
Verfahren und Systeme zur Mikro-und Nanostrukturierung mit Ultrakurzpulslasern

Arnold Gillner

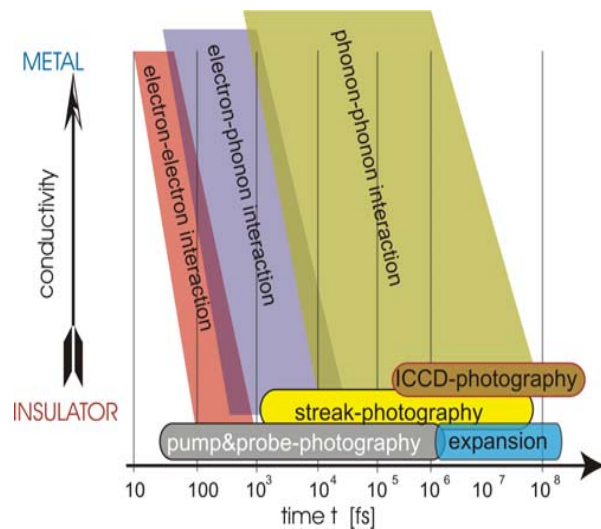
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik Aachen

Gliederung



- Grundlagen Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung
- Werkstoffmodifikation mit UKP-Laserstrahlung
- 2-Photonen-Prozesse mit UKP-Lasern
- Laserabtrag mit ns- und ps-Lasern
- Laserstrahlquellen zum Präzisionsabtrag
- Maschinenteknik zum Präzisionsabtrag mit Laserstrahlung

Grundlagen Laser-Wechselwirkung



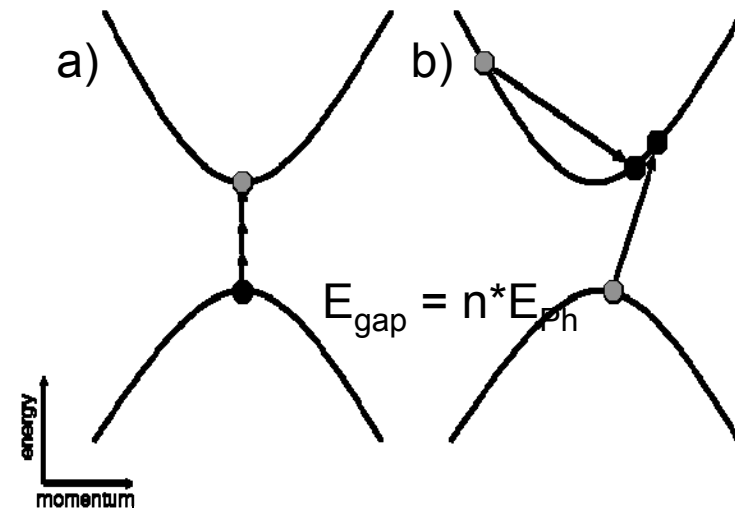
- Elektron-Phonon Wechselwirkung ($t_{ep} < 1 \text{ ps}$)

→ Plasmadynamik

- Phonon-Phonon Wechselwirkung ($t_{pp} < 100 \text{ ns}$)

→ Schmelzbildung

→ Mikrostrukturelle Eigenschaftsänderung

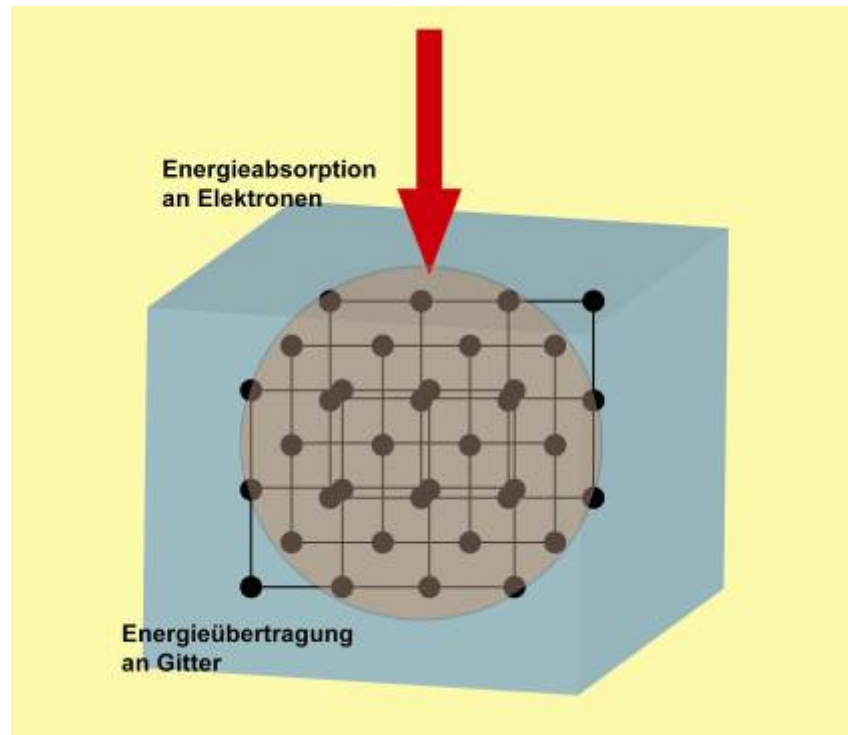


a) Multiphotonen-Absorption $\sim I^n$

b) Avalanche-Ionisation $\sim I$

Metallisches Verhalten aller Werkstoffe
während und kurz nach Bstrahlung

ps-Wechselwirkung mit Metallen



- Energieabsorption an Elektronen
- Übertragung der Energie an Gitter nach typischerweise 10 ps
- Erwärmen und Aufschmelzen nach Ende des Laserpulses



- Keine Wechselwirkung Strahlung mit Dampf und Schmelze
- Überwiegend dampfförmiger Abtrag
- Minimale thermische Eindringtiefe

$$T(x) = \frac{2I_0}{K} \sqrt{\kappa t} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\kappa t}}$$

2-Temperatur-Modell der Kurzpulsbearbeitung

Temperaturen

Elektronentemperatur $c_E \frac{\partial T_E}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T_E) - G(T_E - T_L) + E_{opt}$

