wird die Mach-Zehnder-Sequenz für alle Geometrien mit Lichtpulsen durchgeführt, die wiederum entweder Bragg- oder Raman-Prozesse innerhalb des zweiten optischen Gitters anregen. Dieses Gitter ist senkrecht zum jeweiligen \vec{v}_{sep} und der anfänglichen Aufspaltung ausgerichtet. Um die Empfindlichkeit eines oder aller Interferometer zu erhöhen, können Beugungsprozesse höherer Ordnung gesteuert werden. Die Messung aller sechs Freiheitsgrade kann potenziell in einem einzigen Versuchsdurchgang durchgeführt werden, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass die einzelnen Beugungsordnungen parasitär wechselwirken können. Die vorgesehene Arbeitsweise einer sechsachsigen Inertialmessung ist daher sequentiell, was dazu beiträgt, Probleme im Zusammenhang mit dem Übersprechen zwischen Beugungsvorgängen entlang verschiedener Messachsen zu vermeiden und den absoluten Bedarf an Laserleistung zu verringern.

Beispielsweise würde ein Beugungspuls erster Ordnung der Geometrie (a) in Abb. 2.30 entlang der z-Achse (grüne Pfeile), der die anfängliche Aufspaltung durchführen soll, auch mit den beiden Wellenpaketen interagieren, die für die Geometrie (c) erzeugt werden, da beide Wellenpakete die gleiche relative Geschwindigkeit entlang der aufspaltenden z-Achse haben. Daher würde man am Ende mehr als die typischen $n = 6$ interferometrischen Ausgangstore $N_{A,B}''$ haben.

Das Vorhandensein einer konstanten Beschleunigung in Richtung der z-Achse, zum Beispiel der Erdbeschleunigung g , hat stets einen Einfluss auf die Geometrien, wie in Abb. 2.30 zu sehen ist. Für die Betrachtung wurde angenommen, dass sich diese Orientierung im Betrieb nicht ändert. Im Prinzip kann bei einer aktiven Lagestabilisierung das Koordinatensystem immer so ausgerichtet werden, dass eine Achse in die Richtung der größten konstanten Beschleunigungskomponente zeigt. In einer Richtung senkrecht zur Schwerkraft induziert ein retro-reflektierter Lichtstrahl natürlich eine doppelte Beugung, aber im Fall entlang dieser zusätzlichen Beschleunigung gilt dies nur, wenn sich das Atomensemble in Ruhe befindet. Wie in Abb. 2.30 (a) zu sehen ist, erhalten die beiden sich in y-Richtung auseinander bewegenden Ensembles eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung, sodass die drei (roten) Interferometriepulse zu Einzelbeugungsübergängen führen, anstatt Doppelbeugungsprozesse auszulösen. Aufgrund der Zeit, die die Zustandsvorbereitung vor der ersten Aufspaltung in Anspruch nimmt, befindet sich das Ensemble auch bei der ersten Aufspaltung normalerweise nicht in Ruhe. Dies stellt eine Herausforderung für die Geometrie (b) aus Abb. 2.30 dar. Um jedoch eine doppelte Beugung zu erreichen, muss das optische Gitter beschleunigt werden, was eine zusätzliche Frequenzkomponente erfordert (Malossi u. a., 2010). Ein anderer Ansatz wäre die Implementierung der Fontänensequenz (Abend u. a., 2016), die das ursprüngliche Ensemble zurück in die Position von nahezu null Relativgeschwindigkeit bringt, in der Doppelbeugung natürlich auftritt. Eine weitere Herausforderung bei dieser Konfiguration ist, dass die eingeschlossenen Flächen der beiden Interferometer nicht gleich sind ($A_1 \neq A_2$), was zu einer unvollkommenen Unterdrückung des Rotationsrauschens in der Summenphase ϕ_{sum} führt. Für das Differenzsignal ϕ_{diff} wird das Beschleunigungsrauschen noch unterdrückt. Um diesen Nachteil zu kompensieren, könnte auch hier der hybride Ansatz in Form eines klassischen Beschleunigungssensors helfen, den Einfluss von g aus dieser Phase durch Korrelation zu entfernen.

2.6. Koordination (AP6000, IfE)

Das Konsortium wurde vom Institut für Erdmessung geleitet. Neben den monatlichen Videokonferenzen zum Projektfortschritt fanden jährlich persönliche Treffen statt, um die wesentlichen Entwicklungen im

Vorhaben ausführlich zu diskutieren. Diese fanden 2022 und 2021 in Hannover, 2020 in St. Ingbert und 2019 als Kick-off Meeting in Hannover statt.

Die enge Absprache bezüglich Planungsstrategie und Nutzung der Fördermittel für den Gesamtverbund erfolgte durch eine monatliche Berichterstattung. Die Koordinierung der Verbundpartner erfolgte innerhalb der LUH (IfE, IQO) ebenfalls durch kaskadierte Berichterstattung und Absprachen zur Erstellung der Mittelanforderungen, Zwischennachweise und Zwischenberichte.

3

Zahlenmäßiger Nachweis

3.1. Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel wurden im Verlauf des Verbundvorhabens wie folgt eingesetzt.

Personalmittel Kurz nach Vorhabensbeginn kam es zum weltweiten Lockdown; unter diesen Bedingungen waren Neueinstellung an der Universität nicht möglich. Am IQO war es daher nicht möglich, die Stellen umfassend und geeignet zu besetzen. In der Folge waren Umwidmung von Mitteln notwendig, um auf die Anpassungen der eingesetzten Personalressourcen und gleichzeitig auch auf die Herausforderungen durch entstandene Lieferengpässe reagieren zu können. Am IfE und bei der Firma iMAR konnten die Positionen mit existierendem Personal, wie ursprünglich geplant, besetzt werden. Die zentrale Koordinierung des Verbundvorhabens erfolgte am IfE durch einen erfahrenen Post-Doc.

Reisekosten Durch den weltweiten Ausbruch des SARS-Covid II Virus, der im Vorhabensjahr 2020 bis 2021 durch die Pandemiebedingungen zu einem vollständigen Erliegen von Dienstreisen führte, musste das Vorhaben entsprechend an die gegebenen Umstände angepasst werden. Eine Entspannung der Situation ergab sich zum Ende des Vorhabens, wo sich die Anzahl an rein digitalen Konferenzen deutlich reduzierte. Freiwerdende Mittel, aufgrund nicht stattfindender Konferenzen bzw. geänderter Konferenzgebühren, wurden für die Optimierung des Versuchsstandes eingesetzt. Dies erfolgte verstärkt über wissenschaftliche Hilfskräfte.

Verbrauchsmaterial Die Mittel für Verbrauchsmaterial konnten wie geplant eingesetzt werden. Die ursprünglich geplante Position einer Labormiete war nicht im vollen Umfang notwendig, da für die Entwicklung des Systems zum einen Veränderungen am Versuchsstand durchgeführt wurden und zum anderen durch das IfE ein geeignetes Labor bereitgestellt werden konnte. Geringe Umbaumaßnahmen waren hingegen notwendig, um den Arbeitsschutz (Laserschutz) zu gewährleisten.

