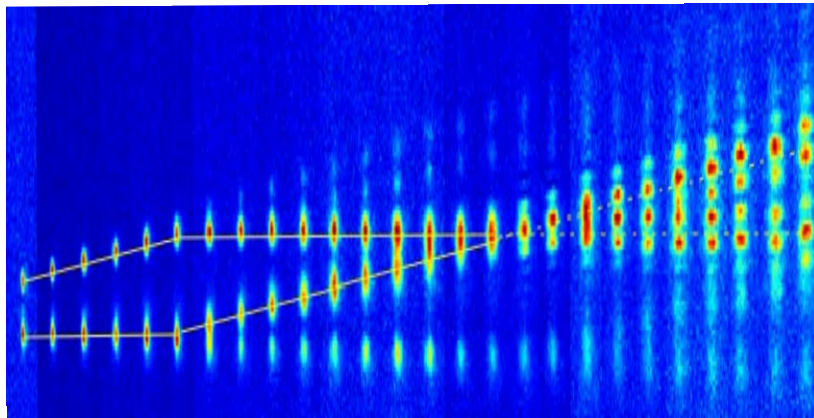


**Verbundprojekt:
Bose-Einstein Kondensate unter Schwerelosigkeit
QUANTUS**

Verbundpartner: Humboldt-Universität zu Berlin (HUB)



**Abschlussbericht für das Teilprojekt
Lasersystem Entwicklung und Atominterferometrie**

Achim Peters, AG Optische Metrologie, Humboldt-Universität zu Berlin

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für *Wirtschaft und Technologie* unter dem Förderkennzeichen 50 WM 0839 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

I.	Darstellung des Verbundprojektes QUANTUS I+II.....	5
1.	Aufgabenstellung und Zielsetzung von QUANTUS I+II.....	5
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
II.	Eingehende Darstellung der Arbeiten im Teil-projekt „Lasersystem Entwicklung und Atom-interferometrie“.....	9
1.	Ergebnisse.....	9
2.	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	20
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	20
4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	21
5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	21
6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	21

I. Darstellung des Verbundprojektes QUANTUS I+II

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung von QUANTUS I+II

Dieses Projekt zielt im Verbund mit den anderen Projektpartnern auf die parallele Erforschung neuer physikalischer Parameterbereiche an der existierenden QUANTUS Fallturmapparatur und die Weiterentwicklung der Quantengas-Technologie für einen Raumfahrteinsatz. Die Erfahrungen aus den gemeinsam mit allen Partnern an der Fallturmapparatur in Bremen durchgeführten Forschungsprojekten werden dabei essentielle Informationen für die weiteren gemeinsam koordinierten Technologie-Entwicklungen an den einzelnen Projektpartner-Standorten liefern. Die Hauptziele des Verbundprojektes QUANTUS sind im Abschlussbericht des koordinierenden Projektpartners LUH dargelegt.

Die Ziele des Verbundprojektes können in folgenden Schwerpunkten zusammengefasst werden:

QUANTUS I	QUANTUS II
<ul style="list-style-type: none"> • Physik bei sub-Nano Temperaturen • Untersuchung der Kohärenz von Bose-Einstein Kondensaten und ihre Entwicklung • Atomoptik mit Materiewellen • Kontrolle von Wellenpaketen zur Verwendung in der Atominterferometrie, Lange Beobachtungszeiten • Tests auf dem Gebiet der fundamentalen Physik, neuartige Sensoren mit ultrakalten Atomen 	<ul style="list-style-type: none"> • Starke Reduktion der Größe, des Gewichts und der Leistungsaufnahme • Kombination einer zwei-dimensionalen magneto-optischen Falle mit der Atomchiptechnologie • Entwicklung eines für die Operation in Schwerelosigkeit optimierten Atomchips • Erweiterung der Apparatur auf zwei Atomspezies • Erhöhung der Teilchenzahl • Reduktion der experimentellen Gesamtzykluszeit • Atominterferometrie mit zwei Spezies (Test des Äquivalenzprinzips)

Im Folgenden werden nur die spezifischen Aufgabenstellungen und Zielsetzungen des von der HUB bearbeiteten Teilprojektes geschildert.

Zielstellung im Projektbereich QUANTUS I war die Erforschung kalter Quantengase im freien Fall mit Hilfe der bestehenden QUANTUS Apparatur. Bei der Durchführung von Experimenten mit der QUANTUS Apparatur lag der Schwerpunkt der HUB Arbeiten im Bereich der von LUH/ZARM koordinierten Experimente zur Atominterferometrie. Neben einer Beteiligung an der Ausarbeitung experimenteller Strategien wurde dabei insbesondere ein zusätzliches Zwei-Frequenz-Lasermodul entwickelt und bereitgestellt, welches die Implementierung von alternativ Raman- oder Bragg-Strahlteilern basierend auf Lichtpulsen ermöglichen sollte.

Zentrale Rolle der HUB im Projektbereich QUANTUS-II war in enger Kooperation mit dem FBH die Entwicklung miniaturisierter hybrider Lasersysteme. Darüber hinaus sollte die HUB die Projektpartner bei der Implementierung der Lasersysteme für die QUANTUS-II-Apparatur sowie bei der Entwicklung von Lasersystemen für eine zweite atomare Spezies unterstützen. Als Referenz für diese Arbeiten sollte zudem ein neues Master-Lasermodul basierend auf einem mechanisch stabilen External Cavity Diodenlaser bereitgestellt werden.

Die Schwerpunkte der wissenschaftlichen Untersuchungen sind dabei:

QUANTUS I	QUANTUS II
<ul style="list-style-type: none"> • Koordinierung Betriebsoptimierung der QUANTUS Apparatur in Zusammenarbeit mit allen Partnern. HUB Aufgabe dabei insbesondere Minimierung elektromagnetischer Störeinflüsse. • Erzielung tiefster Temperaturen (Koordiniert von UHH): Minimierung elektromagnetischer Störeinflüsse. • Atominterferometrie (Koordiniert von LUH/ZARM): Lasermodul für die Implementierung von Raman- oder Bragg-Beamsplittern. 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordination der Entwicklung neuer optischer Elemente und Subsysteme. HUB Aufgabe hierbei insbesondere Entwicklung miniaturisierter hybrider Lasersysteme in enger Kooperation mit dem FBH. • Apparatur (Koordiniert von LUH/ZARM/ENS): Zusammenstellung und Optimierung der Stabilität der Lasersysteme. Lasersystem für 2D-MOT. • Erweiterung auf fermionische Systeme: Unterstützung bei der Entwicklung der notwendigen Lasersysteme.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

QUANTUS-II wurde als Kooperation mit universitären Gruppen und Forschungseinrichtungen gestartet, die eine weltweite Expertise unter anderem auf dem Gebiet der Atomoptik, Atomlaser und Mikrogravitation besitzen. Die Entwicklungsschritte wurden im Rahmen der verfügbaren finanziellen Mittel mit einer hohen Parallelität durchgeführt.

Die involvierten Gruppen waren:

- Ernst M. Rasel, Wolfgang Ertmer, Institut für Quantenoptik, Universität Hannover: Atomoptische Methoden
- Kai Bongs, Klaus Sengstock, ILP, Universität Hamburg: Laser zur Manipulation der Atome, Atom-optische Methoden
- Claus Lämmerzahl, Hansjörg Dittus, ZARM/Universität Bremen: Fallkapselintegration und Mikrogravitation
- Achim Peters, AG Optische Metrologie, Humboldt-Universität zu Berlin: Laserstabilisierung und Laserkonzeption
- Theodor Hänsch, Jakob Reichel, Max-Planck Institut für Quantenoptik, München: Atomchip-Technologie
- Reinhold Walser, Wolfgang P. Schleich, Abteilung für Quantenphysik, Universität Ulm: Theoretische Modellierung

Die beteiligten Institute führten die Arbeiten im Rahmen von Diplom- und Doktorarbeiten durch.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Ausgehend von der ersten erfolgreichen Kondensation von Rubidiumatomen unter Schwerelosigkeit im November 2007 wurde die QUANTUS-I Apparatur von Ende 2007 bis Anfang 2009 detailliert charakterisiert. Weltweit erstmalige Studien zur Evolution von Bose-Einstein Kondensaten bis zu einer Sekunde wurden in unserer Veröffentlichung von Zoest et al., Science 1540-1543 (2010) vorgestellt. Die dramatische Auswirkung von diesen residuellen elektro-magnetischen Streufeldern auf die Expansion des Kondensats wurde untersucht und um ein theoretisches Modell erweitert.

Im April 2009 kam es nach einem Abwurf zu einem elektrischen Versagen, welches den Austausch des Atomchips und dementsprechend ein Öffnen des Vakuums nötig machte. Die Neufertigung eines Atomchips wurde notwendig und dieser konnte im September 2009 in eine modifizierte Vakuumkammer eingebaut und integriert werden. Die Modifikationen betreffen u.a. eine neue Abbildung für zusätzliche optische Teleskope um die Lichtstrahlen für interferometrische Anwendungen auf das Kondensat abbilden zu können. Die für die Erweiterung zu einem Materiewelleninterferometer in einem magnetisch insensitiven Zustand nötigen Arbeiten konnten Mitte 2010 abgeschlossen werden. Die auf Braggbeugung basierende kohärente Manipulation des Kondensats und die realisierten Interferometertopologien wurden zunächst vollständig im Laborbetrieb charakterisiert. Bis Ende der Laufzeit des Verbundprojektes konnten mit der QUANTUS-I Apparatur in mehreren Messkampagnen Ramsey- und Mach-Zehnder Interferometer in Schwerelosigkeit analysiert werden. Um die Beobachtungszeit im freien Fall weiter vergrößern zu können wurde parallel zu den Arbeiten in der Interferometrie eine magnetische Linse implementiert. Durch die Kollimation von Wellenpaketen wird die freie Evolutionszeit der Atome vergrößert.

