

Zwischenergebnisse 2015

Opti-Bond: Integriert-Optische Module durch neue Bondtechnologien (18360 BR)

Für viele optische Anwendungen stoßen geklebte optische Systeme, bei denen brechzahlangepasste Polymere als Hilfsstoffe zum Fügen optischer Flächen aus Glas eingesetzt werden, zunehmend an die Leistungsgrenzen. Dies gilt insbesondere für erhöhte Temperaturen, Vakuumbedingungen und leistungsstarke Laser-Anwendungen sowie den Einsatz im UV-Spektralbereich. Ursache dafür ist in der Regel die begrenzte Materialstabilität der Polymere auf mikroskopischer Ebene aufgrund der schwachen Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung (C-C) innerhalb der Kettenstruktur, die bereits durch weiche UV-Strahlung aufgebrochen wird. Analog kann selbst eine geringe Absorption langwelliger Strahlung bei hohem Leistungseintrag über Wärmeentwicklung und thermische Ausdehnung der Polymere oder nachfolgende chemische Reaktionen die Funktionalität optischer Systeme gravierend beeinträchtigen.

Ziel des Projekts ist es, die Technologien des silikatischen Bondens und des direkten Bondens in spezifischen transmissiven Prototypenanwendungen für den Bereich erhöhter Temperaturen (> 100 °C) und/oder hoher Leistungsdichten verfügbar zu machen, sowie die Technologie des Ultrakurzpuls-Laserschweißen anzuwenden und hierbei alle denkbaren Synergieeffekte aus den drei Technologien umfassend zu nutzen.

Um diese Ziel zu erreichen werden sowohl planare als auch konforme sphärische optische Glasflächen mittels der jeweils optimal Material-angepassten Technologie für transmissive Optikanwendungen gefügt. Zum Einsatz kommen die folgenden Technologien:

1. Direktes Bonden bei ca. 250 °C
2. Silikatisches Bonden bei ca. 120 °C
3. Ultrakurzpuls-Laserschweißen bei Raumtemperatur

Dabei sollen aus Kostengründen zunächst optische Bauteile mit einem Durchmesser ≤ 30 mm zur Anwendung kommen (Voruntersuchungen an Testsubstraten). Es werden jeweils mindestens 2 Einzelelemente zu Optikbaugruppen für anwendungsbezogene Demonstratoren gefügt und bezüglich ihrer Funktionalität unter Anwendungsbedingungen getestet.

Ergebnisse

Im Rahmen des direkten Bondens ist vorgesehen, Strahlteilerwürfel aus zwei 90°-Prismen zu fügen. Die Auswirkungen von Verdrehungen in der Bondebene (bzw. Anlagetoleranzen der Einzelteile) auf den Strahlversatz wurden berechnet. Darauf aufbauend wurde ein Fügekonzept entwickelt, mit dem ein korrektes Alignment beim Fügen erzielt werden kann. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist in Abb. 1 dargestellt.

In Absprache mit den Projektpartnern ist geplant, lange „Prismenriegel“ mit einer Kantenlänge von etwa 50 mm senkrecht zur Dreiecksfläche zu fügen und diese nach dem

Bonden in kürzere, würfelförmige Teile zu separieren. Damit lässt sich der Strahlversatz voraussichtlich auf < 10 arcsec einschränken.

