Fraunhofer ISIT

Abschlussbericht zum Vorhaben

MEMS-BORO

gemäß Nebenbestimmungen NKBF 98

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (ISIT)	**Förderkennzeichen:** 20Q2109E
Vorhabenbezeichnung: Entwicklung einer 2D-MEMS-Scanner basierten 3D-Kamera mit integrierter miniaturisierter Laserquelle – „MEMS-BORO“	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2022 – 30.11.2025	
Berichtszeitraum: 01.06.2022 – 30.11.2025	
Ansprechpartner: Prof. Dr. Shanshan Gu-Stoppel und Dr. Gundula Piechotta	
Datum: 28.05.2026	

Inhalt

1 **Zusammenfassung** 3
1.1 Aufgabenstellung 3
1.2 Voraussetzungen 3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7
2 **Eingehende Darstellung** 8
2.1 Ergebnisse 8
a) AP 1.2 8
b) AP 2.1 8
c) AP 2.2 9
d) AP 2.3 19
e) AP 2.4 22
f) AP 2.5 26
g) AP 4.1 27
h) AP 4.2 28
i) AP 5.1 29
j) AP 5.3 29
k) HAP6 29
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 30
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 30
2.4 Nutzen und Verwertbarkeit 30
2.5 Fortschritt anderer Stellen 31
2.6 Veröffentlichungen/Vorträge 31
3 **Literaturverzeichnis** 32

1 Zusammenfassung

1.1 Aufgabenstellung

Die zentralen Aufgaben des Fraunhofer ISIT im Verbundvorhaben MEMS-Boro war die Entwicklung eines biaxialen, resonanten MEMS-Spiegels sowie dessen optische Integration, in Kombination mit einer miniaturisierten Laserlichtquelle, in einem Boroskop. Das übergeordnete Ziel des Verbundvorhabens war dabei die Realisierung eines dreidimensional messenden Boroskops mit einer bisher nicht erreichten Messtiefe und Auflösung, welches so stark miniaturisiert ist, dass es für die Inspektion von Flugzeugtriebwerken geeignet ist. Die Verwendung eines MEMS-Scanners soll dabei ermöglichen, mehrere Messmethoden, nämlich die Stereotriangulation, die Lasertriangulation sowie das Time-of-Flight LiDAR in einem Boroskop zu kombinieren.
Konkret übernahm das ISIT die Entwicklung und Reinraumprozessierung des MEMS-Spiegels mit piezoelektrischem Antrieb, der eine auf Waferlevel gefertigte, optisch transparente Vakuumverkapselung besitzt. Hierbei sollte ein Sichtfeld des MEMS-Spiegels von 65° × 65° und eine hohe laterale Messauflösung durch dichte Lissajous-Scantrajektorien realisiert werden.
Die technologische Kernherausforderung besteht in der Kombination aus kleiner Spiegelplatte, geringen Chipaußenmaßen, niedrigen Resonanzfrequenzen und einem gleichzeitig großen optischen Scanwinkel.
Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt lag in der optischen Integration der Komponenten zu einem vollständigen, hochminiaturisierten Laserscannersystem. Ziel war die Realisierung einer Laser-Scanner-Baugruppe mit geringer Strahldivergenz bei einem Gesamtdurchmesser von max. 7,6 mm. Darüber hinaus unterstützte das ISIT die Entwicklung der Ansteuerungs- und Auswerte-elektronik und war bei der Integration aller optischen und elektronischen Komponenten zur MEMS-3D-Kamera beteiligt.
Im weiteren Projektverlauf sollte das ISIT zudem die abschließende Demonstration und Validierung an realen Flugzeugbauteilen unterstützen. Die wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse durch Publikationen auf internationalen Konferenzen und in Fachzeitschriften war ebenfalls Teil der Aufgabenstellung des ISIT.

1.2 Voraussetzungen

Das Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (ISIT) verfügt als eines der modernsten europäischen Forschungsinstitute für Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik über relevante Voraussetzungen für die Entwicklung eines miniaturisierten, MEMS-Spiegel basierten Boroskops im Vorhaben MEMS-BORO. Mit 180 Mitarbeitenden, einem leistungsfähigen Reinraum zur MEMS-Fertigung und über 20 Jahren Erfahrung in der Entwicklung und Produktion von MEMS-Spiegeln bringt das Institut eine solide technologische und infrastrukturelle Basis mit. Die am ISIT patentierte Vakuum-Verkapselungstechnologie auf Wafer-Level ermöglicht eine hermetische Einkapselung der MEMS-Spiegel durch Glaskappenwafer und gewährleistet damit eine hohe mechanische Robustheit und Langzeitstabilität. Einschlägige Vorerfahrungen wurden im Rahmen verschiedener Projekte zur 3D-Abstandsmessung auf Basis resonanter MEMS-Spiegel gesammelt.

Relevante Schutzrechte des ISIT im Bereich Wafer-Level-Packaging, MEMS-Spiegeldesign und Positionsfeedback ergänzen die technologische Ausgangsbasis.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist in sechs Hauptarbeitspakete gegliedert, wobei das ISIT in den HAPs 1,2,4,5 und 6 beteiligt ist (vgl. Abb. 1), die sich über die gesamte Projektlaufzeit erstrecken.

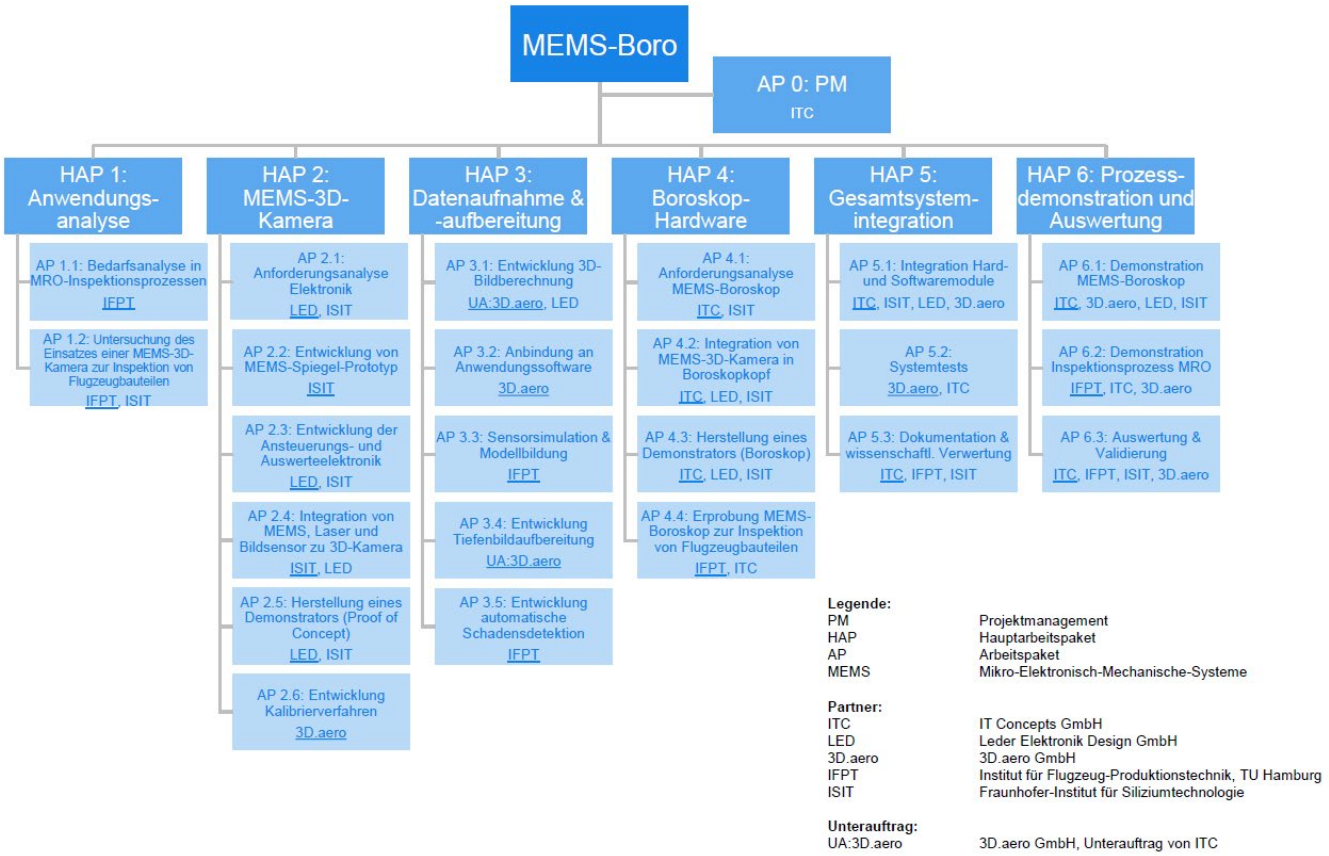


Abbildung 1: Projektstrukturplan gemäß Antragsstellung.

Im Rahmen von **HAP 1 (Anwendungsanalyse)** unterstützt das ISIT das IFPT bei der Beschaffung eines verfügbaren 3D-Kamera-Demonstrators und begleitet erste Probemessungen an Realteilen, um frühzeitig Rückschlüsse auf die Auslegung der Kameraparameter ziehen zu können.
Den größten Anteil der ISIT-Aktivitäten umfasst **HAP 2 (MEMS-3D-Kamera)**, in dem der eigentliche Kamera-Demonstrator entwickelt wird. Zunächst wird gemeinsam mit dem Partner Leder Elektronik Design GmbH eine Anforderungsanalyse für die Elektronik durchgeführt (AP 2.1). Darauf aufbauend entwickelt das ISIT eigenständig einen biaxialen MEMS-Spiegel sowie die notwendige Strahlenoptik zur Integration einer miniaturisierten IR-Laserlichtquelle (AP 2.2).

Parallel dazu unterstützt das ISIT die Entwicklung der Ansteuerungs- und Auswerteelektronik für den Spiegel (AP 2.3). In AP 2.4 werden alle Hardwarekomponenten – MEMS-Spiegel, Laserquelle, Optikkomponenten und Sensorelemente – zu einem integrierten System zusammengeführt. Abschließend werden in AP 2.5 auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse, federführend durch die Leder Elektronik Design GmbH funktionsfähige MEMS-3D-Kamera-Demonstratoren als Proof of Concept gefertigt und charakterisiert.

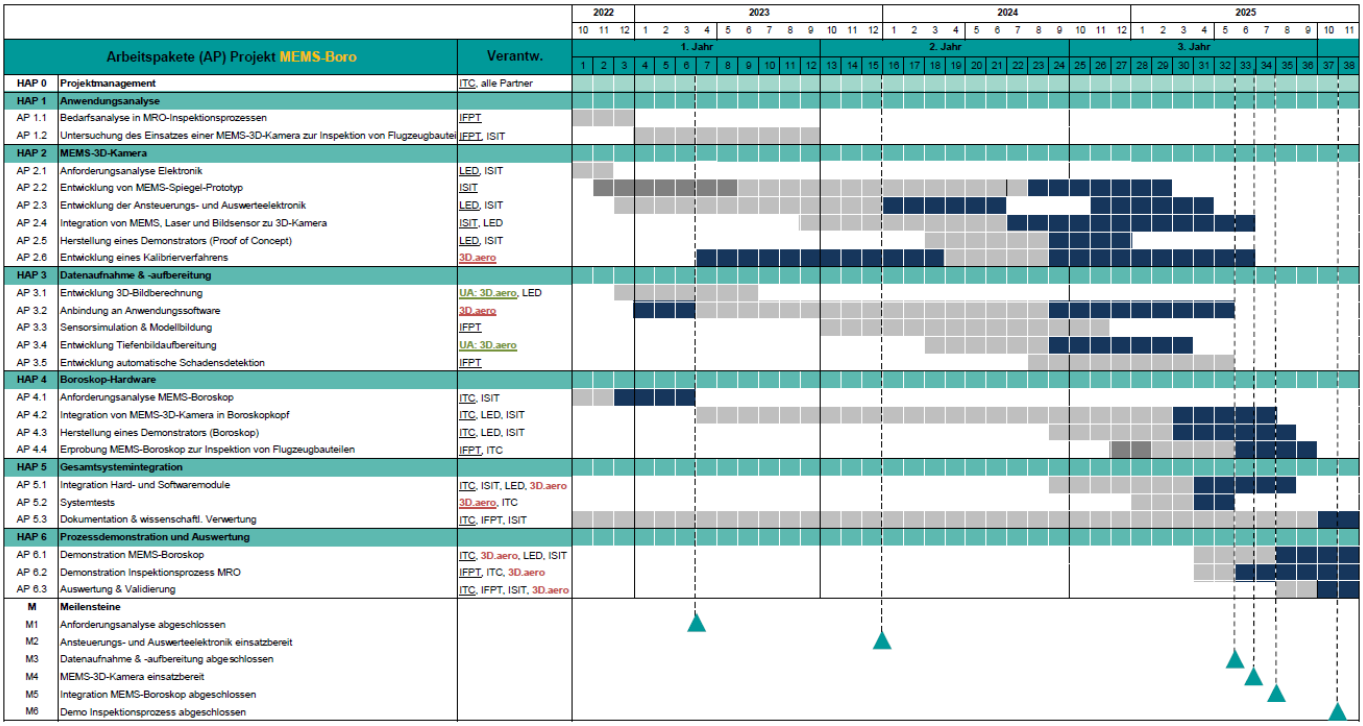
In **HAP 4 (Boroskop-Hardware)** begleitet das ISIT die Integration der Kamera in den Boroskopkopf. Zunächst wird gemeinsam mit der IT Concepts GmbH eine detaillierte Anforderungsanalyse hinsichtlich optischer, elektrischer, mechanischer und thermischer Aspekte erarbeitet (AP 4.1). Anschließend erfolgt die schrittweise Integration der MEMS-3D-Kamera in den Boroskopmesskopf (AP 4.2). In AP 4.3 werden schließlich funktionsfähige Boroskop-Demonstratoren zusammengebaut und getestet.

Im Rahmen von **HAP 5 (Gesamtsystemintegration)** liefert das ISIT die notwendigen Parametrisierungseinstellungen für MEMS-Spiegel und Laserquelle, damit eine reibungslose Zusammenführung von Hard- und Software möglich wird (AP 5.1). Darüber hinaus ist das ISIT durchgehend über die gesamte Projektlaufzeit für die fortlaufende Dokumentation und wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse, etwa durch Veröffentlichungen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften, mitverantwortlich (AP 5.3).