Phonontemperatur $c_L \frac{\partial T_L}{\partial t} = G(T_E - T_L)$

Kopplungskonstante $G = \frac{\pi m n_e v^2}{6 \tau (T_E) T_E}$

E_{opt} = Absorbierte optische Energie

m_e = Elektronenmasse

n_e = Elektronendichte

v = Elektronengeschwindigkeit

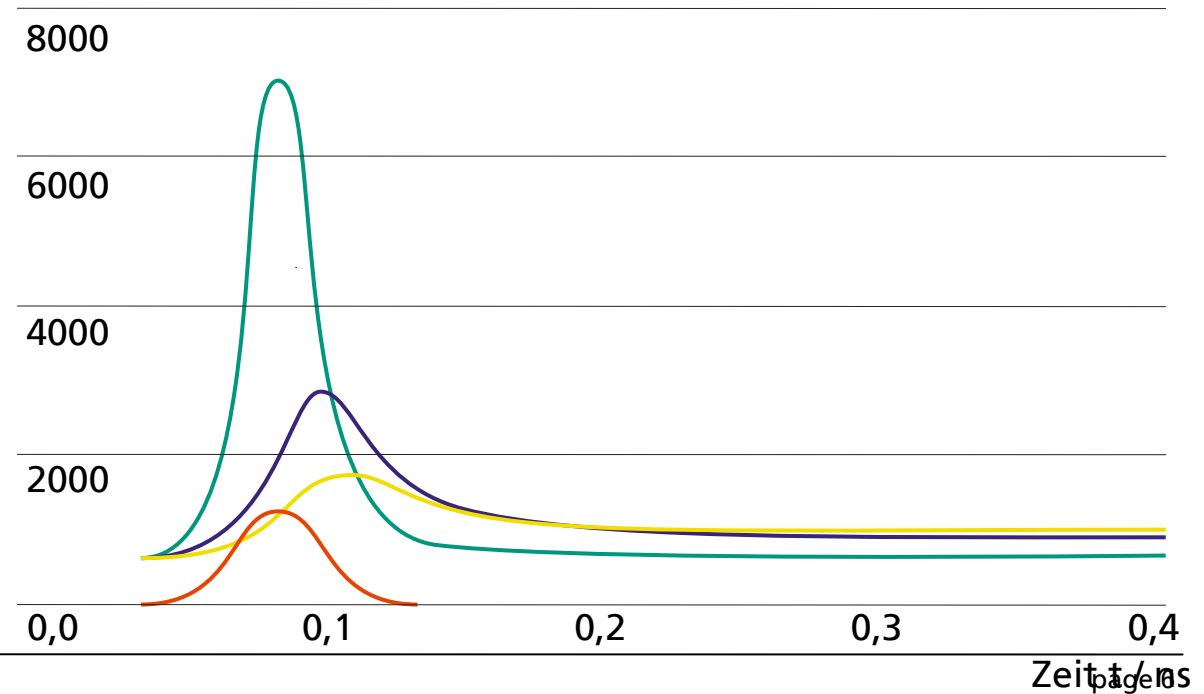
τ = Zeit zwischen zwei Elektronenstößen



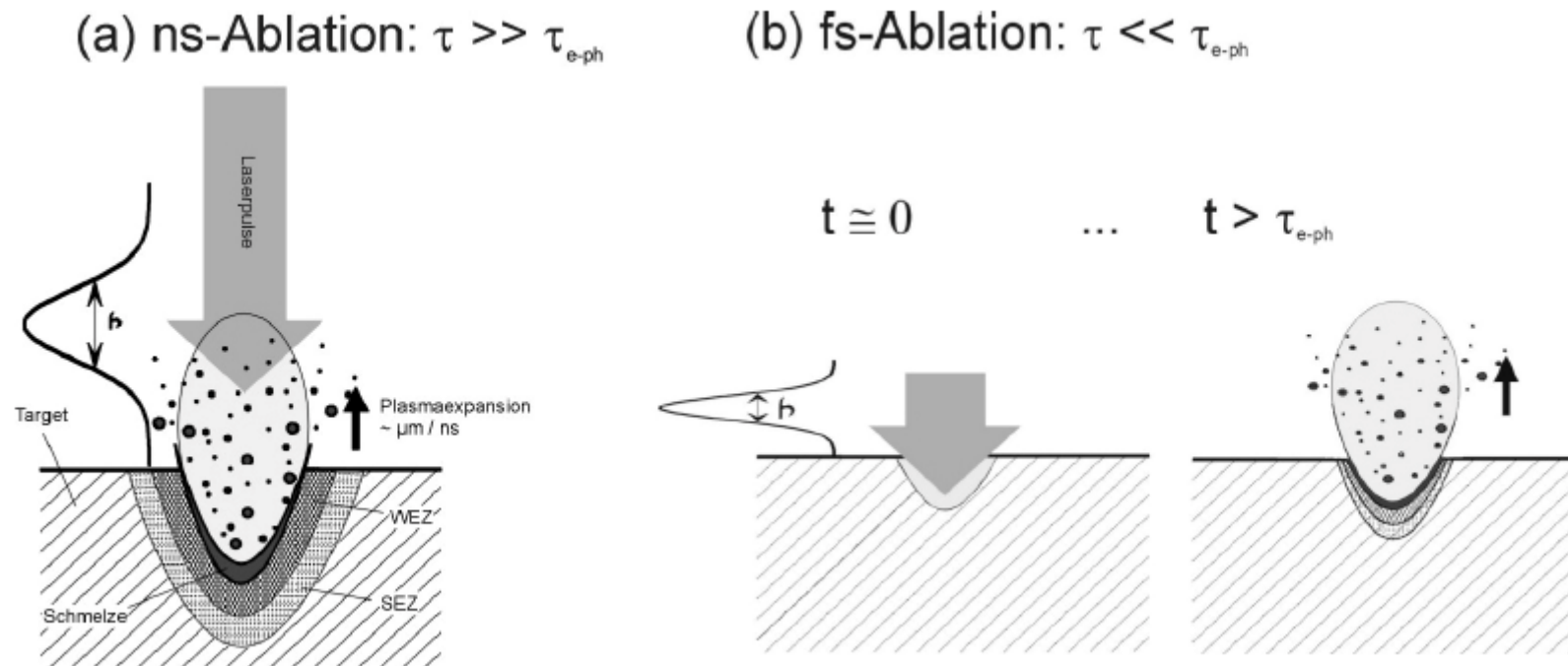
2-Temperaturmodell der Kurzpulsbearbeitung

- Laserpuls
- Gittertemperatur (1-Temperatur-Modell)
- Gittertemperatur (2-Temperatur-Modell)
- Elektronentemperatur (2-Temperatur-Modell)

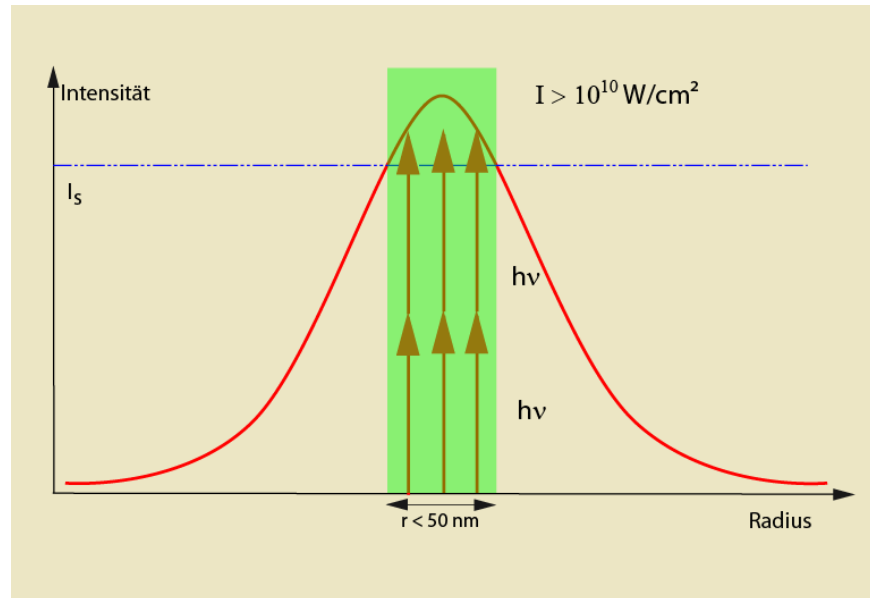
Oberflächentemperatur T / K



Wechselwirkung Kurzpuls laser mit Metallen



2-Photonenprozesse zur Mikro- und Nanostrukturierung

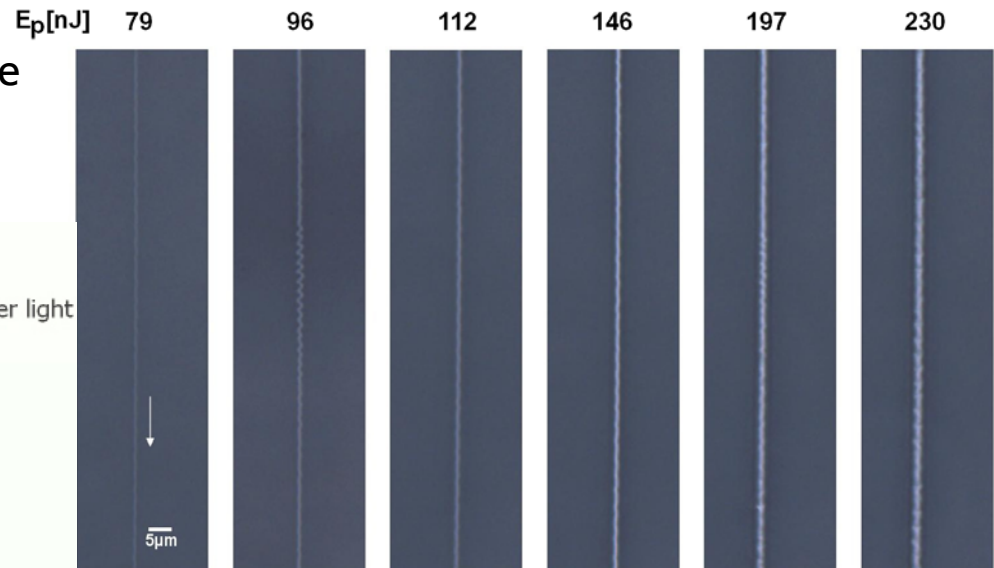
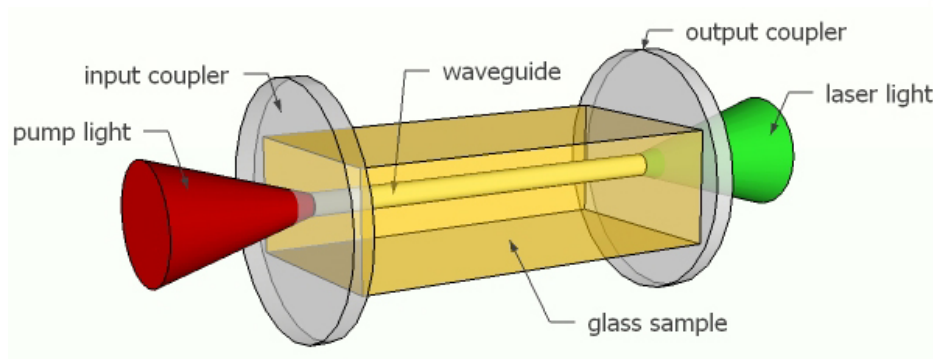


- Fokussierung von Femtosekunden- und Pikosekunden-Laserstrahlung mit hoher numerischer Apertur
- Erzeugung hoher Photonendichten
- Addition der Photonenenergien im Fokus
- Reduzierung der Wechselwirkungsgeometrie
- Nutzung nichtlinearer Absorptionsphänomene
- UV-Strukturierung in transparenten Medien

Werkstoffmodifikation mit Ultrakurzpuls-Verfahren

Schreiben von Wellenleitern und Mikrokanälen

Volumen-Wellenleiter durch lokalisierte Brechungsindexänderung



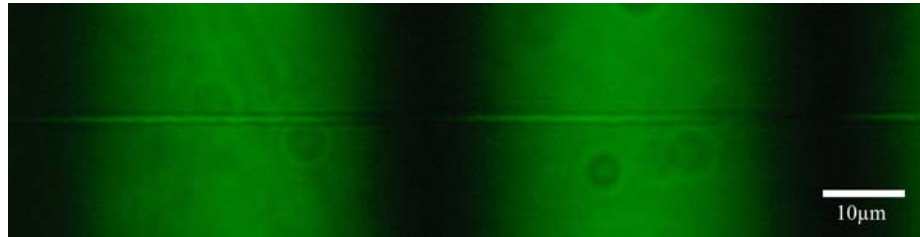
Modifizierte Linien in dotierten Gäsern als Basis für integrierte Wellenleiterlaser

Lokalisiertes Schmelzen und schnelles Abkühlen führt zu thermomechanischem Stress

Materialbewegung führt zu Arealen mit höherer und niedrigerer Dichte und Brechungsindex

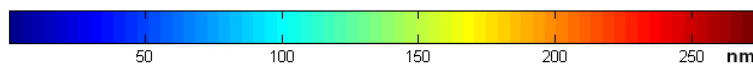
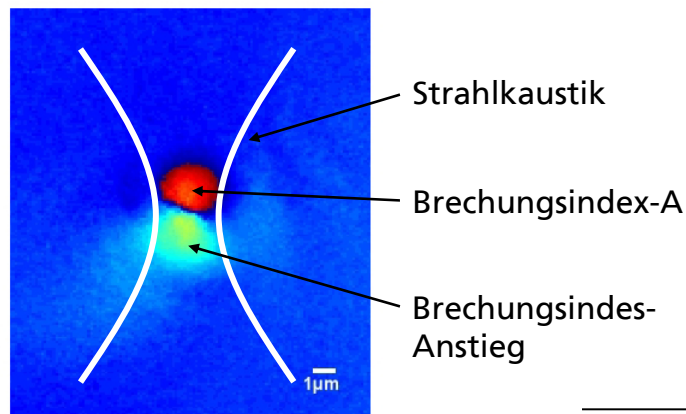
Schreiben von Wellenleitern und Mikrokanälen

