

Schepers GmbH & Co. KG

## **Alternativer Einsatz von verschleißfesten, umweltfreundlichen Kunststoffschichten für den Tiefdruck**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 27275 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

von

den Verfassern:

Dipl.-Ing. (M.Sc.) Stephan Brüning  
Schepers GmbH & Co. KG/Vreden  
[www.schepers-digilas.de](http://www.schepers-digilas.de)



Prof. Dr. Klaus Dickmann  
Lasierzentrum FH Münster/Steinfurt  
[www.lfm-online.de](http://www.lfm-online.de)



Oktober 2011

Schepers GmbH & Co. KG

## **Alternativer Einsatz von verschleißfesten, umweltfreundlichen Kunststoffschichten für den Tiefdruck**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 27275 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

von

den Verfassern:

Dipl.-Ing. (M.Sc.) Stephan Brüning  
Schepers GmbH & Co. KG/Vreden  
[www.schepers-digilas.de](http://www.schepers-digilas.de)

The logo for Schepers GmbH & Co. KG, featuring the word "SCHEPERS" in a bold, blue, sans-serif font with a horizontal line through the middle of the letters.

Prof. Dr. Klaus Dickmann  
Lasierzentrum FH Münster/Steinfurt  
[www.lfm-online.de](http://www.lfm-online.de)

The logo for the Laserzentrum FH Münster, featuring the letters "LFM" in a stylized, blue, outlined font. Below the letters, the text "LASERZENTRUM" and "FH MÜNSTER" is written in a smaller, blue, sans-serif font.

Oktober 2011

# Projektkennblatt

der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	<b>27275</b>	Referat	<b>21/2</b>	Fördersumme	<b>118.000</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Alternativer Einsatz von verschleißfesten, umweltfreundlichen Kunststoffschichten für den Tiefdruck</b>				
<b>Stichworte</b>	Tiefdruck, Laserablation, Kunststoffschicht				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>14 Monate</b>	<b>04.01.2010</b>	<b>04.09.2011</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	12.08.2010				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Fa. Schepers GmbH & Co KG			Tel	02564-95050
	Karl-Benz Str. 7			Fax	02564-34563
	48691 Vreden			Projektleitung	Stephan Brüning, M.Sc.
				Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>	Laserzentrum FH Münster Stegerwaldstraße 39 48565 Steinfurt Tel.: 02551-962324 Telefax: 02551-962-490 E-Mail: laserlab@fh-muenster.de				

## ***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Mit dem Vorhaben sollte erreicht werden, dass durch eine gezielte Weiterentwicklung eines alternativen Tiefdruckzylinders die Direktstrukturierung mit geeigneten Laserstrahlquellen ökonomisch noch sinnvoller eingesetzt werden kann. Es sollte mit optimierten Laserstrahlquellen eine weitere Reduzierung der Produktionszeiten und –kosten erreicht und die Akzeptanz des Verfahrens verbessert werden. Die Oberfläche eines Tiefdruckzylinders ist hierzu mit einer Kunststoff-Schicht versehen worden. Die Zylinderoberfläche wurde anschließend mit dem Laser  $\mu\text{m}$ -genau strukturiert und so die eigentlichen Druckinformationen übertragen. Im Druckprozess sollte die Kunststoff-Schicht ähnliche tribologische- und farbübertragungs- Eigenschaften besitzen wie eine Metallschicht (z.B. Chrom- oder Nickelschicht).

## ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

In einem ersten Schritt wurde in Orientierungsversuchen der Schwerpunkt auf die Überprüfung schon entwickelter, d.h. vorhandener anorganisch-organischer Hybridmaterialien, gelegt. So erstellte Zylinder-Substrat-Proben (bzw. Flachproben) wurden hinsichtlich der Möglichkeit untersucht, mit cw-Lasern bei Wellenlängen von 1070nm und 535nm ablatieren zu können. Es wurden zunächst zwei Hybridmaterialien eingesetzt, die bei den verwendeten Laserwellenlängen ein hohes Absorptionsspektrum bieten sollten.

Eine bei der Fa. Schepers vorhandene DIGILAS Lasergravuranlage zur  $\mu\text{m}$ -Strukturierung von Zylinderoberflächen wurde für diese Untersuchung bereitgestellt. Die erstellten Zylinder-Substrate wurden anhand einer zuvor erstellten Untersuchungsmatrix (Variation von Laserenergie, Laserwellenlänge

1070nm und 535nm, Gravurauflösung und Pulslänge und -frequenz) mit der DIGILAS Anlage strukturiert und anschließend mit einem hoch aufgelösten Messmikroskop vermessen und analysiert. Nach Abschluss dieser Untersuchungen und einer Analyse wurden hierauf aufbauend dann die Materialoptimierungen durchgeführt und somit der nächste Schritt initiiert.

Die anorganisch-organischen Hybridmaterialien wurden hinsichtlich der Absorptionseigenschaften optimiert. Hierzu wurden zwei Absorber dem Hybridmaterial beigemischt (Dye, IR26 und Graphit KS26). Die erstellten Zylinder-Substrat-Proben wurden mit der zuvor angewendeten Untersuchungsmatrix strukturiert und wieder mit einem hoch aufgelösten Messmikroskop vermessen und analysiert.

Hierauf aufbauend wurde die Konzentration des Absorbers nochmals erhöht, um eine Absorption weiter zu steigern.

Die Zylinder wurden gemeinsam mit dem Projektpartner LFM mit unterschiedlichen Prozessparametern eines Singlemode cw-Faserlasers mit 100W nomineller Leistung bearbeitet. Am LFM erfolgte die Auswertung der eingebrachten Teststrukturen mittels Lichtmikroskop. Zur Auswertung wurden die Strukturen nicht direkt, sondern indirekt anhand von „Replika-Abdrücken“ der Strukturen analysiert.

In einem weiteren Schritt wurden die am Anfang erstellten Zylinder- und Flachsubstrate, mit einem bei der Fa. Schepers und am LFM vorhandenen ps-Laser-System strukturiert und analysiert.

Im letzten Schritt wurden handelsübliche CPL-Platten (CPL - Continuous Pressure Laminate) mit dem ps-Laser strukturiert. Die strukturierten Platten wurden in einem Flach-Andruckgerät gedruckt und das Ergebnis ausgewertet.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Zur Strukturierung der beschichteten Substrate wurde zunächst ein cw-Faserlaser eingesetzt. Die erste transparente Beschichtung zeigte keinerlei Wechselwirkung mit der Laserstrahlung. Die mit den Additiven (Dye IR26 und Graphit KS26) versetzte Beschichtung wies einen leicht erkennbaren, aber unbefriedigenden Abtrag auf. Durch eine weitere Steigerung des Graphit-Anteils in der Kunststoffschicht konnte ein definierter Abtrag erzielt werden. Allerdings hat ein zu hoher Kohlenstoffanteil dazu geführt, dass durch den notwendigen UV-Aushärtprozess des anorganisch-organischen Hybridmaterials starke Inhomogenitäten in der Schichtdicke entstanden sind. Hinzu kommt, dass die Haftung der Kunststoffschicht mit dem Aluminiumuntergrund nicht mehr ausreichend war. Zur Strukturierung der Oberfläche war allerdings eine signifikant geringere Laserleistung erforderlich (ca. 10%) im Vergleich zu den Proben mit einem geringeren Absorberanteil. Auf der nicht gravierten Oberfläche verblieb ein „weißes Pulver“ als Rückstand. Der Boden einer strukturierten Oberfläche war ebenfalls weiß.

Da eine gute Absorption und eine für Druckprozesse akzeptable Oberfläche mit cw-Lasern nicht möglich war, wurde in einem weiteren Schritt ein Ultrakurzpuls-Laser zur Strukturierung der Oberfläche verwendet. Als Basis dienten die zuerst hergestellten Zylindersubstrate ohne Absorber. Mit einem Ultrakurzpuls-Laser können sehr kurze Pulse mit sehr hoher Intensität verwendet werden, um Materialien unabhängig vom Absorptionskoeffizienten zu strukturieren. Die Auflösung konnte gegenüber den mit dem cw-Laser strukturierten Substraten um Faktor 2-3 gesteigert werden.

Abschließend wurde das aus der Laminatherstellung (Fußbodenlaminat) bekannte Harz CPL (Continuous Pressure Laminate) verwendet. In die Oberfläche der hergestellten (transparenten) Laminatplatten, mit dem Maß 800x800mm<sup>2</sup>, wurde mit dem Ultrakurzpuls-Laser ein für Tiefdruckanwendungen bekanntes Test- und Dekormuster mit einem 70 L/cm Raster strukturiert. Die erstellte Testdruckform wurde in einem Andruckgerät mehrfach gedruckt. Auffällig war, dass sich die Druckform nach dem Druckprozess nur sehr schwer reinigen ließ. Es verblieb immer noch Farbe in den Nöpfchen. Nach

etwa vier Andrucken quoll die Druckplatte und wurde leicht wellig. Es konnte aber ein akzeptables Druckergebnis mit einer vergleichsweise hohen Auflösung erzielt werden.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

x

### **Fazit**

Es konnte in diesem Projekt der gesamte Tiefdruck-Prozessablauf mit Verwendung einer Kunststoffschicht aufgezeigt werden. Von dem Aufbringen der Kunststoffschicht auf den Zylinder, über die Strukturierung für den Tiefdruckprozess bis hin zum eigentlichen Druck. Es wurde deutlich, dass für die Entwicklung der Kunststoffschicht und die Zylinderbeschichtung noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig ist, der innerhalb dieses Projektes nicht geleistet werden konnte. Die Verwendung von Ultrakurzpuls-Lasern erlaubt eine nahezu materialunabhängige Strukturierung. Dieser gewonnene Freiheitsgrad kann zukünftig zur Optimierung der Kunststoffschicht für den Beschichtungs- bzw. Druckprozess ausgenutzt werden.

## Inhaltsverzeichnis

Titelblatt.....	1
Projektkennblatt.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	5
Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen.....	6
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....	8
Zusammenfassung.....	9
1. Einleitung.....	10
2. Eingesetzte Lasertechnik.....	13
3. Verwendete Kunststoffbeschichtungen.....	16
3.1 ORMOCER® .....	16
3.2 Melaminharz.....	19
4. Messtechnik zur Qualitätsanalyse.....	19
5. Durchführung der Mikrostrukturierung an ORMOCER® und Zwischen- ergebnisse.....	21
5.1 Mikrostrukturierung mit Faserlasern.....	21
5.2 Mikrostrukturierung mit ps-Lasern.....	23
6. Durchführung der Mikrostrukturierung an Melaminharz- Beschichtungen mittels ps-Laser.....	28
7. Fazit.....	35
8. Literaturverzeichnis.....	36

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

### Abbildungen

- Abb. 01: DIGILAS-Laseranlage zur Mikrogravur von Druckwalzen mit geöffneter Maschinenabdeckung. Die Anlage ist auf einem stabilen, vibrationsfreien Granitbett angeordnet.[Quelle: Schepers GmbH & Co. KG].....S. 10
- Abb. 02: Mikroskopaufnahme von Tiefdruckrasterzellen mit Schriftanteil.....S. 11
- Abb. 03: Herkömmlicher Tiefdruckzylinder mit Chrombeschichtung angeordnet innerhalb der DIGILAS-Lasergravuranlage (Schepers GmbH & Co. KG).....S. 12
- Abb. 04: DIGILAS Gravur-System (Typ 2900), mit integriertem Faserlaser beim Antragsteller Fa. Schepers/Vreden..... S. 15
- Abb. 05: Aufgebaute Versuchsanlage mit integriertem Laser zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen zur Laser-Direktgravur (Fa. Schepers GmbH & Co. KG/Vreden)..... S. 15
- Abb. 06: Pikosekunden-Laser Typ „TruMicro 5050“ mit Bearbeitungskammer beim Projektpartner Laserzentrum (LFM)..... S. 16
- Abb. 07: Mit ORMOCER<sup>®</sup> beschichtete Zylinderrohlinge  
Links: beschichteter Zylinderrohling; rechts: beschichteter Zylinderrohling mit Aufspindelung.....S. 18
- Abb. 08: ORMOCER<sup>®</sup>-Beschichtung mit erhöhtem Graphitanteil (Typ h100617/03) auf Zylinderrohling (rechts: vergrößerter Detailausschnitt zeigt erste Strukturierungsergebnisse).....S. 19
- Abb. 09: Replika-Abdrücke von Laser-Mikrostrukturen in ORMOCER<sup>®</sup> werden zur Qualitätsanalyse verwendet.....S. 20
- Abb. 10: Abtragsuntersuchungen an ORMOCER<sup>®</sup> mittels ps-Laser.....S. 24
- Abb. 11: Kontinuierlicher, spiralförmiger Abtragsprozess durch synchronisierten axialen Vorschub zur Rotation.....S. 24
- Abb. 12: Digitaler Datenbestand wird Pixel für Pixel auf das Substrat übertragen.....S. 24
- Abb. 13: Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER (Rautenform #1: Auflösung 60L/cm; Kantenlänge: 167 µm.....S. 25
- Abb. 14: Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER<sup>®</sup> (Rautenform #2: Auflösung 90L/cm; Kantenlänge: 111 µm.....S. 25
- Abb. 15: Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER<sup>®</sup> (Rautenform #3: Auflösung 100L/cm; Kantenlänge: 100 µm.....S. 26
- Abb. 16: Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER<sup>®</sup> (Rautenform #4: Auflösung 120L/cm; Kantenlänge: 83 µm.....S. 26

