

Schepers GmbH & Co. KG

## **Entwicklung von Nickelschichten und eines angepassten Laser-Abtragverfahrens zur hochauflösenden Direkt-Lasergravur**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 29686 – 21/2 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

von

den Verfassern:

Dr.-Ing. 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 thin blue outline.

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

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

Matthias Kurrle  
International PlatingTechnology GmbH  
[www.ipt-plating.com](http://www.ipt-plating.com)

The logo for International Plating Technologies (IPT), featuring the letters "IPT" in a bold, black, sans-serif font. To the right, the text "International Plating Technologies" is written in a smaller, black, sans-serif font.

November 2013

Schepers GmbH & Co. KG

## **Entwicklung von Nickelschichten und eines angepassten Laser-Abtragverfahrens zur hochauflösenden Direkt-Lasergravur**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 29686 – 21/2 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

von

den Verfassern:

Dr.-Ing. 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 FH MÜNSTER" is written in a smaller, blue, sans-serif font.

Matthias Kurrle  
International PlatingTechnology GmbH  
[www.ipt-plating.com](http://www.ipt-plating.com)

The logo for International Plating Technologies (IPT), featuring the letters "IPT" in a bold, black, sans-serif font. To the left of the letters is a small circular icon with a dot inside. To the right of the letters, the text "International Plating Technologies" is written in a smaller, black, sans-serif font.

November 2013

# Projektkennblatt

der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	<b>29686-21/2</b>	Referat	<b>21/2</b>	Fördersumme	<b>118.000</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Entwicklung von Nickelschichten und eines angepassten Laser-Abtragverfahrens zur hochauflösenden Direkt-Lasergravur</b>				
<b>Stichworte</b>	Tiefdruck, Laserablation, Galvanische Nickelschicht				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>18 Monate</b>	<b>04.01.2011</b>	<b>04.07.2012</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	02.08.2012				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Fa. Schepers GmbH & Co KG Karl-Benz Str. 7  48691 Vreden			Tel	02564-95050
				Fax	02564-34563
				Projektleitung	Dr. Stephan Brüning
				Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>	Laserzentrum FH Münster Stegerwaldstraße 39 48565 Steinfurt Tel.: 02551-962324 Telefax: 02551-962-490 E-Mail: laserlab@fh-muenster.de		International Plating GmbH In den Entenäckern 30 70599 Stuttgart Tel.: 0711-900710 Telefax: 0711-9007120 E-Mail: info@ipt-plating.com		

## **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Mit dem Vorhaben sollte erreicht werden, dass durch eine gezielte Weiterentwicklung eines alternativen Tiefdruckzylinders die Direktstrukturierung mit geeigneten Laserstrahlquellen ökologisch noch sinnvoller eingesetzt werden kann. Ein wesentliches Ziel des Projektes war der Verzicht auf die in der Handhabung sehr kritische Chromschicht. 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 Nickel-Schicht versehen worden. Die Zylinderoberfläche wurde anschließend mit dem Laser µm-genau strukturiert / bebildert und so die eigentlichen Druckinformationen übertragen. Im Druckprozess sollte die Nickel-Schicht ähnliche tribologische- und farbübertragungs- Eigenschaften besitzen wie eine Chromschicht.

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

In einem ersten Schritt wurde in Orientierungsversuchen der Schwerpunkt auf die Laserstrukturierbarkeit von zwei unterschiedlichen Nickelschichten (Rein-Nickel und Nickel-Phosphor) durchgeführt. Die Rein-Nickel-Schicht hat eine Härte von 500HV und die Nickel-Phosphor-Schicht eine Härte von 750HV. So erstellte Flachproben wurden hinsichtlich der Möglichkeit untersucht, mit ps-Lasern bei Wellenlängen von 1070nm zu strukturieren zu können. Die Auswertung der eingebrachten Teststrukturen erfolgte mittels Lichtmikroskop. Außerdem wurden am LFM die hier erzeugten Strukturen mit einem 3D-Meßsystem vermessen, um eine Aussage über die Abtragtopographie treffen zu können. Hierauf aufbauend wurden drei kleine Testzylinder erstellt und so die zuvor gewonnenen Erkenntnisse des Laserabtrags überprüft.

Hierauf aufbauend wurden drei kleine Testzylinder erstellt und so die zuvor gewonnenen Erkenntnisse des Laserabtrags überprüft.

Es wurde von der Fa. IPT ein konventioneller Tiefdruckzylinder mit einer Doppelschicht versehen. Der Aufbau sah so aus, dass zunächst eine ca. 100µm dicke Rein-Nickel-Schicht aufgebracht wurde, und in einem zweiten Schritt eine Nickel-Phosphor-Verschleißschutzschicht mit einer Dicke von 20µm. Der Zylinder wurde nach der Gravur in einer Andruckmaschine angedruckt und ausgewertet.

Abschließend ist ein Zylinder, der von der Hochschule der Medien, HDM in Stuttgart, zur Verfügung gestellt wurde unter normalen Tiefdruckbedingungen getestet worden. Dieser Zylinder wurde von IPT mit einer Rein-Nickel-Schicht und einer Nickel-Phosphor-Schicht als Verschleißschutzschicht versehen. Auf dem Zylinder wurden mit einer Digilas Anlage verschiedene Testmotive mit unterschiedlichen Parametern graviert.

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

Die Rein-Nickel-Schichten konnten mit lateralen Auflösungen von 10µm und Tiefenauflösungen von 500nm strukturiert werden. Es zeigten sich bei definierten Abtragparametern auch bei Tiefen von 250µm keine Probleme. Bei einer Nickel-Phosphor Schicht kam es schon nach einigen 10µm Abtragtiefe zu einer inhomogenen rauhen Abtragtiefe. Ausgehend von einem Keim bildete sich flächendeckend eine Mikro-Lochbildung aus. Durch diese Löcher wurde ein weiterer Abtragprozess unterbunden.

Da im Tiefdruck Abtragtiefen von ca. 15µm bis 40µm notwendig sind, war die Lochbildung nicht relevant für den weiteren Prozessverlauf. Die Zylinder konnten bei diesen Tiefen mit Rasterformen wie Raute, Hexagon oder Linien graviert werden. Aufgrund der guten Ergebnisse im ersten Andruck wurde dann ein Produktionszylinder für eine konventionelle Druckmaschine erstellt. Die Drucke zeigten ein analoges Verhalten zu Standardzylindern, die in Kupfer graviert und anschließend verchromt wurden. Somit stellt das Material Nickel eine Alternative zum Zweischicht System Kupfer-Chrom dar.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Erste Ergebnisse wurden bereits auf ERA-Tagungen einem breiten Publikum vorgestellt.

### ***Fazit***

In anfänglichen Versuchen wurde zunächst eine „weiche“ Nickelschicht aus einem Nickelsulfat-elektrolyten aufgebaut, da dieses aber nicht porenfrei gelungen ist, wurde versucht aus dem Nickel-Phosphor-Elektrolyten mit unterschiedlichen Stromdichten sowohl eine „weiche“ als auch eine „harte“ Nickelschicht zu erzeugen. Es hat sich bestätigt, dass eine hohe Stromdichte zu einer weicheren Schicht führt als eine niedrige Stromdichte. Somit ist es gelungen, aus einem Elektrolyten ein für die Lasergravur geeignetes Schichtsystem zu entwickeln, das für die weiteren Abtragsversuche von der Fa. IPT zur Verfügung gestellt wurde.

Mit dem Digilas Mikrostrukturierungssystem konnte unter Verwendung einer Nickel-Schicht der gesamte Tiefdruck-Prozessablauf aufgezeigt werden. Von dem Aufbringen der Nickelschicht auf dem Zylinder, über die Strukturierung für den Tiefdruckprozess bis hin zum eigentlichen Druck in einer konventionellen Druckmaschine. Die Verwendung von Ultrakurzpuls-Lasern erlaubt eine nahezu materialunabhängige Strukturierung. Hier gilt es in einem nächsten Schritt durch eine Parallelisierung von vielen Laserstrahlen die Mikrostrukturierungsprozesszeiten zu reduzieren.

Da Tiefdruckformen vielfach für den Druck von Verpackungen eingesetzt werden, also auch im Lebensmittelbereich und das Material Nickel hier als Gesundheitsbedenklich gilt, bleibt letztendlich die Frage, ob Nickel als Kupfer-Chrom Ersatz akzeptiert werden wird. Derzeit laufen hier noch einige Untersuchungen, deren Ergebnisse für eine zukünftige Verwendung relevant sein werden. Es wurden aber bereits chemisch abgeschiedene Nickel-Phosphor-Schichten für verschiedene Verwendungen im Lebensmittelbereich getestet und zugelassen.

## Inhaltsverzeichnis

Titelblatt.....	1
Projektkennblatt.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	4
Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen.....	6
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen.....	9
Zusammenfassung.....	10
1. Einleitung.....	11
2. Eingesetzte Lasertechnik.....	12
3. Verwendete Nickelschichten.....	15
3.1 „Weiche“ Nickelschicht.....	16
3.2 „Harte“ Nickelschicht.....	16
3.3 Ökologische Betrachtung der Nickelballardhaut.....	17
3.4 Anlagentechnische Voraussetzungen.....	18
3.5 Elektrolytüberwachung.....	19
4. Messtechnik zur Qualitätsanalyse.....	20
4.1 Chromatischer Sensor.....	20
4.2 Mikroskop.....	21
5. Grundlegende Abtragsuntersuchungen.....	22
5.1 Bestimmung der Abtragsschwellfluenz.....	22
5.2 Bestimmung des Abtragsvolumens pro Puls.....	22
5.3 Untersuchungen zur Abtragsoptimierung.....	22
6. Messergebnisse.....	23
6.1 Nickel.....	23
6.1.1 Bestimmung der Schwellfluenz.....	23
6.1.2 Abtragsqualität: Näpfchentiefe 50µm.....	23
6.1.3 Abtragsqualität: Näpfchentiefe 250µm.....	25
6.2 Kupferbeschichtetes Nickel.....	27
6.2.1 Abtragsqualität: Näpfchentiefe 50µm.....	27
6.3 Phosphor beschichtetes Nickel.....	28
6.3.1 Abtragsqualität: 50µm.....	28
7. Durchführung der Mikrostrukturierung an Nickelblechen und Zylindern.....	30
7.1 Abtraguntersuchungen an Nickelblechen.....	30

7.1.1	Laserparameter.....	30
7.1.2	Abtragdurchmesser.....	30
7.1.3	Schichtabtrag 2D.....	30
7.1.4	3D-Fläche / Pyramide.....	31
7.2	Abtraguntersuchungen mit Zylindern.....	32
8.	Gravur und Druck von Tiefdruckzylindern.....	35
8.1	Gravur und Andruck eines Tiefdruckzylinders.....	35
8.2	Gravur eines Tiefdruckzylinders und Druck an der HDM in Stuttgart.....	37
8.2.1	Zylinder.....	37
8.2.2	Bebilderung des Zylinders.....	37
8.2.3	Druck des Zylinders an der HDM in Stuttgart.....	40
8.2.4	Druckergebnisse.....	45
8.2.4.1	Schriften.....	46
8.2.4.2	Liniaturen.....	47
8.2.4.3	Halbtöne.....	49
9.	Fazit.....	50
10.	Literaturverzeichnis.....	53

## 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. 13
- Abb. 02: Aufgebaute Versuchsanlage mit integriertem Laser zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen zur Laser-Direktgravur (Fa. Schepers GmbH & Co. KG/Vreden)..... S. 13
- Abb. 03: Pikosekunden-Laser Typ „TruMicro 5050“ mit Bearbeitungskammer beim Projektpartner Laserzentrum (LFM)..... S. 14
- Abb. 04: Vorbehandlung eines Tiefdruckzyl. vor dem Aufbringen der Nickelschicht..... S. 15
- Abb. 05: Tiefdruckzylinder während der Beschichtung in der Rotoplate..... S. 19
- Abb. 06: Links im Bild: Messprinzip des Chromatischen Sensors: Aufgrund der wellenlängenabhängigen Brennweite der Linse wird nur die Frequenz im reflektierten Spektrum maximal durchgelassen, hieraus lassen sich Rückschlüsse über die Topographie der Probe machen. Rechts: Das verwendete Mikroskop der Firma Olympus /Typ BX6..... S. 20
- Abb. 07: In dem Diagramm ist die Fluenz über die abgetragene Fläche dargestellt. Die untere Gerade (hier rot) schneidet die x-Achse bei  $0,05 \text{ J/cm}^2$  und gibt die Schwellfluenz wieder. Die obere Gerade (hier grün) schneidet die x-Achse bei ungefähr  $10 \text{ J/cm}^2$  und gibt die thermische Schwellfluenz wieder. Außerdem sind zu ausgewählten Messpunkten die dazu gehörigen Bohrungen abgebildet. Die Bohrungen wurden mit 80 Pulsen generiert ..... S. 23
- Abb. 08: Erstellung von Nöpfchen mit  $50\mu\text{m}$  – Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scandurchläufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balken) steigt dabei mit zunehmender Fluenz an..... S. 24
- Abb. 09: Profilschnitt durch zwei Nöpfchenstrukturen. Die mit  $1,6 \text{ J/cm}^2$  und 35 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist einen wesentlich glatteren Grund auf, als die mit  $10 \text{ J/cm}^2$  und 11 Wiederholungen generierte Struktur (rechts)..... S. 24
- Abb. 10: REM-Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme im Makro-Bereich; Im rechten Bild im Mikro-Bereich..... S. 25
- Abb. 11: Erstellung von Nöpfchen mit  $250\mu\text{m}$ -Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scandurchläufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balken) steigt dabei mit zunehmender Fluenz. .... S. 26
- Abb. 12: Profilschnitt durch zwei Nöpfchenstrukturen. Die mit  $1,6 \text{ J/cm}^2$  und 230 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist einen wesentlich glatteren Grund auf als die mit  $10 \text{ J/cm}^2$  und 40 Wiederholungen generierte Struktur (rechts)..... S. 26
- Abb. 13: REM Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme mit 200-facher Vergrößerung: Im rechten Bild eine Aufnahme mit 3000-facher Vergrößerung..... S. 26

Abb. 14:	Erstellung von Nöpfchen mit 50µm-Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scanabläufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balke) steigt dabei mit zunehmender Fluenz.....	S. 27
Abb. 15:	Profilschnitt durch zwei Nöpfchenstrukturen. Die mit 0,5 J/cm <sup>2</sup> und 80 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist eine wesentlich höhere Unebenheit aus als die mit 1,5 J/cm <sup>2</sup> und 40 Wiederholungen generierte Struktur (rechts).....	S. 28
Abb. 16:	REM-Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme mit 200-facher Vergrößerung; Im rechten Bild eine Aufnahme mit 3000-facher Vergrößerung.....	S. 28
Abb. 17:	Erstellung von Nöpfchen mit 50µm-Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scandurchläufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balken) steigt dabei mit zunehmender Fluenz. ....	S. 29
Abb. 18:	Profilschnitt durch zwei Nöpfchenstrukturen. Die mit 0,8 J/cm <sup>2</sup> und 60 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist einen wesentlich glatteren Grund auf als die mit 5 J/cm <sup>2</sup> und 23 Wiederholungen generierte Struktur (rechts).....	S. 29
Abb. 19:	REM-Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme mit 200-facher Vergrößerung; Im rechten Bild: eine Aufnahme mit 3000-facher Vergrößerung.....	S. 29
Abb. 20:	Abtragspur eines Fokustests.....	S. 30
Abb. 21:	links: Datenbestand einer Tiefdruckzelle, rechts: eingestellte Auflösung.....	S. 31
Abb. 22:	Gravierte Tiefdruckzelle in Rautenform.....	S. 31
Abb. 23:	8-bit Datenbestand einer Pyramide.....	S. 32
Abb. 24:	3D-strukturierte Pyramide in Nickel-Oberfläche.....	S. 32
Abb. 25:	Gravierter Tiefdruckzylinder mit ps-Laser.....	S. 33
Abb. 26:	ps-Laser Gravur, Halbtöne mit 5%, 10% und 20%.....	S. 34
Abb. 27:	ps-Laser Gravur, Halbtöne mit 40%, 60% und 80%.....	S. 34
Abb. 28:	ps-Laser Gravur, Halbtöne mit 90% und 100%.....	S. 34
Abb. 29:	ns-Laser Gravur, Halbtöne mit 40%, 60% und 80%.....	S. 34
Abb. 30:	ns-Laser Gravur, Halbtöne mit 90% und 100%.....	S. 35
Abb. 31:	Gravierter Tiefdruckzylinder mit ns-Laser.....	S. 35
Abb. 32:	Andruck des mit ns-Laser gravierten Tiefdruckzylinder auf Foliensubstrat.....	S. 36
Abb. 33:	Gedruckte Giluolchen und Strukturen.....	S. 36
Abb. 34:	Gesamtansicht des mit ps-Laser gravierten Tiefdruckzylinders.....	S. 37



Abb. 35:	Gravierter Zylinder mit Halbton-Bild und Schriften.....	S. 37
Abb. 36:	Gravierter Zylinder mit Liniaturen.....	S. 38
Abb. 37:	links: Rauten-Rasterzelle 80 l/cm, rechts: Rauten-Rasterzelle 100 l/cm.....	S. 38
Abb. 38:	links: Rauten-Rasterzelle 80 l/cm, rechts: Rauten-Rasterzelle 100 l/cm.....	S. 39
Abb. 39:	links: Rauten-Rasterzelle, rechts: Hexagon-Rasterzelle.....	S. 39
Abb. 40:	links: Hexagon-Rasterzelle, rechts: Rauten-Rasterzelle.....	S. 39
Abb. 41:	links: 1Pt-Schrift ohne Outline, rechts: 1Pt-Schrift mit Outline.....	S. 40
Abb. 42:	Mikroskopaufnahme eines Linienrasters.....	S. 41
Abb. 43:	Druckmaschine ROTOMEC MW 60 der Fa. Bobst.....	S. 41
Abb. 44:	Zylinderrevolver zur Maschinenbestückung.....	S. 42
Abb. 45:	Farbwanne mit Farbpumpe.....	S. 42
Abb. 46:	Seitenansicht eine Farbwerks mit Farbzuführsystem.....	S. 43
Abb. 47:	Einbringen eines Zylinders in ein Farbwerk.....	S. 43
Abb. 48:	Zylinder in Farbwerk.....	S. 44
Abb. 49:	Bedienoberfläche der Druckmaschine.....	S. 44
Abb. 50:	Substrat-Aufrollstation der Druckmaschine.....	S. 45
Abb. 51:	Ausdruck auf Papiersubstrat und auf Foliensubstrat.....	S. 45
Abb. 52:	Liniaturen und Schriften.....	S. 46
Abb. 53:	Kreise 900µm bis 50µm.....	S. 46
Abb. 54:	Mikroskopaufnahme verschiedener Schrifthöhen 1Pt = 0,352µm.....	S. 47
Abb. 55:	2Pt Schrifthöhe mit Löchern.....	S. 47
Abb. 56:	Messung der positiv ausgedruckten Linienbreite.....	S. 48
Abb. 57:	Messung der negativ ausgedruckten Linienbreite.....	S. 48
Abb. 58:	Negativ und positiv ausgedruckter Kreis mit einer Linienbreite von 50µm.....	S. 48
Abb. 59:	Schnittdarstellung einer 5% (links) und 50% (rechts) Rasterzelle.....	S. 49
Abb. 60:	Schnittdarstellung einer 100% Rasterzelle.....	S. 49
Abb. 61:	Ausdruck einer 5%, 50% und 100% Rasterzelle auf Papiersubstrat.....	S. 49
Abb. 62:	Innovation AWARD der ERA.....	S. 49

## Tabellen

Tab. 1:	In diesem Forschungsvorhaben eingesetzte Laserquellen.....	S. 11
Tab. 2:	Vergleich des Energieverbrauchs einer Nickel- und klassischen Ballardhaut bei halber Eintauchtiefe und einer Zylinderoberfläche von 1m <sup>2</sup> bei 45µm Schichtdicke des weichen Nickels.....	S. 18
Tab. 3:	Vergleich des Energieverbrauchs einer Nickel- und einer klassischen Ballardhaut bei halber Eintauchtiefe und einer Zylinderoberfläche von 1m <sup>2</sup> bei 80µm Schichtdicke des weichen Nickels .....	S. 19
Tab. 4:	Vergleich der Stundensätze von ns- und ps-Lasern.....	S. 34
Tab. 5:	Rasterparameter der Gravurtests.....	S. 39

## Verzeichnis von Begriffen und Abkürzungen

### Begriffe

UKP: Ultra-Kurz-Puls

LFM: Laserzentrum FH Münster

IPT: International Plating Technology

### Abkürzungen

$\lambda$  = Wellenlänge

HV = Härte Vickers

$P_L$  = 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

ns = Nanosekunde

ps = Pikosekunde

## Zusammenfassung

Eine ökonomische Laser-Mikrostrukturierung von Tiefdruckzylindern ist eine Herausforderung in der industriellen Fertigung. In diesem Projekt wurde das übliche Kupfer-Chrom-Schichtsystem (Zwei-Material-System) durch eine Nickelschicht (Ein-Material-System) 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.

