

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Abschlussbericht zum BMBF-Förderprojekt

---

**FH-Impuls 2016: ‚Neuartige Diagnostikmethoden‘ im Rahmen  
der Partnerschaft ‚Plasma for Life‘ (NeDia)**

**(FKZ: 13FH6I02IA)**

---

Teil I: Kurze Darstellung

Berichtszeitraum:

01. Januar 2021 bis 31. Dezember 2024

Projektleiter:

Prof. Dr. Christoph Gerhard

an der Fakultät Ingenieurwissenschaften und Gesundheit an der  
Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK),  
Göttingen

**Inhaltsverzeichnis**

1. Aufgabenstellung .....3

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....3

3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....4

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....4

5. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die  
Durchführung des Vorhabens benutzt wurden ..... 5

6. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und  
Dokumentationsdienste ..... 6

7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....7

## 1. Aufgabenstellung

Inhalt des Projekts war zum einen die grundlagenorientierte Aufklärung fertigungsrelevanter Phänomene bei Herstellung und Betrieb optischer Systeme und zum anderen deren Übertragung in eine anwendungsorientierte Nutzung. Ziel war es, durch das Ausarbeiten neuartiger Lösungen für die Optikfertigung die Fertigungsausfälle und damit verbundenen Kosten möglichst deutlich zu senken. Zusätzlich zielen die Forschungstätigkeiten darauf ab, ergänzend neuartige Fertigungsverfahren für anspruchsvolle Optikkomponenten zu erarbeiten. Es sollten im Projektverlauf Lösungsansätze ausgearbeitet werden und gegebenenfalls Funktionsmuster entstehen, die den Fragestellungen und Anforderungen der industriellen Kooperationspartner so gut wie möglich entsprechen.

In diesem Rahmen war das Impulsprojekt „Neuartige Diagnostikmethoden“ in vier Teilprojekte gegliedert. Projektinhalt in Kooperation mit dem Projektpartner Qioptiq war die Entwicklung einer **Plasmaunterstützten Bondingprozesses**, der ohne zusätzliche Haftvermittler auskommt und damit zu optisch einwandfreien und hochbelastbaren Verbindungen führt.

Als zweites Thema beinhaltete das Vorhaben in Kooperation mit der Firma Trumpf die Aufklärung eines Phänomens, bei dem sich der Gasdruck und -zusammensetzung in Laseranlagen während des Betriebs über längere Zeiträume hinweg verändert und beschäftigt sich daher mit der **Stabilisierung von Gasgemischen in Hochleistungs-CO<sub>2</sub>-Lasern**.

Ein weiteres Teilprojekt, gemeinsam mit der Firma Henke-Sass, Wolf GmbH, beschäftigte sich mit dem **Feinkitten von optischen Linsen und Blendenelementen**. Hier sollte aufgeklärt werden, weshalb sporadisch Kittverbindungen und PVD-Beschichtungen nicht zweckbestimmungsgemäß halten, wenn deren Herstellung nicht durch einen Plasmaprozess unterstützt wird. Zusätzlich sollte abhilfeschaftende eine Atmosphärendruck-Plasmaanlage entwickelt und im Fertigungsumfeld erprobt werden.

Im vierten Teilprojekt sollten, mit der Firma Zeiss als Kooperationspartner, die **Auto-Degradierung optischer Linsen** untersucht werden, die sich nach Wochen bis Monaten auf einigen Glaskomponenten als Graubeschlag äußert. Hier bestand das Ziel darin, objektive und reproduzierbare Diagnosemethoden zu entwickeln, um das Auftreten des Graubeschlags bereits frühzeitig zu erkennen und im besten Falle Gegenmaßnahmen abzuleiten.

## 2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde maßgeblich in den Forschungslaboren der Fakultät Naturwissenschaften und Technik an der HAWK in Göttingen durchgeführt. Im späteren Verlauf wurde mit enger mit den Partnerfirmen zur Erprobung der Funktionsmuster zusammengearbeitet.