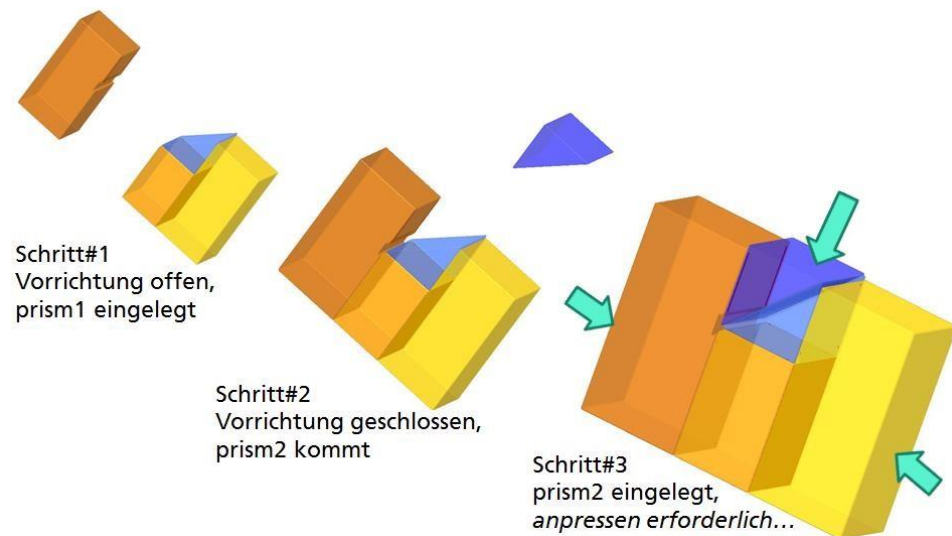


Abb. 1: Alignment-Strategie zum direkten Bonden von Strahlteiler-Elementen

Beim silikatischen Bonden von Testsubstraten wurden drei Materialpaarungen für die zukünftigen Untersuchungen gemeinsam mit dem begleitenden Arbeitskreis festgelegt und sind Gegenstand erster Untersuchungen:

- Kieselglas + Kieselglas (Demonstrator 2)
- Kieselglas + CaF_2 (Demonstrator 1)
- N-BK7 + N-SF6 (Demonstrator 1)

Für die Ausbildung der Si-O-Si Brückenbindung in der Fügezone ist es von Vorteil, wenn beide Fügepartner an der Oberfläche Si-OH Bindungen enthalten. Bei CaF_2 handelt es sich um ein nicht-oxydisches Material, das kein Silizium enthält. In der Literatur wird jedoch beschrieben, dass eine entsprechende Vorbehandlung zum Austausch der Fluor-Atome aus dem Kristallgitter gegen OH-Gruppen denkbar ist. Die so entstandene Oberfläche ist für das silikatische Fügen geeignet.

Der Unterschied der CTE (coefficient of thermal expansion) von CaF_2 und Kieselglas ist erheblich. Anhand dieser Paarung sollen die Grenzen der konventionellen Wärmebehandlung beim silikatischen Bonden im folgenden Berichtszeitraum untersucht werden.

Für das Laserbonden wurden zunächst Testsubstrate für die Grundlagenversuche mit den Industriepartnern festgelegt. Ein Hauptaugenmerk beim Laserbonden liegt dabei auf der Einschränkung, dass die Fügepartner vor dem Prozessieren angesprengt werden müssen. Daher galt es zur Entwicklung spaltüberbrückender Verfahren, den Schweißprozess unter Anpressen der Fügepartner zu untersuchen.

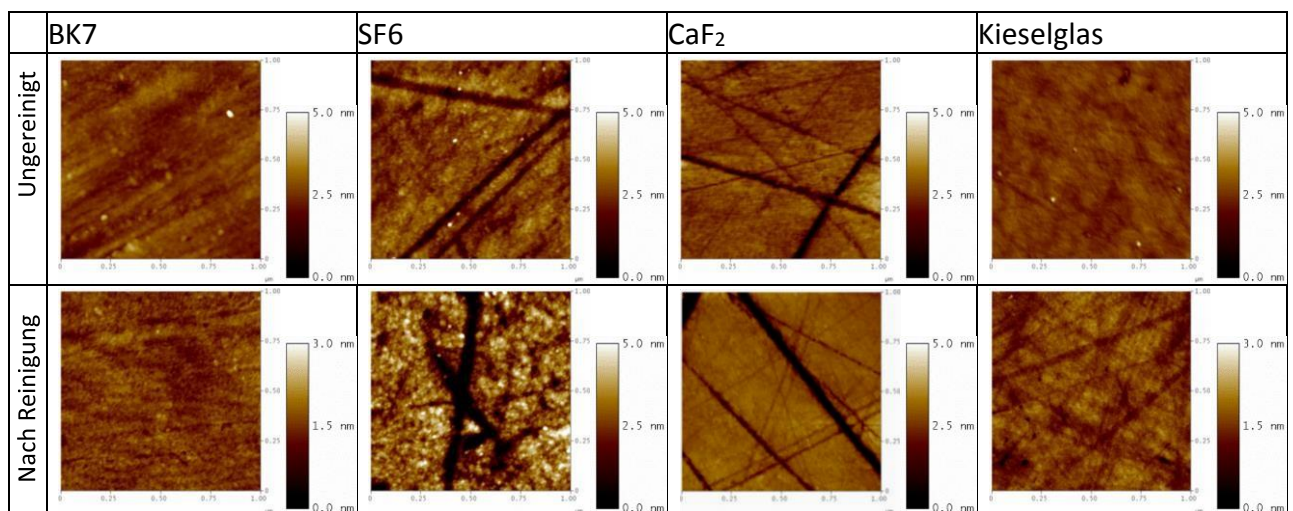
Es wurden exemplarische Beschichtungen an Testsubstraten vorgenommen und die Rauheitsveränderungen charakterisiert, bevor bei Bondversuchen hauptsächlich die Temperatureinflüsse auf die Festigkeit untersucht werden. Gegebenenfalls werden

zusätzliche dünne Haftvermittlerschichten aufgebracht. Die erzielten Bondergebnisse werden im Einzelnen charakterisiert hinsichtlich optische Transmission, Bond-/Bruchfestigkeit und bei Bedarf auch Streulicht sowie LaserDamage-Threshold bei unterschiedlichen Pulsdauern.

