Schlussbericht

der Forschungsstellen

Fst-1 Fraunhofer IWU Chemnitz und
Fst-2 Otto-Schott-Institut, Universität Jena

zu dem über die

im Rahmen des Programms zur
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16436 BR**

Wirtschaftliche Glassensorik auf Basis der Prozesskette Heißprägen

(Bewilligungszeitraum: 01.12.2009 - 30.09.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. - EFDS

Chemnitz, 29.02.2012	Jan Edelmann
Ort, Datum	Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s) an der Forschungsstelle 1
Jena, 29.02.2012	Dr. Christian Worsch
Ort, Datum	Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s) an der Forschungsstelle 2

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SACHBERICHT

Wirtschaftliche Glassensorik auf Basis der Prozesskette Heißprägen

Jan Edelmann

Fst-1 Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz

Dr. Christian Worsch

Fst-2 Otto-Schott-Institut, Universität Jena

Projektnummer: 16436 BR
Bewilligungszeitraum: 01.12.2009 - 30.09.2011

Federführende AiF-Forschungsvereinigung
Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. - EFDS

Inhalt

1
Forschungsziel 4

2
Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels 6

3
Ergebnisse 8
3.1
AP 1 »Methodik zur Schichteignungsbestimmung« 8
3.2
AP2 »Schichtoptimierung« 15
3.3
AP3 »Rückwirkung der Beschichtung« 22
3.4
AP4 »Wirtschaftlichkeitsbetrachtung« 28

4
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 35

5
Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft 36

6
Zusammenfassung 38

1
Forschungsziel

Die Ergebnisse bisheriger gemeinsamer Forschungsaktivitäten zeigen das außerordentliche Potential der neuartigen Beschichtungsstrategie für das Heißprägen von Glas, jedoch sind für die Anwendungen auf dem Gebiet der Sensorik wesentliche neue Fragestellungen zu beantworten. Das Forschungsvorhaben soll die neu entwickelte Beschichtungstechnologie zur Trennung von Werkzeug und Glas im Heißprägeprozess für die **wirtschaftliche Herstellung von Sensorkomponenten** qualifizieren. Dazu soll untersucht werden, welchen Einfluss die Schichtdicke bzw. -struktur auf die zu prägenden Strukturen haben und welche Mindestschichtdicke für die Wirksamkeit der einzelnen Schichten besteht. Die Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten bestätigen die Wirksamkeit der Beschichtungstechnologie zur Entkopplung der Viskosität im Volumen des Glases von dessen Klebeverhalten an der Grenzfläche zum Formwerkzeug. Es konnten jedoch noch keine **optimalen Schichtdicken für praxisnahe Strukturen** dargestellt werden. Das Ziel der Arbeiten besteht darin, aus der Forderung nach einer maximal dehnbaren und gleichzeitig haftmindernd wirksamen Schichtdicke das Optimum für Sensorstrukturen der **Mikrooptik und Mikrofluidik** zu finden.
Ein weiterer dabei wirkender Parameter ist der **Einfluss der Schicht auf die Funktion** geprägter Komponenten. Dies ist besonders bei dem bisher noch nicht betrachteten Einsatzfeld der Mikrooptik relevant, da nicht bekannt ist, inwiefern bestimmte Beschichtungen die optische Funktion der Bauteile beeinflussen bzw. ob entfernbare Schichten rückstandslos beseitigt werden können oder eine messbare Rückwirkung der Beschichtung auf das fertige Bauteil bestehen bleibt. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird die Zuverlässigkeit der Prägetechnologie bewertet und die **Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette** für komplexe Strukturen der Mikrooptik und Mikrofluidik dargestellt. Daraus wird sich auch ableiten lassen, für welche Strukturen und Anwendungen die Prozesskette gegenüber Alternativverfahren besonders geeignet ist.
Die bisherigen sehr guten Erfahrungen beim Verzicht auf eine Werkzeugbeschichtung und Verwendung einer Beschichtung des Glases zur Trennung von Werkzeug und Glas im Heißprägeprozess ermöglichen ein Abformen mit hohen Scherraten bei niedrigen Viskositäten, was sich besonders positiv auf die **Abformtreue** sowie die **Zykluszeit** zum Pressen auswirkt. Weiterhin werden die insbesondere für optische Anwendungen schädlichen Eigenspannungen im Glas bereits während der Formausbildung stark reduziert. In diesem Zusammenhang muss auch der Einfluss der **Porosität der Schicht** bei den keramischen Schichten sowie eventuell durch den Beschichtungsprozess eingebrachte Schichtspannungen auf die Formgebung untersucht werden.

Der Innovationscharakter des Projekts liegt in der Nutzung kostengünstiger, etablierter Prozesse zur Beschichtung von Glassubstraten zur Nutzbarmachung der Heißprägetechnologie für die Mikrostrukturierung großflächiger Glassubstrate in optischen und fluidischen Anwendungen. Dies wird durch die Entkopplung der Viskosität des Glases vom Haft- und Klebeverhalten erreicht. Aufwändige und teure Prozessschritte der seriellen Bearbeitung einzelner Glaskomponenten werden dadurch vermieden, wodurch sich darüber hinaus neue Anwendungsfelder bei der Strukturierung von Gläsern in der Mikrosystemtechnik ergeben. Die Erreichung des Forschungsziels bietet die Chance, eine kostengünstige Fertigungstechnologie für mittlere und große Stückzahlen zu erhalten, deren Einsatz für folgende Produkte und Verfahren Einsparungen bedeutet:

- Analytiksysteme (Integration optischer und fluidischer Funktionen in Sensorik)
- Optoelektronik (diffraktive und refraktive optische Sensoren)
- Packaging mikrosystemtechnischer Komponenten

Forschungsziel

- Produktsicherung hochwertiger Glaskomponenten durch holografische Strukturen
- Mottenaugenstrukturen für Entspiegelungen
- pyramidale Strukturen auf Solarzellen zur Erhöhung des Wirkungsgrades.

Das Potential der Technologie besteht in der Erschließung eines Verfahrens zur Erzeugung hochkomplexer Geometrien bis in den Submikrometerbereich zur großflächigen Mikrostrukturierung von Flachglas. Damit wird ein wesentlicher Vorteil der abformenden Verfahren, nämlich komplexe hochgenaue Geometrien abzubilden, für die breite Werkstoffgruppe der anorganischen Gläser nutzbar gemacht. Die damit erzielbare deutlich höhere Funktionsintegration lässt auch die Realisierung von Produkten erwarten, die derzeit in Ermangelung kommerziell verfügbarer Fertigungstechnologien nicht herstellbar sind. Darüber hinaus gibt die neue Beschichtungstechnologie für de Glasformgebung wichtige Impulse zur Weiterentwicklung des Blankpressens von optischen Gläsern. Auch hier lassen sich damit die Verfahrensgrenzen deutlich verschieben.

2
Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die Optimierung der neuen Beschichtungstechnologie für die Mikrostrukturierung von Glas durch Heißprägen zur wirtschaftlichen Herstellung von Sensorsystemen erfordert maßgeblich eine tiefgehende Schichtqualifizierung. Die bisherigen Erkenntnisse bestätigen zwar die Wirksamkeit der Beschichtung, jedoch können keine auf den Einsatzfall abgestimmten Vorschriften für die unterschiedlichen Anwendungsgebiete aufgestellt werden. Als kritisch sind dabei einerseits die begrenzte Duktilität vor allem der oxidischen Schichten zu betrachten, andererseits die hohe Mobilität der sehr duktilen Edelmetallschichten im Vakuum, welche zur Verunreinigung der Prozesskammer führen.
Prinzipiell steht eine sehr breite Auswahl an Trennschichten zur Verfügung (siehe eigene Vorarbeiten). Hier muss eine engere Auswahl vor dem Anwendungshintergrund Mikrooptik und Mikrofluidik getroffen werden, um die Optimierung der Parameter Schichtdicke, -porosität und -eigenspannungen vorantreiben zu können. Dazu werden experimentelle Prüfmethoden zur Bewertung der Schichtparameter vor und nach dem Prägeprozess entwickelt, deren Ergebnisse in ein Modell zur Formabbildung der Werkzeuggeometrie einfließen. Beim Aufbringen der oxidischen Schichten mit Hilfe von Sol-Gel-Prozessen aber auch mittels CVD und PVD Verfahren können die Schichtparameter in weiten Bereichen beeinflusst werden.
Im Vorhaben sollen mit einfachen Formwerkzeugen technologische Prüfversuche analog der Metallformgebung entwickelt werden, wie etwa der Stauchversuch oder der Steigversuch, um eine experimentell gestützte Methode zur Optimierung der Schichten schaffen zu können. Der Arbeitsplan zur Erreichung der gestellten Forschungsziele gliedert sich in mehrere Teilthemen, die aufeinander aufbauen und gemeinsam von den beiden Forschungsstellen bearbeitet werden. Die detailliert erläuterten Arbeitspakete werden zum Teil von den Forschungsstellen allein, meist aber auch gemeinsam bearbeitet.

AP 1 Methodik zur Schichteignungsbestimmung
Als wesentliche Grundlage für die Schichtoptimierung ist eine Methodik zur Eignungsbestimmung der Beschichtung für den Heißprägeprozess zu entwickeln. Dazu sind eine systematische Vorgehensweise zu formulieren, technologische Prüfversuche zu entwickeln und experimentell zu erproben sowie Schichtversagenskriterien einschließlich der Prüfmethoden zu deren Detektion zu definieren.

AP 1.1 Entwicklung einer Methodik zur Auswahl und experimentellen Eignungsbewertung der Beschichtung für das Heißprägen unter Prozessbedingungen (IWU+OSI)

AP 1.2 Entwicklung und experimentelle Erprobung einer technologischen Prüfmethode zur Bestimmung der Schichtduktilität (IWU)

AP 1.3 Systematische Definition von Schichtversagenkriterien und Qualifizierung von Techniken zu deren Detektion (OSI)

M1 Meilenstein 1 — 8 Monate nach Projektbeginn
Eine Methodik zur Bestimmung der Schichteignung einschließlich der dazu notwendigen technologischen Prüfmethode und den definierten Schichtversagenskriterien, liegt vor.

AP 2 Schichtoptimierung
Auf der Basis der im vorangegangenen Arbeitspaket entwickelten Methodik zur Schichteignungsbestimmung sollen systematisch geeignete Schichtwerkstoffe und optimierte Beschichtungsparameter ermittelt werden. Dabei wird die Schichtdicke,

die Mobilität der Beschichtung unter Hochtemperatur- und Vakuumbedingungen sowie die Schichteigenspannung betrachtet.

AP 2.1 **Untersuchung poröser keramischen Schichten zur Optimierung der Schichtduktilität (OSI)**

AP 2.2 **Untersuchung von metallischen Schichtwerkstoffen und Legierungen im Hinblick auf eine minimierte Mobilität unter Hochtemperatur- und Vakuumbedingungen (IWU)**

AP 2.3 **Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der optimalen Schichtdicke (IWU+OSI)**

AP 2.4 **Untersuchung des Einflusses induzierter Schichtspannungen (IWU)**

M2 **Meilenstein 2 — 14 Monate nach Projektbeginn**
Die Schichtoptierung ist abgeschlossen. Für optische und fluidische Anwendungen liegen maßgeschneiderte Beschichtungstechnologien vor.

AP 3 Rückwirkung der Beschichtung auf die erzielbaren Bauteileigenschaften

Ziel ist es, mögliche Rückwirkungen der Beschichtung auf die Bauteileigenschaften zu erkennen und zu quantifizieren. Dazu sind insbesondere die Formausbildung im Heißprägeprozess beziehungsweise mögliche Verformungen während der Abkühlphase sowie Auswirkungen auf die optischen Gebrauchseigenschaften (z.B. Reflexion, Transparenz, Brechzahl) zu betrachten.

AP 3.1 **Wirkung der Beschichtung auf die Formausbildung (IWU)**

AP 3.2 **Auswirkung der Beschichtung auf die optische Funktionalität (IWU+OSI)**

AP 3.3 **Technologien zum Entfernen der Beschichtung am strukturierten Bauteil (OSI)**

AP 4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollen neue Applikationen vor dem Hintergrund erweiterter Verfahrensgrenzen aus wirtschaftlicher und technologischer Sicht untersucht und bewertet werden. Weiterhin soll eine, den Gesamtprozess abbildende Kostenmatrix erstellt werden, welche unter anderem das zu erwartende Kostensenkungspotential aus einer kürzeren Zykluszeit oder aus einer erhöhten Werkzeugstandmenge aufzeigen kann.

AP 4.1 **Neue Applikationen durch Erweiterung der Verfahrensgrenzen (IWU)**

AP 4.2 **Abschätzung des Kostensenkungspotentials durch mögliche Zykluszeitverkürzung (IWU)**

AP 4.3 **Experimentelle Verifikation der entwickelten Methodik an einem Anwendungsglasbauteil (IWU+OSI)**

3 Ergebnisse

3.1 AP 1 »Methodik zur Schichteignungsbestimmung«

Durchgeführte Arbeiten

- Entwicklung einer Methodik zur Schichteignungsbestimmung
- Ableitung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Schichtduktilität
- Definition von Schichtversagenskriterien und Techniken zur Detektion
- Analyse der Prozessatmosphäre im Arbeitsraum

Dazu benötigt und eingesetzt:

wissenschaftlich-technisches Personal

Arbeitspaket	**FS1 IWU**	**FS2 OSI**
1.1 Anforderungen, Schichteigenschaften, Vorgehensweise	2	4
1.2 Prüfmethode zur Schichtduktilität	3	
1.3 Schichtversagenskriterien		4
1.4 Analyse Prozessatmosphäre	2	

Geräte
- Beschaffung »PrismaPlus Kompakt-Massenspektrometer QMG 220« der Pfeiffer Vacuum GmbH; Inbetriebnahme: 20.05.2010; Abnahme: 15.07.2010

3.1.1 Entwicklung einer Methodik zur Schichteignungsbestimmung

Die erzielbaren bzw. geforderten Parameter und Eigenschaften der Schicht sind neben den für das Heißprägen prozessbedingten Anforderungen abhängig vom Anwendungsbereich der geprägten Bauteile. In Tabelle 1sind exemplarisch die Schichtanforderungen für den jeweiligen Einsatzbereich dargestellt.

Tabelle 1: Anforderungen an die Beschichtungen

Prozessbed. Anforderungen	Fluidik	Abbildende Optik	Nichtabbildende Optik
• Schichten während des Prägeprozesses stabil, • Reduzierung der Haftkräfte, Verhinderung von Klebeerscheinungen, • Keine Reaktion mir den WZ-Werkstoff	• bondbar, • chemisch inert, • haftfest, • Rauheit durch WZ begrenzt, • optional: Schicht zur Funktionalisierung	• transparent, • Rauheit < 5nm, • möglichst geringe Absorption, • keine Streuung und Interferenz, • optional: Schicht zur Funktionalisierung	• Schicht transparent oder entfernbar, • Rauheit < 1/10 λ, möglichst keine Absorption, optional: • Transmissionsver-besserung, Schicht zur Funktionalisierung

Für fluidische Bauteile sind in der Regel höhere Umformgrade bzw. Aspektverhältnisse notwendig als für optische Bauteile. Allerdings sind die Anforderungen in Bezug auf die Schichtrauheit und eventuelle umformbedingte Risse in der Schicht als unkritisch zu betrachten. Für optische Anwendungen sind die Anforderungen an die Schichtrauhigkeit und Wechselwirkung der Beschichtung mit Licht, deutlich höher als für die Fluidik.
Zur Herstellung von dünnen Schichten sind heutzutage für die jeweiligen Schichtsysteme eine Vielzahl von Beschichtungstechnologien verfügbar. Die verschiedenen Schichtsysteme und die damit im Allgemeinen erreichbaren Schichteigenschafen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die jeweiligen positiven und negativen Eigenschaften sind grün bzw. rot markiert. Die gelb markierten Felder sind abhängig von dem verwendeten Beschichtungsprozess.

