

# Neue Beschichtungsstrategie für die Heißformgebung von Glas

J. Edelmann, A. Schubert  
(*Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz*)  
C. Rüssel, C. Worsch  
(*Otto-Schott-Institut für Glaschemie, F.-Schiller-Universität Jena*)

Die Heißformgebung von Glas zur Herstellung von Kavitäten unterschiedlicher Geometrien und Abmessungen im mm- und  $\mu\text{m}$ -Bereich ist ein ökonomisch sehr interessantes Verfahren, vor allem bei der Herstellung größerer Stückzahlen. Die Anwendungen überstreichen dabei die Mikrofluidik, die Optoelektronik, das Packaging bis hin zur Solartechnik. Andere Strukturierungstechnologien von Glas zum Einbringen von Mikrostrukturen sind entweder sehr teuer, geometrie- bzw. glasartbeschränkt oder schädigen das Glas in der Nähe der Bearbeitungsstelle.

## 1 Glas in der Mikrosystemtechnik

Glas ist ein in der Mikrosystemtechnik vielseitig nutzbarer Werkstoff. Funktionale Strukturen sind in Anlehnung an Waferlevel-Prozesse der Mikrosystemtechnik in Array-Anordnungen auf dem Glaswafer aufgebracht. Diese Nutzstrukturen können unter anderem Kanalstrukturen, flächige und punktförmige Kavitäten bis hin zu Durchbrüchen für elektrische und fluidische Durchkontaktierungen sein. Neben diesen Anwendungen in der mikrofluidischen Analysetechnik und Biomedizintechnik, im Packaging zur Hausung und als isolierendes Trägermaterial für Kontaktierungen können heißgeformte Glasbauteile auch in der Mikrooptik und optischen Informationsübertragung eingesetzt werden. Der bislang beschrittene Weg, Mikrostrukturen in Anlehnung an die Halbleitertechnik durch photolithografische Verfahren herzustellen, wird durch das Ätzverhalten von Glas limitiert. Somit müssen alternative Fertigungsverfahren zum Zuge kommen, die sich neben der Genauigkeit im Sub-Mikrometerbereich vor allem durch eine hohe Wirtschaftlichkeit auszeichnen. Unter den zahlreichen Möglichkeiten Glas an der Oberfläche zu strukturieren, ist Prägen das ökonomisch vorteilhafteste Verfahren, insbesondere zur Fertigung höherer Stückzahlen. Werden hierbei Strukturbreiten im unteren  $\mu\text{m}$ -Bereich angestrebt, so muss das Prägen isotherm oder annähernd isotherm erfolgen. Hierbei spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle, da sie die Viskosität des Glases bei gegebener Zusammensetzung bestimmt. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Temperatur bei der das Glas am Formwerkzeug haftet,

eine direkte Funktion der Viskosität ist. Dies bedeutet, dass Glasschmelzen bei einer bestimmten Viskosität auch ein bestimmtes Klebeverhalten besitzen.