Die Einflüsse von Oberflächen-Rauheit und -Ebenheit auf die Bondfestigkeit wurden zunächst anhand von Kieselglastests substraten untersucht. Es wurden die Bondtemperatur und der Anpressdruck variiert. Die Bondfestigkeit wurde mittels 3-Punkt-Biegebruch ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass Bondtemperatur und Anpressdruck (für die relativ steifen Proben) nur geringe Auswirkungen haben, aber die Oberflächenqualität (Ebenheit und Rauheit) und die Festigkeit ganz entscheidend beeinflussen.

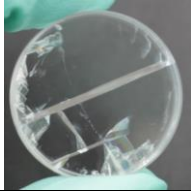


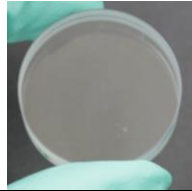
Für erste Vorversuche zur prinzipiellen Eignung der Materialpaarungen und Analysemethoden wurden planare Testsubstrate verwendet. Zunächst erfolgte die Messung der Oberflächenrauheit mithilfe von AFM (Atomic Force Microscopy) im angelieferten Zustand (Tabelle 1). Anschließend wurden die Proben gereinigt. Ein chemischer Angriff der Probenoberfläche zeigt sich im Aufrauen der Oberflächen und in einer veränderte Oberflächenstruktur. Dazu wurden die Proben nach der Reinigung erneut mit dem AFM vermessen. Insgesamt weisen die zur Verfügung gestellten Proben eine sehr geringe Rauheit auf, was sich positiv auf die Bondfestigkeit auswirkt.

Tabelle 1: AFM-Aufnahmen



Für erste Versuche zum silikatischen Bonden wurden die jeweiligen Materialkombinationen mit einer Natriumsilikat-Lösung gefügt. Die hergestellten Proben wurden zunächst visuell begutachtet (Tabelle 2). Das Fügen von CaF₂/Kieselglas war bisher nicht erfolgreich. Bei Temperaturen für die Wärmebehandlung von 70 °C, 90 °C und 110 °C kam es zur Zerstörung des CaF₂ aufgrund der hohen thermischen Spannungen. Um nachzuweisen, dass silikatisches Fügen mit CaF₂ prinzipiell möglich ist, wurden zwei CaF₂Substrate miteinander gefügt. Es konnte ein visuell einwandfreier Bond erzielt werden. Bei Kieselglas/Kieselglas wurden bei einer Temperatur von 110 °C lediglich kleine Fehlstellen beobachtet, bei 200 °C eine großflächige Trübung in der Mitte.

Tabelle 2: Visuell begutachtete Proben

CaF ₂ /Kieselglas	CaF ₂ /CaF ₂	BK7/SF6	Kieselglas/ Kieselglas
			
Spannungsrisse	Keine Fehlstellen erkennbar	Mittige Trübung	Einzelne Fehlstellen

Anschließend wurden die gefügten Proben in einem 3-Punkt-Biegebruchversuch getestet und die so ermittelten Festigkeiten mithilfe einer Weibull-Statistik ausgewertet. Die beobachteten Trübungen korrelieren mit niedrigen Bruchfestigkeiten. Bei Kieselglas wurde eine Festigkeit von ca. 40 % des massiven Materials erreicht. Bei CaF₂/CaF₂ ist eine Festigkeit von ca. 30 % des massiven Materials erreicht worden, was akzeptabel ist, bezogen z. B. auf konventionelle Klebeverbindungen. Diese liegen zwischen 5 und 15 MPa.

Um die Dimension Laser-induzierter Modifikationen sowie deren Parameterabhängigkeit zu charakterisieren, wurden erste Untersuchungen an flachen Glassubstraten durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass die Größe der aufgeschmolzenen Bereiche mit der mittleren Laserleistung skaliert. Mit dem verwendeten Ultrakurzpulslaser (bereitgestellt von Trumpf Lastertechnik GmbH) konnten Modifikationen mit mehreren 100 µm Größe im Volumen von Kieselglas induziert werden (Abb. 3).