Tabelle 2: Allgemeine Schichteigenschaften

glasig bzw. kreamische Schichten			Nichtoxidische Schichten		
	Oxidische Schichten		Metall		Nichtmetall
	amorph	kristallin	Edelmetall	Metall	Kohlenstoff
Nichtoxi-dische Schichten / Mehrfachschichten	Schicht verbleibt auf dem Substrat		Schichtdicke von wenigen nm realisierbar	Schichtdicke von wenigen nm realisierbar	Schichtdicke von wenigen nm realisierbar
	temperaturbeständig				
	Schichtdicke von wenigen nm realisierbar	Schichtdicke meist größer als bei amorphen oxidischen Schichten	Schicht entfernbar	Schichten können reißen	Schicht problemlos entfernbar
bisher nicht betrachtet			Schichten gut verformbar		
	geringe Rauigkeit realisierbar	meist höhere Rauigkeit als amorphe Schichten	Hohe Mobilität (evtl. Abdampfen, Oberflächen und Volumendiffusion)	evtl. Passivierung → schwer entfernbar	Werkzeug darf kein Carbidbildner sein
	Brechzahl in großen Bereich variierbar				
	Porosität einstellbar				
	Schichten können reißen			Schichten können reißen	Schichten können reißen

Ohne die konkreten Auswirkung auf die Bauelemente zu kennen ist eine Schichteignungsbestimmung für den optischen Bereich schwierig. Daher wurde eine mögliche Auswirkung der Schicht auf das spätere Bauteil möglichst gering gehalten. Das heißt es wurden Schichten gewählt, welche nach dem Prägeprozess entfernbar sind, oder es wurden Schichten mit einem möglichst geringen Schichtversagen eingesetzt.
Viele Schichtparameter sind voneinander abhängig und können nur schwierig einzeln betrachtet werden. So beeinflusst bspw. die Schichtdicke von oxidischen Schichten nicht nur die Duktilität, sondern auch die optischen Eigenschaften. Die Schichtdicke hat auch einen entscheidenden Einfluss auf die Dehnbarkeit, daher wurde zunächst der Bestimmung der optimalen Schichtdicke Priorität eingeräumt.

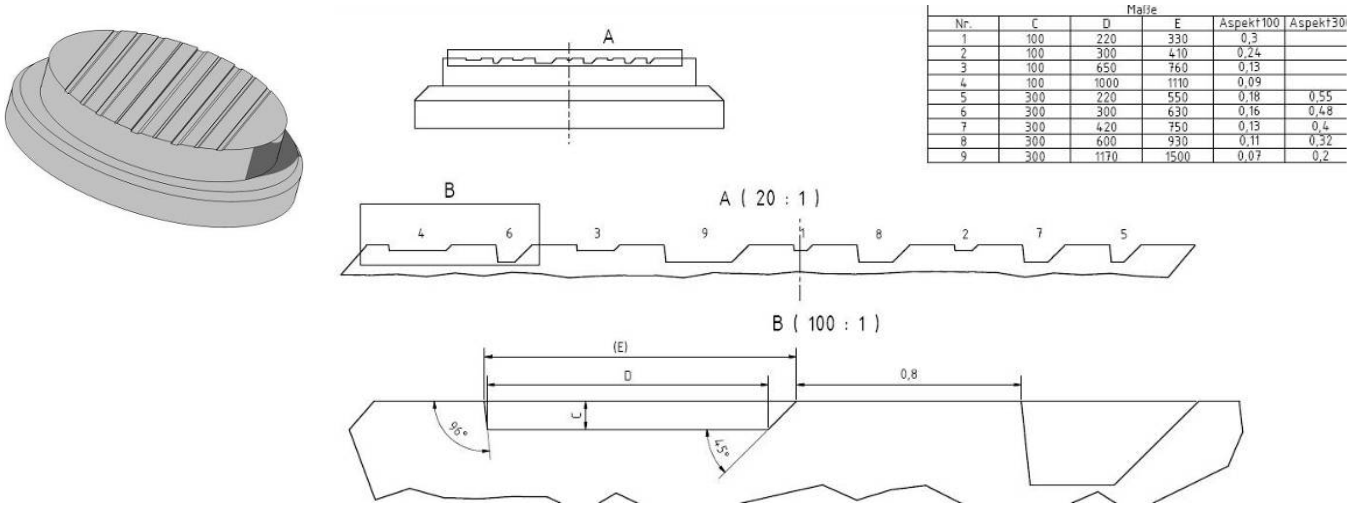
Gewählte Schichten und Schichtdickenbereich:

- Pyrosil® SiOx – 20 bis 70 nm
- Platin Pt - 9 bis 21 nm
- Guardian Compositschichten <=100 nm

3.1.2 Prüfmethode zur Bestimmung der Schichtduktilität

Zur Bestimmung der Dehnbarkeit potentieller Schichten auf dem Glassubstrat musste ein Versuchswerkzeug hergestellt werden. Die Anforderungen daran waren einerseits die möglichst kostengünstige Fertigung und andererseits eine flexible mehrfache Dehnung der Schichten auf den umzuformenden Glassubstraten. Es sollten also in einem Prägeversuch möglichst viele verschiedene Schichtdehnungen erzeugt werden. Dazu wurde ein Werkzeug mit nichtsymetrischer Kanalstruktur entworfen (Abbildung 1), welches die Dehnung der Glasoberfläche und damit der Beschichtung in zwei Prägetiefen und unterschiedliche Breiten realisiert. Hierdurch ergeben sich eine ganze Reihe Dehnungen mit variierenden Aspektverhältnis. Eine weitere Variation ergibt sich, wenn man das Werkzeug nicht vollständig abformt, sondern beispielsweise nur die ersten 100 Mikrometer. Durch die im Prinzip »zweidimensionale« Struktur wird weiterhin eine mehr oder weniger eindimensionale Schichtdehnung erreicht. Damit tritt ein Schichtreißen vorzugsweise in einer Richtung auf, also senkrecht zur Umformrichtung, was die Auswertung der Prägeversuche zur Schichtduktilität deutlich vereinfacht.

Die Aspektverhältnisse sind relativ klein. Das ist jedoch insofern beabsichtigt, da ein kleines Aspektverhältnis in etwa dem Anschneiden der Schicht entspricht, ohne dass das Glas schon durch eine gegenüberliegende Seite einer Kante gedehnt bzw. verformt wurde. Außerdem sind für das Schichtversagen im Anwendungsfeld optischer Komponenten keine größeren Schichtdehnungen zu erwarten.



Maße					
Nr.	C	D	E	Aspekt100	Aspekt30
1	100	220	330	0,3	
2	100	300	410	0,24	
3	100	650	760	0,13	
4	100	1000	1110	0,09	
5	300	220	550	0,18	0,55
6	300	300	630	0,16	0,48
7	300	420	750	0,13	0,4
8	300	600	930	0,11	0,32
9	300	1170	1500	0,07	0,2

Abbildung 1: Konstruktionszeichnung des Versuchswerkzeugs

Beim Prägen mit dem Versuchswerkzeug setzt die Trapezoberseite des Werkzeuges als erstes auf (Abbildung 2). Auf Grund der Querdehnungsbehinderung der Schicht durch den Kontakt von Werkzeug und Probe wird dort das Glas kaum fließen. Mit steigender Umformung wird der Kontakt des Werkzeugs zum Glas an der 45° Kante zunehmen. Ähnlich wird es sich an der steilen Kante verhalten, nur dass hier die Dehnung größer sein wird. Bei vollständiger Ausformung der Struktur haben die unterschiedlich gedehnten Bereiche des beschichteten Substrates Kontakt zum Werkzeug. Wenn es zu

einem Schichtversagen kommt, wird so ein bestimmter Dehnzustand eingefroren und so die spätere messtechnische Auswertung ermöglicht.

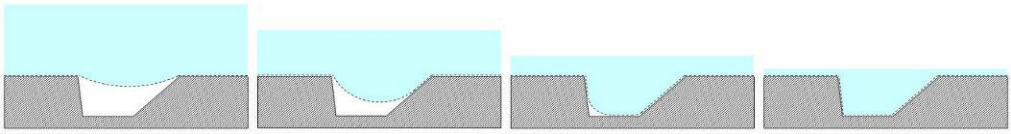


Abbildung 2: Glasfluss beim Prägen mit dem Versuchswerkzeug (schematisch). Von links nach rechts: zeitlicher Verlauf.

3.1.3 Definition von Schichtversagenskriterien und Techniken zur Detektion

Das Hauptversagen der Schicht besteht, wenn es zu Klebeerscheinungen zwischen Bauteil und Werkzeug kommt. In den bisherigen Untersuchungen wurde gezeigt, dass dies bei allen Schichten und durch geeignete Wahl der Prozessparameter wirksam verhindert werden kann. Allerdings wurde festgestellt, dass die Schichten bei größeren Umformgraden reißen. Im Folgenden bezieht sich das Schichtversagen auf das Reißen der Schicht beim Umformen.
Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass das Schichtversagen abhängig von den Kontaktbedingungen zwischen Substrat und Werkzeug ist. Mit dem im AP 1.2 entwickelten Werkzeug ist es möglich, verschieden große Umformgrade sowie mehrere Kontaktarten und Kontaktzeiten zu realisieren. Bei voller Ausformung haben die unterschiedlich gedehnten Bereiche des beschichteten Substrats Kontakt zum Werkzeug. Auf Grund der zweidimensionalen Struktur des Werkzeugs werden die Schichten überwiegend in eine Richtung gedehnt. Ein Reißen der Schicht wird daher auch vornehmlich in eine Richtung, parallel zu den Stegen der Werkzeugstruktur, erfolgen. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass sich eventuell auftretende Risse hierdurch nicht bzw. wenig verzweigen. Infolgedessen ist eine deutlich einfachere Beschreibung des Umformverhaltens und der Schichtdehnung bzw. des Schichtversagens, im Vergleich zu früheren Duktilitätsuntersuchungen, möglich.

Weiterhin ermöglicht die vollständige Ausformung des Werkzeugs, Aussagen über den Einfluss des Kontakts zwischen Werkzeugoberfläche und dem beschichteten Glassubstrat zu treffen. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die beschichtete Substratoberfläche, welche in Kontakt mit dem Werkzeug ist, keine bzw. kaum eine Dehnung aufweist. Folglich werden beim Prägen verschiedene Umformgrade bzw. Schichtdehnungen »eingefroren«. Zusammen mit den beim Prägen auftretenden repräsentativen Haftkräften kann so das Schichtverhalten und der daraus resultierende Einfluss auf das Prägeverhalten beurteilt werden.

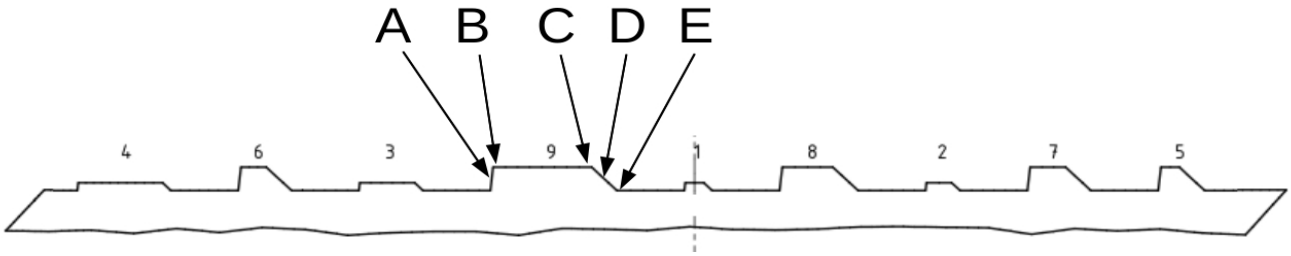


Abbildung 3: Repräsentative Stellen der Schichtdehnung auf dem Glassubstrat

In Abbildung 3 sind repräsentative Stellen markiert, wo unterschiedliche Schichtdehnung mit verschiedenen Kontaktarten vorkommen. An der steilen Flanke (A) findet beim Umformen eine große Schichtdehnung statt, wobei das Glas nach oben fließt und in Kontakt mit der Werkzeugoberfläche kommt. Die Schichtdehnung ist an der Kante (B) sowie in deren Umgebung am Größten. Hier kommt das Glas als letztes mit dem Werkzeug in Kontakt. Ähnlich verhält es sich an der Stelle (C) wobei hier die Dehnung geringer ist. Die Schichtdehnung an der Kante (D) verhält sich analog zur Flanke (A), allerdings mit geringerer Schichtdehnung. An der Stelle (E) ist der Übergang von dem Teil der Glasoberfläche, welcher zuerst Kontakt mit dem Werkzeug hat und daher nicht bzw. kaum gedehnt wird, zu einem Teil, welcher als erstes umgeformt wird.
Die Bestimmung der Topografie und damit der Genauigkeit des geprägten Bauteils konnten mittels Laser-Scanning-Microscope (LSM) nur an einzelnen Stegen an der 45° steilen Kante ermittelt werden. In Abbildung 4 ist Gegenüberstellung der Topografie von Werkzeug (oben) und geprägter Probe (unten) an jeweils der gleichen Stelle zu sehen. Die Aufnahme des Werkzeuges ist meßtechnisch bedingt etwas stärker verrauscht, was sich unter Anderem in den vereinzelten aus der Topografie heraus schauenden Messwertspitzen äußert. Die Struktur des Prägewerkzeuges wurde exakt in das beschichtete Glas übertragen. Auch die von der Werkzeugherstellung bedingten Rillen des Fräswerkzeuges wurden in das Glas abgeformt.

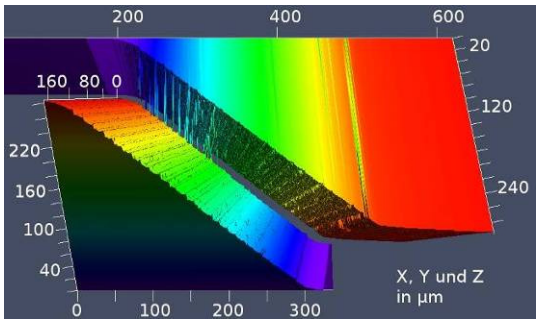


Abbildung 4: Gegenüberstellung der der mittels Laser-Scanning-Mikroskop erstellten Topografie des Werkzeuges an der 45° Kante von Nut 9 (oben) und einer geprägten Probe (unten)

Die optische Mikroskopie ist auf Grund des geringen Reflexionsvermögens der beschichteten Substrate bzw. begrenzter Aperturen der Objektive für die Untersuchung von steilen Kanten wenig geeignet. Informationen über das Schichtverhalten können daher nur an mehr oder weniger ebenen Stellen erhalten werden. Zum Detektieren des Schichtversagens haben sich rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (SEM) als besonders günstig erwiesen. Dabei werden die geprägten Proben mit einer dünnen Kohlenstoffschicht bedampft. Anschließend werden an den mit B – E markierten Stellen (Abbildung 3) Aufnahmen mit hoher Vergrößerung angefertigt. Um von der Stelle A Abbildungen machen zu können ist es notwendig die Probe stark zu kippen, oder diese zwischen dem Steg 3 und 9 zu brechen und die Probe anschließend vertikal zu betrachten. Mittels dieser Aufnahmen ist eine sichere Detektion von Rissen möglich. Bei einem Schichtversagen in Form von Rissen können nun aus den SEM-Aufnahmen der jeweiligen Stellen (A-E) die durchschnittliche Rissbreite in µm und die durchschnittliche Anzahl der Risse in µm-1 ermittelt werden. Aus diesen beiden Parametern kann eine Abschätzung des daraus resultierenden Anteils an frei werdender, unbeschichteter, Glasoberfläche und damit der Dehnbarkeit der Schicht getroffen werden. Zusammen mit den ermittelten repräsentativen Haftkräften ist somit eine Bewertung bzw. ein Vergleich der verschiedenen Schichten und Schichtdicken möglich.

