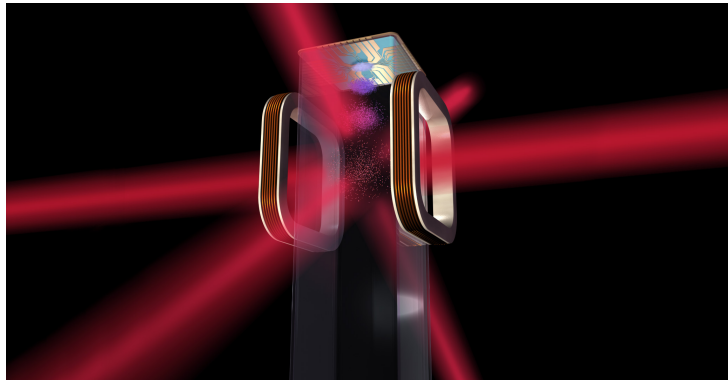




CAL II

Abschlussbericht Juni 2025



Durchführung und Auswertung der Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten auf der Internationalen Raumstation im Rahmen des Cold Atom Laboratory der NASA

DLR 50WM2245A

Projektleiter:

Dr. Naceur Gaaloul, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover (Koordination)

Verbundpartner:

Prof. Dr. Wolfgang P. Schleich, Institut für Quantenphysik, Universität Ulm

Autoren des Berichts:

Naceur Gaaloul, Leibniz Universität Hannover
Annie Pichery, Leibniz Universität Hannover
Gabriel Müller, Leibniz Universität Hannover
Timothé Estrampes, Leibniz Universität Hannover

Inhaltsverzeichnis

1. Kurze Darstellung	3
1.1. Aufgabenstellung	3
1.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	5
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2. Eingehende Darstellung	6
2.1. Verwendung der Zuwendung und Darstellung des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	6
2.1.1. Unterstützung beim Design eines verbesserten SM3B Atomchips	6
2.1.2. Optische Simulationen zur Evaluation der optischen Streuung am Atomchip	6
2.1.3. Vorbereitungsexperimente zum Atomlaser	6
2.1.4. Simulationsplattform für Experimente mit BEC-Mischungen	7
2.1.5. Nachweis von Interspezies-Interaktionen in BEC-Mischung	7
2.1.6. Atom-Interferometrie mit Zwei-Spezies BECs	8
2.1.7. Präparation von BEC-Mischungen für die Atominterferometrie	9
2.1.8. Magnetfeldmessung mittels differentieller Atominterferometrie	10
2.1.9. Vorbereitung von Rubidium Kollimations-Experimenten	10
2.1.10. Lessons Learned Workshop zur Durchführung von BEC-Experimenten auf der ISS	10
2.1.11. Vergleich des aktuellen Stands mit den angestrebten Zielen	11
2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	14
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	14
2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	14
2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	15
2.6. Erfolgte und geplante Veröffentlichung des Ergebnisses	15
2.6.1. Beiträge in wissenschaftlichen Zeitschriften	15
2.6.2. Eingereichte oder in Arbeit befindliche Publikationen	17
2.6.3. Abschlussarbeiten an der Universität Hannover	17
2.6.4. Vorträge und Poster	17
A. Anlage: Erfolgskontrollbericht	21
A.1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	21
A.2. Fortschreibung des Verwertungsplans	22
A.3. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	22
A.4. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	23
A.5. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	23
A.6. Weiternutzung erworbener Gegenstände	23

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten (BECs) in Schwerelosigkeit bieten einzigartige wissenschaftliche Möglichkeiten, die in einem erdgebundenen Labor nicht zugänglich sind. So können in Schwerelosigkeit deutlich längere Ausbreitungszeiten erreicht werden, die entscheidende Fortschritte in der Entwicklung von hochpräzisen Inertialsensoren oder bei der Überprüfung des schwachen Äquivalenzprinzips erwarten lassen. Darüber hinaus treten im freien Fall andere Kräfte in den Vordergrund, wie beispielsweise die abstoßende Wechselwirkung der Atome, die die Dynamik von ultrakalten Quantengasen maßgeblich beeinflussen und so zu bisher unbeobachteten Phänomenen wie kugelschalenförmigen BECs führen können.

Im Rahmen der QUANTUS-Kollaboration in Deutschland wurde bereits herausragende Pionierarbeit auf diesem Gebiet geleistet, sodass seit mehr als zehn Jahren BECs in Schwerelosigkeit erzeugt und, unter anderem mittels Atominterferometrie, untersucht werden können. Seit Mai 2018 bietet das „Cold Atom Laboratory“ (CAL) der NASA zusätzlich die Möglichkeit, ultrakalte Quantengasen auf der Internationalen Raumstation (ISS) zu erzeugen, wodurch die Zahl der täglich durchführbaren Versuche, im Vergleich zu bisherigen Fallturmexperimenten, deutlich gesteigert werden konnte. Als Teil des deutsch-amerikanischen „Consortium for Ultracold Atoms in Space“ (CUAS) haben die Verbundpartner aus Ulm und Hannover seit 2019 im Rahmen des CAL I Projekts Experimente mit CAL durchgeführt. Darunter fallen insbesondere die hochpräzise Bewegungskontrolle von BECs mittels Magnetfallen, die Reduktion der Expansionsenergie mittels Delta-Kick-Kollimation und die Demonstration von Shear-Ramsey Atominterferometrie im Orbit.

Ziel des Verbundprojekts CAL II ist es, aufbauend auf den Erfahrungen des CAL I Projekts, konkrete experimentelle Sequenzen für die CAL-Apparatur vorzuschlagen, durchzuführen und auszuwerten. Dazu gehören die Demonstration eines Atomlasers in Schwerelosigkeit, die Manipulation und Untersuchung von Quantengasmischungen, die präzise Vermessung des residualen Magnetfelds innerhalb der CAL-Apparatur mittels Einzelspezies-BECs und die Demonstration eines Interferometers mit zwei Atomsorten. All diese Vorhaben haben mittelfristig das Ziel, Atominterferometrie mit BECs als Weltraumtechnologie weiterzuentwickeln, um diese dann in dedizierten Projekten in der Fundamentalphysik oder als Quantensensoren nutzen zu können. In diesem Rahmen war ein weiteres konkretes Vorhaben, das JPL-Team bei dem Design eines verbesserten Wissenschaftsmoduls zu unterstützen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Durchführung dieser BEC-Experimenten sollen dafür genutzt werden, das derzeit in der Vorbereitung befindliche deutsch-amerikanische Gemeinschaftsprojekt BECCAL zu unterstützen, das ebenfalls für einen Betrieb auf der ISS vorgesehen ist.

1.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Durch die Arbeiten an den Projekten QUANTUS I-V sowie MAIUS besitzen die Verbundpartner einzigartige Erfahrungen in der praktischen Durchführung und Auswertung von Experimenten mit Bose-Einstein-Kondensaten in Schwerelosigkeit.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die konkreten Zielsetzungen des hier beschriebenen Teilprojekts CAL II wurden in 4 Arbeitspaketen (AP) zusammengefasst und lauteten ursprünglich wie folgt:

AP 1: Space Atom Laser

- Prinzipielle Demonstration des Space Atom Lasers mit CAL
- Analyse der Daten und Vergleich mit numerischen Simulationen
- Unterstützung des UULM-Teams mit experimentellen Sequenzen, die im CAL-Experiment eingesetzt werden

AP 2: Quantengasmischungen

- Weiterentwicklung der numerischen Methoden zur Beschreibung der Dynamik von Mehrkomponentigen Bose-Einstein-Kondensaten (G. Müller und A. Pichery)
- Entwicklung und Vorschlag von Experimentalsequenzen mit Quantenmischungen für die Flugeinheit CAL (G. Müller)
- Auswertung der Daten mit numerischen und analytischen Methoden (G. Müller)

AP 3: Atominterferometrie

- Numerische Simulation von mehrdimensionalen Atominterferometern mit optisch verzerrten Strahlen unter Verwendung des Universal Atom Interferometry Simulator (UATIS) (G. Müller)
- Präzise Vermessung des residualen Magnetfelds innerhalb der CAL-Apparatur (Koordination UULM)
- Demonstration eines Interferometers mit zwei Atomsorten (G. Müller)

AP 4: Input zum SM4 Upgrade

- Entwicklung eines Experimentdesigns, der die optischen Defekte des Interferometerstrahls minimiert (G. Müller)
- Simulation für neue Chipstrukturen zur Erhöhung der BEC-Atomzahlen (G. Müller)

Zur Erfolgskontrolle des Projekts wurden zusätzlich die in den Tabellen 1 and 2 dargestellten Meilensteine definiert.