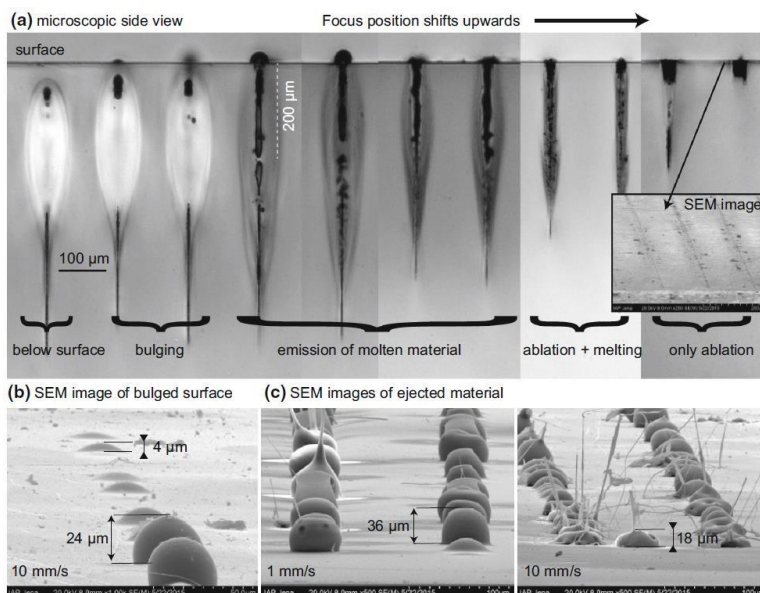


Abb. 3: (a) Laser-induzierte Modifikationen in Kieselglas bei unterschiedlicher Fokuslage. (b)/(c) REM Bilder der Probenoberfläche nach dem Laserstrukturieren.

Je nach Fokusposition können Auswölbungen, Auswürfe aus geschmolzenem Glas bis hin zu ablatierten Bereichen beobachtet werden. Für das Fügen sind insbesondere die Zonen ausgeworfener Schmelze von Interesse.

Im Folgenden wurde untersucht, ob diese Auswürfe zum spaltüberbrückenden Bonden genutzt werden können. Dafür wurde ein Glas-basiertes Stufenindexprofil durch Ätzen angefertigt. Dieses weist diskrete Stufen auf, die durch Kombination mit einem flachen Wafer Spalten verschiedener Größe ergeben.

Durch Scannen des Laserfokus können nun die Schweißmodifikationen so platziert werden, dass der Bereich der größten Schmelze innerhalb des Spaltes liegt. Durch die diskreten Spalte ist im Mikroskopbild ein Muster aus Newtonringen erkennbar. Diese sind nach dem Schweißprozess nicht mehr beobachtbar, was auf eine permanente Verbindung der Proben (spaltüberbrückend) hindeutet. Weiterhin ist im Mikroskopbild der Spalt innerhalb der aufgeschmolzenen Bereiche sowie zwischen diesen geschlossen. Die abkühlende Schmelze innerhalb der Grenzfläche der Glasproben bewirkt das Zusammenziehen und so ein Verschließen des Spaltes. Zusätzlich überbrückt austretendes geschmolzenes Material den Spalt innerhalb der Modifikation.

Um den Effekt zu quantifizieren, wurde im Folgenden die Spaltbreite sowie die Fokusposition variiert und untersucht, in welchem Bereich der Spalt noch überbrückt werden kann. Hierbei zeigt sich, dass die Toleranz (Fokusabweichung) mit zunehmender Spaltbreite abnimmt. Es konnten Spalte bis zu 2,5 μm verschlossen werden.

Um die Festigkeit Laser-gebondeter Proben zu evaluieren, diente ein 3-Punkt-Biegeversuch. Die statistische Bruchfestigkeit wurde mittels Weibull-Verteilung bestimmt. Insgesamt konnten sehr hohe Festigkeiten, bis zu 90 % der Bruchfestigkeit des Volumenmaterials (optisch kontaktiert), gemessen werden. Nutzt man das spalt-überbrückende Bonden (nicht kontaktiert), werden Bruchspannungen bis zu 72,9 MPa (85 % des Volumenmaterials) erreicht. Generell zeigt sich, dass die Festigkeit bei kleinen Linienabständen ($< 50 \mu\text{m}$) sinkt, was auf die Akkumulation eingebrachter Spannungen zurück zu führen ist. Allerdings verringert sich das aufgeschmolzene Volumen bei großen Linienabständen ($> 125 \mu\text{m}$), wodurch die Bruchfestigkeit ebenfalls sinkt. Optimale Werte ergeben sich im Bereich dazwischen.