Bei der Bearbeitung des Vorhabens konnte auf jahrelange Erfahrung bei der Entwicklung von Atmosphärendruck-Plasmaverfahren zwecks Aktivierung, Reinigung, Dekontamination, Strukturierung, Funktionalisierung und zur Beschichtung zurückgegriffen werden. Weiterhin existiert an der HAWK eine breite Expertise und gerätetechnische Ausstattung im Bereich der physikalischen Oberflächenanalytik, auf die im Vorhaben maßgeblich zurückgegriffen wurde. Die Themenverwandtschaft der aktuellen und zurückliegenden Forschungsarbeiten führten zu einem breiteren Verständnis und nachhaltiger Stärkung der Forschungskompetenz der HAWK.

Die Forschungsarbeit an grundsätzlichen Fragestellungen zur Wechselwirkung von

Atmosphärendruckplasmen mit verschiedensten Materialklassen insbesondere Glas, bedeutet für die HAWK die konsequente Weiterführung der Strategie, innovative plasmabasierte Verfahren im Bereich der Oberflächenbearbeitung Applikationen zu erforschen und trägt auf diese Weise zur Forschungsprofilbildung der HAWK bei. Dabei wird besonders der wissenschaftliche Nachwuchs mit einbezogen, indem Bachelor- und Masterarbeiten von Studierenden im Rahmen des Projektes angefertigt wurden.

### **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Planung des Vorhabens erfolgte zunächst mit Schwerpunkten auf die messtechnische Untersuchung der von den Partnerunternehmen vorgetragenen Phänomene. Im zweiten Schritt sollte die Ausarbeitung von Lösungsansätzen und in geeigneten Fällen die Erstellung von Funktionsmustern erfolgen, die anwendungsnah zusammen mit den Kooperationspartnern erprobt werden können.

Das Vorhaben wurde gemäß dem vorgesehenen Zeitplan und im Rahmen der zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel bearbeitet. Verbleibende Fragestellungen aus dem Bereich der Auto-Degradierung optischer Linsen, die wegen ihrer Komplexität nicht abschließend beantwortet werden konnten, werden zum Berichtzeitpunkt in ein Folgeprojekt mit dem Kooperationspartner Zeiss übertragen.

### **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Moderne Optiksysteeme enthalten Gerätekomponenten, an die sehr hohe Sauberkeits- und Präzisionsansprüche gestellt werden. Die Implementierung von Plasmatechnologien als Werkzeug für hochpräzise Fertigungsprozesse sind nach Kenntnisstand nach wie vor wenig genutzte Optionen zur Realisierung derartiger Geräte.

#### **Feinstreinigung und Graubeschlag**

Bei der Fertigung feinoptischer Glasoberflächen interagieren Betriebsmittel wie Kühlschmiermittel und Poliermittelsuspensionen mit dem Material. Während des Schleifens lagern sich Kohlenwasserstoffe sowie Abrieb von Schleifkörnern und Werkzeugen in Mikrorissen der Glasoberfläche ab [1]. Beim Polieren diffundiert Wasser aus der Poliermittelsuspension in die Materialstruktur der Glasrandschicht und führt zu einer hydrolytischen Spaltung von Siliziumdioxid, wodurch eine poröse Kieselgelschicht entsteht [2]. Diese Kieselgelschicht verfügt über hygroskopische Eigenschaften und kann zu Glaskorrosion führen [3, 4]. Rückstände von Poliermitteln wie Ceriumoxid oder Aluminiumoxid, sowie Abrieb von Polierwerkzeugen setzen sich in der Glasoberfläche fest, wodurch sich sowohl deren chemische Zusammensetzung [6, 7] als auch deren optischen Eigenschaften [8] von der des darunterliegenden Materials unterscheidet. Mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurde bereits gezeigt, dass Politurverunreinigungen bis zu einer Tiefe von 20 nm nachweisbar sind [9]. Im Rahmen des Forschungsvorhabens kam dieses Verfahren in Kombination mit verschiedenen optischen Methoden zum Einsatz, um Zusammenhänge zwischen Fertigungsparametern und optischen Eigenschaften aufzuzeigen.