Tabelle 1: Übersicht der Meilensteine für den Verbundpartner LUH

Meilenstein	Ziel	Zeitpunkt
MS 1	Neues Design eines fortgeschrittenen Atomchips für die SM4-Einheit	31.12.2022
MS 2	Entwicklung einer effizienten Simulationsplattform für BECs-Experimente mit zwei Spezies	31.12.2023
MS 3	Abschließender Lessons-Learned-Workshop zur Durchführung von BEC-Experimenten auf der ISS	31.12.2024

Tabelle 2: Übersicht der Meilensteine für den Verbundpartner UULM

Meilenstein	Ziel	Zeitpunkt
MS 1	Vermessung des residualen Magnetfelds innerhalb der CAL-Apparatur mit einer Atomsorte	31.12.2022
MS 2	Grundlegende Demonstration von Mischungsexperimenten mit Kalium und Rubidium	31.12.2023
MS 3	Abschließender Lessons-Learned-Workshop zur Durchführung von BEC-Experimenten auf der ISS	31.12.2024

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der wissenschaftliche und technische Stand der Verbundpartner der LUH basierte auf langjähriger Forschung im Bereich der Theorie von Quantensensoren unter der Leitung von Dr. Naceur Gaaloul. Unter anderem wurde eine Vielzahl theoretischer Ergebnisse in Zusammenarbeit mit den höchst erfolgreichen QUANTUS- und MAIUS-Projekten, sowie natürlich im Vorgängerprojekt mit CAL, experimentell realisiert. Zu den relevanten theoretische Vorarbeiten gehörten insbesondere die numerische Simulation von Bose-Einstein-Kondensaten und Quantengasmischungen, und die Simulation von Chip-basierten Magnetfallen.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen dieses Teilprojekts pflegen wir eine enge und sehr fruchtbare Zusammenarbeit mit unseren Verbundpartnern der Universität Ulm unter der Leitung von Prof. Wolfgang P. Schleich vom Institut für Quantenphysik. Ebenso sind wir im regen Austausch mit Prof. Dr. Nicholas Bigelow von der Universität Rochester, USA, der als Sprecher des CUAS auf amerikanischer Seite für die Koordinierung der Experimente des Konsortiums verantwortlich ist.

Zur Durchführung der Experimente finden auch regelmäßige Gespräche und Treffen mit Mitgliedern des CAL-Teams am Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, USA unter Leitung von Dr. Jason Williams statt, die für die Wartung und den Betrieb der CAL-Apparatur verantwortlich sind. Weiterhin stehen wir in Kontakt mit anderen amerikanischen Wissenschaftlern, die ebenfalls Experimente mit CAL durchführen, um von deren Erfahrungen zu profitieren.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und Darstellung des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die im Folgenden dargestellten Arbeiten wurden am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover unter Leitung von Dr. Naceur Gaaloul durchgeführt. Darüber hinaus wurden Arbeiten von den Doktoranden Gabriel Müller, Timothé Estrampes und der während des Projekts promovierten Annie Pichery ausgeführt.

In den folgenden Unterabschnitten dieses Kapitels wollen wir kurz auf die wichtigsten aktuellen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse unseres Teilprojektes eingehen bevor wir diese im nächsten Kapitel mit den angestrebten Zielen in Verbindung bringen.

2.1.1. Unterstützung beim Design eines verbesserten SM3B Atomchips

Eine der wesentlichen Limitierungen von CAL als BEC-Maschine ist die finale Anzahl der Atome im kondensierten Gas. Die Atomzahl in einem Rubidium-BEC ist in der aktuellen Version des Wissenschafts-Moduls SM3 auf ca. 10 bis 20 Tausend limitiert, was eine Herausforderung in der Durchführung von Messungen aufgrund eines geringen Signal-Rausch Verhältnisses darstellt. Gleichzeitig skaliert auch die Sensitivität von Atominterferometrie-Experimenten mit der Atomzahl.

Diese Limitierung ergibt sich hauptsächlich durch Ineffizienzen beim Transport der thermischen Atome von der MOT in die harmonische Magnetfalle zur Evaporation. Durch ein neues Design oder eine Erweiterung des Atomchips können diese Ineffizienzen minimiert werden. Dabei haben wir die Kollegen des JPL mit Chip-Simulationen und den in Hannover gesammelten Erfahrungen mit anderen Atomchip-Experimenten unterstützt, siehe AP 4 in Abschnitt 1.3.

2.1.2. Optische Simulationen zur Evaluation der optischen Streuung am Atomchip

Bereits im Vorgängerprojekt wurden optische Dipolkräfte als potentielle Ursache für Kontrastverluste bei relativ kurzen Interferometriezeiten benannt. Es wurde vermutet, dass das Laserprofil durch Streuung an den Drähten des Atomchips deformiert wird. Um diese Vermutung weiter zu untersuchen, haben wir optische Simulationen entwickelt, die die Streuung des Interferometrie-Lasers am Fenster und den Atomchip-Drähten betrachten können. Die simulierten Intensitätsprofile haben wir in einem weiteren Schritt verwendet, um den Zusammenhang zum Atominterferometrie-Kontrast zu quantifizieren.

Die Ergebnisse der optischen Simulationen wurden in den Arbeitspaketen 3 und 4 verwendet. Im Rahmen von AP 3 wurde für mehrere verwendete Atominterferometrie-Konfigurationen untersucht, wie stark differentielle Dipolkräfte den Kontrast beeinflussen. In AP 4 fanden die optischen Simulationen Einzug, weil als Teil vom Upgrade zum neuen Wissenschaftsmodul SM3b der Kollimator für den Interferometrie-Laser getauscht wurde. Es wurde sich in Kooperation mit den Kollegen des JPL für einen Laser mit geringerem Beamradius entschieden, siehe AP 3 und AP 4 in Kapitel 1.3.

2.1.3. Vorbereitungsexperimente zum Atomlaser

Um einen möglichst effektiven Übergang zwischen den internen Zuständen der Rubidium-Atome zu gewährleisten und Verluste durch das Koppeln an Zwischenzustände zu vermeiden,

wurde vom Team in Ulm eine Sequenz vorgeschlagen, bei der die Atome direkt vom magnetisch sensitiven $F = 2$, $m_F = 2$ Zustand in den magnetisch insensitiven Zustand $F = 1$, $m_F = 0$ überführt werden. Für diesen Zwei-Photonen-Prozess ist die kombinierte Nutzung von Radiofrequenz- und Mikrowellenstrahlung notwendig. Daher wurden zunächst Messungen zur Charakterisierung der beiden Strahlungsfelder, insbesondere ihrer effektiven Kopplungsstärke und notwendiger Frequenzanpassung, durchgeführt.

Die gewonnenen Erkenntnisse erlauben nun die Bestimmung der notwendigen Pulszeiten für Demonstrationsexperimente zum Space Atom Laser. Aufgrund des Umbaus der CAL-Apparatur ab September 2023 mussten die experimentellen Arbeiten jedoch zunächst eingestellt werden. Diese Arbeiten fanden im Rahmen von AP 1 statt, wurden federführend durch den Verbundpartner in Ulm durchgeführt und aus Hannover unterstützt.

2.1.4. Simulationsplattform für Experimente mit BEC-Mischungen

Die Simulation der Dynamik von interagierenden Mischungen erfordert viele Rechenressourcen in Bezug auf Zeit und Speicher, insbesondere für Transportdynamiken, bei denen sich die Atome über große räumliche Regionen bewegen, oder für Dynamiken der freien Expansion, bei denen sich die Atomwolke sehr schnell ausdehnt. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurde eine Simulationstechnik mit einem skalierten Rasteransatz entwickelt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden in der folgenden Veröffentlichung dokumentiert: *Pichery et al., AVS Quantum Science* 5.4 (2023).

Hier möchten wir kurz die wichtigsten Ergebnisse in Bezug auf die mit CAL durchgeführten Experimente zusammenfassen. Die Simulation des Grundzustands eines BECs (Einzel-BEC oder Mischungs-BEC) wird durch Lösung der gekoppelten Gross-Pitaevskii-Gleichungen mit der imaginären Zeitentwicklung durchgeführt. Als Parameter können die Fallencharakteristiken aus dem Chipmodell und die realistischen Atomzahlen in CAL verwendet werden. Die Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse einer solchen Simulationen in einer quasi-zylindrischen Falle, die mit der CAL-Maschine erzeugt werden kann. Wie aus der Abbildung hervorgeht, ist die Konfiguration des Grundzustands bei Schwerkraft und Mikrogravitation für die wechselwirkenden KRb-Mischungen sehr unterschiedlich. Aufgrund des Gravitationsgradienten wird das Gemisch auf der Erde entlang der Schwerkraftrichtung aufgetrennt, in der Mikrogravitation sind die beiden Fallenminima jedoch überlagert. Die Auftrennung der Dichtverteilung erfolgt dann entlang der Richtung, in der die Fallenfrequenz die geringste Einschränkung darstellt. Es gibt verschiedene Zustände mit sehr ähnlicher Energie zum Grundzustand, die in der anfänglichen Falle quasistabil sind (siehe rechte Grafik in der Abbildung 1). Ein Ziel unserer Mischungsexperimente im Rahmen dieses Projekts war es, die verschiedenen Zustandskonfigurationen zu beobachten. Diese Arbeiten fanden im Rahmen von AP 2 statt.

2.1.5. Nachweis von Interspezies-Interaktionen in BEC-Mischung

Wir haben zusammen mit dem JPL-Team die Produktion und Manipulation von BEC Mischungen mit der CAL SM3-Maschine demonstriert. Der Bericht über die erste Beobachtung von BEC-Mischungen und dessen Interspezies-Interaktionen im Weltraum war Gegenstand einer gemeinsamen Veröffentlichung mit unseren amerikanischen Partnern: *E. R. Elliott et al., Nature* **623**, 502-508 (2023).

