

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 1 of 22

KACTUS-II - Kompakte Atomchiptechnologie für den Einsatz unter Schwerelosigkeit

50WM1949

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Ferdinand-Braun-Institut gGmbH
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
Joint Lab Integrated Quantum Sensors
Gustav-Kirchhoff-Str. 4
12489 Berlin

Förderkennzeichen: 50WM1949

Vorhabensbezeichnung: Verbundvorhaben zur Entwicklung neuer Atomchiptechnologien zur Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten unter Schwerelosigkeit, Teilprojekt: Integration von optischen Elementen auf Atomchips

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2019 – 31.12.2024

Wissenschaftlicher Geschäftsführer: Prof. Dr. P. Scheele

Projektleiter: Prof. Dr. Markus Krutzik

Autoren: Dr. Marc Christ, Prof. Dr. Markus Krutzik

Verbundpartner: Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover (IQ)
Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover (IMPT)

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 2 of 22

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens (FBH)	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn	5
1.5	Vorarbeiten in KACTUS-I: UHV Qualifizierungsaufbau, Konzept optische Dipolfalle	7
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
2	Eingehende Darstellung	9
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	9
2.2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	20
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	20
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	20
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	20
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	21
3	Referenzen.....	22

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 3 of 22

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens ist die technische Weiterentwicklung und Miniaturisierung von wissenschaftlichen Instrumenten zur Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten (BEK) und der auf dieser basierenden Atominterferometrie. Hierzu sollen die sogenannten „Atomchips“ in ihrer Anwendbarkeit und Vielseitigkeit für zukünftige Mikrogravitationsexperimente verbessert werden.

Dabei handelt es sich um planare Leiterstrukturen mit denen allein oder in Kombination mit Spulenpaaren Magnetfeldkonfigurationen erzeugt werden, in denen neutrale Atome gefangen werden können. Im Vergleich zu Aufbauten, die lediglich auf Spulenpaaren basieren, bieten Atomchipapparaturen einige Vorteile die besonders für den Einsatz von Experimenten unter Schwerelosigkeit interessant sind. So sind zum Beispiel die Größe der Systeme, ihre Masse und ihre Leistungsaufnahme deutlich geringer. Außerdem ist es möglich eine schnellere Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten zu realisieren. Dafür müssen die Atomchips jedoch in Ultrahochvakuumkammern integriert werden und daher entsprechend geringe Ausgasraten aufweisen. Bisherige Techniken erfüllen diese Anforderung nur mit großer Einschränkung. Hieraus resultiert beispielsweise eine Verringerung der Lebensdauer der präparierten Bose-Einstein Kondensate.

Im Rahmen dieses Vorhabens sollen diese Nachteile adressiert werden und gleichzeitig die zuvor genannten Vorteile ausgebaut werden. In einer ersten Phase sollen hierzu konzeptionelle Vorarbeiten geleistet werden. Somit wird die Weiterentwicklung der Atomchiptechnologie zu einer zusätzlichen Miniaturisierung von Apparaturen zur Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten und gleichzeitig längeren Lebensdauern führen. Dies ist von großer Bedeutung für zukünftige Schwerelosigkeitsmissionen mit BEKs und besonders für hierauf basierende Atominterferometer und anderer Quantensensoren.

Das Projekt KACTUS-II ist Teil einer Reihe von Vorhaben mit dem Ziel der Untersuchung der Eigenschaften von Bose-Einstein Kondensaten in der Schwerelosigkeit und deren Nutzung als Quelle für die Atominterferometrie in Mikrogravitationsumgebungen. Begonnen wurden diese Anstrengungen mit dem Projekt QUANTUS, in dem eine Apparatur für den Fallturm Bremen gebaut wurde und mit dieser 2008 erstmals ein Bose-Einstein Kondensat unter Schwerelosigkeit erzeugt werden konnte. Mit derselben Apparatur konnte auch erstmals ein auf BEKs basierendes Atominterferometer realisiert werden. Im Rahmen des Folgeprojektes QUANTUS II wurde eine weiterentwickelte Fallturmapparatur gebaut, die sich neben einer geringeren Größe und einer geringeren Masse durch eine schnellere Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten mit einer höheren Anzahl von Atomen im BEK auszeichnet. Die Leistungsfähigkeit dieser mobilen Apparatur ist dabei mit den derzeit besten laborgebundenen Aufbauten vergleichbar.

Als konsequente Fortsetzung der Fallturmexperimente befinden sich derzeit drei Höhenforschungsraketenmissionen, MAIUS 1, 2 & 3, in Vorbereitung (gefördert in den Verbundprojekten QUANTUS III und QUANTUS IV MAIUS). Auf der ersten Mission wurde erstmals ein BEK im Weltraum erzeugt und als Quelle für die Atominterferometrie genutzt. Außerdem ist es ein zentrales Ziel dieser Mission, Bose-Einstein Kondensate mit bisher unerreicht niedriger Ausbreitungsgeschwindigkeit zu präparieren und hiermit Messungen mit mehreren Sekunden Propagationszeit durchzuführen.

Auf den beiden Folgemissionen sollen BEKs aus zwei verschiedenen chemischen Elementen erzeugt werden, wobei die erzeugten Bose-Einstein Kondensate dann wiederum als Quelle für die Atominterferometrie dienen. Sowohl Apparaturen für den Einsatz im Fallturm wie auch die für den Flug auf Höhenforschungsraketen basieren dabei auf Atomchips, wodurch ein hinreichend kompakter Aufbau für diese Einsatzszenarien möglich ist. Die

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 4 of 22

Höhenforschungsraketenmissionen sind jedoch bereits jetzt besonders durch die Masse und Volumen der Nutzlast herausgefordert, die zu einer Limitierung der verfügbaren Experimentierzeit führen. Dabei wird ein großer Teil der Masse und des Volumens durch die Vakuumpumpen in Anspruch genommen. Die Vakuumqualität ist hierbei durch die Ausgasrate des Atomchips und interner Komponenten limitiert. Daher wäre durch eine Reduktion der Ausgasrate eine Verringerung der Masse möglich.

Neuartige Optikkonzepte sollten es zudem erlauben, die benötigte optische Leistung zu reduzieren und damit elektrische Leistung und Masse der Laser und somit der Elektronik zu verringern. Parallel zu den zuvor beschriebenen Anstrengungen zur Untersuchung der Eigenschaften von Bose-Einstein Kondensaten in der Schwerelosigkeit wurde in separaten Projekten bereits ein Teil der Technologien vorangetrieben, die zur Erzeugung von Bose-Einstein Kondensaten in Schwerelosigkeitsexperimenten nötig sind. So wurden in den Projekten LASUS und LASUSII hochkompakte Steuerelektronik und mikrointegrierte Lasermodule entwickelt. Diese wurden bereits auf der Höhenforschungsraketenmission TEXUS 51 im Experiment FOKUS erfolgreich geflogen und werden im Rahmen von TEXUS 53 in FOKUS Reflight beziehungsweise KALEXUS eingesetzt werden.

In dem Vorhaben KACTUS-I am FBH wurden Konzepte und Strukturen geschaffen, um die Entwicklung und Qualifikation integrierter Optiksysteeme und somit die Miniaturisierung der notwendigen Subsysteme weiterzuentwickeln. So wurde ein Vakuum-Teststand entworfen und aufgebaut, der die Untersuchung miniaturisierter Komponenten, integrierter Systeme und Fügetechniken auf ihre Ausgaseigenschaften unter Ultrahochvakuumbedingungen erlaubt. Für Studien an kalten Atomgasen, besonders von Mischungen verschiedener atomarer Spezies, wurden erste Entwürfe für ein Dipolfallensystem zur Integration auf einem Atomchip untersucht.

Das Vorhaben KACTUS-II am FBH baut darauf auf. Hier soll der Vakuum-Teststand fertiggestellt und kommissioniert werden, so dass die Untersuchung der Vakumeigenschaften neuer Chiptechnologien, Fügetechniken und optischer Komponenten und mikrointegrierter Systeme fortgeführt werden kann. Aufbauend auf dem Entwurf aus KACTUS-I werden optische Subsysteme der integrierten Dipolfalle schrittweise realisiert. Basierend auf dieser Technologie werden hochintegrierte optische Subsysteme realisiert, die hinsichtlich ihrer Robustheit als auch Leistungsfähigkeit zur Manipulation von kalten Atomen qualifiziert werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Rahmen des Vorhabens sollen Konzepte für neue Techniken zur weiteren Miniaturisierung und Vereinfachung von auf Atomchip-basierenden wissenschaftlichen Nutzlasten auf dem Gebiet der Atominterferometrie entwickelt werden. Weiterhin soll eine erweiterte optische Funktionalität zur Atommanipulation für integrierte Physikpakete ermöglicht und demonstriert werden. Diese könnten in Zukunft das Herzstück neuer orbitaler und suborbitaler Mission auf diesem Gebiet bilden. Hierzu werden die Arbeiten im Rahmen eines Verbundvorhabens durchgeführt.

- Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover (Verbundleitung) (IQ)
- Institut für Mikroproduktionstechnik, Leibniz Universität Hannover (IMPT)
- Joint Lab Integrated Quantum Sensors, Ferdinand Braun Institut Berlin (FBH)

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens (FBH)

Ziel des Teilvorhabens am FBH ist die Integration von optischer Funktionalität in kompakte Atomchip-basierte Apparaturen zur Erzeugung ultra-kalter atomarer Ensembles in Schwerelosigkeit. Schwerpunkt am FBH war:

- Etablierung und Qualifikation der benötigten Technologiebasis, Infrastruktur und

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 5 of 22

Schlüsselkomponenten

- Anwendungsspezifische Qualifikation von adhäsiven Integrationstechnologien mit Umweltaalterung.
- Aufbau und Betrieb einer Ultrahochvakuum-Qualifikationsanlage
- Beschaffung, Aufbau und Betrieb eines Prüfstandes zur dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC)
- Etablierung von Mikrointegrationsaufbauten und Verfahren für miniaturisierte optische Systeme.
- Entwicklung und Qualifikation eines Prototyps einer miniaturisierten, gekreuzten Dipolfalle, Demonstration mit kalten Atomen.
- Anpassung und Delta-Qualifikation einer miniaturisierten, gekreuzten Dipolfalle zur Integration mit den Atomchip-basierten Apparaturen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Erstmals wurde die Erzeugung von einem Bose-Einstein Kondensat auf einem Atomchip 2001 fast simultan in München und Tübingen demonstriert. Hierbei wurde jeweils das chemische Element 87Rb verwendet und es wurde schnell klar, dass durch die Miniaturisierung der stromführenden Strukturen eine Verringerung der benötigten Ströme bei gleichzeitig höheren Falleneinschlüssen möglich ist. Hierdurch ist wiederum eine wesentliche Beschleunigung des Erzeugungsprozesses möglich. Einen guten Überblick über die daraus resultierenden Entwicklungen in unterschiedlichen Gebieten der Physik findet sich zum Beispiel in.

