



QUANTUS – V – Fallturm

Humboldt-Universität zu Berlin

Abschlussbericht zum Vorhaben

**Untersuchung der Eigenschaften von Bose-Einstein-Kondensaten unter
Schwereelosigkeit und Entwicklung von Methoden für die Atominterferometrie –
Teilprojekt HUB**

Erstellt von:

Julia Pahl, Simon Kanthak und Markus Krutzik
in Zusammenarbeit mit:

Dorthe Leopoldt, Sven Herrmann, Sven Abend, Matthias Gersemann, André Wenzlawski und
Ernst M. Rasel

Projektpartner:

Ernst M. Rasel, W. Ertmer, Institut für Quantenoptik, Universität Hannover (Koordination)
Patrick Windpassinger, Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Sven Herrmann, Claus Lämmerzahl, ZARM/Universität Bremen
Markus Krutzik, Jointlab IQS, Humboldt-Universität, Berlin
Wolfgang P. Schleich, Institut für Quantenphysik, Universität Ulm
Reinhold Walser, Institut für Angewandte Physik, TU Darmstadt

August 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.3.1	QUANTUS-1	4
1.3.2	QUANTUS-2	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2	Ausführliche Darstellung	10
2.1	Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens	10
2.2	Zahlenmäßiger Nachweis	47
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	47
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	47
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten	47
2.6	Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten	48
2.6.1	Veröffentlichungen	48
2.6.2	Abschlussarbeiten	49
2.6.3	Geplante Veröffentlichungen	49

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Präzisionsmessungen sind Wegbereiter für fundamentale Durchbrüche in der Physik. Spektroskopische Messungen führten zur Entwicklung der Quantenmechanik und die Relativitätstheorie wurde mit aufwendigen astronomischen Beobachtungen bestätigt. Die Verbindung dieser Grundpfeiler der Physik ist bis heute unklar und benötigt neue Impulse. Die erstaunliche Beobachtung, daß die Fallbeschleunigung beliebiger Körper im Vakuum identisch ist, findet Ihren physikalischen Ausdruck in der Äquivalenz von schwerer und träger Masse. Mit der Atominterferometrie steht unter Ausnutzung quantenmechanischer Effekte eine neue Methode Beschleunigungen zu messen zur Verfügung. Frei fallende Materiewellen werden mit Licht manipuliert und zur Interferenz gebracht. Das resultierende Muster wird analysiert, wobei die eingehenden Skalenfaktoren allesamt sehr gut bekannt sind und heutzutage mit Freifalldauern von 200 ms bereits eine Präzision von $< 10^{-10}$ g nach Integration erreicht werden kann. Da die Präzision quadratisch mit der Dauer des freien Falls skaliert, ist die Motivation groß, hier Zeiten jenseits von Sekunden zu erreichen und so bisher unerreichte Präzisionen zu demonstrieren.

Die QUANTUS-Verbundprojekte verfolgen seit 2004 die Entwicklung von Technologien und Modellen zur Anwendung von Atominterferometrie unter Schwerelosigkeit im Bremer Fallturm sowie auf Forschungsraketen. Im Fallturm konnte mit QUANTUS-1 bereits unter Verwendung der magnetischen Linse die Ausdehnung eines ultrakalten Materiewellenpaketes über die Dauer von 2s beobachtet und ein Rubidium Interferometer mit einer Interferometriedauer von 675 ms demonstriert werden. Mit der QUANTUS-2 Apparatur konnten die Studien zur Reduzierung der Ausdehnungsgeschwindigkeit des Rubidium-BEC im Fall- sowie Katapultbetrieb wesentlich vorangetrieben werden. Das Projekt zielt auf die Durchführung von Tests der UFF im Fallturm und die dazu nötige Untersuchung von Kontrollmöglichkeiten, innovativen Interferometrieschemata und potentiellen Herausforderungen der Materiewelleninterferometrie auf langen Zeitskalen ab. Hiermit wird die ultimative Leistungsfähigkeit von Materiewelleninterferometrie unter optimalen Bedingungen erforscht. Diese Untersuchungen bilden zusätzlich zu ihrem wissenschaftlichen Nutzen zusammen mit den MAIUS-Missionen und BECCAL den Grundstein für einen Präzisionstest der UFF mit Quantenzuständen im Weltraum. Das Vorhaben dient auch der bilateralen deutsch-amerikanischen Kooperation auf der ISS. Grundlage ist ein gemeinsamer Experimentvorschlag von Mitgliedern des Projektes QUANTUS-V und US Wissenschaftlern verschiedener Institutionen. Dieser wurde von der NASA im Wettbewerb 2014 ausgewählt und wird seitdem von ihr gefördert. Daher sind die Forschungsziele des Verbundprojektes QUANTUS-V Fallturm von großer Bedeutung für das NASA Cold Atom Laboratory (CAL) auf der ISS. Verbundprojektpartner kooperieren mit Wissenschaftlern, die Forschung mit CAL durchführen, bzw. die hierfür benötigten Methoden entwickeln.

1.2 Voraussetzungen

Aufgrund der Komplexität des Vorhabens wurde die Kooperation von mehreren Instituten und Forschergruppen aus den Vorgängerprojekten fortgeführt, so dass jeder Aufgabenbereich mit der Expertise des jeweiligen Institutes abgedeckt wurde.

Dabei konnten die Partner auf die in den vorherigen Verbundprojekten gesammelten Erfahrungen zurückgreifen.

Das Vorhaben wurde begonnen unter der Beteiligung der folgenden Gruppen:

Universität und Institut
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Quantenoptik
Universität Bremen, ZARM
Humboldt Universität zu Berlin, Jointlab IQS
Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Physik
Universität Ulm, Institut für Quantenphysik
Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Physik

Tabelle 1.1: Projektpartner

Die beteiligten Institute führten die Arbeiten hauptsächlich im Rahmen von Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten durch.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.3.1 QUANTUS-1

Folgende Punkte wurden mit der QUANTUS-1 Apparatur bearbeitet:

- Es wurde ein kompaktes Faserlasersystem entwickelt, welches in der Lage ist Demonstrationsexperimente mit (Doppel-)Raman- und (Doppel-)Bragg-Interferometrie durchzuführen. Gleichzeitig besitzt es die Funktionalität zur Erzeugung und Detektion eines Bose-Einstein-Kondensats.
- Auf Grundlage der gewonnenen Expertise über Doppel-Bragg und Single-Bragg Interferometrie konnte eine Geometrie realisiert werden, welche aus einem einzigen Bose-Einstein-Kondensat (BEC) zwei simultane Interferometer erzeugt, welche dann die Unterscheidung zwischen Rotationen und Beschleunigungen ermöglicht. Diese neuartige Methode wurde publiziert und nutzt die präzise Bewegungskontrolle von BECs kombiniert mit präzisiertem Impulstransfer.
- Die Verwendung von nicht-Gausschen Lichtfeldern wurde für die Atominterferometrie mit BECs untersucht und charakterisiert. Es wurde gezeigt, dass diese eine kohärente Manipulation ermöglichen. Das Strahlprofil zeigt einen deutlich besseren qualitativen Verlauf, da es einerseits eine gleichmäßige Verteilung der Intensität aufweist, sowie weniger anfällig ist für Störungen an Kanten oder Aperturen.

- Neben der Möglichkeit, die atomaren Ensembles mit magnetischen Potentialen zu manipulieren, wurde zusätzlich die Möglichkeiten des Fangens und Haltens der Atome mit fern-resonanten Lichtpotentialen untersucht. Darüberhinaus wurde das Verhalten und der Einsatz für die kohärente Manipulation untersucht.

1.3.2 QUANTUS-2

Folgende Punkte wurden mit der QUANTUS-2 Apparatur bearbeitet:

- Die QUANTUS-2 Apparatur wurde durch den Austausch elektronischer, mechanischer und optischer Komponenten instandgehalten. Hierbei mussten u.a. das FAB-PXI, der Teleskopspiegel der zweiten Detektion, optische Fasern und der Chiller ausgetauscht werden. Des Weiteren wurden Vakuumkomponenten in Vorbereitung des Umtauschs der 2D+ Vakuumkammer designt und beschafft.
- Es wurden MOPAs für das Rubidium- und das Kalium-Lasersystem fertig gestellt und nach Bremen ausgeliefert. Zum Teil wurden diese Module ins bestehende Lasersystem eingebaut wurden, zum Teil als Ersatz gelagert.
- Untersuchungen von verschiedenen Atominterferometergeometrien am Boden und in Schwerelosigkeit wurden durchgeführt. Insbesondere wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:
 - Das Rubidium-Lasersystem wurde um die Funktionalität zur Generierung von Single- und Doppel-Bragg Beugung an Rubidiumatomen erweitert.
 - Insgesamt wurden 221 Abwürfe während des Vorhabens am Fallturm durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Interferometergeometrien getestet und charakterisiert und ebenfalls mit magnetischen Linsen zur Kollimierung der BECs kombiniert.
 - Es wurde ein simplifiziertes BEC Gravimeter demonstriert. Dies diente u.a. zur Charakterisierung der Interferometerpulse, und zur Charakterisierung der Stabilität des experimentellen Aufbaus.
 - Es wurde ein atomares Scherinterferometer demonstriert, welches auf einer offenen Ramsey-Interferometergeometrie basiert. In Kombination mit unterschiedlich stark kollimierenden magnetischen Linsen kann hiermit die räumliche Geschwindigkeitsverteilung der Atome aufgelöst werden. Des Weiteren empfiehlt sich diese Methode, um die Stärke einer perfekt kollimierenden magnetischen Linse zu bestimmen. Eine Publikation zu diesem Sachverhalt ist in Vorbereitung.
 - Es wurde die asymmetrische Mach-Zehnder-Interferometergeometrie demonstriert und eingehend untersucht. Es konnte eine Interferometerzeit von $2T = 1.7\text{s}$ ohne auftretenden Kontrastverlust gezeigt werden. Es zeigte sich eine Aufprägung eines Musters auf die Atome, welche den Kontrast jedoch ganzheitlich drückt. Diese Aufprägung wurde in einer Vielzahl von Abwürfen untersucht, sodass als Ursache der Interferometerstrahl selbst ausfindig gemacht werden konnte. Eine Publikation zu diesem Sachverhalt und der langen Interferometerzeit ist in Vorbereitung.

- Die QUANTUS-2 Apparatur wurde für den Betrieb im GraviTower Bremen Pro zur Erhöhung der Wiederholrate der Experimente zur Analyse und Optimierung des Systems aufgerüstet. Es wurde an 11 Tagen am GraviTower Bremen Pro gearbeitet. Dabei konnten erste Statistiken über einzelne Schritte zur Erzeugung eines BECs in Schwerelosigkeit sowie des Transports des BECs auf die μg Position durchgeführt werden. Ebenfalls konnte ein voller Rabi-Oszillations-Zyklus durchgeführt, sowie erste offene Ramsey-Interferometer demonstriert werden.
- Das Kalium-Lasersystem wurde mit einer sich in Berlin befindlichen BEC Apparatur verbunden und eine erste Kalium-MOT demonstriert. Dafür wurde zusätzlich ein Trapezverstärker auf Labortischebene für mehr Leistung des Kalium Lasersystems aufgebaut. Folgend wurde das Kalium-Lasersystem eingängig charakterisiert und nach Bremen inkl. aller zugehöriger Elektronik ausgeliefert.
- Es wurden verschiedene Schallengeometrien in Schwerelosigkeit implementiert und die Abhängigkeit von der Radiofrequenz und deren Leistung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die QUANTUS-2 Apparatur zurzeit durch die maximal mögliche Leistung der Radiofrequenz-Quelle beschränkt ist.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Durch die bisherigen QUANTUS Verbundprojekte QUANTUS (2004-2007), QUANTUS-II (2008-2010), QUANTUS-III (2011-2015), QUANTUS-IV-Fallturm (2015-2019) sowie auch QUANTUS-IV-MAIUS (2015-2024) konnten bisher vier Experimentier-Plattformen zur Untersuchung quantenentarteter Gase unter der Bedingung der Schwerelosigkeit entwickelt, aufgebaut und verbessert werden.

Mit der Apparatur QUANTUS-1 wurde die Interferometrie mit Bose-Einstein-Kondensaten als atomarer Quelle weltweit erstmalig unter Schwerelosigkeit demonstriert. Diese Arbeiten legten die Grundlage, dass im Anschluss während QUANTUS-III eine Raketenmission (MAIUS-1) in Angriff genommen werden konnte, deren Aufgabe die erstmalige Demonstration der Bose-Einstein-Kondensation im Weltall darstellte. Ferner konnte in QUANTUS-III mit der Plattform QUANTUS-2 die Untersuchung der kohärenten Evolution eines BECs und wichtige Konzepte für die Atominterferometrie unter Schwerelosigkeit demonstriert werden. Erst die entwickelten Methoden des Delta-Kick-Kühlens, der kohärenten Präparation des unmagnetischen atomaren Zustands und der Interferometrie mit Hilfe der symmetrischen Bragg-Interferometrie ermöglichen eine Anwendung der Atominterferometrie unter Schwerelosigkeit für hochpräzise Messungen. Die Delta-Kick-Kollimation erlaubte die Realisierung von Temperaturen von bis zu 38 pK und in Folge dessen die Beobachtung eines freifallenden Wellenpakets über makroskopische Zeitskalen von über 2 Sekunden, zu jener Zeit ein Weltrekord und dessen Interferenz über eine Interferometriedauer von 675 ms.

Mit Hilfe dieser experimentellen Plattformen QUANTUS-1 und QUANTUS-2 der deutschen Raumfahrtagentur (DLR) wurden Tests von Atomlasern und deren Interferenzeigenschaften unter den Bedingungen des ausgedehnten freien Falls am Fallturm in Bremen durchgeführt. Als nächster Schritt wurde die experimentelle Plattform MAIUS-1 entwickelt, welche eine Ausdehnung des freien Falls auf mehrere Minuten ermöglichen sollte. Dies wurde durch einen geplanten Einsatz eines Atomlasers auf einer Höhenforschungsrakete gewährleistet, welche am 23.01.2017 auf einen Freifallparabelflug jenseits der Kármán-Linie geschickt wurde und das erste BEC im Weltraum demonstrieren konnte.

In Folge dieser wurde ab 2014 mit der Entwicklung der MAIUS-B-Nutzlast begonnen, die aufbauend auf den zahlreichen mit den QUANTUS-Apparaturen und der MAIUS-A-Apparatur erzielten Ergebnissen, die Präparation und Interferometrie mit zwei atomaren Spezies (Rubidium und Kalium) untersuchen sollte.

Unter den vielfältigen Forschungsrichtungen wurde der quantenoptische Test der UFF, d.h. ein Test der universellen Propagation von Materiewellen im ausgedehnten freien Fall, vom QUANTUS Konsortium als wissenschaftliches Thema von fundamentalem Interesse ausgewählt. Langfristig wird die Durchführung eines solchen Tests auf einer Raumstation oder einer frei fallenden Satellitenplattform angestrebt.

Ähnliche Zielsetzungen zur Entwicklung der angegebenen Methoden zur Atominterferometrie verfolgten die Forschungsarbeiten an der Universität Stanford mit einer 10 m Fontäne in einem Bodenexperiment. In diesem Experiment konnten mit einer magnetischen Linse effektive 2D-Temperaturen im Pikokelvinbereich demonstriert werden. Dieses Experiment ist jedoch nicht für einen Einsatz im Weltall geeignet.

Das I.C.E (Interférométrie atomique à sources Cohérentes pour l'Espace) Konsortium, mit

Unterstützung der französischen Weltraumagentur CNES, untersuchte in Parabelflügen an Bord eines Airbus A300 Zero G ähnliche Methoden. Es konnte bereits atominterferometrische Messungen mit Interferometriezeiten von einigen Millisekunden demonstrieren und befindet sich gerade in einer Umbauphase, um ebenfalls Interferometrie mit Kalium zu erforschen. Die Kompaktheit dieses Experiments war jedoch noch nicht weit genug fortgeschritten, um z.B. auf Höhenforschungsraketen oder Satelliten eingesetzt zu werden. Zudem konnte die amerikanische Weltraumagentur NASA das Experiment CAL (Cold Atom Laboratory) auf der Internationalen Raumstation (ISS) in 2018 installieren und mit der Erforschung ultra-kalter Quantengase und Quantengasgemische beginnen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Am Verbundprojekt QUANTUS-V-FT sind sechs deutsche Partner und Institutionen beteiligt (siehe Tab. 1.1).

Die Experimente mit der QUANTUS-1-Apparatur wurden am ZARM in Bremen durchgeführt, wobei Mitarbeiter der Projektpartner aus Bremen, Hannover und Berlin die Arbeiten vor Ort durchgeführt haben.

Die Experimente mit der QUANTUS-2-Apparatur, insbesondere die Fallturmkampagnen, wurden am ZARM in Bremen in Zusammenarbeit von Mitarbeitern aus Bremen, Hannover, Berlin und Mainz durchgeführt.

Die Arbeitspakete der Partner der Universität Ulm sowie der TU Darmstadt wurden im Rahmen der regulären Projektlaufzeit abgeschlossen. In einer Aufstockung wurden weitere Arbeiten lediglich von den vier Partnern durchgeführt, die an den noch offenen Arbeitspakete beteiligt waren. Alle vier Partner unterstützten die Arbeiten an der QUANTUS-2-Apparatur sowie die Durchführung der Abwurfkampagnen vor Ort am Fallturm in Bremen. Die vier in die Aufstockung aktiv eingebundenen Partner sind:

- Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH), Institut für Quantenoptik
- Universität Bremen, ZARM
- Humboldt-Universität zu Berlin (HUB), Jointlab IQS
- Johannes Gutenberg Universität Mainz (JGU), Institut für Physik

Die Verbundpartner der TU Darmstadt sowie der Universität Ulm beteiligten sich lediglich im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung ihrer Teilprojekte synchron mit dem Gesamtvorhaben.

2 Ausführliche Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens

AP 1: Demonstrationsexperimente mit (Doppel-)Raman- und (Doppel)-Bragg-Interferometrie am Boden

Doppel-Raman und Doppel-Bragg Beugung, sowie deren Kombination zur Verwendung in Interferometertopologien, sind zwei verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen für die Atominterferometrie. Um die diesbezüglichen wissenschaftlich interessanten Fragestellungen auch experimentell zu beantworten wurde ein neuartiges Lasersystem entwickelt. Dieses Lasersystem ermöglicht es Bragg- oder Raman-Strahlteiler für atominterferometrische Messungen zu realisieren. Siehe Abbildung 2.1 für den schematischen Aufbau und Abbildung 2.2 für die faserbasierte Umsetzung.