Eines unserer Engagements umfasste die Analyse der Mischungsdaten und deren Interpretation mit unserer theoretischen Simulationsplattform, beschrieben in 2.1.4. Unter Verwendung

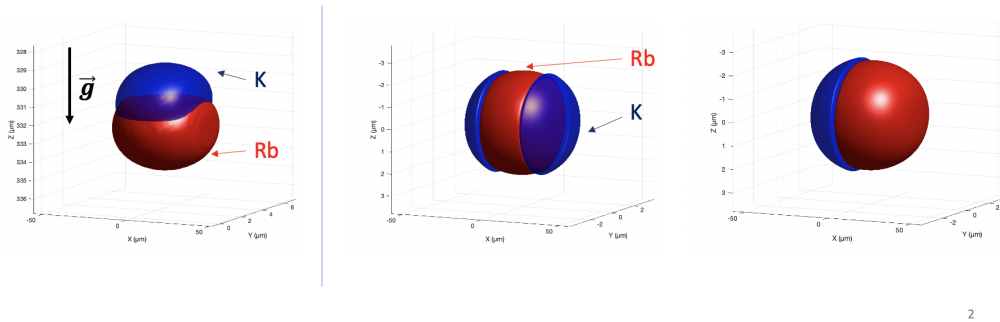


Abbildung 1: Vergleich der Mischungskonfiguration unter Einfluss der terrestrischen Gravitation im Vergleich zu Mikrogravitation. Links: Grundzustand unter Gravitation, Mitte: Grundzustand unter Mikrogravitation, Rechts: Beispiel eines quasistabilen Zustands in Mikrogravitation.

der entwickelten Skalierungsmethode wurden effiziente Simulationen der experimentellen Sequenz durchgeführt. Eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Ergebnissen wurde beobachtet, wie in Abbildung 2 dargestellt. Diese Abbildung vergleicht die Dichteverteilung einer Mischung aus Kalium (K41) und Rubidium (Rb87) mit der einer einzelnen K41-Wolke nach einem Transport und einer anschließenden freien Expansion der Ensembles. Wir können beobachten, dass in den Panels (e) und (f) von Abbildung 2 die maximale Dichte der thermischen Wolke und der kondensierten Wolke verschoben sind. Dies führte zur Hypothese, dass es sich um einen Effekt der Wechselwirkung zwischen den beiden Arten in einer BEC-Mischung handelt. Diese Hypothese wurde durch den Vergleich der jeweiligen Dichtemaxima für eine einzelne K41-Wolke in den Panels (e) und (f), die keine Verschiebung zeigen, bestätigt. Dies lieferte den ersten Beweis für Wechselwirkungen zwischen den beiden Spezies einer Quantenmischung im Weltraum. Diese Arbeiten fanden im Rahmen von AP 2 statt.

2.1.6. Atom-Interferometrie mit Zwei-Spezies BECs

Wir haben zusammen mit dem JPL-Team das erste Grundlagen-Experiment zur Zwei-Spezies Interferometrie mit BECs im Weltall durchgeführt. Die Ergebnisse dazu haben wir ausführlich in einer gemeinsamen Veröffentlichung mit unseren amerikanischen Partnern dargestellt: *E. R. Elliott et al., Nature* **623**, 502-508 (2023).

Die Durchführung der Atominterferometrie mit zwei Spezies in Schwerelosigkeit ermöglicht neue Chancen für extrem sensitive Tests des Einstein'schen Äquivalenzprinzips. Das Ziel der durchgeführten Experimente ist hier vor allem die Demonstration der grundlegenden Technologie und dessen Weiterentwicklung. Wir nutzen hier einen einzelnen Laser mit einer sogenannten magischen Wellenlänge, die für ein zeitlich abgestimmtes Verhalten beider Spezies im Rahmen von Bragg-Oszillationen sorgt. So können sich zum Beispiel Vibrationen auf dem Laser, die wiederum zu Phasenrauschen führen, als Gleichtaktrauschen in der differentiellen Messungen zwischen den Atomen gegenseitig aufheben. Im Rahmen der ersten Experimente konnte eine Gesamtinterferometriezeit von 1ms erreicht werden, die zu einer differentiellen Phasenmessung von $0.5_{-1.2}^{+0.5}$ geführt hat. Die schließt wie erwartet die Null mit ein und ist somit in Übereinstimmung mit dem Äquivalenzprinzip. Die aktuellen Limitierungen bzgl. der Sensitivität liegen in der limitierten Interferometriezeit, und damit vor allem in der Kontrolle der differentiellen Schwerpunktsbewegung, dem Überlapp mit dem Interferometrielaser und dem Expansionsver-

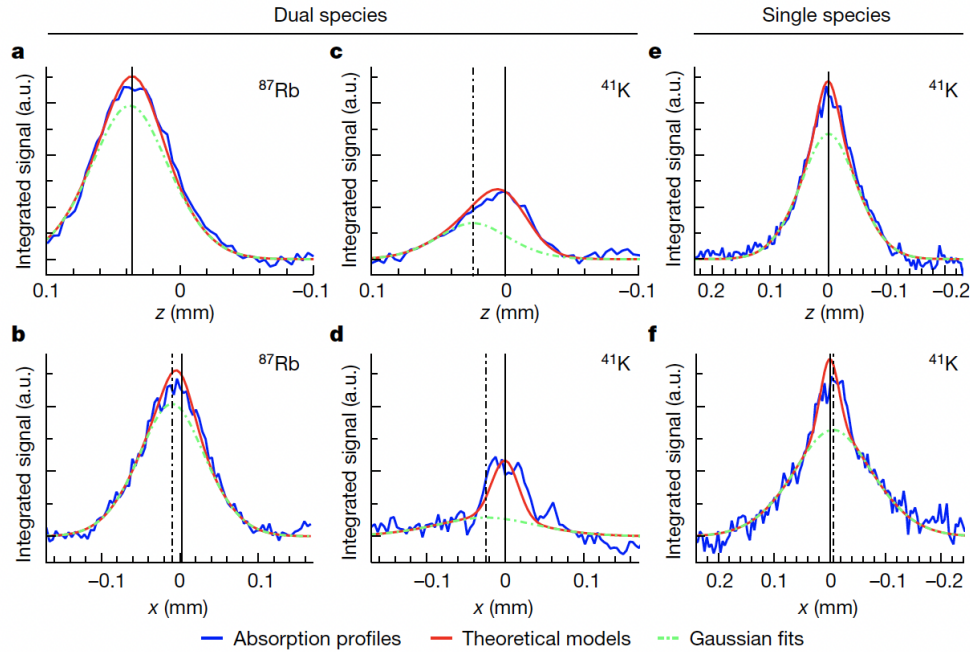


Abbildung 2: Wechselwirkungen von K und Rb in einer Mischung. Die blaue Kurve entspricht der integrierten Dichte der auf der Kamera beobachteten Atomwolke. Die rote Kurve entspricht den Ergebnissen des theoretischen Modells, und die grüne Kurve zeigt einen Gaussian Fit der thermischen Wolke. Abbildung aus *E. R. Elliott et al., Nature* **623**, 502-508 (2023).

halten der Mischung. Wir berichten im folgenden Kapitel 2.1.7 über Schritte zur Verbesserung der genannten Parameter. Diese Arbeiten fanden im Rahmen von AP 3 statt, wurden federführend durch den Verbundpartner in Ulm durchgeführt und aus Hannover unterstützt.

2.1.7. Präparation von BEC-Mischungen für die Atominterferometrie

Nach der ersten Realisierung einer Quantengasmischung aus Rubidium und Kalium haben wir weitere Experimente zur Charakterisierung und Präparation der Mischung durchgeführt. Das Ziel dieser Experimente ist es, den Grundzustand der Mischung zu beobachten und weiterhin einen Mischungszustand zu präparieren, der die Durchführung von Zwei-Spezies Atominterferometrie mit längeren Interferometrie-Zeiten ermöglicht. Dabei haben wir beobachtet, dass bei der Freisetzung aus der Evaporationsfalle starke differentielle Kräfte auf die unterschiedlichen Atomsorten wirken. Daher haben wir Ausschaltsequenzen entwickelt, die die Schwerpunktbewegung beider Spezies bestmöglich vereinigen. Dabei verzögern wir das Ausschalten der Atomchip-Drähte relativ zu den Spulen, um die unterschiedlichen Kicks aufgrund des Massenunterschieds zwischen Rubidium und Kalium auszugleichen. Auch mit diesem Verfahren haben wir bisher immer gebündelte Rubidium- und Kalium-Wolken beobachtet, jedoch noch keine burger-ähnliche Aufspaltung. Bezüglich der Präparation der Mischung für die Atominterferometrie haben wir eine Reihe von Experimenten durch Simulation geplant und bereits teilweise durchgeführt. Insbesondere haben wir dabei ein kalibriertes Atomchip-Modell verwendet, um genaue Magnetfalleneigenschaften zu extrahieren und diese im Rahmen unserer Simulationen für BEC-Mischungen zu verwenden. Damit haben wir Transporte geplant, die den Grundzustand der Mischung aus der Evaporationsfalle konservieren und die Mischung gleichzeitig in

eine andere Falle transportieren. Diese Transporte haben wir experimentell durchgeführt und die BEC-Mischung in ihrem Dichteverhalten, ihrer Schwerpunktsbewegung und ihrem Expansionsverhalten charakterisiert. Diese Eigenschaften und dessen präzise Kontrolle sind essentiell für die Durchführung von Mischungs-Interferometrie über die Grundlagenexperimente (siehe Abbildung 2.1.6) hinaus zu ermöglichen. Diese Arbeiten fanden im Rahmen von AP 2 und AP 3 statt.

