

Möglichkeiten und Limiten neuer Lasersysteme für die Fertigungstechnik in der Mikrobearbeitung

Beat Neuenschwander

***Institute for Applied Laser, Photonics & Surface
Technologies ALPS
Bernener Fachhochschule Technik und Informatik
Pestalozzistrasse 20
3400 Burgdorf***

Das Departement Technik und Informatik TI

Bachelorstudiengänge

- Automobiltechnik
- Informatik
- Elektro- und Kommunikationstechnik
- Maschinentechnik
- Medizininformatik
- Mikro- und Medizintechnik

Masterstudiengänge

- Master of Science in Biomedical Engineering
- Master of Science in Engineering

Umfassendes Weiterbildungsangebot (Bern) Managementzentrum (Wankdorf)

Umfassende Managementausbildungsmöglichkeiten

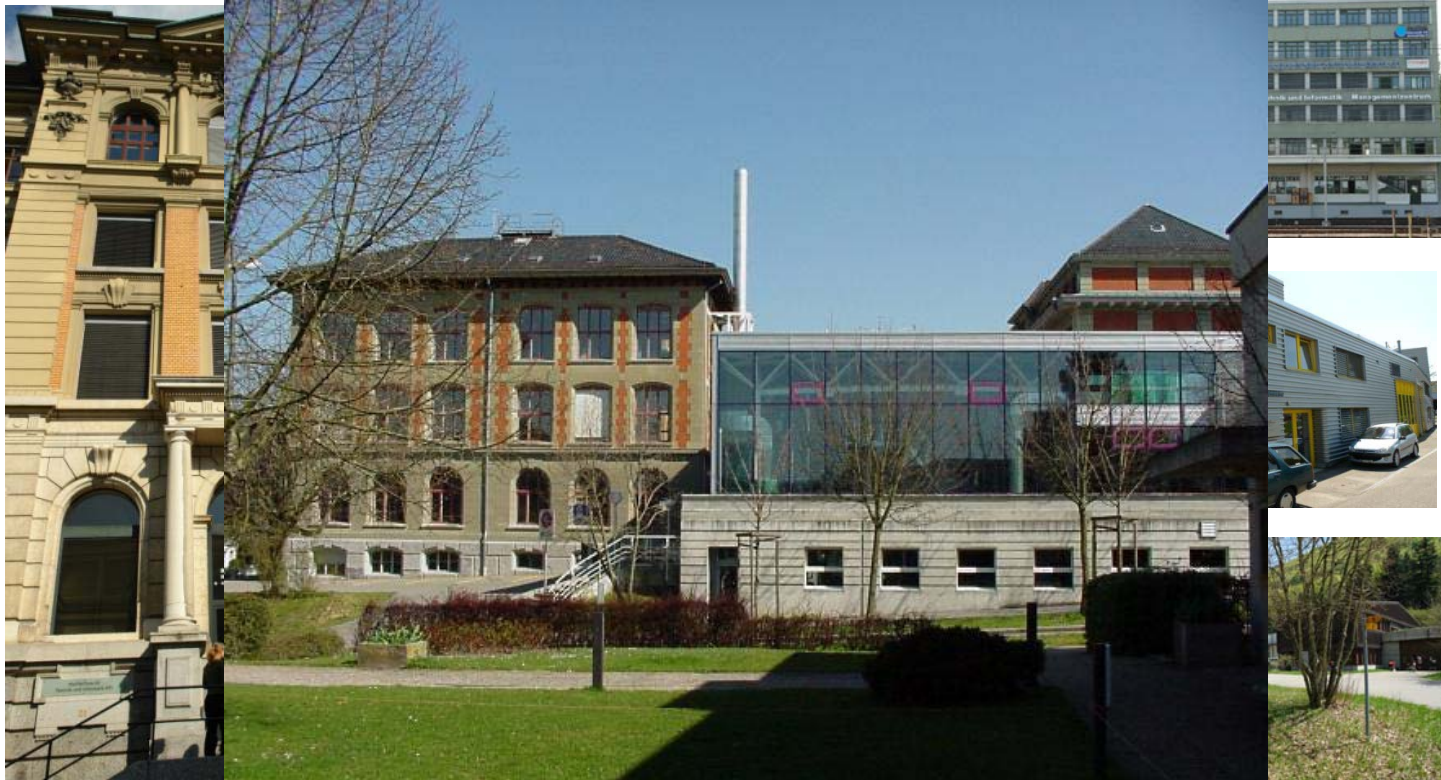
Medizintechnik, Medizininformatik

Software Schule Schweiz

Die 10 Forschungsinstitute an der BFH – TI

- **Institute for Applied Laser, Photonics and Surface Technologies ALPS**
- Institute for Printing Technology
- Energy, Transport and Mobility
- Human Centered Engineering HUCE
- ICT-based Management
- Institute for mechatronic systems ifms
- Institute for Rehabilitation and Performance Technology
- Institute for Risks and Extremes iREX
- Research Institute for Security in the Information Society
- Ubiquitous Mobile Communication Institute

Ein Departement an mehreren Standorten

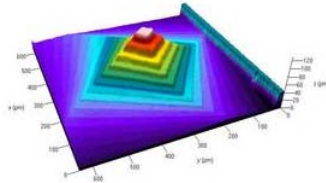


Institute for Applied Laser, Photonics and Surface Technologies ALPS

Cometencies and Research Groups:

Site Burgdorf:

- Laser Surface Engineering
B. Neuenschwander



- Fiber Laser Development
V. Romano

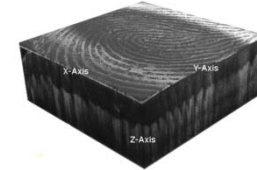


- Thin Films & Surfaces
P. Schwaller



Site Biel:

- Photonics
Ch. Meier



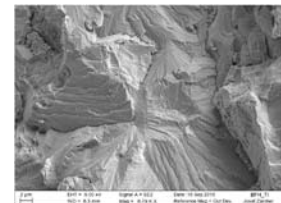
- Heat Treatment of Materials
J. Rufer



- Nanometrology
P. Walter



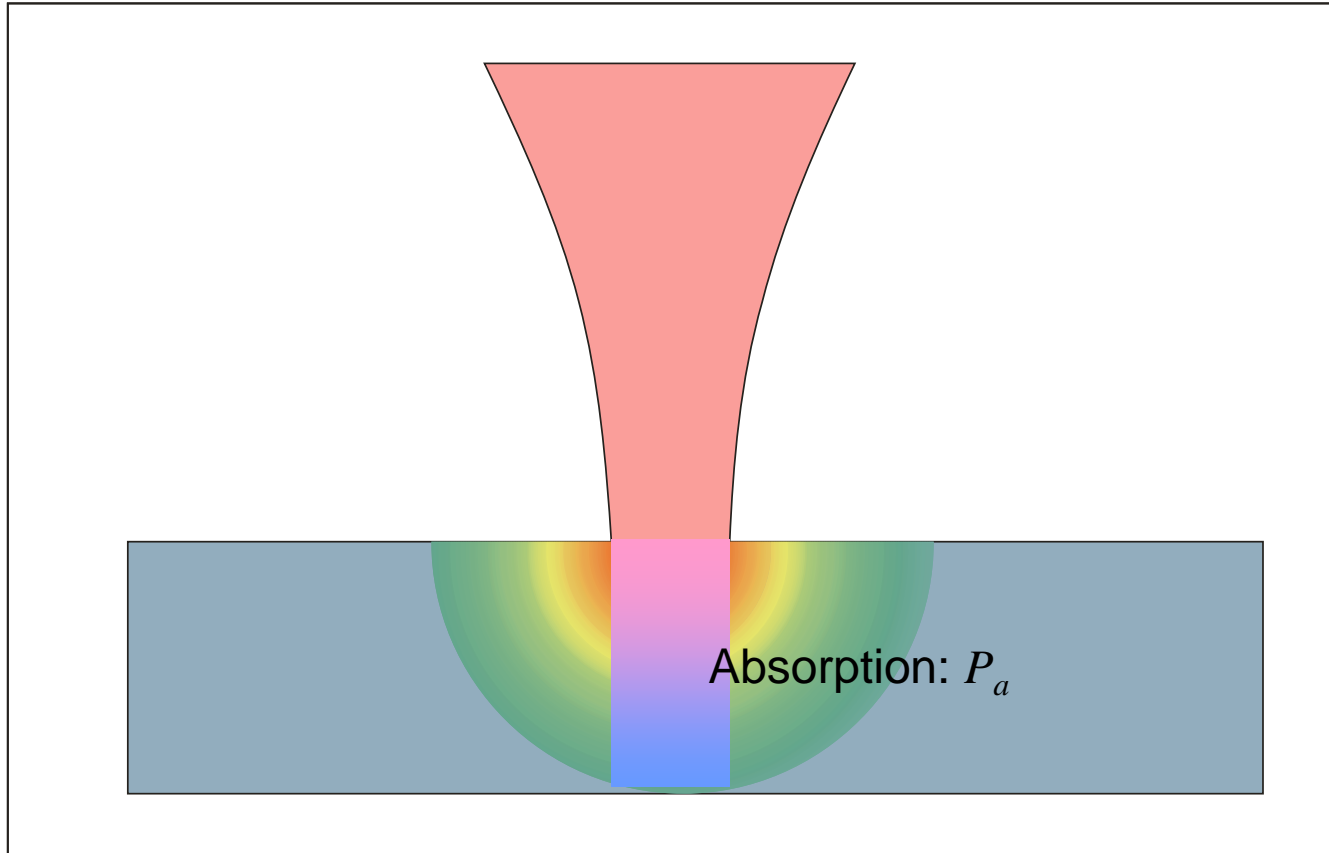
- Lab for Material and Surface Analysis (M. Baak, J. Zürcher)



Möglichkeiten und Limiten neuer Lasersysteme für die Fertigungstechnik in der Mikrobearbeitung