Das Projekt wird in **HAP 6 (Prozessdemonstration und Auswertung)** abgeschlossen, indem der finale MEMS-Boroskop-Demonstrator aufgebaut (AP 6.1) und von den Verbundpartnern an realen Flugzeugbauteilen getestet werden soll. Die erzielten Messergebnisse hinsichtlich der Boroskop-Performance werden ausgewertet und validiert (AP 6.3).

Das Projekt startete am 01.06.2022 und sollte bis zum 31.05.2025 laufen.

Aufgrund von verschiedenen Verzögerungen, beispielsweise durch eine notwendige, längere Anforderungsanalysen für Hardware und Elektronik sowie Verzögerungen in der Hardwareentwicklung, wurden einzelne Arbeitspakete verlängert bzw. verschoben. Außerdem wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis Ende November 2025 beantragt und bewilligt. Der aktualisierte Balkenplan ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



	Arbeitspakete (AP) Projekt MEMS-Boro	Verantw.
HAP 0	Projektmanagement	ITC, alle Partner
HAP 1	Anwendungsanalyse	
AP 1.1	Bedarfsanalyse in MRO-Inspektionsprozessen	IFPT
AP 1.2	Untersuchung des Einsatzes einer MEMS-3D-Kamera zur Inspektion von Flugzeugbauteil	IFPT, ISIT
HAP 2	MEMS-3D-Kamera	
AP 2.1	Anforderungsanalyse Elektronik	LED, ISIT
AP 2.2	Entwicklung von MEMS-Spiegel-Prototyp	ISIT
AP 2.3	Entwicklung der Ansteuerungs- und Auswerteelektronik	LED, ISIT
AP 2.4	Integration von MEMS, Laser und Bildsensor zu 3D-Kamera	ISIT, LED
AP 2.5	Herstellung eines Demonstrators (Proof of Concept)	LED, ISIT
AP 2.6	Entwicklung eines Kalibrierverfahrens	3D.aero
HAP 3	Datenaufnahme & -aufbereitung	
AP 3.1	Entwicklung 3D-Bildberechnung	UA; 3D.aero, LED
AP 3.2	Anbindung an Anwendungssoftware	3D.aero
AP 3.3	Sensorsimulation & Modellbildung	IFPT
AP 3.4	Entwicklung Tiefenbildaufbereitung	UA; 3D.aero
AP 3.5	Entwicklung automatische Schadensdetektion	IFPT
HAP 4	Boroskop-Hardware	
AP 4.1	Anforderungsanalyse MEMS-Boroskop	ITC, ISIT
AP 4.2	Integration von MEMS-3D-Kamera in Boroskopkopf	ITC, LED, ISIT
AP 4.3	Herstellung eines Demonstrators (Boroskop)	ITC, LED, ISIT
AP 4.4	Erprobung MEMS-Boroskop zur Inspektion von Flugzeugbauteilen	IFPT, ITC
HAP 5	Gesamtsystemintegration	
AP 5.1	Integration Hard- und Softwaremodule	ITC, ISIT, LED, 3D.aero
AP 5.2	Systemtests	3D.aero, ITC
AP 5.3	Dokumentation & wissenschaftl. Verwertung	ITC, IFPT, ISIT
HAP 6	Prozessdemonstration und Auswertung	
AP 6.1	Demonstration MEMS-Boroskop	ITC, 3D.aero, LED, ISIT
AP 6.2	Demonstration Inspektionsprozess MRO	IFPT, ITC, 3D.aero
AP 6.3	Auswertung & Validierung	ITC, IFPT, ISIT, 3D.aero
M	Meilensteine	
M1	Anforderungsanalyse abgeschlossen	
M2	Ansteuerungs- und Auswerteelektronik einsatzbereit	
M3	Datenaufnahme & -aufbereitung abgeschlossen	
M4	MEMS-3D-Kamera einsatzbereit	
M5	Integration MEMS-Boroskop abgeschlossen	
M6	Demo Inspektionsprozess abgeschlossen	

Abbildung 2: Aktualisierter Balkenplan.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zum Zeitpunkt der Antragstellung 2021 wurde die Inspektion von Flugzeugtriebwerken visuell mithilfe von kamerabasierten Boroskopen durchgeführt. Dieser Prozess ist schwer quantifizierbar und die Interpretation von der subjektiven Einschätzung des prüfenden Mitarbeitenden abhängig. Ein miniaturisiertes Boroskop, das eine MEMS-basierte 3D Vermessung der Flugzeugtriebwerke inklusive einer automatisierten Datenauswertung ermöglicht, existierte nicht.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung existierten bereits kommerzielle LIDAR-Kameras, die MEMS-Spiegel mit Time-of-Flight-Messtechnik kombinieren und eine hohe Messleistung bei kompakter Bauform erzielen (z.B. die Intel® RealSense™ LIDAR Camera L515). Diese Systeme gelten als Stand der Technik, sind jedoch für den Einsatz in einem miniaturisierten Boroskop noch zu groß und unflexibel.

Das Fraunhofer ISIT verfügt über langjährige Erfahrung in der Entwicklung von MEMS-Spiegeln und hat in vorangegangenen Projekten bereits erste Prototypen miniaturisierter 3D-Kamerasysteme auf dieser Basis realisiert. Dabei konnten wichtige Erkenntnisse zur optischen Integration, zur Elektronikentwicklung und zur Verkapselungstechnologie gewonnen werden. Gleichzeitig wurden Schwachstellen identifiziert – insbesondere bei der optischen Entkopplung und der Laserleistung –, die im vorliegenden Vorhaben gezielt adressiert werden sollten.

Die Patentsituation im Bereich MEMS-basierter LIDAR-Systeme ist sehr komplex. Das ISIT hält jedoch eigene relevante Schutzrechte, die eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung bilden.
Insgesamt zeigt der Stand der Technik, dass die grundlegenden Technologien vorhanden sind, eine ausreichend miniaturisierte und leistungsfähige Lösung für den Boroskop-Einsatz zum Zeitpunkt der Antragstellung jedoch noch nicht existierte. Genau hier setzt das Vorhaben an.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer ISIT und den Verbundpartnern verlief über die gesamte Projektlaufzeit stets in engem Kontakt. Zum regelmäßigen fachlichen Austausch zu den Themen Hardware und Software fanden in zweiwöchentlichem Abstand Onlinemeetings mit allen Projektpartnern statt. Hier wurden sowohl die Fortschritte der einzelnen Projektpartner vorgestellt als auch die aktuellen Herausforderungen und nächsten Arbeitsschritte besprochen. Zu Beginn des Projekts wurden dort außerdem die Spezifikationen für den MEMS-Spiegel festgelegt. Die organisatorische Abstimmung erfolgte ebenfalls maßgeblich im Rahmen der Projektmeetings sowie ergänzend über Emailkommunikation. Zur Erleichterung der gemeinsamen Bearbeitung wurde ein Kanal eingerichtet, in dem die Partner die für das Konsortium relevanten Dokumente und Daten ablegen konnten.
Zusätzliche persönliche Verbundtreffen zwischen dem Fraunhofer ISIT und den Verbundpartnern fanden jährlich statt. Dieser persönliche Austausch ermöglichte tiefergehende fachliche Gespräche.
Die weiteren Hauptaspekte der inhaltlichen Zusammenarbeit mit den verschiedenen Projektpartnern ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Leder Elektronik Design GmbH	u.a. Unterstützung bei der Entwicklung der Ansteuer- und Ausleseelektronik der MEMS-Spiegel und dem Aufbau der Beleuchtungseinheit (Laser,Faser, Prisma) der Demonstratoren; technische Abstimmung Gesamtprojekt & Spiegelspezifikationen
IT Concepts GmbH	technische Abstimmung Gesamtprojekt & Spiegelspezifikationen
3D.aero	technische Abstimmung Gesamtprojekt & Spiegelspezifikationen
IFPT (TU HH)	Zusammenarbeit bei der Identifikation und Beschaffung eines 3D Kamera Demonstrators (AP1.2); technische Abstimmung Gesamtprojekt & Spiegelspezifikationen

Innerhalb des Fraunhofer ISIT bestand eine enge Zusammenarbeit zwischen den Arbeitsgruppen Optische Systeme (Geschäftsfeld MEMS-Anwendungen), der Arbeitsgruppe Mikrofertigungsverfahren, der Integrationsgruppe sowie der Fab. Zur organisatorischen Abstimmung sowie der Vorstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen wurden ergänzende interne Meetings durchgeführt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Projektergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen zusammenfassend dargestellt und mit den ursprünglichen Zielen verglichen. Weitere Details können den Zwischenberichten entnommen werden.

a) AP 1.2 Untersuchung des Einsatzes einer MEMS-3D-Kamera zur Inspektion von Flugzeugteilen

In diesem Arbeitspaket hat das ISIT das IFPT bei der Identifikation und Beschaffung eines 3D-Kamera-Demonstrators beraten und unterstützt. Der Demonstrator sollte vergleichbare Eigenschaften wie die zu entwickelnde miniaturisierte MEMS-3D-Kamera haben, konnte aber von größerer Bauform sein.
In ersten Gesprächen mit dem IFPT wurde besprochen, auf welche Parameter (Pixel, Tiefenauflösung etc.) bei dem kommerziell erhältlichen 3D-Kamera-Demonstrator Wert gelegt werden soll.
Als potenzieller Anwendungsfall sollte die Kamera für eine Überprüfung im Hochdruckverdichter von Triebwerken geeignet sein.
Es hat sich gezeigt, dass die kommerzielle Verfügbarkeit von passenden Geräten sehr eingeschränkt war. Das IFPT hat sich zwar entschieden, eine MEMS-basierte Intel RealSense LiDAR Camera L515 zu kaufen. In der praktischen Anwendung erfüllte diese Kamera dann jedoch nicht zufriedenstellend die benötigte Anforderung an die laterale Auflösung.

b) AP2.1 Anforderungsanalyse Elektronik

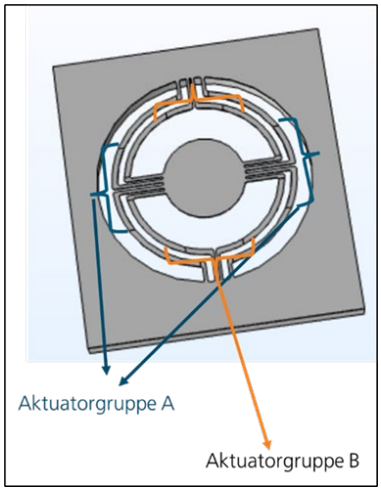
AP 2.1 diente der systematischen Analyse der Systemanforderungen an die Elektronik – insbesondere hinsichtlich der Laser-Ansteuerung sowie des MEMS-Spiegel-Antriebs mit integrierter Positionssensorik. Das ISIT übernahm dabei eine beratende Rolle, welche Elektronikkomponenten für den geplanten MEMS-Scanner und den Laser am sinnvollsten eingesetzt werden können und wie das Gesamtsystem aufgebaut werden sollte.
Um den Partnern – insbesondere der Leder Elektronik Design GmbH – einen praktischen Einstieg in die MEMS-Spiegel-Ansteuerung zu ermöglichen, hat das ISIT vorhandene, vergleichbare MEMS-Scanner zur Verfügung gestellt. Damit konnten erste Vorversuche mit eigenen Elektronikkomponenten durchgeführt werden, um Erfahrungen mit dem Aufschwingverhalten, dem resonanten Betrieb, den erforderlichen Ansteuerspannungen sowie der Nachjustage der Scanner zu sammeln. Mithilfe dieser Vorerkenntnisse konnten die Anforderungen an die Elektronik nachgeschärft werden.
Da die gewonnenen Erkenntnisse aus AP 2.1 eng mit den Arbeiten in AP 2.3 (Entwicklung der Ansteuerungs- und Auswerteelektronik) verknüpft sind, fließen die Ergebnisse direkt in das übergeordnete Elektronikkonzept ein.

c) AP 2.2 Entwicklung von MEMS-Spiegel Prototyp

Eine zentrale Entwicklungsaufgabe des ISIT im Gesamtprojekt war die Entwicklung und Fertigung von leistungsfähigen, biaxialen resonanten MEMS-Spiegeln, welche im Boroskop als Laserstrahlablenkungssystem integriert werden sollten.
Die MEMS-Spiegel werden hierbei verwendet, um eine zu inspizierende Oberfläche, im Speziellen Triebwerksschaufeln, abzutasten. Die Scanner müssen hierbei eine derart miniaturisierte Baugröße haben, dass sie in den finalen Boroskopkopf integriert werden können. Gleichzeitig müssen sie ein großes Sichtfeld, eine hohe Pixel-Auflösung und genaue Positionsbestimmung ermöglichen.

Vorarbeiten mit der MEMS-Spiegel-Generation 0

Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystemansatzes konnten die Spezifikationen für den MEMS-Scanner noch nicht zu Beginn des Projekts, sondern erst später festgelegt werden (s. Jahresbericht 2022). Damit die Projektpartner die generelle Funktionsweise der biaxialen, resonanten MEMS-Spiegel kennenlernen konnten sowie darauf aufbauend erste Entwicklungsschritte bei der Elektronik getätigt werden konnten, hat das ISIT einen MEMS-Spiegel zur Verfügung gestellt, der in erster Näherung viele Anforderungsparameter bereits erfüllt hat. Das Design dieses MEMS-Spiegel ist schematisch in Abb. 3 dargestellt; die Spezifikationen sind in der Tabelle in Abb.3 zusammengefasst.



Durchmesser Spiegelplatte	3 mm
Chipgröße	9,4 x 10 mm
Dicke Spiegelplatte und Federstrukturen	50 µm polykristallines Silizium
Antrieb	Piezoelektrisch (AlN)
Hermetische Verkapselung	Glasdom

Abbildung 3: Schematische Abbildung des MEMS-Spiegels (Gen0). Rechts; Spezifikationen des MEMS-Spiegels

Die MEMS-Scanner der Generation 0 wurden auf Printed Circuits Boards (PCB) aufgebaut, damit sie bei den Projektpartnern in Betrieb genommen werden konnten. Ein Beispiel eines aufgebauten MEMS-Spiegels der Gen0 ist in Abb. 4 gezeigt. Das verwendete PCB wurde ausgewählt, um die Integrierbarkeit in einen Laboraufbau, beispielsweise durch die Möglichkeit der Verwendung eines einfachen SME-Steckers, zu erleichtern.