#### **Gasstabilisierung**

Molekularsiebe spielen eine zentrale Rolle bei der Kontrolle der Gaszusammensetzung in technischen Anwendungen. Zeolithische Molekularsiebe sind im Allgemeinen mikroporöse, hydrophile Granulate, die für ihre katalytischen Anwendungen bekannt sind [10]. Ihr kristallines Alumosilikat-Gerüst besteht aus Silizium- und Aluminiumtetraedern, die über Sauerstoffatome miteinander verbunden sind. Diese bilden spezifische Strukturen mit einer

großen inneren Oberfläche von typischerweise 600–1000 m<sup>2</sup>/g, die als Wirtsstruktur für Gastmoleküle dient [11]. Während der Zweck von Molekularsieben in herkömmlichen Anwendungen nicht nur darin besteht, Wasser zu absorbieren, sondern auch CO<sub>2</sub> als umweltschädliches Gas aus der Umgebungsluft zu filtern [8–10], erfordert die innerhalb des Forschungsvorhabens verfolgte Anwendung eine gezielte Anpassung der Siebe [12] durch geeignete Zulieferer. Dieser Ansatz erschien im Projektverlauf jedoch problematisch, da die Moleküldurchmesser der Laser-Gasbestandteile in ihren Moleküldurchmessern nur geringfügig voneinander abweichen. Die Eintrittsporen zu den Adsorptionskavitäten haben einen definierten Durchmesser und lassen daher hauptsächlich solche Substanzen passieren, deren kritischer Moleküldurchmesser kleiner als der Porendurchmesser ist. Dadurch wird üblicherweise eine selektive Trennung der Stoffe nach ihrer Größe ermöglicht [13,14]. Das Problem besteht darin, dass das Lasergasgemisch mehrere Bestandteile mit ähnlichem kritischem Moleküldurchmesser enthält: CO mit 3,2 Å, N<sub>2</sub> mit 3 Å, CO<sub>2</sub> mit 2,8 Å und H<sub>2</sub>O mit 2,6 Å [15]. Folglich adsorbieren herkömmliche Molekularsiebe mit einem Porendurchmesser von 3 Å immer sowohl CO<sub>2</sub> als auch H<sub>2</sub>O [16], was keine günstige stabilisierende Wirkung auf die Gaszusammensetzung hat.

### **Bonden von Planoptiken**

Der Begriff des Bondens umfasst verschiedene Verfahren zur Verbindung polierter Wafer oder Metall-Halbleiter-Interfaces [17, 18]. Der Prozess gliedert sich in drei Schritte: Aktivierung, Fügen, Ausheilen. Das Bonden erfolgt entweder durch Funktionalisierung der Oberflächen oder durch Zwischenschichten [19, 20]. Beim Bonden von Präzisionsoptiken darf die Transmission oder Integrität optischer Schichten jedoch nicht beeinträchtigt werden, weshalb im Forschungsvorhaben ausschließlich das direkte Bonden ohne Zwischenschichten infrage kommt. Dabei werden Oberflächen chemisch oder physikalisch aktiviert und anschließend gefügt [21-23]. Die chemische Aktivierung erzeugt reaktive Gruppen zur Ausbildung kovalenter Bindungen [24], etwa durch Ätzen mit Kalilauge [25] oder Flusssäure [26]. Physikalische Aktivierung erfolgt über kalte Niederdruckplasmen [27]. Kohäsionskräfte tragen zur Haftung bei, während die kovalente Vernetzung von Siloxangruppen (Si-O-Si) entscheidend ist [28]. Kovalente Bindungen können auch durch Aminogruppen (NH<sub>2</sub>) entstehen, sowohl nasschemisch [29] als auch durch Plasmatechnologie [30]. Der Fügeprozess erfolgt beim Projektpartner Qioptiq meist unter Spülung mit vollentsalztem Wasser (VE-Wasser) [31, 32], was die Staubbefreiheit sichert und Siloxangruppen vorübergehend stabilisiert. Während des Ausheilprozesses werden die Oberflächen unter Vakuum, hohen Temperaturen (bis 1000°C) und mechanischem Druck (ca. 1 MPa) kovalent verbunden. Aufgrund der effizienten Verfahrenstechnik gewinnen für derartige Aktivierungstechniken kalte Atmosphärendruckplasmen zunehmend an Bedeutung [22, 30, 33]. In Nichtgleichgewichtplasmen können allerdings hohe Randschichtpotenziale vorliegen, die positiv geladene Ionen zur Oberfläche beschleunigen [34, 35], was zu unerwünschten Sputtereffekten führen kann [36]. Laut dem Projektpartner Qioptiq kann dies durchaus vorhandene optische Funktionsschichten degradieren oder beschädigen. Im Rahmen des Projekts soll ein Niedertemperatur-Plasmaverfahren entwickelt werden, das minimale Inhomogenitäten aufweist und keine Schäden an Glas- oder Funktionsschichten verursacht.