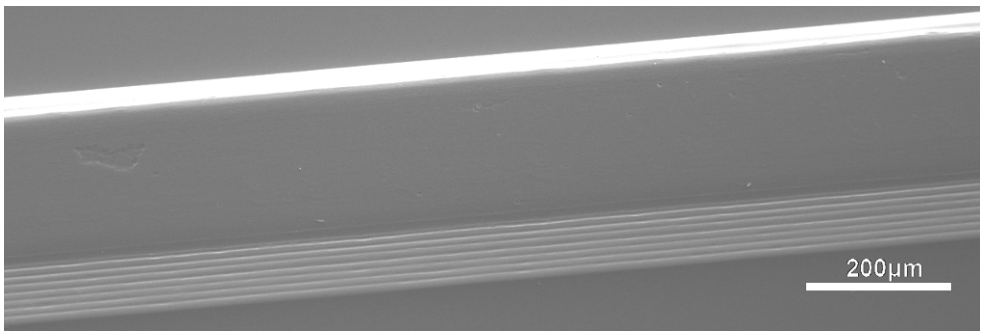


Abbildung 5: SEM-Übersichtsaufnahme des Stegs 1

An SEM-Übersichtsaufnahmen der Stege mit geringer Vergrößerung kann weiterhin, Anhand der Breite und Parallelität der Kanten, die Abformtreue abgeschätzt werden. In Abbildung 5 ist eine Übersichtsaufnahme des Stegs 1 mit hoher Abformtreue dargestellt. Da an spitzen Kanten eine große Oberfläche vorhanden ist an welcher Elektronen austreten können, ist die steile Kante in der Aufnahme weiß abgebildet. Auf der 45° Kante sind mehrere weiße Streifen sichtbar, welche von der fertigungsbedingten treppenartigen Struktur des Testwerkzeugs resultieren. Diese wurden mit hoher Genauigkeit abgebildet. Um die Zuverlässigkeit der Prüfmethode zu verifizieren, wird diese zur Bestimmung der optimalen Schichtdicke verwendet. Siehe hierzu AP 2.3

3.1.4 Analyse der Prozessatmosphäre im Arbeitsraum während Hochtemperatur- Abformversuchen zur experimentellen Schichteignungsbestimmung und Schichtoptimierung

Während der Heißprägeversuche zur experimentellen Schichteignungsbestimmung und Schichtoptimierung in der bestehenden Versuchsanlage zur Hochtemperatur Mikroumformung wurde die Prozessatmosphäre im Arbeitsraum während des Abformversuches analysiert. Daraus können Rückschlüsse zu Schichteignung und Schichtoptimierung gezogen werden. Folgende Untersuchungen können mittels des beschafften Quadrupol-Massenspektrometers durchgeführt werden:

- Bestimmung des Sauerstoffpartialdruckes (Oxidation, Schichtschädigung)
- Abschätzung der Schichtmobilität (Analyse des abgeführten Spülgases)
- Detektion von Reaktionsprodukten

Tabelle 3 zeigt die typische Zusammensetzung der Prozessatmosphäre beim Heißprägen in der IWU Versuchsanlage bei unterschiedlichen Konzentrationen der Argon-Schutzgasspülung. Durch die Schutzgasspülung wird eine effektive Reduzierung des schädlichen Sauerstoffgehalts der Atmosphäre erzielt, unabhängig von der Konzentration der Spülung.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Prozessatmosphäre[in %]

	Konzentration bei 1 mbar Spülung	**Konzentration bei 5 mbar Spülung**	**Konzentration bei 10 mbar Spülung**
Argon	99,5289	99,6561	99,7718
Wasser	0,4173	0,2975	0,1995
Sauerstoff	0,0012	0,0012	0,0008
Stickstoff	0,0421	0,0320	0,0121
CO2	0,0022	0,0016	0,0007

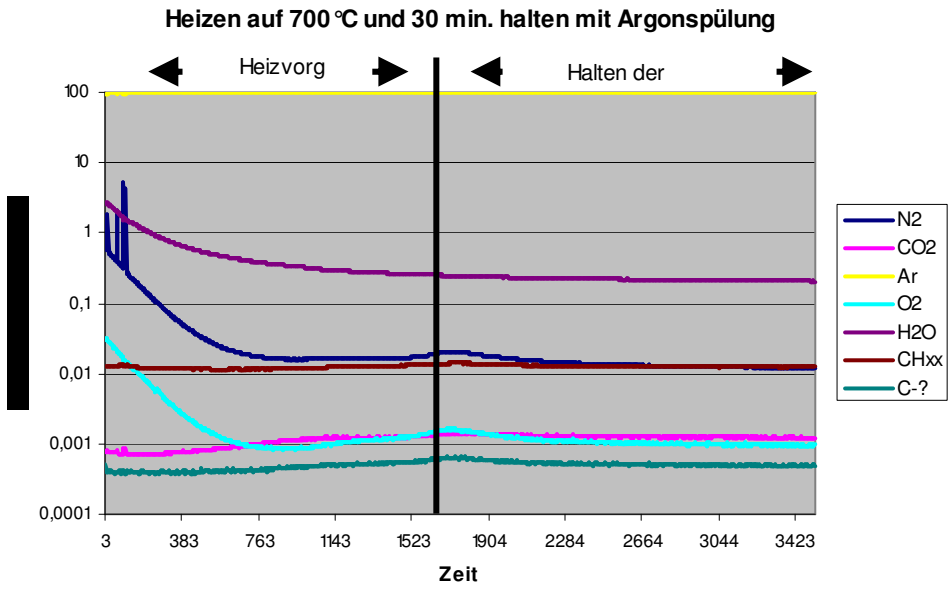


Abbildung 6: Konzentrationsdiagramm der Prozessatmosphäre

Während des Heizvorgangs auf Prägetemperatur herrscht eine annähernd konstante Konzentrationsverteilung der einzelnen überwachten Massen. Die Argonspülung minimiert die Restgaseinflüsse effektiv. Beim Evakuieren wird die Masse 18 bei eingelegtem Substrat stärker detektiert, als bei Versuchen ohne Substrat. Dies ist auf an der Probe anhaftendes Wasser zurückzuführen. Auch die Reinigung mit Ethanol verfälscht die Messung beim Aufheizen der Versuchsanlage.
Der Vergleich von Kohlenstoff beschichtetem Substrat mit der Grundlinie (Prozessgasüberwachung ohne eingelegtes Substrat) zeigt keinen Unterschied in der Detektion der überwachten Massen. Ein Abdampfen war dabei also nicht zu beobachten. Andererseits ermöglicht die Analyse der Prozessatmosphäre eine gute Prozessüberwachung. Die sofortige Detektion erhöhter Sauerstoffpartialdrücke zeigte einen Defekt im Argon-Spülgasregelsystem während der Durchführung der Versuchsreihen.

3.2 AP2 »Schichtoptimierung«

Durchgeführte Arbeiten

- Untersuchung poröser keramischen Schichten zur Optimierung der Schichtduktilität
- Untersuchung von metallischen Schichtwerkstoffen und Legierungen im Hinblick auf eine minimierte Mobilität unter Hochtemperatur- und Vakuumbedingungen
- Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der optimalen Schichtdicke
- Untersuchung des Einflusses induzierter Schichtspannungen – noch nicht abgeschlossen

Dazu benötigt und eingesetzt:

Arbeitspaket	**FS1 IWU**	**FS2 OSI**
2.1 poröse keramische Schichten		3 von (5)
2.2 metallische Schichten	2	**1**
2.3 optimale Schichtdicke	1	3
2.4 induzierte Schichtspannungen	1	

3.2.1 Poröse keramische Schichten

Poröse Schichten können Spannungen besser abbauen. Für die Untersuchung zum Einfluss der Schichtporosität auf die Umformbarkeit der Schichten im Heißprägeprozess wurde SiO2 als Schichtsystem ausgewählt. Als Beschichtungsverfahren wurde das Sol-Gel-Tauchbeschichtungsverfahren verwendet. Die somit hergestellten silicatischen Schichten nach dem Prägeprozess auf dem Bauteil verbleiben, ist es für optische Anwendungen notwendig, dass diese eine geringe Absorption und Streuung von Licht aufweisen (siehe AP 1.1, Tabelle 1). Dies kann erreicht werden, wenn die resultierenden Strukturen, d.h. Poren kleiner als die halbe Lichtwellenlänge sind.

Die Grundlage der Beschichtungslösung bildet ein Sol mit Tetraethylorthosilicat (TEOS) als Precursor und Ethanol als Lösungsmittel. Um Schichten mit verschiedenen Porositäten herzustellen, wurden dem Sol wasserlösliche Polymere (Pluronic®-123) oder Polyethylenglycol zugesetzt. Diese werden als kleine Tröpfchen (Durchmesser $< \lambda/2$) beim Beschichtungsvorgang in das Gel-Netzwerk eingelagert. Nach dem Beschichtungsprozess wurden die Schichten bei 500 °C calciniert. Dabei pyrolysiert das Polymer und es bleiben Poren in dem SiO2-Netzwerk zurück. Auf diese Weise sind Porositäten bis ca. 40 % erreichbar. Bei größeren Mengen an Polymerzusätzen sind entweder keine Schichten mehr herstellbar oder es sind keine nanoskaligen Poren mehr erreichbar. Die untersuchte Schichtdicke betrug zu zunächst 100 nm.

Um höhere Porositäten zu erreichen, wurden die Beschichtungs-Sole ohne Polymere über eine Zwei-Schritt Säure/Base Katalyse hergestellt. Der Beschichtungsvorgang wurde unter Ethanol-gesättigter Atmosphäre durchgeführt. Anschließend wurde die Porenflüssigkeit der Schichten durch n-Hexan ausgetauscht und die beschichteten Proben bei 300 °C getrocknet. Auf diese Weise konnten Schichten mit Porositäten von 50 bis 80 % hergestellt werden. Die Untersuchungen zur Optimierung der Schichtdicke (AP 2.3) zeigten, dass dünnere Schichten ein geringeres Schichtversagen beim Umformen aufweisen. Daher wurden die Prägeversuche zu den Schichtporositäten über 50% mit Schichtdicken von 50 nm durchgeführt.

Die Haftkräfte bei der Entformung waren bei den porösen keramischen Schichten gegenüber den unbeschichteten Substraten deutlich reduziert (im Mittel 30-50 N). Zum Teil konnten jedoch höhere Haftkräfte als bei den nicht porösen Beschichtungen detektiert werden. Allerdings traten aufgrund der beidseitigen Beschichtung Schwierigkeiten in der Versuchsdurchführung auf, sodass die Trennung von Prägewerkzeug und Glassubstrat nicht sicher detektiert werden konnte. So ist nicht auszuschließen, dass einige Proben erst beim Abkühlvorgang vom Glas getrennt wurden. Aus diesem Grund kann die Haftminderung nur qualitativ als vorhanden, jedoch nicht quantitativ bewertet werden.

Von den geprägten Strukturen wurden an den in Abbildung 3 gekennzeichneten Stellen SEM-Aufnahmen angefertigt. Es konnten bei allen untersuchten Schichten an den umgeformten Oberflächen Risse nachgewiesen werden. An der Stelle mit der stärksten Umformung (Stelle B) wurden die Rissparameter (Rissbreite und Rissanzahl) für die jeweiligen Proben bestimmt. Diese sind in Abbildung 7 für die jeweiligen Schichtdicken und Porositäten dargestellt. Die Anzahl der Risse steigt mit zunehmender Porosität, wobei die Schichtdicke hierauf einen geringen Einfluss hat. Bei einer Schichtdicke von 100 nm nimmt mit zunehmender Porosität die Rissbreite ab. Die Schichten mit einer Dicke von 50 nm zeigen im Rahmen des Fehlers keine Abhängigkeit der Rissbreite von der Porosität. Die Rissbreite ist allerdings mit < 200 nm sehr klein. Die ermittelte Schichtfreie Oberfläche liegt bei sehr großen Umformgraden bei nur 10 % unter Verwendung der dünnen Schichten mit Porositäten > 50 %.

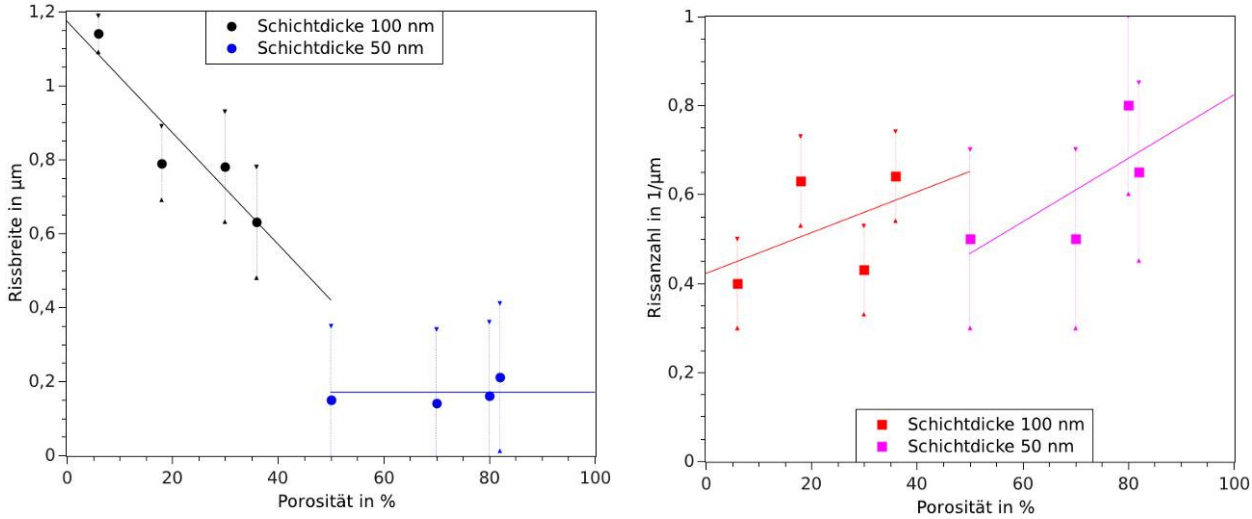


Abbildung 7: Rissbreite für verschieden Porositäten an der Stelle B von Steg 9

Die restlichen der für den AP 2.1 geplanten Ressourcen wurden genutzt um das Verhalten der Entnetzung und den Zerfall der Edelmetallschichten zu Nanopartikeln während des Heißprägeprozesses zu untersuchen. Weiterhin wurde die Nutzung dieser metallischen Nanopartikel zur Funktionalisierung der geprägten Strukturen untersucht und in einer möglichen Sensoranwendung nachgewiesen (Siehe AP 3.2).