Der eigentliche Aufbau des Spiegels auf den PCBs erfolgte über einen Klebeprozess. Im Anschluss daran wurden die Kontaktpads des Chips mit denen des PCBs über Drahtbond mittels eines speziellen Dünndrahtbonders verbunden. Für alle diese Schritte wurden die Facility und Kompetenzen der Arbeitsgruppe „Aufbau und Verbindungstechnik“ des ISIT genutzt.

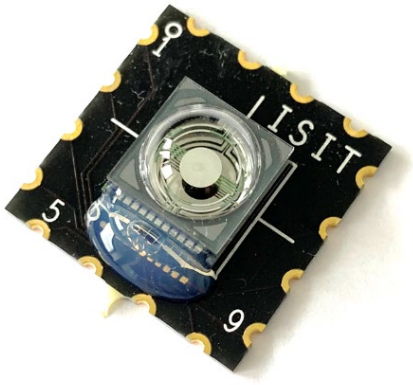


Abbildung 4: Foto eines auf PCB aufgebauten MEMS-Spiegels der Generation 0.

Die ersten MEMS-Spiegel der Generation 0 konnten den Partnern nach erfolgreicher Herstellung im Juni 2023 zur Verfügung gestellt werden. Vor der Lieferung wurden die Spiegel im Hinblick auf Funktionalität, wie Resonanzfrequenzen und totale optische Scanwinkel (TOSA) charakterisiert. Die versendeten MEMS-Spiegel erreichten hierbei typischerweise totale optische Scanwinkel von ca. 60-/70° x 35° bei ca. 2,2 bzw. 5,5 kHz. Weitere Details können den Zwischenberichten entnommen werden.

Zur Untersuchung der Langzeitstabilität der MEMS-Scanner wurde außerdem ein Langzeittest durchgeführt, bei dem ein MEMS-Spiegel im open-loop-Betrieb, d.h. ohne eine korrigierende Regelungselektronik, im Dauerbetrieb biaxial angetrieben wurde. Eine Veränderung der Eigenschaften des MEMS-Spiegels, beispielsweise eine Veränderung der Resonanzfrequenz, würde sich in einer Veränderung der Lissajousfigur, z.B. ein reduzierte Größe oder veränderte Liniendichte, zeigen. Beim Vergleich der beiden Lissajousfiguren zu Beginn des Tests und nach 6 Wochen (siehe Abb. 5) konnte keine Veränderung beobachtet werden, was die Langzeitstabilität der MEMS-Spiegel im Dauerbetrieb verdeutlicht.

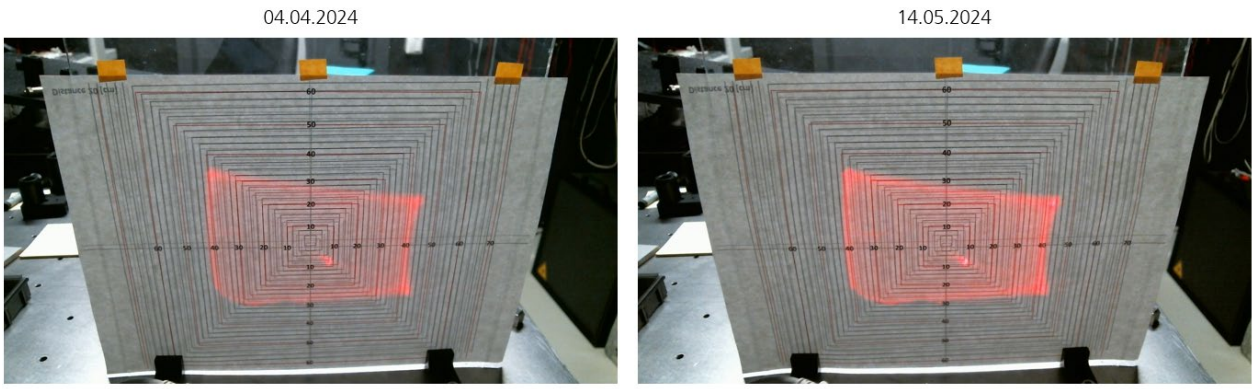


Abbildung 5: Langzeittest MEMS-Spiegel: Lissajousfigur zu Beginn des Tests (links) und nach 6 Wochen Dauerbetrieb (rechts).

Designphase

Sowohl die Spiegelplatte des zu Beginn bereit gestellten MEMS-Spiegels als auch des speziell entwickelten MEMS-Spiegels, im Folgenden als BORO-Spiegel bezeichnet, wird mittels piezoelektrischer Aktoren entlang zweier Torsionsachsen bewegt. Beim verwendeten Designkonzept wird dies durch zwei Aktuatorgruppen realisiert, die ausschließlich durch die Verbindung mit der Spiegelplatte und dem Rahmen mechanisch miteinander gekoppelt sind. Dies ermöglicht die Modifikation der beiden Hauptschwingungsmoden weitestgehend unabhängig voneinander und erleichtert damit die Realisierung eines für die Anwendung optimierten Frequenzverhältnisses.

Die verwendeten MEMS-Spiegel sind für den Betrieb in Resonanz optimiert, sodass die Aktuatorflächen möglichst klein und damit die gesamte Bauteilgröße miniaturisiert werden kann. Um dennoch die notwendigen Auslenkungswinkel der Spiegelplatte und damit das erforderliche optische Sichtfeld des Boroskops umsetzen zu können, müssen die MEMS-Spiegel im Vakuum betrieben werden, um die Q-Faktoren durch eine Reduktion der Luftdämpfung erhöhen zu können. Hierfür werden die MEMS-Scanner hermetisch verkapselt, indem der MEMS-Wafer mit einem speziell hergestellten Siliziumbodenwafer sowie einem kuppelförmig ausgeblasenen Glaswafer zu einem Waferstack gebondet werden. Dies ermöglicht den Betrieb des optischen Scanners im Vakuum, was zu einer signifikanten Erhöhung des Q-Faktors und damit zu einer Verbesserung der realisierbaren optischen Scanwinkel führt.

Basierend auf den technischen Diskussionen mit den Projektpartnern in den verschiedenen Projektmeetings und den Ergebnissen von AP4.1 , konnten die Parameter des zu entwickelnden Boroskops im Projektverlauf geschärft und daraus die Spezifikationen des MEMS-Scanners abgeleitet werden. Als zentrale Anforderungen wurden ein totaler optischer Scanwinkel (TOSA) von 65°, eine Spiegelplatte von mindestens 1 mm, eine maximale Chipgröße von 4,5 × 5,2 mm sowie Resonanzfrequenzen zwischen 7 und 8 kHz bei einem Frequenzverhältnis möglichst nahe 1 festgelegt. Das MEMS-Spiegel-Design, welches die oben genannten Spezifikationen erfüllen soll, wurde mithilfe von Simulationen mit der Finite-Elemente Methode (FEM) entwickelt. Fest vorgegebene Parameter waren hierbei die kritischen Chipaußenmaße von 4,5 mm x 5,2 mm sowie das grundlegende Federdesign des erfolgreichen Vorläuferscanners. Zur Realisierung der geforderten Spezifikationen wurden die folgenden Parameter variiert:

- Breite der Federstrukturen
- Abstände der Federstrukturen
- Dicke des polykristallinen Siliziums
- Größe und Form der Spiegelplatte
- Länge der parallelen Abschnitte der Federn
- Anknüpfungen an der Spiegelplatte
- Rückseitige Masse der Spiegelplatte: Variationen von Dicke und Struktur

Für die Designentwicklung stellt die Kombination aus kleiner Spiegelplatte, geringen Chipaußenmaßen und gewünschten (niedrigen) Frequenzen eine große Herausforderung dar. Die vielversprechendsten Ergebnisse sahen eine ovale Spiegelplatte mit der vollen Waferstärke als rückseitige Masse vor, um die niedrigen Frequenzen bei verhältnismäßig kleiner Spiegelplatte zu

realisieren. Die simulierten Eigenfrequenzen lagen bei 7,72 kHz und 7,95 kHz mit einem Frequenzverhältnis von 0,97, der simulierte TOSA betrug rund 56° bei 20 V Antriebsspannung und einem Q-Faktor von ca. 15.000. Ein zweites Design, mit unterschiedlicher Federstruktur, zeigte Eigenfrequenzen von 7,1 kHz und 7,85 kHz.

Das Ergebnis dieser Eigenfrequenzstudie des favorisierten Designs (für die horizontale Torsionsachse) ist in Abb. 6 dargestellt.

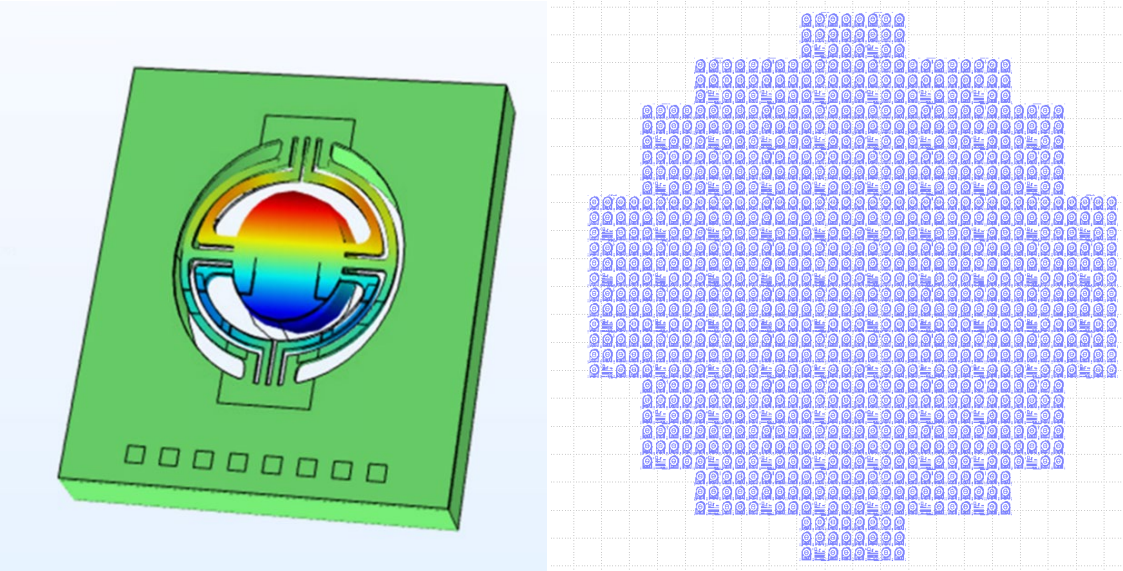


Abbildung 6: links: Ergebnis der FEM-Eigenfrequenzstudie: horizontale Torsionsmode, rechts: Lithographiemaskendesign (Wafermap).

Die aus den Simulationen gewonnenen Designparameter wurden anschließend in ein CAD-basiertes Maskenlayout überführt (vgl. Abb. 6 rechts). Für jede der **neun Lithographieebenen** wurde ein entsprechender Datensatz generiert und die Masken bei externen Herstellern in Auftrag gegeben.

Parallel dazu wurde in der Fertigungssteuerungssoftware CMF ein neuer Prozessflow mit insgesamt **222 Einzelprozessschritten** angelegt. Analog zum Vorläufer-MEMS-Spiegel wird polykristallines Silizium als Basismaterial für die Federstrukturen und Spiegelplatte sowie Aluminiumnitrid als piezoelektrisches Material verwendet.

Glasdomsimulationen

Zur hermetischen Verkappung der MEMS-Spiegel mussten außerdem für das Projekt individuelle Glasdöme entwickelt und hergestellt werden. Hierzu wurden ebenfalls FEM-Simulationen des Herstellungsprozesses, dem heißviskosen Glasformen, durchgeführt. Mittels dieser Simulationen können die Prozessparameter, die zur Herstellung einer bestimmten Domgeometrie benötigt werden, vorab bestimmt werden. Hierzu zählen beispielsweise die Kavitätengeometrie sowie das Temperatur- und Druckprofil. Ein Beispiel einer solchen Prozesssimulation ist in Abb. 7 dargestellt.

Die auf diese Weise ermittelten Prozessparameter bilden hierbei die Ausgangsbasis für die anschließende Fabrikation der Glasdöme auf Waferlevel (siehe Abschnitt Prozessierung der Glaswafer).

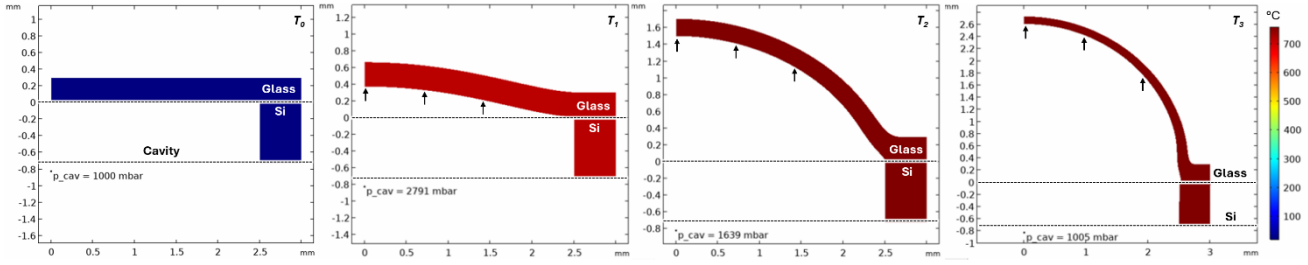


Abbildung 7: Beispiel einer FEM-Simulation des heißviskosen Glasformens. [1]

Prozessierung der MEMS-Wafer

Im Rahmen des Projekts wurden zwei unterschiedliche Bodenelektrodenmaterialien – Molybdän und Platin– parallel verfolgt, weshalb in der Summe zwei vollständige Prozessflows zu entwickeln und zu pflegen waren. Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der Prozessierung der MEMS-Wafer gegeben, weitere Details können den einzelnen Zwischenberichten entnommen werden.