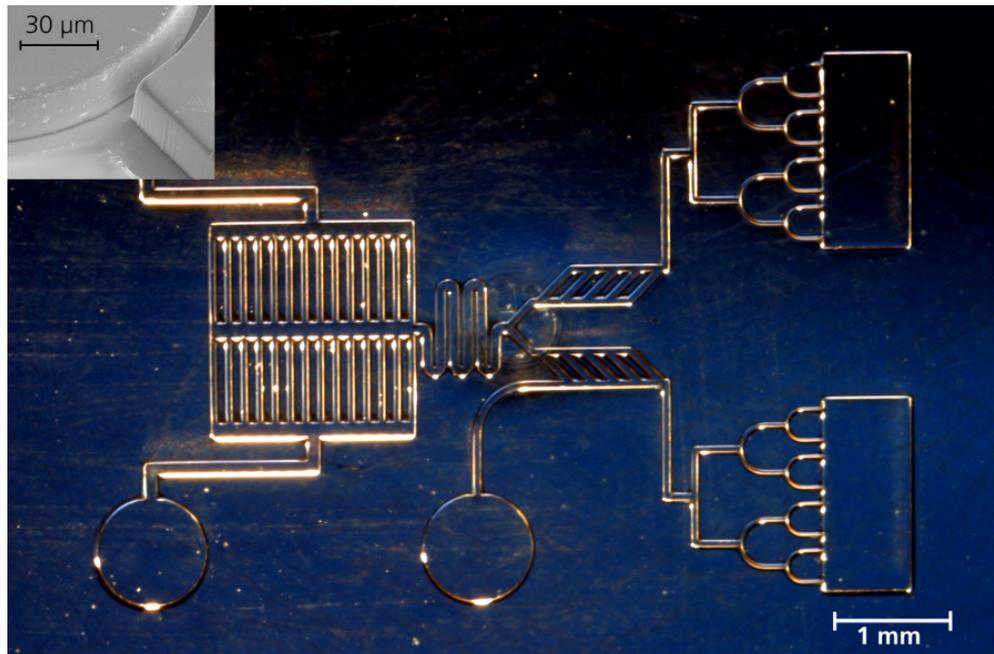


Abbildung 1: Mikrofluidikstruktur geprägt in Glas (Übersicht und Detail)

## 2 Andere Strukturierungstechnologien

Zur Fertigung von Mikrostrukturen in Glas werden auch verschiedene serielle (Laser, Wasserstrahl, Sandstrahl, Ionenätzen) und parallele (Ätzen, Fotostrukturierung) abtragende Verfahren angewendet. Darüber hinaus werden spanende Fertigungsverfahren (Mikroschleifen, -fräsen und -bohren) untersucht, mit deren Hilfe man Strukturen von 10 Mikrometern bis zu einigen Millimetern herstellen kann. Die erzielbare Geometrievielfalt ist dabei durch die verwendeten Werkzeuge eingeschränkt. Die Mikrostrukturierung von Glas durch Lithographie- und Temperprozesse ist zur Strukturierung von Spezialgläsern geeignet. Bei dem lithographischen Photoform-Verfahren werden durch UV-Bestrahlung, Tempern und Fixieren durch Ätzen unter dem Einsatz von Masken feinste Strukturen mit Lochdurchmessern bis zu 20 Mikrometern erzeugt.

Die genannten Verfahren weisen jedoch einige Nachteile auf: Risse, die durch die mechanische oder thermische Bearbeitung entstehen können, schädigen das Glas. Einige Methoden der Strukturierung erfordern Gläser mit speziellen Eigenschaften. So ist die Anwendung von lithographischen Verfahren auf fotostrukturierbare Gläser (z.B. Foturan®) beschränkt.

Abformverfahren sind eine Alternative, welche hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit und der Formenvielfalt der Strukturen beziehungsweise hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit die Einschränkungen der Anwendbarkeit des Werkstoffes Glas aus dem Weg räumt. Abformverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass der Glaswerkstoff in einem durch Erhitzung erzielten viskosen Zustand durch ein Werkzeug geformt wird. Dabei kann dieser Zustand das gesamte zu verarbeitende Glasvolumen als auch nur die oberflächennahen Regionen betreffen.

Für die Fertigung hochpräziser optischer Bauelemente kommen Blankpressverfahren zum Einsatz. Dabei wird ein erhitzter Glaskörper in eine Presse mit temperierten Werkzeugen gegeben und durch diese Werkzeuge geformt. Die Werkzeugtemperatur ist dabei im Allgemeinen geringer als die Glastemperatur. Für das Blankpressen sind neben der Technologieentwicklung eine Reihe von Arbeiten zur Beschichtung von Werkzeugen zur Verringerung der Haft- und Klebeneigung zwischen Werkzeug und Glas bekannt.