Investitionskosten bzw. Gerätekosten Investitionsmittel und Sachmittel sind in die Konstruktion des Teststandes und in den Aufbau der Sensoreinheiten geflossen. Die Kosten für Investitionsmaterialien mussten aufgrund der weltweit eingeschränkten Verfügbarkeit und wegen Lieferschwierigkeiten umdisponiert werden. Dies führte zu längeren Lieferzeiten einzelner Produkte und teilweise deutlichen Preisschwankungen der Komponenten. Da die Versuchsgeräte vor Ort in Hannover zusammgebaut wurden, konnten Lieferanten agil gewechselt werden.

Schwierigkeiten ergaben sich insbesondere für die seitens des IQO initiierte Beschaffung der Vakuumkammer, da diese nicht den ursprünglich mit dem Hersteller abgesprochenen Spezifikationen

der Spezialanfertigung entsprach. Hier wurden Nacharbeiten notwendig, die mit zusätzlichen Kosten und erheblichen Verzögerungen verbunden waren.

Die weiteren Investitionsmittel konnten für die vorher beantragten Geräte, teilweise unter Modifikation der Aufbauten, beschafft und zusammengestellt werden.

Die Ergebnisse des Vorhabens konnten auf nationalen und internationalen Konferenzen und in Publikationen dem Fachpublikum zur Verfügung gestellt werden. Hierzu wird auch auf die ausführliche Liste der erfolgten Publikationen und Vorträge verwiesen (siehe Abschnitt 3.6).

3.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Insgesamt stellten diese gemeinschaftlichen Entwicklungen für alle Partner eine erhebliche Steigerung der eigenen Expertise in einer wichtigen Zukunftstechnologie - der Quantentechnologie - dar. Diese sichern den Vorsprung im internationalen Wettbewerb. Innerhalb des Vorhabens wurde ein Versuchsstand konstruiert und in Betrieb genommen. Hierbei handelt es sich um ein Atominterferometer mit einachsiger Beschleunigungsmessung und hohen Datenraten. Es erfolgte eine experimentelle Verifikation von Konzepten zur Aufhebung der Mehrdeutigkeit und Betrieb in dynamischen Umgebungen durch nachträgliche Korrektur. Hierbei kommen Regelschleifen sowie Lageregelung im Zusammenspiel mit herkömmlicher Sensorik zum Einsatz.

Darauf aufbauend wurde als Ergebnis am IQO ein Konzept für eine driftfreie Beschleunigungsmessung entwickelt, das kompatibel ist mit der Aufzeichnung hoher Datenraten in dynamischen Umgebungen. Grundlegend wurde das Konzept von Anfang an kompatibel zu einem Mehrachsensystem ausgelegt, um derartige Weiterentwicklungen in einer Folgephase zu ermöglichen. Die Arbeiten im Folgevorbau 50 NA 2106 (QGyroPlus) führten bereits zu erfolgreichen Erweiterungen. Im Anschluss bietet sich die mittelfristige Perspektive, das Gesamtsystem in einen kompakten, portablen Aufbau für den Betrieb auf relevanten Plattformen zu überführen.

Ergebnisse wurden auf Tagungen, wie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), der *Frontiers of Matter Wave Optics* (FOMO) und der Division of Atomic, Molecular and Optical Physics (DAMOP) präsentiert. Ebenfalls wurden die Konzepte zusammen mit den Kollegen des IfE auf der European Geophysical Union (EGU) und innerhalb der Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE) präsentiert. Im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeiten erfolgte ebenfalls die Publikation in renommierten Fachzeitschriften.

Algorithmen für die Inertialnavigation mit Quantensensoren (sog. Atom-Strap-Down) wurden entworfen und implementiert. Sie wurden in umfangreichen Simulationsstudien getestet, optimiert und validiert sowie auf reale Daten aus vorherigen Experimenten des IQO oder emulierten CAI-Beobachtungen erfolgreich angewandt. Für die Durchführung der Experimente mit Inertialsensoren wurde am IfE auf bewährte Technik (Anregung durch nominelle Kräfte (Schwerkraft)) zurückgegriffen. Für den neu beschafften Hexapod wurde ein Steueralgorithmus entwickelt und CAI-Messungen mittels einer navigation-grade IMU emuliert.

Die erzielten Ergebnisse eigneten sich daher beispielsweise für die Präsentation auf internationalen wissenschaftlichen Symposien wie DGON Inertial Sensors and Systems (ISS) Symposium Gyro Technology, oder IEEE Positioning and Navigation Symposium (PLANS).

3.3. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Ein direkter wirtschaftlicher Erfolg wird für die erste Förderphase noch nicht erwartet. Es sei an dieser Stelle aber ausdrücklich hervorzuheben, dass in der Technologie basierend auf Quantensensorik enormes Zukunftspotential steckt. Dieses Verbundvorhaben hat erstmals eine detaillierte Adaption eines

Atominterferometers zum Quanteninertialsensor durchgeführt und nimmt damit eine Vorreiterrolle ein. Mittelfristig zielt die Initiative auch darauf ab, das Potenzial kosten-effizient zur Verfügung stellen zu können.

Verwertbarkeit am Institut für Erdmessung (IfE) Im Rahmen des Vorhabens konnten die langjährigen Erfahrungen im Bereich der Inertialnavigation vertieft und ausgebaut werden. Zudem konnte die enge Kooperation mit dem Institut für Quantenoptik intensiviert und gefestigt werden und neue Arbeiten mit dem Partner iMAR gestartet werden. Es wurden weitreichende Implementierungen von neuartigen Inertialalgorithmen und Simulationsstrategien durchgeführt. Ebenfalls wurden optimale Kombinationen von Quanteninertialsensoren und klassischen INS zur Lösung in Navigationsalgorithmen entwickelt und umgesetzt. Durch das Vorhaben konnten die entwickelten Algorithmen mit hochgenauer Referenzsensorik (Hexapod) emuliert und verifiziert werden. Damit konnte das IfE seine Stellung im Bereich der Navigationsforschung deutlich ausbauen. Alle Ergebnisse wurden auf einschlägigen Tagungen veröffentlicht.

Verwertbarkeit am Institut für Quantenoptik (IQO) Das IQ konnte seine langjährigen Erfahrungen im Bereich der Quantensensoren zur Beschleunigungs- und Rotationsmessung deutlich ausbauen. Hierzu gehören auch die Entwicklung und Umsetzung kompakter, robuster atom-optischer Experimente. Die experimentellen Ergebnisse wurden und werden durch Erfahrung in der Modellierung von Quantensensoren am IQ gestützt. Bezüglich der Einsatzmöglichkeiten konnte der Kontakt zum Institut für Erdmessung (IfE) intensiviert werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurde die Konstruktion und der Betrieb eines Atominterferometers zur einachsigen Beschleunigungsmessung mit hohen Datenraten und eine experimentelle Verifikation von Konzepten zur Aufhebung der Mehrdeutigkeit durchgeführt. Begleitet wurden diese Arbeiten durch den Einsatz in dynamischen Umgebungen (nachträgliche Korrektur), Entwicklung und Adaption von Regelschleifen bzw. Lageregelung im Zusammenspiel mit einsatzüblicher Sensorik. Konzeptionell wurde das System von Anfang an derart angelegt, dass es kompatibel zu einem Mehrachsensystem ist. Eine Weiterentwicklung ist in der zweiten Phase des Vorhabens (QGYroPlus, FKZ: 50 NA 2106) ermöglicht worden. Weiterhin wird in dem Anschlussvorhaben die Größe auf des Gesamtsystems auf eine kompakte und portable Bauweise übergeführt. Ergebnisse wurden auf Tagungen (z.B. DPG, FOMO, DAMOP, EGU und PQE) präsentiert und in renommierten Fachzeitschriften veröffentlicht (siehe Abschnitt 3.6).