3.2.2 Alternative metallische Schichtwerkstoffe und Legierungen

Bei Untersuchungen an den goldbeschichteten Proben wurde festgestellt, dass die dünnen Goldschichten bei hohen Temperaturen nicht nur Abdampfen, sondern auch ihre Struktur ändern. In einer geschlossenen Schicht bilden sich zunächst Löcher. Mit zunehmender Temperzeit werden aus dieser »netzartigen« Struktur viele einzelne Goldpartikel. Hierbei spielt, neben dem Abdampfen, die Oberflächendiffusion eine große Rolle. Das Abdampfen kann möglicherweise mit Metallen, welche eine höhere

Siedetemperatur bzw. Verdampfungsenthalpie als Gold (T_{sied} = 2970 °C, H_V = 324 kJ/mol) haben, wie beispielsweise Palladium (T_{sied} = 3125°C, H_V = 357 kJ/mol) oder Platin (T_{sied} = 3825°C, H_V = 447 kJ/mol) verhindert werden.

In ersten Versuchen wurden ca. 20 nm dicke Platinschichten mittels Sputtern auf Glassubstraten aufgebracht. Diese Proben wurden unter Prozessbedingungen 30 min getempert. Anders als bei den Goldschichten wurde kein Abdampfen des Platins beobachtet. Die ungetemperten Platinschichten sind mechanisch nicht sehr stabil (nicht kratzfest). Nach dem Tempern sind die Schichten kratzfest. Da hierbei das Platin in die Substratoberfläche diffundiert ist, wurden versucht, die Schichten zu entfernen (AP 3.3) bzw. die Auswirkung auf die optischen Eigenschaften untersucht (AP 3.2).

3.2.3 Bestimmung der optimalen Schichtdicke

Die in AP 1.3 entwickelte Methode zur Definition und Detektion von Schichtversagen wurde zur Bestimmung der optimalen Schichtdicke verwendet. Somit soll diese auch als Bewertungskriterium verifiziert werden.

Pyrosilschichten

Es wurden SiO2-Schichten mittels Flammenpyrolyse abgeschieden. Dabei wurde die Schichtdicke durch eine unterschiedliche Anzahl an Brennerüberfahrten variiert. Diese Pyrosilschichten weisen eine partikelähnliche Struktur auf. Aus bisherigen Untersuchungen ist bekannt, dass nach 2 Brennerüberfahrten die Substratoberfläche vollständig mit SiO2-Partikeln bedeckt ist. Für eine komplett geschlossene Schicht, welche dann ca. 30 nm dick ist, sind mindestens 4 Brennerüberfahrten notwendig. Die Größe dieser »Partikel« ist mit ca. 50 nm konstant, wobei die Dichte (Häufigkeit, Anzahl, Verteilung) dieser Partikel bis ca. 4 Brennerüberfahrten zunimmt.
Für die Untersuchungen zur Bestimmung der optimalen Schichtdicke wurden Schichtdicken von 20 nm (2 Brennerüberfahrten) bis 70 nm (10 Brennerüberfahrten) auf Objektträgern aus Kalk-Natron-Silicat abgeschieden. Anschließend wurde die Struktur des Werkzeugs aus AP 1.2 vollständig durch die beschichteten Proben ausgeformt.
Die Teststruktur wurden in je zwei Proben gleicher Schichtdicke abgeformt. Die Ergebnisse der auftretenden Haftkräfte der mit unterschiedlicher Dicke beschichteten Proben sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Haftkräfte unbeschichteter und Pyrosil-beschichteter Proben

Schichtdicke der Pyrosilschicht [nm]					ohne
20	**32**	**45**	**57**	**70**	**Schicht**
15 N	15,5 N	20 N	13 N	31 N	95 N

Generell sind die Haftkräfte ohne eine Beschichtung auf dem Glas deutlich höher als bei den beschichteten Substraten. Bei den Prägungen mit Pyrosil Beschichtung sind die Haftkräfte bei unterschiedlichen Schichtdicken annähernd gleich geblieben.

Um das Verhalten der verschiedenen Schichtdicken beim Umformen und bei Werkzeugkontakt zu untersuchen, wurden an den in Abbildung 3 gekennzeichneten Stellen SEM-Aufnahmen angefertigt. Wie bereits erwähnt ist am Rand der steilen Kante (Stelle B) der Umformgrad am größten. Daher kommt es hier auch zu einer hohen Schichtdehnung und zu einem vermehrten Auftreten von Rissen. In Abbildung 8 ist

beispielhaft eine SEM-Aufnahme des Steg 9 an der Stelle B einer geprägten Probe zu sehen. Die Probe wurde mit einer 57 nm dicken Pyrosilschicht versehen. Der weiße Rand im oberen Bereich des Bildes stellt den Rand der steilen Kante des Steges dar. Die Risse der Schicht sind, im Vergleich zu dieser, dunkler abgebildet. Es ist zu sehen, dass die Schicht viele Risse aufweist, welche ungefähr parallel zu den Kanten liegen und wenig verzweigt sind.

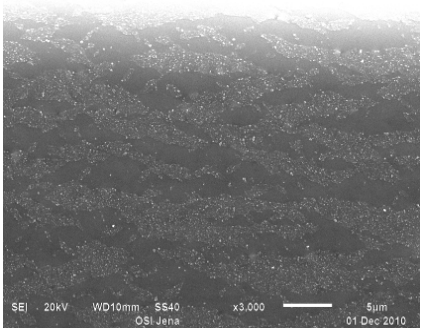


Abbildung 8: SEM-Aufnahme an Stelle B eines in Glas geprägten Steg, Schicht: 57 nm Pyrosil

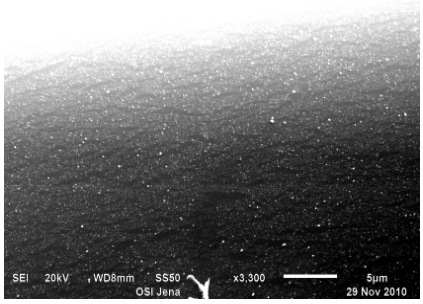


Abbildung 9: SEM-Aufnahme an Stelle B eines in Glas geprägten Steg, Schicht: 45 nm Pyrosil

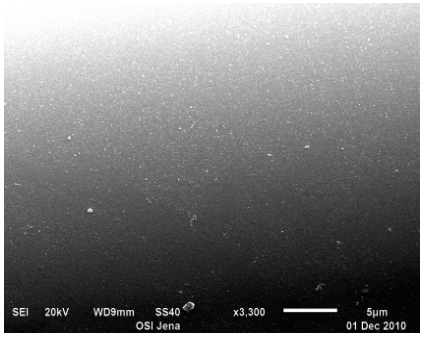


Abbildung 10: SEM-Aufnahme an Stelle B eines in Glas geprägten Steg, Schicht: 20 nm Pyrosil

Abbildung 9 zeigt eine Aufnahme an der gleichen Stelle wie in Abbildung 8 bei einer Probe mit einer Schichtdicke von 45 nm. Auch diese Schicht weist Risse auf. Im Vergleich zu der 57 nm dicken Schicht sind Risse allerdings deutlich schmaler. Die Pyrosilschicht in Abbildung 10 ist noch vollständig intakt bzw. es sind keine Risse zu erkennen. Die Schichtdicke dieser Probe beträgt 20 nm. Die Aufnahme zeigt ebenso die gleiche Stelle wie in Abbildung 8 und Abbildung 9.

In Tabelle 5 ist zusammenfassend dargestellt, welche Schicht an welcher Stelle ein Schichtversagen in Form von Rissen aufweist. Hierbei wurden die Untersuchungen immer an Steg 9 der jeweiligen Probe durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei der 20 nm dicken Pyrosilschicht an keiner Stelle ein Schichtversagen auftritt. Bei den Proben, welche mit einer 32 nm dicken Schicht versehen sind, sind nur an der Stelle B Risse sichtbar. Die 45 nm dicken Pyrosilschichten weisen nur bei großen Umformgraden (Stelle A und B) Risse auf. Ab einer Schichtdicke von ca. 57 nm sind an allen untersuchten Stellen Risse sichtbar, wobei diese mit zunehmender Schichtdicke, bei gleichen Umformgrad, breiter werden.

Tabelle 5: Auftreten von Schichtversagen

Schichtdicke / Stelle	20 [nm]	32 [nm]	45 [nm]	57 [nm]	70 [nm]
A	/	/	X	X	X!
B	/	X	X	X!	X!
C	/	/	/	X	X
D	/	/	/	X	X
E	/	/	/	X	X
Schichtverhalten:	/ kein Schichtversagen		X Risse vorhanden		X! starkes Schichtversagen

Die bestimmten Rissparameter (Rissbreite und Rissanzahl) der mit verschieden Schichtdicken versehenen geprägten Proben sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Parameter wurden am Steg 9 an der Stelle B gemessen. Wie bereits erwähnt weist die 20 nm dicke Schicht keine Risse auf. Diese treten erst ab einer Schichtdicke von 32 nm auf. Die Rissbreite nimmt mit zunehmender Schichtdicke zu, wobei gleichzeitig die Anzahl der Risse abnimmt. Der Bereich in dem, mit zunehmendem Abstand zur Kante, Risse auftreten können beträgt bei dem verwendeten Versuchswerkzeug und der untersuchten Stelle ca. 100 µm. Dabei nimmt sowohl die Rissbreite als auch die Rissanzahl mit zunehmendem Abstand zur Kante stark ab.

Tabelle 6: Rissparameter für verschiedene Schichtdicken an Stelle B / Steg 9

Schichtdicke	20 [nm]	32 [nm]	45 [nm]	57 [nm]	70 [nm]
Rissbreite [µm]	/	0,36 ±0,05	0,79 ±0,05	1,75 ±0,05	2,12 ±0,05
Rissanzahl [μm^{-1}]	/	0,8 ±0,05	0,45 ±0,05	0,3 ±0,05	0,2 ±0,05
Schichtfreie Oberfläche [%]	/	29 ±5	35 ±5	52 ±5	42 ±5

Weiterhin wurde die auf Grund der Risse nun schichtfrei vorliegende Oberfläche an der gleichen Stelle bestimmt. Es zeigt sich, dass die schichtfreie Oberfläche mit zunehmender Schichtdicke zunimmt.
Die beim Prägen auftretenden Haft- bzw. Entformkräfte zeigen, dass diese nicht bzw. wenig abhängig von der Schichtdicke sind. Daher können auch sehr dünne Schichten zur Verhinderung von Klebeerscheinungen verwendet werden. Wie in Abbildung 2 zu sehen, hat das Glas an der Kante der steilen Flanke (Stelle B) als letztes Kontakt zum Werkzeug und somit auch die kürzeste Kontaktzeit. Daher kann ein Schichtversagen an dieser Stelle als unkritisch in Bezug auf die Haft- bzw. Klebeneigung des Glases angesehen werden. Die 32 nm und 20 nm dicken Pyrosilschichten weisen das geringste Schichtversagen auf. Für den Prägeprozess sind damit diese am geeignetsten.

Zirkonoxidschichten

Zur Überprüfung der Erkenntnisse konnten Zirkonoxid-beschichtete Glasproben, die vom projektbegleitenden Ausschuss zur Verfügung gestellt wurden, mit einer definierten Schichtdicke von 6 nm untersucht werden. Dabei wurden jedoch Haftkräfte im Bereich der unbeschichteten Glasproben gemessen. Die Haftkräfte beim Heißprägen unter gleichen Versuchsbedingungen mit einer 16 nm Zirkonoxid-Beschichtung lagen bei etwa 25 % der unbeschichteten Referenzproben. Die haftmindernde Wirkung war also schon vorhanden, aber noch nicht in dem Bereich der dickeren Beschichtungen. Als Optimum der Glasbeschichtung kann somit eine Schichtdicke im Bereich von 20 nm bis 30 nm abgeleitet werden.

Platinschichten

Auf Grund der Ergebnisse der Untersuchungen in AP 3.2 und AP 3.3 wurden vier Platin beschichtete Substrate mit Schichtdicken von 9 bis 21 nm auf das Schichtverhalten beim Umformen und die bei der Entformung auftretenden Haftkräfte untersucht.

Tabelle 7: Haftkräfte der unbeschichteten und mit Platin beschichten Proben

Schichtdicke der Platinschicht [nm]				ohne
9	**14**	**18**	**21**	**Schicht**
193 N	360 N	90 N	115 N	95 N

In Tabelle 7 sind die beim Entformvorgang auftretenden Haftkräfte der platinbeschichteten Proben in Vergleich zu einer unbeschichteten Probe dargestellt. Es zeigte sich, dass die Haftkräfte durch eine dünne Platinschicht nicht reduziert werden können.
Die Struktur der Platinschichten nach dem Prägevorgang sind in Abbildung 11 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Schichten sehr mobil sind und sich eine Partikelstruktur gebildet hat. Diese Struktur, in Verbindung mit der in AP 2.2 festgestellten Kratzfesigkeit der Schicht führt dazu, dass das Prägewerkzeug mit dem Glassubstrat in Kontakt kommt und somit die Haftkräfte nicht reduziert werden.

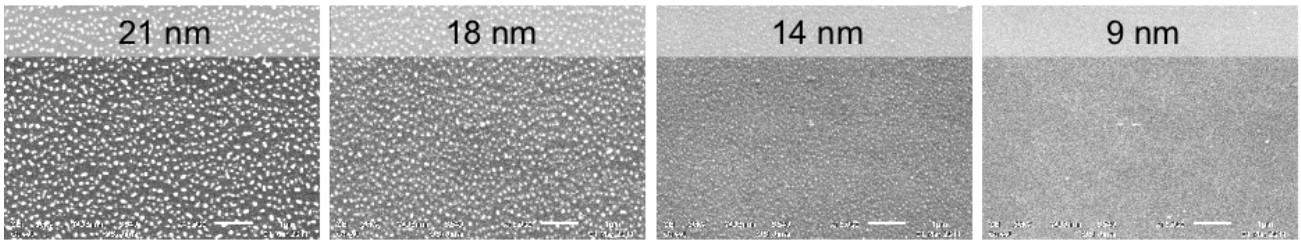


Abbildung 11: SEM-Aufnahmen der steilen Kante (B) an Nut 9 von Platinschichten unterschiedlicher Schichtdicke

Dünne Schichten aus edelmetallischen Nanopartikeln zeigen besondere optische Eigenschaften. Bei kleinen Metallpartikeln, beispielsweise aus Gold oder Platin, können bei einfallender elektromagnetischer Strahlung (z.B. Licht) nicht propagierende Feldüberhöhungen, sogenannte Plasmonen, auftreten. Diese sorgen dafür, dass eintreffendes Licht für verschiedene Frequenzen unterschiedlich stark von diesen absorbiert bzw. gestreut wird. Es gibt viele Faktoren, welche die Frequenz für die Absorption und Streuung beeinflussen. Den größten Einfluss haben die Art des Metalls, die Größe und Form, die dielektrische Umgebung sowie der Abstand der Partikel voneinander. Somit können die optischen Eigenschaften von metallischen Nanopartikeln in einem großen Bereich variiert werden. Metallische Nanopartikel eignen sie sich daher, für viele verschiedene Anwendungen, bspw. als chemische und plasmonische Sensoren, für Oberflächenplasmonenresonanzspektroskopie, als Katalysatoren oder für nichtlineare Optiken. Weiterhin können die Partikel für biologische Anwendungen wie die Diagnostik und sogar zum Abtöten von Mikroorganismen eingesetzt werden.

Aus diesem Grund wurden Versuche mit Schichten aus Platin als auch Gold durchgeführt, um die Bildung von Nanopartikeln im Heißprägeprozess zu untersuchen und diese für sensorische Anwendungen nutzbar zu machen. Um ein Anhaften des Prägewerkzeugs am Glassubstrat zu verhindern, wurde noch eine zusätzliche, dünne Schicht aus Pyrosil aufgebracht. Die Versuche und Ergebnisse werden in AP 3.2 dargestellt.