In einem ersten Schritt wurde in Orientierungsversuchen der Schwerpunkt auf die Laserstrukturierbarkeit von zwei unterschiedlichen Nickelschichten (Rein-Nickel und Nickel-Phosphor) durchgeführt. Eine Nickel-Phosphor-Schicht besitzt eine deutlich höhere Härte (750HV, Rein-Nickel=250HV) und dient somit als Verschleißschicht. Die erstellten Flachproben wurden hinsichtlich der Möglichkeit untersucht, mit ps-Lasern bei Wellenlängen von 1070nm ablatieren zu können. Die Auswertung der eingebrachten Teststrukturen erfolgte mittels Lichtmikroskop. Außerdem wurden am LFM die hier erzeugten Strukturen mit einem 3D-Meßsystem vermessen, um eine Aussage über die Abtragtopographie treffen zu können. Hierauf aufbauend wurden drei kleine Testzylinder erstellt und so die zuvor gewonnenen Erkenntnisse des Laserabtrags überprüft.

Es wurde von der Fa. IPT ein konventioneller Tiefdruckzylinder mit einer Doppelschicht versehen. Der Aufbau sah so aus, dass zunächst eine ca. 100µm dicke Rein-Nickel-Schicht aufgebracht wurde, und einem zweiten Schritt eine Nickel-Phosphor-Schicht mit einer Dicke von 20µm als Verschleißschicht. Der Zylinder wurde nach der Gravur in einer Andruckmaschine angedrückt und ausgewertet.

Abschließend wurde ein Zylinder, der Rohling wurde von der Hochschule der Medien in Stuttgart zur Verfügung gestellt, unter normalen Tiefdruckbedingungen getestet. Dieser Zylinder wurde von IPT mit einer Nickel-Phosphor und Rein-Nickel-Schicht versehen. Auf dem Zylinder wurden mit einer Digilas Anlage verschiedene Testmotive mit unterschiedlichen Parametern graviert. Dieser Zylinder wurde dann von der HDM in Stuttgart unter realen Druckbedingungen getestet.

Es konnte in diesem Projekt der gesamte Tiefdruck-Prozessablauf unter Verwendung einer Nickelschicht aufgezeigt werden: Von dem Aufbringen der Nickelschichten (Rein-Nickel und Nickel-Phosphor) auf den Zylinder über die Mikro-Strukturierung / Bilderung für den Tiefdruckprozess bis hin zum eigentlichen Druck in einer konventionellen Druckmaschine. Durch diese Prozesskette konnte ein alternatives Schichtsystem zur derzeitigen Chrom-Kupfer-Schicht aufgezeigt werden.

## 1. Einleitung

Die industriellen Anforderungen zur Herstellung von Druck- und Prägeformen steigen stetig mit der Tendenz, kleinere und verbesserte Strukturen (z. B. höhere Pixeldichten) in Druck- und Prägeverfahren zu ermöglichen. Druckzylinder als Prägewerkzeuge wurden ursprünglich mit lithographischen Verfahren strukturiert. Jedoch geht der aktuelle Trend immer weiter in die Richtung des direkten Laserabtragverfahrens. Die Vorteile liegen dabei in der Flexibilität und der Anwendbarkeit bei verschiedensten Werkstoffen sowie dem relativ geringen Aufwand in der Produktion von Druckwalzen.

Schon seit 1980 werden Lasersysteme im Bereich der Druck- und Prägeformung eingesetzt und stetig weiterentwickelt. Es konnten mit immer kürzer werdenden Pulsdauern und höheren Strahlqualitäten laufend verbesserte Abtragsergebnisse sowie kleiner werdende Strukturen erzielt werden. Ziel dieses Projektes ist es, durch die Weiterentwicklung alternativer Werkstoffe für Tiefdruckzylinder die Direktstrukturierung mit geeigneten Laserstrahlquellen ökonomisch und ökologisch zu verbessern. Mit optimierten Laserstrahlquellen wird eine Reduzierung von Produktionszeiten und -kosten angestrebt. In dem Zusammenhang sollen die bestehenden und aufwendig herzustellenden Kupfer-Chrom-Systeme durch alternative Oberflächenbeschichtungen abgelöst werden. Im Rahmen des Projektes sind dies in erster Linie Nickelschichten (Nickellegierungen), die wesentlich unproblematischer und umweltschonender zu fertigen sind und hierzu auf ihre Strukturierbarkeit hin untersucht werden. Durch die Entwicklung von extrem verschleißfesten Nickeloberflächen ist somit ein Ansatz gefunden, um bisherige Druckzylinder zu ersetzen.

Die Anforderungen, die dabei an eine alternative Beschichtung gestellt werden, lauten:

- Strukturierbarkeit mit Kurzpulslasern und gute Abtragsergebnisse
- Hohe Verschleißbeständigkeit der Beschichtung
- Hohe Abriebfestigkeiten für die Bedruckungen

Gezielte Untersuchungen sollen dazu führen, dass sich die Nickel-Schichten mindestens ähnlich gut mit dem Laser strukturieren lassen wie konventionelle Tiefdruckzylinder. Dazu sollen umfangreiche Abtragsuntersuchungen durchgeführt werden, um die Wechselwirkungsmechanismen und -eigenschaften ermitteln zu können. Die Bestimmung von material-spezifischen Abtragschwellfluenzen sowie thermische Schwellfluenzen und das Abtragsverhalten pro Puls ist notwendig, um Aussagen zum Wechselwirkungsverhalten der spezifischen Nickeloberflächen treffen zu können. Abschließend soll die Qualität des generierten Bodens eines Nöpfchens bewertet werden, um diese den Anforderungen entsprechend mit unterschiedlichen Laserparametern zu verbessern.

## 2. Eingesetzte Lasertechnik

Es wurden zur Mikrostrukturierung von Tiefdruckzylindern einns-Faserlaser und einps-Laser verwendet. Ps-Laser bieten den Vorteil des schmelzarmen Abtrages, ns-Faserlaser haben eine deutlich höhere Abtragsrate verbunden mit einem höheren Schmelzanteil. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht aller in diesem Vorhaben eingesetzten Laserquellen.

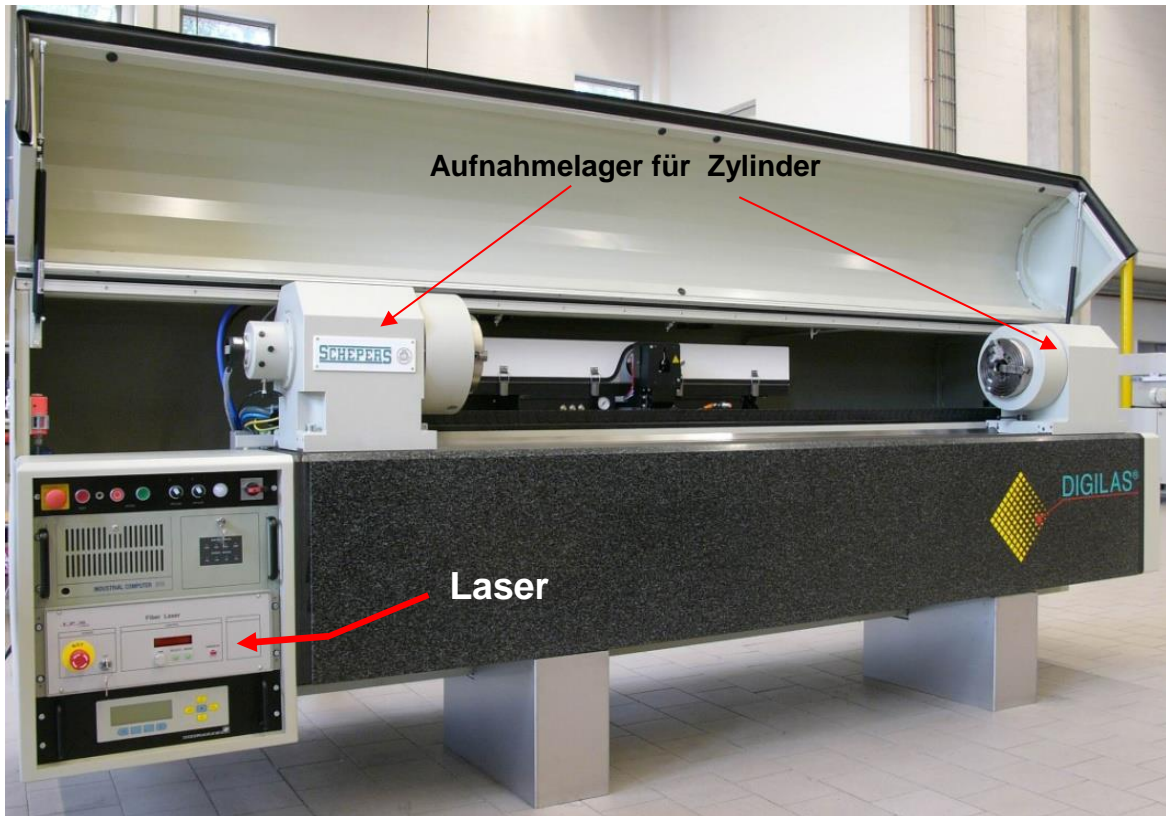
<b>ns-Laser @ 1070 nm (Schepers GmbH &amp; Co. KG)</b>					
Wellenlänge $\lambda$	1070	nm	Maximale Pulsfrequenz $f_{p,max}$	1	MHz
Mittlere Leistung $P_L$	250	W	Strahlqualität $M^2$	2	
Maximale Pulsenergie $E_{p,max}$	1	mJ	Brennweite der Scanoptik $f$	60	mm
Maximale Fluenz $F_{max}$	318	J/cm <sup>2</sup>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

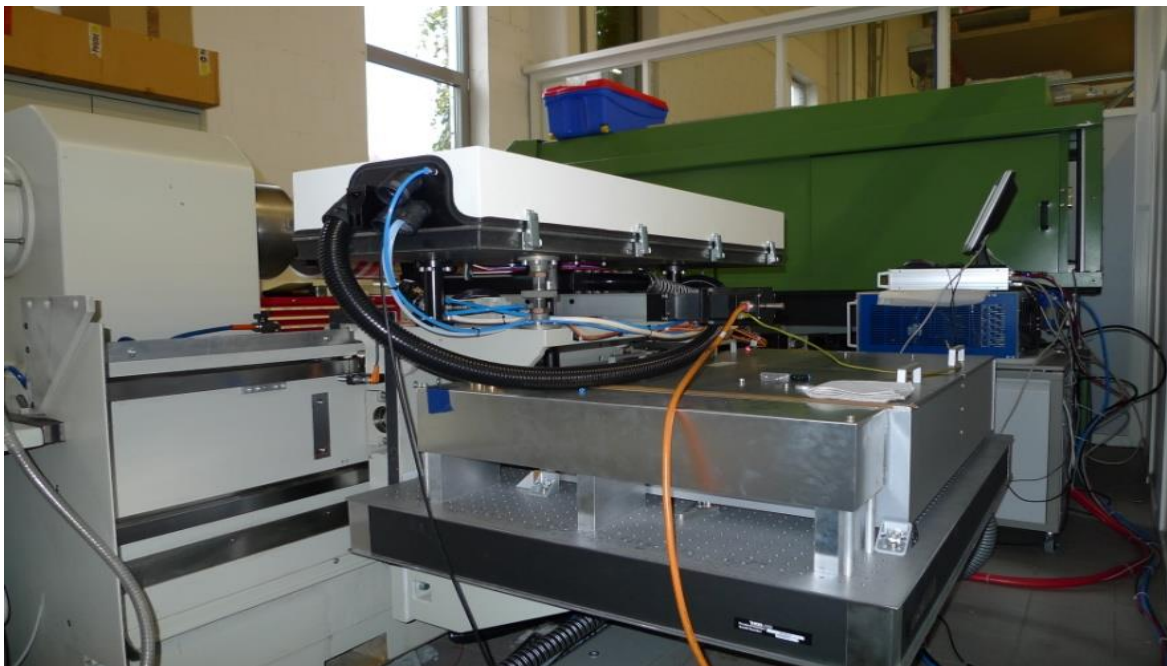
<b>Pikosekunden-Laser TruMicro 5050 compact mit Scanoptik (Laserzentrum LFM)</b>					
Wellenlänge $\lambda$	1030	nm	Maximale Pulsfrequenz $f_{p,max}$	800	kHz
Mittlere Leistung $P_L$	50	W	Strahlqualität $M^2$	< 1,3	
Maximale Pulsenergie $E_{p,max}$	62,5	$\mu\text{J}$	Brennweite der Scanoptik $f$	100	mm
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. 1:** DIGILAS Gravur-System (Typ 2900), mit integriertem Faserlaser beim Antragsteller Fa. Schepers/Vreden



**Abb. 2:** 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. 3:** *Pikosekunden-Laser Typ „TruMicro 5050“ mit Bearbeitungskammer beim Projektpartner Laserzentrum (LFM)*

### 3. Verwendete Nickelschichten

Für die Entwicklung der Nickelschichten wurden zunächst im Becherglas Bleche beschichtet, um die genaue Elektrolytzusammensetzung, die Beschichtungsparameter und das geeignete Anodenmaterial zu ermitteln. Mit diesen Parametern wurden die ersten kleinen Tiefdruckzylinder in einer Testanlage beschichtet.

Die vorverkupferten Zylinder wurden mit einer Polierpaste behandelt, um das Kupfer zu entfetten und zu aktivieren, anschließend mit VE-Wasser gespült, mit einer 5 %igen Schwefelsäure dekapiert und erneut gespült. Die Zylinder wurden im Ballardhautverfahren hergestellt.

Um eine klassische Ballardhaut herzustellen, wird zunächst die Stahlwalze entfettet und eine Grundkupferschicht aufbeschichtet. Auf die Grundkupferschicht wird eine Trennschicht aufgebracht, die es ermöglicht, die Ballardhaut vollständig abzuziehen, was die Herstellungszeit der Tiefdruckzylinder verkürzt. Als Trennschicht können silber- und schwefelhaltige Verbindungen dienen. Anschließend wird eine Gravurkupferschicht aufgebracht. Nach dem Polieren der Kupferhaut erfolgt die elektromechanische Gravur. Nach der Gravur wird der Zylinder entfettet, und eine Chromverschleißschutzschicht wird aufgebracht. Nach dem Druck wird die Ballardhaut abgezogen und der Zylinder kann nach erneutem aufgalvanisieren für ein neues Druckmotiv verwendet werden.

Im vorliegenden Projekt wurden zwei Nickelschichten mit unterschiedlichen Härten anstelle von Kupfer und Chrom beschichtet. Durch die Kombination von zwei Metallen ist das Recycling einer klassischen Ballardhaut schwierig, während die Nickel-Ballardhaut nur aus einem Metall besteht, das problemlos wiederverwertet werden kann.



**Abb. 4:** Vorbehandlung eines Tiefdruckzylinders



### 3.1 „Weiche“ Nickelschicht

Die Beschichtung mit einer weicheren, schneller abscheidenden Rein-Nickelschicht wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

Rein-Nickel:

pH-Wert: 2,2

Temperatur: 65 °C

Stromdichte: 20 A/dm<sup>2</sup>

Anode: Mischoxid

Von der Rein-Nickelschicht wurden zunächst ca. 150 µm mit einer Abscheidegeschwindigkeit von 4 µm/min abgeschieden. Diese Schicht ist glänzend und zeigt Druckspannungen. Diese Schicht konnte nicht absolut porenfrei abgeschieden werden. Daher wurde in weiteren Beschichtungen versucht, die "weiche" Nickelschicht aus dem gleichen Elektrolyten wie die „harte“ Nickelschicht, die sich porenfrei abscheiden ließ, zu beschichten. Um die „weiche“ Nickelschicht aus einem Nickel-Phosphor-Elektrolyten zu beschichten, wurde eine geringere, aber dennoch im Vergleich zu anderen Nickelbeschichtungen höhere, Stromdichte als bei der „harten“ Nickel-Phosphor-Schicht gewählt. Hier konnte die Schichtdicke deutlich reduziert werden, da eine Nickel-Ballardhaut mit nur 45 µm nach der Lasergravur noch abgezogen werden konnte.

### 3.2 „Harte“ Nickelschicht

Die Beschichtung mit einer härteren und verschleißbeständigen Nickel-Phosphor-Schicht wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

Nickel-Phosphor:

pH-Wert: 1,8

Temperatur: 50 - 70 °C

Stromdichte: 25 - 30 A/dm<sup>2</sup>

Anode: Mischoxid

Von der harten Nickel-Phosphor-Schicht wurden ca. 10 µm mit einer Abscheidegeschwindigkeit von bis zu 2 µm/min abgeschieden. Diese antiferromagnetische Schicht ist hochglänzend, spannungsfrei mit Härten zwischen bis zu 750 HV<sub>0,1</sub>.

Mit den gegebenen physikalischen Eigenschaften kann das Nickelschichtsystem wie eine klassische Kupfer-Chrom-Ballardhaut verwendet werden.

Nach beendeten Beschichtungsversuchen in der Testanlage wurden Tiefdruckzylinder in der von IPT entwickelten Beschichtungsanlage ROTOPATE beschichtet.

Die Entscheidung für die weichere und härtere Nickelkombinationsschicht fiel auf Grundlage von Vorversuchen, die ergaben, dass sich durch die Kombination die sauberste Lasergravur erzielen lässt.

### 3.3 Ökologische Betrachtung der Nickel-Ballardhaut

Im vorliegenden Projekt wurden von der weicheren Nickelschicht aus dem Nickel-Phosphor-Elektrolyten nur ca. 45 µm beschichtet anstelle der 80 µm Kupferschicht in der klassischen Ballardhaut. Die aus der harten Nickel-Phosphorschicht bestehende Verschleißschutzschicht war mit ca. 10 µm etwas dicker, als die Chromschicht in der klassischen Ballardhaut, die mit 6 bis 8 µm beschichtet wird. Mit der Nickel-Ballardhaut kann daher deutlich Metall eingespart werden, was sich auch in dem Energieverbrauch für die Beschichtung zeigt (Tab. 2). Tab. 3 zeigt, dass auch bei einer weichen Nickelschicht mit einer Schichtdicke von 80 µm Energie eingespart werden kann. In diesem Fall ist die Beschichtungsdauer höher als bei einer Kupferbeschichtung. Die längere Beschichtungszeit kann aber durch die Einsparung der Zwischenschritte, die im klassischen Ballardhautverfahren zwischen der Kupfer- und der Chrombeschichtung liegen, ausgeglichen werden.