Abb. 17:	Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER® (Rautenform #5: Auflösung 140L/cm; Kantenlänge: 71 µm.....	S. 27
Abb. 18:	Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER® (Rautenform #6: Auflösung 160L/cm; Kantenlänge: 63 µm.....	S. 27
Abb. 19:	Mit ps-Laser in Kombination mit DIGILAS-Gravuranlage in Melaminharz eingebrachte Teststrukturen (die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Flächendeckung im Druck, d.h. Zellöffnung).....	S. 29
Abb. 20:	Mittels ps-Laser und DIGILAS-Gravuranlage in Melaminharz eingebrachte Strukturierung aus der Praxis.....	S. 31
Abb. 21:	Kalibrierdruck mit Referenzdruckform.....	S. 31
Abb. 22:	Typ. Druck aus der Verpackungsindustrie, 6. Ausdruck.....	S. 32
Abb. 23:	Typ. Druck aus der Verpackungsindustrie, 7. Ausdruck.....	S. 32
Abb. 24:	Typ. Dekor-Druck, Holzlaminat, 8. Ausdruck.....	S. 33
Abb. 25:	Typ. Dekor-Druck, Holzlaminat, 9. Ausdruck.....	S. 33
Abb. 26:	Typ. Dekor-Druck, Holzlaminat, 10. Ausdruck.....	S. 34
Abb. 27:	Typ. Druck aus der Verpackungsindustrie, 10. Ausdruck.....	S. 34

## **Tabellen**

Tab. 01:	In diesem Forschungsvorhaben eingesetzte Laserquellen.....	S. 14
Tab. 02:	Prozessparameter für Abtragsuntersuchungen mit ps-Laser an ORMOCER®-Beschichtungen auf ebenen Substraten (Projektpartner LFM)...	S. 23



## Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

### Begriffe

CPL: Continuous Pressure Laminat

UKP: Ultra-Kurz-Puls

LFM: Laserzentrum FH Münster

ISC: Fraunhofer-Institut für Silicatforschung

### Abkürzungen

$\lambda$  = Wellenlänge

$P_L$  = Mittlere Leistung

$E_{p,max}$  = Maximale Pulsenergie

$F_{max}$  = Maximale Fluenz

$t_p$  = Pulsdauer

$f_{p,max}$  = Maximale Pulsfrequenz

$M^2$  = Strahlqualität

$F$  = Brennweite der Scanoptik

$d_0$  = Fokusbereich

$z_R$  = Rayleighlänge nach Optik

## Zusammenfassung

Eine ökonomische Laser-Mikrostrukturierung von Tiefdruckzylindern ist eine Herausforderung in der industriellen Fertigung. In diesem Projekt wurde das übliche Kupfer-Chrom- Schichtsystem durch eine Kunststoffschicht ersetzt. Um bei relativ großen Zylinderoberflächen (Länge bis zu 7 m bei Durchmessern bis zu 600 mm) Mikrostrukturierungen mit kleinen Prozesszeiten durchführen zu können, wurden verschiedene Laserstrahlquellen untersucht. Neben den Prozesszeiten wurde auch untersucht, inwieweit sich ein IR-Laser, der in der verwendeten Schicht kaum absorbiert wird, sich zur Mikrostrukturierung der Kunststoffschicht einsetzen lässt. Abschließend wurden die strukturierten Zylinder in einem Druckprozess angewendet.

Zur Strukturierung der beschichteten Substrate (Zylinder) wurde zunächst ein cw-Faserlaser eingesetzt. Die erste transparente Beschichtung zeigte keinerlei Wechselwirkung mit der Laserstrahlung. Die mit den Additiven (Dye IR26 und Graphit KS26) versetzte Beschichtung wies einen leicht erkennbaren, aber unbefriedigenden Abtrag auf. Durch eine weitere Steigerung des Graphit-Anteils in der Kunststoffschicht konnte ein definierter Abtrag erzielt werden. Allerdings hat ein zu hoher Kohlenstoffanteil dazu geführt, dass durch den notwendigen UV-Aushärteprozess des anorganisch-organischen Hybridmaterials starke Inhomogenitäten in der Schichtdicke entstanden sind. Hinzu kommt, dass die Haftung der Kunststoffschicht mit dem Aluminiumuntergrund nicht mehr ausreichend war. Zur Strukturierung der Oberfläche war allerdings eine signifikant geringere Laserleistung erforderlich (ca. 10 %) im Vergleich zur Phase 1. Auf der nicht gravierten Oberfläche verbleibt ein „weißes Pulver“ als Rückstand. Der Boden einer strukturierten Oberfläche war ebenfalls weiß.

Da eine gute Absorption und eine für Druckprozesse akzeptable Oberfläche mit den anorganisch-organischen Hybridmaterialien in Verbindung mit cw-Lasern nicht möglich war, wurde in einem weiteren Schritt ein Ultrakurzpuls-Laser zur Strukturierung der Oberfläche verwendet. Als Basis dienten die ersten hergestellten Zylindersubstrate ohne Additiv. Mit einem Ultrakurzpuls-Laser können sehr kurze Pulse mit sehr hoher Intensität verwendet werden, um Materialien unabhängig vom Absorptionskoeffizienten zu strukturieren. Die Auflösung konnte gegenüber der mit dem cw-Laser strukturierten Substraten um Faktor 2 - 3 gesteigert werden.

Abschließend wurde das aus der Laminatherstellung (Fußbodenlaminat) bekannte Harz CPL (Continuous Pressure Laminate) verwendet. In die Oberfläche der hergestellten (transparenten) Laminateplatten mit dem Maß 800 x 800 mm<sup>2</sup> wurden mit dem Ultrakurzpuls-Laser ein für Tiefdruckanwendungen bekanntes Test- und Dekormuster mit einem 70 L/cm-Raster strukturiert. Die erstellte Testdruckform wurde in einem Andruckgerät mehrfach gedruckt. Auffällig war, dass sich die Druckform nach dem Druckprozess nur sehr schwer reinigen lässt. Es verbleibt immer noch Farbe in den Nöpfchen. Nach etwa vier Andrucken quillt die Druckplatte und wird leicht wellig. Es konnte aber ein akzeptables Druckergebnis erzielt werden.

Es konnte in diesem Projekt der gesamte Tiefdruck-Prozessablauf mit Verwendung einer Kunststoffschicht aufgezeigt werden: Von dem Aufbringen der Kunststoffschicht auf den Zylinder über die Strukturierung für den Tiefdruckprozess bis hin zum eigentlichen Druck. Es wurde deutlich, dass für die Entwicklung der Kunststoffschicht und die Zylinderbeschichtung noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig ist, der innerhalb dieses Projektes nicht geleistet werden konnte. Die Verwendung von Ultrakurzpuls-Lasern erlaubt eine nahezu materialunabhängige Strukturierung. Dieser gewonnene Freiheitsgrad kann zukünftig zur Optimierung der Kunststoffschicht für den Beschichtungs- bzw. Druckprozess genutzt werden.

## 1. Einleitung

In einem interdisziplinären Verbund, bestehend aus dem Unternehmen Schepers GmbH & Co. KG und dem Laserzentrum der FH Münster (LFM) sowie dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) als Unterauftragnehmer soll untersucht werden, inwieweit eine innovative, verschleißfeste Kunststoffbeschichtung für die Direktstrukturierung von Tiefdruckzylindern im Gegensatz zu den üblichen umweltbelastenden und aufwendig herstellbaren Chromschichten geeignet ist. Bisherige Chromschichten auf Tiefdruckwalzen sind in ihrer Herstellung energieintensiv, zeitaufwendig, umweltbelastend und nur in mehreren Verfahrensschritten zu fertigen. Die Beschichtung von Kunststofflayern auf Druckwalzen ist wesentlich unproblematischer und umweltschonender aufzubringen. In Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC)/Würzburg sollen dazu Druckwalzen mit einem haft- und verschleißfesten ORMOCER<sup>®</sup>-Layer beschichtet werden. Die Variation der Materialeigenschaften wird dabei durch den Einbau eines anorganischen Netzwerkes in polymere Strukturen erreicht.

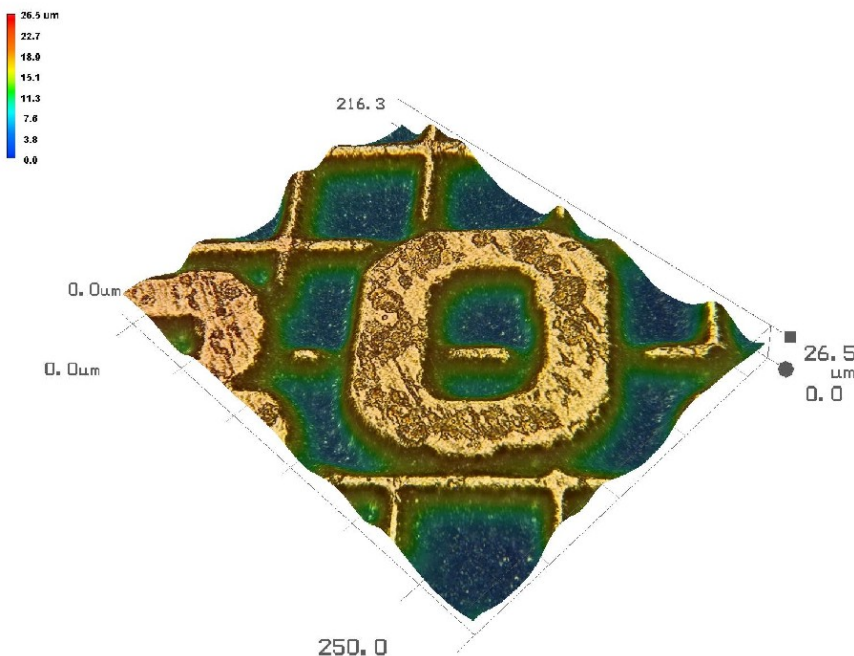


**Abb. 1:** DIGILAS-Laseranlage zur Mikrogravur von Druckwalzen mit geöffneter Maschinenabdeckung. Die Anlage ist auf einem stabilen, vibrationsfreien Granitbett angeordnet. [Quelle: Schepers GmbH & Co. KG].

Die beschichteten Druckwalzen sollen mittels Laser strukturiert werden. Dafür steht beim Antragsteller Schepers GmbH & Co. KG eine Lasergravuranlage (Typ DIGILAS, Abb. 1) zur Verfügung, mit der die Direktgravur mittels Faserlaser unter industriellen Bedingungen durchgeführt werden kann. Parallel dazu werden beim Projektpartner Laserzentrum FH

Münster (LFM) begleitende Forschungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, den Gravurprozess zu optimieren. Dazu werden zahlreiche Prozessgrößen, wie bspw. Linsen-Brennweite, Fokusslage, Modulation, Pulsdauer, Pulsleistung und evtl. Zusatzgas variiert. Eine umfangreiche Auswertung und Analyse zur Beurteilung der Ergebnisse soll daraufhin mikroskopisch erfolgen. Nach den ersten Untersuchungen ist in einem zweiten Schritt ein Hinzufügen von zusätzlichen Additiven zur Optimierung der Absorptionseigenschaften der ORMOCER®-Schicht und Anpassung an die Laserwellenlänge des verwendeten Lasers vorgesehen. ORMOCER® nimmt in diesem Vorhaben zur Beschichtung eine bedeutende Position ein, es sollen jedoch gegebenenfalls auch weitere vergleichbare Kunststoffbeschichtungen auf deren Eignung untersucht werden (bspw. Melamin-Harz).

