Abschlussbericht zum Vorhaben

ORKA
Optische Resonatorfalle für Kalte Atome

ZARM, Universität Bremen

Juni 2026

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung **3**

1.1 Aufgabenstellung 3
1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 3
1.2.1 Magnetische Chipfallen vs optische Fallen in μg-Anwendungen 3
1.2.2 Optische Fallen mit resonanter Überhöhung 4
1.3 Voraussetzungen 5
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens 5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6

2 Ausführliche Darstellung **7**

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens 7
2.1.1 Design, Aufbau und Test eines Bow-Tie Resonators 7
2.1.2 Konstruktion und Anfertigung einer geeigneten Vakuumkammer . . . 10
2.1.3 Aufbau eines kompakten Fallkapsel-tauglichen Kühllasersystems . . . 12
2.1.4 Integration des Resonators in die Kammer in einem Fallkapselaufbau. 12
2.2 Zahlenmäßiger Nachweis 15
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 15
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 15
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten 16
2.6 Konferenzbeiträge, Veröffentlichungen, Abschlussarbeiten 16
2.6.1 Konferenzbeiträge 16
2.6.2 Abschlussarbeiten 16

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Eine der größten Herausforderungen für die Entwicklung von Quantentechnologien für Forschung unter Weltraumbedingungen ist neben der Komplexität die Größe und die hohe Leistungsaufnahme der eingesetzten Apparaturen. Hinsichtlich der Präparation von Quantengasen für die Quantensensorik stellen magnetische Chipfallen derzeit den gängigen Ansatz dar, um kompakte, leistungs-effiziente Aufbauten zu ermöglichen. Allerdings bringen diese Fallen auch viele experimentelle Einschränkungen mit sich. Dazu zählen potentielle Störungen durch die nahe Oberfläche, Einschränkungen des optischen Zugangs sowie die fehlende Möglichkeit zur Manipulation von Gemischen mittels weiterer magnetischer Felder. Auch hybride Fallen die optische Fallen mit Chipfallen kombinieren lösen diese Probleme nur teilweise. Optische Fallen ohne Chip bieten hier viele Vorteile und sind in boden-basierten Aufbauten mit Quantengasen daher weit verbreitet. Allerdings stehen sie den Chip- und Hybridfallen in puncto Leistungsaufnahme und Kompaktheit derzeit noch deutlich nach.

Mit diesem Vorhaben wurden daher existierende Labor-Ansätze für kompakte, leistungseffiziente, rein optische Fallen aufgegriffen und für den Einsatz in Mikrogravitationsexperimenten adaptiert. Zentraler Ansatzpunkt war dabei, eine resonant überhöhte optische Falle in einem Fallkapeselaufbau umzusetzen. Ziel war eine Reduktion vor allem der Leistungsaufnahme des optischen Fallensystems um einen Faktor 10. Die Arbeiten des Vorhabens wurden dabei primär durch den perspektivischen Einsatz in der Quantensensorik mit kalten Atomen für die Mikrogravitation motiviert. Der hier verfolgte Weg der resonanten Uberhöhung des Fallenpotentials ist aber von breitem Interesse für viele weitere Bereiche der Quantentechnologie mit kalten Atomen und deren wissenschaftlichen Anwendung, von Quanteninformation bis hin zu Quantenmetrologie.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

1.2.1 Magnetische Chipfallen vs optische Fallen in μg-Anwendungen

Experimente mit Quantengasen in Schwerelosigkeit werden derzeit zum überwiegenden Teil mit magnetischen Chipfallen durchgeführt. So setzen z.B. die Verbundvorhaben QUANTUS, MAIUS sowie CAL oder BECCAL auf diesen Ansatz. Die Wahl der magnetischen Chipfalle ergibt sich vor dem Hintergrund der strengen Anforderungen hinsichtlich maximal zulässiger Größe und Leistungsaufnahme des Aufbaus. Chipfallen ermöglichen einen hinreichend kompakten Aufbau, bei moderatem Energieverbrauch und gleichzeitg hohem Fluss. QUANTUS-II oder MAIUS beispielsweise ermöglichen die Erzeugung von BECs mit

ca. 2×10^5 Atomen in unter 2 s. Die gesamte mittlere Leistungsaufnahme der MAIUS Apparatur liegt dabei bei ca. 300 W, wovon ca 50 W auf die magnetische Chipfalle (Stromtreiber) entfallen.
Zahlreiche wissenschaftliche und technische Anwendungen die nicht die strengen Anforderungen eines weltraum-basierten Einsatzes erfüllen müssen, setzen jedoch nicht auf magnetische Chipfallen sondern auf die Evaporation in einem rein optisch generierten Fallenpotential. Dieser Ansatz umgeht einige wichtige Einschränkungen, die sich beim Einsatz einer Chipfalle ergeben. Zum Einen bedeutet die Implementierung einer Chipstruktur im Vakuum inklusve elektrischer Durchführung der Anschlüsse ein höheres Maß an Komplexität. Vor allem aber bringt die Erzeugung des BECs in unmittelbarer Nähe einer Chipoberfläche mehrere operationelle Einschränkungen mit sich. Für Präzisionsinterferometrie wird es nötig sein das BEC hinreichend weit vom Chip zu entfernen, idealerweise sogar es in ein zweite separate Interferometrie-Kammer zu transferieren. Andernfalls stellen Beugungseffekte der Strahlteiler am Chip sowie Wechselwirkungen der Atome mit der Chipoberfläche eine erhebliche potentielle Fehlerquelle dar. Auch die Präparation von Gemischen verschiedener atomarer Spezies ist auf den Einsatz optischer Fallenpotentiale angewiesen. Nur hier hat man die Möglichkeit Feshbach-Resonanzen durch Anlegen eines von der Falle entkoppelten Magnetfelds zur Kontrolle der Wechselwirkungen im Gemisch zu nutzen. Vor diesem Hintergrund wird derezeit insbesondere der Einsatz hybrider Fallen verfolgt, bei denen die schnelle Evaporation zum BEC zunächst in einer Magnetfalle erfolgt und dieses dann in eine schwache optische Falle umgeladen wird.
Eine rein optische Falle hingegen umgeht diese Problematiken. Allerdings benötigen die Fallenlaser für die optische Evaporation je nach verwendeter Wellenlänge und angestrebter Fallentiefe zwischen 10 W und 100 W an optischer Leistung. Dies wiederum übersetzt sich typischerweise in mehrere 100 W elektrische Leistung, was i.a. sehr schnell das Power-Budget einer Payload sprengt. Im PRIMUS-IV Projekt wird beispielsweise ein Yb-Faserverstärker von ALS bei 1064 nm mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 300 W eingesetzt. Um also den weltraumbasierten Einsatz der in vielen Punkten vorteilhaften optischen Fallen zukünftig möglich zu machen, ist es dringend erforderlich, die Leistungsaufnahme solcher optischer Fallen zu reduzieren und diese mit kompakteren Lasern zu verwirklichen.