### 3 Neue Beschichtungsstrategie

Bei hohen Aspektverhältnissen und Strukturbreiten im  $\mu\text{m}$ -Bereich muss im Gegensatz zum Blankpressen unter isothermen Prozessbedingungen abgeformt werden, wobei die alleinige Beschichtung der Formwerkzeuge zur Verhinderung von Klebeerscheinungen zwischen Glas und Werkzeug bisher wenig erfolgreich war oder auf preisintensive Werkzeugwerkstoffe wie Hartmetall oder Keramik zurück gegriffen werden muss. Mittels einer Beschichtung des Glases, nicht des Werkzeugs, kann eine Entkopplung der Viskosität im Volumen und des Klebeverhaltens an der Oberfläche erzielt werden. Eine dünne, haftfeste Schicht auf dem Glas dient als Trennung von Substrat und Werkzeug. Diese muss in gewissen Grenzen duktil sowie mechanisch und chemisch stabil sein. Prinzipiell eignen sich dafür dünne Metallschichten, amorpher Kohlenstoff oder keramische Schichten.

Werkzeugbeschichtungen liefern gute Ergebnisse, wenn die Grenzflächentemperatur zwischen Glas und Werkzeug unterhalb der Klebetemperatur liegt. Dies ist sowohl beim klassischen, nicht-isothermen Blankpressprozess der Fall, da hier die Werkzeugtemperatur weit unter der Werkstücktemperatur liegt, als auch beim isothermen Präzisionsblankpressen, da in diesem Fall im Viskositätsbereich unterhalb der Klebetemperatur gearbeitet wird. Die Herstellung von Mikrostrukturen mit größeren Aspektverhältnissen ( $\geq 1$ ) erfordert hohe Pressviskositäten oberhalb der Klebetemperatur. Damit wird zum Einen die Mikrostruktur in einer relativ kurzen Prozesszeit bei mäßigem Prozessdruck vollständig ausgebildet. Zum Anderen werden die insbesondere für optische Anwendungen schädlichen Eigenspannungen im Glas bereits während der Formausbildung stark reduziert. Ein Heißprägen bei Viskositäten oberhalb der Klebetemperatur ist dabei mittels der alleinigen Werkzeugbeschichtung nicht realisierbar.

Die Vorteile der Glasbeschichtung liegen auf der Hand: Bei jedem Umformvorgang herrschen identische Anfangsbedingungen und es tritt kein Schichtverschleiß auf. Die Beschichtung von Flachglas mit dünnen duktilen Schichten ist Stand der Technik und die Anforderungen an die Beschichtung sind sehr viel einfacher als an eine Werkzeugbeschichtung. Außerdem ist durch diese Technologie eine breitere Auswahl an Werkzeugwerkstoffen möglich.

## 4 Das Forschungsvorhaben

Das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz und das Otto-Schott-Institut für Glaschemie der Universität Jena forschen im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung der AIF im Auftrag der Europäischen Forschungsgemeinschaft für dünne Schichten (EFDS) und der Hüttentechnischen Vereinigung der Glasindustrie (HVG) zur Mikrostrukturierung von Glas durch Heißprägen von beschichteten Glaswafern (Aktenzeichen 245 ZBR). Unterstützt wird das Projekt durch die Mitgliedsfirmen der beiden Forschungsvereinigungen sowie durch mehrere Anwender mikrostrukturierter Gläser aus dem Bereich der Mikrofluidik.

Zur Trennung von Werkzeug und Substrat wird nicht das Formwerkzeug, sondern das Glas selbst beschichtet. Durch die Beschichtung des Glases soll eine Entkopplung der Viskosität im Volumen und des Klebeverhaltens an der Oberfläche erzielt werden. Dazu müssen die aufgetragenen Schichten dünn, haftfest und duktil sein. Weiterhin müssen die Beschichtungen gegenüber dem Formwerkzeug mechanisch und chemisch stabil sein. Sie dürfen entweder die zukünftige Funktion der Bauteile nicht beeinträchtigen, oder müssen sich nach dem Prägevorgang wieder leicht entfernen lassen. Prinzipiell erfüllen diese Anforderungen sehr dünne Schichten aus Edelmetallen, aus amorphen Kohlenstoff oder hochschmelzende, oxidische Schichten.

