



Institut für Satellitengeodäsie
und Inertialsensorik



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Anlage zum Verwendungsnachweis

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Innovative Vakuumtechnologie für Quantensensoren - InnoVaQ

Teilvorhaben

Glaswafer-basierte Atomquellen

Förderkennzeichen

13N15915

Zuwendungsempfänger

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik

Callinstraße 30b, 30167 Hannover

Projektaufzeit

01.01.2022 bis 30.06.2025

Autoren

Roman Schwarz

Datum

19.12.2025

Teil 1: Kurzbericht

Im Verbundprojekt „Innovative Vakuumtechnologie für Quantensensoren“ (InnoVaQ) wurden gemeinsam mit den Partnern LPKF, VACOM, dem Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) unter Führung des DLR-SI, Komponenten für zukünftige kompakte Quantensensoren wie z.B. optische Uhren entwickelt. Das Ziel war die Entwicklung, der Aufbau und die Integration der Komponenten in eine miniaturisierte Vakuum-Demonstratorkammer.

Das Teilvorhaben „Glaswafer-basierte Atomquellen“ des DLR beinhaltete neben der Führung und Koordination des Verbundes:

- Die Organisation von regelmäßigen Projekttreffen (AP0)
- Die Planung des Demonstrators (AP1)
- Die Entwicklung, Integration und Test der Mikro-Heizplatte gemeinsam mit LPKF (AP3)
- Die Komponentenintegration in den Demonstrator (AP5)
- Die Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften (AP0)
- Die Präsentation von Projektergebnissen auf Fachkonferenzen (AP0)

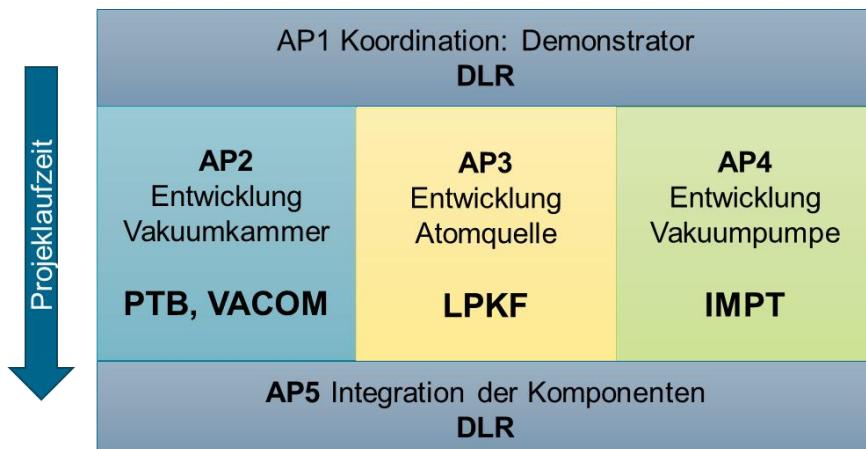


Abbildung 1: InnoVaQ Projektablaufplan

Das DLR übernahm im Verbund die Koordination der Partner untereinander und zum Projektträger. Es organisierte regelmäßige Projekttreffen auf denen der Projektfortschritt präsentiert wurde und das weitere Vorgehen diskutiert wurde. Während des Projektes entwickelten die Partner folgende Komponenten:

- LPKF: Entwicklung einer Mikroheizplatte auf Glasbasis als Atomquelle
- IMPT: Entwicklung einer miniaturisierten Vakuumpumpe auf Basis von Feldemission
- PTB: Entwicklung der Demonstratorkammer
- VACOM: Entwicklung der Demonstratorkammer und Sonderflansche mit geklebten Schaugläsern

Die Konstruktion des Demonstrators wurde von der PTB und VACOM federführend durchgeführt. Das DLR stellte dabei sicher, dass die Schnittstellen der von den Partnern entwickelten Komponenten kompatibel blieben und zog deren Expertise bei kritischen Designentscheidungen hinzu. So wurden die Formfaktoren und benötigten Schnittstellen der zu entwickelnden Komponenten festgelegt und auf dieser Basis ein Entwurf für den Demonstrator erstellt, der im späteren Verlauf des Projektes finalisiert und in den Fertigungsauftrag gegeben wurde.

In enger Abstimmung wurde mit LPKF an der Entwicklung der Mikro-Heizplatten gearbeitet. Dies umfasst die Festlegung der Geometrie der Mikro-Heizplatte als Basis für die Atomquelle sowie für die Einbringung von Heizleistung in die Mikro-Heizplatte. Hier wurden zwei unterschiedliche Methoden untersucht:

- Eine aus Platin bestehende elektrisch betriebene Heizspule, die durch Metallisierung der Rückseite mit anschließender Strukturierung hergestellt wurde.
- Eine optisch absorbierende Schicht, die mittels Laserstrahlung aufgeheizt wurde.

Die gefertigten Prototypen wurden auf ihre thermische Stabilität getestet und hinsichtlich der relevanten Operationsparameter charakterisiert.

Die Integration der entwickelten Komponenten wurde durch das DLR vorgenommen, sowie die Inbetriebnahme des Demonstrators. Hier konnten die aus der Mikro-Heizplatte abgedampften Strontium Atome in einer Einstrahl-magneto-optischen Falle (MOT) gefangen werden. Die Basis für die MOT lieferte eine planare Beugungsgitterstruktur (grating MOT-Chip).

Die im Laufe des Projektes gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in mehreren Peer-Review Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Fachkonferenzen vorgestellt und einem breiten Publikum aus internationalen Experten zugänglich gemacht.