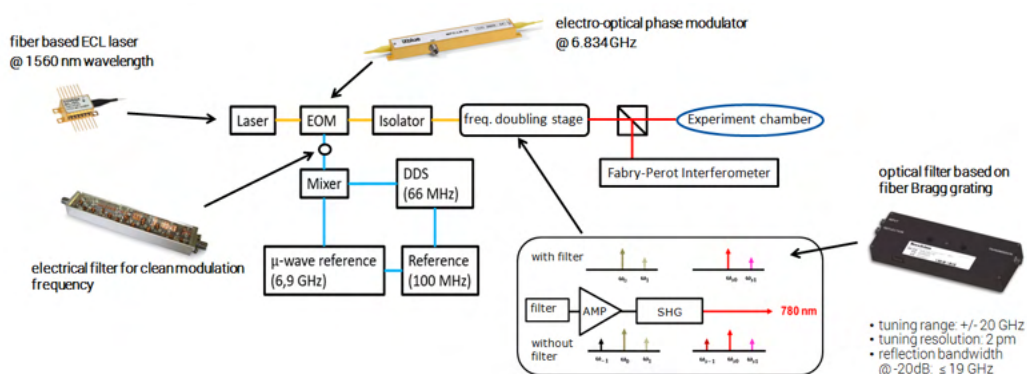


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines faserbasierten Lasersystems zur Raman-Strahlteilung. Wichtige Bestandteile sind der elektrische Filter zum Säubern der elektronischen Mischfrequenz, der elektro-optische Phasenmodulator (EOM) zur optischen Seitenbanderzeugung, der optische Filter (Faser-Bragg-Gitter) und die optische Frequenzverdopplung um die Bedingung der atomaren Resonanzfrequenz zu erfüllen.

Die Realisierung der benötigten Laserfrequenzen erfolgt mithilfe eines elektro-optischen Phasenmodulators (EOM), welcher Seitenbänder auf den Laserstrahl aufmoduliert. Da dabei neben der Trägerfrequenz stets weitere Seitenbänder entstehen, müssen die unerwünschten Seitenbänder mithilfe von Filtern unterdrückt werden. Dabei kommen ein elektrischer Filter zum Säubern der Mischfrequenz für den EOM, sowie ein optischer Filter nach der optischen Phasenmodulation durch den EOM zum Einsatz. Das resultierende optische Spektrum wurde mithilfe eines Fabry-Perot-Resonators aufgenommen und zeigt eine Unterdrückung der unerwünschten Frequenzen von >20 dBc (siehe Abbildung 2.3).



Abbildung 2.2: Frequenzverdoppelt, faserbasiertes Lasersystem basierend auf Telekom-Technologie zur Raman- und Bragg-Strahlteilung.

Ein wichtiger Parameter eines Lasersystems für die Atominterferometrie ist das Phasenrauschen. Deshalb wurde das erzeugte Raman-Lichtfeldes diesbezüglich untersucht. Das mit der Sensitivitätsfunktion des Atominterferometers gewichtete, integrierte Phasenrauschen wurde zu 6.19 mrad bestimmt. Die einzelnen frequenzabhängigen Phasenrauschwerte (gewichtet und ungewichtet) sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

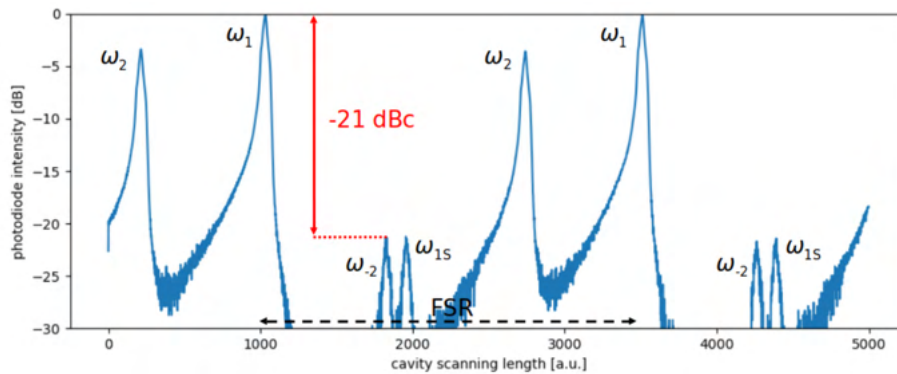


Abbildung 2.3: Mit einem Fabry-Perot-Resonator aufgenommenes optisches Spektrum des Raman-Lichtfeldes. Die Frequenzen ω_1 und ω_2 sind die gewünschten Frequenzen zur Raman-Strahlteilung. Andere parasitäre Seitenbänder sind um >20 dBc unterdrückt.

Nach Charakterisierung und Kompensation des AC-Stark Shifts per Variation des Intensitätsverhältnisses der zwei Laserfrequenzen wurden Messungen zur Einzel-Raman-Beugung entlang der vertikalen Achse und Doppel-Raman-Beugung entlang der horizontalen Achse in QUANTUS-1 realisiert.

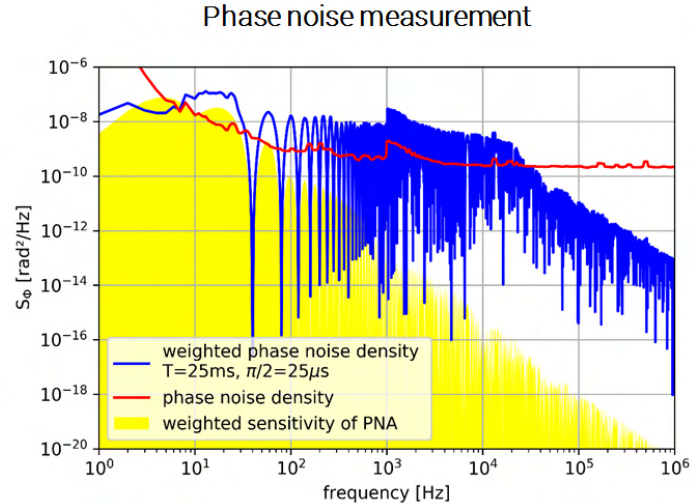


Abbildung 2.4: Phasenrauschanalyse des Raman-Lichtfeldes des Lasersystems. Die gemessene Phasenrauschdichte (rot) ist mit der Sensitivitätsfunktion des Interferometers gewichtet (blau). Es ergibt sich ein integriertes Phasenrauschen von 6.19 mrad.

Im Vergleich zu Bragg-Beugung zeigten die Raman-Strahlteiler eine geringere Stabilität. Um die Ursache dafür zu finden, wurde die Strahlteilerstabilität in Abhängigkeit verschiedener Parameter untersucht. Dazu zählen Zeitpunkt und Dauer des Strahlteiler-Pulses, Magnetfeldeinflüsse sowie der Detektionsprozess. Für Doppel-Raman-Beugung wurden abgesehen von Prozessen erster Ordnung auch sequentielle Pulse, sowie Pulse dritter Ordnung realisiert. Letztere sind nur in einer Doppel-Raman-Konfiguration möglich.

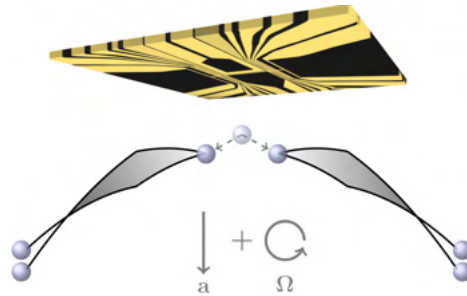


Abbildung 2.5: Schema von zwei simultanen Interferometern zur Unterscheidung von Rotationen Ω und Beschleunigungen a erzeugt aus einem einzelnen Bose-Einstein Kondensat. Publiziert als Graphical abstract für Gersemann, M., et al. (2020). Differential interferometry using a Bose-Einstein condensate. European Physical Journal D, 74(10), 203.

Auf Grundlage der gewonnenen Expertise über Doppel-Bragg und Single-Bragg Interferometrie konnte eine Geometrie realisiert werden, welche aus einem einzigen Bose-Einstein-Kondensat (BEC) zwei simultane Interferometer erzeugt, welche dann die Unterscheidung

zwischen Rotationen und Beschleunigungen ermöglicht. Diese neuartige Methode wurde publiziert und nutzt die präzise Bewegungskontrolle von BECs kombiniert mit dem präzisen Impulstransfer durch Bragg-Beugung. Auf diese Weise wird die Komplexität von zwei einzelnen BEC-Quellen vermieden (siehe Abbildung 2.5).

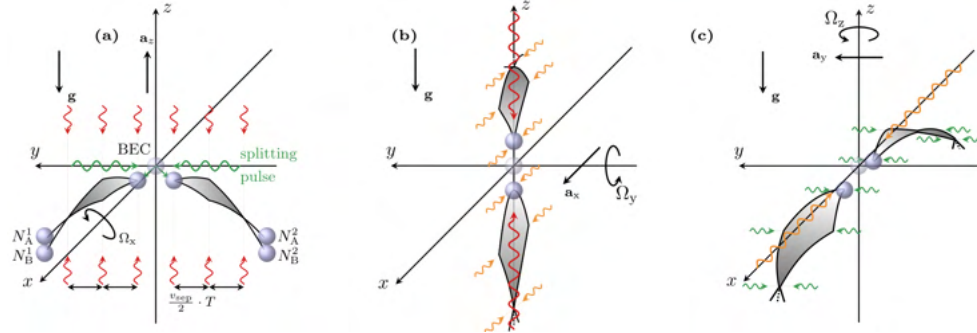


Abbildung 2.6: Drei senkrecht orientierte optische Gitter erzeugen die benötigten Strahlteilerprozesse um alle drei Rotations- und Beschleunigungskomponenten zu messen. Die dargestellten einzelnen Geometrien (a), (b) und (c) ermöglichen jeweils die simultane Messung einer Rotations- und Beschleunigungskomponente. Publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Diese Methode konnte am Boden demonstriert werden und bietet die Möglichkeit der Erweiterung auf einen sechs-Achsen Inertialsensor. Dafür werden drei senkrecht orientierte optische Gitter in Rot (z-Achse), Grün (y-Achse) und Orange (x-Achse) für die verschiedenen Beugungsprozesse benötigt. Um alle drei Rotations- und Beschleunigungskomponenten zu messen werden dreimal durch Doppel-Bragg-Prozesse zwei Anfangswellenpakete entlang der drei Raumachsen erzeugt. Die entsprechenden Interferometer werden durch drei aufeinanderfolgende Lichtpulse gebildet, die Beugung oder Doppelbeugung entlang der x-, y- bzw. z-Achse induzieren (siehe Abbildung 2.6).

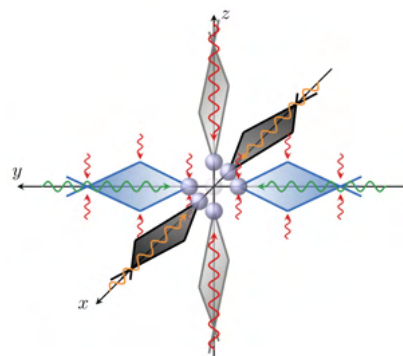


Abbildung 2.7: Atominterferometer-Trajektorien und zugehörige Strahlteilerpulse der sechs-Achsen Inertialsensor Geometrie unter Schwerelosigkeit

Während diese Geometrie unter dem Einfluss der Gravitationsbeschleunigung einsetzbar ist, bietet sie den Vorteil der Symmetrie für alle Achsen unter Schwerelosigkeit (siehe Abbildung 2.7). Die Einfachheit dieses Schemas macht es geeignet für die Anwendung in einer Quanten- oder Hybrid-Inertialmesseinheit auch für den Einsatz an Bord von Flugzeugen, Schiffen oder Raketen.

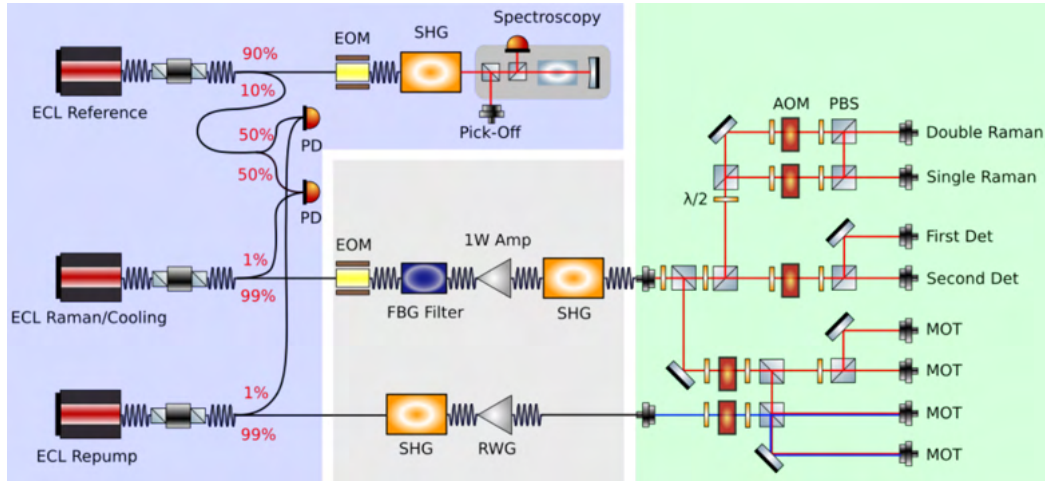


Abbildung 2.8: Laser Komplettsystem zur BEC Erzeugung und Detektion, sowie zur Raman- und Bragg-Strahlteilung. Adaptiert publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Das zu Beginn des Abschnitts beschriebene, faserbasierte Lasersystem zur Raman Strahlteilung wurde zusätzlich um die Funktionalität der Erzeugung und Detektion eines Bose-Einstein-Kondensats erweitert. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Dieser Aufbau ermöglicht nicht nur die kompakte und robuste Erzeugung aller optischen Frequenzen und Lichtfelder, sondern auch die Kontrolle über diese in einem Komplettsystem. Abgesehen von der Funktionalität zur Single- und Double-Raman Beugung lassen sich mit diesem System auch Bragg-Strahlteiler realisieren. Das System ist in drei kompakte Module aufgeteilt, welche in Blau, Grau und Grün in Abbildung 2.8 eingefärbt wurden. Im ersten Modul werden die Frequenzen von drei Faserlasern erzeugt, auf eine Spektroskopie referenziert und untereinander stabilisiert. Die Absolutfrequenzen ergeben sich aus den benötigten atomaren Resonanzen. In dem zweiten Modul werden die Lichtfelder verstärkt sowie frequenzverdoppelt. Das dritte Modul sorgt anschließend für die Aufteilung und finale Puls- und Frequenzkontrolle mit Faser-gebundener Aufteilung und Führung des Lichts bis zur Experimentkammer. Zusammengefasst lassen sich mit diesem System die notwendigen optischen Schritte zur Erzeugung eines BECs und anschließend die angestrebten kombinierten Interferometertopologien aus Raman- und Bragg-Strahlteilern realisieren.

Geplante weitere Demonstrationsexperimente zur Kombination von Interferometertopologien, die sowohl Raman- als auch Bragg-Strahlteilung kombinieren wurden zugunsten von dieser weiteren technologischen Entwicklung zurückgestellt. Dies ist zum Teil auch den (Zugangs-)Beschränkungen zur Eindämmung der Corona Pandemie geschuldet.

AP 2: Interferometrie mit nicht-Gausschen Strahlformungsoptiken und gestörten Lichtfeldern

Zur Erzeugung eines sogenannten "Flat-Top-Profiles", also eines Profils mit einer möglichst homogenen Intensitätsverteilung, wurde eine neue Optik der Firma Asphericon getestet. Diese Optik soll in Form eines Teleskops Vorteile für die Atominterferometrie bieten und aktuelle Limitationen überwinden. Zwei wesentliche Vorteile in Bezug auf die Realisierung atomarer Strahlteiler und Interferometer sind: Eine homogene Intensitätsverteilung sowie eine scharfe Kante der optischen Leistung, welche Beugung an Aperturen vermeidet.

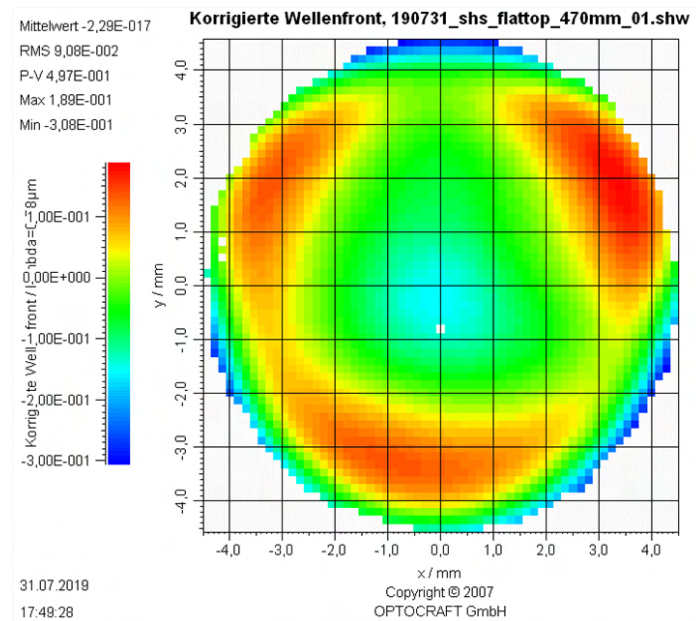


Abbildung 2.9: Intensitätsprofil des Flat-Top-Strahls. (links) Wellenfrontanalyse des Flat-Top-Strahls mit einem kommerziellen Shack-Hartmann-Sensor. (rechts)

Zunächst wurden dazu das Strahlprofil (siehe Abbildung 2.9) links) an sich, sowie die Wellenfronten dieses Strahls für unterschiedliche Propagationslängen untersucht. Diese Untersuchungen wurden sowohl mit einem kommerziellen Shack-Hartmann Sensor durchgeführt (siehe Abbildung 2.9 rechts), als auch mit einem Michelson-Interferometer-Aufbau (siehe Abbildung 2.10)). Bei der Michelson-Interferenz Bildanalyse werden die auftretenden Interferenzstreifen mittels Fourier-Transformation analysiert. Der Peak-to-valley Wert der Phaseninhomogenität betrug in beiden Fällen $\lambda/2$. Dennoch zeigten sich hierbei Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Methoden. Aufgrund der räumlichen Inhomogenität der ersten Flat-Top-Optik konnten bisher noch keine verbesserten Ergebnisse erzielt werden. Da die Vorteile eines Flat-Top Profils gegenüber der bisher verwendeten Gauß Optik dennoch substantielle Verbesserungen für die Atominterferometrie liefern könnten, wurde dies weiter untersucht. Insbesondere wurde eine verbesserte Optik des Herstellers getestet, mit welcher auch bessere Ergebnisse für atominterferometrische Messungen erreicht wurden.