Parameter	Nickel-Ballardhaut		klassische Ballardhaut	
Stromstärke [A]	weiche Nickelschicht	750	Kupfer	1250
Spannung [V]		8		8
Zeit [min]		35		40
Schichtdicke [µm]		45		80
Energieverbrauch [kWh]	3,5		6,7	
Stromstärke [A]	harte Nickelschicht	1500	Chrom	3000
Spannung [V]		8		6
Zeit [min]		5		18
Schichtdicke [µm]		10		6
Energieverbrauch [kWh]	1,0		5,4	
Energieverbrauch [kWh] gesamt	4,5		12,1	

**Tab. 2:** Vergleich des Energieverbrauchs einer Nickel- und einer klassischen Ballardhaut bei halber Eintauchtiefe und einer Zylinderoberfläche von 1 m<sup>2</sup> bei 45 µm Schichtdicke des weichen Nickels

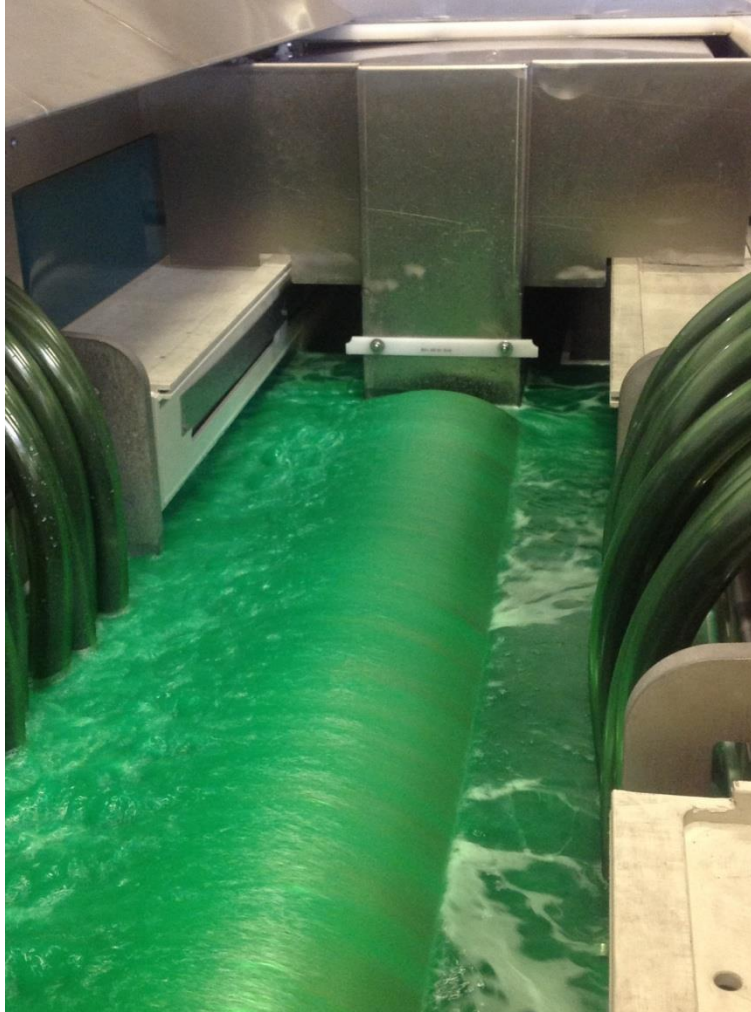
Parameter	Nickel-Ballardhaut		klassische Ballardhaut	
Stromstärke [A]	weiche Nickelschicht	750	Kupfer	1250
Spannung [V]		8		8
Zeit [min]		62		40
Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ]		80		80
Energieverbrauch [kWh]	6,2		6,7	
Stromstärke [A]	harte Nickelschicht	1500	Chrom	3000
Spannung [V]		8		6
Zeit [min]		5		18
Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ]		10		6
Energieverbrauch [kWh]	1,0		5,4	
Energieverbrauch [kWh] gesamt	7,2		12,1	

**Tab. 3:** Vergleich des Energieverbrauchs einer Nickel- und einer klassischen Ballardhaut bei halber Eintauchtiefe und einer Zylinderoberfläche von  $1 \text{ m}^2$  bei  $80 \mu\text{m}$  Schichtdicke des weichen Nickels

### 3.4 Anlagentechnische Voraussetzungen

Bisher werden für die Herstellung von Tiefdruckzylindern im Ballardhautverfahren zwei Beschichtungsanlagen benötigt. Für die Nickelballardhaut wird nur noch eine Anlage benötigt, da beide Schichten aus einem Elektrolyten beschichtet werden können. Hierzu kann eine Kupferbeschichtungsanlage problemlos umgebaut werden. Dazu müssen die bei der Kupferbeschichtung verwendeten Anodenkörbe mit Kupferclippings gegen eine Mischoxid-anode ausgetauscht werden und der Elektrolyt muss rückstandslos aus der Anlage entfernt werden. Sobald keine Kupferrückstände mehr in der Anlage vorhanden sind und die Anode getauscht wurde, kann die vorhandene Beschichtungsanlage mit dem Nickel-Phosphor-Elektrolyten betrieben werden.

### 3.5 Elektrolytüberwachung



**Abb. 5:** Tiefdruckzylinder während der Beschichtung in der ROTOPLATE

Sowohl bei der Beschichtung in der Testanlage, als auch bei der Beschichtung in der ROTOPLATE wurde die Zusammensetzung der Elektrolyte regelmäßig analytisch überwacht, dazu wurde der Nickelgehalt titriert, die organischen Bestandteile im Rein-Nickel-Elektrolyten mit Hochleistungsflüssigchromatographie, die Phosphorkomponenten im Nickel-Phosphor-Elektrolyten mit Ionenchromatographie und die Fremdmetalle Eisen und Kupfer mit Atomabsorption gemessen. Der Puffer wurde je nach Elektrolyt titriert oder mit der Atomabsorption bestimmt.

Die Nachdosierung der einzelnen Komponenten erfolgte nach den Analysewerten, ebenso wie eine Wasserstoffperoxidbehandlung in dem Fall, dass die Konzentrationen der Abbauprodukte der organischen Bestandteile einen gesetzten Grenzwert überstiegen.

## 4. Messtechnik zur Qualitätsanalyse

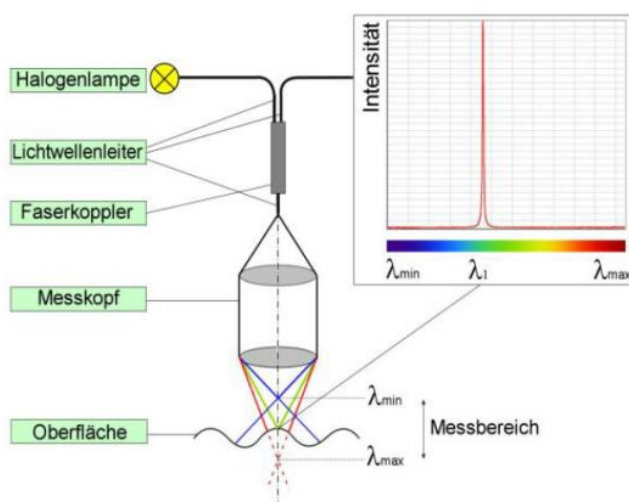
Für die Auswertung der Proben wurden zwei verschiedene Messsysteme verwendet. Beim LFM wurde ein Chromatischer Sensor und zum anderen ein Lichtmikroskop eingesetzt.

Die Analyse erfolgte beim Antragsteller mittels optischem 3D-Profilometer von Keyence, Typ VHX-600D. Chromatischer Sensor

### 4.1 Chromatischer Sensor

Der Chromatische Sensor wurde für die Rauheitsmessung sowie für die Topographievermessung der bearbeiteten Oberfläche verwendet. Im Wesentlichen besteht das System aus zwei Komponenten: Zum einen aus einer Auswerteeinheit, die aus einer Weißlichtquelle und einem Spektrometer besteht. Zum anderen aus einem Linsensystem, welches den Messkopf darstellt. Die beiden Einheiten sind örtlich voneinander getrennt und durch eine Lichtleitfaser miteinander verbunden.

Das Messsystem nutzt die chromatische Aberration zur Höhenmessung. Dabei wird die Messobjektoberfläche mit einer Weißlichtquelle punktförmig beleuchtet. Ein optisches System, mit in diesem Fall „gewollter“ chromatischer Aberration, teilt das Licht in axiale Richtung in seine Spektralfarben auf, sodass sich für jede Spektralfarbe ein anderer Brennpunkt in axiale Richtung ergibt. Durch die Auswertung der reflektierten Intensität in Abhängigkeit der Wellenlänge kann auf den Abstand zwischen Sensorkopf und Messobjektoberfläche zurückgeschlossen werden. Die Probe kann mittels Achssystem unterhalb des Messkopfes verfahren werden, sodass eine Vermessung der Oberflächentopographie möglich wird. Der verwendete Messaufbau erreicht hierbei eine axiale Auflösung von 1  $\mu\text{m}$  und eine laterale Auflösung von 6  $\mu\text{m}$ . Das Messprinzip wird in der Abb. 2 (links im Bild) dargestellt.



**Abb. 6:** Links im Bild: Messprinzip des Chromatischen Sensors: Aufgrund der wellenlängenabhängigen Brennweite der Linse wird nur eine Frequenz im reflektierten Spektrum maximal durchgelassen, hieraus lassen sich Rückschlüsse über die Topographie der Probe machen. Rechts: Das verwendete Mikroskop der Firma Olympus/Typ BX60.

## 4.2 Mikroskop

Bei dem verwendeten Mikroskop handelt es sich um das BX60 der Firma Olympus, s. Abb. 2 (rechts im Bild). Es sind folgende Vergrößerungen möglich, je nach Wahl des Objektivs: 50 x, 100 x, 200 x, 500 x und 1000 x. Mit Hilfe von Mikrometerschrauben und einer digitalen Auswerteeinheit können Proben vermessen werden, hierbei werden in lateraler und axialer Auflösung Genauigkeiten von wenigen Mikrometern erreicht.

## **5. Grundlegende Abtragsuntersuchungen**

### **5.1 Bestimmung der Abtragsschwellfluenz**

Ziel dieser Untersuchungen war es, für das Trägermaterial (Nickel) individuell die Abtragsschwellfluenzwerte zu ermitteln. Ergebnis dieser Untersuchung sind zwei unterschiedliche Fluenzen, s. Abb. . Die erste Fluenz gibt die Grenze zum Materialabtrag wieder (unterer Fluenzbereich), die zweite den Wert der thermischen Schwellfluenz (oberer Fluenzbereich). Der Bereich zwischen den beiden Ergebnissen wird durch einen abdampf-generierten, kalten Materialabtrag dominiert. Oberhalb der thermischen Schwellfluenz ist der Abtrag durch einen deutlichen thermischen Einflussbereich gekennzeichnet. Für die Versuche wurde zur Bestimmung der Schwellfluenzen ausschließlich das Trägermaterial (Nickel) untersucht, da die äußerst dünnen Beschichtungen keine zuverlässigen Ergebnisse lieferten.

### **5.2 Bestimmung des Abtragsvolumen pro Puls**

Um in den nachfolgenden Untersuchungen nahezu identische Abtragsvolumina vergleichen zu können, wurde das Abtragsvolumen pro Puls bestimmt. Hierfür wurde lediglich die Fluenz verändert, s. Abschnitt 3.1.1. Die Brennweite der Optik, die Vorschubgeschwindigkeit und der Pulsabstand wurden konstant gehalten.

### **5.3 Untersuchungen zur Abtragsoptimierung**

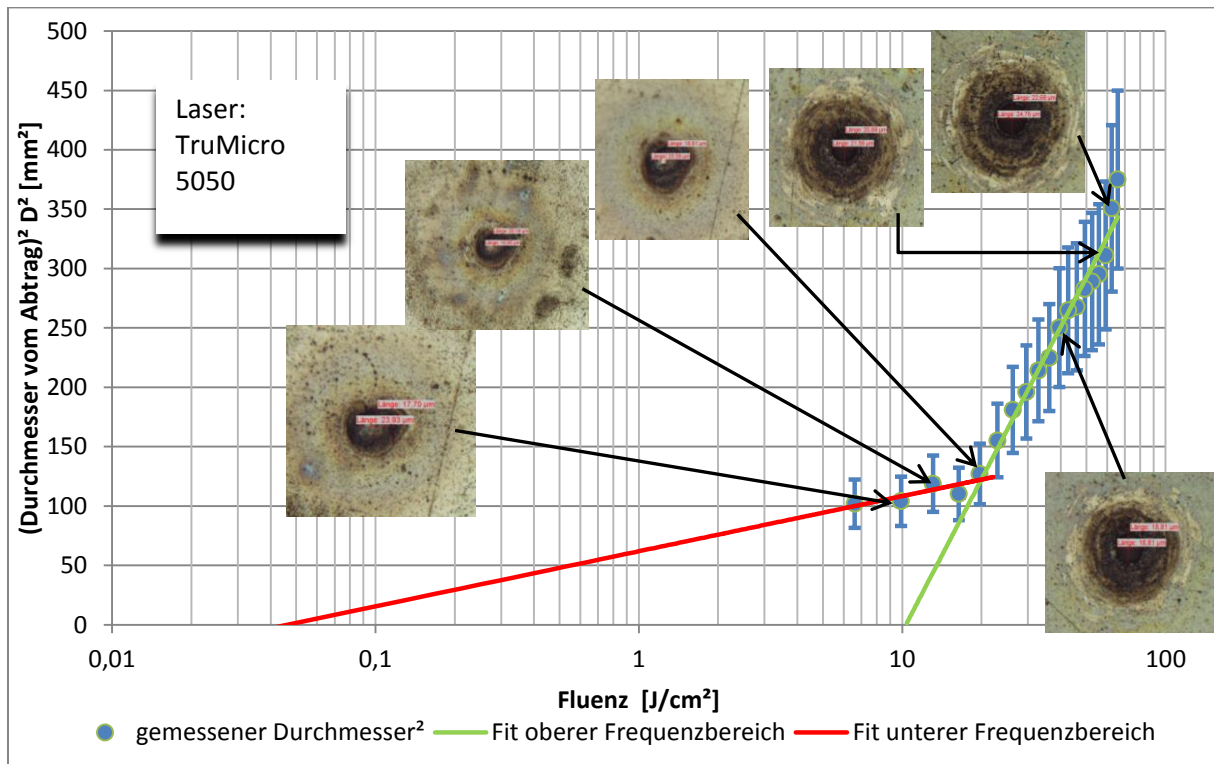
Für eine optimale Bearbeitungsqualität wurde die Originaloberfläche als Referenz gewählt. Bearbeitete Flächen sollen möglichst eine gleichwertige Oberflächengüte aufweisen. Daher war es wichtig, die Einflüsse unterschiedlicher Prozessparameter auf die Qualität der Oberfläche näher zu untersuchen. Dies wurde an zwei verschiedenen Abtragsvolumina durchgeführt, für  $6 \times 6 \times 0.05$  mm und  $6 \times 6 \times 0.25$  mm. Aus vorhergehenden Untersuchungen konnte für die gewünschten Tiefen die Anzahl der nötigen Durchläufe abgeschätzt und gegebenenfalls korrigiert werden. Die Ergebnisse wurden mittels der Rauheit der bearbeiteten Oberfläche bewertet. Hierfür wurde jeweils ein Profilschnitt mit dem Chromatischen Sensor erstellt. Für die Rauheit waren insbesondere Abweichungen vom Mittelwert der Höhenunterschiede von Interesse. Die Anzahl der im Laserprogramm festgelegten Wiederholungen gibt Auskunft über die zeitliche Dauer der Bearbeitung.

## 6. Messergebnisse

### 6.1 Nickel

#### 6.1.1 Bestimmung der Schwellfluenz von Rein-Nickel

Die Messung zur Bestimmung der Schwellfluenz, s.Abb. , hat ergeben, dass oberhalb von  $0,05 \text{ J/cm}^2$  der Abtrag des Materials beginnt. Im Bereich zwischen  $0,05 \text{ J/cm}^2$  und  $10 \text{ J/cm}^2$  ist der abgetragene Bereich ohne merkbare thermische Einflüsse. Oberhalb von  $10 \text{ J/cm}^2$  ist ein deutlicher thermischer Einfluss erkennbar.

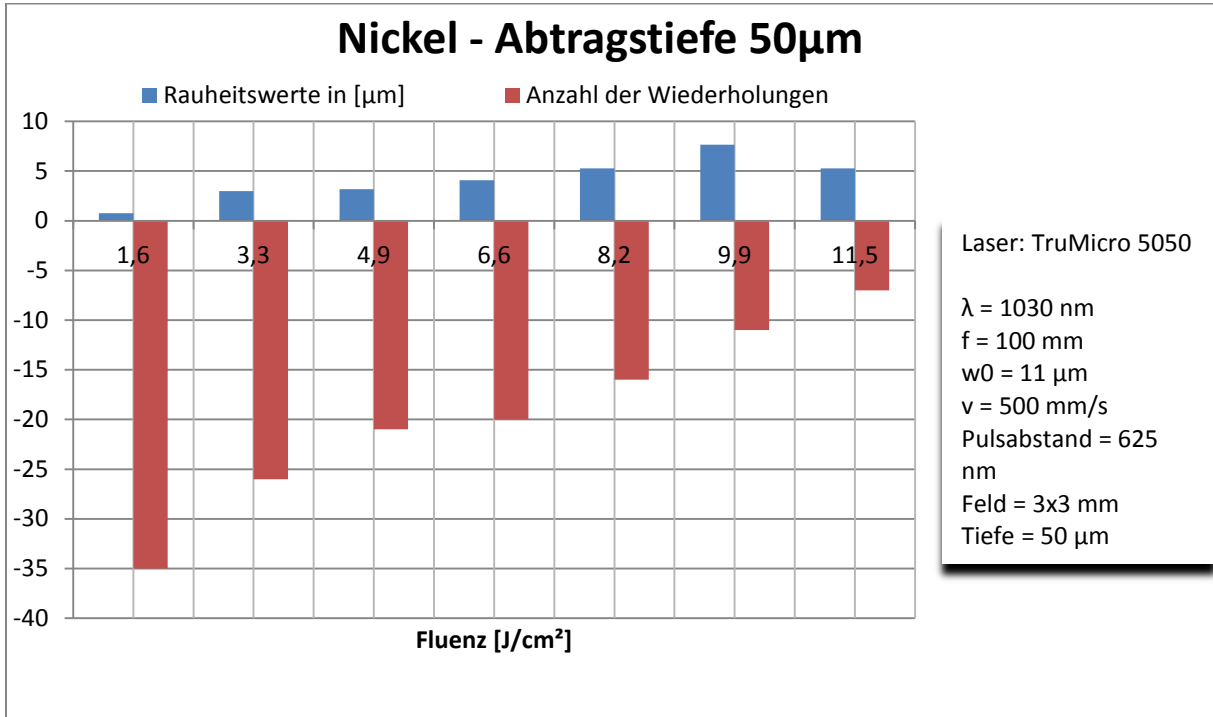


**Abb. 7:** In dem Diagramm ist die Fluenz über die abgetragene Fläche dargestellt. Die untere Gerade (hier rot) schneidet die x-Achse bei  $0,05 \text{ J/cm}^2$  und gibt die Schwellfluenz wieder. Die obere Gerade (hier grün) schneidet die x-Achse bei ungefähr  $10 \text{ J/cm}^2$  und gibt die thermische Schwellfluenz wieder. Außerdem sind zu ausgewählten Messpunkten die dazu gehörigen Bohrungen abgebildet. Die Bohrungen wurden mit 80 Pulsen generiert.

