

Laserstrukturierung von Mikroprägewerkzeugen und Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von Dipl.-Ing. (FH) Andy Engel

geboren am 20.10.1980 in Grimma

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Biermann, Freiberg
Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel, Mittweida

Tag der Verleihung: 29.06.2020

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Formelzeichen und Abkürzungen	III
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
3. Stand der Technik	4
3.1. Mikrostrukturierung / 3D-Mikrostrukturierung	4
3.1.1. Mechanische Verfahren	4
3.1.2. Elektroerosive Verfahren	6
3.1.3. Laserbasierte Verfahren	7
3.2. Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen	10
3.2.1. Photolithographie und Ätztechnik	11
3.2.2. Strukturierung mittels gerichteten Teilchenstrom	12
3.2.3. LIGA-Technik	14
3.2.4. Elektroerosive Verfahren	16
3.2.5. Laserbasierte Verfahren	16
3.2.5.1. Fokusabtragverfahren	16
3.2.5.2. Maskenprojektionsverfahren	18
3.2.5.3. Interferenzverfahren	19
3.2.5.4. Laserinduzierte Oberflächenstrukturen	20
3.2.5.5. Laserinduzierte /-unterstützte Ätzverfahren	21
3.3. Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen	21
4. Eigenschaften der untersuchten Materialien	24
4.1. Eigenschaften der für die Mikroprägwerkzeuge eingesetzten Materialien	24
4.1.1. Grundmaterialien der Mikroprägwerkzeuge	24
4.1.2. Schichtmaterialien der Mikroprägwerkzeuge	26
4.2. Eigenschaften der Zielmaterialien für die Abformung der Mikroprägwerkzeuge ..	28
4.2.1. Folienwerkstoffe	28
4.2.2. Werkstoffverbunde	29
5. Experimentelle Grundlagen	32
5.1. Versuchsaufbau für die Lasermikrostrukturierung	32
5.1.1. Charakterisierung der eingesetzten Lasersysteme	32
5.1.2. Fokusabtragverfahren	34
5.1.3. Maskenprojektionsverfahren	37
5.2. Charakterisierung strukturierter Oberflächenbereiche	38

5.2.1. Laterale Strukturabmessungen und Profilbestimmung	39
5.2.2. Oberflächenrauheit	40
5.2.3. Härtemessung	40
5.2.4. Qualitative Elementanalyse	40
5.2.5. Beugungseffizienz	41
5.3. Versuchsaufbau für die Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen	41
5.3.1. Statische Abformung	41
5.3.2. Rotative Abformung	43
6. Experimentelle Untersuchungen zur Laserstrukturierung von Mikroprägewerkzeugen	46
6.1. Mikrostrukturierung von Prägewerkzeugen zur Freistellung von Funktionsflächen	46
6.1.1. Beschreibung des Ablationsprozesses und Bestimmung der Ablations- schwelfluenzen	49
6.1.2. Abtragsraten und Qualität der Strukturierung	54
6.1.3. Einfluss inerter Prozessgase	60
6.2. Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mittels Direktschreiben im Fokusabtragverfahren	61
6.3. Erzeugung laserinduzierter, periodischer Oberflächenstrukturen	66
6.3.1. Modellhafte Beschreibung der Entstehung laserinduzierter, periodischer Gitterstrukturen	68
6.3.2. Einfluss der Prozessparameter	70
6.3.2.1. Polarisationszustand und Einfallswinkel der auftreffenden Laserstrahlpulse	71
6.3.2.2. Laserstrahlwellenlänge und Probenmaterial	74
6.3.2.3. Laserstrahlpulsfluenz	76
6.3.2.4. Anzahl der Laserstrahlpulse pro Flächeneinheit	78
6.3.2.5. Pulsdauer der Laserstrahlpulse	81
6.3.3. Besonderheiten bei der Strukturierung von Hartstoffschichten	82
6.3.4. Optische Wirkung und Erzeugung von Mischfarben	87
6.3.5. Produktivitätsabschätzung	93
6.4. Erzeugung von Gitterstrukturen mittels Femtosekundenlaser im Masken- projektionsverfahren	95
6.5. Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren	96
7. Experimentelle Untersuchungen zur Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in Mikroprägewerkzeugen	104
7.1. Einfluss des Zielmaterials für die Abformung	104
7.1.1. Folienwerkstoffe	105

7.1.2. Werkstoffverbunde	108
7.2. Einfluss der Prägeparameter	115
7.2.1. Druck	116
7.2.2. Zeitdauer der Druckaufbringung	119
7.2.3. Temperatur	119
7.3. Einfluss der Strukturparameter	120
7.3.1. Gitterperiode und Gitterorientierung	120
7.3.2. Gittergeometrie	121
7.3.3. Tiefe der Gitterstrukturen	122
7.4. Einfluss der für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Werkstoffe	122
7.5. Weiterentwicklung der papierbasierten Werkstoffverbunde für die Mikroprägung	126
8. Anwendungsmöglichkeiten und Abformung in verschiedene Zielmaterialien	129
8.1. Marketing	129
8.2. Produktauthentifizierung	130
9. Zusammenfassung und Ausblick	132
10. Literatur- und Quellenverzeichnis	143

Danksagung

Versicherung

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Untersuchungen zur Laserstrukturierung von Mikroprägewerkzeugen und zur Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen durchgeführt.

Zu Beginn erfolgen eine Einleitung und eine Analyse des derzeitigen Standes der Technik.

Ausgehend von experimentellen Untersuchungen wird eine modellhafte Beschreibung des Ablationsprozesses für die Freistellung der Funktionsflächen der Mikroprägewerkzeuge dargelegt. Auf diesen in Relation zu den umgebenden Oberflächenbereichen erhobenen Funktionsflächen sind in einem nächsten Schritt beugungsoptisch wirksame Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ einzubringen. Hierzu in Anwendung gebrachte, laserbasierte Verfahren werden vorgestellt und hinsichtlich der Ergebnisse, ihren Limitationen und Potentialen miteinander verglichen. Eine Übersicht der geeigneten Strukturierungsparameter wird aufgezeigt und es erfolgt eine Diskussion der Besonderheiten bei der Strukturierung von Hartstoffschichten. Produktivitätsabschätzungen für zwei beispielhafte Strukturierungsaufgaben veranschaulichen die mit den im Rahmen der Arbeit genutzten Lasersystemen erzielbaren Flächenleistungen und verdeutlichen Ansatzpunkte für weitere Produktivitätssteigerungen.

Eine umfassende Beschreibung der Abformung der verschiedenartig strukturierten Mikroprägewerkzeuge in ausgewählte Folienwerkstoff und Werkstoffverbunde wird dargelegt. Die maßgebenden Faktoren und Abhängigkeiten sowie die identifizierten materialspezifischen Parameterräume für die Strukturübertragung als Teilprozess einer durchgehenden Produktionsstrecke (Inline-Prägung) werden präsentiert.

Mit der entwickelten Prozessabfolge zur Strukturierung von Mikroprägewerkzeugen und deren Abformung eröffnet sich ein weites Feld potentieller Anwendungsgebiete. Exemplarisch sind Anwendungsmöglichkeiten im Bereich des Produktmarketing und der Produktauthentifizierung beschrieben.

Abstract

In this dissertation, the results of investigations on laser microstructuring of embossing tools and on the embossing of the structures in various foils and material composites are presented and discussed.

At the beginning an introduction and an analysis of the state of the art of producing microstructures in various materials are given. On the basis of experimental investigations a model describing the production of in the surface of the embossing tools by pulsed laser ablation is presented. Laser structuring of diffraction gratings with periods less than 2 μm into these raised areas of the embossing tool has been investigated with the aim to optimise their parameters with respect to embossing into foils and material composites. Limitations and potentials as obtained in these investigations are discussed. An overview of the suitable parameters found for laser structuring is presented and some specialties on the structuring of hard coating layers are discussed. Productivity assessments for different exemplary structuring tasks illustrate the possibilities currently achievable and elucidate starting points for further productivity increasements.

A comprehensive description of the experimentally obtained embossing results using differently structured embossing tools in selected foils and material composites is given in the last main part of the dissertation. The relevant factors and dependencies as well as the identified material-specific parameter spaces for the microstructure transfer into the embossed materials are thereby discussed, taking into account the industrial embossing process.

The structuring sequences developed in this dissertation for the microstructuring of embossing tools and their imprints open up a broad field of potential applications. Exemplary application possibilities in the area of product marketing and product authentication are described in a final part of the work.

Formelzeichen und Abkürzungen

AFM	atomares Kraftmikroskop
$A_{100\text{ mm}}$	Bruchdehnung für Proben mit Messlänge $L_0=100\text{ mm}$
BOPP	biaxially oriented polypropylene / biaxial orientiertes Polypropylen
c-BN	kubisches Bornitrid
CVD	chemical vapor deposition / chemische Dampfphasenabscheidung
cw-Laser	continuous wave – Laser / Dauerstrich-Laser
DEDM	dry electrical discharge machining / trockene Funkenerosion
DLC	diamond like carbon / diamantartiger Kohlenstoff
DLIP	direct laser interference patterning / direkte Laserinterferenz-Strukturierung
EDM	electrical discharge machining / Funkenerosion
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FIB	focused ion beam / fokussierter Ionenstrahl
HSS	High Speed Steel / Schnellarbeitsstahl
HSFL	high spatial frequency LIPSS / LIPSS hoher Raumfrequenz
LIGA	Lithographie, Galvanik und Abformung
LIPSS	laser induced periodic surface structures / laserinduzierte periodische Oberflächenstrukturen
LSFL	low spatial frequency LIPSS / LIPSS niedriger Raumfrequenz
MBE	molecular beam epitaxy / Molekularstrahlepitaxie
Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat
Nd:YVO ₄	Neodym:Yttrium-Vanadat
PCTFE	Polychlortrifluorethylen
PET	Polyethylenterephthalat

PFA	Perfluoralkoxy-Polymer
PLA	Polylactid / Polymilchsäure
PLD	pulsed laser deposition / Laserpulsabscheidung
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	physical vapor deposition / physikalischen Dampfphasenabscheidung
R _a	mittlere Rauheit
REM	Rasterelektronenmikroskop
R _{p0,2}	Dehngrenze bei plastischer Extensometer-Dehnung mit 0,2 % Dehnung
R _m	Zugfestigkeit
SDD	Siliziumdriftdetektor
T	Temperatur
ta-C	tetraedrisch gebundener, amorpher Kohlenstoff
T _g	Glasübergangstemperatur
Ti:Saphir	Titan:Saphir
WC	Wolframcarbid

d	Puls-zu-Puls-Distanz
g	Gitterperiode des Reflexionsgitters (Kap. 6.3)
H	Laserstrahlpulsfluenz
l	Wärmediffusionslänge der Elektronen (Kap. 6.1.)
L	Abtragtiefe pro Puls (Kap. 6.1.)
m	Ordnung der Beugung (Kap. 6.3)
n _i	Brechungsindex der bestrahlten Oberflächenbereichen (Kap. 6.3)

$n_{material}$	Brechungsindex der unbestrahlten Oberflächenbereiche (Kap. 6.3)
S	Gitterperiode der Oberflächenstrukturen (Kap. 6.3)
S_0	Gitterperiode der Oberflächenstrukturen bei senkrechtem Einfall der Laserstrahlung (Kap. 6.3)
S^+	Gitterperiode der Oberflächenstrukturen bei Rückwärtsstreuung (Kap. 6.3)
S^-	Gitterperiode der Oberflächenstrukturen bei Vorwärtsstreuung (Kap. 6.3)
w_{86}	Laserstrahlradius mit 1/e-Abfall der elektrischen Feldstärke (86,5 % Leistungseinschluss)
z_R	Rayleighlänge
α	Absorptionskoeffizient
α	Einfallswinkel der auftreffenden Laserstrahlung (Kap. 6.3.)
α_e	Winkel der auf das Reflexionsgitter auftreffenden Strahlung (Kap. 6.3.)
α_m	Winkel der am Reflexionsgitter gebeugten Strahlung (Kap. 6.3.)
Δ	optischer Gangunterschied zwischen zwei benachbarten Punkten der Beugung (Kap. 6.3.)
Δ_1	optischer Gangunterschied des ersten Punktes der Beugung am Reflexionsgitter (Kap. 6.3)
Δ_2	optischer Gangunterschied des zweiten Punktes der Beugung am Reflexionsgitter (Kap. 6.3)
ε_b	Bruchdehnung
λ	Laserstrahlwellenlänge / Wellenlänge der auftreffenden Strahlung (Kap. 6.3)
σ_m	Zugfestigkeit
T_H	Pulsdauer

Φ_0	Laserstrahlpulsfluenz (Kap. 6.1.)
Φ_{th}^a	Ablationsschwellfluenz des ersten Ablationsregimes (Kap. 6.1.)
Φ_{th}^l	Ablationsschwellfluenz des zweiten Ablationsregimes (Kap. 6.1.)

1. Einleitung

Der Produktauthentifizierung kommt vor dem Hintergrund der Rückverfolgbarkeit, den zunehmenden Sicherheitsanforderungen und des Echtheitsnachweises eine stetig steigende Bedeutung zu. Vermehrt werden hierfür beugungsoptisch wirksame Gitterstrukturen als Sicherheitsmerkmal in Anwendung gebracht. Die Aufbringung auf das Produkt erfolgt zumeist durch Übertragung einer Kunststoffolie, in welche die Gitterstrukturen zuvor von einer Vorlage ausgehend abgeformt wurden. Beispiele hierfür sind Hologramme und beugungsoptisch wirksame Strukturen auf Debitkarten, Geldscheinen, Tickets, Sicherheitsetiketten oder Produktverpackungen. Da die hierdurch erzielbaren optischen Effekte ebenfalls für das Produktmarketing interessant sind, offeriert dieser Bereich weitere Einsatzpotentiale für derartige Strukturen.

Limitierend wirkt hierbei die derzeit in Anwendung befindliche Technologie, bei welcher die Abformung vorzugsweise von einem Nickel-Shim erfolgt. Dieses Verfahren ermöglicht keine wirtschaftliche Abformung bzw. Aufbringung von beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen direkt auf das Produkt oder die Produktverpackung im Rahmen eines Inline-Prozesses. Des Weiteren liegen im Abformprozess, insbesondere dem Verschleiß der Vorlage, von welcher abgeformt wird, begründete Einschränkungen der Materialien vor, in welche die Strukturübertragung erfolgen kann. In der vorliegenden Arbeit sollen Verfahren und Lösungsansätze aufgezeigt werden, welche die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in der Oberfläche von Mikroprägewerkzeugen sowie deren Abformung betreffen. Es werden die Grundlagen, Potentiale und Limitationen der entwickelten Verfahren dargelegt. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei neben der statischen Abformung auf der rotativen Abformung im Rahmen eines Inline-Prozesses.

2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit entstand während einer Industriekooperation im Segment der Verpackungsindustrie, insbesondere der Verpackung von dem Lebensmittelrecht unterliegenden Gütern. Auf Basis der Ergebnisse der Untersuchungen ist eine Überführung dieser Technologie in die industrielle Produktion vorgesehen. Hierbei ist für die rotative Abformung der in der Oberfläche der Mikroprägewerkzeuge erzeugten beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen eine Inline-Baugruppe innerhalb derzeit produzierender Verpackungsstrecken geplant. Die Geometrie und Abmessungen der Mikroprägewerkzeuge sowie das Design der Funktionsflächen, welche die abzuformenden Strukturen tragen, sind daher den aktuellen Produktionslinien entlehnt.

Kernpunkte der Arbeit sind die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mit einer Gitterperiode kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ auf der Oberfläche von Mikroprägewerkzeugen sowie deren Abformung in repräsentative Verpackungsmaterialien. Hierzu werden zunächst Untersuchungen zur Freistellung der Funktionsflächen der Mikroprägewerkzeuge mittels Lasermikrostrukturierung, d.h. präzises Abtragen spezifischer Oberflächenbereiche der Prägewerkzeuge, durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse der Abtragsversuche werden die für die jeweilig angestrebte, spezifizierte Oberflächenqualität ermittelten Prozessparameter vorgestellt. Für diesen Teilprozess werden eine Verfahrenseinordnung sowie die Wichtung der Einflussfaktoren gegeben. Zur Erhöhung der Standzeit der Gitterstrukturen wurden verschiedene Hartstoffsichten auf der Oberfläche der Prägewerkzeuge aufgebracht und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in Hinblick auf die Parameter der angestrebten Gitterstrukturen sowie die eingesetzten Lasersysteme untersucht. In der Arbeit wurden beugungsoptisch wirksame Gitterstrukturen näher betrachtet. Es werden vergleichende Gegenüberstellungen mittels Ultrakurzpulslaser erzeugten Gitterstrukturen und mittels Excimerlaser erzeugten Gitterstrukturen aufgezeigt. Insbesondere wird auf die Erzeugung der Gitterstrukturen unter Verwendung ultrakurzer Laserstrahlpulse eingegangen. Der Einfluss der Prozessparameter sowie die Grenzen des Verfahrens werden dargelegt. Weiterhin wird eine Produktivitätsabschätzung gegeben und die Möglichkeit der Erzeugung von Mischfarben betrachtet. Nachfolgend ist hiermit die Überlagerung verschiedener gebeugter, spektraler Lichtanteile bei der Bestrahlung der, die beugungsoptisch

wirksamen Gitterstrukturen aufweisenden, Oberfläche mit Weißlicht im Raumwinkelsegment des Betrachters zu verstehen.

Für die Abformung der in der Oberfläche der Prägewerkzeuge eingebrachten Gitterstrukturen wurden verschiedene Versuchsaufbauten realisiert. Diese ermöglichen Untersuchungen zur statischen und zur rotativen Abformung. Es werden die den Prägeprozess beeinflussenden Parameter aufgezeigt und deren Einfluss betrachtet. Der Nachweis der Übertragung der Gitterstrukturen in die Oberfläche der Verpackungsmaterialien, als Teilprozess einer durchgehenden Produktionsstrecke (Inline-Prägung), bei derzeit industriell genutzten Materialvorschubgeschwindigkeiten wird geführt.

Für die aufgezeigten Verfahren werden Anwendungsmöglichkeiten im Bereich des Marketing und der Produktauthentifizierung dargelegt.

3. Stand der Technik

Für die Herstellung von Mikroprägewerkzeugen, mit in die Oberfläche der Funktionsflächen eingebrachten, beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen, ist eine Kombination verschiedener Fertigungsverfahren erforderlich. Zur Freistellung der Funktionsflächen sind Verfahren zur dreidimensionalen Mikrostrukturierung in Anwendung zu bringen. In der Oberfläche der, durch präzisen Materialabtrag in Relation zu den umgebenden Oberflächenbereichen, erhabenen Funktionsflächen werden in einem weiteren Schritt beugungsoptisch wirksame Strukturen erzeugt. Nachfolgend kann die Abformung der beugungsoptisch wirksamen Strukturen in die zu prägenden Materialien erfolgen.

3.1. Mikrostrukturierung / 3D-Mikrostrukturierung

Die dreidimensionale Strukturierung von Festkörperoberflächen durch Materialabtrag stellt eine grundlegende Fertigungstechnologie dar. In Abhängigkeit von den Parametern der zu erzeugenden Strukturen, insbesondere deren Strukturabmessungen, der erforderlichen Präzision des Abtrages sowie der resultierenden Oberflächenrauheit und der Abtragsraten, stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Nachfolgend wird ein Überblick über die wichtigsten Verfahren gegeben und auf deren Möglichkeiten und Limitationen eingegangen. In Hinblick auf die Nutzung von wärmebehandelten Stählen und WC-Hartmetall als Grundwerkstoffe der Mikroprägewerkzeuge erfolgte eine Beschränkung auf die für diese Materialien relevanten Verfahren.

3.1.1. Mechanische Verfahren

Für die Erzeugung präziser, dreidimensionaler Strukturen in den Oberflächen von Stählen und WC-Hartmetall können im Bereich der mechanischen Verfahren verschiedene Arten der Mikrozerspanung genutzt werden. Im Gebiet des Spanens mit geometrisch unbestimmten Schneiden ist dies insbesondere durch Schleifen mit rotierenden Werkzeugen möglich. Die erzielbaren minimalen Strukturabmessungen und resultierenden Rauheiten der bearbeiteten Probenoberflächen sind maßgeblich von der Körnung und den Durchmessern der in Anwendung gebrachten Schleifkörper abhängig. Während für die Erzeugung einfacher geometrischer Strukturen wie beispielsweise Rechteckprofilen vorzugsweise Umfangsschleifscheiben eingesetzt

werden, nutzt man für geschlossene 3D-Strukturen Schleifstifte [1]. Die minimalen Durchmesser kommerzieller, gesinterter Schleifstifte liegen im Bereich oberhalb 200 μm [1, 2]. Da die minimale Bearbeitungsbreite durch die beim Schleifen aktive Kontaktfläche zwischen Schleifkörper und Werkstück bestimmt wird, sind zur Erzeugung kleinerer Strukturen Schleifkörper mit geringeren Abmessungen dieser Kontaktfläche erforderlich. Diese können mittels verschiedener Beschichtungsverfahren realisiert werden. In [2] werden Mikroschleifstifte mit einem Durchmesser von 50 μm vorgestellt. Hierzu werden auf Hartmetallgrundsubstraten mittels Heißdraht-CVD-Verfahren polykristalline Diamant-Schichten mit Kristallitgrößen bis kleiner ein Mikrometer abgeschieden. Die Grundsubstrate können Freiformgeometrien aufweisen, da die Aufbringung der Funktionsschicht bei diesem CVD-Verfahren richtungsunabhängig erfolgt. Für die Bearbeitung von Stählen geeignete Schleifstifte werden in [3] vorgestellt. Diese sind bis zu einem Durchmesser von 30 μm verfügbar und basieren ebenfalls auf einem Beschichtungsprozess. Als Schneidstoff kommt hierbei kubisches Bornitrid zum Einsatz. Dieser weist eine deutlich höhere thermische Stabilität (bis ca. 1200 $^{\circ}\text{C}$) im Vergleich zu Diamant bzw. diamantartigen Schichten auf, bei welchen ab Temperaturen über 600 $^{\circ}\text{C}$ eine Graphitisierung zu verzeichnen ist [4]. Limitation erfahren Mikrozerspanungsverfahren, bei welchen Diamant oder diamantartige Schichten als Schneidstoff eingesetzt werden, hinsichtlich der Bearbeitung von Eisenwerkstoffen. Bei der Bearbeitung dieser Werkstoffe kommt es mit zunehmender Temperatur zum chemischen Verschleiß infolge von Diffusionsprozessen sowie Oxidationsverschleiß.

Trotz dieser Limitationen werden Diamantwerkzeuge ebenfalls für das Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden in Anwendung gebracht. Hinsichtlich der 3D-Mikrostrukturierung ist hierbei das Fräsen das am weitesten verbreitete Verfahren. Dies ist maßgeblich auf die Flexibilität sowie die hohen Abtragsraten im Vergleich zum Schleifen oder elektroerosiven Verfahren zurückzuführen. Wie beim Mikroschleifen wird auch beim Mikrofräsen die Form und Geometrie des genutzten Bearbeitungswerkzeuges im Rahmen der Verfahrenstoleranzen in der Strukturgeometrie abgebildet [5]. Zu Gewährleistung stabiler Bearbeitungsprozesse in Hinblick auf die Standzeit der Fräser werden für diese vorzugsweise Werkstoffe wie Hartmetall und Diamant, in geringerem Umfang auch HSS, eingesetzt [6]. Für die Fräser aus Hartmetall und HSS sind des Weiteren Hartstoffbeschichtungen, wie diese auch im makroskopischen Bereich genutzt werden, verfügbar und üblich [6, 7]. Die

zum Mikrofräsen verwendeten Schaft- und Radiusfräser sind bis zu einem minimalen Durchmesser von ca. 50 μm verfügbar [6 - 8]. Mit den zur Herstellung 3-dimensionaler Strukturen eingesetzten Radiusfräsern lassen sich Aspektverhältnisse bis knapp über 1 realisieren, wohingegen die für die Erzeugung 2,5-dimensionaler Strukturen genutzten Schaftfräser Aspektverhältnisse bis 5 zulassen [7]. Durch den Einsatz spezieller Profilfräser ist es möglich noch feinere Strukturen mit einem Aspektverhältnis bis 10 zu fertigen. So werden in [7] Diamant-Profilwerkzeuge vorgestellt, welche als Rechteckwerkzeuge eine Schnittbreite von 40 μm aufweisen. Des Weiteren werden hier V-Nutenfräser mit einem Spitzenwinkel von 15 ° und einer Spitzenbreite unter 10 μm aufgezeigt. Die Kombination aus hochpräzisen Bearbeitungsmaschinen mit bis zu sieben Achsen sowie Spindeldrehzahlen von bis zu 250000 min^{-1} [9, 10] und anwendungsspezifisch optimierten Geometrien der eingesetzten Fräser erlaubt heute minimale laterale Strukturgrößen von 10 μm bis 1000 μm und Aspektverhältnisse von 2 bis 50 [3.1.1.-5]. Hinsichtlich der mittleren Rauheit R_a sind mit Hartmetallfräsern Werte im Bereich von 300 nm und mit Diamantfräsern Werte von 10 nm realisierbar [11].

3.1.2. Elektroerosive Verfahren

Elektroerosive Verfahren, auch als Funkenerosion oder electrical discharge machining (EDM) bezeichnet, bieten ebenfalls vielfältige Möglichkeit der Generierung dreidimensionaler Strukturen. Der Materialabtrag beruht bei diesen Verfahren auf dem Energieeintrag in oberflächennahe Bereiche mittels elektrischer Entladungen. Hierdurch kommt es bei jeder Entladung zum Schmelzen und Verdampfen einer geringen Menge des abzutragenden Materials. Limitationen erfahren diese Verfahren dahingehend, dass lediglich leitfähige Materialien bearbeitet werden können. Mit Ausnahme einiger Verfahrensvarianten, wie der DEDM [12, 13], findet die Bearbeitung typischerweise in einer dielektrischen Flüssigkeit (z.B.: Petroleum, Testbenzin, deionisiertes Wasser) statt [14]. Das verwendete Dielektrikum dient dabei der elektrischen Isolation zwischen Elektrode und zu bearbeitendem Werkstück, welche mit einer gepulsten Gleichspannung beaufschlagt werden. Durch Verringerung des Abstandes zwischen Elektrode und Werkstück kommt es zur Unterschreitung des, durch die angelegte Gleichspannung und das genutzt Dielektrikum bedingten, kritischen Abstandes und zur Ausbildung der Entladung. Für die Generierung dreidimensionaler Strukturen sind insbesondere die Verfahrensvarianten des

Mikrosenkerodierens sowie der Mikrofunkenerosion von Bedeutung. Beide Verfahren ermöglichen die Herstellung einfacher dreidimensionaler Oberflächenstrukturen bis hin zu Freiformgeometrien [15]. Während beim Mikrosenkerodieren die Elektrode bereits die dreidimensionale Gestalt des Negativs der zu erzeugenden Struktur aufweist und dieses bei der Annäherung der Elektrode lediglich mit geringen Abweichungen der geometrischen Abmessungen aus dem Werkstück abgetragen wird, erfolgt die Strukturzeugung bei der Mikrofunkenerosion durch sukzessiven Materialabtrag bei gleichzeitiger Relativbewegung zwischen Werkstück und Elektrode. Hinsichtlich der Werkzeugbahnen kann dieses Verfahren mit dem 3D-Mikrofräsen verglichen werden. Die verwendeten Elektroden in Kombination mit der Positioniergenauigkeit für die Relativbewegung bedingen daher maßgeblich die erzielbare Auflösung. Mittels Mikrosenkerodieren können in Abhängigkeit von der verwendeten Elektrode Strukturen mit einem Aspektverhältnis bis 20 sowie minimalen Strukturabmessungen bis zu 20 μm bei einer resultierenden mittleren Rauheit R_a im Bereich von 0,1 μm realisiert werden [15]. Die Elektroden für die Mikrofunkenerosion sind bis zu einem minimalen Durchmesser von 5 μm verfügbar [16]. Typischer für die Erzeugung dreidimensionaler Freiformgeometrie sind jedoch Elektroden mit Durchmessern im Bereich von 100 μm , mit welchen mittlere Rauheiten R_a in der Größenordnung von bis zu 0,2 μm erreicht werden können [15, 17]. Durch Variation der angelegten Spannung, des Stroms an der Funkenstrecke, der Entladungsdauer, der zeitlichen Abfolge der Entladungen sowie weiterer Prozess- und Bearbeitungsparameter (Art und Austauschgeschwindigkeit des verwendeten Dielektrikums, Vorschubgeschwindigkeit usw.) können Abtragsraten, Oberflächenrauheit und Oberflächenmorphologie in prozessbedingten Grenzen definiert beeinflusst werden [12 – 14].

3.1.3. Laserbasierte Verfahren

Aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sind laserbasierte Verfahren im Bereich der 3D-Mikrostrukturierung etabliert. Sie zeichnen durch den verschleißfreien, berührungslosen und kräftefreien Charakter der Bearbeitung aus. Mit Ausnahme etwaiger Prozessgase kann in Abgrenzung zu den mechanischen und elektroerosiven Verfahren auf Kühlschmiermittel bzw. dielektrische Flüssigkeiten verzichtet werden, wodurch der Aufwand für nachfolgende Reinigungsschritte der strukturierten Probenoberflächen sinkt. Hinsichtlich der Laserstrahlquellen kommen typischerweise

Systeme im gepulsten Betrieb zum Einsatz. Die Pulsdauer der applizierten Laserstrahlpulse reicht dabei vom Nanosekundenbereich, welche auch als kurze Laserstrahlpulse bezeichnet werden, bis in den Piko- und Femtosekundenbereich, für welche die Bezeichnung ultrakurze Laserstrahlpulse gebräuchlich ist. Im Bereich der Bearbeitung mit Nanosekundenlaserstrahlpulsen erfolgt der Materialabtrag auf Basis von Schmelz-, Verdampfungs- oder Sublimationsprozessen. Mit der thermischen Belastung durch den Strukturierungsprozess geht die Ausbildung wärmebeeinflusster Zonen einher, deren geometrische Ausdehnungen abhängig sind von den Prozess- und Bearbeitungsparametern. So werden in [18] Ergebnisse der Strukturierung kobaltgebundener WC-Hartmetalle mit gütegeschaltetem Nd:YAG- bzw. Nd:YVO₄-Laser und Pulsdauern im Bereich von 80 ns bzw. 30 ns sowie Ti:Saphir-Laser mit einer Pulsdauer von 100 fs aufgezeigt. Für die Bearbeitung mit ns-Laserstrahlpulsen sowie das Hochfluenzregime der fs-Laserstrahlpulse konnten strukturelle Änderungen im Bereich von kleiner 3 µm festgestellt werden. Weiterhin kritisch sind die bei Anwendung von Laserstrahlpulsen in ns-Bereich auftretenden Entmischungsprozesse bei der Strukturierung kobaltgebundenen WC-Hartmetalls, welche auf die stark unterschiedlichen Schmelz- und Siedetemperaturen von Wolframcarbid und Kobalt zurückzuführen werden können [18]. Limitation erfährt die Mikrostrukturierung mit kurzen Laserstrahlpulsen ebenfalls für die Bearbeitung von Stählen. Hierbei kommt es neben den thermisch bedingten Gefügeveränderungen zu Aufwürfen und Gratbildung durch wiedererstartete Schmelze [19, 20] sowie zu Verrundungen von Strukturkanten infolge der Schmelzdynamik [21]. Die erzielbaren Genauigkeiten sind abhängig von den in Anwendung gebrachten Laserstrahlquellen, den Prozess- und Bearbeitungsparametern sowie den Werkstoffeigenschaften. Mit kurzen Laserstrahlpulsen lassen sich typische Werte der mittleren Rauheit R_a im Bereich von 1,0 µm bei Genauigkeiten bis zu 0,01 mm realisieren [21].

Eine deutliche Verbesserung der Bearbeitungsqualität hinsichtlich der erreichbaren Oberflächenrauheit und der Strukturauflösung bei gleichzeitiger Verminderung respektive Vermeidung der Ausbildung schmelzflüssiger Phasen kann durch die Nutzung ultrakurzer Laserstrahlpulse im Niedrigfluenzregime realisiert werden [19, 20, 22, 23]. Die Abtragsmechanismen [19, 20, 22 – 24] für die Ablation infolge der Bestrahlung mit Ultrakurzpulslaserstrahlung unterscheiden sich dabei deutlich von denen bei der Bearbeitung mit längeren Pulsdauern im Nanosekundenbereich und darüber hinaus. Eine Beschreibung ist mittels des abgeleiteten Zwei-Temperaturen-

Modells möglich [19, 20, 22 – 24]. Dieses liefert, auf Basis der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an den jeweiligen Versuchsmaterialien, die Fluenzbereiche zur Auswahl geeigneter Strukturierungsparameter. Hierbei ist insbesondere das Niedrigfluenzregime von Interesse für die Erzeugung hochqualitativer dreidimensionaler Mikrostrukturen. Das Überschreiten dieses materialspezifischen Fluenzbereiches bedingt eine signifikante Verschlechterung der Bearbeitungsqualität. Insbesondere sind ein Abfall der Volumenabtragsraten [25], eine Vergrößerung der wärmebeeinflussten Zone bis hin zur Ausbildung von Schmelzen [18 – 20, 26] sowie ein Anstieg der mittleren Rauheit zu verzeichnen. In diesem auch als Hochfluenzregime bezeichneten Bereich bieten ultrakurze Laserstrahlpulse keine wesentlichen Vorteile gegenüber der Bearbeitung mit Laserstrahlpulsen längerer Pulsdauer [19].

Für die Strukturierung von Stählen und Hartmetall können unter Verwendung ultrakurzer Laserstrahlpulse bei Bearbeitung im Niedrigfluenzregime typische Werte der mittleren Rauheit R_a im Bereich von einigen 100 nm erreicht werden [27, 28]. Hierbei ist mit steigender Laserstrahlpulsfluenz eine Zunahme der mittleren Rauheit festzustellen. Vor dem Hintergrund der geringeren Rauheit sowie der verminderten thermischen Belastung der strukturierten Oberflächenbereiche bietet der Einsatz ultrakurzer Laserstrahlpulse weitreichende Potentiale für die Erzeugung dreidimensionaler Mikrostrukturen.

In Abgrenzung zu den genannten Möglichkeiten der Lasermikrostrukturierung unter Verwendung kurzer und ultrakurzer Laserstrahlpulse, können für spezifische Anwendungen auch Laserstrahlquellen mit deutlich längerer Pulsdauer bis hin zu cw-Lasern zum Einsatz kommen. Beispielhaft ist das Verfahren des reaktiven Abtrags für die Strukturierung von Eisenwerkstoffen zu nennen [29 – 32]. Bei diesem auch als Laserspanen bezeichneten Verfahren erfolgt durch die Absorption der auftreffenden Laserstrahlung eine oberflächennahe Aufheizung des Materials bis knapp unterhalb der Schmelztemperatur. Mit Überschreitung der Zündtemperatur setzt die Reaktion des erhitzten Metalls mit dem als Prozessgas zugeführten oder aus der Umgebungsluft stammenden Sauerstoff ein. Der Materialabtrag selbst resultiert aus Spannungen infolge unterschiedlicher Volumenausdehnungen zwischen dem sich bildenden Eisenoxid und dem Metall [32]. Diese führen bei geeigneter Parameterauswahl zur Ablösung des Oxids von der Oberfläche. Durch die Vermeidung einer schmelzflüssigen Phase ist die Erzeugung scharfkantiger Strukturen möglich.

Begrenzungen erfährt das Verfahren hinsichtlich der, im Vergleich zur Lasermikrostrukturierung mit kurzen und ultrakurzen Laserstrahlpulsen, geringen Prozessgeschwindigkeiten sowie der Materialauswahl, welche vornämlich auf Eisenwerkstoff beschränkt ist [29 – 32].

3.2. Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen

Die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mit Gitterperioden kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ in der Oberfläche von Mikroprägewerkzeugen ist mit einer Vielzahl von Verfahren möglich. Diese Gitterstrukturen können hierbei entweder direkt in der Oberfläche der Prägewerkzeuge erzeugt werden bzw. deren Erzeugung erfolgt in der Oberfläche spezifischer Einsätze, welche nachfolgend über geeignete Befestigungen oder Aufspannungen an den Prägewerkzeugen angebracht werden. Maßgebend für das jeweils in Anwendung gebrachte Verfahren ist der Werkstoff des Prägewerkzeuges bzw. Abformeinsatzes, in dessen Oberfläche die Gitterstrukturen eingebracht werden sollen, sowie die Zielmaterialien, in welche zu einem späteren Zeitpunkt die Abformung erfolgt. In Hinblick auf die mechanischen Belastungen der Mikroprägewerkzeuge sind die für diese relevanten Werkstoffe limitiert. Als Grundwerkstoffe kommen vorzugsweise wärmebehandelte Stähle sowie aus der Gruppe der Hartstoffe WC-Hartmetall zur Anwendung. Zur Erhöhung der Standzeiten sind des Weiteren Hartstoffbeschichtungen auf den, die beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen aufweisenden, Funktionsflächen der Prägewerkzeuge von Interesse. Hierbei ist die Strukturierung in der jeweiligen Hartstoffschicht der nachgelagerten Beschichtung von Gitterstrukturen aufweisenden Funktionsflächen vorzuziehen. Die Ursache hierfür liegt in der angestrebten Zielgröße der Gitterperiode von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ in Kombination mit den mechanischen Belastungen der Gitterstrukturen im Zuge des nachfolgenden Prägeprozesses sowie den Anforderungen an Konturtreue und Strukturmaßhaltigkeit. Ist nur eine geringe Anzahl der Abformungen vorgesehen oder erfolgt diese bei vergleichsweise geringem Druck in plastisch leicht deformierbare Verpackungsmaterialien, können ebenfalls Werkstoffe geringerer Härte und Festigkeit eingesetzt werden. Ein typisches Beispiel hierfür sind Shim-Formeinsätze aus Nickel [58, 59], welche für die Prägung in UV-härtende Lacke sowie das Heißprägen thermoplastischer Kunststoffe wie PET oder BOPP in Verwendung sind (siehe Kapitel 3.3.).

In den nachstehenden Kapiteln werden Verfahren zur Strukturierung in den genannten Materialien vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die erzielbaren Strukturabmessungen hinsichtlich Gitterperiode und Strukturtiefe, die Qualität der Strukturierung sowie die Limitationen der jeweiligen Verfahren eingegangen.

3.2.1. Photolithographie und Ätztechnik

Die Photolithographie in Verbindung mit verschiedenen, in Abhängigkeit vom zu bearbeitenden Werkstoff zu wählenden Ätzverfahren bietet vielfältige Möglichkeiten zur Realisierung der angestrebten beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen. Hierbei wird in einem ersten Schritt zunächst die Maskierung der Oberflächenbereiche realisiert, welche nicht den nachgelagerten Ätzprozessen unterliegen sollen. Im Bereich des nasschemischen Ätzens kommen dafür vorzugsweise spezielle photosensitive Lacke, welche auch als Photoresist bzw. Fotolack bezeichnet werden, zum Einsatz. Die Belichtung dieser Lacke im Rahmen des Lithographieprozesses kann über abbildende Systeme oder auch mittels direkten Kontakts zwischen Belichtungsmaske und verwendetem Fotolack erfolgen. Je nach verwendetem Lacktyp (Positiv- bzw. Negativlack) erfolgt die Übertragung der Struktur der Belichtungsmaske in den Lack. Nach der Entwicklung des Lackes bleibt dieser für den Negativlack im belichteten Bereich erhalten und wird im nicht belichteten Bereich entfernt. Für den Positivlack geschieht dies in umgekehrter Art und Weise. Der auf der Oberfläche verbleibende Lack wirkt für den nachgelagerten Prozessschritt des nasschemischen Ätzens als Ätzstopp. Das in Anwendung zu bringende Ätzmittel ist abhängig vom zu strukturierenden Werkstoff. So kann beispielsweise die Strukturierung in der Oberfläche von Stählen mittels nasschemischen Ätzens erfolgen. Limitierende Faktoren hinsichtlich der Qualität der auf diese Art realisierten Strukturen sind vornehmlich das Gefüge des jeweiligen Stahls sowie die Problematik des Unterätzens der Ätzstoppmaske. Hierbei führt das Unterätzen zu Abweichungen der Gittergeometrie, insbesondere zu unregelmäßigen Strukturkanten und Schwankungen der Strukturabmessungen der vom Ätzstopp bedeckten Oberflächen. Infolge des isotropen Charakters dieses Ätzprozesses sind die erzielbaren Strukturturen auf die Hälfte der Abmessungen der mit Ätzstopp bedeckten Bereiche begrenzt. Eine Steuerung der Strukturtiefe und Gitterparameter ist durch das eingesetzte Maskendesign sowie die Anpassung der Ätzdauer gegeben. Die verwendeten Ätzmittel und die differierenden Ätzraten der jeweiligen Gefügebestandteile sowie

deren Korngröße und Anordnung im Gefüge bedingen die Oberflächenmorphologie in den Bereichen, welche dem Ätzprozess unterliegen. Eine Strukturierung im angestrebten Bereich der Gitterperiode von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ ist unter Verwendung von Murakami-Reagenz [33] in WC-Hartmetall möglich. Für diamantartige Hartstoffschichten wie DLC und ta-C stehen bei Raumtemperatur keine geeigneten nasschemischen Ätzmittel zur Verfügung. Lediglich bei Temperaturen von 800-1000 K [34] ist ein nasschemisches Ätzen von Diamant in geschmolzenen Salzen wie beispielsweise KNO_3 möglich [34, 35].

3.2.2. Strukturierung mittels gerichteten Teilchenstroms

Im Vergleich zu den in Kapitel 3.2.1. aufgezeigten Verfahren ist eine deutliche Verbesserung der Strukturierungsqualität hinsichtlich der erzielbaren Aspektverhältnisse sowie der Genauigkeit der Strukturkanten und Strukturabmessungen durch Nutzung anisotroper Ätzprozesse unter Verwendung eines gerichteten Teilchenstroms gegeben [36]. Gebräuchliche Verfahrensvarianten sind das Ionenstrahlätzen oder das Plasmaätzen, bei welchen die Prozessführung innerhalb eines Vakuumrezipienten erfolgt. Diese ermöglichen des Weiteren die Strukturierung in chemisch inerten Materialien wie ta-C, DLC und c-BN sowie weiteren Hartstoffschichtmaterialien [37]. Hierzu erfolgt in Analogie zum Vorgehen beim nasschemischen Ätzen zunächst die Maskierung der nicht zu strukturierenden Oberflächenbereiche. Für das Verfahren des Ionenstrahlätzens sind die genutzten Techniken zur Maskierung sowie die verwendeten Fotolacke identisch mit denen für das nasschemische Ätzen. Beim Plasmaätzen hingegen ist das zum Einsatz kommende Maskierungsmaterial abhängig vom zu strukturierenden Werkstoff und dem einzusetzenden Ätzmittel. Maßgebend ist die, für die jeweilig verwendeten Ätzmittel, stark verminderte Ätzrate im Vergleich zu den zu strukturierenden Materialien. In [36] wird für das Plasmaätzen eine Übersicht über mögliche Ätzmittel und Arten der Plasmaerzeugung zur Strukturierung in einer Vielzahl von Hartstoffen gegeben. Detaillierte experimentelle Ergebnisse sowie die hierfür genutzten Prozesse werden für Diamant in [38 – 44] sowie für DLC in [45 – 47] aufgezeigt. Unter Verwendung von beispielsweise Nickel [45], Aluminium [48] oder Gold [40] als Maskenmaterial sind minimale Strukturabmessungen bis 20 nm [45] und Aspektverhältnisse (Höhe / Breite) im Bereich von 25 [48] bis 30 [45] realisierbar.

Aus dem Bereich der abtragenden Verfahren ist die Strukturierung im angestrebten Größenbereich der Gitterperiode von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ ebenfalls mittels fokussierten Ionenstrahl (FIB-Verfahren) oder fokussiertem Elektronenstrahl möglich. Diese weisen jedoch im Vergleich zum Ionenstrahlätzen oder Plasmaätzen eine geringere Produktivität bei großflächiger Erzeugung der Gitterstrukturen auf. Weiterhin bedingt die, mit der Bearbeitung mittels Elektronenstrahl, einhergehende thermische Belastung der zu strukturierenden Substrate eine Limitation des Verfahrens.

Für die Strukturierung mittels gerichteten Teilchenstroms können neben den bereits beschriebenen, auf Materialabtrag beruhenden Verfahren ebenfalls generative Verfahren in Anwendung gebracht werden. Dies ist insbesondere mit der physikalischen (PVD) und der chemischen (CVD) Dampfphasenabscheidung möglich. Beide Beschichtungsverfahren erlauben die Realisierung von Gitterstrukturen mit einer Gitterperiode von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$. Beim CVD-Verfahren erfolgt dabei die Abscheidung des Beschichtungsmaterials typischerweise durch eine thermisch aktivierte chemische Reaktion an der Oberfläche des zu beschichtenden Substrates. Für die selektive Abscheidung der Schichtmaterialien sind vordergründig fokussierte Ionen- [49], Elektronen [50] oder Laserstrahlen [51 – 53] anwendbar, welche entsprechend der zu erzeugenden Strukturen auf der Probenoberfläche abgelenkt werden. Sie ermöglichen die für die Abscheidung erforderlichen Oberflächentemperaturen der Substrate in entsprechend kleinen Bestrahlungsquerschnitten. Im Gegensatz zu den CVD-Verfahren ist bei den PVD-Verfahren im Vorfeld der Beschichtung die Substratoberfläche, auf welcher keine Beschichtung erfolgen soll, zu maskieren. Hierzu können die bereits in 3.2.1. beschriebenen Techniken Anwendung finden. Ursächlich hierfür ist, dass die Schichtabscheidung bei den PVD-Verfahren auf dem Prinzip der Kondensation und Erstarrung von zuvor in die Dampfphase überführten Teilchen auf den zu beschichtenden Substratoberflächen beruht. Eine selektive Abscheidung, wie dies infolge der chemischen Reaktion bei den CVD-Prozessen gegeben ist, ist daher nicht möglich. Die unter Verwendung von PVD-Prozessen erzeugten Gitterstrukturen liegen daher erst nach Entfernung der Maskierungsschichten auf den zuvor vollflächig beschichteten Substraten vor. Sowohl bei den CVD- als auch den PVD-Verfahren erfolgt die Einstellung der Dicke der abgeschiedenen Schichten durch die Variation der Beschichtungsparameter.

Mit der Molekularstrahlepitaxie sowie dessen spezifischen Modifikationen steht ebenfalls ein etabliertes Verfahren zur Erzeugung periodischer Gitterstrukturen in den angestrebten Größenordnungen zur Verfügung. So wird in [54] die Abscheidung von Natrium, Aluminium und Chrom mittels laserfokussierter atomarer Abscheidung beschrieben. Auf die Oberfläche des zu beschichtenden Substrates auftreffende Atome werden durch die Laserstrahlung, welche annähernd als stehende Welle appliziert wird, beeinflusst. Durch die Interaktion der schichtbildenden Teilchen mit der stehenden Welle scheiden sich diese im Bereich der Wellenknoten ab. Mit dem beschriebenen Verfahren konnten periodische Gitter mit einer Höhe der abgeschiedenen Chromschicht von 60 nm und einer Breite der einzelnen Linien von 28 nm auf Silizium- und Saphirsubstraten realisiert werden. Die Gitterperiode entspricht dabei der Hälfte der genutzten Laserstrahlwellenlänge. Durch Anwendung der bereits beschriebenen Maskierungsverfahren unter Nutzung photosensitiver Lacke (siehe Kapitel 3.2.1) ist die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen auch mittels klassischer MBE möglich. Infolge vergleichsweise geringer Aufwachsraten im Bereich von typischerweise kleiner gleich 1 μm pro Stunde [55 – 57] ist eine sehr genaue Steuerung der resultierenden Schichtdicke gegeben, wodurch die Produktivität jedoch stark limitiert ist.

3.2.3. LIGA-Technik

Zur Fertigung von Abformeinsätzen steht mit der LIGA-Technik ein etabliertes Verfahren zur Verfügung [58, 59]. Hierbei wird die gewünschte Zielstruktur, welche durch die spätere Abformung in den Zielmaterialien realisiert werden soll, zunächst in die Oberfläche von Silizium, Glas oder gegebenenfalls auch direkt in Photoresist eingebracht. Für die Strukturierung werden die zu strukturierenden Substratoberflächen mit einem photosensitiven Lack beschichtet. Die nachfolgende Belichtung bedingt eine chemische Veränderung des Lacks in den bestrahlten Bereichen. In Abhängigkeit von der Art des verwendeten Lacks bleiben nach der nasschemischen Entwicklung die bestrahlten bzw. unbestrahlten Bereiche der Lackschicht erhalten. Die Bestrahlung selbst erfolgt unter Nutzung photolithographischer Verfahren bzw. mittels Elektronenstrahlolithographie [58 – 62]. Ist eine Übertragung der Struktur der entwickelten Lackschicht in die Glas- bzw. Siliziumsubstrate gewünscht, geschieht dies typischerweise mittels nasschemischen Ätzens oder durch reaktives Ionenätzen [58, 62]. Durch erneutes Aufbringen des

photosensitiven Lacks und Wiederholung der Belichtungs-, Entwicklungs- und Ätzprozesse ist die Möglichkeit der Realisierung mehrstufiger Oberflächenprofile gegeben. Weisen die Substrate die geforderte Oberflächenstruktur auf, wird auf diesen mittels PVD-Verfahren eine geschlossene, leitfähige Metallschicht abgeschieden. Die Erstellung der Shim-Formeinsätze erfolgt nun durch galvanische Abscheidung. Für die Galvanoformung kommt vorzugsweise Nickel zum Einsatz, wobei eine Dicke der Shims von einigen 100 μm (typisch 500 μm) angestrebt wird [58, 59]. Hinsichtlich der Härte der abgeschiedenen Nickelschichten werden in Abhängigkeit von den Parametern der galvanischen Abscheidung Werte im Bereich von 300 bis 400 HV_{0,1} erreicht [58, 59, 62]. Die Trennung der Shim-Formeinsätze von den Substraten wird für die Siliziumsubstrate durch chemisches Auflösen realisiert. Bei Verwendung von Glassubstraten ist dies aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten durch Erhitzen [58] möglich.

Die mittels Ligatechnik hergestellten Shim-Formeinsätze zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit der eingebrachten Strukturen aus, welche je nach Auflösungsvermögen der verwendeten Lacke sowie des genutzten Belichtungsverfahrens und den Metallisierungsparametern bis in den unteren Nanometerbereich (kleiner 50 nm) reicht [58, 59, 62]. Eine definierte Steuerung der Höhe der Strukturen ist durch Variation der Anzahl der Lackschichten und deren Schichtdicke bzw. durch die pro Prozessschritt realisierte Ätztiefe gegeben. Limitierend wirkt die eingeschränkte, für die Galvanoformung zur Verfügung stehende Materialauswahl in Hinblick auf die erzielbaren Härten. Wenngleich härtere Nickelmodifikation abgeschieden werden können, sind diese, infolge des mit zunehmender Härte der Nickelschichten einhergehenden Abfalls der Duktilität, technisch nicht uneingeschränkt nutzbar. Des Weiteren geht mit der Härtezunahme der verschiedenen Nickelmodifikationen der Verlust der Schweißeignung einher [63]. Dies wirkt beschränkend, da die Befestigung der Shims auf den Prägewerkzeugen typischerweise durch Schweißen oder anwendungsspezifische Spann- und Haltesystem erfolgt.

3.2.4. Elektroerosive Verfahren

Die bereits im Kapitel 3.1.2. beschriebenen elektroerosiven Verfahren sind ebenfalls für die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen geeignet. Dies ist insbesondere unter Verwendung von beispielsweise mittels LIGA-Technik (vgl. Kapitel 3.2.3.) hergestellten Formelektroden im angestrebten Größenbereich der Gitterperiode möglich. Einschränkungen unterliegt das Verfahren in den Punkten, dass lediglich leitfähige Materialien bearbeitet werden können sowie den Herausforderungen einer hinreichenden elektrischen Trennung von Elektrode und Werkstückoberfläche durch ein geeignetes Dielektrikum. Dies stellt sich für die angestrebten Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ zunehmend schwierig dar und begrenzt die erreichbaren Aspektverhältnisse.

3.2.5. Laserbasierte Verfahren

Im Bereich der laserbasierten Verfahren existiert eine Vielzahl an Verfahrensvarianten, welche die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen im angestrebten Größenbereich zulässt. Nachfolgend wird exemplarisch auf einige dieser, für die Herstellung von Mikroprägewerkzeugen relevanten, Verfahrensvarianten eingegangen.

3.2.5.1. Fokusabtragverfahren

Die Realisierung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ dringt bereits in den verfahrensbedingten Grenzbereich der erzielbaren Strukturabmessungen vor. Hierzu bedarf es einer entsprechend hohen Positioniergenauigkeit bei der lateralen Relativbewegung zwischen Werkstückoberfläche und Laserstrahl. Vorzugsweise kommen daher hochgenaue Positioniertischsysteme zur Anwendung, welche das Werkstück relativ unter dem zumeist stationären, fokussierten Laserstrahl bewegen [64 – 69]. Die Fokussierung der in Anwendung gebrachten Laserstrahlung auf entsprechend kleine Querschnittsflächen im Bereich der Werkstückoberflächen setzt des Weiteren die Nutzung kurzbrennweitiger Objektive sowie die etwaige Verwendung zusätzlicher Strahlformungskomponenten (z.B. Strahlaufweiter) voraus. Verbreitet ist der Einsatz von unendlich korrigierten Mikroskop-Objektiven [64 – 68], da diese die problemlose Implementierung zusätzlicher optischer Komponenten im Strahlengang (z.B.

Polarisatoren, Strahlteiler oder Beleuchtungsstrahlengänge) ermöglichen. Sie liefern unter dem Ansatz der Bestrahlung mit paraxialer Laserstrahlung Fokusradien im Bereich der Beugungsbegrenzung. Vor dem Hintergrund der Minimierung thermisch bedingter Materialänderungen bietet sich die Nutzung von gepulster Laserstrahlung mit Pulsdauern im Piko- und Femtosekundenbereich an [19, 69].

In [66] wird die Strukturierung von Gräben in der Oberfläche von Diamant beschrieben. Unter Verwendung eines Ti:Saphir-Lasers mit einer Pulsdauer von 220 fs, einer mittleren Laserstrahlwellenlänge von 800 nm und einer Fokusgröße von 1,2 μm auf der Diamantoberfläche konnten Gräben mit einer Breite kleiner gleich 2 μm realisiert werden. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug dabei 0,01 mm/s bis 0,1 mm/s bei einer Repetitionsrate des Lasersystems von 100 kHz und Laserstrahlpulsfluenzen im Bereich von 5,6 kJ/cm² bis 140 kJ/cm². Für die Tiefen der Gräben wurden Werte zwischen 1 μm und 2 μm gemessen. Verbesserungen der Abtragstrukturen für ein vergleichbares Lasersystem (100 kHz Repetitionsrate; 130 fs Pulsdauer; 800 nm mittlere Wellenlänge) durch Nutzung spezieller Komponenten zur Wellenfrontkorrektur sind in [65] aufgezeigt. Für die Bearbeitung von Edelstahl der Werkstoffnummer 1.4301 konnten hiermit Strukturabmessungen im Bereich der Beugungsbegrenzung des eingesetzten Objektivs erreicht werden.

Untersuchungen zur Erzeugung von Gitterstrukturen in Saphir werden in [64] präsentiert. Die geringste Strukturbreite der Gräben betrug 2,2 μm bei Nutzung von Femtosekundenlaserstrahlpulsen mit einer mittleren Wellenlänge von 517 nm, einer Pulsdauer von 350 fs, einer Verfahrensgeschwindigkeit von 150 mm/s bei einer Repetitionsrate des Lasersystems von 100 kHz sowie einer Laserstrahlpulsfluenz geringfügig oberhalb der ermittelten Ablationsschwellfluenz von 50 J/cm².

Das Fokusabtragverfahren zeichnet sich insbesondere durch seine hohe Flexibilität hinsichtlich der realisierbaren Gitterparameter aus. Vergleichsweise geringe Flächenraten bei der Einzelfokusbearbeitung, in Kombination mit den hohen Anforderungen an die in Anwendung zu bringenden Positioniersysteme sowie die minimal realisierbaren Laserstrahlquerschnittsflächen auf der Werkstückoberfläche wirken verfahrensbedingt beschränkend.

3.2.5.2. Maskenprojektionsverfahren

Weitreichende Potenziale sowie hohe Flexibilität sind Merkmale des Maskenprojektionsverfahrens für die Anwendung zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen. Hierbei wird eine das vergrößerte Positiv oder Negativ der Zielstruktur aufweisende Maske mit der Laserstrahlung beaufschlagt. Je nach Art der verwendeten Maske wird der durch diese transmittierte bzw. von dieser reflektierte Strahlungsanteil über ein optisches System verkleinert auf die Probenoberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks abgebildet. Die zur Überschreitung der materialspezifischen Ablationsschwelle notwendigen Energieflussdichten bedingen den Einsatz gepulster Laserstrahlquellen. Für die Bearbeitung der im Vordergrund stehenden Materialien wie Stähle, WC-Hartmetall und Hartstoffbeschichtungen sind insbesondere kurze und ultrakurze Laserstrahlpulse verfahrensrelevant. Hinsichtlich der erzielbaren Auflösung wird diese maßgeblich vom verwendeten Abbildungssystem, der genutzten Laserstrahlwellenlänge sowie vom Zusammenspiel zwischen Maskendesign und zu bearbeitendem Material bestimmt.

In [70] ist das Verfahren beschrieben und es werden Beispiele für die Realisierung verschiedener Mikrostrukturen gegeben. Unter Verwendung eines Excimer-Lasersystems, welches Laserstrahlpulse im ultravioletten Strahlungsspektrum liefert, ist die Erzeugung periodischer Gitterstrukturen mit Gitterperioden von ein bis zwei Mikrometern in ta-C- [70] und anderen Hartstoffschichten möglich. Beschränkend wirken die typischen Pulsdauern der Excimer-Lasersysteme im Nanosekundenbereich. Bei der Bearbeitung von Stählen führen diese bereits zur Ausbildung von Schmelze und bedingen eine thermische Beeinflussung des strukturierten Materials. Für Hartstoffschichten (z. B. Aluminiumoxid) konnte z.T. eine thermische Zersetzung im Ergebnis der Bearbeitung festgestellt werden. Durch die Verwendung von Laserstrahlpulsen kürzer Pulsdauer lassen sich diese Effekte verringern. So wird in [71] auf die Strukturierung weiterer oxydischer Keramiken (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2) mittels Maskenprojektionsverfahren eingegangen, welche sich auf Grund ihrer Härte als Verschleißschutzschichten eignen. Für die hier zur Anwendung gebrachten Laserstrahlpulse mit einer Pulsdauer von 500 fs und einer Wellenlänge von 248 nm konnte, im Vergleich zu der Bearbeitung mit Laserstrahlpulsen gleicher Wellenlänge und Pulsdauern im Nanosekundenbereich, neben einer geringeren thermischen Belastung auch eine höhere Ablationsrate festgestellt werden.

Die Produktivität des Verfahrens skaliert mit der zur Verfügung stehenden Pulsenergie der eingesetzten Laserstrahlquellen sowie der nachfolgenden Strahlführung und Strahlformung. Maßgebende Faktoren sind dabei die materialspezifischen Ablationsschwellen, das Maskendesign bzw. die Strukturvorgaben für die zu erzeugenden Gitterstrukturen sowie die Geometrie der zu bearbeitenden Werkstückoberflächen.

3.2.5.3. Interferenzverfahren

Die Überlagerung mehrerer Laserstrahlen im Bereich der Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks bietet ebenfalls eine hohe Flexibilität in Hinblick auf die Erzeugung von Gitterstrukturen mit beugungsoptisch wirksamem Charakter für Licht [72 – 78]. Bei diesem auch als DLIP bezeichneten Verfahren beruht der Strukturierungsprozess auf der räumlichen Modulation der Energieflussdichteverteilung durch Interferenz von zwei oder mehr Teilstrahlen, welche auf den gleichen Oberflächenbereich fokussiert werden. Auch hierzu wird ob der für die Materialmodifikation bzw. die Ablation notwendigen Fluenzen vorzugsweise gepulste Laserstrahlung in Anwendung gebracht. Die Materialbearbeitung erfolgt verfahrensbedingt durch definierte Überschreitung der materialspezifischen Schwellfluenzen im Bereich der Interferenzmaxima. Dabei wird die Auflösung des Verfahrens maßgeblich durch die verwendeten Laserstrahlquellen, insbesondere die Laserstrahlwellenlänge, die Kohärenzlänge sowie die Pulsdauer, und die Auslegung der Strahlführungs- und Strahlformungssysteme bestimmt. Eine definierte Einstellung der Gitterperioden der erzeugten Strukturen ist bei Nutzung von Teilstrahlen gleicher Wellenlänge durch Variation des jeweiligen Winkels, unter welchem die Teilstrahlen überlagert werden, gegeben [72 – 78]. Typische Bereiche der realisierbaren Strukturperioden sind 150 nm bis 30 µm, wobei in Abhängigkeit von den Spezifikation der eingesetzten Systeme sowohl die Bearbeitung von zweidimensionalen als auch dreidimensionalen Bauteilen möglich ist [74, 77, 78]. Die Produktivität skaliert dabei mit den genutzten Lasersystemen sowie der anwendungsspezifischen Auslegung der Strahlführungs- und Strahlformungskomponenten. Ist hierbei anforderungsbedingt ein häufiger Wechsel der Geometrieparameter der zu erzeugenden Strukturen gefordert, bedarf es für jedes Parametersetup einer erneuten, z.T. aufwendigen Justage der Teilstrahlen zueinander.

3.2.5.4. Laserinduzierte Oberflächenstrukturen

Mikro- und Nanostrukturen, welche im Zuge der Lasermaterialbearbeitung entstehen, sind bereits seit längerem bekannt. Deren Geometrie ist dabei ebenso wie die Beschreibungsmodelle der Ausbildungsmechanismen sowohl vom Material als auch von der für die Strukturierung genutzten Laserstrahlung abhängig. Für die Bearbeitung von einer Schmelzphase ausbildenden Materialien und Verwendung kontinuierlicher Laserstrahlung bis hin zu gepulster Laserstrahlung mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich werden zumeist hydrodynamische Erklärungsmodelle herangezogen [79]. Infolge der thermischen Beeinflussung der oberflächennahen Bereiche und den damit einhergehenden Eigenschaftsänderungen für die in der vorliegenden Arbeit relevanten Materialien sind die bei diesen Bearbeitungsregimen erzielbaren Strukturen nicht anwendbar. Eine Verringerung der Laserstrahlpulsdauer bietet vor dem Hintergrund kleinerer wärmebeeinflusster Zonen technologische Vorteile hinsichtlich des Erhalts der Funktionalität der Werkstoffe. Bei der Applikation ultrakurzer Laserstrahlpulse mit Pulsdauern im Bereich von Pikosekunden und Femtosekunden kommt es in Abhängigkeit von Prozessparametern und den bearbeiteten Werkstoffen zur Ausbildung verschiedenartiger Oberflächenstrukturen [80 – 90]. Vor dem Hintergrund der Nutzung als Beugungsgitter für Licht sind aus den unter der Bezeichnung LIPSS klassifizierten Strukturen [88] besonders die als LSFL oder gemeinhin als Ripple bezeichneten Typen interessant. Hinsichtlich deren Entstehung konkurrieren verschiedene Erklärungsmodelle [80, 82, 84, 91]. Ihre Gitterperiode ist typischerweise geringfügig kleiner als die eingesetzte Laserstrahlwellenlänge und skaliert mit dieser [80 – 82]. Beispiele für die Bearbeitung von Stahl, Wolframcarbid und ta-C-Hartstoffschichten sind in [80, 81] aufgezeigt. Die hier untersuchten LSFL des Typs sind Bestandteil der Versuche zu dieser Arbeit und werden nachfolgend noch näher behandelt.

Begründet in der vergleichsweise einfachen Umsetzung, welche sich im Wesentlichen auf die definierte Regelung der Fluenz, der Polarisierung sowie der Anzahl der pro Oberflächeneinheit applizierten Laserstrahlpulse beschränkt, ist eine unkomplizierte Anpassung des Prozesses an verschiedene Bearbeitungsaufgaben gegeben. Lediglich die Einschränkungen hinsichtlich der Variation der Gitterperiode der generierten Strukturen wirken limitierend [81, 82, 84].

3.2.5.5. Laserinduzierte / -unterstützte Ätzverfahren

Das laserinduzierte bzw. laserunterstützte Ätzverfahren unterscheidet sich vom klassischen Trockenätzverfahren sowie dem nasschemischen Ätzen dahingehend, dass die Reaktion zwischen Ätzmittel und der Festkörperoberfläche lediglich in dem Bereich erfolgt, welcher mit der Laserstrahlung beaufschlagt wird bzw. in welchem wesentlich höhere Ätzraten erreicht werden [72]. Hinsichtlich geeigneter Ätzmittel können diese sowohl im gasförmigen Zustand (Precursor) als auch in flüssiger Form vorliegen. Die Absorption der auf die Probe aufgetragenen Laserstrahlung bewirkt in Kombination mit dem Ätzmittel einen thermischen oder photochemischen Prozess, welcher die oberflächliche Ätzreaktion treibt. Maßgebende Faktoren für die Bearbeitbarkeit des Werkstoffs und die erzielbare Auflösung sind neben der verwendeten Laserstrahlung sowie den erreichbaren Bestrahlungsquerschnitten auf der Probenoberfläche die für die Materialien anwendbaren Ätzmittel. Deren Selektivität in Hinblick auf die prozessbedingten Ätzraten bestimmt ebenfalls die Qualität des Strukturierungsergebnisses.

3.3. Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen

Für die Abformung beugungsoptisch wirksamer Strukturen auf Verpackungsmaterialien haben sich auf industrieller Ebene das Heißprägen [92 – 97] sowie die Prägung in UV-härtende, z.T. angehärtete Lacke [98 – 100] etabliert. Für das Verfahren des Heißprägens kommen als Zielmaterial der Abformung vorzugsweise in Folienform vorliegende thermoplastische Kunststoffe wie PET oder BOPP [92, 94 – 97] und für spezifische Anwendungen weichgeglühte Aluminiumfolie [94] zum Einsatz. Die Materialstärke der verwendeten Folien liegt im Bereich von minimal 12 µm [92, 94 – 97] bis maximal 120 µm [94, 97]. Hinsichtlich der Materialien, auf welchen die beugungsoptisch wirksamen Strukturen abgeformt werden können, ist das Verfahren der Prägung in UV-härtende Lacke geringeren Limitationen unterworfen. Typische Zielmaterialien sind Klebeetiketten, Papier und Karton, Verpackungsfolien, Kunststoff und Rohrmaterialien sowie Schrumpf- und Heißsiegelfolien [101]. Für beide Verfahren werden als, die abzuformenden Strukturen tragende, Prägevorlage Nickel Shims eingesetzt [92 – 97, 100]. Für die Prägung in UV-härtenden Lack kommen des Weiteren auch Polypropylenfolien als Vorlage zum Einsatz [98, 99, 102]. Die Tiefe der beugungsoptisch wirksamen Strukturen auf den abzuformenden Vorlagen liegt typischerweise im Bereich von 200 nm [102, 103] bis 250 nm [104]. In [103] werden

Angaben zu den Parametern der Heißprägung in BOPP-Folie vorgestellt. Eine vollflächige Abformung sinusförmiger Gitterstrukturen mit einer Gitterperiode von 1 μm und einer Strukturtiefe von 200 nm wurde im Temperaturbereich von 100 °C bis 120 °C, d.h. größer gleich der materialspezifischen Glasübergangstemperatur, erzielt. Die Prägungen erfolgten bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 30-34 m/min und einem Druck von 0,6 N/mm² bis 1 N/mm². Höhere Vorschubgeschwindigkeiten bedingen eine unvollständige Prägung in die BOPP-Folie. Heißprägungen ähnlicher Gitterstrukturen (1 μm Gitterperiode, 250 nm Strukturtiefe) in eine 60 μm dicke BOPP-Folie werden in [104] vorgestellt. Auch hier konnten vollflächige Abformungen erst bei Temperaturen (≥ 120 °C) oberhalb der Glasübergangstemperatur ($T_g=110$ °C) erzielt werden. Die Prägungen erfolgten abweichend von [103] statisch mit einer Kontaktzeit von 60 s. Während der Prägung wurde der Druck konstant gehalten und betrug 21 N/mm². Weitere Ergebnisse zur statischen Heißprägung von BOPP-Folie mit einer Materialstärke von 60 μm sind in [105] aufgezeigt. Die Abformung von Mikrostrukturen mit einer Strukturgröße von ≥ 365 nm und einer Strukturtiefe von ≥ 255 nm erfolgte bei einem konstanten Druck von 300 N/mm², einer Temperatur von 130 °C und einer Kontaktzeit von 60 s. Das in [104] und [105] verwendete Material ist identisch mit dem, welches derzeit für die Produktion australischer Kunststoffbanknoten Verwendung findet. Auf eine in [106, 107] beschriebene Verfahrensvariante des Heißprägens, bei welcher Vakuumbedingungen im Bereich des Prägewerkzeuges realisiert werden, wird nicht näher eingegangen. Dieses, auch als Vakuumheißprägen bezeichnete Verfahren, ist hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Inline-Prägung bei den angestrebten Materialvorschubgeschwindigkeiten nicht nutzbar. Limitierende Faktoren sind insbesondere die prozessbedingt erforderliche Erhitzung des zu prägenden Materials, in Abhängigkeit von der Polymerart, auf Temperaturen oberhalb der Glasübergangs- bzw. der Schmelztemperatur sowie temperaturabhängigen Kontaktzeiten im Bereich von einigen zehn bis einigen hundert Sekunden [106]. Es werden Drücke zwischen 20 N/mm² und 100 N/mm² appliziert [106, 107].

Im industriellen Maßstab erfolgt die Abformung der beugungsoptisch wirksamen Strukturen in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung sowohl statisch (vorrangig Flachprägung) als auch rotativ. Bei den rotativen Abformungen werden mit kommerziellen Systemen Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von maximal 30-60 m/min [92, 94 – 97] für die Heißprägung und von 30-50 m/min [100] für die Prägung in UV-härtenden Lack erreicht. Maschinen zur statischen Abformung

erreichen Produktionsgeschwindigkeiten für die Heißprägung von bis zu 2000 Blatt/h [93] und für die Prägung in UV-härtenden Lack von 5000-7000 Blatt/h [99]. Die Haltbarkeit der Prägevorlagen beträgt für die bei der Prägung in UV-härtenden Lack verwendeten Polypropylenfolien 10-20 Abformungen [99, 102] und für die Nickel Shims 32000-64000 Abformungen [94, 97]. Bei allen derzeit am Markt befindlichen Maschinen handelt es sich um Offline-Systeme, d.h. die Abformung der beugungsoptisch wirksamen Strukturen auf das Verpackungsmaterial erfolgt im Unterschied zur Inline-Prägung außerhalb der Verpackungsmaschinen.

Quellen für die direkte Prägung beugungsoptisch wirksamer Strukturen in die Oberflächen von Werkstoffverbunden, welche als Verpackungsmaterial für den direkten Kontakt mit dem Lebensmittelrecht unterliegenden Verpackungsgütern vorgesehen sind, konnten im Rahmen der durchgeführten Recherchen nicht aufgefunden werden. Eine Strukturübertragung in die Oberflächen von PET- oder PP-Folien ist bei Temperaturen deutlich unterhalb der materialspezifischen Glasübergangstemperatur gemäß [103 – 107] nicht bzw. nur unzureichend gegeben.

4. Eigenschaften der untersuchten Materialien

Ausgangspunkt der Untersuchungen waren bestehende, industrielle Anwendungen zur statischen und rotativen Prägung verschiedener Materialien im Offline- und Inline-Verfahren. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen als Basis für eine Verfahrenserweiterung hinsichtlich der Abformung von beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen dienen. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst im Einsatz befindliche Werkstoffe für die Untersuchungen herangezogen, um eine Kompatibilität mit bestehender Anlagentechnik bzw. die Möglichkeit der Adaption vorhandener Komponenten und Konstruktionselemente zu ermöglichen. Im Ergebnis der durchgeführten Arbeiten wurden weitere Materialien in die Versuchsmatrix einbezogen.

4.1. Eigenschaften der für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Materialien

Für die statischen Prägeverfahren werden derzeit zumeist zylinderförmige bzw. rondenförmige Prägestempel eingesetzt, deren Stirnfläche die abzuformenden Strukturen trägt. Im Gegensatz hierzu sind die Prägewerkzeuge für die rotative Prägung vordergründig in Form von Hohlzylindern ausgeführt, welche auch als Prägewalzen bezeichnet werden. Die abzuformenden Strukturen befinden sich hierbei entweder direkt in der Oberfläche der Prägewalzen bzw. können an diesen durch, die abzuformenden Strukturen aufweisende, Einsätze oder Aufspannungen angebracht werden.

4.1.1. Grundmaterialien der Mikroprägewerkzeuge

Bei den für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Grundmaterialien handelt es sich vordergründig um Stähle und WC-Hartmetall. Aus der Gruppe der Stähle erfolgten die Untersuchungen an den Werkstoffen mit den Werkstoffnummern 1.2365, 1.2367, 1.7131, 1.2379 und 1.2990. Die Werkstoffe 1.2365, 1.2367 und 1.7131 lagen im nitrierten Zustand, die Werkstoffe 1.2379 und 1.2990 im gehärteten und angelassenen Zustand mit einer Arbeitshärte von 62 HRC vor. Zur Verringerung des Maß- und Formverzuges der Probenkörper erfolgte für die Werkstoffe 1.2379 und 1.2990 die Wärmebehandlung im Vakuumofen mit Gasabkühlung. Für die nitrierten Werkstoffe

wurden die in nachfolgender Tabelle 4-1 aufgezeigten Härtewerte der Oberflächen und Nitrierhärteiefen ermittelt.

Tab. 4-1: Vickershärte der Probenoberfläche und Nitrierhärteiefe der untersuchten Stähle mit den Werkstoffnummern 1.2365, 1.2367 und 1.7131.

Werkstoff	Härte der Probenoberfläche	Nitrierhärteiefe in mm
1.2365	827 ± 37 HV 1	0,1
1.2367	968 ± 43 HV1	0,1
1.7131	693 ± 18 HV 1	0,3

Von den im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Stählen kommt denen mit der Werkstoffnummer 1.2379 und 1.2990 besondere Bedeutung zu. Im Vorgriff auf die in Kapitel 6 und 7 dargelegten Ergebnisse der Laserstrukturierung der Oberfläche der Mikroprägewerkzeuge sowie der Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in der Oberfläche der Mikroprägewerkzeuge in die Zielmaterialien entsprechen nur diese dem Anforderungsprofil der angestrebten industriellen Umsetzung. Daher wird an dieser Stelle lediglich auf die mechanischen Eigenschaften der Stähle mit den Werkstoffnummern 1.2379 und 1.2990 eingegangen, welche in nachfolgender Tabelle 4-2 dargestellt sind. Die mechanischen Eigenschaften wurden mittels Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1:2009-12 an Zugproben DIN 50125 - A 10 x 50 gemäß DIN 50125:2009-07 ermittelt.

Tab. 4-2: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Stähle mit den Werkstoffnummern 1.2379 und 1.2990.

Werkstoff	1.2379 [X153CrMoV12]	1.2379 PM [X153CrMoV12]	1.2990 [X100CrMoV8-1-1]
Streckgrenze $R_{p0,2}$	2093 ± 22 N/mm ²	2139 ± 5 N/mm ²	2123 ± 5 N/mm ²
Zugfestigkeit R_m	2453 ± 22 N/mm ²	2577 ± 6 N/mm ²	2434 ± 23 N/mm ²
E-Modul	203 GPa	205 ± 1 GPa	202 GPa
Bruchdehnung A	0,9 ± 0,1 %	2,1 ± 0,2 %	0,7 ± 0,1 %

Der Stahl der Werkstoffnummer 1.2379 lag bezogen auf den Herstellungsprozess der Halbzeuge sowohl als Blankstahl (Bezeichnung 1.2379) als auch in pulvermetallurgischer Form (Bezeichnung 1.2379 PM) vor. Hinsichtlich der nachfolgenden mechanischen Bearbeitung und der Wärmebehandlung durchliefen beide Varianten identische Prozesse.

Als Rauheitskennzahl wurde für die polierte Oberfläche der Stähle N1 spezifiziert. Die mittels taktilen Oberflächenprofilometer gemessene mittlere Rauheit R_a betrug typischerweise kleiner 10 nm.

Für die Untersuchungen im Bereich der WC-Hartmetalle wurde die Hartmetallsorte AKS-F03 der Firma AKS Hartmetalltechnik GmbH ausgewählt. Die polierte Materialoberfläche weist hierbei eine mittlere Rauheit R_a von ca. 3 nm auf. In nachfolgender Tabelle 4-3 sind wichtige Eigenschaften der verwendeten Hartmetallsorte aufgezeigt.

Tab. 4-3: Eigenschaften der Hartmetallsorte AKS-F03 der Firma AKS Hartmetalltechnik GmbH [108].

Bezeichnung	Co-Binder in %	Korngröße in μm	Dichte in g/cm^3	Härte in HV10	Biegebruchfestig- keit in N/mm^2
AKS-F03	3,0	0,5 - 0,8 (feinst/submicron)	15,20	2000	3000

4.1.2. Schichtmaterialien der Mikroprägwerkzeuge

Auf den o.g. Grundmaterialien wurden des Weiteren verschiedene Hartstoffschichten aufgebracht. Dies waren BALINIT® ALCRONA der Firma Oerlikon Balzers Coating sowie ta-C-Schichten, welche am Laserinstitut Hochschule Mittweida hergestellt werden. Zur Erhöhung der Haftfestigkeit der ta-C-Schichten auf den untersuchten Grundmaterialien wurde vor deren Aufbringung, ebenfalls mittels PLD-Verfahren, eine Wolframcarbidschicht mit einer Dicke von 80 nm abgeschieden. Wichtige Eigenschaften dieser Schichtmaterialien sind in den nachstehenden Tabellen 4-4 und 4-5 aufgezeigt.

Tab. 4-4: Eigenschaften der Hartstoffschichten BALINIT® ALCRONA der Firma Oerlikon Balzers Coating [109 – 111].

Schichtmaterial	AlCrN
Schichtdicke in μm	3 – 4
Mikrohärte ([109, 110] / [111])	3200 HV 0,05 / $24,7 \pm 10$ GPa
Reibwert gegen Stahl (trocken)	0,35
Max. Beschichtungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$	< 500
Max. Anwendungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$	1100
Eigenspannungen in GPa	-3

Tab. 4-5: Eigenschaften der am Laserinstitut Hochschule Mittweida hergestellten ta-C-Schichten [4].

Schichtmaterial	ta-C (80 nm WC-Haftschrift)
Aufwachsrate	120 nm/min
Max. Substrattemperatur bei der Beschichtung in $^{\circ}\text{C}$	< 90
Schichtdicke in μm	1 – 1,5
Struktur	amorph
sp^3 -Gehalt in %	80 – 85
Optische Energiebandlücke in eV	1,8 – 2,2
Dichte in g/cm^3	3,2 – 3,3
Schichtspannung in GPa	$\rightarrow 0$ (nahezu spannungsfrei)
Härte in GPa	60 – 65
Elastizitätsmodul in GPa	880 – 920
Haftfestigkeit (Kritische Last beim Ritztest) in N	50 – 55
Reibungskoeffizient	0,08 – 0,14

Für das Schichtmaterial BALINIT® ALCRONA wurde mittels taktilen Oberflächenprofilometer auf den untersuchten Stählen als auch den Hartmetallproben eine mittlere Rauheit R_a der Materialoberfläche im Bereich von 40 nm bis 60 nm gemessen. Die mit ta-C beschichteten Proben weisen bei diesen Grundmaterialien eine mittlere Rauheit R_a der Materialoberfläche von kleiner 30 nm auf.

4.2. Eigenschaften der Zielmaterialien für die Abformung der Mikroprägewerkzeuge

Zielmaterialien für die Abformung der in die Mikroprägewerkzeuge eingebrachten Gitterstrukturen sind Folienwerkstoffe und Werkstoffverbunde, welche überwiegend in Rollenform vorliegen. Diese werden nachfolgend vordergründig für Verpackungen von Gütern eingesetzt, welche dem Lebensmittelrecht unterliegen. Die Gesamtmaterialstärke beträgt dabei typischerweise $\leq 100 \mu\text{m}$.

4.2.1. Folienwerkstoffe

Aus der Gruppe der Folienwerkstoffe wurden, für die angestrebte, industrielle Umsetzung, repräsentative Vertreter ausgewählt. Doppeltgewalzte, weichgeglühte Veredlerfolie gemäß [112] aus dem Werkstoff EN AW-8079 mit einer Materialstärke von $6 \mu\text{m}$ ist hierbei der derzeit verbrauchsmengenmäßig interessanteste Vertreter der untersuchten Metallfolien. Vergleichende Untersuchungen wurden an $38 \mu\text{m}$ bzw. $20 \mu\text{m}$ starken Folien aus EN AW-8079 bzw. EN AW-1200 durchgeführt. Der Lieferzustand sowie die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Metallfolien sind in nachfolgender Tabelle 4-6 dargestellt. Die chemische Zusammensetzung entspricht [113].

Tab. 4-6: Lieferzustand und mechanische Eigenschaften der untersuchten Aluminiumfolien [114].

Werkstoff	EN AW-8079 [Al Fe1Si]	EN AW-8079 [Al Fe1Si]	EN AW-1200 [Al 99,0]
Lieferzustand (Zustandsbezeichnung gemäß EN 515:1993)	O	O	H19
Dehngrenze $R_{p0,2}$	$> 35 \text{ N/mm}^2$	$> 35 \text{ N/mm}^2$	$> 130 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit R_m	$86\text{-}98 \text{ N/mm}^2$	$85\text{-}110 \text{ N/mm}^2$	175 N/mm^2
Bruchdehnung $A_{100 \text{ mm}}$ in Längsrichtung	$2,4\text{-}3,1 \%$	$9\text{-}17 \%$	$4,2 \%$
Materialstärke	$6 \mu\text{m} \pm 8 \%$	$38 \mu\text{m} \pm 6 \%$	$20 \mu\text{m} \pm 6\%$

Des Weiteren wurden einseitig metallisierte Kunststofffolien aus PET und PLA untersucht, welche eine Materialstärke von $30 \mu\text{m}$ aufweisen. Die Dicke der aufgedampften Aluminiumschicht beträgt typischerweise 30 nm . Für die verwendete PET-Folie vom Typ Mitsubishi Hostaphan® RHS erfolgte die Metallisierung auf der

nicht siegelfähigen Seite der Folie. Mittels taktilem Oberflächenprofilometer wurden auf der metallisierten Seite dieser Kunststofffolien Werte der mittleren Rauheit R_a von typischerweise kleiner 50 nm gemessen. In der nachfolgenden Tabelle 4-7 sind wichtige Eigenschaften dieser Kunststofffolien aufgezeigt.

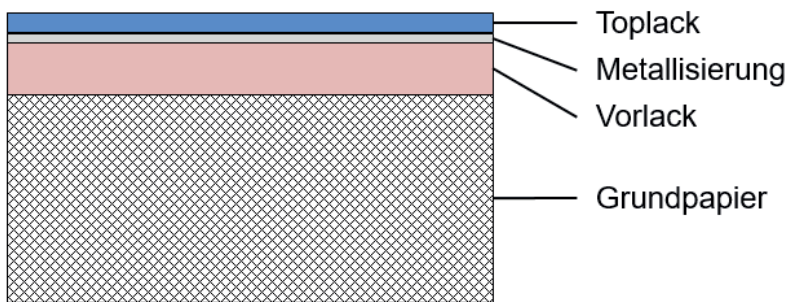
Tab. 4-7: Eigenschaften der untersuchten Kunststofffolien (Prüfung gemäß [115]; Prüfbedingungen: Prüfungsgeschwindigkeit 100 mm/min., 23 °C, 50 % relative Feuchte).

Werkstoff	PET-Folie (Mitsubishi Hostaphan® RHS) [116]	PLA-Folie [117, 118]
E-Modul	> 4000 MPa	≥ 1700 MPa
Zugfestigkeit σ_m	> 190 MPa	≥ 50 MPa
Bruchdehnung ε_b	> 80 %	5-11 %
Glasübergangstemperatur T_g	80 °C	55-60 °C

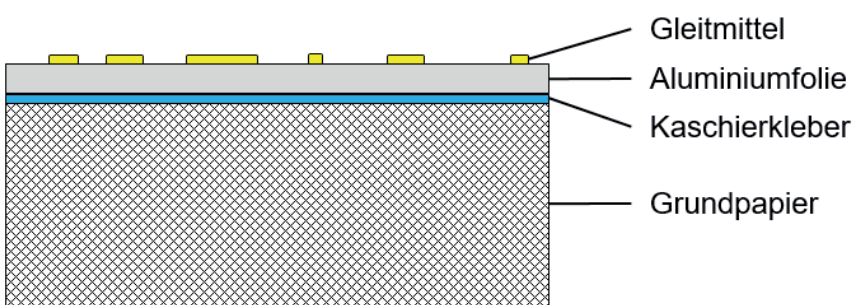
4.2.2. Werkstoffverbunde

Der Untersuchungsgegenstand im Bereich der Werkstoffverbunde sind papierbasierte Werkstoffverbunde, welche für den direkten Kontakt mit dem Lebensmittelrecht unterliegenden Verpackungsgütern, eingesetzt werden. Hinsichtlich ihres Aufbaus kann zwischen metallisierten und kaschierten papierbasierten Werkstoffverbunden unterschieden werden. Die jeweiligen Komponenten exemplarischer Varianten der Werkstoffverbunde sowie deren Aufbau sind in Tabelle 4-8 für die untersuchten, metallisierten Werkstoffverbunde und in Tabelle 4-9 für die untersuchten, kaschierten Werkstoffverbunde dargestellt.

Tab. 4-8: Aufbau der untersuchten, metallisierten Werkstoffverbunde.

Schematischer Aufbau		
Werkstoffverbund	Met. 50 gsm.	Met. 80 gsm.
Grundpapier	50 g/m ² einseitig gussgestrichenes Papier; ungestrichene Papierrückseite	80 g/m ² einseitig hochglänzend gussgestrichenes Papier; Papierrückseite mit Funktionsstrich
Vorlack	1,6 g/m ² Vorlack auf Wasserbasis (T _g = 115°C)	2 x 0,8 g/m ² Vorlack auf Wasserbasis (T _g = 115°C)
Metallisierung	30 nm Aluminium	
Toplack	0,2 g/m ² ammoniakstabilisierter Polyethylenwachs	-

Tab. 4-9: Aufbau der untersuchten, kaschierten Werkstoffverbunde.

Schematischer Aufbau		
Werkstoffverbund	Alu 30 gsm.	Alu 50 gsm.
Grundpapier	30 g/m ² Seidenpapier (unbeschichtetes Kraftpapier; maschinenverglast)	50 g/m ² Seidenpapier (unbeschichtetes Kraftpapier; maschinenverglast)
Kaschierung	nasskaschiert mittels 1 g/m ² Stärkekleber (modifizierte Kartoffelstärke)	
Materialstärke der Aluminiumfolie	6 µm ± 8 % (EN AW-8079; weichgeglüht)	
Gleitmittel	0,02 g/m ² Polyethylenwachs (Erweichungstemperatur T = 80 - 85 °C)	

Bei den in den Tabellen 4-8 und 4-9 angegebenen Flächengewichten handelt es sich jeweils um Trockengewichte.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten des Weiteren Untersuchungen an kaschierten Werkstoffverbunden mit Variation der Dicke der Aluminiumfolie sowie des verwendeten Grundpapiers durchgeführt werden. Für die metallisierten Werkstoffverbunde wurden Art und Materialdicke des Grundpapiers sowie die Auftragsmengen der genutzten Vorlacke und Toplacke variiert. Die Einbeziehung transfermetallisierter Folienverbunde und transfermetallisierter, papierbasierter Werkstoffverbunde führte zu einer Erweiterung der Versuchsmatrix [119].

5. Experimentelle Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die Versuchsdurchführung genutzten experimentellen Aufbauten zur 3D-Lasermikrostrukturierung von Mikroprägewerkzeugen sowie zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in der Oberfläche dieser Werkzeuge vorgestellt. Des Weiteren wird eine Übersicht über die in Anwendung gebrachte Mess- und Analysetechnik zur Auswertung der strukturierten Oberflächenbereiche gegeben. Abschließend erfolgt die Beschreibung der Versuchsaufbauten für die Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in die Zielmaterialien.

5.1. Versuchsaufbau für die Lasermikrostrukturierung

5.1.1. Charakterisierung der eingesetzten Lasersysteme

Die Charakterisierung der verwendeten Laserstrahlpulse erfolgte sowohl zeitlich als auch räumlich. Für die Ermittlung der Pulsdauer der von den Lasersystemen bereitgestellten Laserstrahlpulse wurde das Verfahren der Autokorrelation genutzt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingesetzten Lasersysteme sowie deren Parameter sind in Tabelle 5-1 aufgezeigt.

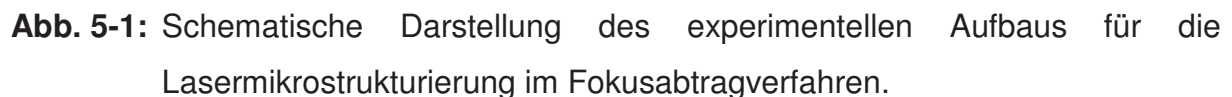
Tab. 5-1: Parameter der eingesetzten Lasersysteme.

Lasersystem	Clark MXR CPA-2010	LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP	Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego
Wellenlänge	775 nm / 387 nm / 258 nm	1028 nm	1064 nm
Pulswiederhol- frequenz f_p	1 kHz	Einzelpuls ... 1 MHz	Einzelpuls ... 200 kHz
max. mittlere Leistung P_{AV}	1 W / 380 mW / 60 mW	15 W	50 W
max. Pulsenergie Q	1 mJ / 380 μ J / 60 μ J	200 μ J	200 μ J
Pulsdauer τ_H	150 fs / 200 fs / 200 fs	250 fs	10 ps
mittlere Photonenenergie	1,60 eV / 3,21 eV / 4,81 eV	1,21 eV	1,17 eV

Zur Analyse der Intensitätsverteilung des Rohstrahls wurde dieser stark abgeschwächt auf eine CCD-Kamera geleitet. Das detektierte Kamerabild gibt die 2-dimensionale Leistungsdichteverteilung des untersuchten Laserstrahls in der Ebene des CCD-Chips wieder. Die Skalierung der Bilddaten erfolgt auf Basis der Pixelgröße und Pixelanzahl der eingesetzten Kamera. Das Kamerabild dient neben der Rohstrahlanalyse weiterhin zur Qualitätssicherung hinsichtlich etwaiger Schwankungen innerhalb des Strahlprofils im zeitlichen Verlauf bzw. bei Anpassungen der Versuchsaufbauten. Die Abschwächung des Laserstrahls sollte hierbei vorzugsweise über reflektive Komponenten wie Keilplatten oder Strahlteiler erfolgen. Bei Verwendung transmittierender, auf dem Prinzip der Absorption beruhender, optischer Komponenten wie beispielsweise neutralen Graufiltern kann es infolge der hohen Intensitäten im Rohstrahl bereits zu einer Schädigung dieser Elemente kommen, wodurch das von der Kamera detektierte Bild verfälscht wird.

Unter Verwendung des MicroSpotMonitor MSM der Firma Primes GmbH war die räumliche Vermessung der für die Lasermikrostrukturierung genutzten Laserstrahlpulse in Kombination mit den jeweiligen Fokussieroptiken möglich. Das System bildet über entsprechende Messobjektive den systemintern abgeschwächten Laserstrahl auf eine CCD-Kamera ab. Man erhält wie bei der Rohstrahlanalyse beschrieben die 2-dimensionale Leistungsdichteverteilung in der Abbildungsebene des detektierten Laserstrahls. Durch sukzessives Verfahren der Abbildungsebene in Ausbreitungsrichtung des fokussierten Laserstrahls wird ein Ebenenstapel erfasst. Typischerweise wird bei diesem Analyseverfahren die Fokusebene der zu vermessenden Fokussieroptik in die Mitte des Messbereiches gelegt. Die Länge des Messbereiches wird über den Fahrweg einer mechanischen Achse bestimmt, welche das Messobjektiv relativ zur Fokussieroptik positioniert. Die Auswertung dieses Ebenenstapels in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls ermöglicht neben der Ermittlung der Fokusradien auch Aussagen über die Fokusslage im Raum, Strahlqualität, Divergenz sowie die Leistungsdichteverteilung vor und nach dem Fokus. Die Messungen erfolgten konform zur ISO 11146.

Für das Fokusabtragverfahren wurden die in Tabelle 5-1 aufgeführten Lasersysteme gemäß dem in Abbildung 5-1 dargestellten, experimentellen Aufbau genutzt.



34

polarisationsabhängigen Reflexion an dem Dünnpolarisator. Der durch diesen hindurch transmittierte Laserstrahlanteil ist ebenfalls wieder linear polarisiert. Im weiteren Verlauf der Strahlausbreitung wird eine gleichermaßen an einer motorisierten, steuerbaren Rotationsachse befindlichen $\lambda/2$ -Platte im Strahlengang positioniert. Diese dient der Einstellung der Polarisation der auf die Probenoberfläche auftreffenden Laserstrahlpulse. Des Weiteren bestand optional die Möglichkeit der Strahlaufweitung sowie der Frequenzkonversion, welche in Abhängigkeit vom genutzten Lasersystem systemintern oder extern erfolgte. Die Relativbewegung Laserstrahl-Probe erfolgte wahlweise mittel Laserstrahlscanner oder im Zusammenspiel von Festobjektiv und Positioniersystem. Zur Einstellung des Laserstrahlquerschnitts auf der Probenoberfläche sind sowohl Festobjektiv als auch Laserstrahlscanner an einer Verschiebachse befestigt. Diese erlaubt die Einrichtung des Relativabstandes zwischen Objektiv und Probenoberfläche mit einer Genauigkeit von 1 μm . Direkt vor der Fokussieroptik kann optional eine $\lambda/4$ -Platte in den Strahlengang eingebracht werden, um die Probenoberfläche alternativ mit zirkular polarisierter Laserstrahlung zu beaufschlagen. Die Visualisierung des Bearbeitungsprozesses erfolgt über ein Kamerasystem, welches koaxial hinter dem letzten, dielektrischen Spiegel vor dem Bearbeitungsobjektiv bzw. dem Laserstrahlscanner positioniert ist.

Für die 3D-Mikrostrukturierung wurde der Fokus auf die Probenoberfläche gelegt. Der Abtragprozess erfolgt schichtweise. Zunächst werden in der Probenoberfläche der jeweiligen Versuchsmaterialien, durch mehrmalige, schichtweise Ablation, quadratische Abtragstrukturen generiert. Von Abtragstruktur zu Abtragstruktur erfolgt die systematische Variation der Strukturierungsparameter. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Parametermatrix liefern die Grundlage für die Auswahl geeigneter Strukturierungsparameter für die 3D-Mikrostrukturierung. Hierbei erfolgt die Programmgenerierung gemäß der in Abb. 5-2 aufgezeigten schematischen Darstellung.

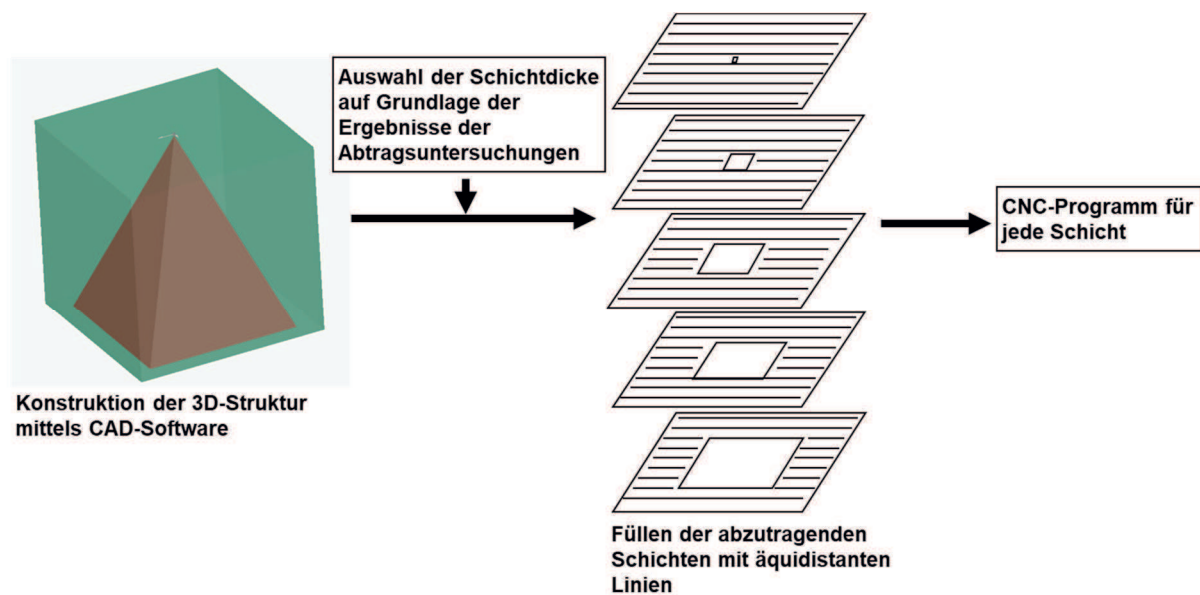


Abb. 5-2: Schematische Darstellung zur Programmgenerierung für die 3D-Mikrostrukturierung.

Nach vollständiger Bearbeitung einer Schicht des abzutragenden Schichtstapels wird der Fokus um den Betrag der abgetragenen Schichtdicke nachgeführt. Zur Vermeidung einer Vorzugsrichtung bei der Bearbeitung erfolgt nach jeder der abzutragenden Schichten eine Drehung der Bearbeitungsrichtung. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde vordergründig das Lasersystem Clark MXR CPA-2010 eingesetzt.

Zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen wurden weiterhin Untersuchungen mit defokussiertem Laserstrahl durchgeführt. Hierfür wurde der Relativabstand zwischen Objektiv und Probenoberfläche verringert und somit der Fokus in das Material hinein verlagert. Dieses Vorgehen ist erforderlich, da es bei Defokussierung mit einem Laserstrahlfokus oberhalb der Materialoberfläche, infolge der sehr kurzen Pulsdauern und den hieraus resultierenden hohen Intensitäten im Fokus, bereits zur Ausbildung eines Luftplasmas kommt.

5.1.3. Maskenprojektionsverfahren

Das Maskenprojektionsverfahren wurde für die Grundwellenlänge von 775 nm des in Tabelle 5-1 aufgeführte Lasersystem Clark MXR CPA-2010 realisiert. Nur dieses System liefert eine ausreichend hohe Laserstrahlpulsenergie. Der experimentelle Versuchsaufbau erfolgte gemäß der schematischen Darstellung in Abbildung 5-3.

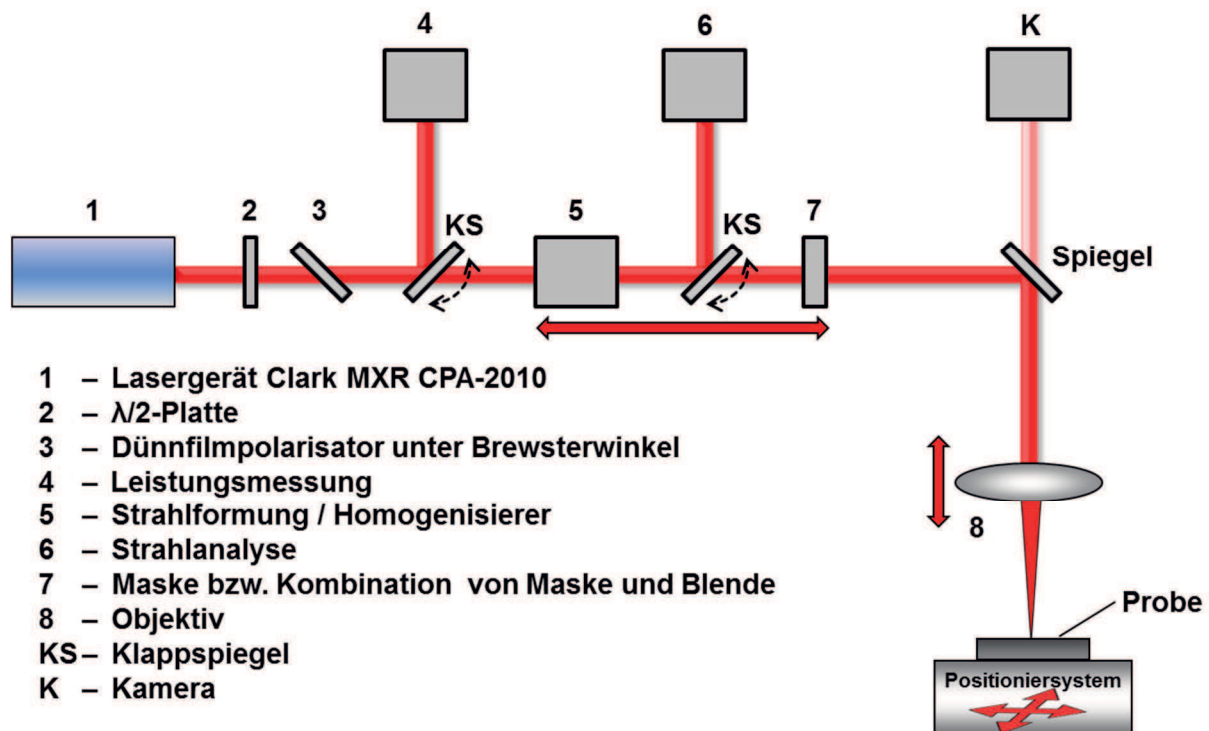


Abb. 5-3: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus für die Lasermikrostrukturierung im Maskenprojektionsverfahren.

Beim Maskenprojektionsverfahren wird die vom Lasergesetz emittierte Laserstrahlung zunächst auf eine Abschwächereinheit gelenkt. Diese erlaubt, wie bereits beim Fokusabtragverfahren beschrieben, die stufenlose Regelung der Laserstrahlpulsenergie. Nachfolgend tritt der abgeschwächte Laserstrahl durch Strahlformungselemente, welche eine Homogenisierung bedingen. Das gaußstrahlartige Eingangsstrahlprofil wird in ein Profil mit über den Strahlquerschnitt annähernd homogener Intensitätsverteilung transformiert. In der räumlichen Ebene, in welcher das Strahlprofil diese homogene Intensitätsverteilung aufweist, werden Maskenhalter und Maske im Strahlengang positioniert. Diese sind zur genaueren Justage an einer 5-Achs-Verstelleinheit befestigt. Durch geeignete Führungselemente ist ein wiederholgenauer Wechsel der Masken gegeben. Für die Untersuchungen

wurden sowohl Masken aus Tantalfolie mit einer Materialstärke von 50 µm als auch Streumasken aus Quarzglas eingesetzt. Die Strukturierung der Masken erfolgte mit dem Lasergerät Clark MXR CPA-2010 im Fokusabtragverfahren. Zusätzlich zur Verwendung von Masken können weiterhin auch Kombinationen von Masken mit Blenden genutzt werden. Bei den Blenden handelt es sich vorzugsweise um ebenfalls laserstrukturierte Tantalfolie. Die verkleinernde Abbildung der durch die Maske hindurchtretenden Laserstrahlanteile auf die Probenoberfläche erfolgt über geeignete Transmissionsobjektive. Das realisierte Abbildungsverhältnis beträgt jeweils 10:1. Da die Strukturierungsqualität bei dem Maskenprojektionsverfahren maßgeblich von der Homogenität der Intensität innerhalb des Laserstrahlquerschnitts abhängt, wurde zu deren Überprüfung die Möglichkeit der Strahlanalyse geschaffen. Hierzu wird mittels Klappspiegel der Laserstrahl auf den CCD-Chip einer Strahlanalysekamera gelenkt. Dieser befindet sich im gleichen Abstand zum Homogenisierer wie die Ebene, in welcher die Maske positioniert ist. Das Kamerabild erlaubt daher direkte Rückschlüsse auf die Homogenisierung und die Qualität der Strukturierung. Zur Kompensation unterschiedlicher Probenhöhen sind Homogenisierer, Strahlanalyse und Maske auf einer in Strahlausbreitungsrichtung verstellbaren Verschiebeeinheit befestigt. Hierdurch können die Relativabstände der optischen Komponenten zum abbildenden Bearbeitungsobjektiv und somit das Abbildungsverhältnis sowie die Abbildungsqualität durch Verfahren der Verschiebeeinheit beibehalten werden. Die Visualisierung des Bearbeitungsprozesses erfolgt, wie beim Fokusabtragverfahren, über ein Kamerasystem, welches koaxial hinter dem letzten, dielektrischen Spiegel vor dem Bearbeitungsobjektiv positioniert ist.

5.2. Charakterisierung strukturierter Oberflächenbereiche

Im nachstehenden Abschnitt wird die, für die Beschreibung und Beurteilung der strukturierten Oberflächenbereiche sowie der in die Oberfläche der Zielmaterialien abgeformten Strukturen, in Anwendung gebrachten Mess- und Analysetechnik aufgezeigt. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchungen können qualitative wie quantitative Aussagen abgeleitet werden. Im Vorfeld der messtechnischen Charakterisierung der laserstrukturierten Oberflächenbereiche wurden die jeweiligen Proben mit Ethanol bzw. im ultraschallunterstützten Ethanolbad gereinigt.

5.2.1. Laterale Strukturabmessungen und Profilbestimmung

Die Analyse der lateralen Strukturabmessungen erfolgt größtenteils mittels Auflichtmikroskopie im Hellfeld. Hierzu wurden vorzugsweise Lichtmikroskope vom Typ Axiovert 200 M der Firma Carl Zeiss Microscopy GmbH, VHX-100 der Firma Keyence sowie ConfoGate CGF-LV/-SD der Firma confovis GmbH eingesetzt. Das System ConfoGate CGF-LV/-SD der Firma confovis GmbH wurde weiterhin für die Profilbestimmung und Rauheitsanalysen genutzt. Die Messungen erfolgten für dieses System nach dem Messprinzip der Fokusvariation in Kombination mit strukturierter Beleuchtung gemäß DIN EN ISO 25178. Durch ein zur Verfügung stehendes Laserscanning-Modul vom Typ LSM 5 Pascal der Firma Carl Zeiss AG konnten, nach dem Messprinzip der konfokalen Laserscanning-Mikroskopie, ebenfalls Profilmessungen mit dem Axiovert 200 M der Firma Carl Zeiss Microscopy GmbH durchgeführt werden.

Insbesondere für die Auswertung der lateralen Abmessungen der beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen kam ein Rasterelektronenmikroskop von Typ JSM-6600 der Firma Jeol zur Anwendung. Durch Nutzung der Sekundärelektronen als Eingangssignal für die Bildgenerierung wurde der Kontrastmechanismus des Topographiekontrastes verwendet.

Für die Bestimmung der Tiefe und des Oberflächenprofils der generierten Strukturen wurde weiterhin das Tastschnittverfahren unter Verwendung eines taktilen Oberflächenprofilometers vom Typ Dektak 3030 der Firma Veeco Instruments Inc. / Sloan Technology Division genutzt. Die Diamantspitze der verwendeten Abtastnadel weist einen Spitzenradius von $2,5\ \mu\text{m}$ und einen Kegelwinkel von 60° auf. Für die Messungen gemäß [120] und [121] wurde mit einer Auflagekraft der Messspitze auf der Probenoberfläche von $0,1\ \text{mN}$ gearbeitet.

Mit Hilfe von Querschnittpräparationen, durch geeignete Schliffe oder Brüche, konnten ebenfalls Informationen zu den Abmessungen und dem Profil der generierten Strukturen gewonnen werden. Die Auswertung erfolgte mittels Lichtmikroskop oder Rasterelektronenmikroskop.

Für die Analyse der beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen wurden weiterhin Untersuchungen mittels AFM vom Typ Level AFM der Firma Anfattec Instruments AG durchgeführt. Die erhaltenen Messwerte, insbesondere Strukturiefen und Rauheitswerte, wurden mit denen der optischen Messsysteme verglichen und lieferten

im Rahmen der systemspezifischen Messgenauigkeiten eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

5.2.2. Oberflächenrauheit

Die resultierende Oberflächenrauheit ist ein maßgebendes Kriterium zur Beurteilung der Qualität für die Erzeugung dreidimensionaler Strukturen. Zu deren Ermittlung wurde das in 5.2.1. näher beschriebene, taktile Oberflächenprofilometer vom Typ Dektak 3030 der Firma Veeco Instruments Inc. / Sloan Technology Division genutzt. Weitere Untersuchungen wurden mit dem ebenfalls in 5.2.1. aufgeführten System ConfoGate CGF-LV/-SD der Firma confovius GmbH durchgeführt. Die Messungen erfolgten profilbezogen gemäß [121] bzw. flächenbezogen gemäß [122]. Als charakteristische Kenngröße wurde die mittlere Rauheit R_a in den jeweiligen Probenbereichen bestimmt.

5.2.3. Härtemessung

Die Ermittlung der Härte der für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Stähle erfolgte unter Verwendung von Vickers-Härtemessgeräten vom Typ Shimadzu HMV-2000 sowie Struers Duramin-A300, gemäß [123] und [124]. Für die Bestimmung der Härte sowie des Elastizitätsmoduls der untersuchten Schichtmaterialien wurden ein Nanoindenter-Messgerät vom Typ UNAT-M der Firma ASMEC Advanced Surface Mechanics GmbH sowie das Ultra-Nanohärtemessgerät (UNHT³) der Firma Anton Paar GmbH genutzt. Die Messungen erfolgten gemäß [125] und [126].

5.2.4. Qualitative Elementanalyse

Für die qualitativen Untersuchungen zu etwaigen Veränderung der Elementzusammensetzung oberflächennaher Probenbereiche infolge der Lasermikrostrukturierung wurden EDX-Analysen durchgeführt. Hierzu wurde ein Rasterelektronenmikroskop vom Typ JSM-6600 der Firma Jeol verwendet, welches mit einem EDX-Analysesystem auf SDD-Basis (SiriusSD® SDD der Firma e2v scientific instruments Ltd.) vom Typ SAMx der Firma remX GmbH ausgestattet ist. Für die Messwertauswertung kam die Software IDFix in Version Nr. 12.2.2.1 der Firma remX GmbH zum Einsatz.

5.2.5. Beugungseffizienz

Zur Beurteilung der in der Oberfläche der Mikroprägwerkzeuge mittels Lasermikrostrukturierung generierten, beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen sowie deren Abformungen in den Zielmaterialien wurde weiterhin ein Diffraktometeraufbau genutzt. Hierbei wird die Probenoberfläche unter definiertem, veränderbarem Winkel mit monochromatischem Licht oder Weißlicht bestrahlt. Als monochromatische Lichtquellen wurden Lasermodule mit einer Wellenlänge von 532 nm bzw. 650 nm verwendet. Die Größe des bestrahlten Oberflächenbereiches kann durch geeignete Strahlformungskomponenten variiert werden. In Abhängigkeit vom Einfallswinkel des auftreffenden Lichtstrahls, dessen Wellenlänge sowie den Gitterparametern der in der Oberfläche der bestrahlten Probenbereiche befindlichen Gitterstrukturen, werden messtechnisch sowohl die räumliche Lage als auch die Intensitäten der einzelnen Beugungsreflexe detektiert. Die Auswertung dieser Beugungsreflexe ermöglicht Rückschlüsse auf die Beugungseffizienz in den einzelnen Beugungsordnungen, d.h. dem Verhältnis der Intensitäten zwischen dem auf die Probenoberfläche auftreffenden Strahlanteil und den unter definiertem Raumwinkel gebeugten Strahlanteilen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann bei bekannter Gitterperiode auf die Tiefe der Gitterstrukturen im bestrahlten Oberflächenbereich rückgerechnet werden. Weiterhin ermöglichen diese Messungen qualitative Aussagen zu den eingebrachten Gitterstrukturen und liefern Ansatzpunkte für prozesstechnische Optimierungen.

5.3. Versuchsaufbau für die Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen

Die Abformung der in die Oberfläche der Mikroprägwerkzeuge eingebrachten, beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen in die Zielmaterialien stellt eine zentrale Aufgabe im Rahmen der vorliegenden Arbeit dar. In diesem Zusammenhang wurden Untersuchungen zum statischen und rotativen Abformen unter Nutzung der nachfolgend dargestellten Versuchsaufbauten durchgeführt.

5.3.1. Statische Abformung

Die statische Abformung ist durch konstante Bedingungen hinsichtlich des Drucks und der Temperatur während des Abformprozesses charakterisiert. Es findet keine laterale

Relativbewegung zwischen dem, die abzuformenden Gitterstrukturen tragenden, Prägestempel und dem entsprechenden Gegenlager bzw. Druckstempel statt. Das Zielmaterial wird zwischen dem Prägestempel und dem Druckstempel positioniert. Infolge der Kraftaufbringung zwischen Druck- und Prägestempel erfolgt die Übertragung der in der Oberfläche des Prägestempels befindlichen, beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen in die Oberfläche des Zielmaterials. Eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur statischen Abformung ist in Abb. 5-4 aufgezeigt.

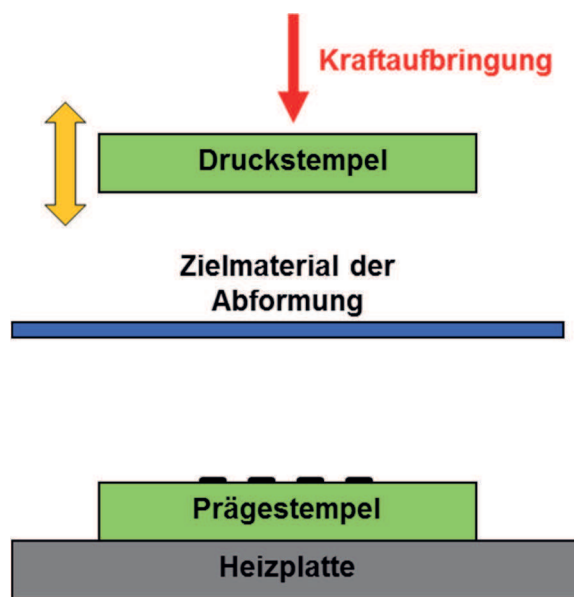


Abb. 5-4: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung der statischen Abformung.

Insbesondere für die Untersuchungen zur Abformung in die untersuchten Kunststofffolien sowie die metallisierten Werkstoffverbunde wurde die Möglichkeit der Durchführung von Prägungen mit Temperierung von Prägestempel und Zielmaterial bis zu einer Temperatur von 120 °C vorgesehen. Hierzu wurde eine Heizplatte mit Temperaturregelung unterhalb des Prägestempels positioniert. Für die realisierten Versuchsaufbauten wurde ein Schwankungsbereich der Prägetemperatur von $\pm 1,5$ K ermittelt. Zur thermischen Isolierung der Heizplatte gegenüber den verwendeten Versuchsaufbauten wurde Hochtemperaturkeramikfaserpapier genutzt. Eine erste Realisierung der aufgezeigten Versuchsanordnung erfolgte unter Nutzung einer Materialprüfmaschine vom Typ ProLine Z010TN der Firma Zwick GmbH & Co. KG und ermöglicht eine Kraftaufbringung bis 10 kN. Dabei ist die Messunsicherheit der

Kraftmessung mit kleiner $\pm 0,1 \%$ des Messwertes spezifiziert. Zur Aufbringung höherer Lasten wurde ein Versuchsaufbau unter Verwendung einer für eine Presskraft von 200 kN ausgelegten Werkstattpresse der Firma Rodac genutzt. Das hierfür eingesetzte Kraftmesssystem der Firma Althen (Kraftaufnehmer Althen ABCH-5t / Anzeige- und Versorgungseinheit AD4) erlaubt eine Kraftmessung bis zu einer Nennlast von 50 kN. Dabei beträgt die Messunsicherheit der Kraftmessung bei einer Kraftaufbringung bis 150 % der Maximallast des Messsystems kleiner $\pm 0,3 \%$ des Messwertes.

Die realisierten Versuchsaufbauten für die statische Abformung erlauben die Variation der Prägeparameter Zustellgeschwindigkeit (zeitlicher Verlauf des Druck-/Kraftaufbaus), applizierte Kraft bzw. Druck, Kontaktzeit (Zeitdauer der Krafteinwirkung) und Temperatur.

5.3.2. Rotative Abformung

Im Unterschied zur statischen Abformung ist die rotative Abformung durch eine Relativbewegung zwischen der, die abzuformenden Gitterstrukturen tragenden, Prägewalze und der entsprechenden Gegenwalze gekennzeichnet. Die Gegenwalze ist hierbei typischerweise in Hinblick auf das Grundmaterial, den Wärmebehandlungszustand und die Oberflächenrauheit identisch mit der Prägewalze, weist jedoch keine etwaige Beschichtung auf. Wie bei der statischen Abformung erfolgt die Übertragung der in der Oberfläche der Prägewalze befindlichen, beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen in die Oberfläche des Zielmaterials durch Kraftaufbringung zwischen Präge- und Gegenwalze. Im praktischen Anwendungsfall kann infolge designbedingter, über die Oberfläche der Prägewalze positionsabhängig, variabler Kontaktflächen zwischen Präge- und Gegenwalze ein veränderlicher Druck während der Prägung vorherrschen. Die Vorschubgeschwindigkeit des Zielmaterials wird durch die Drehzahl der jeweilig angetriebenen Walze bestimmt. Für die Versuchsanordnung zur rotativen Abformung ist in Abb. 5-5 eine schematische Darstellung aufgezeigt.

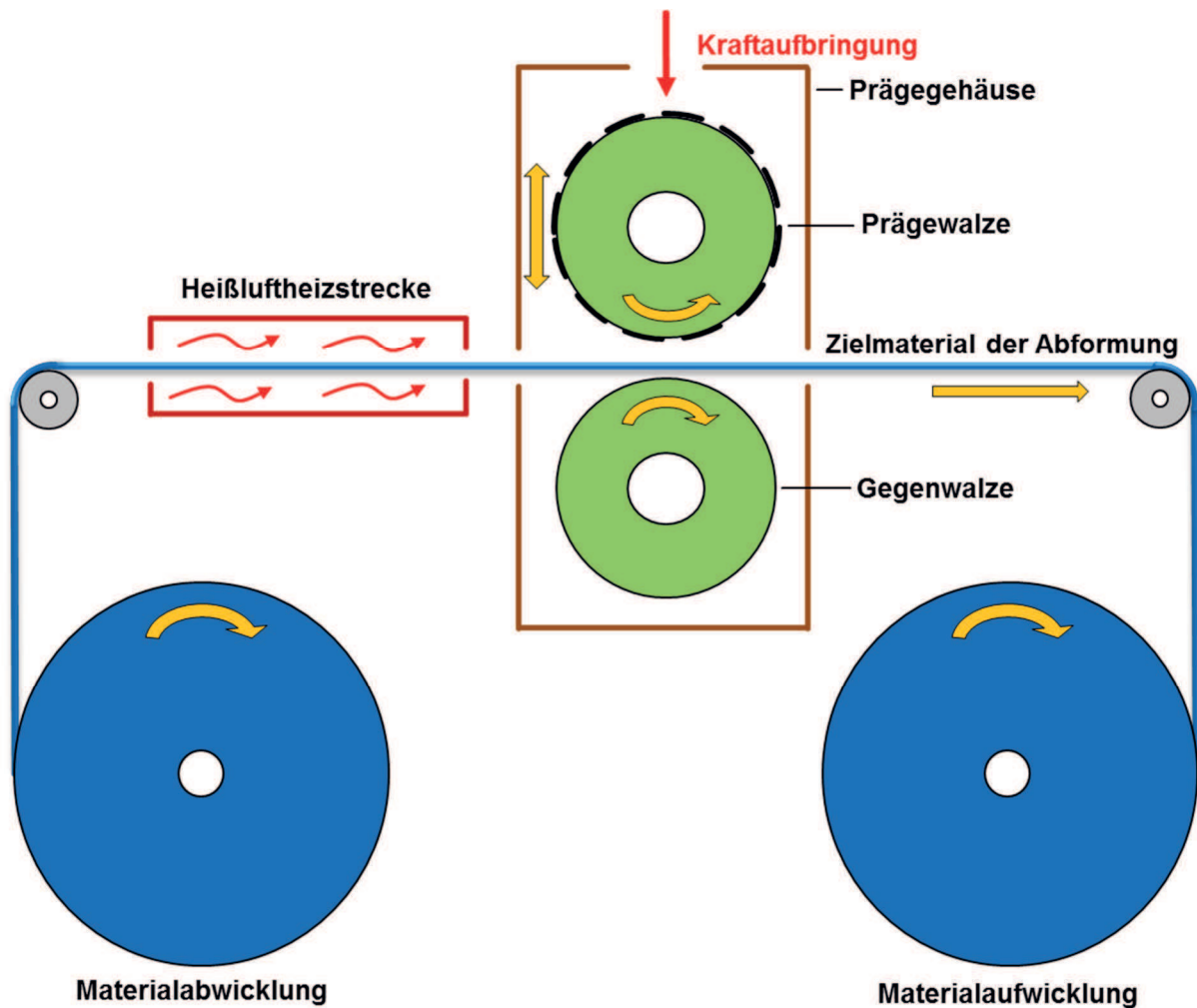


Abb. 5-5: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung der rotativen Abformung.

Der Transport des Zielmaterials der Abformung erfolgt aktiv seitens der angetriebenen Präge- bzw. Gegenwalze und wird durch geeignete Einrichtungen zur Ab- und Aufwicklung, zur Führung sowie zur Beibehaltung einer konstanten Spannung der Materialbahn unterstützt. Mit den Versuchsaufbauten können unter Verwendung der standardmäßig genutzten Walzen mit einem Außendurchmesser von 70 mm Vorschubgeschwindigkeiten der Materialbahn bis 660 m/min erreicht werden. Hierbei beträgt die maximale Breite der zu prägenden Materialbahn 120 mm. Vor dem Hintergrund designbedingter Vorgaben wurde der Kraftaufbau zwischen den Prägewalzen und somit die Prägung typischerweise auf eine Breite von 40 mm in der Mitte der Materialbahn beschränkt. Die Kraftaufbringung erfolgt bei den realisierten Versuchsaufbauten hydraulisch bis zu einer Maximallast von 50 kN. Dabei beträgt die Messunsicherheit der Kraftmessung bei einer Kraftaufbringung bis 150 % der Maximallast des Messsystems kleiner $\pm 0,3$ % des Messwertes. Zur Durchführung von

Untersuchungen bei erhöhter Temperatur wurde neben einer temperaturgeregelten Heißluftheizstrecke zur Vorheizung des Zielmaterials vor der Prägung die Möglichkeit der Temperierung der Prägewalzen innerhalb des Prägegehäuses realisiert. Die Hysterese der Oberflächentemperatur der Prägewalzen als auch der zu prägenden Zielmaterialien beträgt ± 2 K bei einer maximal nutzbaren Temperatur von 120 °C. Mit den für die rotative Abformung umgesetzten Versuchsaufbauten sind die Variation der Prägeparameter Bahnvorschubgeschwindigkeit, applizierte Kraft bzw. Druck und Temperatur möglich.

Eine systembedingt bei den applizierten Kräften zu verzeichnende Durchbiegung der Präge- und Gegenwalze wurde, durch spezifische, konstruktive Anpassungen der Versuchsaufbauten zur rotativen Abformung, kompensiert.

6. Experimentelle Untersuchungen zur Laserstrukturierung von Mikroprägewerkzeugen

Für die Erzeugung funktional einsetzbarer Mikroprägewerkzeuge ist eine Kombination verschiedener Fertigungsverfahren erforderlich. Nachfolgend wird zunächst auf die Freistellung von Funktionsflächen mittels dreidimensionaler Lasermikrostrukturierung eingegangen. Im Anschluss werden verschiedene Verfahren und Vorrichtungen zur Generierung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in der Oberfläche der, durch präzisen Materialabtrag in Relation zu den umgebenden Oberflächenbereichen, erhabenen Funktionsflächen vorgestellt.

6.1. Mikrostrukturierung von Prägewerkzeugen zur Freistellung von Funktionsflächen

Die präzise Ablation unter Verwendung von Laserstrahlpulsen unterschiedlicher Pulsdauern und Laserstrahlwellenlängen stellt eine sehr flexible und universelle Technologie zur dreidimensionalen Ausgestaltung von Festkörperoberflächen dar. Dabei erfolgt in Analogie zum mechanischen Fräsen ein schichtweiser Abtrag in die Tiefe (siehe Abb. 5-2). Vor dem Hintergrund der vorzugsweisen Bearbeitung gehärteter oder nitrierter Stähle bzw. von Wolframcarbid-Hartmetall als Grundmaterialien der Prägewerkzeuge sowie verschiedener Hartstoffbeschichtungen auf diesen, kommt der in Anwendung gebrachten Laserstrahlung eine prozesstechnologisch entscheidende Bedeutung zu. So sind insbesondere Laserstrahlpulsdauern im Bereich von Nanosekunden und darüber hinaus, infolge der thermisch bedingten Veränderungen des Gefüges, der Materialeigenschaften und / oder der Materialzusammensetzung nicht oder nur sehr eingeschränkt nutzbar [72, 127]. Bei der Bearbeitung von cobaltgebundenem Wolframcarbid-Hartmetall führen diese Temperaturbelastungen bereits zu einem teilweisen Verdampfen des im Vergleich zu den Wolframcarbid-Teilchen niedrigschmelzenden Cobalt und zu einer Entmischung der Cobaltmatrix. Bei den Stählen ist die Ausbildung oberflächennaher Schmelzphasen zu verzeichnen. Mit der Verringerung der Pulsdauer der applizierten Laserstrahlpulse kann die thermische Belastung der Werkstückoberfläche verringert werden. In [27] werden, ebenfalls am Laserinstitut Hochschule Mittweida durchgeführte, vergleichende Untersuchungen zur Bearbeitung von Stahl mit Piko- und Femtosekunden-Laserstrahlpulsen vorgestellt. Auch hier zeigte sich, wie bereits

in [127] eine höhere Effektivität der Ablation für Stahl bei Nutzung kürzerer Laserstrahlpulse. Die mit der Anwendung von Laserstrahlpulsen im Femtosekundenbereich einhergehenden Vorteile sowie die Verfügbarkeit des Lasersystems Clark MXR CPA-2010 (vgl. Tab. 5-1) waren ursächlich für dessen Nutzung im Rahmen der vorliegenden Arbeit. Für die Untersuchungen kam ein Transmissionsobjektiv mit einer Brennweite von 100 mm zum Einsatz, welches in der Bearbeitungsebene einen Strahlradius von $w_{86} = 27,4 \mu\text{m}$ bei einer Rayleigh-Länge von 1,2 mm liefert. Vergleichende Untersuchungen erfolgten unter Verwendung eines Transmissionsobjektivs mit einer Brennweite von 32 mm, welches in Kombination mit einem Strahlaufweiter Strahlradien von $w_{86} = 5,7 \mu\text{m}$ in der Fokusebene ermöglicht. Für diese Konfiguration wurde eine Rayleigh-Länge von $49 \mu\text{m}$ ermittelt. Im Rahmen der Untersuchungen kam ausschließlich die Grundwellenlänge des Lasersystems von 775 nm zur Anwendung. Die Intensitätsverteilungen in den Fokusebenen sind für beide Objektive in der nachstehenden Abbildung 6-1 dargestellt.

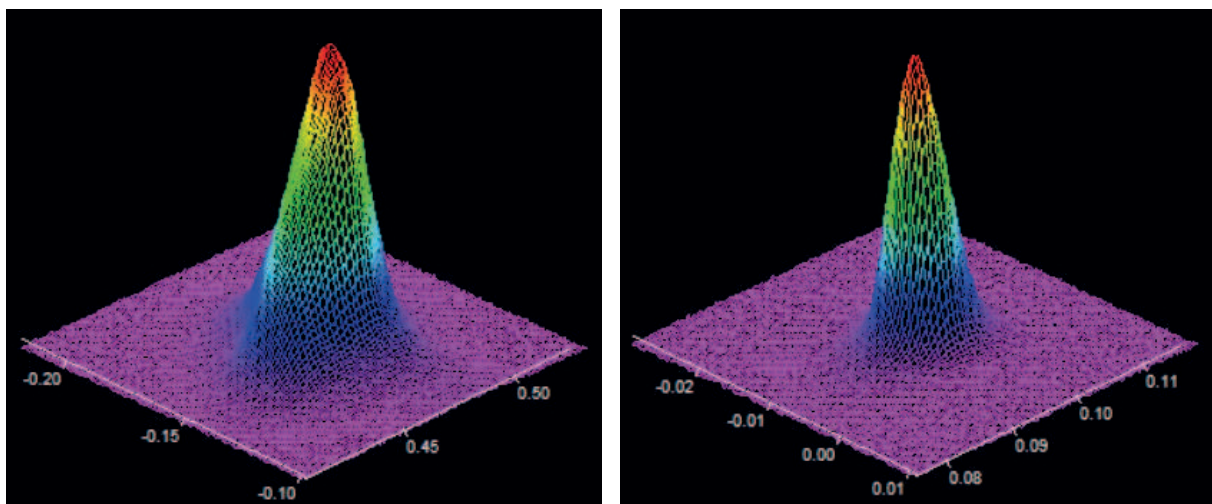


Abb. 6-1: Falschfarbenbild der Intensitätsverteilung in der Fokusebene der verwendeten Transmissionsobjektive (Links: Transmissionsobjektiv mit 100 mm Brennweite; Rechts: Transmissionsobjektiv mit 32 mm Brennweite und Strahlaufweitung).

Da für die Freistellung der Funktionsflächen der Mikroprägewerkzeuge vordergründig das Abtragsverhalten der Grundmaterialien maßgebend ist, wurden für die jeweiligen Werkstoffe Testfeldmatrizen generiert und ausgewertet. Die zur Charakterisierung des Abtrags wichtigsten Kenngrößen, Abtragtiefe, laterale Strukturabmessungen und resultierende Oberflächenrauheit, konnten mit den in Kapitel 5.2.1. und 5.2.2. beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Die nachfolgend angegebenen Werte des

gemittelten Abtragvolumens pro Puls beruhen dabei auf dem Volumen der generierten Abtragstrukturen, welche auf Basis der messtechnisch ermittelten Abmessungen errechnet wurden, dividiert durch die Gesamtanzahl der Laserstrahlpulse, welche zu deren Erzeugung aufgebracht wurden. Um Messwertverfälschungen durch lokale Störungen auszuschließen erfolgte die Messwertermittlung mehrfach an lokal getrennten Positionen sowohl für die X- als auch die Y-Richtung. Bei den angegebenen Werten handelt es sich daher um die arithmetischen Mittelwerte der jeweiligen Größen. Innerhalb der Testfeldmatrizen wurden die Strukturierungsparameter Puls-zu-Puls-Distanz sowie Laserstrahlpulsfluenz variiert (siehe Abb. 6-2).

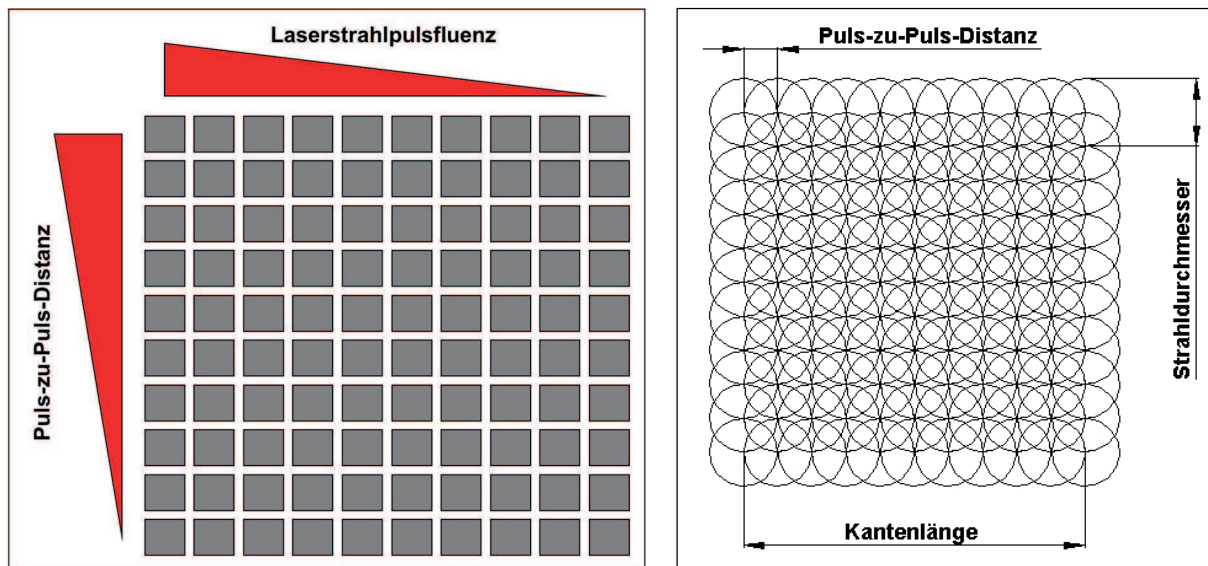


Abb. 6-2: Links: Schematische Darstellung der innerhalb einer Testfeldmatrix variierten Strukturierungsparameter; Rechts: Schematische Darstellung und Parameterzuordnung für die laterale Aneinanderreihung der Laserstrahlpulse bei der Erzeugung von Abtragstrukturen.

Für die Versuchsdurchführung kamen hinsichtlich der Puls-zu-Puls-Distanzen in X- und Y-Richtung jeweils identische Werte in Anwendung, da die im Rahmen der Versuche genutzten Laserstrahlquerschnitte auf der Probenoberfläche ein näherungsweise rundes Profil aufweisen.

6.1.1. Beschreibung des Ablationsprozesses und Bestimmung der Ablationsschwellfluenzen

Eine modellhafte Beschreibung des für die Untersuchungen beobachteten Abtragverhaltens ist mittels der in [23, 128 – 140] dargelegten Zusammenhänge möglich. Dieser auch als Zwei-Temperaturen-Modell bekannte Erklärungsansatz ermöglicht die Charakterisierung und theoretische Näherung des Verhaltens von Metallen bei der Bestrahlung mit ultrakurzen Laserstrahlpulsen. Hierbei werden die Subsysteme der Elektronen und des Festkörpergitters als getrennte Wärmebäder betrachtet [23, 139, 141]. Wird die Oberfläche von Metallen mit ultrakurzen Laserstrahlpulsen beaufschlagt, so erfolgt der Energieeintrag in den Festkörper inertial durch Photonen-Elektronen-Interaktion. Die Energie der auftreffenden, absorbierten Photonen wird auf die quasifreien Elektronen übertragen und ist somit vollständig im elektronischen Subsystem deponiert [140]. Dies führt zu einem Anstieg der kinetischen Energie der freien Elektronen und zu einem thermischen Ungleichgewicht zwischen den Elektronen in dieser Zeitphase. Durch Elektronen-Elektronen-Streuung kommt es in der anschließenden zweiten Zeitphase zur Ausbildung eines thermischen Gleichgewichtes der mittleren kinetischen Energie des Elektronengases (Elektronentemperatur) [23, 141], welches mittels Fermi-Dirac-Verteilung beschrieben werden kann. Somit weisen die Subsysteme der Elektronen und des Gitters zwei unterschiedliche Temperaturen auf. Nachfolgend kommt es infolge der Elektronen-Phononen-Kopplung sowie der thermischen Diffusion der Elektronen zum Energietransport in das Volumen. Im Rahmen der Beschreibung mittels des Zwei-Temperaturen-Modells kann, für die Anwendung auf die Ablation von Metallen, eine konstante Elektronendichte während der Einwirkdauer der Laserstrahlung angesetzt werden. In der Folge unterliegen die Temperatur der Elektronen T_e und die Temperatur des Gitters T_l den zwei nachfolgenden, gekoppelten, eindimensionalen Gleichungen (Gl. 6-1) und (Gl. 6-2) [23, 141, 142].

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) - g(T_e - T_l) + S(z, t) \quad (\text{Gl. 6-1}) [23]$$

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = g(T_e - T_l) \quad (\text{Gl. 6-2}) [23]$$

Hierbei sind die Größen C_e und C_l als Wärmekapazitäten der Elektronen bzw. des Gitters definiert. Mit (Gl. 6-1) wird die thermische Diffusion der Elektronen beschrieben.

Der erste Term repräsentiert die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen, der zweite die Elektronen-Phononen-Kopplung und der dritte die Aufheizung der Elektronen durch den Laserstrahlpuls. $S(z, t)$ ist die Energiedichte der absorbierten Laserstrahlung in Abhängigkeit von der Zeit und der Tiefe. Da die Wärmediffusion aufgrund der stark differierenden Wärmekapazitäten der Elektronen und des Gitters, die Wärmekapazität der Elektronen liegt ein bis zwei Größenordnungen unterhalb derer des Gitters, viel schneller durch das Elektronengas erfolgt als durch die Gitterphononen, kann die Wärmediffusion durch das Gitter in (Gl. 6-2) vernachlässigt werden [23].

Wie in [23] mit Verweis auf [22] ausgeführt, können für die Ablation von Metallen auf Grundlage des Zwei-Temperaturen-Modells zwei Ablationsregime identifiziert werden. Für beide gilt eine logarithmische Abhängigkeit der Abtragrate von der Laserstrahlpulsfluenz. Eine Beschreibung der Abtragtiefe pro Puls ist demnach für geringe Laserstrahlpulsfluenzen (kleiner 1 J/cm^2) ausgehend vom Lambert-Beer'schen Gesetz durch nachstehende Gleichung (Gl. 6-3) gegeben, welche das erste Ablationsregime charakterisiert.

$$L \approx \alpha^{-1} \cdot \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}^\alpha}\right) \quad (Gl. 6 - 3) \quad [23]$$

Für höhere Fluenzen schließt sich ein zweites Ablationsregime an, welches durch die Wärmediffusionslänge der Elektronen und die Ablationsschwellfluenz für dieses Hochfluenzregime bestimmt ist. In [141] wird hierfür die Gleichung (Gl. 6-4) angewendet.

$$L \approx l \cdot \ln\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{th}^l}\right) \quad (Gl. 6 - 4) \quad [23]$$

Die in [23, 128 – 140] beschriebenen Zusammenhänge sowie die sich daraus ergebenden formellen Beschreibungen [139, 140] konnten für die untersuchten Grundmaterialien der Prägwerkzeuge ebenfalls festgestellt werden. Exemplarisch ist dieser Zusammenhang in Abb. 6-3 für die Strukturierung von Wolframcarbid aufgezeigt.

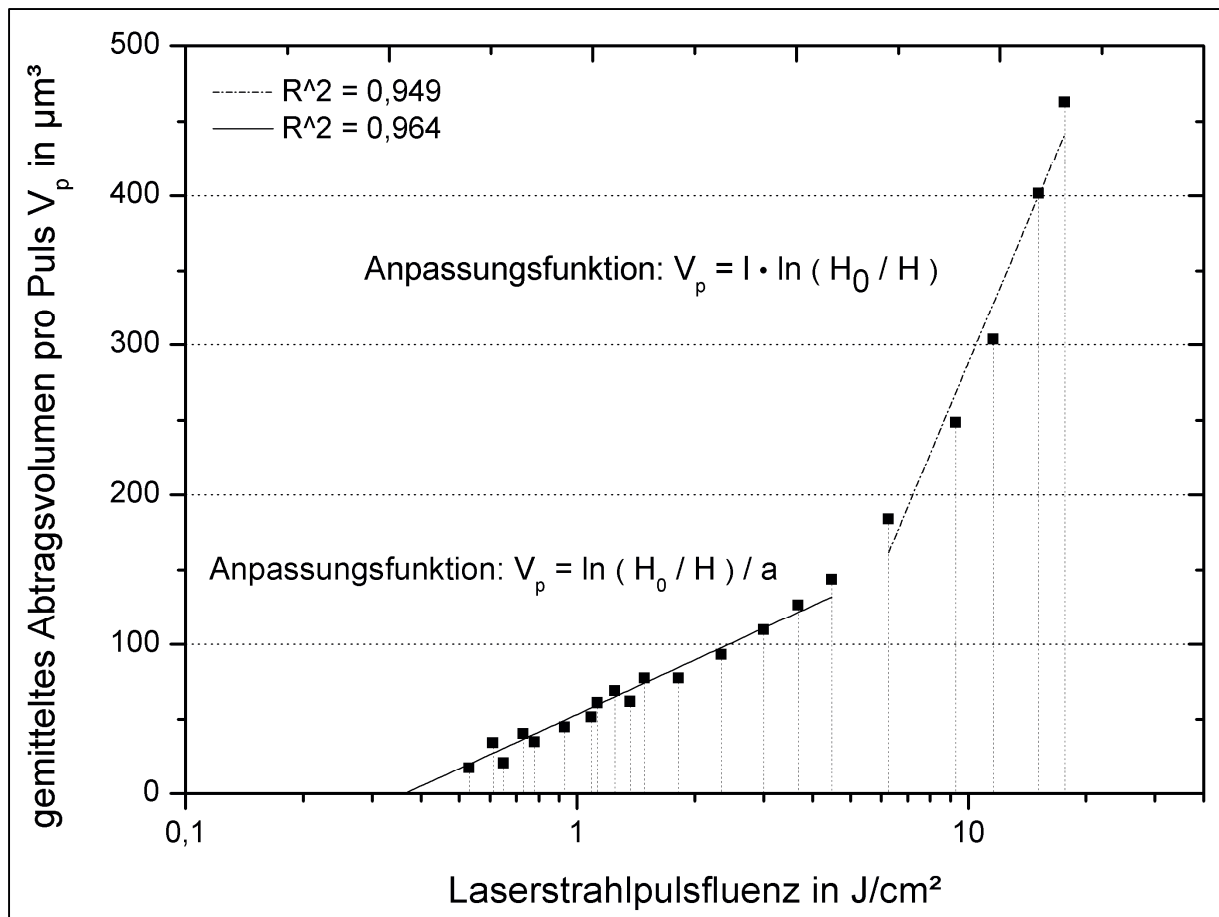


Abb. 6-3: Abhängigkeit des gemittelten Abtragsvolumens pro Puls von der Laserstrahlpulsfluenz für Wolframcarbid (Transmissionsobjektiv mit 100 mm Brennweite; Puls-zu-Puls-Distanz $d = 7 \mu\text{m}$).

Auf Basis der Auswertung der ermittelten Abhängigkeiten kann für die jeweiligen Materialien die Ablationsschwellfluenz ermittelt werden. Hierbei ist insbesondere das erste Ablationsregime von Interesse, da die Nutzung ultrakurzer Laserstrahlpulse in diesem ihre Vorteile gegenüber der Bearbeitung mit Laserstrahlpulsen längerer Pulsdauer zeigt. Beim Wechsel in das zweite Ablationsregime steigen zwar wie in Abbildung 6-3 erkennbar das Abtragsvolumen pro Puls und somit die Produktivität deutlich an, jedoch geht dies mit einer Verschlechterung der im Ergebnis der Bearbeitung vorliegenden Oberflächenrauheit und einer signifikanten Zunahme der thermischen Belastung der oberflächennahen Probenbereiche einher [140]. In der nachstehenden Tabelle 6-1 sind die, ausgehend vom ersten Ablationsregime experimentell ermittelten Werte der Ablationsschwellfluenz, die zugehörigen Absorptionskoeffizienten sowie die Fluenzbereiche des Wechsels der Ablationsregime aufgezeigt.

Tab. 6-1: Ablationsschwellfluenzen, Absorptionskoeffizienten und Fluenzbereiche des Wechsels der Ablationsregime für die untersuchten Grundmaterialien der Prägewerkzeuge (Transmissionsobjektiv mit 100 mm Brennweite; Puls-zu-Puls-Distanz $d = 7 \mu\text{m}$).

Werkstoff	Ablations-schwellfluenz	Absorptions-koeffizient	Fluenzbereich des Wechsels der Ablationsregime
Wolframcarbid	0,36 J/cm ²	$4,43 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$	zwischen 5 J/cm ² und 7 J/cm ²
Stahl	0,23 J/cm ²	$6,24 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$	zwischen 6 J/cm ² und 9 J/cm ²
Messing	0,46 J/cm ²	$2,32 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$	zwischen 3 J/cm ² und 5 J/cm ²

Ein direkter Vergleich der ermittelten Werte für materialspezifische Ablationsschwellfluenz mit der Literatur ist nur eingeschränkt möglich. Dies ist unter anderem auf die differierenden Parameter der genutzten Lasersysteme, als auch die chemische Zusammensetzung der untersuchten Materialien und die Prozessparameter zurückzuführen, unter welchen die Ablationsschwellen ermittelt wurden. In [23, 142, 143] wird dies exemplarisch ausgeführt. Die hier festgestellte Verringerung der Ablationsschwellfluenz bei Erhöhung der Pulsanzahl pro Flächeneinheit konnte im Rahmen der Untersuchungen ebenfalls nachgewiesen werden. So lieferten die Untersuchungen an Wolframcarbid, im Vergleich zu der in Tabelle 6-1 ausgewiesenen Ablationsschwellfluenz von 0,36 J/cm² bei einer Puls-zu-Puls-Distanz von 7 μm , eine Ablationsschwellfluenz von 0,15 J/cm² bei Absenkung der Puls-zu-Puls-Distanz auf einen Wert von 17 nm und Verwendung des Transmissionsobjektives mit einer Brennweite von 100 mm. Zurückführen lässt sich dieser Effekt auf nichtlineare und Akkumulationseffekte [79, 142, 143]. Der Einfluss der Materialzusammensetzung wird in [144] deutlich. Mit einem vergleichbaren Lasersystem ($\lambda = 800 \text{ nm}$; $\tau_H = 150 \text{ fs}$) sind für Wolframcarbid mit 6 % bzw. 10 % Cobaltbinderanteil Werte der Ablationsschwellfluenz von 0,3 J/cm² bzw. 0,4 J/cm² aufgeführt. Eine Entmischung der Cobaltmatrix bzw. eine signifikante Änderung der stöchiometrischen Zusammensetzung oberflächennaher Probenbereiche im Ergebnis der Laserbearbeitung zeigte sich, in Übereinstimmung mit [145], in den hierzu durchgeführten EDX-Analysen nicht (siehe Abb. 6-4).

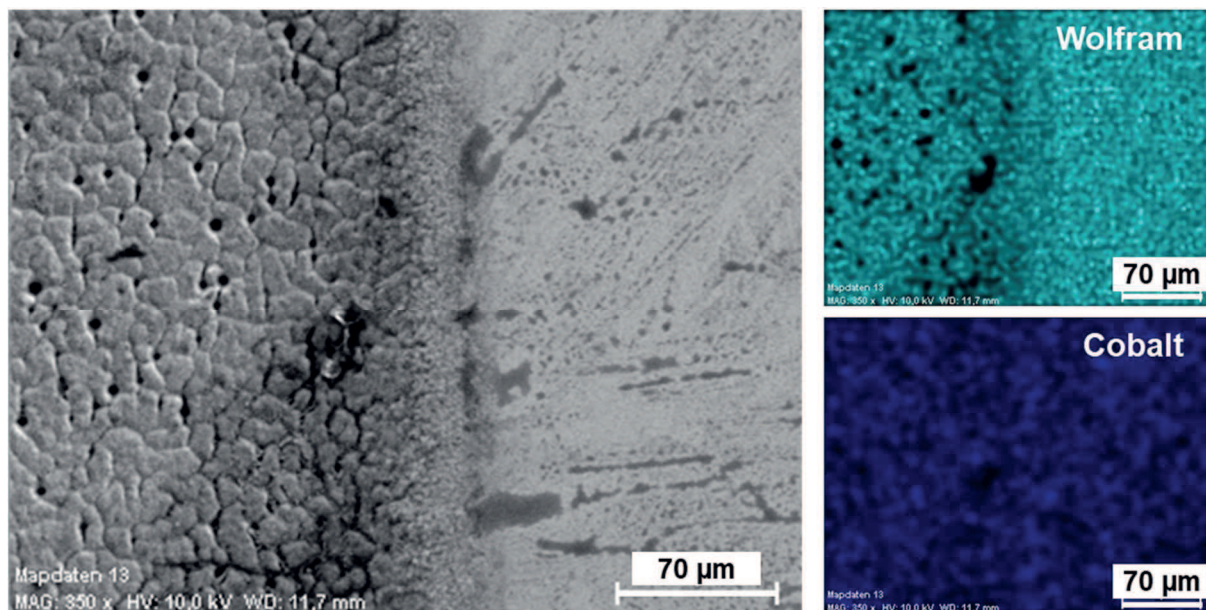


Abb. 6-4: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen einer strukturierten Wolframcarbid-Probe (Links: Sekundärelektronenbild; Rechts: Mapping-Daten EDX).

Sind Unterschiede der chemischen Zusammensetzung beim Wolframcarbid auf den Cobaltanteil sowie die Korngröße der Hartstoffpartikel zurückzuführen, so sind dies bei den untersuchten Stählen sowie dem Messing die Anteile der Legierungselemente. Die Stähle mit den Werkstoffnummern 1.2379 und 1.2990 zeigten in den Versuchen keine erkennbaren Unterschiede hinsichtlich des Ablationsverhaltens. Auch der Herstellungsprozess für die als Blankstahl und pulvermetallurgisch vorliegenden Stähle der Werkstoffnummer 1.2379 bedingte keine signifikanten Abweichungen für die Laserstrukturierung. In Tabelle 6-1 ist daher der Mittelwert der ermittelten Ablationsschwellen für die Stähle angegeben. Die Abweichungen der errechneten Ablationsschwellenfluenzen zwischen den Stählen bewegen sich im Bereich der Messunsicherheit. Für Edelstahl sind in [23] $0,16 \text{ J/cm}^2$ bzw. $0,13 \text{ J/cm}^2$ in [146] als Schwellfluenz der Ablation für eine Laserstrahlwellenlänge von 775 nm [23] bzw. 800 nm [146] und einer Pulsdauer von jeweils 150 fs angegeben. Der Vergleich mit [23] und [146] zeigt, dass die im Rahmen der Bearbeitung von Stahl ermittelten Werte der Ablationsschwelle zwar größer sind, aber in der gleichen Größenordnung skalieren. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die differierende Anzahl an Pulsen pro Flächeneinheit sein. Beruhen die Ergebnisse in [23] auf 100 Pulsen, sind es in [146] 68 Pulse und bezogen auf die Werte in Tabelle 6-1 38 Pulse pro Laserstrahlquerschnittsfläche. Für Prägwerkzeuge, für welche lediglich eine geringe

Anzahl an Abformungen vorgesehen ist bzw. welche im Ergebnis spezifischer Anwendungen deutlich reduzierten Lasten ausgesetzt sind, kommt in geringem Umfang auch Messing der Werkstoffnummer 2.0401 zum Einsatz. Die Versuchsmatrix wurde daher um diesen Grundwerkstoff erweitert. Ein Abgleich der ermittelten Ablationsschwellfluenz von $0,46 \text{ J/cm}^2$ war in Ermangelung entsprechender Quellen nicht möglich.

6.1.2. Abtragraten und Qualität der Strukturierung

Die Auswertung der Abtraguntersuchungen lässt des Weiteren Aussagen über die Produktivität der Laserstrukturierung zu und bildet die Basis für eine perspektivische Skalierung des Prozesses durch Anpassung der System- und Prozessparameter. In den Abbildungen 6-5 und 6-6 sind die ermittelten Abhängigkeiten der gemittelten Abtragvolumen pro Puls von der Laserstrahlpulsfluenz für die Werkstoffe Wolframcarbid und Stahl bei unterschiedlichen Puls-zu-Puls-Distanzen dargestellt.

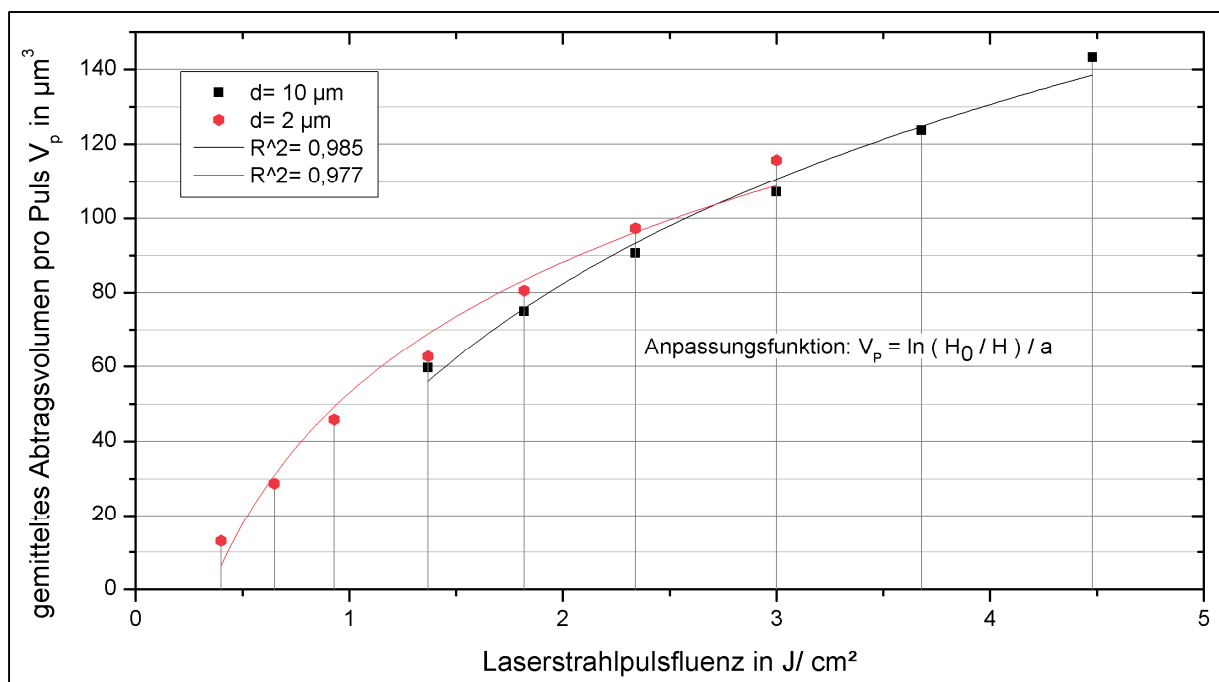


Abb. 6-5: Gemittelt. Abtragvolumen pro Puls in Abhängigkeit von der Fluenz, bei verschiedenen Puls-zu-Puls-Distanzen d für Wolframcarbid und Verwendung eines Transmissionsobjektivs mit 100 mm Brennweite (Strahlradius $w_{86} = 27,4 \mu\text{m}$).

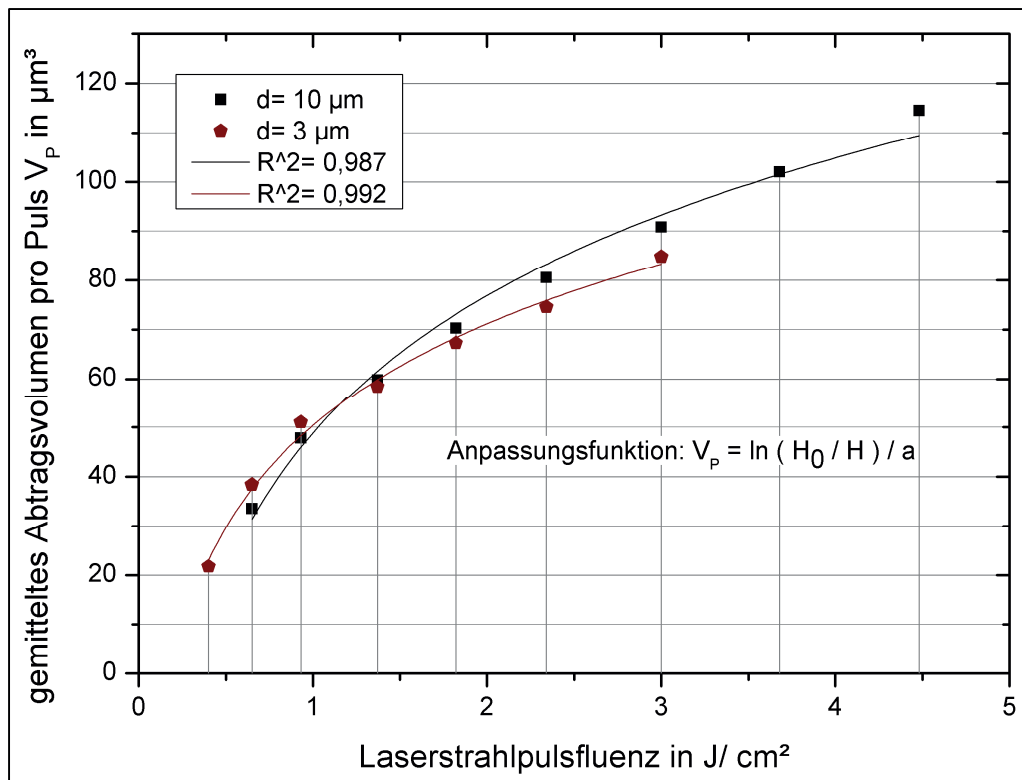


Abb. 6-6: Gemittelt. Abtragsvolumen pro Puls in Abhängigkeit von der Fluenz, bei verschiedenen Puls-zu-Puls-Distanzen d für Stahl und Verwendung eines Transmissionsobjektivs mit 100 mm Brennweite (Strahlradius $w_{86} = 27,4 \mu\text{m}$).

Hierbei zeigt sich für die untersuchten Materialien, dass die genutzte Puls-zu-Puls-Distanz bei Bearbeitung im ersten Ablationsregime keinen Einfluss auf das Abtragsvolumen pro Puls hat. Im Bereich des ersten Ablationsregimes wird diese maßgebende Prozessgröße zur Beurteilung der Produktivität, neben der Laserstrahlquerschnittsfläche auf der Probenoberfläche sowie den materialspezifischen Werten der Ablationsschwellfluenz und des Absorptionskoeffizienten, nur von der applizierten Laserstrahlpulsfluenz bestimmt. Ursächlich hierfür sind die in [140] beschriebene Ablationsmechanismen. So ist der Materialabtrag im ersten Ablationsregime durch ein schichtweises Ablösen des Materials infolge der Ausbildung von Gasblasen unterhalb der Oberfläche charakterisiert. Diese sich ablösenden Schichten zerbrechen infolge des Gasdrucks und bilden nanoskalige Partikel. Für das zweite Ablationsregime wurde in [140] die den höheren Materialabtrag bedingende Droplet- oder Schmelzphasenbildung nachgewiesen. Die relative Anordnung der Pulse zueinander beeinflusst in diesem Bereich der Laserstrahlpulsfluenz die erzielbaren Abtragraten. Für den zur Freistellung

der Funktionsflächen zu favorisierenden Fluenzbereich des ersten Ablationsregimes ist auf Basis der Ergebnisse eine Skalierung sowohl hinsichtlich der anwendbaren Lasersysteme als auch der auf der Probenoberfläche realisierten Laserstrahlquerschnittsflächen gegeben. Der Nachweis hierzu wurde unter Verwendung des in Kapitel 6.1. beschriebenen Transmissionsobjektives mit einer Brennweite von 32 mm und Verwendung eines Strahlaufweiters geführt und lieferte korrespondierende Ergebnisse.

Für das Wolframcarbid konnten dabei Werte der gemittelten mittleren Rauheit R_a des Bodens der laserstrukturierten Oberflächen von kleiner 100 nm erreicht werden. Bei einem Überlappingsgrad der Laserstrahlquerschnittsflächen auf der Probenoberfläche zwischen einem Puls und dem nachfolgenden Puls im Bereich von 63 % bis 90 % wurden hierbei Laserstrahlpulsfluenzen bis $4,5 \text{ J/cm}^2$ zur Anwendung gebracht. Ein Minimum der gemittelten mittleren Rauheit R_a konnte bei Überlappingsgraden zwischen 70 % und 80 % erreicht werden. In diesem Bereich sind für das untersuchte Material Werte der mittleren Rauheit R_a von kleiner gleich 50 nm erreichbar. Die laterale Auflösung der realisierbaren Strukturen skaliert dabei mit der Strahlformung, den auf der Probenoberfläche erzielbaren Laserstrahlquerschnittsflächen sowie der applizierten Laserstrahlpulsfluenz. Eine anforderungsspezifische Auswahl der Höhenauflösung ist durch die Auswahl der Strukturierungsparameter (Puls-zu-Puls-Distanz bzw. Überlappingsgrad der Laserstrahlquerschnittsflächen sowie der Laserstrahlpulsfluenz) gegeben. In der Abbildung 6-7 sind mit Verwendung der zur Verfügung stehenden Objektive erstellten Demonstratoren aufgezeigt.

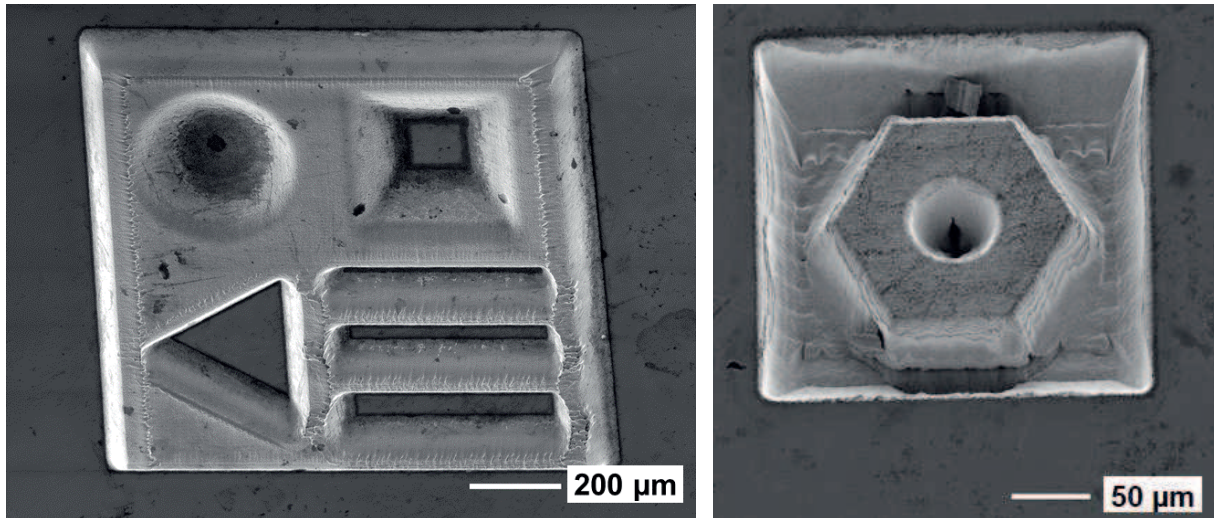


Abb. 6-7: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen in der Oberfläche von Wolframcarbid erzeugter dreidimensionaler Demonstratorstrukturen (1 µm vertikale Schichtauflösung; Links: 100 Abtragschichten, Transmissionsobjektiv mit 100 mm Brennweite; Rechts: 50 Abtragschichten, Transmissionsobjektiv mit 32 mm und Aufweiter).

Für die Bearbeitung der Stähle erfolgte im Ergebnis der Auswertung der Abtraguntersuchungen eine Beschränkung der applizierten Laserstrahlpulsfluenz auf 1 J/cm². Bei höheren Laserstrahlpulsfluenzen kam es zur Ausbildung der in Abbildung 6-8 exemplarisch aufgezeigten, punktuellen Vertiefungen.

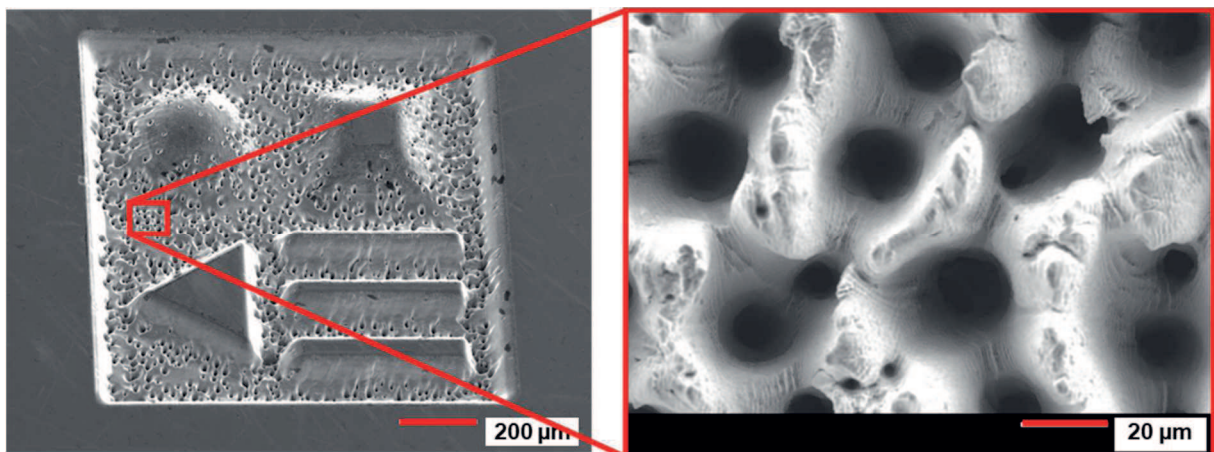


Abb. 6-8: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen einer dreidimensionalen Teststruktur in Stahl der Werkstoffnummer 1.2990 (Strukturtiefe 100 µm; Laserstrahlpulsfluenz $H = 2,3 \text{ J/cm}^2$; Puls-zu-Puls-Distanz $d = 9 \text{ µm}$; Transmissionsobjektiv mit 100 mm Brennweite).

Mit zunehmender Abtragtiefe sowie höherem Anteil der Legierungselemente Chrom, Vanadium und Molybdän im jeweiligen Stahl konnte, mit Ausnahme des pulvermetallurgisch hergestellten Stahls 1.2379 PM, eine Verstärkung dieses Effekts bis hin zur vollflächigen Aneinanderreihung der Vertiefungen festgestellt werden. Die Auswertung metallographischer Schliffe lieferte eine Erklärung für die beobachteten Effekte. In den als Blankstahl vorliegenden Werkstoffen zeigten sich in Querschliff-Präparationen nach erfolgter Kontrastätzung Ausscheidungen im Gefüge. Nachfolgend mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie durchgeführte Untersuchungen ergaben für diese Bereiche deutliche Abweichungen der chemischen Zusammensetzung im Vergleich zum Grundgefüge des jeweiligen Stahls. In Abweichung zu den Blankstählen ist das Gefüge des pulvermetallurgischen Stahls 1.2379 PM über den gesamten Querschnitt homogen und ausscheidungsfrei. Eine lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschliffs sowie die Ergebnisse der EDX-Analyse für eine strukturierte Stahlprobe der Werkstoffnummer 1.2990 sind in Abbildung 6-9 dargestellt.

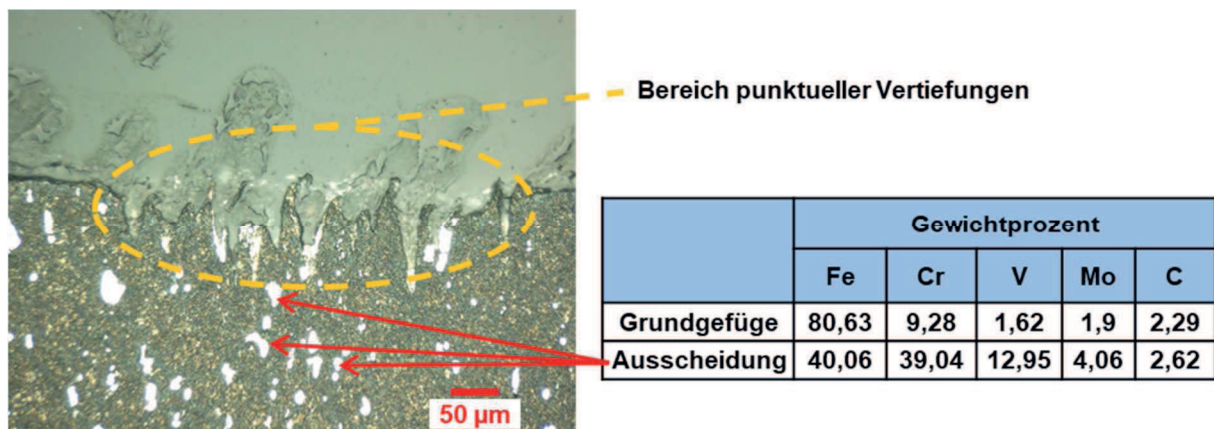


Abb. 6-9: Lichtmikroskopaufnahme einer im Querschliff präparierten, strukturierten Stahlprobe der Werkstoffnummer 1.2990 nach Kontrastätzung (Chemische Zusammensetzung der Gefügebestandteile gemäß EDX-Analyse).

Für die genutzten Laserstrahlpulse weisen diese Ausscheidungen erhöhte Abtragsraten auf. Hierdurch kommt es bei Laserstrahlpulsfluenzen oberhalb von 1 J/cm² zu einem verstärkten Materialabtrag in diesem Bereich und in der Folge zu Ausbildung von Vertiefungen. Trifft bei einer nachfolgenden, weiteren Laserbearbeitung der Probe erneut Laserstrahlung auf die Vertiefungen, so geht dies mit einer Zunahme deren Tiefe einher. Die Tiefenzunahme bei neuerlicher

Laserbearbeitung ist mit der verstärkten Energieeinkopplung durch Mehrfachreflexionen an den Wänden der Vertiefungen erklärbar. Mit der Erhöhung der Gesamttiefe des Abtrages werden potentiell mehr der im Volumen vorliegenden Ausscheidungen mit der Laserstrahlung beaufschlagt. Dies führt bei unangepassten Strukturierungsparametern zu einer Vergrößerung der Anzahl der punktuellen Vertiefungen. Durch die Beschränkung der Laserstrahlpulsfluenz auf den bereits genannten Wert von 1 J/cm^2 kann für die jeweiligen Stähle die Ausbildung dieser Oberflächenmorphologie vermieden werden. In Abbildung 6-10 ist ein Vergleich der im Ergebnis der Laserstrukturierung vorliegenden Oberfläche, bei gleicher Gesamtabtragtiefe, zum einen für eine Laserstrahlpulsfluenz oberhalb des festgelegten Grenzwertes und zum anderen mit angepassten Strukturierungsparametern aufgezeigt.

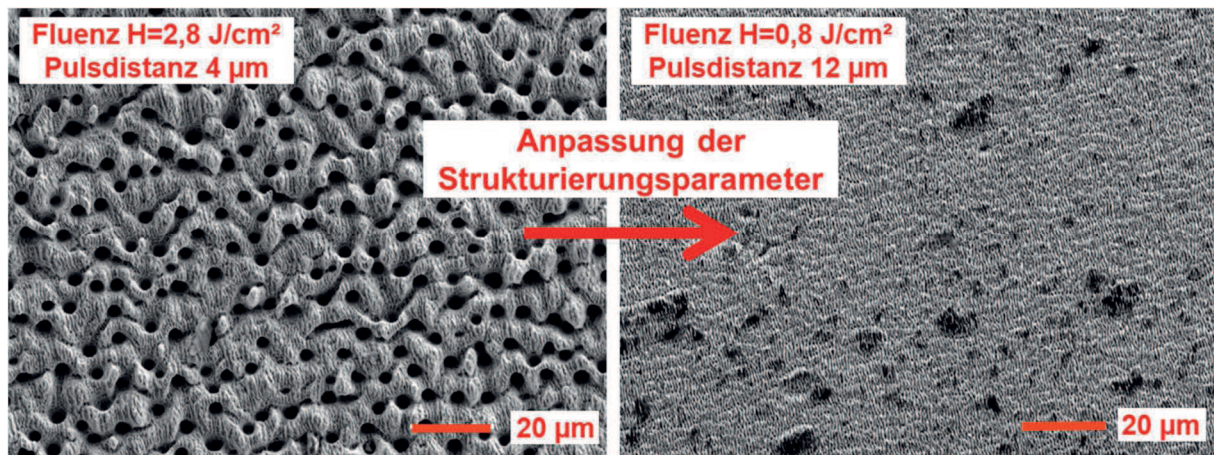


Abb. 6-10: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der laserstrukturierten Oberfläche des Stahls 1.2990 (Transmissionsobjektiv mit 100 mm Brennweite; Links: ungeeignete Strukturierungsparameter; Rechts: angepasste Strukturierungsparameter).

Für die untersuchten Stähle war es, im direkten Vergleich mit den Ergebnissen der Strukturierung des Wolframcarbid-Hartmetalls, nicht möglich Werte der mittleren Rauheit R_a der Strukturböden von kleiner gleich 50 nm zu realisieren. Die Bearbeitung, mit Überlappungsgraden der Laserstrahlquerschnittsflächen auf der Probenoberfläche zwischen einem Puls und dem nachfolgenden Puls von 50 % bis 80 %, lieferte bei Laserstrahlpulsfluenzen bis 1 J/cm^2 mit typischen Werten der mittleren Rauheit im Bereich von 50 nm bis 110 nm die besten Oberflächenqualitäten. Wie bereits für das Wolframcarbid, wurden auch für die untersuchten Stähle EDX-Analysen durchgeführt. In der Auswertung konnten für die untersuchten Stähle bei Anwendung der

aufgeführten Parameter keine signifikanten Änderungen der chemischen Zusammensetzungen festgestellt werden. Auch waren für im Querschliff präparierte, strukturierte Proben nach erfolgter Kontrastätzung lichtmikroskopisch keine Gefügeänderungen erkennbar.

In [27] dargestellte vergleichende Untersuchungen belegen deutlich höhere Abtragraten der Mikrostrukturierung für Laserstrahlpulse mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich, als dies mit Pulsdauern im Pikosekundenbereich möglich ist. Auch konnten in [27] und [147] signifikant geringere Rauheiten im Ergebnis der Nutzung von Laserstrahlpulsen kürzer Pulsdauer gemessen werden. Folglich bieten die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen ermittelten Parameterräume die Möglichkeit der anwendungsspezifischen Optimierung unter der Maßgabe der Umsetzung eines effizienten Materialabtrages bei gleichzeitiger Realisierung geringer Oberflächenrauheiten.

6.1.3. Einfluss inerter Prozessgase

Die Laserstrukturierung erfolgte für die durchgeführten Untersuchungen zunächst unter Normalbedingungen an Luft. Zur Abklärung ob und in wieweit die Strukturierungsqualität durch die Verwendung von Prozessgasen verbessert werden kann, wurden weitere Versuche durchgeführt. Hierbei kamen als Prozessgase Stickstoff, Argon und Helium in Anwendung, welche bei Gasdrücken von 0,5 bar, 1 bar und 1,5 bar stechend auf die Bearbeitungsstelle zugeführt wurden. Der Abstand zwischen Gasdüse und Bearbeitungsstelle betrug 5 mm. Im Ergebnis der Nutzung dieser Inertgase konnte im untersuchten Druckbereich bei Applikation der in Kapitel 6.1.2. aufgezeigten Parameterbereiche, zur Erzielung eines Minimums der gemittelten mittleren Rauheit der laserstrukturierten Oberflächen, kein Einfluss der Gasart oder des Gasdrucks auf das Bearbeitungsergebnis im Vergleich zu der Bearbeitung an Luft unter Normalbedingungen festgestellt werden.

6.2. Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mittels Direktschreiben im Fokusabtragverfahren

Die Verfahrensvariante des Direktschreibens stellt eine Möglichkeit für die Erzeugung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden in der angestrebten Größenordnung von $\leq 2 \mu\text{m}$ in den untersuchten Grundmaterialien der Mikroprägewerkzeuge dar. Bei Fluenzen im Bereich der Ablationsschwelle können durch Fokussierung der Laserstrahlung mittels kurzbrennweitiger Objektive auf die Materialoberfläche Gräben mit Breiten von $1 \mu\text{m}$ bis $1,5 \mu\text{m}$ realisiert werden. Die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Probe erfolgt hierbei vorzugsweise mittels hochpräziser Achssysteme zur Probenpositionierung unter stationärem Laserstrahl. Unter Verwendung des Lasersystems Clark MXR CPA-2010 bei der Grundwellenlänge von 775 nm und eines Reflexionsobjektives Typ Coherent X25/0.4 mit einer effektiven Brennweite von 8 mm , welches im Fokus einen Strahlradius von $w_{86} = 2,1 \mu\text{m}$ liefert, ließen sich Gitter mit einer Grabenbreite von $1,5 \mu\text{m}$ und einer Gitterperiode von $2 \mu\text{m}$ realisieren. Die Strukturen wiesen, wie in Abbildung 6-11 gezeigt, eine Tiefe von ca. 300 nm bei Strukturierung mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 2 mm/min und einer applizierten Laserstrahlpulsfluenz von $H = 0,32 \text{ J/cm}^2$ für die untersuchten Stähle auf. Für die untersuchte Wolframcarbid-Hartmetallvariante AKS-F03 skaliert die Laserstrahlpulsfluenz im gleichen Verhältnis zu der ermittelten, materialspezifischen Ablationsschwelle und liegt im Bereich von $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 2 mm/min .

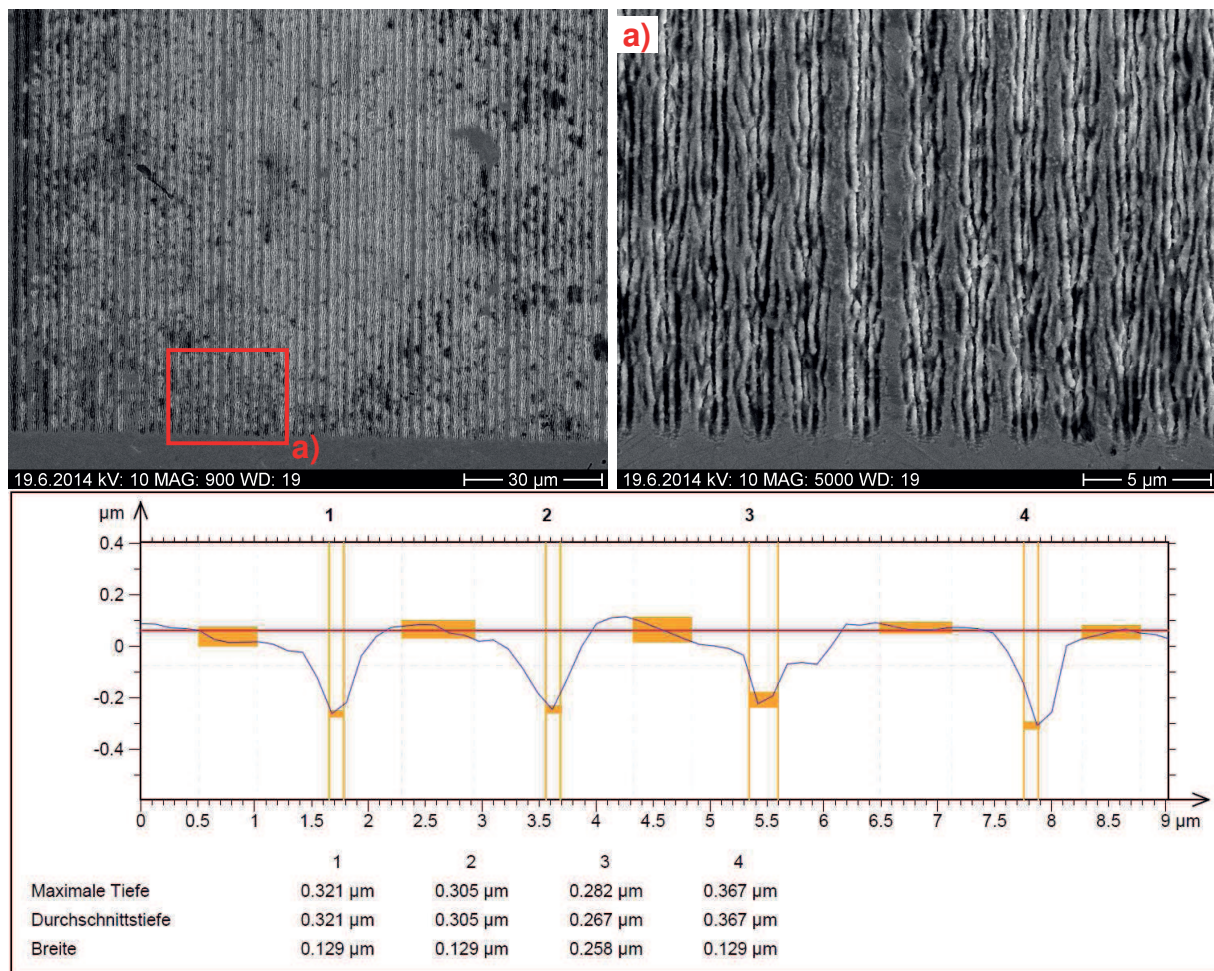


Abb. 6-11: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen sowie Profilschnitt (Messprinzip der Fokusvariation in Kombination mit strukturierter Beleuchtung) der in einem Plansubstrat (Material: 16MnCr5) erzeugten Gräben ($v = 2 \text{ mm/min}$; $H = 0,32 \text{ J/cm}^2$ bei $w_{86} = 2,1 \text{ µm}$; lateraler Abstand der erzeugten Gräben 2 µm).

Durch Erhöhung der pro Streckeneinheit auf die Probenoberfläche applizierten Laserstrahlpulse, im untersuchten Fall durch Verringerung der Verfahrensgeschwindigkeit auf $1,5 \text{ mm/min}$ bei einer Laserstrahlpulsfluenz von $H = 0,32 \text{ J/cm}^2$ für die Stähle bzw. $H = 0,5 \text{ J/cm}^2$ für die Hartmetallsorte AKS-F03, kann die durchschnittliche Tiefe der erzeugten Gräben auf $400 \dots 450 \text{ nm}$ vergrößert werden. Eine weitere Verringerung der Verfahrensgeschwindigkeit bedingt keine Zunahme der Tiefe der erzeugten Gräben. Diese o.g. Struktur Tiefen stellen prozessbedingte Grenzwerte des realisierten Parametersetups dar. Eine Vergrößerung der Grabentiefe durch Erhöhung der Laserstrahlpulsfluenz ist bedingt durch die hiermit einhergehende Zunahme der Strukturbreite der realisierten Gräben nicht möglich. Hieraus resultierend kommt es in

der Folge der Verbreiterung der Gräben zu einem Abtrag der Stege zwischen den Gräben und somit zu einem Einsinken der strukturierten Bereiche unter das Niveau angrenzender, nicht strukturierter Bereiche.

Die Strukturierung bei Fluenzen im Bereich der Ablationsschwelle stellt hohe Anforderungen an die Planizität der Probenoberfläche. Abweichungen der Fokusslage kleiner der Rayleighlänge z_R führen bereits zu einem Abbruch des Ablationsprozesses.

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_{86}^2}{\lambda} \quad (Gl. 6 - 5)$$

Für die beschriebene Parameterkombination unter Verwendung des Reflexionsobjektives Typ Coherent X25/0.4 mit einer Rayleighlänge von 17,9 μm konnte dies bereits bei Abweichungen der Fokusslage im Bereich größer $\pm 2 \mu\text{m}$ festgestellt werden. Die Rayleigh-Länge kann in diesem Zusammenhang nicht als Kriterium für den sicheren Schwankungsbereich des Relativabstandes Probenoberfläche-Objektiv herangezogen werden.

Limitationen erfährt das Verfahren des Direktschreibens mittels Fokusabtrag zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Strukturen hinsichtlich der bearbeitbaren Materialien in Kombination mit den in Anwendung gebrachten Laserparametern. Hierbei sind insbesondere die materialspezifischen Ablationsschwellen, sowie die Abfolge der Schichten bei der Bearbeitung von Werkstoffverbunden zu berücksichtigen. Der für den angestrebten industriellen Einsatz vorgesehene Werkstoffverbund Stahl mit ta-C-Beschichtung ist für das Verfahren des Direktschreibens zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Strukturen nicht geeignet. Ursächlich hierfür sind die Teiltransparenz der ta-C-Schicht sowie die deutlich geringere Ablationschwelle von Stahl im Vergleich zur ta-C-Schicht für die verwendete Laserstrahlwellenlänge von 775 nm. Für Stahl erfolgt die Ablation auf Basis eines Einphotonenabsorptionsprozesses, hingegen sind für das ta-C-Schichtmaterial vorrangig Multiphotonenprozesse erforderlich, welche erst bei höheren Fluenzen erreicht werden. Bei der Bearbeitung mit Fluenzen unterhalb der Ablationsschwelle der ta-C-Schicht kommt es daher zur Ablation des Stahlsubstrates. Der hierbei entstehende Gasdruck des ablatierten Materials führt zur Ausbildung einer Gasblase im Übergangsbereich Substratmaterial-Schicht. Mit steigendem Gasdruck kommt es zur Vergrößerung dieser Gasblase bis zum Aufbrechen des Schichtmaterials. Bei den angestrebten Gitterstrukturen mit einer Gitterperiode von $\leq 2 \mu\text{m}$ konnte ein vollständiger Abtrag bzw. vollflächiges Abplatzen der Schicht

festgestellt werden. Die Realisierung der Gitterstrukturen bei Fluenzen im Bereich größer oder gleich der Ablationsschwelle des ta-C-Schichtmaterials ist aufgrund der Verbreiterung der hierbei entstehenden Grabenstrukturen nicht möglich.

Untersuchungen zur Abscheidung der ta-C-Schichten, gemäß dem in [4] beschriebenen Verfahrens, auf mittels Direktschreiben vorstrukturierten Probenmaterialien zeigten eine signifikante Zunahme graphitischer Anteile in der aufwachsenden Schicht sowie die in Abbildung 6-12 erkennbare Vergröberung der Schichttextur.

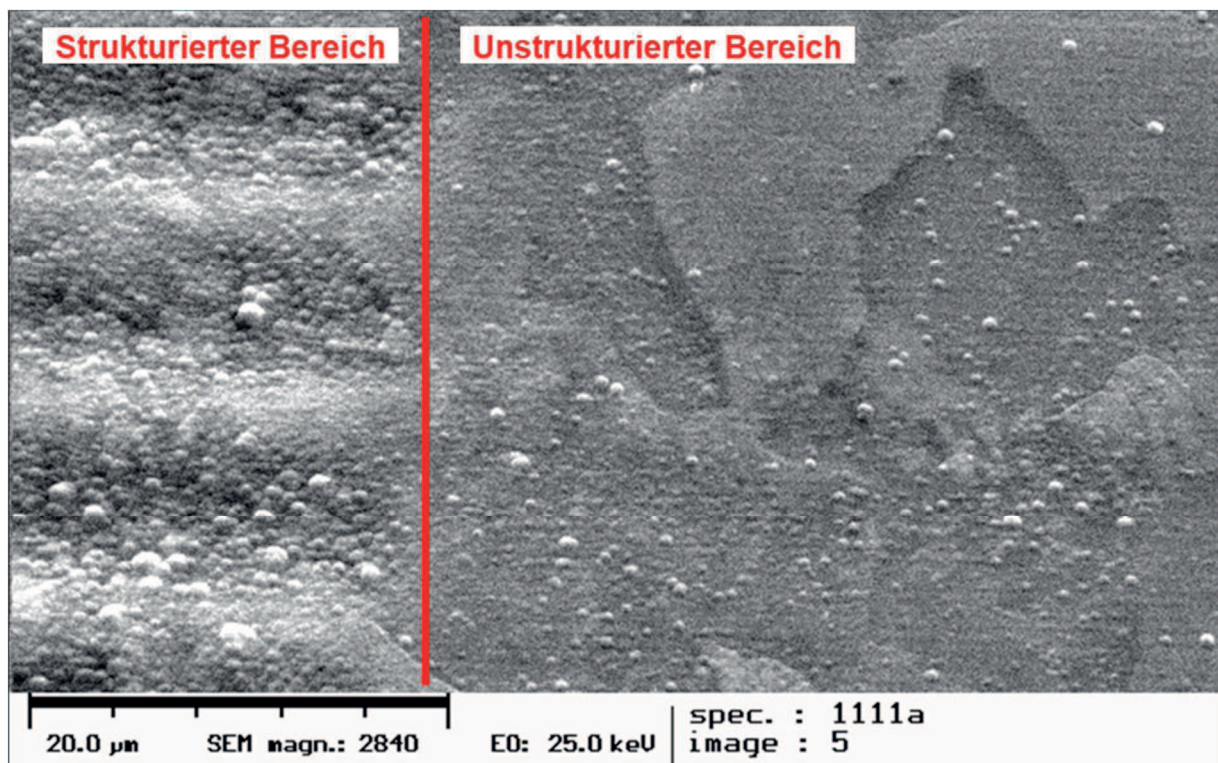


Abb. 6-12: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer mittels Direktschreiben im Fokusabtragverfahren vorstrukturierten und nachträglich mit 2 µm ta-C beschichteten Probenoberfläche (Substratmaterial: 1.2367 / X38CrMoV5-3; Gitterperiode 10 µm).

Ursächlich hierfür sind abweichende Wachstumsbedingungen für die schichtbildenden Teilchen zwischen den strukturierten Bereichen im Vergleich zu den unstrukturierten, polierten Oberflächen. Im Ergebnis der Strukturierung weisen die bearbeiteten Oberflächenbereiche laserinduzierte periodische Oberflächenstrukturen sowie Anhaftungen von Debris auf. Letztere konnten durch geeignete Reinigungsverfahren weitestgehend entfernt werden. Die LIPSS hingegen bedingen durch ihre geometrische Ausformung lateral unterschiedliche Auftreffwinkel für die, auf das

Substrat auftreffenden, schichtbildenden Teilchen. In [148 – 151] werden Untersuchungen zum Einfluss des Einfallswinkels der Kohlenstoffteilchen für die Abscheidung tetraedisch gebundener, amorpher Kohlenstoffschichten präsentiert. Mit einer Vergrößerung des Einfallswinkels der schichtbildenden Teilchen relativ zur Oberflächennormalen des zu beschichtenden Substrates verringert sich der sp^3 -hybridisierte (diamantartig gebundene) Anteil der aufwachsenden Schicht [148 – 151]. Das geometrische Profil der LIPSS führt so zu lokalen Schwankungen der Verhältnisse der sp^2 - bzw. sp^3 -hybridisierten Anteile der ta-C-Schicht. Bereiche höheren sp^2 -Gehaltes (graphitisch gebunden) zeigen durch ihre geringere Dichte ein schnelleres Wachstum. Die Kombination dieser Effekte führt zu der in Abbildung 6-12 für den strukturierten Bereich erkennbaren Oberflächengestalt.

Im Ergebnis der geringen Verfahrensgeschwindigkeiten, im Bereich von einigen mm/min bei der Verwendung von Lasersystemen mit Pulswiederholfrquenzen von 1 kHz, ist das Verfahren des Direktschreibens mittels Fokusabtrag des Weiteren hinsichtlich seiner Produktivität stark limitiert. Die vom Lasersystem bereitgestellte Laserstrahlpulsenergie wurde für die Versuche stark abgeschwächt. Mit einer perspektivischen Umsetzung der Gesamtleistung des Systems könnte eine Produktivitätssteigerung um den Faktor 10750 erzielt werden. Durch den Einsatz von Lasersystemen mit höherer mittlerer Leistung und höherer Pulswiederholfrquenz sind weitere Steigerungen realisierbar. In Hinblick auf die technologische Umsetzung sind Produktivitätszuwächse in diesen Größenordnungen jedoch nur mit hohem Aufwand darstellbar. Eine Möglichkeit besteht in der Realisierung einer Mehrstrahlbearbeitung durch Nutzung von Strahlteilern. Hierbei wird die zur Verfügung stehende Laserstrahlleistung zu jeweils gleichen Teilen auf mehrere Strahlengänge verteilt, um eine parallele Bearbeitung der zu strukturierenden Bauteile zu erreichen. Die Erhöhung der Produktivität skaliert hierbei mit der Anzahl der gleichzeitig aktiven Bearbeitungsstellen und wird von der zur Verfügung stehenden, maximalen Laserstrahlleistung begrenzt. Hinsichtlich der Prozesssicherheit ergeben sich durch die Erhöhung der Komplexität des Gesamtsystems jedoch zusätzliche Herausforderungen, welche eine Umsetzung im Rahmen der Zielstellung dieser Arbeit nicht zweckmäßig erscheinen lassen. Diese sind insbesondere in den hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Positioniersysteme sowie den Einschränkungen derartiger Anlagenkonzepte in Hinblick auf die Flexibilität der Bearbeitungsaufgaben zu sehen.

Der nachfolgend in Kapitel 6.3. beschriebene Prozess zur Erzeugung laserinduzierter, periodischer Oberflächenstrukturen (LIPSS) stellt vor diesem Hintergrund die technologisch einfacher beherrschbare und kosteneffizientere Verfahrensvariante zur Realisierung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen auf den Oberflächen der Mikoprägewerkzeuge dar.

6.3. Erzeugung laserinduzierter, periodischer Oberflächenstrukturen

Die Entstehung periodischer Oberflächenstrukturen im Ergebnis der Bearbeitung von Festkörperoberflächen mittels Laserstrahlung ist, wie in Kapitel 3.2.5.4. beschrieben, bereits seit längerem bekannt. Vor dem Hintergrund des Erhalts der Funktionalität der für die Mikoprägewerkzeuge eingesetzten Werkstoffe ist, wie bereits in Kapitel 6.1. ausgeführt, insbesondere die Strukturierung unter Nutzung ultrakurzer Laserstrahlungspulse von Interesse, um die thermische Belastung oberflächennaher Probenbereiche zu verringern [152]. Einzelne Arten der, bei Applikation von Laserstrahlungspulsen mit Pulsdauern im Bereich von Pikosekunden und Femtosekunden, auftretenden Oberflächenstrukturen [80 – 90] eignen sich durch ihre geometrische Form und die Strukturabmessungen für den Einsatz als Beugungsgitter für Licht. Die LSFL, als Untertypus der in [88] klassifizierten LIPSS, adressieren dabei die Anforderung an die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mit einer Gitterperiode kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ am besten und waren daher Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Eine modellhafte Beschreibung deren Entstehung erfolgt, ebenso wie die Betrachtung der maßgebenden Einflussgrößen, in den nachstehenden Kapiteln. Des Weiteren wird eine Abschätzung der Produktivität dieses prozesstechnisch vergleichsweise einfach umzusetzenden Verfahrens gegeben und auf die Möglichkeit der Erzeugung von Mischfarben durch Überlagerung von Spektralfarben eingegangen.

Die Bearbeitung der Versuchsmaterialien erfolgte, sofern nicht anderweitig beschrieben, in der Fokusebene der jeweils in Anwendung gebrachten Objektive. In Tabelle 6-2 ist eine Übersicht der mit diesen in der jeweiligen Fokusebene realisierten Strahlradian für die genutzten Lasersysteme aufgezeigt.

Tab. 6-2: Übersicht der in Anwendung gebrachten Lasersysteme und der mit den verwendeten Objektiven in der Fokusebene realisierten Strahlradien.

Lasersystem	Clark MXR CPA-2010		
Wellenlänge	775 nm		387 nm
Objektivbrennweite	100 mm	32 mm	100 mm
Strahlradius w_{86} in der Fokusebene	27,4 μm	5,7 μm	12,6 μm
Lasersystem	LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP		
Wellenlänge	1028 nm		
Objektivbrennweite	167 mm		
Strahlradius w_{86} in der Fokusebene	15 μm		
Lasersystem	Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego		
Wellenlänge	1064 nm		
Objektivbrennweite	100 mm		
Strahlradius w_{86} in der Fokusebene	15 μm		

Hierbei entsprechen die Systemparameter der Laserstrahlquellen den in Kapitel 5.1.1. ausgewiesenen Werten der Tabelle 5-1. Die Ähnlichkeit der Intensitätsprofile der genutzten Lasersysteme erlaubt deren Vergleichbarkeit hinsichtlich der Strukturierungsergebnisse. Untersuchungen zur defokussierten Bearbeitung der Probenoberflächen fanden ausschließlich im Zuge der Versuchsreihen zu den in Kapitel 6.3.5. dargestellten Produktivitätsabschätzungen statt. In Übereinstimmung mit dem in Kapitel 6.1. beschriebenen Vorgehen erfolgte die laterale Anordnung der Laserstrahlpulse zueinander entsprechend der schematischen Darstellung in Abbildung 6-2. Da im Rahmen der Versuche mit näherungsweise runden, gaußverteilten Laserstrahlquerschnitten auf der Probenoberfläche gearbeitet wurde, kamen hinsichtlich der Puls-zu-Puls-Distanzen in X- und Y-Richtung jeweils identische Werte in Anwendung. Zur Charakterisierung der laserstrukturierten Oberflächenbereiche wurde die in Kapitel 5.2. beschriebene Messtechnik in Anwendung gebracht.

6.3.1. Modellhafte Beschreibung der Entstehung laserinduzierter, periodischer Gitterstrukturen

Im Ergebnis der Strukturierung von Festkörperoberflächen mit ultrakurzen Laserstrahlpulsen kann, in Abhängigkeit von den genutzten Prozess- und Strukturierungsparametern sowie den jeweilig bearbeiteten Werkstoffen, die Ausbildung verschiedener, in [80 – 90] beschriebener, periodischer Oberflächenstrukturen beobachtet werden. Aus der Gruppe dieser auch als LIPSS [88] klassifizierten Strukturen sind insbesondere die LSFL, gemeinhin auch als Ripple bezeichneten Strukturen, für die angestrebte Anwendung von Interesse. Sie weisen typischerweise eine Gitterperiode auf, welche geringfügig unterhalb der Wellenlänge der applizierten Laserstrahlung liegt und mit dieser skaliert [80 – 82]. Für deren Entstehung finden sich in [80, 82, 84, 91] verschiedene Beschreibungsmodelle. Auf Basis der durchgeführten Versuchsreihen an den für die Prägewerkzeuge relevanten Werkstoffen konnte das in [81, 82, 84, 153] beschriebene „surface-scattered wave“-Modell bestätigt und mit den Ergebnissen in Übereinstimmung gebracht werden. Ausgangspunkt des Modells ist die Entstehung periodischer Oberflächenstrukturen durch Interferenz zwischen der auf die Probenoberfläche auftreffenden Laserstrahlung und einem entlang der Oberfläche gestreuten Strahlungsanteil. Hinsichtlich der Nomenklatur werden die entstehenden Strukturen mit „-“ bei Vorwärtsstreuung bzw. „+“ bei Rückwärtsstreuung kategorisiert. Bei Bestrahlung der Probenoberflächen mit p-polarisierter Laserstrahlung konnte in [82, 83] die Veränderung der Periode S der entstehen periodischen Oberflächenstrukturen mit der Variation des Einfallswinkels α der Laserstrahlung gemäß nachfolgender Gleichung (Gl. 6-6) beschrieben werden.

$$S \approx \frac{\lambda}{1 \pm \sin \alpha} \quad (\text{Gl. 6 – 6}) \quad [82, 83]$$

Die hierbei entstehenden LIPSS sind senkrecht zum elektrischen Feldstärkevektor der auftreffenden Laserstrahlung orientiert und werden als LSFL des Typs s^- (für Vorwärtsstreuung) bzw. des Typs s^+ (für Rückwärtsstreuung) bezeichnet. Des Weiteren ist in [82, 84] die Entstehung periodischer Gitterstrukturen beschrieben, welche wie die LSFL des Typs s^- bzw. des Typs s^+ eine Abhängigkeit der Gitterperiode von der Wellenlänge und dem Einfallswinkel der auftreffenden Laserstrahlung zeigen, jedoch parallel zum elektrischen Feldstärkevektor orientiert sind. In [82, 84] wird für

diese, als LSFL des Typs c bezeichneten Strukturen [84], der in Gleichung (Gl. 6-7) aufgezeigte Zusammenhang dargelegt.

$$S \approx \frac{\lambda}{\cos \alpha} \quad (\text{Gl. 6 – 7}) \quad [82, 84]$$

Sie treten zumeist erst bei größeren Einfallswinkeln ($\alpha > 35^\circ$) auf und ihre Entstehung wird auf die Interferenz zwischen der einfallenden Laserstrahlung und angeregten Oberflächenplasmonen zurückgeführt [81, 154]. Eine Erklärung der in [88] beschriebenen Ausbildung von HSFL ist mit dem „surface-scattered wave“-Modell nicht möglich. Bedingt durch deren Werte der Gitterperiode, welche deutlich kleiner sind als die Wellenlänge der in Anwendung gebrachten Laserstrahlung, sind diese periodischen Gitterstrukturen für die vorgesehene technologische Zielsetzung nicht geeignet. In [155] wurden für die Bearbeitung einer Stahllegierung bei einer applizierten Laserstrahlwellenlänge von 800 nm Gitterperioden der HSFL im Bereich von 111 nm bis 238 nm ermittelt.

Vor dem Hintergrund der Nutzung der LIPSS als Beugungsgitter für Licht und auf Basis der zuvor ausgeführten Zusammenhänge sind daher insbesondere die LSFL des Typs s von Interesse für die angestrebte Anwendung und Bestandteil der Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit. Eine erweiterte Beschreibung der in Gleichung (Gl. 6-6) aufgezeigten Zusammenhänge zwischen der Gitterperiode der LSFL des Typs s⁻ und des Typs s⁺ in Abhängigkeit von der applizierten Laserstrahlwellenlänge und dem Einfallswinkel der Laserstrahlung ist in [81, 87, 153] aufgezeigt. Anknüpfungspunkt ist hierbei die in [87] ausgeführte, temporäre Änderung des Brechungsindex im oberflächennahen Bereich durch die Laserbestrahlung. Die Erweiterung des Modells, unter Einbeziehung der in [87] beschriebenen Änderung des Brechungsindex im oberflächennahen Bereich, ist schematisch in Abbildung 6-13 dargestellt.

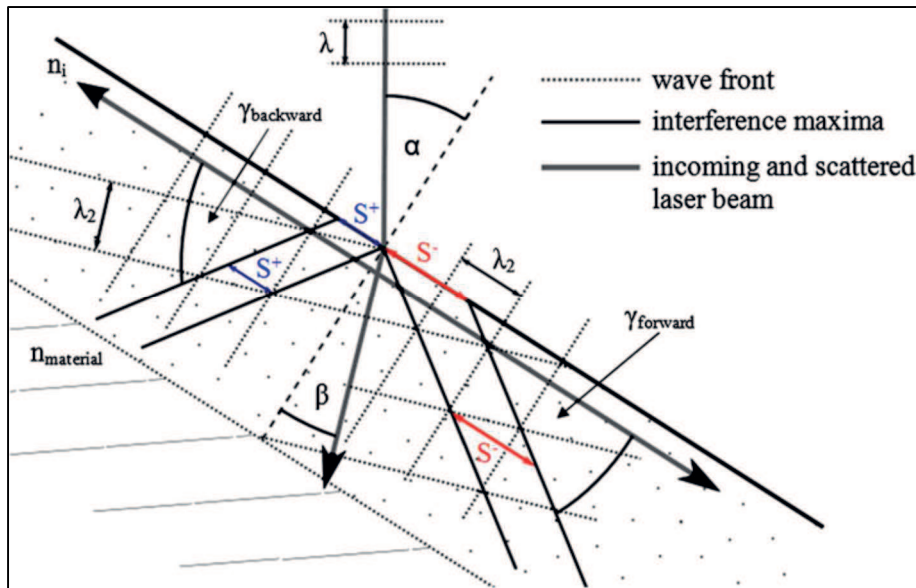


Abb. 6-13: Schematische Darstellung des „surface-scattered wave“-Modells für die Interferenz des einfallendes Laserstrahls mit dem gestreuten Strahlungsanteil [153].

Im Ergebnis dieser Erweiterung ergibt sich für die Gitterperiode der LSFL des Typs s^- und des Typs s^+ der nachstehende Zusammenhang gemäß Gleichung (Gl. 6-8).

$$S^{\pm} \approx \frac{\lambda_2}{1 \pm \sin \beta} = \frac{\lambda}{n_i \pm \sin \alpha} \quad \text{mit } n_i = \frac{\lambda}{S_0} \quad (\text{Gl. 6 - 8}) \quad [81, 87, 153]$$

Für die entstehenden LSFL des Typs s^- bei Vorwärtsstreuung ergibt sich somit eine Zunahme der resultierenden Gitterperiode S^- bei Vergrößerung des Einfallswinkels α der auftreffenden Laserstrahlung. Im Gegensatz hierzu bedingt die Vergrößerung des Einfallswinkels α der auftreffenden Laserstrahlung für LSFL des Typs s^+ bei Rückwärtsstreuung eine Verringerung der resultierenden Gitterperiode S^+ . Die Untersetzung der, auf Basis der angeführten Beschreibungsmodelle, aufgezeigten Zusammenhänge erfolgt im nachstehenden Kapitel 6.3.2. anhand der Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen.

6.3.2. Einfluss der Prozessparameter

Zur Generierung einer validen Datenbasis wurden für die aufgezeigten Werkstoffe Testfeldmatrizen erzeugt, innerhalb derer eine Variation des jeweiligen Prozessparameters erfolgte. Die Auswertung der Ergebnisse dieser Untersuchungen ermöglichte die Parametrisierung und Optimierung der maßgebenden Einflussfaktoren

für den Prozess der Erzeugung von LSFL in der Oberfläche der Funktionsflächen der für die Prägewerkzeuge relevanten Materialien. Hierbei waren insbesondere die nachstehend ausgeführten, anwendungs- und / oder prozesstechnologischen Restriktionen zu berücksichtigen. Mittels des Verfahrens soll die Möglichkeit der flächigen, homogenen und effizienten Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in den Oberflächen der Materialien der Prägewerkzeuge geschaffen werden. Des Weiteren darf die Funktionalität der Werkstoffe und Oberflächen durch den Strukturierungsprozess nicht verloren gehen. In der Folge ist eine prozessbedingte Oxidation der Oberfläche, insbesondere bei der Strukturierung der Stähle, zu vermeiden. Die Schichtdicke der eingesetzten Hartstoffschichten, welche im Minimum eine Dicke von 1 μm bis 2 μm aufweisen, erfordert eine Ausrichtung des Prozesses auf Parameter, bei welchen kein signifikanter Materialabtrag im Ergebnis der Strukturierung der Oberflächen zu verzeichnen ist.

Unter Anwendung der für die maßgebenden Prozessparameter nachfolgend aufgezeigten Werte können die gesetzten Anforderungsprofile, durch Erzeugung von LSFL des Typs s für die angestrebte Anwendung, erfüllt werden.

6.3.2.1. Polarisationszustand und Einfallswinkel der auftreffenden Laserstrahlpulse

An den für die Prägewerkzeuge relevanten Werkstoffen wurden Untersuchungen zur Veränderung der Gitterperiode der LSFL bei Variation des Einfallswinkels α der auf die Probenoberflächen auftreffenden, linear polarisierten Laserstrahlpulse durchgeführt. Hierzu wurden die Probenmaterialien auf einer Goniometeranordnung fixiert. Die Variation des Einfallswinkels α erfolgte durch definiertes Verkippen der Proben mittels des Goniometers im Bereich von 0° bis 50°. Für die Bestrahlung der Probenoberflächen mit senkrecht zur Einfallsebene der auftreffenden Laserstrahlung polarisierten Laserstrahlpulsen konnte bei Variation des Einfallswinkels α , in Übereinstimmung mit dem in Kapitel 6.3.1. beschriebenen „surface-scattered wave“-Modell, keine Änderung der Periode der entstehenden LSFL festgestellt werden. Durch Aufbringung parallel zur Einfallsebene polarisierter Laserstrahlpulse konnte der Nachweis geführt werden, dass die Bearbeitung der Oberflächen der Versuchsmaterialien mit den genutzten Lasersystemen vornehmlich die Ausbildung von LSFL des Typs s⁺ bedingt. Die Übereinstimmung der auf Basis der Gleichung (Gl. 6-8) zu erwartenden, theoretischen Werte der Gitterperiode der LSFL,

mit den gemessenen Werten ist in Abbildung 6-14 exemplarisch für Wolframcarbid und Stahl der Werkstoffnummer 1.2990 aufgezeigt.

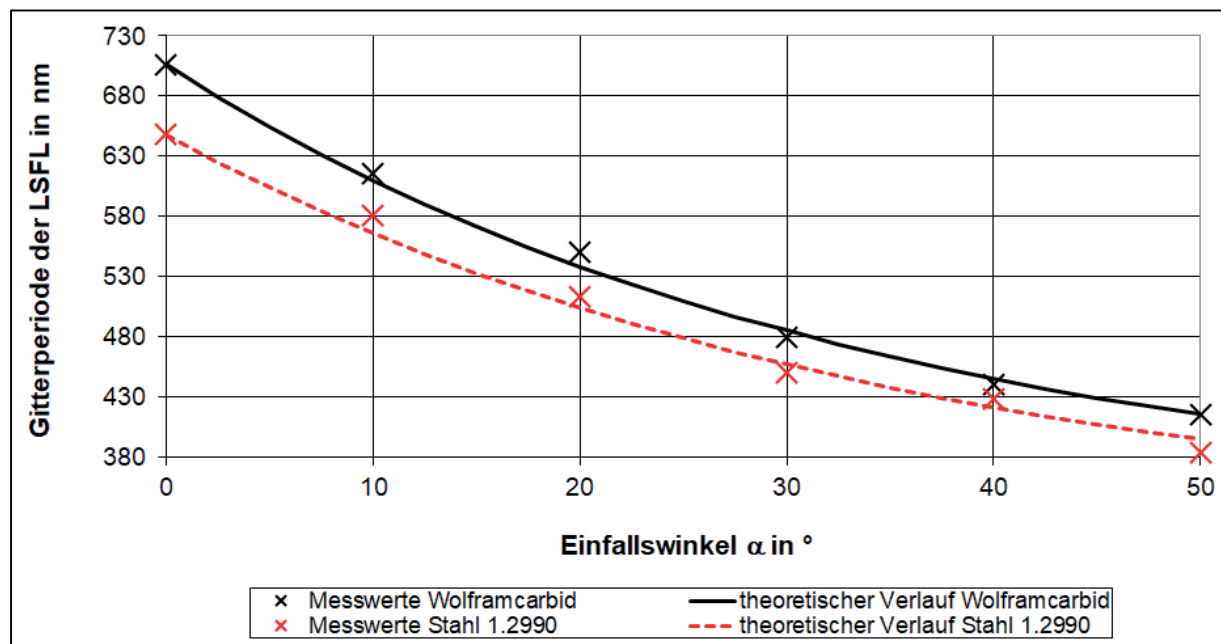


Abb. 6-14: Gitterperiode der LSFL des Typs s^+ bei Variation des Einfallswinkels α für parallel zur Einfallsebene polarisierte Laserstrahlpulse (Lasersystem Clark MXR CPA-2010; Laserstrahlwellenlänge $\lambda = 775$ nm).

Für die Abbildung 6-14 aufgezeigten Untersuchungen kam das Lasersystems Clark MXR CPA-2010 bei der Grundwellenlänge von $\lambda = 775$ nm zur Anwendung. Die Abweichungen der theoretischen sowie der gemessenen Werte der Gitterperiode der entstehenden LSFL für die untersuchten Werkstoffe untereinander sind auf die, in Kapitel 6.3.1. beschriebene, Änderung des Brechungsindex im oberflächennahen Bereich zurückzuführen [87]. Zu der Materialabhängigkeit der Gitterperiode der LSFL werden im nachfolgenden Kapitel 6.3.2.2. weitere Ausführungen gegeben.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte für spezifische Versuchsanordnungen des Weiteren die Ausbildung von LSFL des Typs s^- unter Verwendung parallel zur Einfallsebene polarisierter Laserstrahlpulse nachgewiesen werden. Dies war jedoch nur in einem räumlich stark begrenzten Gebiet im Übergangsbereich zwischen planen Oberflächen und Strukturkanten gegeben. Beispielhaft ist dies in Abbildung 6-15 erkennbar.

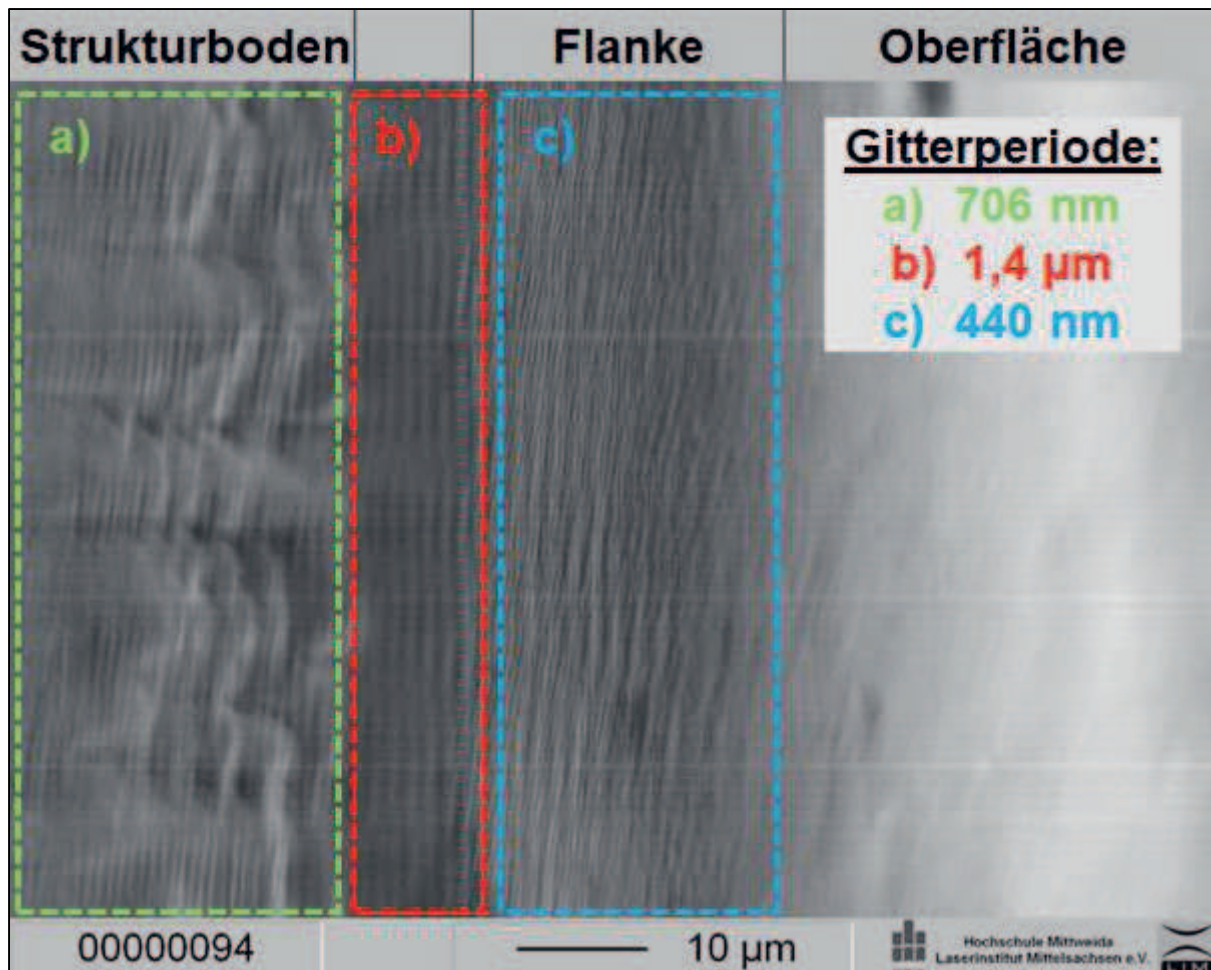


Abb. 6-15: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer in Wolframcarbid eingebrachten Mikrostruktur mit LSFL (Lasersystem Clark MXR CPA-2010; Laserstrahlwellenlänge $\lambda = 775 \text{ nm}$).

Am Boden der Struktur im Bereich a) der Abbildung 6-15 konnten LSFL mit einer Gitterperiode von 706 nm festgestellt werden. Die LSFL des Typs s^- im Übergangsbereich b) der Abbildung 6-15 besitzen eine Gitterperiode von 1,4 μm und für die LSFL des Typs s^+ , welche sich an der Strukturflanke gebildet haben, wurde eine Gitterperiode von 440 nm ermittelt. Vor dem Hintergrund der flächigen Erzeugung der LSFL auf den Funktionsflächen der Prägwerkzeuge kommt den LSFL des Typs s^- anwendungsbezogen keine Bedeutung zu. Die LSFL des Typs s^+ sind durch den, nachfolgend noch ausgeführten, größeren Parameterraum, der einfacheren Applikation sowie der Umsetzbarkeit auf großen Oberflächenbereichen zu favorisieren.

Ist anwendungsbezogen die Unterdrückung der Ausbildung der LSFL im laserstrukturierten Oberflächenbereich gewünscht, so ist dies durch Verwendung zirkular polarisierter Laserstrahlung weitgehend möglich.

6.3.2.2. Laserstrahlwellenlänge und Probenmaterial

Die Gitterperiode der im Ergebnis der Laserbearbeitung entstehenden LSFL ist, wie in Kapitel 6.3.1. beschrieben, abhängig von der Wellenlänge der in Anwendung gebrachten Laserstrahlung sowie dem Probenmaterial selbst [82, 87, 153]. Für die genutzten Lasersysteme konnten die in Tabelle 6-3 aufgezeigten Gitterperioden der LSFL des Typs s, bei senkrechter Bestrahlung der Probenoberflächen, in den für die Prägewerkzeuge relevanten Materialien ermittelt werden.

Tab. 6-3: Übersicht der mit den verschiedenen Lasersystemen bei senkrechter Bestrahlung realisierten Gitterperioden der LSFL sowie des berechneten Brechungsindex n_i im bestrahlten Oberflächenbereich (* partielle Ablösung der ta-C-Schicht infolge unzureichender Absorption im Schichtmaterial; - keine Messwerterhebung).

Material	Clark MXR CPA-2010				LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP		Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego	
	$\lambda = 775 \text{ nm}$		$\lambda = 387 \text{ nm}$		$\lambda = 1028 \text{ nm}$		$\lambda = 1064 \text{ nm}$	
	Gitter- periode	Brechungs- index n_i	Gitter- periode	Brechungs- index n_i	Gitter- periode	Brechungs- index n_i	Gitter- periode	Brechungs- index n_i
Messing 2.0401	626 nm	1,238	-	-	-	-	-	-
Stahl 1.2990	648 nm	1,196	320 nm	1,209	-	-	-	-
Stahl 1.2379 PM	640 nm	1,211	-	-	989 nm	1,039	1010 nm	1,053
Stahl 1.2365	638 nm	1,215	-	-	-	-	-	-
Stahl 1.2367	636 nm	1,219	-	-	-	-	-	-
ta-C	667 nm	1,162	330 nm	1,173	846 nm	1,215	890 nm*	1,196
Wolframcarbid	706 nm	1,098	-	-	-	-	-	-
BALINIT® ALCRONA (AlCrN)	610 nm	1,270	-	-	-	-	-	-

Infolge lateral über den bearbeiteten Oberflächenbereich schwankender Gitterperioden der LSFL wurden für diese Mittelwertbildungen durchgeführt. Bei den angegebenen Gitterperioden des LSFL handelt es sich jeweils um die arithmetischen Mittelwerte der an 3 Messpositionen über 10 Gitterperioden ermittelten Werte. Unter Anwendung der in Gleichung (Gl. 6-8) dargestellten Zusammenhänge erfolgte die Berechnung des Brechungsindex n_i im bestrahlten Oberflächenbereich.

Exemplarisch sind die Schwankungen der Gitterperiode der LSFL in nachstehender Abbildung 6-16 für die Bearbeitung verschiedener Werkstoffe mit dem Lasersystem Clark MXR CPA-2010 bei der Grundwellenlänge von 775 nm erkennbar.

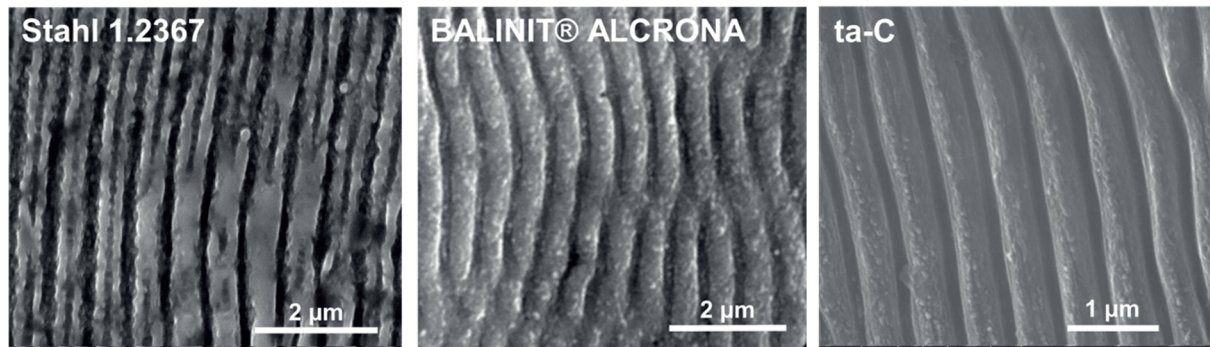


Abb. 6-16: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der in der Oberfläche verschiedener Werkstoffe erzeugten LSFL (Lasersystem Clark MXR CPA-2010; Laserstrahlwellenlänge $\lambda = 775 \text{ nm}$).

Die morphologische Ausformung der im Ergebnis der Laserbearbeitung entstehenden LSFL des Typs s ist für die untersuchten Lasersysteme unabhängig von der Wellenlänge und der Pulsdauer der applizierten Laserstrahlpulse. Die LSFL weisen im Profilschnitt stets eine sinusförmige Strukturform auf. Eine Beeinflussung der Strukturtiefe der LSFL ist innerhalb der prozessbedingten Grenzen durch die Variation der Laserstrahlpulsfluenz sowie der Anzahl der pro Flächeneinheit aufgebrauchten Laserstrahlpulse möglich. Auf diese Einflussgrößen wird in den Kapiteln 6.3.2.3. und 6.3.2.4. näher eingegangen.

Für die Untersuchungen mit dem Lasersystem Clark MXR CPA-2010 konnte, wie in Tabelle 6-3 aufgezeigt, nachgewiesen werden, dass eine Verringerung der Laserstrahlwellenlänge bei näherungsweise gleicher Pulsdauer der Laserstrahlpulse keine signifikante Änderung des errechneten Brechungsindex n_i im bestrahlten Oberflächenbereich bedingt. Der in Gleichung (Gl. 6-8) und Kapitel 6.3.1. beschriebene Zusammenhang der resultierenden Gitterperiode der LSFL wurde durch die Untersuchungen ebenfalls bestätigt. Mit der Anwendung von Laserstrahlpulsen größerer Wellenlänge, durch Nutzung der Lasersysteme LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP sowie Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego, konnten LSFL größerer Gitterperiode realisiert werden (siehe Tabelle 6-3). Für das untersuchte Schichtmaterial ta-C sowie den Stahl 1.2379 PM lieferten beide Systeme vergleichbare Werte des Brechungsindex n_i im bestrahlten Oberflächenbereich. Die errechneten Werte des Schichtmaterials ta-C weichen dabei nur geringfügig vom dem Wert ab, der für das Lasersystem Clark MXR CPA-2010 bei der Grundwellenlänge und mit frequenzverdoppelter Laserstrahlung ermittelt wurde. Deutlichere Abweichungen der errechneten Werte des Brechungsindex n_i konnten für den Vergleich der

Lasersysteme bei der Bearbeitung von pulvermetallurgischem Stahl der Werkstoffnummer 1.2379 festgestellt werden. Die Ursachen hierfür sind noch nicht bekannt und bedürfen weiterführenden Untersuchungen.

Hinsichtlich des Vergleichs der bearbeiteten Stähle untereinander konnte, auf Basis der Ergebnisse mit dem Lasersystem Clark MXR CPA-2010 bei der Grundwellenlänge von 775 nm, festgestellt werden, dass die abweichenden Legierungszusammensetzungen der Stähle lediglich geringfügige Variationen der Gitterperiode der LSFL bedingen. Nach der Bearbeitung weisen die Oberflächen keine mittels EDX-Analysen nachweisbaren Änderungen der chemischen Zusammensetzung auf. Durch die mit der Ausbildung der LSFL einhergehende Vergrößerung der Oberfläche zeigen die Stähle im Nachgang der Strukturierung in den bearbeiteten Bereichen eine erhöhte Korrosionsneigung.

Für die Schichtmaterialien BALINIT® ALCRONA und ta-C waren im Ergebnis der Erzeugung der LSFL mikroskopisch keine Veränderungen der Schichten feststellbar, welche deren Funktionalität hinsichtlich der zu einem späteren Zeitpunkt erfolgenden Abformung der Gitterstrukturen in die Zielmaterialien limitieren würden. Die im Kapitel 6.4. noch ausgeführte, bei der Bearbeitung der Schichtenmaterialien mit Excimer-Laserstrahlpulsen und Pulsdauern im Nanosekundenbereich z.T. auftretende, Ausbildung von Heißrissen konnte für die Applikation ultrakurzer Laserstrahlpulse nicht beobachtet werden. Die für das Schichtmaterial ta-C festgestellten, strukturierungsbedingten Auswirkungen auf die Schichthärte sind in Kapitel 6.3.3. gesondert beschrieben.

6.3.2.3. Laserstrahlpulsfluenz

Durch die Variation der Laserstrahlpulsfluenz der auf die Oberfläche der Materialien auftreffenden Laserstrahlpulse ist eine Steuerung der Tiefe der entstehenden LSFL sowie der Oberflächenbereiche, innerhalb der Laserstrahlquerschnittsfläche, in denen sich diese bilden, möglich. Die Auswahl der im Maximum in Anwendung zu bringenden Laserstrahlpulsfluenz erfolgte unter der Maßgabe, dass bei dieser im Zuge der Bearbeitung kein signifikanter Materialabtrag zu verzeichnen ist und eine Oxidation der Oberfläche vermieden wird. Diese Vorgaben bedingen im Zusammenspiel mit den in Kapitel 6.3.2.4. dargelegten Anforderungen hinsichtlich der lateralen Anordnung der Laserstrahlpulse zueinander und der Anzahl der pro Oberflächeneinheit aufgetragenen Laserstrahlpulse die homogene, flächige Erzeugung der LSFL. Die auf

Grundlage dieser Restriktionen ermittelten, maximal zu applizierenden Laserstrahlpulsfluenzen skalieren dabei im Bereich des zweifachen bis sechsfachen der materialspezifischen Ablationsschwellfluenz. In Tabelle 6-4 wird diesbezüglich eine Übersicht der anzuwendenden Laserstrahlpulsfluenzen für die verwendeten Lasersysteme und ausgewählte Materialien gegeben.

Tab. 6-4: Übersicht der materialspezifischen Bereiche der Laserstrahlpulsfluenz für die Erzeugung von LSFL unter Verwendung verschiedener Lasersysteme (* partielle Ablösung der ta-C-Schicht infolge unzureichender Absorption im Schichtmaterial; - keine Messwerterhebung).

Material	Clark MXR CPA-2010	LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP	Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego
	$\lambda = 775 \text{ nm}$	$\lambda = 1028 \text{ nm}$	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
Stahl	0,6 J/cm ² bis 1,0 J/cm ²	0,6 J/cm ² bis 1 J/cm ²	0,6 J/cm ² bis 1 J/cm ²
ta-C	2,0 J/cm ² bis 4,0 J/cm ²	3,7 J/cm ² bis 5,4 J/cm ²	*
Wolframcarbid	0,8 J/cm ² bis 2,4 J/cm ²	-	-

Im Ergebnis der Untersuchungen zeigten sich für den Vergleich der verschiedenen, untersuchten Stähle untereinander keine signifikanten Abweichungen hinsichtlich der ermittelten Bereiche der Laserstrahlpulsfluenz. Die in Tabelle 6-4 aufgezeigten Werte sind daher für alle untersuchten Stähle gleichermaßen anwendbar. Hinsichtlich der Wellenlänge der eingesetzten Laserstrahlpulse konnten für die Stähle ebenfalls nur vernachlässigbare Differenzen festgestellt werden. Als Ursache ist die Absorption der aufgetragenen Laserstrahlung im Rahmen eines Einphotonenprozesses für die Bearbeitung von Stahl anzusehen. Die erhöhte Transparenz der ta-C-Schicht für die genutzten Laserstrahlwellenlängen macht die Applikation höherer Laserstrahlpulsfluenzen erforderlich, um eine, für die Strukturierung der Schicht, ausreichende Absorption auf Basis eines Multiphotonenprozesses sicherzustellen. Dies begründet auch die bei Nutzung des Lasersystems LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP höheren Werte der anzuwendenden Laserstrahlpulsfluenzen. Für die Laserstrahlpulse des Lasersystems Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego mit einer Pulsdauer von 10 ps konnte keine ausreichende Absorption der Laserstrahlung im Schichtmaterial ta-C realisiert werden. Die Absorption der Laserstrahlung erfolgte vordergründig auf dem Substratmaterial und bedingte eine Delamination der Schicht. Verfahrenstechnologische Anpassungen der Abscheidebedingungen für den Herstellungsprozess der ta-C-Hartstoffschichten

bieten jedoch die Möglichkeit, eine Absorption der Laserstrahlpulse dieses Lasersystems innerhalb des Schichtmaterials sicherzustellen. Spezifische Ausführungen hierzu werden im Kapitel 6.3.3. gegeben.

6.3.2.4. Anzahl der Laserstrahlpulse pro Flächeneinheit

Die Erzeugung von LSFL ist in den untersuchten Materialien bereits durch Applikation von Einzelpulsen möglich. Ausgangspunkt der Entstehung des LSFL ist dabei die in Kapitel 6.3.1. auf Basis des „surface-scattered wave“-Modells [81, 82, 84, 153] beschriebene Interferenz der auf die Probenoberfläche auftreffenden Laserstrahlung mit einem entlang der Oberfläche gestreuten Strahlungsanteil. Die Ausbildung dieser entlang der Oberfläche gestreuten Strahlungsanteile setzt das Vorhandensein von Oberflächenstörungen voraus, welche diese bedingen. Kratzer, an der Oberfläche befindliche Partikel oder auch aus vorherigen Bearbeitungsprozessen (z.B. Schleifen, Laserbearbeitung usw.) stammende strukturierte Oberflächen sind derartige Oberflächenstörungen und initiieren den Prozess der Ausbildung der LSFL. Hinsichtlich der Orientierung der LSFL kann in dieser Phase, in welcher erst ein Laserstrahlpuls bzw. eine geringe Anzahl an Laserstrahlpulsen aufgebracht wurde, eine von der typischen Orientierung senkrecht zum Vektor der elektrischen Feldstärke der auftreffenden, linear polarisierten Laserstrahlung abweichende Orientierung der LSFL beobachtet werden. Diese richten sich, wie in Abbildung 6-17 beispielhaft aufgezeigt, z.T. parallel (z.B. bei Schleifriefen; Abb. 6-17 für Stahl 1.2379) bzw. ringförmig (z.B. bei Partikulaten innerhalb von Schichtmaterialien; Abb. 6-17 für ta-C) zu bestehenden Oberflächendefekten aus.

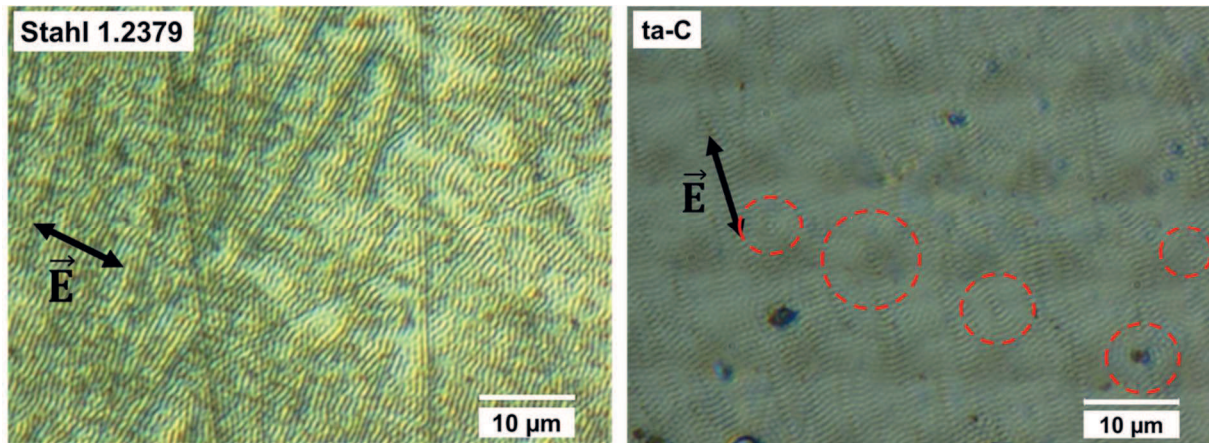


Abb. 6-17: Lichtmikroskopaufnahmen erzeugter LSFL mit abweichender Orientierung infolge von Oberflächenstörungen (Lasersystem Clark MXR CPA-2010; Laserstrahlwellenlänge $\lambda = 775 \text{ nm}$).

Mit einer Erhöhung der Anzahl der pro Flächeneinheit aufgetragenen Laserstrahlpulse geht eine Gleichrichtung dieser abweichenden Orientierung der LSFL einher und deren Ausrichtung erfolgt flächendeckend senkrecht zum Vektor der elektrischen Feldstärke für linear polarisierte Laserstrahlung. Die bereits mit den vorherigen Laserstrahlpulsen ausgebildeten LSFL wirken bei erneuter Bestrahlung als Oberflächenstörungen und erfüllen die Bedingungen zur Ausbildung der entlang der Oberfläche gestreuten Strahlungsanteile auf Basis des „surface-scattered wave“-Modells. Im Ergebnis dieser Untersuchungen kann festgehalten werden, dass eine polierte Oberfläche für die homogene Ausbildung der LSFL auf der Oberfläche der Funktionsflächen der Prägwerkzeuge Vorteile bietet. Im Rahmen der Versuche wiesen die Versuchsmaterialien typischerweise die in Kapitel 4.1. genannten Oberflächenrauheiten auf. Hierdurch wird eine effiziente Bearbeitung mit definierter, über die Oberflächenbereiche durch die Wahl der Bearbeitungsparameter (insbesondere der Polarisation der auftreffenden Laserstrahlpulse) variabel einstellbarer, Ausrichtung der LSFL ermöglicht.

Infolge der Intensitätsverteilung der genutzten Lasersysteme liegen innerhalb der auf der Probenoberfläche wirksamen Laserstrahlquerschnittsflächen unterschiedliche Werte der Fluenz vor. Hierdurch schwankt der Ausbildungsgrad der LSFL lateral über diese wirksamen Laserstrahlquerschnittsflächen. Die Erzeugung homogener, im bestrahlten Oberflächenbereich flächendeckend ausgebildeter, LSFL erfordert daher die Aufbringung mehrerer, sich hinsichtlich der Laserstrahlquerschnittsflächen überlappender Laserstrahlpulse. Anwendungsbezogen sind dabei nicht nur die Anzahl

der pro Flächeneinheit applizierten Laserstrahlpulse zu berücksichtigen, sondern auch deren laterale Aneinanderreihung. Für die Bearbeitung lieferten Überlappungsgrade der Laserstrahlquerschnittsflächen auf der Probenoberfläche zwischen einem Puls und dem nachfolgenden Puls im Bereich von 55 % bis 80 % die besten Ergebnisse. Die für die genutzten Lasersysteme und jeweiligen Versuchsmaterialien zur Anwendung gebrachten Laserstrahlpulsfluenzen entsprechen dabei den in Kapitel 6.3.2.3. in Tabelle 6-4 aufgezeigten Werten. Ein Vergleich mit den für die Freistellung der Funktionsflächen in Kapitel 6.1. beschriebenen Bereichen des Überlappungsgrades zeigt eine gute Korrelation der ermittelten Werte. Unter Nutzung dieser Strukturierungsparameter konnte eine homogene, flächendeckende Ausbildung der LSFL im bearbeiteten Oberflächenbereich erzielt werden. Durch Erhöhung der Anzahl der Bearbeitungszyklen, im konkreten Anwendungsfall der Anzahl der Überfahrten, kann eine Vergrößerung der Tiefe der generierten LSFL bis hin zu einem prozessbedingten Maximalwert erreicht werden. Für die aufgezeigten Parameter wurde dieser Wert bereits nach der zweiten Überfahrt erreicht. Eine Überschreitung der aufgezeigten Bereiche der Laserstrahlpulsfluenz, eine Erhöhung des Überlappungsgrades der Laserstrahlquerschnittsflächen oder eine Steigerung der Anzahl der Bearbeitungszyklen bedingt eine teilweise Zerstörung der erzeugten LSFL sowie ein inhomogeneres Bearbeitungsergebnis. Auch sind in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter ein Materialabtrag sowie ein Abfall der Strukturtiefe der LSFL festzustellen.

Unter Anwendung der aufgezeigten Strukturierungsparameter werden unter senkrechter Bestrahlung der Probenoberflächen mit den Lasersystemen dabei typische, maximale Strukturturen der LSFL im Bereich von 20 % bis 30 % der Gitterperiode des LSFL für die Bearbeitung der Stähle, von Wolframcarbid sowie der BALINIT® ALCRONA Hartstoffschichten erreicht. Die Strukturierung des Schichtmaterials ta-C erlaubt die Realisierung größerer Strukturturen für die Lasersysteme mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich. Im Maximum sind typische Strukturturen im Bereich von 30 % bis 44 % der Gitterperiode des LSFL darstellbar. Für die Versuche zur Variation der Gitterperiode der LSFL durch Veränderung des Einfallswinkels der auf die Probenoberfläche auftreffenden Laserstrahlpulse konnte festgestellt werden, dass sich die Strukturtiefe der LSFL hierbei im gleichen Verhältnis zur ursprünglichen Strukturtiefe bei senkrechter Bestrahlung verringert, wie dies für die

Gitterperiode der Fall ist. Zu beachten ist dabei die Beibehaltung der applizierten Laserstrahlpulsfluenz im Ergebnis der Vergrößerung der Querschnittsfläche der auf die Probenoberfläche auftreffenden Laserstrahlung infolge der Verkipfung.

6.3.2.5. Pulsdauer der Laserstrahlpulse

Die Pulsdauer der auf die Oberfläche der Probenmaterialien aufgetragenen Laserstrahlpulse ist für die Bearbeitung der Stähle und von Wolframcarbid im untersuchten Bereich bis 10 ps nicht als kritisch hinsichtlich der Bearbeitungsergebnisse oder des Erhalts der Funktionalität der Werkstoffe anzusehen. Mit der Strukturierung von Schichtmaterialien, insbesondere ta-C, sind technologisch höhere Anforderungen verbunden. Dieses weist für die eingesetzten Lasersysteme bei deren Grundwellenlänge eine erhöhte Transmission auf, so dass die Absorption der Laserstrahlung in der Schicht einen Mehrphotonenprozess erfordert. Unter Verwendung der standardmäßig am Laserinstitut Hochschule Mittweida hergestellten ta-C-Schichten war eine Strukturierung dieses Materials mit der vom Lasersystem Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego emittierten Laserstrahlung nicht möglich. Die Möglichkeiten der einfachen Pulsdauervariation sowie die lediglich geringfügig kürzere Wellenlänge der Laserstrahlung des Lasersystems LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP waren ausschlaggebend für dessen Nutzung zur Ermittlung des Grenzwertes der Pulsdauer. Als Grenzkriterium wurde die Pulsdauer definiert, ab welcher eine ausreichende Absorption der Laserstrahlung in den auf den Stahlsubstraten genutzten 1,5 µm dicken ta-C-Schichten gegeben ist. Im Ergebnis der Bearbeitung sollte keine Delamination der ta-C-Schicht feststellbar sein und die Ausbildung der LSFL ausschließlich im Schichtmaterial erfolgen. Da das Einsetzen des Prozesses der Multiphotonenabsorption eine ausreichende Photonendichte im Absorptionsvolumen voraussetzt, ist die applizierte Laserstrahlpulsfluenz neben der Pulsdauer ein weiterer ausschlaggebender Faktor. Für die Versuchsreihen wurde diese daher ebenfalls variiert. Hinsichtlich des Überlappungsgrades der Laserstrahlquerschnittsflächen wurde auf die in Kapitel 6.3.2.4. aufgeführten Werte zurückgegriffen und ein Überlappungsgrad von 75 % in Anwendung gebracht.

Die Auswertung der Versuche zeigte, dass bei Pulsdauern kleiner gleich zwei Pikosekunden keine Delamination der Schicht feststellbar war und die Ausbildung der LSFL bei ausreichender Laserstrahlpulsfluenz ausschließlich im Schichtmaterial

erfolgt. Dabei waren die Laserstrahlpulsfluenzen, bei welchen sich die LSFL flächendeckend und homogen bildeten, in Übereinstimmung mit der Theorie höher. Konnten LSFL mit einer Strukturtiefe von 300 nm unter Verwendung des Lasersystems LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP bei dessen minimaler Pulsdauer von 250 fs bereits bei einer Laserstrahlpulsfluenz von 2,9 J/cm² erzielt werden, erforderte die Verlängerung der Pulsdauer auf 2 ps die Applikation von Laserstrahlpulsen mit einer Laserstrahlpulsfluenz von 6 J/cm², um vergleichbare Strukturen zu erhalten. Mit der Vergrößerung der Pulsdauer der Laserstrahlpulse von 250 fs auf 2 ps geht in der Folge näherungsweise eine Verdopplung der erforderlichen Laserstrahlpulsfluenzen einher.

6.3.3. Besonderheiten bei der Strukturierung von Hartstoffschichten

In Abhängigkeit von den optischen Eigenschaften der auf den Funktionsflächen der Mikroprägewerkzeuge aufgetragenen Hartstoffschichten stellt deren Bearbeitung besondere Anforderungen an die anzuwendenden Strukturierungsparameter. Handelt es sich bei den Hartstoffschichten um für die Wellenlänge des genutzten Lasersystems transparente bzw. teiltransparente Materialien (z.B. ta-C-Schichten), so erfordert dies die Sicherstellung einer ausreichenden Absorption der auf deren Oberfläche aufgetragenen Laserstrahlpulse im Schichtmaterial. Ursächlich hierfür sind insbesondere die materialspezifischen Ablationsschwellen. Die als Grundmaterialien für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Stähle bzw. Wolframcarbid-Hartmetalle weisen für die entsprechenden Laserstrahlwellenlängen eine, im Vergleich zu den transparenten bzw. teiltransparenten Schichtmaterialien, niedrigere Ablationsschwellfluenz auf. Treffen, wie in Kapitel 6.2. beschrieben, Laserstrahlpulse zu geringer Laserstrahlpulsfluenz auf einen solchen Werkstoffverbund, erfolgt die Absorption der Laserstrahlung vordergründig im Substratmaterial. Eine Absorption der Laserstrahlung im Schichtmaterial findet infolge hierfür erforderlicher, höherer Laserstrahlpulsfluenzen nicht bzw. nicht in ausreichendem Maße statt. Wird die Ablationsschwellfluenz des jeweiligen Substratmaterials überschritten, so setzt dessen Ablation ein. Im Ergebnis der Ablation des Substratmaterials kommt es am Interface Substrat-Schicht zur Ausbildung einer Dampfblase, welche mit steigendem Druck eine Delamination der Schichtmaterialien bis hin zum dessen Aufbrechen bedingt.

Für die Bearbeitung derartiger, für die Wellenlänge des in Anwendung gebrachten Lasersystems transparenter bzw. teiltransparenter, Schichtmaterialien sind im

Ergebnis der durchgeführten Versuchsreihen nachfolgend dargestellte Prozessvarianten anwendbar. Die Verringerung der Pulsdauer der auf die Probenoberfläche aufgetragenen Laserstrahlungspulse ist eine Möglichkeit, eine ausreichende Absorption der Laserstrahlung im Schichtmaterial sicherzustellen. Hierdurch werden, bei ausreichend hohen Laserstrahlungspulsfluenzen, die für den Prozess der Multiphotonenabsorption erforderlichen Bedingungen erreicht. Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnten für das Schichtmaterial ta-C die in Kapitel 6.3.2.5. beschriebenen Parameterräume ermittelt werden. Die Verringerung der Wellenlänge der genutzten Laserstrahlung stellt eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Absorption im Schichtmaterial dar. Weist die Laserstrahlung dabei eine Photonenenergie auf, welcher größer als die Energiebandlücke des zu bearbeitenden Schichtmaterials ist, erfolgt der Übergang von dem bei größeren Wellenlängen vorherrschenden Prozess der Multiphotonenabsorption zu einem Einphotonenprozess. Hiermit geht ein signifikanter Anstieg des Absorptionskoeffizienten einher. Für die untersuchten ta-C-Schichten mit einer Energiebandlücke im Bereich von 1,8 eV bis 2,2 eV ergeben sich daher korrespondierende Wellenlängen von 689 nm bis 564 nm. Technologisch ist die Adaption des in diesem Punkt kritischen Lasersystems Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego durch Frequenzkonversion (bspw. Frequenzverdopplung) beherrschbar. Alternativ stehen Lasersysteme mit einer Strahlungsemission in diesem Bereich am Markt zur Verfügung. Hinsichtlich der angestrebten Anwendung ist dabei zu berücksichtigen, dass dies, in Übereinstimmung mit dem in Kapitel 6.3.1. dargelegten Beschreibungsmodell sowie dessen experimentellem Nachweis in Kapitel 6.3.2.2., eine Verringerung der Gitterperiode der LSFL zur Folge hat. Für das Schichtmaterial ta-C besteht, durch verfahrenstechnologische Anpassungen der Abscheidebedingungen für den Herstellungsprozess der Schichten, eine weitere Möglichkeit, die Absorption der Laserstrahlung innerhalb des Schichtmaterials zu gewährleisten. Die Modifikation der Abscheidebedingung erfolgt dahingehend, dass die zuletzt abgeschiedene Schicht bzw. eine Mehrzahl von diesen einen höheren Anteil sp^2 -hybridisierter Bindungen (graphitisch gebunden) aufweisen. Diese als Absorptionsschicht bzw. -schichten wirkenden Subschichten besitzen eine geringere Energiebandlücke und ermöglichen die effiziente Einkopplung der Laserstrahlung in das Schichtmaterial.

Vor dem Hintergrund der durchgeführten Versuche ist die Nutzung von Ultrakurzpulslasersystemen mit möglichst kurzer Pulsdauer unter prozesstechnologischen Gesichtspunkten zu favorisieren. Die genutzten Systeme mit Pulsdauern von 150 fs bzw. 250 fs lieferten hinsichtlich der angestrebten Anwendung deutlich bessere Ergebnisse bei gleichzeitig erhöhter Prozessstabilität sowie größere Flexibilität der Strukturierungsparameter als das Lasersystem Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego mit einer Pulsdauer von 10 ps.

Im Zusammenhang mit der Strahlungsabsorption in den ta-C-Schichten durchgeführte Untersuchungen deuteten jedoch auch für die kürzeren Pulsdauern auf deren strukturelle Veränderung durch die Erzeugung der LSFL an der Oberfläche hin.

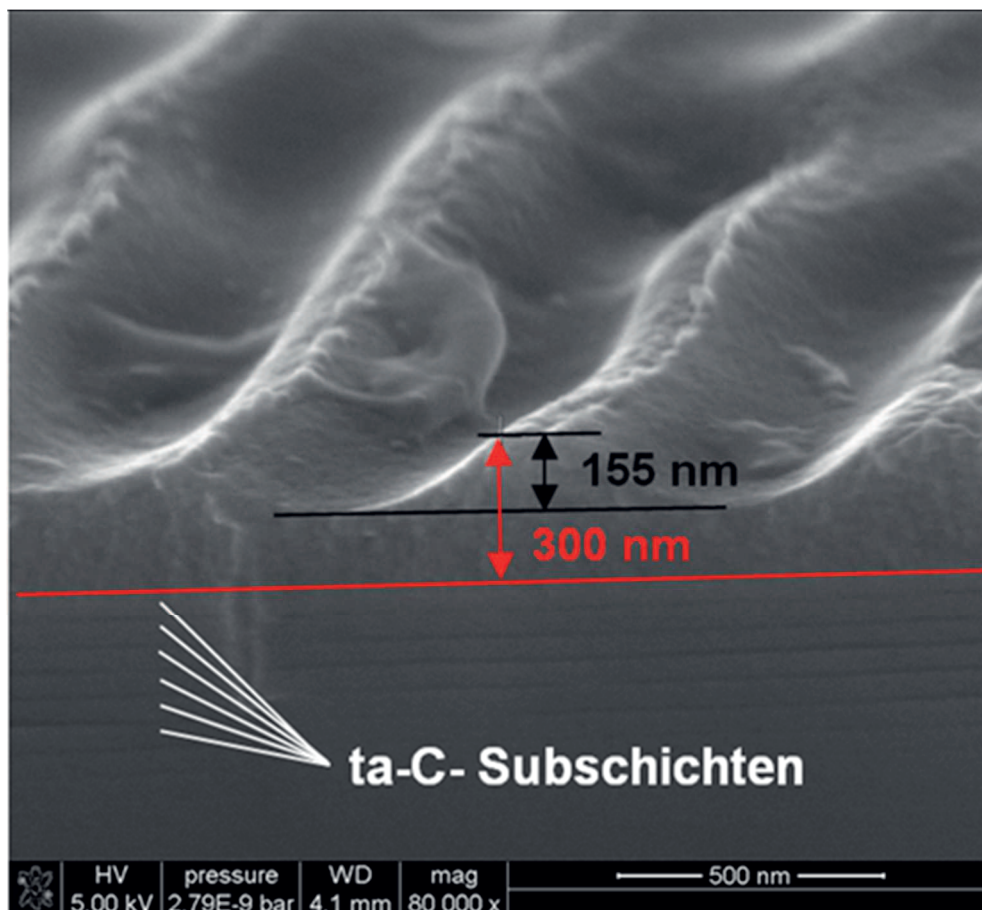


Abb. 6-18: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer im Querschnitt präparierten, strukturierten ta-C-Hartstoffschicht auf Silizium (Gesamtschichtdicke: ca. 1 µm; Laserstrahlwellenlänge $\lambda = 775$ nm; Laserstrahlpulsfluenz $H = 2,79$ J/cm²).

Hierfür angefertigte, in Abbildung 6-18 beispielhaft dargestellte, Querschnittpräparationen zeigten im Sekundärelektronenbild deutliche

Kontrastunterschiede zwischen den oberflächennahen Schichtbereichen, in welchen sich die LSFL bilden, und darunterliegenden Schichtbereichen, welche deutlich durch ihren herstellungsbedingten, schichtweisen Aufbau mit Subschichtdicken von jeweils kleiner gleich 100 nm erkennbar sind [156]. Die Dicke der Schichtbereiche mit verändertem Kontrast in den REM-Aufnahmen zeichnet sich dabei ca. 100 - 150 nm unterhalb der Tiefe der erzeugten Ripple-Strukturen ab.

Zur Abklärung des Einflusses dieser strukturellen Veränderungen innerhalb der ta-C-Schichten auf deren Härte wurden vergleichende Härtemessungen angestellt. Eine Aufstellung der für die unstrukturierten ta-C-Schichten bei einer Prüfkraft von 1 mN ermittelten Werte der Nanohärte ist in nachstehender Tabelle 6-5 gegeben.

Tab. 6-5: Nanohärte der unstrukturierten ta-C-Schichten für die Untersuchungen mit verschiedenen Lasersystemen.

Material	Nanohärte der unstrukturierten ta-C-Schicht (Prüfkraft $F_N = 1$ mN)	Eindringtiefe des Indenters
1,5 μ m ta-C auf Stahl 1.2379 PM für Versuchsreihe mit Lasersystem Clark MXR CPA-2010	38,7 GPa $\pm$ 1,8 GPa	30,5 nm
1,5 μ m ta-C auf Stahl 1.2379 PM für Versuchsreihe mit Lasersystem LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP	35,7 GPa $\pm$ 1,7 GPa	31,4 nm
1,5 μ m ta-C auf Silizium für Versuchsreihe mit Lasersystem LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP	41,1 GPa $\pm$ 7,4 GPa	29,3 nm
Prüfbedingungen: Berkovich Indenter; Spitzenradius 50 nm; Prüfkraft $F_N = 1$ mN		

Die hierbei ermittelten Werte der Nanohärte liegen, bedingt durch die geringe applizierte Prüfkraft, unterhalb den in Tabelle 4-5 im Kapitel 4.1.2. dargestellten Werten. Bei Erhöhung der Prüfkraft nähern sich die Werte der Nanohärte den Werten in Tabelle 4-5 an.

Eine direkte Härtemessung in LSFL aufweisenden Oberflächenbereichen ist mit dem genutzten Ultra-Nanohärtemessgerät (UNHT³) der Firma Anton Paar GmbH nicht möglich. Die korrekte Messung der Härte erfordert die Kraftaufbringung in Richtung der Oberflächennormalen. Infolge der sinusförmigen Struktur der LSFL kann dies in Hinblick auf die Positionierung des Indenters mit dem genutzten Messgerät nicht sichergestellt werden. Des Weiteren bedingt eine Positionierung des Indenters mit geringem lateralem Versatz neben den Wellenbergen des LSFL die Einwirkung von Querkräften auf die Spitze des Indenters, welche das Risiko eines mechanischen

Versagens der Indenterspitze stark erhöhen. Für die Messungen wurden die Probenoberflächen daher bei Parametern strukturiert, die für linear polarisierte Laserstrahlung die gewünschte homogene, flächendeckende Ausbildung der LSFL ermöglichen. Jedoch kam anstelle der linear polarisierten Laserstrahlung zirkular polarisierte Laserstrahlung zur Anwendung, in deren Ergebnis die Entstehung der LSFL weitgehend unterdrückt werden konnte. Die ermittelten Werte der Nanohärte dieser bis auf den Polarisationszustand somit identisch belasteten Oberflächen sind für die Lasersysteme mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich in Abbildung 6-19 dargestellt.

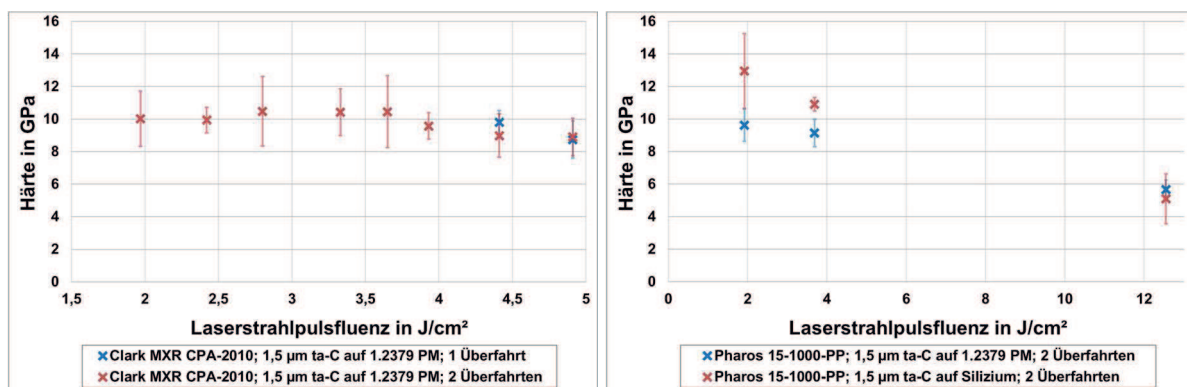


Abb. 6-19: Nanohärte der ta-C-Schichten nach der Laserbearbeitung für verschiedene Laserstrahlpulsfluenzen und Lasersysteme (Berkovich Indenter; Spitzenradius 50 nm; Prüfkraft $F_N = 1$ mN).

Hierbei betragen die Eindringtiefen des Indenters in die Schichten 65 nm bis 90 nm. Die Gegenüberstellung der gemessenen Härtewerte der ta-C-Schichten auf den Stahlsubstraten zeigt, dass für beide Lasersysteme, bei Applikation von Laserstrahlpulsen mit Laserstrahlpulsfluenzen gemäß Tabelle 6-4 in Kapitel 6.3.2.3., vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. In den strukturierten Oberflächenbereichen wurden Härtewerte im Bereich von 9 GPa bis 10 GPa für eine Prüfkraft von 1 mN ermittelt. Dies entspricht einem Abfall der Nanohärte der ta-C-Schichten infolge der Laserbearbeitung auf ein Viertel des Wertes der gemessenen Schichthärte vor der Strukturierung. Im direkten Vergleich zu der nachfolgend in Kapitel 6.5. noch ausgeführten Strukturierung mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren, welche typische, resultierende Nanohärten der ta-C-Schichten im Bereich von 2,5 GPa bis 4,5 GPa bedingt, stehen im Ergebnis der Bearbeitung mit Femtosekundenlaserstrahlpulsen Kohlenstoffschichten höherer Härte zur Verfügung.

6.3.4. Optische Wirkung und Erzeugung von Mischfarben

Werden die in den Oberflächen der Prägewerkzeuge generierten LSFL oder deren Abformungen in den Zielmaterialien mit Licht bestrahlt, so sind in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der elektromagnetischen Strahlung sowie der Orientierung und Gitterperiode der Strukturen Beugungseffekte in den korrespondierenden Raumwinkeln feststellbar. Eine schematische Darstellung der Beugung an diesen, als Reflexionsgitter wirkenden, Strukturen ist in Abb. 6-20 gegeben.

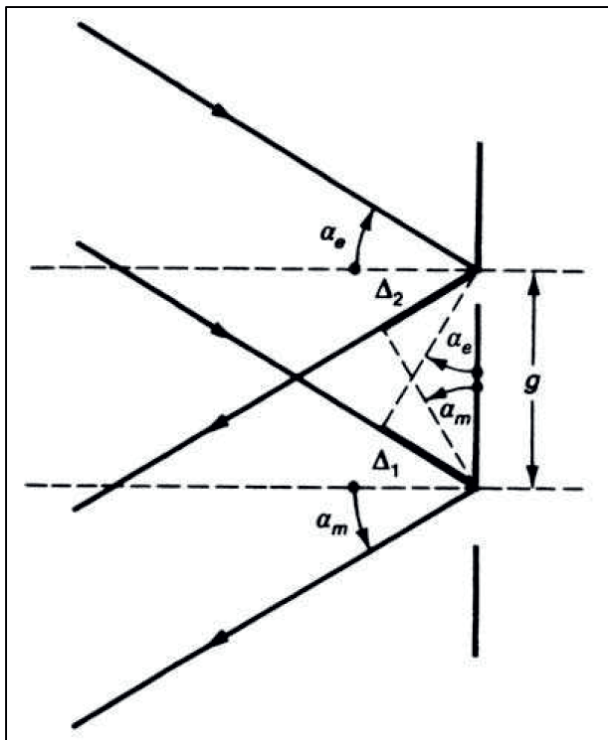


Abb. 6-20: Schematische Darstellung der Beugung am Reflexionsgitter [157].

Hierbei besitzen die einfallenden Teilstrahlen den Winkel α_e , die gebeugten Teilstrahlen den Winkel α_m zur Oberflächennormalen. Die Gitterperioden der LSFL in der Oberfläche der Prägewerkzeuge bzw. deren Abformungen entsprechen dabei der jeweiligen Gitterperiode g des Reflexionsgitters. Für einen beliebigen Einfallswinkel α_e ergeben sich am Reflexionsgitter die Beugungsmaxima gemäß Gleichung (Gl. 6-9).

$$-\sin \alpha_e - \sin \alpha_m = \frac{m \cdot \lambda}{g} \quad \text{mit } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{Gl. 6-9}) \quad [157]$$

Dabei kann der optische Gangunterschied Δ zwischen zwei benachbarten Punkten der Beugung mittels Gleichung (Gl. 6-10) berechnet werden.

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = -g \sin \alpha_e - g \sin \alpha_m \quad (\text{Gl. 6 - 10}) \quad [157]$$

Für die Beugungsmaxima ergibt sich dieser zu $\Delta = m \cdot \lambda$, wobei m die Beugungsordnung beschreibt. Die Ermittlung der Winkel α_m der gebeugten Strahlung in den jeweiligen Beugungsordnungen m erfolgt, ausgehend von Gleichung (Gl. 6-9), gemäß (Gl. 6-11).

$$\alpha_m = \arcsin \left(-\sin \alpha_e - \frac{m \cdot \lambda}{g} \right) \quad \text{mit } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{Gl. 6 - 11})$$

Im Rahmen der messtechnischen Auswertung der Beugungsbilder konnten, ursächlich auf die bereits beschriebene, lateral über den bearbeiteten Oberflächenbereich schwankende Gitterparameter der LSFL zurückzuführende, Effekte nachgewiesen werden. Bedingt durch die Schwankungen insbesondere der Gitterperiode sind bei Bestrahlung der strukturierten Oberflächen mit monochromatischem Licht im Beugungsbild keine punktförmigen Beugungsmaxima sichtbar. Die Beugungsmaxima treten vielmehr in einem mit den Schwankungen der Gitterperiode korrespondierenden Winkelbereich auf. Bei Bestrahlung der Oberflächen mit Weißlicht kommt es zur Dispersion der gebeugten Strahlung. In Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Weißlichts, den Strukturparametern sowie des Betrachtungswinkels können hierdurch verschiedene optische Wirkungen realisiert werden. Die Verringerung der Gitterperiode der in die Oberflächen eingebrachten Strukturen bedingt dabei eine Vergrößerung der Winkeldifferenz der gebeugten Strahlanteile für die Bestrahlung mit Weißlicht. Durch Variation der Orientierung der in den Oberflächen erzeugten LSFL ist des Weiteren die Möglichkeit gegeben, den Raumwinkel (durch Veränderung der Ausrichtung der Gitterstrukturen) zu beeinflussen, unter welchem diese eine beugungsoptische Wirkung, bei Beaufschlagung mit senkrecht zur Orientierung der LSFL auftreffender Strahlung, zeigen.

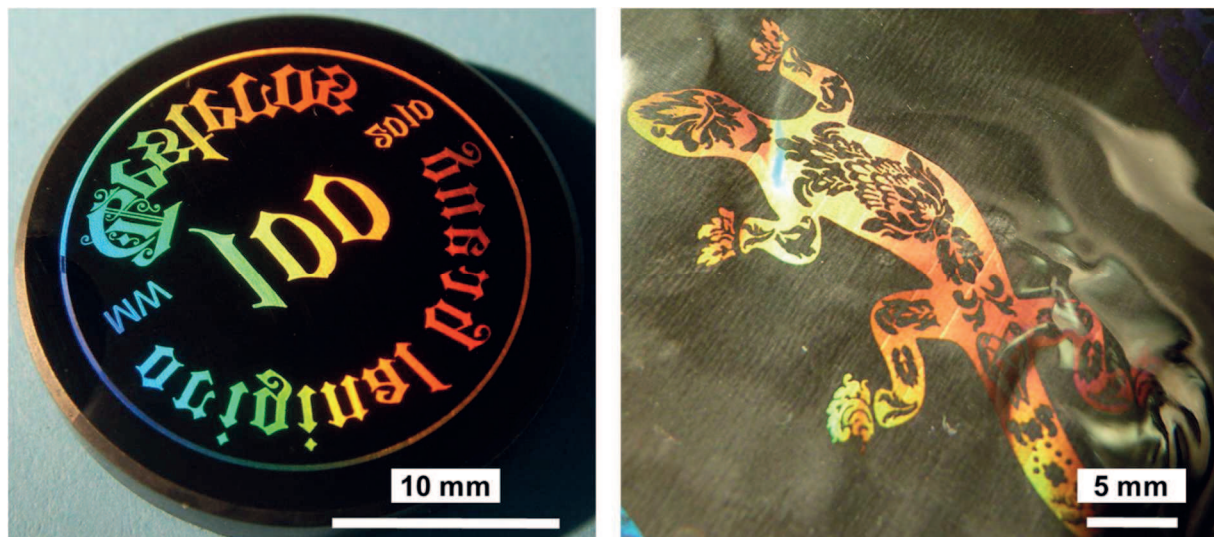


Abb. 6-21: Aufnahmen der Beugungseffekte bei gleichförmiger Orientierung der LSFL und Bestrahlung mit Weißlicht (Links: ta-C-beschichtetes Wolframcarbid; Rechts: Abformung in Aluminiumfolie).

Für über den bearbeiteten Oberflächenbereich gleichförmig orientierte LSFL bzw. deren Abformungen sind bei Bestrahlung mit Weißlicht die in Abbildung 6-21 beispielhaft dargestellte Beugungseffekte feststellbar. Durch differierende Ausrichtung der erzeugten Strukturen in festgelegten Bereichen der bearbeiteten Oberflächen ist, wie nachfolgend in Abbildung 6-22 gezeigt, die Realisierung von Kippeffekten bei der Drehung der Proben gegeben.

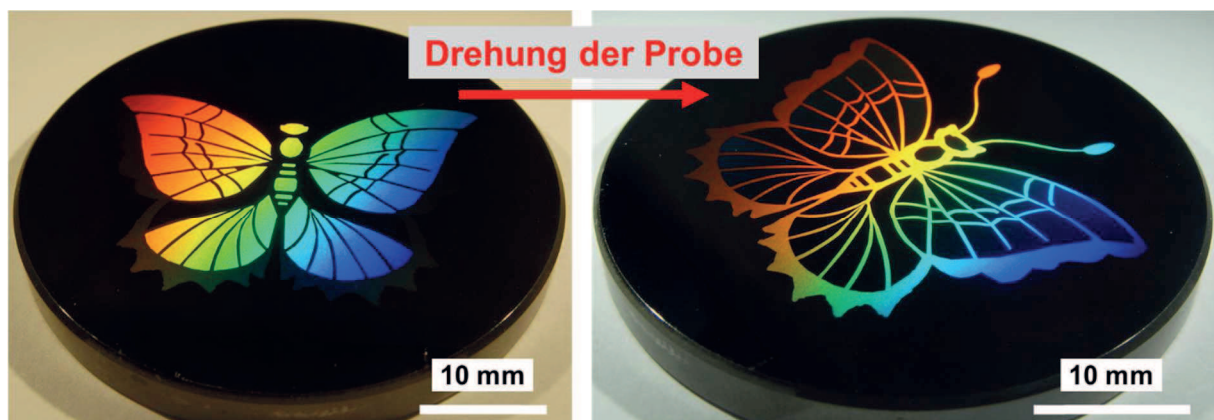


Abb. 6-22: Aufnahmen der Beugungseffekte bei differierender Orientierung der LSFL in den verschiedenen, bearbeiteten Oberflächenbereichen und Bestrahlung mit Weißlicht.

Erfolgt während der Laserbearbeitung der Oberflächen eine kontinuierliche Variation der Polarisation der auftreffenden, linear polarisierten Laserstrahlpulse, so führt dies für die sich ausbildenden LSFL ebenfalls zu einer kontinuierlichen Veränderung deren

Ausrichtung. Für die Bestrahlung mit Weißlicht können für diese fortlaufenden Änderungen der Orientierung der LSFL bzw. deren Abformungen zugehörige Beugungseffekte beobachtet werden. Unter Beibehaltung der Raumwinkel der Beleuchtung und der Beobachtung zeigen sich bei Drehung der, diese Strukturen aufweisenden, Oberflächen stets andere Oberflächenbereiche als beugungsoptisch aktive Flächen. Hierdurch ist, wie in Abbildung 6-23 beispielhaft aufgezeigt, die Möglichkeit der Realisierung von Lauffeffekten gegeben.

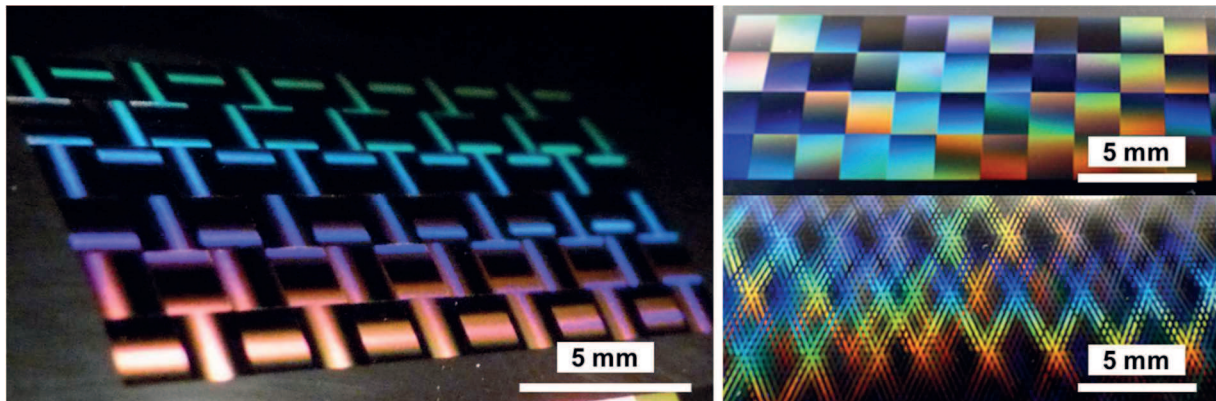


Abb. 6-23: Aufnahmen der Beugungseffekte bei kontinuierlicher Veränderung der Orientierung der LSFL und Bestrahlung mit Weißlicht.

Der erzielbare Grad der Detailierung wird dabei maßgeblich von den auf den Probenoberflächen wirksamen Laserstrahlquerschnittsflächen sowie der Regelbarkeit der Polarisation der auftreffenden linear polarisierten Laserstrahlpulse bestimmt. Für die trennscharfe Unterscheidung verschiedenartig strukturierter Oberflächenbereiche ist das genutzte Auswertungssystem maßgebend. Erfolgt die Beurteilung der strukturierten Oberflächen mit dem Auge ohne Einsatz optischer Hilfsmittel, so bedingt dies eine Auflösungsgrenze von ca. 0,15 mm bei einem Betrachtungsabstand von 250 mm [157]. Durch den Einsatz optischer, vergrößernder Hilfsmittel oder höher auflösender Detektionssysteme kann dieser Wert verringert werden. Weisen die Oberflächenbereiche mit gleichförmig orientierten, jedoch zum angrenzenden Gebiet abweichenden, Gitterstrukturen laterale Größen unterhalb dieser Auflösungsgrenzen auf, sind diese nicht mehr voneinander unterscheidbar. Unter der Annahme der Betrachtung der die Gitterstrukturen aufweisenden Oberflächen mit dem Auge können durch Verfahrensanpassungen neben den bereits beschriebenen Spektralfarben auch Mischfarben im gebeugten Strahlungsanteil realisiert werden. Dies setzt zur Erzielung eines einheitlichen Farbeindrucks der strukturierten Oberflächenbereiche die Einhaltung bzw. Unterschreitung der lateralen Auflösungsgrenze von 0,15 mm, bei

Betrachtung mit dem Auge, voraus. Für die Erzeugung von Mischfarben durch Mischung von Spektralfarben werden die sich somit ergebenden, beispielsweise quadratischen Pixel mit einem Kantenabmaß von 0,15 mm nochmals in Subpixel unterteilt. Exemplarisch ist dies für das für diese Bearbeitungsaufgabe ebenfalls nutzbare Maskenprojektionsverfahren unter Verwendung eines Excimer-Lasersystem vom Typ Coherent LPXpro 305 in der nachstehenden Abb. 6-24 aufgezeigt. Weitere Ausführungen zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren, den untersuchten Parameterräumen sowie den Ergebnissen werden in Kapitel 6.5. gegeben.

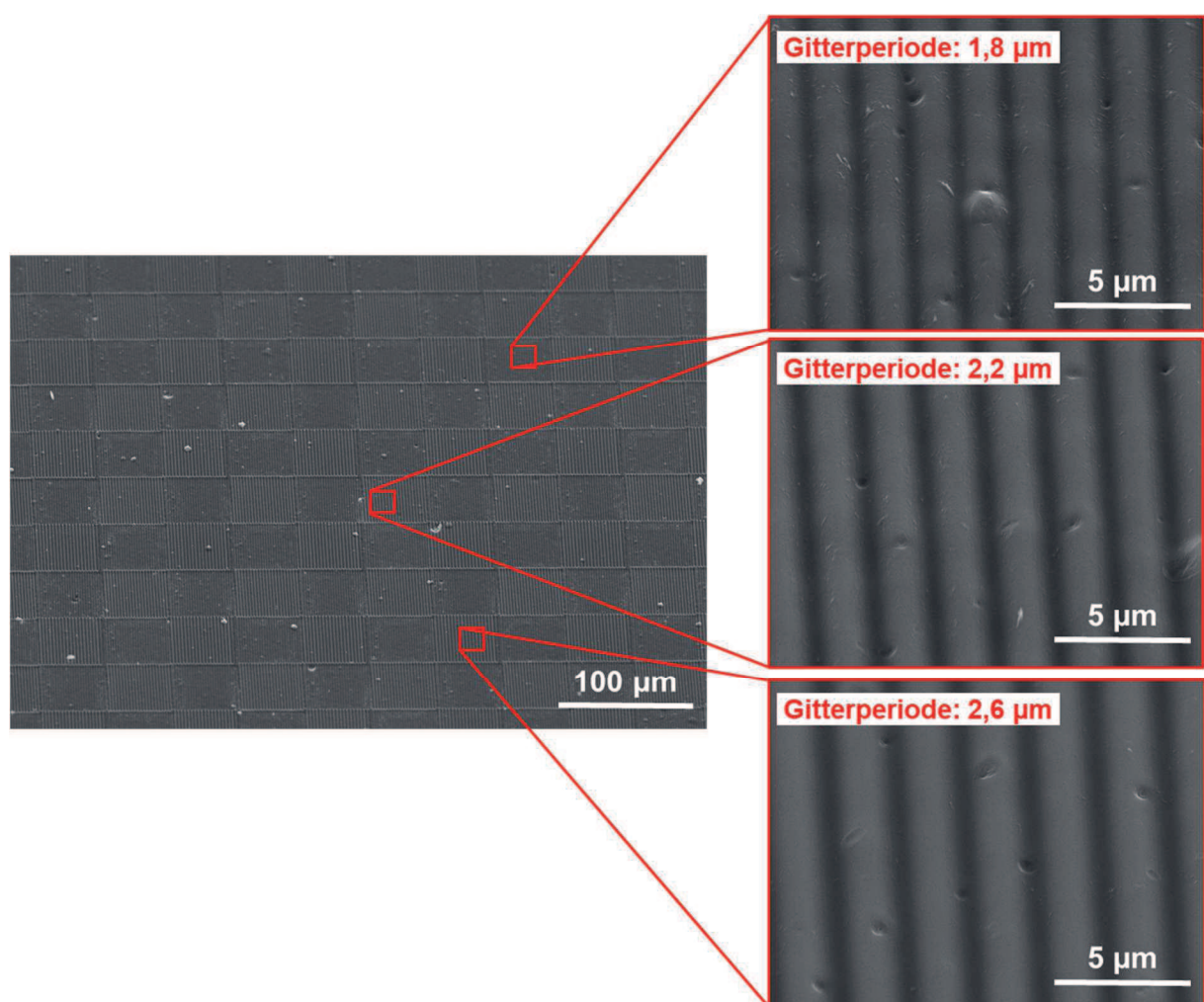


Abb. 6-24: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer mit dem Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren strukturierten ta-C-Hartstoffschicht (Gesamtschichtdicke: 1,5 µm; Tiefe der Gitterstrukturen: 400 - 450 nm).

Die Realisierung einer spezifischen Mischfarbe unter einem definierten Betrachtungswinkel ist nur bei einem korrespondierenden Einfallswinkel für die Bestrahlung mit Weißlicht gegeben. Hierbei werden die Subpixel in der Art strukturiert,

dass diese Gitterperioden aufweisen, welche im Raumwinkel der Beobachtung den entsprechenden Farbanteil der Spektralfarbe liefern. Für das Detektionsinstrument Auge ist weiterhin dessen spektrale Empfindlichkeit gemäß DIN 5031, Blatt 3 zu berücksichtigen. Die Auswahl der Mischfarbe kann beispielsweise anhand des CIE-Normfarbsystems sowie der zugehörigen CIE-Normfarbtafel nach DIN 5033 erfolgen und liefert die erforderlichen Verhältnisse der Spektralfarben Rot, Grün und Blau (RGB-Farbraum). Differierende Emissionsspektren der in Anwendung gebrachten Beleuchtungsquellen sind für die Berechnungen ebenfalls zu berücksichtigen. Beispielhaft wurde dies für die Erzeugung verschiedener Mischfarben durch Mischung der Spektralfarben Rot, Grün und Blau bei senkrechter Bestrahlung mit Weißlicht und einem Betrachtungswinkel von 30° ausgeführt. Die Berechnungen erfolgten gemäß CIE-Normfarbtafel nach DIN 5033. Quadratische Pixel mit einer Kantenlänge von $200\text{ }\mu\text{m}$ wurden hierzu in quadratische Subpixel mit Kantenlängen von jeweils $33,3\text{ }\mu\text{m}$ unterteilt. Die Gitterperiode der Subpixel beträgt dabei für die verschiedenen Spektralfarben $g_{\text{Rot}} = 1,26\text{ }\mu\text{m}$, $g_{\text{Grün}} = 1,06\text{ }\mu\text{m}$ und $g_{\text{Blau}} = 0,86\text{ }\mu\text{m}$. Da die Beugungsintensität dieser Subpixel abhängig ist von Anzahl der Gitterperioden innerhalb des Subpixels und der Wellenlänge der jeweiligen Spektralfarbe, erfolgt die Regelung der Intensität über deren Größe oder deren Anzahl innerhalb der Pixel. Für das ausgewählte quadratische Pixel mit $200\text{ }\mu\text{m}$ Kantenlänge und quadratische Subpixel mit $33,3\text{ }\mu\text{m}$ Kantenlänge, werden gemäß der Berechnungen zur Realisierung der Farbe Weiß 14 rote Subpixel, 10 grüne Subpixel und 12 blaue Subpixel benötigt. Die Farbe Rosa erfordert das Zusammenwirken von 22 roten, 3 grünen sowie 11 blauen Subpixeln pro Pixel. Eine Anpassung der hierfür angewendeten Berechnungsgrundlagen, für die mit der Erzeugung der LSFL in der Oberfläche der verschiedenen Materialien realisierbaren Gitterperioden, ist problemlos möglich.

Die optische Wirkung der als Reflexionsgitter wirkenden Strukturen wird, neben deren geometrischer Gestaltung sowie deren Abmessungen, maßgeblich durch die Reflektivität der Oberfläche bestimmt, in welche diese eingebracht werden. Für den in Kapitel 7 noch ausgeführten Bereich der Abformung der Gitterstrukturen in die Zielmaterialien ist weiterhin die Qualität der Strukturübertragung zu berücksichtigen. Diese Größen bedingen die Brillanz, den Kontrast sowie den Farbeindruck der die beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen aufweisenden Oberflächenbereiche.

6.3.5. Produktivitätsabschätzung

Die Produktivität des aufgezeigten Verfahrens hängt maßgeblich von der zu realisierenden Bearbeitungsaufgabe, dem Probenmaterial sowie dem genutzten Lasersystem und der zugehörigen Anlagenperipherie ab. Für die Abschätzung der mit den vorgestellten Systemen erreichbaren Flächenleistung sollen zwei verschiedene, beispielhafte Strukturierungsaufgaben für das Schichtmaterial ta-C dienen.

Im ersten Fall sei die vollflächige Erzeugung von LSFL auf der Mantelfläche einer Prägewalze gefordert. Die Bearbeitungsstrategie hierfür wäre beispielsweise eine Kombination aus lateraler Verschiebung und kontinuierlicher Drehung der Prägewalze unter dem stationären, fokussierten Laserstrahl. Auf Basis der auf der Walzenoberfläche wirksamen Laserstrahlquerschnittsflächen sowie der Repetitionsrate des verwendeten Lasersystems kann eine Berechnung der Positionierungsparameter Rotationsgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der lateralen Verschiebung erfolgen. Werden hierbei Überlappungsgrade der Laserstrahlquerschnittsflächen gemäß der im Kapitel 6.3.2.4. aufgezeigten Bereiche angewendet, so sind mit dem Lasersystem Clark MXR CPA-2010 und Bearbeitung im Fokus des Transmissionsobjektives mit einer Brennweite von 100 mm Flächenleistungen von ca. 400 mm²/h bei zwei Überfahrten erreichbar. Hinsichtlich der Laserstrahlleistung des Systems kommen unter Verwendung dieser Parameterkombination jedoch nur 3 % der Gesamtleistung zur Anwendung. Für diese Bearbeitungsaufgabe ist der Grad der Detailierung nicht maßgebend, da keine filigranen Strukturen gefordert sind. Eine Skalierung ist vor diesem Hintergrund durch Defokussierung und entsprechende Anpassungen hinsichtlich der lateralen Abstände der Laserstrahlpulse zueinander möglich. Durch die Vergrößerung der Laserstrahlquerschnittsfläche auf der Probenoberfläche um den Faktor 5,75 wird nahezu die vollständige Laserstrahlleistung des Systems umgesetzt. In der Folge ergeben sich Flächenleistungen von ca. 13200 mm²/h bei zwei Überfahrten.

Im zweiten Fall sei die Umsetzung einer detailreichen Bildvorlage gefordert. Der zu strukturierende Oberflächenanteil betrage 50 %. Diese Bearbeitungsaufgabe erfordert, vor dem Hintergrund des zu erreichenden Grades der Detailierung, idealerweise die Bearbeitung im Fokus der in Anwendung zu bringenden Objektive. Kommt während der Strukturierung für die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück ein Achssystem zu Einsatz, so bedingt dessen Dynamik die erreichbaren Flächenleistungen. Auf Basis der Untersuchungen mit dem, in Kombination mit dem

Lasergerät Clark MXR CPA-2010, genutzten Achssystem zeigten sich für derartige Bearbeitungsaufgaben Lasernutzungszeiten von ca. 10 % der Gesamtbearbeitungszeit. Der Großteil der Bearbeitungszeit wird für die Positionierung des Werkstücks benötigt. Mit steigendem Gewicht der zu bearbeitenden Werkstücke werden diese Positionierungszeiten, vor dem Hintergrund der Beschleunigung und Abbremsung dieser trägen Massen, tendenziell größer. Für die beschriebene Parameterkombination wurden Flächenleistungen von ca. 40 mm²/h bei ebenfalls zwei Überfahrten erreicht. Da für dieses Setup wie bereits im ersten Fall beschrieben lediglich 3 % der zu Verfügung stehenden Gesamtleistung des Lasers umgesetzt werden, bieten sich auch hier Möglichkeiten der Skalierung. Am einfachsten wäre dies durch Erhöhung der Pulsrepetitionsrate darstellbar, jedoch ist diese Option am Lasersystem Clark MXR CPA-2010 nicht gegeben. Eine alternative Variante zur Steigerung der Produktivität bietet die Nutzung eines Laserstrahlscanners zur Positionierung des Laserstrahls auf dem Werkstück. Mit einem hierfür realisierten Versuchsaufbau konnten für die identische Strukturierungsaufgabe Lasernutzungszeiten von 90 % der Gesamtbearbeitungszeiten erreicht werden. Hieraus resultiert eine Erhöhung der Flächenleistung auf ca. 360 mm²/h für das Lasersystem Clark MXR CPA-2010.

Durch die Nutzung anderer Lasersysteme sowie durch Anpassungen der System- und Anlagenperipherie können weitere Steigerungen der Produktivität erreicht werden. Durch Verwendung des Lasersystems LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP und unter Ausnutzung von dessen systemimmanenten Parameterbereichen sind, für die im ersten Fall beschriebene vollflächige Erzeugung von LSFL im Schichtmaterial ta-C auf der Mantelfläche von Prägewalzen, Flächenleistungen im Bereich von 107000 mm²/h bis 147000 mm²/h umsetzbar. Die berechneten Flächenwerte berücksichtigen bereits die erforderlichen Anpassungen der Laserstrahlpulsfluenz und die Bearbeitung der Oberfläche mit zwei Überfahrten. Infolge des hinreichenden Einstellbereiches der Pulsrepetitionsrate für dieses Lasersystem ist eine Defokussierung zur Erhöhung der Produktivität nicht erforderlich. Für die im zweiten Fall geschilderte Bearbeitungsaufgabe der Umsetzung einer detailreichen Bildvorlage sind infolge der Skalierbarkeit der Pulsrepetitionsrate für das Lasersystem LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP ebenfalls deutliche Produktivitätssteigerungen erreichbar. Hinsichtlich der konkreten Bearbeitungsstrategie kann das Potential des Lasersystems nur mittels Laserstrahlscanner umgesetzt werden. Eine Flächenleistung

im Bereich von 96000 mm²/h bis 132000 mm²/h ist unter Berücksichtigung der Anpassung der Laserstrahlpulsfluenz für das Schichtmaterial ta-C bei zwei Überfahrten realisierbar. Die Nutzung des Lasersystems Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego ist, für die Bearbeitung des Schichtmaterials ta-C infolge der beschriebenen Limitationen, nicht zu empfehlen.

Für die Erzeugung von LSFL in den Oberflächen der Stähle können unter Anwendung der in Kapitel 6.3.2. aufgezeigten Parameterbereiche sowie durch Anpassung der Bearbeitungsstrategien höhere Flächenleistungen erreicht werden. Dies ist ursächlich auf die geringeren anzuwendenden Laserstrahlpulsfluenzen zurückzuführen, welche bei der Bearbeitung von Stahl im Vergleich zur Bearbeitung von ta-C erforderlich sind. Unter Beachtung der für die Bearbeitung von ta-C beschriebenen Varianten zur Anpassung der System- und Anlagenparameter ist die Berechnung der erreichbaren Flächenleistungen für die jeweilige Bearbeitungsaufgabe möglich. Da die vom Lasersystem Time-Bandwidth® / Lumentum Operations LLC Fuego emittierte Laserstrahlung für die Bearbeitung von Stahl eine hinreichende Absorption bedingt, bietet deren Einsatz vor dem Hintergrund der im Vergleich der Lasersysteme höchsten Laserstrahlleistung entsprechende Potentiale zur Produktivitätssteigerung. Im Ergebnis der auf 200 kHz begrenzten Pulsrepetitionsrate bietet sich dieses jedoch insbesondere für die flächenhafte Erzeugung von LSFL mit defokussiertem Laserstrahl gemäß dem ersten Fallbeispiel an. Lediglich in dieser Systemkonfiguration kann die gesamte, vom Lasergerät emittierte Leistung für die Bearbeitungsaufgabe umgesetzt werden.

6.4. Erzeugung von Gitterstrukturen mittels Femtosekundenlaser im Maskenprojektionsverfahren

Das Lasersystem Clark MXR CPA-2010 zeichnet sich durch die vergleichsweise hohe, verfügbare Laserstrahlpulsenergie von 1 mJ bei einer festen Pulswiederholfrequenz von 1 kHz aus. Mit dem, in Kapitel 5.1.3. beschriebenen, experimentellen Versuchsaufbau konnte der Nachweis der prinzipiellen Umsetzbarkeit des Maskenprojektionsverfahrens für dieses Lasersystem geführt werden. Unter Verwendung eines Abbildungsobjektivs mit einer Apertur von 30 mm ließen sich im Minimum symmetrisch geteilte Gitterstrukturen mit Gitterperioden von 13 µm praktisch erreichen. Durch Optimierung und Anpassung der Systemkomponenten des Versuchsaufbaus, insbesondere durch die Integration zusätzlicher Optiken sowie

durch Einsatz eines hierfür spezifisch entwickelten Abbildungsobjektivs mit einer größeren Apertur von 50 mm, konnte dieser Werte auf ca. 5 μm reduziert werden. Im Ergebnis der Untersuchungen war die Realisierung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich 2 μm in den Oberflächen der für die Prägewerkzeuge relevanten Werkstoffe unter Verwendung des Femtosekundenlasers im Maskenprojektionsverfahren jedoch nicht möglich.

6.5. Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren

Mit der Nutzung des Excimerlasers im Maskenprojektionsverfahren steht eine weitere Strategie zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in den Oberflächen der Prägewerkzeuge zur Verfügung. Die Prozessierung der Probenkörper erfolgte innerhalb der Arbeitsgruppe am Laserinstitut Hochschule Mittweida. Da dieser Bearbeitungsprozess nicht Aufgabe der vorliegenden Arbeit war, wird nachfolgend lediglich übersichtsweise auf diese Technologie eingegangen. Das Funktionsprinzip entspricht hierbei weitgehend dem des in Kapitel 5.1.3. aufgezeigten Maskenprojektionsverfahrens unter Verwendung des Lasersystems Clark MXR CPA-2010. Von diesem abweichend kommt jedoch ein Excimer-Lasersystem vom Typ Coherent LPXpro 305 zum Einsatz. Dieses liefert, bei der für die Versuche genutzten Emissionswellenlänge von 248 nm, Laserstrahlpulse mit einer Pulsdauer von 25 ns. Die maximale Pulsenergie des Systems beträgt 1,1 J, wobei eine maximale Pulswiederholfrequenz von 50 Hz erreicht wird. Diese Lasersysteme emittierten Laserstrahlpulse mit einem rechteckigen Strahlprofil, welches unterschiedliche Divergenzwinkel in den beiden Raumrichtungen orthogonal zur Ausbreitungsrichtung aufweist. Für die Homogenisierung dieser Laserstrahlung sind daher spezifische Strahlformungskomponenten in Anwendung zu bringen. Im vorliegenden Fall wird dies mittels zweier Zylinderlinsenarrays sowie weiterer Optiken erreicht. Diese gewährleisten bei exakter Justage die homogene Intensitätsverteilung über die Querschnittsfläche des Laserstrahls in einer, auch als homogener Fleck bezeichneten, Ebene in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlung. In dieser Ebene, in welcher für das genutzte System die homogene Intensitätsverteilung auf einer Fläche von 20 mm x 20 mm vorliegt, wird wie in Kapitel 5.1.3. beschrieben die jeweilige Maske positioniert. Für die verkleinerte Abbildung der durch die Maske hindurch tretenden Anteile der Laserstrahlung auf die Probenoberflächen stehen am Versuchsaufbau zwei

Strahlengänge zur Verfügung. Mit dem im Verhältnis von 8:1 abbildenden Strahlengang können in der Folge Oberflächenbereiche mit einer Größe von maximal 2,5 mm x 2,5 mm gleichzeitig bearbeitet werden. Der zweite Strahlengang ermöglicht ein Abbildungsverhältnis von 15:1 und erlaubt somit die gleichzeitige Bearbeitung auf einer Fläche von 1,33 mm x 1,33 mm. Als Masken und Blenden kommen für dieses System vorzugsweise mittels Femtosekundenlaser im Fokusabtragverfahren strukturierte Quarzglassubstrate zum Einsatz. Abweichend zum Versuchsaufbau zur Maskenprojektion mittels Femtosekundenlaser erfolgt die Einstellung des Relativabstandes zwischen Bearbeitungsobjektiv und Probenoberflächen nicht durch Verschiebung des Objektivs. Für den Versuchsaufbau unter Verwendung des Excimerlasers besitzen die Abbildungsebenen, infolge der ortsfesten Objektive, eine stets gleiche, definierte Lage im Raum. Die Verschiebung der Probenoberflächen in diese Ebenen wird mittels eines Hubtisches realisiert.

Mit dem im Abbildungsverhältnis von 8:1 arbeitenden Strahlengang war die Erzeugung symmetrisch geteilter Gitterstrukturen mit einer Gitterperiode von minimal 2 μm möglich. Infolge des größeren Abbildungsverhältnisses und besserer Abbildungsbedingungen lieferte der Strahlengang mit dem Abbildungsverhältnis von 15:1 minimale Gitterperioden von 1,6 μm für ebenfalls symmetrisch geteilte Gitterstrukturen. Die Homogenität der erzeugten Strukturen und deren Maßhaltigkeit werden dabei von der Qualität der korrespondierenden Strukturen in der Maske, der Homogenität der Intensitätsverteilung in Maskenebene sowie der Abbildungsschärfe bestimmt. Eine Variation der Gitterperiode ist bei der Strukturierung mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren, im Vergleich zur in Kapitel 6.3. beschriebenen Erzeugung von LSFL, einfach und in großen Bereichen möglich. Durch den Einsatz von Masken mit entsprechenden Gitterteilungen und Gitterabmessungen kann eine hohe Flexibilität in diesem Punkt gewährleistet werden. Die Tiefe der erzeugten Strukturen wird dabei maßgeblich von der angestrebten Gitterperiode, den applizierten Strukturierungsparametern sowie dem Probenmaterial selbst beeinflusst. Für die Bearbeitung der Stähle bei Gitterperioden von kleiner gleich 2 μm sind lediglich Strukturturen von einigen 10 nm bis maximal 50 nm erreichbar. Ursächlich ist dies auf die Pulsdauer der Laserstrahlpulse des Excimerlasers zurückzuführen, welche bei der Bearbeitung der Stähle die Ausbildung einer oberflächlichen Schmelzphase bedingt. Die Erzeugung der Gitterstrukturen infolge der verkleinerten Abbildung der Maskenstruktur auf die Oberfläche der Probenmaterialien beruht auf der Absorption

der auftreffenden Laserstrahlung in den bestrahlten Teilbereichen der Abbildung. Für die unbestrahlten Bereiche kann im Wirkungsprinzip des Maskenprojektionsverfahrens begründet das Auftreffen eines, wenn auch hinsichtlich der Intensitäten deutlich verminderten, Strahlungsanteils nicht vollumfänglich vermieden werden. Durch die Beaufschlagung der Probenoberfläche mit einem Einzelpuls oder einer Pulsfolge kommt es, im Ergebnis der Absorption der Laserstrahlung, zur oberflächlichen Aufheizung des Probenmaterials. Für die Bearbeitung von Stahl kann bei hinreichenden Laserstrahlpulsfluenzen die initiale Ausbildung erster Schmelzbäder in den bestrahlten Bereichen der Abbildung festgestellt werden. In den unbestrahlten Bereichen der Abbildung werden die Temperaturen für ein oberflächennahes Aufschmelzen der Stähle zunächst nicht erreicht. Die einzelnen Schmelzbäder in den bestrahlten Bereichen sind daher zunächst durch die nicht aufgeschmolzenen, unbestrahlten Bereiche voneinander getrennt. Infolge der geringen lateralen Abstände der bestrahlten und unbestrahlten Bereiche bei der Erzeugung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ kann in Kombination mit der guten Wärmeleitfähigkeit der Stähle (siehe Tabelle 6-6) eine zusammenhängende Schmelzbaddynamik im gesamten Bereich der Abbildung beobachtet werden.

Tab. 6-6: Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Werkstoffe bei Raumtemperatur.

Material	Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur
Stahl 1.2365	$32,8 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [158]
Stahl 1.2367	$30,8 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [159]
Stahl 1.2379	$16,7 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [160]
Stahl 1.2990	$24,0 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [161]
Wolframcarbid AKS-F03	$80 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [162]
AlCrN-Schicht	$4,74 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [163]
ta-C-Schicht	$9,2 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [4]

Die Wärmeleitung aus den bestrahlten, oberflächlich bereits aufgeschmolzenen Bereichen in die unbestrahlten Bereiche bedingt auch in diesen einen zumindest partiellen Phasenübergang von fest zu flüssig. Mit einer Erhöhung der Laserstrahlpulsfluenz geht in diesem Fall eine stärkere Aufheizung der bestrahlten Oberflächenbereiche einher, welche eine ausgeprägtere Schmelzbaddynamik nach sich zieht. Infolge der unzureichenden Überführung des schmelzflüssigen Materials in

die Dampfphase kann, auch durch die Aufbringung einer Mehrzahl von Laserstrahlpulsen im Oberflächenbereich einer Abbildung, keine Zunahme der Strukturtiefe in den Stählen erreicht werden. Die erreichbare Strukturtiefe stagniert bzw. nimmt bei mehreren Pulsen pro Abbildung z.T. wieder ab, da die bereits bestrahlten Oberflächenbereiche noch nicht wieder vollständig erkaltet sind. Wird die Laserstrahlpulsfluenz nachfolgend weiter erhöht, führt dies zu einem vollflächigen, schrittweisen Absinken der bearbeiteten Oberflächenbereiche einer Abbildung unter das Niveau angrenzender, außerhalb der Querschnittsfläche der Abbildung liegender, unbearbeiteter Oberflächenbereiche. Die mit der Erhöhung der Laserstrahlpulsfluenz einhergehende stärkere Aufheizung der bestrahlten Oberflächenbereiche bedingt in diesen neben der Zunahme der Verdampfung auch die Ausbildung eines zusammenhängenden, oberflächlichen Schmelzbades. Ein differenzierter Abtrag zwischen bestrahlten und unbestrahlten Oberflächenbereichen innerhalb der Querschnittsfläche einer Abbildung ist nicht mehr gegeben.

Auch für die Bearbeitung von Wolframcarbid sowie des Schichtmaterials BALINIT® ALCRONA konnte, infolge der Pulsdauer der Laserstrahlpulse des Excimerlasers und der damit einhergehenden, bereits beschriebenen Effekte hinsichtlich der sich bildenden Schmelze, kein befriedigendes Strukturierungsergebnis erreicht werden.

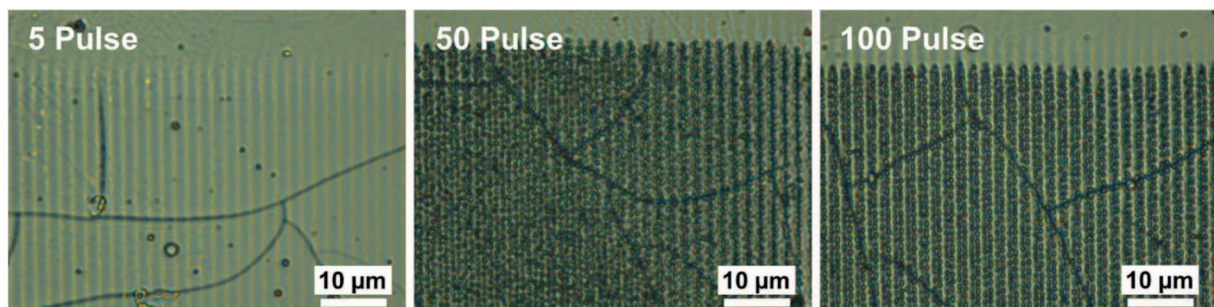


Abb. 6-25: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Oberfläche einer mit dem Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren strukturierten Wolframcarbid-Probe bei Variation der Pulsanzahl (Laserstrahlpulsfluenz $H = 3 \text{ J/cm}^2$; 30 Hz Pulswiederholfrequenz).

Im Ergebnis der Bearbeitung von Wolframcarbid waren, wie in Abbildung 6-25 aufgezeigt, in Abhängigkeit von der Laserstrahlpulsfluenz und der Anzahl der applizierten Laserstrahlpulse, ausgeprägte Risse im bestrahlten Oberflächenbereich feststellbar. Ein direkter Abtrag des hochschmelzenden Wolframcarbids wurde für Laserstrahlpulsfluenzen bis 4 J/cm^2 nicht erreicht. Die Laserbestrahlung bedingte hierbei vordergründig die Überführung des Kobaltbinders in die schmelzflüssige Phase

und dessen Anreicherung an der Probenoberfläche. Diese ist in den bestrahlten Bereichen innerhalb des Oberflächenbereiches einer Abbildung in Gestalt wiedererstarteter Schmelze nachweisbar. Höhere Werte der Laserstrahlpulsfluenz führten wie bei der Bearbeitung der Stähle zu einem vollflächigen, schrittweisem Absinken der bearbeiteten Oberflächenbereiche. Gleichzeitig kommt es zur Verstärkung der beobachteten Rissbildung.

Für Laserstrahlpulsfluenzen, welche im Schichtmaterial BALINIT® ALCRONA einen hinreichenden Materialabtrag erlauben, war die Erzeugung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ nicht gegeben. Die beschriebenen Schmelzeffekte behindern auch für dieses Material bei der angestrebten Gitterperiode die Ausbildung der Strukturgeometrie in die Tiefe.

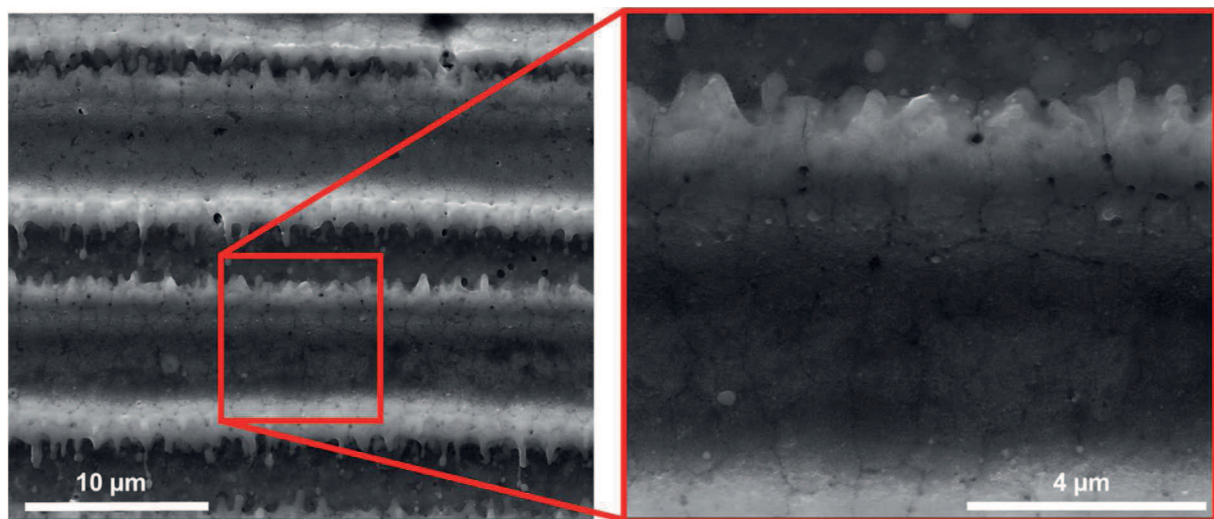


Abb. 6-26: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen einer mit dem Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren strukturierten BALINIT® ALCRONA-Schicht (10 Pulse; Laserstrahlpulsfluenz $H = 4\text{ J/cm}^2$; 10 Hz Pulswiederholfrequenz)

Des Weiteren ist im Ergebnis der Bearbeitung, wie in Abbildung 6-26 dargestellt, in den bestrahlten Bereichen für das Schichtmaterial BALINIT® ALCRONA die Ausbildung von Heißrissen zu beobachten. Hierdurch kann die Funktionalität dieser Hartstoffbeschichtung im Nachgang der Laserbearbeitung nicht gewährleistet werden. Im Vergleich der untersuchten Materialien wurden die besten Strukturierungsergebnisse, sowohl hinsichtlich der realisierbaren Strukturtiefen als auch bezüglich der geometrischen Ausformung der Gitterstrukturen, im Schichtmaterial ta-C erreicht. Die im Maximum erzielbaren Strukturtiefen hängen von der Gitterperiode der zu erzeugenden Strukturen sowie von den in Anwendung

gebrachten Bearbeitungsparametern ab. Bei Gitterperioden von 3 μm konnten Strukturturen von bis zu 1 μm gemessen werden, für Gitterperioden von 1,6 μm sanken diese Werte auf 250 nm bis 300 nm ab. Hinsichtlich des Relativabstandes zwischen Bearbeitungsoptik und Probenoberflächen sind für die Gitterperiode von 1,6 μm Schwankungen von $\pm 5 \mu\text{m}$ tolerierbar. Im Profilschnitt weisen die mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren in der Oberfläche der ta-C-Schichten erzeugten Gitterstrukturen bei Gitterperioden von kleiner gleich 2 μm , ebenso wie die LSFL, eine sinusförmige Strukturform auf. Hinsichtlich der Strukturierungsparameter konnten die tiefsten Strukturen bei Applikation von Laserstrahlpulsfluenzen im Bereich von 6 J/cm² bis 8 J/cm² erreicht werden. Die Tiefe der sich bildenden Gitterstrukturen skaliert hierbei mit der Anzahl der aufgebrauchten Laserstrahlpulse. Dabei kommt es in den bestrahlten Bereichen der Abbildung im Zug der Beaufschlagung der ta-C-Schichten mit dem ersten Laserstrahlpuls und der Absorption der Laserstrahlung zunächst zu einer Phasenumwandlung der überwiegend sp³-hybridisierten ta-C-Schichten im oberflächennahen Schichtbereich. Eine Ablation der Schicht findet nicht bzw. in einem im Vergleich zu den nachfolgenden Laserstrahlpulsen geringeren Umfang statt. Die Ausbildung der Strukturen in die Tiefe erfolgt durch die Applikation weiterer Laserstrahlpulse. Diese werden im Ergebnis der thermisch bedingten, partiellen Umwandlung der sp³-hybridisierten Bindungsanteile der ta-C-Schicht in sp²-hybridisierte Bindungsanteile im bereits bestrahlten Bereich der Abbildung besser absorbiert. In der Folge ist eine im Vergleich zum ersten Laserstrahlpuls höhere Abtragsrate für das Schichtmaterial festzustellen, welche die Strukturausbildung in die Tiefe nach sich zieht. Die, mit der Pulsdauer der Laserstrahlpulse des Excimerlasers im Zusammenhang stehende, thermische Belastung oberflächennaher Bereiche der ta-C-Schicht führt dazu, dass auch nachfolgende Pulse auf eine Oberfläche treffen, welche bedingt durch den erhöhten Anteil sp²-hybridisierter Bindungen eine verstärkte Absorption aufweist. Nach 3 bis 4 Laserstrahlpulsen ist die von der jeweiligen Gitterperiode abhängige, systembedingte Maximaltiefe der Strukturen erreicht. Mit der Aufbringung weiterer Laserstrahlpulse sinkt der bearbeitete Oberflächenbereich der Abbildung, bei Beibehaltung der Strukturtiefe der Gitterstrukturen, unter die umgebende, unbearbeitete Oberfläche ab.

Vor dem Hintergrund der für die Bearbeitung der ta-C-Schichten mit den Ultrakurzpulslasersystemen bereits festzustellenden Verminderung der Schichthärte in den strukturierten Oberflächenbereichen wurden für die mit dem Excimerlaser

strukturierten Schichten ebenfalls Härtemessungen angestrebt. Die in Kapitel 6.3.3. beschriebenen Risiken und Limitationen verhindern eine direkte Messung der Schichthärte in den die gewünschten Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ aufweisenden Oberflächenbereichen. Für die Erstellung der Proben zur Härtemessung wurde daher die Maske aus dem Strahlengang entfernt bzw. lediglich mit einer Blende im Strahlengang gearbeitet. Dabei kamen identische Strukturierungsparameter wie bei der Erzeugung der Gitterstrukturen zur Anwendung. Die resultierende, vollflächige und gleichförmige Bearbeitung der Oberflächenbereiche innerhalb der Abbildungsflächen stellt somit den Grenzfall einer gegen Null strebenden Breite der Stege bei der Erzeugung der Gitterstrukturen dar. Unter diesen Bedingungen ist der Energieeintrag in das Schichtmaterial im Abbildungsbereich und somit auch die thermische Belastung am größten. Für die Härtemessungen wurde, ebenso wie für die Auswertung der Härte bei der Strukturierung mit den Ultrakurzpulslasersystemen, das Ultra-Nanohärtemessgerät (UNHT³) der Firma Anton Paar GmbH genutzt. Die Messungen erfolgten unter Verwendung eines Berkovich Indenters mit einem Spitzenradius von 50 nm bei einer Prüfkraft F_N von 1 mN . An den $1,5\text{ }\mu\text{m}$ dicken ta-C-Schichten, welche auf einem Stahlsubstrat der Werkstoffnummer 1.2379 PM abgeschieden wurden, konnte in den unstrukturierten Bereichen ein Wert der Nanohärte von $39,8\text{ GPa} \pm 3,6\text{ GPa}$ bei einer Eindringtiefe des Indenters von $30,2\text{ nm}$ ermittelt werden. Bei Erhöhung der Prüfkraft näherten sich auch diese Werte der Nanohärte dem Werte in Tabelle 4-5 an. Mit einer Prüfkraft von 10 mN wurde an der gleichen Probe, bei einer Eindringtiefe des Indenters von $109,5\text{ nm}$, eine Nanohärte von $58,2\text{ GPa} \pm 2,8\text{ GPa}$ gemessen. Die im Ergebnis der Bearbeitung mit den Excimerlaserstrahlpulsen innerhalb der strukturierten Probenoberflächen ermittelten Werte der Nanohärte sind, unter Verwendung eines Berkovich Indenter mit einem Spitzenradius von 50 nm bei einer Prüfkraft F_N von 1 mN , in der nachstehenden Abbildung 6-27 dargestellt.

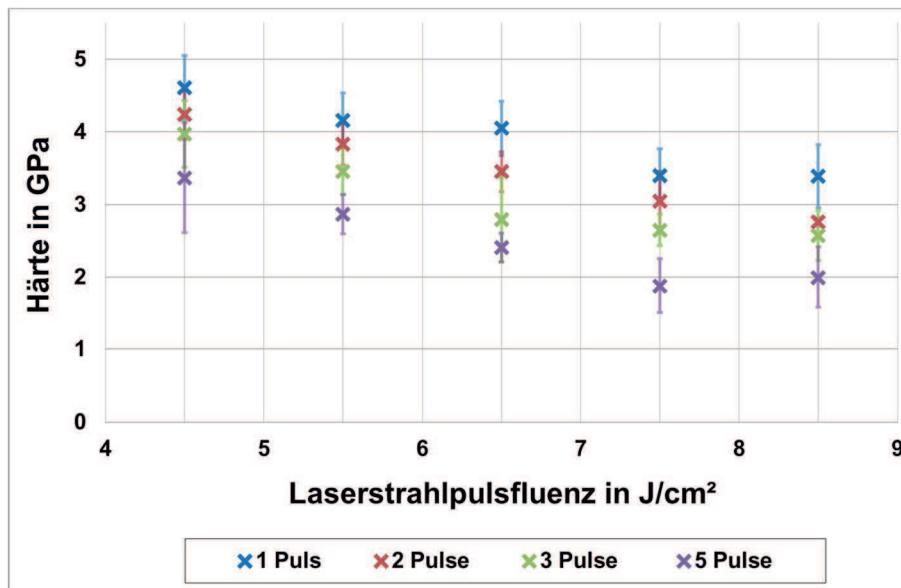


Abb. 6-27: Nanohärte der ta-C-Schichten nach der Laserbearbeitung für verschiedene Laserstrahlpulsfluenzen und Laserpulsanzahlen (Berkovich Indenter; Spitzenradius 50 nm; Prüfkraft $F_N = 1$ mN).

In Abhängigkeit von der Anzahl der applizierten Laserstrahlpulse sowie der Laserstrahlpulsfluenz ist eine Verringerung der Nanohärte der ta-C-Schichten in den strukturierten Oberflächenbereichen auf Werte im Bereich von 2 GPa bis 4,5 GPa festzustellen. Die Eindringtiefen des Berkovich Indenters (Spitzenradius 50 nm) in die Schichten betragen bei einer Prüfkraft F_N von 1 mN 100 nm bis 150 nm. Für hinsichtlich des Ausgangszustandes identische Schichten bedingt die Bearbeitung mit den Excimerlaserstrahlpulsen einen deutlich größeren Härteverlust für das Schichtmaterial ta-C, als dies bei der in Kapitel 6.3.3. beschriebenen Bearbeitung mit Laserstrahlpulsen im Femtosekundenbereich der Fall ist. Ursächlich hierfür sind die höheren thermischen Belastungen des Schichtmaterials infolge der längeren Pulsdauer der Excimerlaserstrahlpulse. Bei Applikation der Strukturierungsparameter, welche hinsichtlich der Erzeugung der Gitterstrukturen die besten Ergebnisse lieferten (3 bis 4 Laserstrahlpulse bei einer Laserstrahlpulsfluenz im Bereich von 6 J/cm² bis 8 J/cm²), weisen die ta-C-Schichten im bearbeiteten Bereich Nanohärten von 2,5 GPa bis 3 GPa (Berkovich Indenter; Spitzenradius 50 nm; Prüfkraft $F_N = 1$ mN) auf.

7. Experimentelle Untersuchungen zur Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in Mikroprägwerkzeugen

Die Untersuchungen zur Abformung der in die Oberfläche der Mikroprägwerkzeuge eingebrachten, beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen in die Zielmaterialien erfolgten unter den Vorgaben deren Übertragbarkeit auf die Strukturabprägung als Teilprozess einer durchgehenden Produktionsstrecke (Inline-Prägung). Hierbei wird die Bahngeschwindigkeit des zu prägenden Materials durch die Verarbeitungsgeschwindigkeit der verwendeten Verpackungsmaschinen vorgegeben. Diese beträgt für den untersuchten Prozess aktuell bis zu 132 m/min. Da die Geschwindigkeit der Materialbahn prozessbedingten Schwankungen unterliegt, sind weitere Rahmenvorgaben zur Gewährleistung der Prozesssicherheit zu erfüllen. Bedingt durch einen Anlagenstopp, welcher ausgehend von der Maximalgeschwindigkeit der Verpackungslinie innerhalb weniger 100 Millisekunden erfolgt (typisch 200 ms), dürfen keine kritischen Systemzustände auftreten. Hieraus resultieren besondere Anforderungen hinsichtlich der maximal für die Prägung anzuwendenden Temperaturen. Infolge spezifischer, die Funktionalität der Produktverpackung bedingender, Funktionsbeschichtungen der zu prägenden Zielmaterialien sind während des Prägeprozesses lediglich Temperaturen von maximal 80 °C bis 90 °C zulässig. Hierdurch wird, für eine Vielzahl der Versuchsmaterialien, die materialspezifische Glasübergangstemperatur T_g nicht erreicht. Die in Kapitel 3.3. beschriebenen Prozesse der Heißprägung sind daher nicht auf die durchgeführten Untersuchungen zur Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen übertragbar. Für die Prägeuntersuchungen kamen die in Kapitel 5.3. dargestellten Versuchsaufbauten zur Anwendung. In einem ersten Schritt erfolgten Untersuchungen zur statischen Abformung. Da die hierfür realisierten Versuchsanordnungen jedoch hinsichtlich ihrer erzielbaren Dynamik limitiert sind, wurden nachfolgend vordergründig Untersuchungen zur rotativen Abformung unter Verwendung der in Kapitel 5.3.2. beschriebenen Versuchsaufbauten durchgeführt.

7.1. Einfluss des Zielmaterials für die Abformung

Mit der Prägung in die Zielmaterialien wird die Erzeugung einer Negativabformung der in der Oberfläche der Prägewerkzeuge befindlichen periodischen Gitterstrukturen angestrebt. Die optische Wirkung der Gitterstrukturen wird dabei neben deren

geometrischer Gestaltung sowie deren Abmessungen maßgeblich durch die optischen Eigenschaften der Materialien bestimmt, in welche die Strukturübertragung erfolgt. Bei den im Vordergrund der Untersuchungen stehenden, in Kapitel 4.2. vorgestellten, Versuchsmaterialien wird eine Prägung in die Metallisierung bzw. die Metallfolie bezweckt. In der Folge wirken diese, die Gitterstrukturen aufweisenden, Oberflächen ihrerseits als Reflexionsgitter. Brillanz, Kontrast und Farbeindruck werden hierbei durch die Reflektivität der die beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen aufweisenden Oberflächenbereiche und die Qualität der Strukturübertragung, insbesondere deren Homogenität, bedingt.

7.1.1. Folienwerkstoffe

Im Ergebnis der herstellungsbedingt sehr geringen Schwankungen der Materialdicke sowie der Homogenität der Materialzusammensetzung konnten für die Prägung der Folienwerkstoffe sehr gut reproduzierbare und gleichbleibende Ergebnisse erzielt werden. Im Vergleich aller untersuchten Versuchsmaterialien sind hinsichtlich der optischen Wirkung die besten Ergebnisse für die Abformung in den Aluminiumfolien sowie der metallisierten PLA-Folie erreichbar. Für die im weichgeglühten Zustand vorliegende Aluminiumfolie aus dem Werkstoff EN AW-8079 zeigte sich kein signifikanter Einfluss der Materialstärke auf das Prägeergebnis. Auch konnte, bei für die Abformung der Gitterstrukturen hinreichenden Drücken, kein Einfluss der Oberflächenrauheit der Folien vor dem Prägen auf das Ergebnis der Abformung festgestellt werden. Die Oberflächenrauheiten der einlagig kaltgewalzten Aluminiumfolien sowie der raueren Seite der doppeltgewalzten Aluminiumfolie nähern sich bei diesen Drücken in den geprägten, unstrukturierten Bereichen den Rauheitswerten der Oberflächen der eingesetzten Prägewerkzeuge an. Für die Prägung in die kaltgewalzte Aluminiumfolie aus dem Werkstoff EN AW-1200 mussten, im Vergleich zur Abformung in die weichgeglühten Aluminiumfolien, den Unterschieden der Dehngrenze entsprechende, höhere Drücke appliziert werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Eine Variation der während der Prägung an der Oberfläche der Prägewerkzeuge sowie der Materialbahn selbst vorherrschenden Temperatur, ausgehend von Raumtemperatur bis hin zu 90 °C, zeigte erwartungsgemäß keinen Einfluss auf das Prägeergebnis.

Für die Prägung der metallisierten PLA-Folien bei Raumtemperatur konnte bei Applikation ausreichend hoher, nachfolgend in Kapitel 7.2.1. für die untersuchten

Materialen noch differenziert dargestellter, Drücke vergleichbare Ergebnisse wie für die Abformung in die Aluminiumfolien erzielt werden. Bedingt durch die geringe Rauheit und hohe Reflektivität stellen die optischen Effekte der Prägungen in diesen Folien, ebenso wie die Abformung in die Aluminiumfolien, das realisierbare Optimum hinsichtlich der strukturbedingt erreichbaren Brillanz, des Kontrastes sowie des Farbeindrucks für die untersuchten Versuchsmaterialien dar. Eine Prägung dieses Materials bei Oberflächentemperaturen der Prägwerkzeuge bzw. mit Vorheizung der Folie auf Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur des Materials von 60 °C war infolge eines auf dem Versuchsmaterial befindlichen Heißsiegellacks (Erweichungstemperatur größer 90 °C) nicht möglich. Bereits bei Oberflächentemperaturen von 60 °C kam es im Ergebnis der Druckbelastung während der Prägung zu einem Verkleben zwischen dem Prägwerkzeug und der PLA-Folie, welches ursächlich auf den Heißsiegellack zurückzuführen ist.

Im Gegensatz zur PLA-Folie, für welche bei der Prägung bei Raumtemperatur eine Abformung der Gitterstrukturen durch plastische Deformation der Oberfläche der Folie möglich war, ließen sich die in der Oberfläche der Prägwerkzeuge befindlichen Gitterstrukturen für die Prägung bei Raumtemperatur nicht in die PET-Folie übertragen. Das Material zeigt bei diesen Temperaturen weitgehend elastisches Deformationsverhalten. In der Folge wiesen die Oberflächen nach der Prägung keine bzw. nur sehr wenige, punktuell abgeformte Gitterstrukturen auf. Optische Effekte in der gewünschten Intensität und Homogenität sind nicht realisierbar. Eine Kompensation durch Erhöhung der aufgetragenen Prägedrücke ist in Hinblick auf die Prozesssicherheit nicht gegeben. Bei der rotativen Prägung kommt es durch die Zunahme der Querkontraktion bei der Aufbringung höherer Drücke zu einer Aufstauung des Folienmaterials vor der Kontaktkante zwischen Präge- und Gegenwalze. In der Folge steigt die Gefahr, dass die Folie mehrlagig übereinander gefaltet zwischen die Walzen gerät. Die hiermit einhergehende Verringerung der Kontaktfläche kann eine Schädigung der Walzen durch die sich ergebenden Druckspitzen nach sich ziehen und ist zu vermeiden. Mit der Erhöhung der Walzenoberflächentemperatur sowie der Vorheizung der PET-Folie auf 85 °C bis 90 °C konnte eine geringfügige Verbesserung der Abformung in die Oberflächen der Folie erreicht werden. Die für den maßgebenden Prozess der rotativen Prägung maximal erreichbaren Struktur Tiefen der abgeformten Gitter liegen im Bereich weniger 10 nm. Eine Strukturübertragung ist hinsichtlich der Oberfläche in weniger als zehn

Prozent der Bereiche gegeben, welche bei der Prägung mit den, die Gitterstrukturen aufweisenden, Funktionsflächen in Kontakt stehen.

Die Realisierung von als Reflexionsgittern wirkenden, geprägten Oberflächenbereichen setzt eine ausreichende, mechanische Beeinflussung der reflektierenden Schicht bzw. Oberfläche voraus. Dies kann durch plastische Deformation (z.B. für die Aluminiumfolien) oder durch mechanische Schädigung (Brechen der Metallisierung im Bereich der Stege für die Abformung der Gitterstrukturen des Prägwerkzeugs) erreicht werden. Für den vordergründigen Prozess der rotativen Abformung muss dies innerhalb vergleichsweise kurzer Zeiten erfolgen, worauf in Kapitel 7.2.2. noch genauer eingegangen wird. Die Ausnutzung des, beim Heißprägen ausgenutzten, viskoelastischen Materialverhaltens der Kunststoffe ist für die rotative Prägung nicht gegeben. Für die in [103 – 107] beschriebenen Heißprägungen ist die Skalierbarkeit der Strukturübertragung durch Variation der Prozessgrößen Temperatur, Druck sowie Zeitdauer der Lastaufbringung gegeben. In Hinblick auf die Rate der Strukturausformung bzw. Strukturübertragung in die Tiefe werden für diese viskoelastische Deformation Werte von maximal einigen 10 nm/s erreicht [105 – 107, 164]. Da sich für die rotative Prägung mit Bahngeschwindigkeiten bis zu 132 m/min im Minimum eine typische Zeitdauer der Druckaufbringung von 0,45 ms ergibt, können diese Prozesse, nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund geringerer Oberflächentemperaturen der zu prägenden Materialien, vernachlässigt werden. Maßgebend für die optischen Effekte der geprägten Oberflächenbereiche sind lediglich die in diesen Zeiträumen erreichbaren plastischen Deformationen oder mechanischen Schädigungen der die Reflexion bedingenden Oberflächen.

Eine hinreichende Differenzierung der Druckaufbringung zwischen geprägten und ungeprägten Oberflächenbereichen kann für die untersuchten Folienwerkstoffe bereits durch eine Freistellung der Funktionsflächen um 5 µm über die umgebenden Bereiche, in welchen keine Prägung erfolgen soll, erzielt werden. Bei diesen Freistellungshöhen sind für die rotative Abformung Bahnführung und Lagestabilität der geprägten Folienwerkstoffe innerhalb der Produktionsstrecke gewährleistet. Größere Freistellungshöhen führen dazu, dass die Materialführung bzw. die für den Materialtransport erforderliche Kraftaufbringung lediglich im Bereich der prägenden Oberflächenbereiche erfolgt. In der Folge können sich Probleme hinsichtlich der Planlage der geprägten Folien sowie der Führung der Materialbahn ergeben. Des

Weiteren geht mit der Vergrößerung der Freistellungshöhe eine Verminderung der quer zur Materialvorschubrichtung wirkenden Abstützung der geprägten Oberflächenbereiche insbesondere für hohe Prägedrücke einher. Erreichen diese Bereiche, in welchen neben der plastischen Deformation der Oberfläche in den druckbelasteten Regionen eine Materiallängung zu verzeichnen ist, kommt es für die geprägten Folien im Randbereich der freigestellten Funktionsflächen zu einem Materialaufwurf. Ursächlich hierfür ist die Querkontraktion im Zuge der Prägung. Die Funktionalität der geprägten Folien für den vorgesehen Einsatz als Verpackungsmaterial ist hierdurch nicht mehr gegeben. Geringere Freistellungshöhen der, die Gitterstrukturen aufweisenden, Funktionsflächen bedingen eine Verschlechterung der Differenzierung zwischen den Oberflächenbereichen, in welche die Strukturübertragung angestrebt ist, und den umliegenden, nicht strukturierten Oberflächen der Prägewerkzeuge. Die Anwendung dieser geringeren Freistellungshöhen bedingt die Aufbringung höherer Lasten um die erforderlichen Prägedrücke zu erreichen, wodurch sich die Prozessstabilität verringert.

Die Freistellung kann prinzipiell sowohl für die, die Gitterstrukturen aufweisende, Prägewalze bzw. den Prägestempel als auch die, glatte Oberflächen aufweisende, Gegenwalze bzw. den Druckstempel erfolgen. Unter prozesstechnologischen Bewertungskriterien ist die Freistellung der die Gitterstrukturen aufweisenden Prägewerkzeuge zu favorisieren. Im Fall der rotativen Abformung kann hierdurch auf eine Synchronisierung zwischen Prägewalze und Gegenwalze verzichtet werden. Auch verringert sich die Anzahl der Bearbeitungsschritte für die Fertigung der Gegenwalze. Da für die nachfolgend noch beschriebene Abformung in die Werkstoffverbunde insbesondere die Papierseite eine abrasive Wirkung bei der Prägung bedingt, ist die Gegenwalze in diesem Punkt stärkeren Belastungen ausgesetzt und die Freistellung der Prägewalze unter diesen Aspekten vorteilhaft.

7.1.2. Werkstoffverbunde

Die Abformung der in den Oberflächen der Prägewerkzeuge befindlichen Gitterstrukturen in die Werkstoffverbunde stellt, vor dem Hintergrund deren z.T. inhomogenen Materialzusammensetzung und des mehrlagigen Aufbaus, eine besondere Herausforderung dar. Wie bereits für die Folienwerkstoffe ist auch für die untersuchten Werkstoffverbunde eine Freistellung der Funktionsflächen über die umgebenden Bereiche erforderlich, um eine ausreichende Differenzierung der

Druckaufbringung zwischen geprägten und ungeprägten Oberflächenbereichen sicherzustellen. Für den Werkstoffverbund Alu 30 gsm. (siehe Kapitel 4.2.) haben sich Höhen der Freistellung von 10 μm als ausreichend erwiesen. An den Versuchsmaterialien Alu 50 gsm. und Met. 50 gsm. konnten die besten Ergebnisse bei Freistellungshöhen von 15 μm erreicht werden. Die Verwendung des metallisierten Werkstoffverbundes Met. 80 gsm. macht, infolge eines Grundpapiers mit einem Flächengewicht von 80 g/m^2 , die Freistellung der Funktionsflächen um 20 μm erforderlich. Im Gegensatz zu den in Kapitel 7.1.1. beschriebenen, druckabhängig möglichen, problematischen Zuständen während der Prägung der Folienwerkstoffe infolge der Querkontraktion sind diese für die Prägung der papierbasierten Werkstoffverbunde weitgehend vernachlässigbar. Für die untersuchten papierbasierten Werkstoffverbunde und Prägedrucke bis 300 N/mm^2 lag die nach der Prägung im Maximum zurückbleibende, irreversible Querdehnung im Bereich kleiner 1 % der geprägten Bahnbreite. Die mit der Freistellung der Funktionsflächen bereits für die Prägung der Folienwerkstoffe beschriebenen Vorgaben zur Gewährleistung der Prozesssicherheit und Prozessstabilität sind für die Prägung der Werkstoffverbunde in gleicher Weise zu berücksichtigen.

Bedingt durch die, für die Werkstoffverbunde eingesetzten, faserbasierten Grundpapiere kommt es bei der Prägung gegen harte, steife Oberflächen des Gegenlagers, wie diese bei Druckstempeln oder Gegenwalzen aus Stahl der Fall ist, zu inhomogenen Prägeergebnissen. Während die Prägungen in die in Kapitel 7.1.1. beschriebenen Aluminiumfolien und die PLA-Folien bei entsprechender Parameterwahl sehr homogen hinsichtlich der Flächendeckung und ihrer optischen Wirkung sind, zeigt sich für die Prägungen in die Werkstoffverbunde deutlich der Einfluss der Textur der jeweiligen Grundpapiere. Deren Schwankungen hinsichtlich der Materialdicke sowie der Materialdichte führen insbesondere bei niedrigen Prägedrucken zu einem fleckigen, die Textur des Grundpapiers widerspiegelnden Erscheinungsbild der geprägten Oberflächenbereiche. Wenngleich Bereiche höherer Materialdichte und Materialstärken in der Vergrößerung betrachtet eine sehr gute Strukturübertagung aufweisen, wirkt bei Betrachtung der Prägungen mit dem Auge diese Ungleichmäßigkeit der optischen Effekte störend und entspricht nicht dem angestrebten Erscheinungsbild. Exemplarisch ist dies in Abbildung 7-1 für die Prägung in den Werkstoffverbund Met. 50 gsm. aufgezeigt.

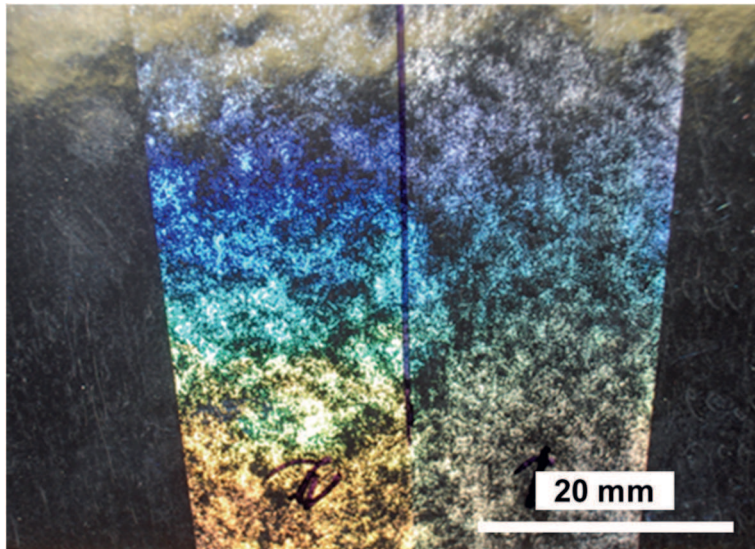


Abb. 7-1: Foto einer Prägung im Werkstoffverbund Met. 50 gsm. (Prägedruck $p = 100 \text{ N/mm}^2$; $60 \text{ }^\circ\text{C}$ Oberflächentemperatur der Prägewalzen).

Mit der Erhöhung des Prägedrucks gehen eine Vergrößerung der geprägten Oberflächenanteile sowie eine Verbesserung der Brillanz der beugungsoptischen Effekte der Gitterstrukturen einher. Die Strukturübertragung im gesamten, dem nominalen Prägedruck ausgesetzten, Oberflächenbereich ist für die untersuchten papierbasierten Werkstoffverbunde infolge der beschriebenen materialbedingten Schwankungen jedoch nicht möglich. Materialabhängig ist bei Applikation der, nachfolgend in Kapitel 7.2.1. ausgeführten, Prägedrucke die Abformung der Gitterstrukturen in 95 % bis 98 % der druckbelasteten Oberflächenbereiche möglich. Durch die Verwendung zähelastischer Puffermaterialien zwischen Druckstempel bzw. Prägewalze und dem jeweiligen Werkstoffverbund kann eine signifikante Verbesserung der Homogenität sowie der Flächendeckung der Prägungen in den Werkstoffverbunden erreicht werden. Die Ergebnisse der hierzu durchgeführten Untersuchungen werden in Kapitel 7.4. beschrieben.

Im Vergleich der untersuchten Werkstoffverbunde zeigte sich, dass mit der Erhöhung der Flächengewichte der verwendeten Grundpapiere sowie der Verringerung deren Oberflächenrauheit deutliche Verbesserungen hinsichtlich der realisierbaren Prägeergebnisse darstellbar sind. Unter den in Kapitel 4.2. hinsichtlich des Aufbaus näher charakterisierten Werkstoffverbunden liefert das Versuchsmaterial Alu 30 gsm. die schlechtesten Ergebnisse für die Strukturabformung. Bei dem verwendeten Grundpapier (30 g/m^2 Seidenpapier) handelt es sich um lediglich maschinenverglastes, gebleichtes Kraftpapier ohne Funktions- oder Glattstrich. In Verbindung mit der Leimkaschierung gegen die $6 \text{ }\mu\text{m}$ dicke Aluminiumfolie resultiert

bei der Prägung eine ausgeprägte Übertragung der Textur des Papiers. Das für den Werkstoffverbund Alu 50 gsm. eingesetzte Grundpapier ist, bis auf das Flächengewicht von 50 g/m², identisch mit dem des Werkstoffverbundes Alu 30 gsm.. Mit der Erhöhung des Flächengewichtes des Grundpapiers geht eine Zunahme der Materialstärke des zu prägenden Werkstoffverbundes einher. Hierdurch steht für die Prägung mehr komprimierbares Volumen zur Verfügung, wodurch in der Folge eine gleichmäßigere Druckverteilung im Fasergeflecht der Grundpapiere erzielt wird und somit bessere beugungsoptische Effekte der abgeformten Gitterstrukturen erreicht werden können. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Homogenität der Druckverteilung innerhalb der Werkstoffverbunde besteht durch Erhöhung des Füllstoffanteils der Grundpapiere. Die hierfür eingesetzten Partikel anorganischer Substanzen, typisch ist die Verwendung von Kreide oder Kaolin, werden in den Zwischenräumen des Fasergeflechts eingelagert [165]. Sie gehen dabei keine Verbindung mit den Fasern ein, welche typische Durchmesser von ca. 20 µm (ungequetschte Zellulose aus Laubhölzern) bis ca. 35 µm (ungequetschte Zellulose aus Nadelhölzern) aufweisen. Der Anteil der dem Papier zusetzbaren Füllstoffe ist jedoch herstellungsbedingt limitiert. Mit Zunahme der Partikelgröße und des Partikelgewichtes vergrößert sich der Anteil der Partikel, welche bei der Blattherstellung wieder ausgespült werden. Des Weiteren bewirkt die Erhöhung des Füllstoffanteils im Papier eine Verringerung der Faserberührungspunkte, wodurch sich die Papierfestigkeit verringert. Durch Zellstoffmahlung, welche schneidend oder quetschend erfolgen kann, ist eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Lastverteilung innerhalb der Grundpapiere der untersuchten Werkstoffverbunde bei der Prägung gegeben. Hierdurch wird verfahrensabhängig eine Verringerung der Dicke der Zellulosefasern erreicht. Des Weiteren erhöht sich mit dem Mahlungsgrad der Zellulosefasern der Bruchwiderstand der Papiere, bedingt jedoch auch einen Abfall des Durchreisswiderstandes. Durch Fibrillierung der Zellulosefasern (typischer Mahlungsgrad größer / gleich 60 %) des Grundpapiers kann der Effekt der Stabilisierung der Lastverteilung weiter verstärkt werden. Infolge des hiermit einhergehenden Abfalls des Reißwiderstandes sind derartige Papiere jedoch technologisch nicht für Verpackungen anwendbar, welche mit einer kontinuierlichen Zuführung des Verpackungsmaterials in Rollenform arbeiten. Die zur Gewährleistung der prozesssicheren Zuführung des Verpackungsmaterials erforderliche Bahnspannung (Zugspannung) wäre für diese Papiere kritisch. Eine Kompensation

durch Laminierung bzw. Kaschierung mit Folien, für den angestrebten Anwendungsfall wären hier insbesondere Aluminiumfolien oder metallisierte Kunststofffolien von Interesse, ist möglich. Die Herstellungskosten derartiger Werkstoffverbunde liegen jedoch deutlich über denen der derzeit in Anwendung befindlichen, papierbasierten Werkstoffverbunde und erschweren eine Platzierung am Markt. Eine Verbesserung der Prägeergebnisse ist für die aluminiumkaschierten Werkstoffverbunde durch die Vergrößerung der Materialdicke der aufkaschierten Aluminiumfolien gegeben. Hiermit einhergehende Kostensteigerungen stellen sich jedoch ebenfalls als kritisch hinsichtlich der kommerziellen Umsetzung dar.

Die metallisierten Werkstoffverbunde Met. 50 gsm. und Met. 80 gsm. zeigen bei vergleichbaren Prägedrücken durchgehend bessere Ergebnisse hinsichtlich der Homogenität der Prägung sowie eine verminderte Abformung der Textur der Grundpapiere als die aluminiumkaschierten Werkstoffverbunde Alu 30 gsm. und Alu 50 gsm.. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf die, auf deren Grundpapiere ausgebrachten, Strichpasten. Durch eine ein- bzw. beidseitige Aufbringung der aus Streichpigmenten, Bindemitteln und Hilfsstoffen bestehenden Strichpasten können die Eigenschaften der so behandelten Oberflächen den prozesstechnologischen Erfordernissen angepasst werden. Hierbei sind insbesondere die mit dem Strichauftrag einhergehende Verringerung der Oberflächenrauheit sowie die Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Papierbahnoberfläche vorteilhaft und bedingen eine homogenere Lastverteilung bei der späteren Prägung. Im Zusammenspiel mit der Viskosität und Zusammensetzung der für die Vorlackierung eingesetzten Lacke bedingen die Strichpasten die erforderlichen Barriereigenschaften bzw. die Regulierung der Saugfähigkeit und verhindern ein Eindringen des Lacks in das Grundpapier. Eine Nutzung dieser Papiere auch für die aluminiumkaschierten Werkstoffverbunde ist prinzipiell möglich. Da die Trocknung des hierfür eingesetzten wässrigen Stärkeklebers nur von der Papierseite aus erfolgen kann, ergeben sich infolge der verminderten Saugfähigkeit, durch den Auftrag der Strichpasten, längere Trocknungszeiten bzw. es werden höhere Trocknungstemperaturen benötigt. Dies führt zu höheren Fertigungskosten. Ein Einsatz ist daher vordergründig für metallisierte Papiere gegeben, welche Kosteneinsparungen durch die dünnen, aufgedampften Aluminiumschichten im Vergleich zu den Aluminiumfolien der kaschierten Werkstoffverbunde aufweisen. Diese Einsparpotentiale rechtfertigen die höheren Kosten für die Verwendung der beschriebenen, mit Strichpasten behandelten Papiere

sowie die Lackierung vor und gegebenenfalls nach der Metallisierung. Der Vergleich der für die metallisierten Werkstoffverbunde eingesetzten Grundpapiere zeigt, wie bereits für die aluminiumkaschierten Werkstoffverbunde beschrieben, eine Verbesserung der Homogenität der Prägung mit der Erhöhung der Flächengewichte der Grundpapiere. Bedingt durch die geringere Oberflächenrauheit der mit Vorstrich und Glättstrich beschichteten, im Nachgang lackierten und metallisierten, Funktionsseite des Grundpapiers des Werkstoffverbundes Met. 80 gsm. sowie einer leicht gestrichenen Rückseite ermöglicht dieses Versuchsmaterial bei vergleichbaren Bedingungen deutlich bessere Prägeergebnisse als das Grundpapier des Werkstoffverbundes Met. 50 gsm. mit einem Flächengewicht von 50 g/m². Die metallisierten Werkstoffverbunde Met. 50 gsm. und Met. 80 gsm. verfügen beide über eine Vorlackierung mit einer Gesamtauftragsmenge von 1,6 g/m² eines wasserbasierten Lacks gleicher Zusammensetzung. Infolge der zweimaligen Lackierung mit einer Auftragsmenge von jeweils 0,8 g/m² können für das Versuchsmaterial Met. 80 gsm. glattere Oberflächen erreicht werden. Hinsichtlich der Metallisierung unterscheiden sich die Werkstoffverbunde Met. 50 gsm. und Met. 80 gsm. nicht. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Scheuerbeständigkeit wurde im Nachgang der Metallisierung für den Werkstoffverbund Met. 50 gsm. noch eine geringe Menge eines ammoniakstabilisierten Polyethylenwachses als Toplack aufgebracht. Bedingt durch die bessere Lastverteilung während der Prägung sowie die geringere Oberflächenrauheit liefert der Werkstoffverbund Met. 80 gsm. deutlich bessere Ergebnisse der Strukturabformung als der Werkstoffverbund Met. 50 gsm..

Untersuchungen an weiteren Versuchsmaterialien mit Variation der Auftragsmengen der genutzten Vorlacke zeigten, dass mit der Erhöhung der Auftragsmengen eine weitere Verbesserung der Prägeergebnisse erreicht werden kann. Die hiermit einhergehenden Kostensteigerungen sowie das Risiko des Aufbrechens der Metallisierung bei der Prägung oder bei Verformungen der Materialbahn setzen jedoch Grenzen hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit. Spezifische Ausführungen zur Weiterentwicklung und Anpassung der Werkstoffverbunde für die Mikroprägung werden nachfolgend in Kapitel 7.5. gesondert dargelegt.

Mit der Aufbringung von Lacken oder Funktionsbeschichtungen auf die Metallisierung bzw. die Aluminiumfolie der Werkstoffverbunde geht insbesondere mit der Zunahme deren Schichtdicke eine Verringerung der Strukturübertragung in die reflektierende Metalloberfläche einher. In der Folge ist in den geprägten Oberflächenbereich eine

Verminderung der optischen Effekte der korrespondierenden Gitterstrukturen festzustellen. Das auf der Aluminiumfolie der kaschierten Werkstoffverbunde Alu 30 gsm. und Alu 50 gsm. befindliche Gleitmittel bedingt ob der geringen Auftragsmengen von $0,02 \text{ g/m}^2$ keine nachteiligen Auswirkungen auf die Strukturübertragung während der Prägung. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte eine Strukturübertragung der Gitterstrukturen der Prägewerkezeuge in die reflektierenden Metalloberflächen der Werkstoffverbunde bis zu einer Auftragsstärke der Lacke oder Funktionsbeschichtungen von 5 g/m^2 (dies entspricht einer Schichtdicke von ca. $5 \text{ }\mu\text{m}$) auf die Metallisierung bzw. die Aluminiumfolie nachgewiesen werden. Die optischen Effekte der als Reflexionsgitter wirkenden, geprägten, reflektierenden Metalloberfläche sind bei diesen Auftragsstärken jedoch nur unzureichend sichtbar. Mit der Zunahme der Schichtdicke geht für die Prägung ein Verlust der Differenzierung der Kraftaufbringung bzw. der Druckunterschiede zwischen den Gräben und Stegen der Gitterstrukturen einher. Eine hinreichend unterscheidbare, optische Wirkung der abgeformten Gräben bzw. Stege ist nicht mehr gegeben. Hierdurch sinkt deren Effektivität bezüglich der beugungsoptischen Wirkung. Des Weiteren geht mit der Aufbringung transparenter oder teiltransparenter Lacke und Funktionsbeschichtungen auf der metallisierten bzw. aluminiumkaschierten Seite ein Intensitätsverlust der an der Metalloberfläche des Werkstoffverbundes reflektierten Strahlung einher, welcher ebenfalls eine verminderte optische Wirkung der Gitterstrukturen bedingt. Ursächlich ist dies auf die brechzahlbedingten Reflexionsverluste an der und / oder bei mehrmaliger Lackierung den Lackoberflächen sowie deren Transparenz zurückzuführen. Unterschiedliche Lackzusammensetzungen sind durch sich hieraus ergebende, differierende Brechzahlen ebenfalls zu berücksichtigen. Bei größeren, in einem Aufzug aufgetragenen, Auftragsmengen steigt für die derzeit im industriellen Einsatz befindlichen Lacke das Risiko der Eintrübung dieser Lacke durch Einschluss von Luftblasen, unzureichende Trocknung oder das Ausgasen flüchtiger Lackbestandteile. Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen ist festzustellen, dass zur Erzielung der für die jeweiligen Versuchsmaterialien besten Prägeergebnisse hinsichtlich Brillanz und optischer Wirkung der abgeformten Gitterstrukturen auf die Aufbringung von Toplacken oder Funktionsbeschichtungen auf der metallisierten bzw. aluminiumkaschierten Seite verzichtet werden sollte. Sind diese für den funktionalen Einsatz der geprägten Verpackungsmaterialien unvermeidlich, so ist deren

Gesamtschichtdicke nach Möglichkeit kleiner als die Tiefe der in die Oberfläche der Prägewerkzeuge eingebrachten Gitterstrukturen zu wählen. Für Schichtdicken bis 200 nm zeigten sich keine signifikanten Verschlechterungen der Prägeergebnisse unabhängig von der Gitterperiode der abgeformten Strukturen. Die Beschreibung der ermittelten Abhängigkeiten der Abformung von der Oberflächentemperatur während des Prägeprozesses wird für die untersuchten Werkstoffverbunde in Kapitel 7.2.3. gegeben.

Eine Strukturübertragung durch Prägung war für die in Kapitel 4.2.2. genannten, ebenfalls in die Versuchsmatrix aufgenommenen, transfermetallisierten Werkstoffverbunde nicht möglich. Die hierfür zum Einsatz kommenden, an der Oberfläche der Werkstoffverbunde befindlichen Lacke weisen verfahrensbedingt eine hohe Elastizität auf. Im Ergebnis der Prägung ist, durch die weitgehend elastische Verformung dieser Lacke und die unzureichende Differenzierung der Kraftaufbringung bzw. der Druckunterschiede zwischen den Gräben und Stegen der Gitterstrukturen, keine Übertragung der beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen in die reflektierende Metallschicht gegeben.

7.2. Einfluss der Prägeparameter

Für den Prozess der Strukturübertragung in die Zielmaterialien sind insbesondere die in Anwendung gebrachten Parameter während der Prägung entscheidend. Hierbei setzt die Realisierung von als Reflexionsgittern wirkenden, geprägten Oberflächenbereichen eine ausreichende, mechanische Beeinflussung der reflektierenden Schicht bzw. Oberfläche voraus. Wie in Kapitel 7.1.1. für die Folienwerkstoffe und in Kapitel 7.1.2. für die Werkstoffverbunde beschrieben, kann dies durch plastische Deformation (z.B. für die Aluminiumfolien) oder durch mechanische Schädigung (Brechen der Metallisierung im Bereich der Stege für die Abformung der Gitterstrukturen des Prägewerkzeugs) erreicht werden. Die vollständige Ausformung des Negativs, der in die Oberflächen der Mikroprägewerkzeuge eingebrachten Gitterstrukturen, in die Tiefe ist hierfür nicht erforderlich. Diese kann insbesondere für die Prägung der papierbasierten Werkstoffverbunde, infolge der auf die Textur der Grundpapiere zurückzuführenden, materialbedingten Inhomogenität, auch durch Optimierung und Anpassung der Struktur- und Prozessparameter, nicht sichergestellt werden. Maßgebend für die optische Wirkung ist die vollflächige Abformung der in der Oberfläche der

Prägewerkzeuge befindlichen Gitterstrukturen im gesamten druckbelasteten Oberflächenbereich. Als Kriterium zur Beurteilung der Qualität der Strukturübertragung kann daher der geprägte Oberflächenanteil herangezogen werden. Dieser beschreibt das Verhältnis der Oberflächenbereiche in welchen nach der Prägung, im Ergebnis einer ausreichenden, mechanischen Beeinflussung der reflektierenden Schicht bzw. Oberfläche, Gitterstrukturen nachweisbar sind, zu der die Gitterstrukturen aufweisenden, dem Prägedruck ausgesetzten Gesamtfläche des Prägewerkzeuges. Die quantitative Ermittlung dieser Oberflächenanteile in den Versuchsmaterialien erfolgte durch messtechnische Auswertung der jeweiligen Prägungen unter Verwendung des Lichtmikroskops VHX-100 der Firma Keyence.

7.2.1. Druck

Die zur Realisierung einer homogenen, vollflächigen Abformung der Gitterstrukturen erforderlichen Drücke sind abhängig vom zu prägenden Versuchsmaterial. Eine Übersicht dieser für die untersuchten Materialien ermittelten, nachfolgend als Mindestdruck bezeichneten Werte ist in Tabelle 7-1 gegeben.

Tab. 7-1: Übersicht der materialspezifischen Mindest- und Maximaldrücke für die Prägung bei Raumtemperatur.

Zielmaterial der Abformung	Mindestdruck für homogene, vollflächige Abformung der Gitterstrukturen	zulässiger Maximaldruck
Aluminiumfolie EN AW-8079; weichgeglüht; Materialstärke 6 µm	40-50 N/mm ²	200 N/mm ²
Aluminiumfolie EN AW-8079; weichgeglüht; Materialstärke 38 µm	40-50 N/mm ²	200 N/mm ²
Aluminiumfolie EN AW-1200; kaltgewalzt; Materialstärke 20 µm	125 N/mm ²	300 N/mm ²
PET-Folie (Mitsubishi Hostaphan® RHS); metallisiert; Materialstärke 30 µm	Keine bzw. sehr wenige, punktuell abgeformte Gitterstrukturen in Folge des weitgehend elastischen Deformationsverhaltens	
PLA-Folie; metallisiert; Materialstärke 30 µm	30-40 N/mm ²	200 N/mm ²
Werkstoffverbund Alu 30 gsm.	125-140 N/mm ²	250-300 N/mm ²
Werkstoffverbund Alu 50 gsm.	110-125 N/mm ²	250-300 N/mm ²
Werkstoffverbund Met. 50 gsm.	90-100 N/mm ²	300 N/mm ²
Werkstoffverbund Met. 80 gsm.	75-100 N/mm ²	300 N/mm ²

Mit einer Erhöhung der während der Prägung applizierten Drücke geht für die Versuchsmaterialien bis zum Erreichen des Mindestdrucks eine Zunahme der geprägten Oberflächenanteile einher. Exemplarisch ist dies für die statische Prägung des Werkstoffverbundes Met. 50 gsm. bei Raumtemperatur in der nachstehenden Abbildung 7-2 dargestellt.

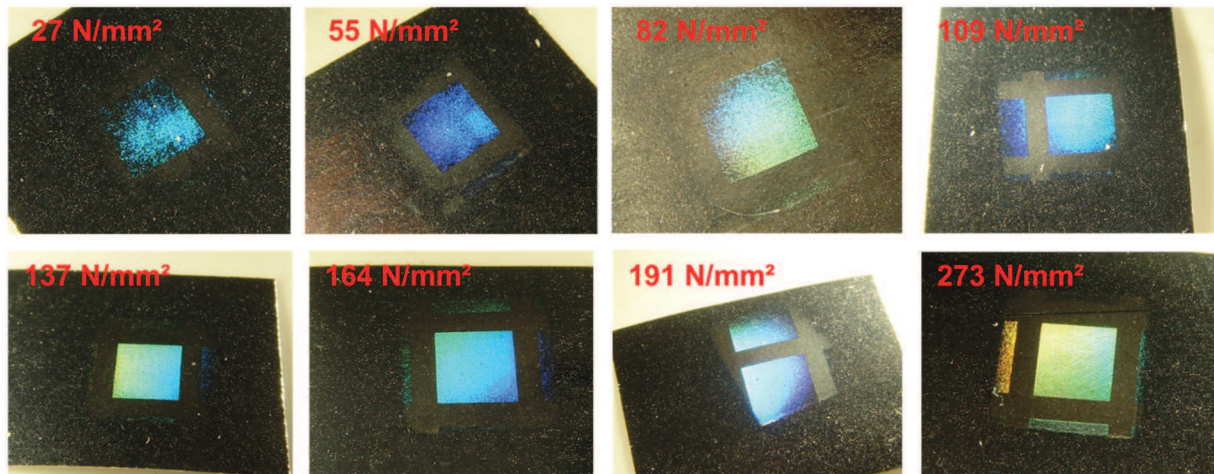


Abb. 7-2: Aufnahmen der bei verschiedenen Drücken im Werkstoffverbund Met. 50 gsm. realisierten Prägungen bei Bestrahlung mit Weißlicht (Nutzung von Teflon als Puffermaterial; Größe des Prägestempels: 6 mm x 6,1 mm; Größe der Quadrate 3 mm x 3 mm; Prägung bei Raumtemperatur).

Durch Verwendung von Puffermaterialien zwischen Druckstempel bzw. Prägewalze und den Werkstoffverbunden kann wie in Abbildung 7-2 erkennbar, eine signifikante Verbesserung der Homogenität sowie der Flächendeckung der Prägungen in den papierbasierten Werkstoffverbunden erreicht werden. Die Abformung der Gitterstrukturen in nahezu 100 % der druckbelasteten, mit den Gitterstrukturen des Prägewerkzeuges in Kontakt stehenden Oberflächen ist hierdurch möglich. Erfolgt die Prägung ohne Verwendung derartiger zähelastischer, die materialbedingten Inhomogenitäten der papierbasierten Werkstoffverbunde ausgleichenden Puffermaterialien, so werden in diesen typische Werte der geprägten Oberflächenanteile im Bereich von im Maximum 95 % bis 98 % erreicht. Eine Erhöhung der während der Prägung aufgetragenen Drücke über den materialspezifischen Mindestdruck hinaus bedingt keine signifikanten Zuwächse der geprägten Oberflächenanteile. Die Brillanz und optische Wirkung der abgeformten Gitterstrukturen kann hierdurch nicht bzw. nur geringfügig gesteigert werden. Vor dem Hintergrund der Gewährleistung einer ausreichenden Prozesssicherheit hat sich die

Prägung bei Drücken von 50 N/mm² oberhalb des materialspezifischen Mindestdrucks bewährt. Mit der Überschreitung des in Tabelle 7-1 für die Versuchsmaterialien angegebenen, zulässigen Maximaldrucks geht ein Verlust deren Funktionalität als Verpackungsmittel und / oder des Materialtransports innerhalb der Produktionsstrecke einher. Für die Folienwerkstoffe kommt es bei Drücken oberhalb des zulässigen Maximaldrucks infolge der Querkontraktion zu einer Aufstauung des Folienmaterials vor der Kontaktkante zwischen Präge- und Gegenwalze. Hierdurch steigt das bereits in Kapitel 7.1.1. beschriebene Risiko hinsichtlich einer möglichen Schädigung der Prägewerkzeuge. Mit der Überschreitung des zulässigen Maximaldrucks geht bei den aluminiumkaschierten Werkstoffverbunden Alu 30 gsm. und Alu 50 gsm. ein partielles Versagen des Kaschierklebers einher. In der Folge ist in den betroffenen Oberflächenbereichen eine Ablösung der Aluminiumfolie vom Grundpapier sichtbar. Die metallisierten Werkstoffverbunde Met. 50 gsm. und Met. 80 gsm. erlauben die Druckaufbringung bis zu 300 N/mm². Höhere Drücke führen zu einem Aufbrechen des Vorlacks. Dies birgt nicht nur die Gefahr der Verschmutzung der Prägewerkzeuge und Verpackungsmaschinen durch die Ablösung von Lackpartikeln, sondern bedingt in der Folge ebenfalls eine Verringerung der geprägten Oberflächenanteile. Beispielhaft ist dies in der nachfolgenden Abbildung 7-3 für die Prägung des Werkstoffverbundes Met. 50 gsm. aufgezeigt.

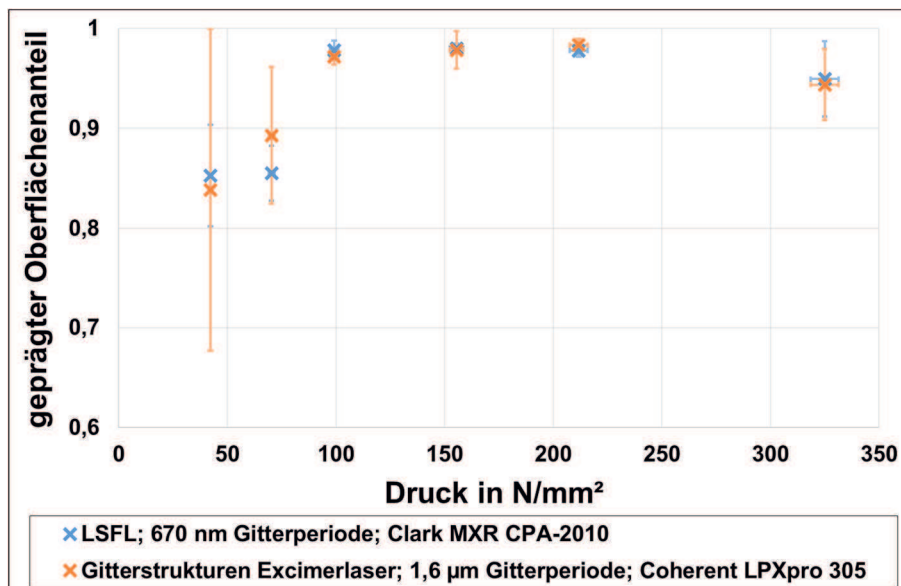


Abb. 7-3: Geprägter Oberflächenanteil im Werkstoffverbund Met. 50 gsm. für unterschiedliche Prägedrücke und Gitterstrukturen (rotative Prägung bei Raumtemperatur; Materialvorschubgeschwindigkeit 150 m/min).

Bei den angegebenen Drücken handelt es sich um errechnete Werte auf Basis der mittels Kraftaufnehmer gemessenen Normalkraft und der für die jeweiligen Versuchskonfigurationen ermittelten Kontaktflächen während der Prägung. Zur Beurteilung der Homogenität der Druckaufbringung wurden des Weiteren Druckmessfolien vom Typ Fujifilm Prescale in verschiedenen Ausführungen hinsichtlich der auswertbaren Druckbereiche genutzt. Diese erlauben nach vorheriger Kalibrierung ebenfalls die direkte Messung des Drucks sowie der Druckverteilung für die Kontaktflächen der Prägewalzen bei der rotativen Prägung.

7.2.2. Zeitdauer der Druckaufbringung

Die Untersuchungen zum Einfluss der Zeitdauer der Druckaufbringung auf das Prägeergebnis erfolgten für den vordergründigen Prozess der rotativen Prägung im Zeitbereich von 0,14 ms bis 273 ms. Dies entspricht einer korrespondierenden Materialvorschubgeschwindigkeit von 440 m/min bis 0,22 m/min. Für Prägedrucke größer / gleich der in Kapitel 7.2.1. aufgezeigten, materialspezifischen Mindestdrücke konnte für den untersuchten Zeitbereich kein Einfluss der Zeitdauer der Druckaufbringung auf die Abformung der Gitterstrukturen festgestellt werden.

7.2.3. Temperatur

Vor dem Hintergrund spezifischer, die Funktionalität der Produktverpackung bedingender, Funktionsbeschichtungen der zu prägenden Zielmaterialien erfolgte die Variation der Temperatur im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen lediglich im Bereich der Prägung bei Raumtemperatur bis hin zu einer maximalen Oberflächentemperatur von 90 °C. Mit der Erhöhung der Oberflächentemperatur konnte für die Prägung der Folienwerkstoffe, wie bereits in Kapitel 7.1.1. beschrieben, keine bzw. eine lediglich geringfügige Verbesserung der Strukturübertragung erreicht werden. Als besonders kritisch hinsichtlich der Gewährleistung der Prozesssicherheit ist hierbei das für die PLA-Folie festzustellende, partielle Verkleben der Folie mit dem Prägewerkzeug, infolge des auf dem Folienmaterial befindlichen Heißsiegelacks, zu beurteilen. Dieser Effekt tritt, bedingt durch die Druckbelastung während der Prägung, bereits bei Temperaturen (ab 60 °C) deutlich unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G von größer / gleich 90 °C des Heißsiegelacks auf.

Für die aluminiumkaschierten, papierbasierten Werkstoffverbunde war erwartungsgemäß kein Einfluss der Temperatur auf das Prägeergebnis feststellbar.

Ein Vorheizen dieser Werkstoffverbunde führt zu einer Verringerung der Restfeuchte des Grundpapiers sowie des Kaschierklebers. Dies wirkt sich negativ auf den Materialtransport innerhalb der Verpackungsmaschinen aus, da mit der Verminderung der Restfeuchte des Papiers eine Zunahme der Neigung zum Zusammenrollen quer zur Vorschubrichtung des Materials einhergeht. Kritisch ist dieses Materialverhalten insbesondere für den Bereich innerhalb der Verpackungsmaschinen, in welchem der Zuschnitt, das Falten und das Verpacken der jeweiligen Produkte erfolgt. Des Weiteren bedingt die Verringerung der Restfeuchte des Kaschierklebers tendenziell niedrigere zulässige Maximaldrücke, bei welchen eine Ablösung der Aluminiumfolie vom Grundpapier festzustellen ist. Auf Grundlage der an den Versuchsmaterialien durchgeführten Untersuchungen stellt sich die Prägung bei erhöhten Oberflächentemperaturen lediglich für die metallisierten Werkstoffverbunde als vorteilhaft dar. Mit der Erhöhung der Oberflächentemperatur auf 85 °C bis 90 °C kann für die Werkstoffverbunde Met. 50 gsm. und Met. 80 gsm. eine Verringerung der aufzubringenden Prägedrücke um 25 % bis 35 % im Vergleich zur Prägung bei Raumtemperatur erreicht werden. Geprägte Oberflächenanteile oberhalb der im Maximum typischerweise ermittelten Werte im Bereich von 95 % bis 98 % sind hierdurch jedoch nicht möglich.

7.3. Einfluss der Strukturparameter

Die Gitterperiode, die Ausrichtung und die geometrische Gestalt der in die Oberflächen der Prägwerkzeuge eingebrachten Gitterstrukturen bedingen nicht nur deren optische Wirkung bzw. die optische Wirkung deren Abformung in die untersuchten Versuchsmaterialien. Auch für den Prozess der Prägung in die Zielmaterialien konnten nachfolgend dargestellte Abhängigkeiten der Strukturübertragung von den Strukturparametern ermittelt werden.

7.3.1. Gitterperiode und Gitterorientierung

In den Kapiteln 6.2. bis 6.5. wurden verschiedene im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Verfahren zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich 2 µm vorgestellt. Insbesondere die Erzeugung von LSFL unter Nutzung ultrakurzer Laserstrahlpulse in Fokusverfahren sowie die Realisierung der Gitterstrukturen mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren haben sich hierbei bewährt. Für die mit diesen Verfahren erzeugten Strukturen zeigte

sich hinsichtlich der Prägung in die Zielmaterialien, bei Anwendung von Prägedrücken größer / gleich dem in Tabelle 7-1 aufgeführten, materialspezifischen Mindestdruck, kein Einfluss der Gitterperiode auf den geprägten Oberflächenanteil. Exemplarisch ist dies in Abbildung 7-3 für die LSFL mit einer Gitterperiode von 670 nm im Vergleich zu mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren erzeugten Strukturen mit einer Gitterperiode von 1,6 μm und Prägung im Werkstoffverbund Met. 50 gsm. erkennbar. Eine Abhängigkeit der Ergebnisse der Strukturabformung in die Zielmaterialien von der Gitterorientierung konnte für die durchgeführten Versuchsreihen nicht festgestellt werden.

7.3.2. Gittergeometrie

Sowohl die LSFL als auch die Excimerlaser-Gitterstrukturen weisen im Profilschnitt herstellungsbedingt eine sinusförmige Strukturform auf. Die ebenfalls näherungsweise symmetrische Teilung begründet die miteinander vergleichbaren Prägeergebnisse dieser Strukturen. Mit einer, seitens eines Projektpartners beigestellten, kontaktlithographisch strukturierten Stahlwalze konnten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Die mittels des Ätzprozesses in der Stahloberfläche realisierten Gitterstrukturen wiesen eine Gitterperiode von 2 μm bei einer durchschnittlichen Strukturtiefe im Bereich von 170 nm bis 250 nm auf. Bedingt durch Unterätzungen der Kontaktmaske zeigten diese Gitter im Profilschnitt eine symmetrisch geteilte, trapezförmige Strukturform. Eine Messung der Flankenwinkel ergab Werte im Bereich von 15 ° bis 30 °. Für die Prägung bedingen die, im Vergleich zu den LSFL bzw. Excimerlaser-Gitterstrukturen, geringeren Kantenradien der Stege bereits bei niedrigeren Prägedrücken eine ausreichende, mechanische Beeinflussung der reflektierenden Schicht bzw. Oberfläche der geprägten Materialien. In den untersuchten Versuchsmaterialien konnten vergleichbare Prägeergebnisse bei durchschnittlich um 20 % verminderten Drücken erreicht werden. Die mit den geringeren Kantenradien einhergehenden, höheren mechanischen Belastungen sowie die im Vergleiche zum Schichtmaterial ta-C geringere Härte führten zu einem raschen Verschleiß der Gitterstrukturen. Die aus Stahl der Werkstoffnummer 1.2365 gefertigte Walze lag im weichgeglühten, nitrierten Zustand mit einer Oberflächenhärte von ca. 830 HV 1 (siehe Tabelle 4-1) und einer auf die Rauheitskennzahl N1 polierten Oberfläche vor. Bei Prägedrücken von ca. 90 N/mm² betrug die Standzeit der auf diese

Weise strukturierten Prägewalze lediglich einige zehn bis einige wenige hundert Meter für die Prägung der Versuchsmaterialien.

7.3.3. Tiefe der Gitterstrukturen

Für die mit der Strukturübertragung während der Abformung in die Zielmaterialien angestrebte Realisierung von als Reflexionsgitter wirkenden, geprägten Oberflächenbereichen ist eine hinreichende Differenzierung der Kraftaufbringung bzw. der Druckunterschiede zwischen den Gräben und Stegen der Gitterstrukturen sicherzustellen. Eine Tiefe der Gitterstrukturen im Bereich von ca. 50 nm ist für die Prägung in Aluminium- sowie PLA-Folie hierfür bereits ausreichend. Infolge der materialbedingten Inhomogenitäten der papierbasierten Werkstoffverbunde sollten die Strukturen für die Prägung in diese Materialien größere Tiefen aufweisen. Gute Ergebnisse konnten in den untersuchten, metallisierten Werkstoffverbunde ab einer Strukturtiefe von 100 nm bzw. 150 nm für die Strukturübertragung in die aluminiumkaschierten Werkstoffverbunde erreicht werden. Hinsichtlich des Prägeergebnisses führen größere Strukturturen nicht zu signifikanten Verbesserungen. Unter dem Aspekt einer, vom zu prägenden Zielmaterial ausgehenden oder auf Verunreinigungen innerhalb der Produktionslinie zurückzuführenden, abrasiven Belastung der Gitterstrukturen bieten größere Strukturturen Vorteile hinsichtlich der Standzeit der Prägewerkzeuge.

7.4. Einfluss der für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Werkstoffe

Wie in den vorangegangenen Kapiteln teilweise ausgeführt, haben auch die für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Werkstoffe entscheidenden Anteil an der prozesssicheren und langzeitstabilen Umsetzung der Strukturabformung. Mit der, bereits in Kapitel 7.1.2. beschriebenen, Verwendung zähelastischer Puffermaterialien zwischen Druckstempel bzw. Prägewalze und den Werkstoffverbunden kann eine signifikante Verbesserung der Homogenität sowie der Flächendeckung bei der Prägung in die papierbasierten Werkstoffverbunde erreicht werden. Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen wurden hierzu verschiedene Funktionsbeschichtungen unterschiedlicher Materialstärke und Härte für die Gegenwalze realisiert. Als Materialien dieser Funktionsbeschichtungen kamen unter anderem Polyurethan mit einer Härte von 50, 70, 90 und 95 Shore A sowie Fluorkunststoffe (PTFE, PFA und PCTFE) mit einer Härte von 35, 45, 80 und

95 Shore D zum Einsatz. Die Schichtdicken wurden im Bereich von 0,1 mm bis 2,5 mm variiert. Für Materialstärken kleiner gleich 0,3 mm zeigte sich, für Härten größer / gleich 90 Shore A, ein positiver Effekt der Funktionsbeschichtungen auf die Homogenität sowie die Flächendeckung bei der Prägung in die Werkstoffverbunde. Dieser verstärkte sich mit der Verringerung der Schichtdicke des Puffermaterials. Größere Schichtdicken sowie Materialien geringerer Härte bedingten infolge der elastischen Deformation bei der rotativen Prägung stark unterschiedliche Drücke im Kontaktbereich der Walzen. Ein dauerhaft funktionssicherer Einsatz der untersuchten Beschichtungen für die rotative Prägung ist für keines der Materialien gegeben. Infolge der Walkarbeit kommt es, insbesondere bei den umzusetzenden Materialvorschubgeschwindigkeiten von bis zu 132 m/min, zu einer Erwärmung dieser Beschichtungen. Im weiteren zeitlichen Verlauf lösen sich die Beschichtungen von den Oberflächen der Stahlwalze.

Die für die Versuche genutzten Prägewalzen wurden der aktuellen Fertigung entnommen und entsprechen in ihren geometrischen Abmessungen den derzeit im industriellen Einsatz befindlichen Walzen. Mit diesen erfolgt die Prägung von Strukturen, welche Abmessungen im Bereich von einigen zehn bis einigen hundert Mikrometern aufweisen. Hierfür werden Drücke von maximal 40 N/mm² aufgebracht. Die für die Abformung der Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich 2 µm erforderlichen Drücke liegen deutlich über diesen Werten. Somit sind die, für den vordergründigen Prozess der rotativen Abformung, zum Einsatz kommenden Prägewalzen höheren mechanischen Belastungen ausgesetzt. Die für die Prägewalzen als Grundwerkstoff eingesetzten, nitrierten Stähle der Werkstoffnummern 1.2365, 1.2367 und 1.7131 halten diesen Belastungen nicht dauerhaft stand. Für die Prägung der Versuchsmaterialien kann ein Knittern der Materialbahn oder ein mehrlagiger Einzug des Materials zwischen den Walzen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die hiermit einhergehenden höheren Drücke führten bei den lediglich nitrierten Walzen zu einer plastischen Verformung der Walzenoberfläche. Ursächlich hierfür ist die geringe mechanische Festigkeit dieser im weichgeglühten Zustand vorliegenden Materialien im Volumen, welche im Ergebnis des Nitrierprozesses nur an der Oberfläche eine ausreichende Härte aufweisen. Mit der Verwendung der durchgehärteten Stähle der Werkstoffnummer 1.2379 und 1.2990 waren auch für diese kritische Zuständen der Prägung in Nachgang keine plastischen

Deformationen der Walzenoberflächen feststellbar. Die mechanischen Eigenschaften dieser Stähle erlauben einen dauerhaft funktionssicheren Betrieb.

Durch die Druckbelastung während des Prozesses der Prägung konnte auch für diese gehärteten Walzen eine elastische Deformation nachgewiesen werden. Bei einem aufgetragenen Druck von 300 N/mm^2 (zulässiger Maximaldruck für die Prägung der metallisierten Werkstoffverbunde) wurden Durchbiegungen der Präge- und der Gegenwalze von ca. $6,5 \text{ }\mu\text{m}$ in der Mitte der Walzen ermittelt. Unterschiede zwischen den für die Walzen eingesetzten Stählen der Werkstoffnummer 1.2379 und 1.2990 waren infolge der vergleichbaren mechanischen Kennwerte nicht zu erwarten und messtechnisch nicht nachweisbar. Eine Verringerung dieser Durchbiegung ist, wie ebenfalls von Wettbewerbern am Markt umgesetzt, durch Vergrößerung der Durchmesser der Walzen möglich. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Prägewalze durch weitere Walzen oder mechanische Stützsysteme zu stabilisieren. Beide Varianten erfordern jedoch einen vergleichsweise großen geometrischen Bauraum, welcher in den derzeitigen Produktionsanlagen und Verpackungsmaschinen nicht zur Verfügung steht. Vor diesem Hintergrund wurde eine Versuchsanordnung realisiert, welche eine ölhydraulische Deformation der Walzenoberfläche im Kontaktbereich zwischen den Prägewalzen erlaubt. Die definierte Verformung der Walzenoberfläche ist hierbei durch die Regelung des Öldrucks für die Hydraulik gegeben und wurde sowohl durch Messungen sowie durch, nachfolgend in Abbildung 7-4 exemplarisch dargestellte, Simulationsrechnungen nachgewiesen.

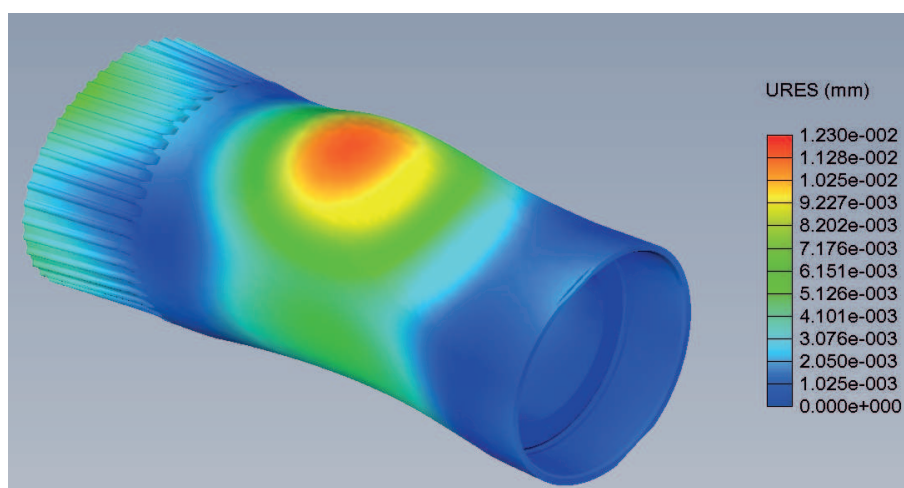


Abb. 7-4: Simulationsrechnung für die Deformation der Walzenoberfläche infolge der ölhydraulischen Druckaufbringung (Öldruck 120 bar; 70 mm Außendurchmesser der Stahlwalze aus dem Werkstoff 1.2990).

Mit der Auswertung dieser Versuche stehen Daten zur Verfügung, welche eine, die elastische Durchbiegung der Walzen während der Prägung kompensierende, Dimensionierung der Walzen in Abhängigkeit vom aufzubringenden Prägedruck sowie der Lastaufbringungsfläche ermöglichen. Die jeweilige Ausformung der Walzenoberfläche (Bombierung) erlaubt in der Folge eine plane, hinsichtlich des Prägedruckes konstantere Kontaktfläche zwischen den Prägewalzen und somit homogenere Prägeergebnisse. Die technologisch realisierbare Fertigung der Prägewalzen aus Wolframcarbid-Hartmetall würde infolge des größeren Elastizitätsmoduls dieses Materials ebenfalls eine Verringerung der Durchbiegung während der Prägung ermöglichen. Bedingt durch die hierfür in Anwendung zu bringenden Fertigungsmittel sowie die damit einhergehenden Kostensteigerungen ist die Nutzung der untersuchten, gehärteten Stähle zu favorisieren.

Wie in Kapitel 7.3.2. für die durchgeführten Prägeversuche an einer kontaktlithographisch strukturierten Stahlwalze beschrieben, wird die Standzeit der Prägewalzen im normalen Betrieb durch die Haltbarkeit der in den Oberflächen erzeugten Gitterstrukturen bestimmt. In Hinblick auf die Erhöhung der Standzeit der Prägewalzen bietet sich daher die Aufbringung von Hartstoffschichten auf die Stahlwalzen sowie die Einbringung der Gitterstrukturen in diese Oberflächen an. In der Folge weisen diese Gitterstrukturen einen höheren Verschleißwiderstand gegenüber, vom zu prägenden Zielmaterial ausgehenden oder auf Verunreinigungen innerhalb der Produktionslinie zurückzuführenden, abrasiven Belastungen auf. Des Weiteren bedingt die mit der Gittererzeugung einhergehende Vergrößerung der Oberfläche für die Strukturierung von Stahl eine erhöhte Korrosionsneigung. Für die Einbringung der Gitterstrukturen in die Oberfläche der untersuchten Hartstoffschichten stellt sich dieser für die Standzeit der Prägewerkzeuge ebenfalls relevante Punkt als nicht kritisch dar. Von den im Rahmen der Arbeit untersuchten Hartstoffbeschichtungen erfüllt lediglich das Schichtmaterial ta-C diese Anforderungen. Die BALINIT® ALCRONA-Schichten sind insbesondere bei durch die in Kapitel 6.5. beschriebenen, im Ergebnis der Bearbeitung mit dem Excimerlaser entstehenden, Heißrisse im Schichtmaterial nicht funktional einsetzbar. Ein partielles Ablösen von Teilen der Schicht während der Prägung würde potentiell die Gefahr einer weiterführenden Schädigung der Prägewerkzeuge nach sich ziehen, wodurch ein Einsatz dieser Hartstoffschichten unter dem Aspekt der Prozesssicherheit nicht zulässig ist.

Vor dem Hintergrund der derzeit noch nicht erfolgten Überführung der aufgezeigten Prozesse zur Abformung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$, insbesondere zur rotativen Prägung, in die industrielle Applikation liegen derzeit lediglich Daten auf Basis der durchgeführten Laborexperimente vor. Diese zeigen für die Prägung des exemplarisch untersuchten, metallisierten Werkstoffverbundes Met. 50 gsm. bei Materiallängen bis 65 km sowie erhöhten Prägedrücken bis zu 485 N/mm^2 keine Indizien für einen abrasiven Verschleiß der strukturierten ta-G-Schichten auf den Funktionsflächen der Mikroprägwerkzeuge. Die mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten vor und nach der Prägung für die Gitterstrukturen ermittelten Strukturtiefen weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Etwaige Abweichungen der einzelnen Messwerte liegen im Bereich der struktur- und prozessbedingten Schwankungsbreite. Für den geprägten Werkstoffverbund konnte bei Vergleich der Ergebnisse der Strukturübertragung sowie deren optischer Wirkung bei Bestrahlung mit Weißlicht kein Unterschied hinsichtlich der Brillanz, der Farbwirkung sowie der geprägten Oberflächenanteile in Abhängigkeit von der geprägten Materiallänge festgestellt werden.

7.5. Weiterentwicklung der papierbasierten Werkstoffverbunde für die Mikroprägung

Die im Rahmen der Untersuchungen genutzten und in Kapitel 4.2.2. hinsichtlich ihres Aufbaus beschriebenen papierbasierten Werkstoffverbunde sind derzeit in der industriellen Applikation befindliche, standardisierte Verpackungsmittel. Dabei überwiegen die metallisierten Varianten der Werkstoffverbunde bezüglich der Einsatzmengen. Eine Prägung der Werkstoffverbunde erfolgt derzeit mit Strukturen, welche Abmessungen im Bereich von einigen zehn bis einigen hundert Mikrometern aufweisen. Bei diesen Strukturgrößen sind die Textur der Grundpapiere, die Oberflächenrauheit sowie etwaig aufgebrachtener Toplack nicht kritisch für die Prägung. Ziel der Prägung mit Strukturen in diesen Größenordnungen ist das Brechen der Fasern der Grundpapiere an den Strukturkanten. Hierdurch wird eine Verminderung der Rückstellneigung der geprägten Werkstoffverbunde erreicht und diese weisen bei Faltung um die zu verpackenden Produkte keine bzw. eine lediglich geringfügige Rückverformung auf. Dem realisierbaren Design sind strukturgrößenabhängig Grenzen gesetzt. Der optische Effekt, der mit der Prägung dieser Strukturen erzielt werden kann, beruht auf dem Kontrast zwischen geprägten und ungeprägten

Bereichen. Innerhalb der geprägten Bereiche besteht weiterhin die Möglichkeit der Variation der Strukturabmessungen, der Strukturform sowie der Ausrichtung der Strukturen, wodurch unterschiedliche Streueffekte der Oberflächen der geprägten Werkstoffverbunde erreicht werden.

Die Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mit Strukturgrößen im Bereich von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ stellt andere Anforderungen an die zu prägenden Werkstoffverbunde und erfordert deren Weiterentwicklung. Da die metallisierten Werkstoffverbunde vor dem Hintergrund der größeren Verbrauchsmengen und des breiteren Einsatzgebietes das zu favorisierende Verpackungsmaterial darstellen, zielen die nachfolgenden Ausführungen insbesondere auf diese Materialien ab. Eine Übertragung auf aluminiumkaschierte Werkstoffverbunde ist jedoch in den hierfür relevanten Punkten, vordergründig den Eigenschaften der Grundpapiere, gegeben.

In Hinblick auf das realisierbare Abformergebnis kommt den für die Werkstoffverbunde eingesetzten Grundpapieren eine besondere Bedeutung zu. Deren Oberflächenrauheit sollte im Bereich kleiner ein Mikrometer liegen. Ideal wären Werte von kleiner 100 nm , wie dies für die Kunststofffolien gemessen wurde. Da ein Teil der Inhomogenität der Prägung auf laterale Dickenschwankungen der Papiere zurückzuführen ist, sind diesbezüglich Werte kleiner ein Mikrometer (peak-valley) anzustreben. Für den Auftrag des Vorlacks sind Schichtdicken von $5\text{ }\mu\text{m}$ bis $10\text{ }\mu\text{m}$ zu favorisieren, um Unebenheiten auszugleichen und eine gleichmäßige Lastverteilung während der Prägung zu gewährleisten. Größere Auftragsmengen stellen sich tendenziell vorteilhaft dar, bergen jedoch das Risiko des Aufbrechens der Metallisierung bei der Prägung oder bei Verformungen der Materialbahn. Die hiermit einhergehende streuende, optisch matt wirkende Oberfläche ist zu vermeiden. Vor dem Hintergrund einsatzspezifischer Vorgaben für die Produktverpackung werden erhöhte Anforderungen an den Vorlack gestellt. Dieser sollte hinsichtlich der thermischen Erweichung bei Temperaturen bis $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ fest sein und eine Glasübergangstemperatur im Bereich von $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufweisen. Im Zusammenwirken mit den Strichpasten der Grundpapiere ist ein Eindringen des erweichten Lacks in das Papier zu vermeiden. Eine geringe Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sind zur Minimierung der abgeführten Wärmemengen ebenso zu favorisieren, wie eine hohe Viskosität des Lacks im thermisch erweichten Zustand. Letztere bedingt den Verbleib der Metallisierung an der Oberfläche des Vorlacks. Ein Eindringen der Metallisierung würde eine Verringerung der Reflektivität der Oberfläche

des Werkstoffverbundes sowie eine vermehrte Streuung in den hierdurch optisch matt wirkenden Bereiche nach sich ziehen. Des Weiteren muss der zum Einsatz kommende Vorlack eine ausreichende Haftung auf den Papieren gewährleisten und die Möglichkeit der internationalen Zertifizierung für den direkten Kontakt mit Lebensmitteln zulassen. Ein partielles Ablösen des Lacks oder einzelner Partikel im Ergebnis der Prägung ist zu vermeiden, um Verschmutzungen der Prägwerkzeuge und Verpackungsmaschinen auszuschließen. Da einige Produktverpackungen höheren mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, ist z.T. die Aufbringung eines Toplacks aus Gründen der Prozesssicherheit unumgänglich. Dieser gewährleistet den für diese Verpackungen kritischen Punkt der Scheuerbeständigkeit. Um eine ausreichende Strukturübertragung im Ergebnis der Prägung sicherzustellen, sollte die Aufbringung von Toplack, sofern dies anwendungsbezogen möglich ist, vermieden werden bzw. die Dicke der Toplackschichten nicht mehr als 100 nm betragen.

Im industriellen Umfeld stehen Werkstoffverbunde mit den genannten, an die Mikroprägung der Gitterstrukturen angepassten, Eigenschaften derzeit nicht zur Verfügung. Erhöhte Kosten durch den, zur Erzielung der gewünschten Schichtdicken erforderlichen, mehrmaligen Lackauftrag, die Zulassung als Verpackungsmittel für den direkten Kontakt mit Lebensmitteln sowie die langwierige Qualifizierung bzw. Validierung im Rahmen der Qualitätsmanagementsysteme erschweren die Platzierung am Markt. Die spezialisierten und auf eine hohe Produktivität ausgerichteten Fertigungslinien für die Papierherstellung und Papierveredelung bedingen hohe Investitionen für die Vorserienentwicklung, da Pilotanlagen zumeist nicht verfügbar sind.

8. Anwendungsmöglichkeiten und Abformung in verschiedene Zielmaterialien

Für die aufgezeigten Verfahren zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen sowie deren Abformung in spezifische Produktverpackungen bietet sich ein weites Feld potentieller Anwendungen. Mit der direkten Bearbeitung von Festkörperoberflächen unter Nutzung der vorgestellten Verfahren ist neben der dekorativen Gestaltung der Oberflächen beispielsweise auch die Realisierung fälschungssicherer, produktspezifischer Originalitätsnachweise möglich. Ist eine größere Anzahl gleichartiger Produktmarkierungen gewünscht und lässt das Produkt selbst bzw. dessen Verpackung dies zu, so bietet sich die Abformung der Gitterstrukturen ausgehend von entsprechend ausgestalteten Prägeworkzeugen an. Eine Auswahl möglicher Einsatzfelder wird nachstehend beschrieben.

8.1. Marketing

Bedingt durch die Wellenlängenabhängigkeit der Beugungswinkel, welche bei Bestrahlung der Gitterstrukturen mit Weißlicht zu einer spektralen Aufspaltung des Lichtes führt, sind die sich hieraus ergebenden optischen Effekte sowie die Farbwirkung für den Bereich des Produktmarketings von besonderem Interesse. Voraussetzungen für die Realisierung der beugungsoptisch wirksamen Gitterstrukturen sind dabei neben der materialspezifischen Strukturierbarkeit bei der direkten Bearbeitung von Festkörperoberflächen bzw. der Möglichkeit der plastischen Deformation bei der Strukturübertragung im Rahmen eines Prägeprozesses insbesondere ein ausreichender Reflexionsgrad der strukturierten bzw. geprägten Oberflächen. Durch die, über die Prozess- und Strukturierungsparameter, selektiv einstellbare Ausrichtung der Gitterstrukturen sowie die aufgezeigten Möglichkeiten der Variation der Gitterperioden können definiert verschiedenartige optische Wirkungen erreicht werden. Ausgehend von Bild- und Designvorlagen ist deren Umsetzung in Form der direkten Strukturierung der Festkörperoberflächen bzw. der Prägeworkzeuge, welche im Nachgang für die Abformprozesse zum Einsatz kommen, im Rahmen der automatisierbaren Steuerung der Laseranlagen problemlos darstellbar. Auf Grundlage des Imports der Vorlagen in die Steuerung sowie softwaregestützten Lösungen zur Zuordnung der korrespondierenden Strukturierungsparameter zu den gewünschten, zu realisierenden optischen Effekten

ist eine zeiteffiziente Erstellung der Bearbeitungsprogramme gegeben. Für den Bereich des Produktmarketing sind dabei neben der gleichförmigen Orientierung der Gitterstrukturen, welche das umgesetzte Design im spektral aufgefächerten Licht wirken lässt, auch die in Kapitel 6.3.4. beschriebenen Kipp- und Laufeffekte interessant. Die in diesem Kapitel ebenfalls dargelegten Verfahrenspotentiale im Bereich der Erzeugung von Mischfarben sowie dem erzielbaren Grad der Detailierung bei der Umsetzung des Designs liefern weitere Ansatzpunkte für kundenspezifische Anwendungen unter Nutzung der erzeugten Gitterstrukturen.

8.2. Produktauthentifizierung

Im Feld der Produktauthentifizierung bieten sich weitere Anwendungsmöglichkeiten für die mit den aufgezeigten Verfahren und Prozessen erzeugbaren Gitterstrukturen. So erlauben beispielsweise die LSFL, welche durch ihre selbstorganisierte Entstehung prozessbedingt Unregelmäßigkeiten aufweisen, einen Originalitätsnachweis. Im Rahmen einer mikroskopischen Beurteilung können diese charakteristischen Stellen in der Folge als produkt- bzw. herstellungsspezifisches Merkmal dienen. Die Fälschungssicherheit ist durch den für jeden bearbeiteten Oberflächenbereich individuellen, stochastischen Entstehungsprozess gegeben. Vergleichbare Produktmarkierungen sind prinzipiell ebenfalls mit den mittels Excimerlaser im Maskenprojektionsverfahren erzeugten Gitterstrukturen darstellbar. Hierzu müssten lediglich entsprechende Masken- und / oder Blendendesigns in Anwendung gebracht werden. Eine Fortführung dieser diskreten Sicherheitsmerkmale ist durch die Erzeugung von Mikroschrift möglich, welche auch in Kombination mit den beugungsoptischen Gitterstrukturen zur Anwendung kommen kann. Für den Excimerlaser ist diese wieder durch zugehörige Masken und Blenden realisierbar. Im Bereich der Bearbeitung mittels Ultrakurzpulslaser wäre das Direktschreiben im Fokusabtragverfahren zu favorisieren.

Mit der messtechnischen Auswertung der beugungsoptischen Effekte der Gitterstrukturen eröffnen sich weitere Nutzungspotentiale. Eine schnelle Beurteilung der optischen Wirkung ist bei Bestrahlung der die Gitterstrukturen aufweisenden Oberflächenbereiche mit Weißlicht bereits durch die Erfassung der sich ergebenden, spektral aufgefächerten, gebeugten Strahlungsanteile auf einem Schirm gegeben. Erfolgt die Detektion mit einer Farbkamera, welche idealerweise nicht über eine automatische Signalpegelregelung verfügen sollte, so können die hierdurch

gewonnenen Bilddaten für einen Abgleich mit einer hinterlegten Referenz herangezogen werden. Über die Erhöhung der Anzahl der untersuchten Messstellen, unterschiedliche Parameter der Gitterstrukturen sowie die Tiefe der Datenauswertung und der hierfür genutzten Auswertungsalgorithmen besteht die Möglichkeit die Sicherheit zu verbessern und valide Aussagen zur Originalität der Produkte abzuleiten. Um die Auswertungszeit weiter zu verringern und kompaktere Prüfanordnungen zu ermöglichen, bietet sich die Einbringung und Auswertung spezifischen Kontrollfelder an. Bei Bestrahlung dieser Oberflächenbereiche mit monochromatischer Strahlung unter einem zuvor festzulegenden, definierten Winkel ergeben sich korrespondierende Raumwinkel und Intensitäten der einzelnen Beugungsordnungen. Deren messtechnische Auswertung, beispielsweise mittels CCD-Zeile, CCD-Matrix oder im einfachsten Fall einer Photodiode, liefert sehr schnell charakteristische Bewertungskenngrößen. Ein Vergleich mit referenzierten Sollwerten lässt nachfolgend Aussagen zur Originalität der Produkte zu. Mit der Kombination verschiedener Verfahren und Strukturen (z.B. LSFL und Excimerlaser-Gitterstrukturen) sowie der zusätzlichen Einbringung von Mikroschrift kann die Komplexität der Markierung und in der Folge die Fälschungssicherheit weiter erhöht werden. Durch hinsichtlich des Strukturierungsdesigns angepassten, produktspezifischen Codierungen kann des Weiteren eine Rückverfolgbarkeit der Produkte erreicht werden. Hierzu könnte beispielsweise ein mit verschiedenartigen Gitterstrukturen in definierter Gitterausrichtung erzeugter, mehrere Designs enthaltender Datamatrixcode eingesetzt werden. Unter Ausnutzung der in Kapitel 6.3.4. beschriebenen Kippeffekte wären in der Folge bei Drehung des Produktes oder gegebenenfalls dessen Verkipfung jeweils andere Bereiche optisch aktiv und für die Auswertung nutzbar. Erfolgt die Bestrahlung mit Weißlicht besteht zudem die Möglichkeit im Zusammenwirken mit entsprechenden Farbfiltern einzelne Wellenlängenbereiche gesondert zu analysieren. Derartige Kombinationen lassen eine Erhöhung der codierbaren Datenmenge (z.B. Angaben zum Herstellungsdatum, der Serien- oder Produktionsnummer usw.) zu.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich $2\text{ }\mu\text{m}$ in den Oberflächen von Prägewerkzeugen sowie deren Abformung in exemplarisch ausgewählte Verpackungsmaterialien untersucht.

Zu Beginn stehen die Einleitung sowie die Beschreibung der Aufgabenstellung und Zielsetzung. Im Anschluss wurde ein Überblick für die zur Umsetzung der Arbeitsaufgabe relevanten Verfahren gegeben. Dieser gibt den aktuellen technischen und wissenschaftlichen Kenntnisstand wieder. Er beinhaltet die umfängliche Diskussion der jeweiligen Parameterräume sowie der Vorteile und Limitationen der einzelnen Verfahren. Hierbei wird differenziert auf die erforderliche Kombination und das Zusammenwirken verschiedener Fertigungsverfahren eingegangen.

Mit der Beschreibung der Eigenschaften der für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Werkstoffe sowie einer exemplarischen Auswahl von Zielmaterialien, in welche die Abformung erfolgen soll, wird zum Hauptteil der Arbeit hingeleitet. Diesem vorangestellt ist die umfängliche Beschreibung der für die Lasermikrostrukturierung im Rahmen der Versuche genutzten Versuchsaufbauten. Des Weiteren werden die zur Charakterisierung der strukturierten Oberflächenbereiche in Anwendung gebrachten Mess- und Analysesysteme betrachtet. Erläuterungen der realisierten Versuchsanordnungen für die Abformung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen sind diesen nachgestellt.

Der Hauptteil der Arbeit beginnt mit den Untersuchungen zur Laserstrukturierung von Mikroprägewerkzeugen. In einem ersten Schritt werden die Untersuchungen zur Freistellung der Funktionsflächen diskutiert.

Die modellhafte Beschreibung des Abtragprozesses auf Basis des Zwei-Temperaturen-Modells ist sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen in Einklang zu bringen. Für den im Rahmen der Versuche eingesetzten Femtosekundenlaser mit einer mittleren Wellenlänge von 775 nm und einer Pulsdauer von 150 fs konnten die Ablationsschwellfluenz sowie die Bereiche des Wechsels der Ablationsregime gemäß des Zwei-Temperaturen-Modells ermittelt werden. Die untersuchten Stähle der Werkstoffnummern 1.2365, 1.2367, 1.7131, 1.2379 und 1.2990 ließen hinsichtlich der errechneten Ablationsschwellfluenz keine signifikanten Unterschiede erkennen. Diese

beträgt für die Stähle $0,23 \text{ J/cm}^2$ und für die ebenfalls untersuchte Hartmetallsorte AKS-F03 der Firma AKS Hartmetalltechnik GmbH $0,36 \text{ J/cm}^2$. Hinsichtlich der Bereiche des Wechsels der Ablationsregime zeigten sich diese zwischen 6 J/cm^2 und 9 J/cm^2 für die Stähle sowie zwischen 5 J/cm^2 und 7 J/cm^2 für das Wolframcarbid. Eine Änderung der stöchiometrischen Zusammensetzung oberflächennaher Probenbereich im Ergebnis der Laserstrukturierung konnte für keinen der untersuchten Werkstoffe, im Rahmen der durchgeführten EDX-Analysen, festgestellt werden. Zur Realisierung einer möglichst geringen Oberflächenrauheit der laserstrukturierten Oberflächenbereiche sollte die Bearbeitung stets bei Fluenzen innerhalb des ersten Ablationsregimes erfolgen. Für das untersuchte WC-Hartmetall sind bei einem Überlappungsgrad der Laserstrahlquerschnittsflächen auf der Probenoberfläche zwischen einem Puls und dem nachfolgenden Puls im Bereich von 63 % bis 90 % und Laserstrahlpulsfluenzen bis $4,5 \text{ J/cm}^2$ Werte der mittleren Rauheit R_a von kleiner 100 nm erreichbar. Mit der Anwendung von Überlappungsgraden zwischen 70 % und 80 % wurden Werte der mittleren Rauheit R_a von kleiner gleich 50 nm gemessen. Die erzielbaren Abtragsvolumina pro Puls erreichen fluenzabhängig Werte von bis zu $140 \mu\text{m}^3$ bei Nutzung eines Objektivs, welches einen Strahlradius von $27,4 \mu\text{m}$ auf der Probenoberfläche liefert. Eine Abhängigkeit der Abtragsvolumina pro Puls von der lateralen Anordnung der Laserstrahlpulse konnte für die durchgeführten Versuche unabhängig vom Material nicht festgestellt werden. Zur Vermeidung der, bei der Strukturierung der Stähle materialabhängig in unterschiedlich starker Ausprägung, beobachteten Ausbildung punktueller Vertiefungen sind die anzuwendenden Laserstrahlpulsfluenzen für diese Bearbeitungen auf 1 J/cm^2 zu begrenzen. Als Ursache für die Ausbildung der punktuellen Vertiefungen in einzelnen Stählen wurden Inhomogenitäten (Ausscheidungen) im Gefüge ermittelt. Die Nutzung von Stählen mit homogenem, ausscheidungsfreiem Gefüge, wie dies für den pulvermetallurgischen Stahl 1.2379 PM gegeben war, ist daher zu favorisieren. Für die Bearbeitung der Stähle konnten, mit Überlappungsgraden der Laserstrahlquerschnittsflächen auf der Probenoberfläche zwischen einem Puls und dem nachfolgenden Puls von 50 % bis 80 %, bei Laserstrahlpulsfluenzen bis 1 J/cm^2 typischen Werte der mittleren Rauheit im Bereich von 50 nm bis 110 nm erreicht werden. Korrespondierende Abtragsvolumina von bis zu $50 \mu\text{m}^3$ pro Puls sind in Abhängigkeit von der Laserstrahlpulsfluenz für die genutzten Laserstrahlpulse mit einem Strahlradius von $27,4 \mu\text{m}$ auf der Probenoberfläche realisierbar. Ebenfalls durchgeführte

Untersuchungen zum Einfluss inerte Prozessgase (Stickstoff, Argon und Helium), welche bei Gasdrücken bis 1,5 bar stechend auf die Bearbeitungsstelle zugeführt wurden, bedingten unter Anwendung der aufgezeigten Parameterbereiche keine abweichenden Ergebnisse im Vergleich zur Bearbeitung an Luft unter Normalbedingungen.

Für die Einbringung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen in die, im Ergebnis der vorangegangenen Lasermikrostrukturierung in Relation zu den umgebenden Oberflächenbereichen, erhabenen Funktionsflächen der Prägwerkzeuge wurden verschiedene laserbasierte Verfahren untersucht. Durch Nutzung des Lasersystems Clark MXR CPA-2010 bei der Grundwellenlänge von 775 nm und eines Reflexionsobjektives Typ Coherent X25/0.4 mit einer effektiven Brennweite von 8 mm, welches im Fokus einen Strahlradius von 2,1 μm liefert, ließen sich Gitter mit einer Grabenbreite von 1,5 μm und einer Gitterperiode von 2 μm realisieren. Diese direktschreibende Oberflächenbearbeitung im Fokusatragverfahren lieferte für die Pulswiederholfrequenz des eingesetzten Lasersystems von 1 kHz bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 2 mm/min Strukturtiefen der Gräben von ca. 300 nm in den Stählen sowie dem WC-Hartmetall. Hierzu sind Laserstrahlpulsfluenzen von 0,32 J/cm² für Stahl und 0,5 J/cm² für Wolframcarbid anzuwenden. Eine Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit auf 1,5 mm/min erlaubt durchschnittliche Tiefen der erzeugten Gräben von 400 nm bis 450 nm. Durch Erhöhung der Laserstrahlpulsfluenz oder eine weitere Verringerung der Verfahrgeschwindigkeit kann keine weitere Erhöhung der Tiefe der Strukturen erreicht werden. Vielmehr kommt es in der Folge der Verbreiterung der Gräben zu einem Abtrag der Stege zwischen den Gräben und somit zu einem Einsinken der strukturierten Bereiche unter das Niveau angrenzender, nicht strukturierter Bereiche. Eine Gittererzeugung mit Gitterperioden von kleiner gleich 2 μm ist im Schichtmaterial ta-C für die genutzte Wellenlänge von 775 nm mit diesem Verfahren nicht möglich. Die für die prozesssichere Umsetzung des Verfahrens erforderliche, exakte Regelung der Fokusslage, welche für den realisierten Versuchsaufbau im Bereich kleiner gleich $\pm 2 \mu\text{m}$ erfolgen musste, limitiert dieses Verfahren zusätzlich.

Deutlich unkomplizierter hinsichtlich der Prozess- und Strukturierungsparameter sowie der bearbeitbaren Materialien stellte sich die Erzeugung laserinduzierter, periodischer Oberflächenstrukturen dar. Für die angestrebte Anwendung sind hierbei insbesondere die LSFL des Typs s von Interesse. Die modellhafte Beschreibung der Entstehung

laserinduzierter, periodischer Gitterstrukturen wurde diskutiert und lieferte Ansatzpunkte für die nachfolgende Erörterung des Einflusses der Prozessparameter auf die Ausbildung dieser Strukturen. Zunächst erfolgte die Untersuchung des Einflusses des Polarisationszustands sowie des Einfallswinkels der auftreffenden Laserstrahlpulse. Sich hieraus ergebende Möglichkeiten zur Variation der Ausrichtung und der Gitterperiode der im Fokus dieser Untersuchungen stehenden LSFL des Typs s wurden dargelegt. Bei Bestrahlung der Probenoberflächen mit linear polarisierter Laserstrahlung bilden sich die Strukturen senkrecht zum elektrischen Feldstärkevektor der elektromagnetischen Strahlung aus. Eine Variation der Ausrichtung ist beispielsweise durch eine im Strahlengang positionierte, drehbar gelagerte $\lambda/2$ -Platte möglich, welche in der Folge die Einstellung der Polarisation der auf die Probenoberfläche auftreffenden Laserstrahlpulse erlaubt. Die definierte Beeinflussung der Gitterperiode der entstehenden LSFL des Typs s ist, unter Nutzung von parallel zur Einfallsebene polarisierten Laserstrahlpulsen, durch Veränderung des Einfallswinkels auf die zu bearbeitenden Oberflächen gegeben. Mit der Variation des Einfallswinkels im Bereich von 0° bis 50° konnten für das oben genannte Lasersystem mit einer Wellenlänge von 775 nm im exemplarisch ausgewählten Stahl der Werkstoffnummer 1.2990 Gitterperioden der LSFL im Bereich von 650 nm bis 385 nm ermittelt werden. Für Wolframcarbid-Hartmetall wurden zugehörige Werte im Bereich von 705 nm bis 415 nm gemessen. Weiterhin wurden der Einfluss des Probenmaterials sowie der in Anwendung gebrachten Laserstrahlwellenlänge näher betrachtet. Mit einer Verringerung der Wellenlänge der applizierten Laserstrahlpulse geht ebenfalls eine Verringerung der Gitterperiode der entstehenden LSFL einher. In den Stählen konnten wellenlängenabhängig Gitterperioden von 320 nm, für eine Laserstrahlwellenlänge von 387 nm, bis 1010 nm, für eine Laserstrahlwellenlänge von 1064 nm, nachgewiesen werden. Im Schichtmaterial ta-C bewegten sich diese Werte im Bereich zwischen 330 nm, für die Laserstrahlwellenlänge von 387 nm, und 890 nm, für die Laserstrahlwellenlänge von 1064 nm. Hinsichtlich der Laserstrahlpulsfluenzen sollten für die Bearbeitung von Stahl $0,6 \text{ J/cm}^2$ bis 1 J/cm^2 , für Wolframcarbid $0,8 \text{ J/cm}^2$ bis $2,4 \text{ J/cm}^2$ sowie für das Schichtmaterial ta-C, in Abhängigkeit von der eingesetzten Laserstrahlquelle, $2,0 \text{ J/cm}^2$ bis $4,0 \text{ J/cm}^2$ (775 nm Laserstrahlwellenlänge, 150 fs Pulsdauer) bzw. $3,7 \text{ J/cm}^2$ bis $5,4 \text{ J/cm}^2$ (1028 nm Laserstrahlwellenlänge, 250 fs Pulsdauer) angewendet werden. Die mit der Vergrößerung der Laserstrahlwellenlänge und Erhöhung der Pulsdauer einhergehende Verschlechterung der Bedingungen für

den, zur Bearbeitung transparenter oder teiltransparenter Materialien als maßgebenden identifizierten Prozess der Multiphotonenabsorption führt dazu, dass für die Strukturierung des teiltransparenten Schichtmaterials ta-C eine Pulsdauer von kleiner gleich 2 ps, bei einer Laserstrahlwellenlänge von 1028 nm, erforderlich ist. Im direkten Vergleich zu Laserstrahlpulsen gleicher Wellenlänge mit einer Pulsdauer von 250 fs bedingt die Verlängerung der Pulsdauer der Laserstrahlpulse auf 2 ps eine Verdopplung der zu applizierenden Laserstrahlpulsfluenz zur Realisierung vergleichbarer LSFL. Die Erzeugung homogener, im bestrahlten Oberflächenbereich flächendeckend ausgebildeter LSFL erfordert die Aufbringung mehrerer, sich hinsichtlich der Laserstrahlquerschnittsflächen überlappender Laserstrahlpulse. Für die Bearbeitung unter Anwendung der aufgeführten, materialspezifischen sowie vom eingesetzten Lasersystem abhängigen, Laserstrahlpulsfluenzen lieferten Überlappungsgrade der Laserstrahlquerschnittsflächen auf der Probenoberfläche, zwischen einem Puls und dem nachfolgenden Puls, im Bereich von 55 % bis 80 % die besten Ergebnisse. Unter Nutzung dieser Strukturierungsparameter konnte eine homogene, flächendeckende Ausbildung der LSFL in bearbeiteten Oberflächenbereich erzielt werden. Die Erhöhung der Anzahl der Bearbeitungszyklen, im konkreten Anwendungsfall der Anzahl der Überfahrten, führte zu einer Vergrößerung der Tiefe der generierten LSFL bis hin zu einem prozessbedingten Maximalwert. Für die aufgezeigten Parameter war dies bereits nach der zweiten Überfahrt gegeben. Bei senkrechter Bestrahlung der Probenoberflächen mit den Lasersystemen wurden dabei typische, maximale Strukturturen der LSFL im Bereich von 20 % bis 30 % der Gitterperiode des LSFL für die Bearbeitung der Stähle, Wolframcarbid sowie der BALINIT® ALCRONA Hartstoffschichten erreicht. Die Strukturierung des Schichtmaterials ta-C erlaubte die Realisierung größerer Strukturturen für die Lasersysteme mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich. Im Maximum waren typische Strukturturen im Bereich von 30 % bis 44 % der Gitterperiode des LSFL darstellbar. Für die Variation der Gitterperiode der LSFL durch Veränderung des Einfallswinkels der auf die Probenoberfläche auftreffenden Laserstrahlpulse konnte festgestellt werden, dass sich die Strukturtiefe der LSFL hierbei im gleichen Verhältnis zur ursprünglichen Strukturtiefe bei senkrechter Bestrahlung verringerte, wie dies für die Gitterperiode der Fall war. Da die Bearbeitung von Hartstoffschichten besondere Anforderungen an die in Anwendung zu bringenden Prozess- und Strukturierungsparameter stellt, wurden diese gesondert diskutiert. Es

wurden Limitationen aufgezeigt und Ansätze zur Verbesserung der Bedingungen hinsichtlich der Absorption der Laserstrahlung in transparenten bzw. teiltransparenten Schichtmaterialien, z.B. durch die Aufbringung spezieller Absorptionsschichten, erörtert. Des Weiteren erfolgte die Betrachtung von im Zuge der Laserbearbeitung im Schichtmaterial ta-C, auch bei der Bearbeitung mit ultrakurzen Laserstrahlpulsen, festzustellenden strukturellen Veränderungen. Ergebnisse der durchgeführten vergleichenden Härtemessungen, für die mit zirkular polarisierten Laserstrahlpulsen bei Pulsdauern von 150 fs bzw. 250 fs sowie Laserstrahlwellenlängen von 775 nm bzw. 1028 nm strukturierten ta-C-Schichten, wurden in Abhängigkeit von der Laserstrahlpulsfluenz präsentiert. Die Analysen lieferten in den strukturierten Oberflächenbereichen Härtewerte im Bereich von 9 GPa bis 10 GPa für eine Prüfkraft von 1 mN und unter Verwendung eines Berkovich Indenters mit einem Spitzenradius von 50 nm. Dies entspricht einem Abfall der Nanohärte der ta-C-Schichten infolge der Laserbearbeitung auf ein Viertel des Wertes der gemessenen Schichthärte vor der Strukturierung.

Nachfolgend wurden die optische Wirkung der generierten Gitterstrukturen sowie die Möglichkeiten zur Erzeugung von Mischfarben umfänglich diskutiert. Auf Basis der aufgezeigten Zusammenhänge konnten Aussagen zu den, bei Bestrahlung mit Licht und / oder monochromatischer Strahlung, strukturabhängig in den jeweiligen, korrespondierenden Raumwinkeln festzustellenden Beugungseffekten abgeleitet werden. Es erfolgte eine Vorstellung exemplarischer, auf Grundlage der erzeugten Gitterstrukturen realisierbarer, optischer Effekte sowie ausgewählter Demonstratoren. Für die Erzeugung von Mischfarben durch Mischung von Spektralfarben wurden die zugrundeliegenden Ansätze erläutert und auf Basis der durchgeführten Berechnungen konkrete Beispiele aufgezeigt. Einen Abschluss fand die Darlegung der Ergebnisse zur Erzeugung laserinduzierter, periodischer Oberflächenstrukturen in der differenzierten Betrachtung der mit diesem Verfahren erzielbaren Produktivität. In Abhängigkeit von dem in Anwendung gebrachten Lasersystem sowie der Leistungsfähigkeit der Anlagenperipherie wurden die mit den untersuchten Systemen erreichbaren Flächenleistungen abgeschätzt. Für das Lasersystem LIGHT CONVERSION Pharos 15-1000-PP lieferten diese Abschätzungen beispielsweise Werte im Bereich von 107000 mm²/h bis 147000 mm²/h für die vollflächige Erzeugung von LSFL im Schichtmaterial ta-C auf der Mantelfläche von Prägewalzen.

Eine Darlegung der Ergebnisse zu Erzeugung von Gitterstrukturen mittels Femtosekundenlaser im Maskenprojektionsverfahren sowie des hierfür realisierten Versuchsaufbaus unter Verwendung eines Femtosekundenlasers vom Typ Clark MXR CPA-2010 mit einer Laserstrahlwellenlänge von 775 nm, einer Laserstrahlpulsenergie von 1 mJ sowie einer festen Pulswiederholfrequenz von 1 kHz ist erfolgt. Nach mehrfachen Anpassungen des Versuchsaufbaus, insbesondere der abbildenden, optischen Komponenten, konnten im Minimum lediglich symmetrisch geteilte Gitterstrukturen mit Gitterperioden von 5 μm in den bearbeiteten Werkstoffen generiert werden. Das angestrebte Ziel der Erzeugung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich 2 μm wurde mit dieser Systemkonfiguration nicht erreicht.

Ein ebenfalls im Maskenprojektionsverfahren betriebener Systemaufbau, in welchem ein Excimer-Lasersystem vom Typ Coherent LPXpro 305 zum Einsatz kam, wurde vorgestellt und die detaillierte Erläuterung der Prozess- und Strukturierungsparameter ist erfolgt. Die beiden am Versuchsaufbau zur Verfügung stehenden Strahlengänge mit einem Abbildungsverhältnis von 8:1 bzw. 15:1 erlaubten die gleichzeitige Bearbeitung auf einer Fläche von 2,5 mm x 2,5 mm bzw. 1,33 mm x 1,33 mm. Infolge des größeren Abbildungsverhältnisses und besserer Abbildungsbedingungen ist der Strahlengang mit dem Abbildungsverhältnis von 15:1 zu favorisieren. Mit diesem konnten minimale Gitterperioden von 1,6 μm für symmetrisch geteilte Gitterstrukturen erreicht werden. Für den Strahlengang mit dem Abbildungsverhältnis von 8:1 wurden minimale Gitterperioden von 2 μm für ebenfalls symmetrisch geteilte Gitterstrukturen nachgewiesen. In den Stählen waren im Ergebnis der Bearbeitung, für Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich 2 μm , lediglich Strukturiefen von einigen 10 nm bis maximal 50 nm erreichbar. Ursächlich konnte dies auf die Pulsdauer der Laserstrahlpulse des Excimerlasers zurückgeführt werden, welche bei der Bearbeitung der Stähle die Ausbildung einer oberflächlichen Schmelzphase bedingt. Eine Beschreibung der infolge der Schmelzbaddynamik auftretenden Effekte und Prozesse bei der Strukturierung ist erfolgt. Erörterungen zu den bei der Bearbeitung von Wolframcarbid sowie des Schichtmaterials BALINIT® ALCRONA festgestellten Beobachtungen wurden gegeben. Die Erzeugung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner gleich 2 μm war in diesen Materialien nicht möglich. Für die BALINIT® ALCRONA-Schichten festgestellte Heißrisse im Ergebnis der Bearbeitung mit den Excimerlaserstrahlpulsen als auch die Rissbildung im bestrahlten Oberflächenbereich des Wolframcarbids führen zu einem Verlust der Eignung dieser

Materialien für die angestrebte Anwendung, da ein funktionssicherer Einsatz nicht gewährleistet werden kann. Im direkten Vergleich der mit dem Excimerlaser bearbeiteten Materialien lieferte die Strukturierung der ta-C-Schichten die besten Ergebnisse. Für die kleinsten, mit der Versuchsanordnung realisierbaren Gitterperioden von 1,6 μm wurden Tiefen der Gitterstrukturen, bei symmetrischer Teilung der Gitter, im Bereich von 250 nm bis 300 nm erreicht. Hinsichtlich des Relativabstandes zwischen Bearbeitungsoptik und Probenoberflächen sind für die Gitterperiode von 1,6 μm Schwankungen von $\pm 5 \mu\text{m}$ tolerierbar. Eine detaillierte Beschreibung der Bearbeitungsparameter hat stattgefunden. Um die Maximaltiefe der im Profilschnitt eine sinusförmige Strukturform aufweisenden Gitterstrukturen zu erreichen, war die Aufbringung von 3 bis 4 Laserstrahlpulsen bei typischen Laserstrahlpulsfluenzen im Bereich von 6 J/cm² bis 8 J/cm² erforderlich. Infolge der, ursächlich auf die längere Pulsdauer der Excimerlaserstrahlpulse zurückzuführenden, höheren thermischen Belastung bedingt diese Bearbeitung einen stärkeren Härteabfall durch die Umwandlung sp³-hybridisierter Bindungsanteile in sp²-hybridisierte Bindungsanteile. Für Schichten, an welchen vor der Strukturierung für eine Prüfkraft von 1 mN und unter Verwendung eines Berkovich Indenters mit einem Spitzenradius von 50 nm eine Nanohärte von 39,8 GPa $\pm$ 3,6 GPa gemessen wurde, sank dieser Wert auf 2,5 GPa bis 3 GPa nach der Strukturierung unter Nutzung der aufgezeigten Bearbeitungsparameter.

Die Untersuchungen zur Abformung beugungsoptisch wirksamer, in die Oberflächen von Mikroprägewerkzeugen eingebrachter Gitterstrukturen in exemplarisch ausgewählte, zu prägende Materialien stellten ein weiteres, zentrales Themenfeld im Hauptteil der Arbeit dar. Hierbei wurde zunächst auf den Einfluss der untersuchten, exemplarisch ausgewählten Zielmaterialien eingegangen. Es erfolgte eine detaillierte Beschreibung der festgestellten Zusammenhänge sowie die Erörterung prozess- und verfahrenstechnologischer Rahmenbedingungen. In Abhängigkeit vom jeweiligen Zielmaterial, in welches die Strukturübertragung im Rahmen des Abformprozesses erfolgt, wurden auf Basis der durchgeführten Analysen erforderliche Mindestdrücke zur Erzielung vollflächiger, homogener Prägungen der Gitterstrukturen im Bereich von 40 N/mm² bis 140 N/mm² ermittelt. Vor dem Hintergrund der Gewährleistung einer ausreichenden Prozesssicherheit hat sich die Prägung bei Drücken von 50 N/mm² oberhalb des materialspezifischen Mindestdrucks bewährt. Die Überschreitung des für die Materialien aufgezeigten, zulässigen Maximaldrucks führt zu den dargestellten,

kritischen Veränderungen in den geprägten Bereichen, welche die Prozesssicherheit und / oder Funktionalität gefährden. Für Prägedrücke größer / gleich der aufgezeigten, materialspezifischen Mindestdrücke konnte für den untersuchten Zeitbereich von 0,14 ms bis 273 ms kein Einfluss der Zeitdauer der Druckaufbringung auf die Abformung der Gitterstrukturen festgestellt werden. Der ebenfalls betrachtete Einflussfaktor der Temperatur lieferte lediglich für die Prägung der metallisierten Werkstoffverbunde einen positiven Effekt. Durch Erhöhung der Oberflächentemperatur auf 85 °C bis 90 °C konnte für die Werkstoffverbunde Met. 50 gsm. und Met. 80 gsm. eine Verringerung der aufzubringenden Prägedrücke um 25 % bis 35 % im Vergleich zur Prägung bei Raumtemperatur nachgewiesen werden. Die Auswertung der untersuchten Einflussgrößen im Bereich der Strukturparameter zeigte, dass die Gitterperiode der erzeugten Strukturen bei Aufbringung von Drücken größer / gleich dem materialspezifischen Mindestdruck keinen Einfluss auf den geprägten Oberflächenanteil hat. Eine Abhängigkeit der Ergebnisse der Strukturabformung in die Zielmaterialien von der Gitterorientierung konnte für die durchgeführten Versuchsreihen nicht festgestellt werden. Mit einer kontaktlithographisch strukturierten Stahlwalze, welche symmetrisch geteilte Gitterstrukturen mit einer Gitterperiode von 2 µm und einer Strukturtiefe im Bereich von 170 nm bis 250 nm aufwies, führten um 20 % verminderte Prägedrücke zu vergleichbaren Ergebnissen, wie dies für die Prägung der LSFL oder Excimerlaser-Gitterstrukturen der Fall war. Ursächlich hierfür war die trapezförmige Strukturform dieser Gitterstrukturen im Profilschnitt. Limitierend wirkte die geringe Standzeit der auf diese Weise strukturierten Prägewalze, welche bei Prägedrücken von ca. 90 N/mm² lediglich einige zehn bis einige wenige hundert Meter betrug. Unter dem Aspekt einer, vom zu prägenden Zielmaterial ausgehenden oder auf Verunreinigungen innerhalb der Produktionslinie zurückzuführenden, abrasiven Belastung der Gitterstrukturen bieten größere Strukturturen Vorteile hinsichtlich der Standzeit der Prägewerkzeuge. Eine Tiefe der Gitterstrukturen im Bereich von ca. 50 nm war für die Prägung in Aluminium- sowie PLA-Folie bereits ausreichend. Infolge der materialbedingten Inhomogenitäten der papierbasierten Werkstoffverbunde sollten die Strukturen für die Prägung in diese Materialien größere Tiefen aufweisen. Gute Ergebnisse konnten in den untersuchten, metallisierten Werkstoffverbunden ab einer Strukturtiefe von 100 nm bzw. 150 nm für die Strukturübertragung in die aluminiumkaschierten Werkstoffverbunde erreicht werden. Größere Strukturturen führten nicht zu signifikanten Verbesserungen des

Prägeergebnisses. Hinsichtlich der für die Mikroprägewerkzeuge eingesetzten Werkstoffe sowie deren Einfluss ist eine umfassende Diskussion erfolgt. Auf die Gegenwalze aufgebraute Funktionsbeschichtungen, mit welchen eine Verbesserung der Homogenität sowie der Flächendeckung bei der rotativen Prägung in die Werkstoffverbunde erreicht werden sollte, waren für die zu realisierenden Materialvorschubgeschwindigkeiten von bis zu 132 m/min nicht dauerhaft funktionssicher. Für die untersuchten Werkstoffe lieferte lediglich die Kombination durchgehärteter Stähle der Werkstoffnummern 1.2379 und 1.2990 mit dem Schichtmaterial ta-C zufriedenstellende Ergebnisse in Bezug auf einen dauerhaft funktionssicheren Betrieb. Eine weitere Möglichkeit böte die technologisch realisierbare Fertigung der Prägewalzen aus Wolframcarbid-Hartmetall mit nachgelagerter ta-C-Schichtabscheidung. Bedingt durch die hierfür in Anwendung zu bringenden Fertigungsmittel sowie die damit einhergehenden Kostensteigerungen ist die Nutzung der untersuchten, gehärteten Stähle zu favorisieren. Im Ergebnis der Druckbelastung während des Prozesses der Prägung konnte auch für die gehärteten Stahlwalzen eine elastische Deformation nachgewiesen werden. Bei einem aufgebrauten Druck von 300 N/mm² wurden Durchbiegungen der Präge- und der Gegenwalze von ca. 6,5 µm in der Mitte der Walzen ermittelt. Verschiedene Ansätze zur Kompensation dieser Durchbiegung wurden diskutiert. Ergebnisse von Simulationsrechnungen für eine realisierte Versuchsanordnung mit ölhydraulischer Deformation der Walzenoberfläche im Kontaktbereich zwischen den Prägewalzen wurden aufgezeigt und in den Kontext einer spezifischen Ausformung der Walzenoberflächen zur Erzielung homogenerer Prägeergebnisse gesetzt. Vor dem Hintergrund der derzeit noch nicht erfolgten Überführung der aufgezeigten Prozesse zur Abformung von Gitterstrukturen mit Gitterperioden von kleiner / gleich 2 µm, insbesondere zur rotativen Prägung, in die industrielle Applikation erfolgte die Darstellung von Ergebnissen bei erschwerten Prüfbedingungen durchgeführter Laborexperimente. Diese zeigten für die Prägung des exemplarisch untersuchten, metallisierten Werkstoffverbundes Met. 50 gsm. bei Materiallängen bis 65 km sowie erhöhten Prägedrücken bis zu 485 N/mm² keine Indizien für einen abrasiven Verschleiß der strukturierten ta-C-Schichten auf den Funktionsflächen der Prägewalzen.

Abschließend wurden Ansätze zur Weiterentwicklung der papierbasierten Werkstoffverbunde diskutiert. Diese zielen vordergründig auf die Verminderung der

Oberflächenrauheit sowie Möglichkeiten zum Ausgleich bzw. der Verringerung von Inhomogenitäten des zu prägenden Materials ab. Die eingesetzten Vorlacke sollten mit einer Gesamtschichtdicke von 5 µm bis 10 µm auf das Grundpapier aufgetragen werden und hinsichtlich der thermischen Erweichung bei Temperaturen bis 80 °C fest sein sowie eine Glasübergangstemperatur im Bereich von 85 °C bis 90 °C aufweisen. Ein Verzicht auf die Aufbringung eines Toplacks ist zu favorisieren. Ist dieser anwendungsbezogen erforderlich sollte dessen Schichtdicke maximal 100 nm betragen.

Abschließend wurden potentielle Einsatzfelder für die aufgezeigten Verfahren zur Erzeugung beugungsoptisch wirksamer Gitterstrukturen sowie deren Abformung in spezifische Produktverpackungen erörtert. Diese sind neben der dekorativen Gestaltung der Oberflächen im Bereich des Produktmarketings insbesondere im Bereich der Produktauthentifizierung durch die Realisierung fälschungssicherer, produktspezifischer Originalitätsnachweise zu sehen. Für beide Bereiche wurden Einsatzszenarien bzw. Umsetzungsvarianten diskutiert und die sich hieraus ergebenden Vorteile dargestellt.

10. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik IWF: *Mikrozerspanung*, unter: <https://www.tu-braunschweig.de/iwf/fup/ft/forschung/ftpo/mikrozerspanung>; verfügbar am 11.10.2015
- [2] Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST: *Mikroschleifstifte mit compeDIA®-Diamantbeschichtung*, unter: <http://www.midias.org/compeDIA-Mikroschleifstifte.pdf>; verfügbar am 18.09.2015
- [3] M. Carrella, M. Walk, J.C. Aurich: *30-µm-Mikroschleifstifte mit CBN als Schneidstoff - Untersuchungen des Schleifprozesses mit Mikroschleifstiften in gehärtetem Stahl*; wt Werkstattstechnik online 102/11-12 (2012) 750-755
- [4] D. Rost: *Laserspulsabscheidung von superharten Schichten auf der Basis von diamantartigem Kohlenstoff und kubischem Bornitrid*; Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2008
- [5] M. Weikert: *Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen*; Dissertation, Universität Stuttgart, 2005
- [6] M.A. Câmara, J.C. Campos Rubio, A.M. Abrão, J.P. Davim: *State of the Art on Micromilling of Materials, a Review*; Journal of Materials Science & Technology 28/8 (2012) 673–685
- [7] W. Pfleging, Th. Schaller: *Mikromaterialbearbeitung durch spanabhebende und lasergestützte Verfahren*; NACHRICHTEN - Forschungszentrum Karlsruhe 34 (2002) 210-220
- [8] T. Schaller, L. Bohn, J. Mayer, K. Schubert: *Microstructure grooves with a width of less than 50 µm cut with ground hard metal micro end mills*; Precision Engineering 23/4 (1999) 229-235
- [9] K. Baier, M. Lehndorff, A. Katz: *Konzepte für erfolgreiche Mikrozerspanung*; Mikroproduktion 1(2004) 27-29

- [10] A. Herrero, I. Goenaga, S. Azcarate, L. Uriarte, A. Ivanov, A. Rees, C. Wenzel, C. Müller: *Mechanical micro-machining using milling, wire EDM, die-sinking EDM and diamond turning*; *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 52/7-8 (2006) 484-494
- [11] F. Klocke, St. Knodt, E. Brinksmeier, O. Riemer: *Skalierte Strukturen*; *VDI-Z Integrierte Produktion* 144 (2002) 54-57
- [12] R. Roth, B. Lukas, H. Balzer, F. Kuster, E. Weingärtner, K. Wegener: *Influence of the Anode Material and the Flushing Gas on the Dry Electrical Discharge Machining Process*; *International Journal of Automation Technology* 7/5 (2013) 581-592
- [13] R. A. Roth: *Trockene Funkenerosion*; Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2014
- [14] oelheld GmbH: *Wissenswertes zur Senkerosion*; Informationsschrift 03/2011
- [15] E. Uhlmann, S. Piltz, U. Doll: *Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining—Recent development*; *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 488–493
- [16] D.T. Pham, S.S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, K. Popov: *Micro-EDM—recent developments and research issues*; *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) 50–57
- [17] M.P. Jahan, M. Rahman, Y.S. Wong: *Micro-Electrical Discharge Machining (Micro-EDM): Processes, Varieties, and Applications*; *Comprehensive Materials Processing* 11 (2014) 333-371
- [18] G. Dumitru, B. Lüscher, M. Krack, S. Bruneau, J. Hermann, Y. Gerbig: *Laser processing of hardmetals: Physical basics and applications*; *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 23 (2005) 278–286
- [19] C. Momma, B. N. Chichkov, S. Nolte, F. v. Alvensleben, A. Tünnermann, H. Welling, B. Wellegehausen: *Short-pulse laser ablation of solid targets*; *Optics Communications* 129 (1996) 134-142

- [20] C. Momma, S. Nolte, B. N. Chichkov, F. v. Alvensleben, A. Tünnermann: *Precise laser ablation with ultrashort pulses*; Applied Surface Science 109/110 (1997) 15–19
- [21] E. Grundler: *Laser macht (Metall-)Dampf - Filigrane Strukturen im Werkzeug- und Formenbau mit Lasertechnik erzeugen*; VDI-Z Special Werkzeug- und Formenbau 5 (2001) 36-39
- [22] S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tünnermann, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, H. Welling: *Ablation of metals by ultrashort laser pulses*; Journal of the Optical Society of America B 14 (1997) 2716-2722
- [23] P. Mannion, J. Magee, E. Coyne, G. M. O'Connor: *Ablation thresholds in ultrafast laser micromachining of common metals in air*; Proceedings of SPIE, Vol. 4876 (2003) 470–478
- [24] A. P. Kanavin, I. V. Smetanin, V. A. Isakov, Yu. V. Afanasiev, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, S. Nolte, C. Momma, A. Tünnermann: *Heat transport in metals irradiated by ultrashort laser pulses*; Physical Review B 57 (1998) 14698 – 14703
- [25] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, M. Schmid, G. Hennig: *Surface structuring with ultra-short laser pulses: Basics, limitations and needs for high throughput*; Physics Procedia 56 (2014) 1047–1058
- [26] T. V. Kononenko, V. I. Konov, S. V. Garnov, R. Danielius, A. Piskarskas, G. Tamoshauskas, F. Dausinger: *Comparative study of the ablation of materials by femtosecond and pico- or nanosecond laser pulses*; Quantum Electronics 29 (1999) 724-728
- [27] P. Lickschat, J. Schille, M. Müller, S. Weißmantel, G. Reißer: *Comparative study on microstructuring of steel using pico- and femtosecond laser pulses*; Proceedings of ICALEO - 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (2012) 1261-1268
- [28] Pfeiffer M.; Engel A.; Weißmantel S.: *Microstructuring of Various Materials using Femtosecond Laser Pulses*; Congress Proceedings ICALEO 2009, (2009) 1436 - 1438

- [29] T. Abeln, A. Raiber, F. Dausinger, H. Hügel,: *Laser-Micro-Caving (LMC) – a tool for high precision ablation of steel*; Proceedings of the 30th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems - LANE'97 (1997) 877-885
- [30] T. Abeln, A. Raiber, F. Dausinger, H. Hügel,: *Laser-Micro-Caving (LMC) – a tool for high precision ablation of steel*; CIRP – Journal of Manufacturing Systems 28 (1999) 95-98
- [31] M. Weikert: *Reaktives Mikro-Abtragen unterschiedlicher Stähle mit innovativen cw-Festkörperlasern hoher Strahlqualität*; Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 1998
- [32] T. Abeln: *Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl*; Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [33] Joseph R. Davis: *ASM Specialty Handbook: Tool Materials*; ASM International (1995) 415-420
- [34] H. Shiomi: *Reactive ion etching of diamond in O₂ and CF₄ plasma, and fabrication of porous diamond for field emitter cathodes*; Japanese Journal of Applied Physics 36 (1997) 7745-7748
- [35] J. Sung, J. Lin: *Diamond Nanotechnology: Synthesis and Applications*; Pan Stanford Publishing (2009)
- [36] B. He, Y. Yang, M.F. Yuen, X.F. Chen, C.S. Lee, W.J. Zhang: *Vertical nanostructure arrays by plasma etching for applications in biology, energy, and electronics*; Nano Today 8 (2013) 265–289
- [37] G. S. Oehrlein: *Reactive ion etching*; in: S. M. Rossnagel, J. J. Cuomo, W. D. Westwood: *Handbook of Plasma Processing Technology*; Noyes Publications (1990) 196—215
- [38] W. J. Zhang, Y. Wu, C. Y. Chan, W. K. Wong, X. M. Meng, I. Bello, Y. Lifshitz, S. T. Lee: *Structuring single- and nano- crystalline diamond cones*; Diamond and Related Materials 13 (2004) 1037–1043

- [39] Y. S. Zou, K. L. Ma, W. J. Zhang, Q. Ye, Z. Q. Yao, Y. M. Chong, S. T. Lee: *Fabrication of diamond nanocones and nanowhiskers by bias-assisted plasma etching*; Diamond and Related Materials 16 (2007) 1208–1212
- [40] Y. S. Zou, Y. Yang, W. J. Zhang, Y. M. Chong, B. He, I. Bello and S. T. Lee: *Fabrication of diamond nanopillars and their arrays*; Applied Physics Letters 92, 053105 (2008)
- [41] N. J. Yang, H. Uetsuka, E. Osawa, and C. E. Nebel: *Vertically aligned nanowires from boron-doped diamond*; Nano Letters 8 (2008) 3573–3576
- [42] Q. Wang, J. J. Li, A. Z. Jin, Z. L. Wang, P. Xu, C. Z. Gu: *The growth and characterization of diamond cone arrays formed by plasma etching*; Diamond and Related Materials 15 (2006) 866-869
- [43] J. Y. Lin, Z. C. Li, C. Y. Chen, L. J. Chou, J. C. Hwang, C. S. Kou: *Fabrication of submicron scale vertically aligned diamond rods by mask-free oxygen plasma etching*; Diamond and Related Materials 20 (2011) 922-926
- [44] G. S. Sandhu, W.K. Chu: *Reactive ion etching of diamond*; Applied Physics Letters 55 (1989) 437-438
- [45] T. Harigai, H. Koji, H. Furuta, A. Hatta: *Formation of Nanofibers on the Surface of Diamond-Like Carbon Films by RF Oxygen Plasma Etching*; Japanese Journal of Applied Physics 50, 08JF12 (2011)
- [46] T. Harigai, K. Iwasa, H. Koji, N. Nitta, H. Furuta, A. Hatta: *Analysis on Self-Organized Formation of Nanofibers on Diamond-Like Carbon Film Surface during RF O₂ Plasma Etching*; Transactions of the Materials Research Society of Japan 38 (2013) 447-450
- [47] T. Harigai, K. Iwasa, H. Furuta, A. Hatta: *Hydrophilic DLC Surface Induced by Nanostructures Formed by RF O₂ Plasma Etching With Metal Micromasks*; IEEE Transactions on Plasma Science 42 (2014) 3858-3861
- [48] Y. Ando, Y. Nishibayashi, K. Kobashi, T. Hirao, K. Oura: *Smooth and high-rate reactive ion etching of diamond*; Diamond and Related Materials 11 (2002) 824-827

- [49] A. Barrancoa, F. Yuberoa, J.P. Espinósa, J. Beníteza, A.R. González-Elípea, J. Cotrinob, J. Allainc, T. Girardeauc, J.P. Rivière: *Room temperature synthesis of SiO₂ thin films by ion beam induced and plasma enhanced CVD*; Surface and Coatings Technology 142–144 (2001) 856–860
- [50] D. Beaulieu, Y. Ding, Z. L. Wang, W. J. Lackey: *Influence of process variables on electron beam chemical vapor deposition of platinum*; Journal of Vacuum Science and Technology B 23 (2005) 2151-2159
- [51] F.-W. Bach, T. Duda: *Moderne Beschichtungsverfahren*; Wiley-VCH (2000)
- [52] K. Piglmayer, H. Schieche, R. Chabicovsky: *On the reaction mechanism in laser-induced deposition of tungsten microstructures from WF₆/H₂*; Applied Surface Science 154–155 (2000) 365–368
- [53] C. J. Jensen, W. K. S. Chiu: *Open-air laser-induced chemical vapor deposition of silicon carbide coatings*; Surface and Coatings Technology 201 (2006) 2822–2828
- [54] M. J. Jackson: *Micro and Nanomanufacturing*; Springer Science+Business Media, LLC (2007) 464-472
- [55] W. Harth: *Halbleitertechnologie*; Vieweg+Teubner Verlag (1981)
- [56] E. Döring: *Werkstoffe der Elektrotechnik*; Vieweg+Teubner Verlag (1988)
- [57] M. Reisch: *Elektronische Bauelemente*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1998)
- [58] M. Guttman, P.-J. Jakobs, K. Kaiser, C. Vannahme, L. Zimmermann, M. Schelb, B. Matthis, C. Straus, T. Mappes, V. Saile: *Galvanische Fertigung von nano- und mikrostrukturierten Shim-Formeinsätzen*; Tagungsband zum Symposium "Galvanik - eine etablierte Technik innovativ angewendet", Fraunhofer Verlag (2010) 85-93
- [59] M. Guttman, P.-J. Jakobs, K. Kaiser, C. Vannahme, L. Zimmermann, M. Schelb, B. Matthis, C. Straus, T. Mappes, V. Saile: *Kombinierte Fertigung und innovativer Einsatz von mikro- und nanostrukturierten Shim-Formeinsätzen*; Galvanotechnik 2/2011 (2011) 394-402

- [60] C. H. Lee, K. Jiang: *Fabrication of thick electroforming micro mould using a KMPR negative tone photoresist*; Journal of Micromechanics and Microengineering 18 (2008) 055032
- [61] G. Schanz, K. Bade: *Microelectroforming of metal*; Advanced Micro and Nanosystems 4 (2005) 395-420
- [62] M. Worgull: *Hot embossing: theory and technology of microreplication*; William Andrew (2009)
- [63] ELEKTROFORM Gesellschaft für funktionelle Galvanotechnik mbH & Co. KG: Nickel und Nickelmodifikationen, unter: http://www.elektroform.eu/content.php?nav_id=51; verfügbar am 03.10.2015
- [64] C.-W. Chang, C.-Y. Chen, T.-L. Chang, C.-J. Ting, C.-P. Wang, C.-P. Chou: *Sapphire surface patterning using femtosecond laser micromachining*; Applied Physics A 109 (2012) 441–448
- [65] N. Sanner, N. Huot E. Audouard, C. Larat, P. Laporte, J. P. Huignard: *100-kHz diffraction-limited femtosecond laser micromachining*; Applied Physics B 80 (2005) 27-30
- [66] J. Kim, T.-J. Je, S.-H. Cho, E.-C. Jeon, K.-H. Whang: *Micro-Cutting with Diamond Tool Micro-Patterned by Femtosecond Laser*; International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 15 (2014) 1081-1085
- [67] C. M. Liebig, P. Srisungsitthisunti, A. M. Weiner, X. Xu: *Enhanced machining of steel using femtosecond pulse pairs*; Applied Physics A 101 (2010) 487-490
- [68] T. H. R. Crawford, A. Borowiec, H. K. Haugen: *Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800 nm pulses*; Applied Physics A 80 (2005) 1717-1724
- [69] M. Pfeiffer, A. Engel, S. Weißmantel, S. Scholze, G. Reisse: *Microstructuring of Steel and Hard Metal using Femtosecond Laser Pulses*; Physics Procedia 12 (2011) 60-66

- [70] F. Jahn, S. Weissmantel: *Mikrostrukturierung von tetraedisch amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C) mittels 248 nm KrF-Excimerlaser* ; Journal of the University of Applied Sciences Mittweida 4 (2015) 114-117
- [71] J. Ihlemann, A. Scholl, H. Schmidt, B. Wolff-Rottke: *Nanosecond and femtosecond excimer-laser ablation of oxide ceramics*; Applied Physics A 60 (1995) 411-417
- [72] N. B. Dahotre, S. P. Harimkar: *Laser Fabrication and Machining of Materials*; Springer, Boston, MA (2008) 451-476
- [73] P. M. Leufke: *Direkte Laserinterferenz-Strukturierung von Co/Pd-Multischichtsystemen mit senkrechter Anisotropie*; Diplomarbeit, Universität Konstanz, 2007
- [74] M. Bieda, C. Schmädicke, A. Wetzig, A. Lasagni: *Direct Laser Interference Patterning of Planar and Non-Planar Steels and Their Microstructural Characterization*; Metals and Materials International 19 (2013) 81-86
- [75] A. I. Aguilar-Morales, S. Alamri, A. F. Lasagni: *Micro-fabrication of high aspect ratio periodic structures on stainless steel by picosecond direct laser interference patterning*; Journal of Materials Processing Technology 252 (2018) 313–321
- [76] S. F. Beckemper: *Mikro- und Nanostrukturierung von Polymeroberflächen mittels Mehrstrahl-Laserinterferenz-Technik*; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2014
- [77] Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS: *Großflächige Herstellung von Mikro- und Submikrometerstrukturen - Oberflächenfunktionalisierung mit direkter Interferenz*; Infoblatt 800-2
- [78] A. Lasagni, D. Benke, T. Kunze, M. Bieda, S. Eckhardt, T. Roch, D. Langheinrich, J. Berger: *Bringing the Direct Laser Interference Patterning Method to Industry: a One Tool-Complete Solution for Surface Functionalization*; Journal of Laser Micro/Nanoengineering 10 (2015) 340-344

- [79] E. Kannatey-Asibu, Jr.: *Principles of laser materials processing*; John Wiley & Sons, Inc. (2009)
- [80] C. Ebner: *Untersuchungen zur Erzeugung von Nanostrukturen mittels Femtosekundenlaserstrahlung*; Masterarbeit, Hochschule Mittweida, 2015
- [81] M. Pfeiffer, A. Engel, K. Günther, H. Grüttner, S. Weißmantel, G. Reiß: *Ripple-Bildung mittels Femtosekundenlaserstrahlung auf Oberflächen von Metallen, Hartstoffen und superharten wasserstofffreien, amorphen Kohlenstoffschichten*; Journal of the University of Applied Sciences Mittweida 9 (2011) 51-57
- [82] J. E. Sipe, Jeff F. Young, J. S. Preston, H. M. v. Driel: *Laser-induced periodic surface structure I*; Physical Review B 27 (1983) 1141-1154
- [83] P. M. Fauchet, A. E. Siegman: *Surface ripples on silicon and gallium arsenide under pico-second laser illumination*; Applied Physics Letters 40 (1982) 824-826
- [84] J. E. Sipe, Jeff F. Young, J. S. Preston, H. M. v. Driel: *Laser-induced periodic surface structure II*; Physical Review B 27 (1983) 1155-1172
- [85] X. C. Wang, G. C. Lim, F. L. Ng, W. Liu, S. J. Chua: *Femtosecond pulsed laser-induced periodic surface structures on GaN/sapphire*; Applied Surface Science 252 (2005) 1492-1497
- [86] N. C. Kerr, B. A. Omar, S. E. Clark, D. C. Emmony: *The topography of laser-induced ripple structures*; Applied Physics 23 (1990) 884-889
- [87] M. Csete, Z. Bor: *Laser-induced periodic surface structure formation on polyethylene-terephthalate*; Applied Surface Science 133 (1998) 5-16
- [88] V. S. Mitko, G. R. B. E. Römer, A. J. Huis in't Veld, J. Z. P. Skolski, J. V. Obona, V. Ocelík, J. T. M. De Hosson: *Properties of High-Frequency Sub-Wavelength Ripples on Stainless Steel 304L under Ultra Short Pulse Laser Irradiation*; Physics Procedia 12 (2011) 99-104.
- [89] J. Schille, R. Ebert, U. Löschner, P. Regenfass, T. Suess, H. Exner: *Highspeed Laser Micro Processing using Ultrashort Laser Pulses*; Proceedings of

- [90] J. Schille, L. Schneider, M. Müller, U. Löschner, N. Goddard, P. Scully, H. Exner: *Highspeed Laser Micro Processing using Ultrashort Laser Pulses*; Proceedings of LAMP2013 - the 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing
- [91] T. J.-Y. Derrien, T. E. Itina, R. Torres, T. Sarnet, M. Sentis: *Possible surface plasmon polariton excitation under femtosecond laser irradiation of silicon*; Journal of Applied Physics 114 (2013) 083104
- [92] Holo East Ltd.: NARROW WEB EMBOSSEER, unter: <http://www.holoeast.com/PDF/HOLOGRAM-EMBOSSEING.pdf>; verfügbar am 15.06.2015
- [93] Holo East Ltd.: FOIL-STAMPING MACHINE, unter: <http://www.holoeast.com/PDF/HOT-FOIL-STAMPING.pdf>; verfügbar am 15.06.2015
- [94] Bajaj Holographics: hard narrow web embossing machine, unter: http://www.bajajholographics.com/hard_narrow_web_embossing_machine.html; verfügbar am 07.08.2015
- [95] Sanjan Packing Machinery Ltd.: Hologram Register mark Wide Web Embossers, unter: <http://www.sanjan.cn/index.aspx?ClassKey=Embossers&ArticleID=434>; verfügbar am 07.08.2015
- [96] Sanjan Packing Machinery Ltd.: Seamless Hologram Embossing Machine, unter: <http://www.sanjan.cn/index.aspx?ClassKey=Embossers&ArticleID=424>; verfügbar am 07.08.2015
- [97] Shanghai Henglei Hologram Co.,LTD.: Hologram Embossing Equipment, unter: <http://www.hlhologram.com/hologram%20embossing%20equipment.htm>; verfügbar am 13.08.2015

- [98] Breit Technologies: Cast and Cure™, unter: <http://www.breit-tech.com/shopcontent.asp?type=Cast%20and%20Cure>; verfügbar am 07.08.2015
- [99] Sanjan Packing Machinery Ltd.: UV Cold Transfer System, unter: <http://www.sanjan.cn/index.aspx?ClassKey=coldtransfer&ArticleID=435>; verfügbar am 13.08.2015
- [100] Sanjan Packing Machinery Ltd.: UV embossers, unter: <http://www.sanjan.cn/index.aspx?ClassKey=coldtransfer&ArticleID=431>; verfügbar am 13.08.2015
- [101] Breit Technologies: Narrow Web Equipment, unter: <http://www.breit-tech.com/shopcontent.asp?type=Narrow%20Web>; verfügbar am 13.08.2015
- [102] Foiltone Ltd: Cast & Cure Process, unter: <http://www.foiltone.com/pages.php?iPagelD=25>; verfügbar am 13.08.2015
- [103] Menglin Jiang, Shiwei Lin, Wenkai Jiang, Nengqian Pan: *Hot embossing holographic images in BOPP shrink films through large-area roll-to-roll nanoimprint lithography*; Applied Surface Science 311 (2014) 101–106
- [104] Patrick W. Leech, Robert A. Lee: *Hot embossing of diffractive optically variable images in biaxially-oriented polypropylene*; Microelectronic Engineering 84 (2007) 25–30
- [105] Patrick W. Leech , Robert A. Lee, Brett A. Sexton, Fiona Smith: *Hot embossing of micrographic elements in polypropylene*; Microelectronic Engineering 84 (2007) 109–113
- [106] M. Worgull, J.-F. Héту , K. K. Kabanemi, M. Hecke: *Modeling and optimization of the hot embossing process for micro- and nanocomponent fabrication*; Microsystem Technologies 12 (2006) 947-952
- [107] A. Kolew, M. Heilig, M. Schneider, D. Münch, R. Ezzat, N. Schneider, M. Worgull: *Hot embossing of transparent high aspect ratio micro parts*; Microsystem Technologies 20 (2014) 1967–1973

- [108] AKS Hartmetalltechnik GmbH: Hartmetallsorten, unter: <http://www.aks-hartmetall.de/Hartmetallsorten/AKSSorten.htm>; verfügbar am 17.12.2014
- [109] Oerlikon Balzers Coating: BALINIT® ALCRONA makes your tools fit for the ultimate in performance, unter: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bmx/documents/HQ001EN.pdf>; verfügbar am 03.01.2015
- [110] Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH: Produkte und Dienstleistungen, unter: http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bde/documents/broschures/DL_StaU_mfo_DE509DE_1010.pdf; verfügbar am 03.01.2015
- [111] G.S. Fox-Rabinovich, B.D. Beake, J.L. Endrino, S.C. Veldhuis, R. Parkinson, L.S. Shuster, M.S. Migranov: *Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings*; Surface & Coatings Technology 200 (2006) 5738–5742
- [112] Norm DIN EN 546-1:2007-03: *Aluminium und Aluminiumlegierungen – Folien – Teil 1: Technische Lieferbedingungen*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- [113] Norm DIN EN 573-3:2013-12: *Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug – Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013
- [114] ALCAN Aluminiumfolienwerk Berlin GmbH & Co., Alcan Deutschland GmbH, Novelis Deutschland GmbH, Eurofoil - Paper Coating GmbH: *Warenbegleitpapiere, Technische Lieferbedingungen*
- [115] Norm DIN EN ISO 527-1:2012-06: *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012
- [116] Mitsubishi Polyester Film GmbH: Produktdatenblatt Hostaphan® RHS, unter: http://europe-de.m-petfilm.de/wp-content/uploads/sites/3/Europe_178GER.pdf; verfügbar am 23.04.2014

- [117] Treofan Germany GmbH & Co. KG: *Warenbegleitpapiere, Technische Lieferbedingungen*
- [118] Folienwerk Wolfen GmbH: Produktdatenblatt PLA – Folie, unter: http://www.folienwerk-wolfen.de/uploads/media/Datenblatt_PLA.pdf, verfügbar am 13.07.2011
- [119] E. Baur, T. A. Osswald, N. Rudolph, S. Brinkmann, E. Schmachtenberg: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*; Carl Hanser Verlag, München (2013)
- [120] Norm DIN EN ISO 3274:1998-04: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1998
- [121] Norm DIN EN ISO 4287:2010-07: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010
- [122] Norm DIN EN ISO 25178-606:2013-02: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 606: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (Fokusvariation)*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013
- [123] Norm DIN EN ISO 6507-1:2006-03: *Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006
- [124] Norm DIN EN ISO 6507-4:2006-03: *Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 4: Tabellen zur Bestimmung der Härtewerte*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006
- [125] Norm DIN EN ISO 14577-1:2012-03: *Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter - Teil 1: Prüfverfahren*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012
- [126] Norm DIN EN ISO 14577-4:2007: *Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter -*

Teil 4: Prüfverfahren für metallische und nichtmetallische Schichten; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007

- [127] GFH GmbH: *Gleiche Qualität bei einem Drittel der Bearbeitungszeit*; Laser 2 (2015) 62-63
- [128] J. G. Fujimoto, J. M. Liu, E. P. Ippen, N. Bloembergen: *Femtosecond Laser Interaction with Metallic Tungsten and Nonequilibrium Electron and Lattice Temperatures*; Physical Review Letters 53 (1984) 1837–1840
- [129] T. Q. Qui, C. L. Tien: *Short-Pulse Laser Heating on Metals*; International Journal of Heat and Mass Transfer 35 (1992) 719-726
- [130] T. Q. Qui, C. L. Tien: *Heat Transfer Mechanisms during Short-Pulse Laser Heating of Metals*; Journal of Heat Transfer 115 (1993) 835-841
- [131] T. Q. Qui, C. L. Tien: *Femtosecond Laser Heating of Multi-Layer Metals-I Analysis*; International Journal of Heat and Mass Transfer 37 (1994) 2789-2797
- [132] T. Q. Qui, T. Juhasz, C. Suarez, W. E. Bron, C. L. Tien: *Femtosecond Laser Heating of Multi-Layer Metals-II Experiments*; International Journal of Heat and Mass Transfer 37 (1994) 2799-2808
- [133] D. Y. Tzou, J. K. Chen, J. E. Beraun: *Hot-Electron Blast Induced by Ultrashort-Pulsed Lasers in Layered Media*; International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 3369-3382
- [134] H. E. Elsayed-Ali, T. B. Norris, M. A. Pessot, G. A. Mourou: *Time-Resolved Observation of Electron-Phonon Relaxation in Copper*; Physical Review Letters 58 (1987) 1212-1215
- [135] R. W. Schoenlein, W. Z. Lin, J. G. Fujimoto, G. L. Eesley: *Femtosecond Studies of Nonequilibrium Electronic Processes in Metals*; Physical Review Letters 58 (1987) 1680-1683
- [136] T. Hertel, E. Knoesel, M. Wolf, G. Ertl: *Ultrafast Electron Dynamics at Cu (111): Response of an Electron Gas to Optical Excitation*; Physical Review Letters 76 (1996) 535-538

- [137] S. D. Brorson, A. Kazeroonian, J. S. Moodera, D. W. Face, T. K. Cheng, E. P. Ippen, M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus: *Femtosecond Room-Temperature Measurement of the Electron-Phonon Coupling Constant Gamma in Metallic Superconductors*; Physical Review Letters 64 (1990) 2172-2175
- [138] G. L. Eesley: *Generation of Nonequilibrium Electron and Lattice Temperatures in Copper by Picosecond Laser Pulses*; Physical Review B 33 (1986) 2144-2151
- [139] L. Jiang, H.-L. Tsai: *Improved Two-Temperature Model and its Application in Ultrashort Laser Heating of Metal Films*; Journal of Heat Transfer 127 (2005) 1167-1173
- [140] C. Cheng, X. Xu: *Mechanisms of decomposition of metal during femtosecond laser ablation*; Physical Review B 72 (2005) 165415
- [141] W.S. Fann, R. Storz, H.W. Tom, J. Bokor: *Direct measurement of nonequilibrium electron-energy distributions in subpicosecond laser-heated gold films*; Physical Review Letters 68 (1992) 2834-2837
- [142] J. Bonse, J. M. Wrobel, J. Krüger, W. Kautek: *Ultrashort-pulse laser ablation of indium phosphide in air*; Applied Physics A 72 (2001) 89-94
- [143] J. Güdde, J. Hohlfeld, J.G. Müller, E. Matthias: *Damage threshold dependence on electron-phonon coupling in Au and Ni films*; Applied Surface Science 127-129 (1998) 40-45
- [144] G. Dumitru, V. Romano, H.P. Weber, M.Sentis, W.Marine: *Femtosecond ablation of ultrahard materials*; Applied Physics A 74 (2002) 729-739
- [145] G. Dumitru, V. Romano, H. P. Weber, Y. Gerbig, H. Haefke, S. Bruneau, J. Hermann, M. Sentis: *Femtosecond laser ablation of cemented carbides: properties and tribological applications*; Applied Physics A 79 (2004) 629-632
- [146] D. Pietroy, Y. D. Maio, B. Moine, E. Baubeau, E. Audouard: *Femtosecond laser volume ablation rate and threshold measurements by differential weighing*; Optics Express 20 (2012) 29900-29908

- [147] J. Schille, L. Schneider, P. Lickschat, U. Loeschner, R. Ebert, H. Exner: *High-pulse repetition frequency ultrashort pulse laser processing of copper*; Journal of Laser Applications 27 (2015) S28007
- [148] S. R. P. Silva, S. Xu, B. K. Tay, H. S. Tan, H.-J. Scheibe, M. Chhowalla, W. I. Milne: *The structure of tetrahedral amorphous carbon thin films*; Thin Solid Films 290–291 (1996) 317–322
- [149] M. Chhowalla, J. Robertson, C. W. Chen, S. R. P. Silva, C. A. Davis, G. A. J. Amaratunga, W. I. Milne: *Influence of ion energy and substrate temperature on the optical and electronic properties of tetrahedral amorphous carbon (ta-C) films*; Journal of Applied Physics 81 (1997) 139–145
- [150] S. Neuville, A. Matthews: *A perspective on the optimisation of hard carbon and related coatings for engineering applications*; Thin Solid Films 515 (2007) 6619–6653
- [151] B. Schultrich: *Modeling of ta-C growth: Influence of the technological parameters*; Diamond and Related Materials 20 (2011) 785–792
- [152] B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann: *Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids*; Applied Physics A 63 (1996) 109–115
- [153] M. Pfeiffer, A. Engel, H. Grüttner, K. Günther, F. Marquardt, G. Reisse, S. Weissmantel: *Ripple formation in various metals and super-hard tetrahedral amorphous carbon films in consequence of femtosecond laser irradiation*; Applied Physics A 110 (2013) 655–659
- [154] J. Wang, C. Guo: *Formation of extraordinarily uniform periodic structures on metals induced by Femtosecond laser pulses*; Journal of Applied Physics 100 (2006) 023511
- [155] J. Z. P. Skolski, G. R. B. E. Römer, A. J. Huis in't Veld, V. S. Mitko, J. V. Obona, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson: *Modeling of Laser Induced Periodic Surface Structures*; Journal of Laser Micro/Nanoengineering 5 (2010) 263–268

- [156] A. Engel, M. Pfeiffer, S. Weißmantel: *Ripple-Bildung mittels Femtosekundenlaserstrahlung auf Oberflächen von Metallen und Hartstoffen*; Journal of the University of Applied Sciences Mittweida 4 (2015) 106-109
- [157] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, H. Schmidt: *Optik für Ingenieure*; Springer-Verlag Heidelberg (2002)
- [158] Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG: *Technisches Datenblatt 1.2365*
- [159] Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG: *Technisches Datenblatt 1.2367*
- [160] Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG: *Technisches Datenblatt 1.2379*
- [161] Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG: *Technisches Datenblatt 1.2990*
- [162] WES Hardmetal Engineering: *Technical data sheet CD3WJ*
- [163] V. Moraes, H. Riedl, R. Rachbauer, S. Kolozsvári, M. Ikeda, L. Prochaska, S. Paschen, P. H. Mayrhofer: *Thermal conductivity and mechanical properties of AlN-based thin films*; Journal of Applied Physics 119 (2016) 225304
- [164] X. Shan, Y. C. Liu, Y. C. Lam: *Studies of polymer deformation and recovery in micro hot embossing*; Microsystem Technologies 14 (2008) 1055-1060
- [165] J. H. Bos, M. Staberock: *Das Papierbuch: Handbuch der Papierherstellung*; ECA Pulp & Paper b.v. (2006)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand auf Basis eines kooperativen Verfahrens zwischen der TU Bergakademie Freiberg und der Hochschule Mittweida.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Biermann, Direktor des Instituts für Werkstofftechnik der TU Bergakademie Freiberg, danke ich für die Begleitung und Unterstützung bei der Erstellung der Dissertation. Die hilfreichen Anregungen, Gespräche und Diskussionen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Gleichwohl gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel für die Schaffung der Rahmenbedingungen zur Anfertigung der Dissertation sowie die Betreuung der Arbeit.

Ein weiterer Dank gebührt den Mitarbeitern unserer Forschungspartner, welche auf eigenen Wunsch hin nicht namentlich genannt werden sollen. Die Zuarbeiten sowie die Bereitstellung der Versuchsmaterialien haben die Erstellung der Dissertation erst ermöglicht.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen des Laserinstituts Hochschule Mittweida für die zielgerichtete Zusammenarbeit und Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, bedanken. Die anregenden Gespräche, die fachlichen Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung bei der Arbeit in den Laboren empfand ich stets als Gewinn.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern für den Rückhalt und die Unterstützung in der z.T. schwierigen und fordernden Zeit der Erstellung der Arbeit.

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Biermann: Auswahl des Materials, Diskussion und formale Hinweise

Prof. Dr. rer. nat. habil. Günter Reiß: Unterstützung bei den Berechnungen zur Erzeugung von Mischfarben

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel: Auswahl des Materials, Diskussion und formale Hinweise

Prof. Dr. rer. nat. habil. Alexander Horn: Diskussion und formale Hinweise

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.