Auf Tiefdruckzylindern werden die zu druckenden Informationen heute mittels Gravur, Ätzung oder bereits mittels Laser direkt übertragen [HB04]. Im Tiefdruck besteht die Druckform aus einem Stahlzylinder mit einer Kupferbeschichtung. In die Kupferschicht wird das Druckbild als tief gelegene Näpfchen mit eingraviert. In der Regel wird die gravierte Oberfläche verchromt, so dass der Druckzylinder eine höhere Haltbarkeit bekommt. Die Tiefe der Näpfchen kann ebenso variieren wie ihre Breite, wodurch echte Halbtöne und haptisch wahrnehmbare Unterschiede (Banknotendruck) möglich sind. Die Näpfchentiefe variiert je nach gewünschtem Tonwert und damit gewünschter Farbmenge. Je kleiner die laterale Näpfchenstruktur auf der Walzenoberfläche, desto höher ist die erzielbare Auflösung beim Druckvorgang (Abb. 2). Zwischen den Näpfchen liegen die Stege. Auf ihnen gleitet das



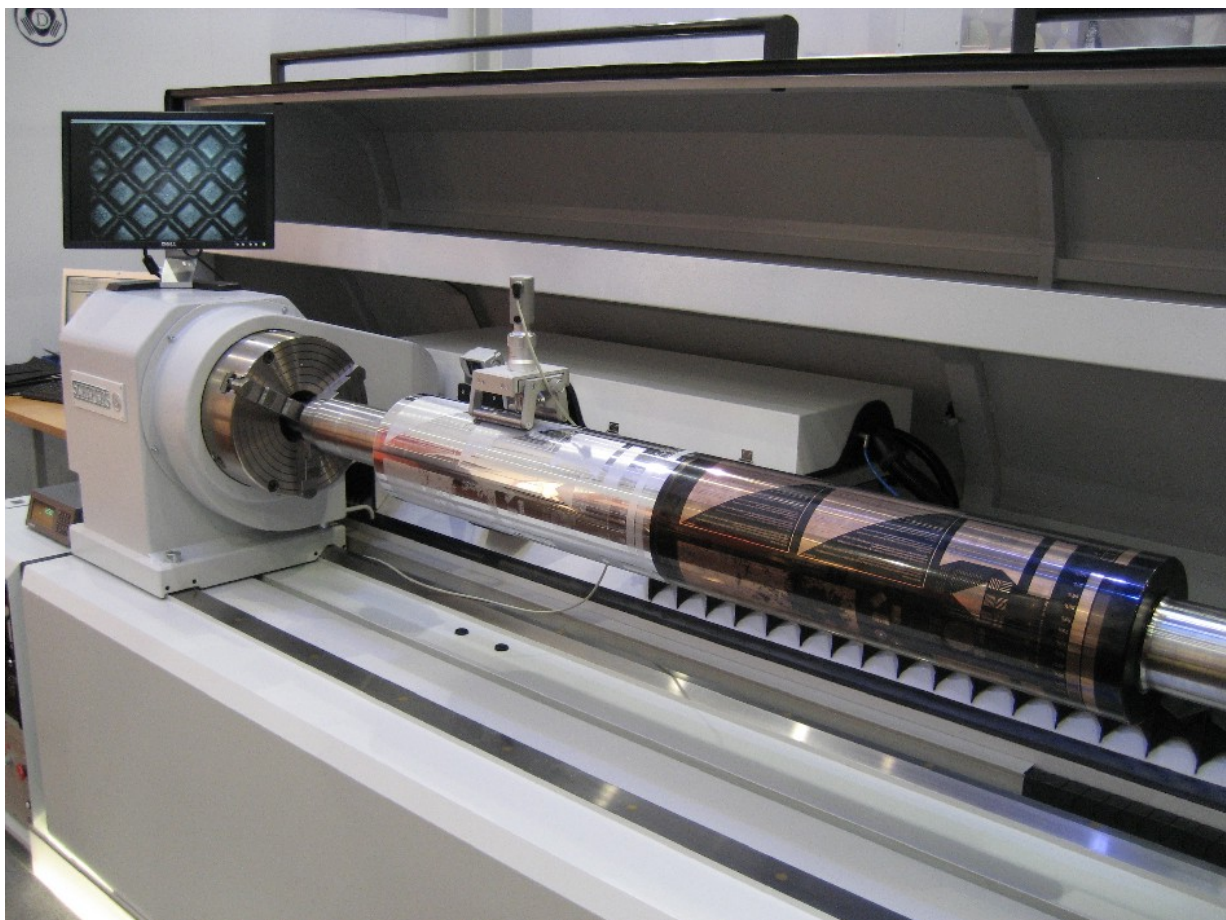
Rakel entlang und hält sie durch Abrakeln farbfrei. Die dünnflüssige Farbe wird im Farbbad in die Näpfchen des sich drehenden Zylinders gedrückt. Anschließend wird das zu bedruckende Material mit hohem Druck auf die Druckform gepresst, damit eine Farbübertragung erreicht werden kann.

**Abb. 2:** Mikroskopaufnahme von Tiefdruckrasterzellen mit Schriftanteil

Der Tiefdruck zeichnet sich vor allem durch eine hohe Druckqualität und Halbtonabbildungen aus.

Ein Tiefdruckzylinder (Abb. 3) besteht im Allgemeinen aus einem Stahlkern, der in einem elektrolytischen Bad zuerst mit Kupfer und nach dem Einbringen der Bilddaten mit Chrom beschichtet wird (galvanische Bearbeitung des Tiefdruckzylinders). Dabei besteht eine galvanische Produktionslinie grundsätzlich aus mehreren zeit- und energieintensiven Verfahrensschritten wie dem Entfettungs-, Kupfer-, Chrom-, Nickel- und Entchromungsbad. Diese notwendigen Schritte bedeuten nicht nur für die Herstellung einen erheblichen Aufwand, sondern sind auch unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Aspekten während des Herstellungsprozesses für Umwelt und Mensch als kritisch zu bewerten.

Mit dem konventionellen Herstellungsprozess von Tiefdruckzylindern ist eine Vielzahl von Nachteilen verbunden:



**Abb. 3:** Herkömmlicher Tiefdruckzylinder mit Chrombeschichtung angeordnet innerhalb der DIGILAS-Lasergravuranlage (Schepers GmbH & Co. KG)

- zeit- und kostenintensive einzelne Verfahrensschritte sind notwendig
- Verwendung von alkalischen Ätzmitteln für Reinigungszwischenschritte
- energieintensiver Herstellungsprozess (150 – 200 kWh pro Zylinder)
- großes Zylindergewicht führt zu hohen Transportkosten
- aufwendige Recyclingtechniken (Entfernung von Chromschichten durch Ätzverfahren)
- gesundheitliche Risiken beim Handling von Chrom VI und Säuren

Die konventionelle Herstellung von Tiefdruckzylindern ist unter umwelttechnischen Aspekten sehr kritisch zu bewerten. Ein Ansatz, um die Produktionskette bei der Herstellung von gravierten Tiefdruckzylindern zu verbessern, ist die Entwicklung einer neuen funktionsfähigen Alternative im Rahmen dieses Projektes. In dem Zusammenhang scheint durch die Entwicklung von extrem verschleißfesten Kunststoffoberflächen in jüngster Zeit ein denkbarer Ersatz möglich. Dadurch könnten die bedenklichen Umweltnachteile, die mit der konventionellen Herstellung eines galvanisierten Tiefdruckzylinders verbunden sind, beseitigt bzw. erheblich reduziert werden.

Die durchschnittliche Jahresleistung eines Tiefdruckformherstellers liegt zwischen 3.000 und 15.000 produzierten Zylindern. Beim Herstellungsprozess der Zylinder entstehen Abwässer, die in einem gesonderten Prozess behandelt werden müssen. Diese Abwässer enthalten metallische Feststoffe wie Cr III, Cu, Steinabrieb vom Schleifprozess, Laugen und Säuren sowie diverse Salze. Pro produzierten Tiefdruckzylinder beträgt das Abwasservolumen zwischen 50 und 200 Liter. Bei der Aufbereitung des Abwassers durch Neutralisation und Filtrierung entsteht Schlamm, der in konzentrierter Form die Verunreinigungen enthält und im Anschluss auf einer Deponie entsorgt werden muss. Diese können pro Jahr einige zehn bis hundert Tonnen betragen.

Mit dem Vorhaben soll erreicht werden, dass durch eine gezielte Weiterentwicklung eines alternativen Tiefdruckzylinders die Direktstrukturierung mit geeigneten Laserstrahlquellen ökonomisch noch sinnvoller eingesetzt werden kann. Bezüglich der Entwicklung von Laserstrahlquellen hat es in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gegeben, um Lasersysteme bezüglich der Strahlqualität und des Wirkungsgrades zu verbessern. Daher soll mit optimierten Laserstrahlquellen eine weitere Reduzierung der Produktionszeiten und -kosten erreicht und die Akzeptanz des Verfahrens gesteigert werden. Folglich ergeben sich eine Reihe von Vorteilen für Mensch und Umwelt.

## **2. Eingesetzte Lasertechnik**

Im ursprünglichen Projektantrag war für die Untersuchungen zur Mikrostrukturierung von Tiefdruckrastern auf Walzen ausschließlich ein cw-Faserlaser vorgesehen. Bei der Projektdurchführung hat sich jedoch später die Notwendigkeit ergeben, weitere Lasersysteme beim Antragsteller (Schepers GmbH & Co. KG) und beim Hochschul-Projektpartner (LFM) hinzuzunehmen. Ultrakurzpuls-Laser bieten neben einem schmelzarmen Materialabtrag von Metallen [KG11], auch die Möglichkeit, transparente Materialien zu bearbeiten [BB11]. Die folgende Tabelle (Tab. 1) gibt eine Übersicht aller in diesem Vorhaben eingesetzten Laserquellen.

<b>cw-Faserlaser @ 1070 nm (Schepers GmbH &amp; Co. KG)</b>			
Wellenlänge $\lambda$	1070 nm	Maximale Pulsfrequenz $f_{p,max}$	
Mittlere Leistung $P_L$	200 W	Strahlqualität $M^2$	1.1
Maximale Pulsenergie $E_{p,max}$		Brennweite der Scanoptik $f$	60 mm
Maximale Fluenz $F_{max}$		Fokusbereich $d_0$	10 $\mu\text{m}$
Pulsdauer $t_p$		Rayleighlänge nach Optik $z_R$	40 $\mu\text{m}$

<b>cw-Faserlaser @ 535 nm (Schepers GmbH &amp; Co. KG)</b>			
Wellenlänge $\lambda$	535 nm	Maximale Pulsfrequenz $f_{p,max}$	
Mittlere Leistung $P_L$	5 W	Strahlqualität $M^2$	1.1
Maximale Pulsenergie $E_{p,max}$		Brennweite der Scanoptik $f$	60 mm
Maximale Fluenz $F_{max}$		Fokusbereich $d_0$	7 $\mu\text{m}$
Pulsdauer $t_p$		Rayleighlänge nach Optik $z_R$	80 $\mu\text{m}$