Die Methodik zur Qualifikation der Schichten im Prägeprozess gliedert sich in drei aufeinander aufbauende Untersuchungsschritte: Zuerst wird durch das Prägen mit ebenen Werkzeugen ein nutzbares Prozessfenster ermittelt und die auftretenden oberflächenphysikalischen Effekte analysiert. Daran schließt sich die Untersuchung der Duktilität der Schichten bei steigenden Verformungsgraden an. Anhand von industrierelevanten Demonstratoren werden letztendlich Kanteneffekte und das Verhalten der Schichten an senkrechten Wänden analysiert.

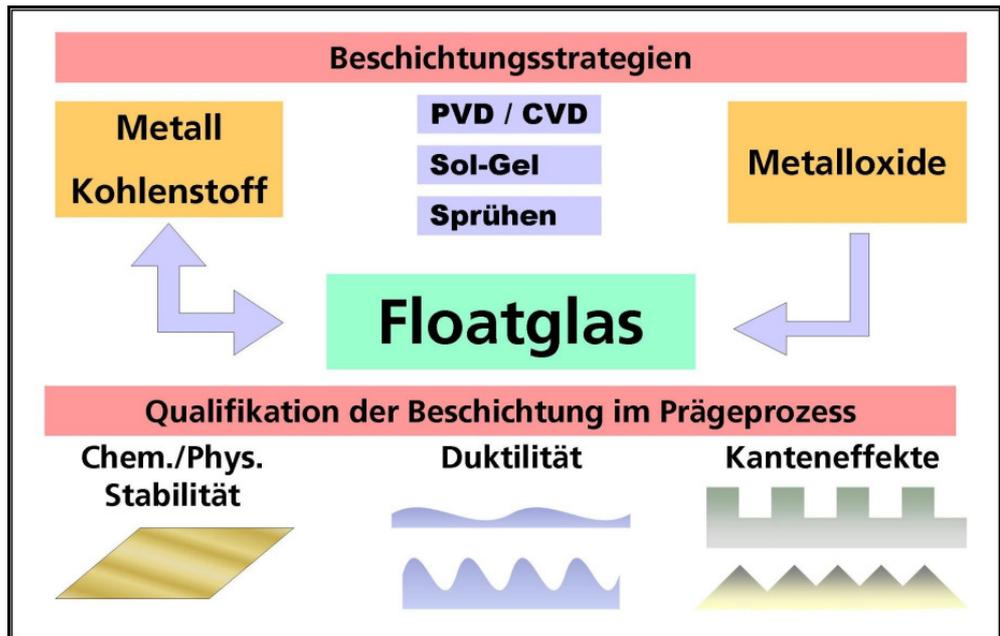


Abbildung 2: Methodisches Vorgehen im Projekt

Als geeignete anlagentechnische Basis wird auf die am Fraunhofer IWU entwickelte Hochtemperatur-Heißprägetechnik zur Heißformgebung von Metallen, Kunststoffen und Gläsern zurückgegriffen. Diese Anlage ermöglicht Prozesstemperaturen bis 1000°C, wobei die Temperiertechnik für den homogenen Wärmeeintrag auch in dünne Substrate ausgelegt wurde.



Abbildung 3: Anlagentechnik zur Heißformgebung von Metallen, Kunststoffen und Gläsern mit Handlingsystem

## 5 Erste Ergebnisse

Das Aufbringen der Schichten erfolgt mittels Verfahren, welche in der Industrie bereits erfolgreich eingesetzt werden.

Die oxidischen Schichten wurden mittels CCVD (Flammenpyrolyse) als auch mittels Sol-Gel-Prozessen aufgebracht. Die Flammenpyrolyse ist ein kostengünstiges Atmosphärendruck-CVD-Verfahren, welches gut skalierbar ist und auch im kontinuierlichen Betrieb eingesetzt werden kann. Das Sol-Gel-Verfahren ist ein einfaches, naßchemisches Verfahren für die Herstellung qualitativ hochwertiger keramischer Schichten. Oxidische Schichten sind chemisch sehr beständig, sodass keine Reaktionen zwischen der Schicht und dem Formwerkzeug eintreten. Da sie sehr dünn, optisch transparent und chemisch dem Glas sehr ähnlich sind, können Sie nach dem Prägeprozess auf dem Glas verbleiben.