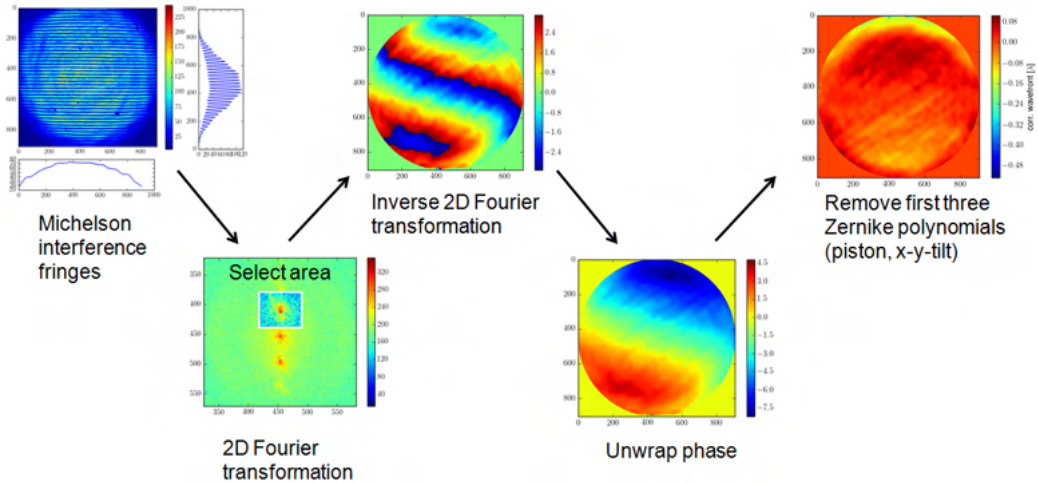


Abbildung 2.10: Wellenfrontanalyse des Flat-Top Strahls per Bildanalyse eines Michelson-Interferenz Profils.

Aufgrund bestehender Limitationen der zuvor getesteten Optik zur Erzeugung eines Flat-Top-Strahls, insbesondere im Fernfeld, wurde dafür ein neuer Aufbau konzipiert und getestet. Dieser besteht aus einer verbesserten, kommerziellen Teleskop-Optik, sowie einer individuell angepassten Einkopplung mithilfe einer Einzellinse. Die Fertigung der Linse basiert auf dem gemessenen Modenprofil der verwendeten Photonischen Kristallfaser. Zusammen mit der Flexibilität, die relative Position der Linse in allen Freiheitsgrade präzise einstellen zu können, ermöglichte dies die bestmögliche Einkopplung in die Flat-Top Teleskop-Optik (siehe Abbildung 2.11). Dies sorgte unter anderem für deutlich stärker abfallende Flanken, sowie eine homogenere Intensität über das Intensitäts-Plateau des Flat-Top Strahl-Profiles.

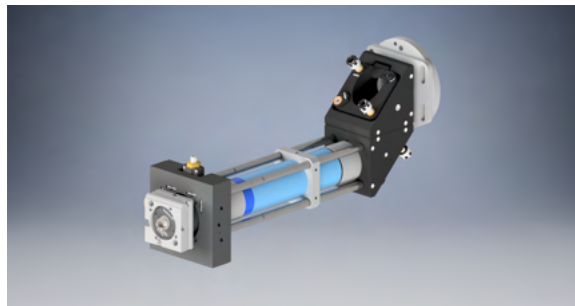


Abbildung 2.11: Optik Aufbau zur Strahlerzeugung sowie Justage eines Flat-Top Strahlprofils.

Dieses System wurde in Bezug auf die Propagation des Intensitätsprofils und Phasenprofils charakterisiert. Während das Intensitätsprofil mithilfe einer geeigneten Strahlprofil-Kamera vermessen werden konnte, ist der Messaufbau zur Wellenfrontcharakterisierung komplexer. Insbesondere ist hier der Einfluss der optischen Komponenten (Vakuumbenutzer, Spiegel, Verzögerungsplatten) des experimentellen Aufbaus wichtig (siehe Abbildung 2.12). Aus den aufgenommenen Bildern konnten per Analyse der Michelson Interferenz Streifen die Phaseninformationen gewonnen werden. Als Vergleich und Verifizierung der gewonnenen

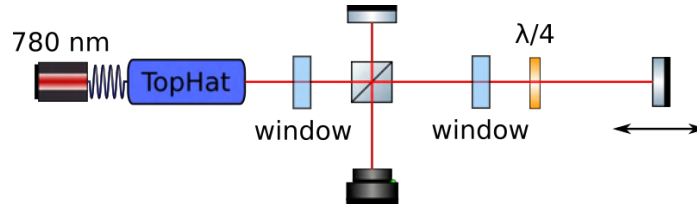


Abbildung 2.12: Messaufbau zur Charakterisierung von Wellenfrontaberrationen. Diese Lichtfeldstörungen können einerseits durch Freistrah-Propagation des Lichtfeldes auftreten, sowie durch eingesetzte optische Komponenten. Publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Informationen wurde diese Messung auch mit einem kommerziellen Shack-Hartmann-Sensor durchgeführt. Dieser lieferte, im Rahmen der Messunsicherheit, vergleichbare Ergebnisse. Um den Einfluss des Lichtfelds auf das Atominterferometer zu untersuchen, wurden mehrere Bilder in einigen μm Schrittweite hintereinander aufgenommen. Diese können dann in Form von 2D-Schnitten dargestellt werden (siehe Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14).

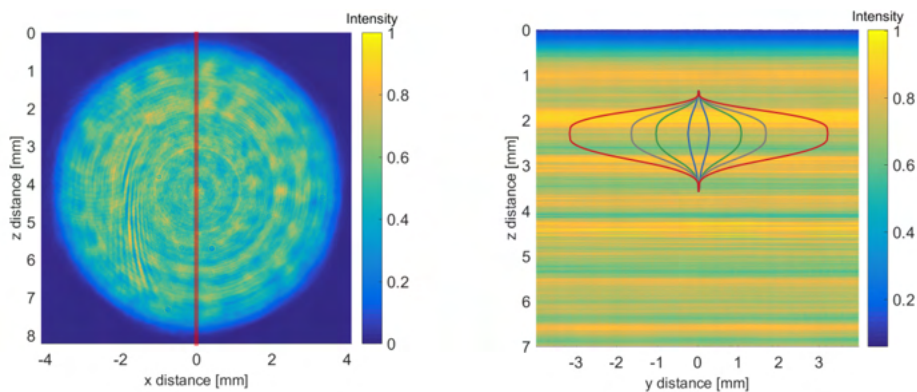


Abbildung 2.13: 2D-Intensitätsprofil des Flat-Top Strahls (links), sowie 2D-Schnitt dieses Profils entlang der roten Linie (rechts). Publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Im Bereich der Interaktionszone des Atominterferometers kann anschließend über die Interferometer Trajektorien integriert werden (siehe rechts in Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14). Dies liefert erstmals Erkenntnisse über den Einfluss der Intensitätsgradienten sowie der Phasenfrontfehler auf die aus dem Interferometer ausgelesene Phase, basierend auf einem real vermessenen Lichtfeld. Die ursprüngliche Analyse basiert auf der Modellierung eines gestörten Gauß-Profiles mit welchem sich der Kontrast Verlust in unseren Messungen mit großem Impulstransfer simulieren ließ. Ergebnisse mit dieser Simulation und dem realen Flat-Top Lichtfeld zeigen einen vielsprechenden Ausblick auf verbesserte Kontrastwerte und damit einer verbesserten Performance des Interferometers.

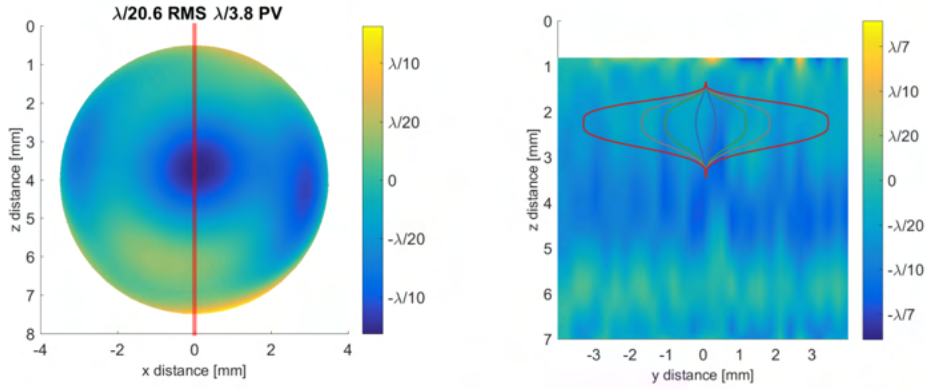


Abbildung 2.14: 2D-Wellenfrontprofil des Flat-Top Strahls (links), sowie 2D-Schnitt dieses Profils entlang der roten Linie (rechts). Publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Um den Einfluss der Intensitätsverteilung auf den Interferometerkontrast zu analysieren, wurde das gemessene Intensitätsprofil mit dem Modell aus der Veröffentlichung "Twin-lattice atom interferometry" analysiert. Die genaue Auswertung und der errechnete Kontrastabfall sind in Abbildung 2.15 dargestellt.

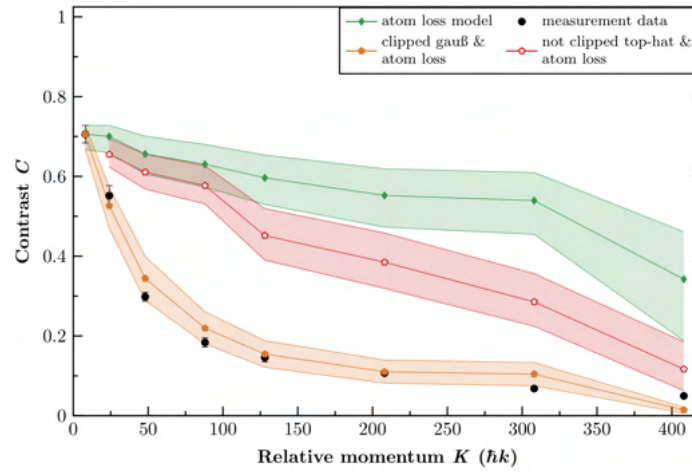


Abbildung 2.15: Kontrast C des Twin-lattice Interferometers in Abhängigkeit vom relativen Impulstransfer K für einen an der Atomchip Kante gebeugten Gaußstrahl und einen Flat-Top Strahl, der nicht gebeugt wird. Zusätzlich wird ein Atomverlustmodell angenommen. Adaptiert publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

In diesem Modell wurde ursprünglich ein idealer Gauß'scher Laserstrahl durch Beugung

an der Kante des Atomchips gebeugt. Wenn sich die Atome auf unterschiedlichen Bahnen durch ein solches Lichtfeld ausbreiten, führt der Gradient des verzerrten Strahlpotential dazu, dass die Atome wegabhängige Dipol Kräfte erfahren. Im modellierten Fall wird das Lichtfeld durch eine 2D-Karte (y - z) der Intensitätsverteilung dargestellt. Aufgrund der sehr geringen Bewegung der Atome in x -Richtung wird angenommen, dass das Strahlprofil in dieser Richtung konstant ist. Die Integration der Dipolkraft über die Dauer des Interferometers entlang des rechten und linken Arms kann zu einem Differenzimpuls führen. Den effektiven interferometrischen Kontrast für einen bestimmten Impulstransfer erhält man durch Integration der atomaren Dichteverteilung. Theoretisch müssten sowohl die anfängliche räumliche als auch die Geschwindigkeitsverteilung berücksichtigt werden, aber zur Vereinfachung des Problems wird die Auswirkung der anfänglichen Geschwindigkeitsverteilung auf die verschiedenen Trajektorien vernachlässigt. Um die räumliche Ausdehnung des anfänglichen Atomensembles zu berücksichtigen, werden 1360 Einzelteilchenbahnen mit unterschiedlichen Positionen zum Startzeitpunkt innerhalb des Thomas-Fermi-Radius berechnet. Die endgültigen Kontrastwerte C sind daher gemittelte Ergebnisse dieser einzelnen, gewichteten Kontrastwerte.

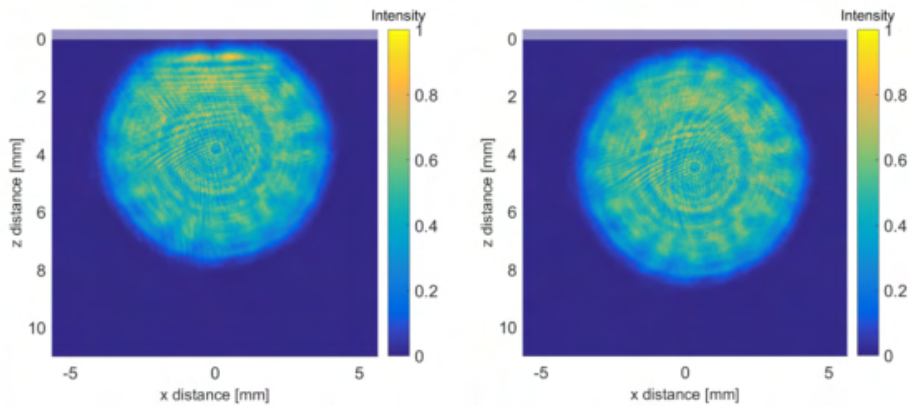


Abbildung 2.16: Vergleich zwischen einem an der Atomchip Kante gebeugten Flat-Top Strahl und einem leicht verschobenen, ungebeugten Strahl. Publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Es wurde außerdem am Experiment untersucht wie nah der Flat-Top Strahl an einer Apertur oder Kante bewegt werden kann, ohne dass sichtbare Beugungseffekte erzeugt werden. In Abbildung 2.16 befindet sich der Atomchip horizontal bei Position $z = 0$. Auf der linken Seite ist der Laserstrahl zu nah am Chip, während bereits bei einer Positionsänderung von <0.5 mm keine Beugungseffekte mehr sichtbar sind. Bei einem typischerweise verwendeten Gaußschen Profil wäre hier eine Änderung von mehr als 4 mm nötig. Nah an der Position der erzeugten atomaren Ensembles zu arbeiten hat mehrere Vorteile, wie z.B. die Möglichkeit mehr Impuls in kürzerer Zeit zu übertragen oder kompaktere Aufbauten zu realisieren.

Da beim Einsatz des Flat-Top Strahls für Strahlteiler Operationen an Atomen noch deutlich

stärkere Schwankungen auftraten, als bei den verschobenen, ungebeugten Gauß Strahlen, wurde die temporäre Stabilität untersucht. Hier ließ sich beobachten, dass das Mehrlinsen-System des Flat-Top Strahl auf der Zeitbasis des Experiments Interferenzmuster aufwies. Die Amplituden Änderungen der Laseramplitude lagen hier im zweistelligen Prozentbereich. Da solche Änderungen einen direkten Einfluss auf die Stabilität der Strahlteiler aufweisen, sollte hier ein noch in sich stabileres, jedoch dennoch justierbares Teleskop entwickelt werden.

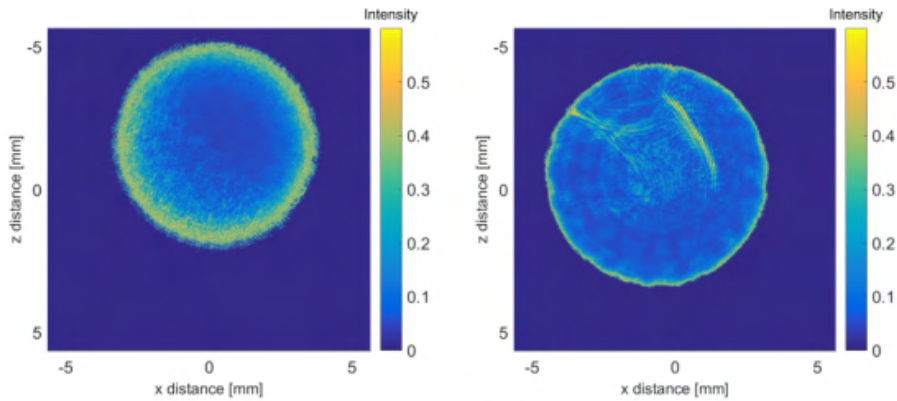


Abbildung 2.17: Zeitliche Stabilität eines Gaußstrahls gegenüber dem Mittelwert von mehreren Messungen, gegenüber der zeitlichen Stabilität des Flat-Top Strahls. Änderungen sind auf 1 normiert, wobei 0.5 einer Änderung von 50% gegenüber des Ausgangswert bedeutet. Publiziert in Gersemann, M., (2023) Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

In Abbildung 2.18 sind alle maßgeblichen Erweiterungen an der experimentellen Vakuum-Apparatur des Quantus-1 Experiments für dieses Arbeitspaket zusammengefasst. Es wurde auf der horizontalen das Flat-Top Teleskop, zusammen mit einer justierbaren Halterung angebaut. Zusätzlich wurde der Halter des Retro-Reflex Spiegel mit einem Beschleunigungssensor kombiniert, mit dessen Hilfe die Korrelation der Interferometerergebnisse gegenüber Vibrationen dieser inertialen Referenz möglich sind.

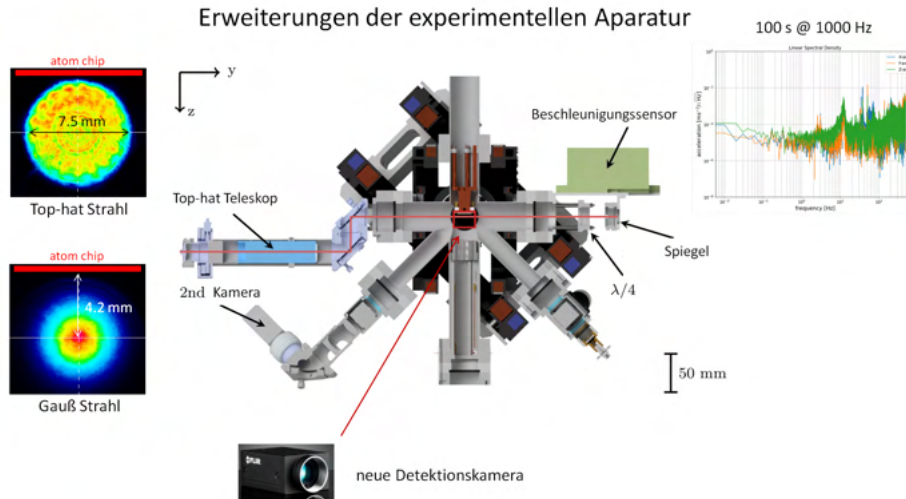


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung der QUANTUS-1 Vakuumparatur und den maßgeblichen Erweiterungen. Besonders hervorgehoben sind der Anbau des Flat-Top Teleskops, des Beschleunigungssensors für Korrelationsmessungen gegenüber Vibrationen und die zweite Detektionsachse.