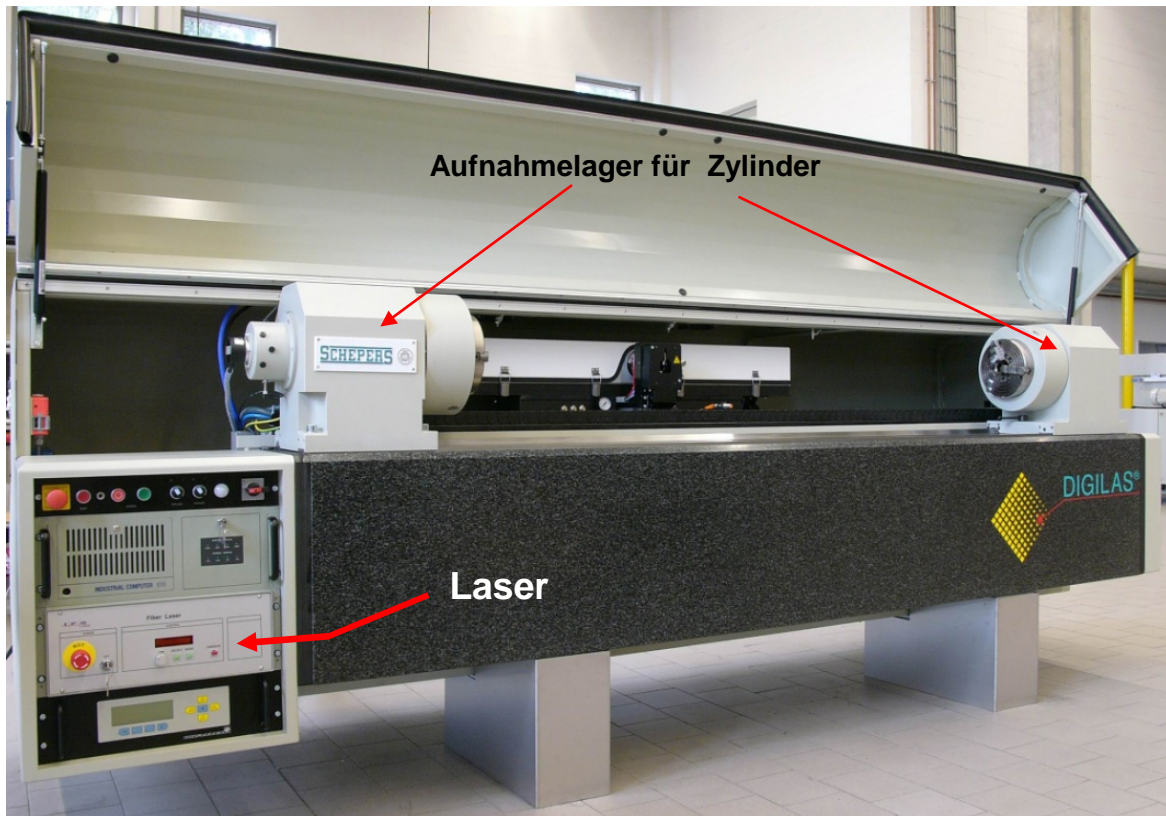
<b>ns-Laser @ 1070 nm (Schepers GmbH &amp; Co. KG)</b>			
Wellenlänge $\lambda$	1070 nm	Maximale Pulsfrequenz $f_{p,max}$	1 MHz
Mittlere Leistung $P_L$	250 W	Strahlqualität $M^2$	2
Maximale Pulsenergie $E_{p,max}$	1 mJ	Brennweite der Scanoptik $f$	60 mm
Maximale Fluenz $F_{max}$	318 J/cm <sup>2</sup>	Fokusbereich $d_0$	20 $\mu\text{m}$
Pulsdauer $t_p$	120 ns	Rayleighlänge nach Optik $z_R$	20 $\mu\text{m}$

<b>Pikosekunden-Laser Fa. LUMERA (Schepers GmbH &amp; Co. KG)</b>			
Wellenlänge $\lambda$	1064 nm	Maximale Pulsfrequenz $f_{p,max}$	4 MHz
Mittlere Leistung $P_L$	80 W	Strahlqualität $M^2$	1,3-2
Maximale Pulsenergie $E_{p,max}$	80 $\mu\text{J}$ (1MHz)	Brennweite der Scanoptik $f$	46 mm
Maximale Fluenz $F_{max}$	32 J/cm <sup>2</sup>	Fokusbereich $d_0$	10 $\mu\text{m}$
Pulsdauer $t_p$	10 ps	Rayleighlänge nach Optik $z_R$	Ca.50 $\mu\text{m}$

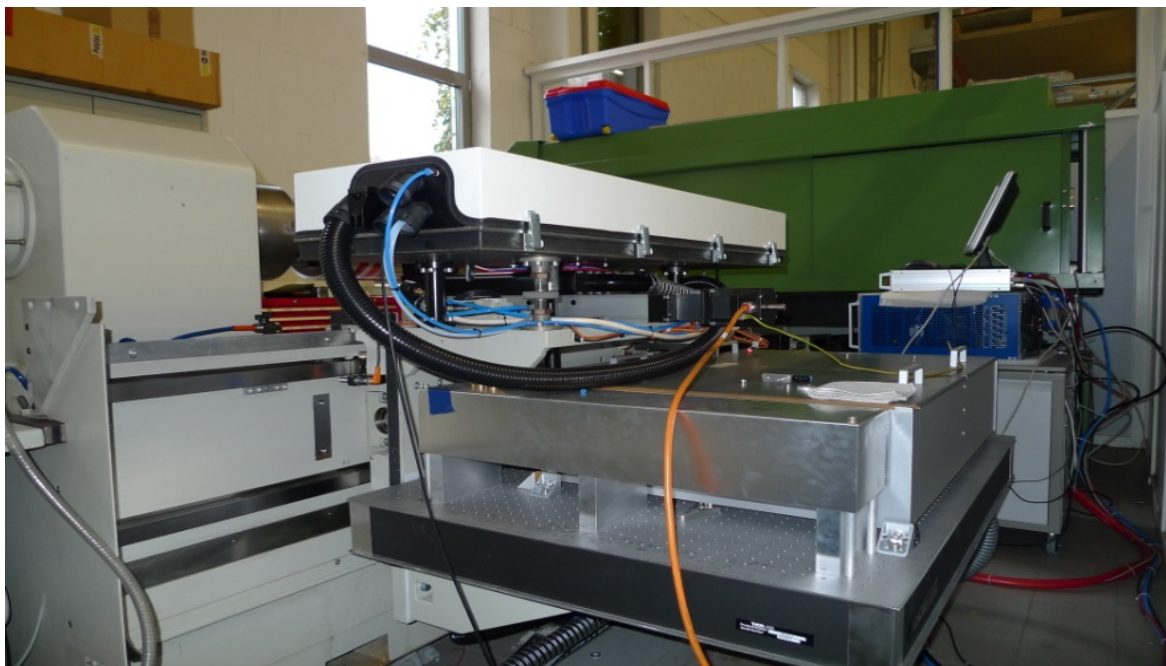
<b>Pikosekunden-Laser TruMicro 5050 compact mit Scanoptik (Laserzentrum LFM)</b>			
Wellenlänge $\lambda$	1030 nm	Maximale Pulsfrequenz $f_{p,max}$	800 kHz
Mittlere Leistung $P_L$	50 W	Strahlqualität $M^2$	< 1,3
Maximale Pulsenergie $E_{p,max}$	62,5 $\mu\text{J}$	Brennweite der Scanoptik $f$	100 mm
Maximale Fluenz $F_{max}$	16,5 J/cm <sup>2</sup>	Fokusbereich $d_0$	22 $\mu\text{m}$
Pulsdauer $t_p$	< 10 ps	Rayleighlänge nach Optik $z_R$	360 $\mu\text{m}$

**Tab. 1:** In diesem Forschungsvorhaben eingesetzte Laserquellen

Die Laserquellen beim Antragsteller waren sowohl in eine Standard-Gravur-Anlage vom Typ „DIGILAS (Typ 2900)“ (Abb. 4) als auch in eine spezielle Versuchsanlage (Abb. 5) integriert. Hiermit konnte die Strukturierung auf Walzen unter Praxisbedingungen untersucht werden.



**Abb. 4:** DIGILAS Gravur-System (Typ 2900), mit integriertem Faserlaser beim Antragsteller Fa. Schepers/Vreden



**Abb. 5:** Aufgebaute Versuchsanlage mit integriertem Laser zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen zur Laser-Direktgravur (Fa. Schepers GmbH & Co. KG/Vreden)



Der Pikosekundenlaser beim Projektpartner LFM war in einer gekapselten Versuchsanordnung integriert, in der der Laserstrahl mittels Scanner über das Bauteil bewegt wird (Abb. 6). Mit den Versuchseinrichtungen im LFM waren Voruntersuchungen zur Ablation ausschließlich an ebenen kunststoffbeschichteten Bauteilen möglich.



**Abb. 6:** Pikosekunden-Laser Typ „TruMicro 5050“ mit Bearbeitungskammer beim Projektpartner Laserzentrum (LFM)

### 3. Verwendete Kunststoffbeschichtungen

In diesem Vorhaben wurden als verschleißfeste Kunststoffschichten sowohl ORMOCER<sup>®</sup> als auch Melaminharz verwendet. Dabei nahm ORMOCER<sup>®</sup> einen deutlich dominierenden Stellenwert bei den Untersuchungen ein. Erst zum Projektende wurde auch Melaminharz als alternatives Schichtmaterial mit einbezogen.

#### 3.1. ORMOCER<sup>®</sup>

ORMOCER<sup>®</sup> ist ein anorganisch-organisches Hybridmaterial, dessen Härte, Abriebfestigkeit sowie Absorption von Laserstrahlung in weiten Bereichen durch den Herstellungsprozess eingestellt werden kann. Das Fraunhofer-Institut ISC in Würzburg verfügt auf diesem Gebiet über 15 Jahre lange Erfahrung und hat in diesem Vorhaben die ORMOCER<sup>®</sup>-Beschichtung von Druckwalzenzylindern übernommen.

Die Erfahrungen des Fraunhofer-Instituts ISC basieren beispielsweise auf verschiedene Dentalmaterialien basierend auf ORMOCER<sup>®</sup> [Haa00]; darüber hinaus sind verschiedene

ORMOCER®-Systeme für optische Anwendungen kommerzialisiert [SP02] und werden in Lizenz produziert. ORMOCER®-Schichten werden aus funktionalisierten Organosilanvorläufen durch Hydrolyse/Polykondensationsreaktionen (Sol-Gel-Prozesse [KP00]) mit anschließender organischer Verknüpfung der anorganisch-oxidischen Oligomere hergestellt. Die Eigenschaften dieser amorphen Materialien können durch molekulares Design der Ausgangssilane und der Prozessführung des Sol-Gel-Prozesses relativ einfach variiert werden [BR01, HB03]. Durch ihr anorganisches Netzwerk, die spezielle Art der Synthese sowie auch die Verwendung und Kombination geeigneter Alkoxysilane auf molekularer Ebene lassen sich vergleichsweise sehr hohe Temperaturstabilitäten (> 270°C) erreichen, wobei jedoch erheblich geringere Enthärtungstemperaturen (< 170°C) verwendet werden können, so dass auch temperatursensitive Bauteile oder Substrate beschichtet werden können. Darüber hinaus zeigen ORMOCER®e eine sehr hohe Stabilität gegenüber bei der Prozessierung üblicherweise verwendeter Lösungsmittel, so dass sie auch als funktionelle Schichten/Strukturen in Multi-Layer-Aufbauten eingesetzt werden können.

Die durch den Sol-Gel-Prozess entstehenden Oligomere liegen in alkoholischen Lösemitteln vor, welche üblicherweise entfernt bzw. für die Prozessierung (z. B. für die Einstellung der Schichtdicken) durch andere Lösungsmittel ersetzt werden können. Ausgewählte Harze können bei Raumtemperatur mindestens 1 Jahr gelagert werden.

ORMOCER®e zeigen aufgrund ihres multifunktionellen chemischen Aufbaus sehr gute Adhäsion sowohl zu Silizium, Metallen als auch zu unterschiedlichsten Polymeren. Das Material kann mit konventioneller Technologie, wie z. B. Spin-Coating, Tauchen, Sprühen, Fluten oder Vorhanggießen auf Substrate appliziert werden. Im Anschluss daran werden die organisch funktionalisierten anorganischen Oligomere über die organischen Funktionalitäten, wie z. B. Methacryl- oder Epoxy-Funktionalitäten, durch UV-Belichtung und/oder thermische Behandlung („Curing“) vernetzt. Eine direkte optische Strukturierung kann durch UV-Vernetzung in einem Maskenbelichter und auch mittels Lasern durchgeführt werden. Abschließend wird je nach ORMOCER®-System und Anwendung ein thermischer Enthärtungsschritt durchgeführt. In entgehärteten Schichten können auch ablativ Prozesse zur Strukturierung benutzt werden.

