

Forschungsberichte aus dem

Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Ein Lasersystem für Experimente mit Quantengasen unter Schwerelosigkeit



Innovationen mit Mikrowellen und Licht

Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Band 61

Max Schiemangk

Ein Lasersystem für Experimente mit Quantengasen unter Schwerelosigkeit

Herausgeber: Prof. Dr. Günther Tränkle, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich

| Ferdinand-Braun-Institut | Tel. +49.30.63 | 392-2600 |
|---------------------------------|-----------------|-----------|
| Leibniz-Institut | Fax +49.30.63 | 92-2602 |
| für Höchstfrequenztechnik (FBH) | | |
| Gustav-Kirchhoff-Straße 4 | E-Mail fbh@fbh- | berlin.de |
| 12489 Berlin | Web www.fbh- | berlin.de |

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

Vorwort der Herausgeber

Neue Ideen, Entwicklungen und Konzepte aus der Forschung sind die Basis von Fortschritt und Wettbewerbsfähigkeit. Als Inventionen erweitern sie den Stand des Wissens und der Technik, als innovative Produkte und Dienstleistungen schließlich findet ein Teil von ihnen Eingang in unsere Alltagswelt.

In diesem Sinne dokumentiert die Reihe *"Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik"* aktuelle Forschungen und Entwicklungen aus dem Institut. Wir möchten Ihnen diese Ergebnisse zugänglich machen und zur weiteren Diskussion anregen – nicht zuletzt, damit möglichst viele Entwicklungen zu einem Teil unseres Alltags werden.

Die vorliegende Arbeit präsentiert Design und Qualifizierung eines Lasersystems und seiner Halbleiterlaser-basierten Strahlquellen. Das kompakte und robuste Lasersystem soll erstmals Zwei-Spezies-Atominterferometrie in Mikrogravitation ermöglichen. Als Kernkomponenten wurden miniaturisierte schmalbandige Diodenlasermodule entwickelt, die eine Ausgangsleistung von mehr als 3,5 W liefern. Teile des Lasersystems werden inzwischen routinemäßig am Fallturm eingesetzt. Die bereits durchgeführten Experimente sind wichtige Schritte auf dem Weg zu einem Quantentest der Universalität des freien Falls mit bisher unerreichter Genauigkeit.

Eine anregende Lektüre wünschen

Prof. Dr. Günther Tränkle Direktor

ofaer

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich stellvertretender Direktor

Das Ferdinand-Braun-Institut

Das Ferdinand-Braun-Institut erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom sichtbaren bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme und Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Kompakte atmosphärische Mikrowellenplasmaquellen mit Niederspannungsversorgung entwickelt es für medizinische Anwendungen, etwa zur Behandlung von Hauterkrankungen.

Das FBH ist ein international anerkanntes Zentrum für III/V-Verbindungshalbleiter mit allen Kompetenzen: vom Entwurf, über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung von Bauelementen.

Seine Forschungsergebnisse setzt das FBH in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen und Technologien erfolgreich durch Spin-offs. In strategischen Partnerschaften mit der Industrie sichert es in der Höchstfrequenztechnik die technologische Kompetenz Deutschlands.

Ein Lasersystem für Experimente mit Quantengasen unter Schwerelosigkeit

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.) im Fach Physik

eingereicht an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät Humboldt-Universität zu Berlin

> von Dipl.-Phys. Max Schiemangk

Präsidentin der Humboldt-Universität zu Berlin: Prof. Dr.-Ing. Dr. Sabine Kunst

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät: Prof. Dr. Elmar Kulke

Gutachter:

- 1. Prof. Achim Peters, Ph.D.
- 2. Prof. Dr. Günther Tränkle
- 3. Prof. Dr. Axel Görlitz

Tag der mündlichen Prüfung: 31.01.2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2020 Zugl.: Berlin, Univ., Diss., 2020

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2020 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7293-3 eISBN 978-3-7369-6293-4