1.2.2 Optische Fallen mit resonanter Überhöhung

Ein interessanter Ansatz um dies zu realisieren besteht darin, das fern verstimmte Lichtfeld, welches die optische Falle bildet, resonant zu überhöhen. Dies würde es ermöglichen, auf einen wesentlich kompakteren Laser mit deutlich geringerer Leistungsaufnahme zurückzugreifen.
Vereinzelte Arbeiten zu optischen Fallen in Resonatoren wurden bereits an verschiedenen Stellen weltweit durchgeführt [1],[2],[3]. Keine dieser Arbeiten lag dabei im Bereich einer Mikrogravitations- oder Raumfahrtanwendung und Ziel war auch nicht die Reduktion der Leistungsaufnahme. Vielmehr sollten hier i.A. durch die Leistungsüberhöhung besonders tiefe Fallen bei gleichzeitig hohem Modenvolumen verwirklicht werden. In [4] wurde so eine Falle für ^{87}Rb mit einem 1560 nm Fallenlaser implementiert und es wurde darin auch die Evaporation bis hin zum BEC erreicht. Insbesondere wurde dort der Resonator doppelt resonant ausgelegt, so dass auch nah-resonantes Licht bei 780 nm eingekoppelt und überhöht werden kann. Da der Resonator bei dieser Wellenlänge sogar eine sehr hohe Finesse und eine Linienbreite im Bereich weniger kHz besaß eröffnen sich hier auch spannende

weitere Möglichkeiten zum sogenannten Cavity-Cooling sowie Methoden zur Erzeugung verschränkter BEC Ensembles.
In [5] wurde ebenfalls ein Bow-Tie-Ringresonator aufgebaut, in diesem Fall zur Speicherung und Kühlung von fermionischem ^{6}Li. Der Resonator wurde hier komplett auf Zerodur-Basis innerhalb des UHV aufgesetzt und ein elaboriertes Schema zur Intensitäts- und Phasenkontrolle der in beiden Richtungen eingekoppelten Resonatormoden wurde demonstriert. Dieses erlaubt es beispielsweise kontrolliert von einer travelling-wave zu einer standing-wave Konfiguration zu wechseln.

1.3 Voraussetzungen

Das ZARM als Institut der Universität Bremen ist Standort des Fallturms Bremen und des GraviTower Bremen und befand sich somit in idealer Ausgangslage für die Durchführung des Vorhabens. Dabei konnte ORKA auf die Expertise aufbauen, die in den vergangenen Jahren am ZARM im Rahmmen der QUANTUS und PRIMUS Vorhaben im Bereich kalter Atome allgemein und im Betrieb optischer Fallen in Mikrogravitation im besonderen aufgebaut werden konnte. Während letztere jedoch im Verbund mit Partnern insbesondere der Leibniz-Universität Hannover durchgeführt wurden, war das ORKA Vorhaben ein Einzelprojekt der Universität Bremen.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Bearbeitung des Vorhabens waren zwei Physiker als wissenschaftliche Mitarbeiter (75% TVL E13) vorgesehen. Der Zeit- und Arbeitsplan war auf 3 Jahre ausgelegt. Bei der Planung des Vorhabens war die Möglichkeit erwogen worden, lediglich einen Resonatoraufbau für eine bestehende Apparatur wie z.B. die des PRIMUS Vorhabens zu realisieren. Dies erwies sich aber als nicht zielführend. Daher wurde von Anfang an geplant, einen kompletten Aufbau mit geeigneter Vakuumkammer (AP1) und Kühllasersystem (AP2) zu realisieren. Insbesondere das Design der Vakuumkammer erwies sich in der Folge als besonders herausfordernd. Dieses folgte der Geometrie des Resonators, musste vielfältige optische aber auch elektrische Zugänge gewähren und dabei die Kombination von magneto-optischer mit Resonatorfalle sowie die Möglichkeit zu dessen Justage gewährleisten. Das Design des Resonators (AP4) und dessen Aufbau und Test (AP5) wurden parallel zur Fertigung der Vakuumkammer vorgenommen. Sowohl die Fertigung der Resonatorspiegel vor allem aber der Kammer waren mit langen Lieferzeiten verbunden, so dass die Integration der Falle (AP6) später als geplant vorgenommen werden konnte und eine kostenneutrale Verlängerung um 5 Monate notwendig wurde. Für die Fertigung der Kammer fand sich außerdem nur ein geeigneter Hersteller, der bereit war die aufwändige Sonderkonstruktion zu produzieren. Von Seiten des Anbieters kam es schließlich mehrfach zu Verschiebungen des Liefertermins. Der Aufbau konnte somit im Rahmen der Projektlaufzeit zwar vollständig integriert jedoch ein abschliessender Test der kompletten Falle (AP7) nicht mehr durchgeführt werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde eigenständig am ZARM durchgeführt und es wurden keine anderen Stellen direkt oder indirekt involviert.

