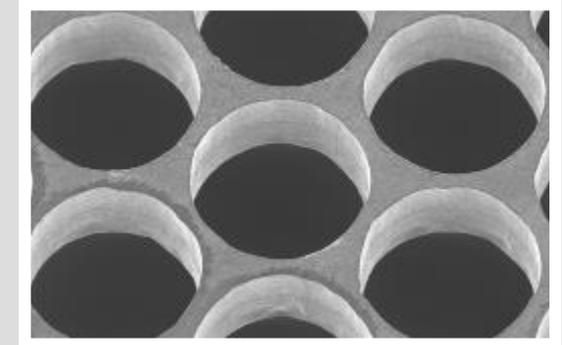
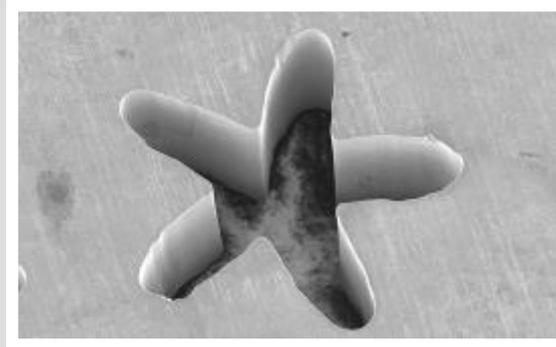
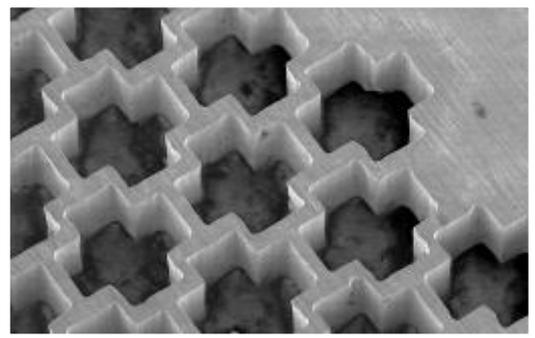


UKP-Laser in der Produktion – Spielzeug oder Werkzeug?



Theoretische Grundlagen der „kalten“ Bearbeitung

Potenzialanalyse

Mikromaterialabtrag

Glasschweißen

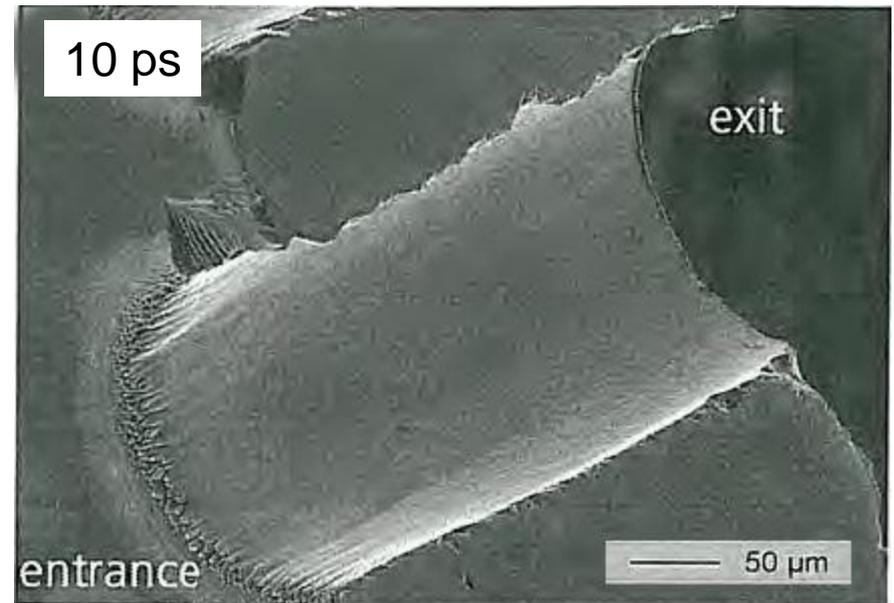
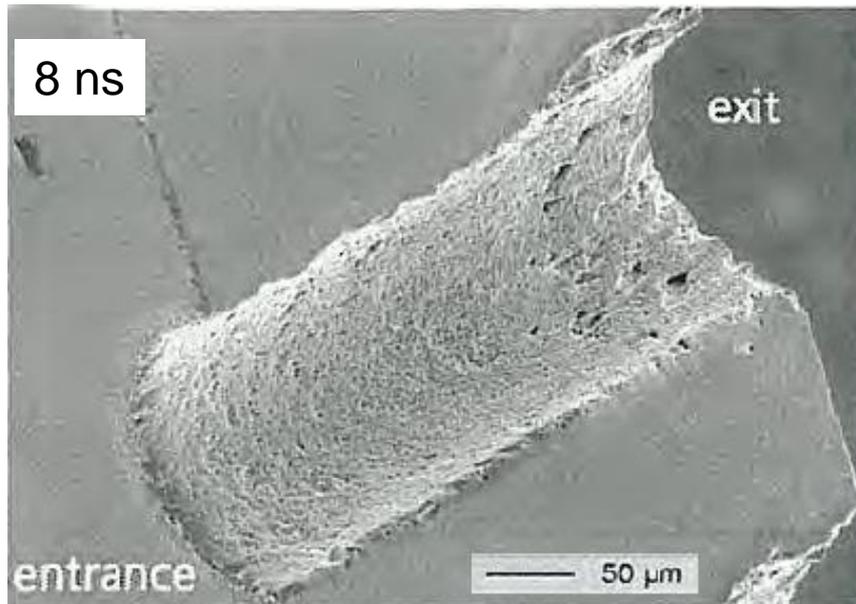
Nanostrukturierung

Zusammenfassung

Vorteile ultrakurz gepulster Laser

- Bohrung in Glas mittels ns-Pulsen im Vergleich zu Bohrung mit ps-Pulsen

[Kaspar et al. J. of Laser Applications Vol. 18, No. 2; 2006]

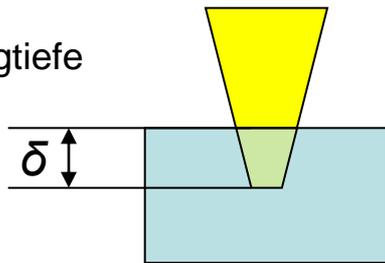


Was bedeutet ultrakurz?

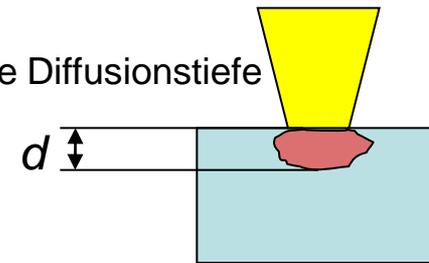
Definition über die Dynamik des Wärmeeintrags

- ultrakurz \leftrightarrow Optische Eindringtiefe **größer als** Thermische Diffusionslänge
 - Optische Eindringtiefe δ der Strahlung ins Material (Lambert-Beersches Gesetz):
$$\delta = \alpha^{-1} \quad (\alpha - \text{Absorptionskoeffizient})$$
 - Thermische Diffusionslänge d (2. Fick'sches Gesetz):
$$d = 2 (D \cdot t)^{0,5} \quad (D - \text{Wärmediffusionskonstante, } t - \text{Dauer des Laserpulses})$$
- Definition unklar bei transparenten und teiltransparenten Stoffen!
- Definition gilt nur für Einzelpulse

Optische Eindringtiefe



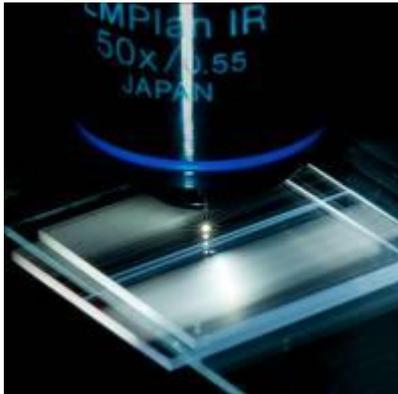
Thermische Diffusionstiefe



Was bedeutet ultrakurz?

Definition über die nichtlineare Absorption

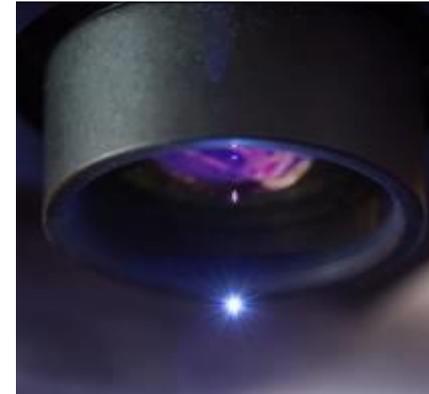
- Enorm hohe Intensitäten eines ultrakurzen fokussierten Laserpulses ermöglichen unabhängig vom Stoff (Festkörper, Flüssigkeit, Gas):
 - Multiphotonionisation, Tunnelionisation
 - Quasi instantaner Übergang vom Originalzustand des Stoffes zum Plasma
 - Plasmaexpansion „entfernt“ Wärme aus dem Werkstück



Plasma in Glas



Plasma in Wasser



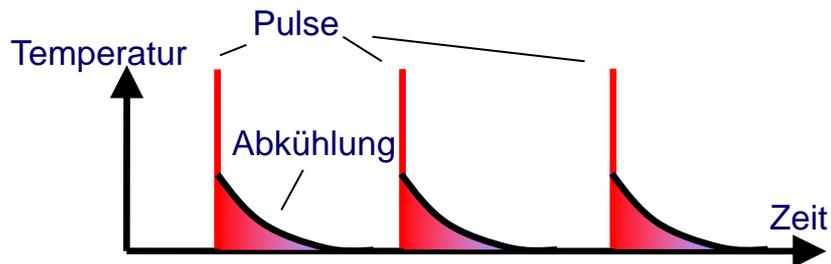
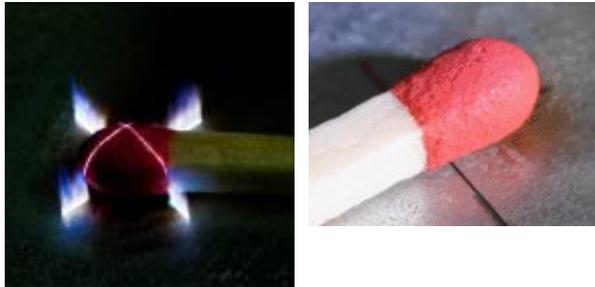
Plasma in Luft

Wann ist ultrakurz wirklich kalt?

