

Anlage zum Verwendungsnachweis

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Innovative Vakuumtechnologie für Quantensensoren - InnoVaQ

Teilvorhaben

Glaskomponenten für Atomquelle und Feldemitter

Förderkennzeichen

13N15916

Zuwendungsempfänger

LPKF Laser & Electronics SE, Osteriede 7, 30827 Garbsen

Projektlaufzeit

01.01.2022 bis 30.06.2025

Autoren

Malte Schulz-Ruhtenberg

Datum

04.11.2025

Teil I: Kurzbericht

Ziel des Gesamtvorhabens ist eine miniaturisierte Vakuumkammer mit integrierter Atomquelle für Atomsensoren. Aufgaben des Teilvorhabens von LPKF waren:

- Entwicklung einer Mikroheizplatte auf Glasbasis als Atomquelle und Herstellung von Teststrukturen für Versuche am DLR-SI (AP3),
- Entwicklung von Feldemittern auf Glasbasis für miniaturisierte Vakuumpumpen (AP4),
- Spezifikation und Aufbau eines Demonstrators, dafür Integration der entwickelten glasbasierten Komponenten in die 3D-gedruckte Vakuumkammer des Partners VACOM (AP1 und AP5).

Für alle Aufgaben wurde das LIDE-Verfahren zur Mikrostrukturierung von Flachglas eingesetzt, dass bei LPKF seit 2014 entwickelt wird. Glas weist für viele technische Anwendungen vorteilhafte Eigenschaften gegenüber Materialien wie Silizium und Kunststoff auf: es ist thermisch und chemisch hochstabil, ist ein exzellenter elektrischer Isolator, hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit und ist optisch transparent.

Mit Hilfe des LIDE-Verfahrens können gängige Glastypen mit hohem Durchsatz flexibel und maskenlos mikrostrukturiert werden. Mögliche Strukturen sind z.B. Durchgangs- und Sacklöcher mit nahezu senkrechten Wänden, konische Löcher, Gräben, Schnitte und Kavitäten. Die Kombination der Vorteile von Glas als Basismaterial mit den Möglichkeiten des LIDE-Verfahrens bildet die technische Grundlage des Vorhabens.

Das Vorhaben verlief planmäßig entlang des Arbeitsplans. Zunächst wurden der Demonstrator und die Teilkomponenten in Zusammenarbeit mit den Partnern spezifiziert (AP1). Darauf aufbauend wurde die Geometrie der Mikro-Heizplatte und die Heizelemente ausgelegt, Teststrukturen gefertigt sowie die Atomquelle aufgebaut (AP3). Parallel wurden Feldemitter auf Glas-Basis untersucht (AP4). Die Strukturierung von Saphir mit LIDE wurde untersucht, aber ohne Erfolg abgebrochen. Die Komponenten wurden für Funktionstests in Vakuumkammern integriert (AP5).

Das zentrale Ergebnis des Vorhabens ist eine vollfunktionsfähige glasbasierte und miniaturisierte Atomquelle mit integrierter Heizung, die elektrisch oder optisch betrieben werden kann. LPKF hat vor Allem eng mit dem DLR-SI zusammengearbeitet, um die Atomquelle zu entwickeln und funktionale Komponente für Anwendungsversuche bereitzustellen.

Teil II: Eingehende Darstellung

AP1: Planung des Demonstrators

In AP1 wurden in Zusammenarbeit aller Partner die Spezifikationen und Schnittstellen der Komponenten des Demonstrators diskutiert und festgelegt. Die notwendigen Prozesse und Messverfahren wurden diskutiert und eine detaillierte Planung der kommenden Schritte aufgestellt.

AP3: Atomquelle mit Mikro-Heizplatte

Die Mikroheizplatte (s. Abbildung 1/Abbildung 2) auf Glasbasis soll aus einem lediglich durch schmale Stege mit dem Substrat verbundenen Bereich bestehen. Dieser zentrale Bereich dient als Heizplatte, die Stege verringern die Wärmeleitung in das Substrat. Der zentrale Bereich soll Kavitäten zum Einfüllen des Strontiums (oder anderer Materialien) enthalten. Die Kavitäten werden durch das Aneinandersetzen von Sacklöchern mit dem LIDE-Verfahren erzeugt. Aus den Ergebnissen von Strukturierungsversuchen wurden Geometrien und Freiheitsgrade ermittelt und mit den Projektpartnern diskutiert. Im Bereich der Kavitäten wird die Glasdicke nur noch 50 μm betragen, wodurch eine Kavitätstiefe von $>420 \mu\text{m}$ erreicht wird. Der durch das Aneinandersetzen der Sacklöcher entstehende wellige Boden der Kavitäten kann für das optische Heizen der Heizplatte genutzt werden.