Schichten aus amorphen Kohlenstoff oder Edelmetallen haben andere Eigenschaften und können im Normalfall nach dem Prägen wieder entfernt werden. Für die Beschichtung der Gläser mit dünnen Edelmetallschichten kommen Verfahren der Kathodenerstäubung (Sputtern) zum Einsatz. Diese Schichten sind im Allgemeinen nur wenige Nanometer dick. Da sich die Schichten nach dem Prägen wieder leicht entfernen lassen sollen, ist ein Einsatz von Haftvermittlern welche normalerweise eingesetzt werden nicht notwendig. Dünne Schichten aus amorphen Kohlenstoff werden unter Vakuum aufgedampft. Das Entfernen der Schichten nach dem Prägeprozess kann oxidativ durch Aufheizen an Luft geschehen.

Die ersten Ergebnisse zur Untersuchung der Schichtstabilität im Prägeprozess und Eignung der Beschichtungen zur Minimierung bzw. Aufhebung der Haftkräfte und Klebeneigung am Glas sind äußerst vielversprechend. Dadurch erschließt sich ein stark erweiterter Temperaturbereich für die Heißformgebung von Glas, was eine Umformung bei niedrigeren Viskositäten erlaubt. Außerdem lassen sich mit diesem Verfahren auch Gläser mit einer ausgeprägten Klebeneigung, wie beispielsweise Borsilikatglas, in Form bringen.

Für die aktuell laufenden Arbeiten zur Untersuchung der Duktilität der Schichten wird ein ebenes Prägwerkzeug mit radial angeordneten Bohrungen verwendet. Im Heißformgebungsprozess entstehen auf dem Glaswafer dabei sphärische Mikrolinsen mit variierendem Krümmungsradius und damit auch variierender Schichtdehnung, ohne dass es zu einem Kontakt zwischen Werkzeug und Beschichtung bzw. Glas im gedehnten Bereich kommt. Somit lässt sich beurteilen, welche Dehnungen die verwendeten Schichten ertragen, bevor sie versagen.

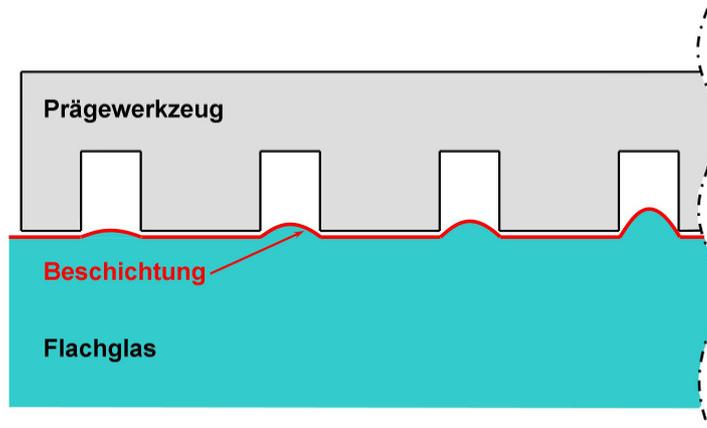


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Wirkungsweise der Duktilitätsuntersuchung