AP 3: Atomare Manipulation mit fern-resonanten Lichtpotentialen

Im Zuge der AP3 wurde der Einsatz fernverstimmter Lichtpotentiale an der QUANTUS-1 Apparatur untersucht. Hierzu wurde innerhalb des QUANTUS-1 Experiment eine Hybride Falle geometrie bestehend aus der bereits existierenden Atom Chip basierten Magnetfalle und einer Einzelstrahl Dipolfalle mit fern-resonantem Licht bei 1064 nm realisiert. Die Anordnung der beiden Fallen ist in Abb. 2.19 zusammen mit den beiden Detektionachsen zur Beobachtung der Bose-Einstein Kondensate illustriert. Konkret wurde untersucht:

1. das Umladen von Bose-Einstein Kondensaten aus der Atom Chip Falle in eine Dipolfalle (Vorstudien für MAIUS und BECCAL).
2. Studien zur Reduktion der Expansionsraten frei fallender Bose-Einstein Kondensate mittel optischer Delta-Kick Kollimation
3. kohärente Strahlteilung und Interferometrie von Materiewellen in Beugungsgittern bei einer Wellenlänge von 1064 nm
4. Vorstudien zu einem geführten Interferometer mit einer Lichtquelle zur simultanen Führung und Strahlteilung von Materiewellen

Hierzu wurde ein transportfähiges Dipolfallen Lasersystem operierend bei einer Wellenlänge von 1064 nm aufgebaut und qualifiziert. Dieses Hochleistungssystem ist in einem mobilen Rack verbaut und besteht aus einem kommerziellen Laserverstärker System mit bis zu 10 W optischer Ausgangsleistung und einem Freistrahl Aufbau zur dynamischen Anpassung der Leistung während der experimentiellen Sequenz. Dieses System wurde an das ZARM in Bremen transportiert, um dort die bestehende QUANTUS-1 Apparatur zu erweitern. Am

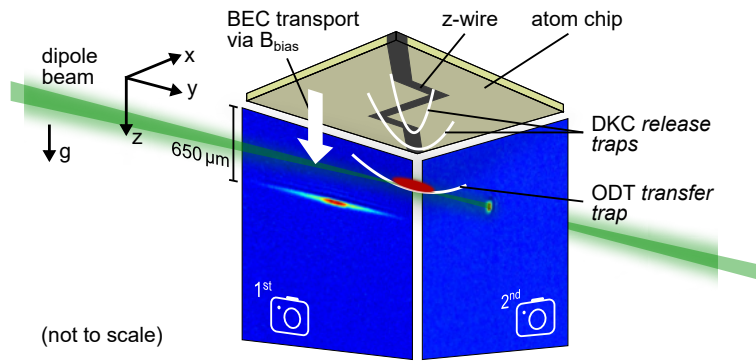


Abbildung 2.19: Hybride Fallengeometrie im QUANTUS-1 Experiment bestehend aus einer Atom Chip basierten Magnetfalle und einer optischen Einzelstrahl Dipolfalle. Die Bose-Einstein Kondensate können aus zwei Richtungen senkrecht und entlang des Dipolfallen Strahls detektiert werden. Adaptiert publiziert in *Kanthak, et al., Time-domain optics for atomic quantum matter, New Journal of Physics 23, 093002 (2021)*.

Experiment wurden optische Teleskope zur Formung der Einzelstrahl Dipolfalle mit einem Fokus von $30\ \mu\text{m}$ angebracht. Das Experiment wurde um eine zweite Detektion erweitert, welche die Beobachtung der Bose-Einstein Kondensate senkrecht und entlang des Dipolfallen Strahls ermöglicht

Zunächst wurden Studien zum Umladen der Bose-Einstein Kondensate aus der Atom Chip Falle in die Einzelstrahl Dipolfalle durchgeführt: Dabei wurde eine im Vorgänger Vorhaben erarbeitete Prozedur zum Überlagern der Magnet- und optischen Falle angewendet und optimiert, welches die Verwendung von resonantem und fern-verstimmten Licht entlang der Optik zur Erzeugung der Dipolfalle verwendet. Dieses ist in den Absorptionaufnahmen in Abb. 2.20a) dargestellt.

Lebenszeitmessungen der Atome in der Dipolfalle, (siehe Abb. 2.20a) ergeben eine Lebenszeit von $10\ \text{s}$. Diese ist vergleichbar mit den Lebenszeiten der Magnetfalle. Dies zeigt auf, dass der dominante Verlustmechanismus weiterhin durch die Vakuum Qualität gegeben ist und keine zusätzliche Heizverluste durch das Umladen oder den Dipolfallen Laser induziert werden. Nach dem Umladen in die Einzelstrahl Dipolfalle sind Oszillationen in der Breite, (siehe Abb. 2.20b), und des Schwerpunktes der Bose-Einstein Kondensate, (siehe Abb. 2.20c), zu beobachten. Die Messung der zeitlichen Dynamik der Atome charakterisiert die Einzelstrahl Dipolfalle wie z.B. nötig für die Applikation der Delta-Kick Kollimation.

Es wurden Studien zur Reduktion der Expansionsraten mittels optischer Delta-Kick Kollimation durchgeführt: Hierbei werden die Bose-Einstein Kondensate in der Atom Chipfalle überhalb des Dipolstrahls präpariert und fallen gelassen. Das Bose-Einstein Kondensat expandiert frei bis zum Erreichen der Position des Dipolstrahls, bei der die Dipolfalle für einige $100\ \mu\text{s}$ angepulsst wird. Auf diesem Weg wird die Ausbreitung der Atome ähnlich der Kollimation eines divergenten Lichtstrahls reduziert und im Idealfall gestoppt.

In Abb. 2.21 sind Flugzeitmessungen der Bose-Einstein Kondensate für a) die freie Expansion und b) nach Anwendung der optischen Delta-Kick Kollimation gezeigt. Zu sehen ist die Reduktion der Ausbreitung in radialer Richtung der Einzelstrahl Dipolfalle.

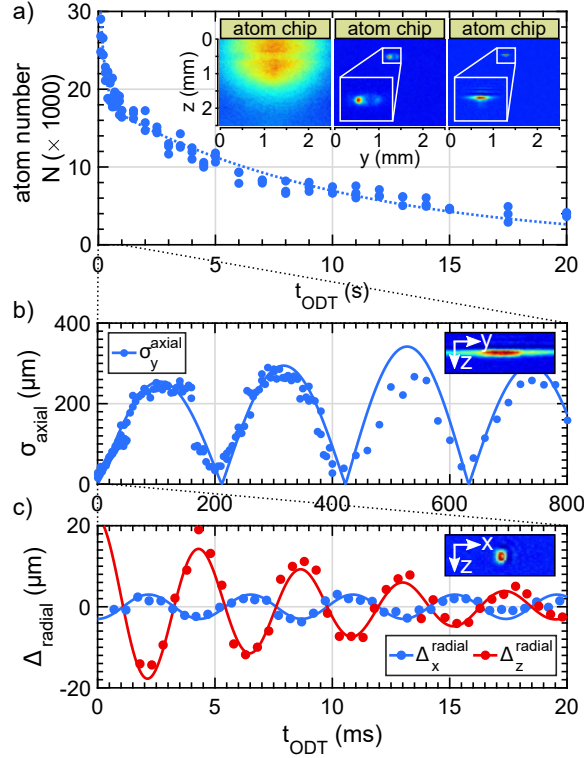


Abbildung 2.20: Dynamik der Bose-Einstein Kondensate nach Umladen aus der Atom Chip falle in die Einzelstrahl Dipolfalle: Zu Sehen sind a) Lebenszeitmessungen der optisch gehaltenen Atome zusammen mit Oszillationen der b) Breite und c) des Schwerpunktes der Bose-Einstein Kondensate in der Dipolfalle. Die Absorptionenaufnahmen in a) illustrieren die Methodik zur Überlagerung der Dipolfalle mit der Atom Chip Falle. Adaptiert publiziert in Kanthak, et al., Time-domain optics for atomic quantum matter, New Journal of Physics 23, 093002 (2021).

Abb. 2.21 zeigt Flugzeitmessungen von Bose-Einstein Kondensaten, die aus Magnetfallen unterschiedlichen Abstandes zum Dipolfallen Strahl freigelassen und optisch Delta-kick kollimiert wurden. Es wird eine bis zu 20-fache Reduktion der ursprünglichen Ausbreitungsrate erreicht. Die residuelle Expansion nach Anwendung der optischen Delta-Kick Kollimation entspricht effektiven Temperaturen von weniger als 1 nK entlang der radialen Richtung der Dipolfalle. Die Ergebnisse dieser Studien wurden in einem Artikel in einer Fachzeitschrift veröffentlicht.

Das bestehende Lasersystem zur Erzeugung einer optischen Einzelstrahl Dipolfalle bei einer Wellenlänge von 1064 nm wurde für die Bragg Strahlteilung atomarer Ensemble erweitert. Ziel ist die Demonstration eines geführtes Materiewellen-Interferometers mit BECs, wobei sowohl die kohärenten Strahlteiler als auch der Atom-führende Wellenleiter durch fern-resonantes Licht eines einzigen Lasers erzeugt werden. Dazu wird ein fern-verstimmtes Lichtfeld auf eine Strahltaile von 100 μm herunter fokussiert, auf der anderen Seite re-

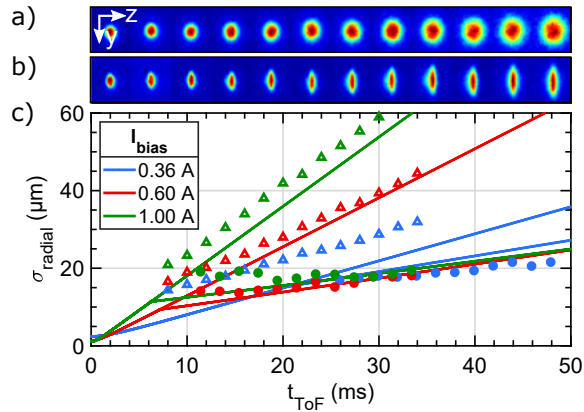


Abbildung 2.21: Reduktion der Expansionsraten mittels optischer Delta-Kick Kollimation: Zu Sehen sind Flugzeitmessungen der aus der Atom Chip Falle frei gelassenen Bose Einstein Kondensate a) ohne und b) mit Delta-Kick Pulsen zur Kollimierung der Materiewellen. c) Mittels optischer Delta-Kick Kollimation können die Expansionsraten äquivalent zu effektiven Temperaturen von einigen Nanokelvin (Dreiecke) auf weniger als ein Nanokelvin reduziert (Punkte) werden. Adaptiert publiziert in Kanthak, et al., Time-domain optics for atomic quantum matter, New Journal of Physics 23, 093002 (2021).

kollimiert und dann in sich retro-reflektiert. Auf diese Weise wird eine fokussierte Variante der bereits demonstrierten Zwillings-Gitter Konfiguration erzeugt, die bei Einstrahlen lediglich einer Laser-Frequenz einen einfachen Atom-Wellenleiter und bei zwei Laser-Frequenzen ein Beugungsgitter für die symmetrische Bragg Strahlteilung bereitstellt. Beugung und Interferometrie von Materiewellen mit fern-resonanten Gittern wurden systematisch, zunächst entkoppelt von der Führung der Materiewellenpakete im Atom-Wellenleiter, untersucht. Abb. 2.22 zeigt Studien kohärenter Strahlteilerpulse bei einer Gitter Wellenlänge von 1064 nm mit Atomen im freien Fall und vergleicht diese mit Ergebnissen erzielt in Gittern bei einer Wellenlänge von 780 nm. Aus den Serien von Absorptionaufnahmen mit Strahlteilern verschiedener Pulsdauern (oben links) wird die Beugungseffizienz für verschiedene optische Leistungen bestimmt (unten links). Gegenüber 780 nm beobachten wir reduzierte Beugungseffizienzen und eine schnelle Population höherer Ordnungen bei größer werdenden optischen Leistungen. Zusammen mit analytischen Berechnungen (rechts) konnten diese wesentlichen Unterschiede bedingt durch den Intensitätsgradienten des fokussierten Beugungsgitters und durch nicht-resonante Kopplung aufgrund reduziertem Photonen Rückstoß bei 1064 nm herausgestellt werden.

Durch Einstrahlen zwei aufeinander folgender Strahlteilerpulse wurde ein erstes, offenes Interferometer (Open-Ramsey Interferometer) bei einer Gitter Wellenlänge von 1064 nm realisiert. Dabei werden die Materiewellenpakete zunächst geteilt und wieder überlagert. Bei räumlichen Überlapp ergibt sich ein Interferenzmuster (siehe Absorptionaufnahmen in Abb. 2.23). Der Abstand zwischen Ebenen konstanter Phase ist durch das Verhältnis der zeitlichen Separation der beiden Strahlteilerpulse (links) und der Expansionszeit (rechts) gegeben. Neben den experimentellen Datenpunkten sind die theoretisch erwarteten Abstände

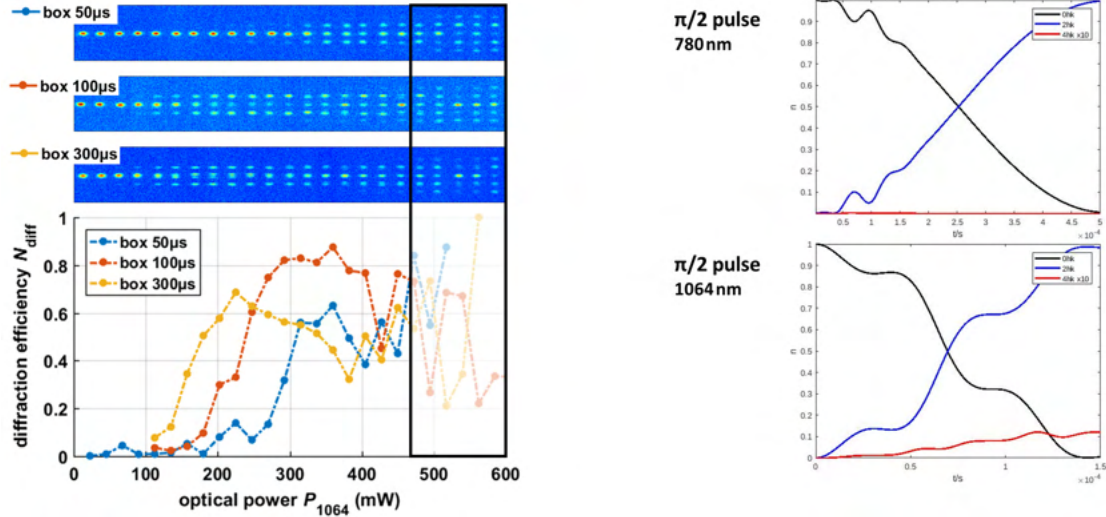


Abbildung 2.22: Symmetrische Bragg Strahlteiler frei fallender Bose-Einstein Kondensate mit fern-resonanten Gittern. Links oben: Gezeigt sind drei Serien von Absorptionaufnahmen mit Strahlteilern unterschiedlicher Pulsdauern unter Variation der optischen Leistung des 1064 nm Beugungsgitter. Links unten: Auswertung der Beugungseffizienz dieser Strahlteiler. Beobachtet wird eine schnelle Population höherer Beugungsordnungen bei größer werdender optischer Leistung. Dieses Verhalten wird durch analytische Berechnungen bestätigt. Aufgrund des niedrigeren Photonen Rückstoßes werden höherer Beugungsordnungen bei einer Gitter Wellenlänge von 1064 nm (unten rechts) im Vergleich zu 780 nm (oben rechts) stärker populiert.

(siehe Formel im Bild) eingezeichnet. Die Steigung ist dabei durch die Gitter Wellenlänge bestimmt.

Die Präparation der Ensemble im Wellenleiter (nur eine Laserfrequenz) ist eine Erweiterung vorangegangener Umladestudien von Bose-Einstein Kondensaten aus einer Magnetfalle eines Atomchips in optische Dipolfallen. Hierbei kommt eine magnetische Atom Linse zur Delta-Kick Kollimation im Wellenleiter zum Einsatz, um höhere Strahlteiler-effizienzen und interferometrische Kontraste durch reduzierte Expansionsraten zu ermöglichen. Durch einen Puls der zweiten Frequenz wird aus dem reinen Wellenleiter ein fokussiertes Beugungsgitter. Damit können geführte Strahlteiler realisiert werden, bei denen die Materiewellenpakete in höhere Impulszustände gebeugt werden, während diese weiterhin gegen Gravitation gehalten werden.

Die Ergebnisse der magnetischen Atom Linse und der geführten Strahlteiler sind in Abb. 2.24 zusammengefasst. Links dargestellt ist die Expansion des BECs im Atom-Wellenleiter mit und ohne Anwendung der magnetischen Atom Linse. Zwei Absorptionaufnahmen sind exemplarisch gezeigt. Deutlich sichtbar ist die reduzierte Ausdehnung der Ensemble nach der Linse. Rechts dargestellt ist die Dynamik der Materiewellenpakete im Wellenleiter nach dem Strahlteilerpuls. Dank der magnetischen Atom Linse ist die Ausdehnung der Ensemble (orange) geringer als die Separation der Beugungsordnungen (blau), sodass diese räumlich separieren. In gelb dargestellt ist die Oszillation der Atome im Atom-Wellenleiter.

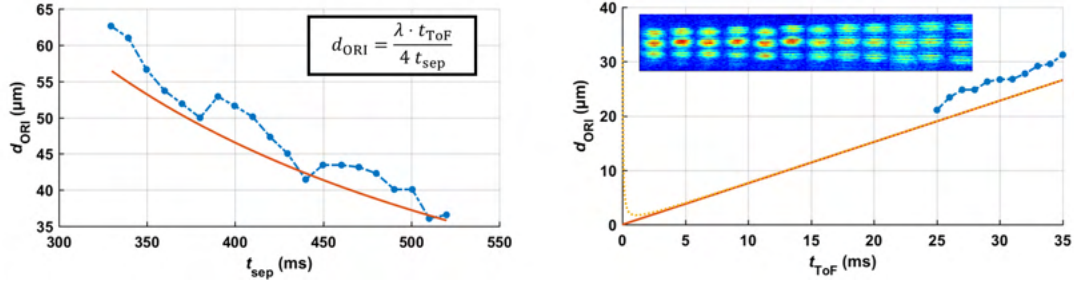


Abbildung 2.23: Open-Ramsey Interferometrie frei fallender Bose-Einstein Kondensate mit fern-resonanten Gittern. Durch zwei aufeinander folgende Strahlteilerpulse wurde ein offenes Interferometer mit einer Gitter Wellenlänge von 1064 nm erzeugt. Der Abstand der Interferenzstreifen (siehe Serie von Absorptionsspektren) ergibt sich aus dem Verhältnis des zeitlichen Abstandes der Strahlteilerpulse (links) und der Expansionszeit der Ensemble (rechts), siehe Formel im Bild. Die Steigung ist dabei durch die Gitter Wellenlänge bestimmt.