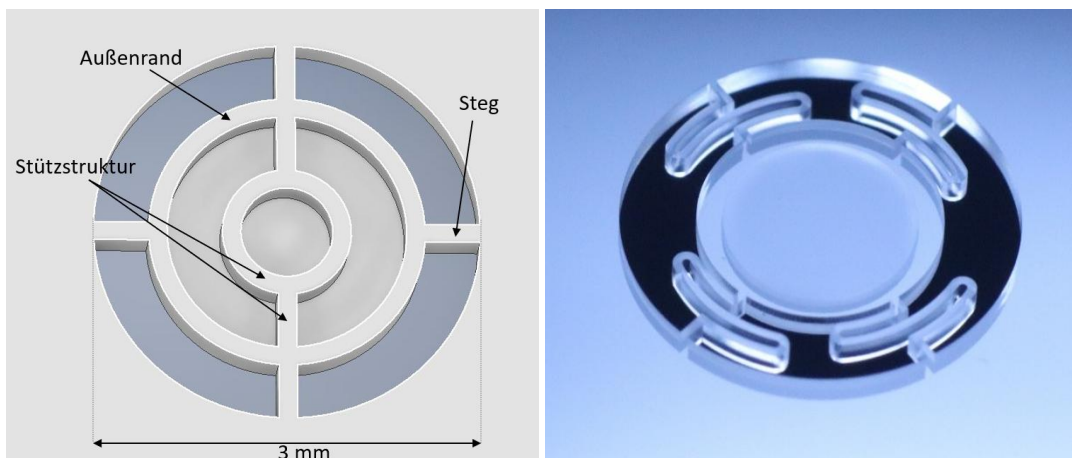


Abbildung 1: Erstes Konzept für die Mikro-Heizplatte (links) und weiterentwickeltes Layout mit längeren Stegen (rechts)

Aus der Kombination mit den Anforderungen aus AP1 entstand ein CAD-Modell der Heizplatte (Abbildung 1, links). Das Modell besteht aus einem runden Glassubstrat mit 23 mm Durchmesser, in dem vier Durchgangsbohrungen für metallisierte Kontakte vorgesehen sind. In der Mitte liegt die durch vier Streben mit dem Substrat verbundene Heizplatte mit einem Durchmesser von 3 mm. Die Heizplatte weist die beschriebene Kavität zum Einfüllen der Atome auf. Zur Erhöhung der Stabilität kann die Kavität durch Stützstrukturen unterteilt werden. LPKF hat verschiedene Versionen zur Charakterisierung am IMPT hergestellt.

Die Verbindungsstreben mit einer geplanten Breite von 200 µm dienen der mechanischen Stabilität der Heizplatte, sollen aber so schmal wie möglich realisiert werden. Daher wurden verschiedene Querschnittsgeometrien, I-förmig, T-förmig und U-förmig, untersucht. Auf Basis von Überlegungen und Diskussionen zum mechanischen Verhalten wurde festgelegt, dass I-förmige Streben ausreichen.

Um die thermische Isolierung der Heizplatte gegenüber dem äußeren Bereich des Substrats zu verbessern, werden die Streben der Heizplatte möglichst schmal und lang realisiert. LPKF hat hierfür mäanderförmige Streben untersucht (Abbildung 1 rechts). Auf den mäanderförmigen Streben werden außerdem die Leiterbahnen zur elektrischen Kontaktierung der Mikroheizplatte realisiert.

Zum Heizen der Mikroheizplatte werden elektrische und optische Methoden untersucht. Für die elektrische Heizung werden elektrische Kontakte auf Glas und in Durchgangslöchern erzeugt. Dafür wird das Glas selektiv mit Titan und Kupfer beschichtet. Für die Heizspirale unterhalb der Heizplatte wird Platin verwendet. Die maximale Stromdichte beim Heizbetrieb wurde auf 10^5 A/cm^2 festgelegt.