2 Ausführliche Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens

2.1.1 Design, Aufbau und Test eines Bow-Tie Resonators

Ziel des Designs war es, die evaporative Kühlung in der Resonatorfalle in derselben Weise zu ermöglichen, wie dies in einer herkömmlichen optischen Dipolfalle bei 1064 nm, hier speziell im Aufbau des PRIMUS Vorhabens, ohne resonante Überhöhung möglich ist. Als Resonatogeometrie bietet sich hierfür ein Bow-Tie Resonator aus 4 konvex gekrümmten Spiegeln an. Die darin umlaufenden Strahlen überlagern sich resonant und kreuzen sich bei entsprechend symmetrischer Spiegelanordnung unter 90°. Die Abmessung des Resonators (Seitenlänge d) und die Krümmungsradien der Spiegel wurden dabei so gewählt, dass sich daraus vergleichbare Strahlfoki und somit vergleichbare Fallenvolumina und Fallenfrequenzen bei gleicher optischer Leistung ergeben. Dabei war insbesondere der in einem Bow-Tie-Resonator immer auftretende Astigmatismus zu berücksichtigen, der eine Verzerrung des Aspektverhältnisses der Foci zur Folge hat. Außerdem waren die Randbedingungen für die Stabilität des Resonators sowie dessen Abmessungen zur Integration in die Kammer zu beachten. Während einerseits ein möglichst kompakter Aufbau angestrebt war, ergab sich eine Mindestgröße aus der Notwendigkeit, freien Zugang ausreichend großer MOT Strahlen zwischen den Resonatorspieglen zu erlauben. In Abbildung 2.2 ist hierzu für drei verschiedene Spiegelkrümmungen die Fokusgröße als Funktion der Resonatorgröße (seitliche Kantenlänge) aufgetragen. Als untere Grenze der Resonatorgröße wurde dabei eine Kantenlänge von 35 mm festgelegt (so dass ein MOT Strahl von 30 mm Durchmesser ungehindert zwischen den Spiegeln passieren kann). Oberes Limit warendabei 47 mm, um die maximale Grundfläche für ein Kammerdesign für die Fallkapsel nicht zu überschreiten. Aus den Graphen wird einerseits der unvermeidliche Astigmatismus deutlich, mit teils starken Unterschieden der Fokusgröße in sagittaler und meridialer Ebene (gestrichelte vs durchgezogene Linien). Zum anderen werden die begrenzten Stabilitätsbereiche sichtbar. Als sinnvolle Wahl erschien letztlich ein Resonator von $d = 43\,mm$ Seitenlänge und mit Spiegeln von 30 cm Krümmungsradius. Damit ergaben sich Fokusradien von 63 bzw 87 μm.
Weiteres wichtiges Designkriterium war die Finesse des Resonators festgelegt durch die Güte der Resonatorspiegel. Hier war ein Trade-off zwischen hoher oder mittlerer Finesse zu treffen. Eine hohe Finesse erlaubt entweder bei gegebener Eingangsleistung eine tiefere Falle oder mit weniger Eingangsleistung eine vorgegeben Fallentiefe zu erreichen. Das Ziel war hier das Äquivalent einer 15 W Dipofalle mit einem Seedlaser von < 10 mW zu erzielen. Daher wurde eine relativ hohe Finesse von $F = 18000$ gewählt (20 ppm Transmittanz der Resonatorspiegel). Dies geht mit einer niedrigen Linienbreite des Resonators von etwa 80 kHz einher. Diese muss mit der Linienbreite des Fallenlasers von < 20 kHz verglichen werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass verbleibende Frequenzfluktuationen des stabilisierten Lasers sich durch die schmale Transferfunktion des Resonator in Leistungsfluktuationen

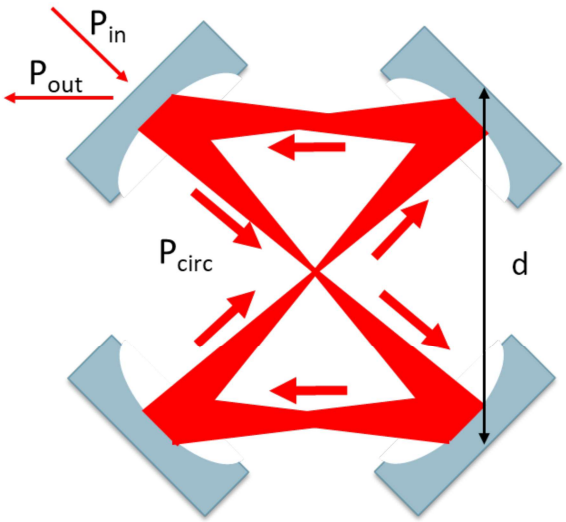

Abbildung 2.1: Schema des Bow-tie Resonators zur Erzeugung einer gekreuzten, resonant überhöhten Dipolfalle.