Verwertbarkeit bei iMAR Durch den Projektpartner iMAR ist der Marktzugang gesichert, der im Rahmen des Vorhabens entwickelte Technologiedurchbruch bei entsprechender Eignung und Entwicklung einer Serienreife, die durch die weiterführende Miniaturisierung und Adaption auf mehrachsige Messverfahren im Anschlussvorhaben (50 NA 2106) weiter vorangetrieben wird, einer Verwertung zuführen kann. Da das Vorhaben sehr forschungsnah ist, lassen sich Verwertungsprognosen nur mit einer entsprechenden Unschärfe angeben.

Das Unternehmen konnte seine Expertise im Bereich der hochgenauen Navigation mit neuartigen Sensoren klar ausbauen. Quantensensoren erschließen durch ihre übergeordnete und absolute Präzision ein völlig neues Anwendungsfeld. Als Unternehmen hat iMAR nun die Expertise in dem Bereich ausbauen können, um die avisierte Marktreife eines Einachs-Beschleunigungssensors zu realisieren. Im Anschlussvorhaben (50 NA 2106) wird iMAR ebenfalls für die Umsetzung und Realisierung eines mehrachsigen quantenbasierten Inertialsystems zur Verfügung stehen und seine Expertise einbringen, um das Wissen in der Handhabung dieser Technologie zusammen mit den Verbundpartnern zu erarbeiten und dem Markt zugänglich zu machen.

3.4. Überführung der Geräte in das Verbundvorhaben QGyroPlus

Die Antragssteller beantragen die Überführung der Instrumente und beschafften Investitionsmittel für das fortlaufende Anschlussvorhaben QGyroPlus, welches beim Projektträger unter dem Förderkennzeichen 50 NA 2106 geführt wird. Die Einzelkomponenten, die im aktuellen Vorhaben zu einem Demonstrator zusammengeführt wurden, werden auch im Folgeprojekt eingesetzt und haben damit die beantragten Investitionskosten im Folgeprojekt maßgeblich senken können.

3.5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten

Während des Vorhabens sind keine FuE-Ergebnisse von Dritten auf dem Bereich bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

3.6. Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten

Im Rahmen von QGyro erfolgte eine Vielzahl von Publikationen und wissenschaftlichen Arbeiten, sowohl als Abschlussarbeiten, Vorträgen bzw. Präsentationen als auch Veröffentlichungen in begutachteten Journalen. Diese sind folgend zusammengestellt.

Darüber hinaus erfolgten im Verbund monatliche Treffen zur Koordinierung der Arbeiten statt, die aus dem IfE durch Prof. Schön geleitet wurden. Durch diesen regen Austausch konnten alle Teilnehmer ihren Erfolg zu dem Gesamtergebnis einbringen.

Der Projektträger DLR e.V. nahm ebenfalls an Verbundtreffen teil, mit der Gelegenheit zum Besuch der eingesetzten Laborumgebungen sowie zur Begutachtung der im Vorhaben entwickelten Sensorik.

3.6.1. Begutachtete Veröffentlichungen

Abend, S., B. Allard, A. S. Arnold, T. Ban, L. Barry, B. Battelier, A. Bawamia, Q. Beaufils, S. Bernon, A. Bertoldi, A. Bonnin, P. Bouyer, A. Bresson, O. S. Burrow, B. Canuel, B. Desruelle, I. Drougkakis, R. Forsberg, N. Gaaloul, A. Gauguet, M. Gersemann, P. F. Griffin, H. Heine, V. A. Henderson, W. Herr, S. Kanthak, M. Krutzik, M. D. Lachmann, R. Lammeger, W. Magnes, G. Mileti, M. W. Mitchell, S. Mottini, D. Papazoglou, F. P. Dos Santos, A. Peters, E. M. Rasel, E. Riis, C. Schubert, S. T. Seidel, G. M. Tino, M. Van den Bossche, W. von Klitzing, A. Wicht, M. Witkowski, N. Zahzam und M. Zawada (2023). „Technology roadmap for Cold-Atoms based Quantum Inertial Sensor in Space“. In: *AVS Quantum Sci.* 5.019201. DOI: [10.1116/5.0098119](https://doi.org/10.1116/5.0098119).

Anders, F., A. Idel, P. Feldmann, D. Bondarenko, S. Loriani, K. Lange, J. Peise, M. Gersemann, B. Meyer-Hoppe, S. Abend, N. Gaaloul, C. Schubert, D. Schlippert, L. Santos, E. Rasel und C. Klempt (2021). „Momentum Entanglement for Atom Interferometry“. In: *Physical review letters* 127.14, S. 140402. DOI: [10.1103/PhysRevLett.127.140402](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.140402).

Canuel, B., S. Abend, P. Amaro-Seoane, F. Badaracco, Q. Beaufils, A. Bertoldi, K. Bongs, P. Bouyer, C. Braxmaier, W. Chaibi, N. Christensen, F. Fitzek, G. Flouris, N. Gaaloul, S. Gaffet, C. L. Garrido Alzar, R. Geiger, S. Guellati-Khelifa, K. Hammerer, J. Harms, J. Hinderer, M. Holyński, J. Junca, S. Katsanevas, C. Klempt, C. Kozanitis, M. Krutzik, A. Landragin, I. Lázaro Roche, B. Leykauf, Y. H. Lien, S. Loriani, S. Merlet, M. Merzougui, M. Nofrarias, P. Papadakos, F. Pereira Dos Santos, A. Peters, D. Plexousakis, M. Prevedelli, E. M. Rasel, Y. Rogister, S. Rosat, A. Roura, D. O. Sabulsky, V. Schkolnik, D. Schlippert, C. Schubert, L. Sidorenkov, J. N. Siemß, C. F. Sopena, F. Sorrentino, C. Struckmann, G. M. Tino, G. Tsagkatakis, A. Viceré, W. Von Klitzing, L. Woerner und X. Zou (2020). „ELGAR - A European Laboratory for Gravitation and Atom-interferometric Research“. In: *Classical and Quantum Gravity* 37.22. DOI: [10.1088/1361-6382/aba80e](https://doi.org/10.1088/1361-6382/aba80e). arXiv: [1911.03701](https://arxiv.org/abs/1911.03701).