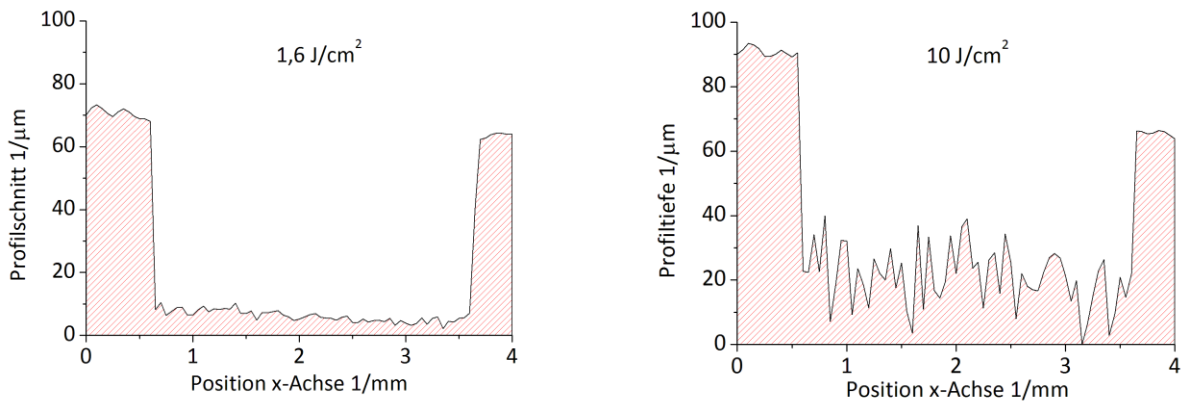
#### 6.1.2 Abtragsqualität: Näpfchentiefe $50 \mu\text{m}$

Sollen Näpfchen mit einer Strukturtiefe von  $50 \mu\text{m}$  erzeugt werden, so kann dies bei einer hohen Fluenz mit wenigen Wiederholungen oder bei einer niedrigen Fluenz mit wesentlich mehr Wiederholungen erfolgen (s. Abb. 4). In der Abb. sind zwei unterschiedliche Profilschnitte gegenübergestellt; das linke Bild ist mit einer Fluenz von  $1,6 \text{ J/cm}^2$  und das rechte mit  $10 \text{ J/cm}^2$  bearbeitet worden. Die gemessene Rauheit unterscheidet sich um den Faktor 7. Anhand von REM-Aufnahmen (Abb. 6) wird erkennbar, dass im Makro-Bereich der Untergrund glatt zu sein scheint. Allerdings ist unter höheren Vergrößerungen eine Substrukturierung erkennbar. Die Zeitersparnis bei Verwendung einer hohen Fluenz geht jedoch zu Lasten der Oberflächenqualität am Strukturgrund.

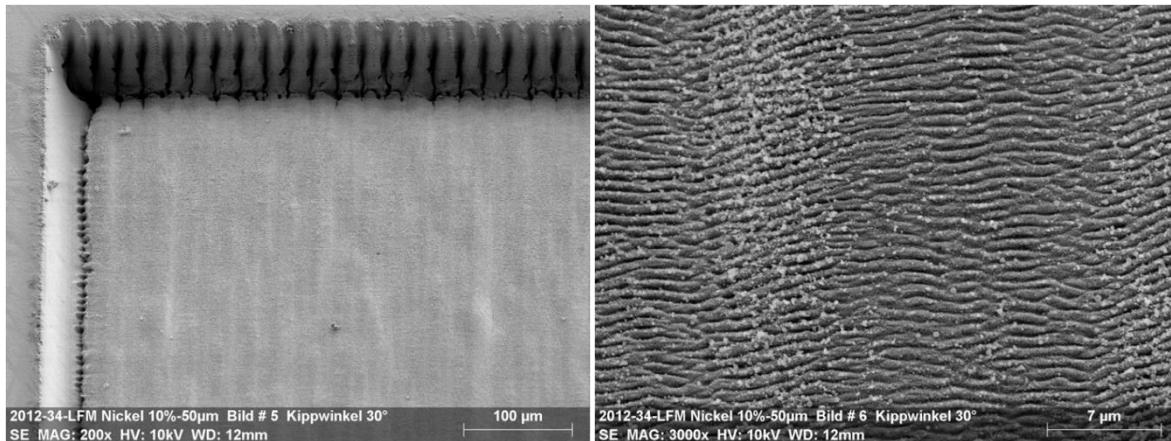




**Abb. 8:** Erstellung von Napfchen mit 50  $\mu$ m – Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scandurchlaufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balken) steigt dabei mit zunehmender Fluenz.



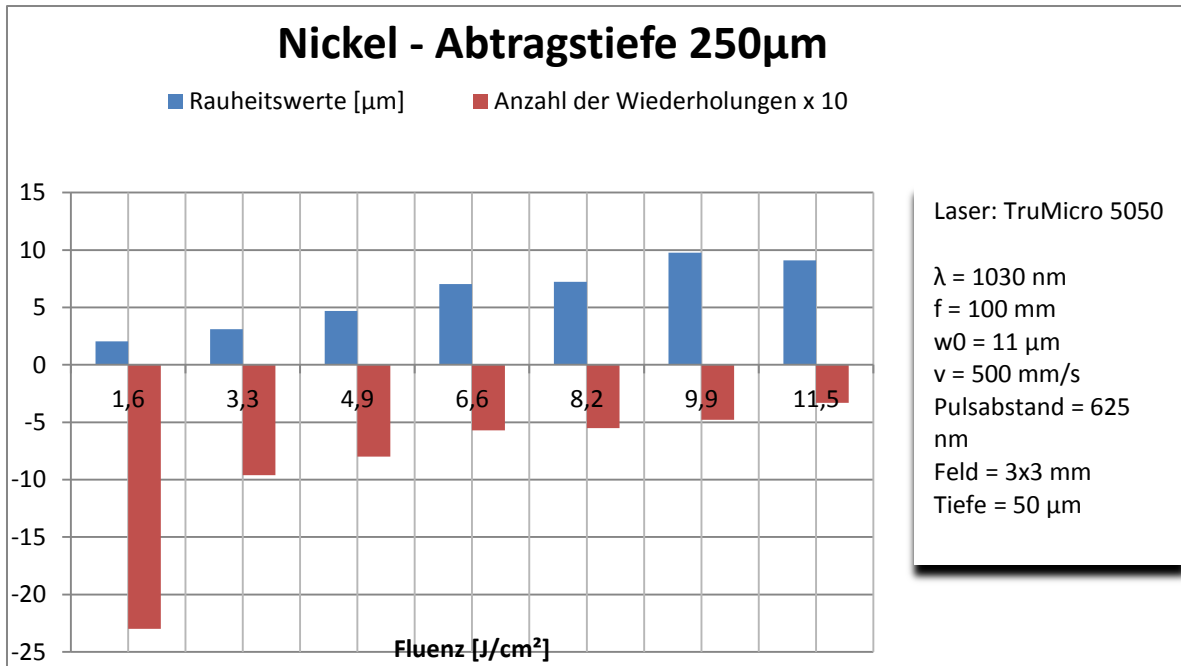
**Abb. 9:** Profilschnitt durch zwei Napfchenstrukturen. Die mit 1,6 J/cm<sup>2</sup> und 35 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist einen wesentlich glatteren Grund auf, als die mit 10 J/cm<sup>2</sup> und 11 Wiederholungen generierte Struktur (rechts).



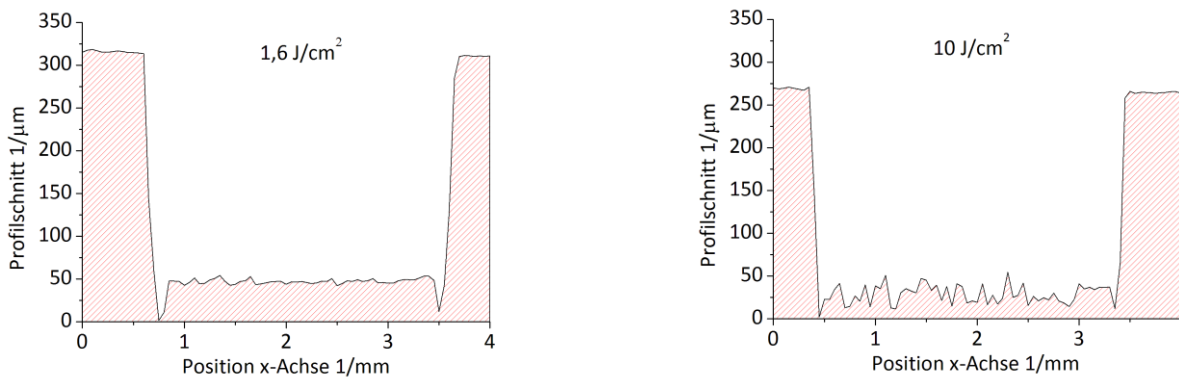
**Abb. 10:** REM-Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme im Makro-Bereich; Im rechten Bild im Mikro Bereich.

### 6.1.3 Abtragsqualität: Näpfchentiefe 250 µm

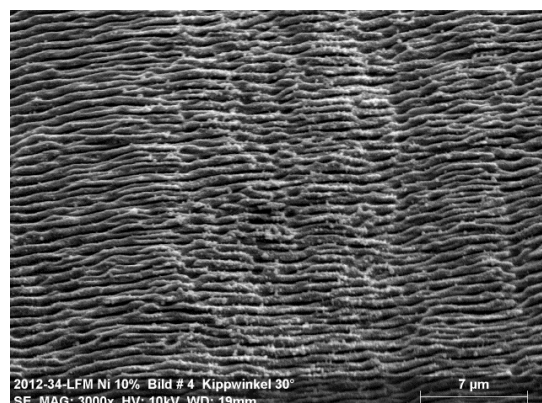
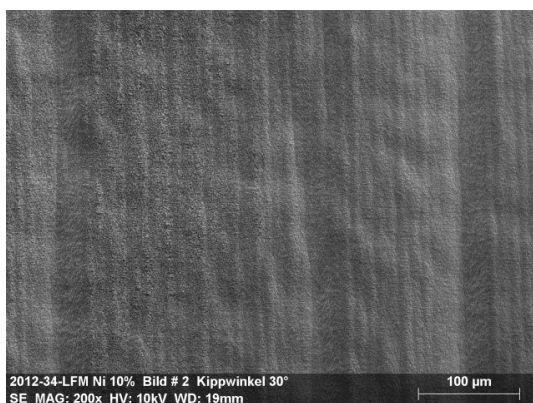
Eine zweite Testreihe wurde mit einer Näpfchentiefe von 250 µm durchgeführt. Dabei lässt sich die um den Faktor 5 gesteigerte Tiefe nicht mit einer proportional erhöhten Anzahl von Scan-Wiederholungen realisieren. Die Studien zeigen, dass eine wesentlich größere Zahl an Wiederholungen notwendig ist. Dies lässt sich vermutlich mit der zunehmenden Entfernung der Strukturebene vom idealen Arbeitsabstandes (Fokuspunkt) erklären. Abhilfe könnte somit eine Nachführung der Fokuslage bewirken. Es stellt sich am Strukturgrund eine nur marginal geringere Oberflächenqualität als bei 50 µm-Strukturen ein (s. Abb. 7). Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Rauheit der Näpfchenstruktur im Allgemeinen nur geringfügig von der Strukturtiefe abhängt (s. Abb. 8). Werden die Profilschnitte von 50 µm (s. Abb. 5) und die bei 250 µm (Abb. 8) verglichen, so fallen bei der größeren Strukturtiefe Vertiefungen im Randbereich auf. Diese Grabenbildung ist allgemein bekannt und beruht auf Reflexionseffekten an der Strukturwand sowie teilweise nicht optimalen Parametern für die Beschleunigung und Verzögerung im Scanvorgang.



**Abb. 11:** Erstellung von Nöpfchen mit 250 µm-Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scandurchläufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balken) steigt dabei mit zunehmender Fluenz.



**Abb. 12:** Profilschnitt durch zwei Nöpfchenstrukturen. Die mit 1,6 J/cm<sup>2</sup> und 230 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist einen wesentlich glatteren Grund auf als die mit 10 J/cm<sup>2</sup> und 40 Wiederholungen generierte Struktur (rechts).



**Abb. 13:** REM Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme mit 200-facher Vergrößerung; Im rechten Bild eine Aufnahme mit 3000-facher Vergrößerung.

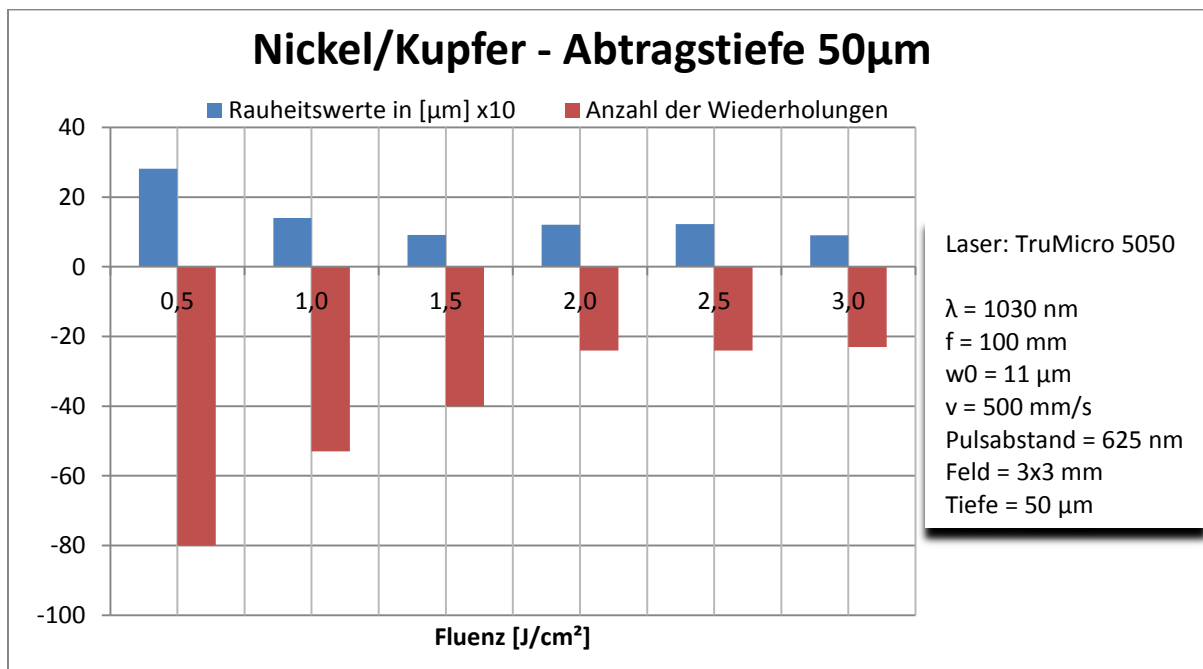
## 6.2 Rein-Nickel-Schicht

### 6.2.1 Abtragsqualität: Näpfchentiefe 50 $\mu\text{m}$

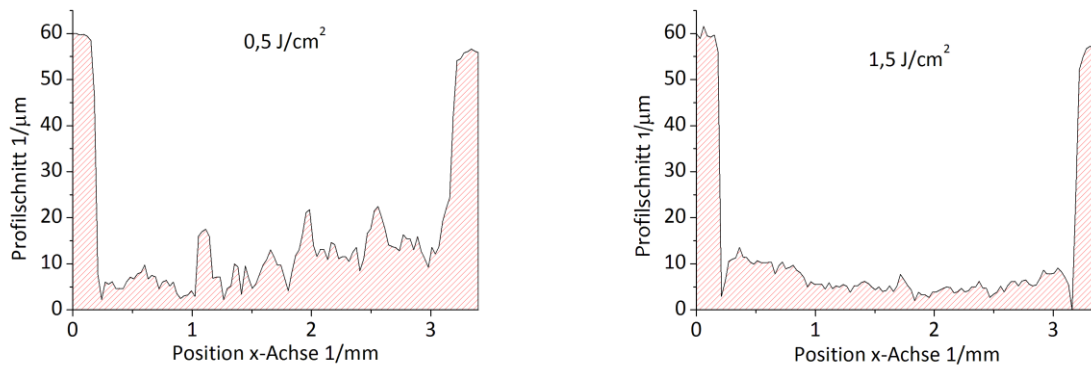
Kupfer beschichtetes Nickel weist ein deutlich abweichendes Abtragsverhalten gegenüber dem reinen Grundwerkstoff auf. Niedrige Fluenzen ergeben signifikant höhere Rauheitswerte bis 30  $\mu\text{m}$  (Standardabweichung vom Mittelwert). Nur in einem Energiebereich um 2  $\text{J}/\text{cm}^2$  konnten mit ca 10  $\mu\text{m}$  Rauheit akzeptable Oberflächengüten generiert werden. Fluenzen oberhalb von 4  $\text{J}/\text{cm}^2$  führten zu keinen praktikablen Resultaten.

In Abb. ist das Ergebnis der Profilmessung abgebildet. Zu sehen sind die Proben, die mit einer Fluenz von 0,5  $\text{J}/\text{cm}^2$  und 1,5  $\text{J}/\text{cm}^2$  bearbeitet wurden. Zwischen den gemessenen Unebenheiten liegt ein Faktor von 3. So erreichte die Probe rechts im Bild einen Rauheitswert von etwa 10  $\mu\text{m}$  (Standardabweichung zum Mittelwert), die Probe links im Bild etwa 30  $\mu\text{m}$ .

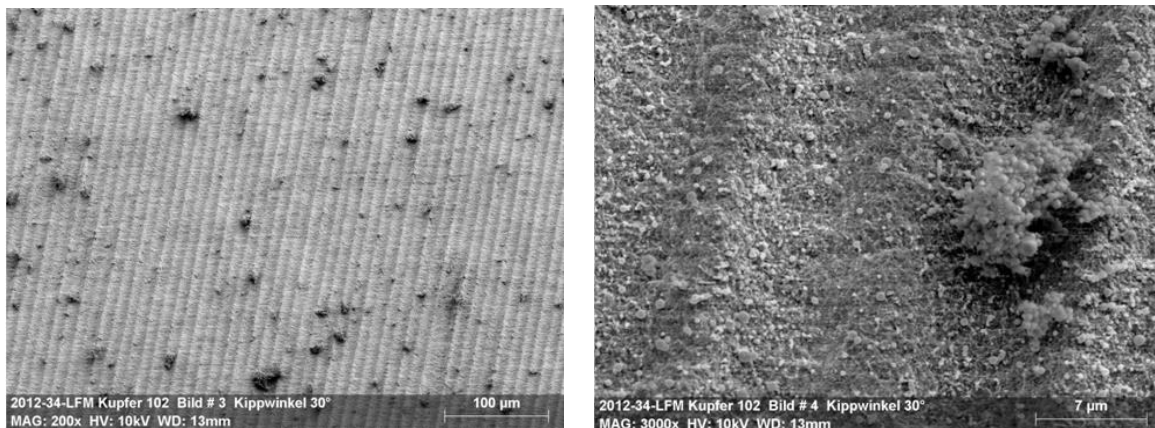
Anhand der REM-Aufnahmen der jeweiligen Proben wurde eine Art Clusterbildung sichtbar. Die Clusterbildung zog sich durch alle Nickelproben hindurch. Sie nahmen unterschiedliche Dimensionen an, gemessen wurden Durchmesser von einigen wenigen Submikrometern bis hin zu 10  $\mu\text{m}$ . Die Clusterstruktur ist ein fester Bestandteil der bearbeiteten Oberfläche und konnte nicht durch Druckluft entfernt werden (s. Abb. 12).