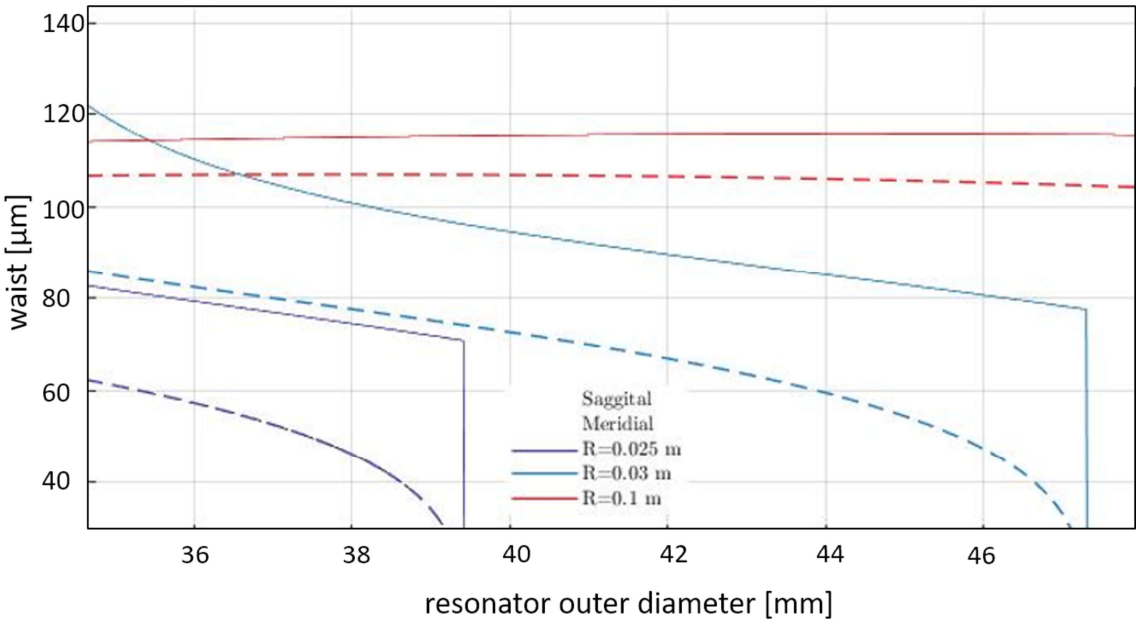

Abbildung 2.2: Fokusgröße in Abhängigkeit der Resonatorgröße d für verschiedene Spiegelkrümmungsradien.

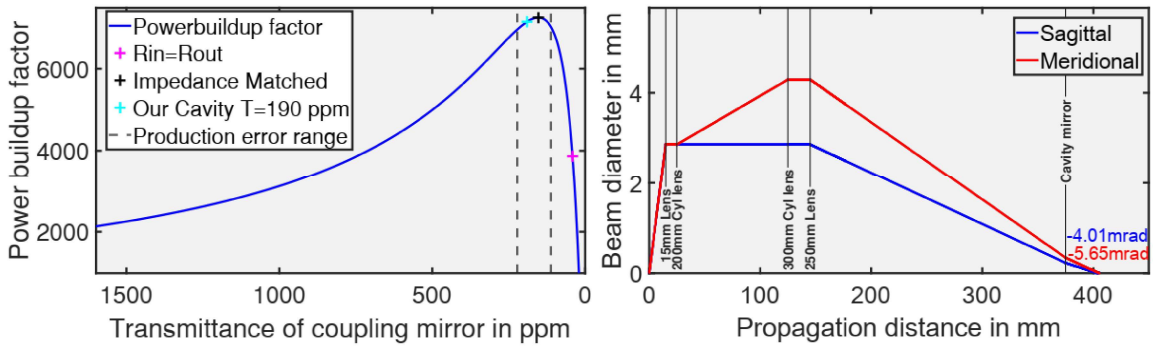

Abbildung 2.3: Links: Impedanzanpassung durch Wahl der Transmittanz des Einkoppelspiegels. Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen und des starken Abfalls jenseits des Maximalwerts wurde ein Wert von $T_{in} = 190\,\text{ppm}$ gewählt. Rechts: Mode-matching unter Berücksichtigung des Astigmatismus des Resonators.

Resonator Parameter	
Seitenlänge	43 mm
Freier Spektralbereich	1.44 GHz
Spiegel Krümmungsradius	30 cm
Spiegel Transmittanz	20 ppm
Einkoppelspiegel Transmittanz	190 ppm
Finesse	18000
Leistungsüberhöhung	7000

Tabelle 2.1: Kennzahlen des Resonator-Designs.

übersetzen und dadurch zu unerwünschten Heizeffekten führen.
Um schließlich die optimale Resonanzüberhöhung zu erzielen, ist eine optische Impedanzanpassung des Resonators durch geeignete Wahl der Transmittanz des Einkoppelspiegels erforderlich. Eine entsprechende Simulation des Resonators ergab hierfür eine optimale Transmittanz von 190 ppm (siehe Abbildung 2.3).
Nachdem die optimale Finesse und geeignete Krümmungsradien festgelegt waren, wurden zwei entsprechende Beschichtungsvorgänge für Resonator- und Einkoppelspiegel beauftragt. Dabei wurden für mögliche spätere Änderungen Substrate verschiedener Krümmungsradien beschichtet. Zusätzlich wurden die Spiegel dabei auch mit einer High-Finesse Beschichtung für 780 nm versehen. Dies geschah im Hinblick auf mögliche spätere Anwendungen, bei der die Atome mit nah resonantem Licht im Resonator wechselwirken.
Die Parameter des finalen Resonatordesigns sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst, die sich daraus ergebenden Fallenparameter in Tabelle 2.2
Der Resonator wurde vor der Integration in die Kammer in einem Testaufbau justiert und es konnten wesentliche Aspekte des Designs verifiziert werden. Die Linienbreite und Finesse des Resonators sowie die erzielte Kopplungseffizienz liegen innerhalb der Messungenauigkeiten im erwarteten Bereich. Es konnten schließlich Pound-Drever-Hall Fehlersignale erzeugt und der Laser auf den Resonator im Testaufbau stabilisiert werden.