Teil 2: Eingehende Darstellung

AP0: Projektmanagement

Das DLR übernahm im Verbundprojekt die Koordination der Partner. Es organisierte die regelmäßigen Projekttreffen und stand im Austausch mit dem Projektträger.

Das DLR dokumentierte die gewonnenen Projektergebnisse und präsentierte diese auf Konferenzen und publizierte in Peer-Review Fachzeitschriften.

AP1: Planung des Demonstrators

In AP1 wurden gemeinsam mit den Partnern die Formfaktoren und benötigten Schnittstellen der zu entwickelnden Komponenten festgelegt. Auf dieser Basis wurde ein Entwurf für die Demonstratorkammer mit Innenvolumina im Bereich weniger Kubikzentimeter erstellt. Insbesondere wurde auf die Einhaltung der Schnittstellen der in AP2-AP4 entwickelten Komponenten geachtet, um eine reibungslose Integration in die Demonstratorkammer sicherzustellen.

Die von den Partnern entwickelten und in den Demonstrator zu integrierenden Komponenten umfassten:

- Titan-Flansche in Sondergrößen mit eingeklebten Schaugläsern
- Wassergekühlte Halterung für stromdurchflossene Magnetfeldspulen
- Mikro-Heizplatten in Kombination mit einem Grating-MOT-Chip (gMOT Chip)
- Eine miniaturisierte, magnetfeldfreie Vakuumpumpe auf Basis von Feldemission

AP3: Atomquelle mit Mikro-Heizplatte

In enger Abstimmung mit LPKF wurde die Entwicklung der Mikro-Heizplatten vorangetrieben. AP3 umfasste die Festlegung der Geometrie der Mikro-Heizplatte als Grundlage für die Atomquelle sowie für die kontrollierte Einbringung von Heizleistung. Die federführende Designausarbeitung erfolgte durch LPKF, während das DLR insbesondere mit Expertise zur Geometrie der Heizspirale beitrag und die experimentelle Charakterisierung übernahm.

Die Mikro-Heizplatten wurden von LPKF mittels des LIDE®-Verfahrens aus Fused-Silica gefertigt und anschließend metallisiert sowie laserstrukturiert. Die Mikro-Heizplatten wurden in zwei Varianten mit unterschiedlich großen Stützstrukturen realisiert (Abbildung 4). Die größere Variante konnte über Durchkontakteierungen direkt an die elektrischen Durchführungen des aufnehmenden Flansches angeschlossen werden, während die kleinere Variante lötbare Kontaktflächen nutzte.

Das Reservoir der Mikro-Heizplatten weist mit einer Tiefe von 0,45 mm und 3 mm Durchmesser ein vorteilhaftes Aspektverhältnis auf, um mittels eines Depositionsverfahrens (Physical vapor deposition, PVD) in einem Vakuumaufbau gefüllt zu werden. Die entsprechenden Tests dazu wurden mit Hilfe des IMPT im AP3.3 durchgeführt und zeigten, dass die Abscheidungsrate in das Reservoir sehr gering ausfiel. Insgesamt konnte eine etwa 50 µm dicke Strontium-Schicht aufgedampft werden. Problematisch stellte sich die rasche Oxidation von Strontium dar, insbesondere bei derart dünnen Schichten, was die Probe unbrauchbar machen würde. In separaten Versuchen des IMPT wurde eine vollständige Oxidation innerhalb weniger Minuten nach Atmosphärenkontakt beobachtet. Aus dem mittels PVD befüllten Ofen konnte Strontium durch Laserheizen erfolgreich verdampft und mittels Laserspektroskopie nachgewiesen werden (Abbildung 3).

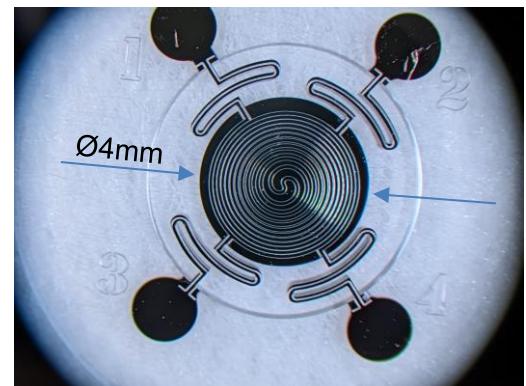


Abbildung 2: Mikroskopaufnahme einer von LPKF gefertigten Mikro-Heizplatte. Die Mikro-Heizplatte ist durch 4 Federn thermisch bestmöglich von der äußeren Stützstruktur isoliert. Mittels eines Laserstrukturierungsprozesses wurde die ca. 80mm lange Heizspirale aus einer vollmetallisierten Fläche (schwarz) herausgestellt.

Oxidation von Strontium dar, insbesondere bei derart dünnen Schichten, was die Probe unbrauchbar machen würde. In separaten Versuchen des IMPT wurde eine vollständige Oxidation innerhalb weniger Minuten nach Atmosphärenkontakt beobachtet.

Hierfür war es erforderlich, den befüllten Mikro-Ofen unter Schutzatmosphäre zum Spektroskopieaufbau zu transportieren, was mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden war. Aus diesem Grund wurden Charakterisierungsmessungen zunächst mit Ytterbium durchgeführt, da dieses Element eine deutlich höhere Oxidationsbeständigkeit aufweist und somit die experimentelle Untersuchung erleichtert.

