



Max Schiemangk (Autor)

Wolfgang Heinrich (Herausgeber)

Ein Lasersystem für Experimente mit Quantengasen unter Schwerelosigkeit



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8322>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einleitung

Die Frage nach der Universalität des freien Falls (UFF) - also der Proportionalität von schwerer und träger Masse - beschäftigt Physiker bereits seit Jahrhunderten. Entsprechend wurde bereits eine große Anzahl von theoretischen und experimentellen Überprüfungen dieses Zusammenhangs durchgeführt, die auch mit so bekannten Namen wie Galilei [1], Newton [2], Bessel [3] und Eötvös [4] verknüpft sind. Zur Quantifizierung eines potentiellen Unterschiedes des Verhältnisses von schwerer zu träger Masse für zwei Körper A und B wird üblicherweise das folgende nach Eötvös benannte Verhältnis genutzt [4, 5]¹:

$$\eta_{A,B} = 2 \frac{\left(\frac{m_{\text{schwer}}}{m_{\text{träge}}}\right)_A - \left(\frac{m_{\text{schwer}}}{m_{\text{träge}}}\right)_B}{\left(\frac{m_{\text{schwer}}}{m_{\text{träge}}}\right)_A + \left(\frac{m_{\text{schwer}}}{m_{\text{träge}}}\right)_B} = 2 \frac{a_A - a_B}{a_A + a_B} . \quad (1.1)$$

Hierbei bezeichnen a_A und a_B die auf die Körper A bzw. B in Richtung der Fallbeschleunigung wirkenden Beschleunigungen. Die Genauigkeit der Bestimmung dieses Verhältnisses wurde über die Jahrhunderte, für unterschiedliche Körper, immer weiter gesteigert und liegt nun im Bereich von $1 \cdot 10^{-13}$ [6, 7]. Bisher konnten jedoch keine signifikanten Abweichungen von Null festgestellt werden und so werden die Untersuchungen, wie von Bessel 1833 prognostiziert, fortgesetzt.

„Es wird aber immer ein Interesse haben, die Wahrheit des Satzes so scharf zu prüfen, wie die Hilfsmittel jeder Zeit erlauben; [...]“ [3]

Ende des 20. Jahrhunderts wurde mit der Atominterferometrie [8–11] ein neuartiges „Hilfsmittel“ für Präzisionsmessungen entwickelt. Bei dieser quantenmechanischen Messung wird analog zu klassischen Lichtinterferometern die Interferenz von Atomen, genauer der ihnen zugeordneten Materiewellen [12], untersucht. Die atom-optischen Elemente wie Strahlteiler und Spiegel werden in den in dieser Arbeit betrachteten Atominterferometern durch Lichtpulse gebildet [13]. Nutzt man nun frei fallende Atome als Testmassen und strahlt die Lichtpulse parallel zur Richtung der Gravitation ein, so ist der Phasenunterschied zwischen den Wellenpaketen in den beiden Armen des Interferometers² für eine sogenannte klassische Mach-Zehnder-Konfiguration gegeben durch [14]

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} a T^2 , \quad (1.2)$$

wobei k_{eff} der Betrag des sogenannten effektiven Wellenvektors der Lichtpulses ist. Er ergibt sich im Prinzip aus der Summe der Wellenvektoren, die die Lichtpulse definieren. Das Symbol a steht für die relative Beschleunigung der Atome in dem durch die Wahl der Laserfrequenzen definierten (inertialen) Bezugssystem in der Apparatur. T gibt die Zeit zwischen zwei Lichtpulsen an. Durch

¹In [4] wird das Verhältnis mit $\chi_A - \chi_B$ bezeichnet.

²Gilt nur unter Vernachlässigung von Gravitationsgradienten.

1. Einleitung

Auslesen der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ kann somit a gemessen werden. Der Vergleich zweier Messungen mit den Testmassen m_A und m_B ermöglicht dann die Bestimmung des Eötvös-Verhältnisses $\eta_{A,B}$ für diese Testmassen. Einer der Vorteile des Vergleichs zweier atom-interferometrischer Messungen gegenüber einer Messung mit zwei klassischen Körpern (klassische Messung) liegt darin, dass die beiden Atominterferometer zeitlich und/oder örtlich überlagert werden können, wodurch sich viele systematische und statistische Fehler (Rauschen) in einer differentiellen Messung [15] unterdrücken lassen.

