

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt



Hahn  
Schickard

## Veröffentlichung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens

**QHMI - QSens: Mensch-Maschine-Schnittstelle basierend auf  
Quantensensoren**

Förderkennzeichen: FKZ03ZU1110DB

Berichtszeitraum: 01.12.2021 – 30.11.2024

Zuwendungsempfänger: Hahn-Schickard Gesellschaft für  
angewandte Forschung e.V.

**Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen FKZ03ZU1110DB gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor**

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung .....	2
2	AP3 -Polymerbasierte Sensor-Module .....	4
2.1	AP3.1: Materialrecherche für die Polymerverkapselung.....	4
2.2	AP-3.2: Konzeptentwicklung für Duroplast-Verkapselung .....	9
2.2.1	Aufbauten für Untersuchungen zu transparenten Kunststoffen mit FAM .....	9
2.2.2	Ergebnisse der FAM-Versuche .....	12
2.2.3	Abformgenauigkeit an vertikalen und horizontalen Strukturen .....	13
2.2.4	Abformgenauigkeit von Kuppengeometrien für Optikintegration.....	15
2.2.5	Ummolden von Glasfasern mit FAM .....	17
2.3	AP3.3: Konzeptentwicklung für Thermoplast-Verkapselung.....	17
2.3.1	Modulares Werkzeugkonzept .....	18
2.4	AP 3.4: Materialcharakterisierung: .....	30
2.5	Erfolgskontrollbericht .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
3	Zusammenfassung und Ausblick .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>

# 1 Zusammenfassung

Ziel des Verbundes ist die Erforschung einer hochgenauen Magnetfeldsensortechnologie auf Basis von Diamant basierenden Quantensensoren. Im Verbund QHMI wird diese neuartige Sensortechnologie für Anwendungen im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle analysiert und demonstriert. Unterschieden wird hier eine Konfiguration für die Erfassung von Nervenaktivitäten am Gehirn und für Muskelaktivitäten am Arm.

QHMI wird durch die Forschungsexpertisen der Universität Stuttgart, Hahn-Schickard und der Fraunhofer-Gesellschaft im engen Verbund mit den Technologieunternehmen Bosch, Q.ANT und Ottobock zusammen mit der Universitätsmedizin der Charité geprägt und regional in Querschnittsaktivitäten des Verbundes QSENS verankert. Innerhalb von QHMI ist Hahn-Schickard hauptverantwortlich für AP3.

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von miniaturisierten und mikrostrukturierten Sensormodulen mit einer hochperformanter Ausleseschaltung auf Basis von Verkapselungsprozessen mit Thermo- und Duroplasten, bei denen der Strahlengang komplett in optisch dichteren Medien als Luft verläuft. Hierfür sollten die notwendigen Technologien und Konzepte für die Entwicklung eines polymerverkapselten Sensormoduls erarbeitet und die dafür geeigneten Materialien identifiziert und charakterisiert werden. Für die Untersuchungen wurden im Projektverlauf die Urformprozesse Film Assisted Molding (FAM) und Spritzguss untersucht. Während sich die Verkapselungskonzepte mittels Spritzguss von Thermoplasten als nicht zielführend herausgestellt haben, wurden umfassendere Untersuchungen für die Verkapselung mittels FAM durchgeführt. Da der zu verkapselnde Quantensensor erst gegen Ende der ersten Phase festgelegt und auf Labormaßstab entwickelt wurde, konnte während der Projektlaufzeit kein Verkapselungskonzept für einen Demonstrator umgesetzt werden. Stattdessen wurden gezielte Untersuchungen von Teststrukturen durchgeführt, die flexible Lösungen zur Verkapselungen von Quantensensoren ermöglichen sollen. Zum einen wurden optische Elemente (Linsengeometrien, s. Abbildung 1, oben links), vertikale und horizontale Strukturen (s. Abbildung 1, oben rechts), Glasfasern (s. Abbildung 1, unten links) sowie sehr dünne Keramiksubstrate (s. Abbildung 1, unten rechts) betrachtet.

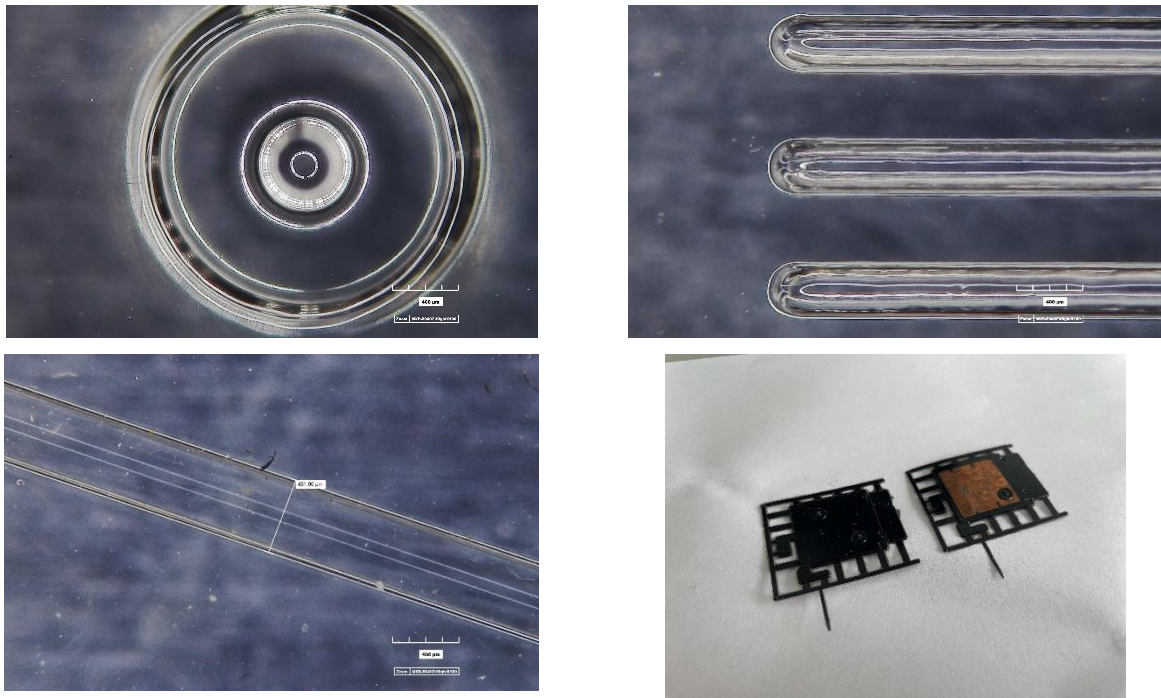


Abbildung 1: Übersicht mittels FAM abgemusterten Teststrukturen

Zum anderen wurde ein flexibler Ansatz mit modularem Werkzeugaufbau und additiv gefertigten Werkzeugeinsätzen konzipiert, ausgearbeitet und untersucht.

Dabei zeigte sich die generelle Machbarkeit von additiv gefertigten Einsätzen sowie deren Potentiale, aber auch die Herausforderungen der verschiedenen Materialien (Stahl, Aluminium und Kunststoff). Anhand dieser Einsätze, aber auch mit konventionell hergestellten Werkzeugeinsätzen, wurde der Einfluss verschiedener Foliendicken beim FAM und verschiedener Epoxy Molding Compounds (EMC) untersucht. Die Ergebnisse stellen dabei eine sehr gute Grundlage für die zweite Projektphase von QHMI, neben Quantensensoren aber auch für das Packaging von anderen Komponenten für andere Anwendungsbereiche dar. Diese sind aufgrund von resilienter Lieferketten und der momentanen Abhängigkeit von Fernost ein brandaktuelles Thema und verdeutlicht die Wichtigkeit der Forschungsarbeiten noch mehr.

## **2 AP3 -Polymerbasierte Sensor-Module**

Ziel von AP3 war die Entwicklung von miniaturisierten und mikrostrukturierten Sensormodulen mit hochperformanter Ausleseschaltung auf Basis von Verkapselungsprozessen mit Thermo- und Duroplasten, bei denen der Strahlengang komplett in optisch dichteren Medien als Luft verläuft. Hierfür sollten die notwendigen Technologien und Konzepte für die Entwicklung eines polymerverkapselten Sensormoduls erarbeitet und die dafür geeigneten Materialien identifiziert und untersucht werden. Dafür wurden im Projektverlauf die Urformprozesse Film Assisted Molding (FAM) und Spritzguss untersucht.

### **2.1 AP3.1: Materialrecherche für die Polymerverkapselung**

Zu Beginn der Arbeiten wurde eine umfangreiche Materialrecherche über transparente Polymere durchgeführt. Das Ziel der Materialrecherche war die Erstellung einer Übersicht über kommerziell verfügbare, transparente Materialien, die für eine Verkapselung einsetzbar sind. Die Materialrecherche beinhaltet thermo- und duroplastische Polymere, welche im Spritzgussverfahren, und duroplastische Polymere, welche im FAM Verfahren verarbeitet werden können. Die Materialrecherche für duroplastische Polymere für die Verarbeitung im Spritzguss hat ergeben, dass diese Materialien laut Materiallieferanten nicht komplett transparent sind und sich für die Anwendung daher nicht eignen werden. Deshalb wurden die duroplastischen Materialien für den Spritzgussprozess im Weiteren nicht näher betrachtet.

Ein wichtiger Faktor für die Einsetzbarkeit von polymeren Werkstoffen bei der Verkapselung von Sensoren mit optischen Komponenten ist deren Autofluoreszenz. Autofluoreszenz tritt bei der Bestrahlung mit materialspezifischen Wellenlängen auf und kann zu einer Störung der Messsignale führen. Für die Untersuchung der Autofluoreszenz wurden die Polymere von den Materialherstellern teilweise als Musterplättchen oder als Rohmaterial zur Verfügung gestellt. Die Musterplättchen wurden präpariert und für die Messungen an die Projektpartner 3.PI und Q.ANT GmbH übergeben.

Weitere Musterplättchen wurden bei Hahn-Schickard (HS) hergestellt. Für die Herstellung von Musterplättchen wurden geeignete Werkzeugeinsätze sowohl für Film Assisted Molding als auch für Spritzguss erarbeitet. Die Werkzeugeinsätze wurde mit der Software Creo 6.0 konstruiert und mittels CNC-Bearbeitung hergestellt.

**Herstellung von Musterplättchen mittels Spritzguss:** Ein Spritzgusswerkzeug besteht aus zwei Formhälften (Auswerfer- und Düsenseite) (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der Aufbau beider Formhälften erfolgte mit Normteilen. Für die Herstellung der Musterplättchen wurde eine neue Kavität in die Rahmenplatte (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) für ein bestehendes Stammwerkzeug konstruiert und gefertigt. Anschließend war es möglich, mit den thermoplastischen Materialien Musterplättchen mit den Maßen 37 x 37,5 x 1,5 mm<sup>3</sup> herzustellen.