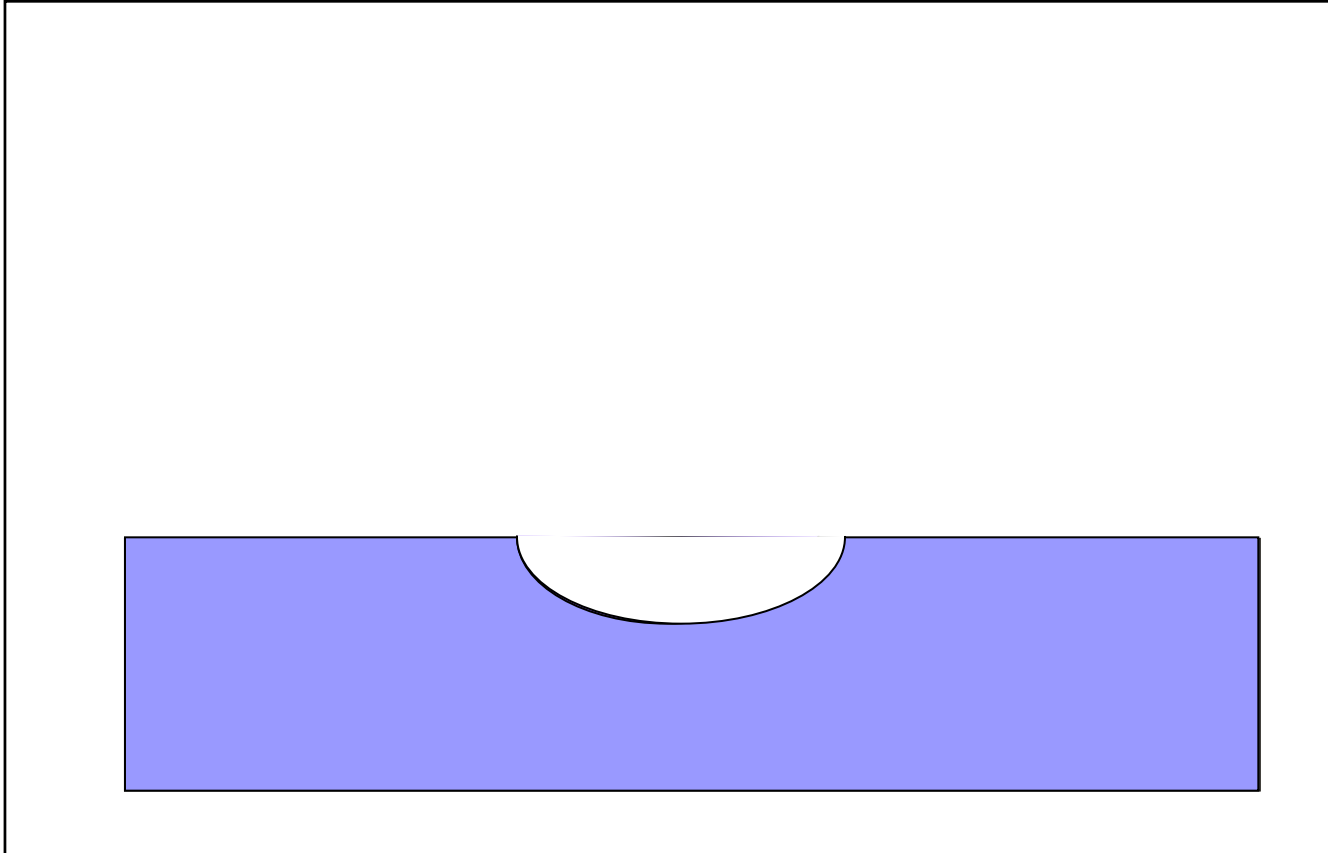
- Einführung
- Landkarte der Laseranwendungen
Einfluss von Spotradius und Pulsdauer
- Faserlaser
- Ultrakurze Pulse
 - Bearbeitung von Isolatoren und Metallen
 - Abtragmodel
 - Optimierungsstrategien
- Fazit

Laserstrahlung trifft auf ein Material



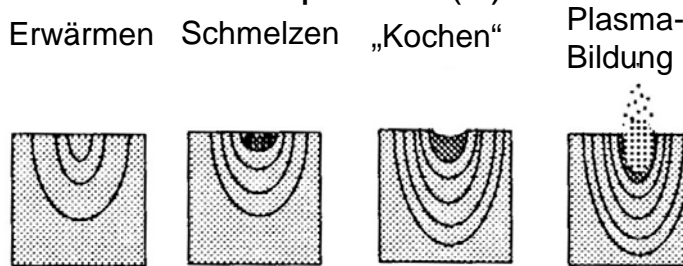
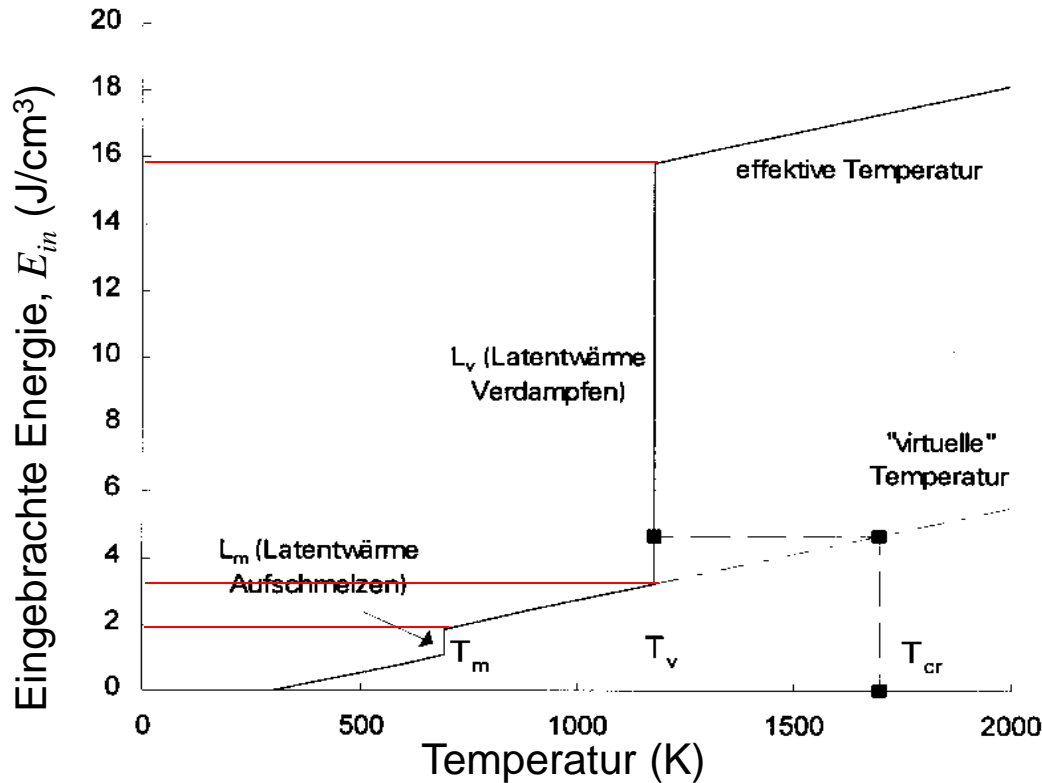
Durch die absorbierte Strahlung wird lokal Energie im Material deponiert, die das Material "aufheizt".

Was bewirkt die absorbierte Laserstrahlung?



Das führt zu „Änderungen“ im Material oder zur Entfernung (Aufschmelzen, Verdampfen) des Materials.

Energiebetrachtungen



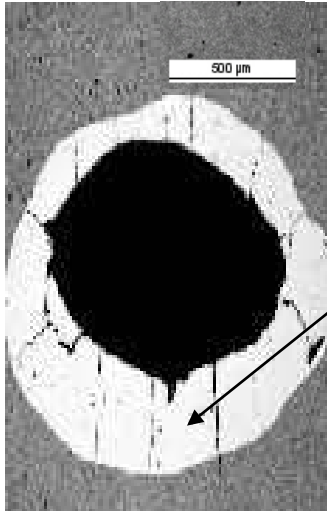
Schmelzen ist viel effizienter als Verdampfen.

Je länger der Energieeintrag dauert, desto tiefer dringt diese ins Material ein.

$$l_D \propto \sqrt{t}$$

Mit dem Laserpointer wird es einfach nicht recht warm.

Energiebetrachtungen



Schmelzfilm,
Heat Affected Zone (HAZ)

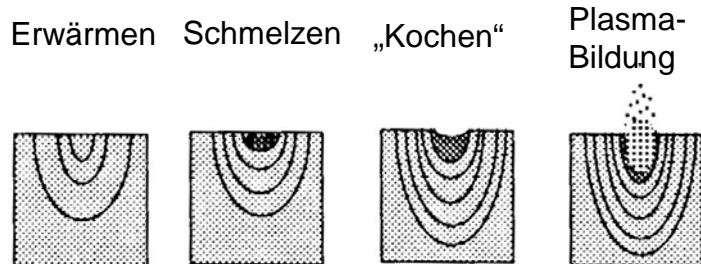
Schmelzen ist viel effizienter als Verdampfen.

Je länger der Energieeintrag dauert, desto tiefer dringt diese ins Material ein.

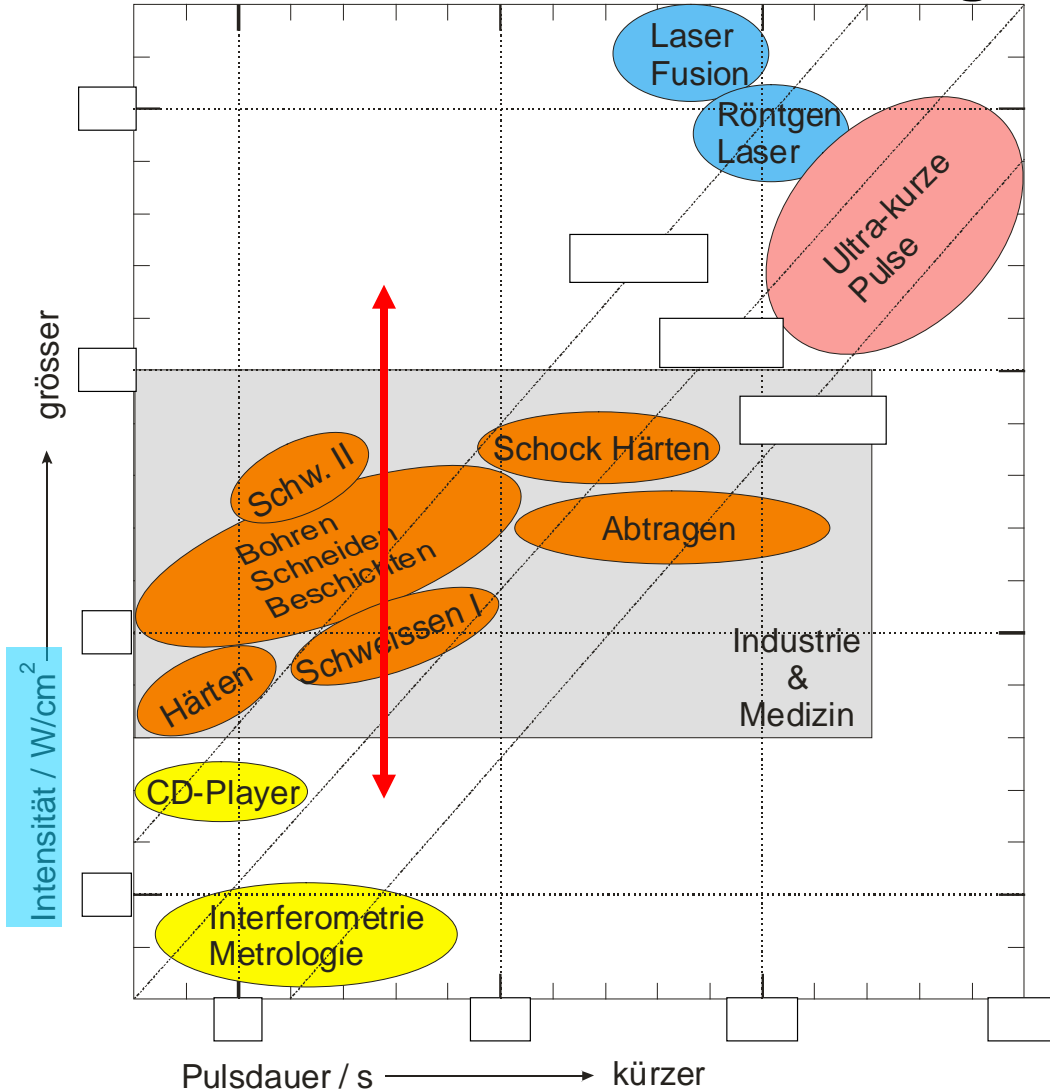
$$l_D \propto \sqrt{t}$$

Mit dem Laserpointer wird es einfach nicht recht warm.

