

# Lasermikrosintern von keramischen Materialien

H. Exner (Sp)\*, L. Hartwig\*, A. Streek\*, M. Horn\*, S. Klötzer\*, R. Ebert\*, P. Regenfuss\*,

## Zusammenfassung:

Lasermikrosintern ist eine neuartige Technologie des selektiven Lasersinterns. Innerhalb der letzten zwei Jahre wurde es am Laserinstitut Mittelsachsen zu einem automatisierbaren und industriell einsetzbaren Verfahren zur generierenden Herstellung von Metallkörpern mit einer Formaflösung von 30µm entwickelt. In letzter Zeit wurden mit dieser Methode erstmals schichtweise Keramikkörper generiert, deren Strukturen ebenfalls Details in der Größenordnung von einigen 10µm aufweisen. Das Sintern des Materials erfolgt mithilfe von Laserstrahlung des nahen infraroten und des sichtbaren Spektralbereichs.

Die Technik eröffnet eine neue Dimension der Freiformgenerierung fein strukturierter und präziser Keramikkörper mit einem vielfältigen Anwendungspotential. Die erwartete strukturelle Auflösung der Produkte liegt bei 40µm. Das Verfahrensprinzip wird dargestellt und Bilder der Produkte werden präsentiert.

*Suchwörter: Lasermikrosintern, selektives Lasersintern, Keramik, Feldspat, Silber, Kupfer, Molybdän, Mikrobauteile*

## 1 Einleitung

Zu Beginn des Jahres 2003 informierte das Laserinstitut Mittelsachsen e.V. (LIM) die Fachwelt über eine neuentwickelte Modifikation des selektiven Lasersinterns (SLS). Mittlerweile ist diese Entwicklung international als „laser micro sintering“ bzw. „Lasermikrosintern“ bekannt. Durch diesen Schritt wurden die bis dahin bestehenden Auflösungs- und Rauheitsgrenzen des selektiven Lasersinterns [1] deutlich unterschritten.

Die Eigenständigkeit des am LIM entwickelten Lasermikrosinterns beruht auf der Kombination einer speziellen Anlage und der kompatiblen Lasersintermethode. Die Verfahren und Vorrichtungen sind deutschland- und weltweit als Patente und Gebrauchsmuster angemeldet. Das Verfahren wird unter dem Namen „microSintering“ zusammen mit der Anlage von der Firma 3D-Micromac AG Chemnitz angeboten.

Die Korngrößen der eingesetzten Pulver lagen anfangs unter 1µm. Mittlerweile werden auch Pulver mit Körnern zwischen 1µm und 10µm durch Lasermikrosintern zu Freiformen verarbeitet. In mehreren Fällen kann bei diesen Korngrößen auf eine Schutzgasatmosphäre verzichtet werden [2]. Die Technik bei der direkten Generierung von Metallmikrobauteilen hat sich für unterschiedliche Anwendungen bewährt [3] und dabei Anerkennung bei Werkzeugherstellern und Anwendern gewonnen.

Seit kurzem wurde dem Lasermikrosintern durch die Bearbeitung von keramischen Materialien ein neues Anwendungsfeld mit noch nicht abschätzbarem Umfang erschlossen.

Das Ziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist die direkte Generierung von keramischen Mikrobauteilen (Strukturauflösung 40µm) in einem einzigen Arbeitsgang. Das direkte Verfahren wurde gewählt, um die Schwierigkeiten auszuschließen, die durch die Schrumpfungsprozesse in Mehrstufenprozessen verursacht werden, da sich eine verlässliche Abschätzung der Schrumpfparameter immer auf Erfahrungswerte mit bekannten Bauteilgeometrien stützt.

Die ersten Arbeiten zum indirekten selektiven Lasersintern von keramischen Mikrokörpern liegen etwa 13 Jahre zurück [4,5]; sie beschäftigten sich im Wesentlichen mit der Generierung von Grünformen oder anderer Zwischenstadien des eigentlichen Produkts, die anschließend durch Ofensintern oder Infiltrationsprozesse ihre endgültige Form und Konsistenz erhielten. Diese Verfahren haben bereits einen hohen Grad der Vollkommenheit erreicht und können mittlerweile mit kommerziellen Anlagen durchgeführt werden [6,7]. Zum direkten selektiven Lasersintern dieser Materialklasse existiert hingegen sehr wenig Literatur.

---

\* Laserinstitut Mittelsachsen e.V. an der Hochschule Mittweida  
Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Über Selektives Lasersintern von Keramik ohne den Einsatz von Bindern wurde seit dem Jahre 1999 berichtet [8-11]. Die bearbeiteten Materialien waren genau genommen Porzellane oder Porzellanrohmaterialien, die als Schlicker aufgetragen und nach dem ersten Eintrocknen mit Laserstrahlung selektiv gesintert wurden. Die geometrische Auflösung des Verfahrens variierte von mehreren Millimetern bis zu einigen hundert Mikrometern. Eine kürzlich erschienene Arbeit berichtet über das direkte Sintern von Borosilikatglas bis zu 48% der spezifischen Materialdichte [12].

Auf der Grundlage eigener Erfahrung in der Laserbearbeitung von Keramik [13,14] werden gegenwärtig am LIM Verfahren zur direkten Generierung von keramischen Mikrokörpern entwickelt. Die eingesetzten Materialien sind Metall- oder Metalloxidpulver von kristallinem oder glasförmigem Gefüge. Einige der Pulverproben bestanden aus natürlichen Mineralien. Die ersten Versuchsläufe erbrachten Auflösungen von 100µm und Aspektverhältnisse von 2 bei Gesamthöhen der Bauteile von bis zu 7mm. Maximale Dichten von 48% der Materialdichte wurden gemessen.