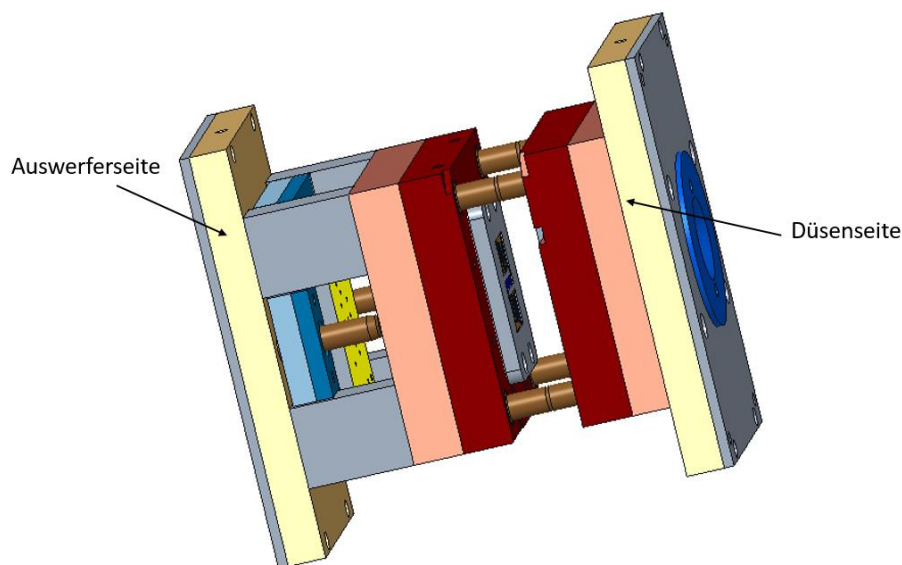


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Spritzgusswerkzeugs mit zwei Formhälften

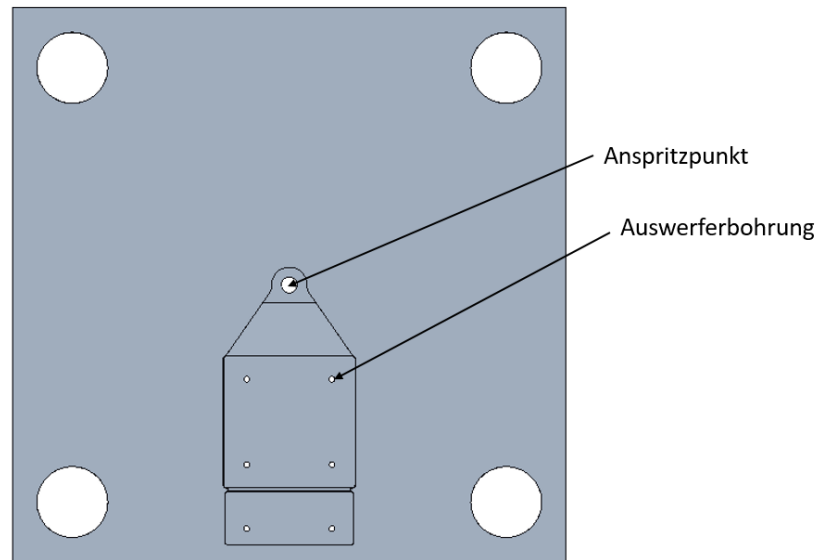


Abbildung 3: Formgebende Rahmenplatte mit Kavität

Im Spritzgussprozess gelangt das Granulat über einen Trichter und die Einzugszone in die Plastifiziereinheit. Durch die Beheizung und die Reibung in dieser Zone erwärmt und verflüssigt sich das Granulat und wird mithilfe der Schnecke über die Einspritzdüse in die Kavität eingespritzt. Nach dem Füllvorgang der Kavität wird zusätzlich ein Nachdruck beaufschlagt, um lunkerfreie Bauteile herzustellen. Nach einer kurzen Kühlzeit werden die Formhälften geöffnet und die Bauteile mithilfe der Auswerfer aus der Form automatisch entformt.

**Herstellung von Musterplättchen mittels FAM:** Das FAM-Werkzeug wird in zwei Formhälften (Bottom und Top) unterteilt. Der Aufbau beider Formhälften wird mit Einzelplatten realisiert. Die Bottom-Seite ist in Abbildung 4 und Abbildung 5 als CAD-Modell dargestellt.

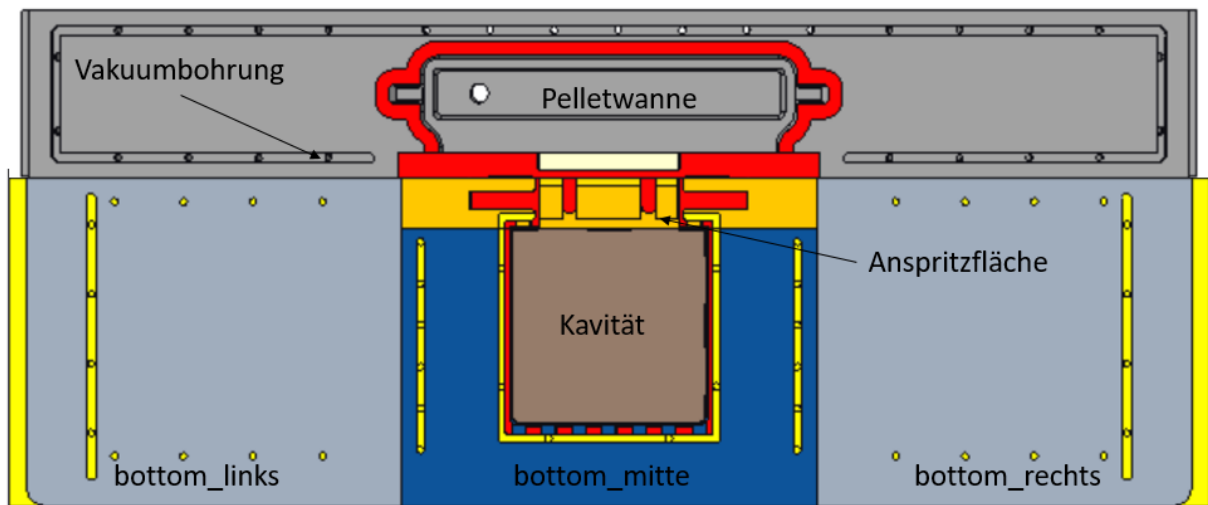


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Stammwerkzeugs für die Herstellung der Musterplättchen mit FAM (Bottom-Seite)

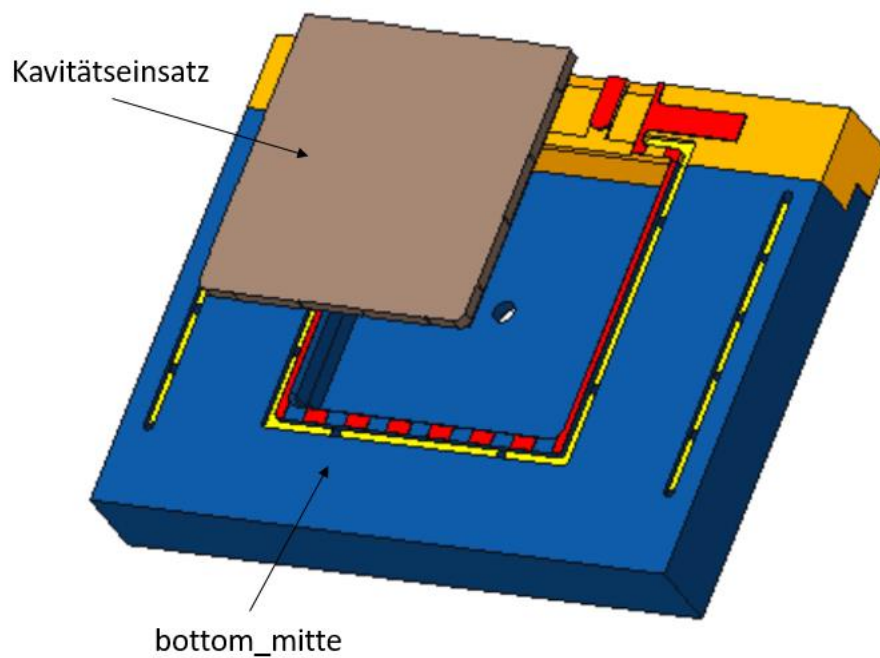


Abbildung 5: FAM-Werkzeug bottom\_mitte mit Kavitätsinsert

Dabei stellt der Kavitätseinsatz („Kavität“) den formgebenden Bereich dar, welcher für die Herstellung der Musterplättchen konstruiert und hergestellt wurde. Die restlichen notwendigen Formplatten wurden aus einem bestehenden Stammwerkzeug übernommen. Die Vakuumborungen sollen die für den FAM-Prozess benötigte ETFE-Folie faltenfrei an die Werkzeugeinsätze ansaugen. Der Einsatz der ETFE-Folie bringt folgende Vorteile:

1. Der Verschleiß der Formeinsätze wird reduziert, da der abrasive duroplastische Kunststoff zu keinem Zeitpunkt mit den metallischen Einsätzen in Kontakt kommt.
2. Es werden keine Auswerfer benötigt, denn die ETFE-Folie wird nach Ablauf des Verarbeitungsprozesses genutzt, um die Bauteile aus der Kavität zu entformen.
3. Egalisierung von Höhenunterschieden bei Einlegeteilen durch die Elastizität der ETFE-Folie.

Durch den modularen Aufbau des FAM-Werkzeuges kann der Kavitätseinsatz durch Unterlegen von verschiedenen dicken Platten unterschiedlich dicke Musterplättchen herstellen. Um auch im Bereich der Kavität die ETFE-Folie faltenfrei an das Werkzeug ansaugen zu können, wurde an der Außenfläche eine Vertiefung angebracht. Somit kann im zusammengebauten Zustand die Folie ohne Falten an das Werkzeug angesaugt werden. Der Kavitätseinsatz wurde aus dem Werkzeugstahl 1.2379 gefräst, um Musterplättchen mit den Maßen 34,5 x 39,5 x 1,2 mm<sup>3</sup> herzustellen.

Im FAM-Prozess werden die Formmassen in Form von Pellets in die vorgesehene Pelletwanne eingelegt und das Werkzeug verschlossen. Die materialabhängige Vorheizzeit (6- 14 s) sorgt dafür, dass über die Werkzeugtemperatur (ca. 180 °C) die Pellets aufgeschmolzen werden. Nach der Vorheizzeit bekommen die Pellets die verarbeitungsfähige Viskosität und werden mithilfe eines Plungers nahezu drucklos in die Kavität gepresst. Nach vollständigem Füllen der Kavität bleiben die Werkzeughälften weiterhin geschlossen und der Aushärteprozess startet. Zum Abschluss werden die ausgehärteten Bauteile mithilfe der ETFE-Folie aus dem Werkzeug automatisch entformt und können manuell entnommen werden.

## 2.2 AP-3.2: Konzeptentwicklung für Duroplast-Verkapselung

### 2.2.1 Aufbauten für Untersuchungen zu transparenten Kunststoffen mit FAM

Für die Untersuchungen zur Abformgenauigkeit wurde ein Werkzeugeinsatz mit horizontalen und vertikalen Teststrukturen konstruiert. Die Teststrukturen haben eine Breite von 0,1 mm - 0,3 mm (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, links). Für Untersuchungen zur Optikintegration wurde eine Geometrie konstruiert, mit der zum einen die Abformgenauigkeit und zum anderen die Auswirkung der Verkapselung auf den Strahlengang untersucht werden soll (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, rechts). Die Kuppelgeometrie hat einen Radius von 0,31 mm.