Interferenzmikroskopie von Wellenleitern

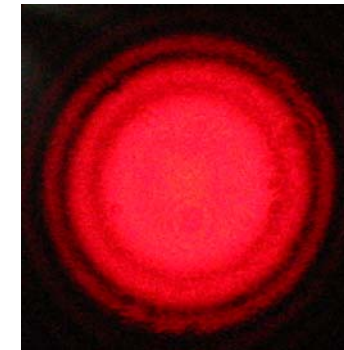


Aufsicht ↑

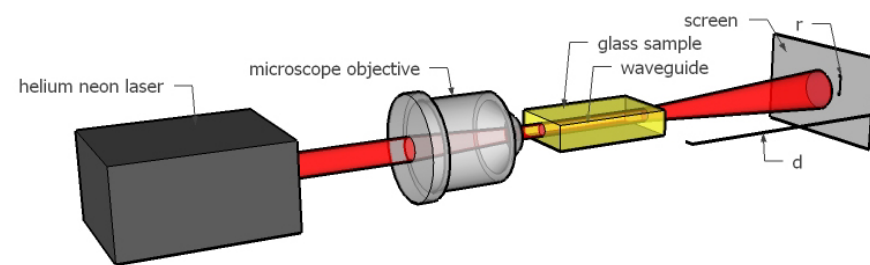
Querschnitt ↓



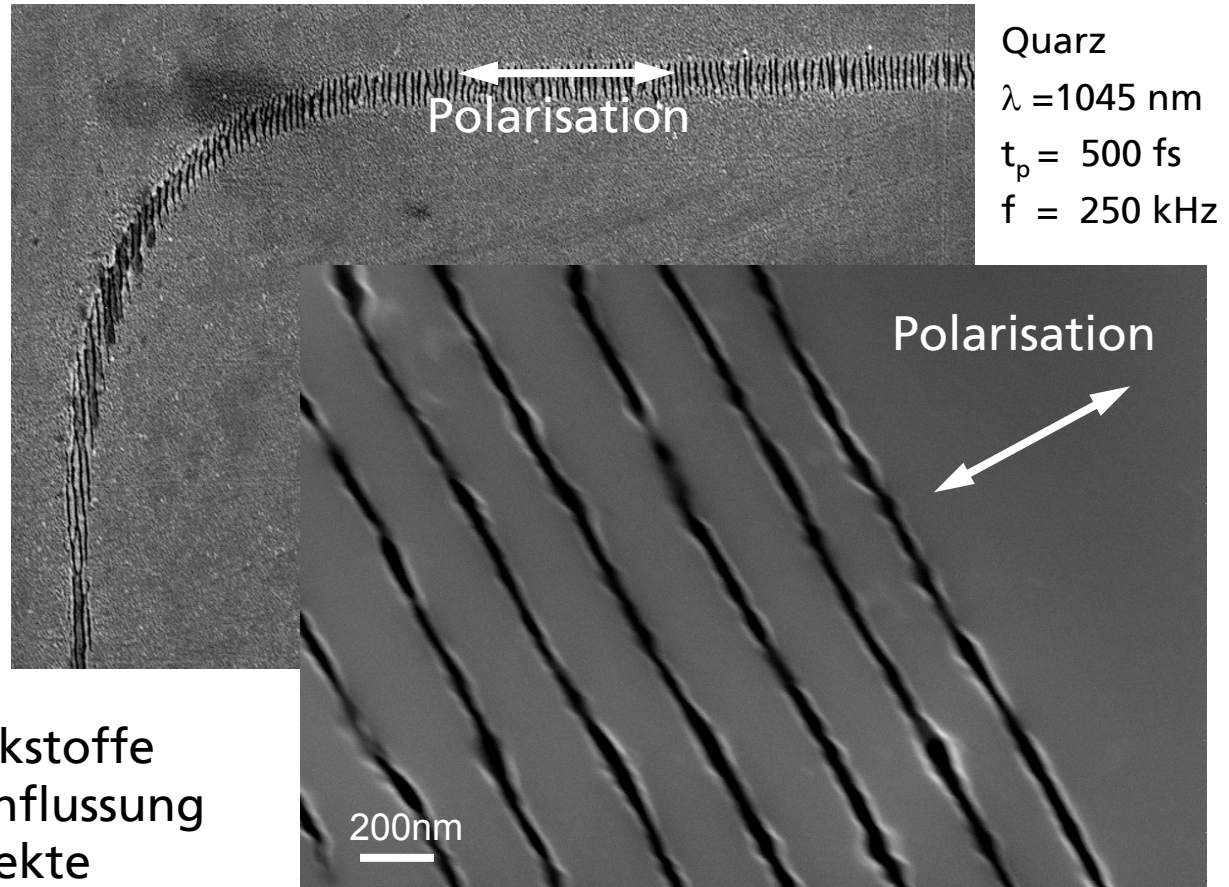
ILT



Fernfeld-Intensitäts-Verteilung des im Monomode-Wellenleiter geführten Lichts

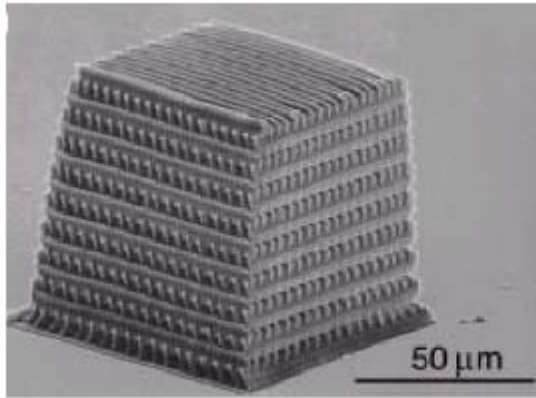


Erzeugung periodischer Nanostrukturen

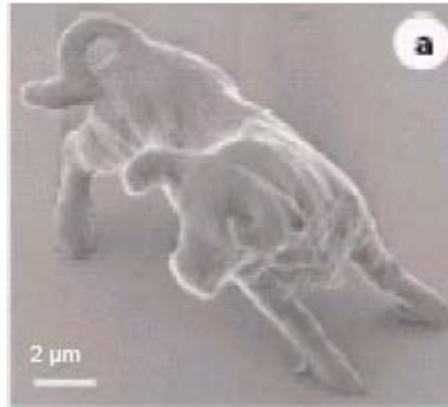


Nano-Strukturierung
unterschiedlicher Werkstoffe
ohne thermische Beeinflussung
durch nichtlineare Effekte

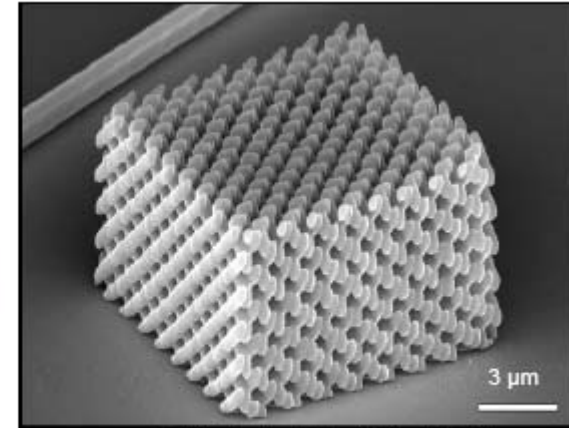
2-Photonenprozesse zur 3-D-Bauteilgenerierung



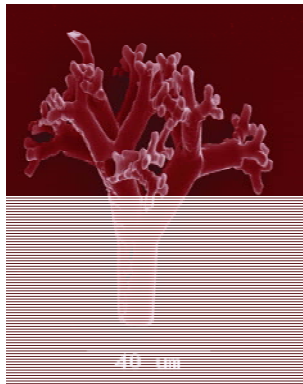
Cumpston et al. *Nature* (1999)



S. Kawata, et al, *Nature* (2001)



M. Deubel, et al, *APL* (2004)



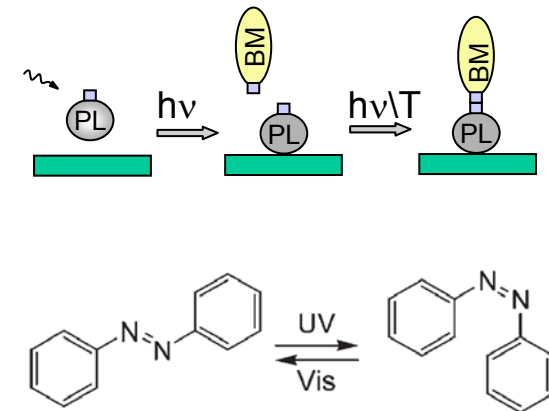
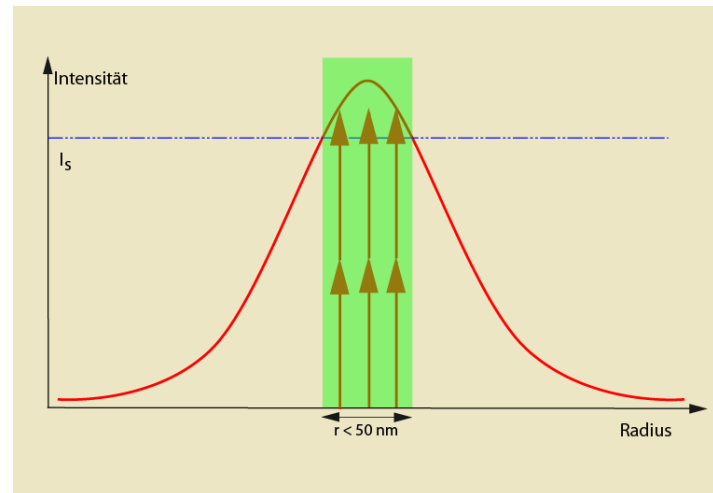
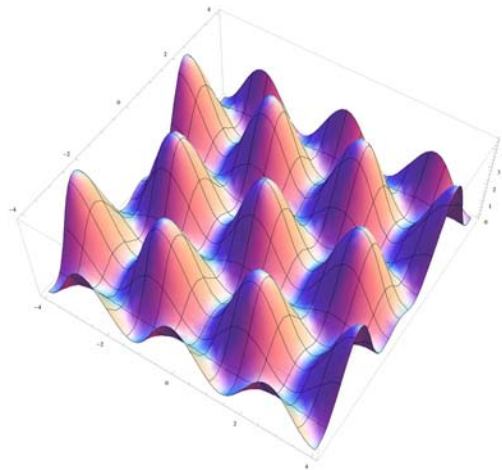
LZH

Anwendungen

- Mikrooptik
- Tissue Engineering
- Mikromechanik
- Biofunktionale Oberflächen

Photochemische Nanofunktionalisierung

- Chemische und strukturelle Nano-Modifikation < 100 nm durch Kombination von Interferenzbestrahlung, Multiphotonen-Absorption und photochemischer Aktivierung von Polymeren und aktivierbaren Dünnschichten



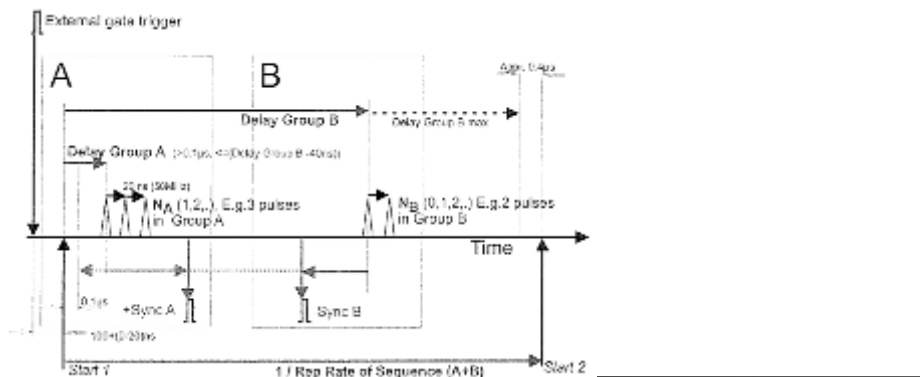
Multistrahl-Interferenz
Reduktion des Bestrahlungsfelds