2.1.8. Magnetfeldmessung mittels differentieller Atominterferometrie

Die Messung der residuellen Magnetfeldkrümmung innerhalb der CAL-Apparatur mittels differentieller Mach-Zehnder-Interferometer aus dem Vorjahr wurde fortgesetzt und konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Dazu wurden im Jahr 2023 noch einige Wiederholungsmessungen durchgeführt, um die Beständigkeit der Messergebnisse zu validieren und die Statistik der Daten zu verbessern.

Anschließend wurden die Messdaten der gesamten Kampagne gründlich analysiert. Hierbei kamen auch vom Team in Ulm weiterentwickelte Methoden zum Ellipse-Fitting zum Einsatz, die eine genaue Bestimmung der differentiellen Phase und ihrer Messgenauigkeit erlauben. Unter Berücksichtigung der exakten Timings und Frequenzverschiebungen während der Interferometersequenz konnte somit die Magnetfeldkrümmung innerhalb der CAL-Apparatur sehr genau bestimmt werden. Die Sensitivität der Messung beträgt nur wenige nT/mm^2 , was der Bestimmung einer magnetischen Restfalle von etwa 1 Hz mit einer Genauigkeit von wenigen mHz entspricht. Damit ist dem Projektteam die Demonstration eines Interferometer-basierten Quantensensors im Weltraum gelungen. Diese Arbeiten fanden im Rahmen von AP 3 statt, wurden federführend durch den Verbundpartner in Ulm durchgeführt und aus Hannover unterstützt.

2.1.9. Vorbereitung von Rubidium Kollimations-Experimenten

Ab November 2024 konnten wir Experimente mit dem Wissenschaftsmodul SM1 durchführen. Dieses Modul beinhaltet nicht die Funktionalität der Atominterferometrie und konnte auch keine Mischungs-BECs realisieren. Daher haben wir uns hier die Demonstration einer neuen Methode zur Kollimation von BECs innerhalb der Magnetfalle vorgenommen. Diese Methode basiert auf der gezielten Anregung von kollektiven Moden (Oszillationen in der Größe des BEC) innerhalb der Falle. Daraufhin wird dann die Frequenz der Falle reduziert, was dem BEC die Möglichkeit gibt, sich in der Falle auszubreiten und somit die kinetische Energie in potentielle Energie umwandelt. Der Vorteil dieser Methode ist zum Einen, dass durch ein passendes Timing nicht nur eine, sondern mehrere Richtungen mit unterschiedlichen Fallenfrequenzen gleichzeitig kollimiert werden können. Zum Anderen kann diese Methode auch mit anderen Schritten kombiniert werden, zum Beispiel mit der Delta-Kick Kollimation. Dies verspricht insbesondere Anwendungen zur Kollimation von BEC-Mischungen. Die beiden Spezies sehen in Magnetfallen grundsätzlich unterschiedliche Fallenfrequenzen, was es inherent erschwert diese parallel zu kollimieren. Diese Arbeiten unterstützen also die geplanten Ziele in den AP 2 und AP 3.

2.1.10. Lessons Learned Workshop zur Durchführung von BEC-Experimenten auf der ISS

Wir haben zum Ende dieses Projekts einen Lessons Learned Workshop zur Durchführung von BEC-Experimenten mit CAL durchgeführt. Dieser Workshop war als Meilenstein 3 (siehe Ta-

belln 1 und 2) ein konkretes Ziel dieses Projekts, um die Kollaboration zwischen den deutschen WissenschaftlerInnen an der LUH und der UULM und den amerikanischen Partnern des JPL zu reflektieren und weiter zu verbessern. Darüberhinaus war dieser Workshop aber auch von hoher Relevanz für andere vom DLR unterstützte Projekte, insbesondere die zur Installation in der ISS geplante und gerade in Arbeit befindliche BECCAL-Apparatur. Zu diesem Workshop haben wir daher eine Vielzahl von Partnern eingeladen, darunter alle direkt beteiligten WissenschaftlerInnen dieses Verbundprojekts, unser amerikanisches Konsortium CUAS und seine Mitglieder, insbesondere den Leiter Prof. Nick Bigelow, Vertreter des JPL, insbesondere den Projektwissenschaftler Jason Williams, Vertreter des BECCAL-Projekts, Vertreter der DLR Agentur und weitere wissenschaftliche Kollaborationspartner anderer Universitäten. Die dominierenden Themen des Workshops waren die Besprechung der wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse der deutsch-amerikanischen Kooperation mit dem CAL-Experiment, sowie die operativen Prozesse, die im Laufe der Jahre verbessert wurden. Von unserer Seite war der Workshop ein voller Erfolg, insbesondere die kritischen Gespräche zur weiteren Optimierung, wie wir das in Orbit befindliche CAL-Experiment bestmöglich und effektiv nutzen können. Auch die beiden JPL und BECCAL Teams konnten einige Erkenntnisse aus unseren Fehlern und verbesserten Prozessen mitnehmen, und haben sich für die Wiederholung eines solchen Austausch in der Zukunft ausgesprochen.

2.1.11. Vergleich des aktuellen Stands mit den angestrebten Zielen

Im Folgenden wird eine kurze Zuordnung der erzielten Ergebnisse zu den einzelnen Arbeitspaketen (AP) gegeben.

AP1 - Space Atom Laser Nach Abschluss der interferometrischen Messung der Magnetfeldkrümmung innerhalb der CAL-Apparatur und dem Ausfall der Kaliumquelle wurden ab Mitte des Jahres 2023 verstärkt Experimente zum Atomlaser durchgeführt. Hier wurde zunächst der Übergang von magnetisch sensitiven in magnetisch insensitive Zustände geplant und charakterisiert. Dies ermöglicht prinzipiell das Auskoppeln aus der Magnetfalle und legt somit die Basis für den Space Atom Laser, siehe 2.1.3. Aufgrund darauf folgender technischer Probleme mit dem CAL-Instrument und der Entscheidung des JPL, das Wissenschaftsmodul auszutauschen, konnten die geplanten Experimente nicht abgeschlossen werden.

AP2 - Quantengasmischungen Die Ziele dieses Arbeitspaketes waren die Realisierung von BEC-Mischungen und die Untersuchung ihrer Interspezies-Wechselwirkungen, die aufgrund von Symmetriebrechungen in Gravitation nicht möglich ist. Gegen Ende des Jahres 2022 ist die Produktion der ersten BEC-Mischung im Weltall realisiert wurde. Dabei konnten wir insbesondere in der Analyse der beobachteten Mischungen und dessen Weitertransport einen wertvollen Beitrag leisten, siehe Abschnitt 2.1.5. Diese Arbeiten wurden in folgender Arbeit veröffentlicht: *E. R. Elliott et al., Nature* **623**, 502-508 (2023).

Von Oktober 2022 bis Mai 2023 haben wir innerhalb unserer Konsortiums eine Reihe zusätzlicher Mischungs-Experimente durchgeführt. Dabei lag der Fokus zunächst auf der Charakterisierung der Mischung in Bezug auf dessen Expansionsverhalten und Schwerpunktsbewegung nach dem Ausschalten der Falle. Dabei nutzen wir die von A. Pichery entwickelte Software zur Simulation von BEC-Mischungen in Kombination mit der von G. Müller entwickelten Simulation zur realistischen Berechnung der Magnetfallen-Eigenschaften im CAL-Experiment. Dies erlaubt zum einen die Simulation des Grundzustands der wechselwirkenden Mischung und

zum anderen auch dessen Expansionsverhalten. Weiterhin haben wir Experimente zur Realisierung eines homogenen Befreiens beider Atomspezies aus der Falle mithilfe unserer kalibrierten Atomchip-Simulation durchgeführt. Als einen weiteren notwendigen Schritt hin zu einer sensitiven Durchführung von Zwei-Spezies Atominterferometrie haben wir außerdem Transporte der BEC-Mischung durchgeführt, wobei wir die Interspezies-Interaktionen vorher mit Simulationen geplant und später mit Messungen getestet haben, siehe Abschnitt 2.1.7. Dies stellt das erfolgreiche Erreichen des Meilenstein 2 aus Tabelle 2 dar.

Auf die hier von A. Pichery entwickelte und verwendete Simulationsplattform für BEC-Experimente mit zwei Spezies gehen wir in Abschnitt 2.1.4 weiter ein. Diese wurde auch in folgender Arbeit veröffentlicht: *Pichery et al., AVS Quantum Science* 5.4 (2023). Dies stellt das erfolgreiche Erreichen des Meilenstein 2 aus Tabelle 1 dar.