Für optisches Heizen kann ebenfalls die Heizspirale genutzt werden, da hier ca. 80% der Fläche absorbierend beschichtet ist. Die Heizung durch Laserstrahlung wurde untersucht.

Für die selektive Metallisierung durch Sputtern wurden Masken, ebenfalls aus Glas, hergestellt und Untersuchungen zur maskierten Metallisierung durchgeführt. Zusätzlich wird die vollflächige Metallisierung mit anschließender Laserstrukturierung untersucht, um eine höhere Dichte der Leiterbahnen zu ermöglichen. Insbesondere die Leiterbahnbreite und -dichte wurde untersucht.

Nachdem verschiedene Layouts mittels thermischer Simulationen verglichen wurden, konnten die Partner ein finales Layout der Heizspirale und elektrischen Kontaktierung festlegen. Das finale Design wird zum Teil über Glasmasken und zum Teil durch Laserstrukturierung realisiert. Auf einer Kreisfläche mit ca. 4 mm Durchmesser wurde eine Heizspirale mit 84 mm Länge realisiert (Abbildung 2 rechts).

Die Mikroheizplatte wird über vier metallische Pins mit der Vakuumkammer (Demonstrator) verbunden. Die Pins bilden ebenfalls die elektrische Kontaktierung. Daher hat LPKF Durchkontaktierungen im Glas so metallisiert, dass ein zuverlässiger elektrischer Kontakt zwischen Pins und Leiterbahnen auf dem Glas durch Aufstecken und Löten erreicht wird. Dies wurde in entsprechenden Untersuchungen erfolgreich erprobt und wurde bei VACOM hinsichtlich der Auswahl des Lötzinns untersucht.

Die Mikroöfen wurden anschließend dem DLR übergeben. In dortigen Versuchen wurden Probleme mit der Bruchfestigkeit des Glases und Kurzschlüsse festgestellt. Gemeinsam wurde eine Ursachenanalyse durchgeführt. Glasbruch entstand vor Allem beim manuellen Befüllen der Öfen, teilweise aufgrund von Spannungsrissen, die durch die

Laserablation entstanden. Die Kurzschlüsse konnten auf teilweise unvollständigen Laserabtrag der Heizspirale zurückgeführt werden. Durch Nachbearbeitung konnten die Öfen nutzbar gemacht werden.

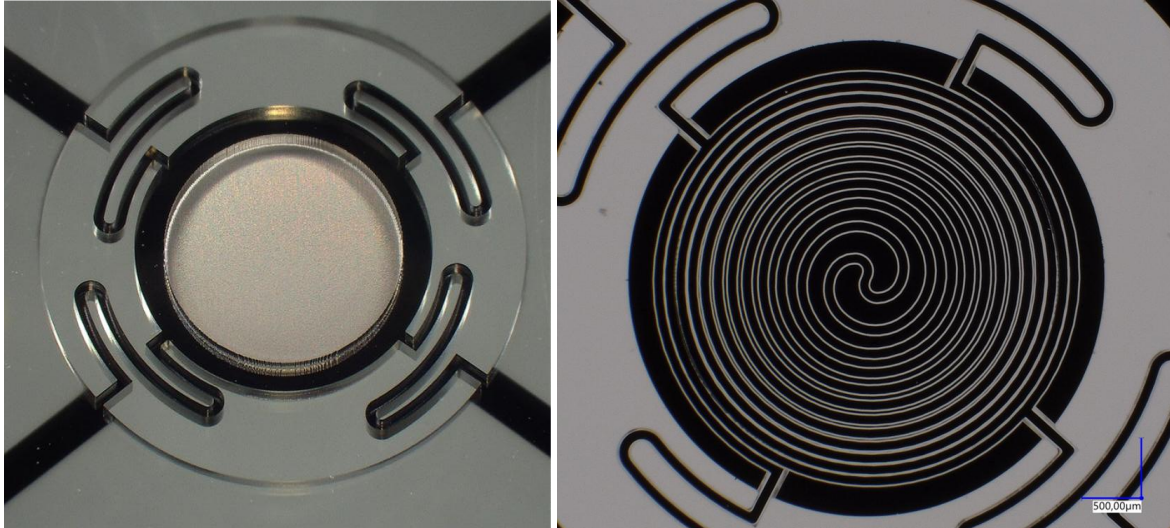


Abbildung 2: fertige Mikro-Heizplatte (links: Vorderseiten, rechts: Rückseite).