An die Herstellung der ORMOCER®-Beschichtungen wurden folgende Anforderungen gestellt:

- das Material soll mittels Tauch- oder Sprühbeschichtung homogen aufgetragen werden können
- die Schichtdicken sollen zwischen 100 µm und 1000 µm betragen

- das Material soll eine hohe Abriebfestigkeit besitzen
- das Material soll mit IR-Laserstrahlung ( $\lambda = 1030 \pm 30 \text{ nm}$  sowie  $\lambda = 530 \text{ nm}$ ) ablatierbar sein
- das Material soll auf Aluminium-Zylindern sowie auf Stahlkörpern, bzw. auf mit Kupfer oder Zink galvanisierten Stahlkörpern eine gute Haftung besitzen

Es sollten unterschiedliche Synthesen von ORMOCER<sup>®</sup> entwickelt werden, die diese Anforderungen erfüllen.

Im Verlauf des Vorhabens – auch nach Rückkoppelung von erzielten Forschungsergebnissen und anschließender Verbesserung – wurden seitens des Fraunhofer-Instituts ISC folgende Beschichtungen von Aluminiumzylindern durchgeführt:

- (1) Beschichtung mit transparentem ORMOCER<sup>®</sup> (Material A und Material B)  
Material A wurde mit einer UV-Lampe vernetzt und thermisch nachgehärtet. Hierbei traten Probleme mit der Vernetzung auf. Material B wurde nicht thermisch nachgehärtet (Abb. 7).
- (2) Beschichtungen mit ORMOCER<sup>®</sup> (Typ CM#1173) + absorbierendem Additiv („Dye“ Typ IR26)
- (3) Beschichtungen mit ORMOCER<sup>®</sup> (Typ CM#1173) + stärker absorbierendem Additiv („Graphit“ Typ KS26)
- (4) Beschichtungen mit ORMOCER<sup>®</sup> (Graphit); wie unter (3), jedoch mit deutlich erhöhtem Graphitanteil (2 Testzylinder mit unterschiedlichen Viskositäten) (Typ h 100617/03a und Typ h100617/03b) (s. Abb. 8)



**Abb. 7:** Mit ORMOCER<sup>®</sup> beschichtete Zylinderrohlinge  
Links: beschichteter Zylinderrohling; rechts: beschichteter Zylinderrohling mit Aufspindelung



**Abb. 8:** ORMOCER®-Beschichtung mit erhöhtem Graphitanteil (Typ h100617/03) auf Zylinderrohling (rechts: vergrößerter Detailausschnitt zeigt erste Strukturierungsergebnisse)

### 3.2. Melaminharz

Bei Melamin handelt es sich um einen chemischen Rohstoff, aus dem unterschiedliche Kunststoffe hergestellt werden. Unter Zugabe weiterer Stoffe und Härtung unter Druck (bis zu einigen MPa) entsteht ein hartes Duroplast für vielfältige Anwendungsfelder. Melaminharze sind optisch transparent und weisen eine hohe Schmelz- bzw. Zersetzungstemperatur von 350°C auf. Aufgrund seiner hohen Abrieb- und Bruchfestigkeit sowie hohen Härte (ähnlich wie Porzellan) wird Melamin überall dort eingesetzt, wo hohe mechanische Beanspruchungen auftreten. Für Untersuchungen innerhalb dieses Vorhabens stand Melamin als Plattenmaterial 800 x 800 mm<sup>2</sup> und einer Stärke von 350 µm zur Verfügung.

### 4. Messtechnik zur Qualitätsanalyse

Zur Auswertung der mittels Lasertechnik erzeugten Mikrostrukturen in ORMOCER®-Beschichtungen wurden unterschiedliche Messverfahren eingesetzt. Die Analyse erfolgte beim Antragsteller mittels optischem 3D-Profilometer von Keyence, Typ VHX-600D. Beim Projektpartner Laserzentrum FH Münster wurde ein Lichtmikroskop (Typ „Olympus BX 70“) mit Vergrößerungen bis zu 1000-fach eingesetzt.

Beim Kooperationspartner Laserzentrum FH Münster wurde darüber hinaus alternativ auch die „Replika-Technik“ eingesetzt [DU98]. Diese Verwendung hat sich als vorteilhaft bei transparenten ORMOCER®-Beschichtungen erwiesen, da in diesen die Mikrostrukturen zur Analyse mittels Lichtmikroskop einen zu geringen Kontrast aufwiesen. Hierbei handelt es sich um ein Präzisionsabformverfahren, bei dem der Abdruck detailgetreu alle Geometrie-

merkmale des Originalbauteils als inverse 3D-Darstellung wiedergibt. Zur Analyse mit diesem Verfahren wurde eine 2-Komponenten-Abformmasse auf der Basis eines Silikonkautschuks mit einer typischen Aushärtezeit von 15 – 30 Minuten auf die zu untersuchende Struktur aufgetragen. Das vollständige Ausfüllen selbst kleinster Mikrostrukturen wird dabei durch Kapillarwirkungen zusätzlich unterstützt. Nach der oben genannten Aushärtezeit lässt sich der Abdruck für weiterführende Messungen problemlos von der ORMOCER®-Beschichtung lösen. Aufgrund der hohen Elastizität der Abformmasse auch nach der Aushärtung können mit dem Replika-Verfahren selbst Hinterschneidungen von Strukturen formgetreu abgebildet werden. In Vorversuchen wurde eine Abformgenauigkeit von ca.  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  ermittelt. Abb. 9 zeigt repräsentativ einige Ergebnisse des Replika-Verfahrens am Beispiel von lasermikrostrukturiertem ORMOCER®.



**Abb. 9:** Replika-Abdrücke von Laser-Mikrostrukturen in ORMOCER® werden zur Qualitätsanalyse verwendet

## 5. Durchführung der Mikrostrukturierung und Zwischenergebnisse

### 5.1. Mikrostrukturierung mit Faserlasern

#### (a) ORMOCER® (Material A und Material B)

Mit diesem Material beschichtete Zylinderrohlinge wurden mit den Lasern

- cw-Faserlaser@1071 nm
- cw-Faserlaser@535 nm
- Nanosekunden-Faserlaser

bearbeitet. Für erste Untersuchungen zur Wechselwirkung der ORMOCER®-Beschichtung mit Laserstrahlung der oben aufgeführten Laser wurde versucht, Näpfchen mit Abmessungen von  $167 \times 167 \mu\text{m}^2$  bis zu  $63 \times 63 \mu\text{m}^2$  einzubringen. Für sämtliche oben genannte Laserquellen konnte auch unter Variation der Laserparameter in großen Bereichen keinerlei sichtbare sowie messbare Wechselwirkung festgestellt werden. Offensichtlich war die Absorption des ORMOCER®s für diese Wellenlängen unzureichend. Dies konnte auch nach Absprache mit dem Fraunhofer-Institut ISC/Würzburg nicht zufriedenstellend geklärt werden, obwohl in dem Pflichtenheft für die spezielle ORMOCER®-Herstellung seitens des Auftraggebers eine Absorption bei den oben genannten Wellenlängen gefordert wurde. Es soll auch erwähnt werden, dass die ORMOCER®-Schichten auf den Zylindern auch starke Inhomogenitäten der Schichtdicken aufwiesen. Diese waren für eine Mikrostrukturierung nicht akzeptabel. Vom Fraunhofer-Institut ISC wurde dies durch das spezielle Beschichtungsverfahren „Tauchen“ erklärt, bei dem das flüssige ORMOCER® langsam an dem vertikal aufgehängten Zylinder nach unten fließt, bevor die UV-Härtung einsetzt.

#### (b) ORMOCER® (Typ CM #1173) mit absorbierendem Additiv („Dye“ Typ IR26)

Die Untersuchungen zur Wechselwirkung an dieser Beschichtung mit den 3 unter (a) aufgeführten Lasersystemen zeigten keinerlei messbare sowie sichtbare Wechselwirkungen.

#### (c) ORMOCER® (Typ CM #1173) mit stärker absorbierendem Additiv („Graphit“ Typ KS26)

Die Untersuchungen zur Wechselwirkung an dieser Beschichtung mit den 3 unter (a) aufgeführten Lasersystemen zeigten keinerlei messbare sowie sichtbare Wechselwirkungen.

- (d)** Beschichtung mit ORMOCER®; wie (b) und (c), jedoch mit einem deutlich erhöhtem Graphit-Anteil

Der erhöhte Graphit-Anteil in ORMOCER® sollte die Absorption der Laserstrahlung erhöhen und somit eine erkennbare Wechselwirkung ermöglichen. Hierzu wurden seitens des Fraunhofer-Institutes ISC 2 Testzylinder mit unterschiedlichen Viskositäten Typ h100617/03a und h100617/03b hergestellt. Der Unterschied dieser beiden Typen bezog sich auf die Aushärtung im Herstellungsprozess. Es wurde eine thermische und eine optische Aushärtung angewendet.

Die Probe h100617/03b konnte mit den oben genannten Lasern nicht strukturiert werden, da sich die Schicht vollständig vom Zylinder abgelöst hatte. Die Probe h100617/03a wurde mit unterschiedlichen Parametern strukturiert. Es hat sich ergeben, dass die erhöhte Beimischung von Graphit zu einer Absorption führt, die einen Abtrag der ORMOCER®-Schicht grundsätzlich ermöglicht. Durch einen wiederholten Scan-Zyklus beim Abtrag konnte diese Schicht bis auf das Grundmaterial vollständig entfernt werden. Bei der Auswertung der Abtragsstrukturen hat sich gezeigt, dass ein „weißes Pulver“ auf der Oberfläche um den Rand der Bearbeitung als Rückstand verbleibt. Dies deutet auf einen thermischen Wechselwirkungsprozess mit der Folge einer „Verbrennung“ des Kohlenstoffs hin. Eine Erhöhung der Laserleistung hat in allen Fällen gezeigt, dass es zu einer erheblichen Verschmelzung auf der Beschichtungsoberfläche kommt. Dies lässt den Rückschluss zu, dass entweder die Eindringtiefe der Strahlung in das ORMOCER® aufgrund immer noch zu geringen Absorption sehr hoch ist. Es ist jedoch auch möglich, dass innerhalb des ORMOCER®s ausschließlich der Kohlenstoff absorbiert und die damit verbundenen lokalen hohen Temperaturen zu einer Materialverschmelzung im Bereich der Einflusszone führen.

Zwischenfazit zu den Untersuchungen (a), (b), (c), (d):

Die Ergebnisse der bis hierhin durchgeführten Untersuchungen unter Einsatz unterschiedlicher Variation von Laserparametern sowie Verwendung unterschiedlicher ORMOCER®-Beschichtungen müssen als negativ bewertet werden. Offensichtlich war es im Rahmen des Unterauftrags an das Fraunhofer ISC mit dem begrenzt dafür zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich, die Anforderungen nach einer auf die Wellenlänge der oben genannten Laser abgestimmten ORMOCER®-Beschichtung zu erfüllen. Es erschien nach Absprache mit dem Fraunhofer-Institut ISC auch wenig aussichtsreich, diese Untersuchungen weiter fortzuführen. Die Untersuchungen mit den cw-Faserlasern (1070 nm, 535 nm) sowie dem Nano-

sekunden-Faserlaser und den oben beschriebenen ORMOCER®-Beschichtungen wurden daher abgebrochen.

Zur Fortführung des Vorhabens wurde nach interner Diskussion und Absprache mit dem Projektträger die ursprünglich geplante Vorgehensweise (s. Projektantrag) geändert: Es soll nun nicht mehr versucht werden, ORMOCER®-Beschichtungen herzustellen, deren Absorption an vorgegebene Laserwellenlängen angepasst werden soll, sondern umgekehrt Laserstrahlung zu verwenden, die eine ausreichende Wechselwirkung mit Standard-ORMOCER® verspricht. Hierfür scheinen beispielsweise ps-Laser aussichtsreich (s. Kap. 2).