- Frye, K., S. Abend, W. Bartosch, A. Bawamia, D. Becker, H. Blume, C. Braxmaier, S.-W. W. Chiow, M. A. Efremov, W. Ertmer, P. Fierlinger, N. Gaaloul, J. Grosse, C. Grzeschik, O. Hellmig, V. A. Henderson, W. Herr, U. Israelsson, J. Kohel, M. Krutzik, C. Kürbis, C. Lämmerzahl, M. List, D. Lüdtke, N. Lundblad, J. P. Marburger, M. Meister, M. Mihm, H. Müller, H. Müntinga, T. Oberschulte, A. Papakonstantinou, J. Perovsk, A. Peters, A. Prat, E. M. Rasel, A. Roura, W. P. Schleich, C. Schubert, S. T. Seidel, J. Sommer, C. Spindeldreier, D. Stamper-Kurn, B. K. Stuhl, M. Warner, T. Wendrich, A. Wenzlawski, A. Wicht, P. Windpassinger, N. Yu, L. Wörner, T. Franz, N. Gaaloul, J. Grosse, C. Grzeschik, O. Hellmig, V. A. Henderson, W. Herr, U. Israelsson, J. Kohel, M. Krutzik, C. Kürbis, C. Lämmerzahl, M. List, D. Lüdtke, N. Lundblad, J. P. Marburger, M. Meister, M. Mihm, H. Müller, H. Müntinga, A. M. Nepal, T. Oberschulte, A. Papakonstantinou, J. Perovsk, A. Peters, A. Prat, E. M. Rasel, A. Roura, M. Sbroscia, W. P. Schleich, C. Schubert, S. T. Seidel, J. Sommer, C. Spindeldreier, D. Stamper-Kurn, B. K. Stuhl, M. Warner, T. Wendrich, A. Wenzlawski, A. Wicht, P. Windpassinger, N. Yu und L. Wörner (Dez. 2021). „The Bose-Einstein Condensate and Cold Atom Laboratory“. In: *EPJ Quantum Technology* 8.1. doi: [10.1140/epjqt/s40507-020-00090-8](https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-020-00090-8). arXiv: [1912.04849](https://arxiv.org/abs/1912.04849).
- Gebbe, M., J.-N. Siemß, M. Gersemann, H. Müntinga, S. Herrmann, C. Lämmerzahl, H. Ahlers, N. Gaaloul, C. Schubert, K. Hammerer, S. Abend und E. M. Rasel (Dez. 2021a). „Twin-lattice atom interferometry“. In: *Nature Communications* 12.1, S. 2544. doi: [10.1038/s41467-021-22823-8](https://doi.org/10.1038/s41467-021-22823-8). arXiv: [1907.08416](https://arxiv.org/abs/1907.08416).
- Gersemann, M., M. Gebbe, S. Abend, C. Schubert und E. M. Rasel (2020a). „Differential interferometry using a Bose-Einstein condensate“. In: *European Physical Journal D* 74.10, S. 203. doi: [10.1140/epjd/e2020-10417-8](https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-10417-8).
- Hartmann, S., J. Jenewein, E. Giese, S. Abend, A. Roura, E. M. Rasel und W. P. Schleich (Mai 2020). „Regimes of atomic diffraction: Raman versus Bragg diffraction in retroreflective geometries“. In: *Phys. Rev. A* 101 (5), S. 053610. doi: [10.1103/PhysRevA.101.053610](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.053610).
- Heine, N., J. Matthias, M. Sahelgozin, W. Herr, S. Abend, L. Timmen, J. Müller und E. M. Rasel (2020). „A transportable quantum gravimeter employing delta-kick collimated Bose-Einstein condensates“. In: *European Physical Journal D* 74.8, S. 174. doi: [10.1140/epjd/e2020-10120-x](https://doi.org/10.1140/epjd/e2020-10120-x).
- Hensel, T., S. Loriani, C. Schubert, F. Fitzek, S. Abend, H. Ahlers, J. Siemß und K. Hammerer (2021). „Inertial sensing with quantum gases : a comparative performance study of condensed versus thermal sources for atom interferometry“. In: *The European Physical Journal D* 75.3, S. 108. doi: [10.1140/epjd/s10053-021-00069-9](https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00069-9). URL: <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00069-9>.
- HosseiniArani, A., B. Tennstedt, M. Schilling, A. Knabe, H. Wu, S. Schön und J. Müller (2022b). „Kalman-Filter Based Hybridization of Classic and Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions“. In: International Association of Geodesy Symposia. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–11. doi: [10.1007/1345_2022_172](https://doi.org/10.1007/1345_2022_172).
- Kanthak, S., M. Gebbe, M. Gersemann, S. Abend, E. M. Rasel und M. Krutzik (2021). „Time-domain optics for atomic quantum matter“. In: *New Journal of Physics* 23. doi: [10.1088/1367-2630/ac1285](https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac1285).
- Richardson, L. L., A. Rajagopalan, H. Albers, C. Meiners, D. Nath, C. Schubert, D. Tell, É. Wodey, S. Abend, M. Gersemann, W. Ertmer, E. M. Rasel, D. Schlippert, M. Mehmet, L. Kumanchik, L. Colmenero, R. Spannagel, C. Braxmaier und F. Guzmán (2020b). „Optomechanical resonator-enhanced atom interferometry“. In: *Communications Physics* 3.1. doi: [10.1038/s42005-020-00473-4](https://doi.org/10.1038/s42005-020-00473-4).
- Schubert, C., S. Abend, M. Gersemann, M. Gebbe, D. Schlippert, P. Berg und E. M. Rasel (Aug. 2021b). „Multi-loop atomic Sagnac interferometry“. In: *Scientific Reports* 11.1. doi: [10.1038/s41598-021-95334-7](https://doi.org/10.1038/s41598-021-95334-7).
- Siemß, J. N., F. Fitzek, S. Abend, E. M. Rasel, N. Gaaloul und K. Hammerer (2020). „Analytic theory for Bragg atom interferometry based on the adiabatic theorem“. In: *Physical Review A* 102.3, S. 1–26. doi: [10.1103/PhysRevA.102.033709](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.033709). arXiv: [2002.04588](https://arxiv.org/abs/2002.04588).
- Tennstedt, B., A. Rajagopalan, N. Weddig, S. Abend, S. Schön und E. M. Rasel (Dez. 2023). „Atom Strapdown: Towards Integrated Quantum Inertial Navigation Systems“. In: *Journal of Navigation* 70.4. doi: [10.33012/navi.604](https://doi.org/10.33012/navi.604).
- Tennstedt, B. und S. Schön (Apr. 2020). „Dedicated Calculation Strategy for Atom Interferometry Sensors in Inertial Navigation“. In: *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, S. 755–764. doi: [10.1109/PLANS46316.2020.9110142](https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9110142).
- Tennstedt, B., N. Weddig und S. Schön (Dez. 2021b). „Improved Inertial Navigation With Cold Atom Interferometry“. In: *Gyroscopy and Navigation* 12.4. doi: [10.1134/s207510872104009x](https://doi.org/10.1134/s207510872104009x).
- Tennstedt, B., N. Weddig, S. Schön, A. Rajagopalan, S. Abend und E. Rasel (Okt. 2022b). „Atom Strapdown: High Rate Phase Shift Calculation for Atom Interferometer Inertial Sensors“. In: *ION*

GNSS+, *The International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*. Institute of Navigation, S. 1377–1391. doi: [10.33012/2022.18321](https://doi.org/10.33012/2022.18321).