AP4: Miniaturisierte Vakuumpumpe

Die Vakuumpumpe soll aus zwei mikrostrukturierten Substraten bestehen, einer Extraktionselektrode und einem Feldemitter. Beide Substrate sollen selektiv metallisiert werden.

Der Ansatz für den Feldemitter besteht aus feinen Spitzen, an denen sich durch Feldüberhöhung Elektronen sammeln. Der Feldemitter kann sich im Betrieb aufgrund der notwendigen hohen Spannungen aufheizen, daher soll er aus Saphir gefertigt werden, was eine um eine Größenordnung größere Wärmeleitfähigkeit ausweist als Glas. Für die Strukturierung von Saphir mit LIDE hat LPKF eine Literaturrecherche durchgeführt. Der Ansatz zur Mikrostrukturierung des kristallinen Saphirs sieht vor, das Material durch Laserbestrahlung in eine amorphe Form zu überführen und diese anschließend selektiv zu ätzen. LPKF hat Versuche zur Strukturierung von Saphir durchgeführt, dabei aber keinen einsetzbaren Prozess finden können. Im Konsortium wurde sich darauf geeinigt, den Feldemitter für Untersuchungen aus Quarzglas zu fertigen.

Für die Feldemitter wurden Tests zur Herstellung von Glasspitzen-Arrays durchgeführt. Dafür werden Sacklöcher mit geringem Abstand mit LIDE hergestellt (Abbildung 3). Durch Variation der Abstände und der Ätzeit können verschieden hohe Glasspitzen erzeugt werden.

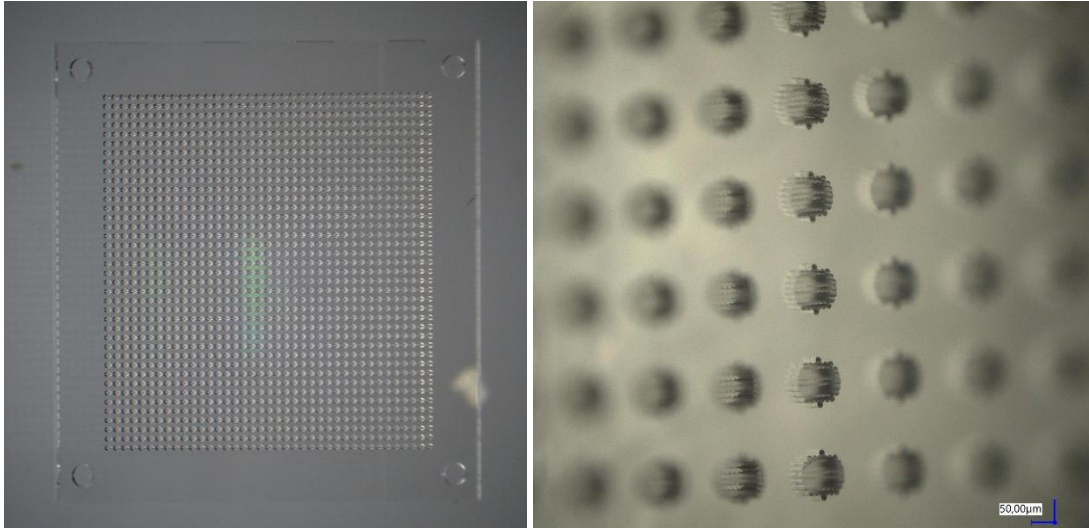


Abbildung 3: Glaswafer mit Extraktionselektroden.

Die Extraktionselektrode soll über dem Feldemitter angeordnet werden und Elektronen aus den feinen Spitzen extrahieren und beschleunigen. Dafür werden konische Löcher in Borosilikatglas gefertigt. Das finale Design besteht aus Löchern mit ca. 100 µm Durchmesser in 250 µm dickem Glas. Die Metallisierung findet beim IMPT statt.

AP5: Integration und Demonstration

Die entwickelten Komponenten aus AP3 und 4 wurden in verschiedenen Versionen realisiert und den Partnern zur Charakterisierung zur Verfügung gestellt.