Fallen-Parameter	Zielwert
Power input	2 mW
Intra-cavity power	15 W
Strahltaille	63/87 μm
Fallenfrequenz	4.68 kHz
Fallentiefe	455 μK

Tabelle 2.2: Ziel-Parameter der Dipolfalle im Bow-Tie Resonator.

2.1.2 Konstruktion und Anfertigung einer geeigneten Vakuumkammer

Ein wesentlicher Teil des Vorhabens bestand in der Konstruktion und dem Aufbau einer Vakuumkammer, die den Betrieb eines Resonators in Ultra-Hoch-Vakuum ermöglicht. Dies erfolgte in enger Abstimmung mit Arbeitspaket AP4, in welchem Geometrie und Größe des Resonators festgelegt wurden. Die Schwierigkeit des Kammerdesigns bestand darin mehrere Aspekte zu vereinen:

- Die Möglichkeit einen ca 4 cm x 4 cm großen Resonatoraufbau zu beherbergen bei gleichzeitiger Kompaktheit mit Abmessungen, die eine Integration in einem Fallkapselexperiment sowie das Anbringen externer MOT Spulen erlauben.
- Optische Zugänge, die das Einkoppeln und die sinnvolle Kombination von Licht zur Laserkühlung sowie Licht für die Resonatorfalle und Detektion zulassen.
- Elektrische Zugänge, um die piezo-aktuierten Spiegel im Inneren der Kammer ansteuern zu können, sowie eine geeignete Kabelführung in der Kammer.
- Pumpanschlüsse, die einen hinreichend großen Querschnitt bieten, so dass mit kompakten Pumpen der nötige Druck von $< 10^{-10}$ mbar erreicht werden kann.
- Die Möglichkeit für eine sinnvolle Montage und Integration des Aufbaus aus seinen Einzelteilen.
- Die Sicherstellung, dass das komplexe Design mittels CNC Technik auch herstellbar ist.

Das finale Design zu erstellen bedurfte mehrerer Iterationen, ein Prozess der sich länger hinzog als bei Vorhabenplanung antizipiert. Eine CAD Zeichnung ist in Abbildung 2.4 gezeigt. Als Kammermaterial wurde Aluminium gewählt, aufgrund seiner nicht-magnetischen Eigenschaften sowie der Möglichkeit zur einachen, kostengünstigen Bearbeitung. Titan als alternatives Material wurde aufgrund der Kosten und Fertigungsmöglichkeiten verworfen. Für das Anbringen der optischen Zugänge wurden Indium-gedichtete Fenster gewählt, um einen möglichst kompakten Aufbau trotz zahlreicher Zugänge zu ermöglichen.
Die Hauptkammer wird durch eine 2D-MOT Kammer ergänzt. Diese wurde komplett mit kommerziellen, geklebten Fensterflanges aufgesetzt. Nach den negativen Erfahrungen indiumgedichteter Fenster speziell an 2D-MOT Kammern mit großflächigen Fenstern und höherem Dampfdruck erschien dies als ein notwendiger Kompromiss zu Lasten der Kompaktheit des Aufbaus.

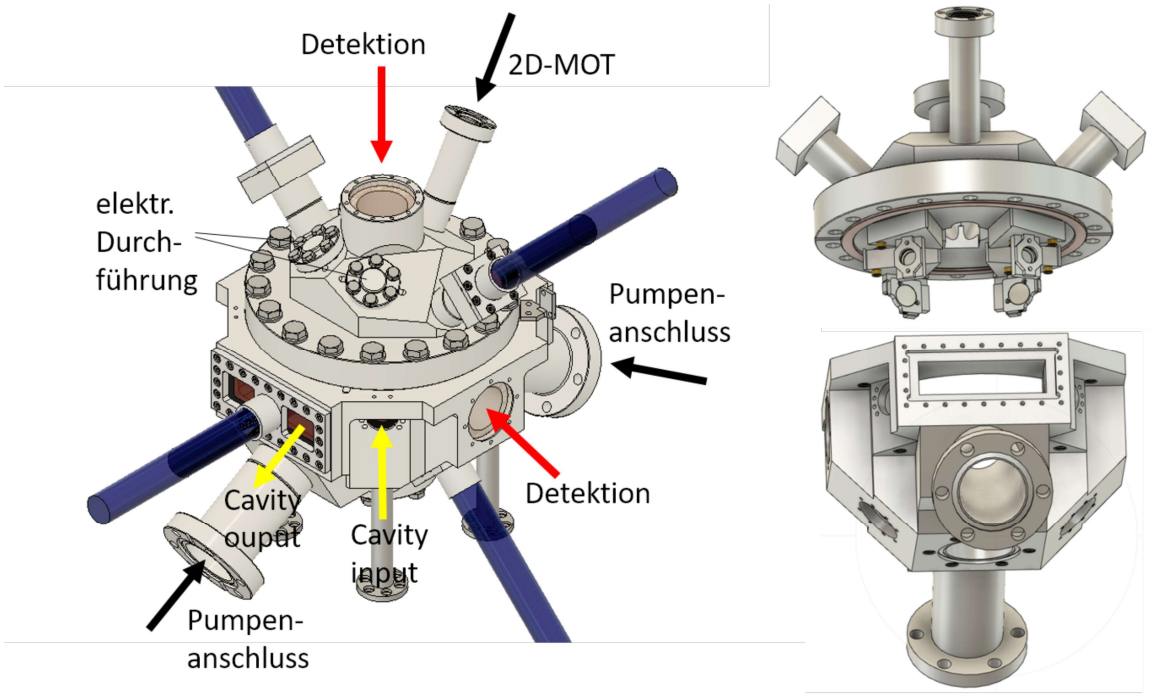

Abbildung 2.4: CAD Zeichung der Vakuumkammer. Links: Zugänge der MOT-Strahlen in blau, sowie weitere Zugänge zum Koppeln des Resonators (gelb), zur Detektion (rot), sowie zum Anschluss der weiteren Vakuumsektionen. Rechts: Explosions-Ansicht mit integriertem Resonator.