## **5. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Die im Projekt verwendeten Konstruktionen und Verfahren sind nach bestem Kenntnisstand

nicht mit Schutzrechten versehen. Einzige Ausnahme ist die Verwendung einer Plasmaquelle, die es erlaubt, ein Niedertemperaturplasma direkt auf einer Oberfläche zu erzeugen und innerhalb dessen simultan eine Laserbearbeitung des Materials durchzuführen. Das Patent hierfür liegt bei der Fraunhofer-Gesellschaft.

W. Viöl, S. Wieneke, S. Brückner, R. Damm als Erfinder, FhG als Anmelder:  
Hohltrichterförmiger Plasmagenerator,  
Deutsche Patentanmeldung DE 10 2010 001 606.3 vom 04.02.2010  
PCT-Anmeldung PCT/EP2010/069123 vom 08.12.2010  
WO 2011/095245 vom 08.12.2011  
EP 2532214 erteilt am 23.03.2016

## **6. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

- [1] T. Suratwala, W. Steele, L. Wong, M. D. Feit, P. E. Miller, R. Dylla-Spears, N. Shen, R. Desjardin: Chemistry and formation of the Beilby layer during polishing of fused silica glass. *Journal of the American Ceramic Society* 2015; 98(8): 2395-2402.
- [2] L. M. Cook: Chemical processes in glass polishing. *Journal of Non-Crystalline Solids* 1990; 120:152-171.
- [3] R. K. Iler: *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica*. New York: Wiley Verlag 1997.
- [4] M. J. Cumbo, S. D. Jacobs: Determination of near-surface forces in optical polishing using atomic force microscopy. *Nanotechnology* 1994; 5: 70-79.
- [6] C. Gerhard: *Optics Manufacturing – Components and Systems*. Boca Raton: CRC press 2017.
- [7] N. D. Dimatteo: *ASM Handbook Volume 19: Fatigue and Fracture*. Novelty: ASM International 1997.
- [8] J. Evans, E. Paul, D. Dornfeld et al.: Material removal mechanisms in lapping and polishing. *CIRP Annals* 2003; 52: 611-633.
- [9] M. Pfiffer, J.-L. Longuet, C. Labrugère, E. Fargin, B. Bousquet, M. Dussauze, S. Lambert, P. Dormont, J. Néauport: Characterization of the polishing induced contamination of fused silica optics. *J Am Ceram Soc* 2017; 100: 96–107.
- [10] L.A. Price, Z. Jones, A. Nearchou, G. Stenning, D. Nye, A. Sartbaeva, The Effect of Cation Exchange on the Pore Geometry of Zeolite L, *AppliedChem* 2 (2022) 149–159.
- [11] K. Gleichmann, B. Unger, A. Brandt, Manufacturing of Industrial Zeolite Molecular Sieves, *Chemie Ingenieur Technik* 89 (2017) 851–862.
- [12] Z. Tahraoui, H. Nouali, C. Marichal, P. Forler, J. Klein, T.J. Daou, Zeolite-Polymer Composite Materials as Water Scavenger, *Molecules* (Basel, Switzerland) 26 (2021).
- [13] C. Xu, W. Wei, Y. He, Enhanced hydrogen separation performance of Linde Type-A zeolite molecular sieving membrane by cesium ion exchange, *Materials Letters* 324 (2022) 132680. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132680>.
- [14] K. Qi, L. Gao, X. Li, F. He, Research Progress in Gas Separation and Purification Based on Zeolitic Materials, *Catalysts* 13 (2023) 855.
- [15] G. Reiss, Die Verwendung von Molekularsieb-Zeolithe in der Adsorptionstechnik, *Period. Polytech. Chem. Eng* (Jan. 1975) 137–164.
- [16] T. Montanari, G. Busca, On the mechanism of adsorption and separation of CO<sub>2</sub> on LTA zeolites: An IR investigation, *Vibrational Spectroscopy* 46 (2008) 45–51.
- [17] J. B. Lasky. Wafer bonding for silicon-on-insulator technologies. *Appl. Phys. Lett.* 1986; 48: 78-80.