Verbindungselemente zur Integration in die Vakuumkammer wurden wie spezifiziert realisiert. Die Integration in den Demonstrator wurde begleitet, z.B. durch Herstellung weiterer Teststrukturen und für bestimmte Tests angepasste Layouts.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position sind Personalkosten. Über die Laufzeit von drei Jahren waren insgesamt 23 Mitarbeiter am Vorhaben beteiligt. Diese sind insbesondere in drei Bereichen tätig: der zentralen Innovation (4 Mitarbeiter), dem LIDE-Bereich (14 Mitarbeiter) und der feinmechanischen Werkstatt (5 Mitarbeiter). Die große Anzahl Mitarbeiter leitet sich aus Mitarbeiterfluktuation und sich während der Projektlaufzeit verschiebenden Zuständigkeiten im Unternehmen her.

Abschreibungen im Vorhaben genutzte Geräte (Sonstige AfA) bildet die zweitgrößte Position. Insbesondere die Nutzung des Chemielabors, einer Vitron-Anlage zur Durchführung des LIDE-Verfahrens sowie eines PVD-Systems und einer Galvanikanlage zur Metallisierung der Glassubstrate wurden abgerechnet. Zur Charakterisierung von hergestellten Glasstrukturen wurden eine Querschleifanlage und ein Rasterelektronenmikroskop eingesetzt. Der in den Anlagen zum VN ausgewiesene Nutzungsanteil beruht auf zeitlich wechselnden Verteilungen der monatlichen AfA auf verschiedene Vorhaben.

Kosten für Verbrauchsmaterialien sind insbesondere für die folgenden Positionen entstanden:

- Glaswafer zur Entwicklung der Glasstrukturierung mit dem LIDE-Verfahren und der Glasmetallisierung
- Optischer Konverter für eine im Vorhaben genutzte Laserquelle für die Anpassung der im Vorhaben zum Teil abbeschriebenen Vitrion-Anlage
- Diffraktive optische Komponenten zur Laser-Strahlformung für die Anpassung der Vitrion-Anlage
- Optische Komponenten (Objektiv, Linsen) für die Anpassung der Vitrion-Anlage
- Platin-Sputtertarget für die Glasmetallisierung

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der im Vorhaben entwickelte und erprobte Atomofen wird von den Partnern im Förderprojekt ISMA (Fkz. 13N17360), das im Januar 2026 startet, weiterentwickelt. Parallel werden die gewonnenen Erkenntnisse in der LPKF-eigenen Fertigung von Glaskomponenten genutzt, um ein breiteres Spektrum an Kundenanfragen bedienen zu können. Die Kombination von PVD-Metallisierung und Laserablation erweitert dafür das Anwendungsspektrum. Zudem wird der Atomofen als Komponente für die Quantentechnologien auf der Website www.vitrion.com zur Bewerbung der gewonnenen Fähigkeiten genutzt.

Das Vorhaben INNOVAQ sowie das o.g. Nachfolgeprojekt ISMA sind Teil einer Reihe von geförderten Maßnahmen unter dem Rahmen „Quantum Valley Lower Saxony“ (QVLS), in dem die Universitäten Hannover und Braunschweig sowie die PTB gemeinsam ein regionales Ökosystem für die Quantentechnologien aufbauen. LPKF ist Teil dieses Ökosystems, insbesondere als Partner im Zukunftscluster QVLS-iLabs (zum Zeitpunkt der Berichterstattung wird der Zukunftscluster für die zweite Phase begutachtet). In diesem Rahmen werden Quantengravimeter und Atomspektroskope entwickelt, die

Bekannt gewordener Fortschritt Dritter

LPKF sind keine Fortschritte Dritter bekannt geworden, die für die Verwertung und Weiterentwicklung der hier entwickelten Technologien relevant sind.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

LPKF hat ein Patent über das Layout des Atomofens und die Ausnutzung der Eigenschaften von Glas für Atomöfen angemeldet. Außerdem erfolgten zwei Veröffentlichungen, eine in Kooperation mit dem DLR-SI im wissenschaftlichen Journal „Physical Review Applied“, sowie ein Konferenzbeitrag bei der IEEE International Vacuum Nanoelectronics Conference in Kooperation mit dem IMPT.