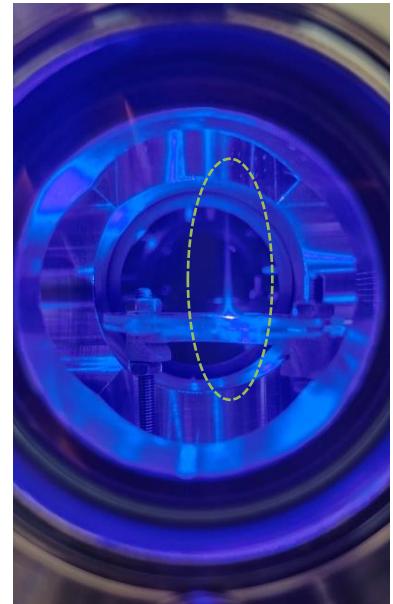
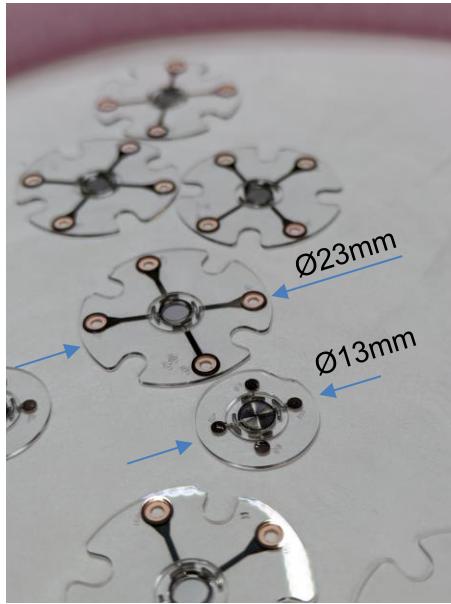
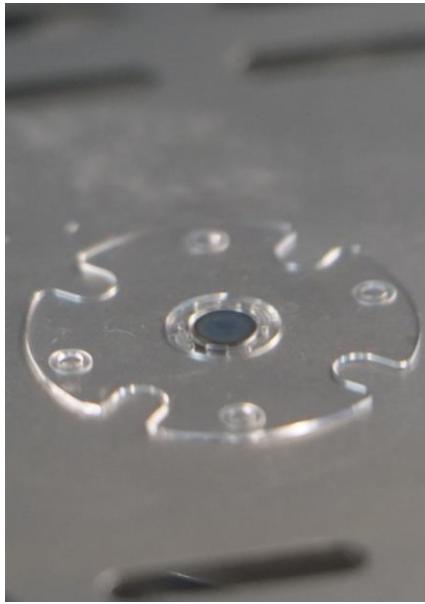


Abbildung 3: Mittels PVD-Verfahren aufgedampfte Strontium Atome. Um die schnelle Oxidation von Strontium zu verhindern wurde der Ofen permanent unter Schutzatmosphäre gelagert. Bei der abgebildeten Mikro-Heizplatte handelt es sich um einen Prototyp ohne Metallisierung.

Abbildung 4: Im Projekt hergestellte Mikro-Heizplatten. Für den Demonstrator und die separaten Tests wurden Heizplatten mit unterschiedlich großen Stützstrukturen hergestellt. Die Variante für den Demonstrator wurde elektrisch über Durchgangsverbindungen kontaktiert, die kleinere Variante mittels lötbarer Kontaktflächen.

Abbildung 5: Die mittels PVD-Verfahren in das Reservoir geladenen Strontium Atome konnten erfolgreich durch optisches Heizen abgedampft, und durch Spektroskopie entlang des Laserstrahles nachgewiesen werden (grüne Markierung).

Heizkonzepte

Zum Heizen des Reservoirs der Mikro-Heizplatten wurden zwei unterschiedliche Konzepte untersucht:

- Eine elektrisch betriebene Heizspule aus Platin.
- Eine optisch absorbierende Schicht, die mittels Laserstrahlung aufgeheizt wurde.

Der Fokus lag zunächst auf der elektrisch beheizten Variante. Die von LPKF gefertigten Prototypen wurden zunächst mikroskopisch inspiziert, um die Strukturierung der Heizspirale auf Kurzschlüsse oder Unterbrechungen zu überprüfen. Das Heizkonzept sieht eine simultane Temperaturmessung während des Heizens mittels Vierleitermessung vor. Hierzu wurde der elektrische Widerstand zwischen allen vier Kontakten mehrerer Mikro-Heizplatten vermessen. Dabei traten teilweise Kurzschlüsse auf, die auf einen unvollständigen Laserabtrag der Heizspirale zurückgeführt werden konnten.

Es stellte sich heraus, dass für das optische Heizen keine speziell entwickelte Schicht anstelle der Heizspirale verwendet werden muss. Da ca. 80% der Fläche beschichtet ist und Platin ausreichend hohe optische Absorption aufweist, konnte die Heizspirale auch zum optischen Heizen mittels Laserstrahlung verwendet werden. Diese hybride Lösung der Heizkonzepte stellt einen weiteren großen Vorteil der entwickelten Mikro-Heizplatten dar.

Betrieb im Vakuum und Nachweis der Funktionalität

In einem nächsten Schritt wurden die Mikro-Öfen in einem Vakuum-Versuchsaufbau mit Ytterbium bestückt und ihre elektrischen Heizeigenschaften untersucht. Der erfolgreiche Nachweis der Ytterbium-Verdampfung mittels Laserspektroskopie belegte die Funktionsfähigkeit der Heizplatten. Hierfür war eine elektrische

Heizleistung von nur wenigen hundert Milliwatt erforderlich, was den theoretischen Erwartungen entsprach. Parallel dazu wurde eine Temperaturbestimmung über die Vierleitermessung durchgeführt. Aus der Geometrie der Heizspirale und dem temperaturabhängigen spezifischen elektrischen Widerstand des Platins wurde die Temperatur der Heizspirale berechnet. Die Messergebnisse zeigten jedoch ein unintuitives und widersprüchliches Verhalten, dessen Ursache nicht abschließend geklärt werden konnte.