In den folgenden Jahren wurden große Fortschritte auf dem Gebiet der Atominterferometrie mit auf Atomchips gefangenen Systemen gemacht. So konnte beispielsweise 2004 erstmals die kohärente Manipulation der internen Freiheitsgrade von den so gefangenen Atomen gezeigt und damit Ramsey-Interferometrie demonstriert werden. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich bei diesen ersten Interferometern eher um Machbarkeitsnachweise als um Messgeräte handelte.

Eine wesentliche Entwicklung für den Einsatz von Atomchipapparaturen in der Schwerelosigkeit ergab sich, wie oben beschrieben, aus den DLR-geförderten QUANTUS-Projekten. Hierbei wurde erstmals demonstriert, dass ein solches System den Anforderungen des Fallturms in Freifall und in Katapultbetrieb genügt und weitergehend eine solche Apparatur für den Einsatz auf einer Höhenforschungsrakete qualifiziert. Basierend auf dieser Technologie befindet sich derzeit ein Absolutgravimeter im Aufbau.

Technologisch konnten Atomchipsysteme in dieser Zeit ebenfalls weiterentwickelt werden. So wurden 2005 erstmals Atomchips mit mehreren Lagen demonstriert, bei denen sowohl zwei Substrate aufeinander geklebt, als auch auf dem oberen Substrat zwei strom-führenden Lagen übereinander realisiert wurden. Dabei wurde zwischen den beiden Lagen auf dem oberen Substrat eine isolierende Schicht aus einem Polyimid aufgebracht.

Auch optische Elemente wurden bereits auf Atomchips integriert. So gelang es beispielsweise 2010 optische Fasern auf der Oberfläche von Substraten anzubringen um damit eine Detektion der Atome zu ermöglichen. Des Weiteren gelang es auch, Resonatoren auf Atomchips zu realisieren umso die Präparation und Detektion von einzelnen Atomen zu ermöglichen. Außerdem wurden 2008 hermetische Durchführungen durch Atomchips realisiert, die in der Folge weiterentwickelt wurden. Hierbei wurden zuerst Löcher in Silizium Substrate geätzt und diese anschließend mit Kupfer galvanisch aufgefüllt.

Diffraktive Strukturen wurden 2010 erstmals zur Beugung der zum Fangen der Atome nötigen Lichtstrahlen an der Oberfläche von Atomchips genutzt, wobei hiermit 2×10^7 Atome bei einer Temperatur von 50 μ K in einer optischen Melasse gefangen wurden. Die Strukturen wurden dabei mittels reaktiven Ionenätzens auf eine Oberfläche strukturiert.

Zur Erzeugung von Dichtungen zwischen Atomchipsubstraten und Glaskammern wurden

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 6 of 22

verschiedene Methoden demonstriert. Erstmals wurde dies mit Epoxidharz realisiert und später durch anodisches Bonden erreicht. Hierbei wird eine Hochspannung zwischen Substrat und Kammer angelegt und diese gleichzeitig erhitzt. Die hier beschriebenen Techniken wurden bisher nicht für den Einsatz auf Mikrogravitationsmissionen qualifiziert und in einer einzigen Apparatur vereinigt. Daher soll im Rahmen dieses Verbundprojektes eine Optimierung des Systems an die Anforderungen des Einsatzes in Schwerelosigkeit und eine Qualifikation stattfinden. Eine Kombination der so qualifizierten Technologien würde eine wesentliche Weiterentwicklung derzeitiger Mikrogravitationsexperimente mit Bose-Einstein Kondensaten darstellen.

Relevante Publikationen

- Tim van Zoest, N Gaaloul, Y Singh, H Ahlers, W Herr, S T Seidel, W Ertmer, E Rasel, M Eckart, E Kajari, et al. Bose–Einstein condensation in microgravity. *Science*, 328(5985):1540–1543, 2010.
- H Müntinga, H Ahlers, M Krutzik, A Wenzlawski, S Arnold, D Becker, K Bongs, H Dittus, H Duncker, N Gaaloul, et al. Interferometry with Bose–Einstein condensates in microgravity. *Physical Review Letters*, 110(9):093602, 2013.
- Jan Rudolph, W Herr, C Grzeschik, T Sterneke, A Grote, M Popp, D Becker, H Müntinga, H Ahlers, A Peters, C Lämmerzahl, K Sengstock, N Gaaloul, W Ertmer, and E M Rasel. A high-flux BEC source for mobile atom interferometers. *New Journal of Physics*, 17(6):065001, 2015.
- D Becker, M D Lachmann, S T Seidel, H Ahlers, A N Dinkelaker, J Grosse, ... E M Rasel. Space-borne Bose–Einstein condensation for precision interferometry. *Nature*, 562(7727):391–395, 2018.
- E Luvsandamdin, C Kürbis, M Schiemangk, A Sahm, A Wicht, A Peters, G Erbert, and G Tränkle. Microintegrated extended cavity diode lasers for precision potassium spectroscopy in space. *Optics Express*, 22(7):7790–7798, 2014.
- M Schiemangk, K Lampmann, A Dinkelaker, A Kohfeldt, M Krutzik, C Kürbis, A Sahm, S Spießberger, A Wicht, G Erbert, et al. High-power, microintegrated diode laser modules at 767 and 780 nm for portable quantum gas experiments. *Applied Optics*, 54(17):5332–5338, 2015.
- W Hänsel, P Hommelhoff, T Hänsch, and J Reichel. Bose–Einstein condensation on a microelectronic chip. *Nature*, 413(6855):498–501, 2001.
- H Ott, J Fortágh, G Schlotterbeck, A Grossmann, and C Zimmermann. Bose–Einstein condensation in a surface microtrap. *Physical Review Letters*, 87(23):230401, 2001.
- J Reichel and V Vuletic. *Atom Chips*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2011.
- P Treutlein, P Hommelhoff, T Steinmetz, T W Hänsch, and J Reichel. Coherence in microchip traps. *Physical Review Letters*, 92(20):203005, 2004.
- S Knappe, V Shah, P D D Schwindt, L Hollberg, J Kitching, L Liew, and J Moreland. A microfabricated atomic clock. *Applied Physics Letters*, 85(9):1460–1462, 2004.
- S T Seidel. Eine Quelle für die Interferometrie mit Bose-Einstein-Kondensaten auf Höhenforschungsraketen. PhD thesis, Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover (TIB), 2014.
- A Günther, M Kemmler, S Kraft, C J Vale, C Zimmermann, and J Fortágh. Combined chips for atom optics. *Physical Review A*, 71(6):063619, 2005.

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 7 of 22

- D Heine, W Rohringer, D Fischer, M Wilzbach, T Raub, S Loziczky, X Yuan Liu, S Groth, B Hessmo, and J Schmiedmayer. A single-atom detector integrated on an atom chip: fabrication, characterization and application. *New Journal of Physics*, 12(9):095005, 2010.
- H R Chuang, D Z Anderson, and V M Bright. The fabrication of through-wafer interconnects in silicon substrates for ultrahigh-vacuum atom optics cells. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(4):045003, 2008.
- H Chuang, H F Li, Y I Lin, Y H Lin, and C H Huang. The development of an atom chip with through silicon vias for an ultrahigh-vacuum cell. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23(8):085004, 2013.
- M Vangeleyn, P F Griffin, E Riis, and A S Arnold. Laser cooling with a single laser beam and a planar diffractor. *Optics Letters*, 35(20):3453–3455, 2010.
- C C Nshii, M Vangeleyn, J P Cotter, P F Griffin, E A Hinds, C N Ironside, P See, A G Sinclair, E Riis, and A S Arnold. A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies. *Nature Nanotechnology*, 8(5):321–324, 2013.
- J P McGilligan, P F Griffin, E Riis, and A S Arnold. Phase-space properties of magneto-optical traps utilizing microfabricated gratings. *Optics Express*, 23(7):8948–8959, 2015.
- S Du, M B Squires, Y Imai, L Czaia, R A Saravanan, V Bright, J Reichel, T W Hänsch, and D Z Anderson. Atom-chip Bose–Einstein condensation in a portable vacuum cell. *Physical Review A*, 70(5):053606, 2004.
- D M Farkas, K M Hudek, E A Salim, S R Segal, M B Squires, and D Z Anderson. A compact, transportable, microchip-based system for high-repetition rate production of Bose–Einstein condensates. *Applied Physics Letters*, 96(9):093102, 2010.

1.5 Vorarbeiten in KACTUS-I: UHV Qualifizierungsaufbau, Konzept optische Doppelfalle

Für den Aufbau von miniaturisierten optischen Systemen nahe von Bose-Einstein Kondensaten ist neben der optischen Leistung und Stabilität die UHV Kompatibilität eine zentrale Fragestellung. Sowohl alle angewandten Integrationstechnologien als auch Komponenten müssen hinsichtlich Ausgasrate und Gasspezies qualifiziert werden. Die im Raumfahrtsektor übliche Qualifikationsmethode der Massenverlustmessung (vgl. NASA low outgassing oder ASTM E595) ist für die Anforderungen von Systemen kalter Atome nicht ausreichend, da in realistischen Messzeiten nur etwa 10^{-5} mbar l/s aufgelöst werden können. Für den angestrebten Einsatz der optischen Systeme nahe der Atomchipoberfläche muss eine deutlich geringere Ausgasrate aufgelöst werden. Hierzu wurde in KACTUS-I ein vielseitiger Teststand entwickelt, der durch die sogenannte Leitfähigkeitsmethode die Auflösung deutlich geringerer Gasraten ermöglicht (Abbildung 1 links). Durch den Einsatz eines Massenspektrometers ist zusätzlich die Bestimmung der Gasspezies möglich, was zur Evaluation von möglichen Kontaminationen elektro-optischer Systeme große Relevanz aufweist. Mit Hilfe eines Probentransfersystems ist ein schneller Probenwechsel ohne brechen des Vakuums des Analysesystems möglich, wodurch die Qualifikationsarbeiten deutlich beschleunigt und vereinfacht werden. Hierdurch können Konditionierungssequenzen qualifiziert und optimiert werden. Der Qualifikationsteststand wurde im Rahmen des Joint Labs in den Laboren am Ferdinand-Braun-Institut assembliert (siehe Abbildung 1 rechts).

