

Projektplan

Labakom: Laserbasierte Spannungskompensation bei Glassubstraten in der Dünnschicht-technologie (01IF23076N)

Motivation

In der Optiktechnologie werden dünne Schichten aufgebracht, um die optischen Eigenschaften von Oberflächen zu verändern oder um Oberflächen vor Beschädigungen zu schützen. Als Substratmaterial werden häufig Gläser auf SiO₂-Basis verwendet. Im Allgemeinen weisen dünne Schichten nach dem Aufbringen eine mechanische Spannung auf, die zu einer unerwünschten Verformung des Bauteils aus Schicht und Substrat führen kann (Abbildung 1).

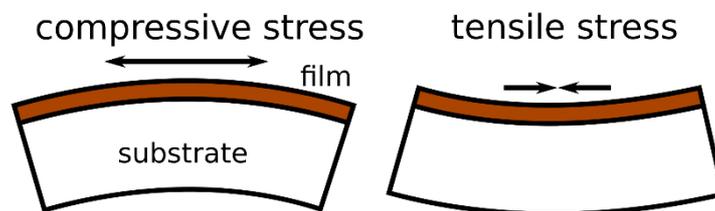


Abbildung 1: Nach der Beschichtung steht eine dünne Schicht üblicherweise unter mechanischer Spannung. Eine Druckspannung (compressive stress) führt zu einer konvexen Verformung der beschichteten Oberfläche. Eine Zugspannung (tensile stress) führt zu einer konkaven Verformung.

Bei der Schichtspannung kann es sich je nach Schichtmaterial und Beschichtungsparameter um eine Druck- oder eine Zugspannung handeln. Die Druckspannung, bei der die Schicht lateral gestaucht ist, führt zu einer konvexen Verformung der beschichteten Seite des Substrats, die Zugspannung hingegen zu einer konkaven Verformung. In beiden Fällen kann durch die Verformung die Qualität des Bauteils gemindert werden.

Bei der Verringerung des mechanischen Einflusses einer Schicht spricht man von „Spannungskompensation“. Gängige Ansätze hierfür sind die Verwendung eines dicken Substrats, die Optimierung der Schichtspannung oder das Aufbringen einer kompensierenden Schicht. Allerdings führt die Verwendung eines dickeren Substrats auch zu einem erhöhten Platzbedarf und Gewicht des Bauteils. Dies kann bei bestimmten Anwendungen, z. B. in der Luft- und Raumfahrt, nicht tolerierbar sein. Zudem wächst mit steigendem Angebot an Dünngläsern auch die Nachfrage nach leichten und formgenauen Optiken. Eine Optimierung der Beschichtungsparameter zur Reduktion der Schichtspannung ist nur in einem gewissen Rahmen möglich und hat im Allgemeinen auch einen Einfluss auf andere Eigenschaften der Schicht. Das Gleiche gilt für eine thermische Nachbehandlung zur Spannungsrelaxation.

Bei einer kompensierenden Beschichtung wird neben der Funktionsschicht, die die Verformung verursacht, eine weitere Schicht aufgebracht, durch deren Schichtspannung die Verformung wieder ausgeglichen wird. Dieser Ansatz stößt allerdings bei strukturierten Schichten, schlechter Reproduzierbarkeit der Spannung der Funktionsschicht oder komplexen Substratgeometrien an seine Grenzen. Die Erweiterung dieses Ansatzes, um auch in schwierigen Fällen eine gute Formkorrektur zu erreichen, ist Gegenstand aktueller Forschung. Es wird ganz allgemein ein Feld ebener Spannungskomponenten in die Rückseite des Substrats eingebracht oder auf die Rückseite aufgebracht (Abbildung 2).

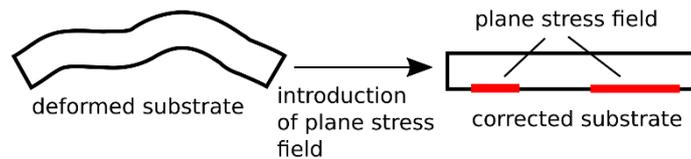


Abbildung 2: Bei einer spannungsbasierten Formkorrekturmethode wird ein Feld ebener Spannungen in die Oberfläche einer Probe eingebracht, um elastisch eine Formkorrektur zu erreichen.

Ein ebener Spannungszustand besteht im Allgemeinen aus einer equibiaxialen, einer antibiaxialen oder uniaxialen und einer Scher-Komponente. Können equibiaxiale und antibiaxiale Komponenten beliebiger Größe und (im Falle der antibiaxialen Komponente) beliebiger Orientierung eingebracht werden, so ist theoretisch eine perfekte Korrektur möglich. Um ein Feld ebener Spannungen zu erzeugen, wird eine aufgetragene Spannungsschicht lithografisch oder mit dem Laser strukturiert, es werden Ionen in die Rückseite implantiert oder man fokussiert Laserpulse in das Material.

In dem hier verfolgten Ansatz werden über den so genannten Temperaturgradienten-Mechanismus (TGM) Zugspannungen in die Oberfläche eines Glassubstrates eingebracht. Beim TGM wird das vom Laser bestrahlte Material aufgeschmolzen, expandiert und verformt sich plastisch. Nach der Bestrahlung kühlt es wieder ab und zieht sich zusammen, wodurch eine Zugspannung entsteht.