Die exzellente thermische Isolation der Mikro-Heizplatte gegenüber der Haltestruktur und der Umgebung konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Hierzu wurde Ytterbium direkt mittels Laserstrahlung geheizt und die verdampften Atome spektroskopisch detektiert. Das hierfür beschaffte Lasersystem bei 556 nm liefert eine ausreichende optische Leistung, um die notwendige Erwärmung zu erzielen. Die isotrop von der Mikro-Heizplatte emittierten Atome konnten in einer angrenzenden MOT eingefangen und gekühlt werden (Abbildung 7). Die MOT wurde dabei mit dem beschafften Lasersystem bei 399 nm betrieben. Zudem konnte eine neuartige monolithische Struktur zur Erzeugung einer Einstrahl-MOT (Abbildung 6) erfolgreich getestet werden. Das Heizlasersystem eignete sich ebenfalls für den Betrieb der zweiten, deutlich schmalbandigeren MOT-Stufe bei 556 nm in der die Atome weiter gekühlt werden konnten und erheblich geringere Temperaturen als in der ersten Stufe erzielt wurden. Die Ergebnisse der Untersuchung wurden in *Physical Review Applied* veröffentlicht¹.

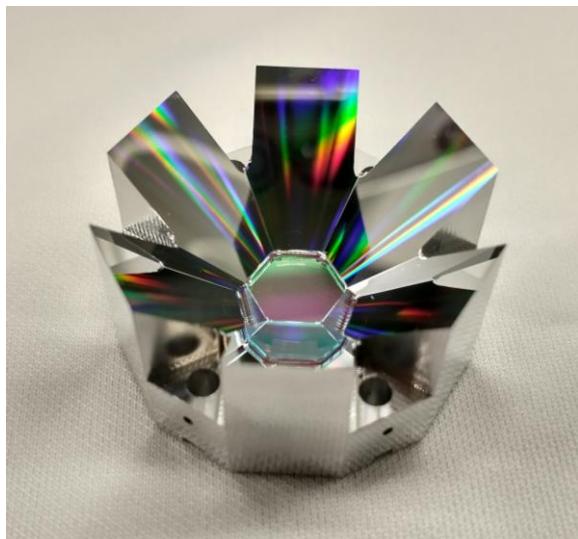


Abbildung 6: Aus Aluminium gefertigte, monolithische Struktur zur generierung einer Einstrahl-MOT ("Pyramiden-MOT"²).

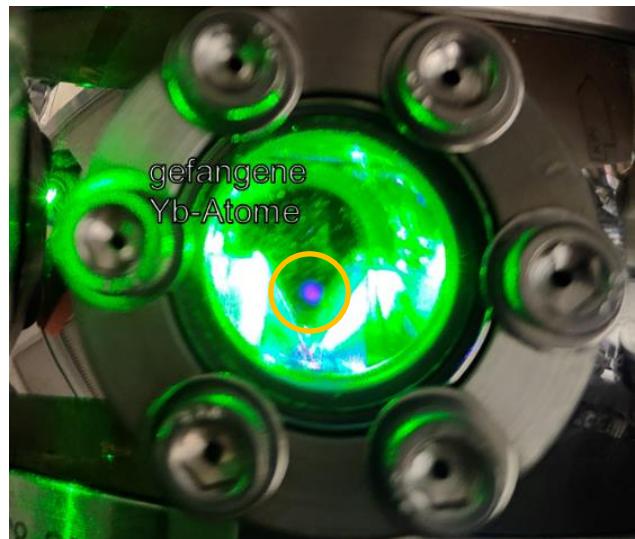


Abbildung 7: In einer magneto-optischen Falle gefangene Ytterbium Atome die zuvor durch optisches Heizen aus dem Mikro-Ofen abgedampft wurden. Das grüne Hintergrund-Streulicht wird durch den optischen Heizstrahl verursacht.

¹(*Phys. Rev. Applied* 23, 014020)

² Rev. Sci. Instrum. 95, 073201 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0203308>

Charakterisierungsmessungen

Im Rahmen von AP3.4 wurden umfangreiche Charakterisierungsmessungen durchgeführt:

- **Laderate in die MOT:**

Die Mikro-Heizplatten wurden elektrisch über vier Kontaktierungen bestromt. Die optische Heizung wurde mit einem Laser aus dem beschafften 556 nm-Lasersystem realisiert. Beide Heizmethoden führten bei Heizleistungen von wenigen hundert Milliwatt zu Laderaten von über 10^8 Atomen pro Sekunde in die MOT. Im Vergleich zu konventionellen Atomquellen, die typischerweise Leistungen von mehreren zehn Watt benötigen, zeichnet sich die Mikro-Heizplatte somit durch eine außergewöhnlich hohe Energieeffizienz aus.

- **Dynamisches Heizverhalten:**

Aufgrund der kompakten Bauweise die mit einer geringen thermischen Masse einhergeht, und der hervorragenden thermischen Isolationseigenschaften von Fused Silica zeigt die Mikro-Heizplatte ein sehr schnelles thermisches Ansprechverhalten. Bereits nach weniger als fünf Minuten Aufwärmzeit ist sie einsatzbereit, was eine deutliche Verbesserung gegenüber konventionellen Öfen mit Aufwärmzeiten von mehreren zehn Minuten darstellt.