Durch Hardware-Probleme mit dem Wissenschaftsmodul SM3 konnten ab Mai 2023 keine Mischungs-Experimente mehr durchgeführt werden. Im November 2024 konnten dann mit dem Modul SM1 wieder erste BEC-Experimente mit Rubidium aufgenommen werden. Hier wurden zunächst Experimente zur Kalibrierung des Instruments und zur Charakterisierung der Performance durchgeführt. Da dieses Modul effektiv keine Zwei-Spezies Experimente und keine Atominterferometrie unterstützt, war das Ziel im Rahmen dieses Arbeitspakets die Methode des Kollimierens innerhalb der Falle mit einer Spezies zu untersuchen. Diese Methode verspricht Anwendungen für die multidimensionale Kollimation von BEC-Mischungen, siehe Abschnitt 2.1.9.

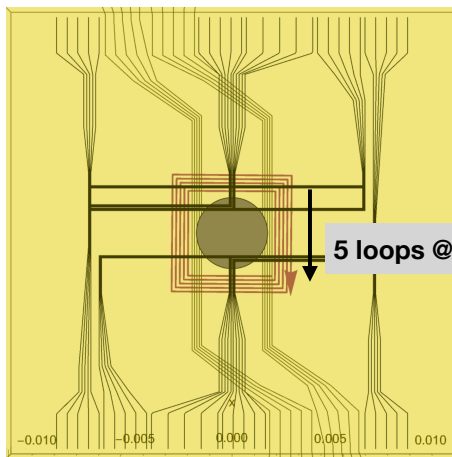
AP3 - Atominterferometrie Die Ziele dieses Arbeitspakets sind die Planung, Durchführung und Auswertung von Atominterferometrie-Experimenten mit Einzel-Spezies BECs und BEC-Mischungen, sowie numerische Simulation von Atominterferometern mit optisch verzerrten Strahlen.

Wir haben eine vollständige Messkampagne mit differentiellen Atominterferometern mit Rubidium-BECs durchgeführt, die wir zur Vermessung des residualen Magnetfelds innerhalb der CAL-Apparatur verwendet haben. Dies beinhaltete eine differentielle Mach-Zehnder Konfiguration mit verschiedenen Zeeman-Leveln $m_F = 0$ und $m_F = 2$, sowie die Realisierung einer differentiellen Butterfly-Konfiguration mit $m_F = 2$ Atomen. Siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.8. Diese Ergebnisse haben wir zum Ende dieses Projekts zur Veröffentlichung in einer angesehenen Fachzeitschrift vorbereitet und bereits auf einem Open-Access Archiv vorveröffentlicht: *M. Meister, G. Müller, et al., arXiv:2505.23532* (2025). Dies stellt das erfolgreiche Erreichen des Meilenstein 1 aus Tabelle 2 dar.

In diesem Rahmen haben wir auch die in 2.1.8 näher beschriebenen optischen Simulationen des Bragg-Beams durchgeführt. Ziel war hier die Untersuchung der Einflüsse des aufgrund von Streueffekten am Chip räumlich variierenden Intensitätsprofils des Interferometrie-Lasers. Simulationen von Atominterferometern zeigen hier einen Kontrastverlust aufgrund asymmetrischer optischer Dipolkräfte in den Interferometer-Armen. Dieser Kontrast-Verlust ist insbesondere entscheidend für Separations-Zeiten, die über die von uns experimentell durchgeführten Zeiten von ca. 40ms hinaus gehen. Ergänzend dazu wurde eine dezidierte Messkampagne durchgeführt, um den Verlauf des Atomstrahls und seine Wirkung auf die Atomwolke genauer zu charakterisieren. Diese Ergebnisse sind wiederum in das Design des zukünftigen Wissenschaftsmoduls im Rahmen von AP 4 eingeflossen.

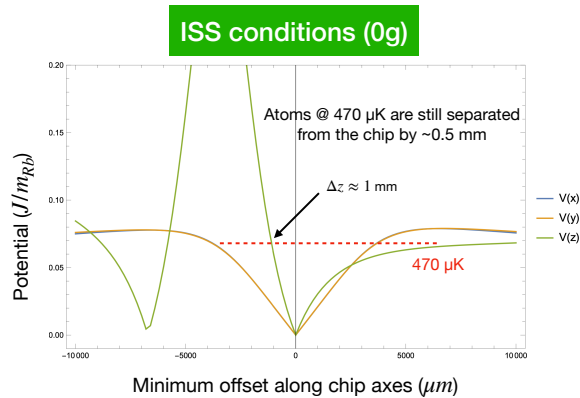
Im Rahmen der BEC-Mischungen haben wir vor allem aktuelle Limitierungen für die Interferometriezeit identifiziert (siehe 2.1.6) und entsprechende Experimente durchgeführt, die

New mesoscopic trap



5 loops @ 5A

Z coil: 1.2 A



Magnetic field gradient: ~ {33, 33, 61} G/cm

Minimum position: ~ {-0.1, -0.1, 1.5} mm

Trap depth ~ 0.47 mK

Eigenvector angles: ~ {10, 24, 22} °

Abbildung 3: Upgrade zur neuen Wissenschaftskammer SM3b durch Hinzufügen einer neuen mesoskopischen Struktur zum Atomchip. Diese kann eine Quadrupolfalle in der Nähe des Atomchips produzieren.

die relevanten Parameter verbessern sollen (siehe 2.1.7). Diese Arbeiten zur Präparation der Mischung für die Atominterferometrie beinhalten den Transport von Mischungen, die Charakterisierung dessen Wechselwirkung und das kontrollierte Auskoppeln aus der Magnetfalle.

AP4 - Input zum SM4 Upgrade Mit einem geplanten Austausch des Wissenschafts-Moduls SM3 durch ein neues in 2023 gab es die Möglichkeit die Schwächen des aktuellen Atomchip-Designs zu beheben. Zusätzlich zu den bereits in Abschnitt 2.1.1 genannten Gründen ist dies auch für unsere geplanten Arbeiten mit Quantengasmischungen höchst relevant. Bei der Verwendung von Rubidium zum sympathischen Kühlen von Kalium bei der Produktion einer BEC-Mischung aus Rubidium und Kalium ist eine hohe Anzahl an Rubidium-Atomen zu Beginn des Prozesses aus zwei Gründen wichtig: erstens verringert sich die Anzahl der Rubidium-Atome bei diesem Prozess weiter und zweitens ist dieses Kühlverfahren mit mehr kalten Rubidium-Atomen effektiver, kühlt also schneller (und mehr) Kalium-Atome.

Es wurden in Zusammenarbeit mit den Kollegen des JPL mehrere Designs für eine Erweiterung durch mesoskopische Strukturen erstellt, analysiert und gegeneinander abgewogen. Das Konzept der mesoskopischen Struktur und der dabei entstehenden Falle sind in Abb. 3 dargestellt. Dabei lag ein hoher Fokus auf dem effizienten Transport der thermischen Atome von einer ca. 15mm entfernten MOT in eine von den neuen mesoskopischen Strukturen produzierte Quadrupolfalle. Von hier aus wurde unter anderem der Transport in die finale Evaporationsfalle simuliert und auf seinen räumlichen Überlapp und die energetische Kompatibilität optimiert.

Das gemeinsam evaluierte Atomchip-Design wurde vom JPL zur Verwendung in CAL SM3b (Neubenennung des SM4 Upgrade) zugelassen. Außerdem hatten die Erkenntnisse aus den in AP 3 erarbeiteten optischen Simulationen einen Einfluss auf die Kollimation des Interferometrie-Lasers für CAL SM3b, siehe Abschnitt 2.1.2. Der Transport von CAL SM3b zur ISS und dessen Installation wurde im September 2023 durchgeführt, jedoch wurden während der Inbetriebnahme Probleme mit der Vakuumqualität festgestellt, die die Durchführung von BEC-

Experimenten verhindert. Zur Überbrückung wurde dann ein älteres Modell SM1 installiert, welches einen Atomchip mit einem alten Design beinhaltet. Für das Jahr 2026 ist die Installation des Wissenschaftsmoduls SMX geplant, welches wiederum die hier entwickelten Verbesserungen am Atomchip-Design beinhaltet und die diskutierten Performance-Verbesserungen verspricht.