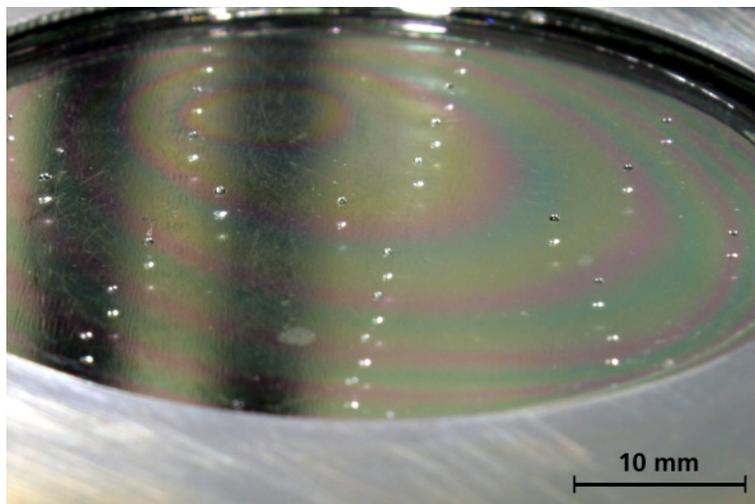


Abbildung 5: Heißgeformtes Flachglas zur Duktilitätsbestimmung der Beschichtung direkt nach dem Prägeprozess

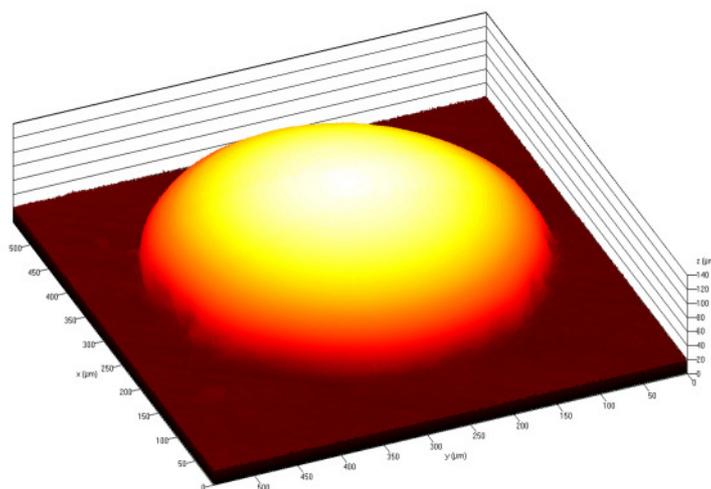


Abbildung 6: 3D-Darstellung der Vermessung einer Linse zur Untersuchung der Schichtduktilität

## 6 Nutzen für die Industrie

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Heißformgebung sind neben der Zykluszeit und Prozesssicherheit die Werkzeugkosten von großem Stellenwert. Werden kostengünstige Werkzeugwerkstoffe durch die Beschichtung des Glaswerkstoffes nutzbar, ist das ein wichtiger Faktor für den zukünftigen Einsatz dieser Technologie für die Strukturierung von anorganischem Flachglas.

Der Innovationscharakter des Projekts liegt in der Nutzung kostengünstiger, etablierter Prozesse zur Beschichtung von Glassubstraten zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen bei der Heißformgebung, indem eine Entkopplung von Viskosität bzw. Verformungsverhalten und dem Kleben des Glaswerkstoffes (Entformungsverhalten) angestrebt wird. Dadurch ist es möglich, heute noch aufwendige und teure Prozessschritte bei der Strukturierung von Gläsern zu ersetzen und damit neue Anwendungsfelder für anorganische Gläser in der Mikrosystemtechnik zu schaffen.

Es ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse des Forschungsvorhabens auch für das Blankpressen von Glas und zur Herstellung von Fresneloptiken aus Glas vorteilhaft sind. Strukturierte Glaswafer tragen zur Funktionsintegration in mikrosystemtechnischen Anwendungen bei und machen diese dadurch einfacher und sicherer. Es werden außerdem neue Anwendungen möglich, die mit den bisherigen Methoden nicht effektiv herstellbar sind. Durch die Erweiterung der Anwendung des Heißprägeverfahrens steht der Medizintechnik ein chemisch hoch beständiger Werkstoff für Analysesysteme zur Verfügung, die bisher nur aus Kunststoffen gefertigt werden konnten.

### **Fraunhofer IWU**

Dipl.-Ing. Jan Edelmann  
Reichenhainer Straße 88  
09126 Chemnitz  
Telefon +49 (0) 371/53 97-1931  
Telefax +49 (0) 371/53 97-1930  
e-mail: jan.edelmann@iwu.fraunhofer.de