Es wurden insgesamt **100 Wafer** im Reinraum gestartet: 50 MEMS-Wafer für die Spiegelebene (aufgeteilt in zwei Prozessflows), 25 Bodenwafer sowie 25 Glasdeckelwafer. Die Boden- und Glasdeckelwafer werden hierbei benötigt, um die hermetische Verkapselung der MEMS-Spiegel auf Waferlevel und damit die Operation der MEMS-Spiegel im Vakuum zu gewährleisten. Auf diese Weise wird die Luftdämpfung reduziert und damit der Q-Faktor der Schwingung erhöht, sodass höhere Auslenkungswinkel der Spiegelplatte realisiert werden können.

Insgesamt ergibt sich damit eine Vielzahl an Prozessschritten, welche vollständig im Reinraum bzw. angrenzenden Laboren des Fraunhofer ISIT durchgeführt wurden. Beide Prozessflows wurden parallel verfolgt, da Molybdän im Hinblick auf Kosteneinsparungen bei höheren Stückzahlen attraktiver ist, während für Platin am ISIT bereits langjährige Erfahrung vorlag. Zusätzlich wurden aus jedem der beiden Sublose je vier Wafer abgezweigt, um das piezoelektrisch leistungsfähigere Aluminium-Scandium-Nitrid (AlScN) anstelle des Standard-AlN zu evaluieren. Der vereinfachte Fabrikationsfluss des Platin-Flows ist in Abb. 8 dargestellt. Für die MEMS-Spiegel wurden polykristalline Silizium-Wafer aus 725 µm Silizium, 1 µm SiO_2 und 50 µm (bei hohen Temperaturen abgeschiedenem) Polysilizium als Substrat verwendet. Eine zusätzliche 1 µm dicke SiO_2-Schicht auf dem Polysilizium wird von einer aufgedampften dünnen Pt-Schicht überlagert, die als Bodenelektrode dient. Anschließend wird 1 µm AlN bzw. AlScN gesputtert, auf dem eine dünne Mo-Schicht als Topelektrode aufgebracht wird. Nach der Abscheidung aller Funktionsschichten wird die Mo-Schicht zunächst trockengeätzt, um als Hartmaske für die Strukturierung der AlN-Schicht zu dienen. Daraufhin wird die Topelektrodenschicht Mo ein zweites Mal trockengeätzt und anschließend die Bodenelektrodenschicht Pt geätzt. Bevor das 50 µm dicke Poly-Si strukturiert wird, um die Spiegel und Aktuatoren zu definieren, wird eine Metallisierungsschicht, u.a. auf der Spiegelplatte, abgeschieden. Abschließend werden das 725

µm Silizium und das 1 µm SiO_2 von der Rückseite mittels deep reactive ion etching geätzt, um den Spiegel freizustellen.

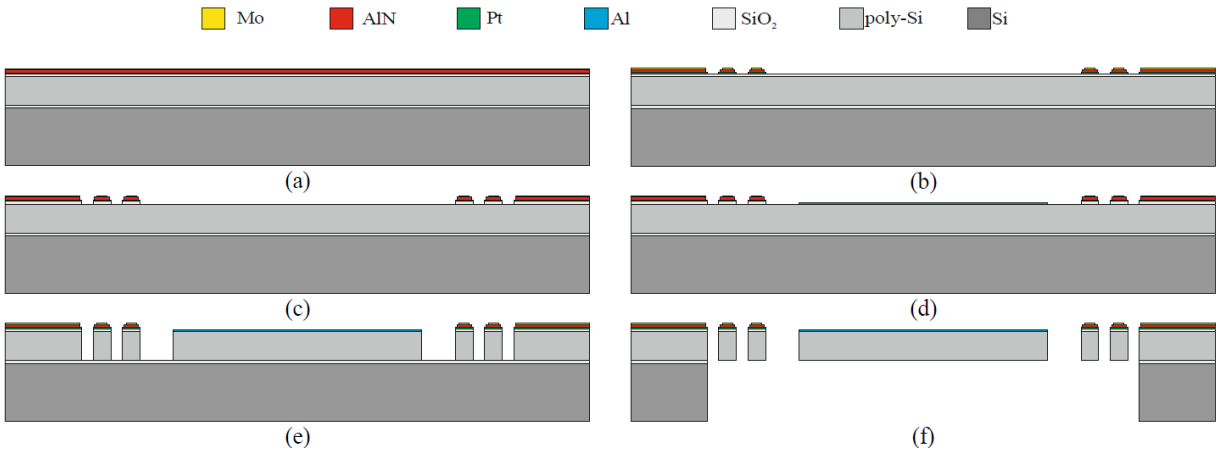


Abbildung 8: Vereinfachter Prozessfluss zur Herstellung der MEMS-Wafer, im Querschnitt dargestellt. (a) Abscheidung der funktionalen Schichten; (b) Strukturierung der Topelektrode, der piezoelektrischen Schicht und der Bodenelektrode; (c) Partielle Entfernung von SiO_2; (d) Abscheidung und Strukturierung der Metallisierung; (e) Strukturierung des polykristallinen Siliziums; (f) Rückseitige Freistellung der Strukturen [2].

Aufgrund der strengen Bauraumbegrenzung musste das Design des MEMS-Spiegels in vielen Aspekten an die technologischen Machbarkeitsgrenzen geführt werden. Dadurch verlief die Prozessierung jedoch nicht ohne Komplikationen (weitere Details siehe Zwischenberichte).

Die Wafer mit Platin als Bodenelektrode zeigten Probleme mit Kurzschlüssen zwischen den Elektroden sowie Abrissen in der Kantenabdeckung. Obwohl diverse Anpassungen der Prozessierung durchgeführt wurden, waren diese Wafer letztlich leider nicht verwertbar.

Die Wafer mit Molybdän als Bodenelektrode zeigten deutlich vielversprechendere Ergebnisse. Zunächst traten jedoch auch hier zunächst Probleme bei den elektrischen Kontrollmessungen beim elektrischen Kontakt zwischen Leiterbahn und Kontaktpad auf. REM-Aufnahmen offenbarten, dass die abgeschiedene Metallisierungsschicht die kritischen Stufen im Chiplayout nicht ausreichend bedeckte und abgerissen war. Als Reaktion wurden neue Masken bestellt, die diesen kritischen Leiterbahnverlauf vermeiden, und gleichzeitig wurde der Metallisierungsprozess optimiert, um eine bessere laterale Benetzung und damit eine zuverlässigere Kantenbedeckung zu realisieren. Die Wafer des zweiten Subloses, die mit den neuen Masken und dem verbesserten Metallisierungsprozess hergestellt wurden, bestanden die elektrischen Tests erfolgreich und wurden mit Glaskappe und Bodenwafer aufgebaut.

Die beschriebenen Herausforderungen bei der Prozessierung der MEMS-Wafer und die Notwendigkeit der Optimierungen im Design und einzelner Fabrikationsschritte haben zu einer längeren Fabrikationszeit und damit zu zeitlichen Verzögerungen bei der Lieferung der MEMS-Spiegel an die Projektpartner geführt.

Prozessierung der Glaswafer

Zur hermetischen Verkappung der MEMS-Scanner wurden mittels der heißviskosen Glasformung Glasdöme auf Waferlevel hergestellt. Eine vereinfachte Darstellung der Prozessierung der Glasdöme ist in Abb. 9 dargestellt.

Zunächst werden Kavitäten in Siliziumwafer geätzt. Anschließend wird der Siliziumwafer mit einem Glaswafer anodisch gebondet. Im Ofen findet dann unter kontrollierten Druck- und Temperaturbedingungen der eigentliche Ausblasprozess statt. Danach wird der Siliziumwafer durch chemisches Ätzen entfernt.

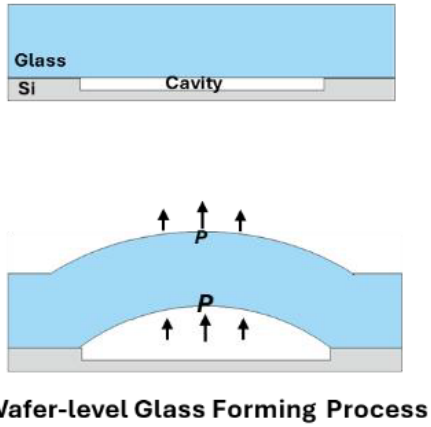


Abbildung 9: Vereinfachter Prozess der heißviskosen Glasformung. [1]

Bondprozess

Eine weitere Herausforderung bei der Fertigung der miniaturisierten, hermetisch verkapselten MEMS-Spiegel ist der Bondprozess, bei dem der Glasdomwafer, der MEMS- und Bodenwafer exakt übereinander gebracht werden müssen. Die für den automatisierten Bond-Prozess notwendigen Alignmentmarken wurden im Rahmen einer gezielten Versuchsreihe optimiert (siehe Zwischenbericht). Der verwendete Ansatz lieferte Alignmentmarken mit scharfen, klar abgegrenzten Konturen, die eine zuverlässige automatische Erkennung durch den Bonder erlauben. Die für MEMS-Boro prozessierten Glaswafer wurden vollständig mit den optimierten Alignmentstrukturen hergestellt, und die Prozessierung verlief reibungslos. Ein Beispiel eines fertig prozessierten MEMS-BORO-Wafers ist in Abb. 10 dargestellt. Ein CT-Scan eines einzelnen MEMS-Spiegels ist in Abb. 11 gezeigt.

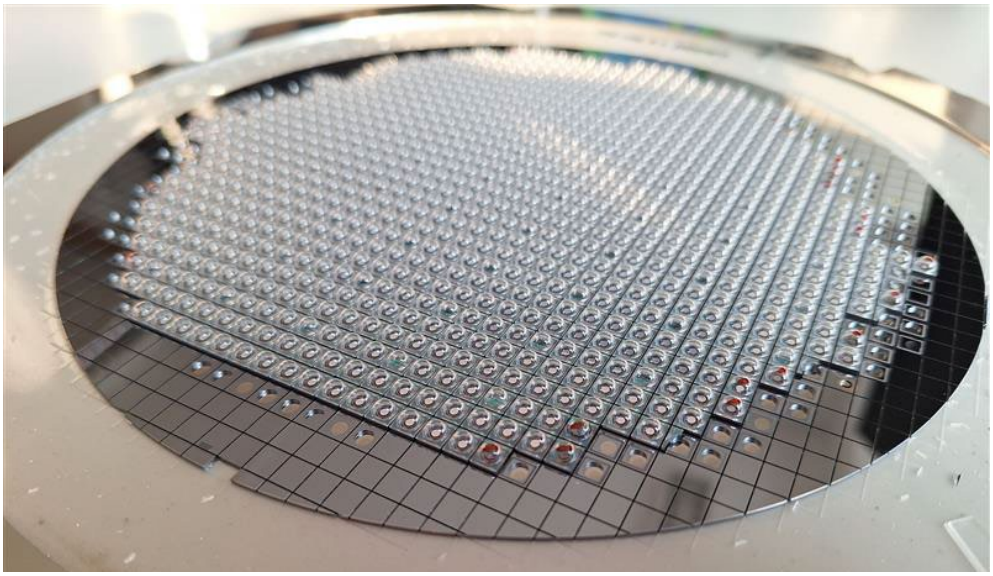


Abbildung 10: Beispiel eines fertig prozessierten MEMS-Boro Wafers; gebondet mit Glaskappen- und Bodenwafer und mit durch Sägen vereinzelten MEMS-Scannern.

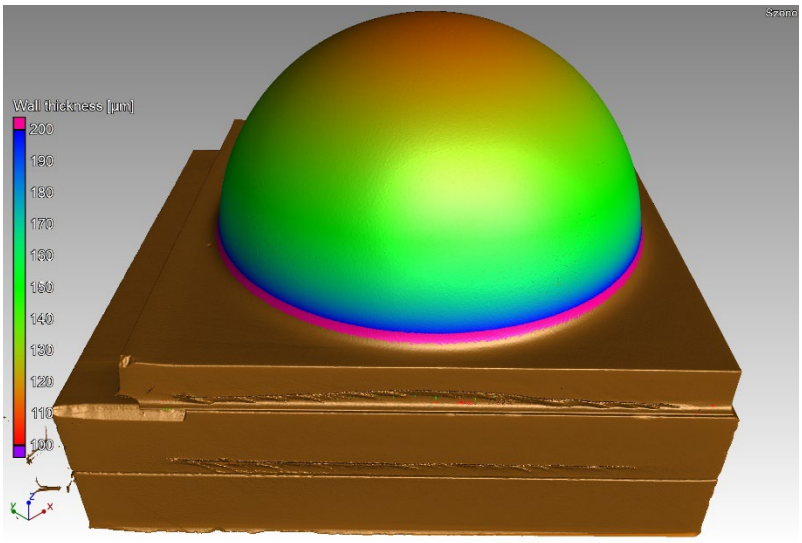


Abbildung 11: CT Scan eines MEMS-BORO-Spiegels.

Charakterisierung

Die MEMS-Spiegel wurden während der Fabrikation an verschiedenen Stellen elektrisch charakterisiert. Hierzu zählen einerseits die genannten elektrischen Messungen auf Waferlevel nach der Strukturierung der Metallisierung. Hier werden die elektrischen Kontakte, Leckströme sowie die Kapazitäten der piezoelektrischen Strukturen bestimmt.

Zusätzlich findet eine finale Messung vor dem Vereinzeln statt. Da in diesem Projekt hohe Anforderungen an die Auslenkungswinkel der MEMS-Spiegel bestehen, wurde diese Messung zusätzlich nach dem finalen Vereinzeln durchgeführt, um eine Selektion geeigneter Spiegel zu erleichtern. Der Vergleich der Messungen vor und nach dem Vereinzeln (s. Abb. 12) zeigt eine Reduktion des Q-Faktors bei einigen Spiegeln, was die Ausbeute pro Wafer reduziert. Eine Verbesserung der Ausbeute kann Gegenstand zukünftiger Entwicklungsarbeiten sein.