Multiphotonen-
Absorption

Photochemische
Aktivierung

Materialabtrag mit ps-Puls-Bursts

- Laser SuperRapid (Lumera Laser)
- Pulsdauer $t = 12$ ps
- Repetitionsrate $f \leq 500$ kHz
- Multi puls option: ja
- Interpuls-Separation Δt $n = 20$ ns
- Burst Energie EB max 200 μ J



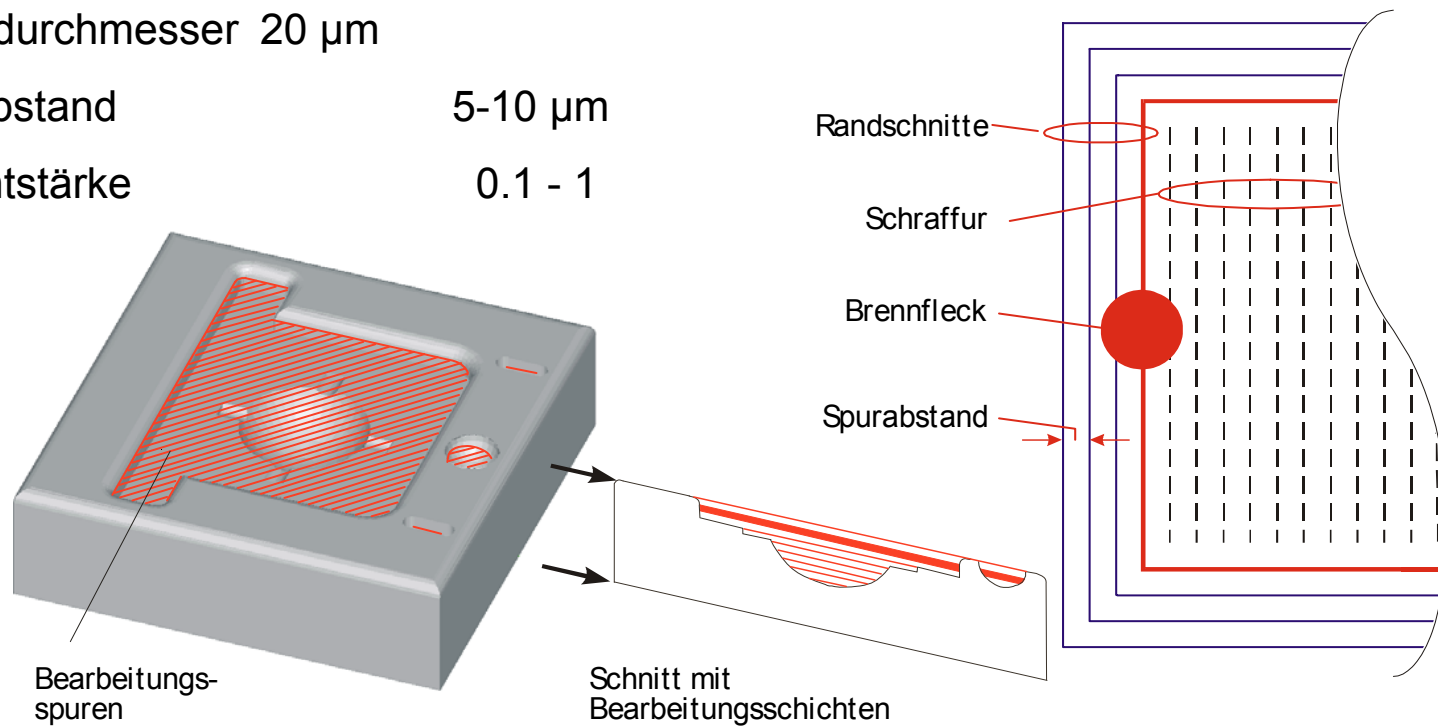
Verfahrensstrategie zum Präzisionsabtrag

Typische Parameter:

Fokussdurchmesser 20 μm

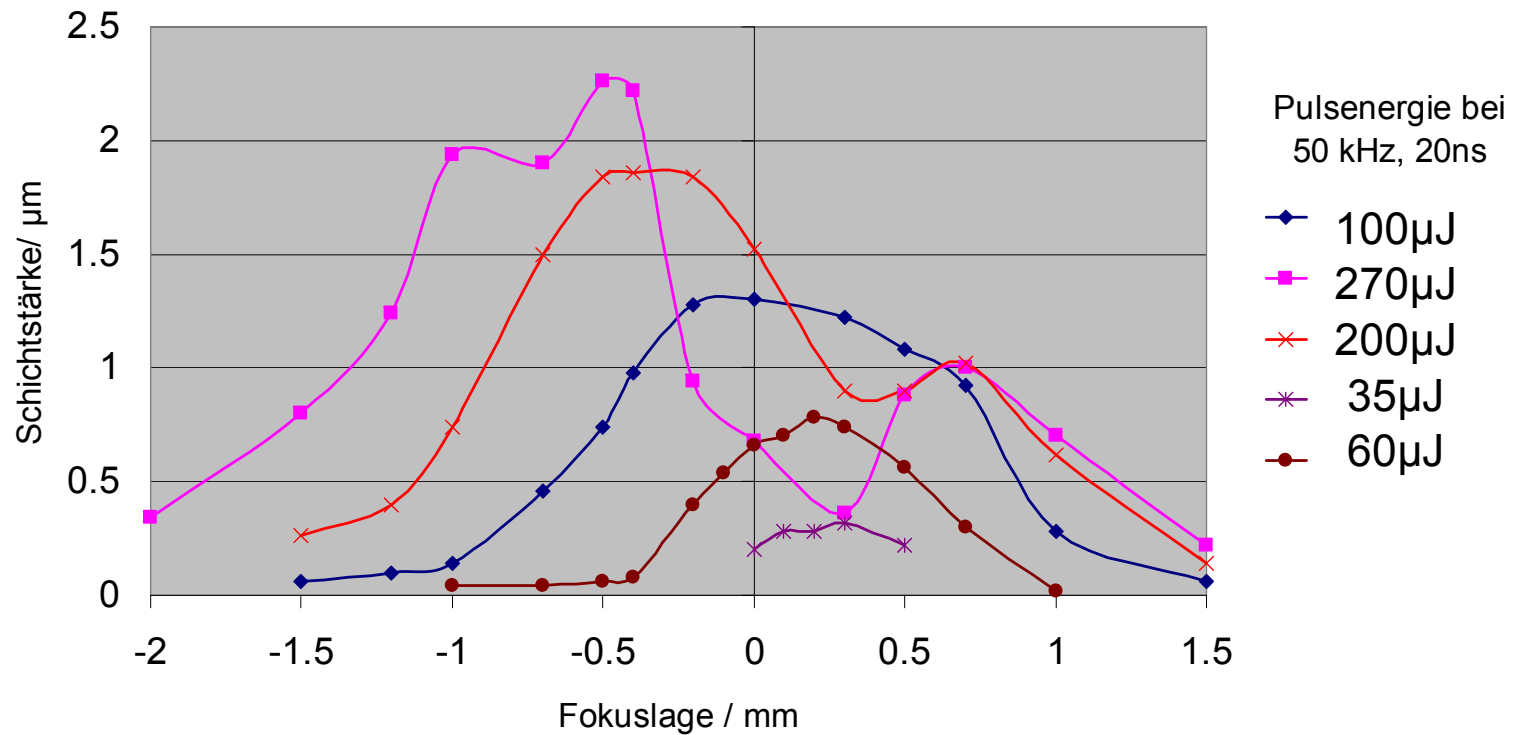
Spurabstand 5-10 μm

Schichtstärke 0.1 - 1 μm



Einflussfaktoren Laserabtrag

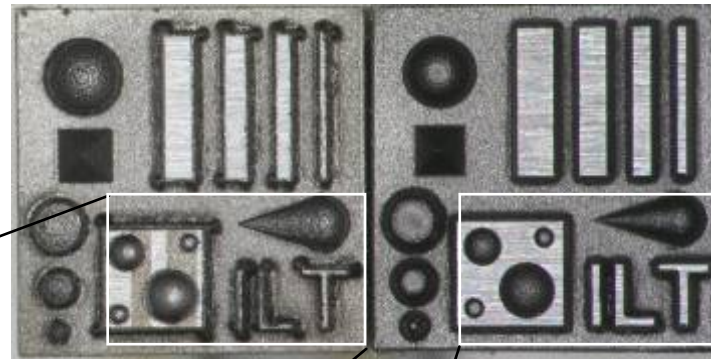
Änderung der Schichtstärke in Abhängigkeit von Fokuslage und eingesetzter Laserleistung



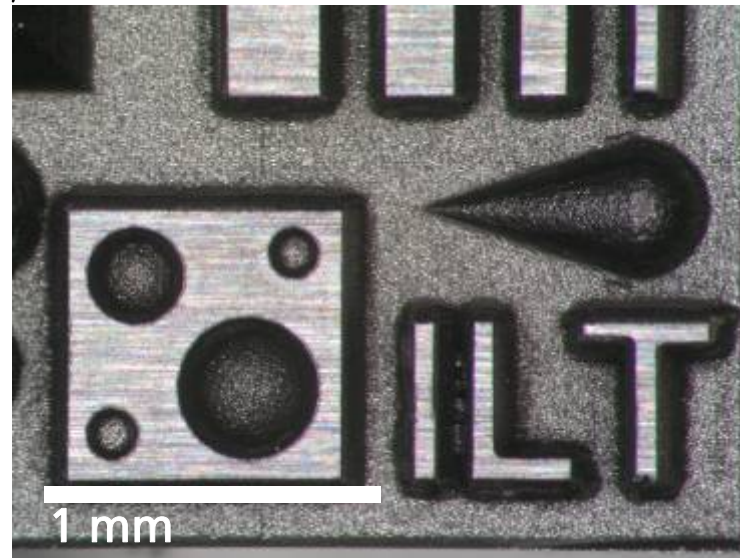
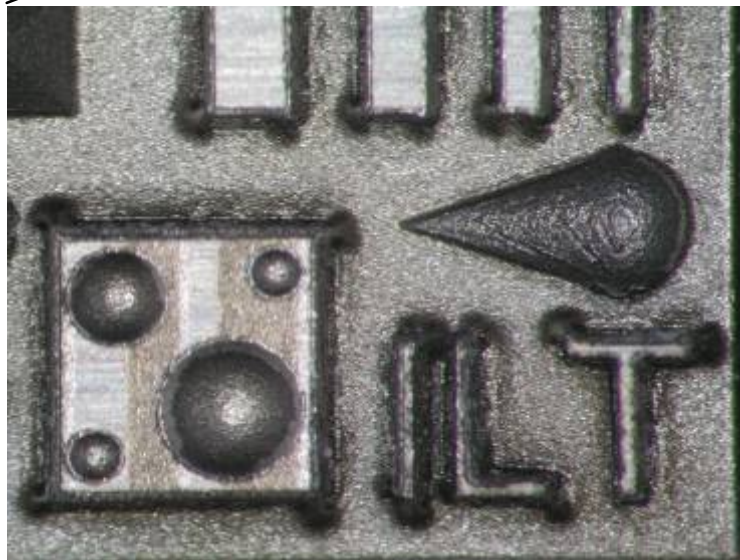
Werkstoffbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern

Mikroabtrag Werkzeugtechnik

Pulsdauer
100 ns
Einzelpuls



Pulsdauer
10 ps
Triple-Puls



Laserabtrag mit ns-Laser



Komplexes Spritzgussteil
mit multiplen Bohrungen

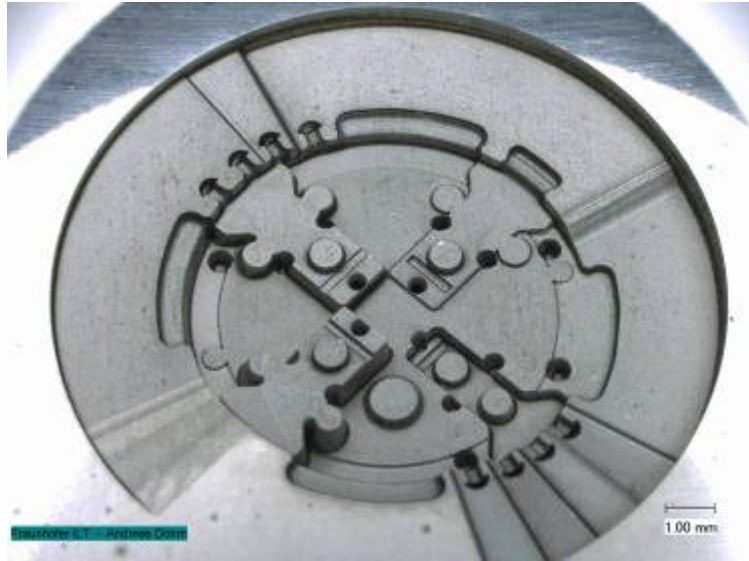


Erodiert



Laserabtrag mit ns-Laser

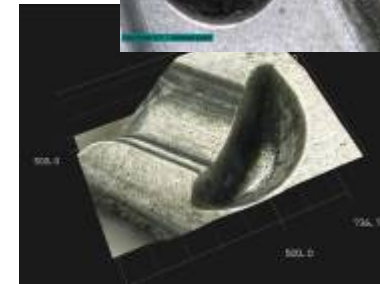
Laserabtrag mit ps-Laser



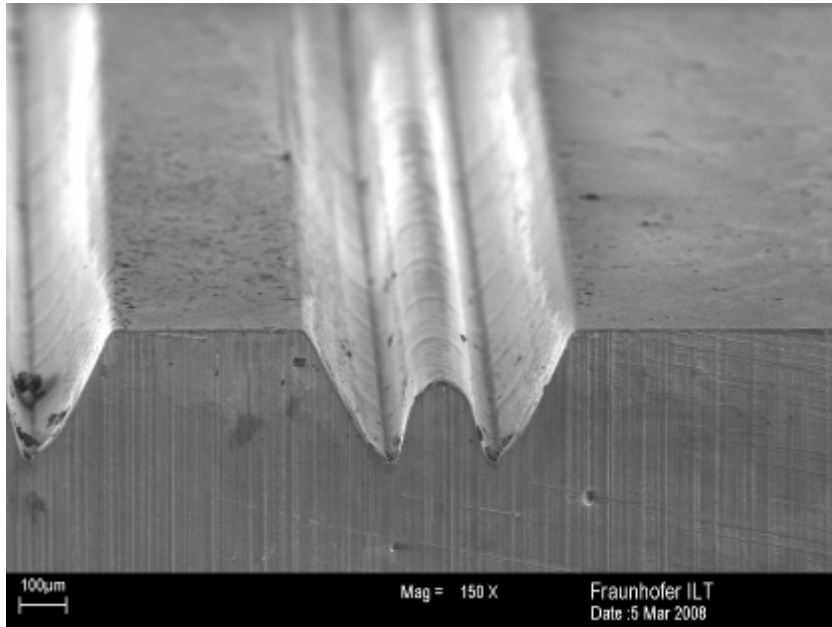
- Bearbeitungszeit: 10 Std.
- Keine Erodierwerkzeuge
- Abtragsqualität vergleichbar mit Erodieren



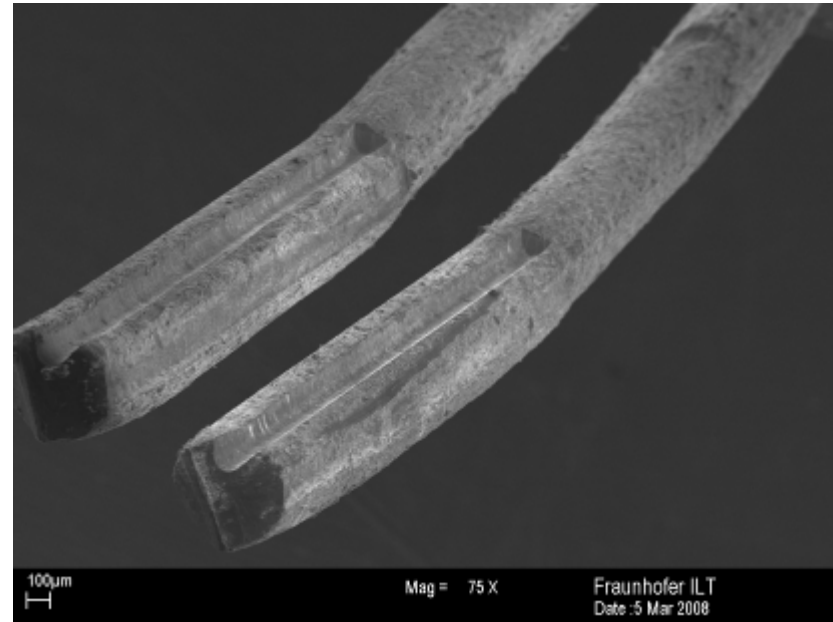
Erodiert



Laserabtrag mit ps-Lasern in Hartmetallen



Prägewerkzeug in Wolframkarbid



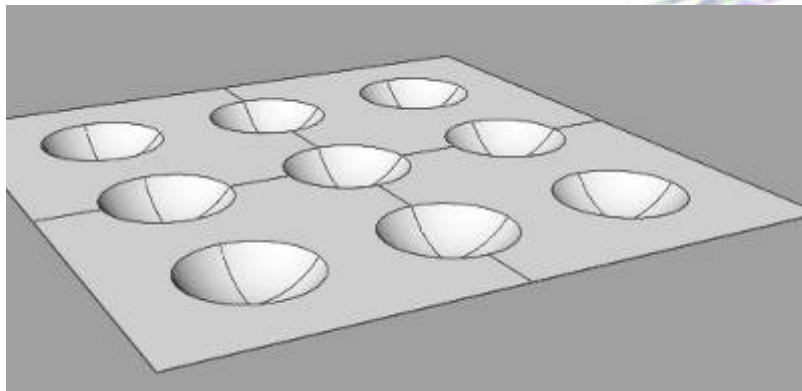
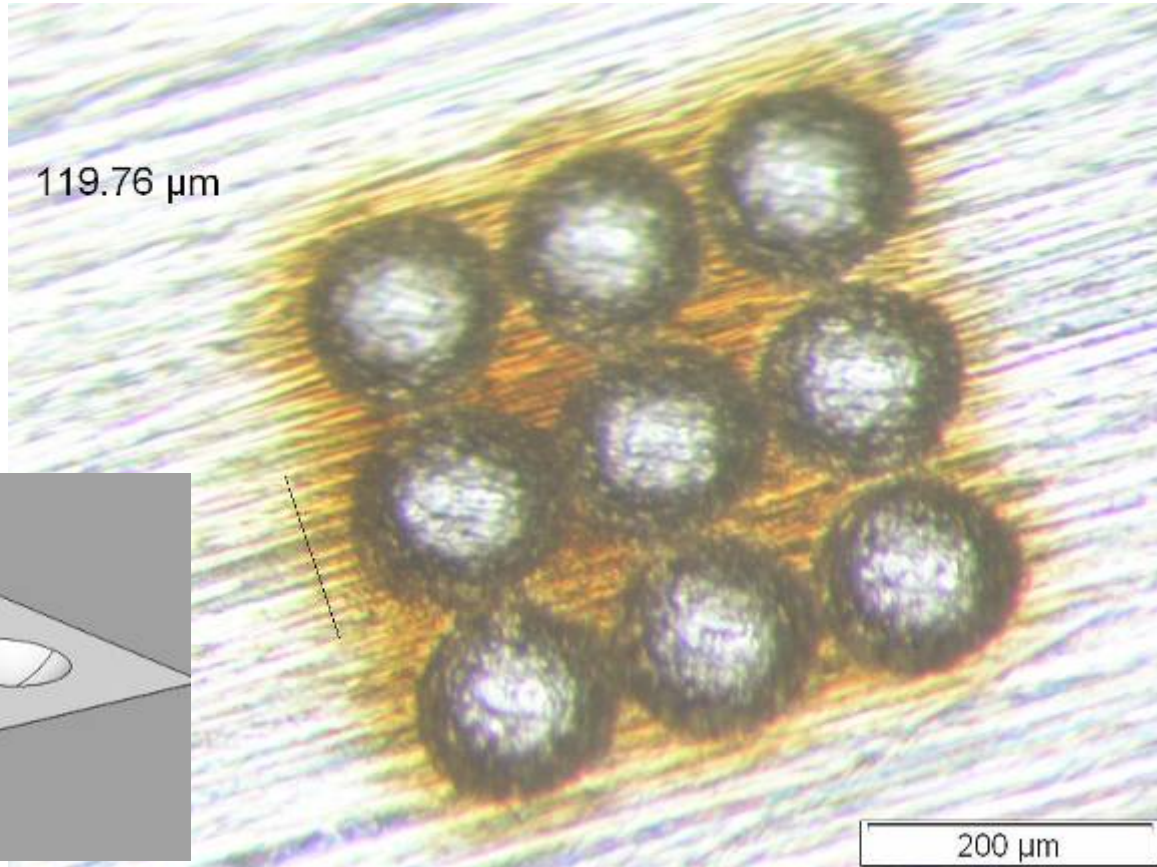
Prägeergebnisse in Federstahl