Mit dem Aufbau von QUANTUS-II in einer katapultfähigen Fallturmkapsel konnte aufgrund unvorhergesehener Verzögerungen in der Design- sowie Testphase nur verspätet begonnen werden. Die Herstellung eines neuartigen Atomchips, der im Vergleich zur ersten Generation eine größere Kontrolle und Variabilität in der Bereitstellung ultrakalten Quantengase ermöglicht, erforderte einen dementsprechend größeren Zeitraum. Ein Einbau in die Vakuumapparatur konnte dadurch erst Ende 2009 realisiert werden. Eine weitere Änderung des Ablaufes des Vorhabens ist durch unerwartet schlechte Effizienzen der Dispenser begründet. Durch die Inbetriebnahme der Apparatur gegen Ende 2010 konnten erste, viel versprechende atomoptische Experimente durchgeführt werden (siehe Abschlussbericht LUH).

Aus der Evaluierung der Anforderungen an die QUANTUS-II Apparatur ergab sich die Notwendigkeit, diese mit einem komplett neu entwickelten Lasersystem zu betreiben. Dieses sollte während der Projektlaufzeit an der HUB entwickelt werden. Durch die dafür zusätzlich nötige Designphase und die gestiegene Komplexität des Aufbaus sowie die für einen Einsatz im Katapultbetrieb notwendigen Stabilitätstests auf Komponenten- und Systemebene kommt es zu einer Verzögerung des Ablaufplans des Experiments QUANTUS-II von 15 Monaten.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Für die Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten wurden Verfahren für die Kühlung und Manipulation von atomaren Gasen eingesetzt, wie sie seit Mitte 1990 an einer Vielzahl von quantenoptischen Experimenten weltweit im Einsatz sind. In diesem Verbundprojekt wurde die mit dem Pilotprojekt QUANTUS begonnene technologische Entwicklung dieser Methoden für einen Einsatz im freien Fall stringent weiterentwickelt. Zu diesen wissenschaftlichen und technischen Verfahren zählen insbesondere

- Laserkühlung von Atomen
- Distributed Feedback (DFB) Laser
- External cavity diode laser (ECDL)
- Hybrid integrierte Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) Lasersysteme
- Konservative, magnetische Speicherpotenziale
- Atomchip
- Evaporative Kühlung
- Adiabatisch rapide Passage zum Transfer in einen magnetisch insensitiven Zustand
- Kohärente Manipulation von Atomen durch Braggbeugung

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

QUANTUS ist eine Kooperation universitärer Gruppen und Forschungseinrichtungen. Mitglieder sind:

- Ernst M. Rasel, Wolfgang Ertmer, Institut für Quantenoptik, Universität Hannover
- Kai Bongs, Klaus Sengstock, ILP, Universität Hamburg
- Claus Lämmerzahl, Hansjörg Dittus, ZARM/Universität Bremen
- Achim Peters, AG Optische Metrologie, Humboldt-Universität zu Berlin
- Theodor Hänsch, Jakob Reichel, Max-Planck Institut für Quantenoptik, München
- Reinhold Walser, Wolfgang P. Schleich, Abteilung für Quantenphysik, Universität Ulm

Die Arbeiten an den neuartigen hybrid integrierten Lasersystemen erfolgten in enger Kooperation mit dem Ferdinand-Braun Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin.

II. Eingehende Darstellung der Arbeiten im Teilprojekt „Lasersystem Entwicklung und Atominterferometrie“

1. Ergebnisse

Im Rahmen des Verbundprojektes Bose-Einstein Kondensate unter Schwerelosigkeit wurde aufbauend auf den Arbeiten und Ergebnissen des Pilotprojektes QUANTUS eine Vielzahl von wissenschaftlichen und technologischen Ergebnissen erzielt. Im Folgenden werden die Arbeiten des Teilprojektes „Laser System Entwicklung und Atominterferometrie“ eingehend dargestellt.

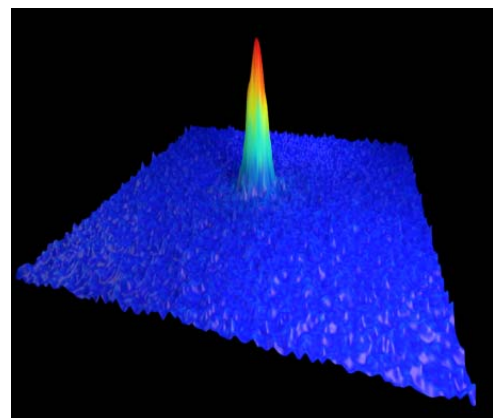
QUANTUS I

a) Betriebsoptimierung der QUANTUS-I Apparatur

Zusammen mit den beteiligten Projektpartnern wurde eine detaillierte Betriebsoptimierung der bestehenden QUANTUS-I Apparatur vorgenommen, die mittlerweile in über 260 Abwürfen Ergebnisse von wissenschaftlicher Relevanz produziert hat. Diese setzt sich aus folgenden Meilensteinen (siehe auch Abschlussbericht LUH) zusammen:

- Optimierung der experimentellen Sequenz
- Optimierung Evaporation unter den Bedingungen des freien Falls
- Präzise Kontrolle der externen Freiheitsgrade und Minimierung der elektromagnetischen Störeinflüsse
- Transfer in einem magnetisch insensitiven Zustand

Die Bose-Einstein Kondensate, die erstmalig mit dem in QUANTUS-I zum Einsatz kommenden Atomchip der ersten Generation in 2007 erzeugt wurden, wiesen eine sehr kleine Anzahl von einigen tausend Atomen auf. Eine niedrige Atomzahl zu Beginn des Experiments, ein geringer Modenüberlapp zwischen den Fallen sowie die stark asymmetrische Form der Joffe-Pritchard-Falle erforderten eine sorgfältige Optimierung aller experimentellen Schritte. Nach sorgfältiger Analyse der vielfältigen Einflüsse auf den Kondensationsprozess im freien Fall werden mittlerweile routinemäßig ultrakalte Ensembles mit über 10000 Atomen erzeugt. Das übertrifft die ursprünglichen Erwartungen an die Performance des Atomchips bei weitem und bestätigt die Eignung eines Atomchips als Quelle für kohärente Materiewellen. In dem Bild auf der rechten Seite ist eine Kondensat mit 12000 Atomen dargestellt, welches nach einer freien Evolutionszeit von 100ms detektiert wurde. Weitere Unterpunkte der Optimierung waren die Evaluation unterschiedlicher Abschirmungskonzepte, Maßnahmen zur Kontrolle der Laserparameter während aller Experimentphasen sowie die mechanische Einflüsse auf die Stabilität der optischen Manipulation der Atome.



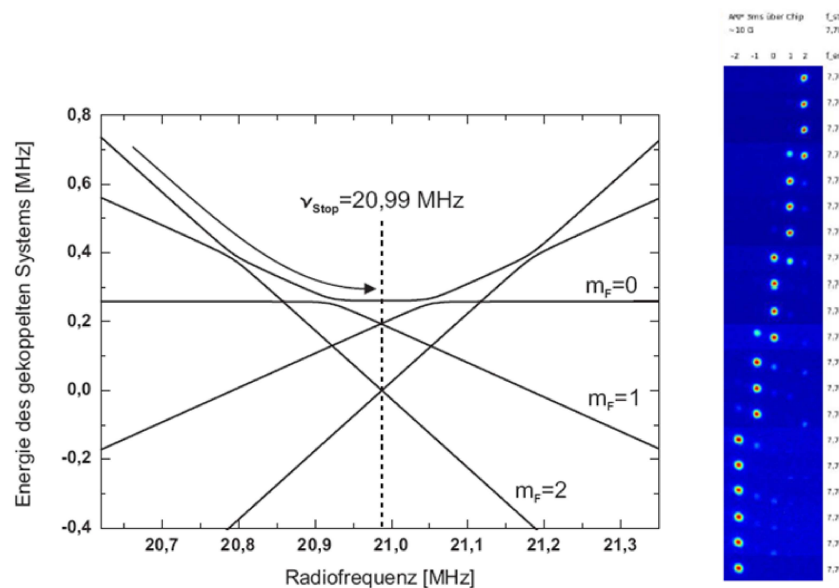


Abbildung II-1: Adiabatische rapide Passage zum Transfer der Atome in den magnetisch insensitiven Zustand $m_F=0$

Als ein weiterer, wichtiger Entwicklungsschritt der Systemoptimierung wurden elektromagnetische Störfelder analysiert, sowie eine grundlegende Lösungsstrategie dieser Problematik erarbeitet. In unserer Veröffentlichung von Zoest et al., Science 1540-1543 (2010) haben wir die dramatische Auswirkung dieser residuellen elektro-magnetischen Streufeldern auf die Expansion des Kondensats untersucht. Der Einfluss auf die räumliche Ausdehnung sowie die Schwerpunktsbewegung der Wellenpakete in einem magnetisch *sensitiven* Zustand ($m_F=2$) würde u.a. interferometrische Messungen auf großen Zeitskalen stark limitieren.