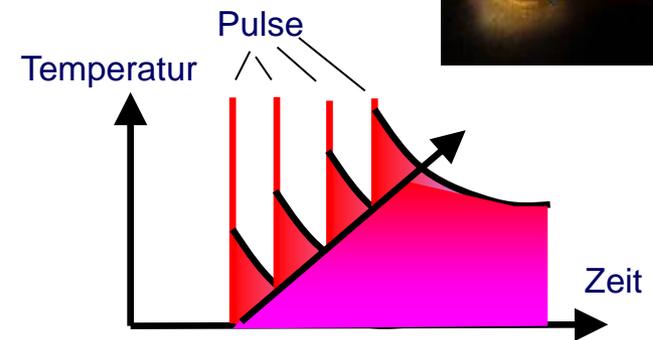
Multipulseffekte und Wärmeakkumulation

- Bei Bearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen Wärmeeinflusszone zwar minimal, aber dennoch vorhanden
- Kalte oder heiße Bearbeitung kann mittels der Repetitionsrate und des räumlichen Puls-zu-Puls-Abstandes eingestellt werden (bei gleichen Pulsparametern!)

Kalte Bearbeitung:



Heiße Bearbeitung:



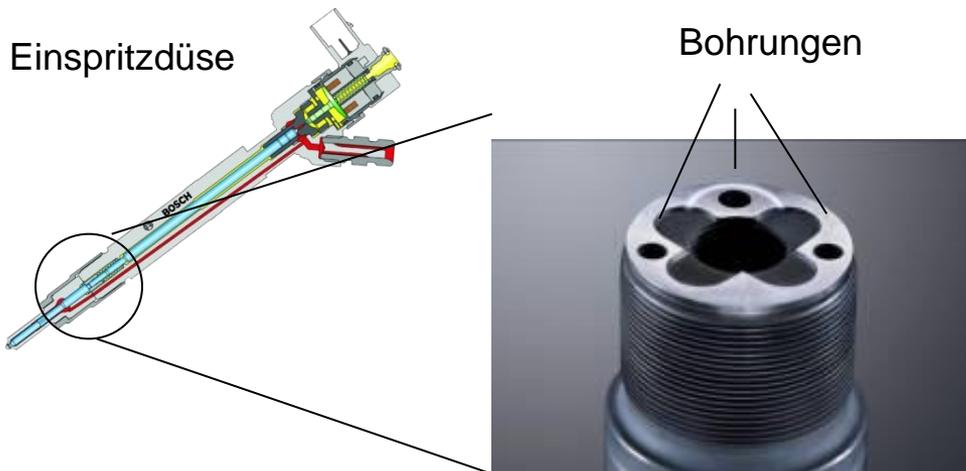
Prozess-Werkstoff-Matrix

	Metalle	Kunststoffe	Glas & Keramik	Halbleiter
Urformen				
Umformen				
Trennen				
Fügen				
Beschichten				
Stoffeigenschaften ändern				

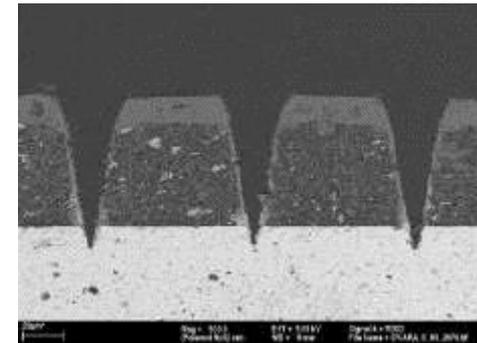
 Industrieller Einsatz

UKP-Laser als Bohr- und Schneidwerkzeug

- Bohren von Dieseleinspritzdüsen (Bosch)
- Einbringung definierter Kerben in das Sensor-Element einer Lambda-Sonde (Bosch)
- Trennen von Glaspanels bei der Display-Herstellung



Sensor-Element einer Lambda-Sonde



Quellen: Bosch

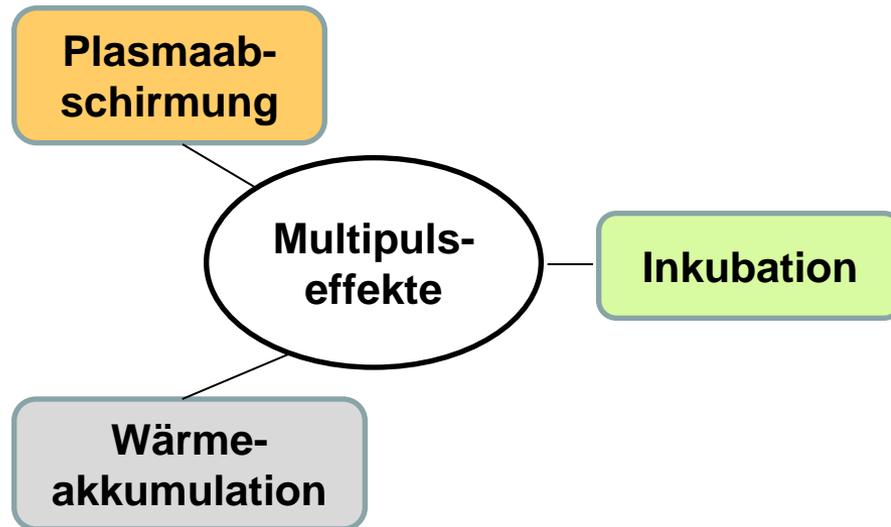
Prozess-Werkstoff-Matrix

	Metalle	Kunststoffe	Glas & Keramik	Halbleiter
Urformen				
Umformen				
Trennen	Mikromaterialabtrag			
Fügen				
Beschichten				
Stoffeigenschaften ändern				

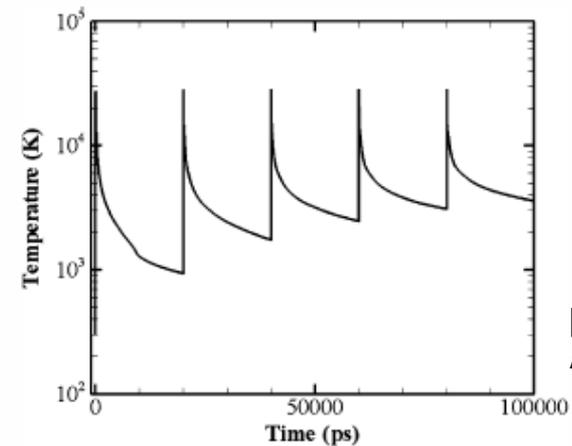
 Industrieller Einsatz & weiterführende Forschungsarbeiten

Forschungsansatz

- Zielsetzungen beim Mikromaterialabtrag
 - Maximierung der Abtragseffizienz
 - Steigerung der Abtragsrate
 - Konstanz der Strukturqualität, d.h. reproduzierbarer Abtrag hoher Präzision
- Realisierung durch Wahl geringer Spitzenfluenzen bei hohen Repetitionsraten

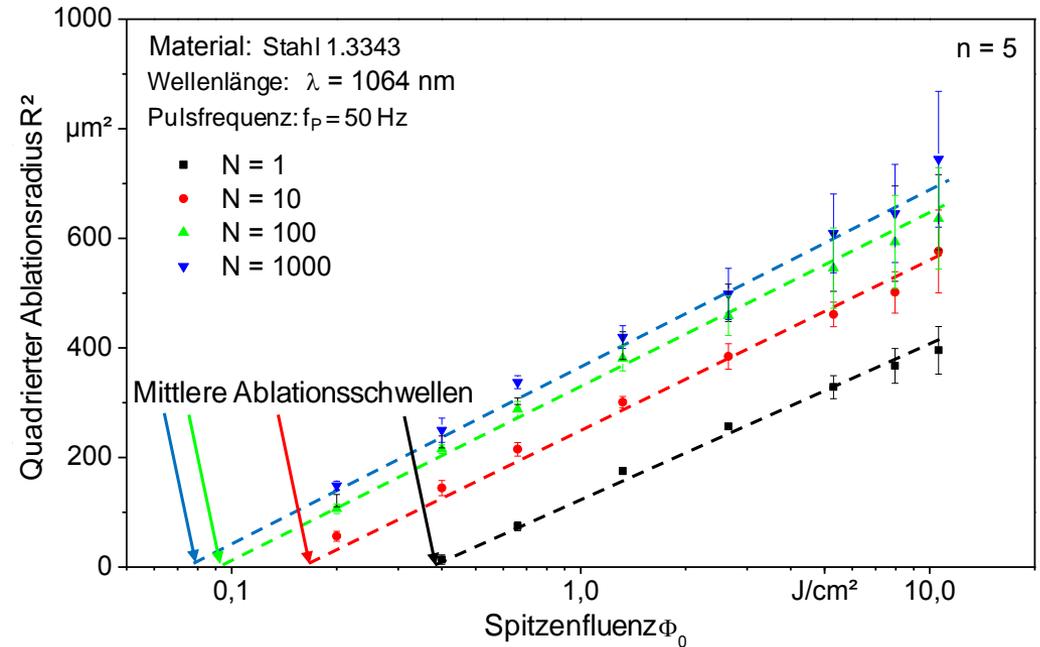
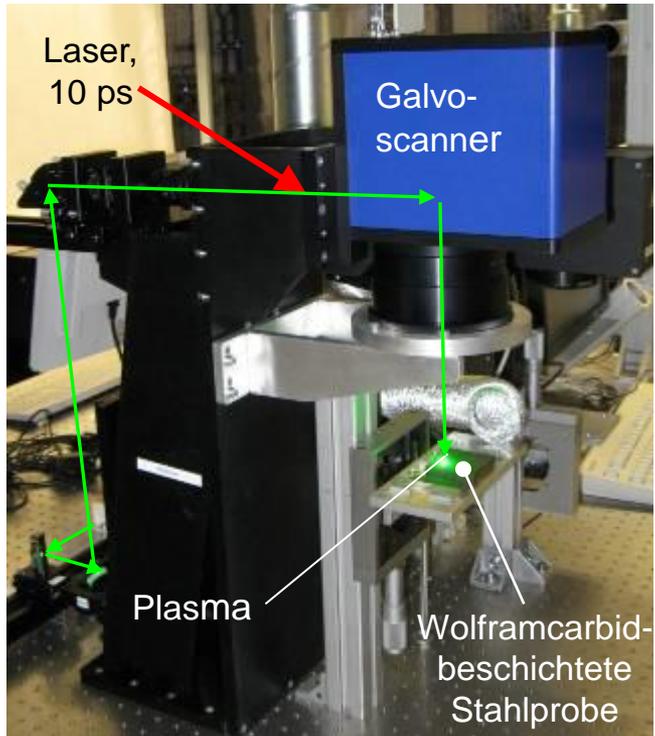