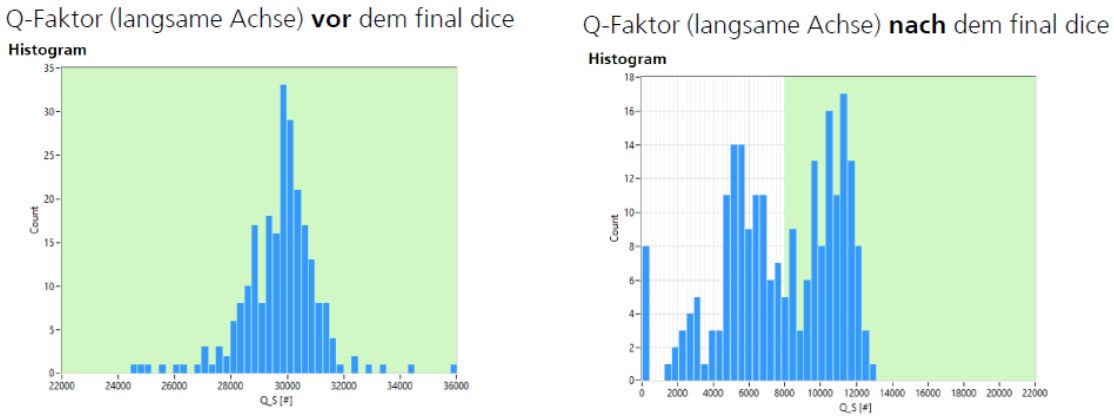


Abbildung 12: Q-Faktor Messungen vor dem finalen Vereinzeln (links) und nach dem Vereinzeln (rechts).

Für die weiteren Funktionstest wurden die MEMS-Scanner auf PCBs aufgebaut. Um eine optimale Performance der MEMS-Spiegel zu gewährleisten, wurden umfangreiche Tests durchgeführt, bei dem verschiedene Klebungen (z.B. hart oder weich) und PCBs getestet wurden (vgl. Abb. 13). Nachdem die vielversprechendste Klebung auf dem benötigten Flex-PCB ermittelt wurde, wurden die weiteren MEMS-Spiegel hiermit aufgebaut und getestet.

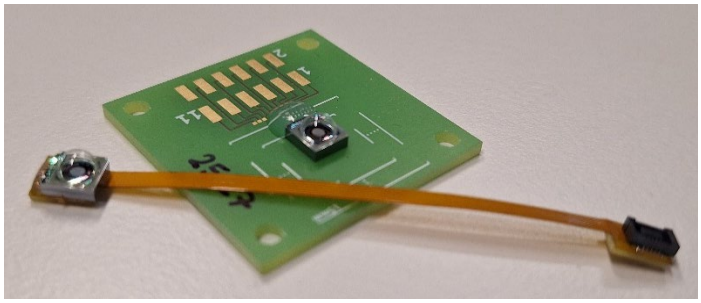


Abbildung 13: MEMS-Spiegel aufgebaut auf verschiedenen PCBs.

Die weiteren Tests wurden im open-loop Betrieb durchgeführt. Hierzu wurde eine Spannung an die piezoelektrischen Aktoren des MEMS-Spiegels angelegt und der Öffnungswinkel über die Einstrahlung eines (grünen) Lasers bestimmt. In diesen Experimenten konnten optische Scanwinkel von bis zu 30° gezeigt werden (vgl. Abb 14 rechts).

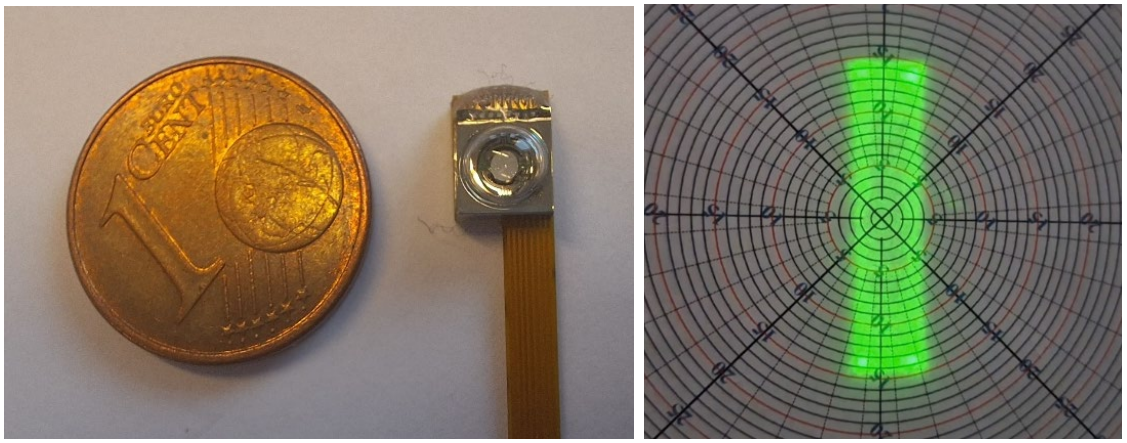


Abbildung 14: links: MEMS-Spiegel, aufgebaut auf Flex-PCB, im Größenvergleich mit einer 1-Cent-Münze. rechts: Beispiels einer mit einem MEMS-Spiegel aufgezogenen Lissajous-Figur.

Parameter	Spezifikation (Plan)	Realisiert
TOSA	65°	25°-30° (1D)
Spiegelplattendurchmesser	Min. 1 mm	1,3/1,6 mm (elliptisch)
Dimensionen Platine	Max. 4,5 mm x 5,2 mm	4,5 mm x 5,2 mm
Frequenzen	7 bis 8 kHz	7,5 – 8,7 kHz
Frequenzverhältnis	Möglichst nah an 1, aber ohne Übersprechen	0,90-0,95
Glasdomverkapselung	Erforderlich	Realisiert, jedoch optische Verzerrungen

Tabelle 1: Gegenüberstellung der geplanten und realisierten Spezifikationen des MEMS-Spiegels.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten, funktionsfähigen MEMS-Spiegel erfüllen die Anforderungen im Hinblick auf die Dimensionen von Spiegelplatte und Chipaußenmaß. Auch die geforderten Eigenfrequenzen der Torsionsmoden sowie das Frequenzverhältnis konnten realisiert werden. Damit konnte die generelle technische Machbarkeit der Miniaturisierung der MEMS-Spiegel gezeigt werden.
Leider erreichen die MEMS-Spiegel jedoch nicht einen optischen Scanwinkel von 65°, sondern maximal 30°, da die aus polykristallinem Silizium bestehenden Federstrukturen bei größeren Auslenkungswinkeln mechanisch brechen. Der Vergleich von SEM-Aufnahmen der defekten MEMS-Spiegel mit den Ergebnissen der Stresssimulationen deutet darauf hin, dass dies auf eine lokale Überlastung der Federstruktur zurückzuführen ist. Vermutlich führt das verwendete Verfahren zum Freistellen der Federstrukturen (Deep Reactive Ion Etching) zu, im Vergleich zur Simulation, erhöhtem Materialstress. An diesem Punkt würde in einer weiteren Design- und Fabrikationsphase an einer Designoptimierung, beispielsweise durch weitere Ausgleichsstrukturen zur weiteren Stressreduktion, gearbeitet werden. Außerdem könnte der Prozess zur Freistellung der Federn, u.a. durch zusätzliches thermisches Ausheilen, optimiert werden.

AP 2.2: Entwicklung Lasermodul

Im Rahmen des AP 2.2 verfolgte das ISIT außerdem das Ziel, eine miniaturisierte Laserlichtquelle mit integrierter Strahlkollimation und präziser Strahllenkung auf den MEMS-Spiegel zu entwickeln. Die Anforderung an das Optikmodul umfasste dabei die Kollimation des Laserstrahls auf maximal 300 µm auf eine Distanz von 200 mm.

In einem ersten Optikkonzept sollte eine Kollimationslinse in Kombination mit einer drehbaren Laserdiode einen runden Strahl erzeugen, während eine Divergenzkompensation durch axiales Verschieben der Laserdiode erreicht werden sollte (vgl. Abb. 20). Für die Realisierung des Optikmoduls wurden folgende Komponenten beschafft: die Laserdiode, ein Prisma, eine Mikrolinse aus dem Bestand sowie eine APD. Die Montage erfolgte in mehreren definierten Schritten, von der Platzierung der Kollimationslinse auf einem UV-Klebstoffbett bis zur abschließenden Feinfokussierung durch Verschieben der Laserdiode.

Im weiteren Projektverlauf konnte gezeigt werden, dass mit dem Laserdioden-Ansatz eine Strahlkollimation von 300 µm auf 200 mm Distanz grundsätzlich erreichbar ist. Gleichzeitig wurden jedoch wesentliche Nachteile identifiziert: Das Gehäuse der Laserdiode beansprucht zu viel Bauraum, die entstehende Wärme gefährdet die Systemstabilität und die aktive Linsenjustage ist äußerst aufwändig und nur mit hochpräzisen Montagemaschinen realisierbar. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde daher ein grundlegend neues Konzept entwickelt.

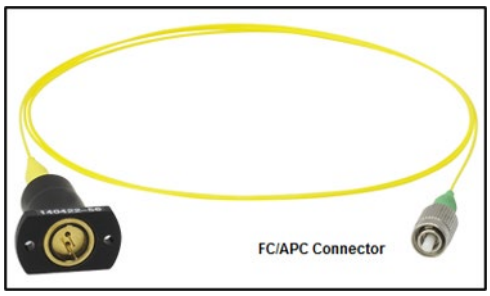


Abbildung 15: Thorlabs LP520-SF15 - 520nm

Im neuen Ansatz wird das Laserlicht über eine optische Singlemode-Faser geführt und über eine an die Faser gekoppelte Optik auf den MEMS-Spiegel gelenkt. Als Lichtquelle wird die fasergekoppelte Laserdiode Thorlabs LP520-SF15 mit grünem Laserlicht (520 nm) eingesetzt, die neben dem Dauerstrichbetrieb auch den gepulsten Betrieb unterstützt.

In Zusammenarbeit mit der Firma Grintech wurde schließlich eine Glasfaser mit integriertem Optikmodul auf Basis einer Grin-Linse entwickelt. Der Linsenaufbau aus Grin-Linse und Fokussierlinse wird direkt in eine Glasferrule von 1,8 mm Durchmesser am Ende der Singlemode-Faser eingeklebt und anschließend in ein Edelstahlrohr mit einem Außendurchmesser von lediglich 2 mm und einer Länge von 10 mm eingesetzt. Ein Prisma lenkt den Strahl so ab, dass er im gewünschten Winkel auf den MEMS-Spiegel gerichtet ist. Das Prisma kann manuell in die optische Achse des Aufbaus eingesetzt und mit dem Träger verklebt werden. Weitere Flexibilität bietet die Trennung von optischer Faser und Lichtleitfaser über einen FC/PC-Adapter, der es ermöglicht, beliebige fasergekoppelte Laserdioden anzuschließen.

Das angestrebte Spezifikationsziel eines kollimierten Strahls von 300 µm Durchmesser konnte mit diesem Ansatz deutlich übertroffen werden. Es wurde ein Strahldurchmesser von lediglich **140 µm** gemessen, was die laterale Auflösung des Gesamtsystems erheblich verbessert und sich positiv auf das gesamte Messsystem auswirkt.

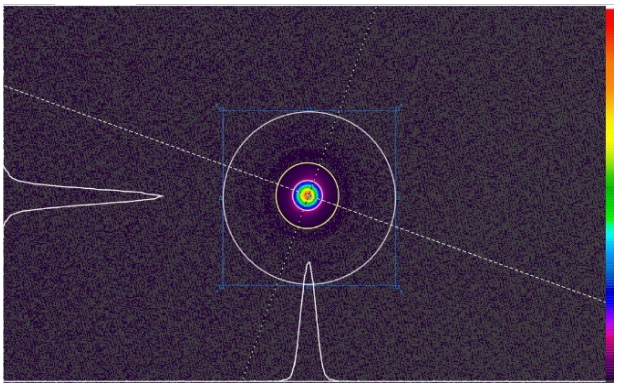


Abbildung 16: Realisiertes Laserstrahlprofil

d) AP2.3 Entwicklung der Ansteuerungs- und Auswerteelektronik

AP 2.3 wurde federführend von der Leder Elektronik Design GmbH bearbeitet, wobei das ISIT über den gesamten Bearbeitungszeitraum beratend unterstützte und das Wissen im Bereich der Spiegelaktuatorik, Positionsauswertung und Laseransteuerung einbrachte.

In der ersten Phase wurden, basierend auf den Ergebnissen aus AP2.1, die konzeptionellen Grundlagen für die zu entwickelnde Elektronik definiert. Zunächst wurden die wichtigsten Charakteristika der MEMS-Spiegel erläutert, darunter der piezoelektrische Antrieb, der resonante Betrieb, die Phasenregelung sowie das Feedback über die Sensorstrukturen.

Als Orientierungsrahmen stellte das ISIT ein bereits für andere Applikationen entwickeltes elektronisches Gesamtkonzept auf Basis eines FPGA (Field Programmable Gate Array) zur Verfügung (s. Abb. 17). Dieses Konzept umfasste alle wesentlichen Teilfunktionen, darunter die Scanneransteuerung, die Bereitstellung der Video- und Displayfunktionalität sowie die Laserquellen-Ansteuerung. Das FPGA bildet dabei die zentrale Steuereinheit, in der alle notwendigen Algorithmen, das Speichermanagement sowie die pixelgenaue Datenaufbereitung für die Lasereinheit implementiert sind.