Bisher liegen die besten rein quantenmechanischen UFF-Tests [5, 15–18] mit Genauigkeiten im Bereich $5 \cdot 10^{-7}$ bis hin zu $3 \cdot 10^{-8}$ noch viele Größenordnungen hinter den besten klassischen Messungen. Gemäß (1.2) skaliert die Empfindlichkeit, mit der a aus der Messung von $\Delta\Phi$ bestimmt werden kann, mit $k_{\text{eff}} \cdot T^2$. Eine Steigerung der Empfindlichkeit, auch für die Bestimmung des Eötvös-Verhältnisses (1.1), lässt sich also besonders effektiv durch eine zeitliche Verlängerung des Interferometers erreichen. Diese zeitliche Verlängerung ist üblicherweise, wegen der quadratisch mit T wachsenden Fallstrecke, an eine physische Verlängerung der Apparatur geknüpft. Somit ist bei Laborexperimenten, selbst in hohen Fontänen (wie z.B. in Wühan [18, 19], Stanford [20] und Hannover [21] gebaut bzw. geplant), die Zeit zwischen den Lichtpulsen begrenzt. Einen Ausweg bietet die Durchführung der Experimente unter Schwerelosigkeit oder – realistischer formuliert – in Mikrogravitation. Entsprechend waren und sind quantenmechanische UFF-Tests auf verschiedenen Mikrogravitationsplattformen geplant (z.B. I.C.E. auf Parabelflügen [22, 23], CAL auf der ISS [24, 25] und STE-QUEST auf einer Satellitenmission [26])³.

Auf den angestrebten langen Zeitskalen ($T > 1$ s) wird jedoch bereits die Expansion des atomaren Ensembles zur Herausforderung. So dehnt sich selbst eine bis zum Rückstoß-Limit gekühlte atomare Punktquelle innerhalb weniger Sekunden auf eine Größe im Zentimeterbereich aus⁴. Diese Ausdehnung ist ultimativ durch die Größe der Apparatur limitiert. Aber bereits zuvor treten Effekte auf, deren Auswirkung mit zunehmender Größe des atomaren Ensembles steigen, wie beispielsweise der Einfluss der Aberration bei der Einstrahlung des Laserlichts [28, 29]. Hinreichend kalte Atome sind also eine zwingende Voraussetzung für die geplanten Experimente auf langen Zeitskalen.

Auch die Projektreihe *Quantengase unter Schwerelosigkeit* (QUANTUS), in deren Rahmen diese Arbeit entstanden ist, zielt auf den Aufbau eines Zwei-Spezies-Atominterferometers für den Einsatz unter Mikrogravitation. Hier hat man sich entschlossen, die Atome bis zur Bose-Einstein-Kondensation [30–32] zu kühlen. Die Projektreihe wird im nachfolgenden Kapitel detailliert vorgestellt. Hier sollen jedoch bereits kurz die historischen Entwicklungen skizziert werden, die die vorliegende Arbeit erforderlich machen.

Mit der ersten Experimentengeneration (Apparatur QUANTUS-1) konnte am Fallturm des ZARM bereits erstmals ein Rubidium-Bose-Einstein-Kondensat (BEC) unter Schwerelosigkeit erzeugt [33], sowie später Interferometrie mit BECs unter Schwerelosigkeit demonstriert werden [34]. Für die Nachfolgeapparatur (QUANTUS-2) war nun der nächste Schritt in Richtung UFF-Test geplant: die Erweiterung um eine zweite Spezies (Kalium) bei gleichzeitiger Verkleinerung des Gesamtaufbaus [35]. Daraus ergab sich der Bedarf einer Neuentwicklung für viele Subsysteme

³I.C.E. (*Interférométrie Cohérente pour l'Espace*), CAL (*Cold Atom Lab*), ISS (*International Space Station*), STE-QUEST (*Space-Time Explorer and Quantum Equivalence Principle Space Test*)

⁴Beispiel ⁸⁷Rb-D2: $v_{\text{recoil}} = 5,885$ mm/s [27]

der Apparatur. Die Entwicklung eines kompakten und robusten Lasersystems für die Erzeugung, kohärente Manipulation und Detektion der kalten Rubidium- und Kaliumatome war eine dieser notwendigen Neuentwicklungen und bildet das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit. Nachfolgend sollen die aus dieser Zielsetzung resultierenden Arbeitsaufgaben kurz erläutert werden.