Neben der eingebrachten Energie (pro Fläche) spielt auch die Einwirkzeit eine zentrale Rolle.



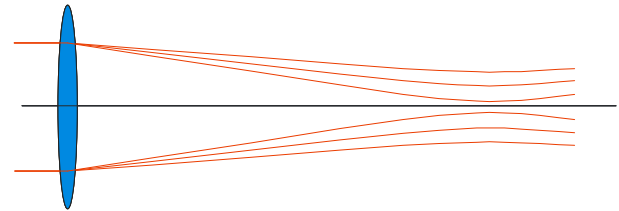
Landkarte der Laseranwendungen



$$I = \frac{P}{\pi \cdot w_0^2} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\pi \cdot w_0^2}$$

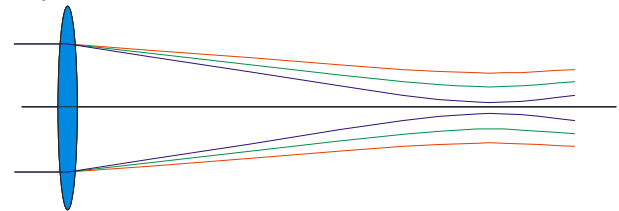
Verbessern der Strahlqualität M^2 :

$$w_0 \propto M^2$$



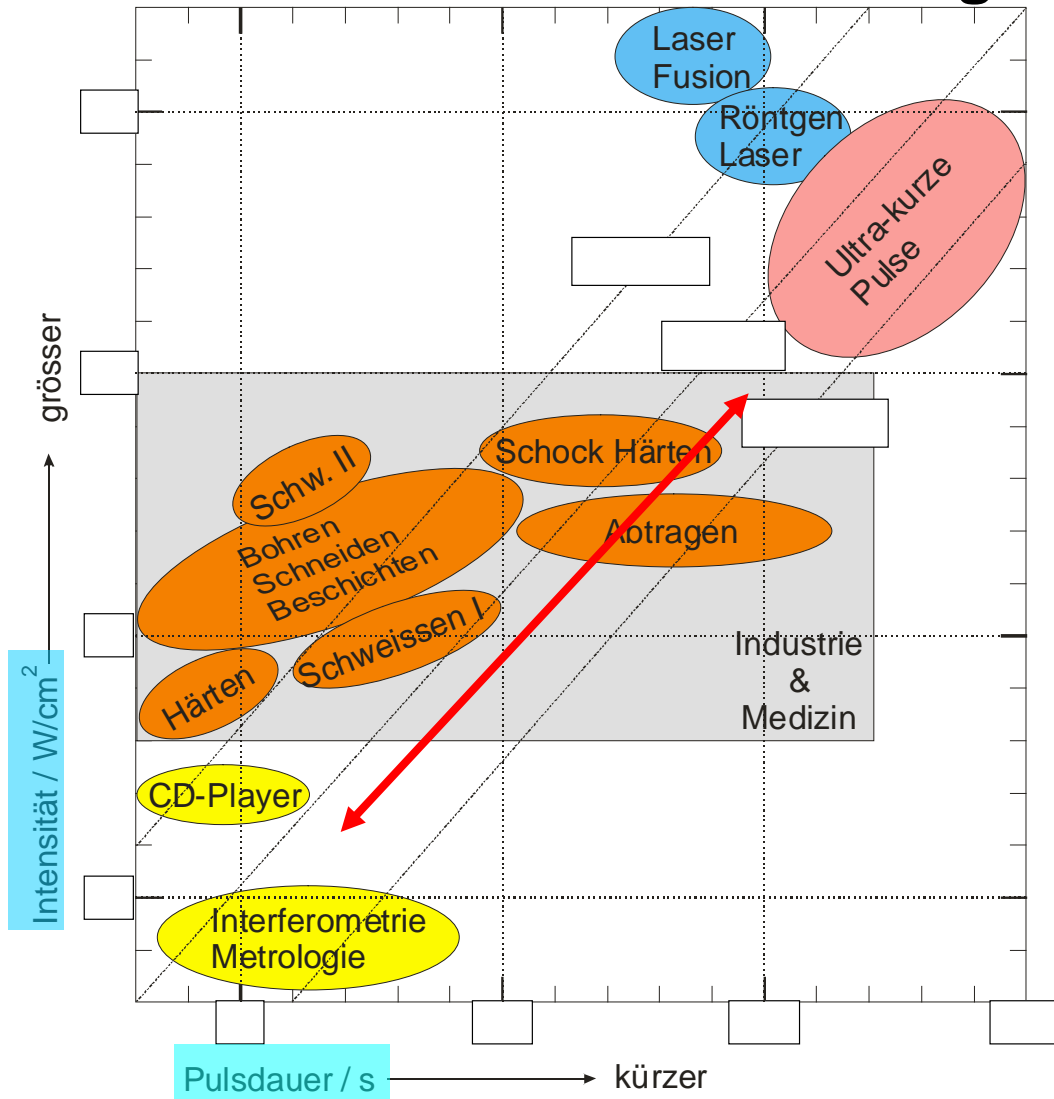
Verkleinern der Wellenlänge λ :

$$w_0 \propto \lambda$$



Änderungen am Fokusradius führen in der Landkarte senkrecht nach oben oder unten.

Landkarte der Laseranwendungen



$$I = \frac{P}{\pi \cdot w_0^2} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\pi \cdot w_0^2}$$

Bei Änderungen der Einwirkzeit bleibt die Energie pro Fläche (Fluenz) konstant.

Bei Änderungen der Einwirkzeit bewegen wir uns schräg in der Landkarte.

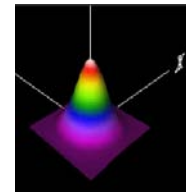
Kurze Einwirkzeiten bei entsprechenden Intensitäten sind nur im gepulsten Betrieb möglich.

Faserlaser

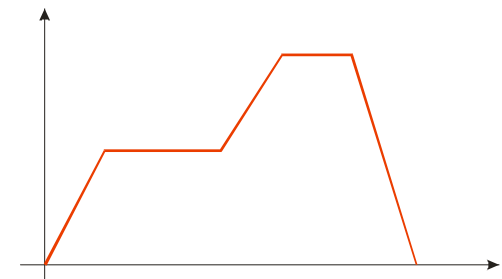
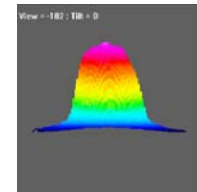


- Klein, kompakt und hohe Steckdoseneffizienz
- Sehr gute Strahlqualität
- Breite Palette (von kW cw bis ns gepulst)
- Hohe Flexibilität und Möglichkeiten zur „Pulsformung“
- Stabilität
- Einfaches Handling und Preisgünstig
- Beschränkte Pulsenergie (abhängig von Pulsdauer)

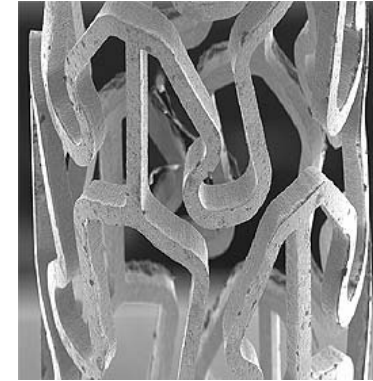
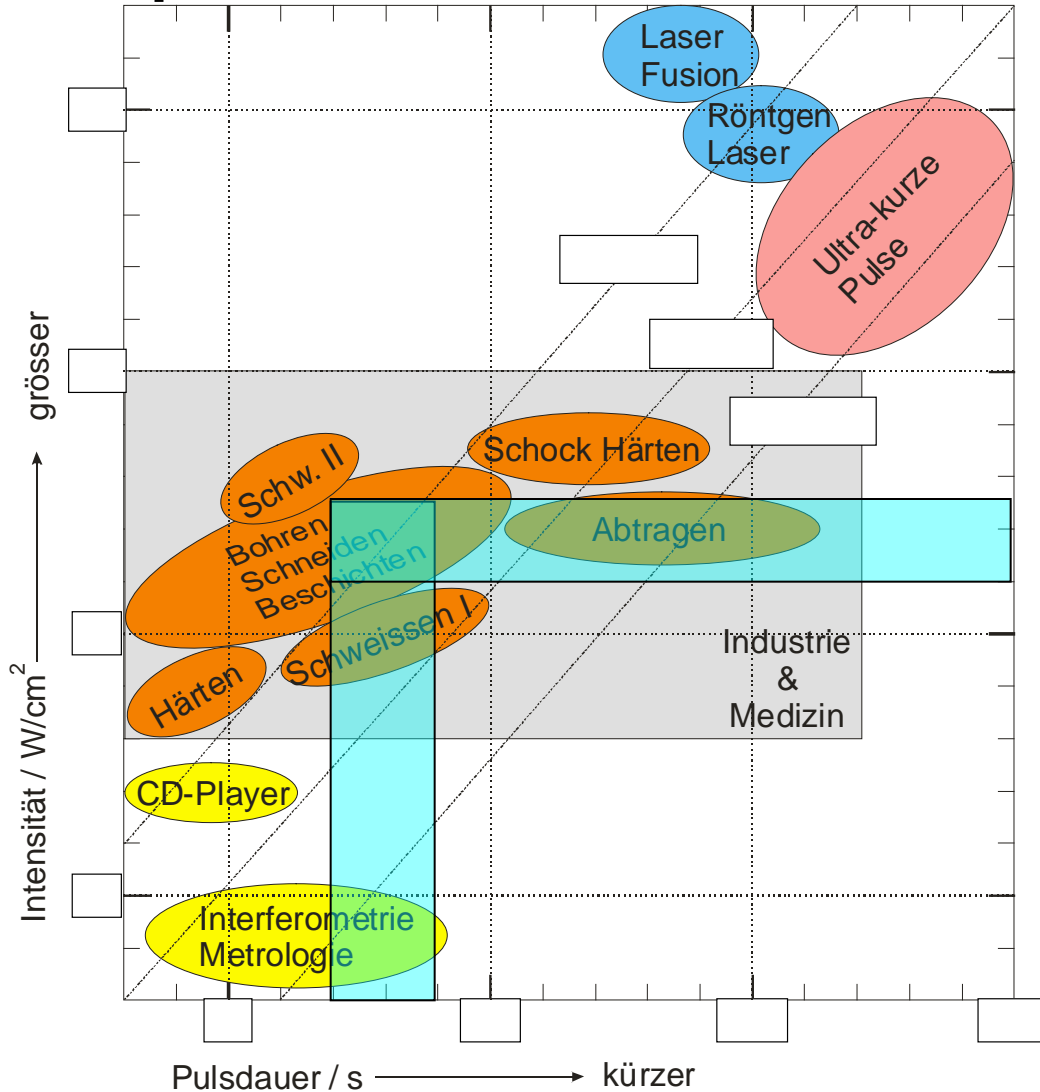
$$M^2 \approx 1.1$$