Zusammenfassung

Bereits Galilei untersuchte, ob verschiedene frei fallende Körper im Schwerefeld der Erde gleich stark beschleunigt werden, die sogenannte Universalität des freien Falls. Die Genauigkeit der experimentellen Überprüfungen konnte seitdem beständig gesteigert werden. Einen neuen Ansatz, die Messgenauigkeit noch weiter zu verbessern, bilden quantenmechanische Messmethoden, die auf Materiewelleninterferometrie beruhen. Dabei wird der freie Fall von Ensembles ultra-kalter Atome zweier unterschiedlicher atomarer Spezies oder unterschiedlicher Isotope einer Spezies verglichen. Die Empfindlichkeit einer solchen Messung skaliert quadratisch mit der Messzeit T. Jedoch skaliert auch der von den frei fallenden Atomen während der Messzeit zurückgelegte Weg quadratisch mit T. Somit sind die erreichbaren Messzeiten und folglich die erreichbaren Messempfindlichkeiten durch die Größe der experimentellen Aufbauten limitiert. Eine Lösung bietet die Durchführung der Experimente in Mikrogravitation. Die Projektreihe Quantengase unter Schwerelosigkeit (QUANTUS) verfolgt derartige Experimente unter anderem am Fallturm des Zentrum für angewandte Raumfahrt und Mikrogravitation (ZARM). Die dabei genutzten Interferometrie-Apparaturen verwenden Laserstrahlung zur Kühlung, Manipulation und Detektion der Atome. Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung des Lasersystems für ein neues Experiment (QUANTUS-2) dieser Projektreihe, das erstmals Zwei-Spezies-Atominterferometrie in Mikrogravitation demonstrieren soll.

Dieses Lasersystem sollte die Erzeugung, die kohärente Manipulation und die Detektion ultra-kalter atomarer Ensembles von Rubidium- und Kaliumatomen ermöglichen. Neben diesen funktionalen Anforderungen stellte der Einsatz auf dem Katapult des Fallturms zusätzliche Anforderungen an Volumen (< 441), Masse (< 35 kg) und mechanische Stabilität (voll funktionsfähig sofort nach einem Katapultstart mit Beschleunigungen von bis zu 30 g). Ein all diese Anforderungen erfüllendes Lasersystem wurde im Rahmen dieser Arbeit funktional konzipiert und mechanisch designt. Zur Demonstration wurde der Rubidium-Teil des Lasersystems im Rahmen dieser Arbeit funktional sowie mechanisch qualifiziert. Inzwischen wird er routinemäßig für Experimente am Fallturm eingesetzt.

Ein wesentlicher Aspekt der Arbeiten zum Lasersystem war die Entwicklung von kompakten und robusten schmalbandigen Lasermodulen. Diese wurden als *Master Oscillator Power Amplifiers* (MOPAs) in hybrid integrierter Form entwickelt und aufgebaut. Sie liefern bei einer Grundfläche der optischen Bank von nur 10 mm × 50 mm Ausgangsleistungen von bis zu 3,7 W. Am für den Einsatz im Lasersystem gewählten Arbeitspunkt (1 W Ausgangsleistung) besitzen die Strahlquellen Linienbreiten im Bereich von 100 kHz (Lorentz) bzw. 1 MHz (-3 dB, 10 μ s). Damit werden die funktionalen Anforderungen für den Einsatz im Experiment erfüllt. Die mechanische Belastbarkeit der Strahlquellen wurde nicht nur durch Tests am Fallturm sondern auch in Vibrationstests mit einem Pegel von bis zu 21,4 $g_{\rm RMS}$ nachgewiesen.