**Abb. 14:** Erstellung von Näpfchen mit 50  $\mu\text{m}$ -Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scandurchläufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balken) steigt dabei mit zunehmender Fluenz.



**Abb. 15:** Profilschnitt durch zwei Nöpfchenstrukturen. Die mit  $0,5 \text{ J/cm}^2$  und 80 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist eine wesentlich höhere Unebenheit auf als die mit  $1,5 \text{ J/cm}^2$  und 40 Wiederholungen generierte Struktur (rechts).

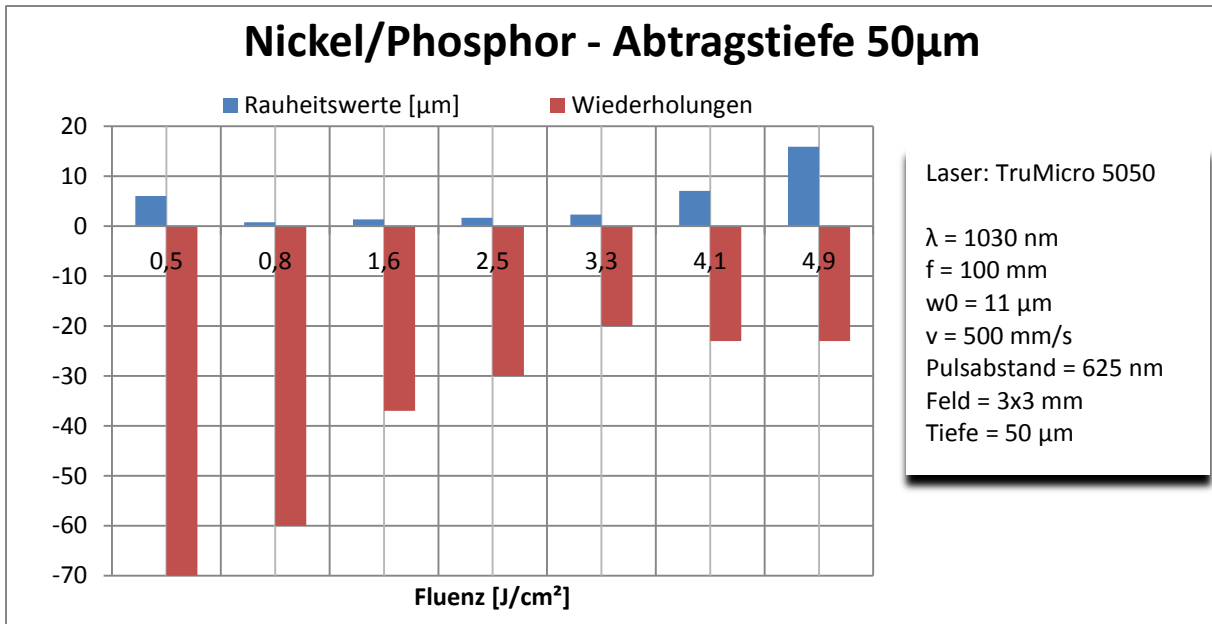


**Abb. 16:** REM-Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme mit 200-facher Vergrößerung; Im rechten Bild eine Aufnahme mit 3000-facher Vergrößerung.

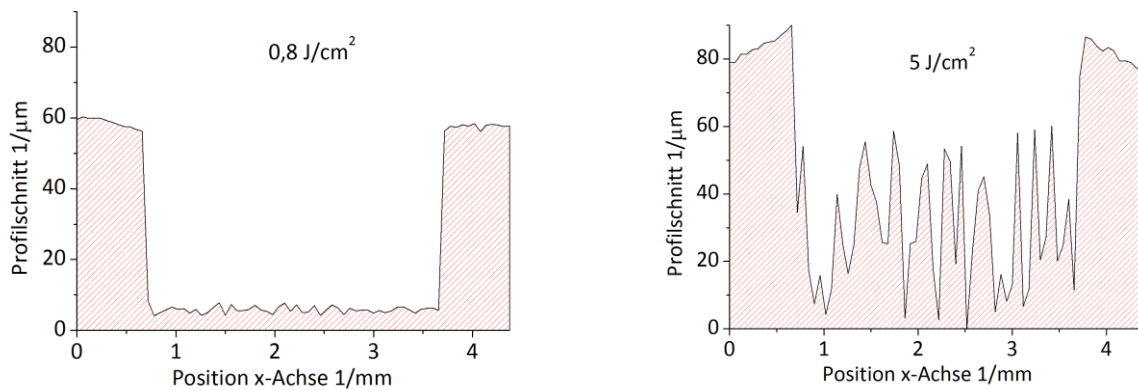
## 6.3 Nickel-Phosphor-Legierung

### 6.3.1 Abtragsqualität: $50 \mu\text{m}$

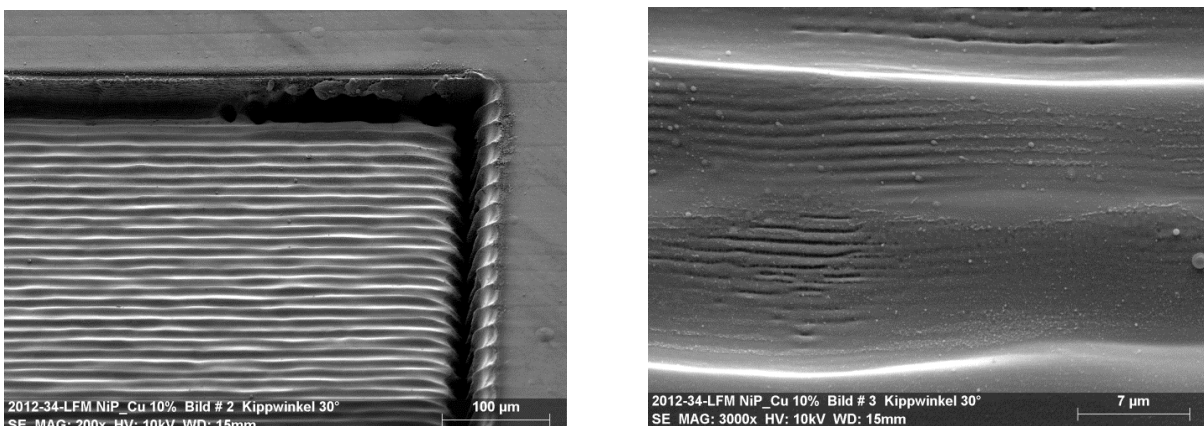
Die Nickel-Phosphor-Schicht wies in einem Fluenzbereich von  $0,8$  bis  $3,3 \text{ J/cm}^2$  deutlich verbesserte Strukturierungsqualitäten als der reine Grundwerkstoff auf. Dabei ergaben sich leichte Vorteile für Parameter mit größerer Anzahl von Scandurchläufen. Oberhalb von  $4 \text{ J/cm}^2$  steigt die Oberflächenrauheit rapide an, so dass die Studie hier bei  $5 \text{ J/cm}^2$  gestoppt wurde. Welche Diskrepanz sich dabei einstellt, zeigt der Profilschnitt von  $0,8$  und  $5 \text{ J/cm}^2$  (s. Abb. 14).



**Abb. 17:** Erstellung von Napfchen mit 50  $\mu\text{m}$ -Strukturtiefe bei variierender Fluenz. Durch Anpassung der Anzahl an Wiederholungen der Scandurchlaufe (rote Balken) kann die Tiefe konstant gehalten werden. Die Rauheit am Strukturgrund (blauer Balken) steigt dabei mit zunehmender Fluenz.



**Abb. 18:** Profilschnitt durch zwei Napfchenstrukturen. Die mit 0,8  $J/cm^2$  und 60 Wiederholungen erstellte Struktur (links) weist einen wesentlich glatteren Grund auf als die mit 5  $J/cm^2$  und 23 Wiederholungen generierte Struktur (rechts).



**Abb. 19:** REM-Aufnahmen: Im linken Bild eine Aufnahme mit 200-facher Vergrößerung; Im rechten Bild eine Aufnahme mit 3000-facher Vergrößerung.

## 7. Durchführung der Strukturierung an Nickelschichten

### 7.1 Abtraguntersuchungen an Nickelblechen

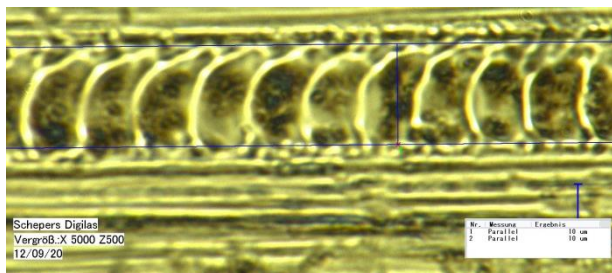
Von der Fa. IPT wurden zunächst Nickelbleche zur Verfügung gestellt. Es waren Bleche aus Rein-Nickel und Bleche aus Nickel-Phosphor wie in Kap. 3 beschrieben. Die Blechdicke ist ca. 100µm. Die Bleche wiesen eine leichte Unebenheit mit Einschlüssen auf. Zur Bearbeitung wurden die Bleche auf einen Vakuumzylinder gespannt und in der Digilas Anlage mit einem ps-Laser strukturiert.

#### 7.1.1 Laserparameter

Laserleistung:	17W
Pulsfolgefrequenz:	2MHz
Pulsdauer:	11ps
Wellenlänge:	1064nm

#### 7.1.2 Abtragdurchmesser

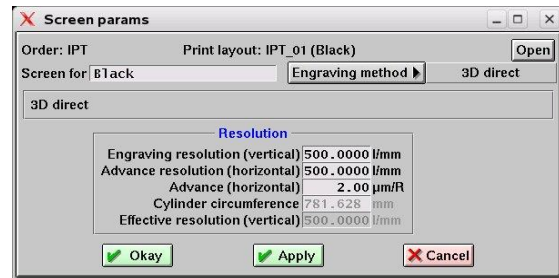
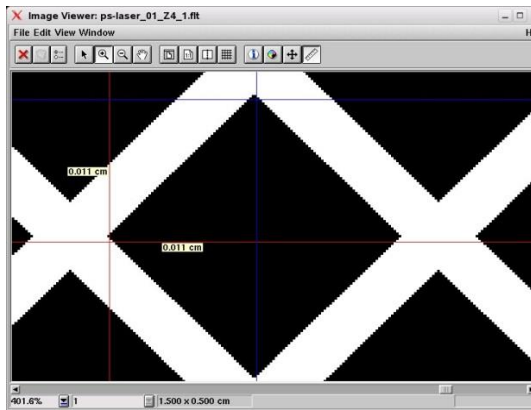
Der optimale Fokusabstand ist vor der Gravur in einem Fokustest eingestellt. Hierzu werden Linien vor und nach dem Fokuspunkte graviert. Die schmalste Fokusspur ist für alle Gravuren verwendet worden (Abb. 16). Diese war bei allen Gravuren 10µm.



**Abb. 20:** Abtragspur eines Fokustests

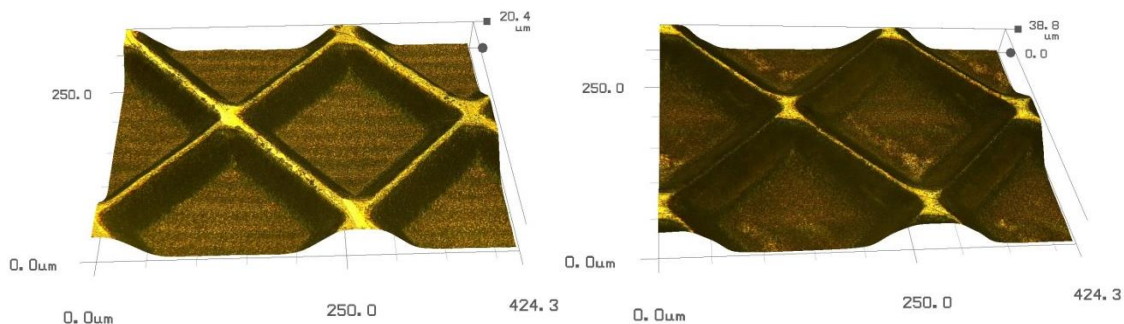
#### 7.1.3 Schichtabtrag 2D

Im autotypischen Tiefdruck[Ko13] wird der Tonwert über die Rasterzellenöffnung definiert. Je größer die Zelle desto dunkler der Tonwert. Die Rasterzellform ist entweder hexagonal oder quadratisch, wie in Abb. 17 als quadratische Form dargestellt.



**Abb. 21 links:** Datenbestand einer Tiefdruckzelle, **rechts:** eingestellte Auflösung

Es wurden Datensätze in quadratischer Rasterzellform mit für den Tiefdruck typischen Rasterweiten (z.B. 80 bzw. 100 l/cm) erstellt. Die verwendete Gravurauflösung (Pitch, bzw. axialer Vorschub) war gemäß Abb. 17 rechts 2µm. Der Schichtabtrag mit den unter 7.1.1 aufgeführten Laserleistungen entspricht ca. 1µm. Durch eine Wiederholung der Gravur bzw. Schicht, kann die gewünschte Zelltiefe mit einer Schrittweite von 1mm eingestellt werden. In Abb. 18 ist die gravierte Struktur dargestellt.



**Abb. 22:** Gravierte Tiefdruckzelle in Rautenform

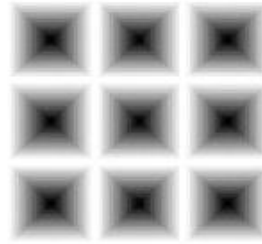
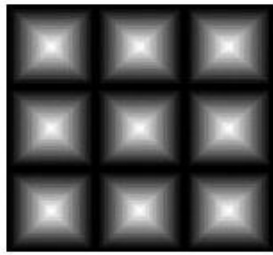
Abb. 18 links zeigt eine mit 20 Wiederholungen erstellte Tiefdruckrasterzelle. Es ist kein Grat und kein Schmelzrückstand erkennbar. Der Abtragboden zeigt keine Lochbildung auf. In Abb. 18 rechts sind weitere 20 Abtragschichten angewendet worden. Der Abtragboden ist vergleichbar mit der Struktur in Abb. 18 links, allerdings ist eine reduzierte Stegbreite erkennbar.

Grundsätzlich kann durch einen sukzessiven Schichtabtrag die Abtragtiefe eingestellt werden. Aufbauend auf diese Ergebnisse konnten alle weiteren 3D Strukturierungen hiernach geplant werden.

#### 7.1.4 3D-Fläche / Pyramide

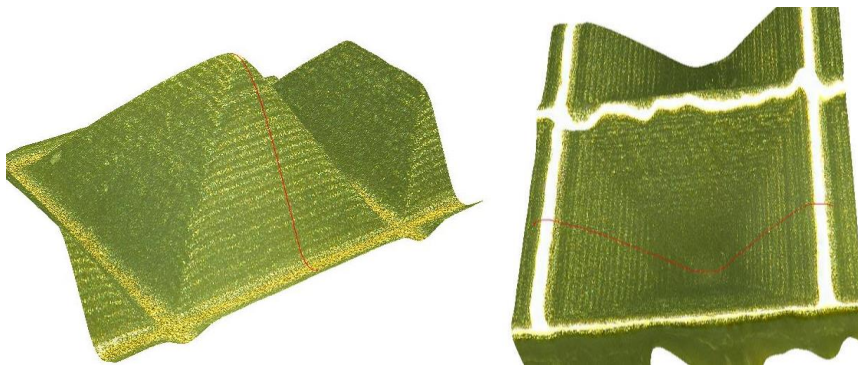
Ausgangspunkt für eine 3D Strukturierung ist ein 8-bit Datenbestand. Die Tonwerte definieren die relative Tiefe. Ein Tonwert von 100% entspricht so der maximalen relativen Abtragtiefe. Die absolute Tiefe wird wiederum durch die absolute Anzahl der Schichten definiert [Br11].





**Abb. 23:** 8-bit Datenbestand einer Pyramide

Abb. 19 zeigt den positiven (links) und negativen (rechts) Datenbestand einer Pyramidenanordnung. Die Sockelbreite einer einzelnen Pyramide beträgt 140µm.



**Abb. 24:** 3D-strukturierte Pyramide in Nickel-Oberfläche

Der in Abb. 20 dargestellte Datenbestand wurde in 127 Schichten graviert. Ausgehend von 256 Grauwerten wurde jeder zweite Tonwert graviert. Die einzelnen Schichten sind als Stufen an den Pyramidenflanken zu erkennen.

## 7.2 Abtraguntersuchungen mit Zylindern

Nachdem die Gravurparameter anhand der durchgeführten Testreihen auf Blechsubstrate, vorgestellt in Kap. 7.1 festgestellt worden sind, konnten erste Zylinder strukturiert werden. Hierzu wurden von der Fa. IPT einige Testzylinder mit unterschiedlichen Nickelschichten („Hart“ bzw. Phosphor-Nickel und „Weich“ bzw. Rein-Nickel) erstellt. Es wurde eine flächenvariable Form (autotypisch) und eine tiefenvariable Form (konventionell) erstellt. Die Rasterparameter waren bei beiden Tests wie folgt:

Rasterfrequenz:	80/cm
Stegbreite:	25µm
Rasterwinkel:	45°
Auflösung:	5µm

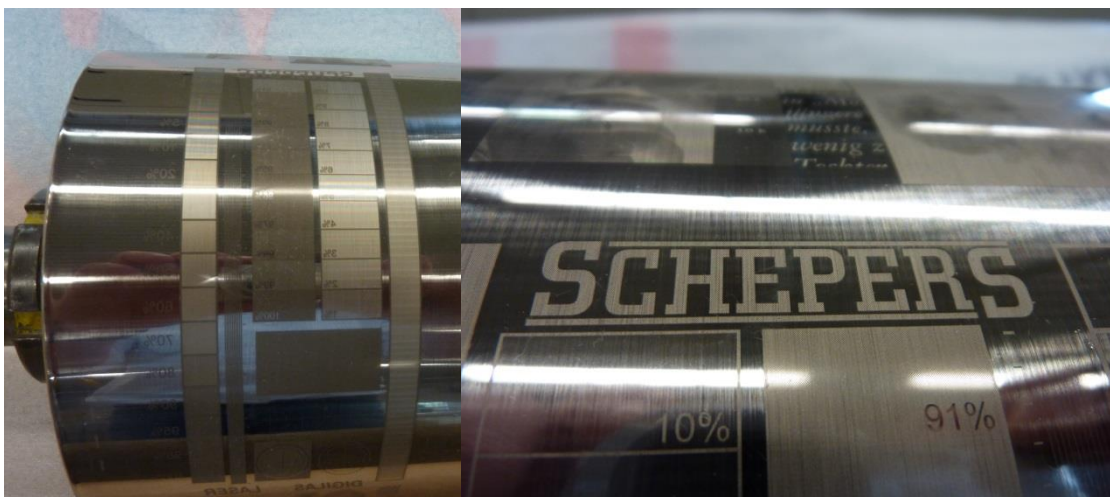
Zur Strukturierung wurde neben dem ps-Laser auch ein ns-Laser eingesetzt, da ps-Laser mit einer mittleren Laserleistung von maximal nur 50W industriell verfügbar sind. Mit einem 50W ps-Laser sind maximale Abtragraten 2-3mm<sup>3</sup>/min bei einem im Vergleich sehr hohen Anschaffungspreis möglich. ns-Laser Systeme hingegen sind mit mittleren Leistungen von einigen 100W bei signifikant günstigeren Anschaffungspreisen und deutlich höheren Abtragraten 100-200mm<sup>3</sup>/min möglich wie folgender Vergleich zeigt:

Laser	ps	ps	ns
Mittl. Leistung	50	250	250
Preis / Stunde	€108	€168,5	€82,5

**Tab. 4:** Vergleich der Stundensätze von ns- und ps-Laser

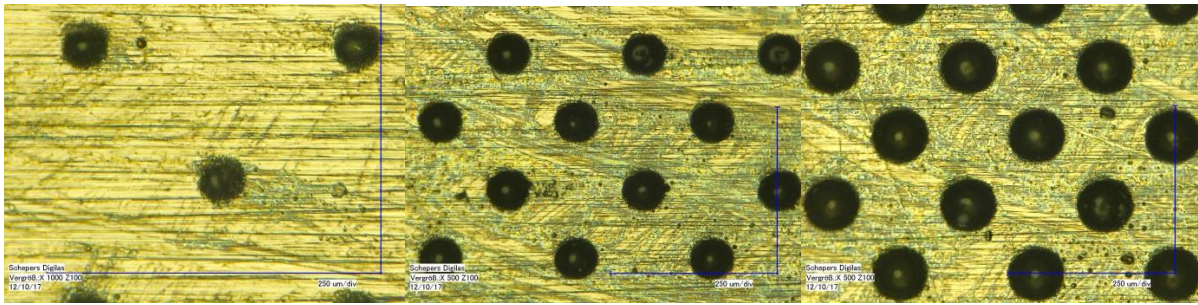
In dem in der Tabelle 4 dargestellten Stundensatz-Vergleich wurde ein ps-Laser mit einer mittleren Leistung von 250W (wie ns-Laser) angenommen. Dieser Laser ist zwar noch nicht verfügbar, zeigt aber wie sich die Kosten entwickeln werden. Da die Strukturierungen mit einem ns-Laser jedoch erhebliche Begleiterscheinungen wie Schmelzperlen, Oxidrückstände und Gradbildungen haben, ist die Verwendbarkeit zu prüfen.