3.2.4 Induzierte Schichtspannungen / Alternative Werkzeugwerkstoffe

Im Rahmen des Arbeitspaketes sollte untersucht werden, inwieweit die in der Beschichtungstechnik bekannten Methoden zum gezielten Induzieren von Druckspannungen einen Einfluss auf das duktile Verhalten im Heißprägeprozess aufweisen. Aufgrund der Ergebnisse aus AP2.2 und AP2.3 ergab sich jedoch eine begrenzte Nutzbarkeit metallischer Schichten. Aus der theoretischen Recherche zu den Möglichkeiten der Schichtmodifikation zur Erzeugung von Druckspannung ließ sich bisher kein praktischer Nutzen für das Heißprägen sensorischer Strukturen ableiten.

Die restlichen für dieses Arbeitspaket geplanten Ressourcen wurden deshalb zur Untersuchung alternativer Werkzeugwerkstoffe verwendet. Aus der Diskussion mit Grafitwerkstoffherstellern konnte Grafit als potentieller Aktivteilwerkstoff abgeleitet werden. Thermische Ausdehnung, Wärmeleitfähigkeit, Bearbeitbarkeit und die schlechte Benetzung mit Glas erfüllen die Anforderungen zum Heißprägen von Glas sehr gut. Versuche mit Elektrodengraphit zeigten eine Minimierung der Haftkraft auch bei unbeschichteten Substraten in ähnlichem Ausmaß wie die untersuchten Glasbeschichtungen. Jedoch wurde auch die fehlende Stabilität des Werkzeuges und Abtrag an der Werkzeugoberfläche deutlich. Deshalb wurde anhand der Prozessbedingungen ein stabilerer Grafitwerkstoff der Fa. SGL Carbon ausgewählt.

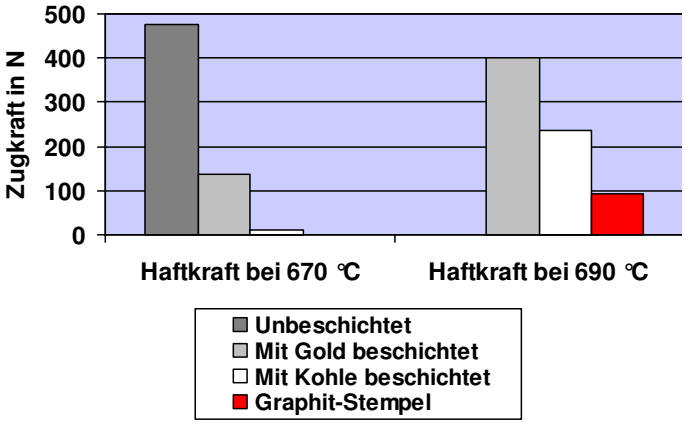


Abbildung 12: Vergleich der Haftkräfte zwischen Glasbeschichtung unddem Einsatz von Grafitwerkzeugen (links) und Prägestempel aus dem Grafitwerkstoff R6710 (rechts)

Der Graphitwerkstoff R6710 eignet sich vom Zerspanverhalten sehr gut zur Herstellung der Prägestrukturen in gleicher Qualität wie bei Werkzeugen aus Werkzeugstahl. Die Qualität der Ausformung im Glas unterscheidet sich bei gleichem Prägeweg nicht im Vergleich zu den Versuchen mit Standardwerkzeugen. Der Grafit-Stempel war auch bei hohen Temperaturen nahe dem Erweichungspunkt des Glases stabil und minimierte die Haftkäfte (Abbildung 12). Lediglich die Langzeitstabilität konnte im Projekt nicht nachgewiesen werden. Für Strukturuntersuchungen, Prototypenlösungen und Kleinserien bietet der Werkstoff aber eine interessante Materialalternative.

3.3 AP3 »Rückwirkung der Beschichtung«

Durchgeführte Arbeiten

- Wirkung der Beschichtung auf die Formausbildung im Heißprägeprozess
- thermisch induzierte Deformation des Glassubstrates
- Auswirkungen auf die optische Qualität / Gebrauchseigenschaften bei optischen Applikationen
- Untersuchung von Verfahren zur Beseitigung der Beschichtung nach der Formgebung

Dazu benötigt und eingesetzt:

Arbeitspaket	**FS1 IWU**	**FS2 OSI**
3.1 Wirkung der Beschichtung auf die Formausbildung	3	
3.2 Auswirkung der Beschichtung auf die optische Funktion	2	(2) +1 +1
3.3 Technologie zum Entfernen der Schichten		(2) -1
3.1 Wirkung der Beschichtung auf die Formausbildung	3	

3.3.1 Wirkung der Beschichtung auf die Formausbildung

Geschlossene dünne Schichten können, je nach Schichtwerkstoff und Schichtparameter, mechanische Spannungen von bis zu mehreren Gigapascal übertragen. Die auf das Glas rückwirkenden Kräfte könnten insbesondere bei der Verarbeitung von dünnen Glassubstraten zu signifikanten und unzulässigen Verformungen am heißgeprägten Bauteil führen. Dazu wurden Experimente zur Formausbildung mit dem in AP 1.2 entwickelten Prüfwerkzeug durchgeführt. Bei den Prägeversuchen wurde die Struktur nicht komplett befüllt, sondern mit dem Werkzeug nur soweit ins Substrat eingedrungen, das es zur Ausbildung einer Freiformfläche ohne Presskontakt in der Umformzone kommt.

Der Vergleich von unbeschichteten und beschichteten Glasproben zeigte keine Unterschiede in der Geometrie der Ausformung. Auch beim Aufheizen beschichteter Glasproben und der Prozessführung ohne Werkzeugkontakt konnte keine Verformung der Glassubstrate detektiert werden. Schichtspannungen werden somit innerhalb der Beschichtung abgebaut und nicht auf das Glassubstrat übertragen. Zumindest ist eine potentielle thermisch induzierte Deformation in Abhängigkeit der Glassubstrat- und Schichtdicke nicht detektierbar.

Ein generelles Problem beim Heißprägen ist die vollständige Befüllung von Werkzeugkavitäten mit dem viskosen Substratwerkstoff. Die Abbildungsgenauigkeit von Funktionsstrukturen steigt dabei mit sinkender Viskosität. Rauheitsstrukturen werden aufgrund ihres sehr geringen Aspektverhältnisses auch bei hohen Viskositäten präzise abgebildet. Funktionale Strukturen mit höheren Aspektverhältnissen werden aber nur unvollständig vom Prägewerkzeug übertragen. Ein typisches Phänomen ist dabei die Kantenverrundung, also die Vergrößerung des Kantenradius bestimmter Strukturgeometrien während der Abformung. Vor allem fluidische Kanäle und Kammern, prismatische Strukturen oder diffraktive optische Elemente sind durch

kantenbetonte Strukturgeometrien mit steilen Wänden und minimalen Eckenradien gekennzeichnet, bei denen es oft zu einer Kantenverrundung kommt. Während bei diesen Strukturgeometrien hervorstehende, auskragende Elemente des Werkzeugs im heißgeprägten Negativ sehr genau abgebildet werden, sind bei vertieften, zurückgesetzten Strukturen die Kanten verrundet.

Die Ursache für die Kantenverrundung ist im Fließverhalten des viskosen Substrates zu finden. Das viskose Material fließt halbrund immer weiter in die Kavität bis der Boden berührt wird. Danach legt sich das zähflüssige Material von den Berührungspunkten aus immer weiter an die Wände der Kavität an und verdrängt noch darin befindliches Prozessgas (Abbildung 2). Da beim freien Prägen eines flachen Substrates der Materialfluss nicht nur in die Kavitäten sondern auch nach außen stattfindet, sind diese nach dem Eindringen des Formwerkzeuges nicht zwingend komplett befüllt. Je größer der Widerstand des Substrates, desto leichter wird das Glassubstrat nach außen fließen, statt die Werkzeugkavität zu befüllen.

Die Beschichtung des Glases ermöglicht dagegen ein Heißprägen mit hohen Scherraten bei niedrigen Viskositäten. Dies wirkt sich positiv auf die Abformgenauigkeit sowie die Zykluszeit für das Heißprägen aus. Außerdem werden schädliche Eigenspannungen im Glas während der Abformung reduziert. Die neue Beschichtungsstrategie ermöglicht damit auch die Strukturierung von Gläsern mit hoher Klebeneigung und erweitert die Palette einsetzbarer Werkzeugwerkstoffe.

Zur Untersuchung des Beschichtungseinflusses auf die Abformung anwendungsnaher Mikrostrukturen wurde ein laserstrukturiertes Siliziumkarbid-Formwerkzeug eingesetzt und in beschichtetes und unbeschichtetes Kalk-Natron-Floatglas heißgeprägt (Abbildung 13). Die Profilvermessung eines Mikrofluidikkanals am unvollständig abgeformten unbeschichteten Glas mit einem 3D-Laserscanning-Mikroskop ergab einen Kantenradius von etwa 130 Mikrometern. Der Kanal besitzt dadurch nicht den gewünschten rechteckigen Querschnitt und es ist nicht auszuschließen, dass es zu unerwünschten Verbindungen zu benachbarten Formelementen kommt. Bereits bei dieser unvollständigen Strukturausformung traten beim unbeschichteten Glas hohe Haftkräfte über 100 N auf, sodass die weiteren Versuche nur noch mit beschichteten Glasproben durchgeführt werden konnten.

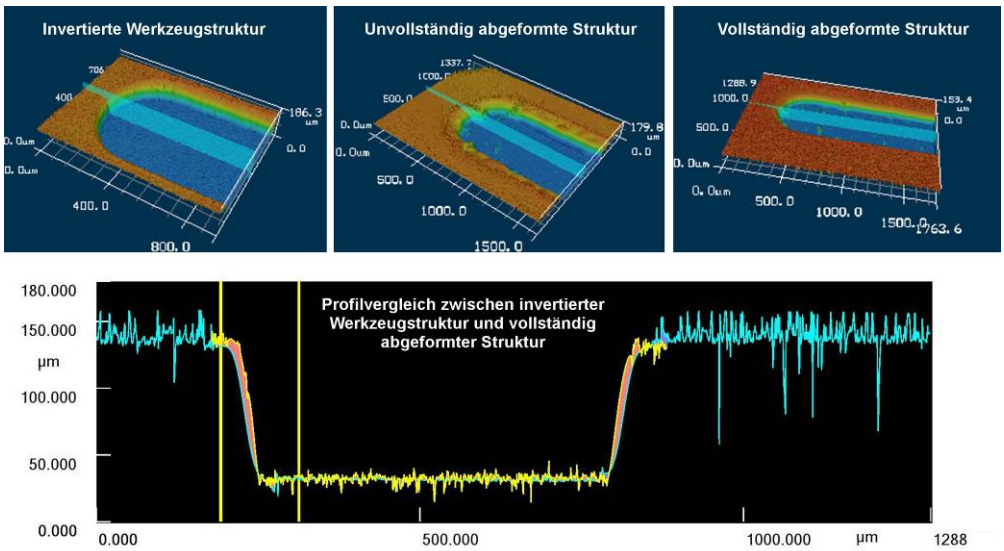


Abbildung 13: Profilvergleich zwischen SiC-Prägewerkzeug und heißgeprägten Glasproben

Im Gegensatz dazu zeigt die beschichtete Glasprobe auf dem rechten Bild eine vollständig abgeformte Struktur. Die Profilvermessung zeigt hier einen Kantenradius von 15 Mikrometern, was sich nur noch gering vom Kantenradius des Werkzeugs von etwa 5 Mikrometern unterscheidet. Mit den optimierten Prozessparametern unter Verwendung der Glasbeschichtung konnte die Mikrofluidikstruktur fehlerfrei und formtreu heißgeprägt werden. Dabei entsprach die erzielte Präzision der des verwendeten Werkzeuges. Abbildung 13 unten zeigt dazu auch den Profilvergleich durch Vermessung mit dem 3D-Laserscanning-Mikroskop.

3.3.2 Auswirkung der Beschichtung auf die optische Funktion / Funktionalisierung mikrofluidischer Strukturen

In AP 2.3 wurde festgestellt, dass die 20 nm dicke Pyrosilschicht bei großen Umformgraden kein Versagen in Form von Rissen aufweist. Die Auswirkung der geschlossen 20 nm dicken Pyrosilschicht auf die optische Funktionalität ist in Abbildung 14 für die Transmission von Licht dargestellt.

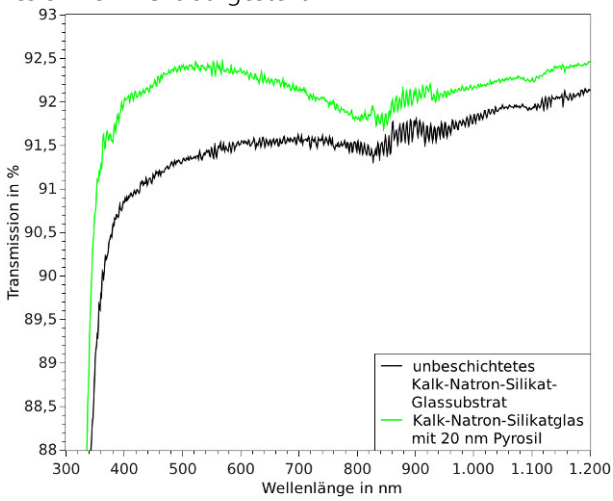


Abbildung 14: Transmissionspektren eines Kalk-Natron-Silicat-Glassubstrats und eines Substrats mit 20 nm Pyrosilschicht

Im Vergleich mit einem unbeschichteten Substrat ist die Transmission von Licht der pyrosilbeschichteten Probe ca. 0,5 bis 1 % höher. Somit können durch die Schicht nicht nur die Haftkräfte im Prägeprozess wirksam reduziert werden, es ist auch davon auszugehen, dass sich die höhere Transmission eher positiv auf die optische Qualität der geprägten Bauteile auswirkt.

Wie bereits in AP 2.3 beschrieben reagiert die Plasmonenresonanz metallischer Nanopartikel (und damit die optischen Eigenschaften) sehr sensitiv auf eine Änderung der dielektrischen Umgebung. Diese Eigenschaft machen diese interessant für Anwendungen in der Sensorik, um beispielsweise die Brechzahl des umgebenden Mediums zu bestimmen. Die Bildung von Gold- bzw. Platin-Nanopartikeln während des Heißprägeprozesses wurde genutzt und untersucht, um diese für sensorische Anwendungen nutzbar zu machen.

Zunächst wurden auf dem Glassubstrat dünne Goldschichten aufgebracht, welche anschließend mit einer Pyrosilschicht abgedeckt wurden. In diese beschichteten Substrate wurde eine Mikrofluidikstruktur geprägt. In Abbildung 15 sind SEM Aufnahmen des Schichtsystems nach dem Prägeprozess zu sehen. Der Kontrast in Abbildung 15 links resultiert hauptsächlich aus der Topografie der Oberfläche. Es ist die partikelähnliche Struktur der Pyrosilschicht zu erkennen. Die Abbildung 15 rechts zeigt

den Materialkontrast der Oberfläche an der gleichen Stelle der Probe. Aufgrund der, im Vergleich mit den Elementen des Glases bzw. der Pyrosilschicht, hohen Ordnungszahl von Gold sind deutlich die Goldpartikel zu sehen.