Laserabtrag mit ns-Laser

Kugelkappe vertieft mit:

$d \cong 100 \mu\text{m}$

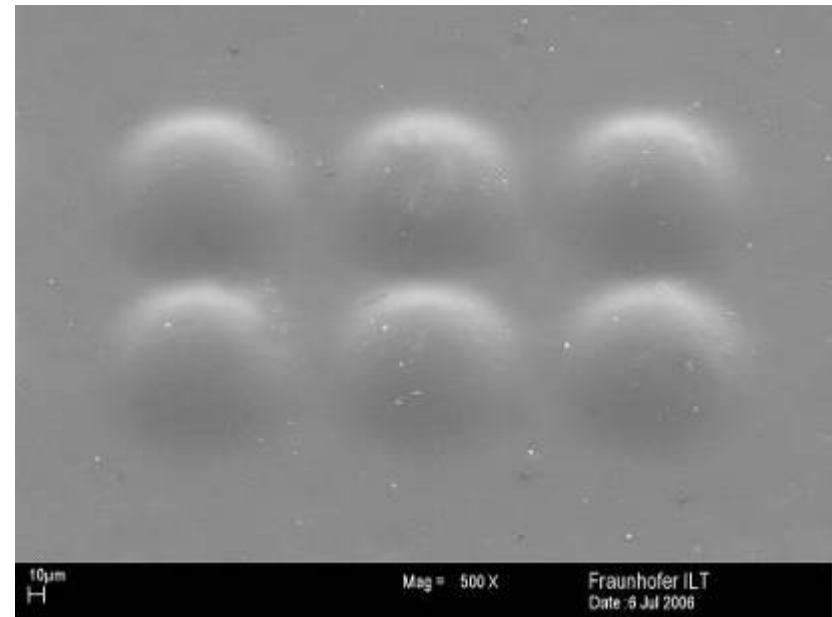
Tiefe=25 μm



Mikrospritzgusswerkzeug für Linsenarray mit ps-Abtrag



Multilinsen-Spritzgusswerkzeug

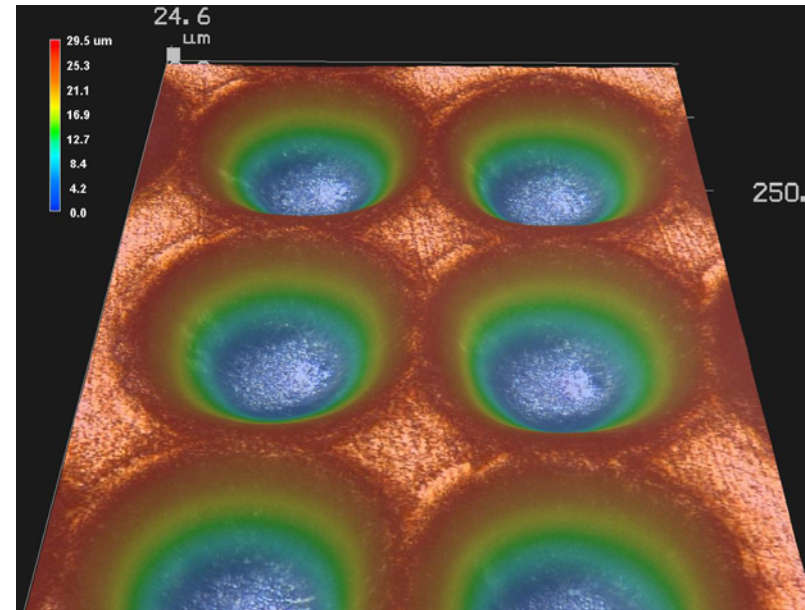


Nach laserbasierter Werkzeugpolitur
Oberflächenqualität besser 100 nm

Mikrospritzgusswerkzeug für Linsenarray mit ps-Abtrag

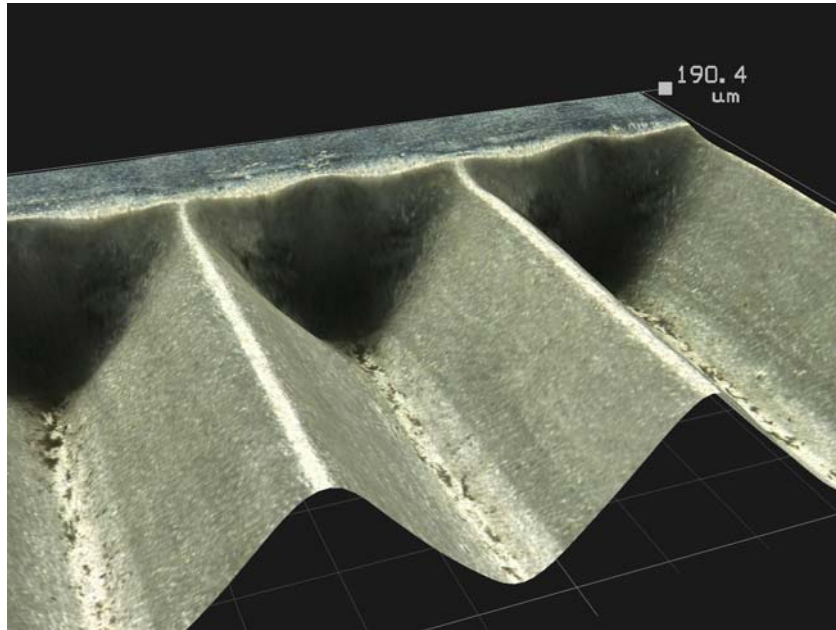


Multilinsen-Spritzgusswerkzeug

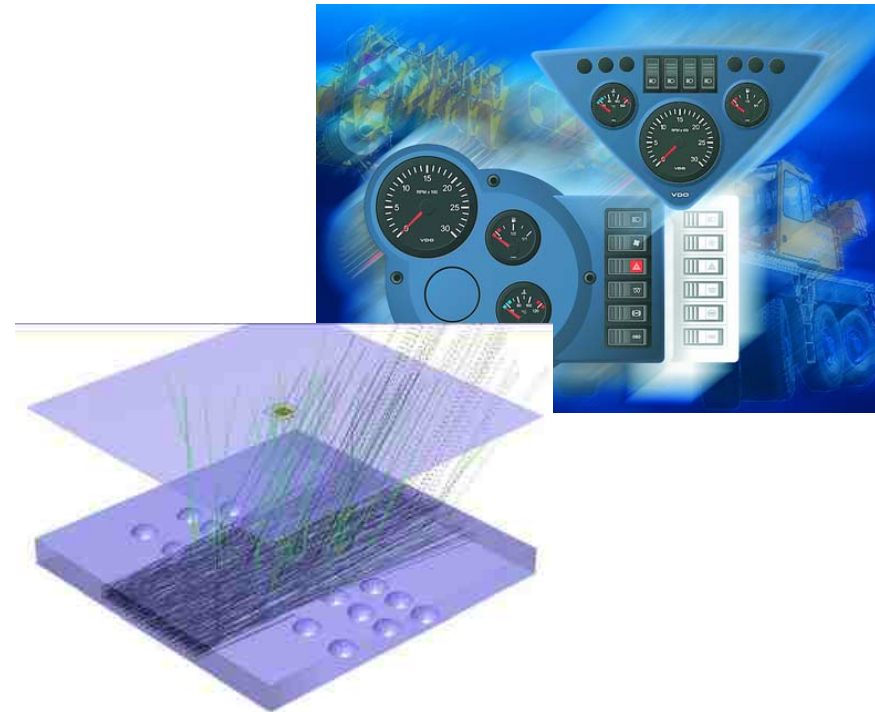


Nach laserbasierter Werkzeugpolitur
Oberflächenqualität besser 100 nm

Mikrospritzgusswerkzeug für Lichtleitelemente

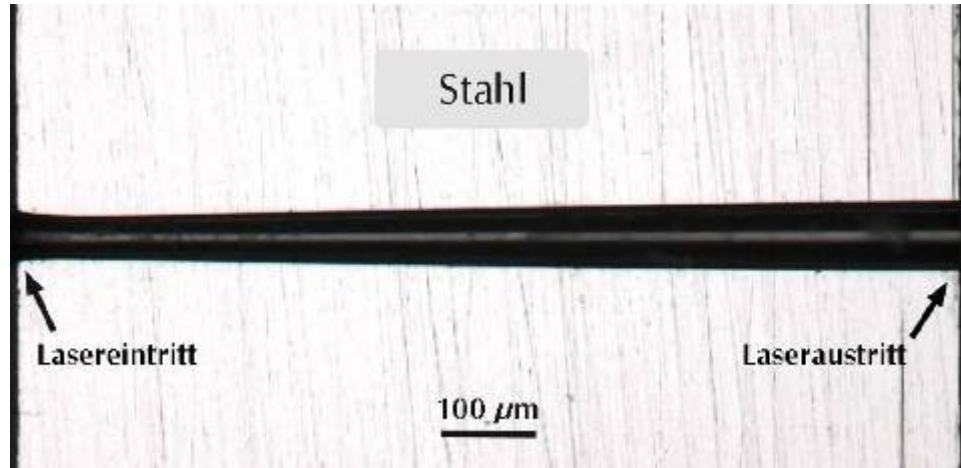


Trapez-Oberfläche in
Spritzgusswerkzeug

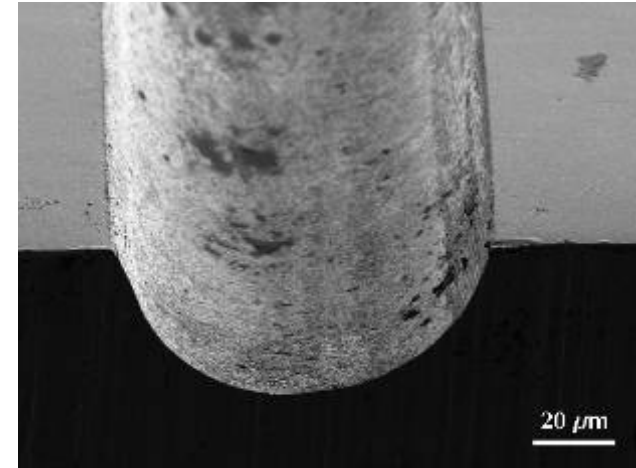


Anwendung als Lichtleitelemente in
Instrumententafeln und LCD-Displays

Mikrobohren mit ps-Laserstrahlung



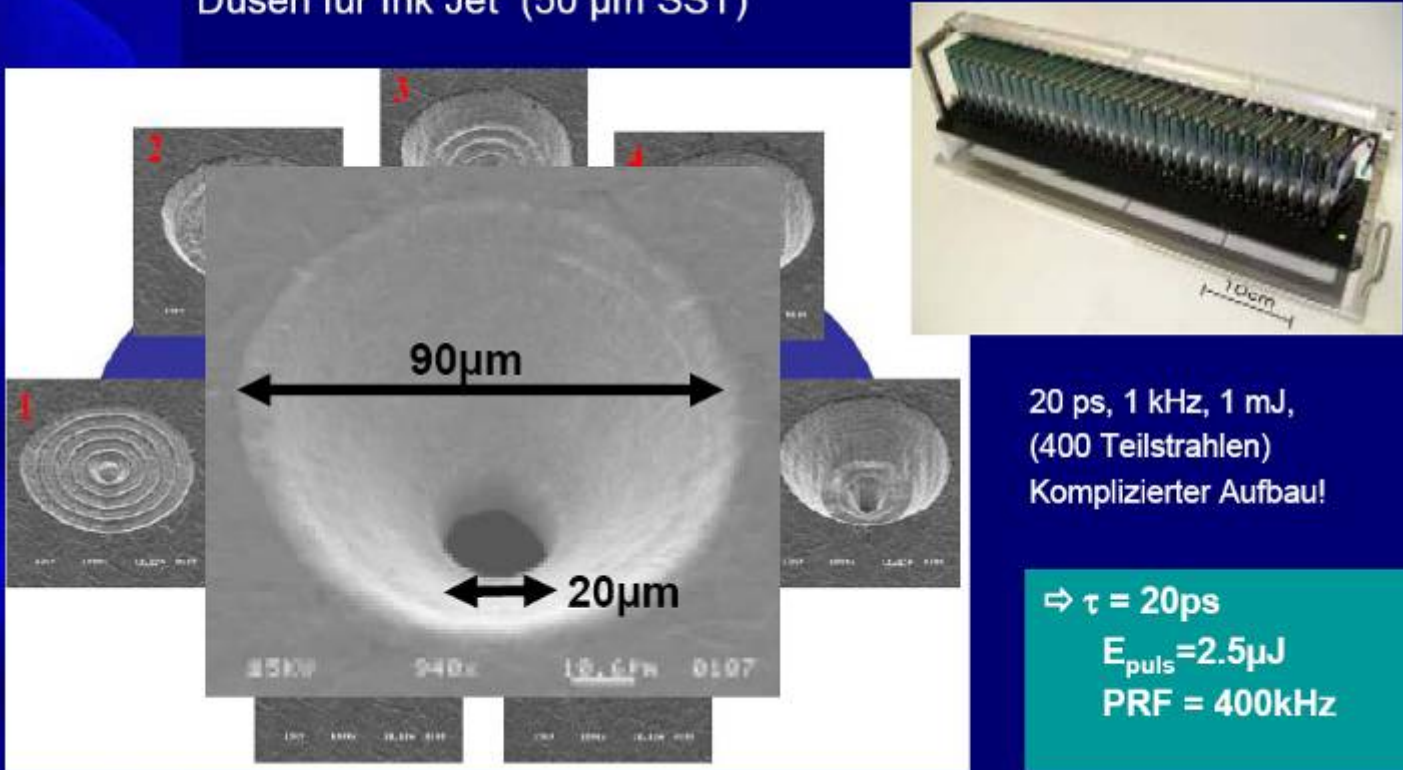
Querschliff einer Einspitzdüse
1 mm Stahl



Hohe Qualität
mit Rauigkeit $< 1 \mu\text{m}$

Mikrobohren von Tintenstrahldüsen

Düsen für Ink Jet (50 μm SST)



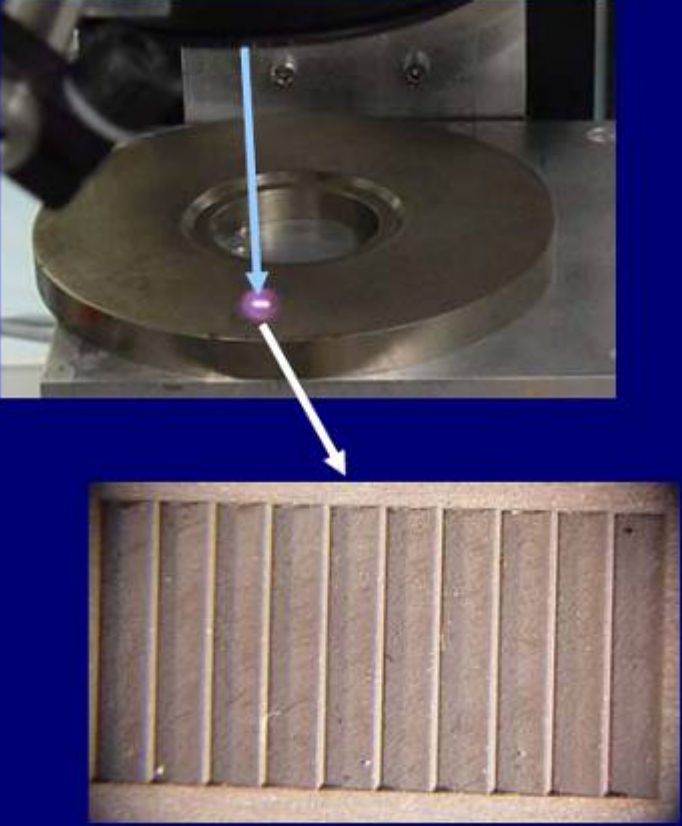
The image shows several scanning electron microscope (SEM) images of inkjet nozzles. The central image is a large, detailed view of a nozzle with a diameter of 90 μm and a hole diameter of 20 μm . It features a complex, multi-layered structure. To the right, a photograph shows a long, narrow array of such nozzles, with a 10 cm scale bar. The nozzle array is housed in a metal frame.