Simulierte Oberflächentemperatur bei einer Repetitionsrate von 50 MHz



[Hu; Appl. Phys. A 98-407; 2010]

Experiment



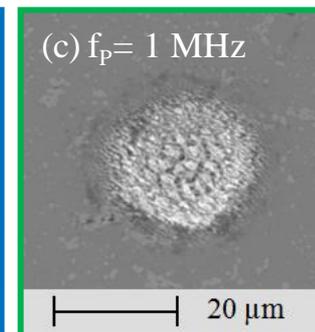
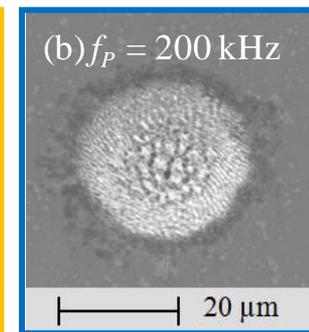
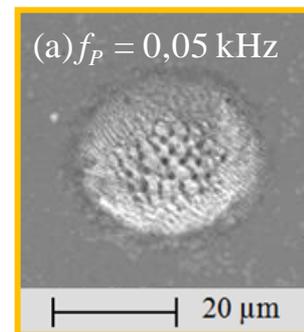
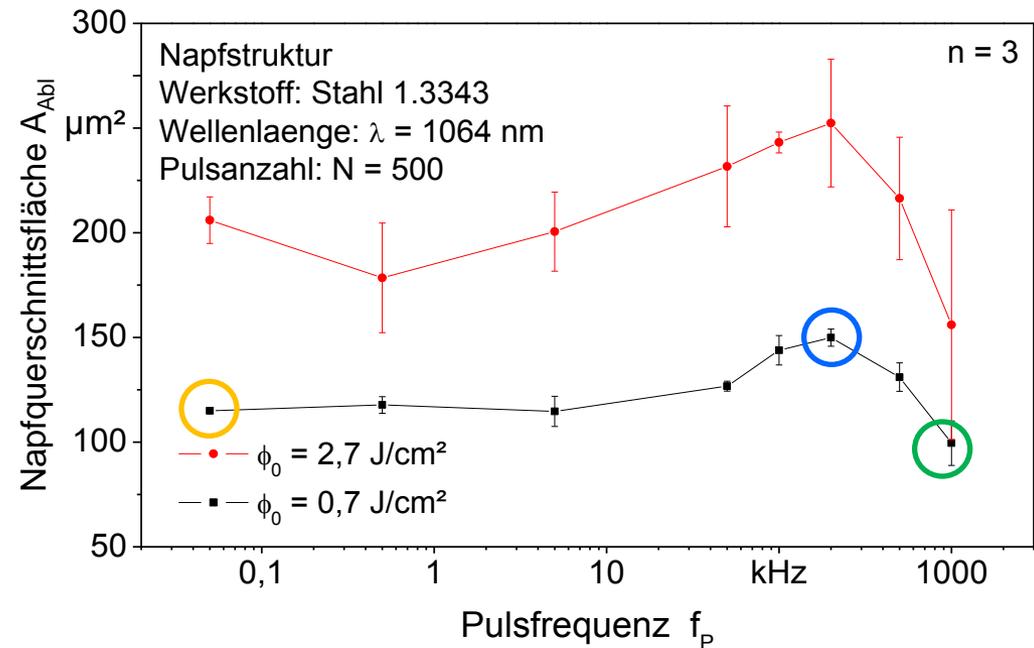
- Untersuchung der Inkubation anhand der Pulsabhängigkeit der Abtragsschwelle
- Wärmeakkumulation und Plasmaabschirmung anhand Repetitionsratenvariation

Ergebnisse

- Abtragsverhalten in Abhängigkeit der Repetitionsrate:
 - Änderung der Napfgröße in Abhängigkeit der Frequenz
 - Abtragsratenzunahme durch Wärmeakkumulation
 - Sinken der Effizienz infolge Abschirmungseffekten
- Temperatur nach dem N-ten Laserpuls:

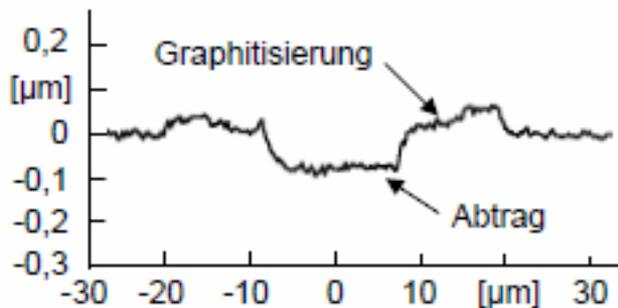
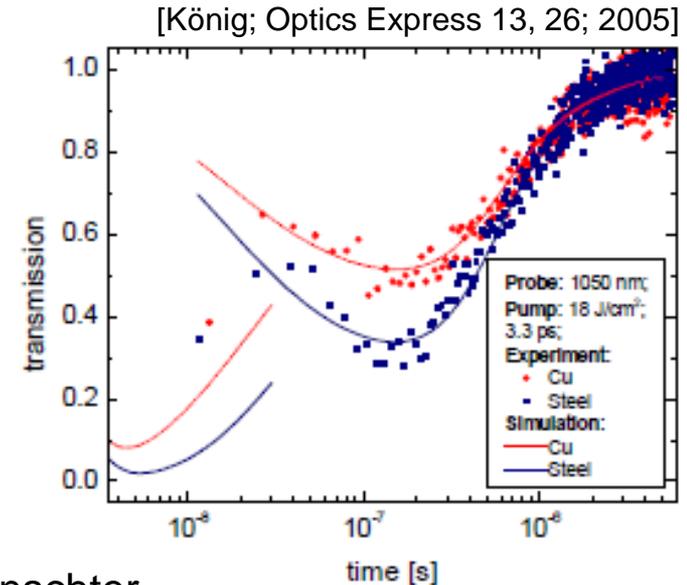
$$T_N = T_1 \times \frac{1 - \alpha^N}{1 - \alpha} \quad \text{mit} \quad \alpha = \sqrt{\frac{t_{th}}{t_{th} - (f_{Rep})^{-1}}}$$

REM-Aufnahmen von Napfstrukturen



Vorteile

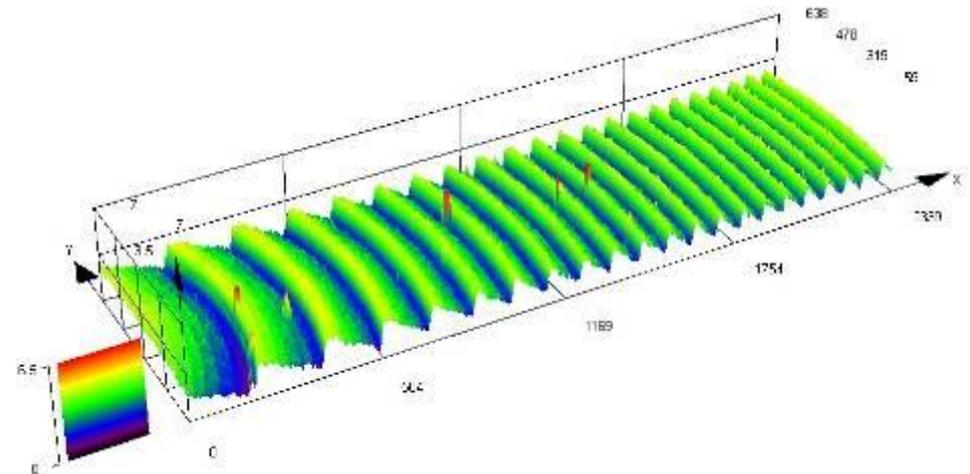
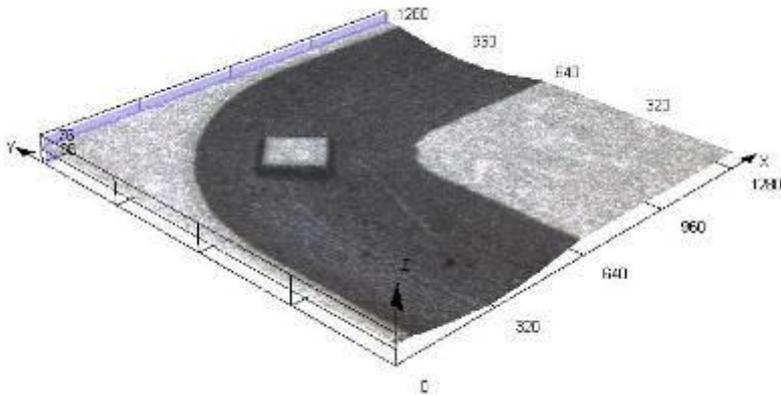
- Systemauslegung durch Kenntnis der Plasmaabschirmung
 - Ermittlung erforderlicher Puls-Separation
 - Systemtechnik zur Strahlführung
- Nutzung oder Vermeidung von Wärmeakkumulation
 - Materialtemperatur gezielt einstellbar
 - Steigerung der Abtragsrate
 - Temperatursensitive Materialien: Vermeidung unerwünschter Materialmodifikationen z.B. Graphitisierung von diamantähnlichen Werkstoffen