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 8 of 22

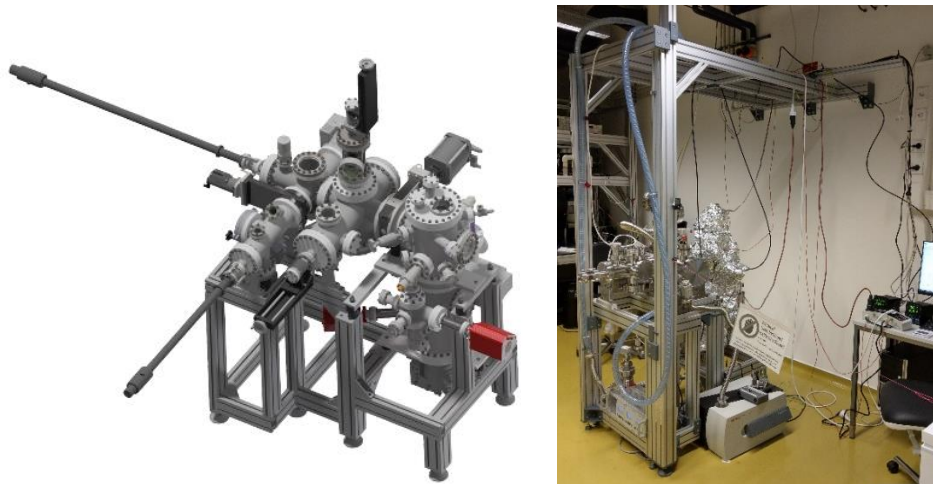


Abbildung 1: Links: CAD Design des UHV Qualifizierungssetups mit Load Lock, Transferkammer und Analysesystem. Rechts: Aufbau und Kommissionierung des UHV Setups am Ferdinand-Braun-Institut.

Im Rahmen von KACTUS-I wurde weiterhin ein erstes Konzept einer miniaturisierten, gekreuzten optischen Dipolfalle erstellt und erste optische Simulationen durchgeführt (siehe Abbildung 2). Diese zeigen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich erreichbarer Strahlfokus und Fallentiefe bei gleichzeitig kleinstem Bauraum. Die zur Realisierung dieses Setups benötigte Integrationstechnologie ist teilweise in der Gruppe Lasermetrologie für mikro-integrierte Lasermodule etabliert, muss jedoch in der Gruppe Integrierte Quantensensoren etabliert und weiter qualifiziert werden. Zusätzlich muss die optische Faserdurchführung und Kollimatorenteknologie für UHV Anwendungen angepasst und qualifiziert werden.

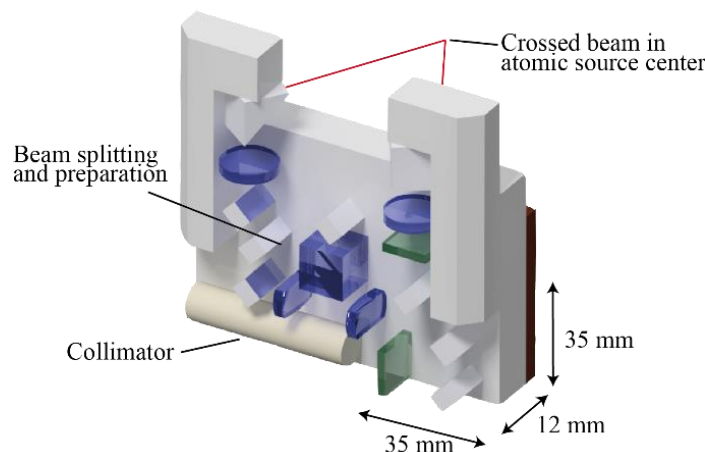


Abbildung 2: CAD Design einer miniaturisierten, gekreuzten optischen Dipolfalle auf Basis der am Ferdinand-Braun-Institut etablierten Integrationstechnologie. Es wird ein gekreuzter Strahlengang mit Fokus im Zentrum des Atomchips erzeugt.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens wurden Synergien mit dem Vorhaben QCHIP (50RK1978), MOTION (50WM2268) und CAPTAIN-QT (50WM2070) genutzt, in dem eine erweiterte Systemfunktionalisierung angestrebt wird, um eine gemeinsame Technologiebasis zu etablieren.

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 9 of 22

2 Eingehende Darstellung

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

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Arbeitspakete vorgestellt, die im Rahmen des Verbundvorhabens vom FBH bearbeitet wurden.

AP 8: Kommissionierung und Weiterentwicklung UHV Qualifikationssetup

In Arbeitspaket 8 sollen die grundlegenden Fähigkeiten und Technologien etabliert und qualifiziert werden, die für miniaturisierte, integrierte und höchst-stabile optische Aufbauten zur Manipulation atomarer Systeme im UHV benötigt werden.

AP 8.1: Fertigstellung Aufbau und Kommissionierung UHV Qualifikationssetup

Das CAD Design des Teststandes *OptiVacQ* und das aufgebaute System sind in Abbildung 3 abgebildet. Die internen Komponenten zum Probentransfer wurden weiterentwickelt, gefertigt und eine Designiteration zum Beseitigen von Fehlern durchgeführt. Weiterhin wurden Upgrades für die weiteren Arbeiten im Rahmen dieses Vorhabens vorbereitet. Dieses System wurde kommissioniert und eine Hintergrundausrate $< 5 \cdot 10^{-9}$ mbar l / (s cm²) qualifiziert. Dies ist mehrere Größenordnungen sensitiver als der E595 Standard. In Abbildung 4 ist das Hintergrundspektrum des Systems sichtbar, welches typische Massen für ein sehr sauberes Edelmetallsystem aufweist. Details zum System und der Kommissionierung sind in [1] publiziert.

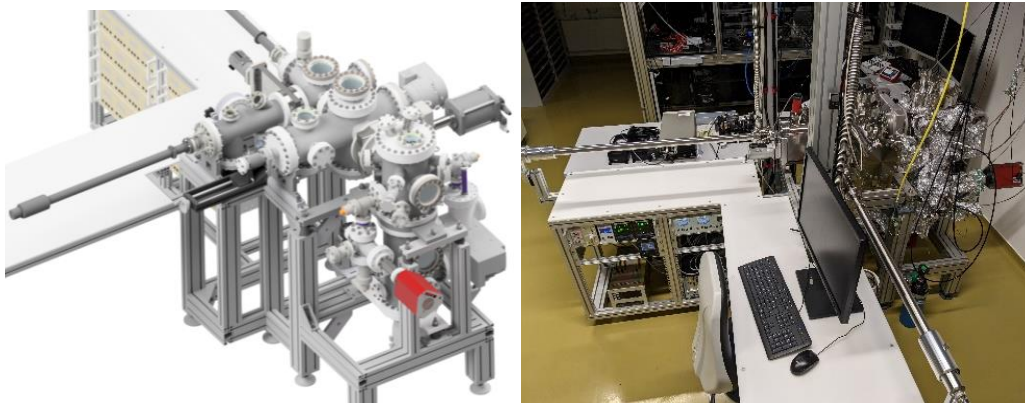


Abbildung 3 UHV-Qualifikationsaufbau mit Probentransfersystem und Elektronenrack, CAD Design und System im Labor. Aus [1].

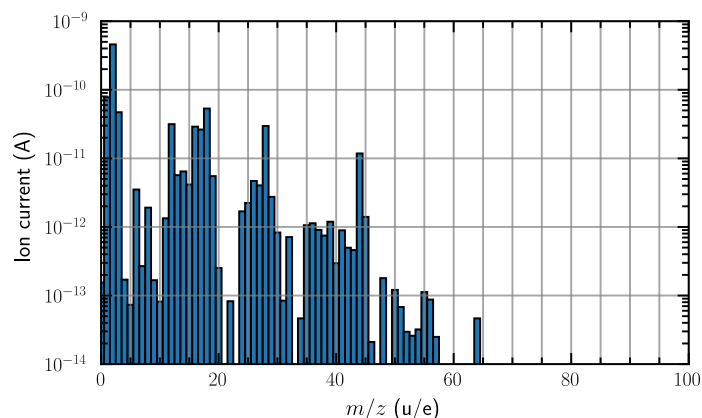


Abbildung 4 Hintergrundspektrum des OptiVacQ Systems. Dieses ist von Wasserstoff dominiert und zeigt typische Massen für saubere Edelmetall UHV-Systeme. Aus [1].

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 10 of 22

In Abbildung 5 ist eine Testmessung einer CF16 Vitondichtung gezeigt, welche zunächst auf dem Probenhalter montiert wurde. Anschließend wurde der Probenhalter in das Ultrahochvakuumssystem eingeschleust, zwischen beiden Transferstangen übergeben und erfolgreich in den Aufnehmer im Analysesystem transferiert. Während des gesamten Transfers verblieb das Analysesystem unter Hochvakuum, was eine erfolgreiche Auslegung des Transfersystems zeigt und eine Hintergrundsubtraktion für niedrig ausgasende Proben ermöglicht.

Anschließend wurde die Testprobe hinsichtlich Ausgasrate und Gasspektrum analysiert, siehe Abbildung 6. Hierbei wurde eine Ausgasrate von $\sim 6,3 \cdot 10^{-6}$ mbar l / (s cm²) gemessen. Das von der Probe desorbierende Gasspektrum ist in Abbildung 6 gezeigt. Die Hauptbestandteile dieses sind Wasser und 2-Propanol, welche nach der Reinigung der Probe auf dieser absorbiert sind und nun unter der Hochvakuumatmosphäre desorbieren. Weiterhin sind N₂ und O₂ als Bestandteile identifizierbar und liegen im selben Verhältnis wie für Atmosphärenluft vor. Dies ist in der Gaseinlagerung von Viton begründet, weshalb dieses auch als Referenzprobe genutzt wird. Diese Werte decken sich mit Literaturwerten (beispielsweise *Battes et al., JVSTA 33, 2015*).