20 ps, 1 kHz, 1 mJ,
(400 Teilstrahlen)
Komplizierter Aufbau!

$\Rightarrow \tau = 20\text{ps}$
 $E_{\text{puls}} = 2.5\mu\text{J}$
PRF = 400kHz

Quelle: Panasonic, 2005

Mikroabtrag mit hohen Repetitionsraten



The image shows a laser micro-abrasion process on a circular metal part. A blue arrow points to the laser head, and a white arrow points to the resulting vertical grooves on the part. Below the main image is a close-up of the finished part showing the vertical grooves.

NdFeB Probe:

- 3D-Strukturierung
- $V \approx 500\text{mm}^3$

↓

RAPID, $0.1\text{mm}^3/\text{min}$
=> 80h ☹️

SUPERRAPID, $1\text{mm}^3/\text{min}$
=> 8h 😊

HYPERRAPID, $8\text{mm}^3/\text{min}$
=> 1h 😊

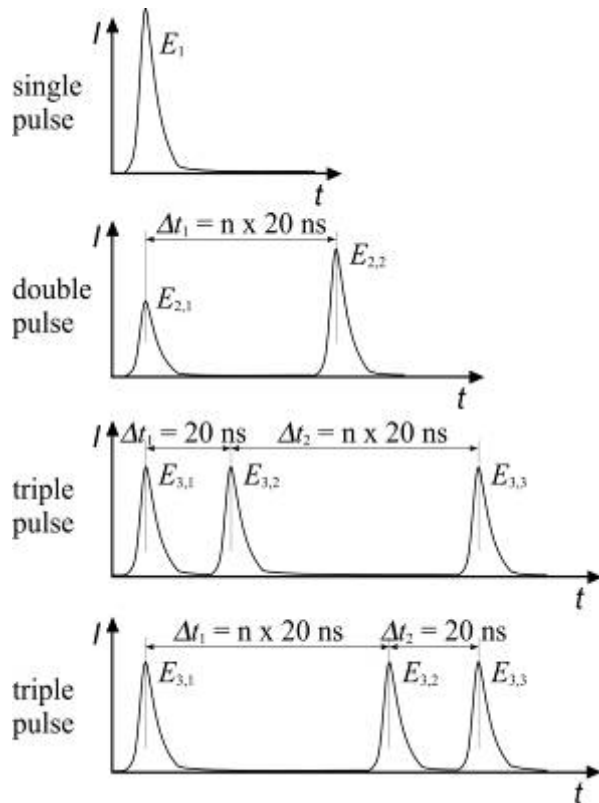
Quelle:
Lumera

Verfahrensspezifische Modulation der Laserleistung

Tailored Pulse Trains

- ➔ Erhöhung der Abtragsleistung
- ➔ Reduzierung der Rauigkeit
 - Oberflächenkonditionierung
 - Veränderung der atmosphärischen Bedingungen
 - Werkstoffvorheizung
 - Veränderung der Plasmabedingungen
 - Kontrolle der Schmelzentwicklung
 - Nachbearbeitung

Pulse burst timings



Geometry

squares 2 mm x 2mm

number of layers

200

double pulses:

variation of pulse energy

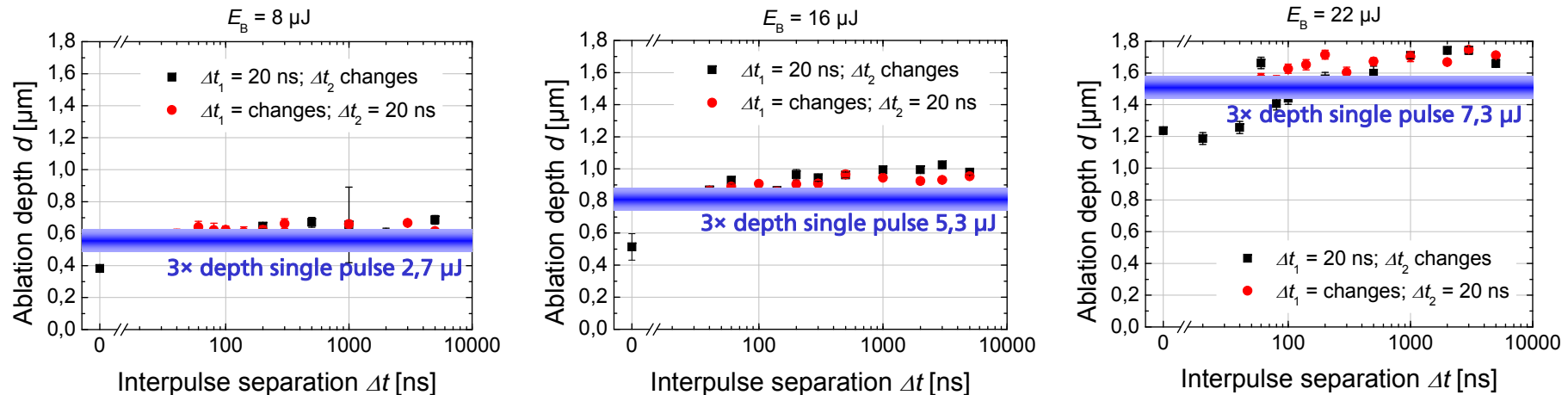
$$E_{2,1} : E_{2,2}$$

triple pulses:

variation of Δt_1 and Δt_2 for

$$E_{3,1} = E_{3,2} = E_{3,3}$$

Abtrag mit ps-Triple-Pulsen

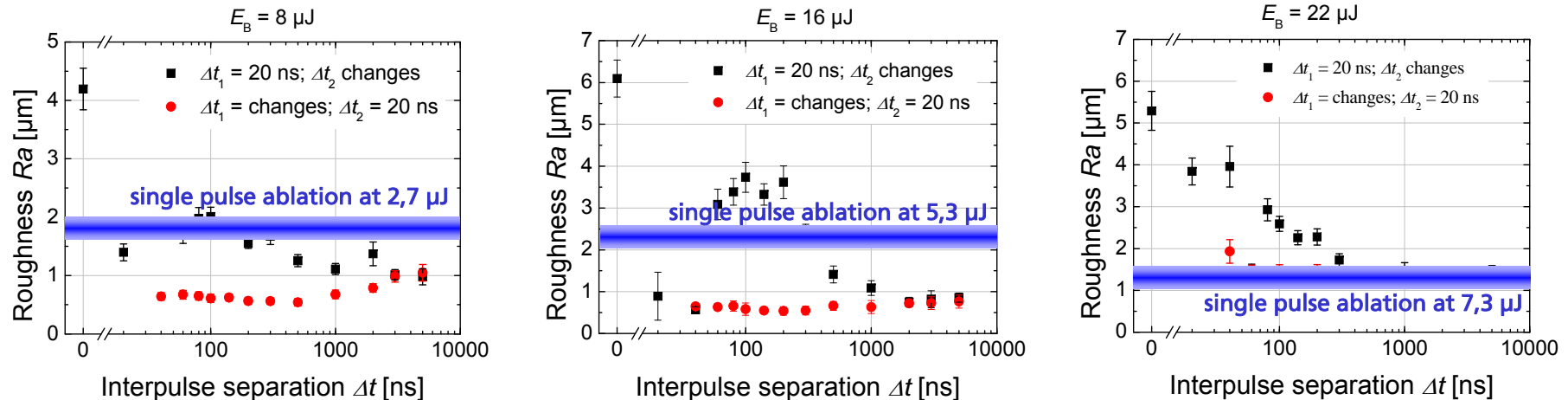


Ergebnisse:

- Erhöhung der Ablationstiefe um bis zu 90 % verglichen mit Einzelpulsen bei gleicher Pulsenergie E_B
- Erhöhung der Ablationstiefe um bis zu 20 % verglichen mit 3 Einzelpulsen bei $E_B/3$
- Ablationstiefe nahezu unabhängig der Zeitabstände Δt_1 und Δt_2

$\nu_1 = 100 \text{ kHz}$
 $\tau = 12 \text{ ps}$
mark speed = 400 mm/s
line overlap ca. 70 %
 $f = 120 \text{ mm}$
 $E_{3,1} = E_{3,2} = E_{3,2}$

Verringerung der Rauheit bei ps-Triple-Pulsen

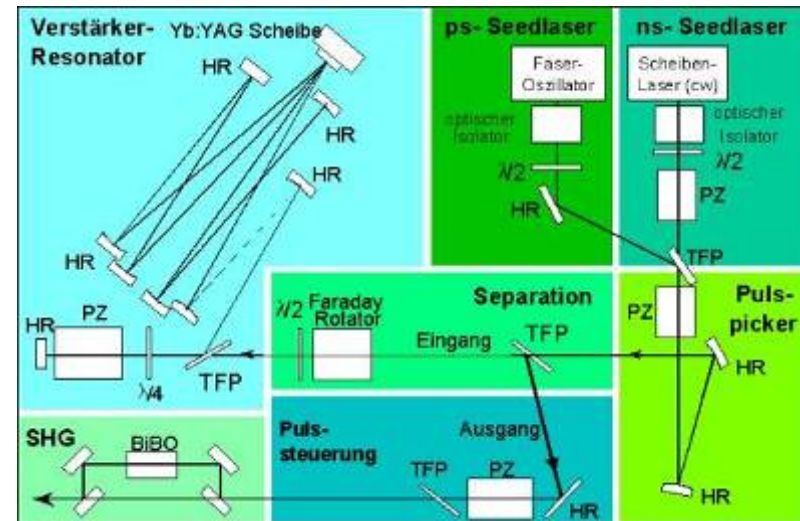
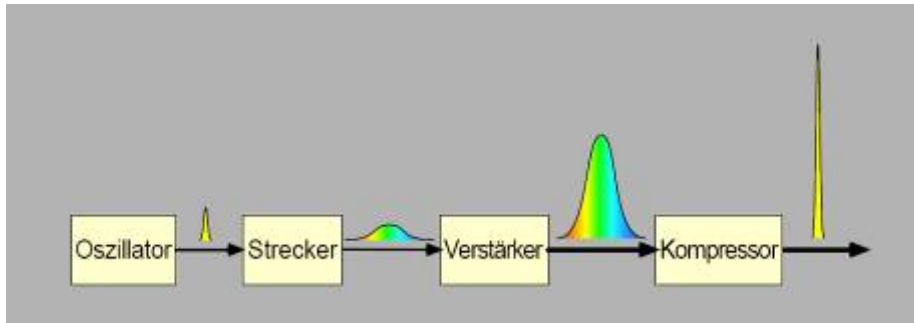


Ergebnisse:

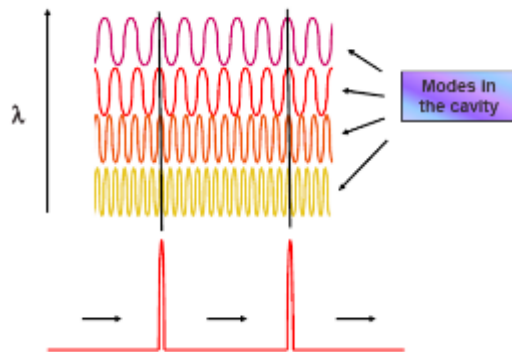
- $\Delta t_1 = 20 \text{ ns}$ R_a ist vergleichbar zu Einzelpulsen $E_1 = E_2$
- $\Delta t_2 = 20 \text{ ns}$ R_a ist nahezu unabhängig von Δt_1
- $R_a < 0.7 \mu\text{m}$ ist erreichbar über einen weiten Parameterbereich
- Best-erreichte Rauheit: $R_a = 0.5 \mu\text{m}$

$v_1 = 100 \text{ kHz}$
 $\tau = 12 \text{ ps}$
mark speed = 400 mm/s
line overlap ca. 70 %
 $f = 120 \text{ mm}$
 $E_{3,1} = E_{3,2} = E_{3,2}$

Aufbau ps-Laser



Pulserzeugung durch Modelocking:



- Erzeugung von ps-Pulsen im Modelock-Oszillator bei Pulsfrequenzen bis 100 MHz
- Selektion einzelner Pulse
- Nachverstärkung
- Kompression
- Erhalt von Strahlqualität und Peakleistung über großen Arbeitsbereich
- Leistungskalierung bis Multi-MHz und Multi-100 W

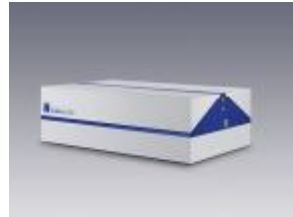
Lieferanten ps-Laser

Lumera
Hyper-Rapid



1064 nm
12 ps
50 W@1MHz
 $M^2 < 1.2$
Puls Bursts

Trumpf
TruMicro5050



1030 nm
< 10 ps
50 W@250kHz
 $M^2 < 1.3$

Time Bandwidth
Fuego



1064 nm
< 12 ps
>10 W@8MHz
 $M^2 < 1.3$

Coherent
Talisker



1064 nm
< 15 ps
>18 W@200kHz
 $M^2 < 1.3$

Corelase
X-lase



1064 nm
< 20 ps
>20 W@4MHz
 $M^2 < 1.3$

Entwicklung kommerzieller ps-Laser

- Hohe Repetitionsraten bis 50 MHz
- Hohe mittlere Leistungen bis 500 W bei gleichzeitig hoher Strahlqualität
- Puls-Burst-Systeme für optimierten Abtrag und hohe Oberflächenqualität
- Kompakte Bauformen
- Kostenreduktion von 250.000 € bei 50 W auf 100.000 € bei 200 W (bei entsprechenden Stückzahlen)
- Schnelle Leistungs- bzw. Energiemodulation



Steigerung der Abtragsrate von 0.5 mm³/min auf 50 mm³/min



Maschinen zur 3D-Präzisions-Laserstrukturierung

Sauer Lasertec
DML40Si



3-Achs-Konzept
3D-Scanner
Q-switch
15 µm Genauigkeit
Integrierte Tiefenkontrolle

Concept Laser
M3 Linear



5-Achs-Konzept
2D-Scanner
Q-switch + cw
15 µm Genauigkeit
Modulares Systemkonzept

FOBA
GP 9000



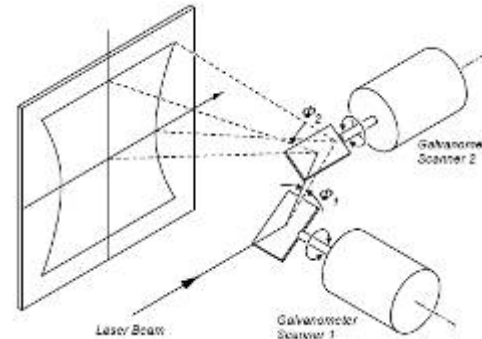
3-Achs-Konzept
2D-Scanner
Q-switch + cw
20 µm Genauigkeit
Modulares Systemkonzept

Scantechnik zur 3D-Präzisions-Laserstrukturierung



Hochleistungs-Galvanometerscanner

- Positioniergeschwindigkeit bis 10 m/s
- Bahngeschwindigkeit bis 3 m/s bei hoher Genauigkeit



Strahlfokussierungssysteme

F-Theta-Objektive

- Großer Arbeitsabstand
- Bildverzerrung
- keine angestellte Bearbeitung möglich

Vario-Scan-Objektive

- Keine Spotverzerrung
- kleiner Arbeitsabstand
- hohe Scangeschwindigkeit

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Fraunhofer ILT, Aachen

Arnold Gillner

Fraunhofer Institute for Lasertechnology

Steinbachstraße 15

D-52074 Aachen, Germany

Phone: +49 (0) 241 89 06 -148

Fax: +49 (0) 241 89 06 -121

Email: arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de