In den Vorversuchen wurde ein ArF Excimerlaser (193 nm, 20 ns) verwendet. Aufgrund der kurzen Wellenlänge wird das Laserlicht vom Glasmaterial (hier Schott D263) gut absorbiert, und aufgrund der kurzen Pulsdauer wird das Material nur oberflächlich aufgeschmolzen. Über ein flat-top Strahlprofil können lokal Bereiche gleichförmiger equibiaxialer Spannung erzeugt werden.

Ein Beispiel für eine Formkorrektur zeigt Abbildung 3. Hier wurde die Probe durch eine inhomogene

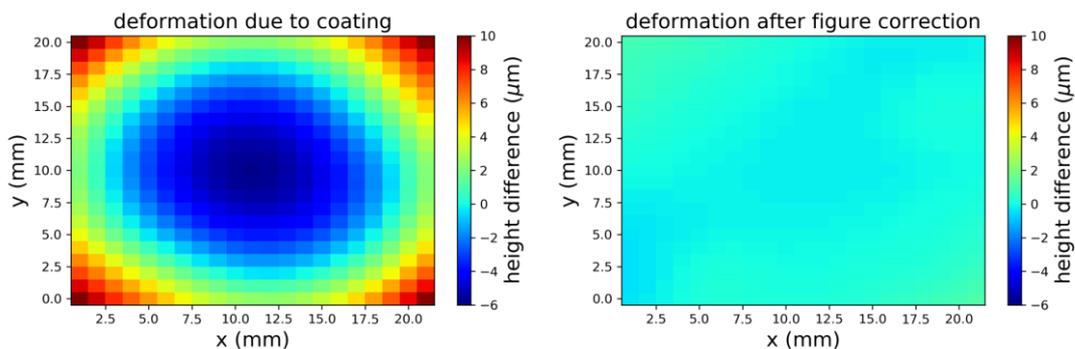


Abbildung 3: Links: Höhenänderung einer Probe aus D263 durch die Beschichtung mit einer inhomogenen Cr-Schicht. Rechts: Höhenänderung nach der Formkorrektur durch Bestrahlung der unbeschichteten Seite mit einem ArF Excimerlaser.

Cr-Schicht verformt. Durch rückseitige Bestrahlung mit einem eigens berechneten Bestrahlungsmuster konnten die RMS-Verformung um einen Faktor 14 reduziert und folglich, trotz eines einfachen Ansatzes zur Berechnung des Bestrahlungsmusters, eine gute Formkorrektur erreicht werden. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass sich antibiaxiale Spannungskomponenten durch Bestrahlung mit einem Linienmuster einbringen lassen, sodass auch komplexere Verformungen korrigiert oder erreicht werden können.

Die Vorteile dieses Ansatzes gegenüber anderen Ansätzen liegen darin, dass kein zusätzlicher Beschichtungsschritt notwendig ist, ein einfacher und robuster Aufbau verwendet werden kann, der Prozess an Luft durchgeführt werden kann und es sich um einen 1-Photonenprozess handelt. Durch letzteres sind die benötigten Intensitäten gering und es kann eine große Fläche schnell bearbeitet werden.

Allerdings gibt es bis zur Anwendung des Prozesses noch einige technologische Hürden zu meistern. Die eingebrachten Spannungen weisen noch eine unzureichende Langzeitstabilität auf. Des Weiteren wurde die Festigkeit formkorrigierter Proben noch nicht untersucht. Allerdings sind Rissbildung und Festigkeit bei der Arbeit mit Gläsern und gerade in Bezug auf eine technische Anwendung ein wichtiger Aspekt. Außerdem können mit diesem Ansatz bisher nur Zugspannungen kompensiert werden. Viele Funktionsschichten weisen allerdings nach dem Aufbringen eine Druckspannung auf.

Forschungsziel

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines laserbasierten Verfahrens zur Spannungskompensation bei Glassubstraten, das auf dem Einbringen von Spannungen in die rückseitige Oberfläche des Substrats basiert. Mit dem Verfahren sollen sich sowohl Zugspannungen als auch Druckspannungen kompensieren lassen. Es soll ebenfalls die Möglichkeit zum Einbringen antibiaxialer Spannungskomponenten beliebiger Orientierung bestehen. Um eine dauerhaft gute Formkorrektur zu gewährleisten, sollen die eingebrachten Spannungen langzeitstabil sein. Der Prozess soll auch keine merklichen Einflüsse auf die Festigkeit des bearbeiteten Materials haben. Ein wichtiger Aspekt sind die Kosten des Verfahrens. Die Investitionskosten sollen für KMU tragbar sein und die laufenden Kosten wirtschaftlich rentabel. Hierzu gehört, dass lediglich gängige Laserquellen und Optikkomponenten verwendet werden, der Aufbau robust und einfach gestaltet ist und die Prozessgeschwindigkeit entsprechend hoch.

Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels

Zur Entwicklung einer Methode mit den oben genannten Eigenschaften wird an die geleisteten Vorarbeiten angeknüpft. Allerdings sollen mit Blick auf die spätere Anwendung in der Optiktechnologie neben dem bereits erprobten Glasmaterial Schott D263 weitere gängige Gläser in die Untersuchungen mit aufgenommen werden. Für den Eintrag von thermischen Spannungen in diese Materialien wird eine ausreichend hohe Absorption des Laserlichts benötigt. Neben UV-Lasern kommen somit auch IR-Laser in Betracht. Hier bietet sich ein gepulster CO₂-Laser an, weil es sich um eine günstige und gängige Strahlquelle handelt, die hohe Leistungen liefert.

Für die betreffenden Materialien soll der Eintrag von equibiaxialen Spannungskomponenten durch eine entsprechend der Absorption gewählten Strahlquelle untersucht werden. Die Langzeitstabilität der Spannungen soll für unterschiedliche klimatische Bedingungen untersucht werden und im Falle einer Instabilität sollen Lösungen zur Stabilisierung der Spannungen gefunden werden. Die Proben könnten z. B. nach der Bestrahlung getempert werden, um die Spannung zu stabilisieren. Eventuell finden sich Bestrahlungsparameter, für die sich eine stabile Spannung ergibt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die mechanische Festigkeit der Proben nach der Bestrahlung. Diese soll mittels eines Ring-on-Ring-Tests (DIN EN 1288) gemessen werden.

Um antibiaxiale Spannungskomponenten zu erzeugen, wird die Oberfläche in Form von linienartigen Vertiefungen mit bestimmter Orientierung und definiertem Aspektverhältnis (Höhe geteilt durch Breite) laserstrukturiert. Entscheidend für die Effektivität dieses Ansatzes sind das Aspektverhältnis der Linien, die Spannungsverteilung auf der Linienstruktur (z. B. nur auf den Stegen) und die Spannungsverteilung senkrecht zur Oberfläche.

Um die Kompensation von Druckspannungen zu erreichen, kann ein ähnlicher Ansatz wie bei den antibiaxialen Spannungskomponenten verfolgt werden, indem Strukturen mit einem bestimmten Aspektverhältnis in die Oberfläche geschrieben werden. Bei geeigneter Wahl von Aspektverhältnis und Dicke des spannungsbehafteten Bereichs sollte die hierdurch verursachte Probenkrümmung einer Druckspannung in der strukturierten Oberfläche entsprechen.

Für die oben genannten Ansätze zur Erzeugung von antibiaxialen Spannungskomponenten und von effektiven Druckspannungen muss ein gangbarer Weg gefunden werden. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Oberflächenstrukturierung mit einem Excimerlaser oder einem CO₂-Laser Spannungen auch an den Stellen, nämlich in den Tälern der Strukturen eingebracht werden, wo sie dem beabsichtigten Effekt entgegenwirken. Durch Experimente und linear-elastische Finite Elemente Simulationen soll der Einfluss dieses Spannungseintrags untersucht und die Oberflächenstruktur entsprechend optimiert werden.

Die entwickelten Prozesse werden dann, idealerweise durch Unterstützung der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses, auf reale Substrat-Schicht-Systeme angewendet. Hierüber können Stärken und Schwächen des Ansatzes erkannt und die Machbarkeit demonstriert werden. Eine

Methode zur Berechnung des Bestrahlungsmusters, die in Grundzügen bereits entwickelt wurde, müsste ggf. angepasst oder erweitert werden.

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas

Dünne Schichten auf Glassubstraten sind in der Optiktechnologie allgegenwärtig und das Problem der Spannungskompensation ist hochaktuell. In Deutschland gibt es eine Vielzahl an Unternehmen, insbesondere auch KMU, die Beschichtungen durchführen. Durch den Einsatz von handelsüblichen Lasern und einfachen optischen Aufbauten sind die Investitionskosten für unsere Methode gering, sodass bei einer Umsetzung auch KMU in die Technologie investieren könnten. Kann eine hochpräzise Formkorrektur durchgeführt werden, ist eine deutliche Verringerung der Substratdicke bei gleichbleibend guter Oberflächenform möglich. Hierdurch erschließen sich neue Anwendungsfelder wie z. B. in der Luft- und Raumfahrt, wo Gewicht der Optiken ein entscheidender Parameter ist, oder bei segmentierten Röntgenoptiken, wo dicke Substrate die Lichtstärke verringern. Von diesen neuen Anwendungsfeldern würden auch KMU profitieren.

Projektbegleitender Ausschuss

Unternehmen
AMSTOG GmbH <small>KMU</small>
Bühler Alzenau GmbH
DIOPTIC GmbH <small>KMU</small>
HEGLA boraident GmbH & Co. KG
JENOPTIK Optical Systems GmbH
LASEROPTIK GmbH <small>KMU</small>
LaVision GmbH <small>KMU</small>
LAYERTEC GmbH
Nagl & Vetter GmbH <small>KMU</small>
Plan Optik AG <small>KMU</small>
scia Systems GmbH
SPECTARIS, Dt. Industrieverband
UltraFast Innovations GmbH <small>KMU</small>