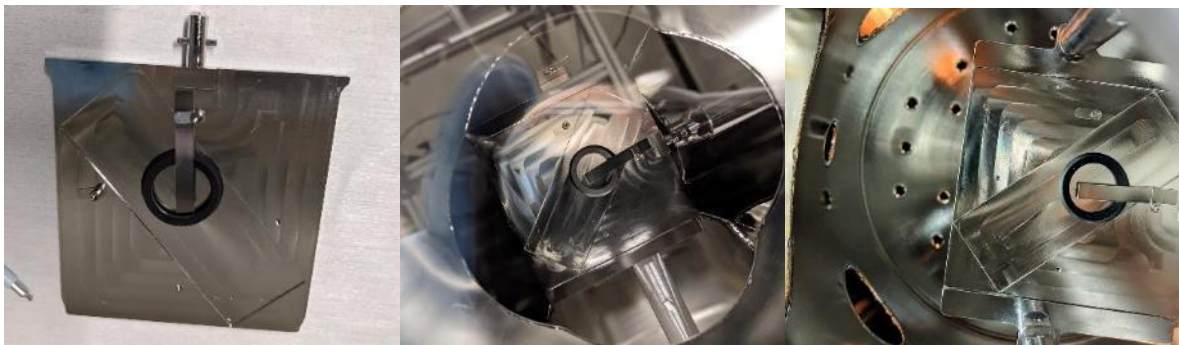


Abbildung 5 CF 16 Vitondichtung als Probe zum Ausgastest. Montiert auf dem Probenhalter (links), während dem Probentransfer (Mitte) und vollständig transferiert in der Analysechamber (rechts).

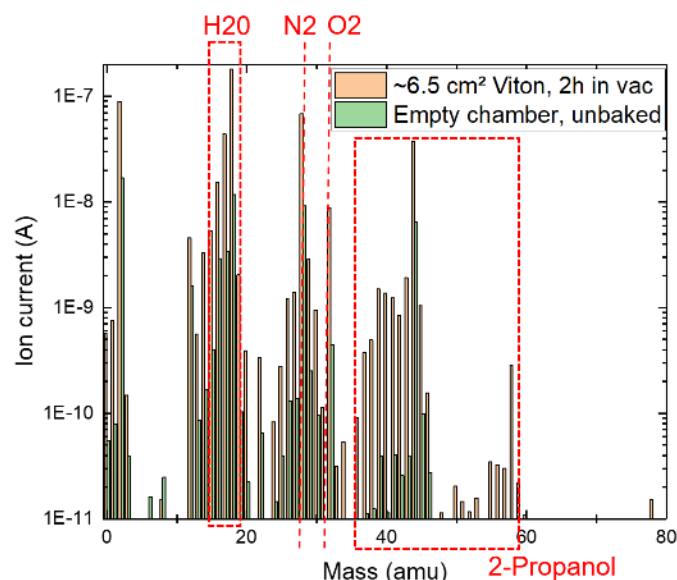


Abbildung 6 Aufgezeichnetes Ausgasspektrum eines CF16 Vitonringes mit identifizierten Hauptbestandteilen.

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 11 of 22

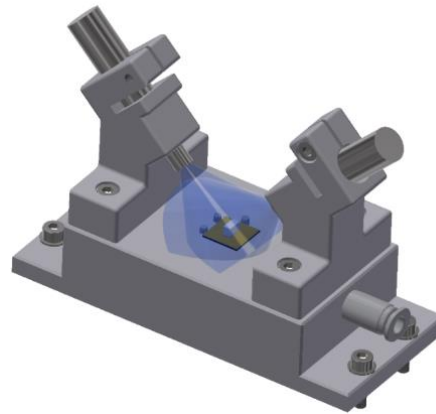
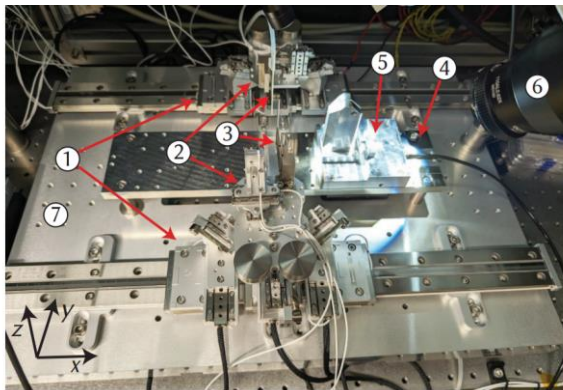


Abbildung 7 Links: Mikrointegrationssystem zur hochpräzisen Assemblierung photonischer Module für integrierte Physikpakete. Rechts: Setup zum Aufbau von Klebstoffproben mit Anschlüssen, Haltern für UV-Quellen und pneumatischen Anschlüssen (links). Weitere Details in und Grafiken entnommen aus [1].

AP 8.2: Adhäsive Fügeverfahren, Vermessung von Klebstoffen

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden adhäsive Fügeverfahren für den Einsatz in miniaturisierten, mikrointegrierten optischen Aufbauten für den Einsatz in Schwerelosigkeit und im Ultrahochvakuum untersucht. Weiterhin wurde die benötigte Mikrointegrations-Infrastruktur etabliert, die in Abbildung 7 gezeigt wird. Sie erlaubt die hochpräzise Assemblierung (1 nm, 1 μ rad Schrittweite) photonischer Systeme für die Quantensensorik, weitere Details sind in [1] verfügbar.

Um die mechanische Fügefestigkeit der genutzten adhäsiven Integrationstechnologien zu qualifizieren wurden Klebstoffproben in anwendungsrelevanten Geometrien aufgebaut. Zum Aufbau der Proben wurde ein Integrationsadapter entwickelt, welches die präzise Positionierung und Halterung von Substraten und Testkörpern ermöglicht, siehe Abbildung 7 links. Weiterhin wird so die reproduzierbare Positionierung der UV-Quellen sichergestellt. Die Testkörper werden mittels eines Mikrointegrationssetups positioniert, welches in Abbildung 7 rechts gezeigt ist.

Somit können die Testkörper aus Quarzglas auf Substrate wie Silizium oder Keramik aufgebaut werden, was detailliert in [1-3] beschrieben und publiziert wurde. Dies wurde im Rahmen des Vorhabens für verschiedene UV- und hybrid (thermisch + UV) härtenden Klebstoffe realisiert, während Prozessierungsparameter wie beispielsweise die UV Intensität, Klebefilmdicke und Vorbehandlung der Testkörper variiert wurden. Es wurde unter anderem der Effekt der Reinigung mittels Plasma untersucht. Hierzu wurden die Probekörper mit einem Klebstoffsystem ohne spezielle Reinigung und mit vorheriger Plasmareinigung aufgebaut. Zur Plasmareinigung wurde zunächst ein Kammerplasma genutzt. Zusätzlich wurde ein Probensystem mit der kompakten Plasmaquelle μ PQ gereinigt und aufgebaut. Diese Quelle ist eine Eigenentwicklung des FBH und in Abbildung 9 (rechts) gezeigt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 9 (links) dargestellt und zeigen eine deutliche Erhöhung der Scherfestigkeit beim Einsatz der Plasmareinigung. Hierbei ist die nach MIL-STD-883E erforderliche Scherfestigkeit als rote Linie eingetragen. Diese wird mit dem hier genutzten Klebverfahren erreicht.

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 12 of 22

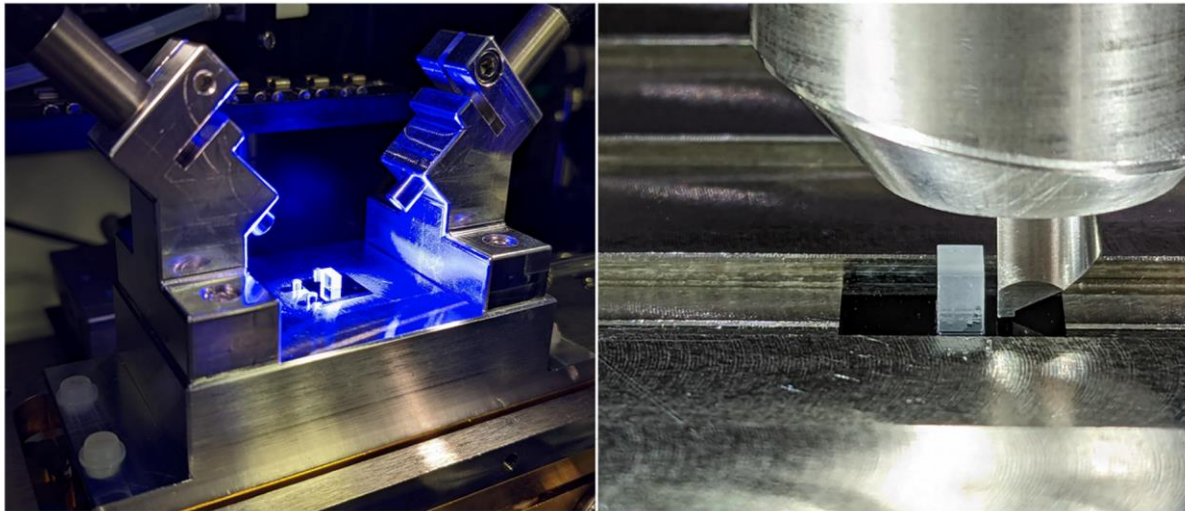


Abbildung 8 Aufbau der Klebstoffproben (links) und mechanischer „Die Shear“ Test nach MIL-STD-883E. Aus [3].