2.1.3 Aufbau eines kompakten Fallkapsel-tauglichen Kühllasersystems

Für die Laserkühlung von Rb87 in einer magneto-optischen Falle wurde ein Kühllasersystem bei 780 nm auf einer Fallkapselplattform aufgebaut. Neben Freistrahl-Lasern (DFB Dioden Eagleyard) für Master-Spekroskopie, Detektion und Rückpumperlicht ist das zentrale Element ein Laser welcher Kühllicht für 2D- und 3D-MOT zur Verfügung stellt. Dieser wurde durch Frequenzverdopplung eines 1560 nm ECL Lasers (Thorlabs) und anschließendem EDFA Verstärker in einem waveguide SHG Modul (NTT) fasergebunden realisiert. Auch die Aufteilung auf die Beat-Dioden erfolgt fasergebunden, so dass lediglich das Verteil- und Schaltmodul auf einem kompakten, temperaturstabilisierten Breadboard in Freistrahloptik aufgebaut wurde. Elektronik zu Temperaturstabilisierung und Frequenzkontrolle konnte ebenfalls kompakt und weitgehend mit kommerziellen Produkten aufgebaut werden. Lediglich die Frequenzdiskriminatoren für die Offset-Stabilisierung der Laser relativ zum Masterlaser wurde nach einem im HYQIS Vorhaben entwickelten Konzept realisiert,

2.1.4 Integration des Resonators in die Kammer in einem Fallkapselaufbau.

Die Integration des Experiments erfolgte in einem kompakten Fallkapselaufbau kompatibel mit dem Betrieb auf dem GraviTower. Der Aufbau umfasst verschiedene Plattformen für die Subsysteme des Kühllasersystems, der Messrechner und Elektronik, der Vakuumkammer mit darunter liegender Pumpensektion so wie der Energieversorgung. Für die Integration des Resonators in die Vakuumkammer wurde ein Titan-Spacer angefertigt auf den die Resonatorspiegel in der zuvor getesteten Konfiguration angebracht wurden (Abbildung 2.5). Dieser wurde am Deckelflansch befestigt. Mit Aufsetzen und Befestigung des Deckels wurde so der Resonator in die Kammer eingebracht. Durch Anschlüsse der entsprechenden Kabel an die elektrischen Durchführungen können die aktuierbaren Spiegelhalter von außen angesteuert werden, was vor dem Abpumpen der Kammer verifiziert wurde. Nach Abpumpen und Ausheizen der Kammer konnte schließlich der erforderliche Enddruck im unteren 10^{-10} mbar Bereich erreicht werden.

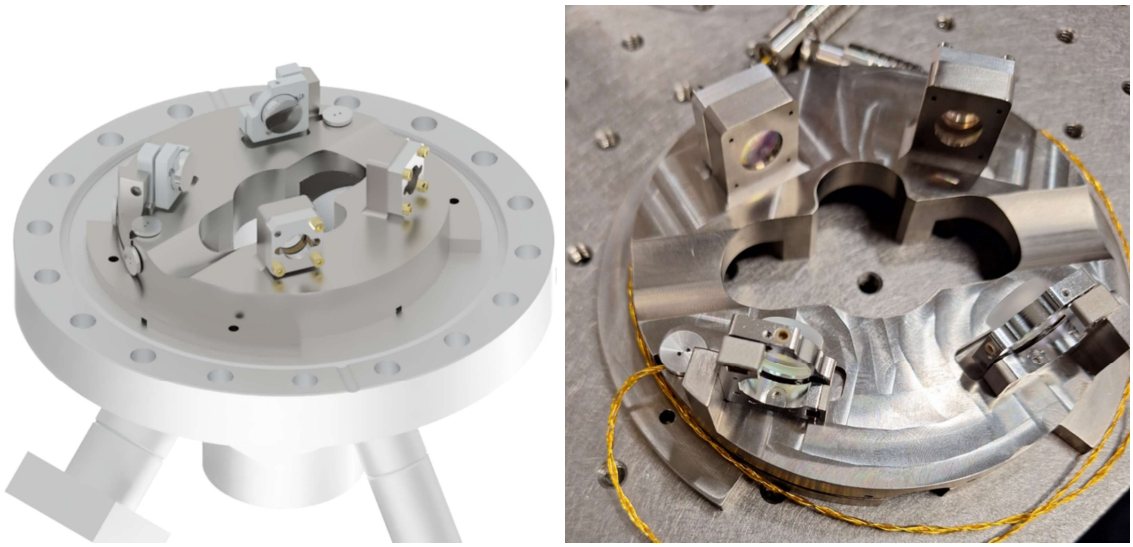

Abbildung 2.5: Links: CAD Konstruktion des Resonators mit Spacer auf dem Kammer-Flansch montiert. Rechts: Der Titan-Spacer vor dem Einbau mit den zwei fixen und den zwei aktuierbaren Spiegelhaltern.