Neuentwicklung eines kompakten und robusten Lasersystems für die Erzeugung, kohärente Manipulation und Detektion kalter Rubidium- und Kaliumatome

Für die neue Katapult-Apparatur QUANTUS-2 sollte ein kompaktes und robustes Lasersystem entwickelt werden. Da die gesamte QUANTUS-2-Apparatur parallel zu dieser Arbeit neu entwickelt wurde, mussten zunächst die Anforderungen an das zu entwickelnde Lasersystem erarbeitet werden. Ausgehend davon sollte ein Lasersystem funktional konzipiert werden, das Licht mit allen für die Erzeugung, kohärente Manipulation und Detektion von kalten Rubidium- und Kaliumatomen benötigten Emissionsfrequenzen mit hinreichender optischer Leistung und spektraler Stabilität bereitstellt⁵. So wird für die Kühlung der Atome beispielsweise Licht mit einer optischen Leistung von mehr als 100 mW an der Experimentkammer gefordert. Gleichzeitig muss die -3 dB-Linienbreite der Strahlung kleiner als 10 MHz sein. Die Detektion der Atome hingegen erfordert nur 1 mW optischer Leistung, jedoch mit -3 dB-Linienbreiten von maximal 2,5 MHz (Rb) bzw. 1,5 MHz (K).

Auf Basis des konzeptionellen Designs sollte anschließend ein mechanisches Design für das Lasersystem entwickelt werden, das auch die aus dem geplanten Einsatz auf dem Katapult des Bremer Fallturms resultierenden Anforderungen erfüllt⁶. Dort treten beispielsweise Beschleunigungen von bis zu 30 *g* auf, die das Lasersystem voll funktionsfähig überstehen muss. Darüber hinaus sind Volumen und Gewicht im Rahmen der QUANTUS-2-Apparatur auf 44 l bzw. 35 kg begrenzt.

Abschließend sollte die Eignung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Lasersystems für den Einsatz in QUANTUS-2 durch funktionale und mechanische Tests nachgewiesen werden.

Entwicklung kompakter und spektral schmalbandiger Strahlquellen hoher Ausgangsleistung

Da das geforderte kompakte Design des Lasersystems für die Apparatur QUANTUS-2 mit den zu Beginn dieser Arbeit kommerziell erhältlichen Strahlquellen nicht möglich war, sollten neue, kompakte schmalbandige Strahlquellen mit hoher Ausgangsleistung entwickelt werden. Resultierend aus den Anforderungen an das Lasersystem wurden Ausgangsleistungen von mehr als 1 W und -3 dB-Linienbreiten von weniger als 2,5 MHz (Rb) gefordert. Gleichzeitig ergab sich aus dem angestrebten mechanischen Design des Lasersystems die Forderung nach Strahlquellen mit einer Grundfläche von weniger als 30 mm \times 60 mm.

Im Rahmen dieser Arbeit sollten entsprechende Strahlquellen nicht nur entwickelt, sondern auch aufgebaut, bezüglich ihrer spektralen Eigenschaften charakterisiert und für den Einsatz in der Katapult-Apparatur QUANTUS-2 qualifiziert werden.

⁵Die funktionalen Anforderungen an das Lasersystem werden in Abschnitt 3.1 abgeleitet.

⁶Die mechanischen Anforderungen an das Lasersystem werden in Abschnitt 3.2 abgeleitet.