Aus diesem Grund wurde eine sogenannte adiabatische rapide Passage (ARP) implementiert, siehe Abbildung II-1, welche Atome des Kondensats in einen magnetisch *insensitiven* Zeeman-Zustand ($m_F=0$) transferiert. Unter Anwendung eines starken Magnetfeldes können je nach Intensität und Frequenz eines eingestrahlichten elektromagnetischen Feldes durch eine Antenne auf dem Atomchip auch Quantengasgemische und kohärente Überlagerungen verschiedener Zeeman-Zustände für Vergleichsmessungen erzeugt werden. Diese Präparation ist eine wichtige Voraussetzung für die definierte Beschleunigung des Kondensats weg von der Chipoberfläche sowie für Arbeiten mit einem Materiewelleninterferometer. Der Einfluss der Restmagnetfelder auf die freie Phasenentwicklung der Atome innerhalb des Interferometers kann dadurch minimiert werden.

b) Erzielung tiefster Temperaturen

Neben der reproduzierbaren Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten mit 10000 Atomen ist das kontrollierte, adiabatische Öffnen der finalen Magnetfalle einer der entscheidenden Faktoren für die erfolgreiche Durchführung nachfolgender Messungen. Diese muss dabei auf relativ langen Zeitskalen erfolgen, damit die kinetische Energie des Ensembles minimiert werden kann und keine ungewünschten Anregungen auftreten. Ein zu schnelles Öffnen würde zu einer großen Expansionsgeschwindigkeit führen, sodass die Beobachtungszeit stark limitiert wäre. Ein langsames Öffnen ist somit für eine Minimierung der Restgeschwindigkeit des Ensembles und die kontrollierbare Bereitstellung des Kondensats für interferometrische Anwendungen notwendig.

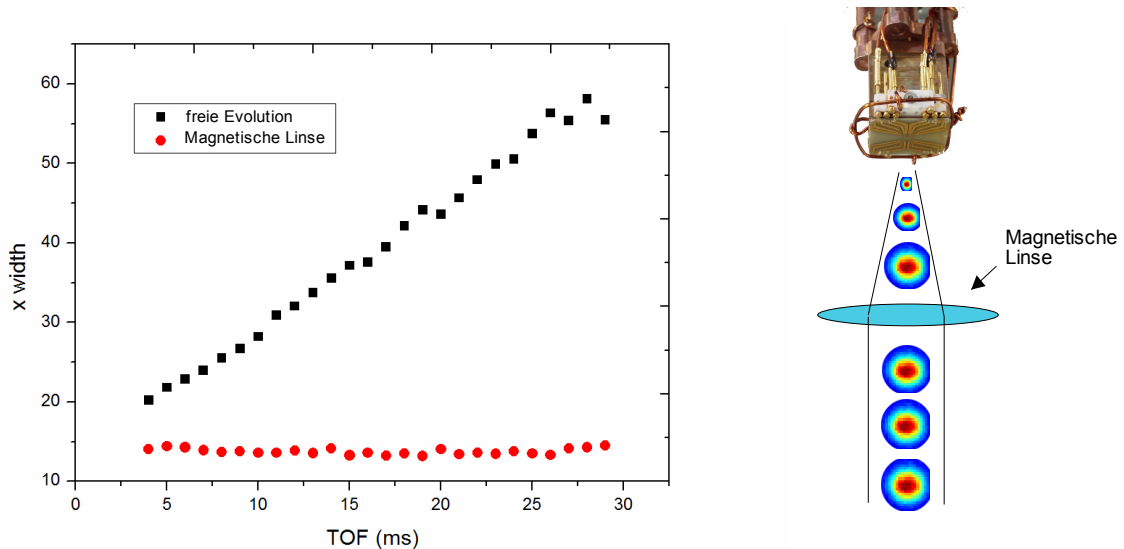


Abbildung II-2: Einfluss der magnetischen Linse auf die Expansion des Kondensats

Um diese Zeit stark reduzieren zu können und eine weitere Verringerung der Temperatur des Kondensates bis in den Sub-Nanokelvin Bereich zu ermöglichen, wurde eine so genannte „Delta-kick“ Kühlung mit magnetischen Feldern implementiert (siehe Abschlussbericht LUH). Dabei wird für einen sehr kurzen Zeitraum ein magnetisches Feld eingestrahlt, siehe Abbildung II-2, welches dem Kondensat einen signifikanten Teil seiner kinetischen Energie entzieht. Dadurch kann die Expansionsgeschwindigkeit der Atomwolke drastisch reduziert werden, sodass man analog zur Optik von der Kollimation von Materiewellen mit einer „magnetischen Linse“ sprechen kann. Erste Ergebnisse lassen hoffen, mit dieser Methode Expansionszeiten im Bereich über einer Sekunde beobachten zu können. Nach Charakterisierung der „magnetischen Linse“ in erdgebundenen Messkampagnen wurde diese neuartige Technik auch unter Bedingungen des freien Falles erfolgreich eingesetzt.

c) Atominterferometrie

Die HUB hat bei der Bearbeitung des von der LUH koordinierten Arbeitspakets „Atominterferometrie mit Bose-Einstein Kondensaten“ mitgewirkt. Die inhaltlichen Schwerpunkte bildeten dabei:

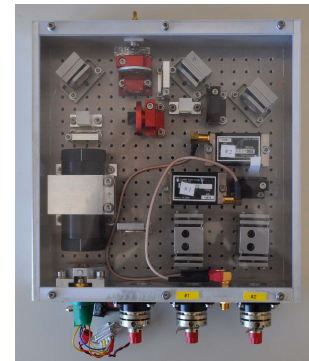
- Aufbau eines Bragg-Laser-Systems (zusammen mit LUH) und Entwicklung der Steuerungselektronik für die Realisierung kurzer Lichtpulse für die Interferometrie
- Theoretische Vorüberlegungen zu den benötigten Parameter für eine effiziente Licht-Atom Wechselwirkung
- Implementierung und Einsatz des Bragg-Laser-Systems an der bestehenden QUANTUS-I Apparatur
- Kontrollierte Teilung des Bose-Einstein Kondensates durch Laserlicht
- Realisierung und Charakterisierung unterschiedlicher Beugungsgeometrien im Rahmen von Ramsey-artigen und Mach-Zehnder-artigen Interferometern sowohl im Laborbetrieb als auch unter den Bedingungen des freien Falles

Zusätzlich wurde ein Raman-Laser-System geplant und aufgebaut, welches ebenfalls für die ultrapräzise Manipulation von kohärenten Wellenpaketen verwendet werden kann. Im Gegensatz zu dem Bragg-Laser-System werden hierbei Atome mit *unterschiedlichen* internen Zuständen in eine kohärente Superposition gebracht. Dieses wurde mit der Option realisiert, sowohl in dem bestehenden QUANTUS-I Experiment als auch in der neu entstehenden QUANTUS-II Apparatur eingesetzt werden zu können. Ziel war ein möglichst flexibles Design, um je nach wissenschaftlicher Situationen einen frühzeitigen Einsatz in

einer der beiden Kapseln ermöglichen zu können. Noch zu erfolgende, vergleichende Studien beider atomoptischer Manipulationsverfahren werden Aufschluss über die Eignung in zukünftigen hochpräzisen Interferometern auf Basis ultrakalter Atome liefern.

Bragg Laser System

Für die Realisierung erster interferometrischer Messungen mit Bose-Einstein Kondensaten in Schwerelosigkeit wurde ein Lasersystem benötigt, welches mit zwei Lichtfrequenzen (ω und $\omega + 15\text{kHz}$) eine kohärente Überlagerung zweier externer atomarer Zustände erzeugt. Diese Superposition von unterschiedlichen Impulszuständen der Atome im BEC führt zu einer räumlichen Teilung des Kondensats. Je nach Festlegung der zugänglichen Parameter kann das Verhältnis der Besetzung der beiden Impulszustände kontrolliert werden. Das Lasersystem wurde in Kooperation mit der LUH in Berlin aufgebaut. Ebenfalls wurde die nötige Elektronik für einen Betrieb in der QUANTUS-I Apparatur bereitgestellt, als auch ein Konzept realisiert, welches die Erzeugung kurzer Lichtpulse für die effiziente Manipulation der Atome ermöglicht. Das System wurde in die QUANTUS-I Apparatur integriert und bis zum heutigen Zeitpunkt in über 50 Abwürfen störungsfrei in verschiedenen interferometrischen Messungen genutzt.



Kohärente Manipulation des Bose-Einstein Kondensats

In einer ersten Reihe von Experimenten wurde die Effizienz und die Reproduzierbarkeit der Teilungspulse detailliert untersucht. Werden die Atome mit Impuls p kontinuierlich mit den bifrequenten Lichtfeldern beleuchtet, so führen die Atome Oszillationen zwischen den beiden kohärent überlagerten Impulszuständen p und $p+2\hbar k$ durch. Die Detektion solcher sogenannter Rabi-Oszillationen unterstreichen die Güte der Atom-Licht Wechselwirkung und gibt Hinweise auf die für ein Interferometer zu wählenden Lichtfeldparameter.