Der Nachweis einer hinreichenden spektralen Stabilität der im Rahmen dieser Arbeit realisierten Strahlquellen erforderte die Entwicklung eines Messverfahrens zur detaillierten Charakterisierung des Frequenzrauschens freilaufender Laser. Dazu wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit ein Messverfahren entwickelt, das auf einer Schwebungsmessung mit anschließender Analyse der Quadraturkomponenten des Signals im Zeitbereich basiert. Durch den Einsatz geeigneter Filter erlaubt dieses Verfahren die Unterdrückung der für Diodenlaser typischen Frequenzdrifts. Die Umsetzung erfolgte hardwareseitig durch den Aufbau eines Messplatzes und softwareseitig durch die Implementierung eines Analyseprogramms.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Entwicklungen tragen entscheidend dazu bei, mit der Apparatur QUANTUS-2 ein Zwei-Spezies-Atominterferometer in Mikrogravitation zu demonstrieren. Diese Arbeit stellt daher einen der vielen wichtigen Schritte auf dem Weg zu einem Test der Universalität des freien Falls mit Quantengasen unter Schwerelosigkeit dar.

Abstract

Already Galileo investigated whether different free falling bodies in the gravitational field of the Earth are accelerated at the same rate, the so-called universality of the free fall. The accuracy of the experimental tests has been steadily increased ever since. A new approach to further increase the measurement accuracy is provided by quantum mechanical measurements based on matter wave interferometry. In this method the free fall of ensembles of ultra-cold atoms of two different atomic species or of different isotopes of one species is compared. The sensitivity of such a measurement scales quadratically with the measurement time T. However, the distance traveled by the free-falling atoms during the measurement time also scales quadratically with T. Thus, the achievable times and consequently the achievable measurement sensitivities are limited by the size of the experimental setups. A solution is provided by conducting the experiments in microgravity. The project series Quantum Gases in Weightlessness (QUANTUS) pursues such experiments i.a. on the drop tower of the Center of Applied Space technology and Microgravity (ZARM). The interferometry apparatuses used for this purpose employ laser radiation for cooling, manipulation, and detection of the atoms. The aim of the present thesis was the development of the laser system for a new experiment (QUANTUS-2) of this project series, which is intended to demonstrate two-species atom interferometry in microgravity for the first time.

This laser system ought to enable the generation, coherent manipulation, and detection of ultra-cold atomic ensembles of rubidium and potassium atoms. In addition to these functional requirements, the deployment on the catapult of the drop tower posed additional demands on volume (< 441), mass (< 35 kg), and mechanical stability (fully functional immediately after a catapult launch with accelerations of up to 30 g). A laser system fulfilling all these requirements has been functionally conceived and mechanically designed within the scope of this thesis. For demonstration, the rubidium part of the laser system was functionally and mechanically qualified within the scope of this thesis. By now it is routinely used for experiments at the drop tower.

An important aspect of the work on the laser system was the development of compact and robust spectrally narrow laser modules. They were developed and constructed as *Master Oscillator Power Amplifiers* (MOPAs) in hybrid integrated form. The laser modules provide an output power of up to 3.7 W at a footprint of the optical bench of only 10 mm × 50 mm. At the operating point selected for use in the laser system (1 W output power), the radiation sources exhibit linewidths in the range of 100 kHz (Lorentzian) and 1 MHz (-3 dB, 10 μ s). These characteristics fulfill the functional requirements for use in the experiment. The mechanical stability of the radiation sources was demonstrated not only by tests at the drop tower, but also in vibration tests with a level of up to 21.4 $g_{\rm RMS}$.

The proof of sufficient spectral stability of the radiation sources realized within the scope of this thesis required the development of a measuring method for the detailed characterization of the frequency noise of free-running lasers. For this purpose a measurement method based on a beat note measurement with subsequent analysis of the quadrature components of the signal in the time domain has also been developed within the scope of this thesis. By utilizing appropriate filters, this method allows the suppression of the frequency drifts that are typical for diode lasers. The implementation on the hardware side was carried out by setting up a measuring station and on the software side by implementing an evaluation program.

The developments carried out within the scope of this thesis contribute decisively to demonstrating a two-species atom interferometer in microgravity using the QUANTUS-2 apparatus. Thus, this thesis forms one of the many important steps on the way to a test of the universality of free fall by means of quantum gases in microgravity.