## 2 Lasermikrosintern: Anlage, Prozess und Kenngrößen für das Metallsintern

### 2.1 Sinterkammer und Vorrichtung zum Pulverauftrag



**Abb. 1:** Variation der Materialzusammensetzung durch Einsatz mehrerer Rakel



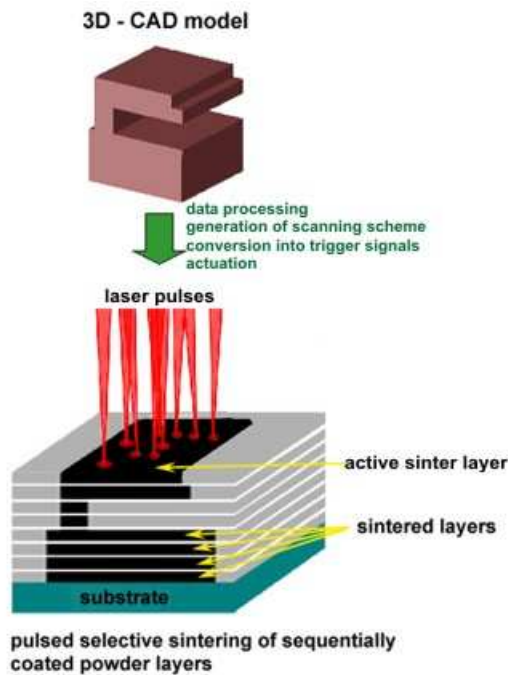
**Abb. 2:** Zylinderklingen dienen als Rakel und Zwischenspeicher für Pulver

Die ursprüngliche Anlage [1] wurde bereits sehr früh („Sinterkammer Typ2“) [15] zur Erhöhung der Effizienz und Erfüllung industrieller Anforderungen weiterentwickelt.

Das Pulvermaterial wird von zwei oder mehreren Rakeln **[Abb. 1]** in einer kreisförmigen Bewegung auf das Probensubstrat (auch „Sinterplattform“) gestrichen. Der Einsatz mehrerer Rakeln ermöglicht die Erzeugung von Materialgradienten oder einer gezielten Veränderung der Materialkörnung entlang der vertikalen Achse des 3D-Mikrokörpers. Die Klingen der Rakel sind Metallzylinder; sie dienen gleichzeitig als intermediäre Pulverreservoirs **[Abb. 2]**. Die Kolben sind gegen ihre Führungen abgedichtet, sodass weder Pulver noch Schlicker in den unteren Kammerbereich entweichen. Die Kammer kann bis zu einem Druck von  $10^{-3}$ Pa evakuiert und mit Schutz- oder Reaktionsgasen mit Drücken von  $10^{-3}$ Pa bis  $4 \times 10^5$ Pa beaufschlagt werden. Sie kann mit Reaktionsgasen bei einem Druck  $\geq 1$ Pa gespült werden, wodurch auch die Kombination von Lasersinter- mit Laser-CVD-Prozessen ermöglicht wird.

### 2.2 Der Lasermikrosinterprozess

Die Strahlquelle für das Metallsintern ist ein gütegeschalteter Nd:YAG-Laser ( $\lambda = 1064$ nm) [1], der im TEM<sub>00</sub> Mode mit einer Pulsfrequenz von 0,5-100kHz betrieben wird; in letzter Zeit wurden auch Pulse von Multimodestrahlung und andere Laser des nahen Infrarotbereichs zum Lasermikrosintern eingesetzt. Ein Beam-Scanner mit einem Scan-Feld von  $25 \times 25$ mm<sup>2</sup> lenkt die gepulste Laserstrahlung über den zur betreffenden Schicht gehörigen Bauteilquerschnitt **[Abb. 3]**.



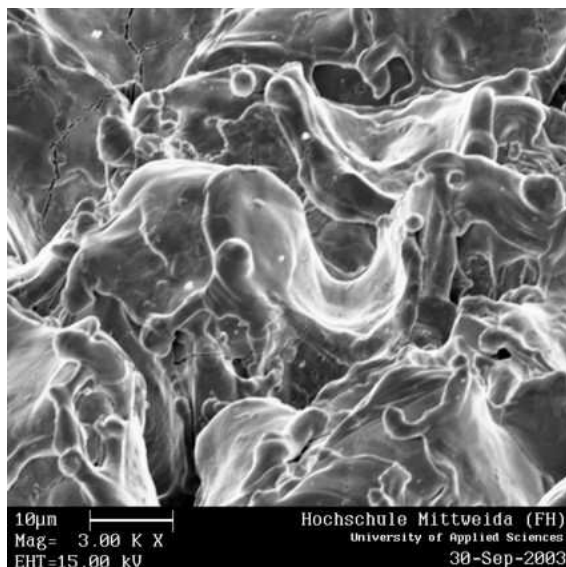
**Abb. 3:** Lasermikrosintern mit semistochastisch positionierten Pulsen

Die Verteilungsdichte und Intensität der Pulse werden – auch innerhalb einer Schicht – entsprechend den gewünschten Gefügegradienten variiert. Dies wird ermöglicht durch die Software *IVS STL Converter (Version 1.0)*, die eigens für diese Technik entwickelt wurde. Über sie wird der eigentliche Sinterprozess gesteuert. Daten im STL-Format können dadurch mit hoher Auflösung im Mikrometermaßstab verarbeitet werden. Besonders Kurvenverläufe werden mit hoher Geschwindigkeit und Präzision ausgeführt. Umriss- und Füllparameter können beliebig eingestellt werden. Ein zusätzliches Programm erlaubt die flexible Modifizierung des Rakelvorgangs. Auf die Programme wird über ein Interface zugegriffen, wodurch der automatische Ablauf des komplexen SLS-Prozesses realisiert wird. Diese Möglichkeit erlaubt die Erzeugung von Struktur- und Dichtegradienten in einem Mikrokörper.

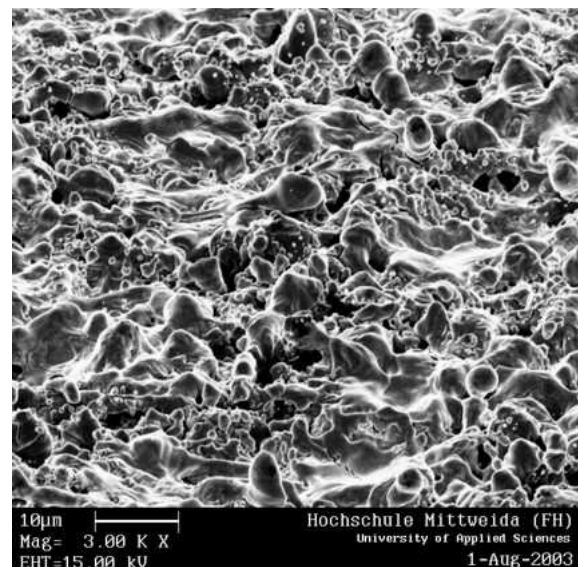
Ständig wiederholte Kalibrierung des Scanners ist in die Software integriert und garantiert die Präzision und Maßtreue des Vorgangs.