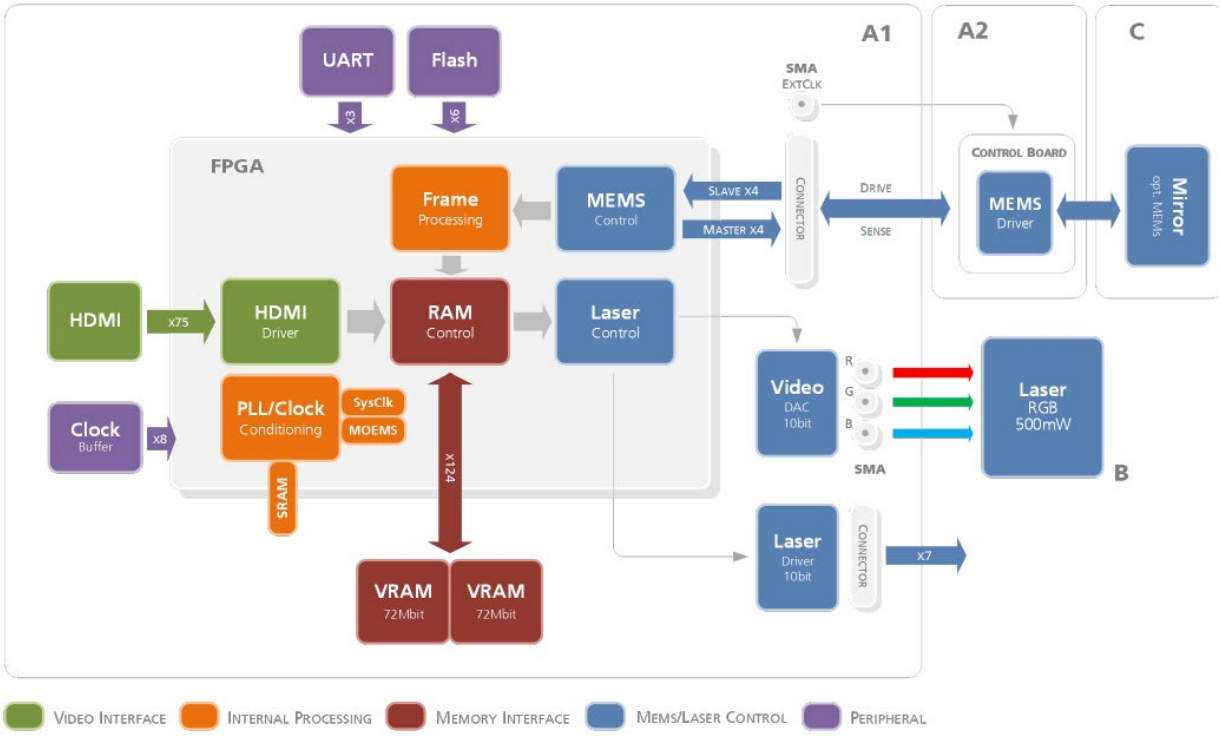


Abbildung 17: Blockschaltbild Gesamtelektronik des ISIT Laserprojektionssystems. [3]

Im weiteren Projektverlauf wurden die Arbeiten zur Elektronikentwicklung vertieft und konkretisiert. Das ISIT lieferte hierbei detaillierten Input zu drei zentralen Themenbereichen:

1. Ansteuerung des 2D-MEMS-Scanners: Die Signalkonditionierung für den Antrieb sowie die Auswertung der Sense-Kanäle wurden im Detail besprochen und erläutert.

2. Closed-Loop-Regelung: Das ISIT erläuterte die Funktionsweise der Phasenregelung, der Demodulation der Sensorsignale sowie der automatisierten Startup-Routine, bei der die Grundparameter für das Aufschwingen der Scanner – insbesondere der Frequenzbereich und die Amplituden – hinterlegt werden.

3. Entzerrung von Bildverzerrungen: Da die Einstrahlparameter des Lasers auf die Spiegelplatte sowie winkelabhängige Faktoren geometrische Verzerrungen der gescannten Fläche

verursachen, wurde die am ISIT entwickelte Korrekturalgorithmik vorgestellt, die in der FPGA-Ansteuerungselektronik implementiert ist.

Diese Inhalte wurden auf Basis des am ISIT vorhandenen Scanner-Testaufbaus, mit dem die unterschiedlichen MEMS-Scanner-Typen hinsichtlich der für den geregelten Betrieb notwendigen Parameter bestimmt werden, sowie mittels eines Laserprojektionssystems (vgl. Abb. 18) praktisch demonstriert.

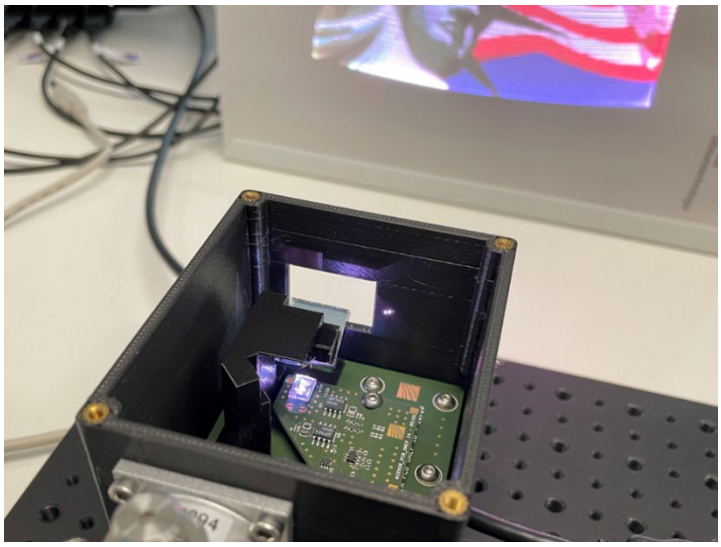


Abbildung 18: Teil des Laserprojektionssystems mit aktiver Projektion im Hintergrund. [3]

Ergänzend demonstrierte das ISIT das **3D-LIDAR-Messprinzip mit Sub-Nyquist-Abtastung** anhand einer in einem vorherigen Projekt entwickelten Kamera das Messprinzip einer LiDAR-Kamera (vgl. Abb. 19). Hier beleuchtet ein digital modulierter CW-Laser eine Oberfläche. Die Phasendifferenz zwischen ausgesendeten und reflektierten Laserimpulsen wird mittels eines Sub-Nyquist-Algorithmus zur Abstandsbestimmung ausgewertet. Dieses Verfahren unterscheidet sich vom klassischen Time-of-Flight-Prinzip und ermöglicht eine präzise 3D-Rekonstruktion in Form von Tiefenbildern und Punktwolken. Im Rahmen des Projekts wurden erste Testaufnahmen mit dieser Kamera durchgeführt (vgl. Abb. 19).

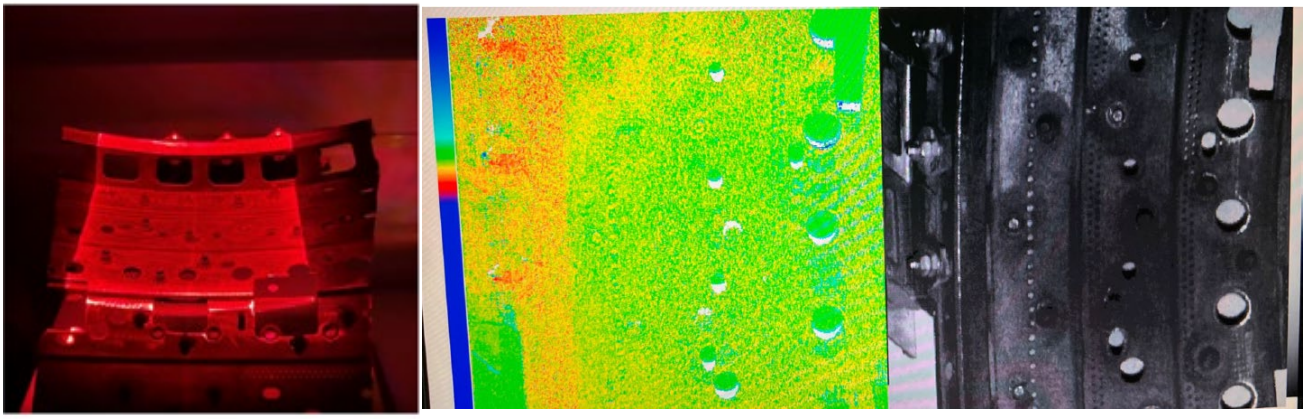


Abbildung 19:Aktive Anwendung der ISIT 3D-Lidar-Kamera. Links: Projizierte Beispiel-Szene eines Stücks einer Triebwerksschaufel. Mitte: Phasenverschiebungsbild, Rechts: Amplitudenbild.

e) AP 2.4 Integration von MEMS, Laser und Bildsensor zu 3D-Kamera

Ziel des Arbeitspakets 2.4 war die Kombination eines MEMS-Spiegels, des Lasermoduls und eines Bildsensors (APD) zu einer 3D-Kamera, die in AP4.2 in den Boroskopkopf eingebaut werden sollte. Dadurch sind die Arbeiten eng mit AP2.2 (Entwicklung MEMS und Lasermodul) und AP 4.2 (Integration der MEMS-3D-Kamera in den Boroskopkopf) verknüpft, da sämtliche konstruktiven Überlegungen stets mit Blick auf die räumlichen Gegebenheiten des Boroskopkopfes erfolgten.

In einer ersten Konzeptphase wurde ein CAD-Modell für die Anordnung der optischen Komponenten erarbeitet, welches in Abb. 20 dargestellt ist. Das Konzept sah eine optische Entkopplung durch Sektorwände und individuelle Fenster vor, wobei eine Kollimationslinse in Kombination mit einer drehbaren Laserdiode einen runden Strahlpunkt erzeugen sollte. Eine Divergenzkompensation sollte durch axiales Verschieben der Laserdiode erreicht werden. Um das Hauptarbeitsfeld des MEMS-Spiegels senkrecht zur Boroskopachse realisieren zu können, muss der MEMS-Spiegel entsprechend verkippt werden. Der benötigte Einstrahlwinkel wird über ein spezielles Strahlablenkungsprisma realisiert. Im Empfängerbereich des Boroskopkopfes sind Halterungen für die Avalanche Photodiode (APD) sowie für eine miniaturisierte Kamera vorgesehen. Die benötigten Komponenten ließen sich in einem Gehäuse von 8 mm Außendurchmesser unterbringen und so justieren, dass eine Strahlkollimation von 300 µm auf eine Distanz von 200 mm erreicht wird, wie in Abschnitt zu AP2.2 beschrieben.

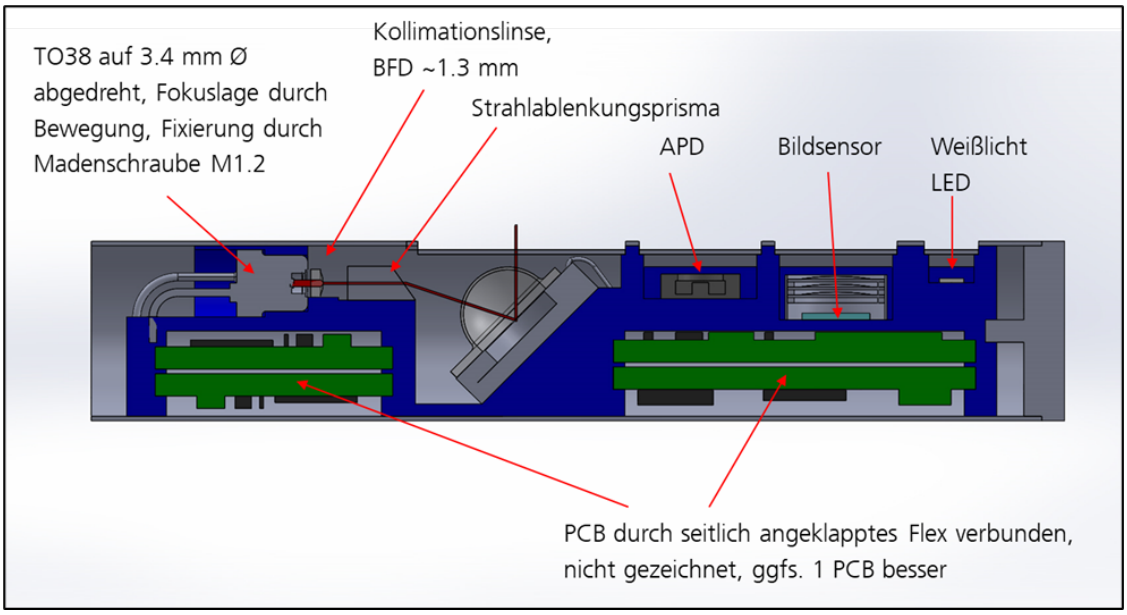


Abbildung 20: CAD-Modell Boroskopkopf mit optischen Komponenten – Rohr mit 7,6 mm Innendurchmesser

Auf Basis dieses Konzepts (vgl. Abb. 21) wurde ein optischer Träger konstruiert und gefertigt. Der Träger wurde aus Messing hergestellt, um eine ausreichende Wärmeableitung für die Laserdiode sicherzustellen, und kann in ein Rohr mit 7,6 mm Innendurchmesser eingeschoben werden (vgl. Abb. 22). Er verfügt über eine Präzisionsbohrung für die Führung der Laserdiode, die es ermöglicht, die Diode sowohl zu rotieren als auch axial vor- und zurückzuschieben, um den Strahl zu fokussieren und die Strahldivergenz zu kompensieren. Eine integrierte optische Bank trägt Linse und Prisma und bietet die Möglichkeit, das Prisma in seiner Position zu verschieben, um den Laserstrahl präzise auf die Mitte des MEMS-Spiegels auszurichten. Eine geneigte Fläche dient der Aufnahme des MEMS-Spiegels, sodass der Strahl orthogonal nach oben aus dem Boroskopkopf austreten kann.