Technische Details des neuen Designs der mesoskopischen Strukturen unterliegen Export-Regulierungen von amerikanischer Seite. Dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen und der Meilenstein 1 aus Tabelle 1 erreicht. Wir konnten einen hohen Beitrag zum neuen Design liefern und dabei viel über das CAL-Instrument lernen. Die Unterstützung wurde von amerikanischer Seite sehr gewertschätzt.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die genehmigten Mittel bestanden zum größten Teil aus Personalkosten und wurden zur Finanzierung der beschäftigten Wissenschaftler aufgewendet. Siehe hierzu auch den Verwendungsnachweis und den Finanzierungsplan des Projektantrags. Weiterhin wurden Reisemittel verwendet, um den engen Kontakt mit dem Verbundpartner in Ulm und den Partnern beim JPL und der NASA in den USA aufrecht zu erhalten, sowie den notwendigen Austausch mit der Wissenschaftsgemeinschaft zu gewährleisten.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Da die CAL-Apparatur von den amerikanischen Partnern gebaut und finanziert wurde, entstanden während der Durchführung und Auswertung der Experimente im Rahmen dieses Verbundprojekts keine Material- oder Baukosten. Stattdessen fielen Personal- und Reisekosten für die an den Experimenten beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter an. Ohne diese finanziellen Mittel wäre eine Mitarbeit an der Durchführung der Experimente für die Verbundpartner nicht möglich gewesen. Der von den Projektpartnern geleistete Beitrag war dabei entscheidend für den Erfolg der vom CUAS mit CAL durchgeführten Experimente und bildet die Grundlage für die weitere zukünftige Zusammenarbeit.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen des Verbundprojekts durchgeführten Experimente und die damit gewonnenen Erkenntnisse sind entscheidend für die weitere Grundlagenforschung mit ultrakalten Quantengasen, insbesondere Mischungs-BECs, in Schwerelosigkeit. Insbesondere die Fortführung der CAL-Experimente im Nachfolgeprojekt CAL III stützt sich auf die in diesem Projekt geleisteten Arbeiten. Auch zukünftige Experimente mit der geplanten deutsch-amerikanischen BECCAL-Apparatur werden von den erzielten Ergebnissen profitieren.

Praktische Erfahrungen im Umgang mit ultrakalten Quantengasen sind darüber hinaus von großer Bedeutung für die Weiterentwicklung von Quantensensoren auf Basis atomarer Interferometer für die Erdbeobachtung – wie beispielsweise die CARIOQA-Mission – sowie für die Durchführung hochpräziser Tests zu grundlegenden physikalischen Fragestellungen, wie im Beispiel STE-QUEST.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Ein grundlegender Aspekt der vorliegenden Arbeit ist die Weiterentwicklung und Demonstration der Technologie von Atominterferometern mit BECs als Testmasse, die durch sogenannte Atomchips bereitgestellt werden. Daher fließen die gewonnenen Erfahrungen stets indirekt in andere Projekte mit ein, dazu gehören insbesondere das BECCAL Projekt¹ und das CARIOQA Projekt².

Darüberhinaus wurde auf der China Space Station ein Gyroskop mittels Atominterferometrie auf Basis von thermischen Atomen realisiert³. Dies nutzt zwar keine BECs und realisiert Atominterferometrie mittels Raman statt Bragg Pulsen, ist aber als sehr verwandte Technologie relevant für die Ziele, die auch unser Ansatz langfristig erreichen möchte.

BEC- und Interferometrie-Experimente wurden von mehreren Forschergruppen mit CAL durchgeführt und daher findet hier ein stetiger Austausch mit den Wissenschaftlern an anderer Stelle statt, dies beinhaltet insbesondere das JPL-Team in Person von Dr. Jason Williams und den Leiter des Konsortiums zur Untersuchung von Quantum Bubbles Prof. Dr. Nathan Lundblad.

Neue Methoden, Techniken und Ideen in unseren Fachgebieten, sowie Fortschritte auf Seiten der Theorie durch andere Gruppen wurden bei der Durchführung der Experimente miteinbezogen und bei der Bewertung der Ergebnisse und entsprechender Anwendungsmöglichkeiten berücksichtigt.

2.6. Erfolgte und geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

2.6.1. Beiträge in wissenschaftlichen Zeitschriften

G. Müller, V. J. Martínez-Lahuerta, I. Sekulic, S. Burger, P. I. Schneider, N. Gaaloul, *Bayesian optimization for state engineering of quantum gases*, *Quantum Science and Technology* 10.1 (2024): 015033. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ad9050>.

J. R. Williams, C. A. Sackett, H. Ahlers, D. C. Aveline, P. Boegel, S. Botsi, E. Charron, E. R. Elliott, N. Gaaloul, E. Giese *et al.*, *Pathfinder experiments with atom interferometry in the Cold Atom Lab onboard the International Space Station*, *Nature Communications* 15.1 (2024): 6414. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50585-6>.

A. Herbst, T. Estrampes, H. Albers, R. Corgier, K. Stolzenberg, S. Bode, E. Charron, E. M. Rasel, N. Gaaloul, and D. Schlippert, *Matter-wave collimation to picokelvin energies with scattering length and potential shape control*, *Communications Physics* 7 (2024): 132. <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01621-w>.

A. Herbst, T. Estrampes, H. Albers, V. Vollenkemper, K. Stolzenberg, S. Bode, E. Charron, E. M. Rasel, N. Gaaloul, and D. Schlippert, *High-flux source system for matter-wave interferometry exploiting tunable interactions*, *PHYSICAL REVIEW RESEARCH* 6 (2024): 013139.

¹K. Frye et al. EPJ Quantum Technol. (2021) 8: 1.

²T. Lévêque et al. ICSO 2022. Vol. 12777. SPIE, 2023.

³J. Li et al. National Science Review (2025): nwaf012. (bereits in 2024 auf arXiv veröffentlicht)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.013139>.

E. R. Elliott, D. C. Aveline, N. P. Bigelow, P. Boegel, S. Botsi, E. Charron, J. P. D’Incao, P. Engels, T. Estrampes, N. Gaaloul, J. R. Kellogg, J. M. Kohel, N. E. Lay, N. Lundblad, M. Meister, M. E. Mossman, G. Müller, H. Müller, K. Oudrhiri, L. E. Phillips, A. Pichery, E. M. Rasel, C. A. Sackett, M. Sbroscia, J. R. Williams, *Quantum gas mixtures and dual-species atom interferometry in space*, *Nature* **623**, 502–508 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06645-w>;

A. Pichery, M. Meister, B. Piest, J. Böhm, E. M. Rasel, E. Charron, N. Gaaloul, *Efficient numerical description of the dynamics of interacting multispecies quantum gases*, *AVS Quantum Sci.* **5**, 044401 (2023). <https://doi.org/10.1116/5.0163850>;

D. R. Lindberg, N. Gaaloul, L. Kaplan, J. R. Williams, D. Schlippert, P. Boegel, E.-M. Rasel, D. I. Bondar, *Asymmetric tunneling of Bose–Einstein condensates*, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* **56**, 025302 (2023). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6455/aca50>;

N. Lundblad, D. C. Aveline, A. Balaž, E. Bentine, N. P. Bigelow, P. Boegel, M. A. Efremov, N. Gaaloul, M. Meister, M. Olshanii, C. A. R. Sá de Melo, A. Tononi, S. Vishveshwara, A. C. White, A. Wolf, and B. M. Garraway, *Perspective on quantum bubbles in microgravity*, *Quantum Sci. Technol.* **8**, 024003 (2023). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.04804>;

S Abend, et al., *Technology roadmap for cold-atoms based quantum inertial sensor in space*, *AVS Quantum Science* **5**, 1 (2023). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.04804>;

J.N. Kirsten-Siemß, F. Fitzek, C. Schubert, E.M. Rasel, N. Gaaloul, K. Hammerer, *Large-Momentum-Transfer Atom Interferometers with μ rad-Accuracy Using Bragg Diffraction*, *Physical Review Letters* **131**, 033602 (2023). <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.033602>;

D. R. Lindberg, N. Gaaloul, L. K. Kaplan, J. R. Williams, D. Schlippert, P. Boegel, E. M. Rasel, D. I. Bondar, *Asymmetric Tunneling of Bose-Einstein Condensates*, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **56**, 025302 (2023). <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aca50>;

N. Gaaloul, M. Meister, R. Corgier, A. Pichery, P. Boegel, W. Herr, H. Ahlers, E. Charron, J. R. Williams, R. J. Thompson, W. P. Schleich, E. M. Rasel, N. P. Bigelow, *A space-based quantum gas laboratory at picokelvin energy scales*, *Nat Commun* **13**, 7889 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35274-6>;

A. Wolf, P. Boegel, M. Meister, A. Balaž, N. Gaaloul, M. A. Efremov, *Shell-shaped Bose-Einstein condensates based on dual-species mixtures*, *Physical Review A* **106** (1), 013309 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.013309>;

N. Lundblad, D. C. Aveline, A. Balaž, E. Bentine, N. P. Bigelow, P. Boegel, M. A. Efremov, N. Gaaloul, M. Meister, M. Olshanii, C. A. R. Sá de Melo, A. Tononi, S. Vishveshwara, A. C. White, A. Wolf, and B. M. Garraway, *Perspective on quantum bubbles in microgravity*, *Quantum Sci. Technol.* **8**, 024003 (2022). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.04804>;

2.6.2. Eingereichte oder in Arbeit befindliche Publikationen

M. Meister, G. Müller, P. Boegel, A. Roura, A. Pichery, D. B. Reinhardt, T. Estrampes *et al.*, *Space magnetometry with a differential atom interferometer*, *arXiv preprint arXiv:2505.23532* (2025). <https://arxiv.org/abs/2505.23532>.