### 2.3 Die Modellvorstellung zum Lasermikrosintern

Bei Verwendung von Einkomponenten-Metallpulvern hat die gesinterte Fläche die Textur eines Netzwerks von Kratern oder vertikalen Brücken, die ca. 5-10 µm unter das durchschnittliche Oberflächenniveau reichen, mit Aufwürfen zwischen 1 und 3 µm. Mit diesen Pulvern kann in den Bauteilen 40-75% der Materialdichte erreicht werden. Mit Pulvermischungen – besonders solchen, die aus einer hoch und einer niedrig schmelzenden Komponente bestehen – können 90% und mehr erzielt werden [1]. Es wird angenommen, dass am Mechanismus des Sinterns mit gütegeschalteten



**Abb. 4a:** Pulse mit hoher Intensität



**Abb. 4b:** Pulse mit niedriger Intensität

Pulsen Vorgänge des Schmelzens, Verdampfens, Siedens oder Siedeabtrags beteiligt sind.

Durch den Rückstoß des verdampfenden oder eruptierenden Metalls auf die restliche Schmelze oder ungeschmolzenes Pulver wird mit jedem Puls das Material mit dem unterliegenden, bereits gesinterten Gefüge vernetzt. Die Pulse werden so gesetzt, dass sich im Anfangsstadium jeder Sinterschicht die erzeugten Mikroflächen untereinander nicht überlappen. Erst gegen Abschluss der

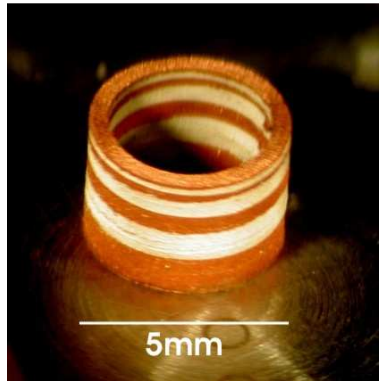
jeweiligen Schicht findet eine Quervernetzung statt. Aus diesem Regime der punktuellen Vernetzung resultiert die hohe Auflösung und die weitgehende Spannungsfreiheit der erzeugten Teile.

Die REM Aufnahmen in den **Abb. 4** lassen den Effekt der gütegeschalteten Pulse erkennen. Pulse mit höherer Intensität bewirken einen Prozess mit größerer Eindringtiefe und dadurch einen höheren Grad an vertikaler Vernetzung. Die erwähnte Software (2.2) erlaubt dem Anwender Mikrokörper mit ausreichender Festigkeit und dennoch hoher Oberflächenqualität zu generieren.

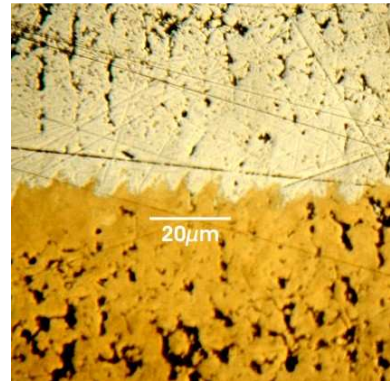
## 2.4 Lasermikrosintern mit alternierenden Materialien



**Abb. 5a:** Einsatz von zwei unterschiedlichen Materialien in der Sinterkammer Typ 2



**Abb. 5b:** Lasermikrogesintertes Bauteil aus Kupfer und Silber



**Abb. 5c:** Querschliff durch die Silber-Kupfer-Kontaktzone

Die Ausstattung der Sinterkammer Typ 2 mit zwei Raketklingen ermöglicht den wahlweisen Einsatz zweier unterschiedlicher Materialien zum Sintern [**Abb. 5a**]. Zur Demonstration wurde ein Zylinder aus 1µm-körnigem Silber- und Kupferpulver generiert [**Abb. 5b**]. Vorausgesetzt, die Materialien sind zueinander kompatibel, entsteht in der Kontaktzone ein hinreichend festes Gefüge [**Abb. 5c**].

## 3.5 Leistungsparameter des Metall-Lasermikrosinterns

Wie bereits erwähnt (1), kann Lasermikrosintern von Metallteilen mit Pulvern unterschiedlicher Korngröße durchgeführt werden, wobei in vielen Fällen, besonders bei den sub-µm-großen Körnern,

**Tab.1: Leistungskennwerte für das Lasermikrosintern mit zwei Pulverklassen: Korngrößen im sub-µm- (Wolfram) und 10µm- (Stahl; Nickel/Chrom) -bereich**

<b>Pulverklasse:</b>		<b>Korngröße [µm]</b>	
		<b>≤ 1</b>	<b>10</b>
<b>Sinterschichtdicke [µm]</b>		<b>1</b>	<b>10</b>
<b>minimale Rauheit <math>r_a</math> [µm]</b>	Normalatmosphäre	---	<b>8.5-10</b>
	sauerstofffreie Atmosphäre	<b>1.5-2.5</b>	<b>5.5-8.5</b>
<b>minimale Stegbreite [µm]</b>	Normalatmosphäre	---	<b>125-150</b>
	sauerstofffreie Atmosphäre	<b>20</b>	<b>55-60</b>
<b>Prozesszeit für 1000mm<sup>3</sup> [h:min]</b>	<b>gegenwärtige Anlage</b>	<b>65:00</b>	<b>08:00</b>
	<b>zukünftiger Anlage</b>	<b>35:30</b>	<b>02:50</b>

unter Schutzgas gearbeitet werden muss. Im Korngrößenbereich 1-10µm ist Lasermikrosintern bei geeigneten Materialien unter Normalatmosphäre möglich.

Oberflächenqualität und Auflösung der Produkte werden von der Pulverkorngröße und dem jeweiligen Sinterregime bestimmt.

Wenn der Prozess unter Normalatmosphäre durchgeführt wird, was mit gröberem Pulver aus 1-10µm-Körnern möglich ist, muss eine geringere Auflösung in Kauf genommen werden (s. Tab. 1). Andererseits ist beim Sintern gröberer Körner die Prozesszeit erheblich kürzer und die Möglichkeit an Normalatmosphäre zu arbeiten, vereinfacht das Verfahren.