## 5.2. Mikrostrukturierung mit ps-Lasern

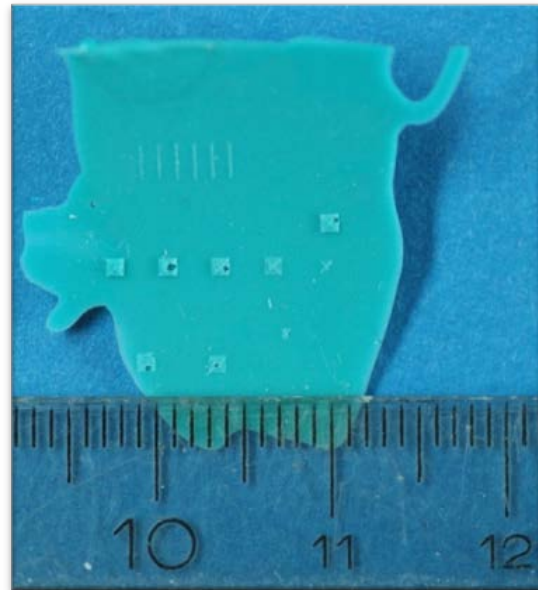
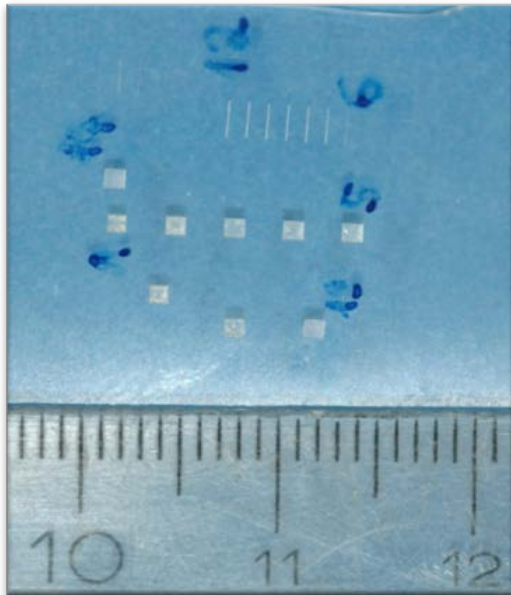
Sowohl beim Antragsteller als auch beim Projektpartner LFM stehen unterschiedliche moderne ps-Laser und Know-how zu damit möglichen Mikrostrukturierungen zur Verfügung [bspw. ED11] (s. Kap. 2). Für Abtragsuntersuchungen wurde Standard-ORMOCER® ohne zusätzliche Additive entsprechend der Beschreibung (s. Kap. 3.1.) verwendet.

Die Abtragsuntersuchungen im LFM bezogen sich ausschließlich auf ORMOCER®-Beschichtungen auf ebenen Probenkörpern. Die folgende Tabelle (Tab. 2) zeigt die Laserparameter für die durchgeführten Bearbeitungen beim Projektpartner LFM. In der Abb. 10 sind die Bearbeitungsergebnisse dargestellt. Abb. 10 (links) zeigt die entsprechend der Anzahl von Abtragsdurchläufen erzielten Abtragstiefen im Bereich von 50 – 340 µm. Zur quantitativen Analyse der Mikrostrukturierungen wurde wie oben erläutert, das Replika-Verfahren verwendet (Abb. 10 rechts).

Laser:	TruMicro 5050
Pulsenergie:	37,5 µJ
Frequenz:	80 Hz
Scangeschwindigkeit:	2 mm/s
Fokusslage:	0
Linienabstand:	5 µm (Schraffur, Linienscan)
Anzahl der Durchläufe:	Matrix 1: 1x, Matrix 2: 2x, Matrix 3: 3x, Matrix 4: 4x, Matrix5: 5x

**Tab. 2:** Prozessparameter für Abtragsuntersuchungen mit ps-Laser an ORMOCER®-Beschichtungen auf ebenen Substraten (Projektpartner LFM)





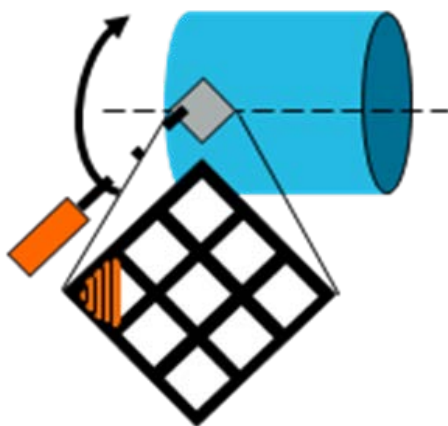
**Abb. 10:** Abtragsuntersuchungen an ORMOCER® mittels ps-Laser

Links: Abtragstiefen in Abhängigkeit der Durchläufe (s. oben Tab. 1).

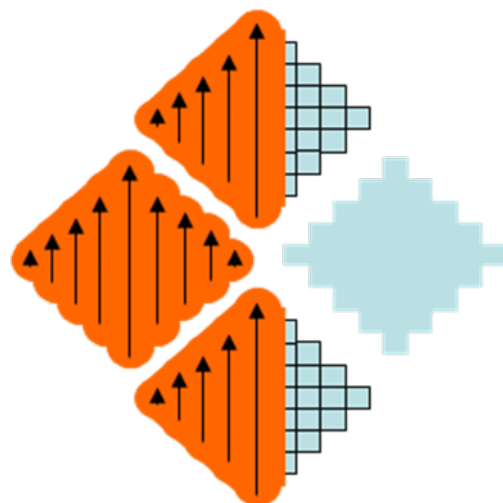
(Matrix 1: 50  $\mu\text{m}$ , Matrix 2: 90  $\mu\text{m}$ , Matrix 3: 180  $\mu\text{m}$ , Matrix 4: 210  $\mu\text{m}$ , Matrix 5: 340  $\mu\text{m}$ )

Rechts: Replika-Abdruck der Abtragsstrukturen zur Auswertung

Beim Antragsteller wurde ein ps-Lasersystem eingesetzt, das in eine Versuchsanlage zur Strukturierung von Zylindern integriert war. Dieses System wurde eingesetzt, um basierend auf den Abtragsuntersuchungen des LFM an ebenen Proben die Erkenntnisse auf Zylinder in Richtung Praxisrelevanz zu übertragen. Für die weiteren Untersuchungen wurden Tiefdruckraster mit verschiedenen Rasterweiten mit einer Auflösung von 5  $\mu\text{m}$  in ORMOCER® beschichtete Walzen eingebracht. Das Verfahren der Lasergravur von Zylindern und der damit verbundenen digitalen Datentransfer sind in den folgenden Abbildungen 11 und 12 dargestellt.

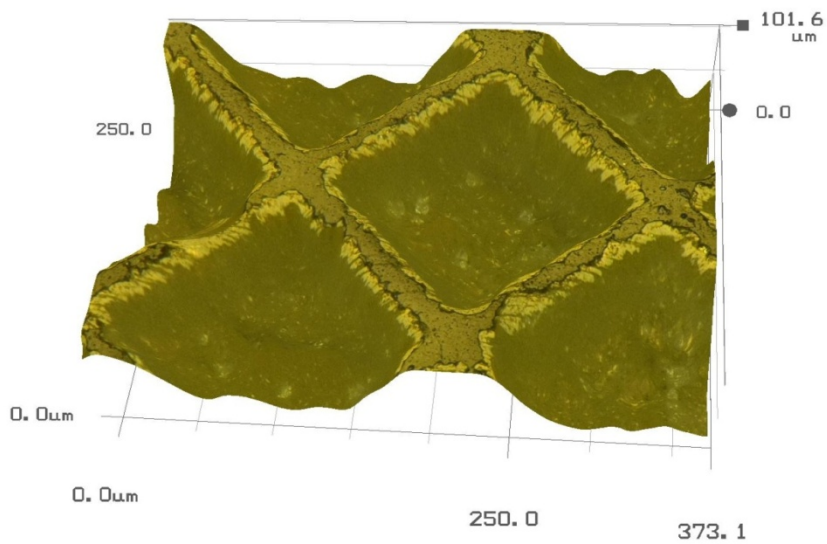


**Abb. 11:** Kontinuierlicher, spiralförmiger Abtragsprozess durch synchronisierten axialen Vorschub zur Rotation

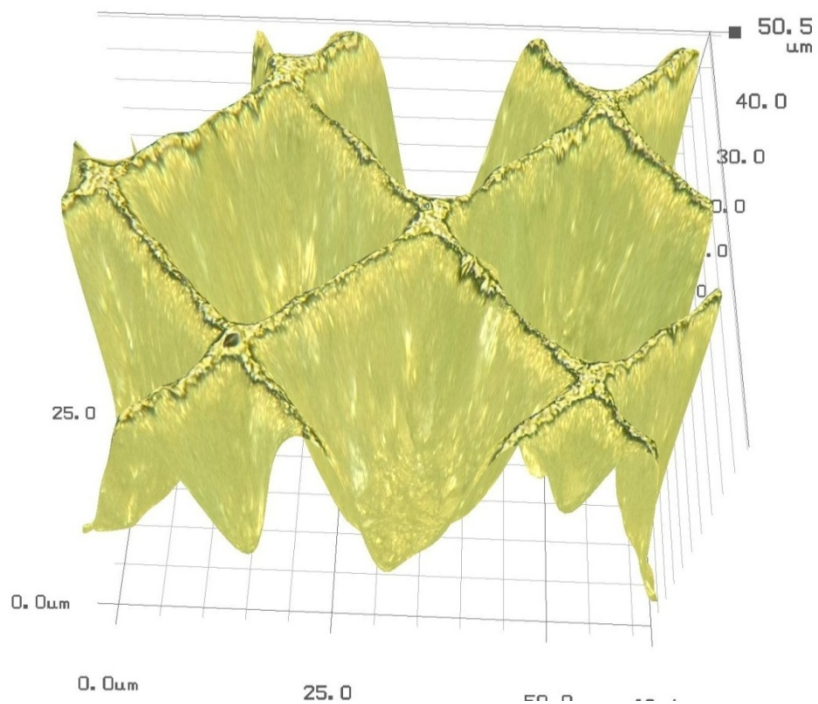


**Abb. 12:** Digitaler Datenbestand wird Pixel für Pixel auf das Substrat übertragen

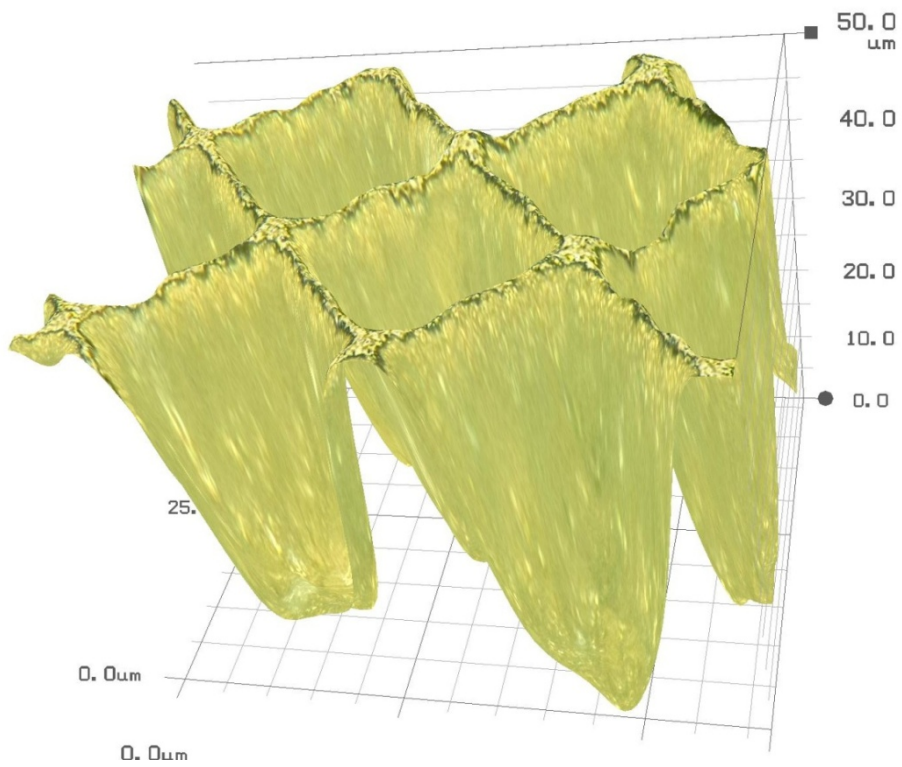
Die Strukturierungen wurden mit mittleren Laserleistungen von ca. 5 W und Oberflächen-  
geschwindigkeiten von 2 m/s durchgeführt. Die folgenden Abbildungen 13 – 18 zeigen die  
Ergebnisse für unterschiedliche Rautenformen bei optimierten Prozessparametern des ps-  
Lasers:



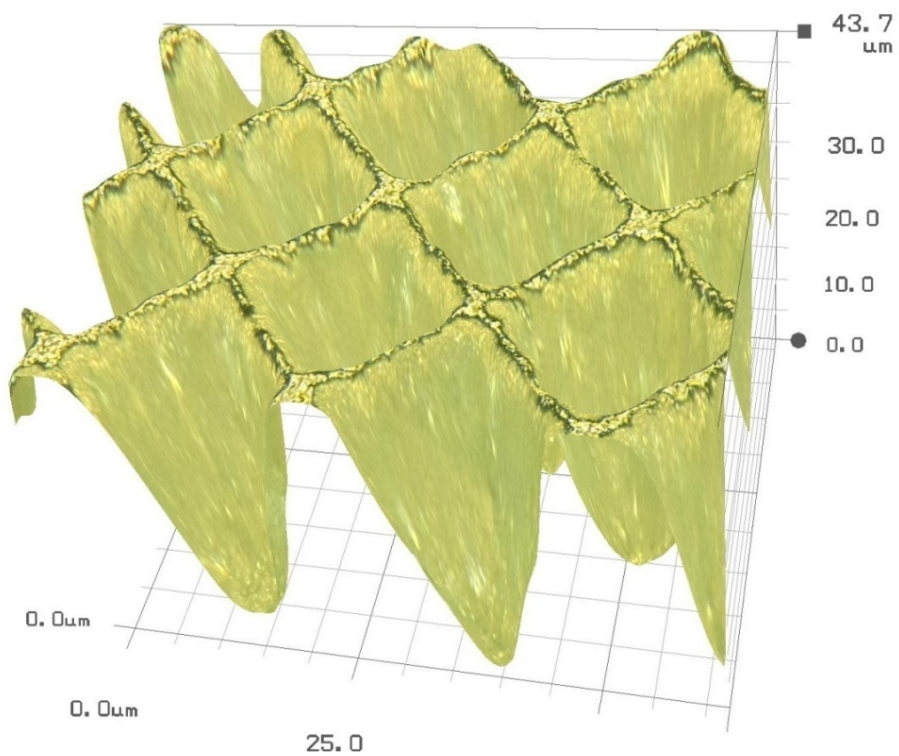
**Abb. 13:** Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER (Rautenform #1: Auflösung  
60L/cm; Kantenlänge: 167  $\mu\text{m}$ )



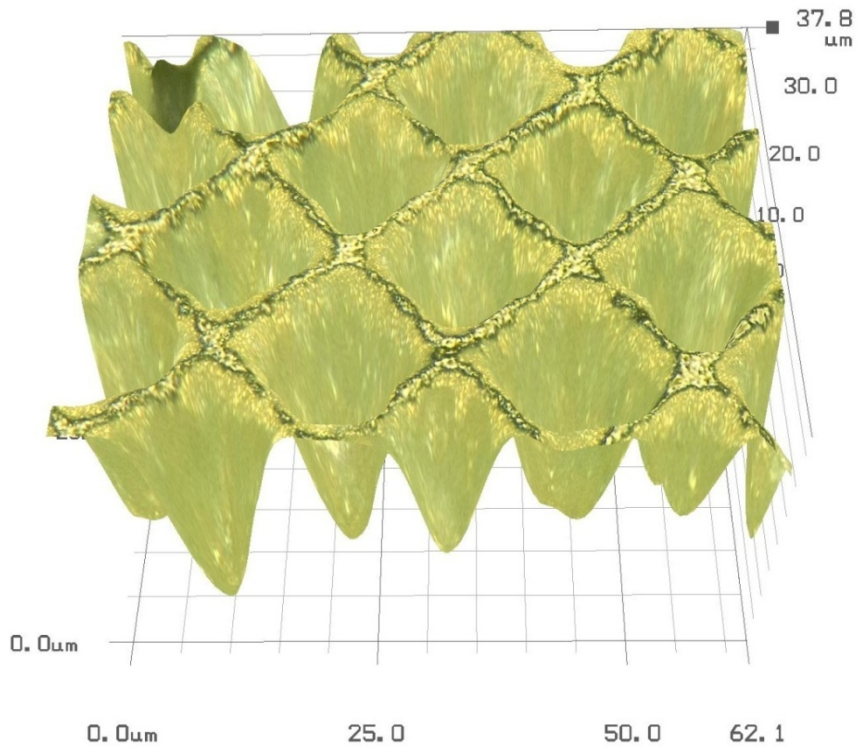
**Abb. 14:** Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER® (Rautenform #2: Auflösung  
90L/cm; Kantenlänge: 111  $\mu\text{m}$ )



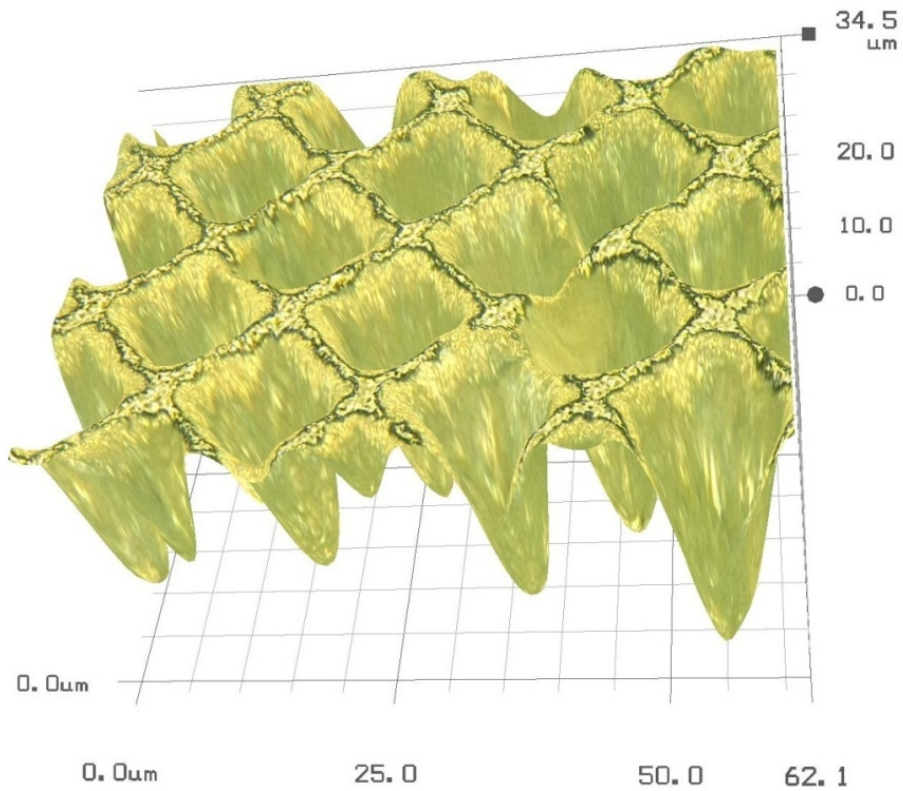
**Abb. 15:** Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER® (Rautenform #3: Auflösung 100L/cm; Kantenlänge: 100 µm)



**Abb. 16:** Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER® (Rautenform #4: Auflösung 120L/cm; Kantenlänge: 83 µm)



**Abb. 17:** Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER® (Rautenform #5: Auflösung 140L/cm; Kantenlänge: 71 μm)



**Abb. 18:** Mit ps-Laser eingebrachte Näpfchen in ORMOCER® (Rautenform #6: Auflösung 160L/cm; Kantenlänge: 63 μm)

Es hat sich eine grundsätzlich zufriedenstellende Qualität der Mikrostrukturierung gezeigt, es soll jedoch erwähnt werden, dass das Parameterfenster für den Einsatz eines ps-Lasers sehr schmalbandig ist. Die hohe erzielte Bearbeitungsqualität geht einher mit einer geringen Abtragsrate von typ. 2 – 3 mm<sup>3</sup>/min, was für die Praxis der Strukturierung von Druckzylindern eine sehr hohe Prozesszeit bedeutet.

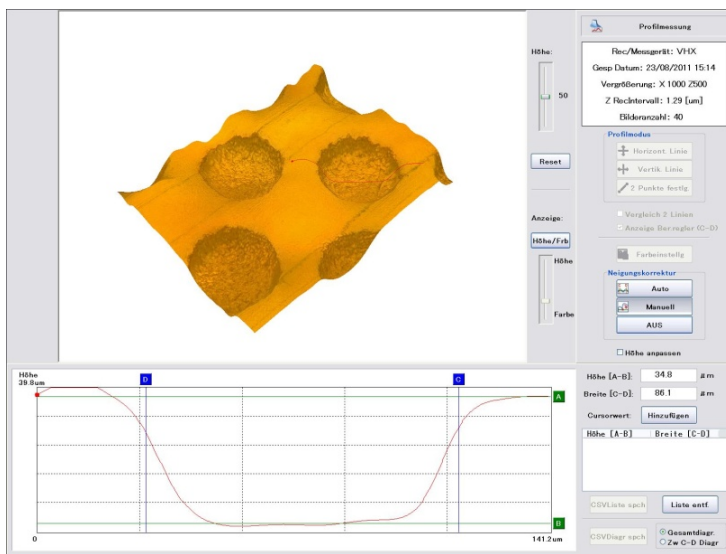
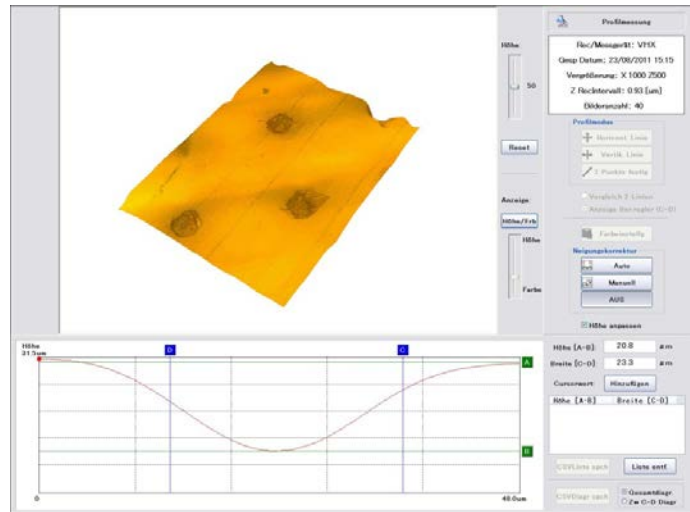
Nach einer Diskussion mit Fachleuten der Druckindustrie hat sich ergeben, dass die Zeiten für die Strukturierung von Druckwalzen mittels ps-Laser offensichtlich zu hoch sind. Es wurde daher ein weiteres Mal – nach Absprache mit dem Projektträger – die Vorgehensweise zur Durchführung des Vorhabens geändert. Anstelle von ORMOCER<sup>®</sup> als verschleißfeste, umweltfreundliche Kunststoffschicht für den Tiefdruck sollten nun alternativ Beschichtungen aus Melaminharz untersucht werden.

## **6. Durchführung der Mikrostrukturierung an Melaminharz-Beschichtungen mittels ps-Laser**

Als Alternative zu ORMOCER<sup>®</sup> wurde abschließend als verschleißfestes Material transparentes Melaminharz verwendet (s. Kap. 3.2). Dies ist aus der Laminatherstellung (bspw. Fußbodenbelag) bekannt und wird auch als CPL bezeichnet (**C**ontinuous **P**ressure **L**aminate). Aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften (bspw. Abriebfestigkeit) sollte dieses für die vorgesehene Laser-Direktstrukturierung von Tiefdruckzylindern grundsätzlich geeignet sein. Wegen der hohen Transparenz von Melamin und der zuvor an ebenfalls ORMOCER<sup>®</sup> gewonnenen Erfahrungen wurde zur Mikrostrukturierung ausschließlich der im Kap. 2 vorgestellte Pikosekundenlaser in Kombination mit der Gravuranlage Typ DIGILAS (Schepers GmbH) eingesetzt.