Die Untersuchungen zur Realisierung eines geführter BEC Interferometers in einem optischen Wellenleiter Potential wurden durch Kohärenzstudien mittels atominterferometrischer Messungen ergänzt. Herangezogen wurden eine Kontrastanalyse von Open-Ramsey Interferometern mit atomaren Ensembles unterschiedlicher Haltedauern in der Dipolfalle. Diese Messungen weisen einen Abfall des interferometrischen Kontrasts innerhalb einiger weniger 10 ms auf und bilden damit den Zeitrahmen geführter Interferometer innerhalb des Wellenleiter Potentials.

Zusammenfassend wurden in AP3 verschiedene Schlüsselemente wie die Präparation der Materiewellenpakete im Wellenleiter Potential, die Kohärenz dieser Pakete im Wellenleiter sowie Doppel Bragg-Strahlteiler mit fern-resonante Gitter untersucht. Die Erkenntnisse dieser Elementewurden dann im Rahmen des Schwesterprojekts QUANTUS+ vertieft und zur Realisierung eines geführten Interferometers kombiniert.

Zudem wurde ein auf einem Trapezlaser basierendes Dipolfallen Lasersystem für das Fangen und Manipulieren atomarer Ensemble in fern-resonanten Lichtpotentialen entwickelt. Trapezlaser vereinen die Vorteile von Single-Mode Diodenlasern (beugungslimitierte Strahlprofile, verhältnismäßig schmalbandige Lichtemission) und Breitflächenlasern (hohe Ausgangsleistungen, hohe Konversionseffizienzen). Damit sind Trapezlaser ein vielversprechender Kandidat für die Realisierung kompakter Dipolfallen Lasersysteme mit niedrigem SWaP Budget, d.h. geringer Größe, Gewicht und Leistungsaufnahme.

Design und Realisierung des kompakten Lasersystems sind in Abb. 2.25 dargestellt. Der Trapezlaser ist in seiner Temperatur stabilisiert und befindet sich zur effizienten Abführung von Wärme bei hohen Leistungen auf einer wassergekühlten Wärmesenke. Optische Faraday Isolatoren schützen den Trapezlaser vor Rückreflexen aus dem optischen Aufbau. Die Lichtleistung kann über einen akusto-optischen Modulator auf zwei Pfade zwischen einer Faserkopplung und Strahlfalle aufgeteilt werden. Damit lässt sich die zum Experiment geführte optische Leistung präzise steuern.

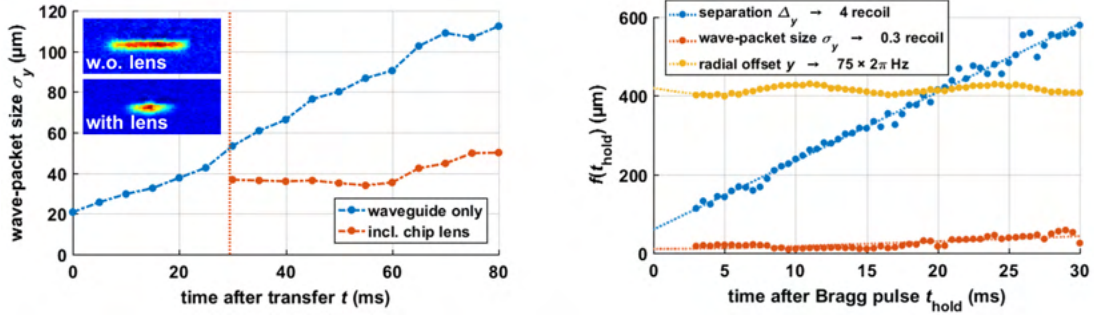


Abbildung 2.24: Magnetische Atom Linse und geführter Strahlteiler in einem fern-resonanten Atom-Wellenleiter. Links: Nach 30 ms Expansion im Wellenleiter wird das Magnetfeld des Atomchips noch einmal angepult, um eine Atom Linse zu realisieren. Damit kann die initiale Expansion (blau) weiter reduziert werden (orange), um höhere Strahlteiler Effizienzen und interferometrische Kontraste zu ermöglichen. Rechts: Gezeigt sind die Ausdehnung (orange) und Position (gelb) des Bose-Einstein Kondensats im Atom-Wellenleiter sowie die Separation der Impulszustände entlang des Wellenleiters nach Anwendung eines 2. Ordnung Strahlteiler Pulses bei einer Gitter Wellenlänge von 1064 nm. Dank der Magnetlinse sind die Impulszustände separierbar (die Separation ist größer als die Ausdehnung). Dabei oszilliert das atomare Ensemble mit der Fallenfrequenz des Atom-Wellenleiters.

Die Trapezlaser wurden umfangreichen Charakterisierungen unterzogen. Zentraler Augenmerk für eine effiziente Modulation und Faserkopplung ist die Kollimation des Laserausgangs in einer zentralen Keule, welches durch eine Linsensystem erreicht wird. Bei einer Ausgangsleistung von 12 W können ca. 68 % in der zentralen Keule vereint und über den optischen Aufbau bis zu 2.7 W an optischer Leistung fasergebunden bereitgestellt werden. Photodioden im Lasersystem erlauben das Monitoren der Leistung und dienen als Regelsignal für eine aktive Stabilisierung. Es wurde eine dynamische Leistungsstabilisierung realisiert, bei der die Ausgangsleistung des Systems auf beliebige, zeitlich veränderliche Rampenformen stabilisiert werden kann.

Für die Erzeugung zeitlich gemittelter Potentiale mit fern-resonanten Lichtfeldern wurde ein optisches und mechanisches Design eines Deflektor Aufbaus erstellt. Das Herzstück bildet hier ein Zwei-Achsen Akusto-optischen Deflektor, welcher die unabhängige Beugung von Licht bei einer Wellenlänge von 1064 nm in einer zweidimensionalen Ebene erlaubt. Über die angelegte Radiofrequenz kann der Beugungswinkel über einen Winkelbereich von ca. 2.5° präzise eingestellt werden. Ein auf die QUANTUS-1 Apparatur abgestimmtes Linsensystem übersetzt diese Beugungswinkel in einen parallelen Versatz von bis zu 4 mm bei gleichzeitiger Fokussierung des Lichtstrahls in der Atomebene des Experiments. Der Aufbau basierend auf diesem Design wurde im Rahmen des Schwesterprojekts QUANTUS+ umgesetzt.

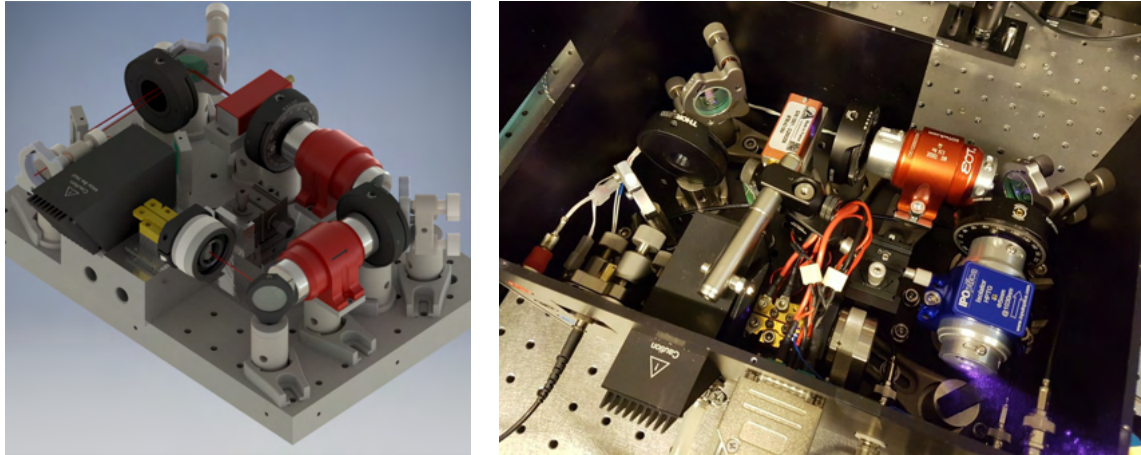


Abbildung 2.25: Design und experimentelle Realisierung des Dipolfallen Lasersystems basierend auf einem Trapezlaser. a) Das CAD Design beinhaltet das Optische Design mit Strahlengang sowie das thermische Design mit Wasserkühlung der Laserquelle und Strahlfalle. b) Zu sehen ist ein Foto des fertig gestellten Dipolfallen Lasersystems mit Trapezlaser, optischer Isolatoren, Modulator und Faserkopplung.

AP 4: Minimierung der Anharmonizitäten der magnetischen Linse

Im vorangegangenen Vorhaben wurde eine magnetische Linse mithilfe der Struktur des Basis-Chips erzeugt. Hierbei gelang die Kollimation entlang der drei Raumrichtungen unter Ausnutzung einer Quadrupolmodenschwingung des Ensembles in der finalen Magnetfalle in Kombination mit einer zylinderförmigen magnetischen Linse. Die Experimente hierzu konnten bereits im Vorgängervorhaben durchgeführt werden, aber die Auswertung der Ergebnisse fand im Rahmen des aktuellen Vorhabens statt. Es wurde eine Publikation dazu im Journal "Physical Review Letters" veröffentlicht.

Konkret erfolgte die Auswertung über Absorptionbilder, die aus einer der beiden zur Verfügung stehenden Richtungen aufgenommen wurden und umfassende Informationen über die Bewegung und Ausdehnung des BEC über die Zeit lieferten (siehe Abbildung 2.26).

Zur Auswertung wurden die experimentellen Ergebnisse mit einer Simulation verglichen, die auf der Bewegung von klassischen Teilchen basiert. Abbildung 2.27 zeigt die Expansion des Ensembles sowohl ohne (Punkte), als auch mit magnetischer Linse (Rauten). Die interne kinetische Energie konnte von etwa 2 nK auf 38 pK reduziert werden.

Um die Anharmonizitäten der Linse weiter zu reduzieren, sind zusätzliche Messungen am Boden durchgeführt worden. So wurde eine magnetische Linse auf Basis einer Kombination der mesoskopischen H-Struktur sowie dem Basechip realisiert. Erste Optimierungen haben eine Reduzierung der Expansion in x' -Richtung auf (0.68 ± 0.40) mm/s und in y' -Richtung auf (1.66 ± 0.52) mm/s ergeben.

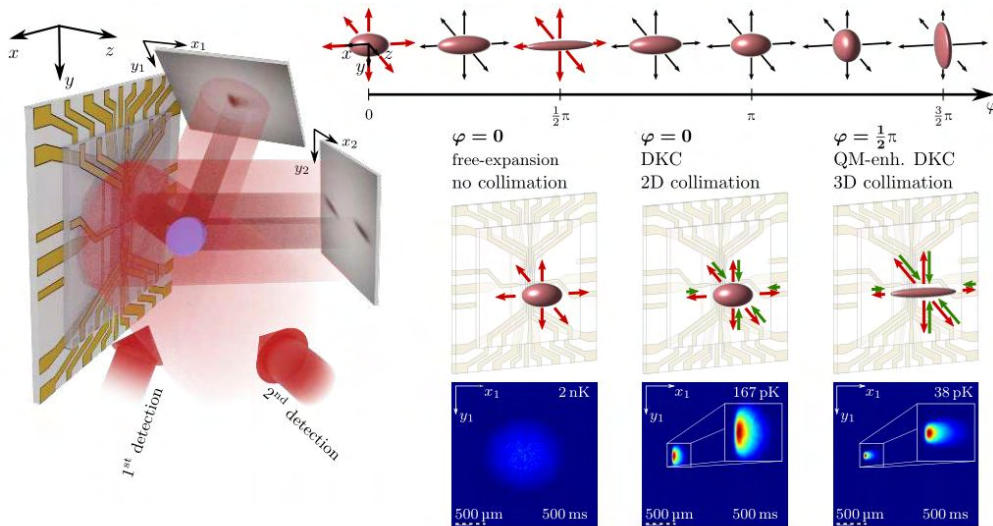


Abbildung 2.26: Nach Erzeugung expandiert das BEC entweder frei oder wird kurzzeitig einem magnetischen Linsenpotential ausgesetzt. Absorptionsbilder aus zwei verschiedenen Richtungen liefern vollständige 3D-Informationen über die Position und räumliche Verteilung des Ensembles. Durch angeregte Quadrupolmodenschwingungen variiert die Größe und Ausdehnung des BEC in Abhängigkeit von seiner Phase φ . Wählt man die Freisetzung in einer oszillatorischen Phase, so dass sich das BEC nur schwach in axialer Richtung ausdehnt, kann man in Kombination mit dem Effekt einer zylindrischen magnetischen Linse eine Energie von 38pK erreichen. Publiziert in Deppner, C., et al. (2021). Collective-Mode Enhanced Matter-Wave Optics. Physical Review Letters, 127(10), 100401

AP 5: Durchführung atominterferometrischer Messungen im Fallturm

Zu Beginn des Berichtszeitraums wurde das Rubidium-Lasersystem um die Bragg-Interferometerstrahlen erweitert. Die Pulse werden durch einen Pulsgenerator erzeugt, mit dem sowohl Boxpulse als auch gaußsche Pulse verwendet werden können. Mit diesem Setup können verschiedene Interferometergeometrien untersucht werden.

Beugung des Interferometerstrahls am Atomchip

Die ersten atominterferometrischen Messungen am Boden zeigten eine Dichtemodulation auf den BECs (siehe Abb. 2.28a). Nach eingehenden Untersuchungen wurde zum Teil die Beugung des Interferometerstrahls am Atomchip, aber mehr noch die Reflexion des Interferometerstrahls an der internen Fensterseite der Vakuumkammer als Ursache identifiziert. Um diese Modulationen zu umgehen, wurde ein neuer Halter des Interferometerkollimators designt, der den Interferometerstrahl um 7° gegenüber dem Fenster verkippt (siehe Abb. 2.28

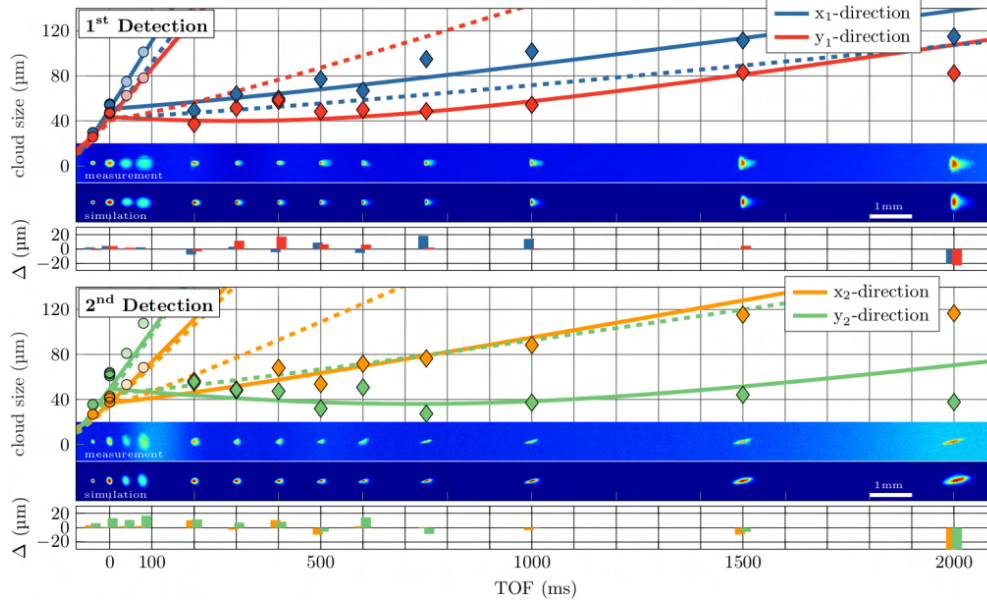


Abbildung 2.27: Expansion des atomaren Ensembles. Mit einer Simulation nichtwechselwirkender Teilchen lässt sich die Expansion des Ensembles während der initialen Expansion (Kreise) mit Quadrupolmodenoszillation, sowie nach Anwenden der magnetischen Linse (Rauten) gut beschreiben. Zum Vergleich ist die Expansion des Ensembles ohne Quadrupolmodenoszillation (gestrichelte Linien) gezeigt, welche zu einer schlechteren Kollimation führt. Publiziert in Deppner, C., et al. (2021). Collective-Mode Enhanced Matter-Wave Optics. Physical Review Letters, 127(10), 100401

rechts). Der gewünschte reflektierte Strahl kann durch den Spiegel unterhalb der Vakuumkammer justiert und entsprechend zurückgeworfen werden. Wie in Abb. 2.28b zu erkennen ist, konnte durch diese Maßnahme die Dichtemodulation deutlich reduziert werden.

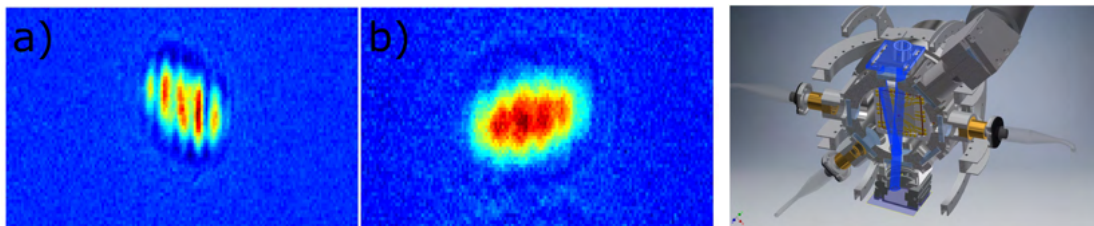


Abbildung 2.28: Links: Dichtemodulation (a) vor und (b) nach dem Einbau des adaptierten Kollimatorhalters, der den Interferometerstrahl um 7° verkippt. Rechts: CAD-Zeichnung des Interferometerstrahls innerhalb der 3D Vakuumkammer, um die Verkipfung des Interferometerstrahls zu visualisieren.