2.6.3. Abschlussarbeiten an der Universität Hannover

A. Pichery, Dissertation: *Theoretical study of quantum gas experiments in an Earth-orbiting research laboratory*, Leibniz Universität Hannover, Tag der Promotion: 01.03.2024. <https://doi.org/10.15488/17008>;

2.6.4. Vorträge und Poster

T. Estrampes, A. Herbst, R. Corgier, E. Charron, E. M. Rasel, D. Schlippert, N. Gaaloul, *Matter-wave collimation to picokelvin energies with scattering length and potential shape control*, ICAP 2024, London, 15.07.2024 (Poster)

T. Estrampes, A. Herbst, R. Corgier, A. Pichery, G. Müller, E. M. Rasel, D. Schlippert, E. Charron, N. Gaaloul, *Optimal time-dependent manipulation of Bose-Einstein condensates*, DPG SAMOP 2024, Freiburg, 14.03.2024 (Vortrag und Poster)

G. Müller, V. Martínez-Lahuerta, P. Immanuel-Schneider, I. Sekulic, N. Gaaloul, *Machine Learning techniques in Quantum Gas Transport Experiments*, DPG SAMOP 2024, Freiburg, 14.03.2024 (Poster)

G. Müller, N. Gaaloul, *Bayesian Optimization for State Engineering of Quantum Gases*, NASA FPW 2024, San Diego, 15.05.2024 (Poster)

G. Müller, V. Martínez-Lahuerta, N. Gaaloul, *Bayesian Optimization for State Engineering of Quantum Gases*, QF Days 2024, Hannover, 27.05.2024 (Poster)

G. Müller *Numerical simulations for precision atom interferometry*, Thematic Einstein semester, ZIB Berlin, 06.06.2024 (Vortrag)

G. Müller, V. J. Martinez-Lahuerta, N. Gaaloul *Bayesian Optimization for State Engineering of Quantum Gases*, FOMO, Kreta, Griechenland, 12.09.2024 (Vortrag)

A. Pichery, T. Estrampes, G. Müller, N. P. Bigelow, E. Charron, N. Gaaloul and the CUAS Consortium, *Quantum gas mixtures in an Earth-orbiting research laboratory*, DPG SAMOP 2024, Freiburg, 14.03.2024 (Vortrag und Poster)

G. Müller, S. Seckmeyer, N. Gaaloul, *Optical simulations for highly sensitive atom interferometry*, DPG SAMOP 2023, Hannover, Poster 07.03.2023 (contributed poster)

- G. Müller, N. Gaaloul, N. Bigelow, *Optical and Magnetic Simulations for Space Cold-Atom Experiments*, NASA FPW 2023, Santa Barbara, Poster 24.05.2023 (contributed poster)
- G. Müller, S. Seckmeyer, N. Gaaloul, *Optical and Magnetic Simulations for Space Experiments*, QF Days 2023, Hannover, Poster 05.06.2023 (contributed poster)
- G. Müller, S. Seckmeyer, J.-N. Kirsten-Siemß, N. Gaaloul, *Optical and Magnetic Simulations for Space Cold-Atom Experiments*, EQTC, Hannover, Poster 19.10.2023 (contributed poster)
- G. Müller, S. Seckmeyer, N. Gaaloul, *Optical simulations for highly sensitive atom interferometry*, DPG SAMOP 2023, Hannover, Vortrag 10.03.2023 (contributed talk)
- G. Müller, S. Seckmeyer, N. Gaaloul, *Current status on optical diffractions by the test mass*, DLR DESIRE meeting 2023, Hannover, Vortrag 05.09.2023 (contributed talk)
- G. Müller, S. Seckmeyer, N. Gaaloul, *Simulations of $\mu\text{g}/\text{space}$ AI sources and sequences*, Quantum Sensing Seminar 2023, Bad Harzburg, Vortrag 20.09.2023 (contributed talk)
- A. Pichery, M. Meister, E. Charron, N. Gaaloul, *Dynamics of quantum gases mixtures in space experiments*, DPG SAMOP 2023, Hannover, Poster 07.03.2023 (contributed poster)
- A. Pichery, M. Meister, N. Bigelow, E. Charron and N. Gaaloul for the CUAS consortium, *Dynamics of quantum gases mixtures in space experiments*, NASA FPW 2023, Santa Barbara, Poster 24.05.2023 (contributed poster)
- A. Pichery, M. Meister, E. Charron, N. Gaaloul, *Dynamics of quantum gases mixtures in space experiments*, DPG SAMOP 2023, Hannover, Talk 10.03.2023 (contributed talk)
- T. Estrampes, A. Herbst *et al.*, *Multiple lensing methods of ultracold atomic and molecular ensembles*, SFP Conference 2023, Paris, Poster 05.07.2023 (contributed poster)
- N. Gaaloul, *Quantum Sensing in Space for Fundamental Physics and Earth Observation*, EQTC, Hannover, 20.10.2023 (invited talk)
- N. Gaaloul, *Precision Atom Interferometry with Quantum Gases*, Frontiers of Quantum Metrology: Fundamental Physics, Unexpected Connections, and Novel Applications, KITP, Santa Barbara, 11.10.2023 (invited talk)
- N. Gaaloul and K. Hammerer *Theory of Large-Momentum-Transfer Atom Interferometry*, ELGAR Workshop, LP2N, Bordeaux University, France 09.11.2023 (invited talk)
- N. Gaaloul, *Highlights of Cold Atoms in Space*, QuantumFrontiers Day, Hannover 05.06.2023 (invited talk)
- N. Gaaloul, *Quantum Sensing with atom interferometry*, IMPRS lecture week, Ourense 02.10.2023 (invited lecture)

N. Gaaloul, *Quantum Sensing with Ultra-cold Atom Interferometers*, DQ-mat Summer School, Hannover 22.08.2023 (invited lecture)

N. Gaaloul, *Space-Time Explorer and QUantum Equivalence Space Test STE-QUEST*, NASA Fundamental Physics Workshop, Santa Barbara, 24.05.2023 (invited talk)

N. Gaaloul, *Quantum Sensing with Ultra-cold Atom Interferometers A theoretical perspective*, LCAR, Toulouse University, France, 13.04.2023 (invited talk)

N. Gaaloul, *Quantum Sensing with Ultra-cold Atom Interferometers*, TII, Abu Dhabi, UAE, 27.04.2023 (invited talk)

N. Gaaloul, *Quantum Bubbles with Degenerate Mixtures*, PQE Conference, Snowbird, USA, 09.01.2023 (invited talk)

N. Gaaloul, *Cold Atom Lab*, Science Debrief of M. Maurer (Cosmic Kiss), Oberpfaffenhoffen, 23.03.2023 (invited talk)

N. Gaaloul, *Quantum State Engineering for precision measurements*, BBR Induced Effects and Phenomena Workshop, Vienna, Austria 16.02.2023 (invited talk)

G. Müller, C. Struckmann, S. Seckmeyer, F. Fitzek, N. Gaaloul, *Universal atom interferometer simulator*, DPG SAMOP 2022, Erlangen, Poster 15.03.2022 (talk)

G. Müller, *Optical simulations for high precision atom interferometry*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 06.12.2022 (talk)

G. Müller, *Optical simulations for high precision atom interferometry*, Holger Müller group, University of California, Berkeley, 09.12.2022 (talk)

A. Pichery, M. Meister, N. Bigelow, N. Gaaloul, and the CUAS Team, *Quantum state engineering of quantum gases in orbit*, DPG SAMOP 2022, Erlangen, 15.03.2022 (talk)

A. Pichery, *Dynamics of quantum gases mixtures in space experiments*, International School of Physics “Enrico Fermi”, Course 211 “Quantum Mixtures with ultra-cold Atoms”, 18-23.07.2022 (poster)

N. Gaaloul, *Quantum Gases in Space*, Imperial College London, September 2022 (invited talk)

N. Gaaloul, *Quantum Gases in Space for Fundamental Physics and Earth Observation*, Frontiers of Matterwave Optics (FOMO), 2022 (invited talk).

N. Gaaloul, *Quantum Gases in Space*, Center for Theoretical Physics Colloquium, Warsaw, 2022(invited talk).

N. Gaaloul, *Quantum Gases in Space*, Rencontres de Moriond - Gravitation, La Thuile, 2022 (invited talk).

N. Gaaloul, "*Precision Atom Interferometry with Quantum Gases*, Abschlussposium Wissenschaftsallianz TU Braunschweig-Leibniz Universität Hannover, December 6th 2022 (poster)

Datum und Unterschrift

Hannover, den 30. June 2025

Projektleitung: Dr. Naceur Gaaloul

A. Anlage: Erfolgskontrollbericht

A.1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Im Rahmen des Verbundprojekts CAL II wurden Experimente mit ultrakalten Quantengasen mit einer Multi-User-Plattform auf der Internationalen Raumstation ISS durchgeführt. Wichtige experimentelle Techniken, die während des CAL I Projekts zum ersten Mal unter Weltraumbedingungen getestet wurden, wurden weiterentwickelt und an die neu installierten wissenschaftlichen Module angepasst. Unter anderem wird damit die Grundlagenforschung im Bereich der ultrakalten Quantengase sowie der Materiewelleninterferometrie unter Schwerelosigkeit gefördert, sowie die weitere Entwicklung weltraumbasierter Quantensensoren zur Inertialsensorik und zur Vorbereitung zukünftiger Erdbeobachtungsmissionen vorangetrieben. Der Verbundpartner der LUH hat bei Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente entscheidende Beiträge geleistet.