*Topografieänderung infolge
der Graphitisierung einer
DLC-Schicht*

Anwendungspotenzial

- Werkzeugfertigung
- Tribologische Dünnschichten
- Passive elektronische Bauelemente
- Sensorik
- Diffraktive und refraktive Optiken



Prozess-Werkstoff-Matrix

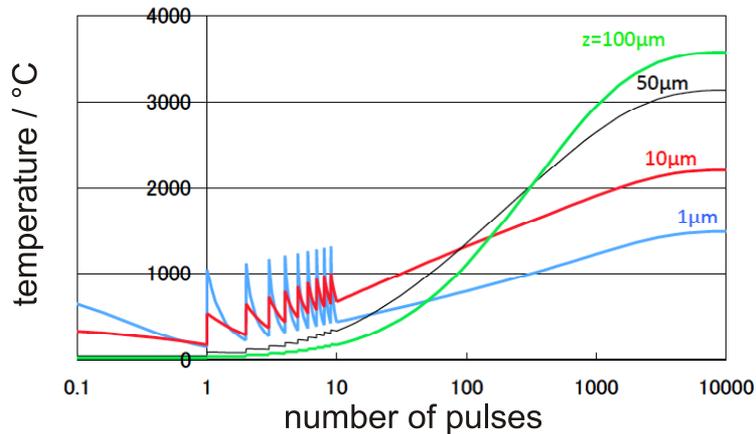
	Metalle	Kunststoffe	Glas & Keramik	Halbleiter
Urformen				
Umformen				
Trennen				
Fügen			Glasschweißen	
Beschichten				
Stoffeigenschaften ändern				

 Industrieller Einsatz & weiterführende Forschungsarbeiten

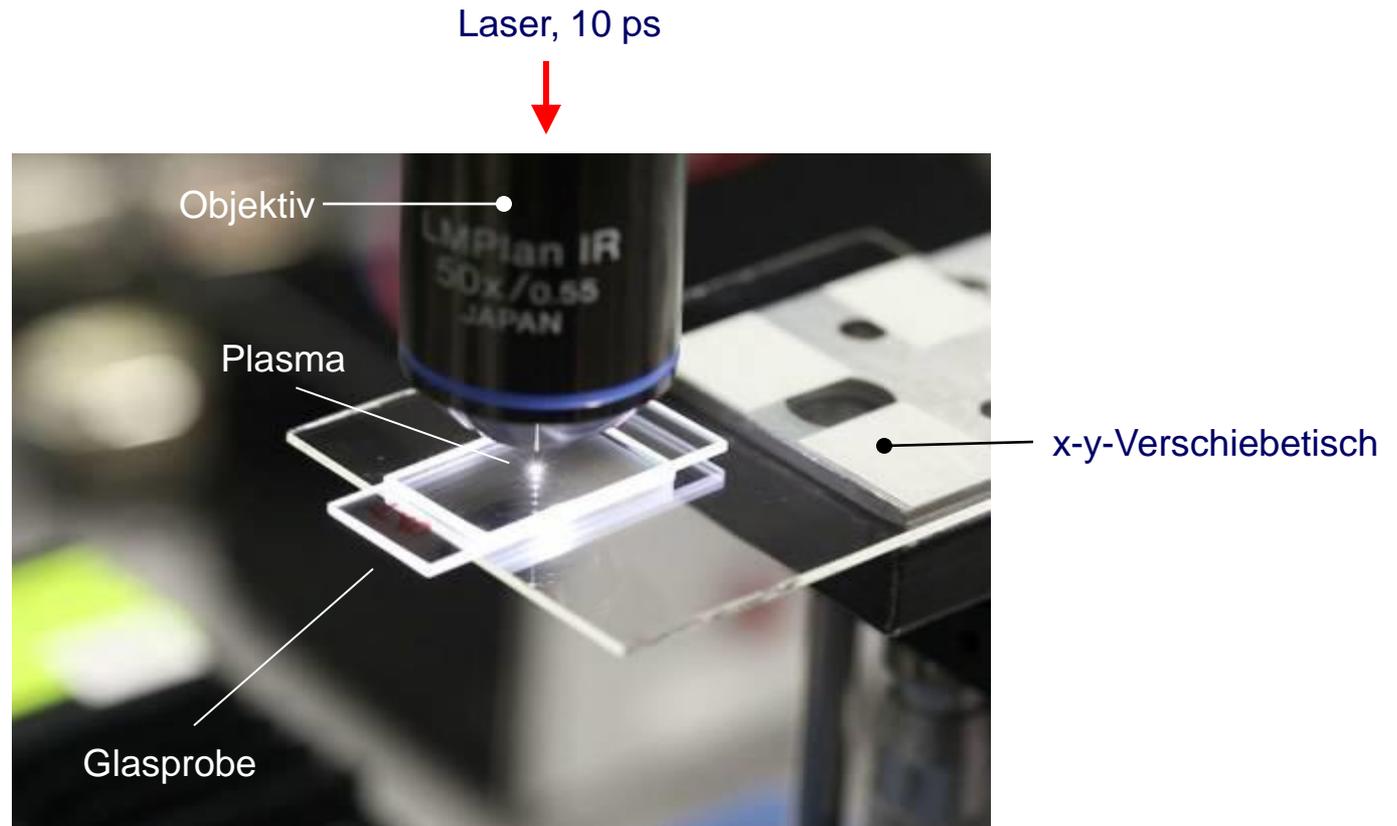
 Forschungsarbeiten

Forschungsansatz

- Ultrakurze Pulse zünden Plasma im transparenten Glas
- Heißes Plasma verbleibt im Glasinneren
 - Plasma erwärmt Umgebung
 - Wahl einer hohen Pulsrepetitionsrate, so dass der Bearbeitungsprozess im heißen Bereich abläuft
- Schmelze um den Fokuspunkt verschweißt Gläser

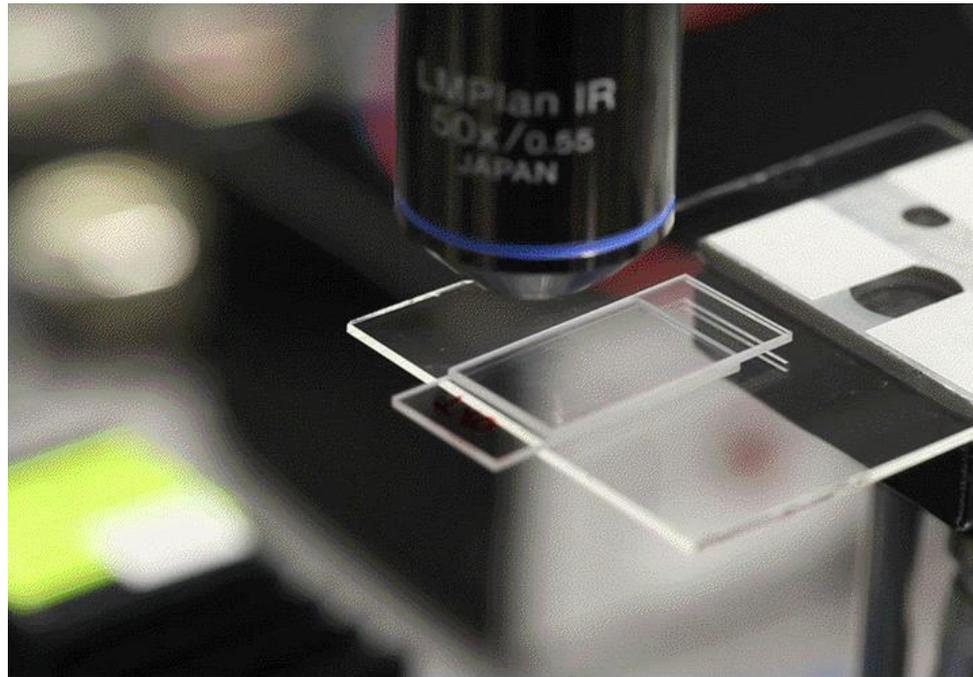


Experimenteller Aufbau



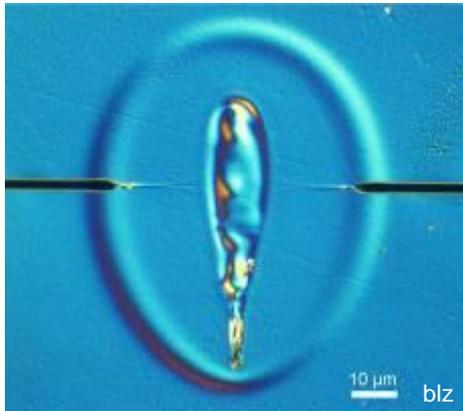
Prozess in Zeitlupe

- Vorschubgeschwindigkeit: 20 mm/s, Leistung: 2 W, Repetitionsrate 1 MHz, Dauer der Schweißung: 0,45 s (9 mm)

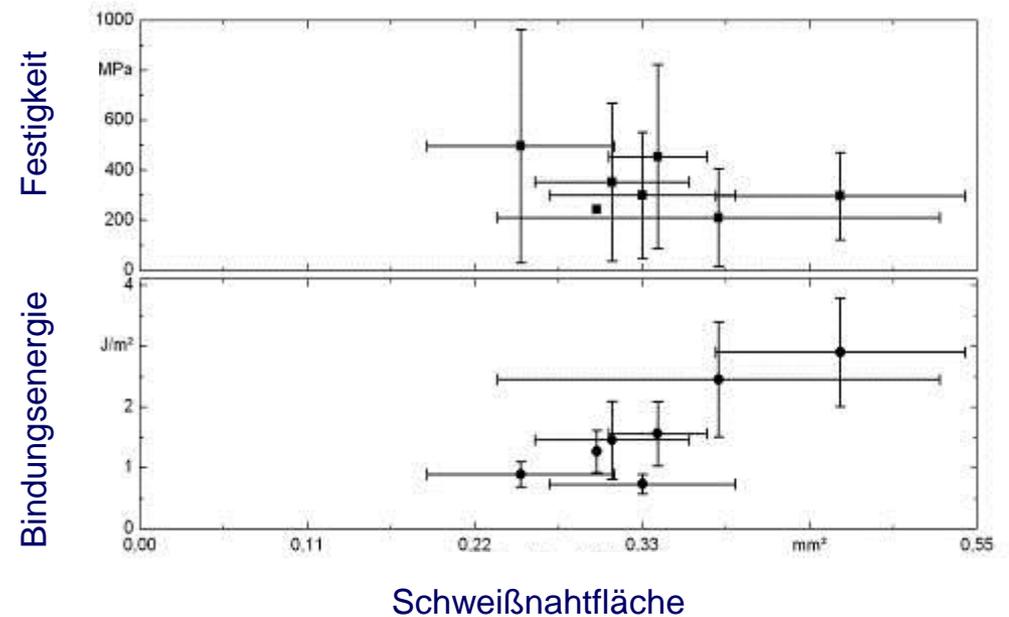


Ergebnisse

- Eigenschaften der Schweißverbindung:
 - Festigkeit im Bereich 100 MPa
 - Bindungsenergie ca. 2 J/m²
 - Hermetisch dicht