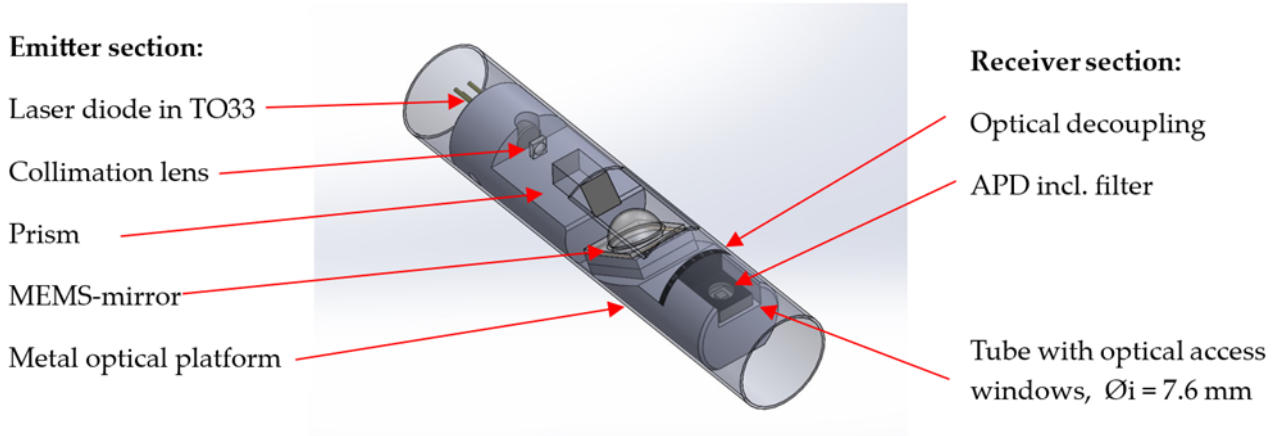


Abbildung 21: CAD-Konzept des optischen Moduls mit Sender- und Empfängerbereich. [4]

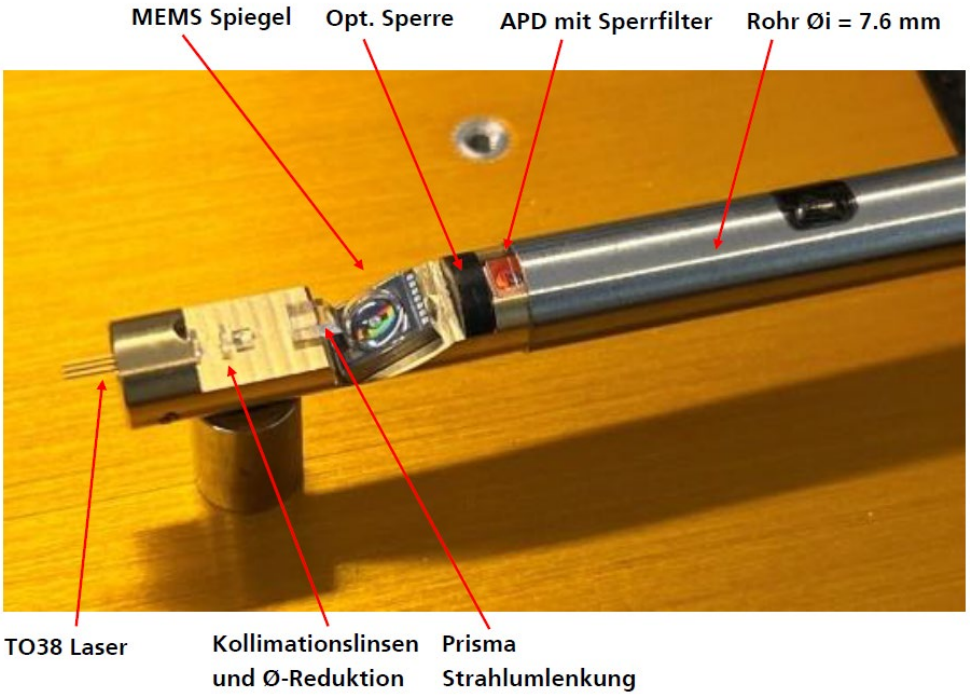


Abbildung 22: Demonstrator: bestückter Messingträger

Für die Montage und Fokuseinstellung wurde ein detaillierter Montageablauf entwickelt. Dieser beginnt mit der Montage des MEMS-Spiegels und dem anschließenden, lageorientierten Einsetzen des Laserdiodengehäuses. Die Kollimationslinse wird auf einem UV-Klebstoffbett in der durch Fernfeldcharakterisierung des Laserstrahls ermittelten Einbauposition platziert und durch UV-LED-Beleuchtung in dieser Position fixiert. Eine abschließende Feinfokussierung zur Kompensation der durch die Glaskuppel des MEMS-Scanners verursachten Strahldivergenz erfolgt durch axiales Verschieben der Laserdiode, die dann durch UV-Kleber und einen zusätzlichen mechanischen Klemmmechanismus dauerhaft fixiert wird.

Im Zuge der weiteren Entwicklung zeigte sich jedoch, dass dieser direkte Laserdioden-Ansatz mit erheblichen praktischen Nachteilen verbunden ist. Das TO33-Gehäuse der Laserdiode nimmt vergleichsweise viel Bauraum in Anspruch und erschwert die Kabelführung an der Vorderseite der Kopfbaugruppe erheblich. Darüber hinaus erzeugt die Laserdiode in unmittelbarer Nähe zum Spiegel und den optischen Komponenten Wärme, was die thermische Stabilität des Gesamtsystems beeinträchtigt und im ungünstigsten Fall zu einem Überhitzen des Lasers und damit zu Instabilitäten im Betrieb führen kann. Zudem erwies sich die aktive Justage der Mikrolinsen und des Prismas als sehr aufwändig und praktisch nur mit hochpräzisen Montagevorrichtungen realisierbar.

Deshalb wurde die Machbarkeit eines faserbasierten Ansatzes evaluiert, bei dem das Licht über eine optische Singlemode-Faser vom Handgriff des Boroskops zum Kopf geführt und dort über eine direkt an die Faser gekoppelte Mikrooptik kollimiert auf den MEMS-Spiegel gelenkt wird.

Dieses Konzept löst die wesentlichen Probleme des direkten Laserdioden-Ansatzes: Die gesamte Wärme, die die Laserdiode erzeugt, wird in den Handgriff des Boroskops verlagert, wo ausreichend Bauraum für eine stabile Kühlung zur Verfügung steht. Der kompakte Linsenaufbau mit einem Außendurchmesser von lediglich 2 mm und einer Länge von 10 mm spart wertvoller Bauraum in der Kopfbaugruppe ein. Eine aufwändige aktive Linsenjustage entfällt vollständig. Zusätzliche Flexibilität ergibt sich durch die Trennung von Laserdiode und Optikfaser, die über einen FC/PC-Adapter miteinander verbunden werden – dadurch können im Prinzip beliebige fasergekoppelte Laserdioden angeschlossen werden, ohne den optischen Aufbau im Kopf zu verändern.

Als Lichtquelle wurde zunächst die fasergekoppelte Laserdiode Thorlabs LP520-SF15 ausgewählt, welche im weiteren Projektverlauf durch eine Spezialanfertigung der Firma Grintech ersetzt wurde. Um den kollimierten Laserstrahl schließlich im richtigen Winkel auf den MEMS-Spiegel zu lenken, wird ein Prisma verwendet, das den Strahl ablenkt und es dem MEMS-Spiegel damit ermöglicht, ein Sichtfeld vertikal nach oben zu erzeugen. Das Prisma kann manuell in die optische Achse des Aufbaus eingesetzt und mit dem Träger verklebt werden. Das CAD-Modell des faserbasierten Aufbaukonzepts des Boroskopkopfes ist in Abb. 23 gezeigt.

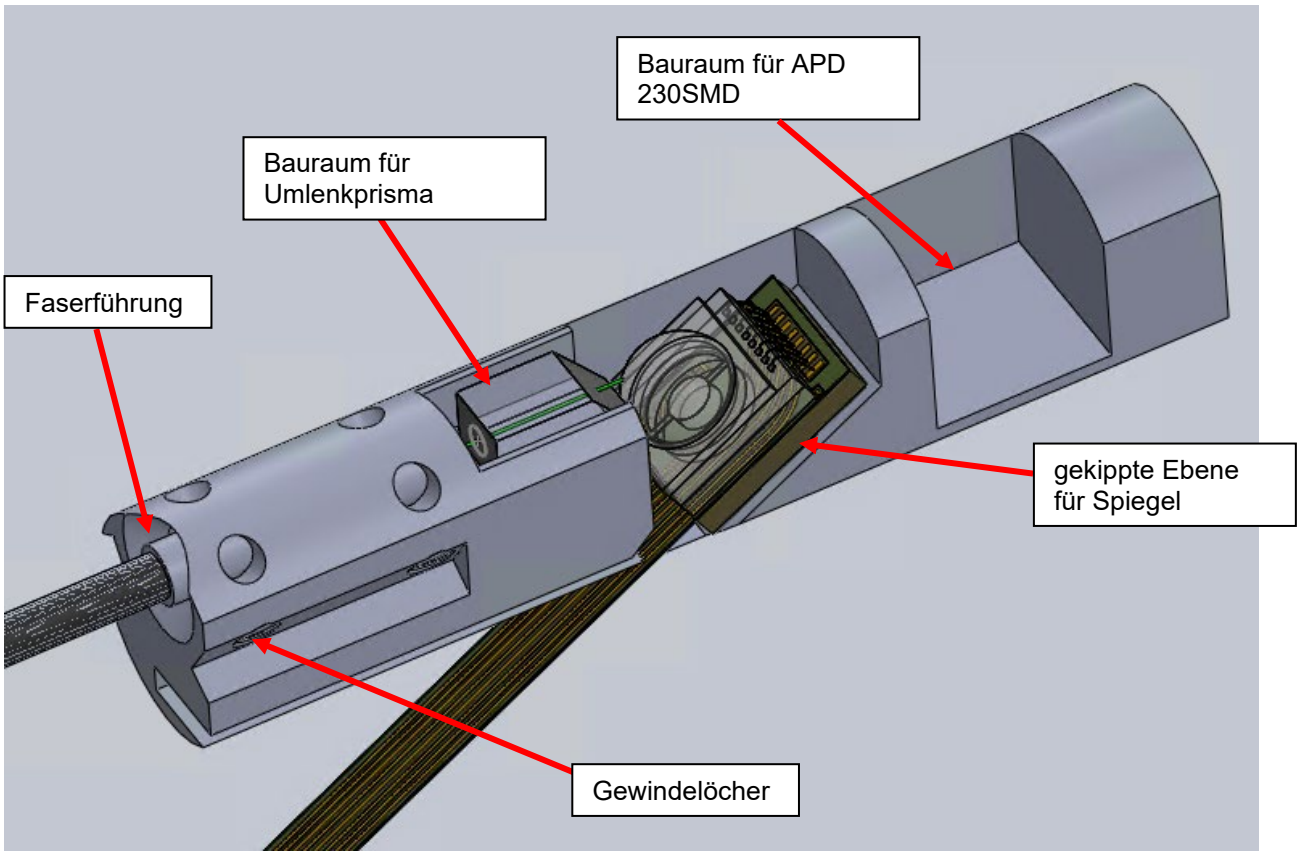


Abbildung 23:Kopfbaugruppe mit Laserfaserführung, Umlenkprisma, Spiegelkippung und Platzhalter für APD.

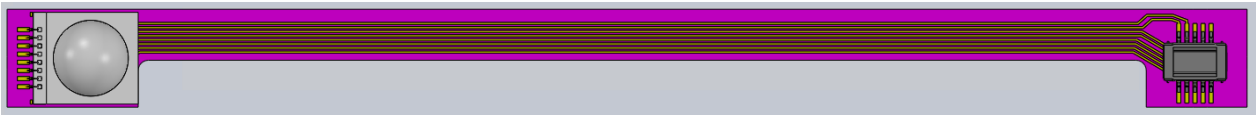


Abbildung 24:Flex-PCB-Layout mit SMD-Stecker und MEMS-Spiegel

In Zusammenarbeit mit der Leder Elektronik Design GmbH wurde zudem ein Flex-PCB-Layout entwickelt, das die elektrische Kontaktierung des Spiegels über einen SMD-Stecker ermöglicht und gleichzeitig eine mechanische Flexibilität für die Spiegelkippung ohne Leitungsbruch gewährleistet (vgl. Abb. 24). Die benötigten Stecker wurden am ISIT dann auf die PCBs gelötet, die MEMS-Spiegel aufgeklebt und drahtgebondet.

f) AP 2.5 Herstellung eines Demonstrators (Proof of Concept)

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Demonstratoren aufgebaut, deren Baugröße stetig verkleinert wurde.

Ein erster öffentlichkeitswirksamer Einsatz eines Demonstrators erfolgte auf der Internationalen Luftfahrtausstellung (ILA) 2024, wo das Konsortium einen Boroskop-Demonstrator im Maßstab 4:1 auf dem Gemeinschaftsstand des BMWK präsentierte. Hierfür stellte das ISIT einen MEMS-Spiegel der Generation 0 zu Verfügung, da der finale MEMS-Boro-Scanner zu diesem Zeitpunkt noch nicht fertiggestellt war.

Auch für den 2:1 Demonstrator wurde ein MEMS-Spiegel der Generation 0 verwendet, welcher auf einem Flex-PCB, ähnlich zu Abb. 24, aufgebaut wurde. Der mechanischer Träger für die Kopfbaugruppe des Boroskops wurde mittels SLA-Druckverfahren gefertigt. Dieser Träger integrierte die optische Faser, das Umlenkprisma, den MEMS-Spiegel sowie die APD und ist so konstruiert, dass er in ein Rohr mit 16 mm Innendurchmesser passt. In Abb. 25 ist ein Foto der Projektionseinheit eines Demonstrators abgebildet, während gerade eine Lissajous-Figur auf einen Projektionsschirm projiziert wird. Die Ansteuerung erfolgt hierbei über die von der Leder Elektronik Design GmbH entwickelte FPGA-basierte Elektronik.

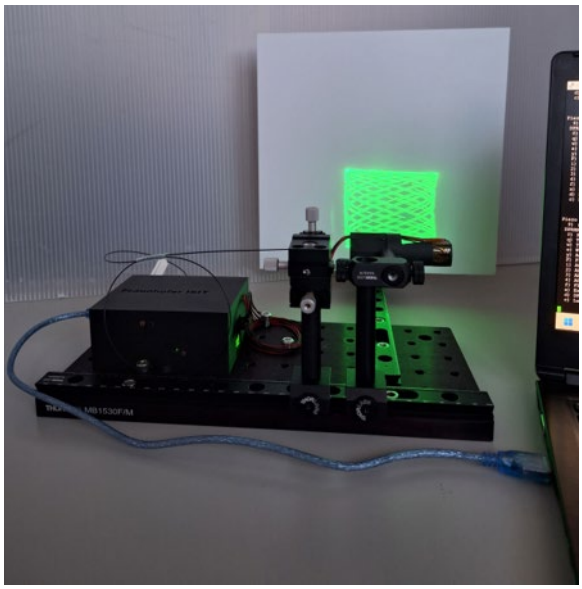


Abbildung 25: Projektionseinheit eines Demonstrators, bei der der Boroskopkopf einen Außendurchmesser von 16 mm hat.

g) AP4.1 Anforderungsanalyse MEMS-Boroskop

Ziel von AP4.1 war die Erstellung einer detaillierten Anforderungsanalyse für das MEMS-Boroskop, vor allem im Hinblick auf die optische und elektrische Auslegung des Boroskopkopfes. Diese wurde maßgeblich von der IT Concepts GmbH erarbeitet, wobei das ISIT inhaltlich unterstütze. Aus den Ergebnissen dieser Anforderungsanalyse wurden direkte Anforderungen an die MEMS-Spiegel und das Lasermodul sowie für die Ansteuerungs- und Auswertelektronik abgeleitet. Die Anforderungen an das zu erreichende Sichtfeld des MEMS-Spiegels wurde, im Vergleich zur Antragsstellung, von 50° x 30° auf 65° x 65° erhöht. Die weiteren Ergebnisse der Anforderungsanalyse im Hinblick auf die MEMS-Spiegel-Spezifikationen sind in Ab. 26 zusammengefasst.