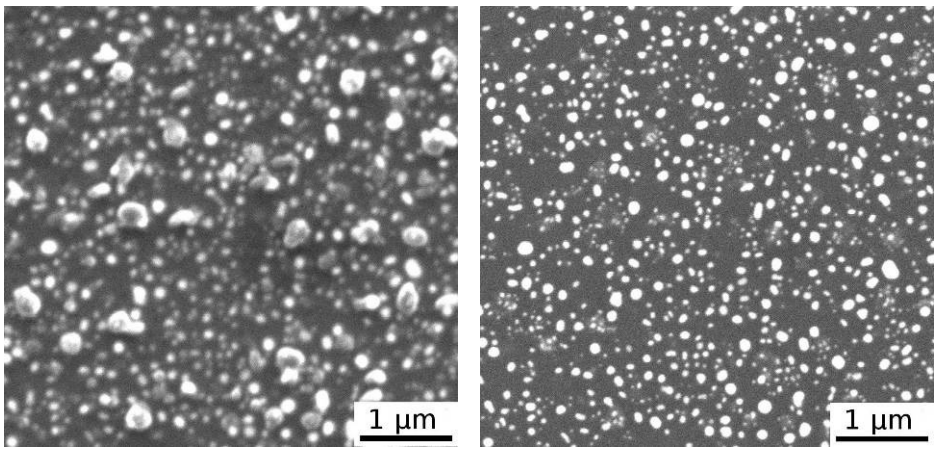


Abbildung 15: SEM-Aufnahme von in Pyrosil eingebetteten Goldpartikeln nach dem Beschichten nachdem diese Prozessbedingungen ausgesetzt wurde. Links: Topografiekontrast, Rechts Materialkontrast

In der Kanalstruktur wurden an 3 Stellen Löcher für die Zu- und Abfuhr von Analyt-Flüssigkeiten gebohrt. Um die in das Gold/Pyrosil-beschichtete Substrat geprägte Mikrofluidikstruktur für sensorische Anwendungen nutzen zu können, ist es weiterhin notwendig, diese mit einem Deckglas zu verschließen. Hierzu wurde ein 1 mm dickes Flachglas, welches ebenso mit einer Gold/Pyrosil-Schicht versehen wurde, auf die geprägte Struktur gelegt und beides bei 600 °C 1 h getempert.
Der Mikrofluidik-Chip mit der Kanalstruktur und den Löcher für die Flüssigkeitszufuhr ist in Abbildung 16 zu sehen.

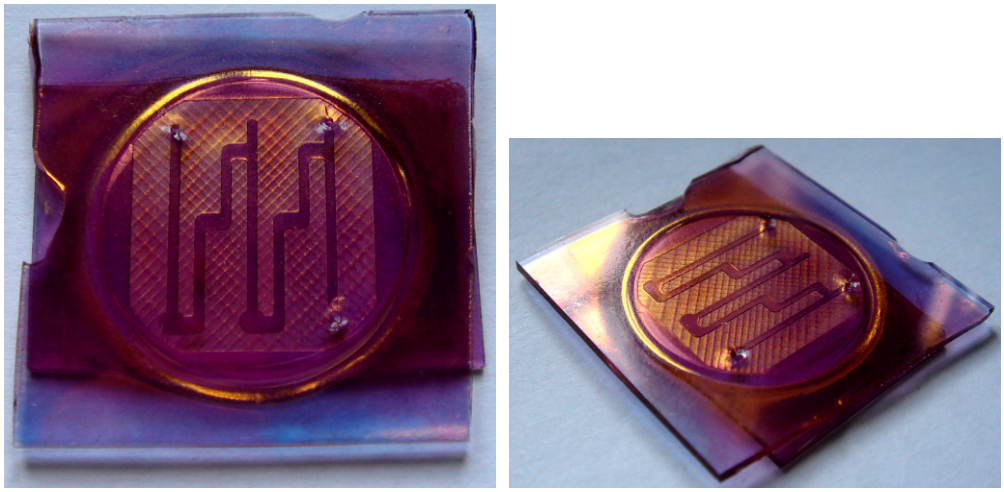


Abbildung 16: Mikrofluidik-Chip mit der Kanalstruktur und Zugangsbohrungen

Mittels UV-vis-NIR-Spekroskopie wurde die Lage des Absorptionsmaximums bzw. Plasmonenresonanzpeaks (PR-Peak) in Abhängigkeit des umgebenden Mediums bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 und Tabelle 8 dargestellt.

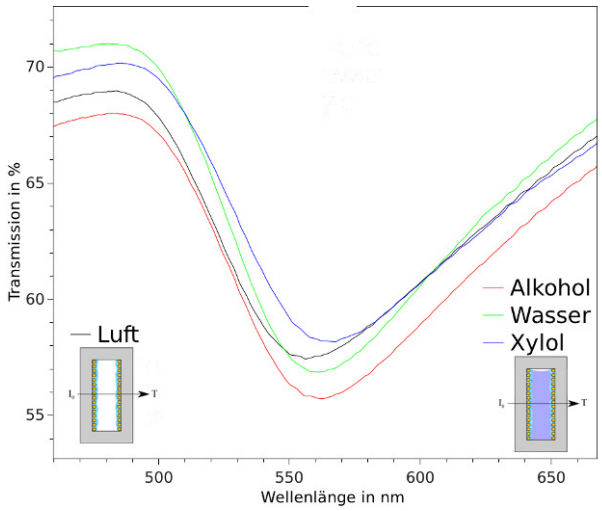


Abbildung 17: Absorptionsmaximum/Plasmonenresonanz (PR) von in Pyrosil eingebetteten Goldpartikeln bei versch. Umgebungsmedien

Die Lage des PR-Peaks hängt empfindlich von der dielektrischen Funktion der Umgebung der Partikel ab. Im Allgemeinen liegt der PR-Peak von Gold-Nanopartikeln, je nach Größe und Form, bei ca. 530 bis 540 nm. Der PR-Peak der Goldpartikel, welche durch den Prägeprägeprozess entstanden sind und vorher mit einer Pyrosilschicht bedeckt wurden, liegt bei 545 nm (mit Luft als umgebendes Medium). Ändert man die dielektrische Umgebung des Schichtsystems, in dem man es verschieden Flüssigkeiten aussetzt, ändert sich auch die Lage des PR-Peaks (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Lage des Absorptionsmaximum/Plasmonenresonanz (PR) von in Pyrosil eingebetteten Goldpartikeln bei verschiedenen Umgebungsmedien

	Luft	Ethanol	Wasser	Xylol
Plasmonenresonanz in nm	545	550	551	557
Δ in nm		5	6	12

Damit wurde einerseits nachgewiesen, dass ein Bonden der beschichteten Substrate möglich ist. Die Versuche zeigen weiterhin, dass sich durch das Abdecken der Edelmetallschichten mit einer dünnen Schicht Pyrosil und einem anschließenden Prägevorgang, kratzfeste, beständige metallischen Nanopartikeln bilden. Die erreichbaren Partikelgrößen und -abstände sowie die optische Eigenschaften der Schichten können über die Schichtdicke der Einzelschichten gezielt und reproduzierbar beeinflusst werden. Weiterhin wurde anhand einer geprägten und beschichteten Mikrofluidikstruktur die prinzipielle Eignung der Schichtsysteme für sensorische Anwendungen nachgewiesen.

3.3.3 Technologie zum Entfernen der Schichten

Es wurde versucht die in AP 2.2 verwendeten Platinschichten zu entfernen, nach dem diese den beim Heißprägen erforderlichen Prozessbedingungen ausgesetzt wurden. Anders als bei Gold war beim Platin, aufgrund der Diffusion in die Substatoberfläche, ein reines mechanisches Entfernen nicht möglich, ohne die Substratoberfläche zu beschädigen.

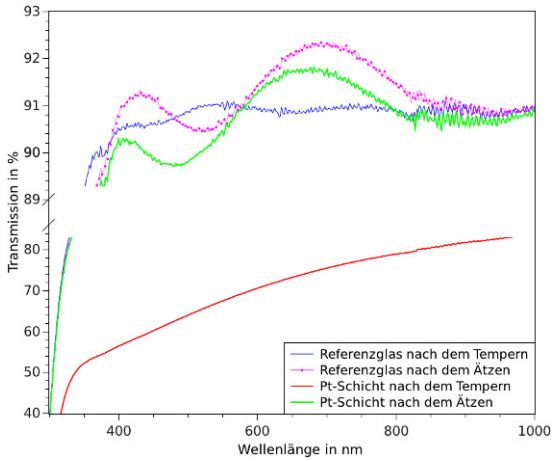


Abbildung 18: Transmissionsspektren von platinbeschichteten Proben in Vergleich mit einer unbeschichteten vor und nach der Temperaturbehandlung bzw. dem Ätzvorgangs

In Abbildung 18 sind Vis-NIR-Transmissionsspektren von der platinbeschichteten Probe im Vergleich mit einem unbeschichteten Substrat zu sehen. Beide Proben wurden zunächst den in AP 2.2 genannten Prozessbedingungen ausgesetzt und anschließend jeweils 60 Sekunden mit 70 °C warmem Königswasser (drei Teile konzentrierte Salzsäure und ein Teil konzentrierte Salpetersäure) behandelt. Die nur wenig geringere Transmission der temperaturbehandelten und geätzen platinbeschichten Probe im Vergleich zu dem Spektrum der Referenzprobe zeigt, dass das Platin fast vollständig entfernt wurde. Sowohl die beschichtete als auch die unbeschichtete Probe zeigen im Transmissionsspektrum nach dem Ätzen mehrere Maxima (bei ca. 424 und 700 nm) und Minima (bei ca. 500 und 940 nm). Diese resultieren aus einer Veränderung der Oberfläche, vermutlich durch die Bildung einer Gelschicht, infolge des Ätzvorgangs. Die Abweichung der Transmission im sichtbaren Bereich des Lichts von den verschieden behandelten bzw. beschichteten oder unbehandelten Proben beträgt ca. 1%.

In AP 2.3 wurde festgestellt, dass oxidische Schichten aufgebracht werden können, welche wirksam die Haftkräfte während des Umformvorgangs reduzieren können und auch bei großen Umformgraden kein Schichtversagen in Form von Rissen aufweisen. Aufgrund der positiven optischen Eigenschaften der Pyrosilschicht kann diese auf den Substrat verbleiben.

3.4 AP4 »Wirtschaftlichkeitsbetrachtung«

Durchgeführte Arbeiten

- Darstellung der im Vorhaben erweiterten Verfahrensgrenzen vor dem Hintergrund der Realisierung von neuen Applikationen
- Abschätzung des Kostensenkungspotentials durch mögliche Zykluszeitverkürzung
- Experimentelle Verifikation der entwickelten Methodik an einem Anwendungsglasbauteil

Dazu benötigt und eingesetzt:

Arbeitspaket	**FS1 IWU**	**FS2 OSI**
4.1 Neue Applikationen durch Erweiterung der Verfahrensgrenzen	3	
4.2 Abschätzung des Kostensenkungspotentials	1	
4.3 Experimentelle Verifikation	3	3

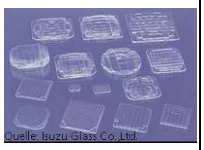
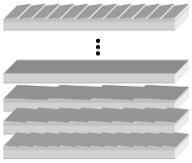
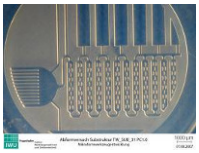
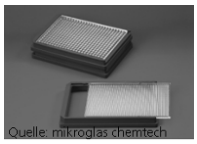
3.4.1 Neue Applikationen durch Erweiterung der Verfahrensgrenzen

Der Werkstoff Glas wird heute schon vielseitig in der Mikrosystemtechnik eingesetzt, sei es zur Realisierung optischer Funktionen, in der Biomedizin- und Analysetechnik bei mikrofluidischen Komponenten, im Packaging mikroelektronischer und mikromechanischer Komponenten oder als Trägermaterial bei Display- oder Solaranwendungen. Die aufwendigere Verarbeitung von anorganischen Gläsern im Vergleich zu Kunststoffen oder Metallen behindert aber oftmals noch den Einsatz in Massenprodukten, vor allem in unteren Preissegmenten. Die bestehenden Fertigungstechnologien sind trotz der an vielen Stellen überlegenen Werkstoffeigenschaften von Gläsern oftmals einfach zu teuer, um mit alternativen Werkstoffen konkurrieren zu können. Speziell für die massenproduktionstauglichen Replikationsverfahren fehlt die adäquate Um- oder Abformtechnologie. Nach der Urformung werden Gläser in den meisten Fällen durch spanende und abtragende Verfahren strukturiert, was eine teure, meist serielle Fertigung bedeutet. Das Blankpressen von Glas ist die einzige beherrschte und industriell eingesetzte Abformtechnologie. Sie wird bisher allerdings technologisch bedingt nur zur Herstellung sphärischer und asphärischer Einzellinsen oder ähnlich einfacher Geometrien eingesetzt.

Den Schlüssel für den Markterfolg bildet die konsequente Entwicklung von Technologien zur hochgenauen replikativen Heißformgebung, die zum einen den kostenseitigen Ansprüchen der zugehörigen Märkte genügen und zum anderen die Realisierung der speziellen optischen und fluidischen Funktionen erlauben. Grundsätzlich wird mithilfe von Abformverfahren die nachbearbeitungsfreie Herstellung komplexer und hochpräziser Glaskomponenten in einem wirtschaftlichen und ressourcenschonenden Abformprozess ermöglicht. Es existieren mehrere Verfahrensvarianten zur abformtechnischen Herstellung von Glaskomponenten, die vor allem aus dem Bereich der Fertigung optischer Einzellinsen hervor gegangen sind. Das Blankpressen und Präzisionsblankpressen eignet sich jedoch speziell für die Fertigung komplexer Arraystrukturen sowie flacher, waferartiger Glaskomponenten mit optischen und fluidischen Funktionselementen kaum (Tabelle 9), da es bei der Mikrostrukturierung von kleinen oder dünnen Bauteilen erforderlich ist, das

Werkzeugsystem auf die zur Formgebung erforderliche Werkstofftemperatur zu erhitzen und während des Erhitzens, Prägens und Entformens einen präzisen Zeit-Temperatur-Kraft-Zyklus zu realisieren. Dieses Verfahren, üblicherweise als Heißprägen bezeichnet, wird bisher vor allem zur Strukturierung von Kunststoff in Forschung und Industrie eingesetzt.

Tabelle 9: Typische mit Press- oder Prägeverfahren hergestellte Arraystrukturen in Glas

	Aufbau- und Verbindungstechnik / Packaging				
	optische Arraystrukturen			**fluidische Arraystrukturen**	
Typ	einseitige Linsenarrays	doppelseitige Linsenarrays	Mehrfach-/ Modularoptik auf Wafern	komplexe Kanal-/ Kammerstrukturen	Mehrfach-strukturen
Abbildung	 Quelle: Isuzu Glass Co. Ltd.				 Quelle: mikroglas chemtech
Tech-nologie	Blankpressen/ Präzisionsblankpressen	Heißprägen	potentiell Heißprägen	Heißprägen Kunststoffe und Gläser	Ätz-/ Strahl-technologien
Verfüg-barkeit	kommerziell verfügbar	Fh Allianz Tailored Optics	keine Technologie am Markt	F&E Fraunhofer IWU / FSU OSI	kommerziell verfügbar
Glas	optisches Glas	optisches Glas	optisches Glas/Floatglas	Floatglas	Fotostruktur-ierbares Glas
Abmessung	ca. Ø 50 mm	Ø 50 mm	---	Ø 100..200 mm	Ø 100..200 mm
Präzision	ca. 0,2 mm	< 20 µm	---	< 10 µm	> 50 µm
Kosten	hochpreisig	hochpreisig	hochpreisig	tiefpreisig	tiefpreisig

Die erforderlichen hohen Umformgrade zur Herstellung von Mikrostrukturen mit größeren Aspektverhältnissen erfordern aber niedrige 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. Darüber hinaus kann mit einer im Vergleich zum Präzisionsblankpressen verbesserten Abformtreue gerechnet werden. Ein Heißprägen bei Viskositäten, welche Temperaturen oberhalb der Klebetemperatur entsprechen, ist mittels der alleinigen Werkzeugbeschichtung nicht realisierbar.