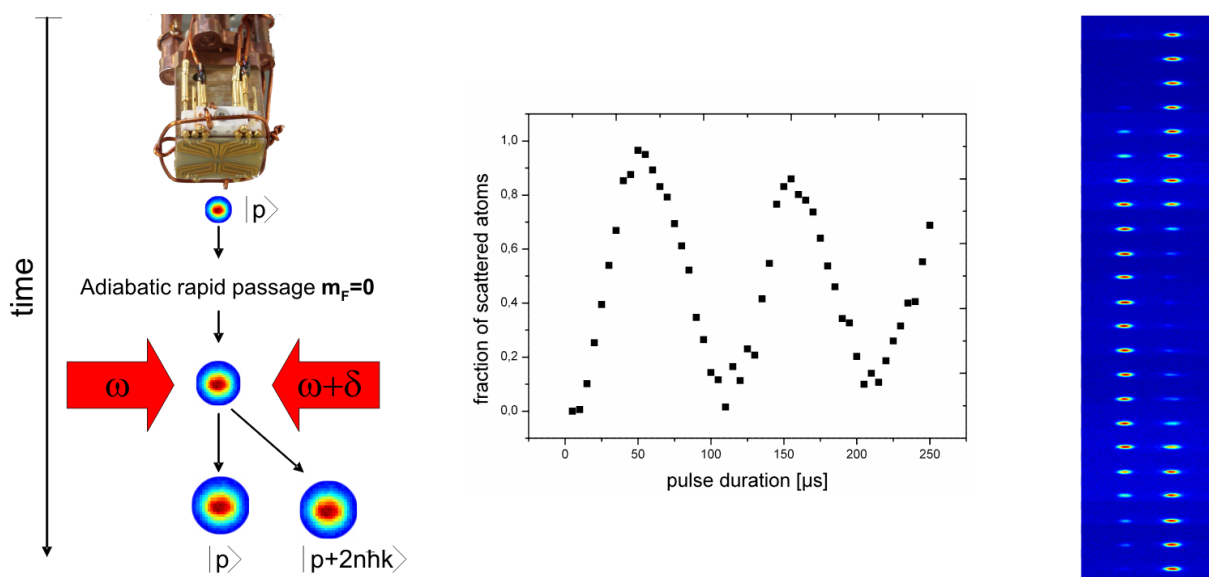


Abbildung II-3: Kohärente Manipulation des Bose-Einstein Kondensats durch Laserlicht

Je nach Wahl der Pulsdauer können so unterschiedliche Besetzungen der beiden Impulskomponenten kontrolliert realisiert werden. Bei einem sogenannten $\pi/2$ -Puls werden die Atome zwischen beiden Zuständen gleichverteilt, analog zu einem optischen Strahlteiler für Licht. Bei einem π -Puls werden alle Atome kohärent in den jeweils anderen Zustand überführt, man spricht von einem Spiegel für Materiewellen. In Abbildung II-3 ist die Besetzung des Impulszustandes $p + 2\hbar k$ in Abhängigkeit der Einstrahldauer sowie ein Auszug der dazugehörigen Absorptionsoptionen dargestellt. Aus diesem Graphen lässt sich die Dauer für einen $\pi/2$ -Puls von $25\mu\text{s}$ ablesen, ein π -Puls lässt sich demnach durch eine Lichtpulsdauer von $50\mu\text{s}$ realisieren.

Ramsey-artiges Interferometer

Um die Phasenkohärenz unseres Kondensates und den Einfluss der Strahlteilungspulse zu untersuchen, wurde zunächst eine Zwei-Puls-Sequenz untersucht. Bei dieser teilen wir das Kondensat zunächst mit einem $\pi/2$ -Puls. Während der darauf folgenden Pausenzeit τ entwickeln sich beide Impulskomponenten räumlich auseinander, bis ein weiterer $\pi/2$ -Puls abermals beide Wellenpakete räumlich teilt. Dieses Schema hat zum Ergebnis, zwei Ausgänge dieses so genannten Ramsey-Interferometers zu detektieren, bei denen sich jeweils zwei Kondensate räumlich überlagern. Die durch den räumlichen Versatz entstehenden Phasenunterschiede führen zur Ausbildung eines Interferenzmusters. In Abhängigkeit von der Variation der Pausenzeit τ zwischen beiden Teilungspulsen als auch der absoluten Entwicklungszeit T lässt sich der Abstand der Maxima bzw. Minima des Interferenzmusters beeinflussen. Der Zusammenhang ist in Abbildung II-4 dargestellt. Der hohe Kontrast des Musters bestätigt die hohe Kohärenz unseres Wellenpakets und ermöglichte einen Vergleich der experimentellen Daten mit den theoretischen Vorhersagen. Bei erdgebundenen Messungen sowie im freien Fall mit bis zu einer maximalen freien Entwicklungszeit von 500ms konnte eine hervorragende Übereinstimmung nachgewiesen werden.

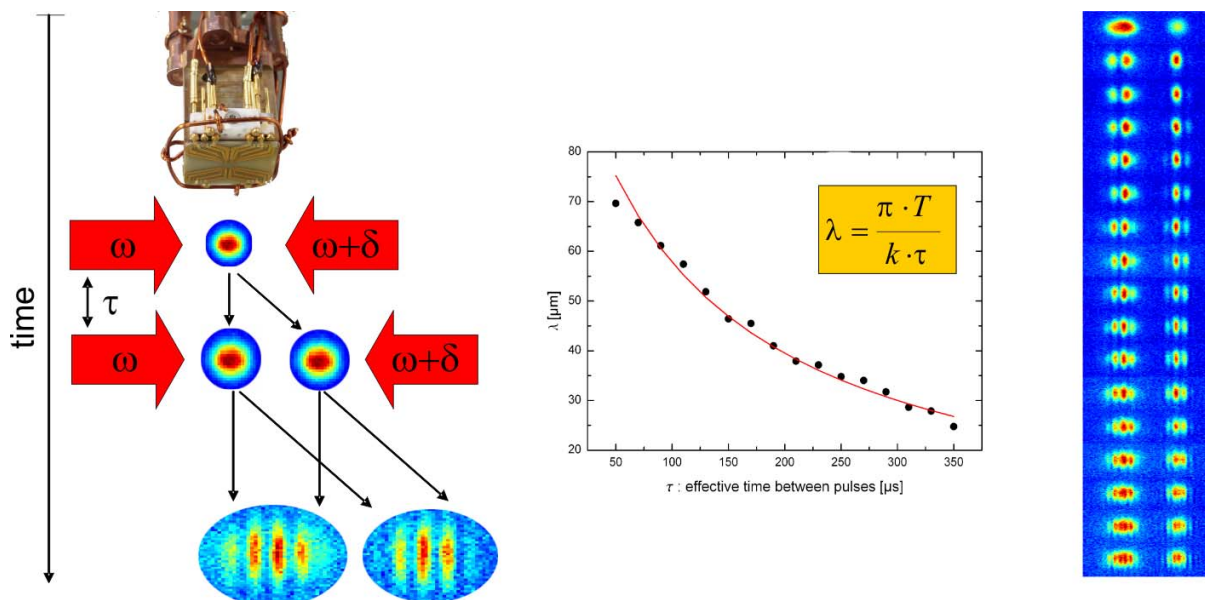


Abbildung II-4: Ramsey Interferometer zur Kohärenzanalyse

Mach-Zehnder-artiges Interferometer

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Messungen bestätigen die Phasenkohärenz unseres Kondensates, eignen sich aber nicht für Vorstudien bezüglich inertialer Sensorik. Durch die Erweiterung der obigen Sequenz um einen dritten Lichtpuls und die geeignete Anpassung der Parameter wurde ein Mach-Zehnder-artiges Interferometer für Bose-Einstein Kondensate realisiert. Dieses wurde auf der Erde vollständig charakterisiert und weltweit erstmalig im freien Fall realisiert. Stimmen die Pausenzeiten τ_1 und τ_2 zwischen den Interferometerpulsen überein, so nennt man das Interferometer symmetrisch. Je nach Phasenunterschied der beiden Interferometerarme zum Zeitpunkt des letzten Überlagerungspulses lassen sich Atome in einem der beiden Ausgänge des Interferometers detektieren (siehe Abbildung II-5). Um jedoch die Untersuchungen der räumlichen Kohärenz mittels sichtbarer Interferenzmuster auf die Mach-Zehnder Topologie zu übertragen, wurde eine Asymmetrie in die Sequenz integriert. Durch ungleiche Wahl der Pausenzeiten τ_1 und τ_2 entstehen wie bei dem Ramsey-Interferometer zwei Ausgänge mit jeweils räumlich interferierenden Teilkondensaten. Die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Abhängigkeit des Streifenmusters gilt auch hier, sodass eine Überprüfung der experimentellen Ergebnisse ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung mit den Theoriewerten ergab.