Während der Projektlaufzeit wurden unterschiedliche Experimente mit BECs in Schwerelosigkeit durchgeführt, die unabdingbare Vorarbeit für zukünftige Grundlagenexperimente und Präzisionsmessungen darstellen. Daneben wurden auch einzigartige Erfahrungen mit der Durchführung von Experimenten mit ultrakalten Quantengasen in einer schwer zugänglichen Multi-User-Plattform auf der ISS gewonnen. Im Einzelnen sind dies:

- Etablierung eines effektiven Ablaufs der Experimente und des Datenaustauschs ohne selbst direkten Zugriff auf das Experiment zu haben.
- Charakterisierung einer experimentellen Apparatur, insbesondere der magnetischen Chipfalle, ohne beim Bau derselben involviert gewesen zu sein.
- Unterstützung beim Design eines verbesserten SM3B Atomchips, um die Atomzahl gegenüber der aktuellen Version des Wissenschafts-Moduls zu verbessern.
- Optische Simulationen zur Evaluation der optischen Streuung am Atomchip.
- Entwicklung und Verwendung einer Simulationsplattform für BEC-Experimente mit zwei Spezies.
- Untersuchung der ersten Realisierung eines Mischungs-BEC im Weltall und Nachweis von Interspezies-Interaktionen.
- Durchführung von ersten grundlegenden Experimenten zur Interferometrie mit Mischungs-BECs im Weltall.
- Durchführung eines Tests des Einsteinschen Äquivalenzprinzips mit einer Gesamtinterferometriezeit von 1 ms.
- Vermessung von Magnetfeldkrümmungen mittels differentieller Atominterferometrie und damit Demonstration eines interferometrischen Quantensensors im Weltraum
- Demonstration einer neuen Methode zur Kollimation von BECs innerhalb der Magnetfalle, basiert auf der gezielten Anregung von kollektiven Moden.

Die Ergebnisse wurden auf Konferenzen vorgestellt und werden in anerkannten Fachzeitschriften veröffentlicht.

A.2. Fortschreibung des Verwertungsplans

Trennung von wirtschaftlichen und nichtwirtschaftlichen Tätigkeiten

Von unserer Seite sind ausschließlich nichtwirtschaftliche Tätigkeiten erfolgt, insbesondere die unabhängige FuE und die Verbreitung von Forschungsergebnissen, zum Teil gemeinsam mit dem Verbundpartner.

Verträge mit Unterauftragnehmern

Es sind keine Verträge mit Unterauftragnehmern geschlossen worden.

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Es sind keine Schutzrechtsanmeldungen von unserer Seite erfolgt.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die durchgeführten Experimente dienen der Grundlagenforschung, weshalb aktuell keine wirtschaftlichen Erfolgsaussichten zu erwarten sind.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Gegen Ende der Projektzeitraums wurde im November 2024 mit der Exploration von Kollimations-Methoden mit Einzelspezies-BEC begonnen, die vielversprechend für das gleichzeitige Herunterkühlen von Mischungs-BECs ist. Diese Erfahrungen werden im Nachfolgeprojekt CAL III Einfluss erhalten, sobald das neue Wissenschaftsmodul SM3X mit der Fähigkeit, Mischungs-BECs zu kreieren, auf der ISS installiert wurde.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die im Verbundprojekt CAL II durchgeführten und begonnenen Experimente werden nahtlos im Folgeprojekt CAL III fortgeführt, so dass ein direkter wissenschaftlicher Anschluss besteht. Darüber hinaus sind die gewonnenen Erkenntnisse auch für die Nutzung anderer Multi-User-Plattformen im Orbit, wie dem derzeit in Planung befindlichen deutsch-amerikanischen Projekt BECCAL, von großem Wert.

Eine direkte wirtschaftliche Anschlussfähigkeit besteht nicht, jedoch können in Zukunft Quantensensoren zur Erdbeobachtung oder zur Navigation zum Einsatz kommen, die ebenfalls auf Atominterferometer mit BECs zurückgreifen. Für die Erprobung dieser Technologien im Weltraum leistet dieses Verbundprojekt wertvolle Pionierarbeit.

A.3. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die vorgeschlagenen Arbeiten an der Physik mit Multi-Komponenten BEC Mischungen (in AP2), sowie die Optimierung der Bewegungskontrolle für Quantenmischungen wurden nicht vollständig abgeschlossen. Das liegt an den gegenüber den Erwartungen teilweise aus technischer Sicht fehlenden experimentellen Möglichkeiten der vom JPL betriebenen BEC-Maschine. Das Wissenschaftsmodul SM3 war nur kurze Zeit in der Lage, Mischungen herzustellen, da wesentliche Komponenten ausfielen und durch eine andere Maschine ersetzt werden mussten, die

diese Funktion nicht erfüllen konnte. Dieses Teilarbeitspaket soll im Nachfolgeprojekt CAL-III weiter durchgeführt werden.

A.4. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die in unserem Teilprojekt gewonnenen Erkenntnisse stehen unseren Kooperationspartnern zur Verfügung. Außerdem haben wir gemeinsam mit dem BECCAL-Team und anderen interessierten Wissenschaftlern einen Lessons Learned Workshop über die gesammelten Erfahrungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse auf Konferenzen präsentiert und in angesehenen Fachzeitschriften veröffentlicht.

A.5. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Das Verbundprojekt ist am 31.12.2024 planmäßig zu Ende gegangen. Die aufgrund technischer Schwierigkeiten auf Seiten des Payload-Betreibers noch nicht vollständig beendeten Arbeiten werden im Rahmen des Verbundprojekts CAL-III.

Die Ausgaben- und Zeitplanung wurde eingehalten.

A.6. Weiternutzung erworbener Gegenstände

Alle erworbenen Gegenstände, insbesondere die in der Liste der Gegenstände aufgeführten Computer, wurden nicht veräußert, sondern werden weiterhin für andere wissenschaftliche Arbeiten verwendet.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht zum Teilprojekt: Durchführung und Auswertung der Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten auf der Internationalen Raumstation im Rahmen des Cold Atom Laboratory der NASA (CAL II)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Gaaloul, Naceur Pichery, Annie Müller, Gabriel Estrampes, Timothé	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2024
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Quantenoptik Leibniz Universität Hannover Welfengarten 1 D-30167 Hannover	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen DLR 50WM2245A
	11. Seitenzahl 23
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	13. Literaturangaben -
	14. Tabellen -
	15. Abbildungen -
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Konferenzen und Veröffentlichungen; siehe Abschlussbericht.	
18. Kurzfassung In diesem Abschlussbericht werden die Arbeiten am Verbundprojekt CAL II dargestellt, die an der Leibniz Universität Hannover durchgeführt wurden. Das wesentliche Ziel dieses Verbundprojekts war die Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten mit Bose-Einstein-Kondensaten (BECs) und dessen Verwendung für die Atominterferometrie mit dem von der NASA betriebenen Cold Atom Lab (CAL) auf der Internationalen Raumstation ISS. Das Experimentieren mit diesen ultrakalten Quantengasen in Schwerelosigkeit bietet einzigartige Vorteile und erleichtert beispielsweise die präzise Manipulation der BECs ohne gravitative Einflüsse und ermöglicht damit gleichzeitig deutlich längere freie Expansionszeiten als in erdgebundenen Laboren. Im Laufe des Projekts wurden eine Vielzahl von Arbeiten durchgeführt, die sich im Wesentlichen in vier Bereiche aufteilen lassen: (i) Experimente zur Manipulation und Charakterisierung von Mischungs-BECs. Gemeinsam mit dem JPL wurden Untersuchungen des ersten Zwei-Spezies BECs im Weltraum durchgeführt. Ebenso wurden grundlegende differentielle Atominterferometrie-Experimente mit Mischungs-BECs realisiert. (ii) Durchführung einer Messkampagne zur Charakterisierung von residuellen Magnetfeldkrümmungen innerhalb der CAL-Apparatur mit unterschiedlichen differentielle Atominterferometrie-Geometrien: Mach-Zehnder und Butterfly Konfiguration. Dies stellt die erste Nutzung eines auf BECs basierten Atominterferometers als Quantensensor dar. (iii) Grundlegende Experimente zum Space Atom Laser, insbesondere die Untersuchung von Auskopplungen aus der magnetischen Falle mittels 2-Photonen Übergängen, getrieben von Mikrowellen und Radiofrequenzen. (iv): Simulationen des CAL-Instruments, insbesondere des Atomchips und der optischen Streuung des Interferometrie-Lasers am Atomchip zur Optimierung der experimentellen Performance in Hinblick auf die Atomzahl im BEC und den Kontrast in Interferometrie-Experimenten. Auf dieser Basis hat das JPL Änderungen am Design des neuen Wissenschaftsmoduls SM3X vorgenommen.	
19. Schlagwörter Bose-Einstein-Kondensat, Atominterferometrie, Quantengas-Mischung, Schwerelosigkeit, Internationale Raumstation	
20. Verlag	21. Preis