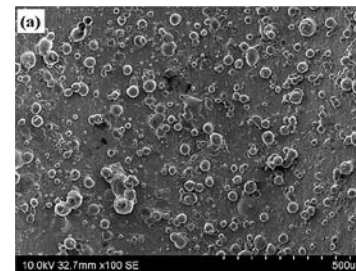
$$M^2 \approx 4$$



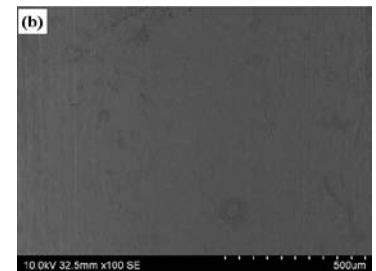
Beispiel: Schneiden von Stents



dry cutting



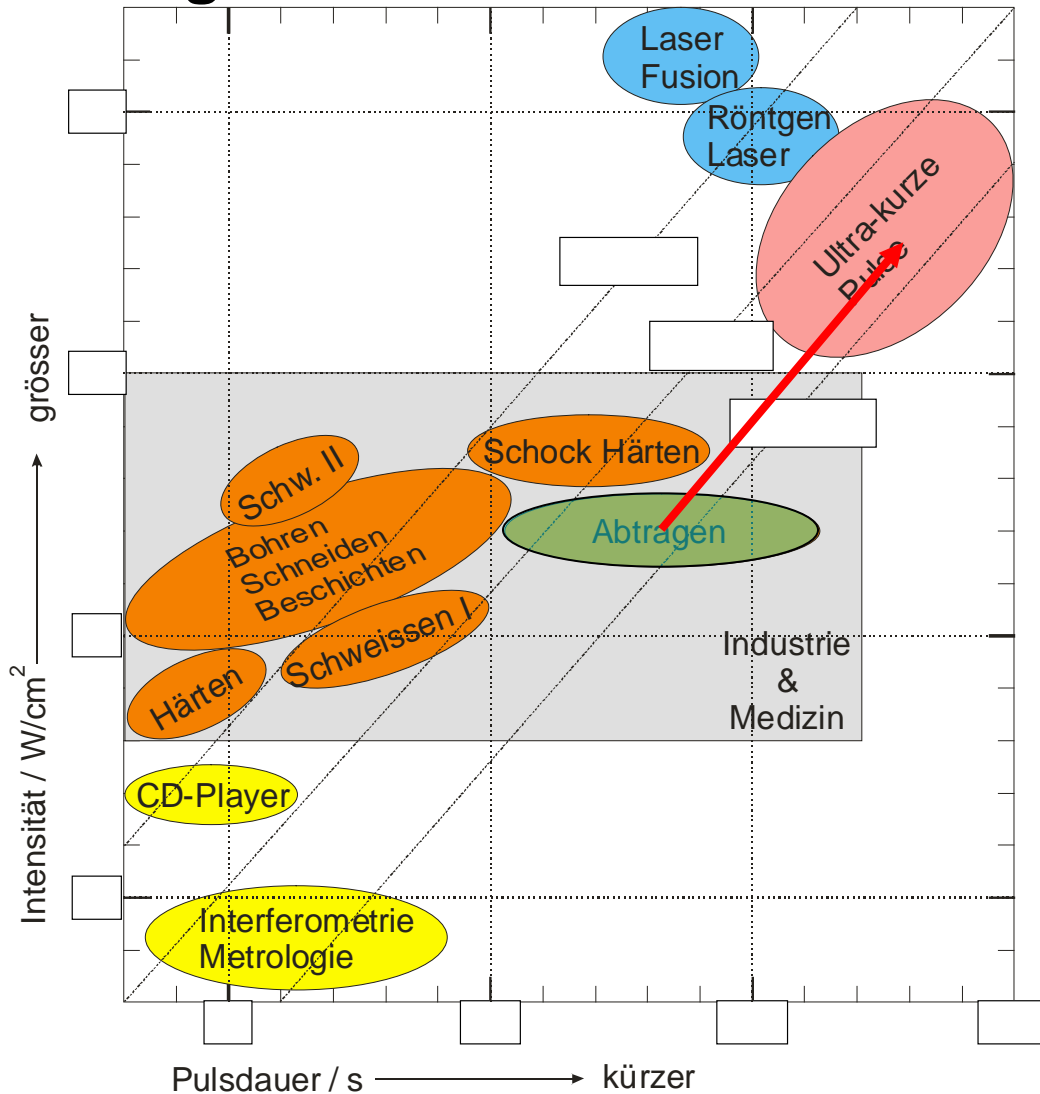
wet cutting



Pictures from University of Manchester

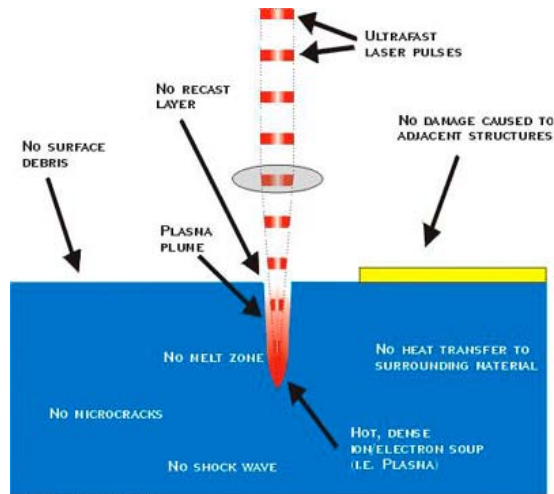
- Klein, kompakt und Effizient
- Sehr gute Strahlqualität
- Stabilität
- Einfaches Handling/ Preisgünstig

Abtragen

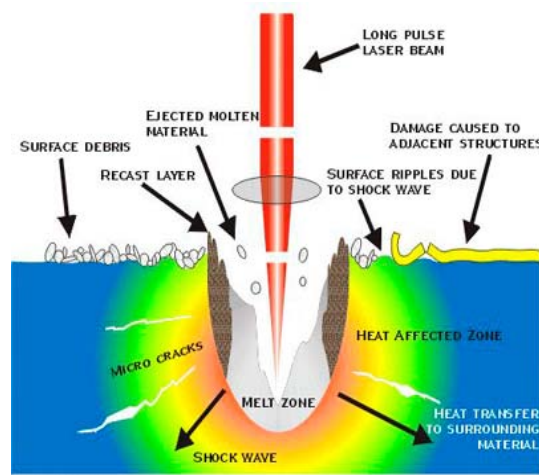


Das Abtragen mit Pulsen zwischen 10ns und 1 μ s wird industriell seit einiger Zeit eingesetzt.

Präzise Bearbeitung mit ultrakurzen Pulsen



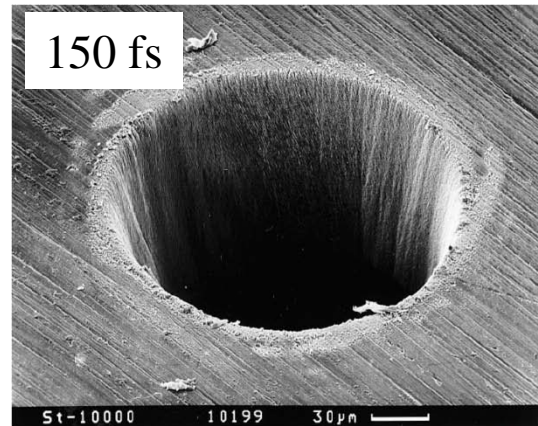
©1999 Clark-MXR, Inc.



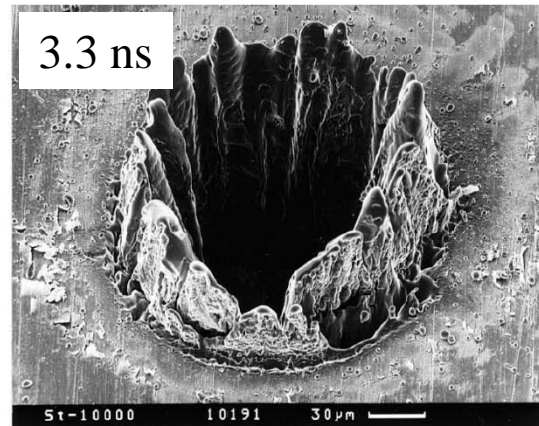
©1999 Clark-MXR, Inc.

Bei ultrakurzen Pulsen kann die eingebrachte Energie aufgrund der sehr kurzen Einwirkzeit kaum in die Umgebung abfließen.

Deshalb können Materialien sehr lokal mit einer verschwindend kleinen Wärmeeinflusszone bearbeitet werden.