- **Verhalten unter Dauerbelastung:**

Die thermische Stabilität wurde in einem mehrtägigen Belastungstest mit zyklischem Ein- und Ausschalten untersucht. Die Platin-Spirale der getestete Mikro-Heizplatte zeigte dabei eine Reduktion des elektrischen Widerstands um etwa 10 %, blieb jedoch voll funktionsfähig.

- **Lebensdauer des Reservoirs:**

Das geringe Fassungsvermögen des Reservoirs von wenigen Milligramm Ytterbium oder Strontium wird durch die deutlich niedrigere Betriebstemperatur und die damit reduzierte Abdampfrate hinsichtlich der Lebensdauer des Reservoirs kompensiert. Eine initiale Befüllung mit etwa 30 mg Ytterbium zeigte während der Versuche (inkl. des mehrtägigen Belastungstests) keinen messbaren Verbrauch. Auf Basis der gemessenen Laderaten wurden theoretische Lebensdauern von mehreren Jahren bei Laderaten von 10^8 Atomen pro Sekunde in eine MOT abgeschätzt.

Die Mikro-Heizplatte erfüllt damit die Anforderungen an eine voll funktionsfähige Atomquelle für Quantenexperimente und stellt eine vielversprechende Lösung³ für den Einsatz in hochkompakten Quantensensoren wie optischen Uhren oder Gravimetern dar.

³ Die Ergebnisse wurde im Fachblatt Physical Review Applied veröffentlicht.
(Phys. Rev. Applied 23, 014020 <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.014020>

AP5: Integration und Demonstration der entwickelten Komponenten

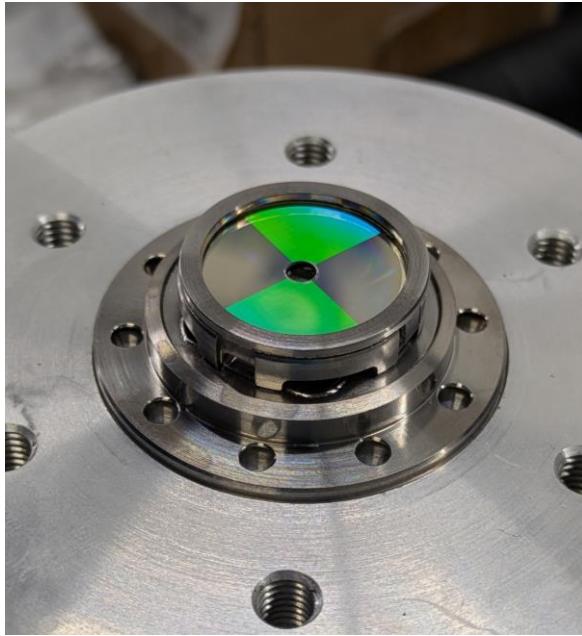


Abbildung 8: Auf Titan-Sonderflansch (analog zur Nennweite CF27) montierte Kombination aus Mikro-Heizplatte (nicht sichtbar) gefüllt mit Strontium und darauf montiertem gMOT-Chip mit seinen 4 Beugungsgitter-Segmenten.

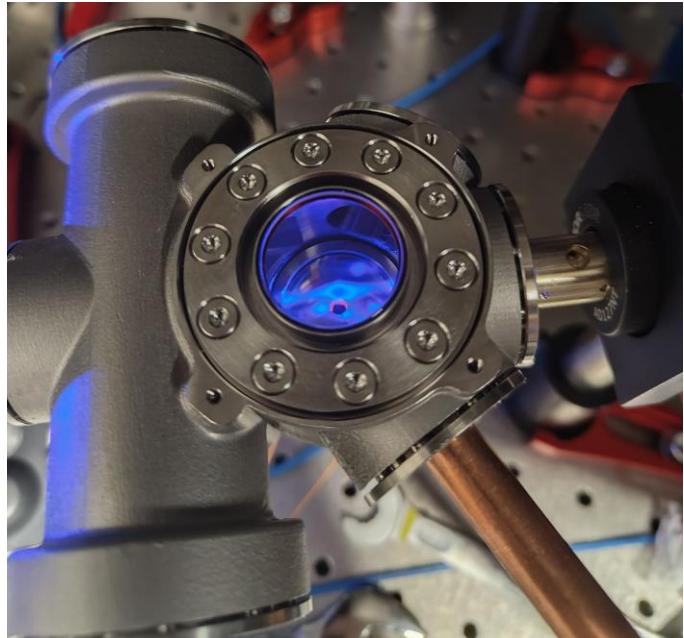


Abbildung 9: Spektroskopischer Nachweis bei 461 nm von der Mikro-Heizplatte abgedampfter Strontium Atome in der aus Titan 3D gedruckten Demonstrator-Vakuumkammer.

Die in den Arbeitspaketen AP2 bis AP4 entwickelten Komponenten wurden an das DLR geliefert. VACOM stellte die Vakuumkammern sowie die gefertigten Sonderflansche in ausreichender Stückzahl für zwei Demonstratoren bereit und lieferte zusätzlich sämtliches benötigtes Zubehör (Dichtringe, Schrauben etc.).

Das DLR montierte die Atomquelle und den gMOT-Chip auf einem von VACOM und der PTB entwickelten Sonderflansch mit vier elektrischen Durchführungen, um die Mikro-Heizplatte von außerhalb des Vakuums elektrisch betreiben zu können (Abbildung 8). Die weiteren Flansche, einschließlich eines Pinch-Off-Flansches für das Abpumpen über einen externen Pumpstand, wurden anschließend an die Kammer montiert.