Geätzter Querschliff

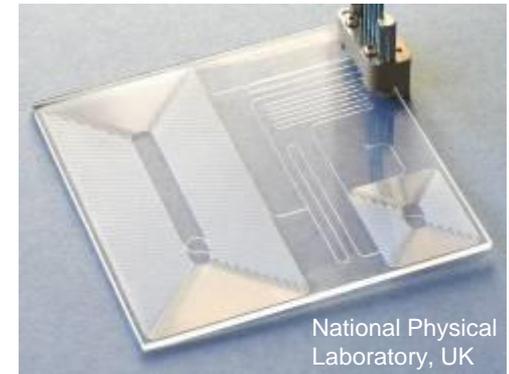


Vorteile

- Einfache Implementierung
 - Prozess durchführbar bei Raumtemperatur
 - Verzicht auf Vor- und Nachheizen
 - Kurze Bearbeitungszeit
 - Keine Zusatzmaterialien (Klebstoffe, Absorber) notwendig
- Hohe Qualität der Schweißnaht
 - Gute mechanische Festigkeit und Stabilität
 - Robust gegenüber thermischer Belastung oder chem. aggressiven Umgebungen
 - Geringe selbstinduzierte Belastung / keine Defektstellen

Anwendungspotenzial

- Chemie – Glasapparatebau, MEMS – mikro-elektro-mechanische Systeme, Medizintechnik, Optik, Telekommunikation, Bauwesen, Design



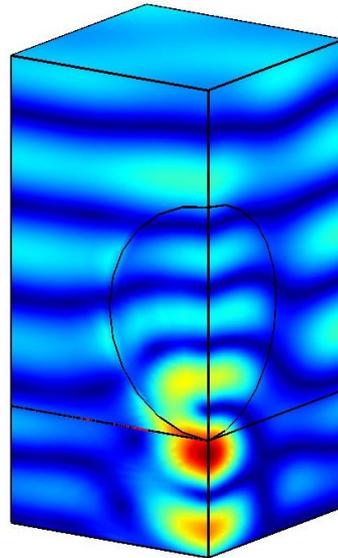
Prozess-Werkstoff-Matrix

	Metalle	Kunststoffe	Glas & Keramik	Halbleiter
Urformen				
Umformen				
Trennen	Nanostrukturierung			
Fügen				
Beschichten				
Stoffeigenschaften ändern				