Ziel der Untersuchungen war es, eine Vorgehensweise einschließlich entsprechender Bewertungskriterien zu definieren, mit welcher besser als bisher die technologischen und wirtschaftlichen Potentiale des Heißprägens applikationsspezifisch abgeschätzt werden können. Folgende Anwendungsmöglichkeiten der Mikrostrukturierung von

Flachglas durch Heißprägen können auf Basis der untersuchten Glasbeschichtungstechnologie angeleitet werden:

- Ebene Glassubstrate können sowohl einseitig als auch doppelseitig, reproduzierbar in Flachglas / optisches Glas strukturiert werden.
- Die Verringerung von Haft- und Klebeerscheinungen durch die Glasbeschichtung führt zu einer Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit der Kantenabformung und Formfüllung geschlossener Kavitäten.
- Eine definierte Grenze der Abformbarkeit bezüglich Strukturgröße konnte in den bisherigen Untersuchungen sowie in der Literatur nicht bestimmt werden.
- Die Verschiebung der kritischen Klebeneigung bis nahe an den Erweichungspunkt des Glases ermöglicht mit der Glasbeschichtung beim Heißprägen eine glasartunabhängige Strukturierungstechnologie.
- Der optimale Schichtdickenbereich liegt bei den untersuchten Schichten zwischen 20 nm und 30 nm.
- Die glasähnlichen oxidischen Schichten eignen sich sowohl in optischen und fluidischen Anwendungen, sofern nicht eine rückstandsfreie Entfernung nach dem Heißprägen gefordert ist. Kohlenstoffschichten sind durch Oxidation besonders einfach entfernbar und Edelmetallschichten können gegebenenfalls Zusatzfunktionen realisieren und den Anwendungsbereich vergrößern.
- Die Beschichtungsstrategie ermöglicht die Strukturierung von Gläsern mit hoher Klebeneigung und erweitert auch die Palette einsetzbarer Werkzeugwerkstoffe.
- Im Bereich lateraler Strukturabmessungen von 10 µm bis zu einigen hundert Mikrometern kann ein Aspektverhältnis von eins sicher erreicht werden. Noch tiefere Strukturen sind nur bedingt abformbar, z.B. durch Anpassungen im Design (Gestaltung von Formschrägen).
- Das Heißprägen beschichteter Gläser ermöglicht damit die Abformung komplexer Geometrien zur großflächigen Mikrostrukturierung anorganischer Gläser.

3.4.2 Abschätzung des Kostensenkungspotentials

Die industrielle Serienfertigung von mikrostrukturierten Glaswafern erfolgt aktuell noch mit Ätzverfahren, Fotolithografie oder mechanischer Bearbeitung. Das Heißprägen von Glas ist noch ein in der Entwicklung befindliches Fertigungsverfahren. Aus diesem Grund sind Daten zur Kostenstruktur nur in sehr eingeschränktem Maße verfügbar. Bei der wertmäßigen Bewertung muss aus diesem Grund oft auf Erfahrungswerte aus der Forschungsarbeit am Fraunhofer IWU zurückgegriffen werden.

Die Fertigungskosten für mikrostrukturierte Glaswafer und heißgeprägte Glaskomponenten setzen sich aus den Kosten für das Ausgangsmaterial, Werkzeugkosten, Prägekosten sowie gegebenenfalls Kosten zur Vereinzelung zusammen. Die Kosten für Glasrohlinge differieren stark je nach verwendeter Glasart. Besonders kostengünstig und für Mikrostrukturkomponenten kaum relevant für die Gesamtkosten ist die Verwendung von Flachglas (Floatglas, Walzglas), allerdings existieren dabei Einschränkungen hinsichtlich der Glasart. Anders verhält es sich bei der Verwendung spezieller optischer Gläser, welche im Block gegossen und vor dem Heißprägeprozess erst noch in die Form entsprechender Rohlinge oder Gobs gebracht werden müssen. Für diese Art Ausgangsmaterial konnten am Fraunhofer IWU für größere Stückzahlen nur sehr grobe Abschätzungen gemacht werden, da für die Forschung und Entwicklung mit den Glasherstellern keine für diese wirtschaftlich interessanten Abnahmemengen diskutiert werden können.

Die Werkzeugkosten wurden nochmals unterteilt in die Kosten für die Fertigung der Formeinsätze, die Beschichtung und Kosten für eine Werkzeugüberarbeitung nach einer definierten Standzeit. Die Prägekosten werden maßgeblich von der Zykluszeit für die Abformung der Struktur der Werkzeugformeinsätze bestimmt. In einer automatisierten Anlage mit Handlingsystem, Vorheiz- und Abkühlstation werden Zykluszeiten von fünf bis zehn Minuten erreicht. Für die Großserienfertigung sollte zur Minimierung der Prägekosten des Weiteren eine Modularisierung der Formeinsätze und damit die Abformung mehrerer Komponenten in einem Prägeschritt realisiert werden.

Am Beispiel von zwei mikrooptischen Komponenten, einem einseitig geprägten Chip mit einer Linsenanordnung auf der Grundfläche von 5 x 7 mm² und einem doppelseitig geprägten Mikrolinsenarray vom Durchmesser Ø 25 mm wurden die Fertigungskosten auf Basis von Angeboten und Prägekosten kalkuliert. Tabelle 10 zeigt die Kostenaufstellung für beide Beispiele, wobei für das doppelseitig geprägte Linsenarray sowohl die Fertigung mit einem Einfachwerkzeug als auch mit einem in Modulbauweise gefertigtem Mehrfachwerkzeug betrachtet wurde.

Tabelle 10: Einzelkosten zur Abschätzung der Fertigungskosten

Kostenart	**Einheit**	**Chip 5x7 mm**	**Linsenarray einfach**	**Linsenarray mehrfach**
Glasrohling	Euro	**2**	**6,50**	**12**
Modulzahl	1	120	1	**7**
Einzelwerkzeugfertigung	Euro	750	**28.060**	28.060
Einzelwerkzeugüberarbeitung	Euro	150	**9.870**	9.870
Werkzeugfertigung	Euro	**90.000**	28.060	**196.420**
Werkzeugüberarbeitung	Euro	**18.000**	9.870	**69.090**
Werkzeugbeschichtung	Euro	1.000	1.000	1.000
Überarbeitungsstandzeit	1	2.000	2.000	2.000
Werkzeugstandzeit	1	10.000	10.000	10.000
Prägepresse	Euro/h	55	55	55
Bediener	Euro/h	60	60	60
Prozesszeit	min	8	8	8
Zykluszeit	min	10	10	10
Glasnachbearbeitung	Euro	**8**	**0**	**5**

Die grafische Darstellung des Stückpreises über der Gesamtstückzahl in Abbildung 19 verdeutlicht, dass es sich bei dem untersuchten Fertigungsprozess um ein Verfahren für die Massenfertigung handelt. Wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar wird das Verfahren bei den dargestellten Beispielen erst ab Stückzahlen von etwa 10.000 Einzelteilen.

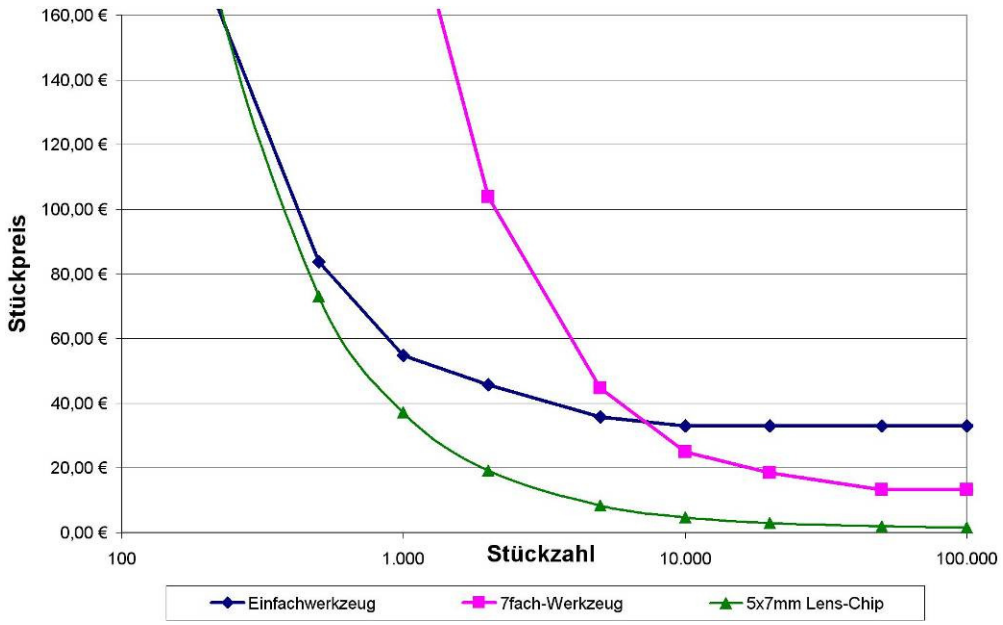


Abbildung 19: Stückpreis heißgeprägter optischer Beispielkomponenten in Abhängigkeit der Fertigungsstückzahl

Für die industrielle Serienfertigung zur Herstellung mikrostrukturierter Glaswafer ist das Ziel der Stückkostenminimierung zu verfolgen. Dies kann durch die Verringerung der Werkzeugkosten, die Erhöhung der Produktivität durch Mehrfachwerkzeuge oder eine wirtschaftlichere Prozessgestaltung geschehen. In Bezug auf die Technologie des Heißprägens muss eine Reduktion der Bearbeitungszeit des Glaswafers geschehen.

Neben der Möglichkeit, neue Anwendungspotentiale mittels der Nutzung beschichteter Gläser bei der Mikrostrukturierung durch Heißprägen zu erschließen, ergibt sich ein großes Einsparpotential durch die Verkürzung der Zykluszeit beim Heißprägen. Mithilfe eines vereinfachten Prozessmodells, welches im Rahmen experimenteller Untersuchungen verifiziert wurde, kann für einen definierten Umformweg die notwendige Presskraft und Prägezeit – also den Prägeimpuls – bei konstanter Viskosität ermittelt werden. Es wird ein geschlossener mathematischer Zusammenhang zwischen den Prozessparametern beim Heißprägen von Glaswafern mit einem kreisrunden, ebenen Einsenkwerkzeug hergestellt.

$$F \cdot t = \frac{3\pi}{4} \cdot \eta \cdot R_{Wz}^{4} \cdot \left(\frac{1}{s(t)^2} - \frac{1}{s_0^2} \right)$$

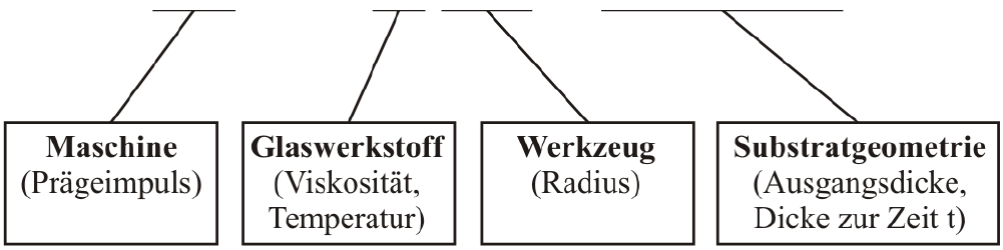


Abbildung 20: Zusammenhang der Prozessparameter beim Heißprägen

Die Glasviskosität steht danach in linearem Zusammenhang zur Prägezeit bei konstanten geometrischen Parametern und konstanter Presskraft. Die Glasbeschichtung erlaubt ein prozesssicheres Heißprägen bei deutlich höheren

Temperaturen als bei der Verwendung unbeschichteter Gläser. Die verringerten Haftkräfte und Klebeerscheinungen ermöglichten in den experimentellen Untersuchungen eine Absenkung der Viskosität um eine bis eineinhalb Größenordnungen von $10^{9.5}$ dPas für unbeschichtetes Glas auf 10^{8} dPas für beschichtete Gläser. Bei gleicher Prägekraft und Geometrie ergibt sich daraus eine Reduzierung der reinen Prägezeit auf ein Zehntel und darunter. Statt einer Prägezeit von 150 s für die Strukturabformung in einen unbeschichteten Glaswafer ist nur noch eine Prägezeit von 10-15 s notwendig.

Die Kosten der Glasbeschichtung fallen dabei in der Serienproduktion kaum ins Gewicht. Flachglas wird heute bereits kommerziell mit nutzbaren Beschichtungen von Floatglasherstellern angeboten. Selbst bei Kleinmengenabnahme wird ein Preis von 15 € pro Quadratmeter für das beschichtete Glas kalkuliert, was für mikrostrukturierte Glasbauteile kaum ins Gewicht fällt. Damit stellt die Anwendung der Glasbeschichtung beim Heißprägen ein deutliches Kostensenkungspotential dar.

3.4.3 Experimentelle Verifikation

Die im Vorhaben entwickelte Methodik sollte an einem Anwendungsbeispiel (Glasplatine mit beispielhaften Sensorikelementen) experimentell verifiziert werden. Dazu wurden zwei Heißprägewerkzeuge eingesetzt und in Glasproben mit der als optimal ermittelten Beschichtung in einer kleinen Testserie heißgeprägt.

Ein Anwendungsbeispiel ist ein Mikrolinsenarray, welches in der Optik zur Strahlhomogenisierung eingesetzt wird. Es handelte sich dabei um ein Testwerkzeug aus 400 Mikrolinsen mit Einzellinsenabmessungen von 400 x 700 Mikrometern mit einer Pfeilhöhe von 65 Mikrometern und einem Krümmungsradius der Linsen von 1,3 mm (Abbildung 21 links). Diese Anwendung zeichnet sich durch eine moderate Umformung des Glases aus, d.h. es ist ein relativ geringes Aspektverhältnis abzuformen. Gleichzeitig stellt die Arraystruktur jedoch hohe Ansprüche an die Gleichmäßigkeit der Formfüllung über die gesamte Prägefläche und an die Oberflächenqualität. Eine größere Dehnung erfährt die Glasbeschichtung im zweiten Anwendungsbeispiel, einer Doppellinsensensorstruktur für einen optischen Entfernungssensor. Dieser besteht aus einer Asphäre vom Durchmesser 3 mm sowie einer daneben liegenden Sphäre vom Durchmesser 1 mm (Abbildung 21 rechts). Die Asphäre hat eine Pfeilhöhe von 800 Mikrometern. Auch hier werden natürlich hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität gestellt (vgl. Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

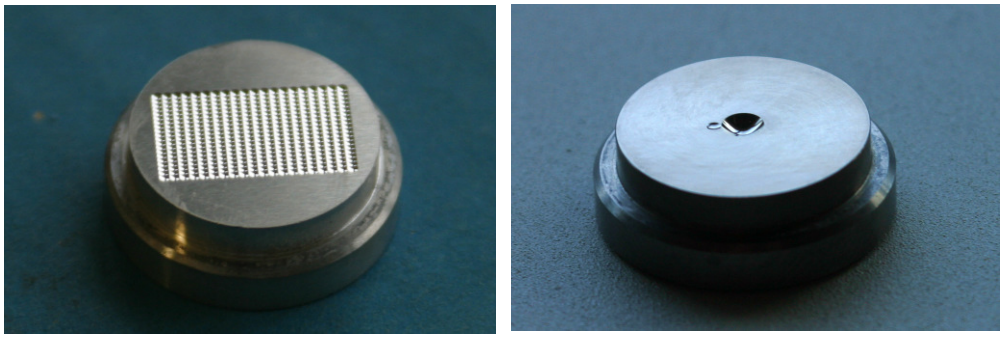


Abbildung 21: Prägewerkzeug Mikrolinsenarray (links) und Doppellinsensensor (rechts)

Das Heißprägen in kleiner Testserie wurde in Kalk-Natron-Glas mit Pyrosilbeschichtung von 30 nm Schichtdicke durchgeführt und die Proben anschließend zur optischen

Vermessung und Bewertung am Otto-Schott-Institut sowie extern am Max-Born-Institut, Berlin untersucht. Das Heißprägen war unter den im Projekt abgeleiteten optimalen Prozessbedingungen problemlos möglich, es traten keine Haft- oder Klebeerscheinungen auf. Auch die Formausfüllung der Strukturen bereitete keine Probleme. Zur Bewertung des Einflusses der Beschichtung auf das Anwendungsbauteil wurden auch Vergleichsprägungen in unbeschichtetes Glas vorgenommen, wobei die Prozessbedingungen so gewählt wurden, dass auch dabei nur geringe Haftkräfte auftraten. Exemplarisch sind ein Linsenarray sowie ein Doppellinsensensorelement in Abbildung 22 dargestellt.