Aufgrund der bekannten schnellen Oxidation von Strontium wurde der Flansch mit der Atomquelle erst zuletzt in den Demonstrator integriert. Die speziell präparierte Strontium-Granulat wurde unter evakuiertem Exsikkator gelagert und unmittelbar vor der Montage eingesetzt, gefolgt von einem sofortigen Abpumpen der Demonstratorkammer. Das erforderliche Vakuum wurde mit einem externen Pumpstand erzeugt und die Kammer auf Dichtigkeit geprüft.

Als Ersatz kamen eine kommerzielle Ionen-Getterpumpe (IGP) sowie ein passives Non-Evaporable-Getter-Material (NEG) zum Einsatz, wobei die IGP zusätzlich als Drucksensor diente. Nach der Trennung vom Pumpstand stellte sich ein Druck im Bereich weniger 10^{-9} mbar ein, der jedoch höher ausfiel als erwartet.

Nach Projektabschluss konnte eine fehlerhafte Vakuumverbindung an einem standardisierten CF-Bauteil identifiziert werden, das für den Anschluss an den Pumpstand verwendet worden war und ursächlich für den erhöhten Druck war.

Für die Generierung des MOT-Magnetfeldes wurden zwei wassergekühlte Magnetfeldspulen in Anti-Helmholtz-Konfiguration verwendet. Der für den Einschluss der Atome notwendige Magnetfeldgradient betrug ca. 50 Gauss/cm, die abgefallene Verlustleistung wurde von den wassergekühlten Spulenhaltern abgeführt.

Mit der beschafften CCD-Kamera (Pos. 12, Vorhabenspezifischen Anlagen) wurde die mittels Laserspektroskopie erzeugte Fluoreszenz der Atome beobachtet und Messdaten aufgezeichnet.

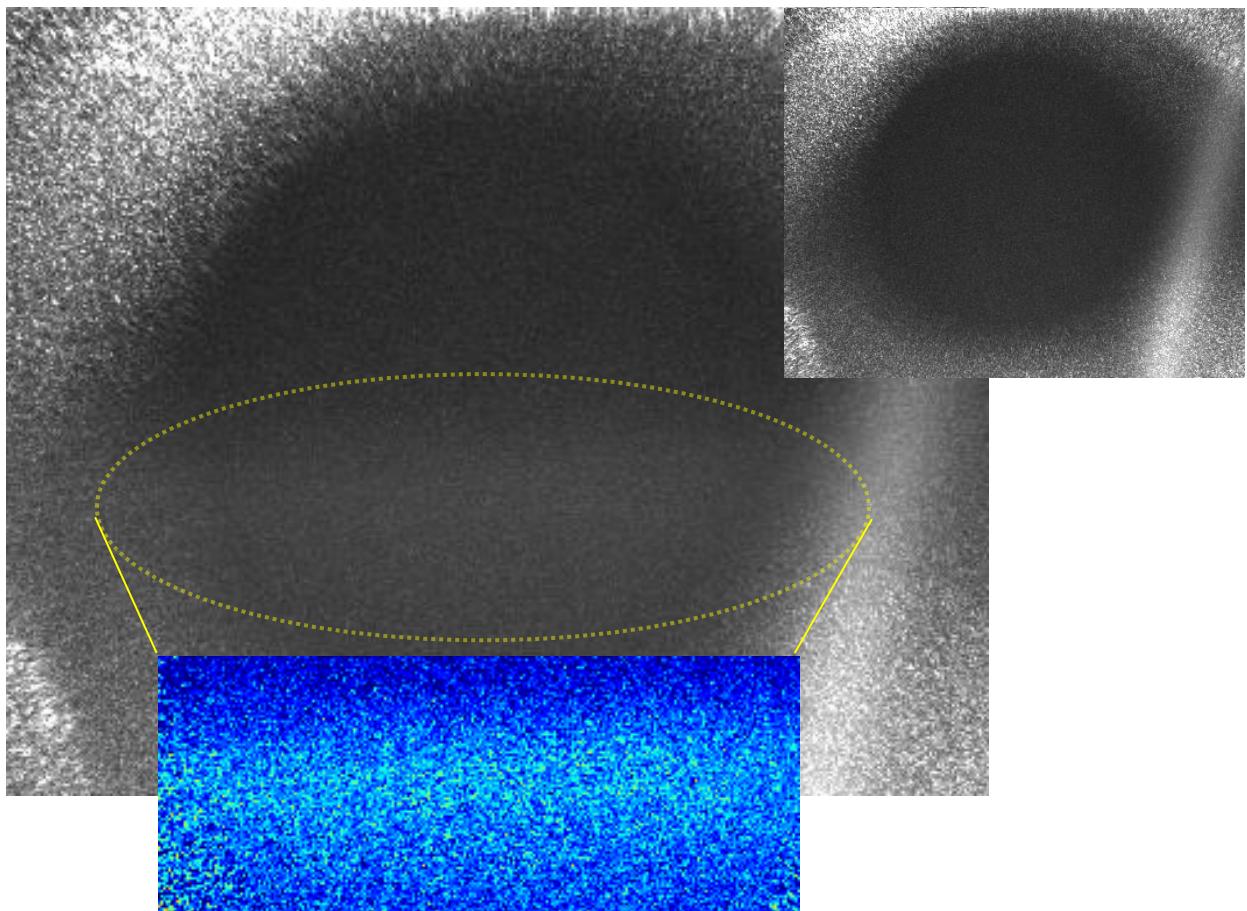


Abbildung 10: Fluoreszenzaufnahme einer MOT mit ca. 10^5 Strontiumatomen. Das Inset zeigt das um den Hintergrund korrigierte Bild der MOT-Region. Die MOT ist aufgrund der geringen radialen Fallentiefe des gMOT-Chips deutlich räumlich verbreitert. Der Vergleich mit ausgeschaltetem Magnetfeld ist oben rechts zu sehen, hier bildet sich keine MOT aus und es kann keine Fluoreszenz beobachtet werden.