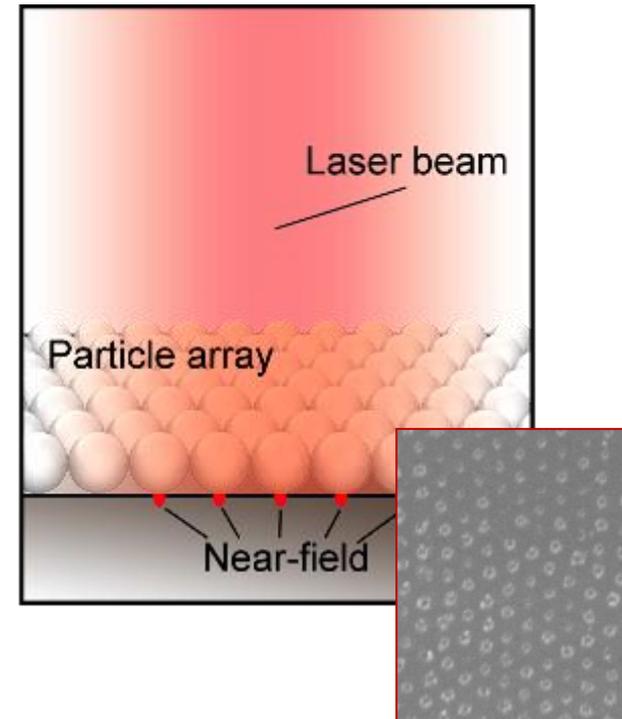
 Forschungsarbeiten

Unterschreitung der Beugungsbegrenzung durch Multiphotonen- und Nahfeldeffekte


$$w_f = \frac{2 M^2 \lambda f_L}{\pi d_L}$$

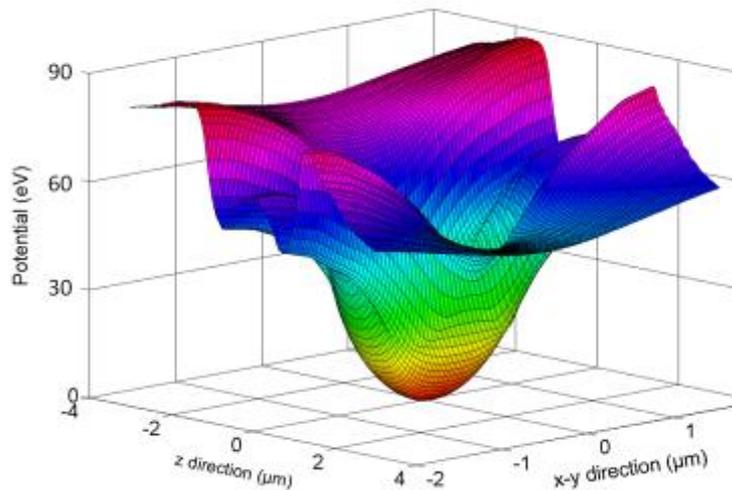


CPLA-Strukturierung

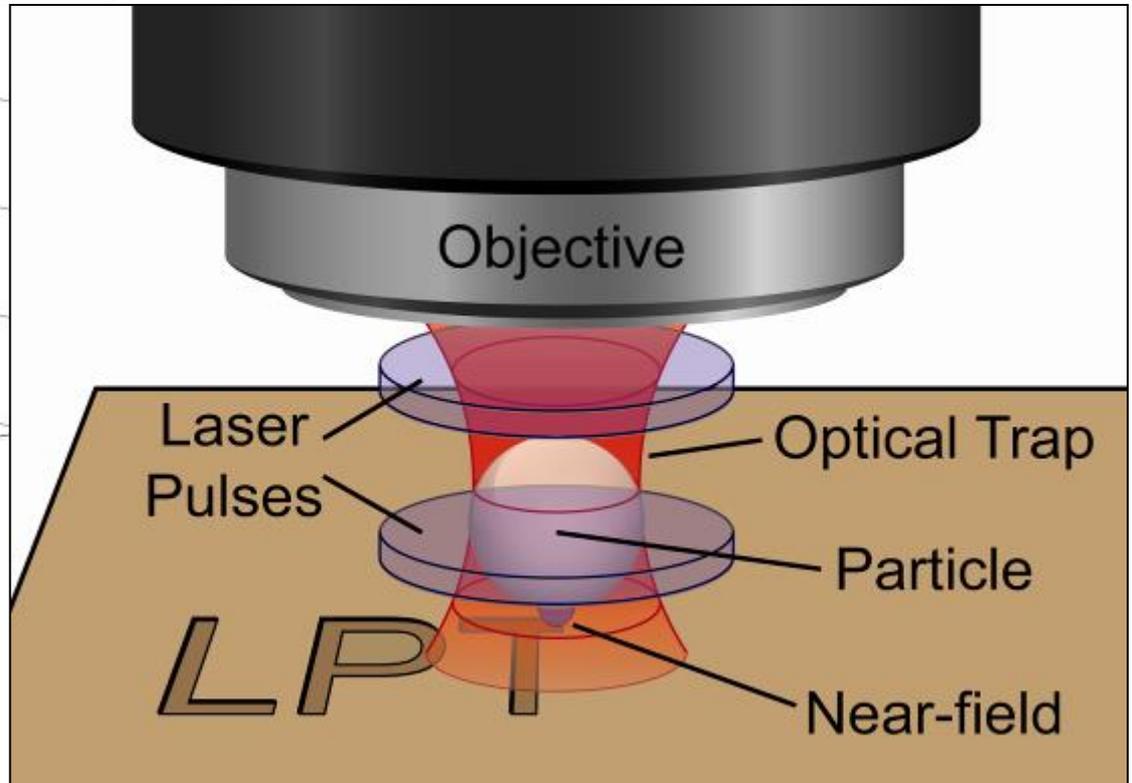


Nanostrukturierung mit Optischer Pinzette

Positionierung von Mikrolinsen mit einem fokussierten cw-Laser



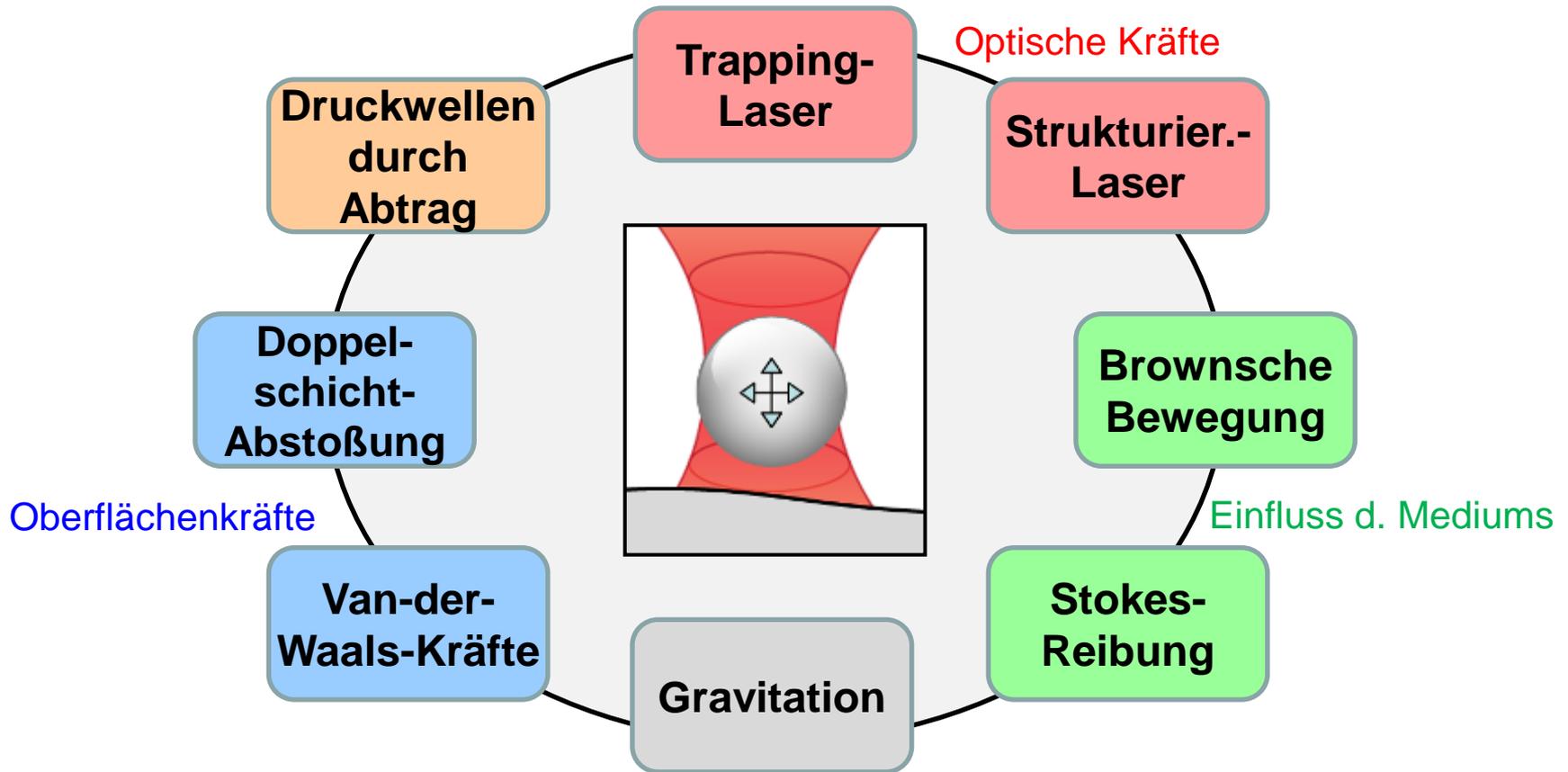
Potenzialsenke einer Optischen Pinzette



Prozessprinzip

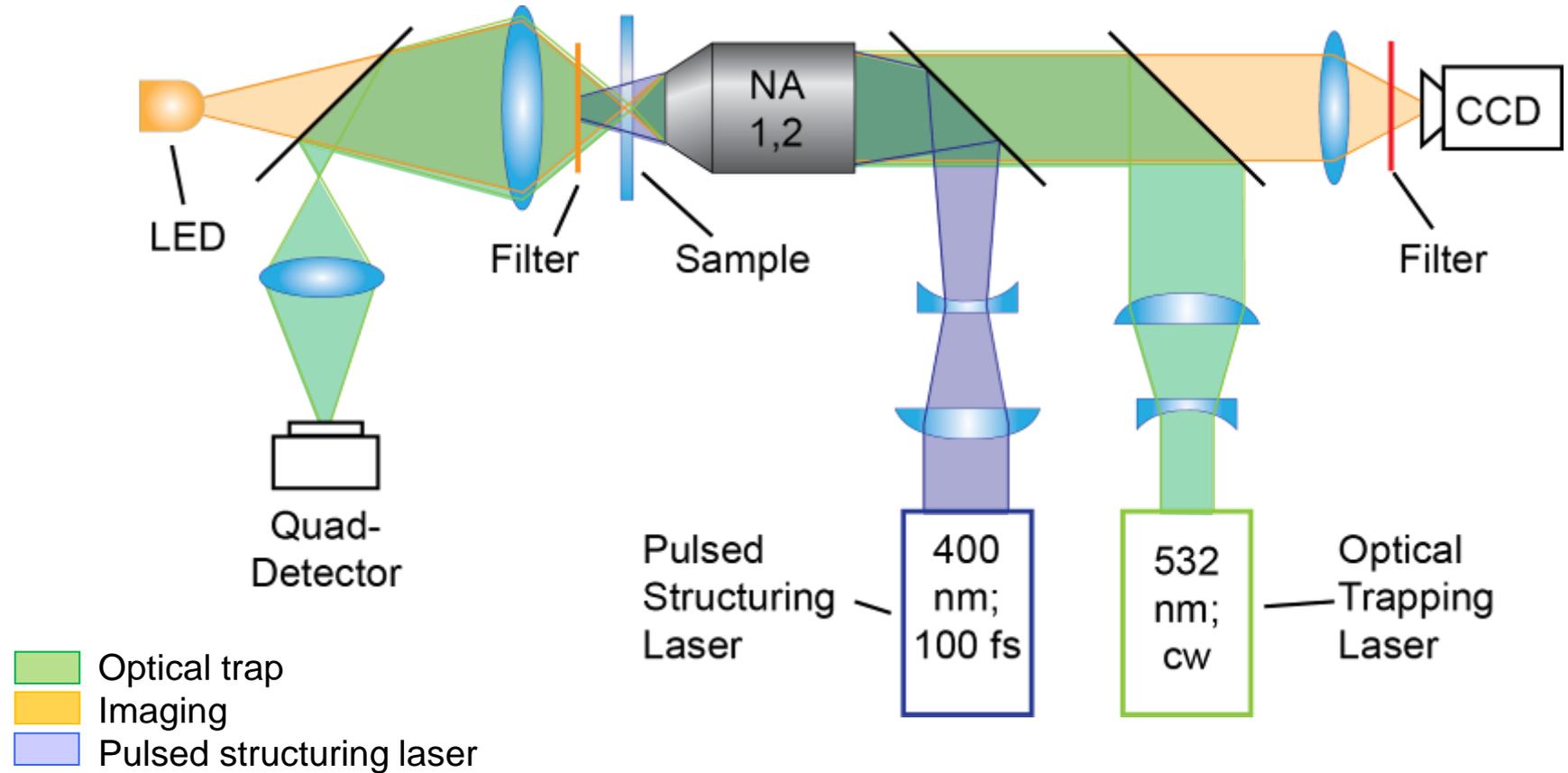
Nanostrukturierung mit Optischer Pinzette

Zusammenspiel einer Vielzahl physikalischer Faktoren

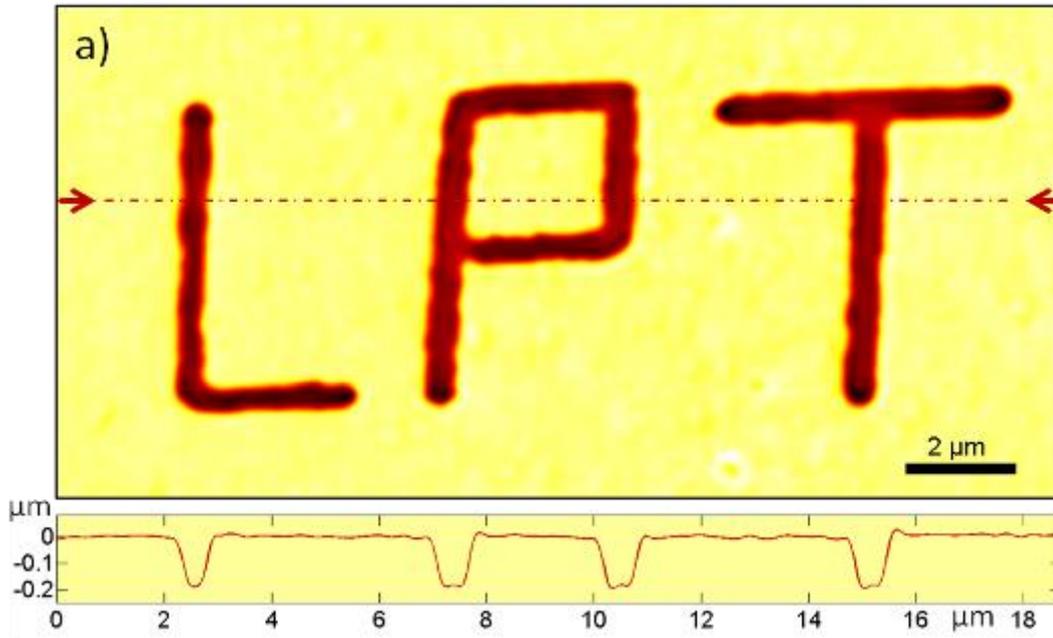


Nanostrukturierung mit Optischer Pinzette

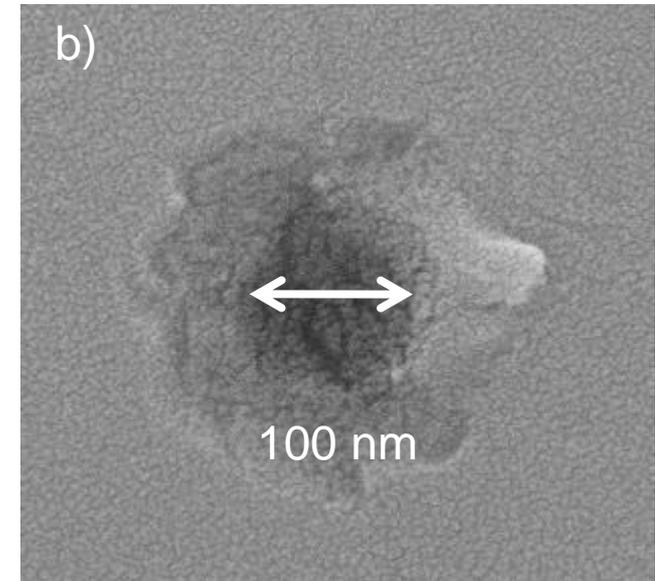
Versuchsaufbau



Ergebnisse



- a) Partikel:** SiO₂; $d = 2 \mu\text{m}$; $n = 1,458$
Laser: $\lambda = 532 \text{ nm}$; $\tau = 10 \text{ ps}$; $F = 8 \text{ mJ/cm}^2$
Vorschub: $v = 5 \mu\text{m/s}$
Substrat: Polyimid