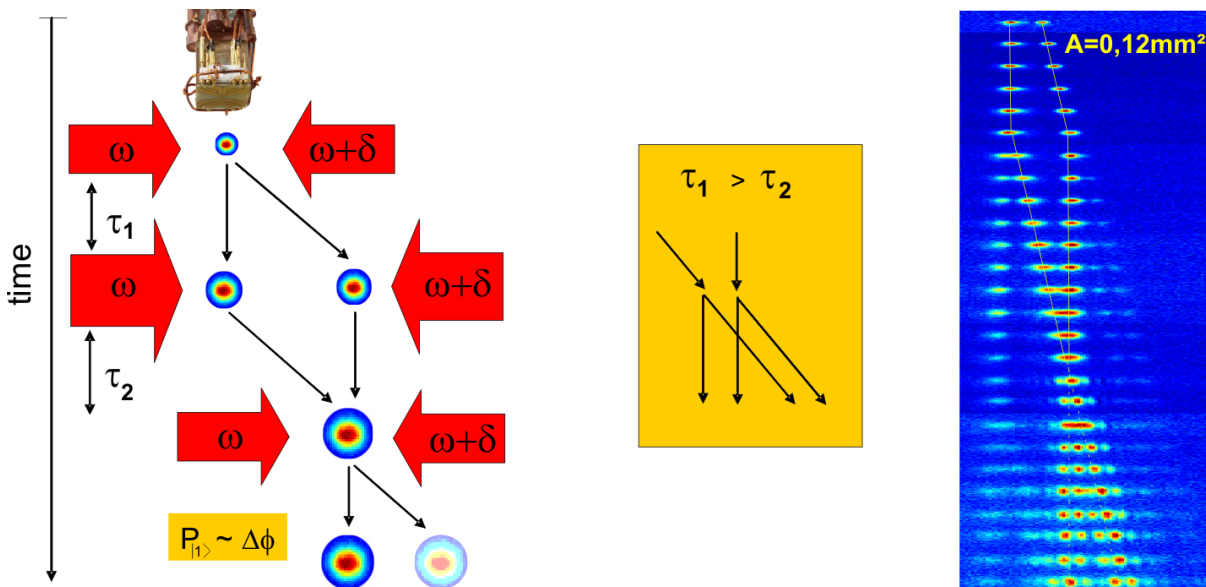


Abbildung II-5: Mach-Zehnder Topologie für inertielle Sensorik

In einer Messkampagne im freien Fall wurden die begonnenen Messungen im Laborbetrieb durch die größere, freie Entwicklungszeit im erweiterten Parameterregime erfolgreich fortgeführt. Die für Bose-Einstein Kondensate extrem große Entwicklungszeit von 360ms innerhalb eines Mach-Zehnder Interferometers konnte erfolgreich realisiert werden. In Abbildung II-6 ist der Streifenabstand der interferierenden Wellenpakete in der asymmetrischen Mach-Zehnder Kampagne im freien Fall dargestellt. Daneben befinden sich zwei zu dieser Messreihe gehörende Absorptionsoptionen. Wie bei der Ramsey-Topologie im freien Fall ist auch hier die makroskopische Größe der interferierenden Wellenpakete eine natürliche Limitation. Durch die in den vorherigen Abschnitten beschriebene magnetische Linse konnte jedoch eine Methodik entwickelt und auf die QUANTUS-I Apparatur übertragen werden, welche das Potenzial besitzt, die freie Entwicklungszeit auf über eine Sekunde zu erweitern.

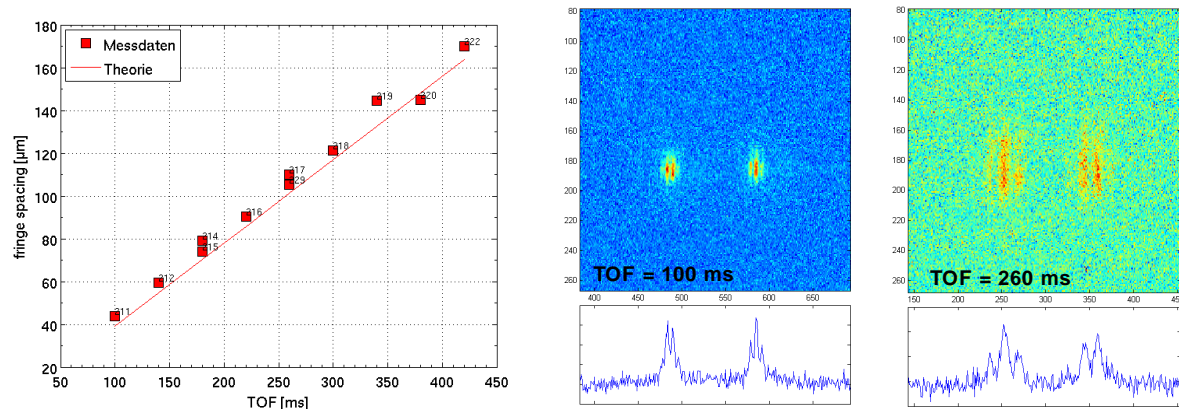


Abbildung II-6: Asymmetrisches Mach-Zehnder Interferometer in Schwerelosigkeit

Vorstudien komplexer Geometrien

Durch die im Rahmen des Projektes PRIMUS gewonnenen Erkenntnisse zur Mach-Zehnder Interferometrie in Retroreflexkonfiguration konnten mit der QUANTUS-I Apparatur verschiedenste Vorstudien in komplexen Geometrien durchgeführt werden. Diese geben weiteren Aufschluss über die Nutzbarkeit eines Atomchips in atominterferometrischen Experimenten auf Basis eines Bose-Einstein Kondensats und wichtige Erkenntnisse für die Nutzung unterschiedlicher Retroreflexkonfigurationen. In einer Vielzahl von Messungen wurden neben der vertikalen Teilung des Kondensates durch Reflektion der Lichtpulse an der dielektrisch beschichteten Chipoberfläche ebenfalls die horizontale Teilung unter Implementation eines Retroreflexspiegels untersucht. In Abbildung II-7 ist beispielhaft die Kombination der Teilungen in x - bzw. z - Richtung dargestellt. Dabei wird Laserlicht sowohl am Chip, als auch am Retroreflexspiegel reflektiert. Das Kondensat lässt sich mit diesem Lichtgitter zweidimensional in mehrere Teilkondensate aufspalten. Auch mit diesem Array an Wellenpaketen ließen sich die kohärenten Eigenschaften nachweisen, indem nach der Erzeugung des Arrays eine Ramseysequenz mit den jeweiligen Teilkondensaten gleichzeitig durchgeführt wurde. Dabei konnten auf einer einzigen Absorptionaufnahme Interferenzmuster von bis zu 18 interferierenden Kondensaten detektiert werden. Solche komplexen, mehrdimensionalen Teilungsschemata dienen als Vorstudie für zukünftige simultane Inertialsensorik in mehreren Dimensionen.

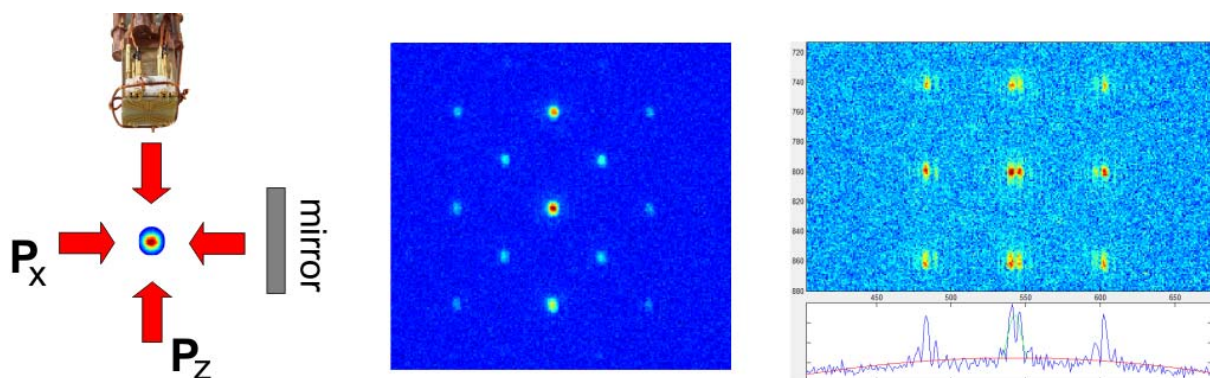


Abbildung II-7: Zweidimensionale Aufspaltung des Kondensates

Raman-Laser-System für Rubidium 87

Neben den oben beschriebenen Arbeiten mit Braggstreuung wurde ein zusätzliches Lasersystem geplant und gefertigt, welches eine kohärente Überlagerung der beiden Hyperfeinzustände $F=1$ und $F=2$ des Rubidiumatoms erzeugt. Dieses Raman-Laser-System basiert auf innerhalb von QUANTUS und LASUS entwickelten Technologien. Es ist sowohl geeignet für den Einsatz in der bestehenden QUANTUS-I Kapsel als auch kompatibel mit dem von der HUB entwickelten Rubidium-Laser-System für QUANTUS-II (siehe Arbeitspaket e).

Das Modul nutzt die Injektionskopplung einer DFB-Laser Diode auf Licht, welches in einem fasergekoppelten elektro-optischen Modulator mit der Hyperfeinfrequenz des Grundzustandes von Rubidium phasenmoduliert wird. Die Güte der intrinsisch stabilen Phasenbeziehung der beiden Laserfrequenzen, welche entscheidend für spätere Präzisionsinterferometrieexperimente ist, wurde bezüglich einer Referenzfrequenz vermessen und das Phasenrauschen charakterisiert.

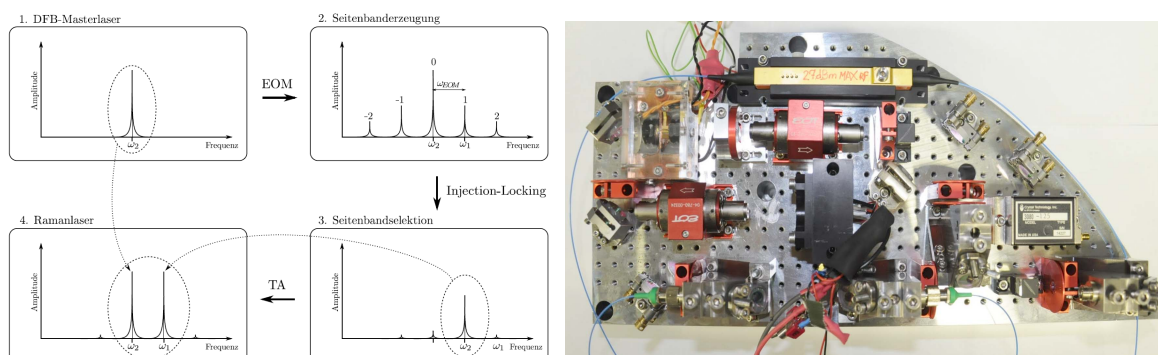


Abbildung II-8: Raman-Laser-System für die kohärente Manipulation von Rubidium 87

QUANTUS II

d) Koordination der Entwicklung neuer optischer Elemente

Basierend auf den durch das FBH bereitgestellten Halbleiterlasern wurde eine erste Version eines hybriden Master-Oscillator-Power-Amplifiers (MOPA) entwickelt. Dieser nutzt als Master-Oscillator „distributed feedback laser“ (DFB-Laser) und „tapered amplifier“ (TA) als Verstärker. Zur optischen Kopplung wurden zunächst Gradienten-Index-Linsen (GRIN-Linsen) genutzt. Diese ermöglichen eine 1:1 Abbildung vom Laser in den Verstärker bei gleichzeitig handhabbaren Abständen der Halbleiterkomponenten im Millimeterbereich. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung II-9 dargestellt. Mit diesen Modulen ließ sich jedoch kein in der Frequenz stabiler Betrieb erreichen. Als Ursache hierfür wurde die Rückkopplung von Licht von den Facetten des Verstärkers in den Laser identifiziert.

Die bereits im Antrag vorgesehene optimierte Version des MOPAs wurde aus diesem Grund mit einem mikro-optischen Isolator ausgestattet, wodurch ein monomodiger Betrieb erreicht werden konnte. Auch wurden statt der GRIN-Linsen nun zylindrische Mikrolinsen eingesetzt, wodurch die Reproduzierbarkeit der Linsenklebung noch weiter gesteigert werden konnte. Ein solches, optimiertes Modul ist in Abbildung II-10 dargestellt. Durch Messung in dem zur Charakterisierung der MOPA-Module aufgebauten Linienbreitenmessplatz konnte verifiziert werden, dass die Linienbreite des Master-Oscillators durch den anschließenden Verstärker nicht verändert wird. Es wurden also Module realisiert, die 1 Watt optische Ausgangsleistung mit der unverändert schmalen Linienbreite der DFB-Laser liefern.

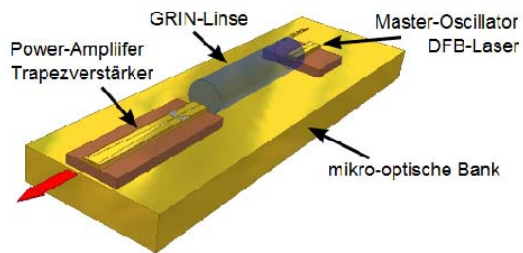


Abbildung II-9: MOPA-Modul der ersten Generation mit GRIN-Linse zur Kopplung von Master-Oscillator und Power-Amplifier

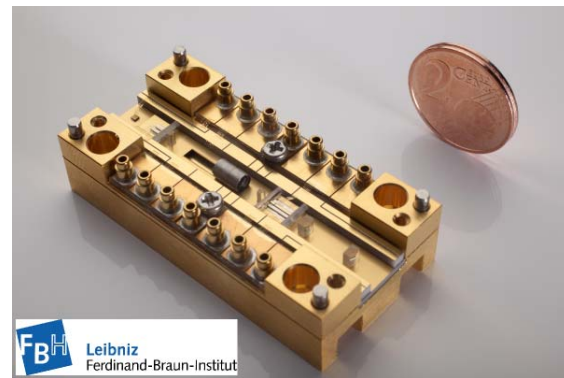


Abbildung II-10: MOPA-Modul der zweiten Generation mit zylindrischen Linsen und Mikroisolator zwischen Master-Oscillator und Power-Amplifier auf CCP-Messhalter
© FBH / Schurian

Als Referenz zur Charakterisierung der aufgebauten hybriden Module wurde ein makroskopisches spektroskopiestabilisiertes Modul aufgebaut. Dieses sollte auch die Variabilität bieten, bei Bedarf am Fallturm getestet und eingesetzt zu werden. Um den daraus resultierenden Anforderungen an die mechanische Stabilität gerecht zu werden, wurde vom üblichen eher horizontalen Design zu Gunsten eines vertikalen Aufbaus (siehe Abbildung II-11) abgewichen, da die hier kritische Biegesteifigkeit mit der dritten Potenz der Höhe skaliert. Das Modul wurde sowohl in einer DFB-Variante, bei der die Stabilität der Laserquelle garantiert ist, als auch in einer ECDL-Variante, deren Stabilität evaluiert werden musste, aufgebaut. Die im Rahmen von QUANTUS I durchgeführten Stabilitätstests zeigten jedoch, dass das ECDL-Modul nur für den Laboreinsatz geeignet ist.

Der Bau der MOPAs führte zu neuen Erkenntnissen bezüglich der Komplexität der hybriden Integration. Basierend auf den dementsprechend bei der Integration des gesamten Spektroskopiesystems mit Strahlteilern, Wellenplatten, Gaszelle und Detektor auf der mikro-optischen Bank zu erwartenden erheblichen Herausforderungen wurde der komplett hybride Aufbau eines Master-Laser-Moduls als im Rahmen der Projektlaufzeit unrealistisch eingestuft. Stattdessen wurde ein Design entwickelt, dass einen auf der Mikrobank aufgebauten und kollimierten DFB-Laser mit einer makroskopischen Zelle und herkömmlichem Detektionssystem verbindet. Dies ist in Abbildung II-12 dargestellt.

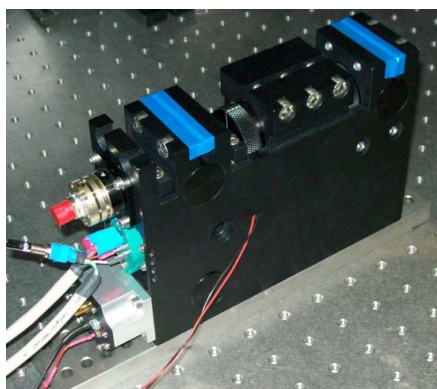


Abbildung II-11: Makroskopischer Referenzlaser in der ECDL-Version

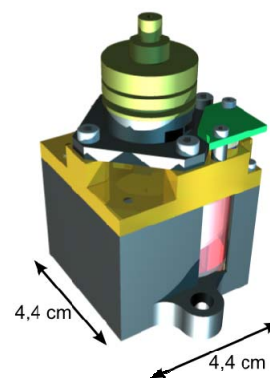


Abbildung II-12: Design des QUANTUS II Master-Laser-Moduls

e) Apparatur (Koordiniert von LUH/ZARM/ENS) / Lasersystem 2D-MOT

Aus der Evaluierung der Anforderungen an die QUANTUS-II-Apparatur ergab sich die Notwendigkeit, diese mit einem komplett neu entwickelten Lasersystem zu betreiben. Dieses sollte während der Projektlaufzeit an der HUB entwickelt werden, wodurch es in diesem Arbeitspaket zu substantiellen Verschiebungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag kam.

Um die 2D-MOT bereits während der Entwicklung des neuen Lasersystems testen zu können, wurde das zu ihrem Betrieb nötige Lasermodul in der herkömmlichen Bauweise direkt an der LUH im Rahmen eines Test-Lasersystems für die gesamte Experimentiereinheit realisiert.

Anstelle des hybriden Lasermoduls, das auf den reinen Betrieb der 2D-MOT beschränkt ist, wurde an der HUB ein neuartiges Gesamtlasersystem zum Betrieb der QUANTUS-II-Apparatur entwickelt. Die Herausforderung hierbei bestand darin, ein System zu entwerfen, das trotz des stark begrenzten Volumens die volle Flexibilität für die Kühlung und Manipulation der Atome bietet. Dieses umfasst:

- Kühlen der Atome in der 2D-MOT
- Kühlen der Atome in der 3D-MOT
- Umpumpen zur Vorbereitung der Magnetfalle
- Interferometrie mit Strahlteilern in Bragg-Konfiguration
- Interferometrie mit Strahlteilern in Raman-Konfiguration
- Detektion der Atome

Das Design wurde speziell auf die im nächsten Arbeitspaket dargestellte Erweiterbarkeit auf fermionische Systeme ausgerichtet. Abbildung II-13 zeigt ein Prinzipbild des Lasersystems.

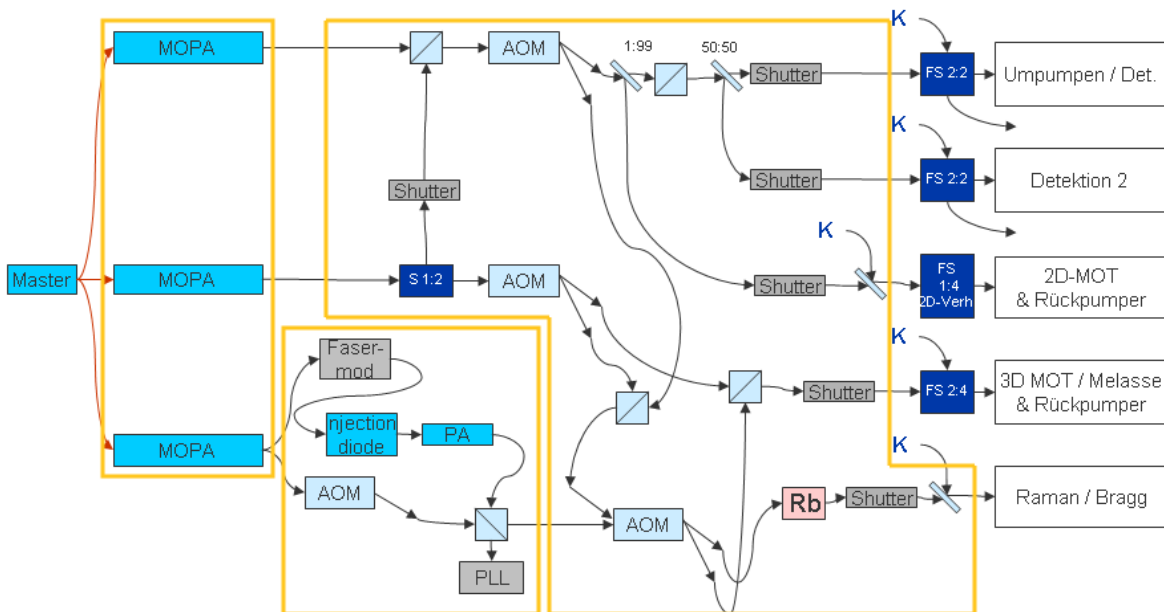


Abbildung II-13: Prinzipbild des Rb-Lasersystems für die QUANTUS II Apparatur

Zur Gewährleistung der mechanischen Stabilität wurden Schlüsselkomponenten wie die Bodenplatten, die Spiegelhalter und die Faserkopplungen weiterentwickelt und bereits vor der Systemintegration getestet. Eine Übersicht über diese Komponenten zeigt Abbildung II-14.

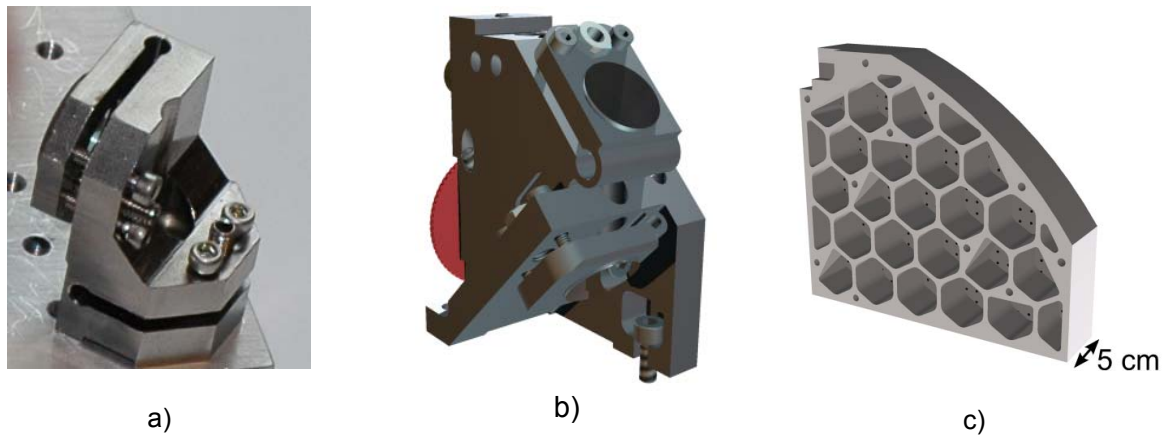


Abbildung II-14: a) kompakter Spiegelhalter, b) Faserkollimatorperiskop, c) Grundplatte eines Lasersystemmoduls mit Wabenstruktur zur Gewichtsreduktion

Das Gesamtsystem, dargestellt in Abbildung II-15, wurde bereits einem ersten Stabilitätstest in Form eines Abwurfes am Fallturm unterzogen. Die dabei getesteten Faserkopplungen zeigten nur beim Aufprall selbst (~ 35 g) Leistungsverminderungen, kehrten danach aber zu ihren ursprünglichen Effizienzen zurück. Weitere Tests bezüglich der Katapulttauglichkeit sollen im Rahmen des Nachfolgeprojektes durchgeführt werden.

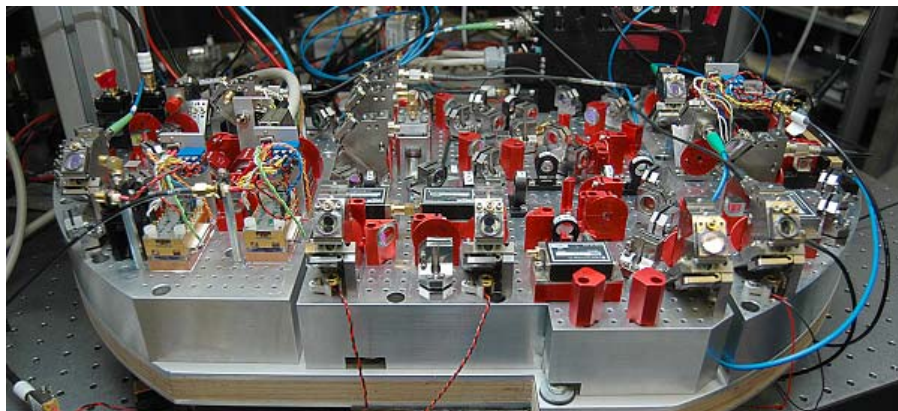


Abbildung II-15: Rb-Lasersystem zum Betrieb der QUANTUS II Apparatur, bestehend aus MOPA-Modul, Verteilungsmodul, Rb-Raman-Laser (v. l. n. r.) und makroskopischem Referenz-Laser (im Hintergrund)

f) Erweiterung auf fermionische Systeme (Koordiniert von UHH) / Lasersystem

An der HUB sollten fallturmtaugliche makroskopische ECDL-Systeme für ^{40}K entwickelt werden. Da sich die ECDL-Aufbauten für ^{87}Rb bei den im Rahmen von QUANTUS I durchgeführten Stabilitätstests jedoch als nichtfallturmtauglich herausstellten, wurde auf eine Portierung dieser Technologie zur Kaliumwellenlänge verzichtet. Diese Entscheidung führt zu keinerlei Beeinträchtigung der geplanten wissenschaftlichen Untersuchungen der fermionischen Systeme, da das FBH neuentwickelte DFB-Dioden der entsprechenden Wellenlänge bereitstellen konnte. An der HUB wurde die Nutzbarkeit dieser Dioden, deren mechanische Stabilität bedingt durch die Bauform garantiert ist, evaluiert und verifiziert.

Die bereits bei der Darstellung des vorherigen Arbeitspaketes angesprochene Entscheidung, an der HUB ein neues Gesamtlasersystem für die QUANTUS II Apparatur zu entwickeln, führte auch in diesem Arbeitspaket zu Ergänzungen.

Um die Erweiterbarkeit des Rb-Lasersystems auf ^{40}K zu gewährleisten, wurde bereits bei der Planung des Rb-Teils ein über die Aufgabenstellungen des ursprünglichen Antrages hinausgehendes Design für das Rb-K-Gesamtsystem erstellt. Dabei ist das System bis auf

die Raman-Laser symmetrisch ausgelegt. Somit kann der Rb-Teil nach erfolgreichem Test gespiegelt werden. Ein CAD-Modell des Gesamtsystems ist in Abbildung II-16 dargestellt



Abbildung II-16: Gesamtlasersystem zum Betrieb der QUANTUS II Apparatur mit Rb und Kalium (dargestellt auf einer Fallturmplattform mit 70 cm Durchmesser)

Folgende Doktoranden/Postdocs waren an den Arbeiten von QUANTUS an der HUB beteiligt:

- Herr Wojciech Lewoczko-Adamczyk
- Herr Malte Schmidt
- Herr Markus Krutzik
- Herr Max Schiemangk

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel wurden für die Stipendien und Stellen der involvierten Doktoranden und Postdocs sowie für den Auf- und Ausbau der Apparaturen eingesetzt.

Wichtige Komponenten sind:

- DFB-Lasersystem (bestehend aus auf Submounts montierten Halbleiterkomponenten und, z.B., zur Montage benötigtem Zusatzmaterial)
- Portabler Spektrumanalysator mit Zubehör
- Optische Isolatoren
- DFB-Dioden
- Trapezverstärker
- Faserkoppler und Faseroptik

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt hat technologisches Neuland betreten und ist in seiner Zielrichtung weltweit einzigartig. Für den sehr ambitionierten Zeitplan, in dem die Betriebsoptimierung der QUANTUS-I Apparatur und die Neuentwicklung von optischen Elementen und Subsystemen

durchgeführt wurde, war die Anstellung von mehr als zwei Doktoranden unbedingt notwendig. Dies wurde zunächst durch die Vergabe von Stipendien realisiert und im späteren Projektverlauf durch eine Aufstockung der Personalmittel ermöglicht. Die angeschafften Investitionsgüter sind nicht Grundausstattung der Universität zuzuordnen und mussten für die Einhaltung der Projektziele angeschafft werden.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

QUANTUS-I erzielte wegweisende Ergebnisse für die Planung der QUANTUS-II Apparatur. Parallel zum Aufbau von QUANTUS-II wurden in QUANTUS-I Technologien im Fallturm demonstriert, welche essenziell für einen erfolgreichen Betrieb von QUANTUS-II sein werden. Durch die bereits in QUANTUS-I gezeigte Machbarkeit der adiabatischen rapiden Passage oder den Einsatz einer magnetischen Linse kann der Fortschritt der QUANTUS-II Apparatur wesentlich beschleunigt werden. Innerhalb des QUANTUS-I-Experimentes wurden weltweit erstmalig interferometrische Experimente mit Bose-Einstein Kondensaten unter Schwerelosigkeit durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse dienen auch als Grundlage für die wissenschaftlichen Zielstellungen zukünftiger Raketenmissionen.

QUANTUS-II bildet eine Plattform für atomoptische Experimente, die für zukünftige Projekte eine Referenzapparatur darstellen wird. In nachfolgenden Missionen, wie z.B. einem Raketenstart oder einem Einsatz auf der ISS/einem Satelliten, kann auf die in QUANTUS-II gezeigte Technologie zurückgegriffen werden. Ebenso stellen die innerhalb von QUANTUS-II entwickelten hybriden Lasermodule einen wichtigen Ausgangspunkt für die weiterführende Technologieentwicklung im Rahmen des Projektes LASUS (Entwicklung von neuartigen Diodenlasersystemen für Präzisionsexperimente unter Schwerelosigkeit) dar.

Die im Rahmen dieses Verbundprojektes erzielten Ergebnisse sind von besonderer Bedeutung für das Nachfolgeprojekt QUANTUS-III, welches die QUANTUS-Apparaturen weiter betreibt und eine neue Apparatur für den Einsatz auf einer Höhenforschungsrakete entwickelt, sowie für das Projekt PRIMUS (Präzisions-Interferometrie unter Schwerelosigkeit), welches aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen die Realisierung von Präzisionsinertialsensoren unter Schwerelosigkeit anstrebt.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Potenzial von Materiewelleninterferometrie im freien Fall wird auch in anderen Forschungsprojekten erforscht. Beispielsweise wird in Stanford/USA und in Wuhan/China je ein ca. 10 m hoher Turm für diesen Zweck gebaut. Atome sollen während der Fallzeit in einer speziellen Vakuumröhre für die kohärente Manipulation in Interferometern manipuliert werden. Auch das französische I.C.E.-Projekt plant eine Erweiterung auf zwei Spezies. In diesem Projekt sollen Atominterferometer mit ultrakalten Atomen in der schwerelosen Umgebung eines Parabelflugzeugs betrieben werden. Der gegenwärtige Stand des I.C.E.-Projekts kann unter folgender Veröffentlichung gesichtet werden: „Light-pulse atom interferometry in microgravity“, G. Stern, B. Battelier, R. Geiger, et al., EPJD (2009)

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

G. Nandi, A. Sizmann, J. Fortagh, C. Wei, R. Walser, Number filter for matter waves, Phys. Rev. A 78, 013605 (2008).

E. Kajari, M. Buser, C. Feiler and W. P. Schleich, Rotation in relativity and the propagation of light, in "Atom Optics and Space Physics", Proceedings of the International School of Physics

Enrico Fermi", Course CLXVIII, edited by E. Arimondo, W. Ertmer, E. M. Rasel and W. P. Schleich, IOS Press Amsterdam and SIF Bologna (2009). Reprinted in: *La Rivista del Nuovo Cimento* 32, 339 (2009).

C. Feiler, M. Buser, E. Kajari, W. P. Schleich, E. M. Rasel and R. F. O'Connell *New Frontiers at the Interface of General Relativity and Quantum Optics*, *Space Science Reviews* 148, 123 (2009).

Reprinted in "Probing the Nature of Gravity - Confronting Theory and Experiment in Space", *Space Sciences Series of ISSI*, Vol. 34, edited by C. W. F. Everitt, M. C. E. Huber, R. Kallenbach, G. Schäfer, B. F. Schutz and R. A. Treumann, Springer, New York (2010).

K. Vogel, F. Gleisberg, N. L. Harshman, P. Kazemi, R. Mack, L. Plimak, W. P. Schleich, Optimally focusing wave packets, *Chemical Physics* 375, 133-143 (2010).

E. Kajari, N. L. Harshman, E. M. Rasel, S. Stenholm, G. Süßmann and W. P. Schleich, Inertial and gravitational mass in quantum mechanics, *Appl. Phys. B* 100, 43{60 (2010).

E. Göklü and C. Lämmerzahl, Metric uctuations and the weak equivalence principle, *Class. Quantum Grav.* 25, 105012 (2008).

E. Göklü, C. Lämmerzahl, A. Camacho, and A. Macias, Spacetime uctuations and the spreading of wavepackets, *Class. Quantum Grav.* 26, 225010 (2009).

H.-P. Breuer, E. Göklü and C. Lämmerzahl, Metric fluctuations and decoherence, *Class. Quantum Grav.* 26, 105012 (2009).

T. v. Zoest, N. Gaaloul, Y. Singh, H. Ahlers, W. Herr, S. T. Seidel, W. Ertmer, E. Rasel, M. Eckart, E. Kajari, S. Arnold, G. Nandi, W. P. Schleich, R. Walser, A. Vogel, K. Sengstock, K. Bongs, W. Lewoczko-Adamczyk, M. Schiemangk, T. Schuldt, A. Peters, T. Könemann, H. Müntinga, C. Lämmerzahl, H. Dittus, T. Steinmetz, T. W. Hänsch and J. Reichel, Bose-Einstein Condensation in Microgravity, *Science* 328 (5985), 1540-1543 (2010).

N. Gaaloul, T. v. Zoest, H. Ahlers, T. A. Schulze, Y. Singh, S. T. Seidel, W. Herr, W. Ertmer, E. Rasel, Quantum tests of the Equivalence Principle with Atom Interferometry, *Acta Astronautica* vol. 67, 1059{1062 (2010).

Jan Rudolph, Naceur Gaaloul, Yeshpal Singh, Holger Ahlers, Waldemar Herr, Torben A. Schulze, Stephan Tobias Seidel, Christina Rode, Vladimir Schkolnik, Wolfgang Ertmer, Ernst Maria Rasel, Hauke Müntinga, Thorben Könemann, Andreas Resch, Sven Herrmann, Claus Lämmerzahl, Tim van Zoest, Hansjörg Dittus, Anika Vogel, Andre Wenzlawski, Klaus Sengstock, Nadine Meyer, Kai Bongs, Markus Krutzik, Wojciech Lewoczko-Adamczyk, Max Schiemangk, Achim Peters, Michael Eckart, Endre Kajari, Stefan Arnold, Gerrit Nandi, Wolfgang P. Schleich, Reinhold Walser, Tilo Steinmetz, Theodor W. Hänsch, Jakob Reichel Degenerate quantum gases in microgravity, *Microgravity Science and Technology*, DOI 10.1007/s12217-010-9247-0.

Sven Herrmann, Ertan Göklü, Hauke Müntinga, Andreas Resch, Tim van Zoest, Hansjörg Dittus, Claus Lämmerzahl, Testing Fundamental Physics with Degenerate Quantum Gases in Microgravity, *Microgravity Sci. Technol.* (2010).

H. Müller, A. Peters, and S.Chu, A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves, *Nature* 463 (2010), p. 926-929

Claus Lämmerzahl, Hauke Müntinga und Reinhold Walser "Riesiges Quantenobjekt -völlig schwerelos", Spektrum der Wissenschaft, Jan.2011.

Eingereichte bzw. in Arbeit befindliche Publikationen:

Ertan Göklü, Claus Lämmerzahl, Fluctuations of spacetime and holographic noise in atomic interferometry, arXiv:0908.3797v3 [gr-qc] to appear in Gen. Rel. Grav.

S. Arnold, D. Denot, M. Eckart, M. A. Efremov, E. Kajari, W. P. Schleich and R. Walser, Efficient description of Bose-Einstein condensates in time-dependent rotating traps, in preparation.

P. Kazemi, S. Chaturvedi, I. Marzoli, R. F. O'Connell, W. P. Schleich, Quantum carpets - a tool to observe decoherence, in preparation.