Abbildung 6: links: Werkzeugeinsatz mit Teststrukturen; rechts: Geometrie für Optikintegration

Für die Untersuchungen zur Optikintegration wurde als Substratträger eine FR4-Leiterplatte mit einer Dicke von 1,5 mm ausgewählt, welche mit Laserdioden-Chips (Typ: B2-VCSEL) bestückt werden kann. Das Chiplayout ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**<sup>7</sup> zu sehen.

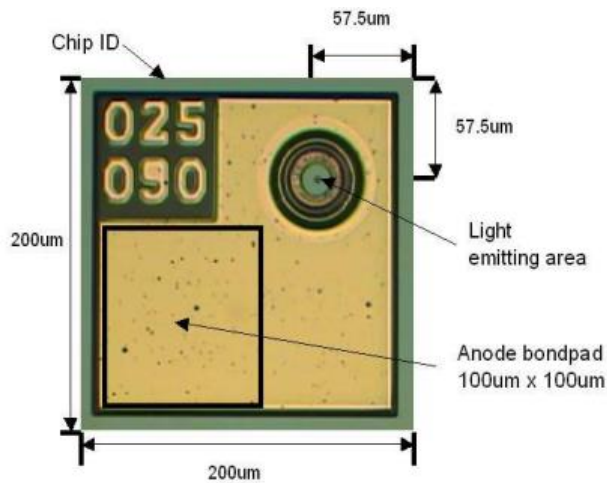


Abbildung 7: Single Mode & Polarisation VCSEL 850nm 2.0mW

Das Layout für die Leiterplatte wurde erstellt. Die Leiterplatte besitzt zwei Bohrungen und ein Langloch für das genaue Positionieren während dem Bestückungs- und Verkapselungsprozess. Zusätzlich wurde seitlich die Leiterplatte so konzipiert, dass sie auch als Direktstecker benutzt werden kann. Dies ermöglicht, die Elektronik auf der Leiterplatte über eine externe Quelle zu bestromen um die Laserdiode zu betreiben und so z.B. den Strahlengang zu charakterisieren (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, links). Für den Bestückungsprozess der B2-Dioden wurde eine Vorrichtung konstruiert und hergestellt. Die Leiterplatten wurden mithilfe der Vorrichtung mit jeweils 6 B2-Dioden an einem hochpräzisen Bestückungsautomaten vom Typ Häcker Automation mittels Klebstoff bestückt und anschließend mit Drahtbonds elektrisch kontaktiert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, rechts).

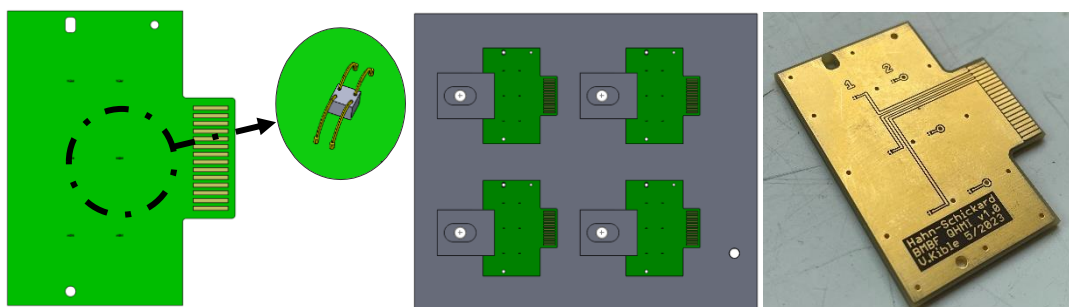


Abbildung 8: links: Leiterplatte mit B2-Dioden; mitte: Vorrichtung für Diodenbestückung; rechts: Bestückte Leiterplatte

Weiterführend wurde ein Werkzeugeinsatz für die Optikintegration konstruiert. Das Werkzeug wurde dabei modular aufgebaut um eine große Vielfalt an Geometrien untersuchen zu können. Daher wurden die Werkzeugkomponenten als einzelne Einsätze konstruiert (Abbildung 9).

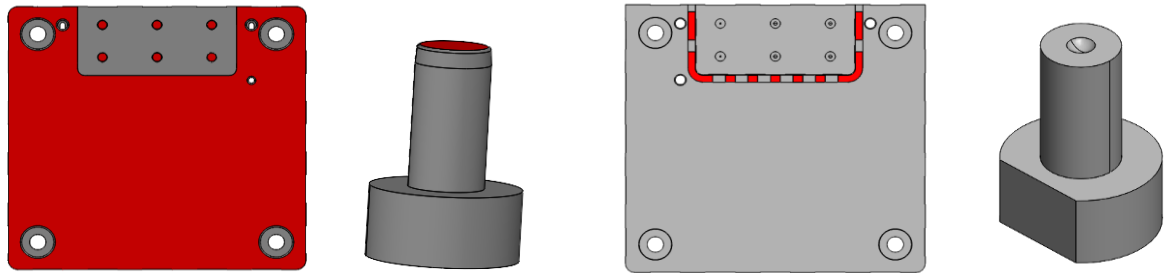


Abbildung 9: Modularer Aufbau des Werkzeugs für die Verkapselung

Somit ist es möglich mit den Einsätzen, ein 3x2 Nutzen herzustellen, welches vereinzelt und in einem weiteren Prozessschritt manuell auf die ankontaktierte B2-Diode (Infrarot bei 850nm) angebracht werden kann. Bei dieser Lösung wird ein Hohlraum zwischen der Laserdiode und der Kunststofflinse erzeugt (Abbildung 10, links). Jedoch kann durch die Veränderung der Höhe im Werkzeug auch die Vollverkapselung realisiert werden. Bei der Vollverkapselung werden alle elektronischen Bauteile mit dem Kunststoff vollständig ummantelt (Abbildung 10, rechts). Dies hat den Vorteil, dass durch die geringere Anzahl an Grenzübergängen des Strahlengangs, dessen Verluste reduziert werden.

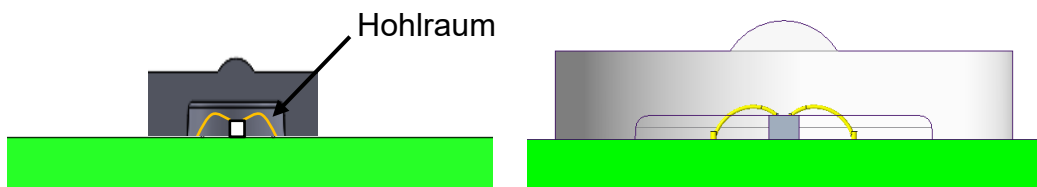


Abbildung 10: links: Bestückte Leiterplatte mit Abdeckung; rechts: Vollverkapselung der bestückten Leiterplatte

Nach Abschluss der Verkapselung kann durch das Bestromen der B2-Laserdioden auf einem Versuchsaufbau der Strahlengang gemessen werden. Durch den modularen Aufbau

Werkzeugeinsätze können die einzelnen Komponenten einfach ausgetauscht und neue verschiedene Geometrien untersucht werden. Die Abbildung 11 zeigt den Aufbau der Leiterplatte und den zu untersuchenden Strahlengang.

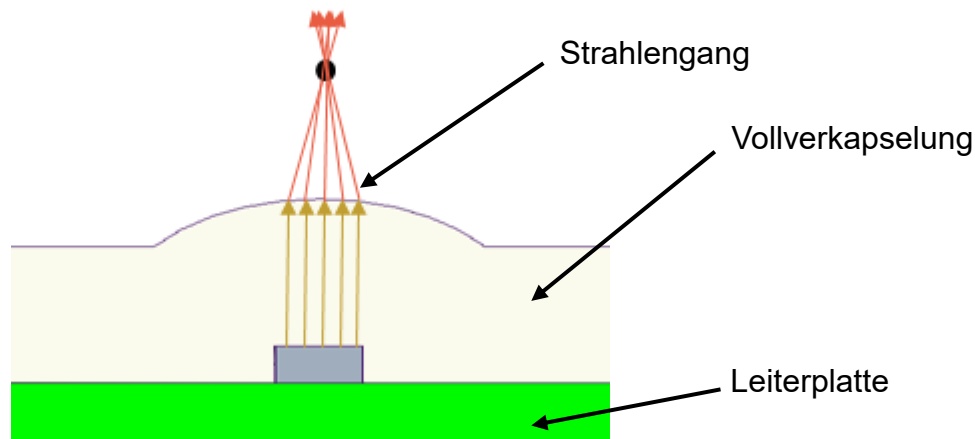


Abbildung 11: Vollverkapselte Laserdiode und Strahlengang

## 2.2.2 Ergebnisse der FAM-Versuche

Die Untersuchungen zeigen das Potential der Verkapselung mittels FAM mit dem optischen Verkapselungsmaterial Solepoxy OP2000. Dieses in Pellet-Form erhältliche Material hat eine geringe Autofluoreszenz, weshalb im weiteren Verlauf des Projektes der Fokus auf dessen Verarbeitbarkeit und Eignung für Quantensensoren gelegt werden soll. Hierfür wurden die oben beschriebenen Werkzeugeinsätze mit den verschiedenen Geometrien aufgebaut und hinsichtlich der Abformgenauigkeit für verschiedene Prozesskonfigurationen des FAM-Prozesses untersucht. Die Prozesskonfigurationen sind wie folgt:

- Konfiguration mit beidseitiger Folie: Untersuchung der Eignung verschiedener FAM-Folientypen. Variation der Rauigkeit und Foliendicke. Erfassen der Toleranzen der Oberflächenprofile der Abmusterung.
- Konfiguration mit einseitiger Folie: Untersuchung zur Abformgenauigkeit bei einseitiger Folie. Bewertung der Entformbarkeit nach Prozess und Erfassen der Oberflächentopografie.

- Konfiguration ohne Folie: Erkenntnisse zum Einsatz von Haftvermittler auf die Abformgenauigkeit und die optischen Eigenschaften.

Darüber hinaus werden weitere Untersuchungen durchgeführt, die einer ganzheitlichen Betrachtung von Quantensensoraufbauten dienen. Dazu wurden zwei generelle Ansätze gewählt:

- Einsatz von Glasfasern zur Führung des Strahlengangs
- Einsatz von im Package integrierten 90°-Umlenkspiegeln zur Führung des Strahlengangs

Die einzelnen Untersuchungen für die beiden Ansätze sind nachfolgend aufgelistet:

- Ummolden von verschiedenen Glasfasern zur optischen Ankoppelung des Strahlengangs von Laserdiode zu Diamant. Erkenntnisse zur Robustheit und dem Verhalten während dem Prozess.
- Untersuchung von integriertem 90°-Umlenkprisma mit dem bereits aufgebauten Werkzeug.
- Toleranzen der Bestückungsgenauigkeiten der Bauteile zur Verkapselung sowie deren Einfluss auf den Strahlengang. Dies ist elementar, da Quantensensoren diesbezüglich hohe Anforderungen haben.
- Erzeugung von Mikrostrukturen über die Folie als Träger. Strukturierung der FAM-Folien vor der Verkapselung zum Abformen von Mikrolinsen.