3.6.2. Nicht begutachtete Veröffentlichungen

- Tennstedt, B. und S. Schön (2021b). „Integration of atom interferometers and inertial measurement units to improve navigation performance“. In: *28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 31.05.–02.06.2021, St. Petersburg, Russia. Piscataway, NJ: IEEE. doi: [10.23919/ICINS43216.2021.9470809](https://doi.org/10.23919/ICINS43216.2021.9470809).
- Tennstedt, B., C. Schubert, D. Schlippert, S. Schön und E. M. Rasel (Sep. 2019). „Impact of Uncertainties in Atom Interferometry on Strapdown Navigation Solutions“. In: *2019 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. IEEE. doi: [10.1109/iss46986.2019.8943632](https://doi.org/10.1109/iss46986.2019.8943632).
- Weddig, N., B. Tennstedt und S. Schön (2021). „Performance evaluation of a three-dimensional cold atom interferometer based inertial navigation system“. In: *2021 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, S. 1–20. doi: [10.1109/ISS52949.2021.9619776](https://doi.org/10.1109/ISS52949.2021.9619776).
- Weddig, N., B. Tennstedt und S. Schön (2022). „Challenges for a hybrid CAI-based INS due to trajectory dynamics derived from real inertial datasets“. In: *2022 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. IEEE, S. 1–20. doi: [10.1109/ISS55898.2022.9926311](https://doi.org/10.1109/ISS55898.2022.9926311).

3.6.3. Präsentationen und Poster

- Abend, S. (2020a). „Twin-lattice interferometry with thousands of photon recoils“. In: *QF General Assembly 2020*.
- Abend, S. (2020b). „Twin-lattice interferometry with thousands of photon recoils“. In: *DAMOP 2020 conference*.
- Abend, S. (2021). „TG Quantum Navigation“. In: *QF TG meeting*.
- Abend, S. (2022a). „BEC interferometry using multi-photon atom optics for precise determination of rotations“. In: *QF Days 2022*.
- Abend, S. (2022b). „Inertial sensing with cold atoms - gravity and rotation“. In: *Lecture Week 2 Quantum Frontiers*.
- Abend, S., C. Schubert, D. Schlippert und E. M. Rasel (2021b). „Quantennavigation mit Mehr Achsen Atominterferometrie und Hybridsensorik“. In: *Quantum Technology for Space Days , DLR Workshop*.
- Abidi, M., B. Tennstedt, N. Weddig, Y. Zou, P. Barbey, M. Gersemann, A. Rajagopalan, C. Schubert, D. Schlippert, S. Schön, S. Abend und E. M. Rasel (2022a). „Quantum Hybridized Accelerometer for Inertial Navigation“. In: *EXC2123 Quantum Frontiers General Assembly*. EXC2123 Quantum Frontiers General Assembly, Jun. 24, Hannover, Germany.
- Abidi, M. (2021a). „QGYRO Project Introduction“. In: *QF TG meeting*.
- Abidi, M. (2021b). „Quantum Inertial Navigation System“. In: *FOMO conference 2021, Online*. online.
- Abidi, M. (2022). „Quantum Hybridized accelerometer for Inertial Navigation“. In: *DPG SAMOP 2022*. online.
- Barbey, P. (2022). „QGYRO“. In: *DQmat ARTIQ user meeting*.
- HosseiniArani, A., B. Tennstedt, M. Schilling, A. Knabe, Q. Beaufils, M. Romeshkani, H. Wu, A. Kupriyanov, F. Pereira Dos Santos, S. Schön und J. Müller (2022a). „Improved Modeling for Hybrid Accelerometers Onboard Future Satellite Gravity Missions“. In: *44th COSPAR Scientific Assembly, July 16-24, Athens, Greece*. URL: <https://elib.dlr.de/192268/> (besucht am 23.01.2023).
- Rajagopalan, A. (2020). „Hybridized quantum inertial sensor for dynamic environments“. In: *IMAR Navigation GmbH*.
- Rajagopalan, A. (2021a). „Hybridization and new capabilities for OMIS production“. In: *QGYRO meeting*.
- Rajagopalan, A. (2021b). „Hybridizing an atom interferometer with an opto-mechanical resonator“. In: *Quarterly PhD student and PostDoc meeting*.
- Rajagopalan, A. (2022). „Classical sensor hybridization for quantum sensors“. In: *QGYRO/QGYRO+ DLR meeting*.
- Schön, S. (2021). „Bausteine für die Navigation mit Quantensensorik“. In: *Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE2021-I, March. 12, Vortrag*.

- Schön, S. (2022a). „GNSS and Quantum Sensors: Concepts, Experiments and Perspectives for Improved Navigation“. In: Institut für Kommunikation und Navigation DLR Oberpfaffenhofen, 04.05.2022, Vortrag.
- Schön, S. (2022b). „Messen wir zukünftig Höhen mit einer Uhr? – Möglichkeiten und Herausforderungen der Anwendung von Quantensensorik in Geodäsie und Navigation“. In: Geodätisches Kolloquium TU Darmstadt, 01.12.2022, Vortrag.
- Schön, S. (2022c). „Quantentechnologie in der Erdbeobachtung und Navigation“. In: DLR Wissenschaftsforum Bonn, 27.9.2022, Vortrag.
- Tennstedt, B. (2021a). „Atom Interferometry Sensors in High-Rate Navigation Cases“. In: Quantum Frontiers Quarterly PhD & PostDocs Meetings, Jan. 14, Vortrag. (online).
- Tennstedt, B. (2021b). „High-Rate Navigation with Atom Interferometers“. In: Frontiers of Matter Wave Optics Summer School 2021, Jul. 1, Vortrag. (online).
- Tennstedt, B. (2022). „QGYro - Quantensensoren für die Navigation“. In: Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen STE2022-I, Jun. 8-10, Vortrag, Wuppertal, Germany.
- Tennstedt, B., A. Rajagopalan, E. M. Rasel und S. Schön (2022a). „An Alternative Hybridisation Scheme for Atom Interferometers used in Navigation“. In: Frontiers of Matter-Wave Optics (FOMO), Sept 19-23. Trieste, Italy.
- Tennstedt, B. und S. Schön (2019a). „From inertial sensing to inertial navigation - a comparison of CAI to conventional INS“. In: *Quantum Metrology Beyond the Standard Model, July 11-14, Hannover, Germany*. doi: [10.13140/RG.2.2.25626.90565](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25626.90565).
- Tennstedt, B. und S. Schön (2019b). „Some practical considerations of quantum inertial sensors in navigation“. In: *DPG Fall Meeting, September 23-27, Freiburg, Germany*. doi: [10.13140/RG.2.2.16165.86247](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16165.86247).
- Tennstedt, B., N. Weddig und S. Schön (2021a). „A hybrid CAI/IMU solution for higher navigation performance“. In: *EGU General Assembly, April 19-30*. (online). doi: [10.5194/egusphere-egu21-9776](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9776).
- Zou, Y. (2022). „Quantum navigation with multi-axis atomic interferometry and hybrid sensing“. In: *EGU General Assembly Vienna*.

3.6.4. Abschlussarbeiten

- Weddig, N. (2021). *Modellierung eines Quantensensors für Navigationsanwendungen*. Masterarbeit. Leibniz Universität Hannover.