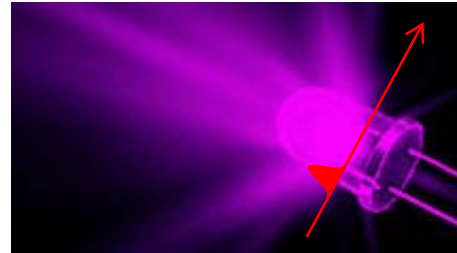
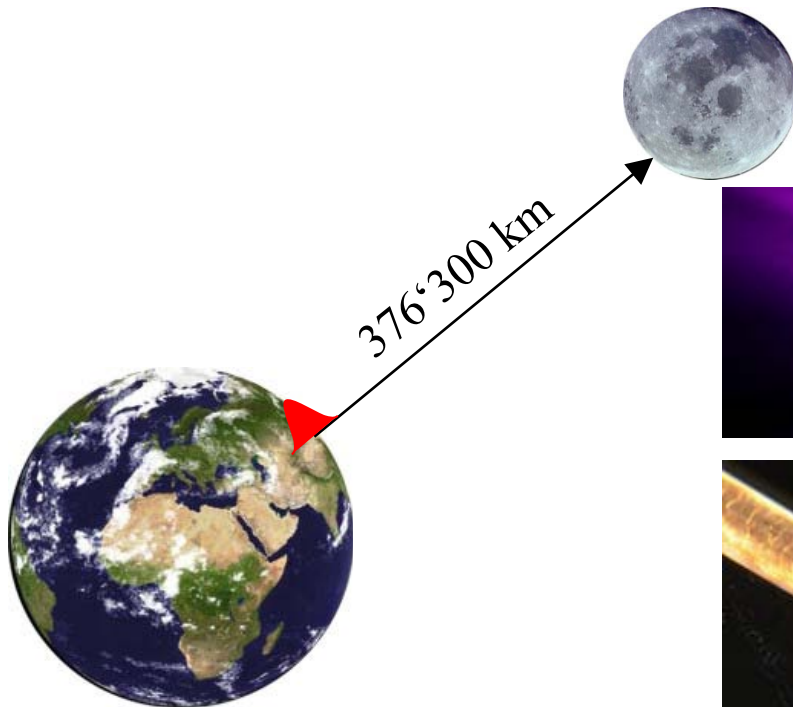
[Chichkov, 1996]



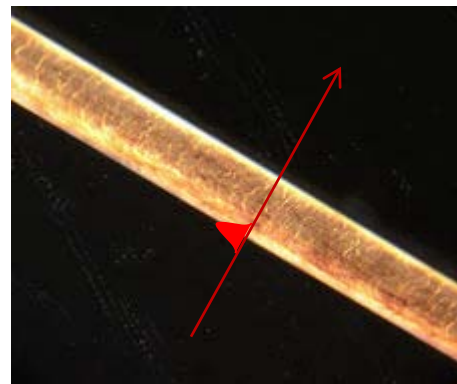
[Chichkov, 1996]

Was heisst ultrakurz?

Für die Distanz Erde – Mond braucht das Licht ca. 1.25 s



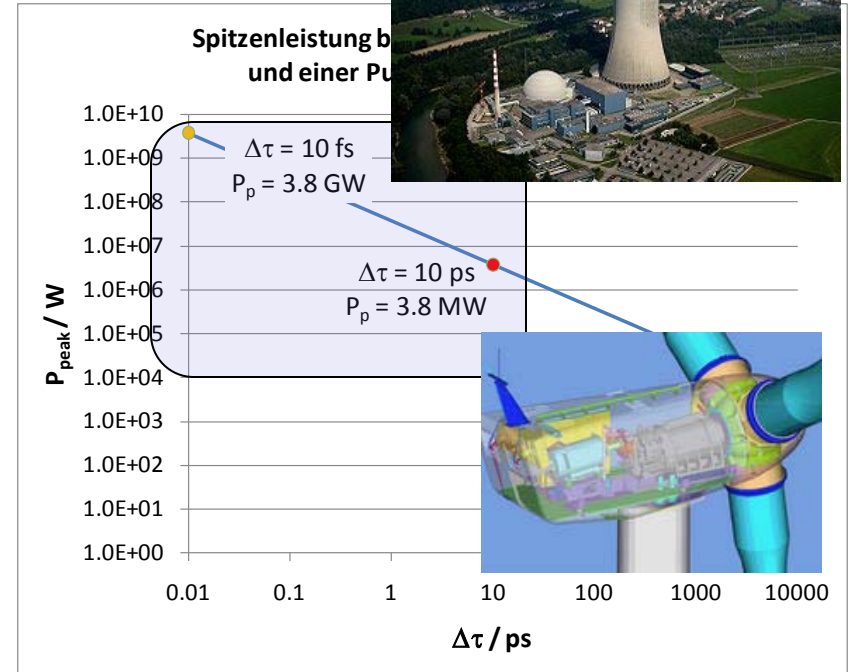
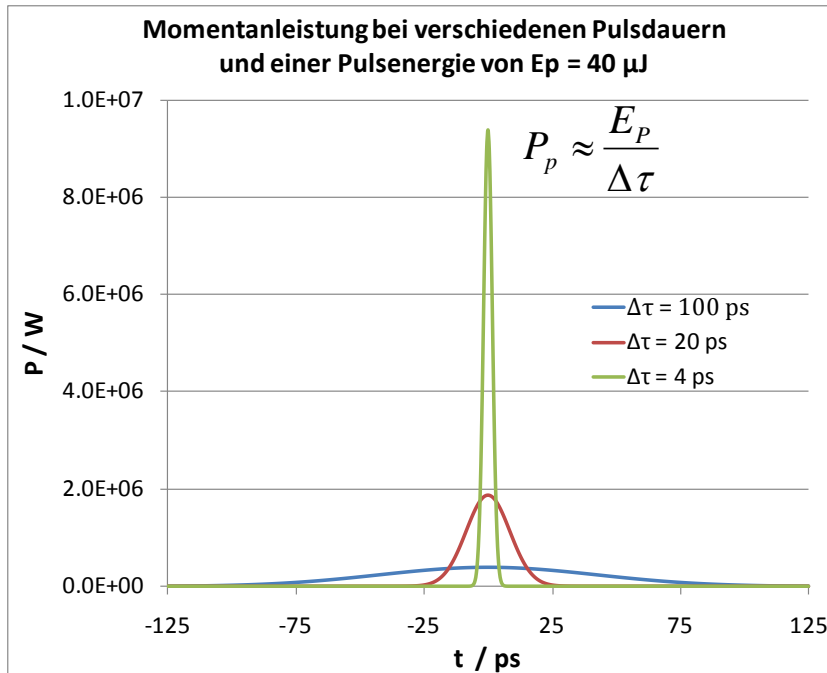
Durchmesser einer kleinen LED 3 mm:
Für 3 mm braucht das Licht 10 ps ($10 \cdot 10^{-12}$ s)



Menschenhaar, Dicke ca. 60 μ m:
Für 60 μ m braucht das Licht 200 fs ($200 \cdot 10^{-15}$ s)

Ultrakurze Pulse sind wirklich kurz!

Was heisst ultrakurz?

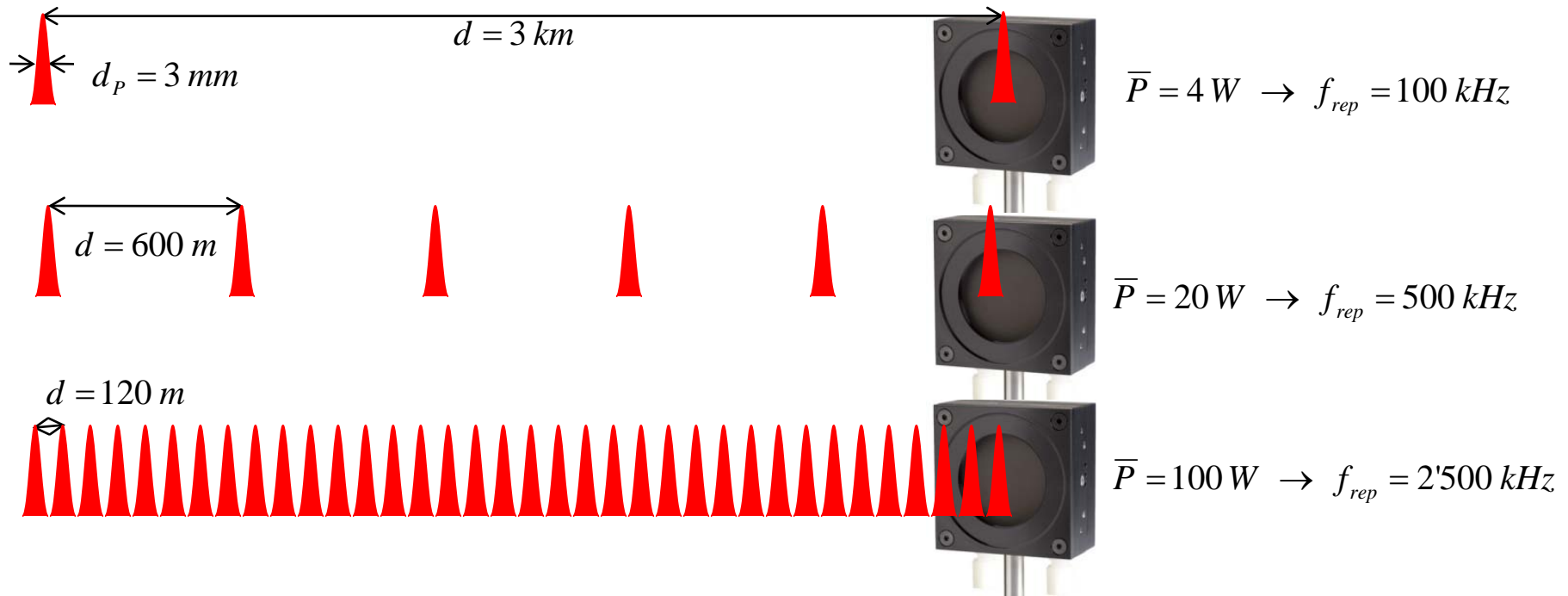


Mit ultrakurzen Pulsen können auch mit sehr geringen Pulsenergien immense Spitzenleistungen erzielt werden.

Was heisst ultrakurz?

Beispiele für mittlere Leistungen bei $\Delta\tau = 10 \text{ ps}$ Pulsen und einer Pulsenergie von $E_p = 40 \mu\text{J}$.

$$\bar{P} = f_{rep} \cdot E_p$$



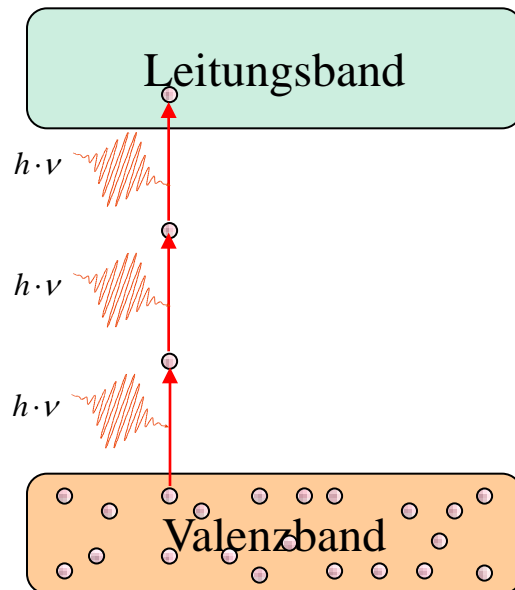
Isolatoren

Isolatoren sind für die Laserwellenlänge oft transparent.