### **3 Direktes Lasermikrosintern von Keramik und Glas**

#### **3.1 Materialvoraussetzungen und spezielle Probleme**

Vergleichbar mit dem Metallsintern erfordert das hochaufgelöste (40µm) Lasermikrosintern von keramischen Teilen zwei prinzipielle Eigenschaften des Ausgangsmaterials:

- als Voraussetzung für hohe Auflösung muss das Pulvermaterial Korngrößen um 1µm aufweisen.
- zum Start und zur Aufrechterhaltung des Sinterprozesses ist eine hinreichende Absorption der Strahlung durch das Material erforderlich.

Bezüglich der erforderlichen Feinheit des Pulvers kann erwartet werden, dass dies – trotz der hohen Härte und Festigkeit einiger oxidischer und nichtoxidischer Keramiken - letztendlich kein limitierender Faktor in der Materialauswahl ist.

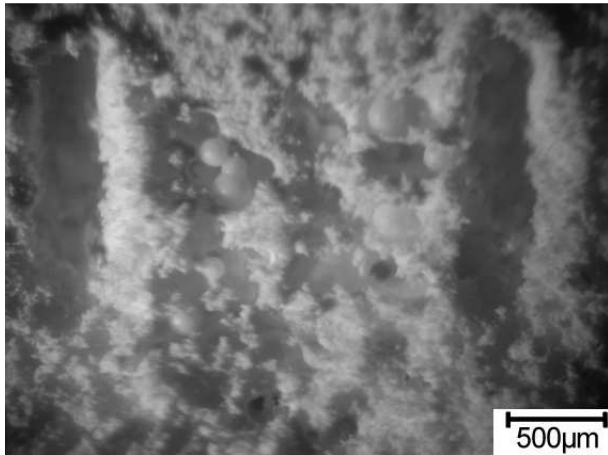
Die Forderung nach hinreichender Absorption (besonders der hier verwendeten NIR-Strahlung) wird jedoch nur von wenigen keramischen Materialien erfüllt. Gerade die besonders interessanten medizinisch unbedenklichen oxidischen Substanzen sind Dielektrika mit entsprechen breiten Bandlücken. Diese Materialien können zwar mit Strahlung von z.B. 10,6µm Wellenlänge problemlos bearbeitet werden, aufgrund der erzielbaren Fokusgröße können dabei jedoch nicht die erforderlichen Auflösungen erreicht werden.

Nach der anfänglichen Aktivierung durch die Strahlung erfordert die anschließende Kondensation und Verfestigung des Pulvermaterials – neben der weiteren Absorption der Strahlung und ihrer Dissipation in Wärme – eine Mindestpackungsdichte der bestrahlten Pulverkörner, um ihre Verbindung über Sinterhalse oder – wie es beim Lasermikrosintern überwiegend der Fall ist – über aufeinanderfolgende oder migrierende räumlich begrenzte Schmelzpool zu ermöglichen. Mit den bis dahin entwickelten Pulverbeschichtungsmethoden, auch denen die für feinkörnige Metallpulver entwickelt worden waren, konnten diese Mindestpackungsdichten zuerst nicht erzielt werden.

Trotz aller Schwierigkeiten ist wie oben erwähnt (1) das direkte Sintern von keramischen Mikroteilen für die Produktion von Unikaten interessant, besonders wenn unregelmäßige Geometrien eine Voraussage der Schrumpfung bei einem Nachsintern nicht zulassen. Daneben bietet das Verfahren der stochastischen Pulsverteilung die Möglichkeit, eine Sinterfläche relativ spannungsarm aufzubauen. Dennoch haben die generierten Keramikkörper im Vergleich zu Lasermikrosinterprodukten aus Metall eine vergleichsweise geringe Zugfestigkeit und konsequenterweise eine schlechte Temperaturwechselbeständigkeit.

#### **3.2 Erste Versuche mit natürlichem keramischen Material**

Die ersten Versuche wurden mit einer Pulverschicht eines natürlichen Materials – Feldspat – durchgeführt. Mit dem angewandten Rakelverfahren konnte nur eine Materialdichte im Pulverbett von 1-1,5g cm<sup>-3</sup> erzielt werden. Da die Absorption der NIR-Strahlung ( $\lambda = 1064\text{nm}$ ) durch dieses Material sehr schlecht ist, wurde von der Bearbeitung mit kontinuierlicher (cw) Strahlung mit einer Leistung von 12 W nur ein geringer Effekt erwartet. Allerdings war bereits bekannt, dass die Absorption dieser Wellenlänge durch Dielektrika – wozu der eingesetzte Feldspat gehört – stark temperaturabhängig ist. Das heißt, dass unter hoher Laserleistung nach anfänglicher Erwärmung des



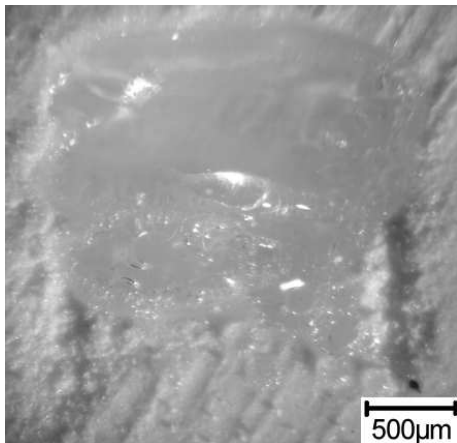
**Abb. 6:** Gerakelte Feldspatpulverschicht, mit 1064nm cw-Laserstrahlung beaufschlagt

Festkörper sind auf der Pulveroberfläche sichtbar - ein Hinweis auf partielles und diskontinuierliches Sintern des inhomogen verteilten Pulvermaterials.