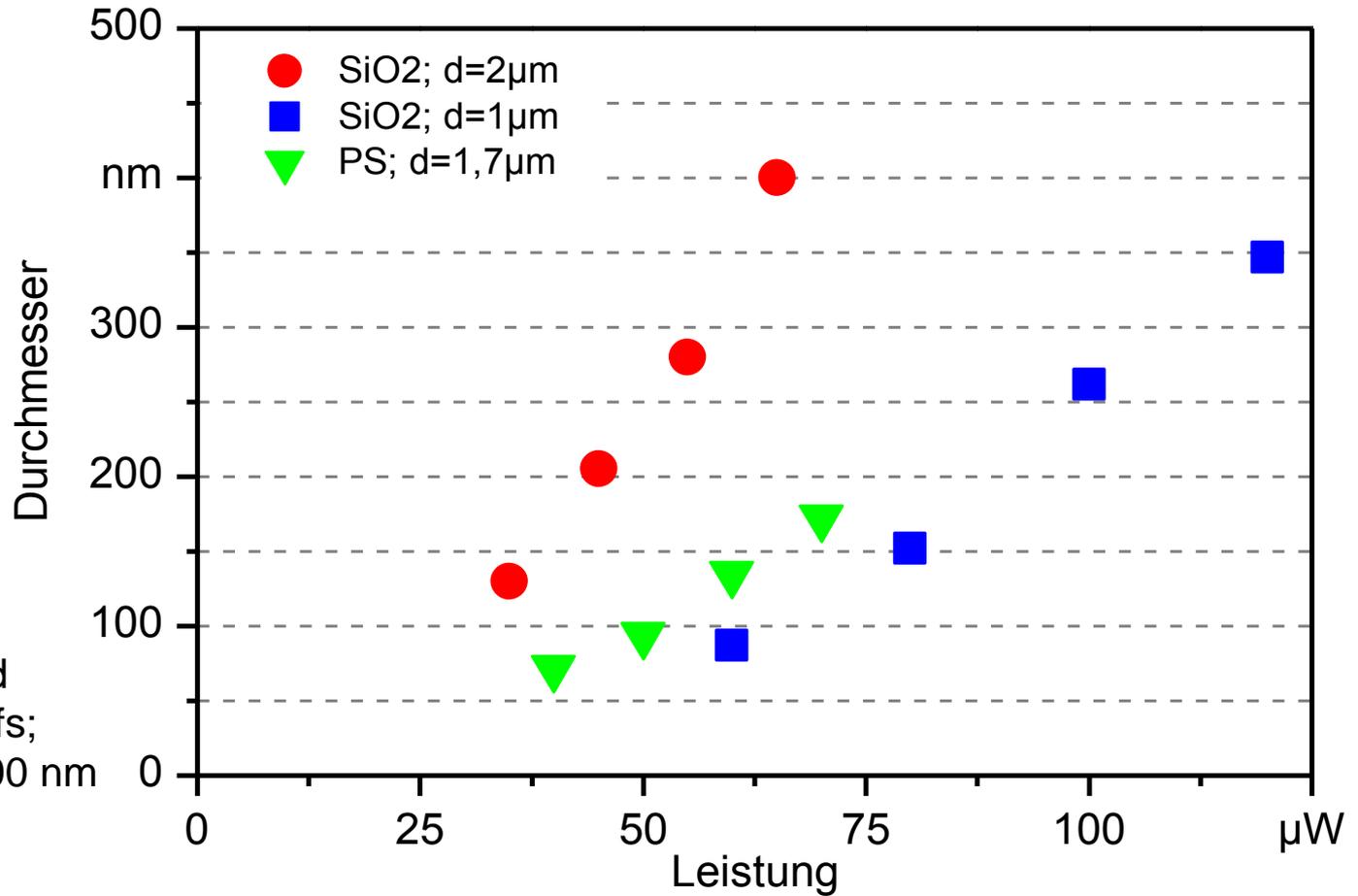
- b) Particle:** PS; $d = 1,7 \mu\text{m}$; $n = 1,54$
Laser: $\lambda = 800 \text{ nm}$; $\tau = 100 \text{ fs}$
Substrat: Quarzglas
Einzelpulsbohrung

Größenvergleich

Laserbeschriftetes
menschliches Haar
[Laser Zentrum Hannover]