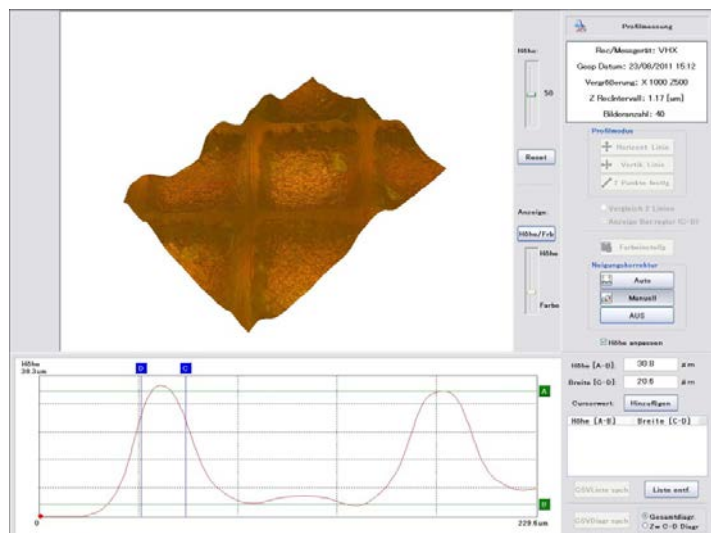
Für die Laserstrukturierung wurden Laminatplatten (800 x 800 mm<sup>2</sup>) über den Umfang von Zylinderrohlingen „gezogen“ und unter Praxisbedingungen mit dem oben genannten Pikosekundenlaser strukturiert. Mit optimierten Laserparametern (mittlere Laserleistung ca. 25 W) wurden Teststrukturen (Rasterfrequenz 70 L/cm, Stegbreite 35 µm) eingebracht. Die Oberflächengeschwindigkeit betrug 7,2 m/s bei einem axialen Vorschub von 10 µm. Die Resultate der Teststrukturierungen sind in der folgenden Abbildung (Abb. 19) dargestellt.

5 % - Schnitt



50 % - Schnitt

100 % - Schnitt



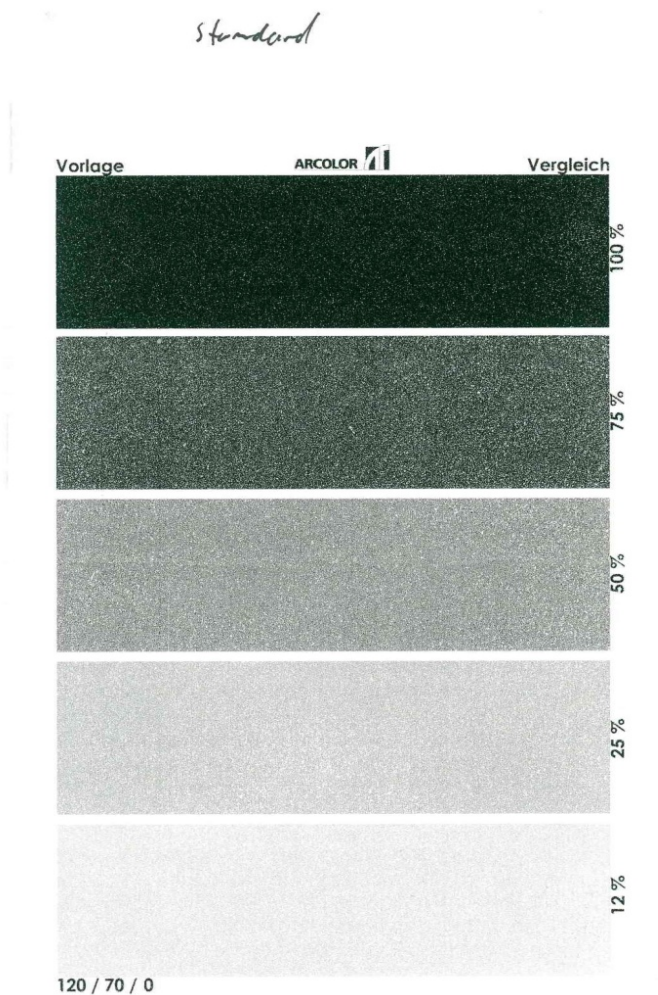
**Abb. 19:** Mit ps-Laser in Kombination mit DIGILAS-Gravuranlage in Melaminharz eingebrachte Teststrukturen (die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Flächendeckung im Druck, d.h. Zellöffnung)

Die Ergebnisse in Abb. 19 zeigen einen sehr guten digitalen Datentransfer auf die Druckformoberfläche. Die Volltonfläche (Abb. 19) weist bei einer Tiefe von 30 µm einen ebenen Boden auf. Unter Berücksichtigung der vorherigen Maschinenparameter ergibt sich eine Abtragsleistung von 65 mm<sup>3</sup>/min. Die Zellkanten weisen einen leicht zackigen Verlauf auf, der auf eine Art „Materialsprengung“ hindeutet. Es sind keinerlei Schmelzanzeichen (wie Schmelzperlen, Grat- bzw. Oxidbildung) erkennbar.

Nach diesen positiven Resultaten an Teststrukturierungen wurde zur Beurteilung der weiteren Eignung dieses Materials die Laser-Direktstrukturierung von Dekormustern und weiteren Druckmustern aus der Praxis durchgeführt (Abb. 20). In Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Interprint GmbH/Arnsberg wurde schließlich ein Andrucken durchgeführt. Hier erfolgte ein Zuschnitt der Vorlagen auf das Format des dort vorhandenen Andruckgerätes und ein anschließendes Spannen auf eine ebene Druckplatte. Anschließend wurde mit einem Spatel Farbe auf die Platte gelegt; ein Bogen Papier wurde auf die Presseur geklebt. Anschließend wurde eine Rakel über die Oberfläche gefahren und es erfolgte durch den Presseur ein Abrollen des Papiers auf der Druckplatte. Einige repräsentative Ergebnisse von derart hergestellten Andrucken sind in den folgenden Abbildungen 21 - 27 dargestellt.



**Abb. 20:** Mittels ps-Laser und DIGILAS-Gravuranlage in Melaminharz eingebrachte Strukturierung aus der Praxis



**Abb. 21:** Kalibrierdruck mit Referenzdruckform



6.

Abb. 22: Typ. Druck aus der Verpackungsindustrie, 6. Ausdruck



7.

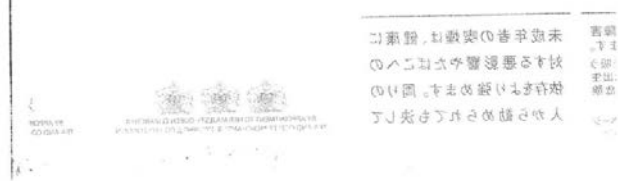


Abb. 23: Typ. Druck aus der Verpackungsindustrie, 7. Ausdruck

8

**Abb. 24:** Typ. Dekor-Druck,  
Holzlaminat, 8. Ausdruck



9

**Abb. 25:** Typ. Dekor-Druck,  
Holzlaminat, 9. Ausdruck



10.

Abb. 26: Typ. Dekor-Druck, Holzlaminat, 10. Ausdruck



10.

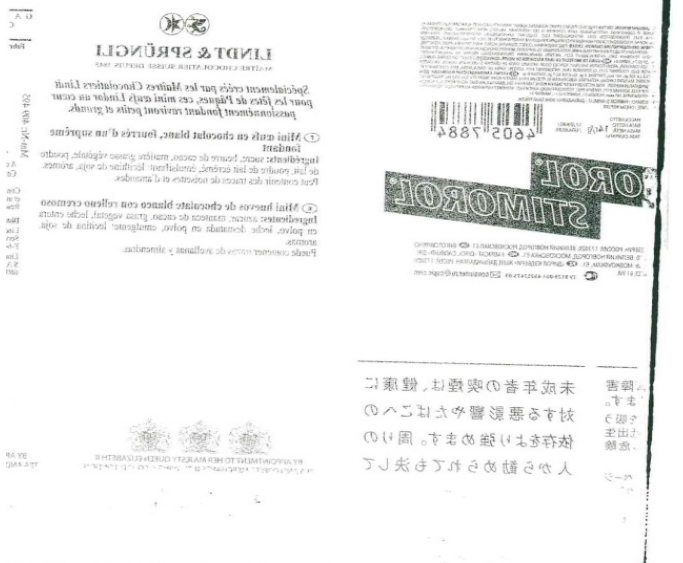


Abb. 27: Typ. Druck aus der Verpackungsindustrie, 10. Ausdruck

Alle Beispiele zeigen ein akzeptables Druckergebnis mit einer vergleichsweise hohen Auflösung. Dies wurde auch vom Anwender Interprint GmbH bestätigt. Es hat sich allerdings gezeigt, dass ein nachfolgendes Reinigen der Oberflächen nur mit Aufwand möglich ist. So verbleibt nach der Reinigung immer ein geringer Farbanteil in den Nöpfchen. Dieser Effekt ist vermutlich auf die gezackte Zellkontur zurückzuführen, an denen sich Farbe anhaftet. Es wurde auch ein „Aufquellen“ der Druckform festgestellt, die darauf zurückzuführen ist, dass das Material nicht lösemittelbeständig ist. Dieses Problem lässt sich aber laut Interprint beheben.

## **7. Fazit**

Es konnte in diesem Projekt der gesamte Tiefdruck-Prozessablauf mit Verwendung einer Kunststoffschicht aufgezeigt werden. Von dem Aufbringen der Kunststoffschicht auf den Zylinder, über die Strukturierung für den Tiefdruckprozess bis hin zum eigentlichen Druck. Es wurde deutlich, dass für die Entwicklung der Kunststoffschicht und die Zylinderbeschichtung noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig ist, der innerhalb dieses Projektes nicht geleistet werden konnte. Die Verwendung von Ultrakurzpuls-Lasern erlaubt eine nahezu materialunabhängige Strukturierung (selbst bei transparenten Materialien). Dieser gewonnene Freiheitsgrad kann zukünftig zur Optimierung der Kunststoffschicht für den Beschichtungs-, bzw. Druckprozess genutzt werden. Für die Untersuchungen innerhalb des Projektes konnte auf eine vorhandene Anlagentechnik für die Oberflächenstrukturierung zurückgegriffen werden. Um eine Kunststoffschicht für den Tiefdruck bis zur Marktreife zu entwickeln, ist aber eine neue Anlagentechnik (Beschichtung & Finish) notwendig. Diese Entwicklung kann nun nach Projektende mit einem Partner aus dem Bereich Beschichtung/Oberflächentechnik fortgeführt werden.

## 8. Literaturverzeichnis

- [BB11] BUCHER, G., ROMANO, V., NUSSBAUM, C., JOSS, B., MURALT, M., AFFOLTER, M., ZÜRCHER, J., SCHÜTZE, P., HUNZIKER, U., NEGRO, T., BOAS, J., *Microprocessing of transparent materials with ps-laserpulses*. Berner Fachhochschule, Technik und Informatik / Laser Surface Engineering, 2011.
- [BR01] BUESTRICH, R., KAHLENBERG, F., POPALL, M., DANNBERG, P., MÜLLER-FIEDLER, R., RÖSCH, O., *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 20, 2001.
- [DU98] DICKMANN, K., HILDENHAGEN, J., THIEMANN, R., LAMMERS, C., LÖDDING, B., UPHOFF, H., *Replika-Technik: Präzisions-Abform-Verfahren in der Laser-Mikrobearbeitung*. Laser Magazin 2, 1998.
- [ED11] ENGELHARDT, U., HILDENHAGEN, J., DICKMANN, K., *Micromachining using high-power picosecond lasers*. Laser Technik Journal 5, 2011.
- [Haa00] HAAS, K.H.: *Adv. Eng. Mater* 2, 2000.
- [HB03] HOUBERTZ, R., DOMANN, G., CRONAUER, C., SCHMITT, A., MARTIN, H., PARK, J.-U., FRÖHLICH, L., BUESTRICH, R., POPALL, M., STREPPPEL, U., DANNBERG, P., WÄCHTER, C., BRÄUER, A., *Thin Solid Films* 442, 2003.
- [HB04] HENNIG, G., SELBMANN, K.-H., BRÜNING, S., *Large Scale Laser Microstructuring in the printing industry*. Wiley-VCH Weinheim, Laser Technik Journal, No. 3, May 2004.
- [KG11] KNAPPE, R., BRÜNING, S., GILLNER, A., *Kleinste Strukturen auf große Flächen*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Laser Technik Journal, Nr. 4, Juli 2011.
- [KP00] KAHLENBERG, F., BUESTRICH, R., POPALL, M., *Mater. Res. Soc. Symp.* 628, 2000.
- [SP02] STREPPPEL, U., DANNBERG, P., WÄCHTER, C., BRÄUER, A., FRÖHLICH, L., HOUBERTZ, R., POPALL, M., *Opt. Mat.* 21, 2002.