Parameter	**Anforderung**
TOSA	65°
Spiegelplattendurchmesser	Min. 1 mm
Dimensionen Platine	Max. 4,5 mm x 5,2 mm
Frequenzen	7 bis 8 kHz
Frequenzverhältnis	Möglichst nah an 1, aber ohne Übersprechen

Tabelle 2: Anforderungen MEMS-Spiegel

h) AP 4.2 Integration von MEMS-3D-Kamera in Boroskopkopf und AP3: Herstellung eines Demonstrators

Im Rahmen des AP 4.2 sollte die entwickelte MEMS-3D-Kamera in den Boroskopf integriert werden. Alle konstruktiven und optischen Entwicklungsarbeiten aus AP 2.2 und AP 2.4, insbesondere die Entwicklung des Lasermoduls, sind dabei von Beginn an auf die späteren Integrationsanforderungen ausgerichtet gewesen. Die vorgegebenen CAD-Layouts und Dimensionen von IT Concepts und Leder Elektronik Design GmbH wurden kontinuierlich mit den ISIT-eigenen CAD-Layouts abgeglichen und alle Komponenten entsprechend angeordnet und dimensioniert. Auch die Positionierung und Anpassung der Elektronikbaugruppen an die räumlichen Gegebenheiten des Boroskopkopfes wurden intensiv diskutiert und geplant.

Der finale Träger wurde schließlich mit einem SLA-Drucker gedruckt, der die optische Faser, das Prisma, den Spiegel und die APD trägt (s. Abb. 27). Der Träger ist so konstruiert, dass er in ein Rohr mit einem Innendurchmesser von 7,6 mm passt. Die Faser wird von vier Schrauben gehalten, mit denen sie justiert und schließlich dauerhaft fixiert werden kann. Davor ist das Umlenkprisma montiert, das in einer optischen Achse mit dem Laserstrahl liegt. Von dort trifft der Laserstrahl auf den geneigten MEMS-Spiegel, der auf einer flexiblen Leiterplatte montiert ist. Optisch entkoppelt und vor Laserlicht geschützt ist auf der Rückseite die APD angebracht, um Time of light-Messungen zu ermöglichen. Die APD ist am ISIT mit einem speziellen Sperrfilter ausgestattet worden und lässt nur grünes Laserlicht durch.

Für die elektrische Kontaktierung und mechanische Integration des MEMS-Spiegels in die Kopfbaugruppe wurde der Spiegel auf der Flexplatine verklebt und mittels Drahtbonden elektrisch kontaktiert. Nach außen hin erfolgt die Kontaktierung über einen SMD-Stecker. Der flexible Anteil des Kabels erlaubt dabei das Kippen des Spiegels in die gewünschte Position, ohne dass es zu Leitungsbrüchen kommt. Für eine erhöhte mechanische Stabilität wurden 0,5 mm dicke Leiterplattenabschnitte unterhalb des Spiegels und des SMD-Steckers integriert.

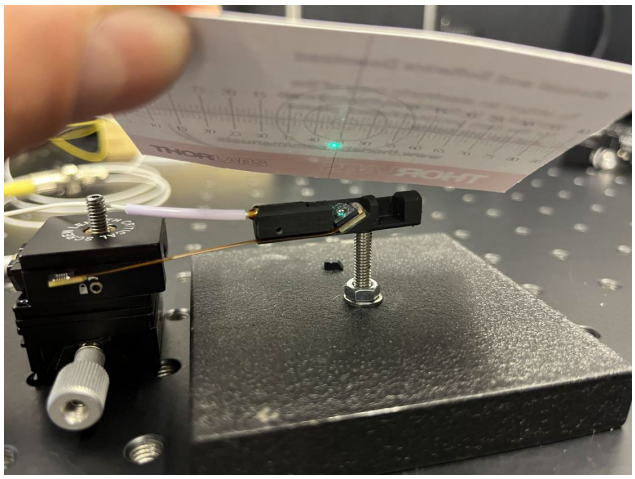


Abbildung 26: 1:1 Demonstrator des Boroskopkopfes mit den Bauelementen: MEMS-Spiegel, Laserfaser, Ablenkprisma.

Wie in Abb. 27 gezeigt, konnte mithilfe dieses Boroskopkopfdemonstrators gezeigt werden, dass es möglich ist, die optischen Komponenten so zu miniaturisieren, dass sie in ein Rohr mit einem Innendurchmesser von 7,6 mm passen. Gleichzeitig konnte die Prismastrahlumlenkung, Divergenzkompensation und die generelle Funktionalität des miniaturisierten MEMS-Spiegels gezeigt werden.
Aufgrund der diversen Verzögerungen im Projektverlauf konnte die finale Demonstration der Funktionalität, d.h. unter anderem die Time-of-Flight Messungen mit dem finalen Demonstrator, jedoch nicht gezeigt werden.

i) AP5.1: Integration Hard- und Softwaremodule

In AP 5.1 sollten alle bisher entwickelten Teilsysteme, sowohl auf der Hardware- als auch auf der Softwareseite – erstmalig zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammengebracht werden mussten. Aufgrund der diversen Verzögerungen im Projekt konnte die vollständige Systemintegration aller Hardware und Softwarekomponenten bis zum Projektende nicht durchgeführt werden. Aufgrund der fortwährend engen Zusammenarbeit der Konsortionalpartner im Laufe des Projekts konnten jedoch die Teilkomponenten des Lasermoduls, des MEMS-Spiegels sowie die Elektronik zur Ansteuerung und Auslese des MEMS-Spiegels erfolgreich kombiniert werden.

j) AP 5.3: Dokumentation & wissenschaftliche Verwertung:

Unter der Leitung des IFPT wurde während der Projektlaufzeit ein wissenschaftlicher Artikel mit dem Titel „Advancements in Aircraft Engine Inspection: A MEMS-Based 3D Measuring Borescope" in der Fachzeitschrift MDPI Aerospace veröffentlicht. Die Publikation beschreibt das Mess- und Aufbau Konzept des Boroskops und stellt die einzelnen Komponenten, wie beispielsweise den MEMS-Spiegel, im Detail vor. Weiterhin wird das Konzept im Hinblick auf die speziellen Anforderungen an Boroskope im Kontext von Triebwerksinspektionen betrachtet.
Desweiteren wurde die Projektidee auf Fachtagungen, wie beispielsweise der Microtec Nord, in Form eines Vortrags vorgestellt.

k) HAP6: Prozessdemonstration und Auswertung

Die ursprünglich in HAP6 geplante Demonstration des Gesamtsystem aus HAP5 unter realen Testbedingungen konnte im Rahmen der Projektlaufzeit leider nicht abschließend durchgeführt werden. Dies ist vor allem auf die erheblichen Verzögerungen in der Hardwareentwicklung und den dadurch bedingten Verzögerungen bei der Systemintegration zurückzuführen.
Im Bezug auf die Validierung der am ISIT zu entwickelnden Komponenten - des miniaturisierten MEMS-Spiegels sowie des Lasermoduls- konnte jedoch die technische Machbarkeit nachgewiesen werden. Der MEMS-Spiegel erfüllt, mit Ausnahme des finalen Sichtfeldes, alle Anforderungen. In nachfolgenden Arbeiten wären die Hauptentwicklungspunkte die weitere

Optimierung des optischen Scanwinkels und der Waferausbeute sowie die Integration einer Kompensationsoptik zur Reduktion der Effekte des Glasdoms.
Die im Projekt entwickelte Illuminationseinheit, bestehend aus Lasermodul und Ablenkprisma, übererfüllt die Anforderungen.

2.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten bilden aufgrund der personalintensiven Tätigkeiten des ISIT (u.a. FEM-Simulationen, Design, Entwicklung, Fertigung, Charakterisierung der MEMS-Spiegel und des Lasermoduls) die größte Position im zahlenmäßigen Nachweis. Die zweitgrößte Position sind die Materialkosten, worunter die Anschaffung der notwendigen Hardwarekomponenten für das Lasermodul (z.B. Fasern, Optikkomponenten) sowie für die Fertigung der MEMS-Spiegel (z.B. Lithographiemasken, Si-/Glaswafer) zusammengefasst sind.
Im Laufe des Projekts musste die Zeit- und Kostenplanung angepasst werden, so dass hier zwei Änderungsanträge beim Projektträger eingereicht wurden.
Zum einen wurde ein Antrag auf kostenneutrale Projekt-Laufzeitverlängerung von 6 Monaten gestellt, da es u.a. bei der Fertigstellung der MEMS-Scanner zu Verzögerungen gekommen ist. Zum andern hat das ISIT einen Antrag auf Mittelumwidmung gestellt, da die Arbeiten zur Herstellung der MEMS-Scanner durch aufgetretene Schwierigkeiten länger als geplant dauerten und damit auch deutlich personal-intensiver waren, als ursprünglich geplant.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die angestrebten Entwicklungen im Bereich MEMS-Spiegeldesign, hermetischer Glasverkappung, Laserstrahlablenkung sowie der optische Aufbau waren technologisch anspruchsvoll und erforderten erhebliche Ressourcen.
Bedingt durch die hohen Anforderungen an die Funktionalität des MEMS-Spiegels sowie der begrenzten Projektlaufzeit wurden, wie im Detail im technischen Bericht beschrieben, verschiedene Fertigungstechnologien parallel durchgeführt und evaluiert. Deshalb wurden insgesamt 100 Wafer gestartet, die jeweils im Durschnitt ca. 200 Prozessschritte durchlaufen haben.
Die geleisteten Arbeiten waren aus Sicht des Fraunhofer ISIT stets notwendig und angemessen.

2.3 Nutzen und Verwertbarkeit

Die entwickelte miniaturisierte MEMS-Scannereinheit ist für viele weitere Anwendungen attraktiv, bei denen entweder der Bauraum oder das Gewicht begrenzt sind. Als Beispiel ist hier u.a. der Einsatz in miniaturisierten optischen Scanner im medizinischen Bereich zu nennen.
Aufgrund der geringen Größe der Spiegelplatte können die entwickelten MEMS-BORO-Spiegel durch geringe Änderungen in der Fabrikation außerdem sehr schnelle Eigenfrequenzen von mehreren zehn kHz erreichen. Dadurch werden sie für eine Vielzahl weiterer Anwendungen, beispielsweise miniaturisierte Projektionssysteme, interessant.

Neben der kommerziellen Verwertung ist auch der wissenschaftliche Aspekt für das Fraunhofer ISIT relevant. So werden das Konzept und die Ergebnisse des Projekts in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Konferenzen vorgestellt.
Inhaltlich konnte das ISIT seine Expertise im Bereich des MEMS-Designs und der Fertigung weiterentwickeln. Vor allem die Erfahrungen und Verbesserung beim Design und der Prozessierung der Glasdom- und MEMS-Wafer können direkt in kommenden Projekten wiederverwertet werden. Auch die gewonnen Erkenntnisse bezüglich der Auslegung und des Erwerbs der Einzelkomponenten der Strahlungseinheit (Laserdiode, Faser, Prismen) können in zukünftigen Projekten bedeutsam sein.
Der im Rahmen des Projekts entwickelte Demonstrator kann vom ISIT als kompakter, anschaulicher Demonstrator eines MEMS-basierten Projektionssystems auf Fachmessen oder zur Präsentation bei potenziellen Kunden verwendet werden.

2.4 Fortschritt anderer Stellen

Bezüglich des Gesamtvorhabens sind keine relevanten Fortschritte oder öffentliche Ergebnisse von dritter Seite bekannt.

2.5 Veröffentlichungen/Vorträge

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine gemeinsame Publikation erstellt, in der das Konzept sowie erste Ergebnisse vorgestellt werden:
Gail, J.; Kruse, F.; Gu-Stoppel, S.; Schmedemann, O.; Leder, G.; Reinert, W.; Wysocki, L.; Burmeister, N.; Ratzmann, L.; Giese, T.; et al. Advancements in Aircraft Engine Inspection: A MEMS-Based 3D Measuring Borescope. Aerospace 2025, 12, 419.
https://doi.org/10.3390/aerospace12050419

Desweiteren wurde das Konzept auf der Microtec Nord 2025 einem Fachpublikum präsentiert:
17.09.2025, Itzehoe:
„Optische MEMS-Scanner für smarte Sensorsysteme: von Quantensensoren bis Triebwerksinspektionen“
Dr. Lena Wysocki – Fraunhofer ISIT, Itzehoe

3 Literaturverzeichnis

[1] J.-Y. Hwang, L. Wysocki, N. Burmeister, D. Kähler, E. Yarar, G. Wille, W. Reinert, H.-J. Quenzer und S. Gu-Stoppel, „Heterogeneous Integration Solution for Optical Electromechanical," Photonics Europe, to be published 2026.

[2] F. Senger, J. Albers, U. Hofmann, G. Piechotta, T. Giese, F. Heinrich, T. von Wantoch und S. Gu-Stoppel, „A bi-axial vacuum-packaged piezoelectric MEMS mirror for smart headlights," in *Proc. SPIE 1129305, MOEMS and Miniaturized Systems XIX*, San Francisco, 2020.

[3] L. Wysocki, L. Ratzmann, P. Schütt, J. Albers, G. Wille und S. Gu-Stoppel, „Efficient piezoelectric gimbal-less MEMS-mirror with large design flexibility," in *Proc. SPIE 12434, MOEMS and Miniaturized Systems XXII*, San Francisco, (2023).

[4] J. Gail, F. Kruse, S. Gu-Stoppel, O. Schmedemann, G. Leder, W. Reinert, L. Wysocki, N. Burmeister, L. Ratzmann, T. Giese und e. al., „Advancements in Aircraft Engine Inspection: A MEMS-Based 3D Measuring Borescope," *MDPI Aerospace,* 12, 419 (2025).