### 2.2.3 **Abformgenauigkeit an vertikalen und horizontalen Strukturen**

Die Abformgenauigkeiten an den vertikalen und horizontalen Strukturen sind ähnlich. Auch beim Vergleich der unterschiedlichen Breiten von 0,1 bis 0,3 mm zeigen sich an den Kanten der Strukturen ähnliche Foliendicken im Bereich wo die Folie thermogeformt wurde (s. Abbildung 12). Die Tatsache, dass zwischen verschiedenen EMC kein Unterschied zu erkennen ist, lässt vermuten, dass die Thermoformung der Folie entscheidend für die spätere Struktur ist.

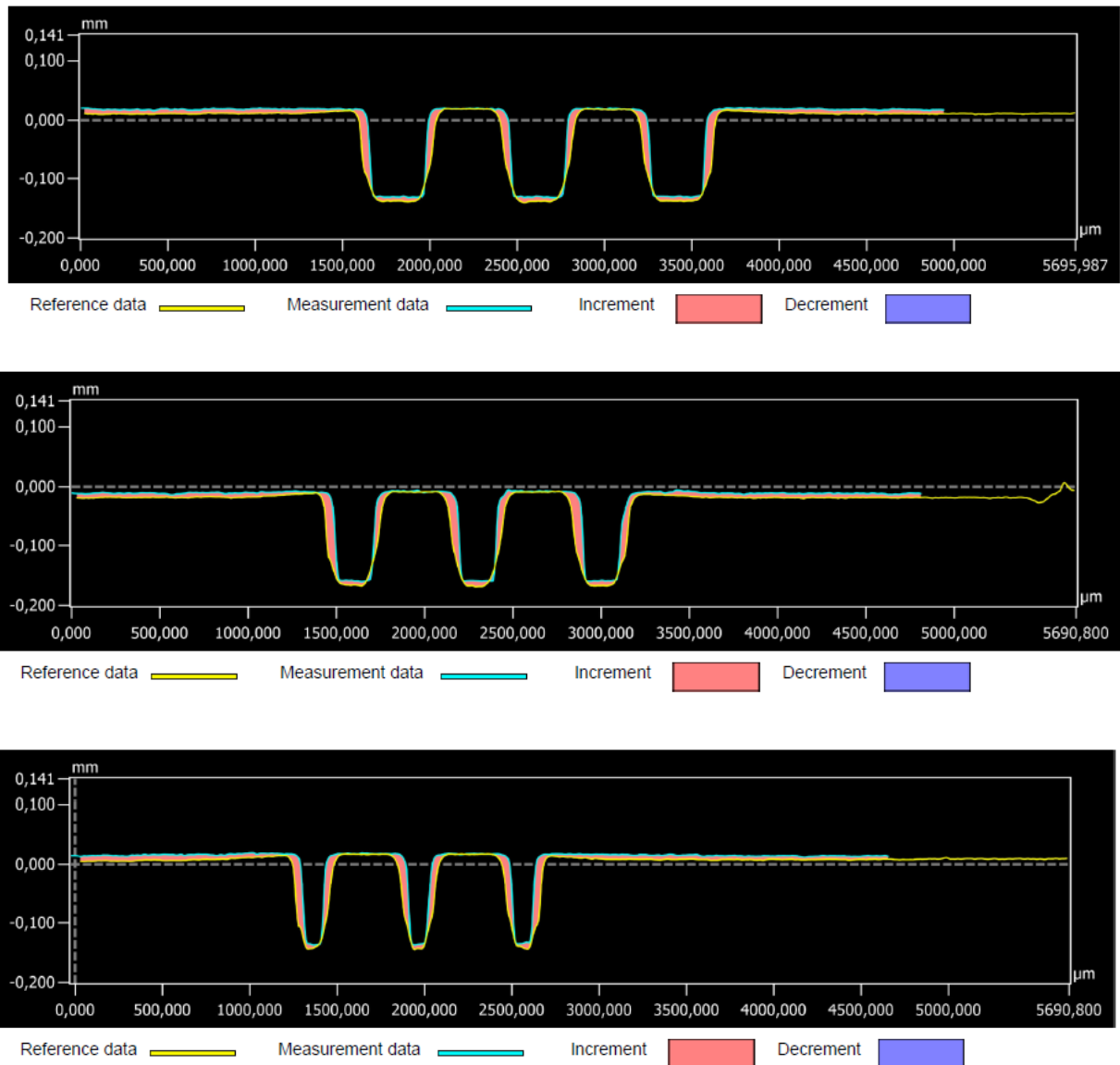


Abbildung 12: Vergleich der unterschiedlichen Steggeometrien. Zu sehen sind die Profilschnitte der horizontalen Strukturen mit 50 µm Folie.

Zwischen den 50 µm und 100 µm Folien zeigen sich noch deutlichere Unterschiede (s. Abbildung 13). Bei einer möglichst formgenauen Nachbildung des Werkzeugs sollten möglichst dünne Folien verwendet werden. Bei Einlegeteilen, die mit Pins im Werkzeug fixiert wurden, konnte außerdem bei der Abmusterung in der Höhe der Pins in der Kavität ein zusätzlicher Verzug festgestellt werden.

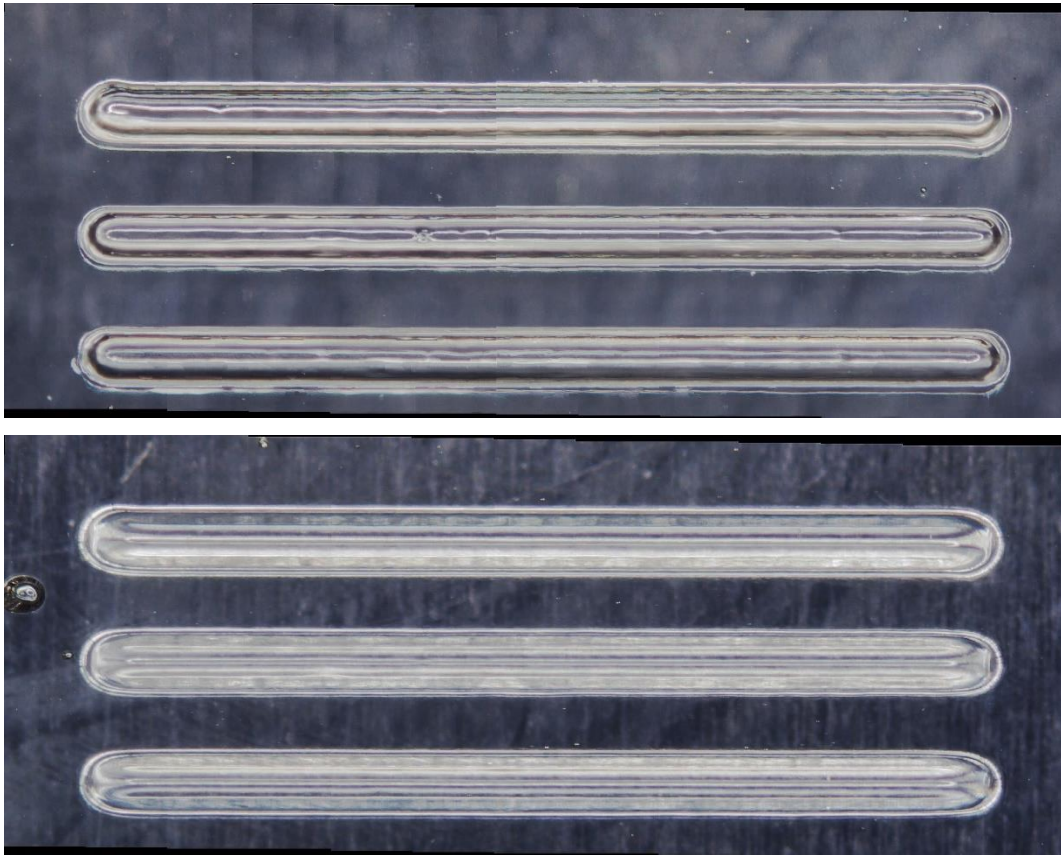


Abbildung 13: Abgeformte Teststruktur mit 50 µm Folie (oben) und 100 µm Folie (unten)

#### 2.2.4 Abformgenauigkeit von Kuppengeometrien für Optikintegration

Die Abmusterung von Kuppengeometrien zeigte ähnliche Ergebnisse wie bei den Abmusterungen an vertikalen und horizontalen Strukturen. Zwar können auch feine Linsen im Werkzeug abgebildet werden (siehe Abbildung 14), jedoch sind diese im Bereich der thermogeformten Folie verzerrt. In Abbildung 15 sind beispielhaft die Ergebnisse für die Abmusterung mit einer 50 µm Folie zu sehen. Gemessen wurde jeweils das abgemusterte Teil („Reference data“) gegenüber dem Formeinsatz („Measurement data“).