Bei einer optischen Leistung von 60 mW konnten ca. 10^5 Atome in der gMOT gefangen werden (Abbildung 10). Im Vergleich zu den im Testaufbau durchgeföhrten Charakterisierungsmessungen mit Ytterbium in Kombination mit der Pyramiden-MOT, waren für die Generierung einer MOT im Demonstrator ca. 850 mW elektrische- und zusätzlich ca. 50 mW optische Heizleistung notwendig, was in etwa eine Verdreifachung der notwendigen Heizleistung bedeutete. Dies ist zum einen auf das Element selbst zurückzuföhren. Ytterbium hat im relevanten Temperaturbereich von etwa 300°C einen etwa 6-mal höheren Dampfdruck als Strontium. Der dadurch resultierende niedrigere Atomfluss des Strontiums muss mit einer höheren Temperatur der Mikro-Heizplatte kompensiert werden. Zudem bietet der gMOT-Chip eine deutlich geringere Einfanggeschwindigkeit für die Atome im Vergleich zu der Pyramiden-MOT. Dies führt dazu, dass insg. weniger Atome gefangen werden können. Teilweise konnte dies mit einer Anhebung der Heizleistung kompensiert werden. Die Kombination des gMOT-Chips mit der Mikro-Heizplatte bietet eine der kompaktesten Lösungen für eine MOT, die derzeit für Erdalkali-Elemente möglich ist. Jedoch zeigte sich insbesondere bei gMOT-Chips, dass das Einfangen von Atomen deutlich schwieriger und komplexer⁴ ist als bei konventionellen Geometrien wie z.B. der Pyramide.

⁴ Daniel S Barker et al 2023 New J. Phys. 25 103046, DOI 10.1088/1367-2630/ad02ea

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Rahmen des Projektes benötigten Mittel wurden für die Umsetzung des Projektes genutzt. Insbesondere wurden von den Materialkosten (0813) Optiken, Optomechaniken, Reinigungsmaterial, Chemikalien (Strontium, Ytterbium), Auftragsfertigung der monolithischen Pyramiden-MOT und sonstigen Mechanikkomponenten, Vakuumstandardkomponenten, Elektroniken und sonstige Verbrauchsmaterialien beschafft.

- Der finanziell größte Posten des Projektes sind Personalkosten. Im Projekt wurden etwa 28 Personenmonate (PM) benötigt. Davon verteilen sich 3 PM auf das Projektmanagement, der Rest auf die wissenschaftlichen Tätigkeiten. Die Mittel wurden entsprechend beim Projektträger angefordert.
- Weiterhin wurden zwei Lasersysteme (Pos. 1) beschafft. Davon wurde eines für die Fluoreszenzdetektion mittels Laserspektroskopie der abgedampften Ytterbiumatome verwendet (Abbildung 7). Ein weiteres Lasersystem mit deutlich höherer Ausgangsleistung wurde für das optische Heizen der Mikro-Heizplatten beschafft und erfolgreich eingesetzt. Es eignete sich ebenfalls für den Betrieb der zweiten, deutlich schmalbandigeren MOT-Stufe bei 556 nm in der die Atome weiter gekühlt werden konnten und erheblich geringere Temperaturen als in der ersten Stufe erzielt wurden.
- Für das Abpumpen des Demonstrators und auch der Testkammer wurde ein Pumpstand (Pos. 3) beschafft und mehrfach eingesetzt. Das vom Pumpstand erzeugte Vakuum war ausreichend um die IGP-Vakuumpumpe (Pos. 11) in Betrieb zu nehmen.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, konnten im Rahmen des Projektvorhabens bedeutende Fortschritte im Bereich miniaturisierter, additiv gefertigter Vakuumsysteme für kompakte Quantensensoren der nächsten Generation erzielt werden. Insbesondere stellt die erfolgreiche Demonstration einer extrem kompakten, integrierten magneto-optischen Falle in Kombination mit einem grating MOT-Chip in einer additiv gefertigten Titan-Vakuumkammer eine international einzigartige Leistung dar. Der erzielte Erfolg wurde maßgeblich durch die Zusammenarbeit der Projektpartner und deren eingebrachte Expertise ermöglicht. Ohne den Forschungsverbund wäre dies weder in der Qualität noch in diesem Zeitrahmen möglich gewesen.

Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses, Planungen für die nähere Zukunft

Der innerhalb des Verbundes entstandene Demonstrator hat erfolgreich gezeigt, dass eine Atomquelle für Quantensensoren erheblich kompakter zu realisieren ist. Für die Entwicklung kompakter und ggf. mobiler Quantensensoren der nächsten Generation ist dies ein notwendiger technologischer Schritt. Auf den Ergebnissen aus InnoVaQ aufbauend, wird das Konsortium im Projekt „*Integriertes Spektroskopiemodul für optische Atomuhren*“ (ISMA) in ähnlicher Zusammensetzung ab Januar 2026 ein Spektroskopiemodul entwickeln. Perspektivisch wird die Quelle kalter Atome um weitere Elemente erweitert, die es ermöglichen sollen, das Modul als Frequenzreferenz zu nutzen.

Dies beinhaltet eine Weiterentwicklung der Mikro-Heizplatte zu einem Atomstrahlofen. Das Ziel ist es, die isotrope Abstrahlcharakteristik der evaporierten Atome zu einem gerichteten Atomstrahl zu optimieren. Im Bereich der Vakuumkammern werden zusätzlich zu den entwickelten elektrischen Vakuumdurchführungen, faseroptische Durchführungen entwickelt. Im Bereich der Vakuumpumpe wird eine miniaturisierte Vakuumpumpe basierend auf der Technologie der Ionen-Getter-Pumpen entwickelt. Zudem wird die magnetfeldfreie Feldemissionspumpe weiterentwickelt.

Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

- Von Cooper et al.⁵ wurde erstmals eine 3D-gedruckte Vakuumkammer publiziert. Die Vakuumkammer wurde mittels Laser-Pulverbett-Fusion aus einer Aluminiumlegierung (AlSi10Mg) gefertigt. Messungen zeigten, dass die Kammer einen extrem niedrigen Druck erreicht und nur sehr geringe Gasfreisetzung aus dem Material erfolgt. Hier wurde der in InnoVaQ verfolgte Ansatz bestätigt, dass diese Entwicklung leichtere, kompaktere und schneller herstellbare Hochvakuum-Systeme ermöglicht, was besonders für mobile Quantensensoren und Messgeräte relevant ist.
- Auf dem Gebiet kompakter Pumpen finden sich einige Beispiele für Alternativen zu Ionen-Getter-Pumpen, die auf passiven Materialien, sogenannten non-evaporable-gettern (NEG) beruhen. Diese Pumpen basieren auf dem Prinzip der Sorption und müssen bei hohen Temperaturen ausgeheizt werden bevor sie eine Pumpwirkung erzielen, was je nach Anwendung problematisch sein kann. Ein Vorteil der NEG-Pumpen ist die hohe Pumpleistung bei z.B. Stickstoff, nachteilig allerdings die extrem niedrige Pumpleistung von Edelgasen (Hauptsächlich Helium). NEG-Pumpen können kommerziell erworben werden, typischerweise als Kombinationspumpe mit einer IGP.
- Auf dem Gebiet kompakter Atomquellen gibt es zahlreiche Beispiele von Dampfzellen, die auf dem Element Rubidium oder Caesium basieren. In diesen Zellen liegt ein permanenter Hintergrunddampf vor, aus dem die Atome genutzt werden. Diese Methode funktioniert bei Strontium oder Ytterbium aufgrund des geringen Dampfdruckes der Elemente nicht. Im Laufe des Projektes sind auch hier ähnliche Konzepte wie das in InnoVaQ entwickelte vorgestellt worden. In Martinez et al.⁶ wurde ein passiv gepumptes Vakuumsystem auf Basis eines hermetisch versiegelten mikrostrukturierten Glas-/Silizium-Stacks entwickelt, der Rubidium-Atome als atomaren Strahl erzeugt.
- Eine weitere sehr kompakte Atomquelle wurde von Kumar et al.⁷ vorgestellt. Hier wurde eine sehr kleine, energieeffizienten und schnell reagierenden Atomquelle hergestellt, die direkt auf ein Ion-Trapping-Mikrochip-System integriert werden kann. Die Quelle wird mikrofertigt mit MEMS-Techniken (Micro-Electro-Mechanical Systems).

⁵ <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101898>

⁶ <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39166-1>

⁷ <https://doi.org/10.1063/5.0271048>

Erfolgte und geplante Publikationen

- “*Compact structures for single-beam magneto-optical trapping of ytterbium*”
J. Pick, R. Schwarz, J. Kruse, C. Lisdat, C. Klempt
Rev. Sci. Instrum. 95, 073201 (2024)
<https://doi.org/10.1063/5.0203308>
- “*Compact structures for single-beam magneto-optical trapping of ytterbium*”
J. Pick, R. Schwarz, J. Kruse, C. Lisdat, C. Klempt
International Conference on Atomic Physics (ICAP) 2024, Konferenzposter
<https://elib.dlr.de/205645/>
- “*Low-power microstructured atomic oven for alkaline-earth-like elements*”
J. Pick, J. Voß, S. Hirt, J. Kruse, T. Leopold, R. Schwarz, C. Klempt
Phys. Rev. Applied 23, 014020
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.014020>
- “*Low-power microstructured atomic oven for alkaline-earth-like elements*”
J. Pick, J. Voß, S. Hirt, J. Kruse, T. Leopold, R. Schwarz, C. Klempt
European Frequency and Time Forum (EFTF) 2025, Konferenzposter
[electronic library - Low-power microstructured atomic oven for alkaline-earth-like elements](#)
- “*Low-power microstructured atomic oven for alkaline-earth-like elements*”
J. Pick, J. Voß, F. Löwinger, E. Henker, S. Hirt, J. Kruse, S. Hannig, T. Leopold, R. Schwarz, C. Klempt
Quantum Optics XI 2025, Konferenzposter
<https://elib.dlr.de/216824/>
- “*Miniaturized setups for magneto-optical trapping of ytterbium and strontium*”
J. Pick, J. Voß, F. Löwinger, S. Hirt, J. Kruse, S. Hannig, T. Leopold, R. Schwarz, C. Klempt
European Frequency and Time Forum (EFTF) 2026, geplantes Konferenzposter
- Geplante Abschlusspublikation über die Projektresultate in 2026
- In Kürze Veröffentlichung einer Doktorarbeit mit dem Titel „Compact Atom Sources for Optical Frequency Standards“