1. Einleitung

Entwicklung eines Verfahrens zur Charakterisierung des Frequenzrauschens freilaufender Laser

Die Charakterisierung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Strahlquellen bezüglich der für die Anwendung geforderten spektralen Stabilität erforderte wiederum die Entwicklung eines Messverfahrens. Dieses Verfahren sollte es ermöglichen, die spektrale Stabilität freilaufender Laser anhand ihres Frequenzrauschens zu charakterisieren. Hierbei musste insbesondere der Einfluss der für freilaufende Diodenlaser typischen Frequenzdrifts untersucht und, sofern möglich, unterdrückt werden.

Das Verfahren sollte hardwareseitig durch den Aufbau eines entsprechenden Messplatzes und softwareseitig durch die Programmierung eines entsprechenden Auswerteprogramms implementiert werden.

Diese Arbeit umfasst somit die Entwicklung des Lasersystems, der zugehörigen Lasermodule und eines Verfahrens zur spektralen Charakterisierung sowie die anschließenden Tests dieser Elemente.

1.1. Aufbau der Arbeit

Die Struktur der vorliegenden Arbeit folgt der Struktur der Arbeitsaufgaben.

In Kapitel 2 wird die Projektreihe QUANTUS vorgestellt, in deren Rahmen diese Arbeit angefertigt wurde. In diesem Zusammenhang wird der Bedarf für eine neue Apparatur anhand der vor Beginn dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse verdeutlicht. Diese Apparatur – QUANTUS-2 – wird anschließend kurz vorgestellt.

Das für die Apparatur QUANTUS-2 neu zu entwickelnde Lasersystem bildet das zentrale Thema von Kapitel 3. Zunächst werden die Anforderungen an das Lasersystem abgeleitet. Anschließend werden Konzept und Design sowie einige Schlüsselkomponenten detailliert vorgestellt.

Die Realisierung des Lasersystems erforderte die Neuentwicklung geeigneter Strahlquellen. Nach der Erfassung der Anforderungen an diese Strahlquellen werden deren Design, Aufbau und Charakterisierung in Kapitel 4 erläutert.

In Kapitel 5 wird eine Messmethode zur Charakterisierung der spektralen Stabilität (freilaufender) Laser vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit speziell für die Charakterisierung der zuvor genannten Strahlquellen entwickelt wurde.

Aufbauend auf den in Kapitel 3 bis 5 beschriebenen Ergebnissen wurde der Rubidium-Teil des Lasersystems aufgebaut. Die damit durchgeführten mechanischen Qualifikationstests und der Nachweis der atom-optischen Funktionalität werden in Kapitel 6 vorgestellt.

Die wesentlichen Resultate dieser Arbeit werden in Kapitel 7 zusammengefasst. Abschließend werden mögliche weiterführende Arbeiten in Form eines Ausblicks adressiert.

2. QUANTUS – Mit Quantengasen auf dem Weg zum Test des freien Falls

In diesem Kapitel wird die Projektreihe *Quantengase unter Schwerelosigkeit* (QUANTUS), in deren Rahmen diese Arbeit durchgeführt wurde, vorgestellt.

Wie bereits in der Einleitung erläutert, besteht die wissenschaftliche Vision dieser Projektreihe in einem konkurrenzfähigen¹ Test der Universalität des freien Falls (UFF) mit einem Quantensensor in Mikrogravitation. Als Quantensensor ist dabei ein Atominterferometer mit Rubidium- und Kalium-BECs geplant. Auch zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit ist es noch ein weiter Weg bis zum Erreichen dieser grundlegenden wissenschaftlichen Vision. Die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Zwischenergebnisse, die auf diesem Weg zu Beginn dieser Arbeit erreicht waren, und die daraus resultierende Definition der nächsten Zwischenziele werden in den nachfolgenden Abschnitten dargelegt. Zunächst wird jedoch ein Überblick über die bisherigen Projekte der QUANTUS-Familie gegeben.

2.1. Die QUANTUS-Projekte

Die Projektreihe QUANTUS umfasst bereits fünf im Wesentlichen aufeinander folgende Verbundprojekte. Diese sind in Tabelle 2.1 mit den Laufzeiten, den Ergebnissen bzw. Zielen und den beteiligten Institutionen aufgelistet.