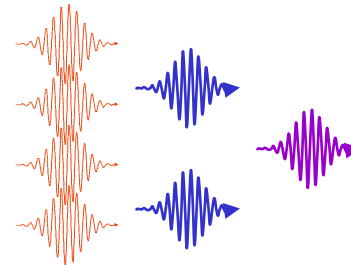
Für ns-Pulse werden Wellenlängen im UV (höhere Absorption) benötigt.

Bei ultrakurzen Pulsen ist die Spitzenintensität so hoch, dass nichtlineare Prozesse eintreten.

Mehrphotonenabsorption



Frequenzkonversion

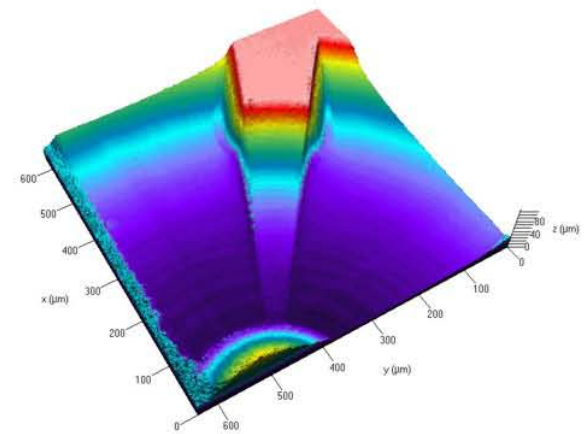
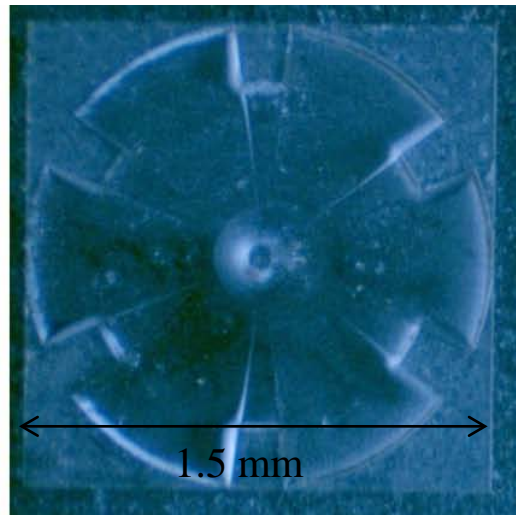
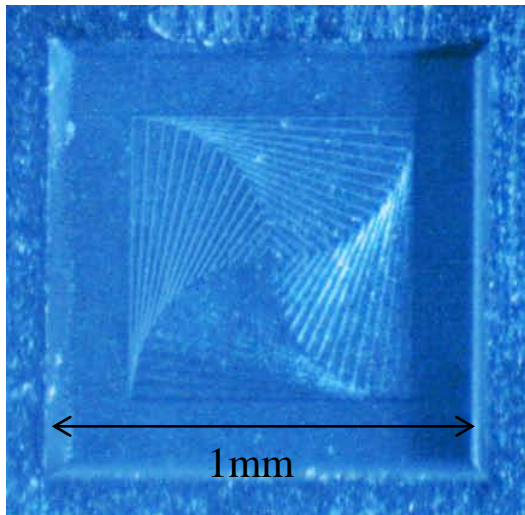


Für Isolatoren scheinen kürzere Pulse (-> fs) vorteilhaft zu sein.

Aber für viele Materialien reichen Pulse im ps-Bereich bereits aus.

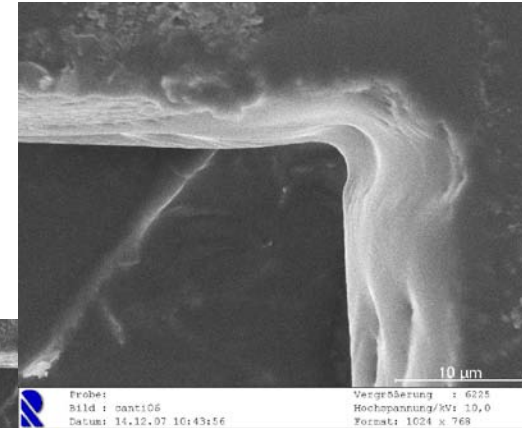
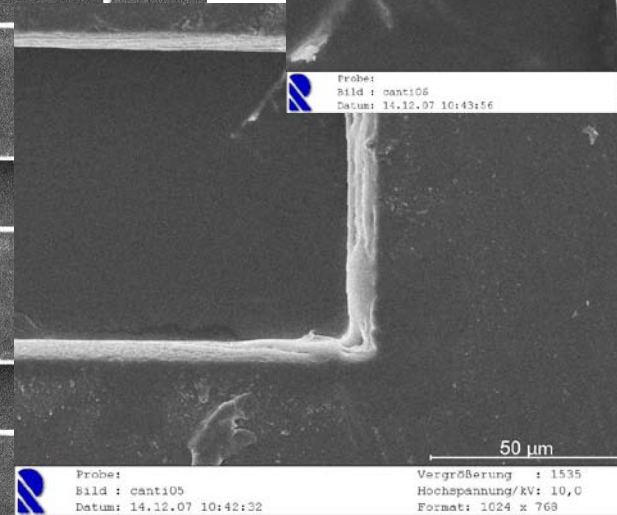
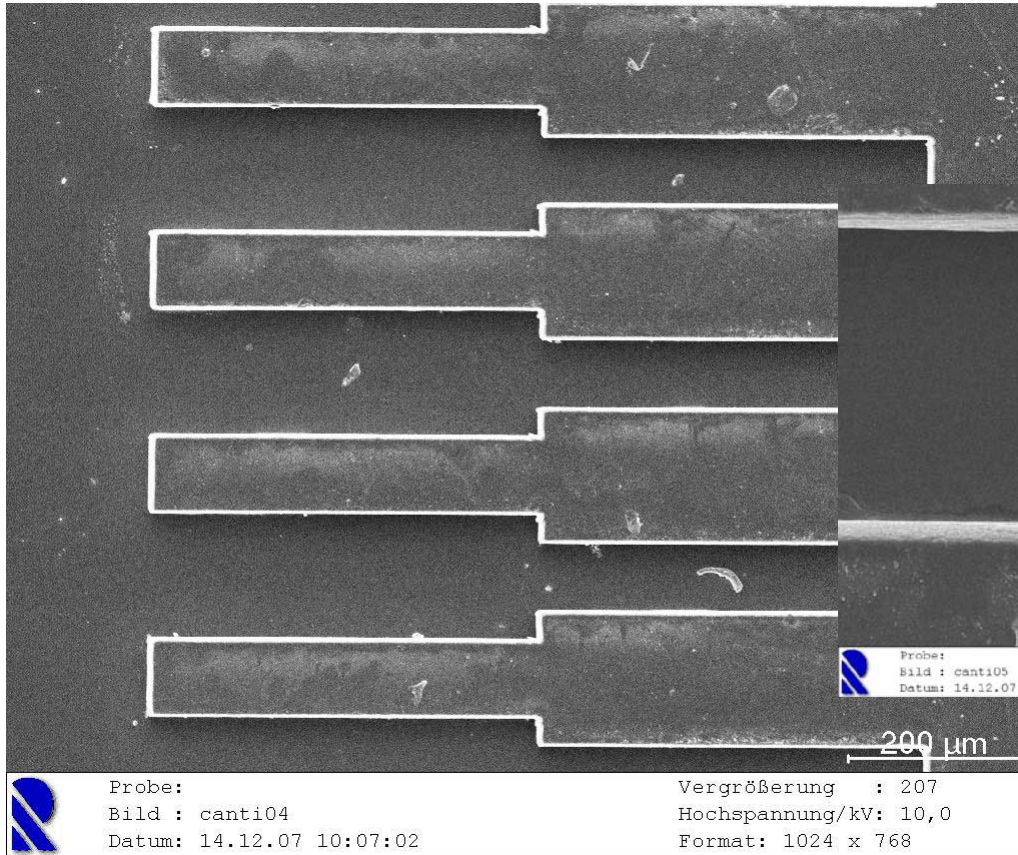
Beispiel: Bearbeitung von Saphir

$$\lambda = 355 \text{ nm}; \Delta\tau \sim 10 \text{ ps}, w_0 = 5 \text{ }\mu\text{m}$$