Zunächst wurde ein Testdatenbestand mit einem in Kap. 7.1.1 beschriebenen ps-Laser strukturiert. In Abb. 21 ist der strukturierte Zylinder dargestellt.



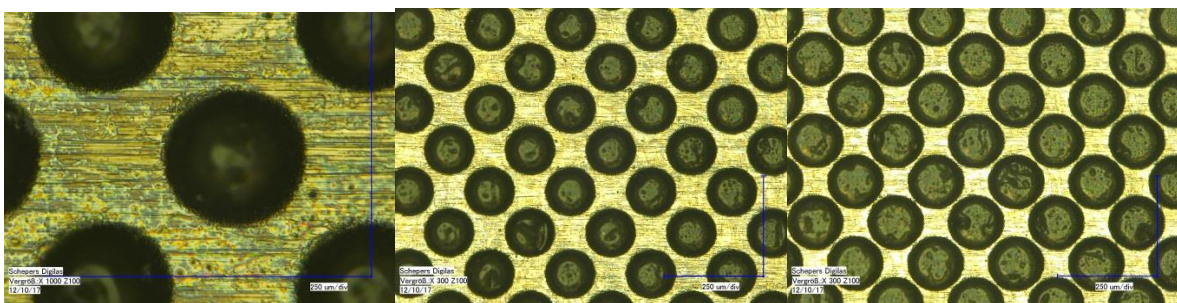
**Abb. 25:** Gravierter Tiefdruckzylinder mit ps-Laser

Die flächenvariablen Rasterzellen sind mit einer Tiefe von 20µm graviert worden. In den folgenden Abbildungen sind auszugsweise einige Tonwerte dargestellt.



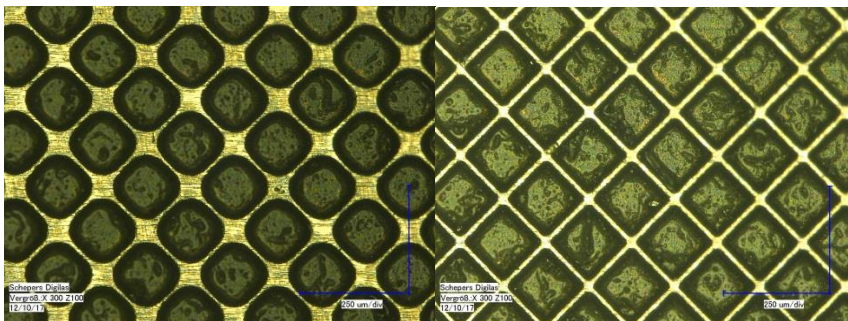
**Abb. 26:** ps-Lasergravur, Halbtöne mit 5%, 10% und 20%

Die unteren Tonwerte besitzen eine runde Punktform um einen möglichst stufenlosen Halbtönverlauf zu erzielen. In Abb. 22 im 5% Punkt ist zwar die ausgetriebene Schmelze neben der Zelle erkennbar, aber um die Rasterzelle herum bildet sich kein Grat aus.



**Abb. 27:** ps-Lasergravur, Halbtöne mit 40%, 60% und 80%

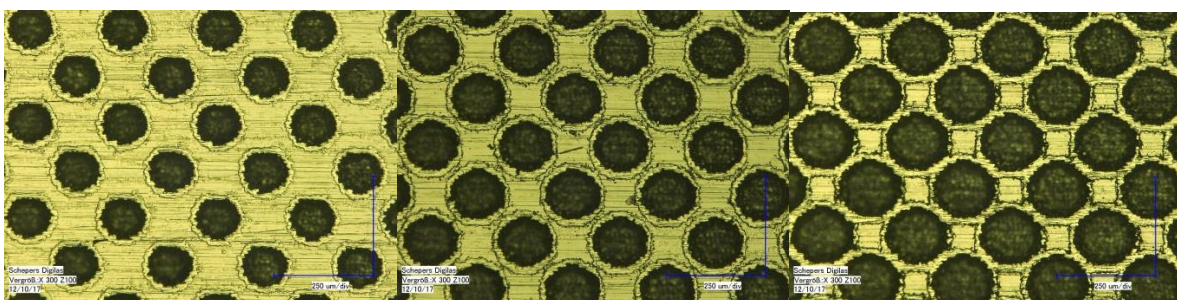
Ein analoges Abtragverhalten konnte auch bei höheren Tonwerten (Abb. 24) festgestellt werden.



**Abb. 28:** ps-Lasergravur, Halbtöne mit 90% und 100%

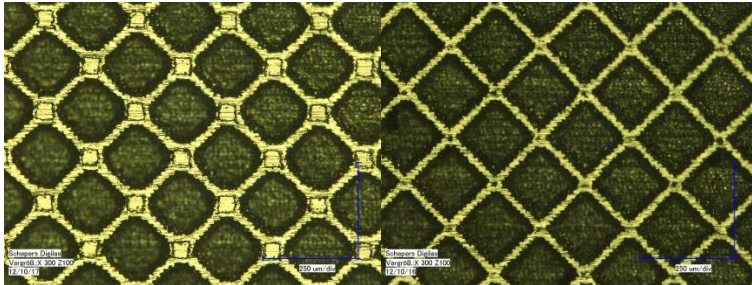
Ab einem Tonwert von 80% wird aus der runden Punktform fortschreitend ein rautenförmige Punktform um die Öffnung zu maximieren.

Der identische Datenbestand wurde auf dem gleichen Zylinder mit einem ns-Laser graviert wie in Abb. 25 dargestellt.



**Abb. 29:** ns-Lasergravur, Halbtöne mit 40%, 60% und 80%

Im Vergleich zu den mit dem ps-Laser strukturierten Testflächen ist hier deutlich eine Gratbildung zu erkennen. Um jeden gravierten Rasterpunkt bildet sich ein Ring mit einer Breite und Höhe von ca. 3µm.



**Abb. 30:** ns-Lasergravur, Halbtöne mit 90% und 100%

Bei größeren Zellen wie in Abb. 26 bei der 100% Rasterzelle sichtbar, wird der Steg fast vollständig mit dem Grat bedeckt.

Die durchgeführten Tests mit einem ns-Laser haben gezeigt, dass die strukturierten Oberflächen nachbehandelt „gefinisht“ werden müssen. Hier bieten sich verschiedene Nachbehandlungsmethoden, wie Elektro-Polieren, Schleifen oder Bürsten an. Die in diesem Projekt durchgeführten Strukturierungen mit einem ns-Laser sind mit einem speziell für Zylinderoberflächen entwickelten Bürstverfahren nachbehandelt worden.

## 8. Gravur und Druck von Tiefdruckzylindern

### 8.1 Gravur und Andruck eines Tiefdruckzylinders

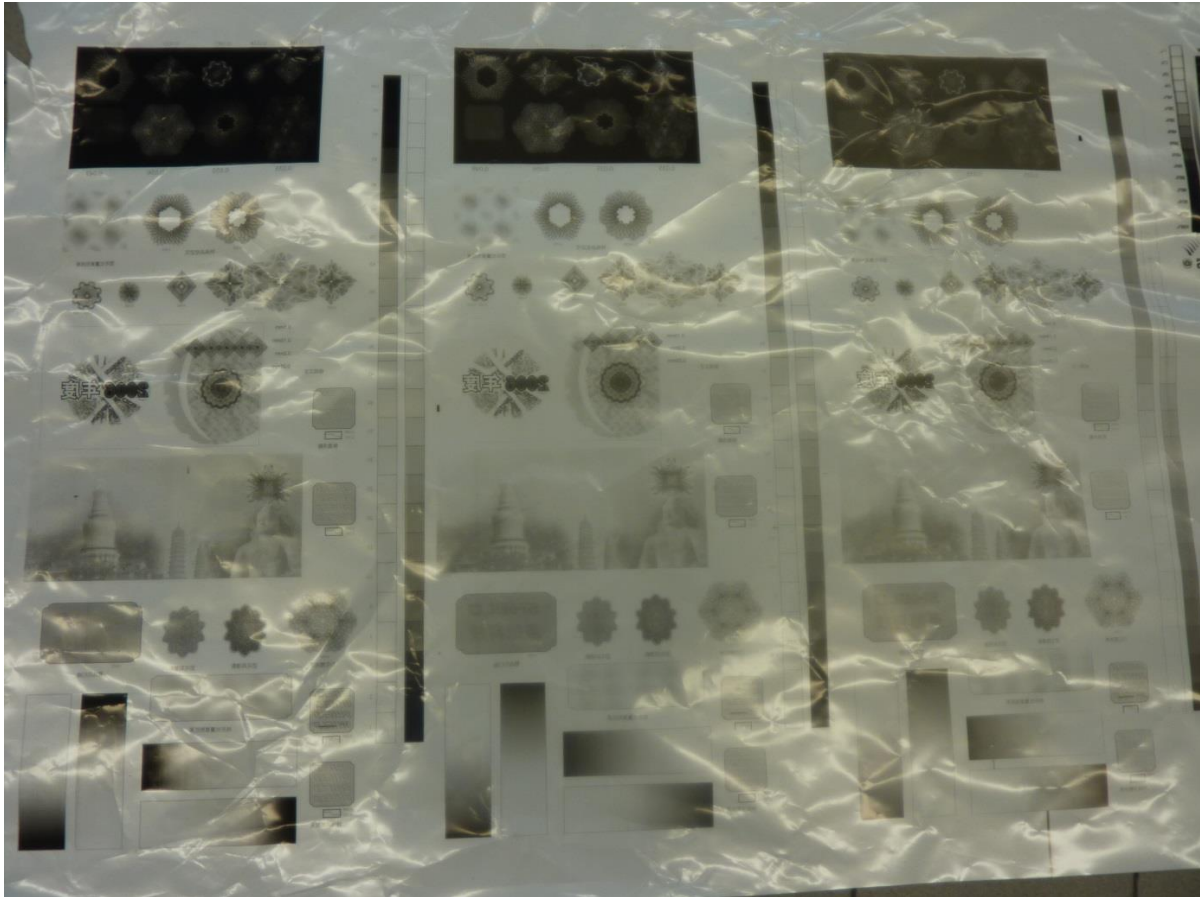
Aufbauend auf die Ergebnisse aus Kapitel 7.2, wurde ein konventioneller Tiefdruckzylinder graviert. Es wurde ein Datenbestand aus dem Sicherheitstiefdruck mit einem ns-Laser graviert. Der Datenbestand wurde dreimal mit Abtragtiefen von 15µm, 20µm und 25µm auf dem Zylinder plziert. Der Tiefdruckzylinder hatte folgende Maße (Abb. 26):

Ballenbreite:	1370mm
Zylinderdurchmesser:	300mm



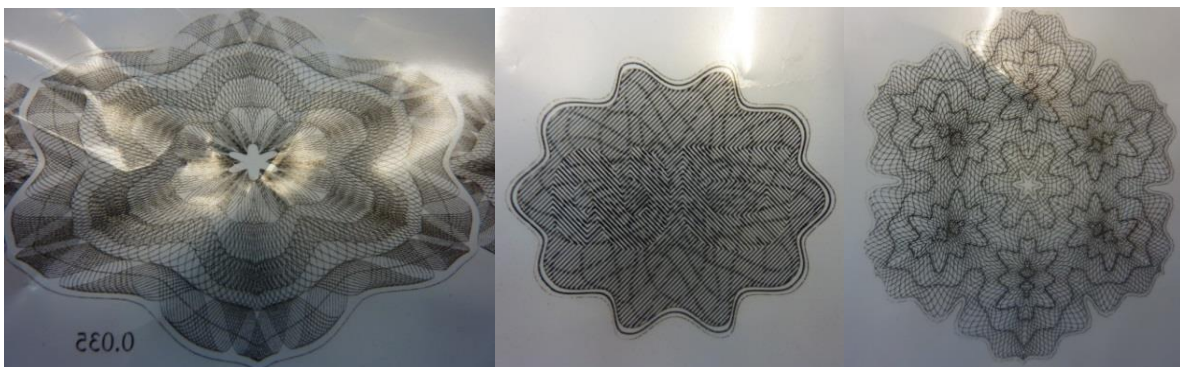
**Abb. 31:** Gravierter Tiefdruckzylinder mit ns-Laser

Die gravierten Strukturen entsprachen den unter Abb. 25 und 26 dargestellten Rasterzellen. Aufgrund der Gratbildung mußte der Zylindernach der Lasergravur gefinisht werden. Im Anschluss hieran wurde ein Andruck zur Qualitätskontrolle erstellt. In Abb. 27 ist der Andruck auf ein Foliensubstrat abgebildet.



**Abb. 32:** Andruck des Tiefdruckzylinders auf ein Foliensubstrat

Abb. 27 zeigt den Andruck des Foliensubstrates mit den drei Gravuren, die mit  $15\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$  und  $25\mu\text{m}$  ausgeführt wurden. In Abb. 28 sind einige gedruckte Guillochen-Strukturen vergrößert dargestellt.



**Abb. 33:** Gedruckte Guillochen Strukturen

## 8.2 Gravur eines Tiefdruckzylinders und Druck an der HDM in Stuttgart

### 8.2.1 Zylinder

Es wurde ein Zylinder Rohling von der HDM Stuttgart zur Verfügung gestellt. Dieser Zylinder ist passgenau für die dort vorhandene Tiefdruckmaschine von Bobst, sodass dort unter realen Druckbedingungen der Zylinder anschließend eingesetzt werden konnte. Bei der Fa. IPT wurde dieser Zylinder mit einer Doppel-Nickel-Schicht versehen. Zunächst wurde eine Rein-Nickel-Schicht aufgebracht. Danach wurde eine Nickel-Phosphor-Schicht mit einer Dicke von 20µm aufgetragen (Abb. 29).



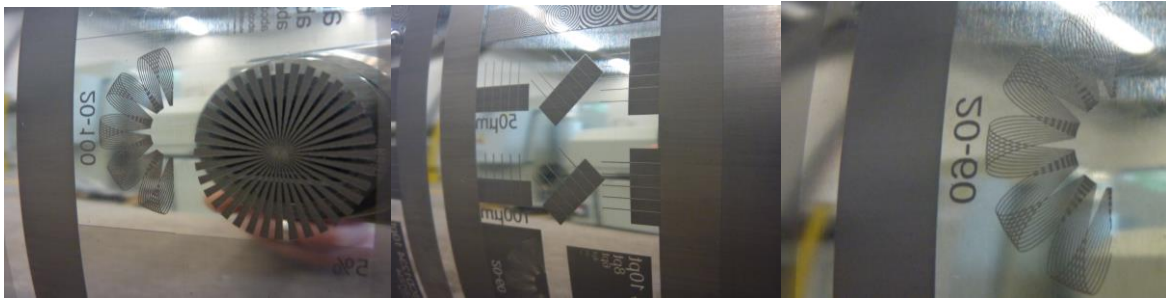
**Abb. 34:** Gesamtansicht des Tiefdruckzylinders

### 8.2.2 Bebilderung des Zylinders

Der Tiefdruckzylinder wurde bei Schepers mit einer Spindel versehen, sodass dieser in eine Lasergravuranlage aufgenommen und bearbeitet werden konnte. Zur Strukturierung wurde ein ps-Laser der Fa. Lumera in eine Digilas Anlage integriert. Die Strukturierungsdaten wurden von der HDM in Stuttgart zu Verfügung gestellt. In Abb. 30 sind einige Bildbereiche des Zylinders dargestellt.



**Abb. 35:** Gravierter Zylinder mit Halbton-Bild und Schriften



**Abb. 36:** Gravierter Zylinder mit Liniaturen

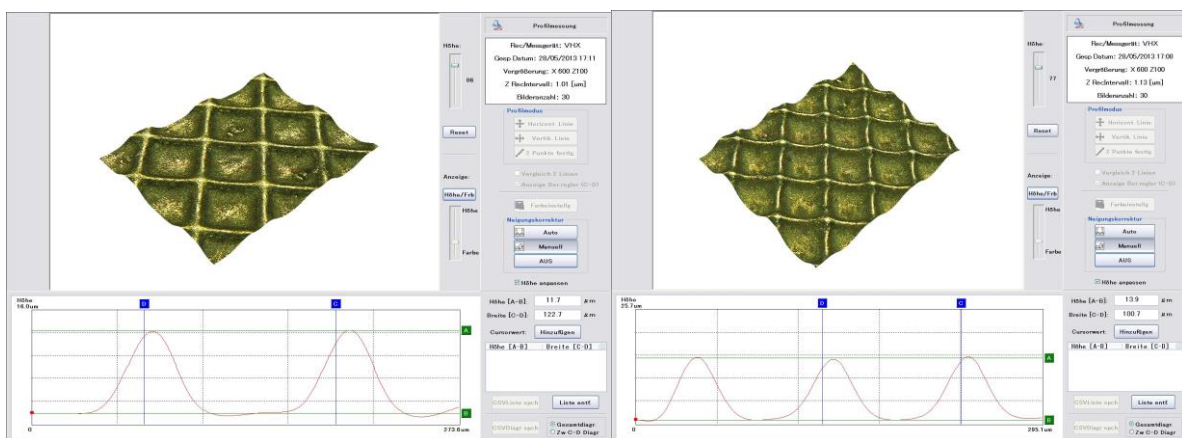
Neben Halbtonbildern sind auch Strichelemente mit Text und Liniaturen graviert worden (Abb. 31).