Inhaltsverzeichnis

| 1. | Einle | eitung | 1 |
|----|-------|---|----|
| | 1.1. | Aufbau der Arbeit | 4 |
| 2. | QUA | ANTUS – Mit Quantengasen auf dem Weg zum Test des freien Falls | 5 |
| | 2.1. | Die QUANTUS-Projekte | 5 |
| | 2.2. | Projektstatus zu Beginn dieser Arbeit | 6 |
| | | 2.2.1. Das Vorgängerprojekt | 6 |
| | | 2.2.2. Die nächsten Schritte / Ziele | 8 |
| | 2.3. | Die Apparatur QUANTUS-2 | 9 |
| | | 2.3.1. Experimentierkammer | 12 |
| | | 2.3.2. Elektronik | 13 |
| | | 2.3.3. Kapselinfrastruktur | 13 |
| | 2.4. | Resümee | 14 |
| 3. | Ein I | kompaktes robustes Lasersystem für QUANTUS-2 | 15 |
| | 3.1. | Funktionale Anforderungen | 15 |
| | | 3.1.1. Erzeugung kalter Atome: Kühlung | 15 |
| | | 3.1.2. Kohärente Manipulation kalter Atome: Interferometrie | 17 |
| | | 3.1.3. Detektion kalter Atome | 22 |
| | | 3.1.4. Zusammenfassung der funktionalen Anforderungen | 24 |
| | 3.2. | Anforderungen für den Einsatz auf dem Katapult | 25 |
| | | 3.2.1. Integration in die Katapultkapsel | 25 |
| | | 3.2.2. Betrieb in der Katapultkapsel | 26 |
| | | 3.2.3. Einsatz auf dem Katpult | 26 |
| | | 3.2.4. Zusammenfassung der äußeren Anforderungen | 27 |
| | 3.3. | Konzept des QUANTUS-2-Lasersystems | 28 |
| | 3.4. | Systemdesign | 30 |
| | 3.5. | Schlusselkomponenten | 34 |
| | | 3.5.1. Neu entwickelte Opto-Mechanik | 34 |
| | 0.0 | 3.5.2. Referenziaser | 36 |
| | 3.6. | Resumee der Entwicklung des kompakten robusten Lasersystems für QUANTUS-2 | 37 |
| 4. | Eine | kompakte schmalbandige Strahlquelle hoher Leistung | 39 |
| | 4.1. | Anforderungen | 39 |
| | 4.2. | Konzept der MOPA-Lasermodule | 40 |
| | | 4.2.1. Halbleiterlaser | 40 |
| | | 4.2.2. Das MOPA-Konzept | 41 |