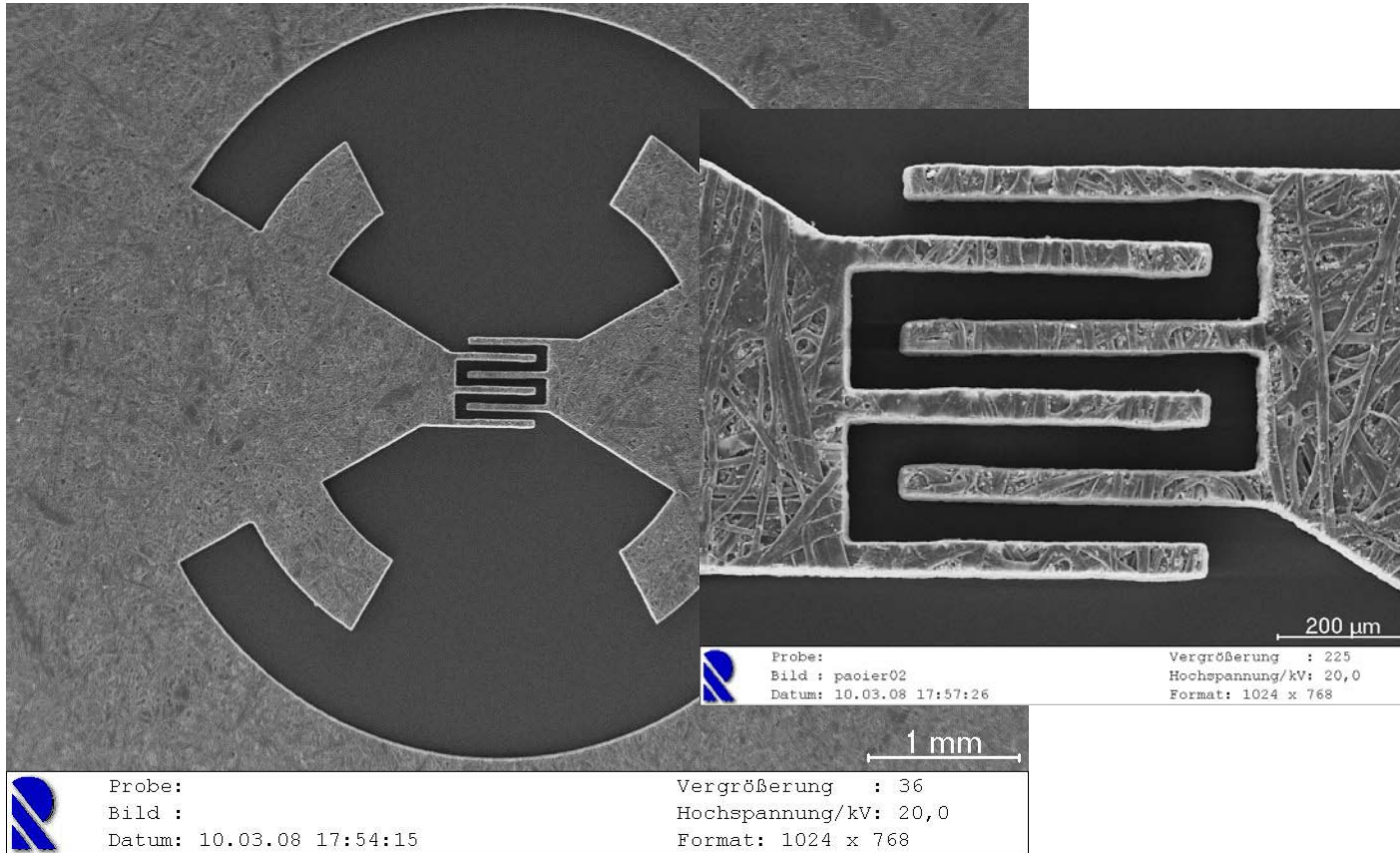


Fast beliebig geformte 3-d Strukturen können in transparenten Materialien realisiert werden.

Beispiel: Schneiden von Kunststoff

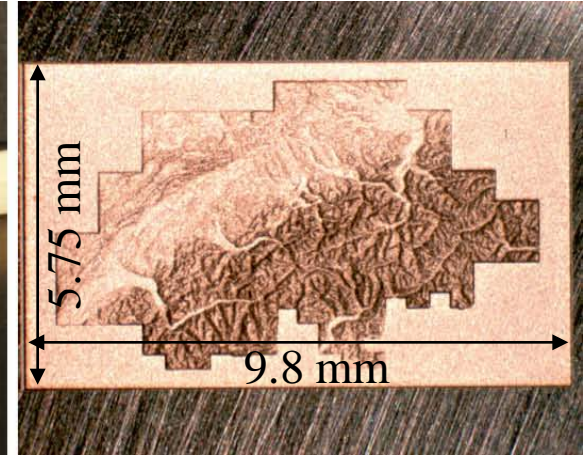
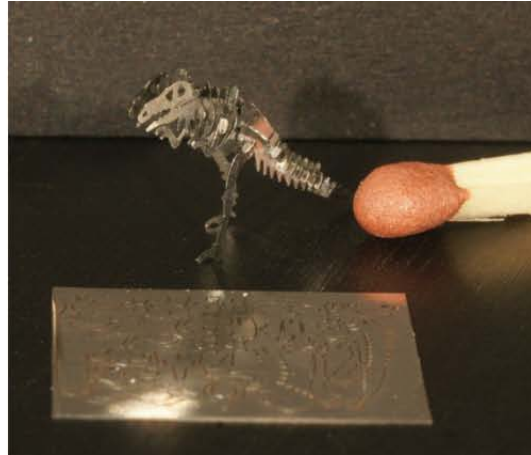
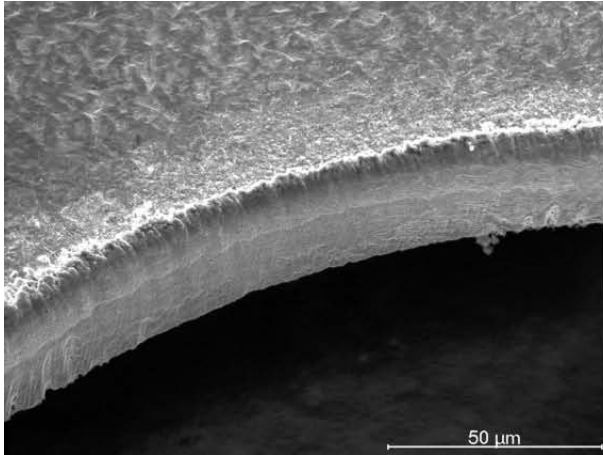


Beispiel: Schneiden von Papier

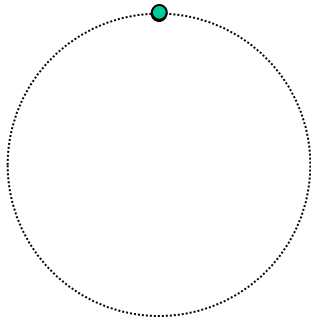


Strukturieren und Schneiden von Metallen

$$\lambda = 532 \text{ nm}; \Delta\tau \sim 10 \text{ ps}, w_0 = 7 \mu\text{m}$$

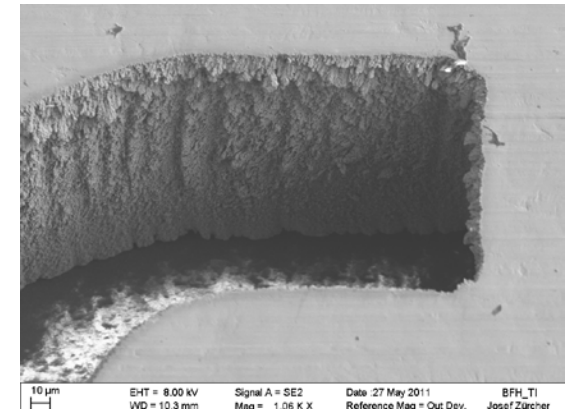


Laser Pulse mit $\Delta\tau \sim 10 \text{ ps}$ sind hervorragend geeignet für praktisch jede Art der Mikrobearbeitung von Metallen

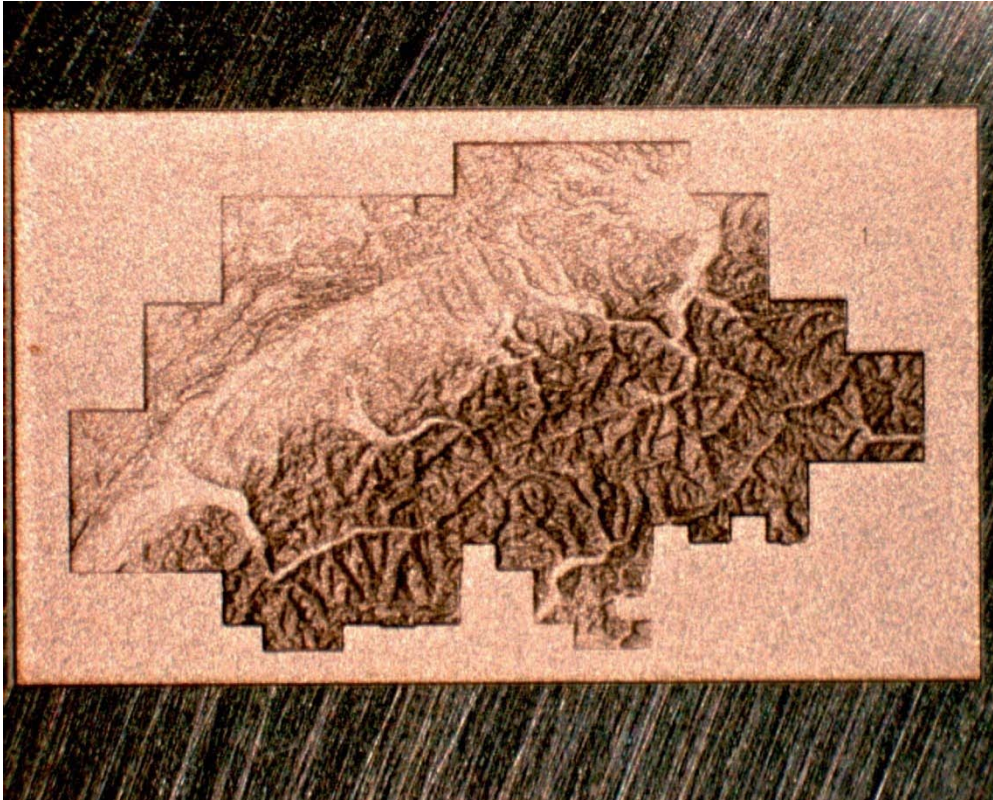


Beim Schneiden muss die Geometrie mehrmals abgefahren werden

Beim konventionellen Prozess leidet die Qualität der Schnittkante stark.



Prozesseffizienz



Neben der Qualität ist vor allem die Prozesseffizienz $\Delta V/\Delta t$ von Interesse.

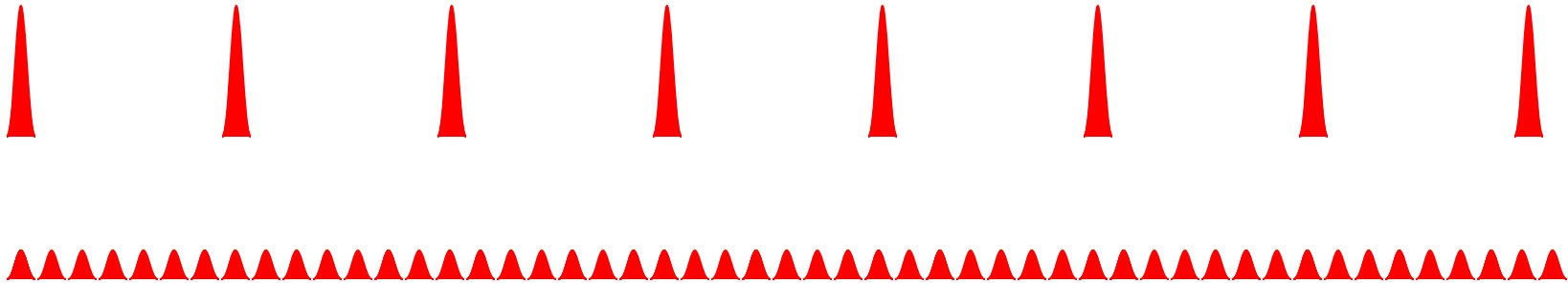
Die Prozesseffizienz ist vor allem auch eine Frage der mittleren Leistung P_{av} .