- [18] J. Utsumi, K. Ide, Y. Ichiyanagi. Cu/SiO<sub>2</sub> hybrid bonding obtained by surface-activated bonding method at room temperature using Si ultrathin films. *Micro and Nano Engineering* 2019; 2: 1-6.
- [19] S.M. Homayouni, M.R. Vasili, T.S. Hong. Bonding Technologies in Manufacturing Engineering. *Comprehensive Materials Processing* 2014; 6: 237-238.
- [20] M. A. Schmidt. Wafer-to-Wafer Bonding for Microstructure Formation. *Proc. IEEE* 1998; 1575-1585.
- [21] U. Gösele, Q.-Y. Tong. Semiconductor wafer bonding: recent developments. *Mater. Chem. Phys.* 1994; 37: 101-127.
- [22] P. Amirfeiz, S. Bengtsson, M. Bergh, E. Zanghellini, L. Börjesson. Formation of Silicon Structures by Plasma-Activated Wafer Bonding. *J. Electrochem. Soc.* 2000; 147: 2693.
- [23] W. Kern. The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology. *J. Electrochem. Soc.* 1990; 137: 1887.
- [24] G. Habenicht. *Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendung* (3. Auflage). Berlin: Springer Verlag 1997.
- [25] H. Gwo. Hydroxide-catalyzed bonding. US Patent 6548176, 1990.
- [26] S. Essig. Entwicklung von GaInP/GaAs/Si-Mehrfachsolarzellen mittels Wafer Bonding. Dissertation, Physik, Universität Konstanz, 2014.
- [27] G. Kalkowski, S. Risse, C. Rothhardt, M. Rohde, R. Eberhardt. Optical contacting of low expansion materials. *Proc. SPIE* 2011; 8126.
- [28] L.T. Zhuravlev. The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2000; 173: 1-38.
- [29] C. Mai, M. Li, S. Yang. Low temperature direct bonding of silica glass via wet chemical surface activation. *RSC Advances* 2015; 5: 42721–42727.
- [30] M. Eichler. Anlagen- und Prozessentwicklung für das Niedrigtemperatur Direktbunden mittels Atmosphärendruck-Plasmaaktivierung. Dissertation, Universität Braunschweig, 2010.
- [31] C. Bürsing. Prozessentwicklung für chemisch aktiviertes Bonden von Quarzglas. Masterarbeit, HAWK-Göttingen, 2016. unveröffentlicht.
- [32] F. Schwandt. Ermittlung der Bondfähigkeit vergüteter hochbrechender Glassubstrate. Bachelorarbeit, HAWK-Göttingen, 2016. unveröffentlicht.
- [33] D. Pasquariello. Plasma Assisted Low Temperature Semiconductor Wafer Bonding. Dissertation, Universität Uppsala, 2001.
- [34] G. Franz. *Oberflächentechnologie mit Niederdruckplasmen* (2. Auflage). Berlin: Springer Verlag: 1994.
- [35] N. Y. Babaeva, M. J. Kushner. Ion energy and angular distributions onto polymer surfaces delivered by dielectric barrier discharge filaments in air: I. Flat surfaces. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2011; 20: 035017 pp.
- [36] H. Takagi, R. Maeda, T. R. Chung, N. Hosoda and T. Suga. Effect of Surface Roughness on Room-Temperature Wafer Bonding by Ar Beam Surface Activation. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1998; 37: 4197.

## 7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Partnerschaft des Impulsprojekts umfasst die Trumpf Laser GmbH als Hersteller von Lasersystemen und die Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG als ein in der Optikbranche breit aufgestelltes Unternehmen. Die Firmen Henke-Sass, Wolf GmbH und Zeiss Microscopy partizipieren als Hersteller von bildgebenden Messsystemen bzw. deren Komponenten.