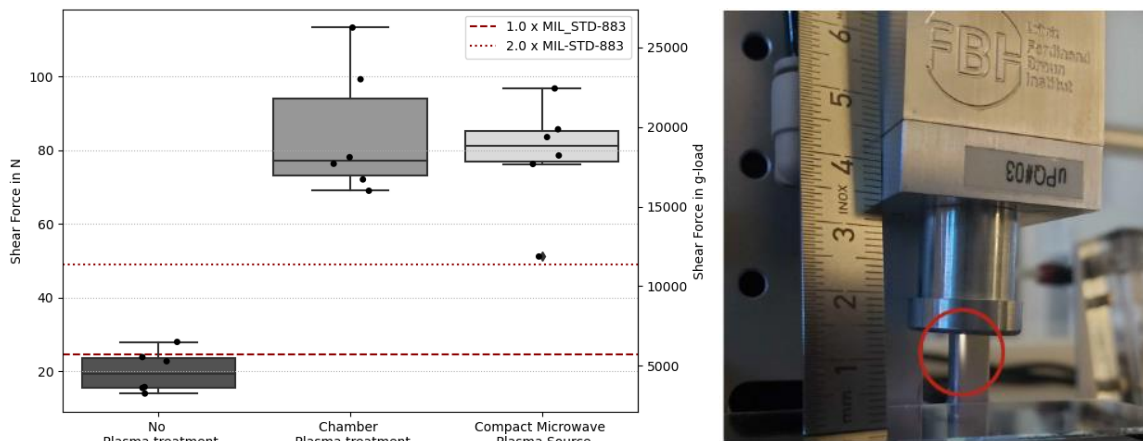


Abbildung 9 Links: Scherfestigkeit eines Klebstoffsystems unter variierenden Vorbehandlungen. Hierbei wurden die Klebstoffproben ohne Plasmareinigung, mit Kammerplasmareinigung und mittels μ PQ Reinigung aufgebaut und anschließend untersucht. Rechts: μ PQ Plasmaquelle mit gezündetem Plasma (roter Kreis) im Laboreinsatz.

Zur Evaluation der Verbundfestigkeit der Klebeverbindungen unter Umweltbedingungen wurden Proben, welche identisch aufgebaut wurden, gealtert. Hierzu wurde beim Verbundpartner IMPT eine Anlage zum thermischen Altern genutzt und einige der Proben einer thermischen zyklischen Belastung nach MIL-STD-883E Method A (-55 bis 85°C) oder B (-55 bis 150°C) unterzogen. Zusätzlich wurde eine Gamma-Strahlenbelastung (15 krad) mittels einer Co60 Quelle am Helmholtz-Zentrum in Wannsee durchgeführt. Ein Probensatz wurde durch beide Belastungen gealtert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen für eines der Klebstoffsysteme ist in Abbildung 10 dargestellt. Diese zeigen eine deutliche Verbesserung der Klebefestigkeit durch thermische Alterung, wodurch vermutlich eine weitere Vernetzung der Polymere erreicht wird. Diese Vernetzung wird durch Strahlenbelastung nicht erreicht, jedoch die Ursprungsfestigkeit auch nicht verschlechtert. Insgesamt erfüllt dieses repräsentative Klebstoffsystem auch unter Umweltbelastungen die Anforderungen an die Scherfestigkeit nach dem MIL-STD-883. Weitere Details und Ergebnisse sind in [3] publiziert.

Weiterhin wurden im Rahmen des Vorhabens die Anforderungen an eine Photo-DSC spezifiziert, das System ausgeschrieben und beschafft. Dieses erlaubte die Exposition von Klebstoffproben mit UV-Licht und Temperatur, während die Reaktionsenergie der Probe aufgezeichnet wird. Somit wird einerseits der Aushärtvorgang von UV- und hybrid (UV+Temperatur)

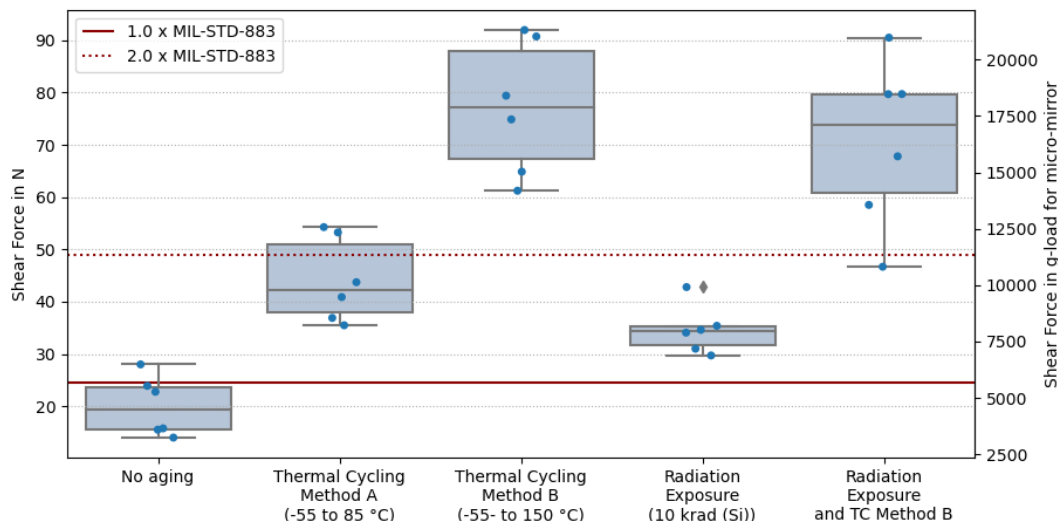


Abbildung 10 Scherfestigkeit eines Klebstoffsystems nach Umweltbelastungen. Es wurden mehrere identische Proben aufgebaut, welche anschließen thermisch nach MIL-STD-833E Method A&B, mittels Gamma-Strahlenbelastung und durch beide Einflüsse gealtert wurden und ihre Scherfestigkeit bestimmt. Aus [3].

härtenden Klebstoffsystemen und der Vernetzungsgrad des Polymersystems zugänglich. Weiterhin sind der Glasübergang des ungehärteten und gehärteten Systems messbar und ein Vergleich von Klebstoffen bzw. Klebstoffchargen möglich. Mit dieser Photo-DSC konnten somit die Härtereaktion von Klebstoffen mit UHV-Kompatibilität und den Ergebnissen zu Zug- und Scherfestigkeit verknüpft werden.

Erste Ergebnisse der Untersuchungen zur UHV-Komptabilität der Klebstoffe sind in Abbildung 11 gezeigt. Eine Klebstoffprobe mit großer Fläche wurde hier in der Qualifikationsanlage untersucht und zeigt vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich Ausgasrate und Spezies. Diese Entwicklungen mit optimiertem Konditionierungszyklus ermöglichen integrierte Optiksyste me mit Klebstoffausgasraten kleiner $< 5 \cdot 10^{-10}$ mbar l/s, siehe [1].

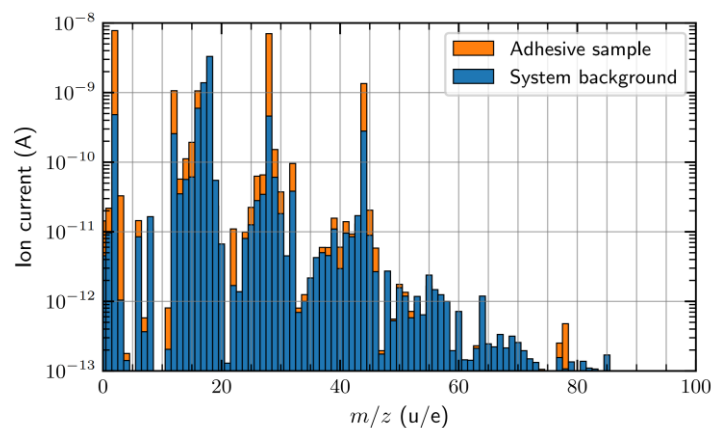


Abbildung 11 Ausgasmessungen von Klebstoffproben. Eine Klebstoffprobe (links) wurde in der OptiVacQ Anlage hinsichtlich Gasrate und Spezies untersucht. Das aufgenommene Massenspektrum zeigt Propan (C_3H_8 , 44u) als primäre ausgasende Spezies und entsprechende Bruchstücke. Weitere Details in und Grafiken entnommen aus [1].

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 14 of 22

AP 8.3: SM PM Faserdurchführung und Kollimator

Eine Schlüsselkomponente für in-vakuum Optiksyste­me ist die single-mode, polarization maintaining Faserdurchführung, welche für den UHV Bereich nutzbare Leckraten kleiner 10^{-9} mbar l/s aufweisen soll. Aufbauend auf Vorarbeiten in parallelen Vorhaben wurde ein Prototyp identifiziert und die Hermetizität und optischen Eigenschaften evaluiert. Weiterhin wurde ein Strahlungshärtetest an einer Co60 Quelle mit einer Dosis von 15 krad durchgeführt und anschließend die Hermetizität erneut getestet, siehe Abbildung 12.

Aufbauend auf diesen Tests wurde von dem Prototyp in einer Delta-Entwicklung eine Durchführung und Kollimator entsprechend den Anforderungen des Vorhabens gefertigt und eingesetzt.

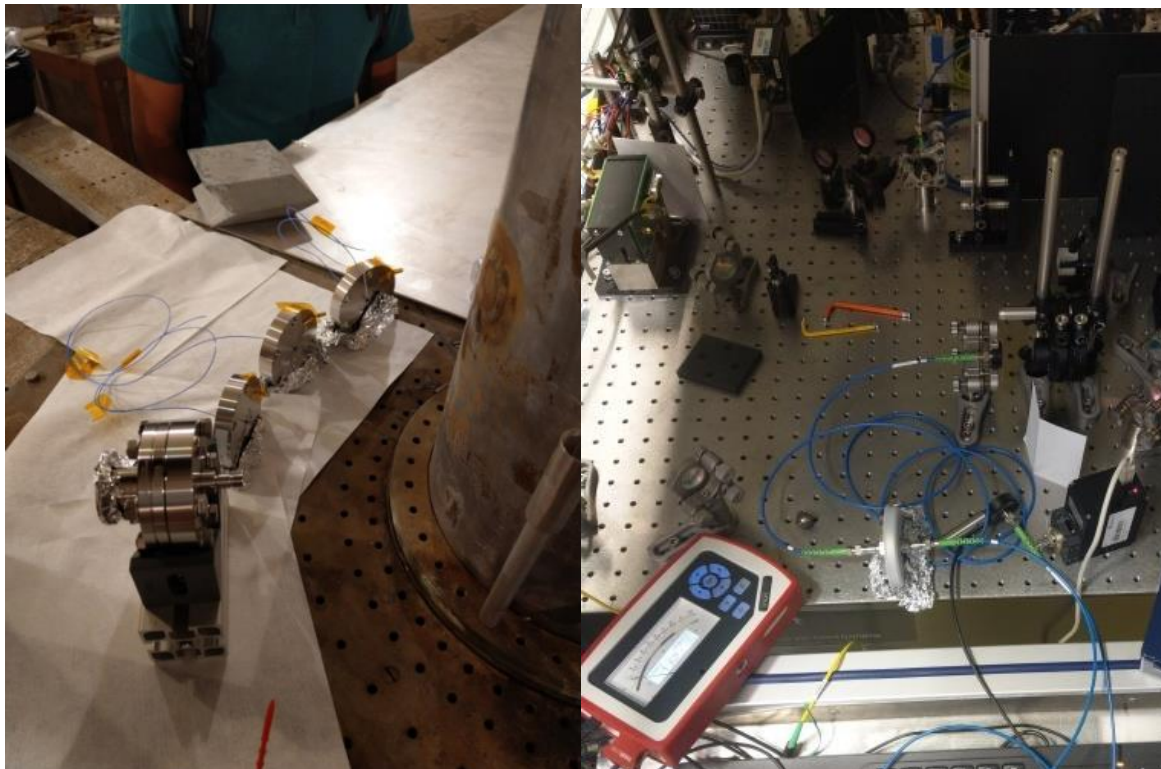


Abbildung 12 Qualifikation von UHV Faserdurchführungen mittels Strahlungshärtetests an einer Co60 Quelle (links) und optische Charakterisierung (rechts).

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 15 of 22

AP 9: Mikrointegrierte, passive gekreuzte Dipolfalle

In diesem Arbeitspaket wird eine passive, gekreuzte Dipolfalle aufgebaut, basierend auf den Vorarbeiten in KACTUS-I und der Technologiequalifikation in AP 8.

AP 9.1: Realisierung und Qualifikation passive optische Dipolfalle für den UHV Einsatz

Für die Komponentenqualifikation in AP 8 und den Aufbau und die Justage der mikrointegrierten, gekreuzten Dipolfalle wird eine Strahlquelle bei der Designwellenlänge von 1064 nm benötigt. Hierzu wurde eine DFB Diode auf C-Mount in einem Breadboard Setup aufgebaut, welches in Abbildung 13 gezeigt ist. Die optischen Eigenschaften der Strahlquelle wurden charakterisiert und die Ergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt.

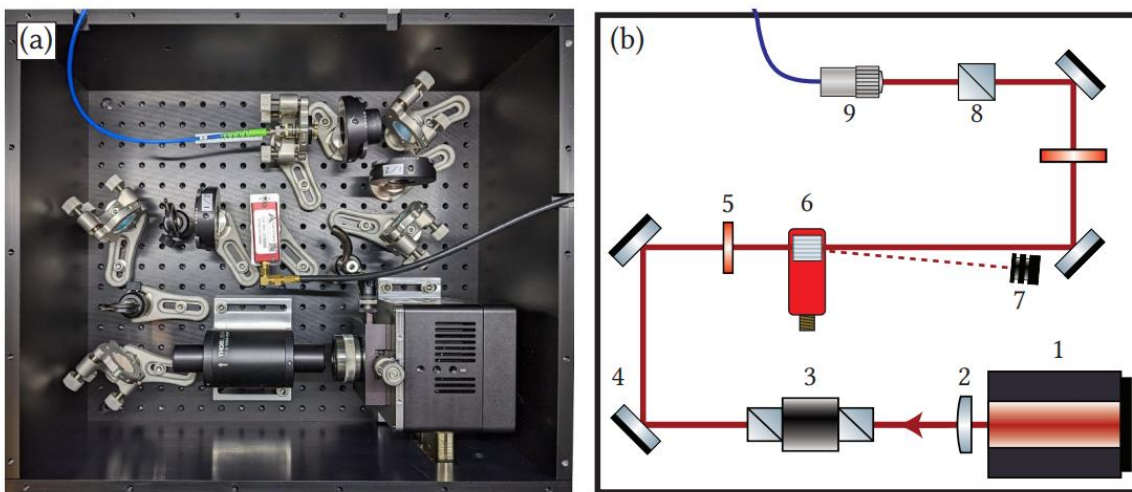


Abbildung 13 (a) Bild und (b) optisches Layout der 1064 nm DFB Strahlquelle mit Faraday Isolator, Wellenplatten, akusto-optischer Modulator, Polarisator und Faserkopplung. Das System ist in einer robusten, transportablen Box aufgebaut. Aus [1].

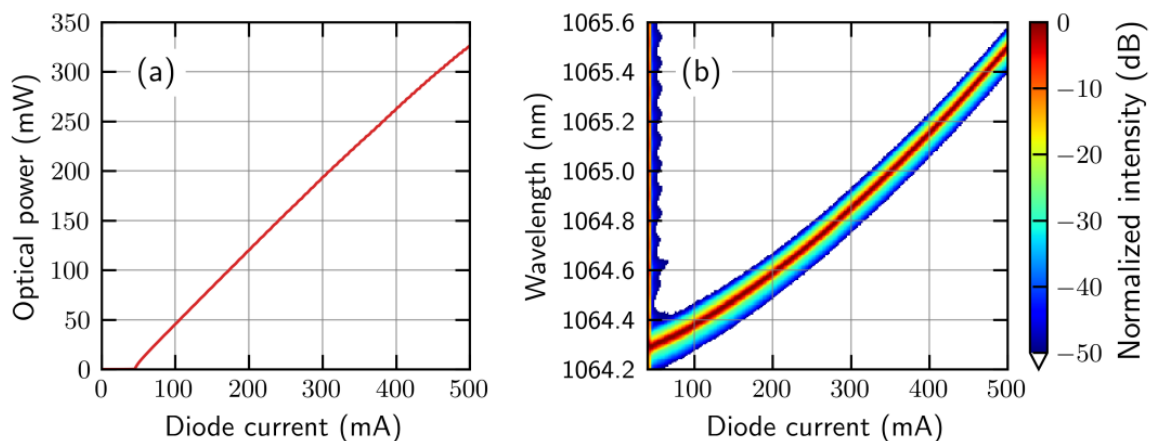


Abbildung 14 Optische Charakterisierung des Lasersystems: Leistungs-Strom Diagramm (links) und optisches Spektrum (rechts). Aus [1].

Um eine gekreuzte Dipolfalle in einer UHV Umgebung auf einem Atomchip zu realisieren sind angepasste Integrations- und Justagemethoden und miniaturisierte optische Komponenten (Spiegel, Kollimatoren, Wellenplatten, PBS, ...) nötig. Um diese zu verifizieren wurde ein Prototyp aufgebaut, welcher mit kalten Atomen qualifiziert wird. Hierzu wurde dieser mit dem kalte Atom Setup BeBEC in Berlin verbunden und die generierte Dipolfalle charakterisiert. Dieser

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 16 of 22

Ansatz erlaubt weiterhin eine Iteration und Verbesserung der Justagemethoden, sollte dies nötig sein.

Diese miniaturisierte, gekreuzte optische Dipolfalle, die μ XODT, wurde im Verlaufe des Vorhabens entwickelt und integriert und der optische Strahlengang und ein Bild des Systems sind in Abbildung 15 gezeigt. Die vollständige Beschreibung des Systems ist in [1,4] veröffentlicht. Dieses System zeichnet sich durch seine Kompaktheit (25 mL Volumen) und sehr hohe Stabilität des Strahlengangs aus, welcher nach Assemblierung keiner Nutzerjustage mehr bedarf.

Zur Assemblierung wurde eine Integrationsumgebung genutzt, welche die gleichzeitige hochpräzise Justage von bis zu vier optischen Komponenten ermöglicht. Diese bestehende Umgebung wurde für die μ XODT angepasst und eine Justage-Strategie sowie ein Integrationsplan entworfen. Der kritische Aspekt bei der Integration ist der hochpräzise Überlapp der fokussierten Strahlen und die senkrechte Polarisierung der Strahlen zueinander. Die beiden fokussierten Strahlen wurden justiert und das Strahlprofil im Kreuzungspunkt entspricht einem Gaußprofil, was nur durch die präzise Überlagerung möglich ist.

Um die Stabilität der μ XODT zu evaluieren wurde diese mittels eines Heizers auf bis zu 65°C aufgeheizt. In Abbildung 16 ist die Temperaturverteilung auf der Oberseite der Mikrobank, aufgenommen mit einer Thermokamera, dargestellt, sowie der vernachlässigbare Einfluss des Temperaturzyklus auf die Justagequalität. Weitere Details in [4]. Dies unterstreicht die hohe mechanische und thermische Robustheit des Gesamtsystems.

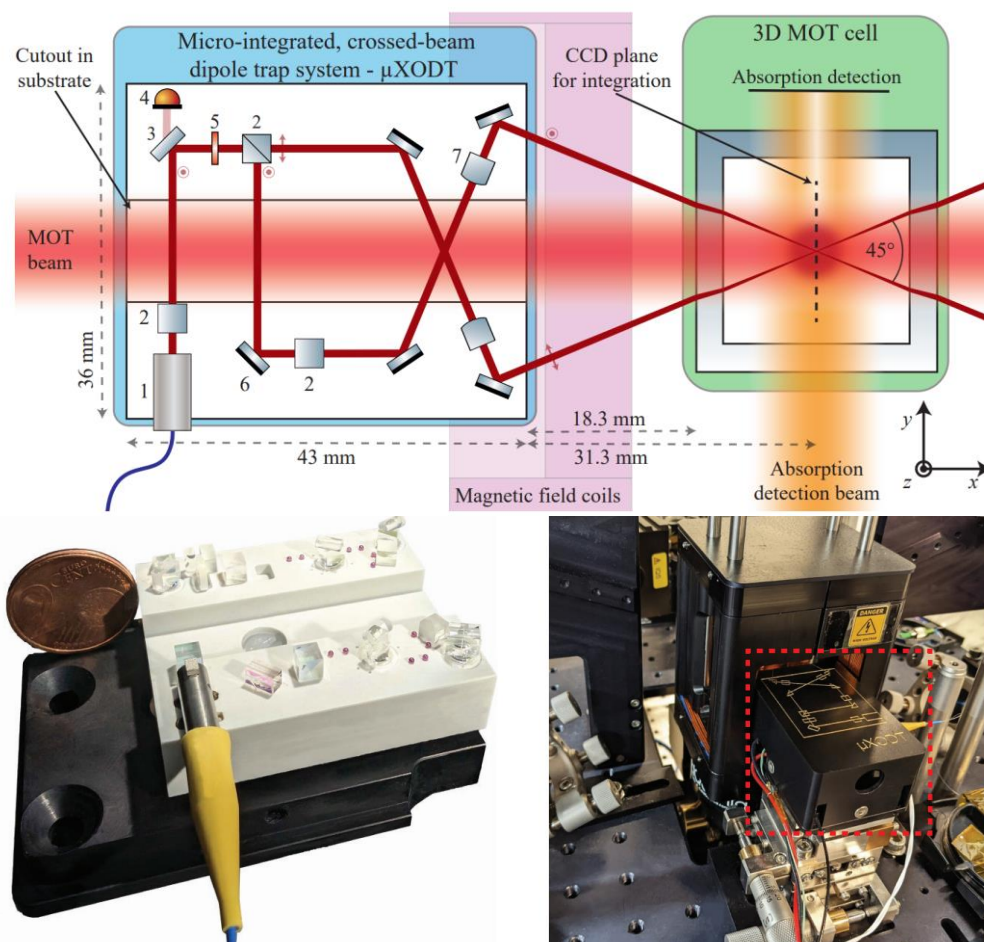


Abbildung 15 Mikro-integrierte, gekreuzte optische Dipolfalle μ XODT. Optischer Strahlengang (oben) und Bild des Systems (unten links), welches eine einzigartige Stabilität und Kompaktheit (25 mL, 38 g) aufweist. Die μ XODT wurde mit einem kalte-Atom System integriert und betrieben (unten rechts). Abbildungen aus und weitere Details in [4].

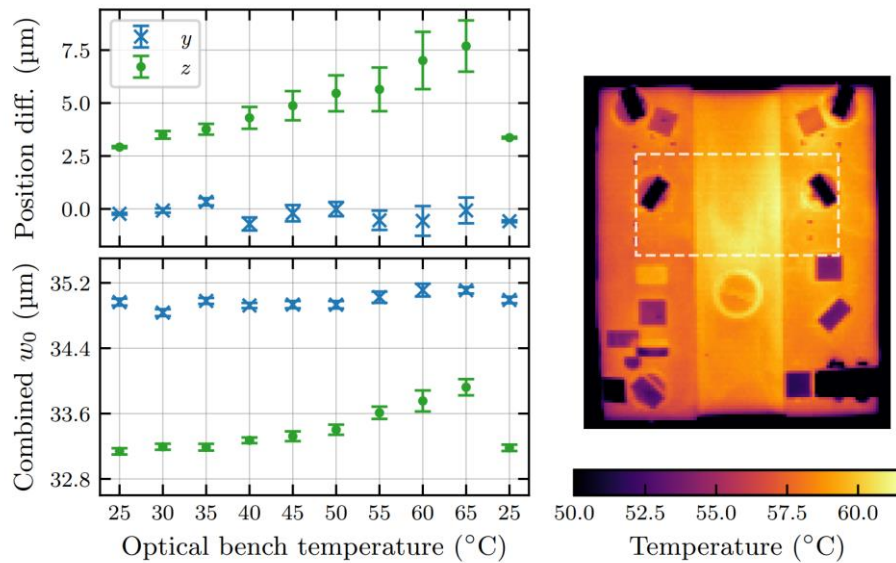


Abbildung 16 Thermischer Belastungstest der μ XODT. Diese wurde mittels einem 4W Heizer auf bis zu 65°C erhitzt. Rechts ist die mittels Thermokamera gemessene Temperaturverteilung auf der Mikrobank bei 60°C Regeltemperatur gezeigt. Der linke Graph zeigt die Auswirkung der Mikrobank der Mikrobank-Temperatur Ausrichtung des Strahlengangs. Dies zeigt eine sehr hohe passive Stabilität bis 35°C und ein reversibles Verhalten nach erhitzen bis 65°C. Entnommen aus [4].

Der mikointegrierte Aufbau μ XODT wurde anschließend am BeBEC Experiment des JL IQS integriert, was in Abbildung 15 rechts gezeigt ist. Zwei Translationstische und zwei Winkelversteller wurden zur Justage des Aufbaus relativ zum Experiment genutzt. Die zentrale Apertur erlaubt es, einen MOT Strahl zur Kühlung der Atome durch die Falle zu lenken.

Es konnten erfolgreich Atome von der Magneto-optischen Falle in die gekreuzte Dipolfalle umgeladen werden. Die μ XODT wurde über 2 Jahre im Experiment verwendet und zeigte keinen messbaren Verschleiß. Die optischen Parameter der Dipolfallenstrahlen im Zentrum der Vakuumapparatur sind auch nach Dauereinsatz noch reproduzierbar, was für die hohe passive Stabilität des Aufbaus spricht.

In Zusammenarbeit mit dem Experimentiererteam an der HU Berlin wurde die μ XODT im Einsatz mit kalten Atomen detailliert charakterisiert. Dazu zählten:

- Vermessung der Lebensdauer von gefangenen Atomen im Kreuzungspunkt der Falle
- Bestimmung von Heizraten und Pointing-Stabilität des Kreuzungspunktes mittels Auswertung der Absorptionenaufnahmen auf der CCD Kamera
- Einsatz der Technik des parametrischen Heizens für die Bestimmung der effektiven Fallenfrequenz
- Vergleich der experimentell bestimmten Fallenfrequenz mit den theoretischen Erwartungswerten basierend auf der optischen Feldkonfiguration der μ XODT

Die vollständigen Ergebnisse wurden in Doktorarbeiten [1,5] und in Publikationen [4] veröffentlicht. In Abbildung 17 ist eine Lebensdauerermessung gezeigt, die Lebensdauer vergleichbar mit makroskopischen Aufbauten zeigt. Abbildung 18 zeigt die hohe Positionsstabilität der μ XODT im experimentellen Aufbau.

Zusammenfassend wurde ein, verglichen mit makroskopischen Systemen, um mehrere Größenordnungen miniaturisierte gekreuzte optische Dipolfalle realisiert, die sich durch ein sehr hohe mechanische und thermische Langzeitstabilität auszeichnet und erfolgreich mit kalten Atomen qualifiziert wurde. Diese Miniaturisierung zeigt keine Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Systems.

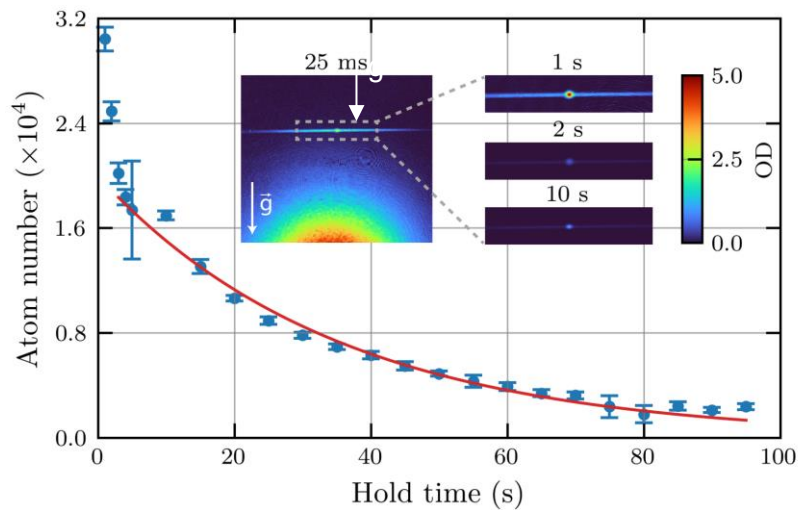


Abbildung 17 Lebensdauerermessung von kalten Atomen, die aus einer Molasse ($6 \mu\text{K}$) in die optische Dipolfalle umgeladen wurden. Die erreichte Lebensdauer von $\sim 35 \text{ s}$ ist vergleichbar mit klassischen Dipolfallen-Systemen. Die Insets zeigen Absorptionsschichtaufnahmen bei verschiedenen Haltezeiten. Grafik aus und weitere Details in [3].

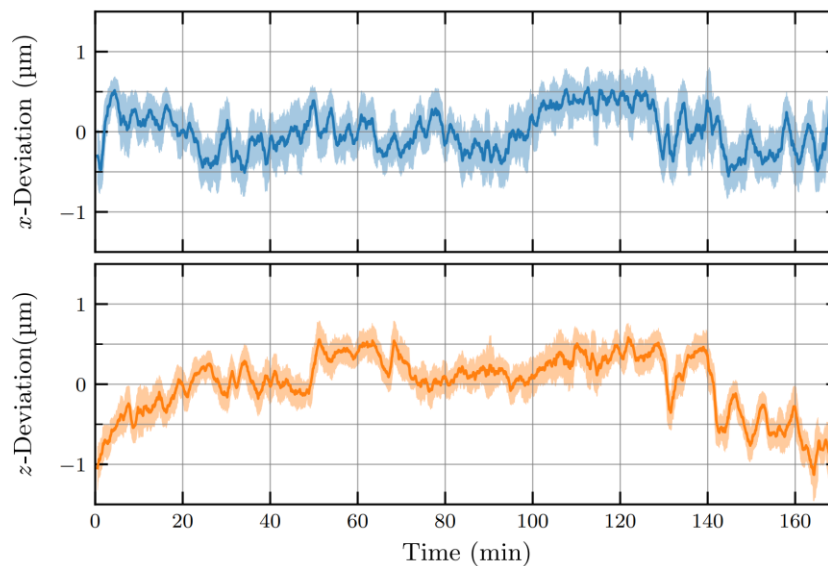


Abbildung 18 Position der ODT im über ein Langzeitexperiment, welche die hohe Stabilität des Systems unterstreicht. Grafik aus und weitere Details in [3].