4

Zusammenfassung und Ausblick

Die Inertialnavigation ist das Rückgrat für hochgenaue Trajektorienbestimmung, die durch Integration der gemessenen Beschleunigungen und Drehraten in allen drei Raumrichtungen berechnet wird. Kritisch ist dabei die Verstärkung der Einflüsse von Sensorfehlern und Messrauschen, die zu einem mindestens mit der Zeit quadratisch anwachsenden Positionsfehler führt. Atominterferometer liefern vielversprechende Möglichkeiten zur Erfassung präziser Beschleunigungsmessungen und Drehraten und damit zur Verbesserung der Inertialnavigation.

Dieses Verbesserungspotenzial wurde im Vorhaben QGyro untersucht, wobei zwei Hauptausrichtungen im Vordergrund standen: (i) Grundlagenwissen über den Einsatz von Quantensensoren in der Navigation zu erwerben und (ii) die Entwicklung von Quantensensoren für diesen Einsatz voranzubringen. Der Erwerb von Grundlagenwissen ist mit konzeptionellen und Simulationsarbeiten verbunden. Wesentliches Ergebnis sind die hier entwickelten Algorithmen, die bereits in Testmessungen zeigen, dass sich die Driften klassischer Sensoren durch eine Koppelung mit Quantensensoren verringern lassen.

Ausgangspunkt für die **Simulationsstudien** sind Auswertungen von Testmessungen, aus denen sich eine Varianz der Beobachtung von $\sigma_p^2 \approx 0.001$ [-] pro Schuss ergab. Diese kann als Grundlage für verschiedene Sensor-Architekturen verstanden werden und skaliert entsprechend der Sensorparameter, Flugzeit und Auslegung des Sensors als Beschleunigungs- oder Drehratenmesser. Langperiodische Driften sind erst bei Zeiten $> 10^4$ Sekunden zu erwarten, und fallen bei der terrestrischen Navigation nicht ins Gewicht. Bei der Hybridisierung und dem Filterentwurf wurde das ursprüngliche Problem der Fringe-Mehrdeutigkeit der Atominterferometermessung aufgrund von zu großen Dynamikschwankungen gelöst. Eine Begrenzung der möglichen Atom-Flugzeiten und des Skalenfaktors besteht nun durch die Unsicherheiten der konventionellen IMU, die für die Hybridisierung verwendet wird, was den Einsatzbereich von Atominterferometrie einerseits stark verbessert, andererseits aber die großen Skalenfaktoren wie sie z.B. in Tab. 2.2 gezeigt wurden, in dynamischen Anwendungen restringiert.

In Abbildung 4.1 ist der horizontale Positionsfehler eines Anwendungsfalles in der terrestrischen Navigation in logarithmischer Skalierung dargestellt. Verschiedene Parameter wurden dabei angesetzt.

IMU stellt zum Vergleich eine State-of-the-Art navigation-grade IMU mit Servo-Beschleunigungsmessern und Ringlaser-Kreiseln dar.

CAI ATLAS ist ein CAI mit Parametern aus dem ATLAS Experiment, wobei für die Gyro-Messung zwei gegenläufige Interferometer und eine Driftgeschwindigkeit von 2,8 m/s angesetzt wurden.

CAI BEC stellt die Navigations-Mehrachs-Konfiguration aus Tab. 2.1 dar.

Multiloop stellt die Konfiguration aus Tab. 2.2 für eine Drehraten-Sensitivität von $5,5 \cdot 10^{-12}$ rad/s/Hz^{1/2} dar.

Man beachte, dass die Multi-Loop Konfiguration als Demonstrator für die hohe Genauigkeit bei statischen Messungen und nicht für den dynamischen Einsatz gedacht ist. Weiterhin existieren aktuell keine konventionellen Sensoren, die eine Hybridisierung mit einem derart hohen CAI-Skalenfaktor auch für zukünftige mobile Einsätze ermöglichen würden. Der Sensor dient demnach nur hypothetisch zu Vergleichszwecken.

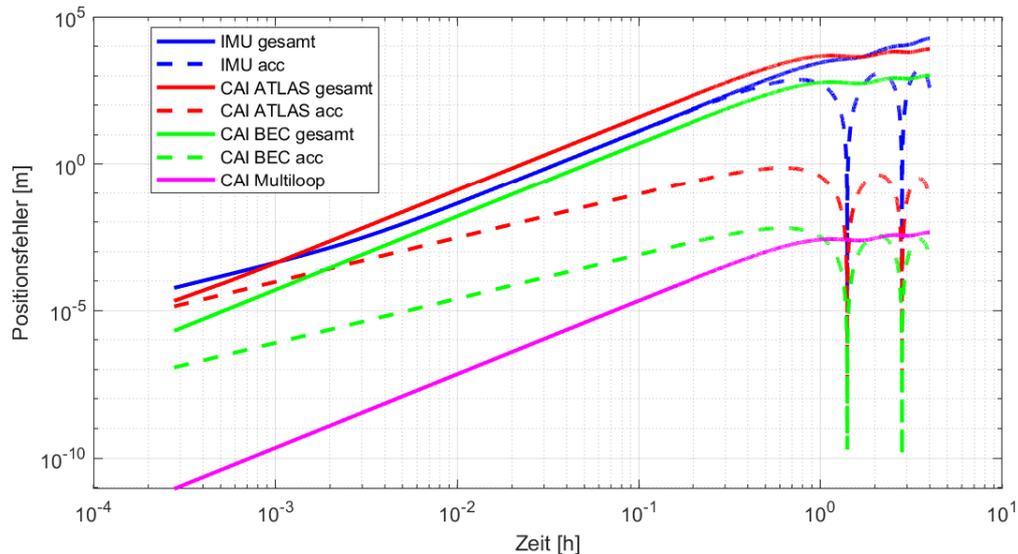


Abbildung 4.1: Ausblick auf die Performance von verschiedenen CAI-Architekturen im terrestrischen System. Dargestellt ist der horizontale Positionsfehler in logarithmischer Skalierung. Die gestrichelten Linien stellen den Anteil der Beschleunigungsmessung am Gesamtfehler (durchgezogene Linien) dar, welcher im Erdsystem durch die Schuler-Oszillationen begrenzt ist.

Die Positionsfehler zu verschiedenen markanten Zeitpunkten für das CAI in Mehrachs-Konfiguration und eine konventionelle navigation-grade IMU zum Vergleich sind nochmals in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Horizontaler Positionsfehler von CAI in Mehrachs-Konfiguration und Vergleichs-IMU

Sensor	Δx nach 10 min.	Δx nach 20 min.	Δx nach 1 h
IMU (gesamt)	48 m	266 m	2760 m
CAI (gesamt)	17 m	91 m	584 m
IMU (acc)	46 m	255 m	529 m
CAI (acc)	< 1 m	< 1 m	< 1 m

Es ist klar zu sehen, dass der Einfluss der Beschleunigungsmessungen des CAI auf den Positionsfehler sehr viel geringer ist als bei der konventionellen IMU. Für schienengebundene Systeme oder ähnliche Anwendungen mit referenzierter Orientierung lassen sich die Vorteile des CAI daher z.B. vollständig ausnutzen. Auf lange Sicht dominiert im terrestrischen Referenzsystem bei freier inertialer Navigation der Einfluss der Gyroskop-Unsicherheiten. Hier kann vor allem in Zeiträumen über einer Stunde das Atominterferometer durch die Langzeitstabilität den Abstand zur IMU stark ausbauen.