Ergebnisse

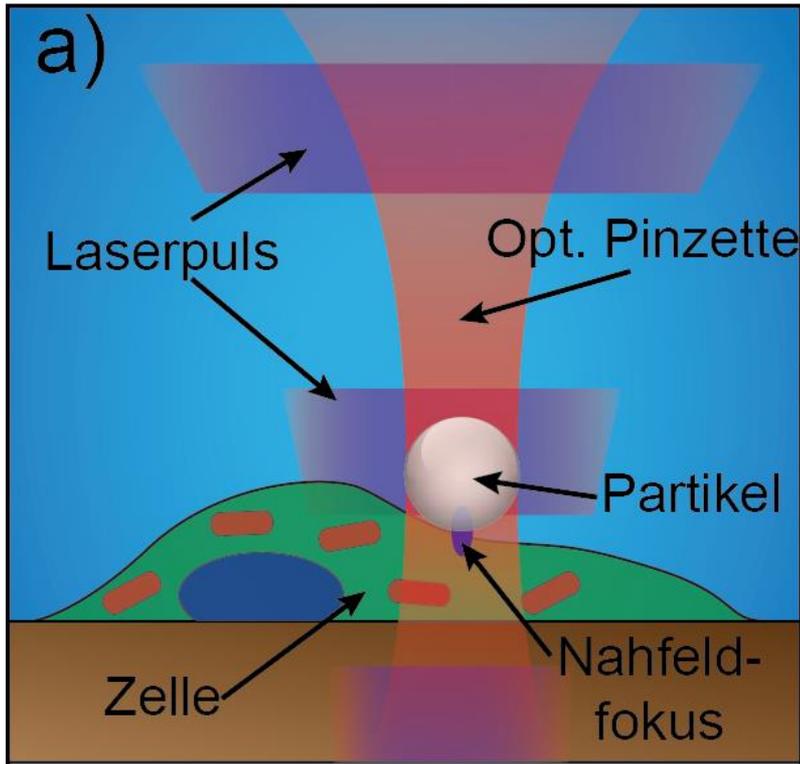


Substrat: Polyimid
Pulsdauer $\tau=100$ fs;
Wellenlänge $\lambda=400$ nm

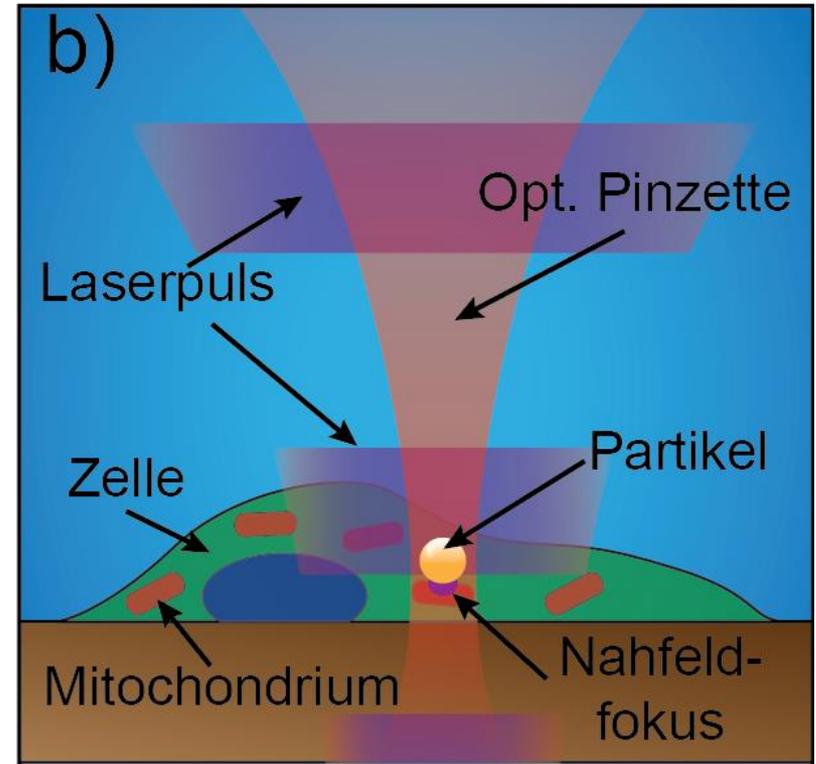
$n_{PS} = 1,58$
 $n_{SiO_2} = 1,45$

Nanostrukturierung mit Optischer Pinzette

Anwendungspotenzial in Forschung und Technik: Biologie / Medizin

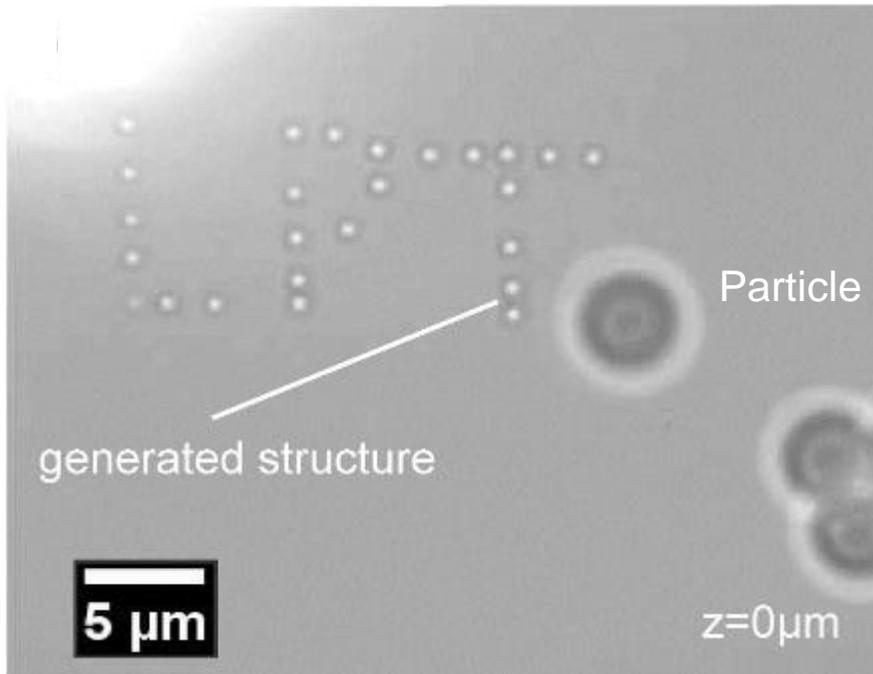


Effiziente Transfektion
durch Nahfeld-Zellchirurgie



Gezielte Bearbeitung von
Zellbestandteilen

Anwendungspotenzial in Forschung und Technik: Additive Fertigung



Additive Fertigung:
Mehrphotonenpolymerisation und
lichtinduzierte Metallabscheidung

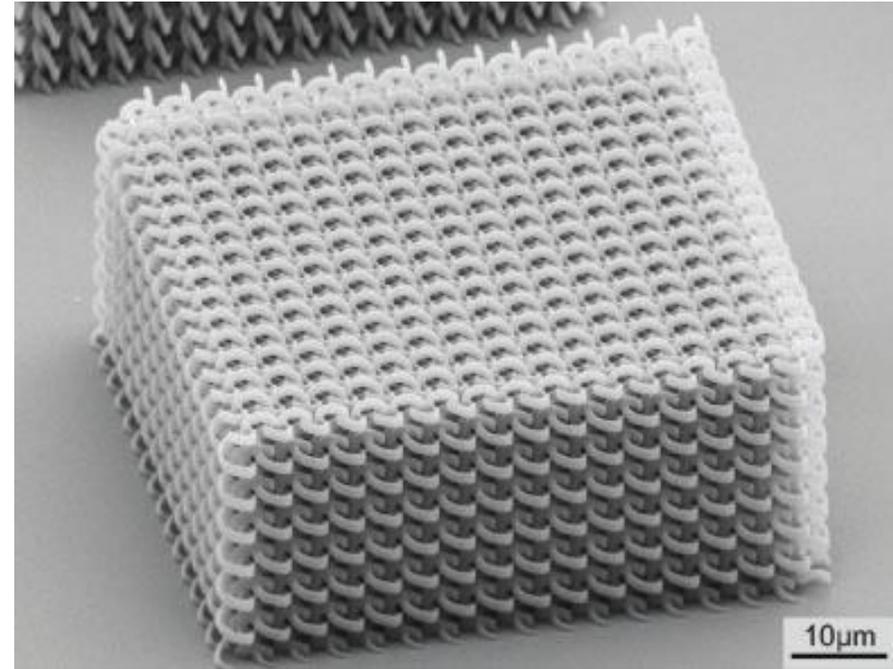


Bild: <http://www.materialsviews.com>

Kombinierte additive und subtraktive
Herstellung von Metamaterialien

Prozess-Werkstoff-Matrix

	Metalle	Kunststoffe	Glas & Keramik	Halbleiter
Urformen				
Umformen	Mikroschockwellen Umformung		Mikroschockwellen Umformung	Mikroschockwellen Umformung
Trennen	Abtrag, Oberflächenstrukturierung	Oberflächenstrukturierung	Trepanieren, Abtrag, Oberflächenbeschriftung	Abtrag (Solarzellen), Oberflächenstrukturierung
Fügen	Glas-Metall-Fügen		Glassschweißen	Glas-Halbleiter-Fügen
Beschichten				
Stoffeigenschaften ändern			Wellenleitererzeugung, Innenbeschriftung	

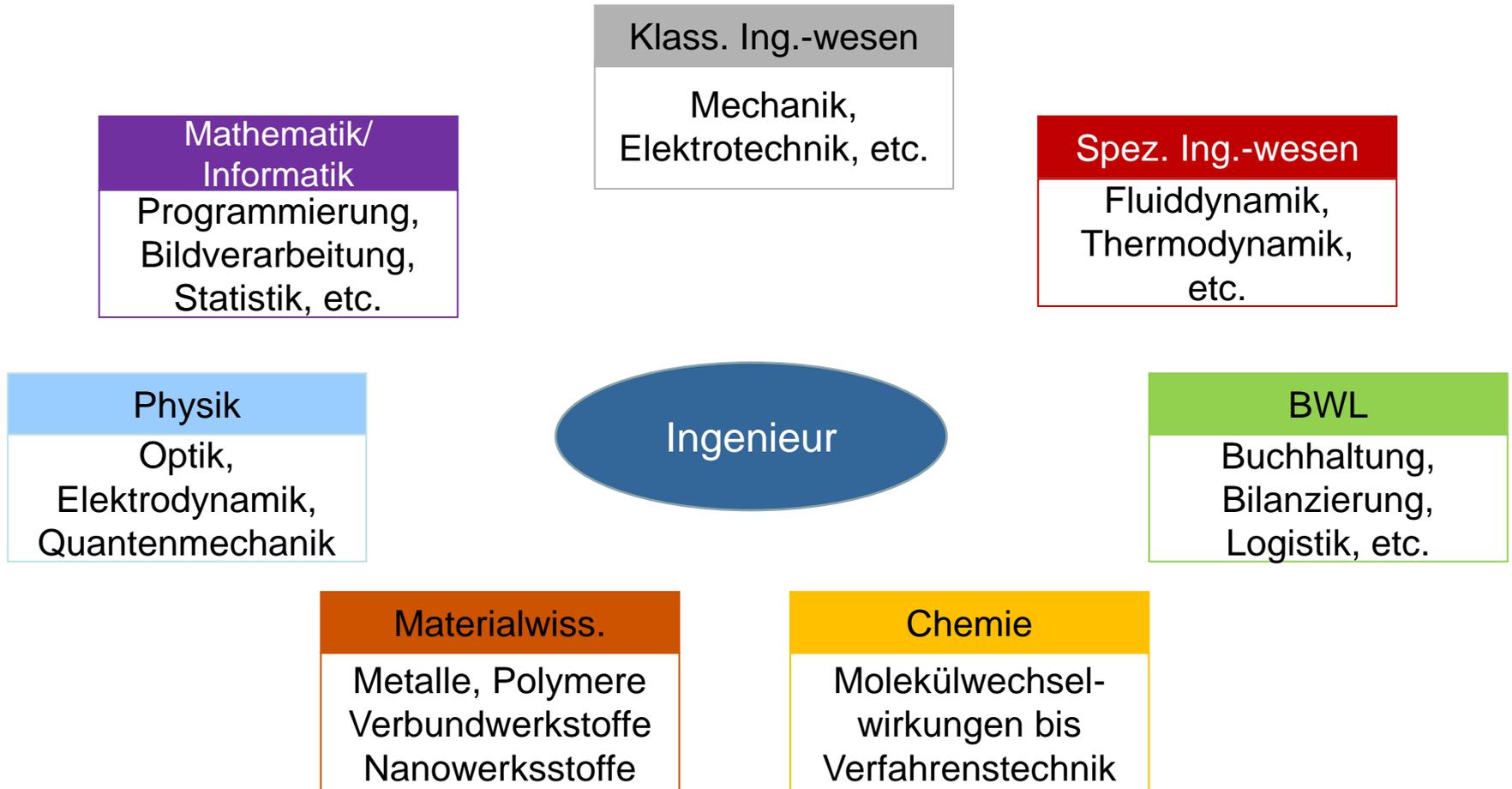
 Industrieller Einsatz

 Forschungsarbeiten

 Zukunftspotenzial

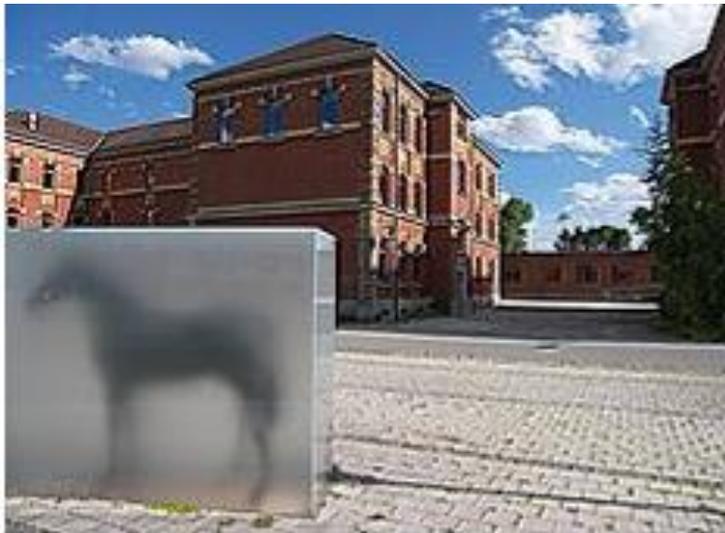
Neue Herausforderungen

Immer komplexere Fragestellungen lassen die Disziplinen wieder zusammenwachsen...



... und verändern das Anforderungsprofil an den modernen Ingenieur.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Lehrstuhl für Photonische Technologien

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Paul-Gordan-Straße 3

91052 Erlangen

Tel.: +49 / (0)9131 / 85 23241

Fax: +49 / (0)9131 / 85 23234

E-Mail: michael.schmidt@lpt.uni-erlangen.de