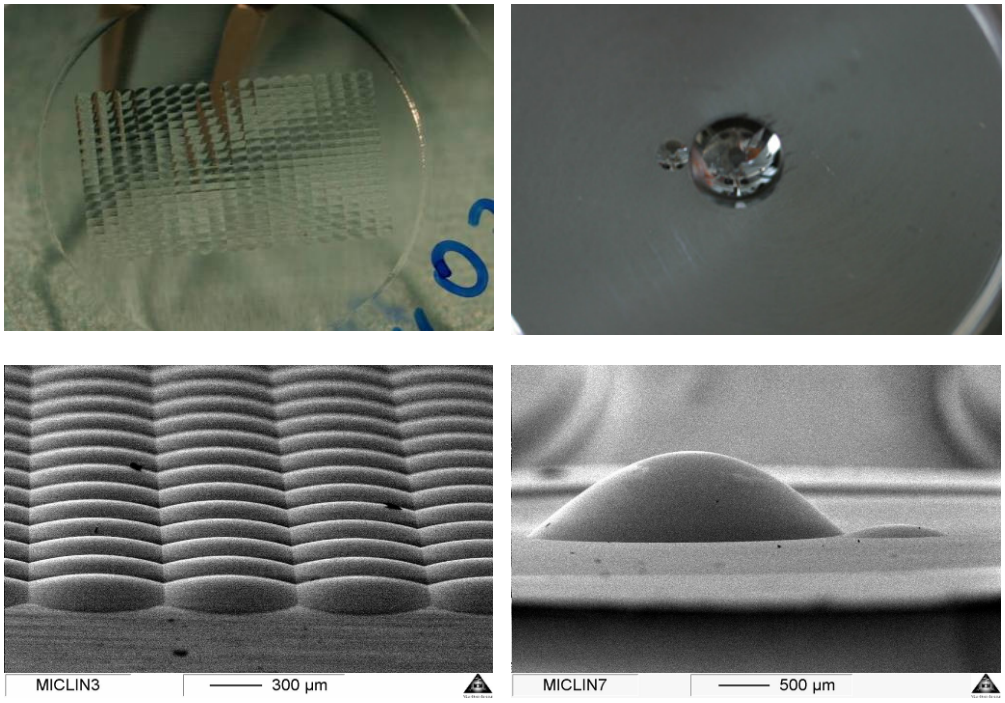


Abbildung 22: Mikrolinsenarray (links) und Doppellinse (rechts) in der Übersicht (oben) und einer Detailaufnahme (unten)

In Tabelle 11 sind zusammengefasst die mittels Weißlichtinterferometer bestimmten Krümmungsradien und die Rauheiten von den geprägten Strukturen, mit und ohne Beschichtung, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Beschichtung keinen Einfluss auf die gemessenen Rauheiten und Krümmungsradien hat.

Tabelle 11: Krümmungsradius und Rauheit der geprägten Strukturen mit und ohne Beschichtung

Probe	Krümmungs-radius (mm)	Rauheit rms (nm)	Bemerkungen
Array Pyrosil beschichtet	1,3	30 ±10	Linsen im Randbereich
Array Pyrosil beschichtet		50 ±10	Linsen in der Mitte
Array unbeschichtet	1,3	25 ±10	Linsen im Randbereich
Array unbeschichtet		60 ±20	Linsen in der Mitte
LensPlate Pyrosil beschichtet	1,37 ±2	67 ±10	in der Mitte gemessen
LensPlate Pyrosil beschichtet	1,24 ±1	87 ±20	in der Mitte gemessen
LensPlate unbeschichtet	1,47 ±2	73 ±20	in der Mitte gemessen
LensPlate unbeschichtet	1,24 ±1	80 ±30	in der Mitte gemessen

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben wurde weitestgehend entsprechend des Arbeits-, Zeit- und Kostenplans durchgeführt. Die benötigten und eingesetzten Mittel sind im Ergebnisteil in Kapitel 3 jeweils am Beginn der Arbeitspakete dargestellt.

Zur geplanten Investition in ein Massenspektrometer wurde eine beschränkte Ausschreibung gemäß Einkaufrichtlinien der Fraunhofer-Gesellschaft durchgeführt. Dazu wurden neun potentielle Anbieter angeschrieben. Da die beiden eingegangenen Angebote der Firmen Pfeiffer Vacuum GmbH und MKS Instruments Deutschland GmbH technisch vergleichbar waren, haben wir uns für die Vergabe des Auftrags an den günstigsten Bieter, Fa. Pfeiffer Vacuum GmbH entschieden.

5
Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabelle 12: Konkrete Beschreibung der bereits durchgeführten Transfermaßnahmen (mit Zeitangaben)

Zeit	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
März 2010	Fachvortrag auf EFDS Workshop »Innovative Verfahren zur Glasoberflächenmodifikation«	Vorstellung der wissenschaftlichen Zielstellungen und Nutzen für die Industrie, Darstellung des Nutzens für die Solarindustrie
April 2010	Journal-Veröffentlichung (reviewed) Microsystem Technologies Vol 16 Issue 4	Micro structuring of inorganic glass by hot embossing of coated glass wafers
Mai 2010	Dissertation C. Worsch »Untersuchung beschichteter Gläser für die Heißformgebung«	Wissenschaftliche Qualifikation des Bearbeiters des FV zur Glasbeschichtung und -charakterisierung
Juni 2010	Konferenzteilnahme euspen International Conference – Delft	Embossing of double-sided micro lens arrays in optical glass
2010/11	Veröffentlichung im Jahresbericht der HVG/DGG	Vorstellung des Forschungsvorhabens
März 2011	Vortrag vor dem Fachausschusses I "Physik und Chemie des Glases" der HVG/DGG	Vorstellung Ergebnisse zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen zur Mikrostrukturierung von Glas
Juni 2011	Vortrag zur 85. Glastechnische Tagung der DGG »Heißprägen beschichteter Gläser – Entwicklung einer Methodik zur Bewertung des Schichtverhaltens und dessen Optimierung«	Vorstellung Ergebnisse zum Bewerten und Optimieren der Schichten bei der Mikrostrukturierung von Glas
Juli 2011	Journal-Veröffentlichung (reviewed) Microsystem Technologies Vol 17 Issue 8	Determination of adhesive forces and sticking temperature of coated glasses for the hot-embossingprocess
Februar 2012	Beratung des projektbegleitenden Ausschusses	Ergebnisbericht, Diskussion, Abstimmung weiterer Transfermaßnahmen
März 2012	Thin Solid Films (reviewed)	Optical Properties of Self Assembled Oriented Island Evolution of Ultra-Thin Gold Layers
2012	Applied Surface Sciene (reviewed) submitted on 19.10.2011	Gold Nano Particles Fixed on Glass
2012	Informationsblatt	Übersicht über das Forschungsgebiet und die Ergebnisse der Arbeiten sowie des industriellen Nutzens

Tabelle 13: Konkrete Beschreibung der noch geplanten Transfermaßnahmen

Zeitraum	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
fortlaufend	gezielte Ansprache von Unternehmen im Direktkontakt sowie auf Messen, Workshops und Konferenzen	Vorstellung der Vorteile des Lösungsansatzes, Darstellung der fertigungstechnischen Möglichkeiten
2012	Studien- und Abschlussarbeiten zur Problematik des FV	Kennenlernen und Vermitteln von wiss. Erkenntnissen und Methoden, Heranführen an selbständiges wiss. Arbeiten
2012	Dissertation J. Edelmann »Mikrostrukturierung von Flachglas durch Heißprägen«	Wissenschaftliche Qualifikation des Bearbeiters des FV zur Mikrostrukturierung durch Abformtechnologien
März 2012	Abschlussbericht	Zusammenstellung der Ergebnisse und Ausblick zur industriellen Nutzung
2012	Veröffentlichung in Zeitschrift »Vakuum in Forschung und Praxis« gemäß Vereinbarung der EFDS mit Wiley-VCH	Wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung der Anwendung (deutschsprachig)
Juni 2012	Tagung, Konferenz euspen 2012	Ergebnisvortrag (Glastechnologie, Beschichtungstechnik und MST)
2012 ff.	Akademische Ausbildung	Wissens- und Technologietransfer durch Verbreitung in der Lehre der FSU Jena und TU-Chemnitz

6 Zusammenfassung

Der wirtschaftlichen und prozesssicheren Herstellung von sensorischen Bauelementen auf Glasbasis, welche der Forderung nach langzeitstabiler, kompakter und kostengünstiger Sensorik gerecht wird, sind durch die Möglichkeiten der bestehenden Fertigungstechnologien Grenzen gesetzt, welche mit einer neuartigen Beschichtungsstrategie umgangen werden. Das Forschungsvorhaben hat die neu entwickelte Beschichtungstechnologie zur Trennung von Werkzeug und Glas im Heißprägeprozess für die wirtschaftliche Herstellung von Sensorkomponenten qualifiziert. Dazu wurde untersucht, welchen Einfluss die Schichtdicke bzw. -struktur auf die zu prägenden Strukturen haben und welche Mindestschichtdicke für die Wirksamkeit der einzelnen Schichten besteht.

Das Ziel der Arbeiten bestand darin, aus der Forderung nach einer maximal dehnbaren und gleichzeitig haftmindernd wirksamen Schichtdicke das Optimum für Sensorstrukturen der Mikrooptik und Mikrofluidik zu finden, um Sensorsysteme auf Glasbasis wirtschaftlich und prozesssicher herzustellen.

Durch die Beschichtung der Glassubstrate wurde bei allen untersuchten Beschichtungen eine Verschiebung der kritischen Klebeneigung bis nahe an den Erweichungspunkt des Glases erfasst. Weiterhin wurde beobachtet, dass bis zum Erreichen dieser Viskosität Haftkräfte auftraten, welche einer Größenordnung von maximal 10 % unbeschichteter Substrate entsprachen. In einem bestimmten Bereich sind dabei alle Beschichtungen duktil. Jedoch zeigt sich bei größeren Deformationsgraden Schichtversagen in Form von Rissen, was allerdings nicht notwendigerweise zu einer Beeinträchtigung des Formungsprozesses führt.

Die Experimente zur Optimierung der Schichtdicke bestätigten die Vermutung, dass die Schichten auf dem Glassubstrat umso dehnbarer sind, je dünner sie werden. Andererseits muss natürlich die haftmindernde Wirkung gewährleistet bleiben. Vergleichende Untersuchungen zur Werkzeugbeschichtung haben gezeigt, dass diese nicht zu einer Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit bei der Mikrostrukturierung von Glas durch Heißprägen beitragen kann, sondern lediglich das Verschleißverhalten der Werkzeuge in der klassischen Glasformgebung verbessert.

Die Beschichtung des Glases ermöglicht dagegen ein Heißprägen mit hohen Scherraten bei niedrigen Viskositäten. Dies wirkt sich positiv auf die Abformgenauigkeit sowie die Zykluszeit für das Heißprägen aus. Außerdem werden schädliche Eigenspannungen im Glas während der Abformung reduziert. Es hat sich gezeigt, dass sowohl metallische und oxidische als auch Kohlenstoffschichten zur Verringerung der Haft- und Klebeneigung geeignet sind. Je nach Anwendungsfall wird zu entscheiden sein, welche Beschichtungsart zu bevorzugen ist. Die besonders glasähnlichen oxidischen Schichten, wie die untersuchten Pyrosilschichten, eignen sich sowohl in optischen und fluidischen Anwendungen, sofern nicht eine rückstandsfreie Entfernung nach dem Heißprägen gefordert ist. Der optimale Schichtdickenbereich liegt zwischen 20 nm und 30 nm. Dickere Schichten weisen eine geringere Dehnbarkeit auf und dünnere Schichten vermindern die Haftkräfte nicht mehr wirkungsvoll. Eine Kohlenstoffschicht lässt sich durch Oxidation besonders einfach entfernen. Dünne Edelmetallschichten zerfallen während des Prägeprozesses in Nanopartikel. Hierdurch ergeben sich völlig neue Anwendungsgebiete auf dem Feld der Sensorik. Auch eine Kombination von metallischer und oxidischer Schicht ist möglich, um die Stabilität der Nanopartikelschichten zu erhöhen. Das Bonden der beschichten Gläser ist möglich. Die neue Beschichtungsstrategie ermöglicht die Strukturierung von Gläsern mit hoher

Klebeneigung und erweitert die Palette einsetzbarer Werkzeugwerkstoffe. Das Heißprägen beschichteter Gläser ermöglicht damit die Abformung komplexer Geometrien zur großflächigen Mikrostrukturierung anorganischer Gläser.

Die Kostenbetrachtung hat verdeutlicht, dass es sich bei dem untersuchten Fertigungsprozess um ein Verfahren für die Massenfertigung handelt. Wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar wird das Verfahren bei den dargestellten Beispielen erst ab Stückzahlen von etwa 1.000 - 10.000 Einzelteilen. Jedoch ist die Fertigungstechnologie auch für geringere Serien wirtschaftlich relevant, wenn sich die Bauteile durch alternative Fertigungsverfahren nicht in dieser Qualität herstellen lassen.

Damit wurde das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht und die neue Beschichtungsstrategie für die Herstellung von Sensorkomponenten qualifiziert. Von den Ergebnissen profitieren Glashersteller, die Unternehmen der Oberflächen- und Beschichtungstechnik, der glasverarbeitenden Industrie sowie Anlagenbauer, da ihnen die untersuchte Prozesstechnologie einen neuen Markt erschließt bzw. den bestehenden erweitert. Ebenso können die Anwender der Technologie, welche Sensorsysteme der Mikrooptik und Mikrofluidik sowie Speziallösungen für Mikrosysteme anbieten, aufwändige und teure Prozessschritte ersetzen und durch die Technologie den Massenmarkt für ihre Applikationen erschließen.

Das Forschungsvorhaben 16436 BR der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. wurde im Programm zur Förderung der 'Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)' vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert.