GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Sachbericht

Verbundprojekt: QUAntenSENsor mit Strontiumstrahlen „QUASENS“

Zum Teilvorhaben: Entwicklung, Bau und Charakterisierung von miniaturisierten Vakuumkomponenten und -kammern für atominterferometrische optische Uhren

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	13N15729
Projektlaufzeit:	01.07.2021 bis 30.06.2025
Berichtslaufzeit:	01.07.2021 bis 31.12.2025

Berichtspflichtiger: VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH

In den Brückenäckern 3

07751 Großlöbichau / Deutschland

Projektleitung: Dr. rer. nat. Andreas Trützschler

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

I. Kurze Darstellung zu Projekt Quasens

1. Aufgabenstellung

Optische Atomuhren benötigen eine stabile Vakuumumgebung, die wurde bisher nur im Labormaßstab realisiert. Für eine kompakte 19“-Rack-Integration muss ein neuartiges Vakuumsystem entwickelt werden, da Standardkomponenten wie Vakuumbereich zu viel Platz beanspruchen. Das Ziel des Teilvorhabens ist es, ein robustes, kompaktes, modular aufgebautes und vollständig integriertes Vakuumsystem für eine optische Uhr im Format eines 19“ Gerätes zu entwickeln, herzustellen und zu charakterisieren. Für das gesamte Vakuumsystem müssen entwickelt werden:

- Polarisations-erhaltende optischer Schnittstellen über eine optische Faser inklusive Vakuumdurchführung,
- Vakuumkammer für optisches Resonanzsystem (ORS),
- Vakuumkammer für Ramsey-Bordé-Interferometer (RBI) und
- Atomofen.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bisherige atominterferometrische Uhren sind Laborsysteme mit Sonderanfertigungen und Standardvakuumkomponenten, die über metallische Dichtungen (z. B. AluVaC®-Technologie) verbunden werden. Für die kompakte 19“-Rack-Integration sind jedoch maßgeschneiderte Lösungen nötig, da Standardkomponenten wie CF-Flansche zu viel Platz beanspruchen.

Schlüsselkomponenten sind

- Vakuumdichte Verbindungen: Metallische Dichtungen für UHV-taugliche Verbindungen
- Optische Faserdurchführungen: Polarisationserhaltend (Grundlage dafür bilden Voruntersuchungen aus dem Projekt „Tailored Optical Fibers“ (Förderkennzeichen 03WKCV03F)).
- Strontiumöfen als Quelle..
- Ionengetter- oder Getterpumpen als gasbindende Pumpen zur Realisierung des Vakuums.
- Magnetfeldabschirmung zur Abschirmung störender externer Einflüsse.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Projekts wurde ein Lastenheft in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erstellt und verabschiedet. Ein zentraler Schwerpunkt lag auf der Untersuchung des bisher verfügbaren optischen Referenzsystems hinsichtlich seiner Ausgaseigenschaften. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden Dichtungen, Werkstoffe und die Vakuumperipherie für das neue Design festgelegt.

Für die Entwicklung eines miniaturisierten Atomofens wurden erste Konzeptvorschläge erarbeitet. Zur Unterstützung dieser Entwicklungsarbeit wurden Simulationen durchgeführt, um den Wärmeleitwert der

Atomofen-Halterung abzuschätzen. Zudem wurden Simulationen genutzt, um die Strahlform der aus dem Atomofen austretenden Atome am bisher verfügbaren Atomofen zu bewerten.

Die Anforderungen an optische Schnittstellen und die Kammer für das Ramsey-Bordé-Interferometer wurden detailliert festgehalten und in Konzeptvorschlägen definiert. Darüber hinaus wurden mehrere Ansätze zur Größenreduzierung des Gesamtsystems basierend auf dem Einsatz passiver Bauelemente und damit obsolet werdenden Betriebsgeräten eingebracht und auf Grundlage von Berechnungen und Simulationen bewertet.

4. Wesentliche Ergebnisse

Im Arbeitspaket 5.2 zur Entwicklung und Auslegung der polarisationserhaltenden optischen Faserdurchführungen (OFDs) wurden diese gefertigt und in 07.2023 an den Projektpartner HUB gesendet. Die Einmessung der Polarisationsachse als Teil der Fertigung wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner am Standort in Berlin durchgeführt. Die OFDs erreichen ein PER von bis zu 13 dB, können bis 180°C erhitzt werden und besitzen eine He-Leckrate < 1e -10 mbar*l /s. Mit diesen Ergebnissen konnte das Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen werden.

Im Arbeitspaket 5.3 zur Entwicklung der Vakuumkammer für das optische Referenzsystem (ORS) wurde die Vakuumkammer gefertigt und in zwei Varianten in 04.2023 sowie in 07.2023 an den Projektpartner MEN geliefert. Die Kammer ist 97 x 106 x 122 mm³ groß, passt in ein 3U Serverschrank und erreicht einen Basisdruck von < 1E-11 mbar. Auch dieses Arbeitspaket ist mit den vorliegenden Ergebnissen erfolgreich abgeschlossen.

Im Arbeitspaket 5.4 zur Entwicklung der Vakuumkammer für das Ramsey-Bordé-Interferometer (RBI) wurde die Konstruktion des Vakuumsystems hinsichtlich der bisher bekannten Anforderungen mehrfach angepasst. Die Größe des Systems ohne periphere Anbauten ist 382,4mm x 301mm x 176,1mm (BxTxH), sodass es in einen 4U, 19 Zoll Serverschrank passt. Die Gesamtleckrate der Aluminiumkammer beträgt < 1E-10 mbar*l/s. Die Kammer wurde in 04.2025 fertiggestellt und an die HUB versand. Für AP 5.4 wurden ebenso zwei Atomöfen gefertigt, welche in 06.2024 an die HUB geliefert wurden. Bei diesem wurde mit einer Heizleistung von 21 W eine Temperatur von 700 °C erreicht. Das Gesamtsystem hat den Aufheiz-, Halte- und Abkühlprozess schadlos überstanden.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Organisatorisch wurden regelmäßig Abstimmungstreffen mit den Partnern MEN und HUB alle 2-4 Wochen durchgeführt. Zudem wurde an sieben Abstimmungstreffen zur Definition des Gesamtsystems (Hardware-Treffen) mit den Partnern QUB, FBH, HUB und MEN teilgenommen. Halbzeit- und Halbjahrestreffen fanden am 02.04.2023, am 26.10.2023 und am 10.06.2024 statt.

Für die Anfertigung und Beschaffung technischer Ausrüstungen und Unterkomponenten für Durchführung wurden interne und externe mechanische Werkstätten und Lieferanten beauftragt.

II. Eingehende Darstellung

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

AP 5.1 Experimentelle Voruntersuchungen:

Folgende Fragestellungen sollten im Arbeitspaket bearbeitet werden:

- Frage: Eignung der AluVaC-Technologieplattform für projektspezifischen Einsatzfall, quantitative Leckraten- und Ausgasungsbestimmung unter prognostizierten Einsatzbedingungen, Bestimmung der Einsatzgrenzen hinsichtlich Temperaturgradienten und Vibrationen
- Frage: Eignung der OFD-Technologieplattform für projektspezifischen Einsatzfall, quantitative Bestimmung der Einfügedämpfung und des Polarisationsextinktionsverhältnis an Koppelstellen, Bestimmung der Einsatzgrenzen hinsichtlich Temperaturgradienten und Vibrationen
- Vorgehen: Ausarbeitung Versuchsplan – Durchführung Experimente – Auswertung und Dokumentation experimentelle Ergebnisse
- Herausforderungen: Bestimmung extrem niedriger Leck- und Ausgasraten (nahe Nachweisgrenze); Bestimmung diffiziler, optischer Parameter, aufwendige Versuchsaufbauten nötig
- Frage: Möglichkeiten der Schwingungsentkopplung und zu berücksichtigende Parameter, Schwingungsdämpfungsverhalten von Vakuumkomponenten verschiedener Werkstoffe
- Frage: Eignung der OFD-Technologieplattform, Eignung der Herstellverfahren, Einsatzgrenzen zu verwendender Messtechnik
- Vorgehen: Ausarbeitung Versuchsplan – Durchführung Experimente – Auswertung und Dokumentation experimentelle Ergebnisse

Darauf aufbauend fand eine Parameterbestimmung für Systemauslegung durch folgende Punkte statt:

- Erstellung Systemparameter (Gesamtausgasbudget, vakuumberührende Oberfläche, aggregierte Primärleckgröße, Saugvermögen) und
- Erstellung Lastenheft Vakuumsystem und Module.

Im Anschluss erfolgte eine Konzepterstellung Vakuumsystem durch:

- Auswahl Dichtprinzip, Kraftkopplung, Werkstoffe, Herstellverfahren und
- Erstellung Pflichtenheft Vakuumsystem und Module.

Die Schnittstellen zu anderen Teilvorhaben waren:

- Input an Konzept Vakuumsystem aus AP 2, AP 4, AP 6 und AP 8 des Gesamtvorhabens und
- Entscheidungsmeilenstein: Konzept Freeze (Q2 in Jahr 1).

Ein Lastenheft wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erstellt und verabschiedet.

Das bisher verfügbare optische Referenzsystem wurde auf seine Ausgaseigenschaften untersucht. Dichtungen, Werkstoffe und Vakuumperipherie für das neue Design wurden festgelegt.

Erste Konzeptvorschläge für einen miniaturisierten Atomofen wurden erarbeitet. Für die Abschätzung des Wärmeleitwerts der Atomofen-Halterung wurden Simulationen durchgeführt. Zur Bewertung der Strahlform des bisher verfügbaren Atomofens wurden Simulationen durchgeführt.

Die Anforderungen an optische Schnittstellen und die Kammer für das Ramsey-Bordé-Interferometer wurden in Konzeptvorschlägen umgesetzt.

Mehrere Ansätze zur Größenreduzierung des Gesamtsystems wurden basierend auf den Einsatz von passiven Bauelementen und damit obsolet werdenden Betriebsgeräten eingebracht und auf Grundlage von Berechnungen und Simulationen bewertet.

Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem abgestimmten Lastenheft.

relevant	nice to have	component / module	requirement	value / specification	date last changed	last changed by	definition in meeting & date	clearance by ... / date2		implementation suggestion
		assembly jigs, mechanical connectors	spacing, size of screws	TBD, Rackpatte ist frei zur gestaltung	12.10.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 29.09.2022			-
		atomic oven tube	position	mounted at chamber, not on zerodur board	15.06.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 17.05.2022			connected to chamber close to atomic oven
		atomic oven tube	direction	according to atomic ovens	15.06.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 17.05.2022			straight line between atomic ovens
		atomic oven tube	orifices for atomic beam	2, close to laser intersection zone sketch will come from HUB	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			??
		atomic oven tube	adjustability	adjustable along beam direction ~ 1mm height adjustment ~ 1mm	05.07.2023	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 05.07.2023			slotted hole in a carrier mounted on bottom of chamber screws in carrier with a counter screw for fixing the position
		atomic oven tube	connection to chamber	STEP --> VAC	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			carrier mounted on bottom of the chamber
		atomic oven tube	accoutability	HUB	29.06.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 28.06.2022			A concept is developed by VACOM.
		atomic oven tube	material	non-magnetic	05.07.2023	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 05.07.2023			aluminium?
		atomic oven tube	dimensions of beam path	6 mm high, 1.5 mm wide	05.07.2023	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 05.07.2023			6 mm high, 1.5 mm wide
		atomic oven tube	fixing points	threads inside tube from top for fixing of cables recess for lenses	05.07.2023	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 05.07.2023			fixing of cables? recess for lenses
		baking	temperature	120 °C	30.09.2021	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 28.09.2021			aluminum chamber & all other materials suitable for 120°C
		baking	when and where	depends on mounting and manufacturing process transfer after baking necessary HUB	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			baking @ HUB and as at test @ VACOM
		baking	baking equipment to HUB	none needed	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			-
		collimator	optical connection	with fibre & plug FC/APC	15.06.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 01.06.2022			irrelevant due to compact OFD
		collimator	position	HUB --> VAC, tbd	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			irrelevant due to compact OFD
		collimator	orientation	HUB --> VAC, tbd	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			irrelevant due to compact OFD
		cooling	interfaces & temperatures	not too much effort cooling of the RBI bottom by peltier elements	12.10.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 29.09.2022			???
		electrical feedthroughs	number of pins	9 for magnetic coils 12 for temperature sensors	15.06.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 17.05.2022			VACOM-Feedthroughs: CF16-VB-18-10 (10 pins) CF16-VB-28-12 (12 pins)
		HUB-components	materials	glue, optics,	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			-
		interface	vacuum-vacuum	2x oven (CF 40) 1x Pump 1x Valve	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			2x oven (CF 40) 1x Pump 1x Valve
		interface	mechanical	1x Transportsicherung	07.07.2022	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 07.07.2022			relevant?
		interface	vacuum-air	Lid on Top of Chamber for mounting and maintenance	30.09.2021	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC 28.09.2021			Lid on Top of Chamber for mounting and maintenance
		interface	optical	2x OFD blue 1x OFD red 1x Viewports for readout 4x Viewports for QPD, 461 Lock and Powerstab	19.10.2023	Stefan Kiesel (VAC)	HUB-VAC-MEN 11.10.2023			2x OFD blue 1x OFD red 1x Viewports for readout 4x Viewports for QPD, 461 Lock and Powerstab

Abbildung 1: Auszug aus dem Groblastenheft (Product Requirement Specification)

AP 5.2 Entwicklung OFD:

Im Arbeitspaket war folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Fragestellung: Wie muss eine OFD designt sein und wie muss sie hergestellt werden, um entsprechend der Anforderungen an Einfügedämpfung und Erhaltung der Polarisation die optische Strahlung transferieren zu können?

Da grundlegend folgende Herausforderung in der Entwicklung bestand:

- Herausforderung: kleine Wellenlänge der zu transferierenden optischen Strahlung bedingt kleine Kerndurchmesser der optischen Fasern, extrem hohe Anforderungen an Positionsgenauigkeit der zu koppelnden Fasern

Zur Beantwortung der Fragestellung wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Vorgehen: Ausarbeitung Design OFD und Herstellungsprozess, Durchführung Design und Prozess-FMEA, Prototypenbau und Charakterisierung, Anpassung Design und Herstellungsprozess

Die Anforderungen an die optischen Faserdurchführungen wurden ermittelt und im Lastenheft festgehalten. Mehrere Optionen für die Realisierung des Vorhabens wurden aufgestellt und verglichen. Ein Konzept wurde ausgewählt, welches auf eine möglichst geringe Anzahl an Koppelstellen setzt, unter Berücksichtigung der Montagereihenfolge.

Die polarisationserhaltenden optischen Faserdurchführungen wurden gefertigt und an den Projektpartner HUB in 07.2023 gesendet. Die Charakterisierung der Polarisationsachse als Teil der Fertigung wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner am Standort in Berlin durchgeführt. Das Arbeitspaket ist damit abgeschlossen

AP 5.3 Entwicklung Vakuumsystem:

Anhand der Anforderung konnten im Arbeitspaket folgende Punkte erarbeitet werden:

- Design Vakuumsystem für Module Optische Schnittstelle, IGP mit NEG, Ventil und Atomofen (Strontiumofen),
- Schnittstellendesign für die obigen Module,
- Thermomechanische, elektrodynamische, magnetische und strömungsphysikalische Auslegung und Berechnung (numerisch und analytisch), Modalanalysen (numerisch),
- Fertigungsstrategie inklusive Reinigungskonzept des Systems und der Module.

Dies wurde folgendermaßen im Projekt final verabschiedet:

- Entscheidungsmeilenstein: Design Freeze (Q6 in Jahr 2)

Anschließend erfolgten folgende Punkte:

- Erstellung Fertigungsunterlagen
- Herstellung, Beschaffung, Teilereinigung und Montage
- Auslieferung Teilsystem Vakuumkammer ORS an MEN = Halbzeitmeilenstein Gesamtvorhaben (Q6 in Jahr 2)

Die Herausforderung bestanden darin, dass begrenzt verfügbare Volumen des Vakuumssystems unter Einhaltung der vakuumtechnischen Anforderungen einzuhalten. Das System bestand aus Optischem Resonanzsystem (ORS), Ramsey-Bordé-Interferometer (RBI) und Atomofen, die nachfolgend einzeln entsprechend getrennt beschrieben werden.

ORS-Kammer

Die bisherige Hauptaufgabe bei der Entwicklung des Referenzsystems bestand in der Erarbeitung eines geeigneten Konzepts für die Erfüllung aller bekannten Anforderungen. Zu den wichtigsten technischen Zielen zählen die Größenreduktion, eine verlässliche und robuste Schnittstelle für Kavität und Schilde, Erreichen eines Vakuums von p <1E-7 mbar und weitreichende Wahlfreiheit der verwendeten Vakuumperipherie.

Aus diesem Antrieb heraus wurden zunächst verschiedene Optionen für die einzusetzende Pumpe ausgearbeitet. Präferiert wird der Einsatz einer kombinierten Ionengetterpumpe mit integriertem nichtverdampfbarem Getter (NEG). Mit dieser Pumpe wird potentiell Platz im Rack freigehalten, da auf das Pumpenbetriebsgerät letztendlich verzichtet werden kann. Für das Erreichen der Vakuumanforderungen wurde ein Ausgasbudget eines bisher im Einsatz befindlichen Systems erstellt und Verbesserungspotentiale ermittelt.

Die AluVaC-Technologie wurde als geeignet für das Vorhaben bewertet. AluVaC bietet die benötigte gute Temperaturhomogenität, ein geringes Gewicht und eine einfachere Bearbeitung der neuartigen Geometrie als eine Alternative aus Edelstahl. Damit liegt eine Entscheidung für die eingesetzten Werkstoffe und die Herstellverfahren vor.

Bei der Festlegung des Dichtprinzip wurde sich für einer an das CF-System angelehnte Dichtung mit kleineren Abmessungen und anderer Geometrie entschieden. Das Pflichtenheft enthält konkrete Maßnahmen für die Erfüllung der vorgegebenen Lasten.

Die Vakuumkammer für das optische Referenzsystem wurde gefertigt und in 2 Varianten in 04.2023 sowie in 07.2023 an den Projektpartner MEN geliefert. Das Arbeitspaket ist damit erfolgreich abgeschlossen.

Atomofen

Die Entwicklung des Atomofens hat vor allem das Ziel der Verkleinerung und Vereinfachung eines aktuell verfügbaren Ofens der HUB. Die detaillierten Anforderungen wurden in einem Lastenheft festgehalten. Zur Abschätzung des erwarteten Atomstrahlprofils wurden Simulationen des molekularen Flusses von Strontium-Atomen durch die Austrittsröhrchen des Atomofens und dem davor liegenden Vakuum durchgeführt. Der Wärmeleitwert des MACOR-Mounts wurde mithilfe von Simulationen ermittelt.

Nach dem fertigen und testen eines Atomofens wurden zusätzlich zwei weitere Atomöfen gefertigt, welche in 06.24 an die HUB geliefert wurden. Diese werden nach dem Bestücken an die RBI-Kammer montiert. Mit der Auslieferung der Atomofen wurde dieser Teil des Arbeitspakets erfolgreich abgeschlossen.

Ramsey-Bordé-Kammer

Bei der Entwicklung der Kammer für das Ramsey-Bordé-Interferometer wurden wichtige Anforderungen im Lastenheft zusammengetragen. Erste Potentiale zur Reduzierung der Systemgröße wurden im Ersatz der Magnetspulen durch Dauermagnete ermittelt. Durch diesen Ansatz würden Betriebsgeräte für den Betrieb der Spulen nicht mehr nötig und somit Platz im Rack geschaffen. Erste Simulationen wurden zur Bewertung des Konzepts durchgeführt.

Die Konstruktion des Vakuumsystems für das Ramsey-Bordé-Interferometer wurde hinsichtlich der bisher bekannten Anforderungen mehrfach angepasst. Es kam zu Schwierigkeiten bei der Definition von Schnittstellen zum optischen Teil des Ramsey-Bordé-Interferometers, da wichtige experimentelle Erkenntnisse und technische Entwicklungsschritte beim Partner HUB ausstanden. Das für die Funktion

des RBI zentrale Zerodurboard mit mikrointegrierten Optiken war zum Ende des zu Beginn geplanten Zeitraums noch nicht vollständig definiert. Da das Design der Vakuumkammer eng verzahnt mit diesem Board ist, da einige Signalwege in Freistrahl vom Board aus der Vakuumkammer durch Schaugläser geführt werden müssen, kam es auch bei der Vakuumkammer zu Verzögerungen. Außerdem muss der Atomstrahl exakt so durch die Kammer geführt werden, dass eine Interaktion mit den Laserstrahlen auf dem Zerodurboard möglich ist. Auch aus diesem Grund kam es zu einer Verzögerung der Herstellung der Vakuumkammer für das RBI. Die finale Kammer wurde erst in 04.2025 fertiggestellt und anschließend an die HUB übergeben. Sie wurde möglichst weit vorassembliert und gelecktestet. Dabei wurden die Ports für die Atomöfen und optischen Faserdurchführungen mit Blindflanschen versehen, da die Bauteile bereits an die HUB geliefert wurden. Die Gesamtleckrate des Systems lag unter der Nachweisgrenze des Lecktesters bei 1*10e-12 mbar*l/s. Damit konnte auch dieses Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen werden.

AP 5.4: Charakterisierung:

- Frage: Erfüllung der Lasten aus Lastenheft (Module und Gesamtsystem)
- Vorgehen: Ausarbeitung Versuchsplan – Dokumentation & Beschreibung der Nachweismethoden im Pflichtenheft – Durchführung Experimente – Auswertung und Dokumentation experimentelle Ergebnisse

Bei den polarisationserhaltenden OFDs wurden folgende Werte gemessen:

He-Leckrate

- < 1,0E-10 mbar*l/s

Einfügedämpfung

- PM405 #1 -> max. 4,00 dB @ 633 nm
- PM405 #2 -> max. 2,74 dB @ 633 nm
- PM630 #1 -> max. 3,31 dB @ 633 nm
- PM630 #2 -> max. 3,42 dB @ 633 nm

PER

- 13 dB PER

Weitere Werte aus dem Lastenheft wurden nach der Assemblierung des Gesamtsystems gemessen. Im Rahmen der Charakterisierung wurde ein minimaler Druck im Gesamtsystem von < 1E-11 mbar nachgewiesen und auch die Leckrate war entsprechend < 1E-10 mbar*l/s. Das Gesamtsystem konnte die geometrischen Größenanforderungen aus dem Lastenheft einhalten. Auch dieses Arbeitspaket konnte damit erfolgreich abgeschlossen werden.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In der Gesamtsumme ergibt sich ein tatsächlicher Aufwand von ca. 45 Personenmonaten. Die Mittel wurden entsprechend angefordert.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Wie in **1.** dargestellt, wurden im Rahmen des Projektvorhabens wesentliche Fortschritte im Bereich der miniaturisierten optischen Uhren mit hoher Stabilität gemacht. Außerdem wurde ein modularer Aufbau erreicht, der eine Integration in einem 19“ System ermöglicht und damit sowohl eine einfache Wartbarkeit, als auch eine Transportabilität des Systems ermöglicht. Der Erfolg wurde einzig durch den Zusammenschluss der Projektpartner und der damit einhergehenden Kombination der Kernkompetenzen ermöglicht und wäre ohne den Wachstumskern nicht in der Form und Geschwindigkeit möglich gewesen.

4. des voraussichtlichen Nutzens, Verwertbarkeit, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Gesamtvorhaben zu entwickelnde atominterferometrische Plattform für eine optische Uhr können nach der Markteinführung einen Bedarf von 50 bis 100 Einheiten generieren. Die Anschlussfähigkeit ist durch die mögliche Weiterentwicklung des Gesamtsystems zu einem Quantensensor für Messaufgaben in der Magnetfeldmessung oder als Gravimeter gegeben. Die Verwertung der weiteren Module wird nicht durch unmittelbare Produktausprägungen sondern gezielt als Erweiterung des Technologieportfolios im Rahmen der Sonderkomponentenherstellung erfolgen. Mit diesen Modulen kann die VACOM GmbH ihr Profil als Sonderkomponentenhersteller mit hohem Forschungs- und Entwicklungsanteil weiter schärfen.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach unserem jetzigen Kenntnisstand gibt es keinen zum Verbund alternativen Anbieter von portablen, hochgenauen optischen Uhren und auch keine uns bekannten Veröffentlichungen auf diesem Gebiet.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Rahmen des Projektvorhabens wurden bei folgenden Konferenzen QUASENS in Vorträgen vorgestellt:

AVS 69 - Miniaturized Vacuum Systems

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

IVC 22 - Vacuum for Quantum Technology: Enabling the Second Quantum Revolution

EVC 17 - Reliable Aluminum Vacuum Components for Miniaturized Quantum Technology Applications