Über die Simulationsstudien hinaus wurden **Konzepte für neue Generationen von Quantensensoren** an sich entwickelt und veröffentlicht. Auf der einen Seite wurde ein Konzept für ein hochgenaues Gyroskop vorgestellt, welches auf den Methoden unserer Grundlagenforschung basiert, namentlich Zwillingsgitter Atominterferometrie mit delta-kick kollimierten Bose-Einstein Kondensaten. Dieses Konzept soll nun im geänderten Demonstrator in QGyroPlus umgesetzt werden. Zum anderen gab es zu Beginn des Vorhabens QGyro keinen vollständigen Ansatz für einen Sechs-Achsen-Sensor. Ein

Konzept, welches auf differentiellen Mach-Zehnder Atominterferometern basiert, wurde erarbeitet und wird ebenfalls im Rahmen von QGyroPlus umgesetzt. Diese Neuentwicklungen wären ohne die Arbeit in QGyro so nicht möglich und haben die Grundlage für die nächste Generation von Quantensensoren gelegt. Die Simulationen oben zeigen, dass insbesondere der Gyroskop-Fehler die Positionsfehler dominieren. Es bietet sich also an, zukünftig vor allem Augenmerk auf diese Entwicklung zu legen und die Quantengyroskope voranzubringen.

Die zweite Hauptausrichtung des Vorhabens zielte auf die **praktische Entwicklung von Quantensensoren**. Dort wurde der Ansatz gewählt, einen Teststand basierend auf kommerziellen Komponenten zu bauen, um eine Einachsenbeschleunigungsmessung zu realisieren, aus der sich viele Eigenschaften von Quantensensoren in dynamischen Umgebungen studieren lassen, aber nicht die gleiche Komplexität verlangt, die für eine komplette Neuentwicklung notwendig ist. Das hat zwei Vorteile: zum einen lässt sich so das Potenzial für zukünftige Kommerzialisierung erkennen. Zum anderen konnten maßgebliche Erkenntnisse nicht nur über die Sensorköpfe gewonnen werden, sondern auch über die Peripherie, also Lasersysteme, Kontrollsysteme und weitere Elektronik. Auch wenn die Messungen in QGyro in einem Laborsystem durchgeführt werden mussten, konnten maßgebliche Fortschritte in der ganzheitlichen Entwicklung erzielt werden. So wurden verschiedene Konzepte für Lasersysteme und Kontrollsysteme untersucht und die vielversprechendsten Konzepte für die weitere Entwicklung ausgewählt .

Literatur

- Abend, S., M. Gebbe, M. Gersemann, H. Ahlers, H. Müntinga, E. Giese, N. Gaaloul, C. Schubert, C. Lämmerzahl, W. Ertmer, W.-P. Schleich und E. M. Rasel (Nov. 2016). „Atom-Chip Fountain Gravimeter“. In: *Physical Review Letters* 117.20, S. 203003. DOI: [10.1103/physrevlett.117.203003](https://doi.org/10.1103/physrevlett.117.203003).
- AOSense (2017). URL: <http://www.aosense.com>.
- Barrett, B., P.-A. Gominet, E. Cantin, L. Antoni-Micollier, A. Bertoldi, B. Battelier, P. Bouyer, J. Lautier und A. Landragin (2014). „Mobile and remote inertial sensing with atom interferometers“. In: *Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi* 188, S. 493–555. DOI: [10.3254/978-1-61499-448-0-493](https://doi.org/10.3254/978-1-61499-448-0-493).
- Barrett, B., P. Cheiney, B. Battelier, F. Napolitano und P. Bouyer (2019). „Multi-Dimensional Atom Optics and Interferometry“. In: DOI: [10.48550/arXiv.1901.02214](https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.02214).
- Battelier, B., B. Barrett, L. Fouché, L. Chichet, L. Antoni-Micollier, H. Porte, F. Napolitano, J. Lautier, A. Landragin und P. Bouyer (2016). „Development of compact cold-atom sensors for inertial navigation“. In: DOI: [10.48550/arXiv.1605.02454](https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.02454).
- Becker, D., M. D. Lachmann, S. T. Seidel, H. Ahlers, A. N. Dinkelaker, J. Grosse, O. Hellmig, H. Müntinga, V. Schkolnik, T. Wendrich, A. Wenzlawski, B. Weps, R. Corgier, T. Franz, N. Gaaloul, W. Herr, D. Lüdtke, M. Popp, S. Amri, H. Duncker, M. Erbe, A. Kohfeldt, A. Kubelka-Lange, C. Braxmaier, E. Charron, W. Ertmer, M. Krutzik, C. Lämmerzahl, A. Peters, W. P. Schleich, K. Sengstock, R. Walser, A. Wicht, P. Windpassinger und E. M. Rasel (2018). „Space-borne Bose-Einstein condensation for precision interferometry“. In: *Nature* 562.7727, S. 391–395. DOI: [10.1038/s41586-018-0605-1](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0605-1).
- Benkler, E., C. Lisdat und U. Sterr (2015). „On the relation between uncertainties of weighted frequency averages and the various types of Allan deviations“. In: *Metrologia* 52.4, S. 565–574. DOI: [10.1088/0026-1394/52/4/565](https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/4/565).
- Berg, P., S. Abend, G. Tackmann, C. Schubert, E. Giese, W. P. Schleich, F. A. Narducci, W. Ertmer und E. M. Rasel (2015). „Composite-light-pulse technique for high-precision atom interferometry“. In: *Physical review letters* 114.6, S. 063002. DOI: [10.1103/physrevlett.114.063002](https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.063002).
- Bidel, Y., N. Zahzam, C. Blanchard, A. Bonnin, M. Cadoret, A. Bresson, D. Rouxel und M. F. Lequentrec-Lalancette (2018). „Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry“. In: *Nature communications* 9.1, S. 627. DOI: [10.1038/s41467-018-03040-2](https://doi.org/10.1038/s41467-018-03040-2).
- Bochkati, M., S. Schön, D. Schlippert, C. Schubert und E. M. Rasel (2017). „Could cold atom interferometry sensors be the future inertial sensors? — First simulation results“. In: *2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, S. 1–20. DOI: [10.1109/InertialSensors.2017.8171500](https://doi.org/10.1109/InertialSensors.2017.8171500).
- Bongs, K., R. Launay und M. A. Kasevich (2006). „High-order inertial phase shifts for time-domain atom interferometers“. In: *Applied Physics B* 84.4, S. 599–602. DOI: [10.1007/s00340-006-2397-5](https://doi.org/10.1007/s00340-006-2397-5).
- Bonnin, A., C. Diboune, N. Zahzam, Y. Bidel, M. Cadoret und A. Bresson (2018). „New concepts of inertial measurements with multi-species atom interferometry“. In: *Applied Physics B* 124.9. DOI: [10.1007/s00340-018-7051-5](https://doi.org/10.1007/s00340-018-7051-5).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg. (2018). *Quantentechnologien - von den Grundlagen zum Markt Rahmenprogramm der Bundesregierung: HighTech Strategie2025 - Rahmenprogramm der Bundesregierung*. Bonn. URL: <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Rahmenprogram-Bundesregierung-Quantentechnologie-2018-bf-C1.pdf> (besucht am 25. 01. 2023).
- Canciani, A. (2012). *Integration of Cold Atom Interferometry INS with Other Sensors*. Bd. ADA558235. Air Force Inst. of Tech. Wright - Patterson AFB OH Graduate School of engineering and Management. Fort Belvoir: Air Force Inst. of Tech. Wright - Patterson AFB OH Graduate School of engineering and Management. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA558235> (besucht am 25. 01. 2023).
- Canuel, B., F. Leduc, D. Holleville, A. Gauguier, J. Fils, A. Viridis, A. Clairon, N. Dimarcq, C. J. Bordé, A. Landragin und P. Bouyer (2006a). „Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry“. In: *Physical review letters* 97.1, S. 010402. DOI: [10.1103/PhysRevLett.97.010402](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.010402).