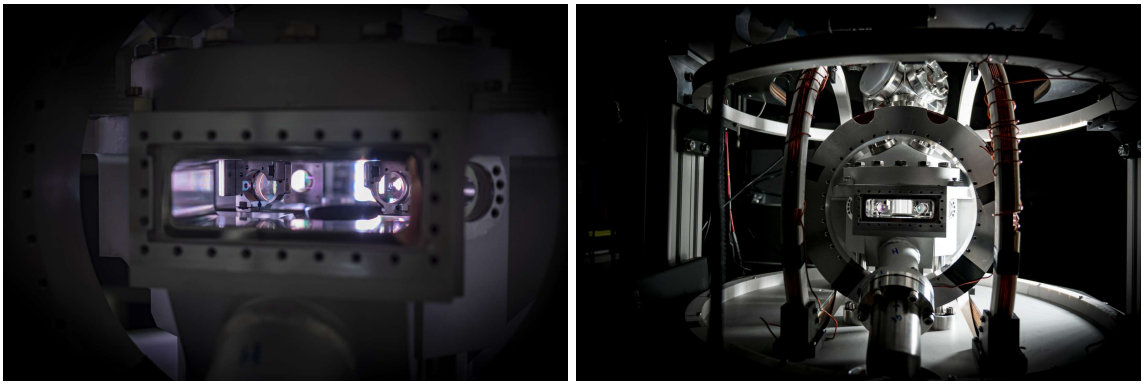

Abbildung 2.6: Blick auf den integrierten Aufbau der Kammer mit MTO Spulen (rechts) und ins Innere der Kammer mit dem Resonator in der Kammer (links).

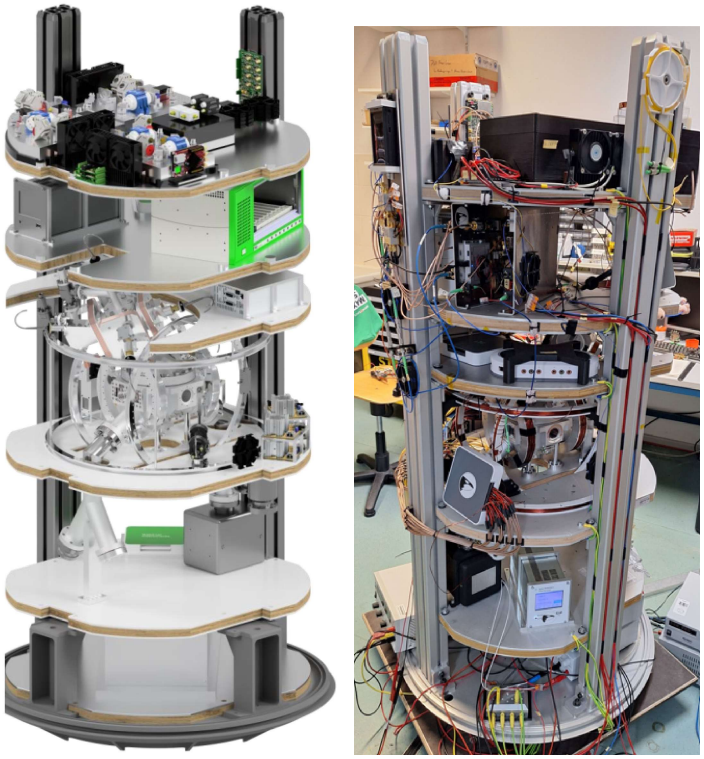

Abbildung 2.7: Kapselaufbau als CAD und wie im Labor aufgebaut mit der evakuierten Kammer.

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der größte Teil der Mittel entfiel auf Personalmittel, mit denen zwei wissenschaftliche Mitarbeiter zu 75% finanziert wurden. Daneben wurden die Mittel vor allem zur Beschaffung der nötigen Geräte aus Pos.0850 eingesetzt. Die wichtigsten Posten hiervon waren:

- lfd.Nr.1,2 und 4: Kühllasersystem: Laserdioden 1560 nm (11222,62 Eur), EDFA 1560 nm (10988,46 Eur) und SHG Module (24920,38 Eur)
- lfd.Nr.6 und 7: Vakuumkammersystem: 2D-MOT Kammer (12886,19 Eur) und 3D-MOT Kammer (12414,21 Eur)
- lfd.Nr.14: PXI-Messrechner (32986,80 Eur)
- lfd.Nr.15: Fallenlaser für die Resonatorfalle: Faserlaser als Seedlaser (13107,85 Eur) + Verstärker 1064 nm (24134,39 Eur)
- lfd.Nr.16: Resonatorspiegel (14896,42 Eur)
- lfd.Nr.17: aktuierbare Spiegelhalter für UHV (19009,04 Eur)

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten des Vorhabens ORKA sind der physikalischen Grundlagenforschung zuzurechnen und sind damit nicht unmittelbar wirtschaftlich verwertbar. Diese Art von Forschung ist kostenintensiv und nur mit Mitteln aus öffentlichen Zuwendungen durchführbar. Die nötigen Ressourcen an Personal für die Durchführung des Forschungsprogramms und zur Weiterentwicklung der Apparatur übersteigen die für derartige Forschung verfügbaren Mittel der Universität. Diese Aktivitäten konnten daher nur mit Drittmitteln finanziert werden. Die erhaltenen Mittel wurden dabei nicht für die Grundausstattung und den laufenden Betrieb der Universität sondern ausschließlich für Projektzwecke eingesetzt.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit Projektabschluss steht ein vollständiger Aufbau zur Verfügung, der eine magneto-optische Falle mit einem im Ultra-Hoch-Vakuum integriertem optischen Resonator kombiniert. Dieser kann potentiell in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben genutzt werden. Das Beladen der Resonatorfalle aus der MOT konnte aufgrund der oben erläuterten Verzögerungen in der Projektlaufzeit nicht mehr getestet werden. Es ist jedoch geplant dies mindestens mit studentischen Kräften im Rahmen von Projekt- und Masterarbeiten noch zu erreichen. Ein besonders interessantes Forschungsfeld mit der vorhandenen Apparatur ergibt sich aus der Möglichkeit auch nah-resonantes Licht bei 780 nm in den Resonator zu koppeln. Eine solche Resonator-Atom Kopplung eröffnet interessante Möglichkeiten etwa zur Erzeugung von verschränkten Zuständen oder zu sogenannten Quantum-Non-Demolition Messungen.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten

Keine

2.6 Konferenzbeiträge, Veröffentlichungen, Abschlussarbeiten

2.6.1 Konferenzbeiträge

- Vortrag DPG Frühjahstagung Freiburg 2024, Sektion AMO, J. Stiehler: ÖRKA - Towards a cavity enhanced Optical Dipole Trap for evaporative cooling of Rb87 in microgravity"
- Poster DPG Frühjahstagung Freiburg 2024, Sektion AMO, M. Prinz: ÖRKA - Design of a cavity enhanced optical dipole trap for the preparation of a Rb87 BEC"
- Poster ICAP International Conference on Atomic Physics, London 2024, M. Prinz: ÖRKA - Towards a cavity enhanced Optical Dipole Trap for a Rb87 BEC in Microgravity"
- Poster FOMO, Frontiers in Matterwave Optics, Crete 2024, J. Stiehler: ÖRKA - Towards a Cavity Enhanced All Optical Rb87 BEC Source for Atom Interferometry in Microgravity"
- Vortrag DPG Frühjahstagung Bonn 2025, Sektion AMO, M. Prinz: ÖRKA- Cavity enhanced dipole trapping of Rb87 atoms for microgravity"
- Poster DPG Frühjahstagung Bonn 2025, Sektion AMO, J. Stiehler: ÖRKA - Towards a Cavity Enhanced All Optical Rb87 BEC Source for Atom Interferometry in Microgravity"

2.6.2 Abschlussarbeiten

- Bachelorarbeit Lasse Michel: Laser-Stabilisierung für eine resonant überhöhte optische Dipolfalle (Hochschule Bremen, 2024)
- Bachelorarbeit Moritz Salger: Control Software Design for an Ultracold Atom Experiment (Universität Bremen, 2025)

Literaturverzeichnis

[1] A. Mosk, S. Jochim, H. Moritz, Th. Elsässer, M. Weidemüller, and R. Grimm. Resonator-enhanced optical dipole trap for fermionic lithium atoms. *Opt. Lett.*, 26(23):1837–1839, Dec 2001.

[2] P. D. Edmunds and P. F. Barker. A deep optical cavity trap for atoms and molecules with rapid frequency and intensity modulation. *Review of Scientific Instruments*, 84(8):083101, 2013.

[3] D. Kruse, M. Ruder, J. Benhelm, C. von Cube, C. Zimmermann, Ph. W. Courteille, Th. Elsässer, B. Nagorny, and A. Hemmerich. Cold atoms in a high-q ring cavity. *Phys. Rev. A*, 67:051802, May 2003.

[4] D S Naik, G Kuyumjyan, D Pandey, P Bouyer, and A Bertoldi. Bose–einstein condensate array in a malleable optical trap formed in a traveling wave cavity. *Quantum Science and Technology*, 3(4):045009, aug 2018.

[5] Yanping Cai, Daniel G. Allman, Jesse Evans, Parth Sabharwal, and Kevin C. Wright. Monolithic bowtie cavity traps for ultracold gases. *J. Opt. Soc. Am. B*, 37(12):3596–3603, Dec 2020.

[6] André Heinz, Jan Trautmann, Neven Šantić, Annie Jihyun Park, Immanuel Bloch, and Sebastian Blatt. Crossed optical cavities with large mode diameters. *Opt. Lett.*, 46(2):250–253, Jan 2021.

[7] Helmut Ritsch, Peter Domokos, Ferdinand Brennecke, and Tilman Esslinger. Cold atoms in cavity-generated dynamical optical potentials. *Rev. Mod. Phys.*, 85:553–601, Apr 2013.

[8] R Culver, A Lampis, B Megyeri, K Pahwa, L Mudarikwa, M Holynski, Ph W Courteille, and J Goldwin. Collective strong coupling of cold potassium atoms in a ring cavity. *New Journal of Physics*, 18(11):113043, nov 2016.

[9] Yafei Wen, Pai Zhou, Zhongxiao Xu, Liang Yuan, Minjie Wang, Shengzhi Wang, Lirong Chen, and Hai Wang. Cavity-enhanced and long-lived optical memories for two orthogonal polarizations in cold atoms. *Opt. Express*, 28(1):360–368, Jan 2020.

[10] T. Lauber, J. Küber, O. Wille, and G. Birkl. Optimized bose-einstein-condensate production in a dipole trap based on a 1070-nm multifrequency laser: Influence of enhanced two-body loss on the evaporation process. *Phys. Rev. A*, 84:043641, Oct 2011.

[11] Weilun Hung, Panpan Huang, Feng-Chuan Wu, M. Bruvelis, Hau-Yl Xiao, A. Ekers, and Ite A. Yu. Storage time of cold rb atoms in an optical dipole trap formed by a multimode fiber laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 32(5):B32–B36, May 2015.

[12] Kazuya Yamashita, Kouhei Hanasaki, Akihiro Ando, Masahiro Takahama, and Toshiya Kinoshita. All-optical production of a large bose-einstein condensate in a double compressible crossed dipole trap. *Phys. Rev. A*, 95:013609, Jan 2017.

[13] Paul Hamilton, Matt Jaffe, Justin M. Brown, Lothar Maisenbacher, Brian Estey, and Holger Müller. Atom Interferometry in an Optical Cavity. *Physical Review Letters*, 114(10):100405, March 2015.

[14] Romain Caldani, Sébastien Merlet, Franck Pereira Dos Santos, Guillaume Stern, Anne-Sophie Martin, Bruno Desruelle, and Vincent Ménoret. A prototype industrial laser system for cold atom inertial sensing in space. *The European Physical Journal D*, 73(12):248, December 2019.