Atominterferometrische Untersuchungen am Boden

Nach den notwendigen Adaptionen des experimentellen Aufbaus wurde in einem nächsten Schritt die Beugung der Materiewellen am Boden zunächst mit Einzel-Bragg-Beugung, und in der Folge auch mittels Doppel-Bragg-Beugung studiert. Hierzu wurden zunächst die Rabi-Oszillationen aufgenommen, die bei Einstrahlung der entsprechenden Laserfrequenzen entstehen und die Abhängigkeiten der Beugung von Pulsdauer und Pulsintensität studiert. In dem gefundenen Parameterbereich ist die Beugung noch nicht von der Impulsverteilung des BEC limitiert und somit können maximale Beugungseffizienzen, und somit perspektivisch auch maximale Interferometerkontraste erreicht werden. Im Ergebnis konnten so am Boden Beugungseffizienzen von bis zu 95% erreicht werden. Da die Atome in Schwerelosigkeit idealerweise keine Relativbewegung zur Vakuumkammer (und somit auch zu den Interferometerstrahlen) aufweisen, ist eine Einzel-Beugung wie am Boden, in Schwerelosigkeit nicht zu realisieren. Um dennoch Aussagen über die zu erwartende Performance in Schwerelosigkeit treffen zu können, wurden die Atome durch entsprechende Magnetfeldrampen auf eine parabelförmige Trajektorie nach oben beschleunigt. Im Scheitelpunkt dieser Flugbahn hat dann das BEC keine Relativgeschwindigkeit zu den Interferometerstrahlen und entsprechend kann die Situation in Schwerelosigkeit nachgestellt werden. Nach Optimierung dieser Wurfparabel konnten ebenfalls Rabi-Oszillationen für die Doppelbeugung aufgenommen werden (siehe Abb. 2.29). Im Ergebnis konnten hier Beugungseffizienzen von bis zu 97% realisiert werden.

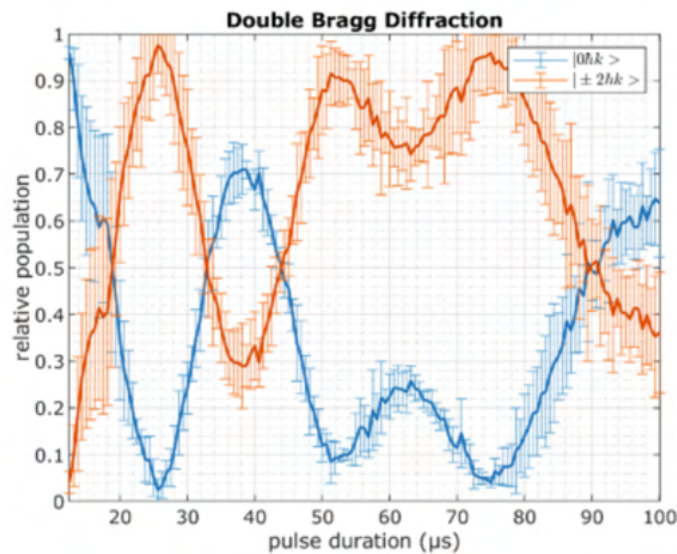


Abbildung 2.29: Rabi-Oszillationen für die Doppel-Bragg Beugung der Atome am Scheitelpunkt der Flugtrajektorie. Die Gauß-Pulse wurden symmetrisch um den Scheitelpunkt herum vergrößert. Für einen Spiegelpuls konnten Effizienzen von bis zu 97% erreicht werden.

Außerdem wurden erste Interferometer an der QUANTUS-2-Apparatur am Boden realisiert. Hierzu wurde wieder zurück zur Einzel-Bragg-Beugung gewechselt und zwei verschiedene Interferometergeometrien realisiert. Diese Messungen wurden ebenfalls mit dem Parabelwurf

kombiniert, hier jedoch mit dem Ziel die zur Verfügung stehende freie Expansionszeit zu maximieren. So wurden offene Ramsey-Geometrien und Mach-Zehnder-Geometrien mit verschiedenen Zeiten zwischen den Pulsen realisiert. Für die Messungen zu den Mach-Zehnder-Interferometern wurde eine feste Pulsdauer von $80 \mu\text{s}$ eingestellt und die Laserleistungen so optimiert, dass die gewünschten $\pi/2$ - und π -Pulse realisiert werden konnten. In Abb. 2.30 sind die normierten Besetzungen eines Ausgangsport des Mach-Zehnder Interferometers abgebildet. Ein Kontrast von über 80% ist zu erkennen. Die angezeigte Beschleunigung ist die Beschleunigung entlang des Bragg-Gitters und geringer als die Erdbeschleunigung, weil der AI-Strahl gegenüber der Gravitationsrichtung verkippt ist. Die AI-Strahlen wurden nicht nach der Erdbeschleunigung ausgerichtet, weil der Zweck dieser Messung in der Untersuchung des Kontrastes und der Stabilität der QUANTUS-2 Apparatur bestand. Für $T=5 \text{ ms}$ wurde das Signal 5,5 Stunden lang aufintegriert. Die Allan-Deviation der Beschleunigung und die Quadratwurzel der Integrationszeit ist in Abb. 2.31 aufgetragen. Es konnte eine relative Genauigkeit von $\frac{\Delta a}{a} = 3.3 \cdot 10^{-6}$ erreicht werden.

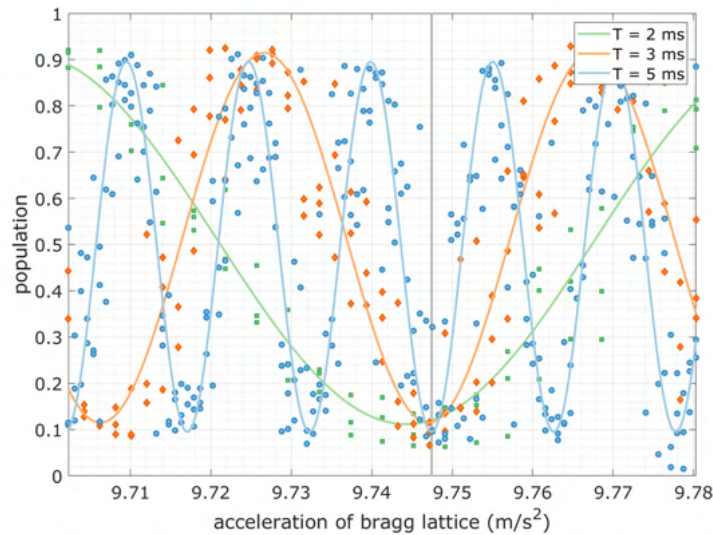


Abbildung 2.30: Normierte Besetzung in einem Ausgangsport des Mach-Zehnder Interferometers für Puls-Separations-Zeiten von $T = 2 \text{ ms}$, 3 ms und 5 ms und die dazugehörigen sinusförmigen Fits. Die graue Linie markiert das Minimum des $T = 5 \text{ ms}$ sinusförmigen Fits, welches mit den Minima der $T = 2 \text{ ms}$ und 3 ms Fits übereinstimmt. Die Beschleunigung ist kleiner als die Erdbeschleunigung, weil die Richtung des Atom-Interferometrie Strahls gegenüber der Gravitation verkippt ist. Der Kontrast liegt bei über 80%.

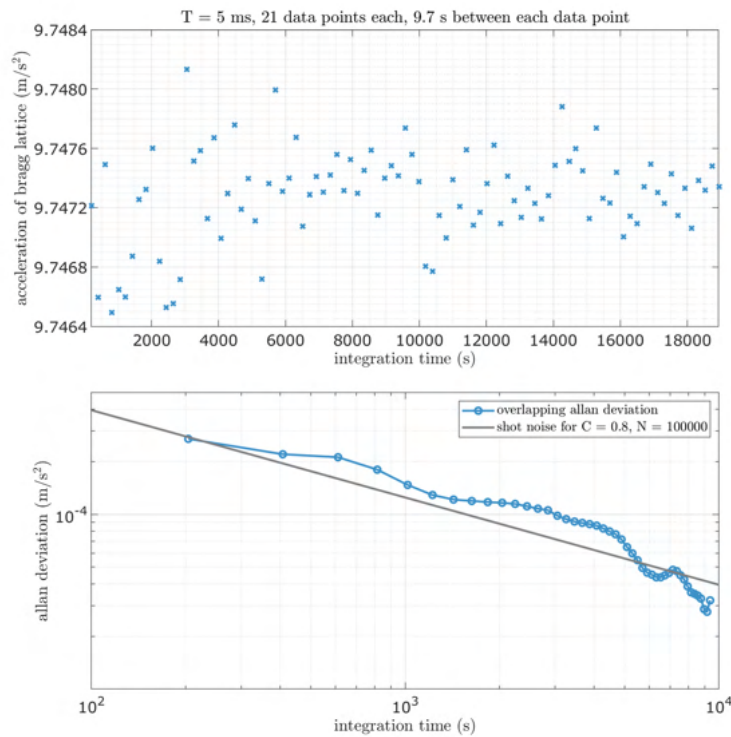


Abbildung 2.31: Die 5h30 min Messung der Beschleunigung des Bragg Gitters (oben). Die Allen-Deviation dieser Messung (unten). Die graue Gerade markiert das Shot-Noise Limit für einen Kontrast von 80% und einen Atomzahl von 10^5 . Es konnte eine relative Genauigkeit von $3,3 \cdot 10^{-6}$ erreicht werden.

Charakterisierung der Atominterferometrie in Schwerelosigkeit

Nach der erfolgreichen Demonstration der Bragg-Beugung und Atominterferometrie am Boden sollten diese Erkenntnisse auf Experimente in Schwerelosigkeit ausgedehnt werden. Hierzu wurde zunächst bestätigt, dass die am Boden optimierten Pulsparameter für die Doppel-Bragg-Beugung auch in der Schwerelosigkeit funktionieren und es konnten Effizienzen von bis zu 90% sowohl für frei expandierende Ensemble, als auch für Ensembles, die per Delta-Kick-Kollimation kollimiert wurden, gezeigt werden.

Zusätzlich konnten erste asymmetrische Mach-Zehnder-Interferometer (aMZI) und Ramsey Interferometer realisiert werden und grundlegende Untersuchungen zur Kohärenz durch Beobachtung des Kontrasts und des Streifenabstandes durchgeführt werden.

Scherinterferometer in Schwerelosigkeit mit offenen Ramsey-Interferometer in Kombination mit magnetischen Linsen

Hier wurde die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Streifenabstandes eines Ramsey-Interferometers zur Charakterisierung der magnetischen Linse ausgenutzt. Dies ist notwendig, da für sehr kleine Expansionsgeschwindigkeiten sehr lange Zeiten benötigt werden, um eine Expansion über eine Flugzeitmessung beobachten und fitten zu können. Ein weiterer Grund hierfür ist die Reduktion zur Charakterisierung erforderlichen Messungen und damit Abwürfen im Fallturm, da andernfalls mit Flugzeitmessungen sehr viele Einzelmessungen benötigen würden. Es wurde die Einstrahldauer der magnetischen Linse (und damit die effektive Temperatur des BEC) variiert und nach einer konstanten Flugzeit von 100 ms wurde ein Ramsey-Interferometer realisiert und der resultierende Streifenabstand aufgenommen. Zum Vergleich wird hier zusätzlich eine Messung ohne Kollimation der Atome nach einer Flugzeit von 80 ms gezeigt. Eine Publikation zu diesen Messungen ist in Vorbereitung.

Mach-Zehnder Interferometer auf langen Zeitskalen größer 1 s

In Folge der erfolgten Charakterisierungs- und Optimierungsmessungen konnten dann verschiedene asymmetrische Mach-Zehnder Interferometer basierend auf Bragg Doppelbeugung in Schwerelosigkeit realisiert werden. Hierbei lag der Fokus auf der Erreichung von möglichst langen Interferometriezeiten und der Analyse des Kontrasts und des Streifenabstandes. Eine Galerie entsprechender Abwurfbilder ist in Abb. 2.33 dargestellt. Die ermittelten Interferometerkontraste und Streifenabstände in Abhängigkeit der Interrogationszeit sind in Abb. 2.32 aufgetragen. Insgesamt konnte eine Interferometriezeit von bis zu 1.7 s demonstriert werden.

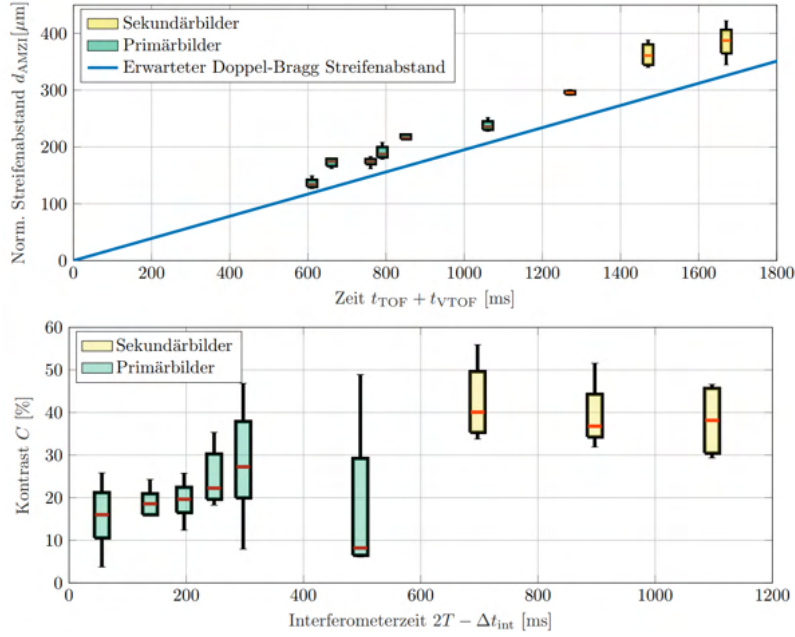


Abbildung 2.32: Verlauf des Streifenabstandes (oben) und Kontrasts (unten) von AMZIs mit zunehmender Gesamtflugzeit ($t_{TOF} + t_{VTOF}$), respektive Interferometerzeit ($2T - \delta t_{int}$). Anfänglich war das Magnetfeld während der Detektion auf die Primärbilder eingestellt (grüne Färbung). Ein einhergehender Kontrastverlust aufgrund störender Hintergrundstrukturen des Atomchips führten zu dem Verwenden der Sekundärbilder (gelbe Färbung) durch ein angepasstes Magnetfeld der Detektion. Die Strukturen haben hier keinen Einfluss auf den Kontrast, sodass dieser auch bei höheren Interferometerzeiten vergleichsweise hoch ist und die Auswertung des Streifenabstandes zulässt. Der Streifenabstand verhält sich wie zum erwarteten Doppel-Bragg Streifenabstand in der Fernfeldnäherung. Diese Abbildung zeigt ausgewählte Abwurfdaten. Adaptiert aus Pahl, J., (2024) Atom interferometric experiments with Bose-Einstein condensates in microgravity, Dissertation, Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin.

Aufprägung von Dichtemodulationen auf die Atome durch den Interferometerstrahl

Bei den Messungen zu asymmetrischen Mach-Zehnder Interferometern ist aufgefallen, dass speziell auf den Bildern aus der zweiten Detektionsrichtung (siehe auch Abb. 2.33) eine Dichtemodulation in Richtung der Interferometriestrahlen zu beobachten war, die rein durch die Interferenz der Atomwolken nicht zu erklären ist. In Konsequenz wurde genauer untersucht wodurch, bzw. wann dieses Streifenmuster entsteht und wie die Entstehung verhindert werden kann. Zunächst wurde untersucht welche Lichtfelder für die Entstehung dieses Muster verantwortlich sind, und wie die räumliche Nähe der Atome zum Atomchip das Muster beeinflusst.

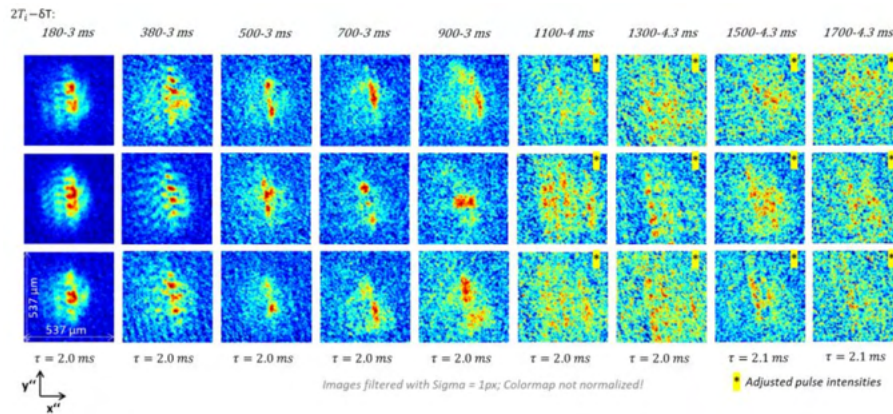


Abbildung 2.33: Dargestellt sind jeweils die drei Ausgangsporte eines asymmetrischen Mach-Zehnder Interferometers in Schwerelosigkeit. Die jeweiligen Interrogationszeiten sind oben angegeben. Unten stehen die jeweils genutzten Linsendauern

Hierbei wurde festgestellt, dass auch bei Einstrahlung von nur einem einzelnen Interferometerpuls das Muster entsteht (siehe Abb. 2.34), weshalb die Vermutung nahe lag, dass die Strukturen durch Abweichungen von der idealen Gauss'schen Strahlform der Interferometriestrahlen herrühren könnten. Derartige Störungen könnten z.B. durch Staub oder Kratzer auf den entsprechenden Optiken verursacht werden.

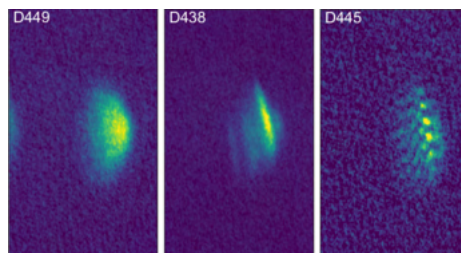


Abbildung 2.34: Drei Abwürfe mit gleichen zeitlichen Parametern zeigen ein BEC (links), ein BEC mit eingestrahltm π -Puls (mittig) und ein AMZI (rechts). Die magnetische Linse verformt das gesamte Ensemble, wie in allen drei Bildern zu sehen ist (Einhüllende). Der π -Puls prägt eine Struktur auf das atomare Ensemble auf. Das lässt auf eine inhomogene Verteilung der Lichtintensität des Interferometriestrahls schließen. Dies wirkt sich weiter auf das AMZI aus, sodass das resultierende Interferenzmuster ebenfalls zusätzlich diese Struktur aufweist.