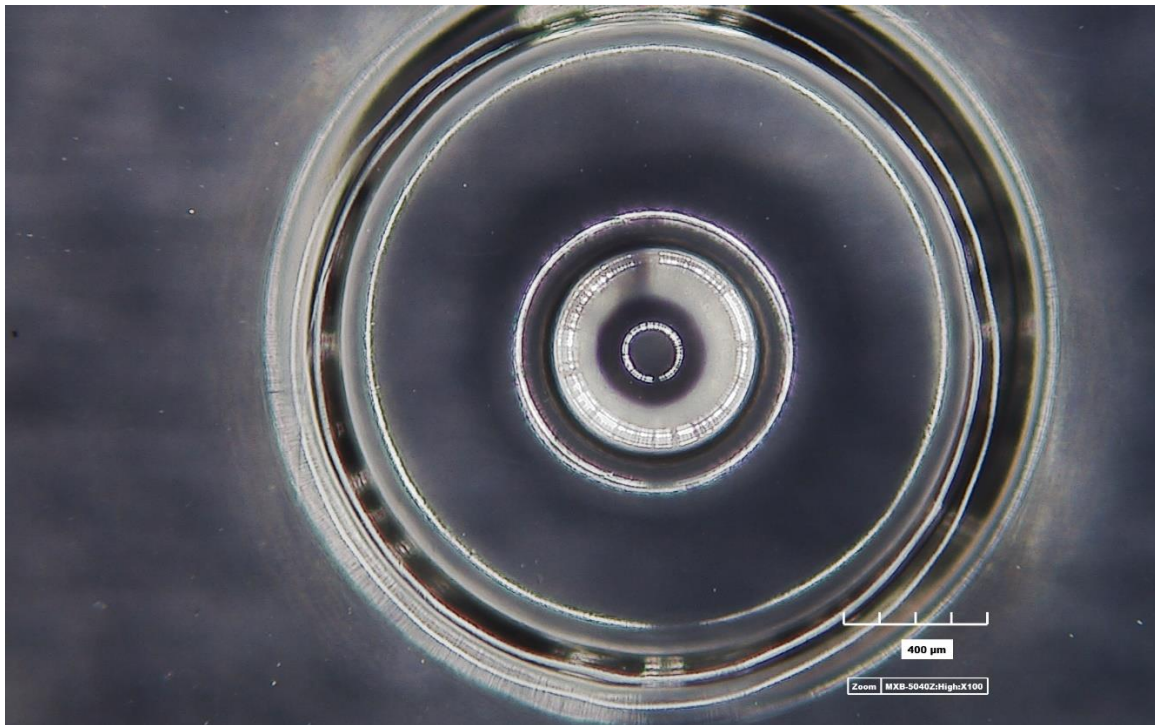


Abbildung 14: Abgemusterte Linse mit 50 µm Folie

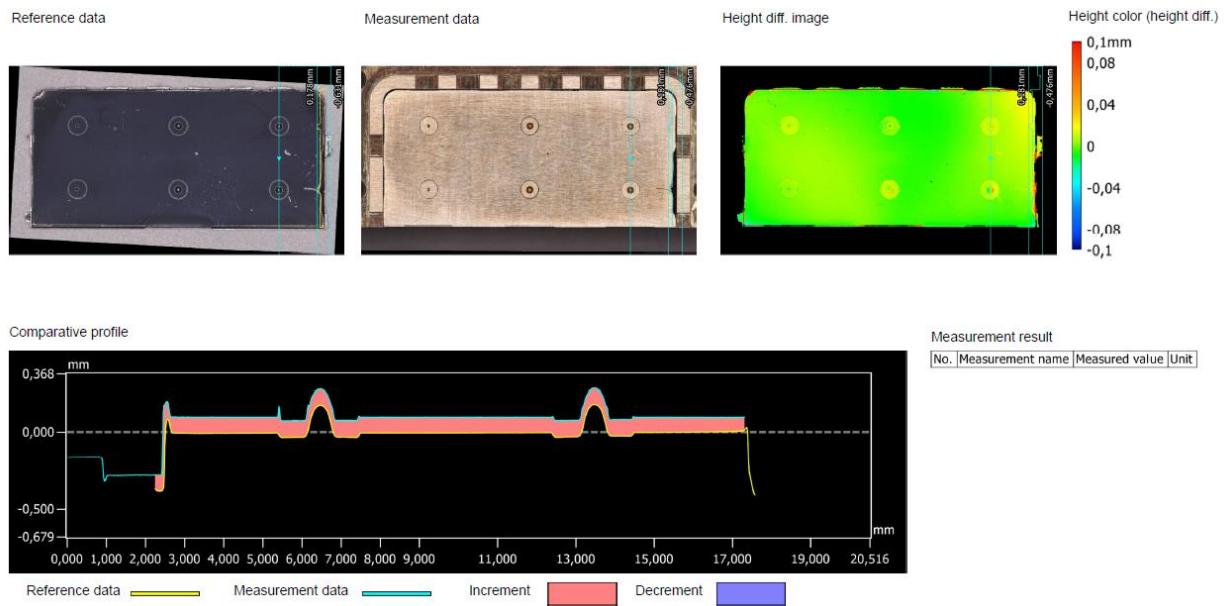


Abbildung 15: Gemessener Höhendifferenz zwischen Werkzeugeinsatz und abgemusterten Bauteil

### 2.2.5 Ummolden von Glasfasern mit FAM

Weiterhin wurden Untersuchungen zum Ummolden von Glasfasern durchgeführt. In Abbildung 16 ist eine eingebettete Glasfaser zu sehen. Die Glasfaser überstehen den FAM Prozess ohne Beschädigung. Jedoch stellte sich eine Fixierung bzw. Herausführung der Faser aus dem Werkzeug als herausfordernd dar, da mit 100 µm Folien eine 400 µm Glasfaser über die Werkzeugtrennebene nicht abgedichtet werden kann. In QHMI 2 wird unter anderen aus diesem Grund eine Bestückung der Glasfaser im Air Cavity Package mit anschließendem Deckeln angestrebt. Es wurde sowohl mit als auch ohne Cladding ummolded.



Abbildung 16. Ummoldete Glasfaser ohne Cladding

## 2.3 AP3.3: Konzeptentwicklung für Thermoplast-Verkapselung

Verschiedene Konzepte für Thermoplast-Verkapselungen mittels Spritzgießen wurden betrachtet. Die Einschätzung ergab, dass eine Verkapselung der empfindlichen Sensorelemente mit diesem Verfahren nicht realistisch ist. Der verfahrensbedingt sehr hohe Werkzeuginnendruck setzt zwangsläufig einen Schutz der sensiblen Elemente voraus. So wären zwar Verfahren wie Glob-Top oder Dam and Fill als selektiver Schutz in vielen Anwendungen ein möglicher zusätzlicher Prozessschritt. Allerdings sind diese nicht für optische Funktionsintegration geeignet.

Verkapselung von einzelnen optischen Komponenten (z.B. Linsen) mittels Thermoplast-Spritzguss im Rahmen von Quantensensoren sind aber auch zukünftig denkbar.

Die im Projekt freigewordenen Kapazitäten wurden für den Mehraufwand bei der Duroplast-Verkapselung, insbesondere mit additiv gefertigten Werkzeugeinsätzen eingesetzt (s. Kapitel 2.4).

### **2.3.1 Modulares Werkzeugkonzept**

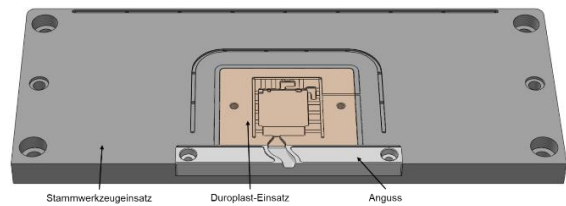
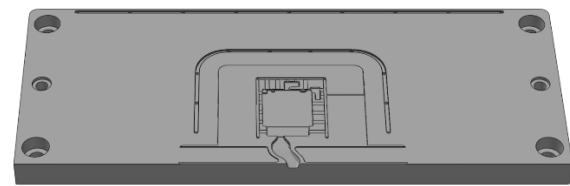
Im Verlauf des Projekts stellte sich heraus, dass die quantensensorischen Entwicklungen zahlreiche Iterationsschritte durchlaufen, wodurch sich sowohl die Komponenten als auch deren Aufbauten erst gegen Ende des Projektes konkretisierten. Da FAM-Werkzeuge an die jeweilige Komponente angepasst werden müssen und die Werkzeugherstellung zeit- und kostenintensiv ist, wurden modulare Werkzeugeinsätze und additiv gefertigte Einsätze untersucht. Mit dem modularen Werkzeugkonzept soll flexibel und auch wirtschaftlich auf Variantenvielfalt von Quantensensoren reagiert werden können. Zukünftig sollen dadurch in QHMI Phase 2 verkapselte Quantensensorelemente realisiert werden können, die mit geringen Initialkosten die Herstellung von Prototypen oder kleinen Stückzahlen ermöglichen und gleichzeitig auf skalierbare Prozesse übertragbar sind.

#### **2.3.1.1 Konzeptionierung**

Verschiedene Lösungsvarianten wurden betrachtet [1] und in einem morphologischen Kasten zusammengefasst. In Abbildung 17 und 18 sind vier ausgewählte Gesamtlösungen für den modularen Werkzeugansatz dargestellt.

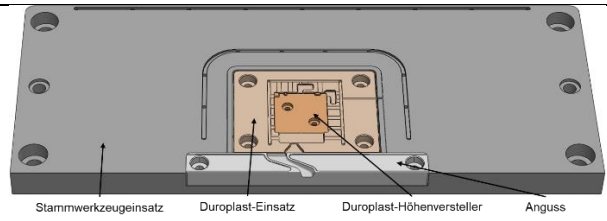
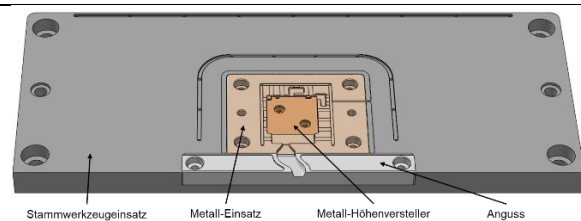
Teilsystem	Lösungsvarianten			
Anzahl Bauteile	A 1	B 3	C 4	D
Zentrierung	Keine	Zentrierstift	Passflächen	Kegliges Zentrierelement
Zusammenbau	Keine	Einschrauben von unten	Einschrauben von oben	
Material	Duroplast	Stahl		
Fertigungsverfahren	Photopolimerverfahren (DLP / SLA)	Pulverbettbasiert	Spanend	
Nachbearbeitung	Keine	Funktionsflächen	Alle Flächen	

Abbildung 17: Morphologischer Kasten mit verschiedenen Ansätzen (Lösungsvarianten A-D)



Ansatz A

Ansatz B



Ansatz C

Ansatz D

Abbildung 18: Darstellung der Lösungsvarianten A-D

Basierend auf den Anforderungen aus QHMI wurden folgende Bewertungskriterien festgelegt:

- **Geringe Komplexität des Werkzeugs:** Reduziert Fehlerquellen und Nachbearbeitungsaufwand um den Einsatz der Formeinsätze an Quantensensoren anpassen zu können.
- **Hohe Wärmeformbeständigkeit des Werkzeugmaterials:** Material muss bis 185 °C formstabil bleiben.
- **Geringe Herstell- und Initialkosten:** Wenige Fertigungsschritte und günstige Materialien sorgen für Wirtschaftlichkeit, sodass neue verkapselte Quantensensoren auch für KMU realisierbar bleiben.
- **Geringer Verschleiß der Werkzeuge:** Langlebigkeit durch robuste Materialien und hohe Temperaturbeständigkeit, sodass eine Skalierbarkeit für kleinere und mittlere Stückzahlen möglich ist.
- **Kurze Fertigungsdauer:** Schnelle Herstellung ermöglicht kurze Iterationsschleifen bei der Entwicklung der Quantensensoren und kurze Produktionsanlaufzeiten.
- **Leichte Austauschbarkeit:** Flexibler Einsatz verschiedener Werkzeuge ohne lange Stillstandszeiten um Produktvielfalt zu ermöglichen.

Die Gewichtung der Kriterien wurde mittels eines binären Vergleichs bestimmt. Die Wärmeformbeständigkeit ist dabei eine Grundvoraussetzung, weshalb sie mit 35,7% am höchsten gewichtet wurde. Eine kurze Fertigungsdauer und geringe Kosten sind ebenfalls von großer Bedeutung. Die technische Nutzwertanalyse der Konzepte mit diesen Gewichtungen erfolgte gemäß VDI 2225-3 mit nachfolgender Formel für die technische Wertigkeit  $W_t$ :

$$W_t = \frac{\sum g_k \cdot p_k}{\sum p_{id}} = \frac{g_1 \cdot p_1 + g_2 \cdot p_2 + \dots + g_n \cdot p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) \cdot p_{max}}$$

$p_k$  = Punktzahl für die jeweils bewertete Eigenschaft

$p_{id} = p_{max}$  = Ideale, maximal zu erzielende Punktzahl einer Eigenschaft

$g_k$  = Gewichtungsfaktor für die jeweils bewertete Eigenschaft

Durch die Nutzwertanalyse wurden die technischen Wertigkeiten der einzelnen Konzepte ermittelt. Dabei erzielte Konzept D mit einem Wert von  $W_t = 0,8214$  die höchste Bewertung. Dies stellt eine technisch sehr überzeugende Lösung dar, was insbesondere auf die geringen

Herstellungskosten sowie die kurze Fertigungsdauer zurückzuführen ist. Auch Konzept C hat mit  $Wt = 0,8036$  eine hohe Wertigkeit.