Die Bilddaten wurden im Digilas-Gravursystem mit folgenden Rasterparametern auf die Nickel-Phosphor-Schicht des Zylinders übertragen:

Fläche #	Form	Rasterfrequenz	Stegbreite	Winkel
1	Raute	80 l/cm	20µm	45°
2	Raute	100 l/cm	14µm	45°
3	Raute	80 l/cm	18µm	60°
4	Hexagon	80 l/cm	18µm	60°
5	Hexagon	100 l/cm	14µm	60°
6	Quadrat / Outline	80 l/cm	20µm	45°
7	Linie	80 l/cm	18µm	64,8°

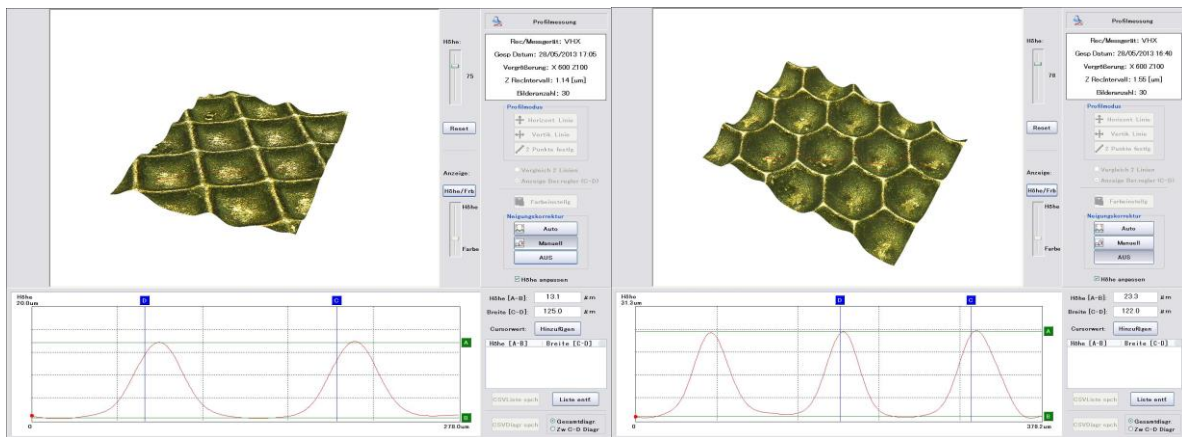
**Tab. 5:** Rasterparameter der Gravurtests

In Abb. 32 rechts bzw. links ist die Rastergeometrie der ersten beiden gravierten Flächen dargestellt.



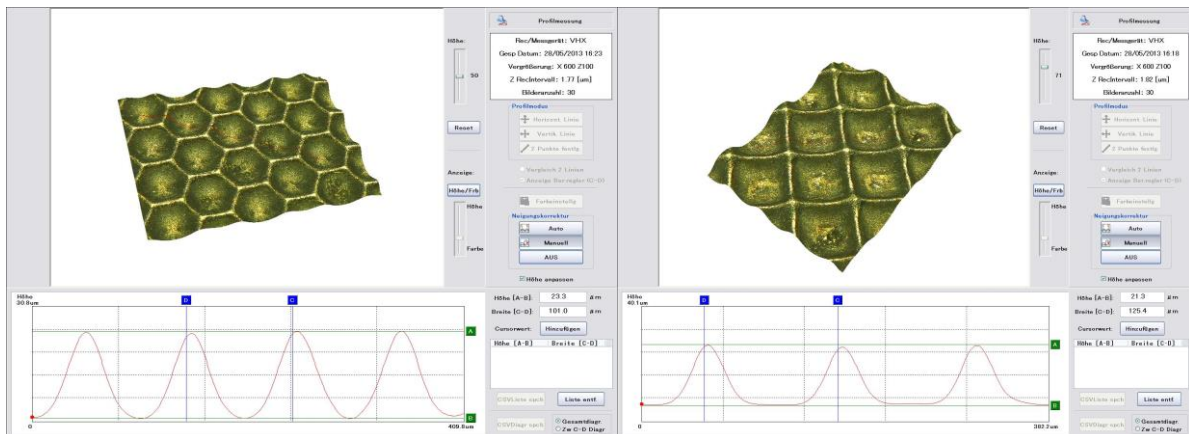
**Abb. 37 links:** Rauten-Rasterzelle 80 l/cm, **rechts:** Rauten-Rasterzelle 100l/cm

In Abb. 33 links/rechts ist die Rastergeometrie der Fläche 3 und 4 abgebildet.



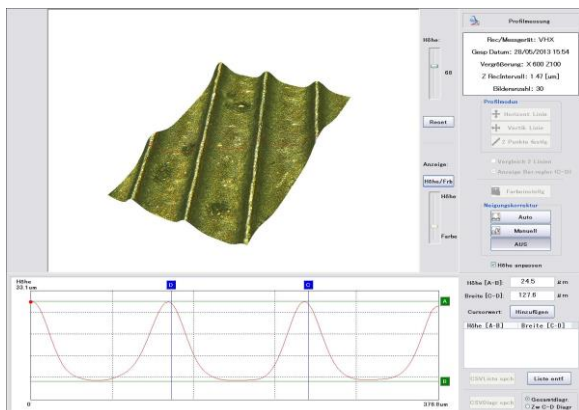
**Abb. 38 links:** Rauten-Rasterzelle mit 80l/cm, **rechts:** Hexagon-Rasterzelle 80l/cm

Die Rastergeometrie der Flächen 5 und 6 ist in Abb. 34 links / rechts dargestellt. Wobei in Test/Fläche 6 eine Outline mit graviert wurde. Diese befindet sich in einer Breite von ca. 10µm um jede Schrift bzw. um jedem Liniatur Element.



**Abb. 39 links:** Hexagon-Rasterzelle mit 100l/cm, **rechts:** Rauten-Rasterzelle mit 100l/cm

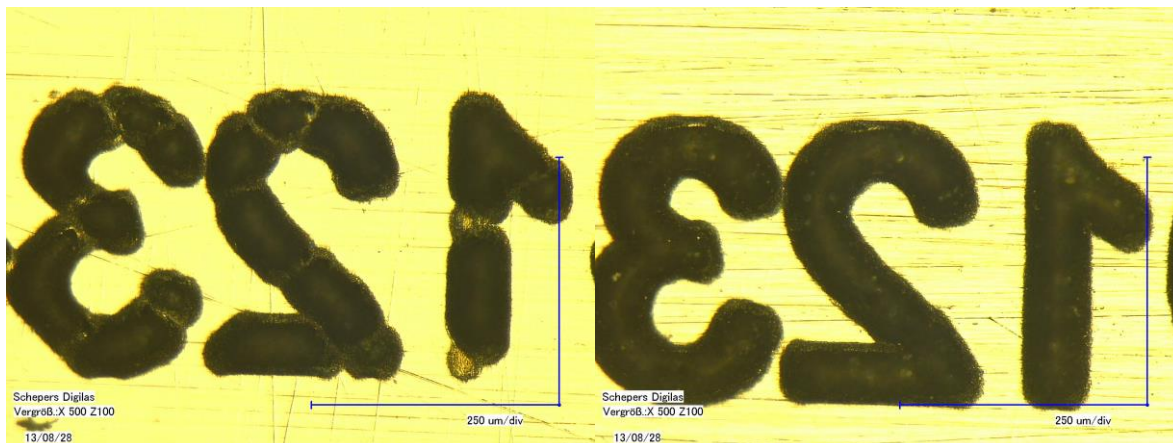
In Fläche 7 wurde eine sogenannte Haschur- bzw. Linienraster angewendet wie in Abb. 35 dargestellt.



**Abb. 40:** Linienraster mit 80l/cm



Fläche 6 wurde mit einer Outline graviert wie in Abb. 36 rechts dargestellt. Wie im Bild zu erkennen ist die Aussenkontur der Schrift signifikant glatter, da es keine vernetzten Stege mit dem nicht gravierten Bereich gibt.



**Abb. 41:** *links:* 1Pt-Schrift ohne Outline, *rechts:* 1Pt-Schrift mit Outline

Alle Testflächen befinden sich auf dem Zylinder in Abb. 29 abgebildeten Zylinder und konnten somit in einem Vorgang in der Druckmaschine gedruckt werden.

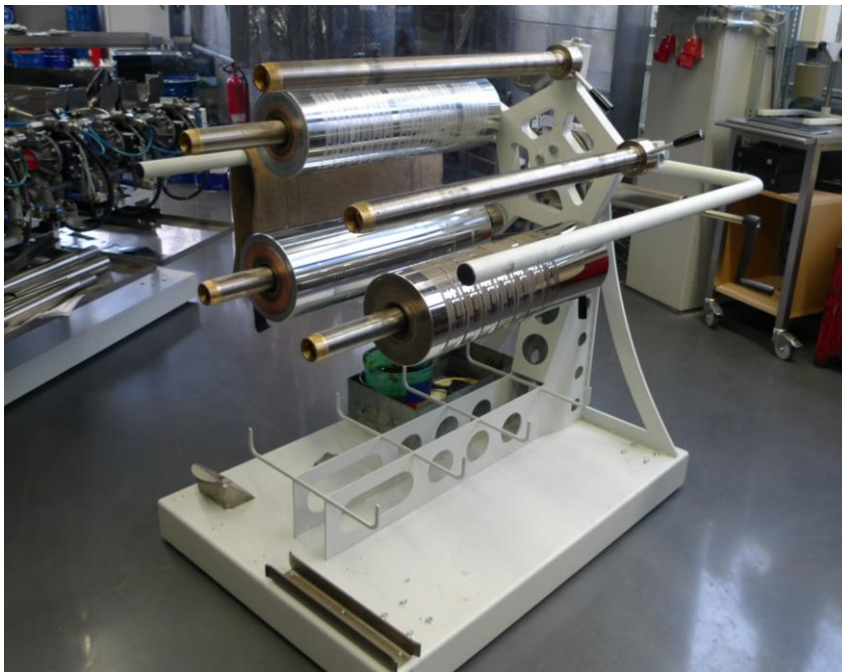
### 8.2.3 Druck des Zylinders an der Hochschule der Medien in Stuttgart

Um den Zylinder hinsichtlich der Druckqualität zu überprüfen, konnte die Tiefdruckmaschine der Fa. Bobst vom Typ Rotomec MW 60 (Abb. 36) an der HDM in Stuttgart genutzt werden.



**Abb. 42:** Druckmaschine ROTOMEK MW 60 der Fa. Bobst

Der Zylinder wurde mit einer Einlegehilfe Abb. 37 in das Farbwerk 3 der Tiefdruckmaschine eingelegt.



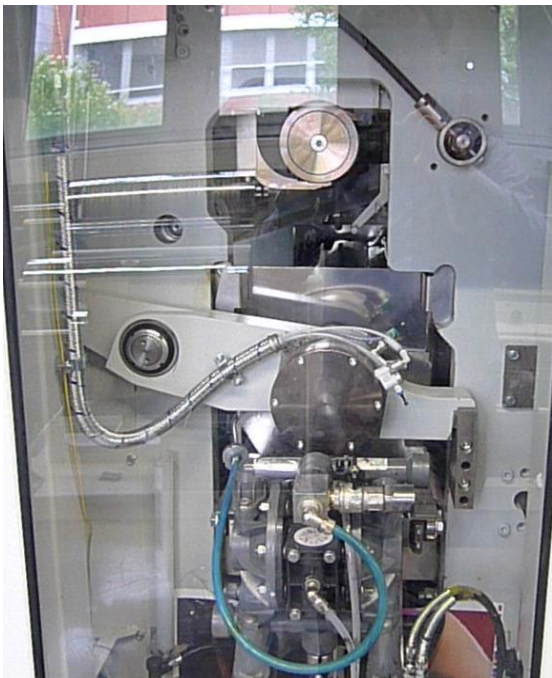
**Abb. 43:** Zylinderrevolver zur Maschinenbestückung

Es wurde nur das Farbwerk 3 für den Druck verwendet.



**Abb. 44:** Farbwanne mit Farbpumpe

Ein Farbwerk besteht aus einer Wanne mit einem Pumpensystem (Abb. 38). Während des kontinuierlichen Zirkulierens der Farbe zwischen Farbwanne und Reservoir wird die Viskosität gemessen und durch Beimengen eines Lösemittels auf ein konstantes Niveau gehalten. Der Zylinder wird zu ca. 10%-20% in der in der Wanne befindlichen Farbe eingetaucht. Nach dem Austritt aus der Wanne befindet sich das Rakel, das die überschüssige Farbe von der Oberfläche entfernt. Nur die in den Rasterzellen befindliche Farbe verbleibt und trägt zum Druck bei.



**Abb. 45:** Seitenansicht eines Farbwerks mit Farbzuführsystem

Zylinder und Farbwanne sind in der Druckmaschine in das Farbwerk 3. eingebracht worden (Abb. 39).



**Abb. 46:** Einbringen des Zylinders in ein Farbwerk

Bevor der eigentliche Druck durchgeführt werden konnte, wurde der Zylinder über einen Zeitraum von ca. 20 Minuten in dem System mit angestelltem Rakel betrieben (Abb. 41). Dieser Prozess dient zum „Einlaufen“ des tribologischen Systems Rakel und Zylinder in Kombination mit der Farbe als Gleitmittel.



**Abb. 47:** Zylinder in Farbwerk

Die Umfangsgeschwindigkeit kann in der Software eingestellt werden. Für das „Einlaufen“ wurde eine Geschwindigkeit von 120 m/min gewählt.



**Abb. 48:** Bedienoberfläche der Druckmaschine

Nach der „Einlaufprozedur“ wurde das zu bedruckende Substratmaterial in die Maschine eingelegt. Es ist auf zwei unterschiedlichen Substratmaterialien, auf einer Folie und einem Papier, gedruckt worden. Die jeweils in der Substratzuführstation Abb. 43 eingelegt wurden.



**Abb. 49:** Substrat-Zuführstation der Druckmaschine

Nachdem die Papier- bzw. Folienbahn bedruckt und getrocknet worden ist, wurde diese wieder aufgerollt (Abb. 44). Der gesamte Druckprozess entsprach so einem Roll-to-Roll Prozess.



**Abb. 50:** Substrat-Aufrollstation der Druckmaschine

Der Druck wurde in regelmäßigen Abständen gestoppt, um einige Proben für die spätere Auswertung entnehmen zu können.

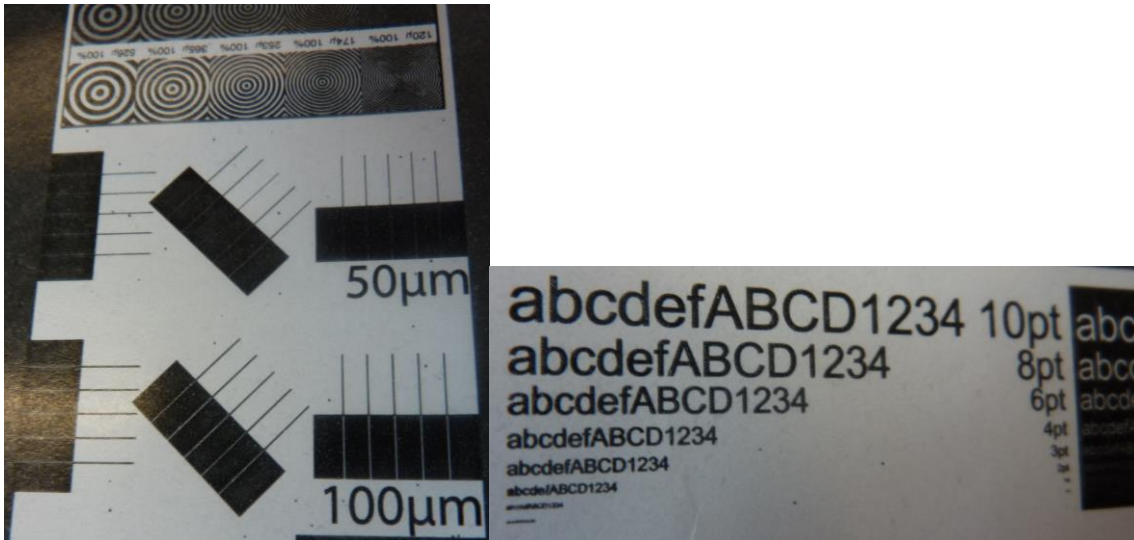
#### 8.2.4 Druckergebnisse

Die Druckversuche wurden auf zwei unterschiedlichen Substratmaterialien durchgeführt. Es wurde eine Folie mit einer Dicke von 20 $\mu$ m und ein Papier mit einer Dicke von 60 $\mu$ m verwendet (Abb. 45). Die verwendete Farbe hatte eine Viskosität von 29s.



**Abb. 51:** Ausdruck auf Papiersubstrat und auf Foliensubstrat

Im Layout waren Strichbereiche (Abb. 46 links.) mit einer Breite von 50 $\mu$ m und 100 $\mu$ m und Schriften mit einer Höhe von 0,5Pt bis 10Pt (Abb 46, rechts.) als positiv und negativ ausgeführt.



**Abb. 52:** Liniaturen und Schriften

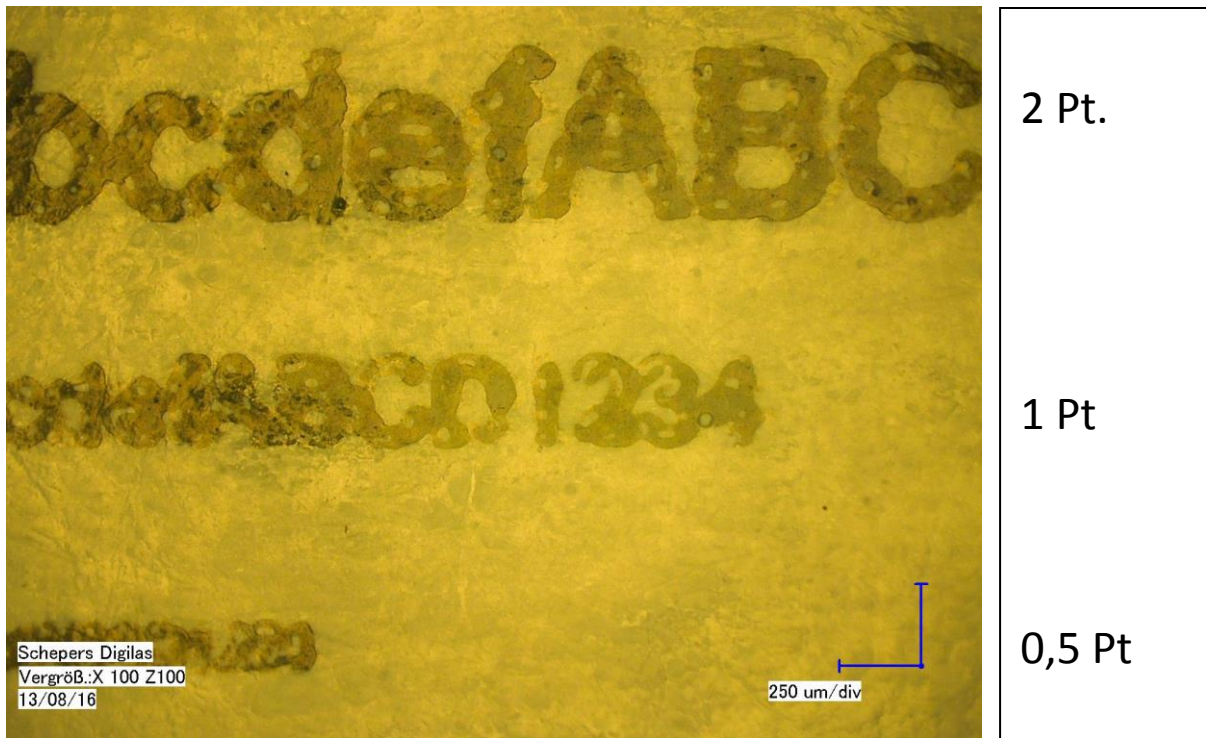
Die Kreise (Abb.47) haben Strichstärken von 50µm bis 900µm



**Abb. 53:** Kreise 900µm bis 50µm

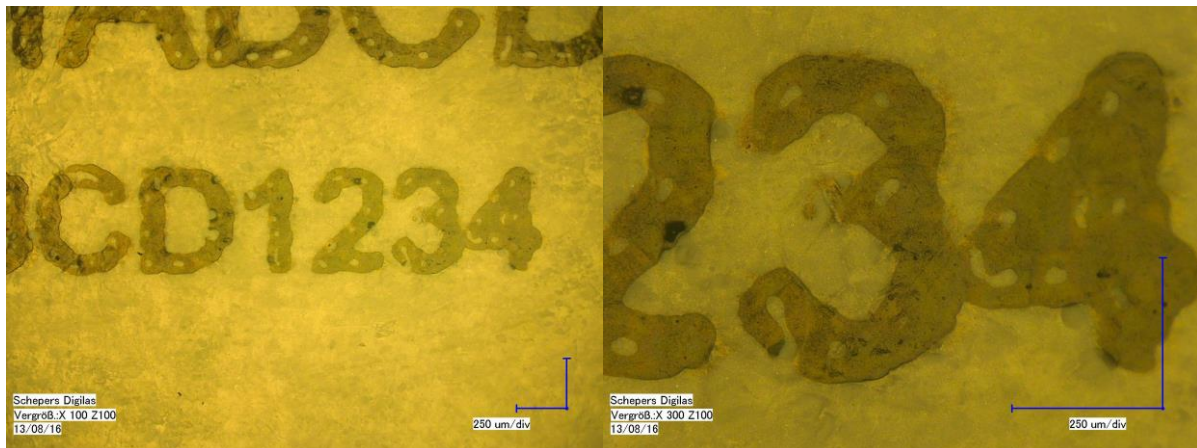
#### 8.2.4.1 Schriften

Gedruckte Schriften mit einer Höhe von bis zu 1Pt konnten auf dem Substrat noch gelesen werden. Die kleinste Schrifthöhe von 0,5Pt war aufgrund der für den Tiefdruck typischen „Überflutung“ nicht mehr lesbar (Abb.48).