Messungen im Gravitower Pro

Zur Erhöhung des wissenschaftlichen Outputs und der Anzahl der möglichen Experimente wurde entschieden die Möglichkeiten, die der neu eröffnete Gravitower Pro am ZARM

bietet, zu nutzen und die Kapsel auf die Nutzung dieser Plattform anzupassen. In der Projektlaufzeit konnten diese Adaptionen vorgenommen werden und erste Charakterisierungsmessungen sowohl zur BEC-Erzeugung als auch zur Atominterferometrie durchgeführt werden. Konkret wurde untersucht wie reproduzierbar die BEC-Erzeugung und insbesondere die Schwerpunktsbewegung der frei expandierenden Atomwolke im Gravitower ist und in wie fern die auftretenden Vibrationen und Beschleunigungen vergleichbar zum Abwurf im Fallturm sind. Eine beispielhafte Messung ist in Abb. 2.35 gezeigt.

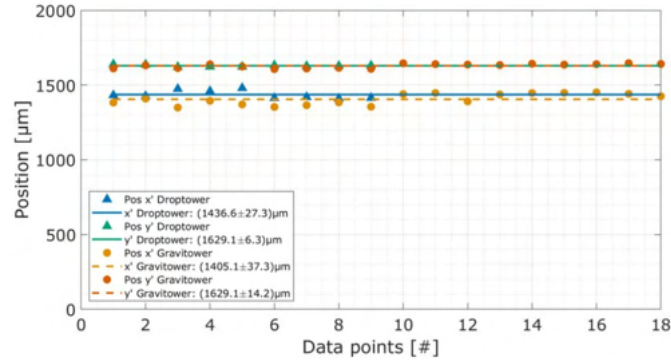


Abbildung 2.35: Vergleich der Schwerpunktspositionen von BECs im Fallturm und im Gravitower Pro. Es ist zwar ein leichter Unterschied in den Positionen zu erkennen, aber dennoch ist die BEC-Erzeugung auch im Gravitower sehr reproduzierbar möglich, so dass sich die Ensembles sehr gut als Quelle für nachfolgende Experimente (z.B. zur Atominterferometrie) eignen.

Ebenso wurde die Doppel-Bragg-Beugung im Gravitower als Voraussetzung für die Atominterferometrie charakterisiert. So konnte im Gravitower innerhalb einer Kampagne eine komplette Rabi-Oszillation aufgenommen werden (siehe Abb. 2.36), eine Messung, die im Fallturm mehrere Woche bis Monate erfordert hätte.

In Folge konnten ebenfalls erste Messungen zur Ramsey-Atominterferometrie durchgeführt werden (siehe Abb. 2.37). Diese Charakterisierungsmessungen sollen dann im Anschlussvorhaben als Grundlage für eine deutlich systematischere Untersuchung der Apparatur und der im Fallturm aufgetretenen Effekte, wie z.B. die oben erwähnte Dichtemodulation durch den Interferometriestrahle, oder auch der Untersuchung symmetrischer Interferometergeometrien dienen.

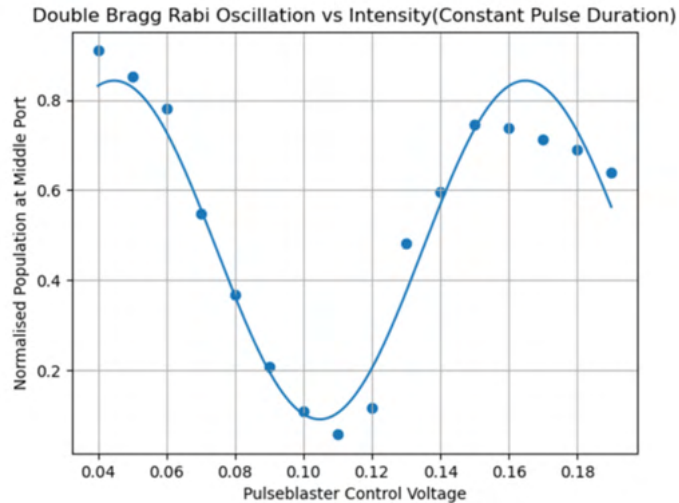


Abbildung 2.36: Aufnahme einer Rabioszillation mittels Doppel-Bragg-Beugung in der Schwerelosigkeit des Gravitower Pro

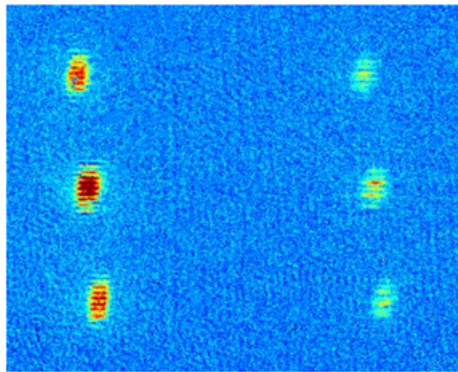


Abbildung 2.37: Abbildung der Ausgangsports eines offenen Ramsey-Interferometers

AP 6: Wiederaufnahme des Katapultbetriebs

Aufgrund der bereits im Vorgängerprojekt aufgetretenen Problematik mit Keramikpartikeln, die sich in der Vakuumkammer befinden und sich beim Katapultstart unkontrolliert durch die Kammer bewegen, erfordert die Wiederaufnahme des Katapultbetriebs eine Erneuerung der 2D+ Vakuumkammer. Dafür wurde während der Projektlaufzeit eine neue 2D+ Vakuumkammer aus Titan in der Mechanikwerkstatt der LUH angefertigt, und es wurden ebenfalls die notwendigen Anbaukomponenten, wie z.B. die Fenster und Dichtungen beschafft. Da der Austausch mit einem zeitweiligen Stopp der experimentellen Aktivitäten einhergeht, wurde entschieden zunächst die Eignung und Dichtigkeit der Kammer und insb. der Fensterdichtungen zu testen. Hierzu wurden an der UB die Fenster mit Indium-Dichtungen angebracht und es wurde die Kammer evakuiert. In Abb. 2.38 rechts ist dargestellt, dass die Kammer die notwendigen Drücke im Bereich von 1×10^{-9} mbar erreicht. Da das Öffnen der Vakuumkammern und somit das Brechen des Vakuums in der QUANTUS-

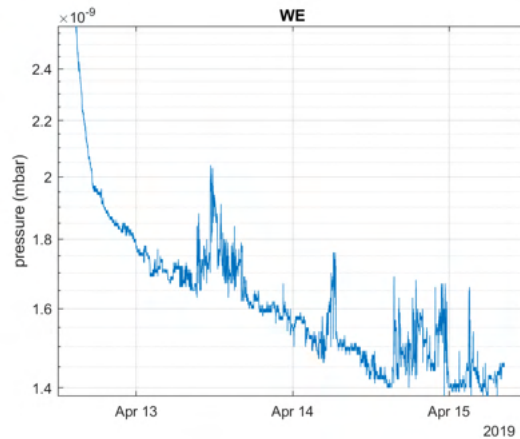


Abbildung 2.38: Vakuumwerte, gemessen kurz nach dem Zusammenbau.

2 Apparatur die aktuelle Ausrichtung des Systems verändert hätte und eine Analyse des aufgeprägten Musters durch den Interferometerstrahl (siehe AP 5) verhindert hätte, wurde in gemeinsamer Absprache mit dem Zuwendungsgeber entschieden, dieses Arbeitspaket zu verschieben.

AP 7: Erweiterung der Q-2 Apparatur auf den Zwei-Spezies Betrieb

Für die geplante Erweiterung der QUANTUS-2 Apparatur auf den Zwei-Spezies Betrieb wurden während des Berichtszeitraums folgende Vorbereitungen durchgeführt: Es wurden vier gefüllte Ampullen mit je 2x Rubidium und 2x Kalium gekauft. Des Weiteren wurde ein Verteiler für die beiden geplanten Öfen entworfen und anfertigen lassen, sowie die dazugehörigen Ofenrohre gekauft. Weiterhin wurden benötigte Siebe und Konterringe gekauft, sowie eine für den Zwei-Spezies Betrieb benötigte neue Kamera.

Das Kalium-Lasersystem wurde in Berlin an eine BEC Apparatur angeschlossen, welche ähnlich zu der QUANTUS-2 Apparatur eine 2D und 3D Vakuumkammer mit Rubidium und Kalium besitzt. Über optische Fasern wurde das Kalium-Lasersystem mit der Apparatur verbunden, wo eine optische Leistung von 2D Kühler und Rückpumper in Höhe von 75 mW und 3D Kühler und Rückpumper in Höhe von 120 mW gemessen werden konnte. Damit konnte eine erste Kalium-MOT demonstriert werden (siehe Abb. 2.40, links). Für die benötigte optische Leistung, wurde ein Trapezverstärker (TA) auf Labortischebene aufgebaut, sodass eine Erhöhung von 25 mW auf 100 mW erreicht werden konnte. Der TA wurde charakterisiert und wäre sowohl für Rubidium als auch Kalium Licht geeignet (siehe Abb. 2.40, rechts). Nach eingängiger Charakterisierung des Kalium-Lasersystem (siehe Abbildung 2.39 wurde dieses inklusiver der dazugehörigen Elektronik mittels Transporter nach Bremen gebracht, wo es nun gelagert wird und für den Einsatz bereit ist. Als Ersatz wurden mehrere Rubidium- und Kalium-MOPAs fertig gestellt und nach Bremen transportiert.



Abbildung 2.39: Das Kalium Lasersystem, bestehend aus einem Referenzlaser und drei MOPA Lasern welche für die Rückpumpung & die Interferometry, sowie die 2D und 3D Kühlung verwendet werden. Das System ist untergliedert in drei Module. Das MOPA Modul beinhaltet die eigentlichen Laser, von hier wird das Licht in das Verteiler & das Raman Modul geleitet. Im Raman Modul wird dabei das Licht für die Atom-Interferometrie-Pulse, im Verteilermodule das Licht für die BEC Generierung bereitgestellt. In beiden Modulen wird das Licht in die jeweiligen Fasern eingekoppelt, welche runter zur Experimentier-Kammer geführt und dort eingekoppelt werden.

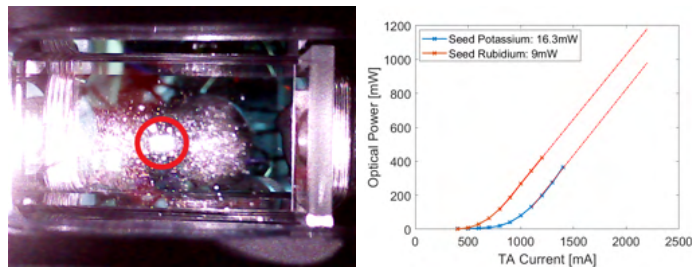


Abbildung 2.40: Links: Erste Kalium-MOT des QUANTUS-2 Kalium-Lasersystems an einer BEC Apparatur in Berlin. Rechts: Charakterisierung des TAs, welcher sowohl für die Verstärkung der optischen Leistung von Rubidium als auch Kalium geeignet ist.

Nach Absprache mit dem Zuwendungsgeber wurde der Einbau des Kalium-Lasersystems auf unbestimmte Zeit verschoben, da für die zweite Spezies das Vauum geöffnet hätte werden müssen. Da dies die aktuelle Ausrichtung des Systems verändert hätte und eine Analyse des aufgeprägten Musters durch den Interferometerstrahl (siehe AP 5) verhindert hätte.

AP 8: Interferometrie Kalium

Die Interferometrie mit Kalium wurde nach gemeinsamer Absprache mit Vertretern des DLR aus dem Zeitplan des Aufstockungsantrags getilgt.

AP 9: Untersuchung der Wechselwirkung beider Spezies

Die Untersuchung der Wechselwirkung beider Spezies (Rubidium und Kalium) wurde nach gemeinsamer Absprache mit Vertretern des DLR aus dem Zeitplan des Aufstockungsantrags getilgt.

AP 10: Experimente zum Space Atom Laser

Zusammen mit der UULM wurden Wege zur Realisierung eines Space Atom Lasers bei QUANTUS-2 diskutiert. Die UULM hat Experimente zum Space Atom Laser mit dem Cold Atom Laboratory (CAL) der NASA durchgeführt. Dort lassen sich die Atome mithilfe einer Mikrowellen-Quelle in den $F = 1$ Hyperfeinzustand überführen. Diese Möglichkeit besteht bei QUANTUS-2 jedoch nicht. Daher wurde beschlossen, dass die UULM ihre Simulation auf den $F = 2$ Hyperfeinzustand erweitert.

AP 11: RF-Dressed Potentials: Shellgeometrien

In der Projektlaufzeit wurde sowohl die generelle Machbarkeit der Erzeugung von Shell-Potentialen für thermische Ensembles mit der QUANTUS-2-Apparatur untersucht, als auch deren Dynamiken in Schwerelosigkeit. Derartige Potentiale konnten durch eine Kombination von der vom Atomchip erzeugten Magnetfalle mit entsprechenden RF-Feldern erzeugt werden. Dabei war es wichtig die Adiabazitäts-Kriterien einzuhalten. Dazu mussten in abwechselnder Reihenfolge die Frequenz und die Leistung linear erhöht werden. Basierend auf den Simulationen der TUDA wurde eine Geometrie für ein Shell-Potential 1.4 mm entfernt vom Atomchip gewählt. Diese Geometrie weist den kleinsten Größenunterschied zwischen den verschiedenen Ellipsoid-Achsen auf und ist somit einer Kugel am nächsten. Zusätzlich hat eine Position weiter weg vom Atomchip den Vorteil, dass die RF Kopplung auf der Oberfläche homogener ist.

Abb. 2.41 zeigt Shell-Potentiale unterschiedlicher RF Verstimmungen gegenüber dem Fallenboden (obere Reihe) und unterschiedlicher RF Leistungen (untere Reihe). Je größer die Verstimmung wird, desto größer wird das Shell-Potential. Des Weiteren kann eine zunehmend asymmetrische Besetzung des Potentials beobachtet werden. Grund für die Asymmetrie ist die RF Antenne auf dem Atomchip, welche eine vergleichsweise größere Kopplung auf der Atomchip zugewandten Seite zur Folge hat. Die weiße Linie deutet die Projektion des simulierten Shell-Potentials an, welche eine passende Übereinstimmung mit den experimentellen Daten erkennen lässt. Die simulierten Shell-Potentiale aus dem bisherigen Berichtszeitraum konnten somit korrekt mit der QUANTUS-2 Apparatur wiedergegeben werden. In der unteren Reihe wurde die RF Kopplung bei einer RF Frequenz von 2.2 MHz (230 kHz über dem Fallenboden) variiert. Nur bei der maximalen Leistung (entsprechend einer Rabi-Frequenz

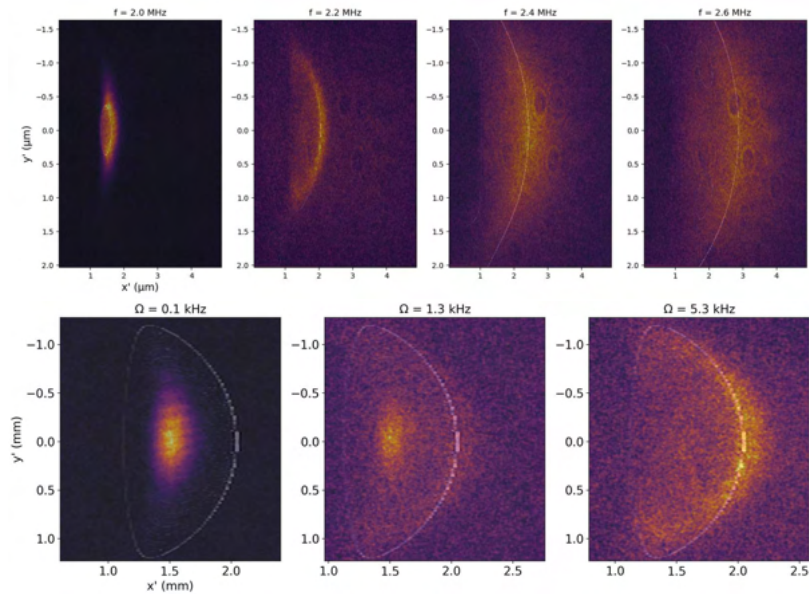


Abbildung 2.41: Obere Reihe: Shell-Potentiale unter Schwerelosigkeit für verschiedene RF Verstimmungen gegenüber dem Fallenpotential. Untere Reihe: Variation der RF Leistung. Die asymmetrische Verteilung der Atome im Shell-Potential ist auf die RF Antenne am Atomchip zurückzuführen, die eine größere Kopplung auf der Atomchip abgewandten Seite zur Folge hat. Des Weiteren sieht man, dass nur bei maximaler RF Leistung (entsprechend einer Rabi-Frequenz von 5.3 kHz) eine komplette Überführung der Atome in das Shell-Potential erreicht wird. Publiziert in Stromberger, P. (2021) Coherent matter wave manipulation in microgravity, Dissertation, Mainz, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

von 5.3 kHz) können alle Atome in das Shell-Potential überführt werden. Bei kleineren Leistungen werden prozentual weniger Atome überführt.

Es wurde weiterhin untersucht, welchen Einfluss die Rampe zur Überführung der Atome in die "dressed states" hat. Es zeigte sich jedoch, dass diese Messung durch die sehr kurzen Lebensdauern stark limitiert ist. Kurze Rampe zeigen eine deutlich höhere Transfereffizienz, welche jedoch hauptsächlich durch die Lebensdauer der Zustände gegeben ist. Eine Optimierung erfordert daher die Erhöhung der Lebensdauern in den Bereich von mehreren Sekunden.

AP 12: Steuersoftware: Vereinheitlichung der Ansteuerung

Es wurden Erkenntnisse der MAIUS-1 Mission unter Berücksichtigung der Fallturmexperimente QUANTUS-1 und -2 auf das Experiment MAIUS-B übertragen und für die Nutzung in BECCAL evaluiert. Hierbei wurde in Hinblick auf eine Generalisierung der Anwendbarkeit auf verschiedenen Mikrogravitationsplattformen die Sequenzbeschreibung überarbeitet

und die entsprechenden grafischen Userinterfaces (GUIs) angepasst. Es wurde ein einfacherer Workflow von der Sequenzbeschreibung zur Ausführung der Sequenzen auf der Hardware entwickelt und in Kooperation mit dem DLR-SC sowie dem ZARM implementiert. Weiterhin wurde das Autonomiekonzept aus MAIUS-1 überarbeitet und erweitert, um die Spezialisierung der Beschreibung zu verringern und so weitere Kontrollmöglichkeiten zu erhalten. In Kooperation mit dem DLR-SC wurde hierzu eine Überarbeitung der Tools zur Implementierung des Control Flows auf der Onboard Software gestartet. Diese neue Implementierung wurde zunächst an MAIUS-B eingeführt.