Da der Unterschied lediglich in der Materialauswahl liegt wurden Konzept C und D umgesetzt. Während bei Konzept C additiv gefertigte metallische Werkzeugeinsätze gefertigt wurde, wurde das Konzept D mit Duroplast-Einsätzen umgesetzt. Die Einsätze wurden aus den verschiedenen Materialien nach den Konstruktionsrichtlinien von FAM-Werkzeugen hergestellt. Es wurde zudem ein konventionell gefertigtes Werkzeug als Referenz hergestellt (s. Abbildung 19).

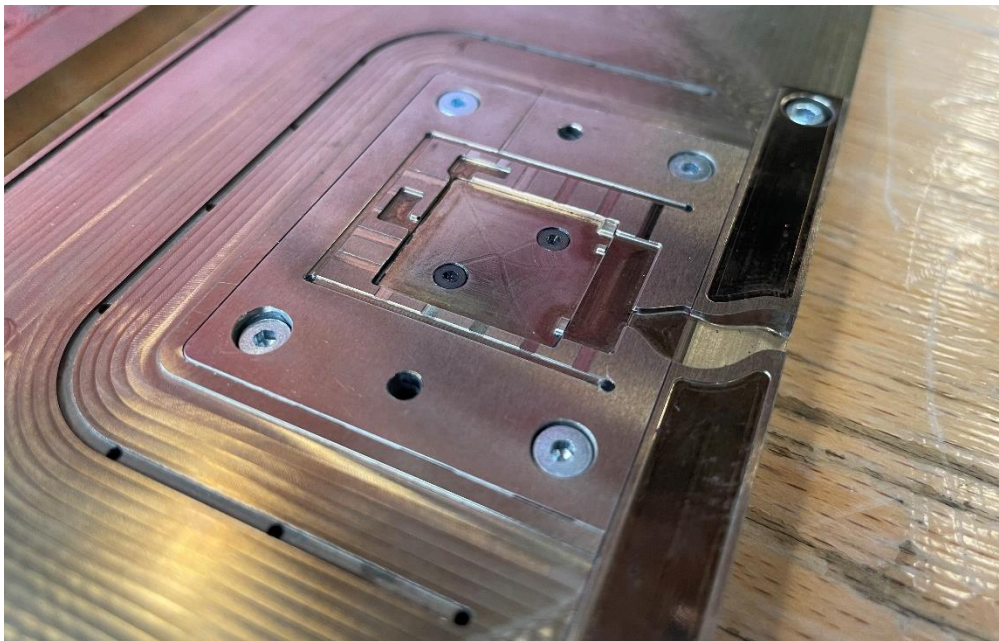


Abbildung 19: Konventionell gefertigter Werkzeug-Einsatz.

Damit der Einsatz den Belastungen während des FAM-Prozesses standhält, muss ein Duroplast verwendet werden, mit dem temperaturfeste Bauteile hergestellt werden können. Aus vorangegangenen Arbeiten sowie aus Veröffentlichungen zur Untersuchung additiv gefertigter Werkzeugeinsätze für das Thermoplastspritzen ging hervor, dass sich insbesondere die Materialien Duroplast 1 und Duroplast 2 vielversprechend sind. Dies wurde zudem durch verschiedene Zulieferer additiv gefertigter Bauteile bestätigt. Darüber hinaus wurde das Material Duroplast 3 als wahrscheinlich geeignet beurteilt. Die wichtigsten Werkstoffkennwerte der genannten Materialien in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der vielversprechendsten Materialien. Davon wurden Duroplast 1 und 2 umgesetzt.

Material	Duroplast 1	Duroplast 2	Duroplast 3
E-Modul [MPa]	2 800	10 000	3 190
Maximale Zugfestigkeit [MPa]	48,7	53	67
Bruchdehnung [%]	2,3	1	2,4
HDT @ 0,455 MPa [°C]	238	218	291
HDT @ 1,82 MPa [°C]	101	110	163
CTE (25°C to 150°C) [ $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]	79,6	46	114
Kosten [€/l]	236,81	355,81	254

Darüber hinaus wurden auch Edelstahl und Aluminiumeinsätze für Konzept D erstellt. In der nachfolgenden Abbildung 20 sind ausgewählte Werkzeugeinsätze dargestellt.

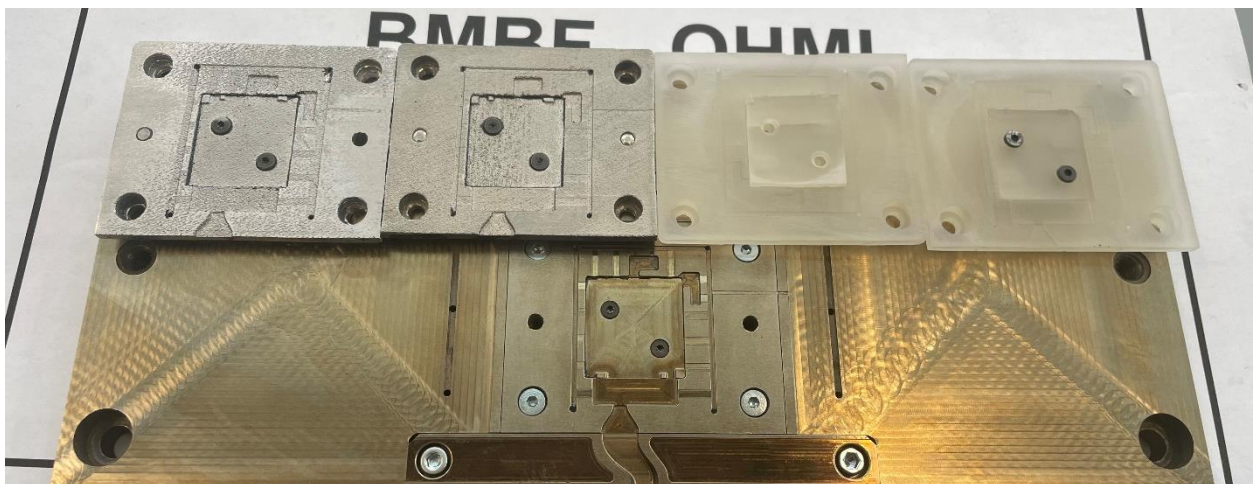


Abbildung 20: Werkzeugeinsätze aus den verschiedenen Materialien.

Um die Maßhaltigkeit der additiv gefertigten Einsätze zu betrachten, wurden die gefertigten Teile mit dem 3D-Profilometer VR-6200 von Keyence mittels des Lichtschnittverfahren vermessen, ein CAD-Files abgeleitet und mit dem ursprünglichen CAD-Modell verglichen. Die Ergebnisse der Duroplast-Einsätze ist in Abbildung 21 und die der Metalleinsätze ist in Abbildung 22 dargestellt.

Der Einsatz aus Duroplast weist eine Planarität von etwa 300  $\mu\text{m}$  auf, mit den größten Verzugsstellen an den Ecken. Die Kavität bleibt weitgehend formgetreu. Feine Details wie Ventings und Kavitätentlüftung mit 50  $\mu\text{m}$  Tiefe sind nicht abgebildet, da die Schichtstärke beim

Druck 100  $\mu\text{m}$  beträgt. Eine tiefere Ausführung ist nicht möglich, da sonst im Prozess EMC austreten könnte.

Der Einsatz aus Duroplast 2 von Hersteller 1 hat eine Planarität von 800  $\mu\text{m}$  und kann daher die Kavität nicht abdichten. Er musste nachbearbeitet oder gebogen werden. Ein Einsatz aus demselben Material von Hersteller 2 wurde schräg aufgebaut, was zu besserer Ebenheit, aber auch zu mehr Stützstrukturen und geringerer Oberflächenqualität führte. Dieser konnte wegen seiner Transparenz nicht mit dem 3D-Profilometer charakterisiert werden. Alle Duroplast 2-Einsätze wurden mit einer feineren Schichtstärke von 50  $\mu\text{m}$  gefertigt, wodurch Details gut dargestellt werden. Die Ergebnisse verdeutlichen die erheblichen Qualitätsunterschiede von unterschiedlichen Herstellern trotz dem gleichen Verfahren und Material.

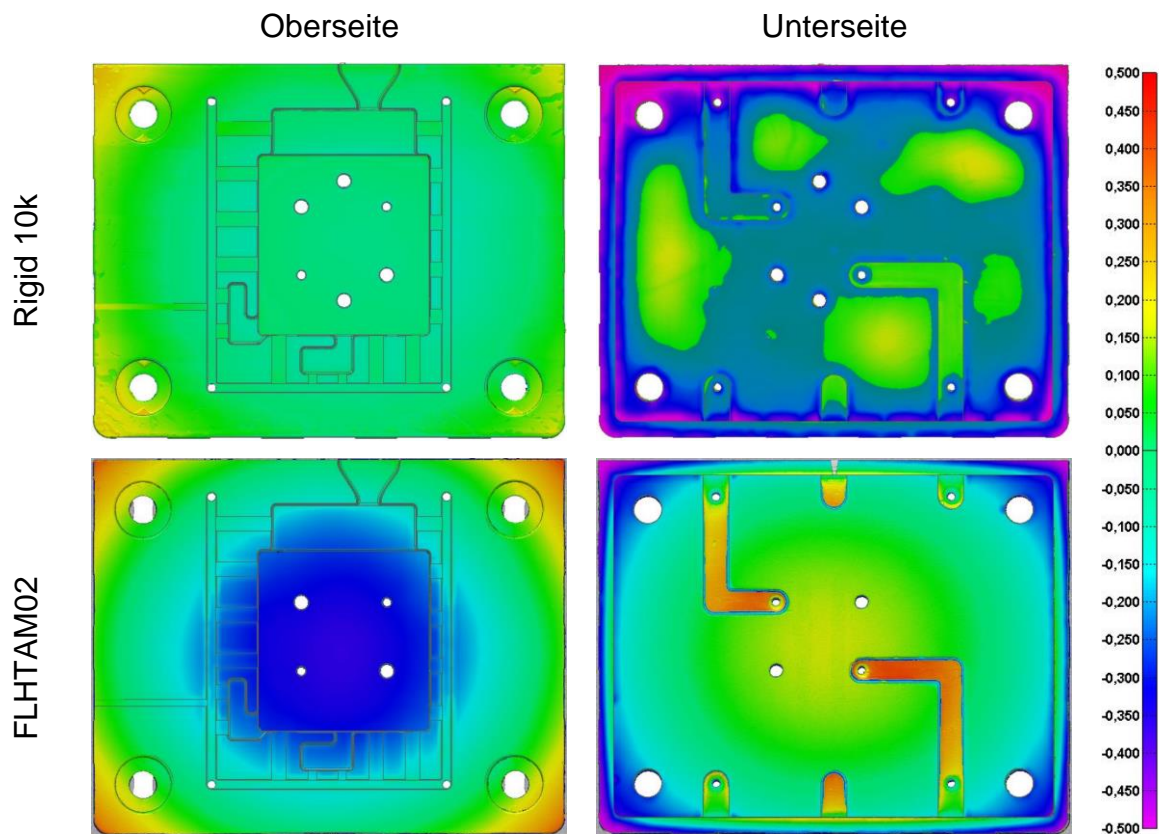


Abbildung 21: Verzug bei Duroplasteinsätzen.