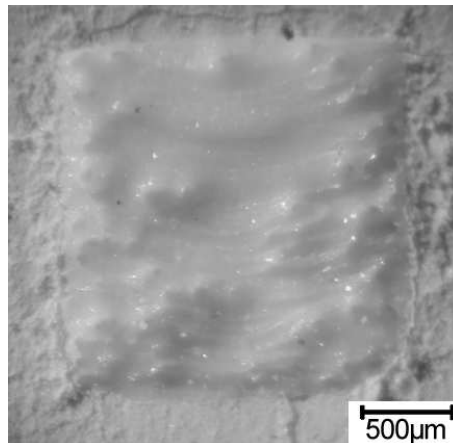
Materials dessen Absorption deutlich steigt, durch die vermehrt absorbierte Energie eine weitere beschleunigte Zunahme der Absorption bewirkt wird und dies somit zu einem lawinenartigen Anstieg der Materialerhitzung und -umwandlung führt. Die Folge ist eine rasche Überhitzung gefolgt von Verdampfung und Zersetzung des Materials. **Abb. 6** zeigt das Resultat der Bearbeitung einer solchen Schicht mit der oben erwähnten Laserstrahlung. Die Probe war in horizontalen Linien mit Laserstrahlung beaufschlagt worden. Die Gräben, die in **Abb. 6** in senkrechter Richtung verlaufen, begrenzen diese Linien und wurden durch einen überhöhten „First-Pulse“ zu Beginn einer jeden Linie verursacht. Aufgrund seiner hohen Intensität wurde das Material zersetzt. Kugelförmige glasartige

### 3.3 Versuche mit verdichtetem (gespresstem) Pulver

Um die Schwierigkeiten zu umgehen, die eine ungenügende Pulverdichte beim Lasersintern



**Abb. 7:** Hinreichende Absorption der Laserenergie in pelletiertem Feldspat



**Abb. 8:** Verbesserte Lasersinterresultate bei reduziertem Anteil an Glasbildnern

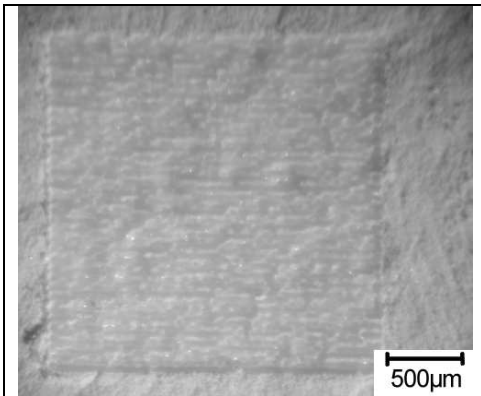
verursacht, wurde das Material in Tabletten mit einer Dichte von 2-2,5 g cm<sup>-3</sup> gepresst. Die Homogenität der Dichte erhöhte die Absorption der Laserstrahlung hinreichend für die Bearbeitung.

Wie die vorherigen Proben (4.2 [**Abb. 6**]) wurde diese in horizontalen Linien mit einem cw-Nd:YAG Laserstrahl abgefahren.

Aus **Abb. 7** ist ersichtlich, dass der Effekt des „First-Pulse“ (4.2) merklich kleiner ist, da die Überhitzung des Materials in der relativ dichteren Packung der Körner deutlich geringer ist. Die bessere Wärmeleitung ermöglicht einen kontinuierlichen Verlauf der Reaktion der Umwandlung des Pulvers. Das Resultat ist ein zusammenhängender Glaskörper, dessen Gefüge jedoch zu spröde ist, um als Werkstoff für funktionelle Bauteile zu dienen.

Als Konsequenz daraus – da die Ausbildung der Glasphase hauptsächlich auf den Gehalt an SiO<sub>2</sub> im Pulver zurückgeführt wird – wurden versuchsweise unterschiedliche Mischungen aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und SiO<sub>2</sub> bearbeitet, um einen sinterbaren Werkstoff zu finden, dessen Glasphase gerade ausreicht, um als Matrix die kristallinen Füllstoffe aufzunehmen. **Abb. 8** zeigt eine rechteckige Fläche in einer Tablette mit erheblich reduziertem Anteil an glasbildender Komponente. Das optimale Verhältnis aus kristallinem Anteil und Glasbildner wurde auf das eingesetzte Feldspatpulver übertragen, d.h. es wurde zur Reduktion des relativen SiO<sub>2</sub>-Anteils mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> versetzt. Mit dieser Mischung wurden vergleichbare Sinterresultate erzielt wie mit der entsprechenden Mischung aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und SiO<sub>2</sub>.

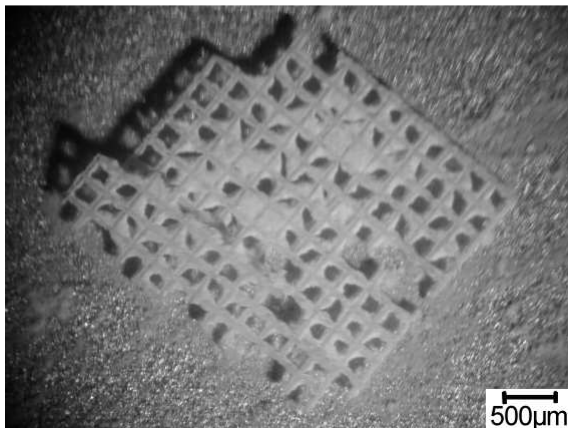
### 3.4 Verbesserte Auflösung durch Sintern mit gütegeschalteten Laserpulsen – Einfluss der Intensität



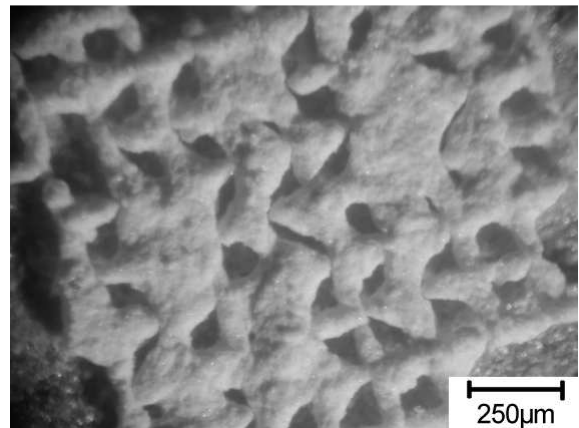
**Abb. 9:** Höhere Auflösung mit gütegeschalteten Laserpulsen

Da bei der Bearbeitung mit kontinuierlicher Laserstrahlung wegen der oben erläuterten Effekte (4.2) Überhitzung aber auch spontaner Abbruch des Prozesses erfolgen kann, wodurch unkontrollierbare Abweichungen von der angestrebten Geometrie der Sinterbauteile erfolgen [Abb. 8], wurde der Prozess mit gütegeschalteten Pulsen durchgeführt. Dadurch wurde der Sinterverlauf in eine Vielzahl von Schritten aufgeteilt, wobei in jedem Schritt mit hinreichend hoher Intensität gearbeitet werden kann, um die Absorptionsschwelle zu überwinden. Durch die Begrenzung der Pulsenergie kann jedoch der zerstörende Lawineneffekt (3.2) minimiert werden. Überhitzung wird ebenfalls durch Abkühlen in den „Pulspausen“ unterbunden. Am Beispiel der gesinterten quadratischen Fläche in Abb. 9 ist sichtbar, dass jede der horizontalen Sinterzeilen auf eine deutlich engere Spur begrenzt ist als

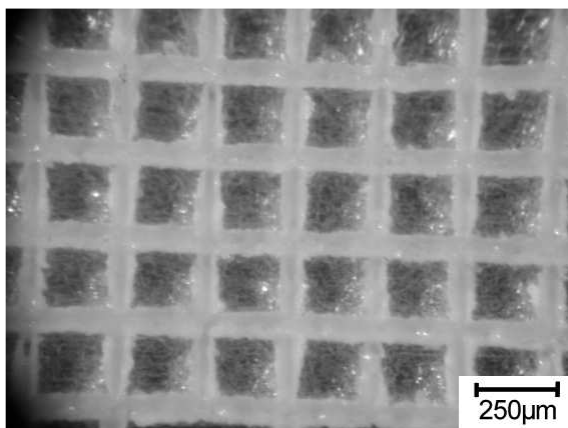
in der Probe, die mit dem Laser in der kontinuierlichen Betriebsart erzeugt wurde [Abb. 8] und die eine fast vollständig verschmolzene Textur zeigt.



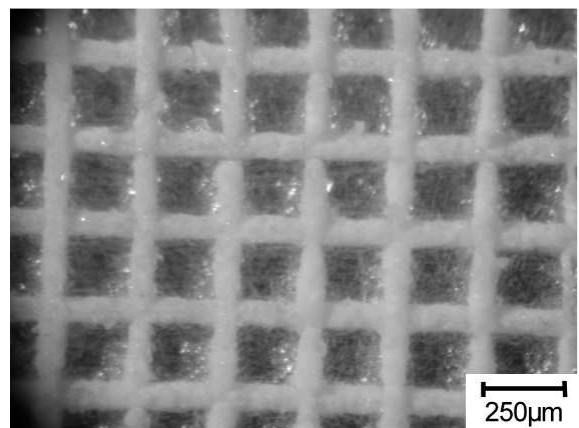
**Abb. 10a:** Aufsicht auf ein lasergesintertes Mikrogitter aus  $Al_2O_3$ /Feldspat (hohe Intensität)



**Abb. 10b:** Bodenansicht von Abb. 10a

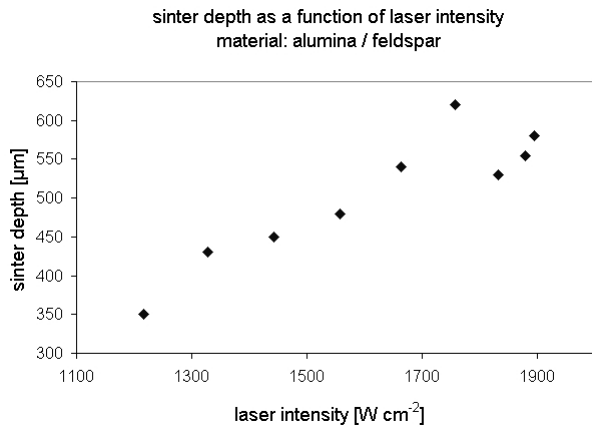


**Abb. 11a:** Aufsicht auf ein lasergesintertes Mikrogitter aus  $Al_2O_3$ /Feldspat (niedere Intensität)



**Abb. 11b:** Bodenansicht von Abb. 11a

Wie zu erwarten nimmt mit der Strahlintensität (bei gleichem Fokusbereich und gleicher Pulsdauer) das effektive Sintervolumen pro Puls zu und entsprechend die Präzision des Bauteils: **Abb. 10** und **11** zeigen zwei gitterähnliche Sinterstrukturen mit einem Gitterlinienabstand von  $250\mu\text{m}$ .

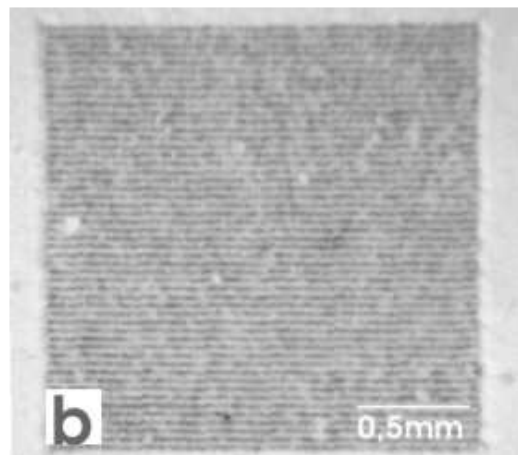
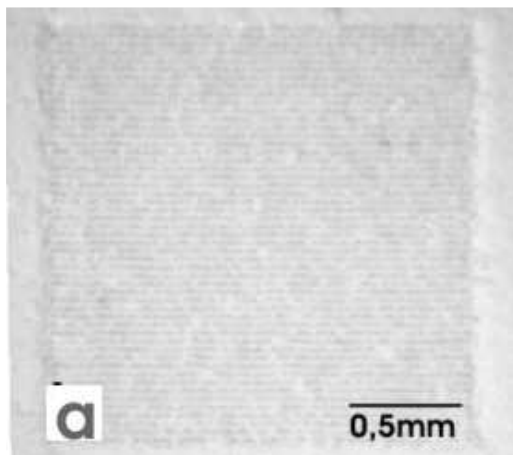


**Abb. 12:** Effektive Sintertiefe in Abhängigkeit von der Intensität

Die Probe in **Abb. 10** wurde mit hoher Intensität gesintert und das in **Abb. 11** abgebildete Bauteil mit nur einem Drittel der Intensität; aus dem Vergleich geht klar hervor, dass mit der geringeren Intensität eine höhere Auflösung erzielt wird. Das Diagramm in **Abb. 12** zeigt die gemessenen effektiven Sintertiefen in Abhängigkeit von der Intensität im Bereich von  $1100$  bis  $2000\text{ Wcm}^{-2}$ .

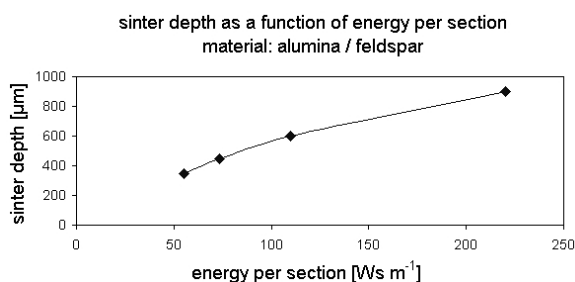
Trotz der ungünstigen Auswirkung auf die Auflösung darf eine minimale Sintertiefe nicht unterschritten werden, um eine ausreichende Verfestigung und Verdichtung des Materials zu gewährleisten. Beim selektiven Lasersintern müssen ständig Kompromisse zwischen Strukturauflösung und Festigkeit sowie Bauteilhomogenität andererseits gemacht werden.

Der Vergleich der gesinterten Flächen in den **Abb. 13** zeigt, dass mit steigender Pulspitzenleistung und damit Intensität ebenfalls der Grad der Materialzersetzung zunimmt.

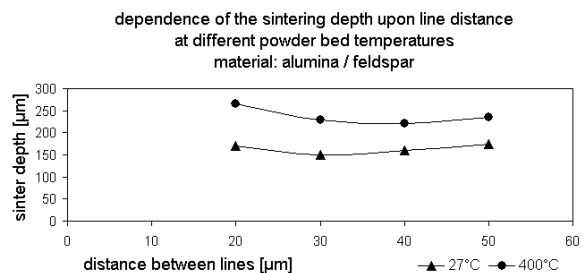


**Abb. 13:** Abhängigkeit des Sintereffekts von der Pulsform; Die Bearbeitung der Proben unterscheidet sich in der Pulspitzenleistung. Probe **a**: einfache Pulspitzenleistung; Probe **b**: doppelte Pulspitzenleistung.

### 3.5 Einfluss der Streckenenergie



**Abb. 14:** Effektive Sintertiefe in Abhängigkeit von der Streckenenergie



**Abb. 15:** Effektive Sintertiefe in Abhängigkeit vom Zeilenabstand

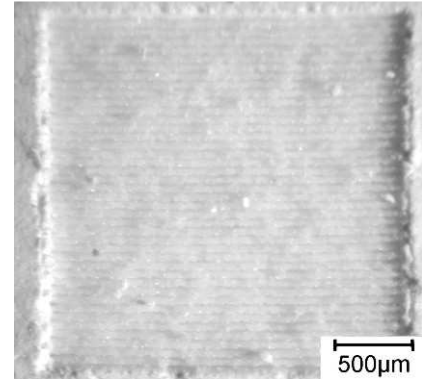


Die Dicke der Plättchen, die durch das Sintern eines 2x2mm-Quadrats auf der Oberfläche einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Feldspat-Tablette entstanden waren, wurden gemessen und als „Sintertiefe“ des entsprechenden angewandten Laserregimes definiert. Die Diagramme in den **Abb. 14** und **15** stellen die Sintertiefen in Abhängigkeit von der Streckenenergie [**Abb. 14**] und dem Zeilenabstand der Laserspuren [**Abb. 15**] dar. Daraus kann entnommen werden, dass nicht nur das gesinterte Volumen mit der absorbierten Energie zunimmt sondern auch, dass, wie oben bereits erwähnt (4.2), mit steigender Pulverbetttemperatur die spezifische Absorption größer wird.

### 3.6 Sinterresultate mit 532nm-Strahlung

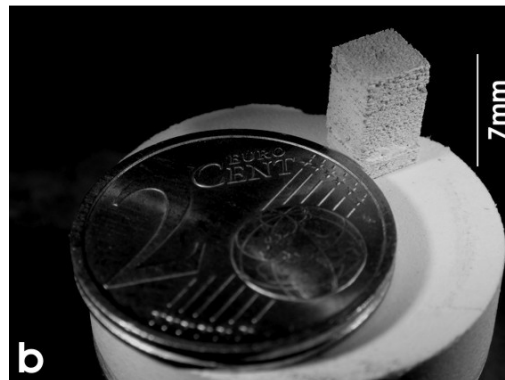
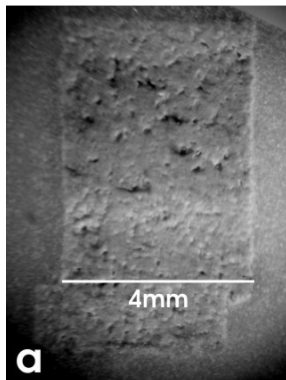
Mit energiereicherer Strahlung als die des nahen Infrarot kann der Sinterprozess temperaturunabhängig gestartet werden, was eine niedrigere Sinterschwelle für diese Wellenlängen nahelegt. Diese Hypothese wurde durch Beobachtungen beim Sintern von Keramikpulvertabletten mit gütegeschalteten Pulsen eines frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers bestätigt: Weder gibt es Anzeichen, dass für den Start der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Material ein Vorheizen nötig ist, noch beobachtet man den erwähnten „Lawineneffekt“ (4.2). Dementsprechend wird der Ablauf des Sinterprozesses weder durch spontane Unterbrechungen noch durch unkontrollierbare Dissoziationsereignisse gestört.

**Abb. 16** zeigt eine quadratische Fläche, die mit gütegeschalteten 532nm-Pulsen gesintert wurde. Die besprochenen Sinter Eigenschaften dieser Wellenlänge führen zu relativ guten Auflösungen.



**Abb. 16:** Mit Laserpulsen der Wellenlänge 532nm gesinterte Platte

### 3.7 Gegenwärtiger Stand des Lasermikrosinterns von Keramik



**Abb. 17:** Schichtweise gesintertem Keramikkörper; Höhe: 7mm.  
**a:** Querschliff, der deutlich die hohe Dichte zeigt; **b:** Größenvergleich

Inzwischen wurde das Verfahren des Lasermikrosinterns erfolgreich zur Herstellung von keramischen 3D Mikroteilen aus sukzessive aufgetragenen und gesinterten Pulverschichten angewandt. **Abb. 17** zeigt ein quadratisches Prisma, das durch direktes selektives Lasersintern von Pulverschichten einer oxidischen Spezialmischung aus Rohstoffen für Glas und Keramik aufgebaut wurde. Zum Aufziehen

ausreichend dichter Pulverschichten musste eigens eine technische Lösung entwickelt werden. Der Querschliff in **Abb. 17a** zeigt die verhältnismäßig hohe Dichte des Gefüges.

## 4 Zusammenfassung, Schlussfolgerung, Aussichten

Lasermikrosintern von keramischen Materialien hat die direkte Freiformgenerierung keramischer Mikroteile mit einer Auflösung von 40µm zum Ziel. Erste Resultate haben die Machbarkeit des Vorhabens bewiesen. Körper mit einfachen Geometrien wurden bis zu einer Höhe von 7mm gebaut. Die Strukturauflösung betrug 200-150µm, die Dichte der Gefüge 90% und mehr der Materialdichte. Die besten horizontalen Auflösungen lagen unter 100µm und wurden beim Sintern von Pulvertabletten erzielt.

Die Technik stützt sich auf die beim Lasermikrosintern von Metallpulvern erworbenen Erfahrungen, musste jedoch modifiziert und erweitert werden, um die Ansprüche zu erfüllen, die aus den

komplexeren Reaktionen des Sinterns von Glas und Keramik sowie aus den problematischeren optischen und mechanischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe und Produkte entstehen.

Weiterhin erfordert dieser neuartige Prozess der Freiformgenerierung von glasigen oder keramischen Mikroteilen eine spezifische Kombination von Ausgangsmaterialien, die ebenso auf den Lasersinterprozess abgestimmt ist, wie die Ausgangsstoffe der konventionellen Keramik und Glasproduktion über lange Zeit an die Bedürfnisse und Möglichkeiten der Ofenprozesse angepasst wurden.

Somit wurden die ersten Schritte auf einem Weg unternommen, von dessen weiterem Verlauf eventuell neue keramische Materialien mit neuen Eigenschaften erwartet werden können.

## 5 Danksagung

Ein Teil der präsentierten Resultate entstanden in Rahmen eines Projekts, das vom europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) 2000-2006 im Rahmen der Technologieförderung und mit Mitteln des Freistaats Sachsen unterstützt wird.

Unsere Industriepartner sind caddental GmbH (Mittweida), 3D MICROMAC AG (Chemnitz) und IVS Solutions AG (Chemnitz.).

## 6 Referenzen

- [1] Regenfuss, P., Hartwig, L., Klötzer, S., Ebert, R., Exner, H.; 2004, 'Microparts by a Novel Modification of Selective Laser Sintering', *SME Technical paper TP04PUB185*.
- [2] Regenfuß, P.; Streek, A.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Maaz, A.; Ebert, R.; Exner, H. 2005, 'Advancements in Laser Micro Sintering', in E. Beyer et. al (eds) *Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, Germany June 13-16 2005*, ATV-Verlag GmbH, ISBN 3-00-016-402-2, pp. 685-688.
- [3] Regenfuss, P.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Ebert, R.; Brabant, Th.; Petsch, T.; Exner, H. 2005, 'Industrial freeform generation of microtools by laser micro sintering', *Rapid Prototyping Journal*, Jan. 2005, vol. 11, no. 1, pp. 18-25.
- [4] Vail, N.K.; Barlow, J.W., 1992, 'Ceramic Structures by Selective Laser Sintering of Microencapsulated Finely Divided Ceramic Materials', *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, vol. 3, pp. 124-130.
- [5] Beaman, J.J.; Barlow, J.W.; Bourell, D.L.; Crawford, R.H.; Marcus, H.L.; McAlea, D.P. 1997, 'Solid freeform fabrication, a new direction in manufacturing', Dordrecht, Kluwer.
- [6] Castle Island Co. REV 1a. 2003, 'RP's frequently asked Questions'. Retrieved: August 20, 2004, from <http://home.att.net/~castleisland/faq/faq220.html>.
- [7] Shellabear, M.; Nirhyla, O. 2004, 'DMLS-Development history and state of the art', in M. Geiger & A. Otto (eds), *Laser Assisted Netshape Engineering 4, Proceedings of the 4<sup>th</sup> LANE 2004, September 21-24 2004, Erlangen, Germany, Bamberg-Meisenbach*, ISBN 3-87525-202-0, pp. 393-404.
- [8] Petzold, J, 1999, 'Porzellanmusterherstellung mit Hilfe der Lasersinterung', *Keramische Zeitschrift* vol 51, no. 6; pp. 450 – 454.
- [9] Li, X.; Crocker, J.; Geiss, E.; Shaw, L.; Marcus, H.; Cameron, T. 2000, 'Evaluation of Microstructure and Properties for Multi-Materials Laser Densification of Dental Restorations', in D. L. Bourell et al. (eds), *The Proceedings of the 11th Annual SFF Symposium*, 2000, pp. 159–167.
- [10] Görke, R., Krause, T., Günster, J., Ries, C., Heinrich, J.G., 2000, 'Laser Assisted Sintering of Porcelain' in: J.P. Sing, N.A. Bansal, K. Niihara (eds.): *Innovative Processing and Synthesis of Ceramics, Glasses and Composites III, Ceramic Transactions*, vol. 108, pp.91-96.
- [11] Li, X.; Wang, J.; Augustine, A.; Shaw, L.L.; Harris L. Marcus; H.L. 2004, 'Microstructure Evaluation for Laser Densification of Dental Porcelains', in D. L. Bourell et al. (eds), *The Proceedings of the 15th Annual SFF Symposium*, 2004, pp. 195–202.
- [12] Klocke, F.; McClung, A.; Ader, C. 2004, 'Direct Laser Sintering of Borosilicate Glass', in D. L. Bourell et al. (eds), *The Proceedings of the 15th Annual SFF Symposium*, 2004, pp. 214–219.

- [13] Nagel, A.-M.; Nieher, M.; Exner, H. 2001, 'Qualitativ hochwertige Keramikschichten auf Metall', *Lasermagazin*, vol 2, pp. 18-19.
- [14] Sachs, M.; Nagel, A.-M.; Exner, H. 1999, „Modellierung von Temperatur- und Spannungsfeldern zum Laserschweißen von Keramik“, *Lasermagazin* vol 6, p. 17.
- [15] Exner, H.; Regenfuss, P.; Hartwig, L.; Klötzer, S; Ebert, R. 2003, 'Microsintering of Miniature and Precise Components and Tools', *Proc. of the Euro-uRapid, Frankfurt/Main*, December 1-2, 2003, B/3.