Inhaltsverzeichnis

| | | 4.2.3. Auswahl des Master Oszillators (MO) | 42 |
|----|------------|--|-----|
| | | 4.2.4. Auswahl des Verstärkers (PA) | 44 |
| | 4.3. | Lasermodulentwicklung | 45 |
| | | 4.3.1. Verwendete Halbleiterkomponenten | 45 |
| | | 4.3.2. Mechanischer Aufbau | 46 |
| | | 4.3.3. Das optische System | 47 |
| | | 4.3.4. Mikro-optische Integration | 48 |
| | 4.4. | Elektro-optische Charakterisierung | 51 |
| | | 4.4.1. Messmethoden / -technik | 51 |
| | | 4.4.2. MO: DFB-Diodenlaser | 52 |
| | | 4.4.3. MOPA | 54 |
| | 4.5. | Mechanischer Test | 60 |
| | | 4.5.1. Durchführung der Vibrationstests | 60 |
| | | 4.5.2. Ergebnis der Vibrationskampagne | 61 |
| | 4.6. | Resümee der Entwicklung einer kompakten schmalbandigen Strahlquelle hoher | |
| | | Leistung | 64 |
| | | | |
| 5. | Die | spektrale Charakterisierung der Strahlquellen | 65 |
| | 5.1. | Spektrale Stabilität bzw. Linienbreite | 65 |
| | | 5.1.1. Phasenrauschen | 67 |
| | | 5.1.2. Linienbreite | 67 |
| | 5.2. | Messkonzepte | 68 |
| | | 5.2.1. Zugang im Frequenzbereich - Klassische HF-Analyse | 70 |
| | | 5.2.2. Zugang im Zeitbereich - Quadraturkomponenten | 74 |
| | . . | 5.2.3. Unterdrückung der Frequenzdrift | 75 |
| | 5.3. | Analyse auf Basis der in Phase / Quadratur (IQ)-Daten | 80 |
| | | 5.3.1. Erzeugung der IQ-Daten | 80 |
| | | 5.3.2. Frequenzrauschen | 82 |
| | | 5.3.3. Amplitudenrauschen | 86 |
| | | 5.3.4. Hochfrequenz (HF)-Spektren | 87 |
| | F 4 | 5.3.5. Breite des HF-Spektrums ohne das HF-Spektrum | 88 |
| | 5.4. | Umsetzung des Messverfahrens | 90 |
| | | 5.4.1. Experimenteller Aufbau | 90 |
| | | 5.4.2. Softwareimpiementierung | 92 |
| | | Decimental de la construction de | 94 |
| | 5.5. | Resumee der Arbeiten zur spektralen Unarakterisierung | 95 |
| 6. | Mec | hanische und funktionale Qualifikation des Lasersystems | 97 |
| - | 6.1. | Mechanischer Test - Katapultkampagnen | 98 |
| | | 6.1.1. Die Berliner Lasersystem-Testkapsel | 98 |
| | | 6.1.2. Die Kampagnen | 99 |
| | 6.2. | Nachweis der Funktionalität | 103 |
| | 6.3. | Resümee der mechanischen und funktionalen Qualifikation des Lasersystems | 104 |
| | | - 0 | |

| 7. | Zusammenfassung und Ausblick | 105 |
|-----|--|-----|
| | 7.1. Zusammenfassung | 105 |
| | 7.2. Ausblick | 107 |
| Α. | Mathematische Hilfsmittel | 109 |
| | A.1. Umformungen | 109 |
| | A.1.1. Zusammenhang Frequenz- und Phasenrauschen | 109 |
| | A.1.2. PSD eines elektrischen Feldes mit weißem Frequenzrauschen | 110 |
| | A.2. Endliche Messzeit mit diskreten Punkten | 110 |
| | A.3. Reihenentwicklungen | 111 |
| в. | Zusätzliche Daten | 113 |
| | B.1. Vibrationstests | 113 |
| Lit | Literaturverzeichnis | |
| Ab | Abbildungsverzeichnis | |
| Та | Tabellenverzeichnis | |
| Lis | Liste der Abkürzungen | |
| Lis | Liste der Symbole | |
| Eig | Eigene Publikationen | |
| Da | Danksagung | |
| Se | Selbständigkeitserklärung | |

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:

$$\eta_{\rm A,B} = 2 \frac{\left(\frac{m_{\rm schwer}}{m_{\rm träge}}\right)_{\rm A} - \left(\frac{m_{\rm schwer}}{m_{\rm träge}}\right)_{\rm B}}{\left(\frac{m_{\rm schwer}}{m_{\rm träge}}\right)_{\rm A} + \left(\frac{m_{\rm schwer}}{m_{\rm träge}}\right)_{\rm B}} = 2 \frac{a_{\rm A} - a_{\rm B}}{a_{\rm A} + a_{\rm B}} \,. \tag{1.1}$$

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 Hülfsmittel jeder Zeit erlauben; [...]" [3]

Ende des 20. Jahrhunderts wurde mit der Atominterferometrie [8–11] ein neuartiges "Hülfsmittel" 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]

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

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 Wǔhàn [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 machten.

Mit der ersten Experimentgeneration (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. (Interférometrie 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: $v_{\text{recoil}} = 5,885 \text{ mm/s}$ [27]