Der Edelstahl-Einsatz (1.4542) weist eine gute Planarität von 150  $\mu\text{m}$  auf, wobei der Verzug zum Rand hin zunimmt, jedoch geringer als bei Duroplasten ist. Feine Details wie Ventings werden größtenteils dargestellt, jedoch fehlen sie teilweise auf der überlaufneren Seite. Dieses Problem kann durch Anpassung der Prozessparameter behoben werden.

Der Aluminium-Einsatz hat eine etwas schlechtere Planarität von etwa 200 µm, beeinflusst durch die raue Oberfläche. Ventings und KavitätSENTLÜFTUNG sind nur schwach erkennbar und müssen möglicherweise nachträglich eingearbeitet werden.

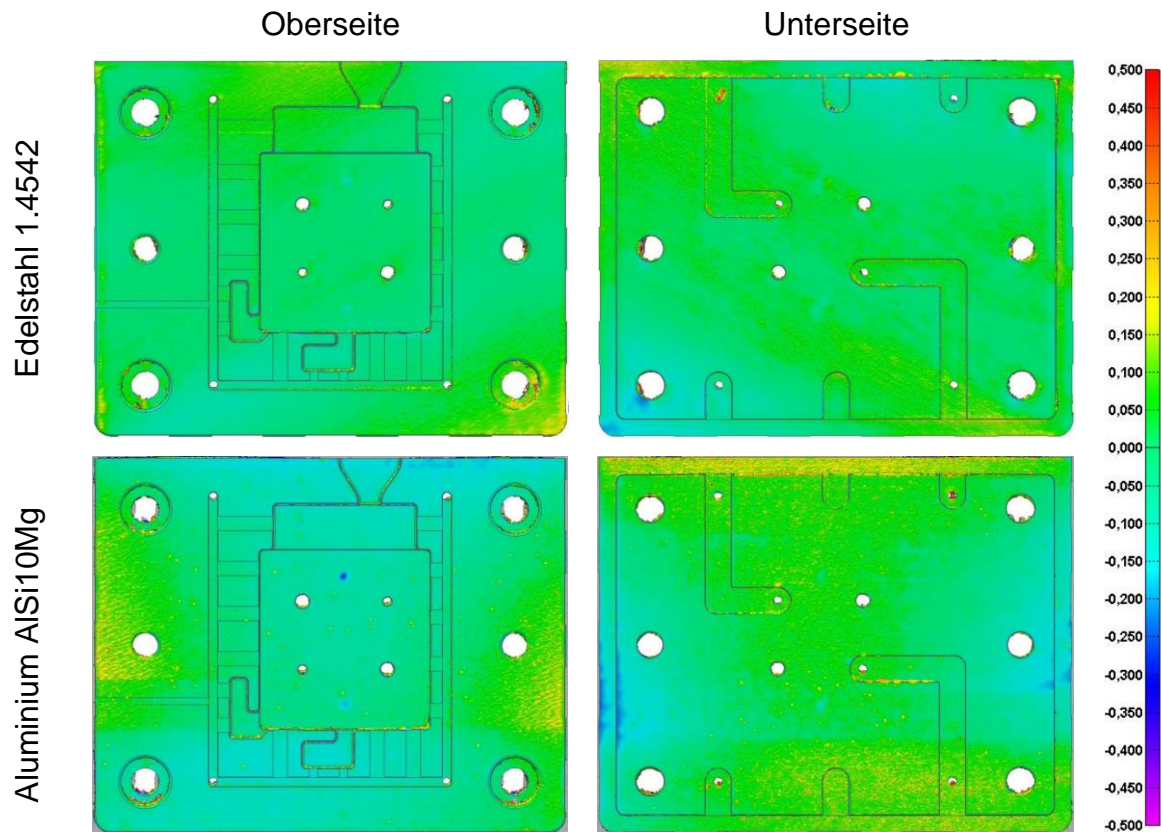


Abbildung 22: Verzug bei Metalleinsätzen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Duroplast-Einsätze (SLA-Verfahren) eine sehr gute Oberflächenqualität, aber höhere Unebenheiten durch Verzug haben. Die dafür nötigen Stützstrukturen erfordern zusätzliche Nachbearbeitung.

Metall-Einsätze (SLS-Verfahren) zeigen eine gute Planarität, aber schlechtere Oberflächenqualität und grobe Ungenauigkeiten bei Geometrien, vor allem bei Durchgangslöchern, die aufgrund des überhängenden Aufbaus entstehen und nachbearbeitet werden müssen.

### 2.3.1.2 Ergebnisse der Abmusterung

**Konventionell gefertigte Werkzeugeinsätze:** Die abgemusterten Bauteile wiesen eine sehr gute Oberflächenqualität und hohe Detailtreue auf. Es kam zu Überspritzungen an den Ventings, wodurch EMC in den Luftabzugskanal gelangte. Zur Vermeidung wurde der Einsatz höher

unterlegt oder die Ventings flacher ausgeführt. Die Überspritzungen lassen sich jedoch ohne wesentlichen Mehraufwand einfach zusammen mit den Überläufen nachbearbeiten. In der Abbildung 23 ist die Abmusterung mit dem Einsatz aus 1.2379 56HRC zu sehen.

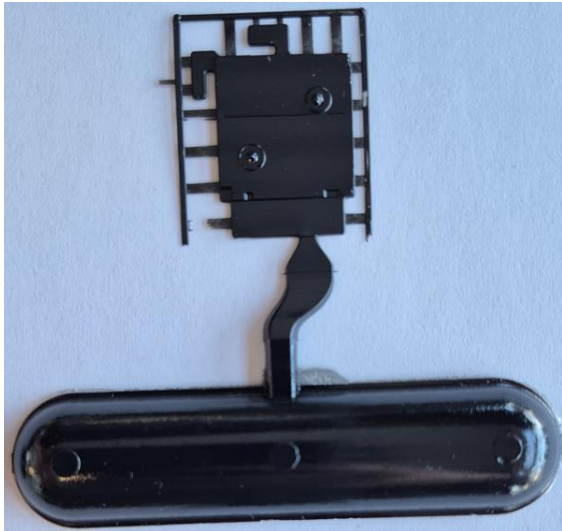


Abbildung 23: Abgemustertes Bauteil aus konventionell gefertigten Werkzeugeinsatz.

**Werkzeugeinsätze aus SLS Edelstahl:** Zur Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit des Werkzeugeinsatzes und der abgemusterten Bauteile wurde eine Rauheitsmessung nach EN ISO 4288 mit dem Mitaka MLP-3 durchgeführt. Die Messung erfolgte mittig in der Kavität von Anguss Richtung Überlauf. Dabei wurden folgende Werte ermittelt:

1. Mittenrauheit des abgemusterten Bauteils: 8,53  $\mu\text{m}$ ,
2. Gesamthöhe des Rauheitsprofils: 56,3  $\mu\text{m}$ .

Zum Vergleich:

1. Mittenrauheit des Höhenverstellers in der Kavität: 12,3  $\mu\text{m}$ ,
2. Gesamthöhe des Rauheitsprofils: 84  $\mu\text{m}$ .

Die ETFE-Folie reduziert die Rauheit merklich, wobei große Rauheitsspitzen (ca. 100  $\mu\text{m}$ ) innerhalb kurzer Strecken (2 mm, 4,3 mm, 8,7 mm) auf etwa 20  $\mu\text{m}$  im Package ausgeglichen werden können.

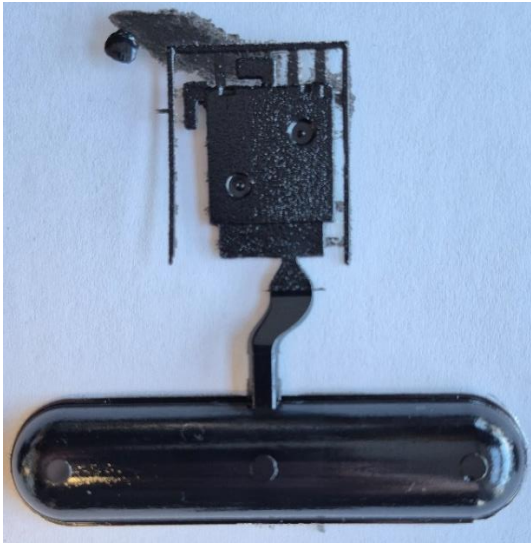


Abbildung 24: Abgemustertes Bauteil aus SLS Edelstahl.

**Werkzeugeinsätze aus SLS Aluminium:** Die vorgesehenen Ventings wurden in den additiv gefertigten Aluminiumwerkzeugeinsätzen schlecht abgeformt. Bei der Abmusterung wurden diese soweit verschlossen, sodass EMC nicht mehr aus der Kavität austreten kann, was sich in den abgemusterten Bauteilen ohne Überspritzungen zeigt (siehe Abbildung 25). Dennoch kann Luft entweichen, wie an der komplett abgefüllten Kavität erkennbar ist. Bei der Abmusterung kam es teilweise zu einem Riss der Folie, was auf die schlechte Detailtreue und hohe Rauigkeit des Einsatzes zurückzuführen ist, wodurch scharfe Kanten entstehen und die Konstruktionsrichtlinien verletzt werden. Positiv ist, dass durch das Ausbleiben der Überspritzung die Nachbearbeitung der Bauteile erleichtert wird (siehe Abbildung 25).

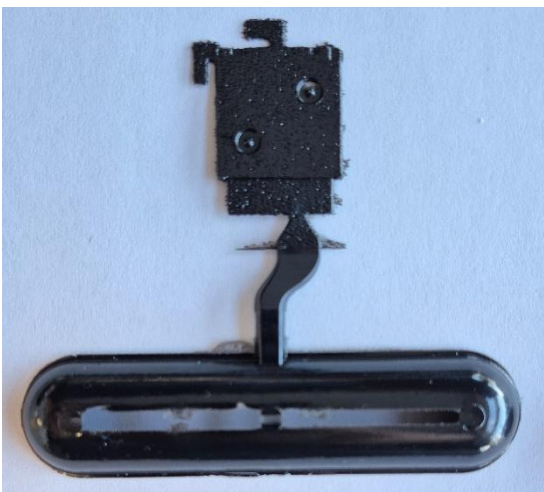


Abbildung 25: Abgemustertes Bauteil aus SLS Aluminium.

**Duroplast-Einsätze:** Die Herausforderungen bei diesen Werkzeugeinsätzen entstehen durch ungenaue Z-Richtungs-Toleranzen des Einsatzes und Höhenverstellers, was zu einer flacheren Kavität führt. Positiv wirkt sich jedoch die Wärmeausdehnung aus, da sie zu einer guten Abdichtung zum Anguss und Stammwerkzeugeinsatz beiträgt, wodurch die ETFE-Folie an diesen Stellen nicht reißt.

Während der Versuche verfärbt sich bei Duroplast 1 und Duroplast 2 der Einsatz. Bei 180 °C wird er milchig, nach 20 Abmusterungen zeigt sich eine leichte Gelbfärbung. Zudem entstehen bei der ersten Erwärmung von Duroplast 1 Mikrorisse auf der Oberfläche von Einsatz und Höhenversteller, die sich jedoch nicht ausweiten. Insgesamt bleibt der Einsatz über alle Abmusterungen hinweg formstabil – ein Hinweis auf die Eignung des Materials Duroplast 1 für den Prototypenbau. Frühere Studien zeigen, dass mit Duroplast 1 bis zu 1.000 Abmusterungen möglich sind, bevor Schäden auftreten.