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 19 of 22

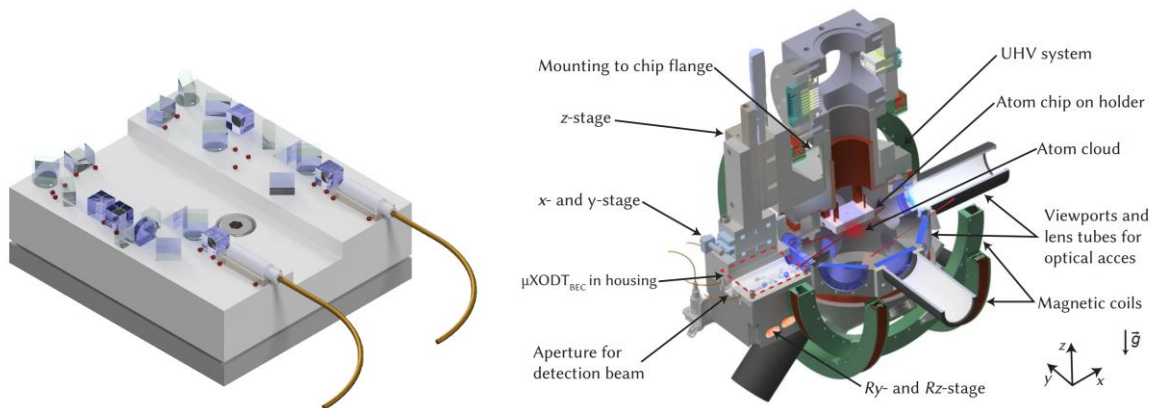


Abbildung 19 Erweiterte optische Dipolfalle als CAD Design und integriert mit dem Atomchip-basierten ultra-kalte Atomsystem. Aus [1].

Im Rahmen des Vorhabens wurde in einer Delta-Entwicklung eine Anpassung des Prototyps zur Integration mit dem Atomchip-Teststandes der LUH und zur Manipulation von BEC entwickelt. Hierzu wird das verifizierte Konzept der μ XODT übernommen und angepasst. Dieser Anwendungsfall zeigt andere Randbedingungen als die Anwendung am BeBEC System:

- Der Strahlüberlapp muss im Zentrum des Atomchips liegen
- Eine zentrale Apertur für den Detektionsstrahl ist notwendig (Durchmesser ~ 12 mm)
- Die Distanz von Fokussierlinse zu Kreuzungspunkt ist ~ 2 -mal größer als bei der bereits realisierten Falle. Hierdurch wird eine längere Brennweite der Linse notwendig, wodurch die Durchmesser des Fokus größer und die Falltiefe kleiner wird. Um dies zu kompensieren wird eine höhere Laserleistung notwendig, was eine Anpassung der Komponenten (Optiken, Kollimatoren) bedingt.
- Durch die Geometrie wird das Gesamtsubstrat größer. Damit können ein zweiter Kollimator und Strahlengang integriert werden. Dies ermöglicht es, zusätzlich zur gekreuzten Falle eine Einstrahlfalle oder ein partielles Gitter zu erzeugen. Diese erweiterte Funktionalität ermöglicht neue experimentelle Ansätze, wie beispielsweise aktuelle Aktivitäten des QUANTUS Vorhabens.

In Abbildung 19 (links) ist das CAD Design der beschriebenen Falle gezeigt, dass die Randbedingungen erfüllt.

AP 9.2: Integration und Test optische Dipolfalle

Das am FBH entwickelte Integrationskonzept der erweiterten gekreuzten optischen Dipolfalle mit dem Atomchip-Teststand der LUH ist in Abbildung 19 (rechts) gezeigt. Durch kompakte, hochpräzise opto-mechanische Achsen wird ein Überlapp des geometrisch stabilen Kreuzungspunktes der gekreuzten optischen Dipolfalle mit dem Fallenzentrum des Atomchips hergestellt.

Weitere Details zu Integration und Betrieb können dem Abschlussbericht des Verbundleiters entnommen werden.

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 20 of 22

2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel wurden für den involvierten Mitarbeiter, für Komponenten- und Verbrauchsmaterial, Investgüter sowie für Dienstreisen entsprechend der Bewilligung eingesetzt. Siehe Belegliste.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In dem Verbundprojekt KACTUS-II wird eine neuartige Quelle ultra-kalter Atome zur Quantenmetrologie entwickelt, die eine deutliche technologische und funktionelle Erweiterung des Standes der Technik darstellt.

Im Rahmen des KACTUS-II Vorhabens wurde am FBH:

- Ein UHV-Qualifikationsaufbau in Betrieb genommen und betrieben.
- Die Fügetechnologie hinsichtlich thermischer und Strahlenbelastung mit anwendungsspezifischen Proben qualifiziert.
- Eine miniaturisierte gekreuzte optische Dipolfalle entwickelt, assembliert und charakterisiert. Diese wurde anschließend mit einem kalte-Atom Experiment integriert und qualifiziert.
- Eine Delta-Entwicklung zu einer miniaturisierten gekreuzten optischen Dipolfalle für Atomchip-basierte Experimente durchgeführt.
- Die notwendige Technologiebasis und Infrastruktur für miniaturisierte, hochstabile Optiksyste me zur Atommanipulation für integrierte Physikpakete etabliert und qualifiziert.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die in KACTUS-I/-II entwickelte Technologien sind insbesondere auch für andere Vorhaben relevant, die kompakte, justierfreie optische Systeme für die Atommanipulation benötigen. Im Rahmen einer weiteren Verwertung und Anschlussfähigkeit konnten erste Überlegungen zum Transfer der Konzepte auf atombasierte Quantenspeicher getätigt werden. Die Technologiebasis ist ein Kernbestandteil von den aktuellen Entwicklungen einer integrierten Atomstrahluhr, die einen ultra-stabilen optischen Aufbau innerhalb des Vakuumsystems benötigt, um die angestrebte Performance als auch Formfaktor zu erreichen. Auch mehrere Partner außerhalb Berlins haben Interesse an der Technologie und haben den Kontakt aufgenommen, was die Relevanz dieser Aktivität nochmals bestätigt.

Weiterführende Vorhaben, in denen die Ergebnisse hohe Relevanz haben und direkt verwertet werden sind QCHIP (50RK1978), MOTION (50WM2268), CAPTAIN-QT (50WM2070) und MY-OQUANT (50WM2169).

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind bei anderen Forschungsgruppen atomchipbasierte Quellen ultra-kalter Atome mit erweiterter Funktionalität publiziert worden (R. Calviac et al., Phys. Rev. Applied 23, L011001, 2025).

Eine vergleichbare Miniaturisierung optischer Dipolfallen wurde nach aktuellem Stand nicht bei anderen Stellen erreicht.

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 21 of 22

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Entwicklungen und Erfolge im KACTUS-II Vorhaben am FBH wurden in folgenden Konferenzbeiträgen und Publikationen veröffentlicht und waren Teil wissenschaftlicher Abschlussarbeiten:

Paper und Proceedings:

- M. Christ et al., Integrated atomic quantum technologies in demanding environments: development and qualification of miniaturized optical setups and integration technologies for UHV and space operation,” CEAS Space Journal 11, 561–566, 2019
- M. Christ et al., Micro-integrated optical systems and qualification of adhesive integration technologies for cold atomic quantum sensors, Proc. SPIE 12777, 2023
- M. Christ et al., Miniaturized Crossed Beam Optical Dipole Trap for Compact Atom-Based Quantum Sensors, CLEO/Europe-EQEC, 2023
- M. Christ et al., Additively Manufactured Ceramics for Compact Quantum Technologies, Advanced Quantum Technologies 7, 2400076, 2024
- M. Christ et al., Micro-integrated crossed-beam optical dipole trap system with long-term alignment stability for mobile atomic quantum technologies, Optics Express 32, 40806–40819, 2024
- M. Christ et al., Miniaturized Optical Frequency Reference and Crossed Beam Optical Dipole Trap Systems for Compact Atom-Based Quantum Sensors, CLEO/Europe-EQEC, 2025

Konferenzbeiträge:

- M. Christ et al., Micro-integrated optical systems and qualification of adhesive integration technologies for cold atomic quantum sensors, International Conference on Space Optics - ICSO, Dubrovnik, Croatia, 2022
- M. Christ et al., Additive manufacturing, micro-integration and semiconductor fabrication for compact cold atom systems, DPG Frühjahrstagung SAMOP, Hannover 2023
- C. Zimmermann et al., Development of micro-integrated optical systems for atom-based quantum sensors, DPG Frühjahrstagung SAMOP, Hannover, 2023
- M. Christ et al., Miniaturized Crossed-Beam Optical Dipole Trap and Enabling Technologies for Compact Atom-Based Quantum Sensors, European Quantum Technologies Conference EQTC, Hannover, 2023
- M. Christ et al., Miniaturized Crossed Beam Optical Dipole Trap for Compact Atom-Based Quantum Sensors, CLEO/Europe-EQEC, 2023
- C. Zimmermann et al., Development of micro-integrated optical systems for compact atom-based quantum sensors, DPG Frühjahrstagung SAMOP, Freiburg, 2024
- C. Zimmermann et al., Ultra-stable miniaturized optical systems for compact atom based quantum sensors, DPG Frühjahrstagung SAMOP, Bonn, 2025
- M. Christ et al., Miniaturized Optical Frequency Reference and Crossed Beam Optical Dipole Trap Systems for Compact Atom-Based Quantum Sensors, CLEO/Europe-EQEC, 2025

Abschlussarbeiten:

- A. Stiegel, Environmental qualification of adhesives for a micro-integrated optical dipole trap used in atomic sensors, Masterarbeit, HU Berlin, 2022
- O. Anton, Optimization of cold atom experiments: development of a machine learning-enhanced cold atom platform for quantum sensor applications, Doktorarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, 2025
- M. Christ, Micro-integrated optical systems, additive manufacturing and vacuum integration for atomic quantum sensors, Doktorarbeit, TU Berlin, 2025

project: 50WM1949 / KACTUS-II			
document title: Abschlussbericht TIB	issue: 01	date: 2025-07-21	page(s): 22 of 22

3 Referenzen

- [1] M. Christ, Micro-integrated optical systems, additive manufacturing and vacuum integration for atomic quantum sensors, Doktorarbeit, TU Berlin, 2025
- [2] M. Christ et al., Integrated atomic quantum technologies in demanding environments: development and qualification of miniaturized optical setups and integration technologies for UHV and space operation,” CEAS Space Journal 11, 561–566, 2019
- [3] M. Christ et al., Micro-integrated optical systems and qualification of adhesive integration technologies for cold atomic quantum sensors, Proc. SPIE 12777, 2023
- [4] M. Christ et al., Micro-integrated crossed-beam optical dipole trap system with long-term alignment stability for mobile atomic quantum technologies, Optics Express 32, 40806–40819, 2024
- [5] O. Anton, Optimization of cold atom experiments: development of a machine learning-enhanced cold atom platform for quantum sensor applications, Doktorarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, 2025