- Chen, Y.-J., A. Hansen, G. W. Hoth, E. Ivanov, B. Pelle, J. Kitching und E. A. Donley (2018). „Multi-axis atom interferometer gyroscope with a single source of atoms“. In: doi: [10.48550/arXiv.1812.00106](https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.00106).
- Chichet, L. (2017). *Interférométrie atomique embarquée double espèce, 87Rb et 39K, appliqué au test du principe d'équivalence faible et à la navigation inertielle*. Dissertation. URL: <https://theses.hal.science/tel-01717235v1> (besucht am 25. 01. 2023).
- Dutta, I., D. Savoie, B. Fang, B. Venon, C. L. G. Alzar, R. Geiger und A. Landragin (2016). „Continuous Cold-atom Inertial Sensor with 1 nrad.s⁻¹ Rotation Stability“. In: doi: [10.48550/arXiv.1604.00940](https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.00940).
- Geiger, R. (2011). *Senseur inertielle à ondes de matière aéropporté*. Dissertation. Paris: Univ Paris Sud. URL: <https://theses.hal.science/tel-00651016/fr/>.
- iXAtom (2017). URL: <https://www.coldatomsbordeaux.org/ixatom> (besucht am 25. 01. 2023).
- Jekeli, C. (2005). „Navigation Error Analysis of Atom Interferometer Inertial Sensor“. In: *Navigation* 52.1, S. 1–14. doi: [10.1002/j.2161-4296.2005.tb01726.x](https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2005.tb01726.x).
- Kersten, T., L. Ren und S. Schön (2018). „A Virtual Receiver Concept for Continuous GNSS based Navigation of Inland Vessels“. In: *Proceedings of 9th Navigation Conference (Navitec), Dec. 5-7, ESA-ESTEC*. Hrsg. von ESA. Noordwijk, The Netherlands: ESA-Estec, S. 1–8. doi: [10.15488/4142](https://doi.org/10.15488/4142).
- Krawinkel, T. (2018). *Improved GNSS navigation with chip-scale atomic clocks*. Dissertation. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. doi: [10.15488/4684](https://doi.org/10.15488/4684). URL: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/4726>.
- Krawinkel, T., A. Jain und S. Schön (2021). *Verbesserte Positionierung und Navigation durch Uhrmodellierung: Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben 50NA1705*. (Besucht am 27. 01. 2023).
- Krawinkel, T. und S. Schön (2017). *Verbesserte Positionierung und Navigation durch Uhrmodellierung: Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben 50NA1321*. doi: [10.2314/GBV:889760632](https://doi.org/10.2314/GBV:889760632). URL: <https://doi.org/10.2314/GBV:889760632> (besucht am 27. 01. 2023).
- Kube, F., C. Bischof, P. Alpers, C. Wallat und S. Schön (2018). „A virtual receiver concept and its application to curved aircraft-landing procedures and advanced LEO positioning“. In: *GPS Solutions* 22.2. doi: [10.1007/s10291-018-0709-y](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0709-y).
- Kube, F., S. Schön und T. Feuerle (2012). „GNSS-based curved landing approaches with a virtual receiver“. In: *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*. IEEE, S. 188–196. doi: [10.1109/PLANS.2012.6236880](https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236880).
- Ménoret, V., P. Vermeulen, N. Le Moigne, S. Bonvalot, P. Bouyer, A. Landragin und B. Desruelle (2018). „Gravity measurements below 10⁻⁹ g with a transportable absolute quantum gravimeter“. In: *Scientific reports* 8.1, S. 12300. doi: [10.1038/s41598-018-30608-1](https://doi.org/10.1038/s41598-018-30608-1).
- Noureddin, A., T. B. Karamat und J. Georgy, Hrsg. (2013). *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: [10.1007/978-3-642-30466-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30466-8).
- QUTEGA (2017). *Webseite*. Hrsg. von BMBF. URL: <https://www.quantentechnologien.de> (besucht am 25. 01. 2023).
- Rakholia, A. V., H. J. McGuinness und G. W. Biedermann (2014b). *Dual-axis, high data-rate atom interferometer via cold ensemble exchange*. doi: [10.48550/arXiv.1407.3847](https://doi.org/10.48550/arXiv.1407.3847).
- Richardson, L. L., A. Rajagopalan, H. Albers, C. Meiners, D. Nath, C. Schubert, D. Tell, É. Wodey, S. Abend, M. Gersemann, W. Ertmer, E. M. Rasel, D. Schlippert, M. Mehmet, L. Kumanchik, L. Colmenero, R. Spannagel, C. Braxmaier und F. Guzmán (2020b). „Optomechanical resonator-enhanced atom interferometry“. In: *Communications Physics* 3.1. doi: [10.1038/s42005-020-00473-4](https://doi.org/10.1038/s42005-020-00473-4).
- Savoie, D., M. Altorio, B. Fang, L. A. Sidorenkov, R. Geiger und A. Landragin (2018a). „Interleaved Atom Interferometry for High Sensitivity Inertial Measurements“. In: doi: [10.48550/arXiv.1808.10801](https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.10801).
- Schlippert, D., J. Hartwig, H. Albers, L. L. Richardson, C. Schubert, A. Roura, W. P. Schleich, W. Ertmer und E. M. Rasel (2014). „Quantum Test of the Universality of Free Fall“. In: doi: [10.48550/arXiv.1406.4979](https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.4979).
- Tennstedt, B. und S. Schön (2021a). *Entwicklung und Test einer für Quantensensoren adäquaten Berechnungsstrategie für die Inertialnavigation: Schlussbericht zum Vorhaben 50NA1805*. doi: [10.2314/KXP:1780396740](https://doi.org/10.2314/KXP:1780396740). URL: <https://doi.org/10.2314/KXP:1780396740>.
- VDI (2017). *Förderung von Quantentechnologien: Positionspapier der deutschen Industrie*. Hrsg. von VDI.
- Willis, K. M. (2014). *Signal Processing in Cold Atom Interferometry-Based INS*. Bd. ADA611347. Air Force Inst. of Tech. Wright - Patterson AFB OH Graduate School of engineering and Management. Fort Belvoir: Air Force Inst. of Tech. Wright - Patterson AFB OH Graduate School of engineering and Management. URL: <https://scholar.afit.edu/etd/636> (besucht am 25. 01. 2023).