Die Oberfläche der abgemusterten Bauteile weist eine schuppenartige Struktur auf, die auf die Mikrorisse im Werkzeugeinsatz zurückzuführen ist (s. Abbildung 26). Messungen ergaben eine Mittenrautiefe von 1,11 µm und eine Gesamthöhe des Rauheitsprofils von 8,52 µm (gemessen nach EN ISO 4288). Die Kavität selbst zeigt deutlich höhere Rauheitswerte mit einer Mittenrautiefe von 2,07 µm und maximaler Profiltiefe von 92,4 µm. Zwei Mikrorisse mit bis zu 83,4 µm Tiefe und 30 µm Breite wurden identifiziert. Diese wurden durch die ETFE-Folie weitgehend kompensiert, sodass sich auf dem abgemusterten Bauteil nur geringe Abdrücke (~3 µm) zeigen. Optisch sind sie zwar erkennbar, die funktionale Oberflächenqualität wird jedoch kaum beeinträchtigt. Eine Abnahme der Rauheit konnte bestätigt werden.

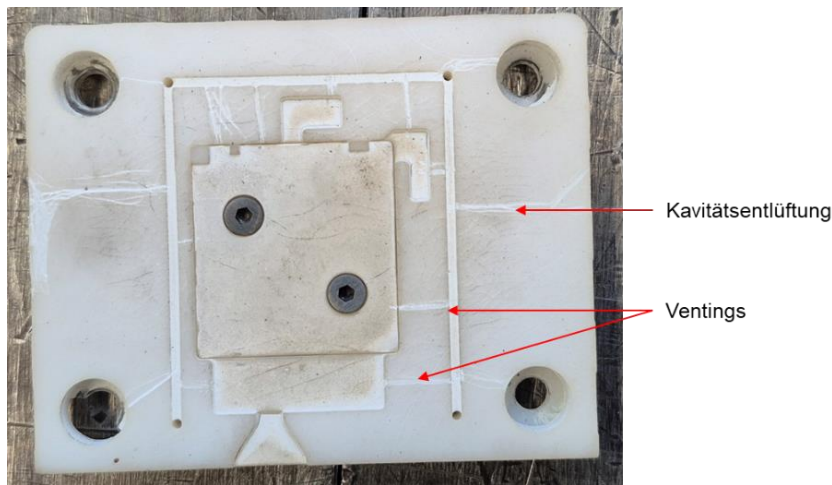


Abbildung 26: Werkzeugeinsatz aus Duroplast 1 mit Mikrorissen in der Oberfläche.

**Vergleich der Werkzeugeinsätze:** Die Versuche zeigen, dass die modularen Einsätze gut im FAM-Prozess einsetzbar sind. Die einfache Montage und schnelle Austauschbarkeit ermöglichen effiziente Tests mit verschiedenen Einsätzen. Der integrierte Höhenversteller kann zwar Fertigungstoleranzen ausgleichen, führt jedoch zu einem höheren Nachbearbeitungsaufwand. Zusätzlich sind in dem Fall Bohrungen für Schrauben notwendig, was sich im Bauteil abbildet. Hohe Präzision bei der Schraubenbohrung ist erforderlich, um eine ebene Kavitätenoberfläche zu gewährleisten. Ein Riss in der ETFE-Folie kann außerdem EMC in den Werkzeugeinsatz eindringen lassen und so zur Verklebung von Einsatz und Höhenversteller führen. Daher wird empfohlen, Einsätze als einteiliges Bauteil auszulegen. Die Funktion des Höhenverstellers wird als nicht zwingend notwendig eingestuft, ebenso wie die Zentrierstifte, da die Einsätze zuverlässig über ihre seitlichen Flächen ausgerichtet werden.

Alle Versuche wurden mit denselben Parametern und Randbedingungen durchgeführt, wodurch ein direkter Vergleich der verschiedenen Materialien und Herstellverfahren möglich ist (vgl. Tabellen 2 und 3):

Tabelle 2: Vergleich der verschiedenen Einsätze

	Werkzeug- stahl	Edelstahl	Aluminium	Duroplast 1	Duroplast 2
Herstellverfahren	konventionell	SLS	SLS	SLA	SLA
Festigkeit	+++	++	+	-	--
Oberflächengüte	+++	-	--	+	++
Genauigkeit	+++	+	-	+	++
Ebenheit	+++	++	-	+	+
Nachbearbeitung	+++	-	--	++	++
Maßhaltigkeit	+++	+++	+++	+	+
Reinigung	+++	++	+	---	---
Herstellungsdauer	---	+	+	+++	+++
Kosten [€/Stück]	---	198,25	177,93	135	120

Tabelle 3: Vergleich der abgemusterten Bauteile aus den verschiedenen Einsätzen.

Parameter	Werkzeug- stahl	Edelstahl	Aluminium	Rigid 10K	FLHTAM02
Oberflächengüte	+++	--	--	++	++
Nachbearbeitung	++	-	++	0	+
Luft einschüsse	+++	+++	+++	--	+++

Konventionell gefertigte Einsätze liefern die besten Ergebnisse, sind jedoch teuer und zeitaufwendig. Additiv gefertigte Einsätze – besonders aus Duroplast – bieten eine wirtschaftlich interessante Alternative, erfordern aber vorsichtigen Umgang aufgrund ihrer geringeren Robustheit und weil sie bei einem Riss der Folien nicht gereinigt werden können.

## 2.4 AP 3.4: Materialcharakterisierung:

Sowohl die bei HS hergestellten als auch die von Lieferanten zur Verfügung gestellten Musterplättchen wurden dem Projektpartner 3. Physikalische Institut (3.PI) der Universität Stuttgart zur Messung der Fluoreszenz bereitgestellt. Der Messaufbau ist in 27 dargestellt.

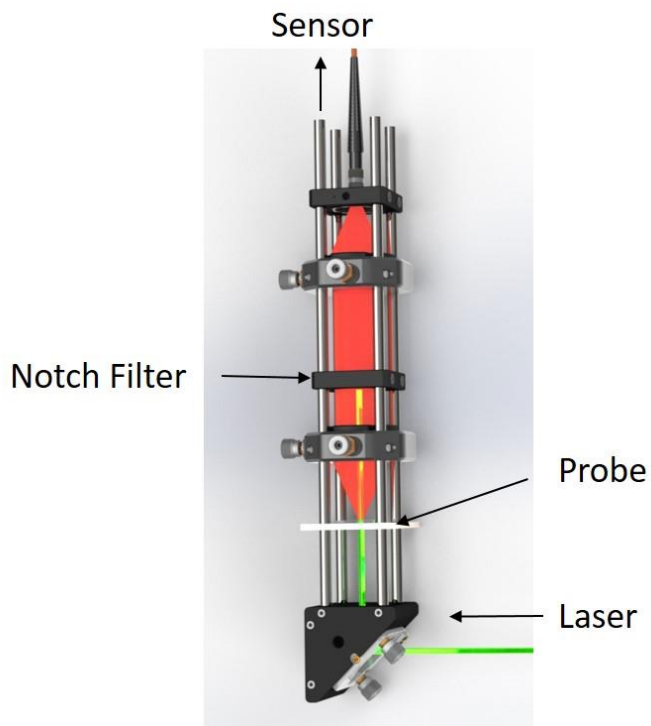


Abbildung 27: Messaufbau zur Fluoreszenzmessung bei 3.PI (Quelle: 3.PI)

Bei der Versuchsdurchführung wurden die Musterplättchen in den Messaufbau (in Abbildung 27 als „Probe“ bezeichnet) eingespannt. Mit dem Messaufbau wurde das Fluoreszenzverhalten der transparenten Kunststoffe gemessen, die von einer externen Lichtquelle angeregt werden. Dabei wird die Probe mit einem Laserstrahl einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt, wodurch die Probe angeregt wird und Fluoreszenzstrahlung emittiert. Der Notch Filter ermöglicht das Ausfiltern von Frequenzen innerhalb eines engen Frequenzbereiches. Ein Sensor am Ende des Strahlengangs erfasst die von der Probe emittierte Fluoreszenz. Die Versuchsdurchführung erfolgte zwischen Wellenlängen von 550 nm bis 800 nm. Die Ergebnisse der Versuche ist in Abbildung 28 zu sehen.

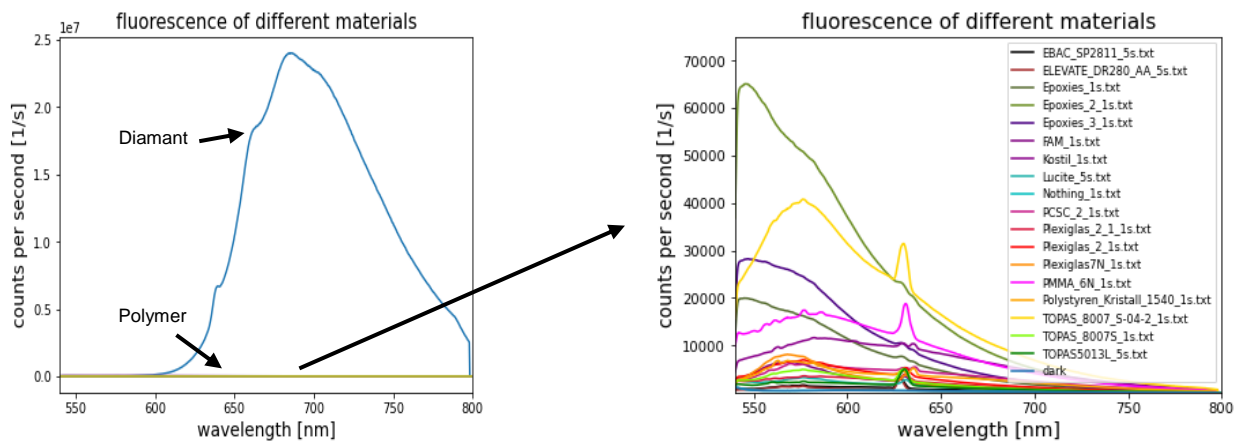


Abbildung 28: Ergebnisse der Fluoreszenzmessung unterschiedlicher Kunststoffe

Die Untersuchungen zeigten, dass alle untersuchten transparenten Materialien eine ca.  $10^3 - 10^4$  geringere Fluoreszenz im Vergleich zu Diamanten (Abbildung ) aufzeigen. Die bisherigen Untersuchungen im Projekt haben gezeigt, dass transparente duroplastische Kunststoffe sich aufgrund ihrer geringen Autofluoreszenz für eine Verkapselung von optischen Elementen für Quantensensoren grundsätzlich eignen. Außerdem eignen sich duroplastische Kunststoffe aufgrund ihrer geringen Viskosität während der Verarbeitung auch für die Verkapselung von filigranen Bauteilen.

Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen hingegen kommt es während des Prozesses zu hohen Werkzeuginnendrücken. Dies würde beispielsweise die Bonddrähte zur elektrischen Verbindung der Komponenten oder die empfindlichen optischen Elemente von Quantensensoren beschädigen. Dadurch erübrigt sich die weitere Untersuchung dieser Materialklasse. Deshalb wurde im weiteren Verlauf des Projektes der Fokus auf die duroplastischen Kunststoffe und deren Verarbeitung durch Film-Assisted Molding gesetzt.