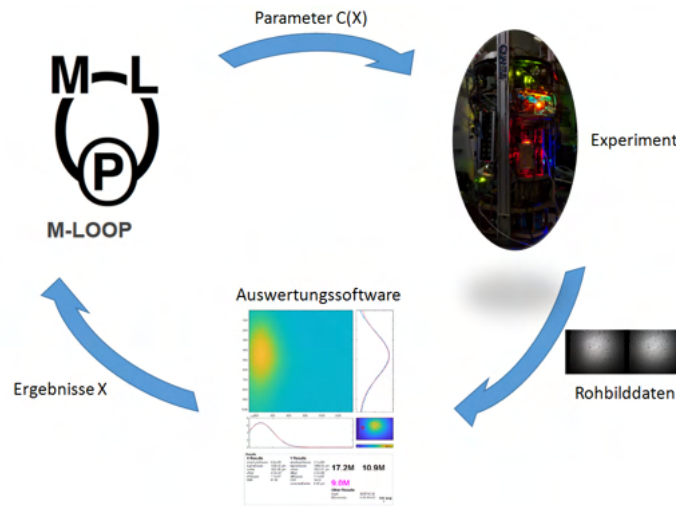


Abbildung 2.42: Schema des automatisierten Optimierungsalgorithmus auf Grundlage von Methoden des maschinellen Lernens

Es wurde ebenfalls eine Optimierungsroutine entwickelt. Bei dieser konnte mithilfe der Expertise der MAIUS-Missionen ein Autonomiekonzept umgesetzt werden, welches automatisierte Optimierungsalgorithmen auf Grundlage von Methoden des maschinellen Lernens zur Verfügung stellt. Hinsichtlich einer vorgegebenen Kostenfunktion (beispielsweise in Abhängigkeit der Atomzahlen oder Dichte) variiert der Algorithmus dabei ein vorgegebenes Parameterset (bspw. Laserleistungen und -frequenzen) innerhalb von definierten Parametergrenzen. Durch den maschinellen Lernprozess wird der verfügbare Parameterraum modelliert und die iterativ neu-berechneten Parameter lassen die Kostenfunktion zum Optimum konvergieren. Die Optimierungssoftware ist in diesem Schema als Schnittstelle zwischen Experimentsteuerung und Datenauswertung integriert und ermöglicht somit einen vollautomatisierten Betrieb für die Dauer des Optimierungsprozesses (siehe Abbildung 2.42). Im Gegensatz zum manuellen Betrieb kann durch dieses computergestützte Vorgehen eine größere Anzahl von Parametern in kürzerer Zeit auf eine gewünschte Messgröße angepasst werden.

AP 13: Simulationen von Strahlteilern im Ortsraum

Für die Simulationen des Einflusses des Lichtfelds auf die Interferometer-Trajektorien wurden zwei komplementäre Ansätze gewählt. Zunächst wurde eine sehr experimentennahe Umsetzung untersucht, welche die lokalen Intensitätsschwankungen des Laserstrahls nachbildet.

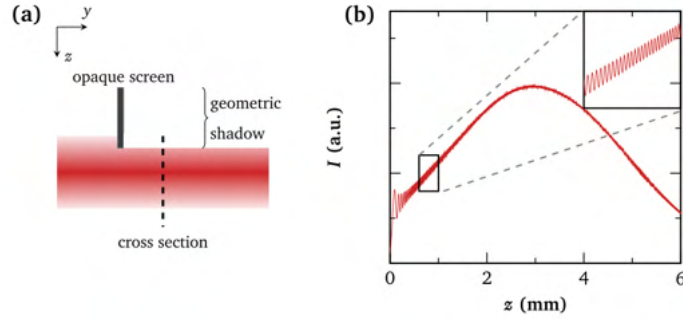


Abbildung 2.43: (a) Schema für die simulierten Lichtfeldstörungen. Ein gaußförmiger Strahl wird an einer scharfen Kante gebeugt. (b) Vertikales Intensitätsprofil des simulierten Strahls.

Diese reduzieren wiederum den Kontrast des Interferometers, da sie zu lokalen Dipolkräften führen, die zusätzliche Änderungen der atomaren Momente erzeugen. Diese Kräfte hängen von der genauen Flugbahn eines Atoms ab und weichen daher sowohl zwischen den verschiedenen Interferometerarmen als auch über eine Atomwolke hinweg ab. Experimentell entstehen diese Lichtfeldverzerrungen hauptsächlich durch Beugung an Aperturen und dem Atomchip. Daher verwenden wir für diese Simulationen einen gaußförmigen Strahl, der an einer Kante gebeugt wurde, wodurch eine normierte Intensitätsverteilung entsteht (siehe Abbildung 2.43 links). Das resultierende Dipolpotential des Strahls ist mit der Gittertiefe skaliert, die für die verschiedenen Interferometer-Realisierungen im Experiment verwendet wird. Für eine bestimmte Trajektorie, d.h. einen Interferometerarm (siehe Abbildung 2.43 rechts), wird der zusätzliche Impuls durch Integration der Dipolkraft entlang dieser berechnet. Auf diese Weise kann der Differenzimpuls zwischen beiden Interferometerarmen bestimmt werden. Schlussendlich lässt sich der daraus folgende interferometrische Kontrast bestimmen. Zusätzlich zu den oben genannten Überlegungen wird in den Simulationen auch die räumliche Ausdehnung des atomaren Wellenpakets berücksichtigt.

Für die Entwicklung einer deutlich allgemeineren Simulation eines Atominterferometers, die effizient und flexibel eine große Breite von experimentellen Imperfektionen, wie z.B. Wellenfrontabweichungen oder andere Lichtimperfektionen miteinbeziehen kann, wurde die praktische, softwaretechnische Umsetzbarkeit und gesondert davon auch deren Genauigkeit untersucht. Um die eben genannten Punkte zu analysieren, ist es notwendig zuerst einfachere Interferometergeometrien und Lichtfelder genau zu verstehen. In Abbildung 2.44) wurde ein Mach-Zehnder Interferometer, bestehend aus einem ersten Strahlteilerpuls, einem Spiegelpuls und einem zweiten Strahlteilerpuls simuliert. Es zeigt sich, dass zusätzlich zu den gewollten Interferometertrajektorien außerdem auch residuelle Trajektorien auftreten, die durch die sogenannte Geschwindigkeitsselektivität der Strahlteiler entstehen.

Kritisch für eine genaue Vorhersage sind zudem die Genauigkeiten mit denen die relativen Phasen in einem Interferometer vorhergesagt werden können. In Abbildung 2.45 kann man die relativen Genauigkeiten der Simulationen am Beispiel von zwei verschiedenen Interferometern sehen. Zuerst die obig erwähnte Standardgeometrie eines Mach-Zehnder Interferometers, welches mit numerischen Zeitschritten von $dt=1 \mu\text{m}$ sehr gute Genauigkeiten im Bereich von 10^{-12} rad aufzeigen. Im nächsten Schritt sind komplexere Lichtgeometrien in-

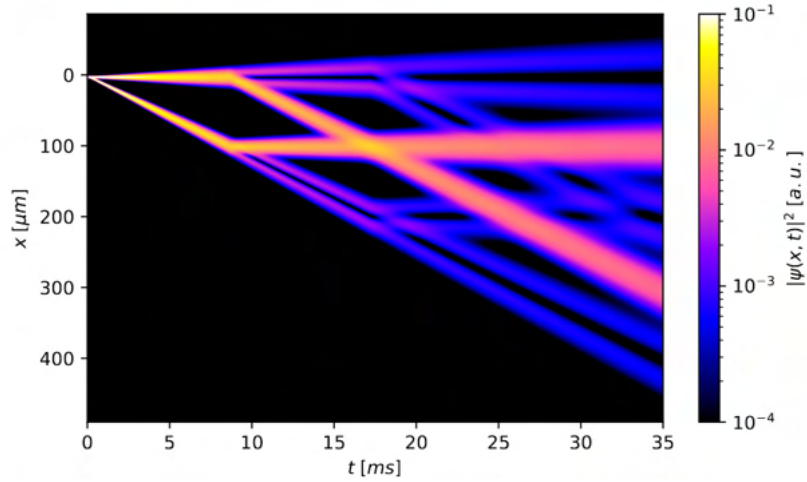


Abbildung 2.44: Plot des Absolutquadrats der Wahrscheinlichkeitsdichte eines Mach-Zehnder Atominterferometers. Adaptiert publiziert in Fitzek, F. (2024) Theory of Large-Momentum-Transfer Atom Interferometry in the Quasi-Bragg Regime, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

teressant, hier vertreten durch ein Bose-Einstein Kondensat Mach-Zehnder Interferometer in einem Gaußschen Wellenleiter, welches eine oben angesprochene nicht-triviale Erweiterung der Standardfälle darstellt. Auch hier können mit praktisch umsetzbaren Zeitschritten im Bereich von $dt=0.1 \mu\text{m}$ relative Phasengenauigkeiten von 10^{-8} rad erreicht werden.

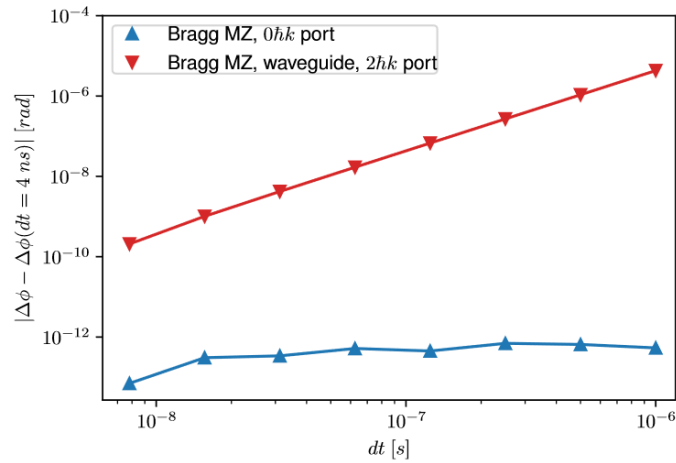


Abbildung 2.45: Numerische Genauigkeit von zwei verschiedenen Interferometer Simulationen. Adaptiert publiziert in Fitzek, F. (2024) Theory of Large-Momentum-Transfer Atom Interferometry in the Quasi-Bragg Regime, Dissertation, Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

AP 14: Interferometrie mit Kalium und Rubidium im Fallturm

Die Interferometrie mit Kalium und Rubidium im Fallturm wurde nach gemeinsamer Absprache mit Vertretern des DLR aus dem Zeitplan des Aufstockungsantrags getilgt.

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Da es sich bei diesem Verbundprojekt um ein Vorhaben aus dem Bereich der Forschung und Entwicklung handelt, fiel ein Großteil der verwendeten Mittel auf Beschäftigung der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Der Großteil der verwendeten Sachmittel wurde für Betrieb, Instandhaltung, und Umbauten der Apparaturen verwendet. Reisemittel wurden für den Betrieb der Experimente, für Projektmeetings und Konferenzen verwendet.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Aktivitäten des Verbundprojektes "QUANTUS V – Fallturm" sind der physikalischen Grundlagenforschung zuzurechnen. Diese Art von Forschung erfordert öffentliche Zuwendung. Die Ressourcen an Personal und finanzieller Mittel für den Betrieb der Apparaturen, notwendig für die Durchführung des Forschungsprogramms, überstiegen die Finanzen der einzelnen Partner und konnten von diesen nicht getragen werden. Diese Aktivitäten mussten daher mit Drittmitteln finanziert werden. Die gezahlten Mittel wurden nicht der Grundausrüstung der Universität zugerechnet und wurden ausschließlich für Projektzwecke eingesetzt.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse stellen eine erhebliche Weiterentwicklung im Bestreben dar, Sensoren auf Basis von Atominterferometern mit ultrakalten Atomen zukünftig im Weltraum zu nutzen. An den Experimenten QUANTUS-1 und QUANTUS-2 wurden in Zusammenarbeit mit den Theoriegruppen die dazu nötigen physikalischen Methoden entwickelt und Studien zu extrem langen Expansionszeiten und neuartigen Interferometergeometrien durchgeführt.

Das Projekt bildet zudem ein Fundament für BECCAL, das bilaterale Projekt zwischen der NASA und dem DLR, welches zum Ziel hat, in den nächsten Jahren eine Apparatur zur Durchführung von Experimenten mit ultrakalten Ensembles, insbesondere Bose-Einstein Kondensaten, auf die Internationale Raumstation ISS zu bringen. Die wissenschaftlichen Methoden und technologischen Entwicklungen wurden hierbei im Rahmen des Projektes QUANTUS-V-Fallturm weiterentwickelt und dienen so der erfolgreichen Durchführung des Projektes BECCAL. Die aktuelle Nutzung der Ergebnisse und der Expertise zur Analyse von Experimenten in NASAs Cold Atom Laboratory (CAL) auf der ISS im DLR Projekt CAL-I unterstreicht die Relevanz.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten

Auf dem Gebiet der Untersuchung und Nutzung von ultrakalten Ensembles in Schwerelosigkeit sind in erster Linie zwei Gruppen hervorzuheben, das I.C.E. (Interférométrie atomique

à sources Cohérentes pour l'Espace) Konsortium aus Frankreich, und das Jet Propulsion Laboratory (JPL) aus den USA. Beim I.C.E.-Konsortium handelt es sich um eine Zusammenarbeit verschiedener französischer Universitäten und Forschungsinstitute zur Realisierung und Erforschung der Atominterferometrie mit kalten und ultrakalten atomaren Ensembles innerhalb eines Zero-G-Airbus, bzw. seit 2018 in einem 3 m hohen Einstein-Elevator. Dort konnte in 2019 die Erzeugung von zwei-Spezies BECs mittels rein optischem Fangen und Kühlen demonstriert werden. Zusätzlich gelang in 2022 die Realisierung eines EEP-Tests in der Schwerelosigkeit des Einstein Elevators. Jedoch war dieser Test dadurch limitiert, dass nur thermische Atome und eine recht kurze Interrogationszeit von 40 ms genutzt wurden. Das JPL entwickelte und betreibt erfolgreich das CAL (Cold Atom Laboratory)-Experiment, welches sich seit Mai 2018 auf der Internationalen Raumstation befindet und dort Experimente mit ultrakalten atomaren Ensembles aus Rubidium, Kalium, und deren Mischungen erlaubt. So konnten an der CAL-Apparatur z.B. die Erzeugung, der Transport und die Delta-Kick-Kollimation bis auf Temperaturen von 50 pK studiert werden. Ebenfalls konnten BECs in schalenförmigen Potentialen untersucht werden und auch erstmalig Atominterferometrie mit Mischungen aus Rb und K-Atomen im Weltraum durchgeführt werden.

Zusätzlich wird auch in China die Erforschung von Materiewellen und ultra-kalter atomarer Ensembles vorangetrieben. So konnte an Bord der China Space Station (CSS) ein Mikrogravitationslabor (MSLC) eingerichtet werden, für welches eine Interferometer Nutzlast mit zwei Arten von kalten Rubidium-Atomen entworfen und realisiert wurde. Das wichtigste wissenschaftliche Ziel des Projekts ist es, das Äquivalenzprinzip mit hoher Präzision zu testen. Außerdem wurden 2022 an der 10 m Fontäne in Wuhan Atominterferenzstreifen mit einer freien Entwicklungszeit von 2,6 s gezeigt. Diese Zeit ist die längste im Labor realisierte Dauer, und die entsprechende Auflösung der Schwerkraftmessung beträgt $4,5 \times 10^{-11} g$ pro Schuss.

2.6 Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten

2.6.1 Veröffentlichungen

- M. Gersemann, M. Gebbe, S. Abend, C. Schubert, & E. M. Rasel *Differential interferometry using a Bose-Einstein condensate*, European Physical Journal D, **74(10)**, 203 (2020).
- C. Deppner, W. Herr, M. Cornelius, P. Stromberger, et al. *Collective-mode enhanced matter-wave optics*, Physical Review Letters **127**, 100401 (2021).
- M. Gebbe, J-N Siemß, M. Gersemann, et al. *Twin-lattice atom interferometry*, Nature Communications **12**, 2544 (2021).
- S. Kanthak, M. Gebbe, M. Gersemann, et al. *Time-domain optics for atomic quantum matter*, New Journal of Physics **23**, 093002 (2021).
- C. Schubert, S. Abend, M. Gersemann, M. Gebbe, D. Schlippert, P. Berg, & E. M. Rasel. *Multi-loop atomic Sagnac interferometry*, Scientific Reports, **11(1)**, 16121 (2021)

- S. Abend, B. Allard, A. S. Arnold, T. Ban, L. Barry, B. Battelier, et al. *Technology roadmap for Cold-Atoms based Quantum Inertial Sensor in Space*, AVS Quantum Sci., **5**(1), 019201 (2023).

2.6.2 Abschlussarbeiten

- Mikhail Cheredinov, *A laser system for absolute light-shift compensation in a twin-lattice interferometer*, 2021, Masterarbeit
- Peter Stromberger, *Coherent matter wave manipulation in microgravity*, 2021, Doktorarbeit
- Merle Cornelius, *Atom interferometry with picokelvin ensembles in microgravity*, 2022, Doktorarbeit
- Christian Deppner, *Ein Materiewellenlinsensystem zur Kollimierung der Expansion eines Bose-Einstein Kondensates unter Schwerelosigkeit*, 2023, Doktorarbeit
- Matthias Gersemann, *Atom interferometry with ultracold atoms for inertial sensing*, 2023, Doktorarbeit
- Jan-Niclas Kirsten-Siemß, *Theory of Large-Momentum-Transfer Atom Interferometry in the Quasi-Bragg Regime*, 2023, Doktorarbeit
- Julia Pahl, *Atom interferometric experiments with Bose-Einstein condensates in microgravity*, 2024, Doktorarbeit

2.6.3 Geplante Veröffentlichungen

Es sind weitere Publikation geplant, die die Fortschritte, die innerhalb des Vorhabens erzielt wurden, zum Thema haben. Insbesondere ist eine Veröffentlichungen zu den sehr erfolgreichen Experimenten zur Realisierung eines Scherinterferometers zur Bestimmung der Impulsverteilung nach eine magnetischen Linse in Planung. Außerdem sollen die Experimente zu Materiewelleninterferometern auf ultra-langen Zeitskalen Grundlage für eine weitere Publikation bilden. Die Experimente im GraviTower Pro sollen ebenfalls Gegenstand einer weiteren Veröffentlichung sein.