**Abb. 54:** Mikroskopaufnahme verschiedener Schrifthöhen 1Pt = 0,352mm

In den gedruckten Resultaten mit hexagonalem und rautenförmigen Rasterformen waren immer nicht gedeckte Bereiche (Abb.49) zu erkennen. Diese Punkte waren bei dem Linienraster nicht erkennbar.

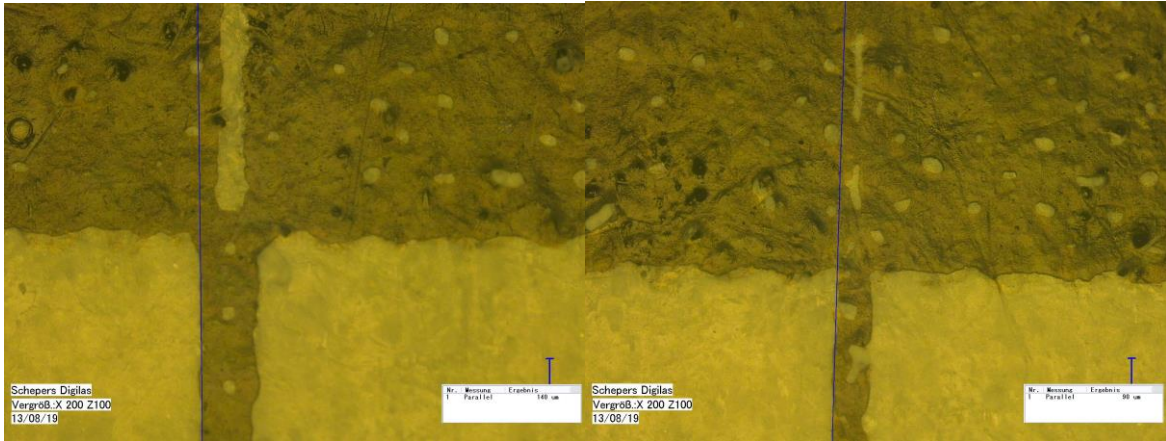


**Abb. 55:** 2 Pt Schrifthöhe mit „Löchern“

#### 8.2.4.2 Liniaturen

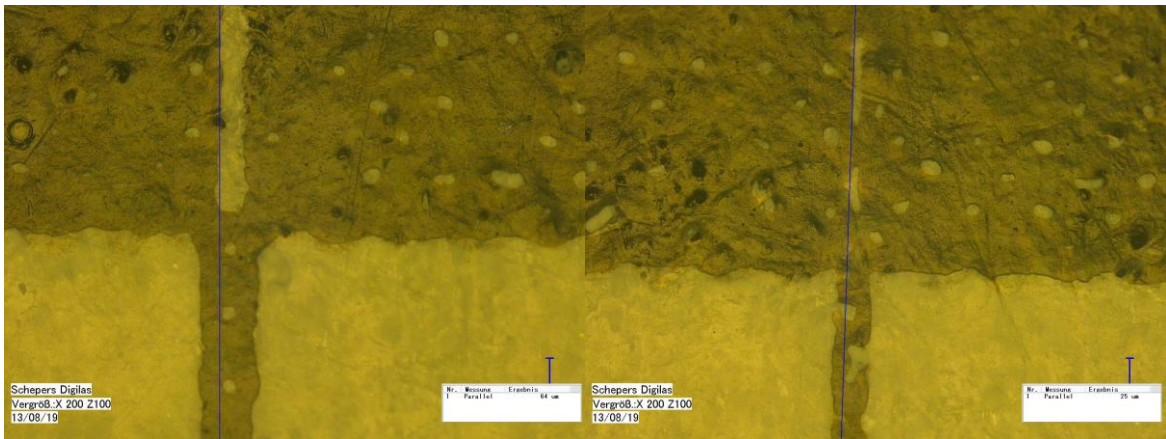
Es sind zwei Linienbreiten mit einer Breite von 50µm und 100µm als positiv und negativ in drei Winkelungen graviert worden. Die positiv ausgedruckte Breite einer im Datenbestand mit 100µm angelegten Linie beträgt 140µm. Ein mit 50µm angelegte Linie hat eine Druckbreite von 90µm. Demnach wird durch das „Verlaufen“ der Farbe die Linie um 40µm verbreitert (Abb. 50).





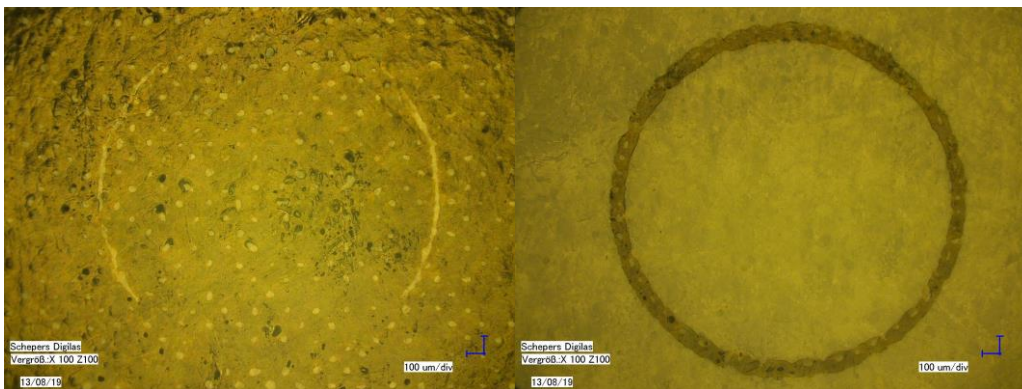
**Abb. 56:** Messung der positiv ausgedruckten Linienbreite

Die Linienbreite einer im Datenbestand mit 100µm ausgedruckten negativen Linie beträgt 64µm (Abb. 51 links). Die 50µm Linie ist teilweise schon überflutet. In den noch erkennbaren Bereichen beträgt die Linienbreite 25µm (Abb. 51 rechts).



**Abb. 57:** Messung der negativ ausgedruckten Linienbreite

Anhand des in Abb. 52 abgebildeten Kreises mit einer Linienbreite von 50µm, ist das Verhalten des „Überflutens“ gut erkennbar. Der negativ gedruckte Kreis ist zum Teil nicht erkennbar, das heißt er wurde partiell vollkommen überflutet. Dieser Effekt ist in den in Druckrichtung befindlichen Bereichen besonders ausgeprägt, wohingegen die Linienfragmente mit orthogonaler Ausrichtung noch zur erkennen sind.

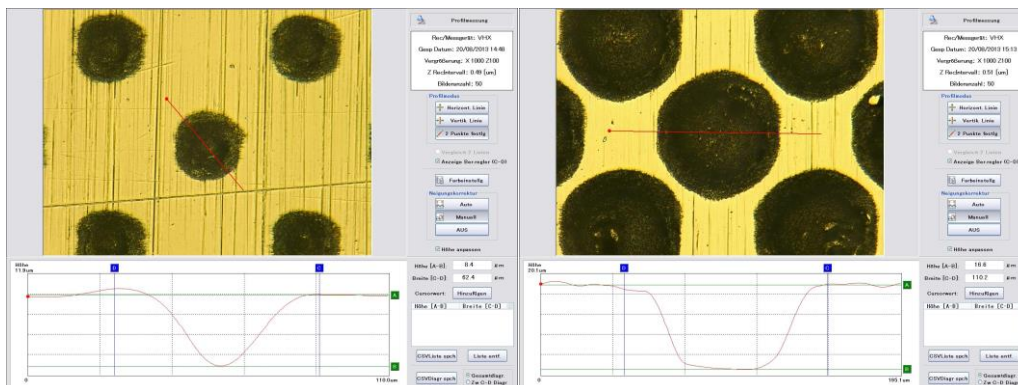


**Abb. 58:** Negativ und positiv ausgedruckter Kreis mit einer Linienbreite von 50µm

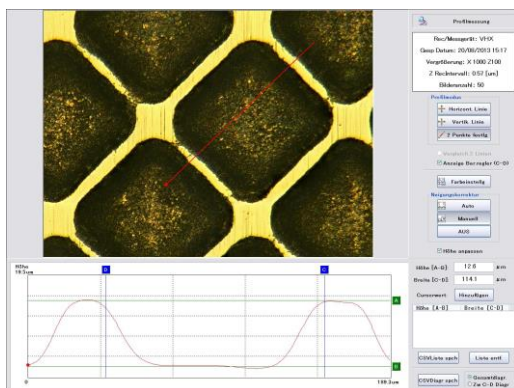
Die Linienbreite des positiv ausgedruckten Kreises Abb. 58 ist in den Bereichen mit orthogonaler Ausrichtung schmaler.

### 8.4.3 Halbtöne

Es sind im Datenbestand drei Halbtöne vorhanden, diese wurden in einem Rastergenerator einer entsprechenden Rasterzelle zugeordnet. Die Öffnung der Zelle entspricht dem Tonwert der Fläche. Der 5% Tonwert hat eine Öffnung von 62,4µm (Abb. 53 links), der 50% Tonwert eine Öffnung von 110,2µm (Abb. 53 rechts) und der 100% die maximale Öffnung von 114,1µm (Abb. 54).

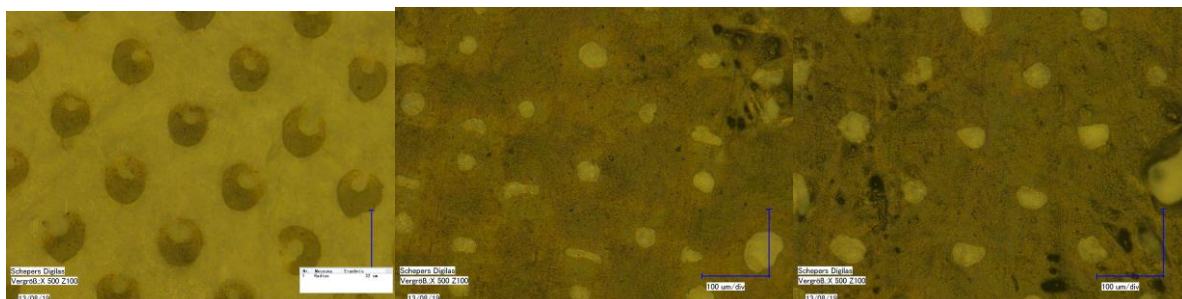


**Abb. 59:** Schnittdarstellung einer 5% (links) und 50% (rechts) Rasterzelle



**Abb. 60:** Schnittdarstellung einer 100% Rasterzelle

Abb. 55 zeigt den Druck dieser Rasterzellen auf das Papiersubstrat.



**Abb. 61:** Ausdruck einer 5%, 50% und 100% Rasterzelle auf Papier

Im Ausdruck der 5% Rasterzelle ist in jeder Zelle ein weißer Punkt erkennbar. Dieses Verhalten setzt sich bei 50% Tonwert fort. Hier ist neben dem typischen Punkt auch noch ein nicht vollständig gedeckter Bereich sichtbar. Beim 100% Tonwert sind nur noch diese Punkte erkennbar.

## 9. Fazit

In anfänglichen Versuchen wurde zunächst eine "weiche" Nickelschicht aus einem Nickelsulfatelektrolyten zu beschichtet, da dieses aber nicht porenfrei gelungen ist, wurde versucht, aus dem Nickel-Phosphor-Elektrolyten mit unterschiedlichen Stromdichten sowohl eine "weiche" als auch eine "harte" Nickelschicht zu erzeugen. Es hat sich bestätigt, dass eine hohe Stromdichte zu einer weicheren Schicht führt als eine niedrige Stromdichte. Somit ist es gelungen, aus einem Elektrolyten ein für die Lasergravur geeignetes Schichtsystem zu beschichten, das für die weiteren Abtragsversuche von der Fa. IPT zur Verfügung gestellt wurde.

In umfangreichen Studien wurde das grundlegende Abtragsverhalten von Nickel bzw. Nickel-Phosphor-Legierung analysiert. Kontinuierlich stattfindende Korrespondenz während der Studie und regelmäßige Projekttreffen mit der Firma Schepers GmbH & Co. KG dienten der Optimierung für den anvisierten Verwendungszweck. Hauptaugenmerk bei den Grundstudien war die maximal erzielbare Strukturierungsqualität, welche maßgeblich von der Oberflächenrauheit bestimmt wurde. Diese konnte präzise mit einem Chromatischen Sensor berührungslos detektiert werden. Zweitwichtigstes Kriterium ist die mögliche Prozessgeschwindigkeit, die über die Abtragsrate (Volumen pro Zeit) definiert wird. Bezüglich der Oberflächenqualität konnten auf reinem Nickel Werte um  $2\ \mu\text{m}$  erzielt werden. Die beiden beschichteten Nickelvarianten ließen sogar bis um den Faktor 50 geringere Rauheitswerte zu, welche jedoch zu stark erhöhten Bearbeitungszeiten führen würden. Aber auch bei praxisrelevanten Parametersätzen waren die mit Kupfer und Phosphor beschichteten Nickeloberflächen klar im Vorteil. Hier konnte bei halbiertem Oberflächenrauheit ein dreifach höherer Volumenabtrag realisiert werden. Diese Werte belegen eindeutig den enormen Zugewinn bei Qualität und Geschwindigkeit, der durch die neuartigen Werkstoffkombinationen möglich ist. Somit kann diese Erprobung als überaus erfolgreich bewertet werden.

Die anschließende Übertragung auf Strukturmuster aus der Praxis (Wabenstruktur) machten die aktuellen Limitierungen des im LFM genutzten Laborsystems deutlich. Die in einer Referenzprobe von der Firma Schepers GmbH & Co. KG dargelegte Qualität konnte in einem ersten Schritt, im Scanverfahren, nicht vollständig reproduziert werden. Hier spiegelt sich das langjährige Know-how des optimierten Fertigungsprozesses wieder. Allerdings konnten die im Laserzentrum erstellten Wabenstrukturen gut als erste Demonstrationsobjekte genutzt werden. Zudem besteht über Wechsel und Variation der Schraffurmuster reichlich Optimierungspotential.

Weitergehende Studien könnten die Flankensteilheit der Strukturen und sich ergebende Randvertiefungen analysieren. Hierzu konnten im Rahmen dieser Studie keine genaueren Aussagen gemacht werden.

Die Ergebnisse vom LFM wurden auf ein bei der Fa. Schepers vorhandenes Digilas-Zylindergravursystem übertragen. Es wurde mit einem ps-Laser und einem ns-Laser diverse

Testzylinder erstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse haben gezeigt, dass eine mit einem ns-Laser gravierte Zylinderoberfläche unabdingbar eine Nachbehandlung erfordert, die bei einer ps-Laserbearbeitung nicht notwendig ist. Für die Entwicklung der Lasermikrostrukturierung von Nickeloberflächen für den Sicherheitsdruck erhielt die Fa. Schepers am 05.11.2013 den Innovation Award 2013 der ERA (European Rotogravure Association, siehe Abb. 62).



**Abb. 62:** Innovation Award 2013 der ERA

Neben den Grundlagenuntersuchungen konnte auch der gesamte Tiefdruck-Prozessablauf aufgezeigt werden. Von dem Aufbringen der Nickelschicht auf den Zylinder, über die Mikrostrukturierung und Bebilderung bis hin zu eigentlichen Druck in einer konventionellen Druckmaschine. In dieser Kette konnte die grundsätzliche Verwendbarkeit von Nickel als Ersatz für die Chromschicht nachgewiesen werden. Ob die Verschleißbeständigkeit einer Chromschicht entspricht muß abschließend anhand eines realen Produktionszylinders noch untersucht werden.

Darüber hinaus ist die Verwendung von Nickelschichten im Lebensmittelbereich zu prüfen. Es wurden bereits Chemisch abgeschiedene Nickel-Phosphor-Schichten für verschiedene Verwendungen im Lebensmittelbereich getestet und zugelassen. Die Tests erfolgen nach „Methoden zur Untersuchung von Bedarfsgegenständen, Grundregeln für die Ermittlung der Migration in Simulanzlösungen“, Stand Januar 1998, entsprechend der Vorschrift Nr. 80.30-1(EG) bis 80.30-3(EG) in der amtlichen Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 35 des Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes, Stand von Juni 2001, sowie der Normserie ENV 1196 „Werkstoffe und Gegenstände in Kontakt mit Lebensmittel-

Kunststoffe“, beziehend auf Migrationsverhalten sowie auf die Abwesenheit gesundheitlich bedenklicher Stoffe. Da die chemisch und galvanisch abgeschiedenen Schichten im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung sehr ähnlich sind, kann von einer Zulassung im Lebensmittelbereich ausgegangen werden. Diese Tests müssen nach zwei Jahren wiederholt werden.

## 10. Literaturverzeichnis

- [Br84] Brugger, R., „*Die galvanische Vernickelung*“, Leuze Verlag, 1984
- [Br11] Brüning, S., Hennig, Eifel, S. Gillner, A. „*Ultrafast Scan Techniques for 3D- $\mu$ m Structuring of Metal Surfaces with high repetitive ps-laser pulses*“, Physics Procedia 12, S. 105-115, 2011
- [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.
- [KG11] KNAPPE, R., BRÜNING, S., GILLNER, A., *Kleinste Strukturen auf große Flächen*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Laser Technik Journal, Nr. 4, Juli 2011.
- [Ko13] J. Kokot, „*Bibliothek des Grafischen Wissens, Band 4: Drucken und Veredeln im Bogentiefdruck – Verpackungs- und Etikettendruck mit Verfahrenskombination*“, J. Kokot, D. Kleeberg, 2013