Darüber hinaus sind im direkten Umfeld noch folgende Projekte bzw. Projektreihen entstanden:

LASUS *Entwicklung von neuartigen Diodenlasersystemen für Präzisionsexperimente unter Schwerelosigkeit*

PRIMUS *Präzisionsinterferometrie mit Materiewellen unter Schwerelosigkeit*

KALEXUS *Kalium-Lasereexperimente unter Schwerelosigkeit*

MILAS *Mikrointegration von Lasersystemen für den Weltraumeinsatz*

Diese Projekte unterstützen die wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen, die im Rahmen der QUANTUS-Projekte notwendig sind, und verdeutlichen die Komplexität und Bedeutung dieses Themenfeldes.

¹ „konkurrenzfähig“ bezieht sich auf den Vergleich zu den jeweils präzisesten Messungen, aktuell [6, 7].

2. QUANTUS – Mit Quantengasen auf dem Weg zum Test des freien Falls

Projekt mit Laufzeit	Partner	Ergebnis bzw. Ziel
QUANTUS-I 01.01.2004 - 31.03.2008	LUH und Unterauf- tragnehmer	Aufbau der Apparatur QUANTUS-1 Erzeugung erstes BEC in Schwerelosigkeit freie Evolution eines BEC über 1 s
QUANTUS-II 01.01.2008 - 31.12.2010	LUH, ZARM, UU, UHH, HUB	Fortführung Experimente mit QUANTUS-1 Aufbau neue Apparatur (QUANTUS-2) für Zwei-Spezies-Experimente auf Katapult
QUANTUS-III 01.01.2011 - 31.12.2016 / 30.04.2017	LUH, HUB, FBH, ZARM, UHH, UU, TUD	Fallturmexperimente (erste Interferometrie) Aufbau von Apparatur für Experimente auf Höhenforschungsrakete (MAIUS-1) & Flug
QUANTUS-IV - Fallturm 01.03.2015 - 28.02.2019	LUH, HUB, JGU, ZARM, UU, TUD	Weiterführung der Fallturmexperimente mit den Apparaturen QUANTUS-1 und QUANTUS-2
QUANTUS-IV - MAIUS 01.08.2014 - 31.07.2018	LUH, HUB, JGU, FBH, ZARM	Zwei-Spezies-Experimente auf Höhen- forschungsraketen: sequentiell (MAIUS-2) und simultan (MAIUS-3)

Tabelle 2.1.: Projektreihe QUANTUS mit den Teilprojekten, Zielen und Partnern: Leibniz Universität Hannover (LUH), Humboldt-Universität zu Berlin (HUB), Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH), Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU), Technische Universität Darmstadt (TUD), Universität Hamburg (UHH), Universität Ulm (UU) und Zentrum für angewandte Raumfahrt und Mikrogravitation (ZARM). Hervorgehoben sind die Teilprojekte, in deren Rahmen diese Arbeit durchgeführt wurde.

2.2. Projektstatus zu Beginn dieser Arbeit

Diese Arbeit begann nach Abschluss des Projektes QUANTUS-I in der Anfangsphase der Nachfolgeprojektes QUANTUS-II. Entsprechend sollen hier die Ergebnisse von QUANTUS-I zusammengefasst werden, die die Basis für die im Nachfolgeprojekt geplanten Schritte bildeten.

2.2.1. Das Vorgängerprojekt

Hauptziel des Projektes QUANTUS-I war es, ein BEC in Schwerelosigkeit zu erzeugen und nachzuweisen. Als Mikrogravitationsplattform wurde der Fallturm des ZARM in Bremen gewählt. Der 146 m hohe Turm beherbergt ein 122 m hohes Fallrohr, in dem Kapseln mit Experimenten abgeworfen oder katapultiert werden können. Da das Fallrohr auf 10^{-5} bar evakuiert werden kann, erfahren die Kapseln während des Fluges durch Reibung nur Restbeschleunigungen von $10^{-6} g$. Somit bilden die Kapseln während des Fluges die Möglichkeit, Experimente in Mikrogravitation durchzuführen.

Im Rahmen des Projekts QUANTUS-I wurde eine fallturmtaugliche Apparatur zur Erzeugung von BECs mit ^{87}Rb aufgebaut – die QUANTUS-1-Apparatur. Dies geschah über den

Zwischenschritt einer fallturmtauglichen Apparatur zur Erzeugung einer magneto-optischen Falle (magneto-optical trap) MOT [36, 37]. Die größte Herausforderung beim Aufbau dieser beiden Apparaturen bestand in der enormen Verkleinerung des zur Verfügung stehenden Volumens. Normalerweise nimmt der gesamte Aufbau für ein solches Experiment einen oder mehrere Labortische in Anspruch. Nun stand nur eine Fallkapsel mit einer Höhe von 172 cm und einem Durchmesser von 70 cm [38] zur Verfügung. Die Verkleinerung der experimentellen Apparatur erforderte eine Vielzahl von technologischen (Neu)entwicklungen bei all ihren Subsystemen (z.B. Experimentierkammer, Lasersystem und Steuerelektronik). Beispielhaft sei hier besonders auf die vielen Eigenentwicklungen am Lasersystem verwiesen [39, 40]. So wurden beispielsweise fast sämtliche Opto-Mechaniken (z.B. Halter für Spiegel, Strahlteiler, Wellenplatten und Linsen) vom damaligen Experimentteam in robuster Bauweise für eine Strahlhöhe von 2 cm designt und in den Werkstätten der zugehörigen Institute gefertigt. Ebenso waren die Gehäuse der einzelnen Lasermodule Eigenentwicklungen. Es sei aber angemerkt, dass als Strahlquellen selbst ausschließlich kommerzielle Laserdioden und Verstärkerchips der Firma eagleyard Photonics eingesetzt wurden. Auf Seiten der Experimentierkammer sei insbesondere auf den Einsatz eines Atomchips [41] zur BEC-Erzeugung verwiesen.

Mit der Apparatur QUANTUS-1 gelang am 6.11.2007 die Erzeugung des weltweit ersten BEC in Mikrogravitation. Im Anschluss konnte die „freie“ Evolution des Ensembles ultra-kalter Atome durch Parameteroptimierung auf bis zu 1 s gesteigert werden [33] (siehe Abb. 2.1). Routinemäßig erzeugte die Apparatur BECs mit 10^4 Rubidiumatomen, deren kinetische Energie einer Temperatur von 9 nK entsprach.

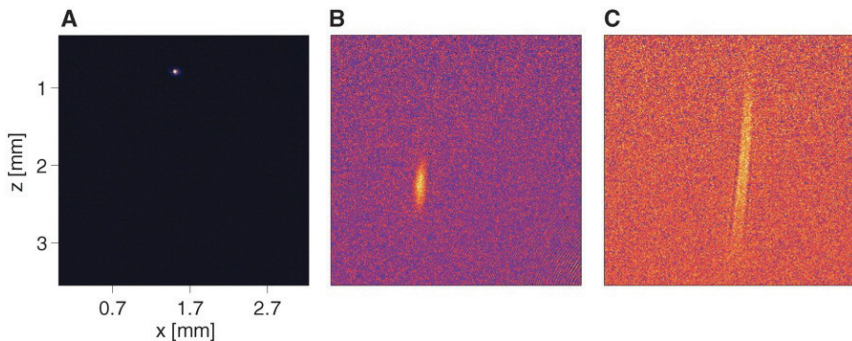


Abbildung 2.1.: Mit QUANTUS-1 erzeugte BECs nach 30 ms (A), 500 ms (B) und einer Sekunde (C) „freier“ Evolution (Teil einer Abbildung aus [33]).

Trotz dieser Erfolge offenbarte sich am Ende des Projekts QUANTUS-I bereits die Notwendigkeit, die Apparatur QUANTUS-1 zu modifizieren oder durch eine neue Apparatur zu ersetzen, um erkannte Probleme zu eliminieren. So verlief die Expansion des BECs in Schwerelosigkeit nicht wie theoretisch erwartet [33]. Als mögliche Ursache wurden Störungen durch externe Magnetfelder vermutet. Um diesen Störeinfluss zu verhindern, wurde vorgeschlagen, das BEC

2. QUANTUS – Mit Quantengasen auf dem Weg zum Test des freien Falls

nach der Auskopplung aus der magnetischen Falle in den magnetisch nicht sensitiven Zeeman-Zustand ($m_F = 0$) zu transferieren. Dazu sollte im Nachfolgeprojekt ein Transfer zwischen den Zeeman-Zuständen mittels adiabatischer Änderung eines eingestrahlten Hochfrequenzsignals (HF-Signals), eine sogenannte „adiabatic rapid passage“ [42], implementiert werden. Des Weiteren war die Beobachtungszeit des „freien“ BECs auf eine Sekunde begrenzt, da das BEC bis dahin bereits so weit expandiert war, dass der Abbildungscontrast durch die geringe Dichte limitiert wurde. Bei gleicher Atomzahl ließe sich dies durch eine Verringerung der Expansion, also der Temperatur, erreichen. Zu diesem Zweck wurde der Einsatz einer magnetischen Linse, sogenanntes „delta kick cooling“ [43–45], vorgeschlagen. Beide Techniken könnten in die bestehende QUANTUS-1-Apparatur integriert werden.

Andere Defizite hingegen ließen sich nicht durch Modifikationen der bestehenden Apparatur umgehen. So hatte sich beispielsweise gezeigt, dass für statistische Untersuchungen die Durchführung von mehr Experimenten unter Schwerelosigkeit erforderlich ist. Da maximal drei Abwürfe pro Tag möglich sind, ließe sich dies nur durch mehrere Experimente pro Abwurf erreichen. Die experimentelle Sequenz der Apparatur QUANTUS-1 war jedoch so lang, dass sie bereits vor dem Abwurf gestartet werden musste. Die Durchführung mehrerer Experimente während eines Abwurfs war somit ausgeschlossen. Ein weiteres Beispiel ist die Steigerung der maximal möglichen Beobachtungszeit eines freien BEC. Diese ist im Fallbetrieb ultimativ durch die Mikrogravitationsdauer von 4,7 s begrenzt. Ein Wechsel in den Katapultbetrieb mit einer fast doppelt so langen Mikrogravitationsdauer, und somit längeren potentiellen Beobachtungszeit, war mit der als Fallkapsel ausgelegten QUANTUS-1-Apparatur nicht möglich. Das für den angestrebten UFF-Test gravierendste Defizit war jedoch die Beschränkung der Gesamtapparatur QUANTUS-1 auf Experimente mit einer atomaren Spezies.

2.2.2. Die nächsten Schritte / Ziele

Im Anschluss an das Projekt QUANTUS-I sollten sowohl die direkt bei den Experimenten mit der Apparatur QUANTUS-1 erkannten Probleme gelöst werden als auch der nächste Schritt in Richtung UFF-Test gegangen werden. Aus diesem Grund wurde seit dem Beginn vom Projekt QUANTUS-II eine mehrgleisige Strategie verfolgt.

Die Experimente mit der Apparatur QUANTUS-1 sollten im Hinblick auf die Untersuchung von BECs unter Schwerelosigkeit fortgesetzt und ausgebaut werden. In diesem Zusammenhang war insbesondere das Erreichen immer tieferer Temperaturen und längerer Beobachtungszeiten zum Ziel gesetzt. Zur Untersuchung der Kohärenzeigenschaften der BECs in diesen nun zugänglichen Parameterbereichen (Temperaturen im nK-Bereich und Beobachtungszeiten bis zu 1 s) sollte die Apparatur darüber hinaus um die Möglichkeit erweitert werden, Atominterferometrie durchzuführen. Diese Messungen sollten gleichzeitig als Pfadfinder für zukünftige Präzisionsinterferometriexperimente unter Schwerelosigkeit fungieren. Die Interferometrie wurde technisch mit Bragg-Strahlteilern [46, 47] umgesetzt und die Ergebnisse dieser Untersuchungen unter anderem in [34] publiziert.

Parallel sollte eine neue Apparatur – QUANTUS-2 – aufgebaut werden, um die mit der alten Apparatur weiterhin bestehenden Defizite zu umgehen und ein Zwei-Spezies-Interferometer in Schwerelosigkeit zu testen. Diese neue Apparatur wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

2.3. Die Apparatur QUANTUS-2

In diesem Abschnitt soll zunächst die Motivation für die Entwicklung der neuen Apparatur QUANTUS-2 erläutert werden, die als zweite Fallturmapparatur in der Projektreihe aufgebaut wurde. Anschließend wird ein Überblick über die Subsysteme der Apparatur (Abb. 2.2) gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem Lasersystem ein zentraler Teil dieser neuen Apparatur entwickelt. Entsprechend wird dieses Subsystem in diesem Überblick ausgespart und im nachfolgenden Kapitel 3 detailliert beschrieben.

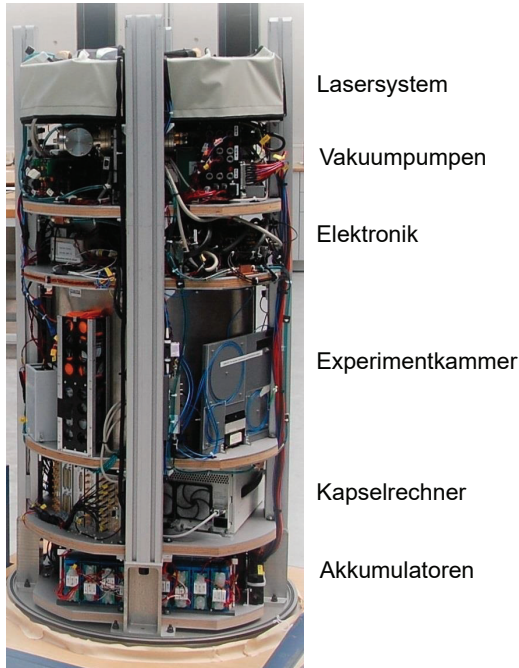


Abbildung 2.2.: Apparatur QUANTUS-2

Untersuchungen auf längeren Zeitskalen

Die maximale Untersuchungszeit unter Schwerelosigkeit ist am Fallturm durch die Flugzeit der Experimentkapsel gegeben. Diese beträgt im Abwurfbetrieb 4,7 s. Zur Verlängerung der Flugzeit sollte vom reinen Abwurfbetrieb zum Katapultbetrieb gewechselt werden, der eine fast doppelt so lange Mikrogravitationsdauer ermöglicht. Da die Katapultkapseln deutlich kleiner

2. QUANTUS – Mit Quantengasen auf dem Weg zum Test des freien Falls

sind als die Fallkapseln, wäre eine entsprechende Verkleinerung von QUANTUS-1 einem Neubau gleichgekommen. Die angesprochene Verkleinerung wird in Abb. 2.3 deutlich, die die bereits fertiggestellte QUANTUS-2 Apparatur vor ihrem Vorgänger QUANTUS-1 zeigt. Somit musste auch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Lasersystem der Apparatur QUANTUS-2 im Volumen kleiner ausgelegt werden als sein Vorgänger in der Apparatur QUANTUS-1. Detaillierte Angaben zur Größe der Kapsel folgen im nächsten Kapitel im Rahmen der Ableitung der Anforderungen an das Lasersystem.



Abbildung 2.3.: Größenvergleich der Apparaturen QUANTUS-1 (hinten) und -2 (vorn), sowie das aktuelle QUANTUS-2 Experimentiererteam: Alexander Grothe, Waldemar Herr, Christoph Grzeschik, Tammo Sterneke und Jan Rudolph (v.l.n.r)

Die Flugzeit stellt jedoch nur eine obere Grenze der Beobachtungszeit dar. Eine weitere Begrenzung der Beobachtungszeit wird durch den Kontrastverlust bei der bildgebenden Messung an den ultra-kalten Ensembles bei zunehmender Expansionsdauer bewirkt. Hier war die Apparatur QUANTUS-1 nach einer Sekunde freier Expansion durch den Kontrast limitiert [33]. Dieser Herausforderung sollte auf zwei Wegen begegnet werden. Zum einen sollten mit der Apparatur QUANTUS-1 parallel Strategien zur Kontrastverbesserung, wie z.B. die Nutzung einer magnetischen Linse zur Reduktion der Expansion des BECs, untersucht werden, die dann auch in der