$$P_{av} = 4 \text{ W} \quad ; \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = 0.25 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

$$P_{av} = 40 \text{ W} \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta t} = 2.5 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \quad ?$$

Steigern der mittleren Leistung

$$P_{av} = f_{rep} \cdot E_P$$



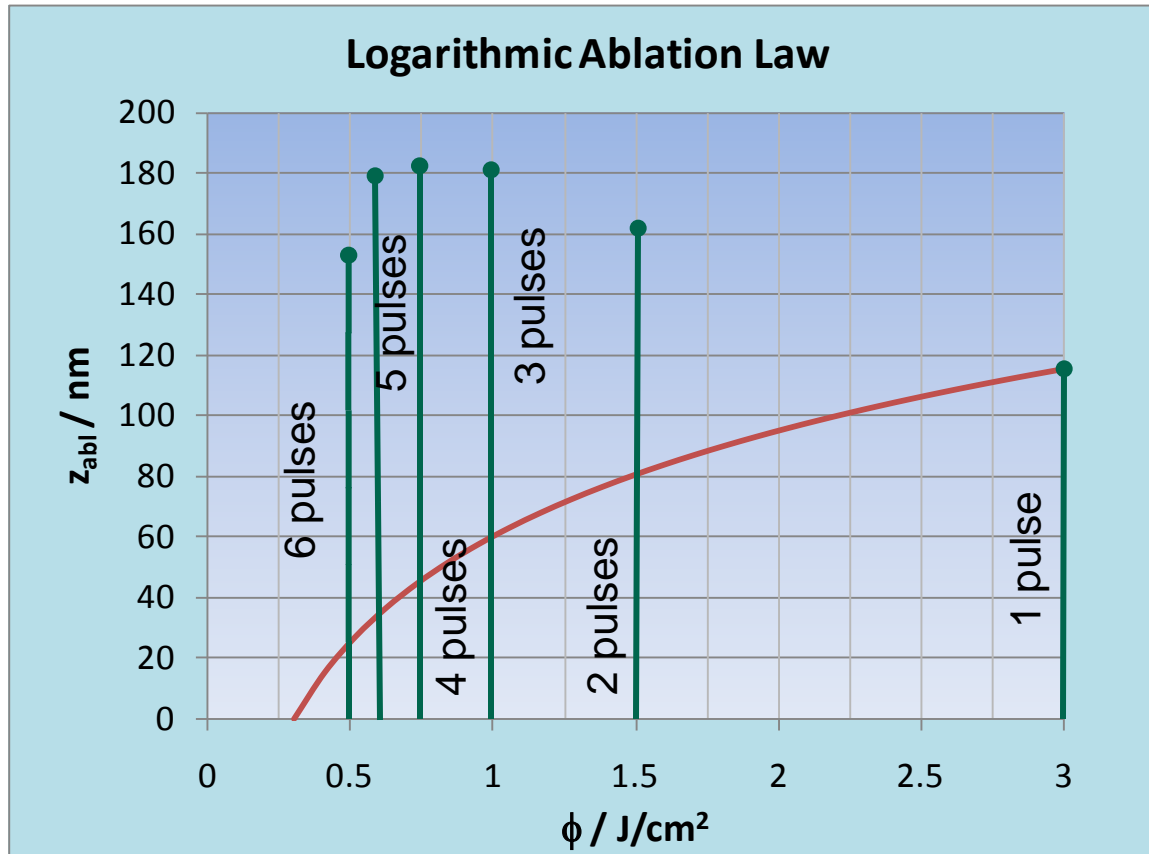
Wir können die Pulsenergie E_P oder die Repetitionsrate f_{rep} (Anzahl Pulse pro Zeit) erhöhen.

Was ist der Unterschied?

Hammer und Nagel



Verteilung der Energie auf mehrere Pulse

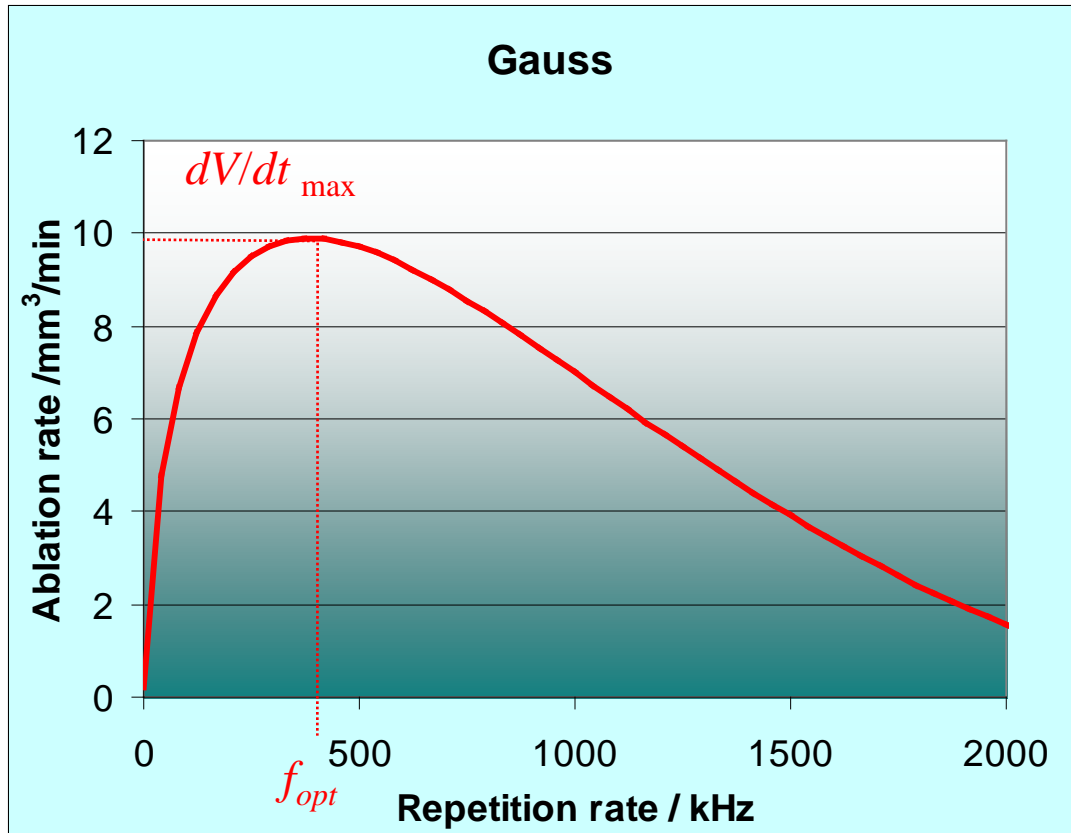


$$z_{abl} = \delta \cdot \ln\left(\frac{\phi}{\phi_{th}}\right)$$

Wir verteilen dieselbe Energie auf mehrere Pulse kleinerer Fluenz. Dabei nehmen wir an, dass der vorangegangene Pulse die Eigenschaften der Oberfläche für den nachfolgenden Puls nicht verändert.

Für eine vorgegebene Energie existiert eine optimale Anzahl Pulse bei der am meisten Material abgetragen wird.

Abtragate bei konstanter mittlerer Leistung



$$P_{av} = 10 \text{ W}, \quad w_0 = 15 \text{ } \mu\text{m}$$

Maximale Abtragate bei optimaler Repetitionsrate.

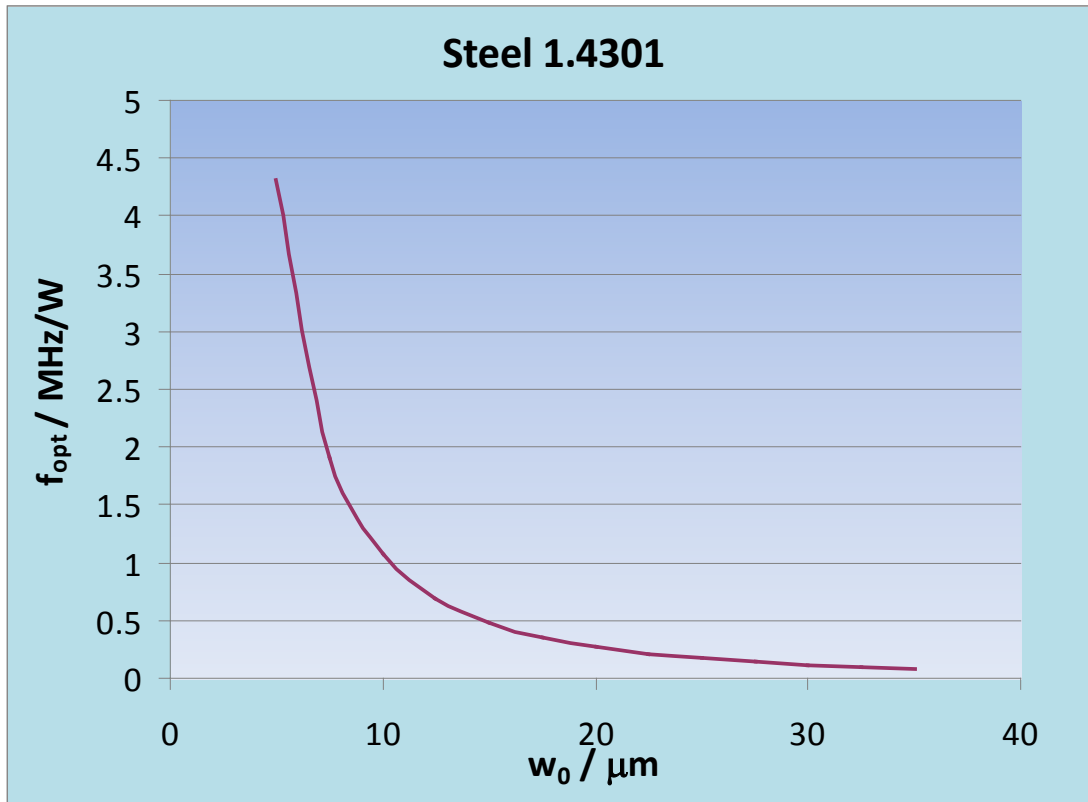
$$\frac{\dot{V}_{\max}}{P_{av}} = \frac{2}{e^2} \cdot \frac{\delta}{\phi_{th}}$$

$$\begin{aligned} \frac{f_{opt}}{P_{av}} &= \frac{2}{e^2} \cdot \frac{1}{\pi \cdot w_0^2} \cdot \frac{1}{\phi_{th}} \\ &= \frac{2}{e^2} \cdot \frac{1}{E_{P,th}} \end{aligned}$$

Die Maximale Abtragate skaliert linear mit der mittleren Leistung.

Die optimale Repetitionsrate skaliert bei festem Spotradius auch linear mit der mittleren Leistung.

Optimale Repetitionsrate für Stahl 1.4301



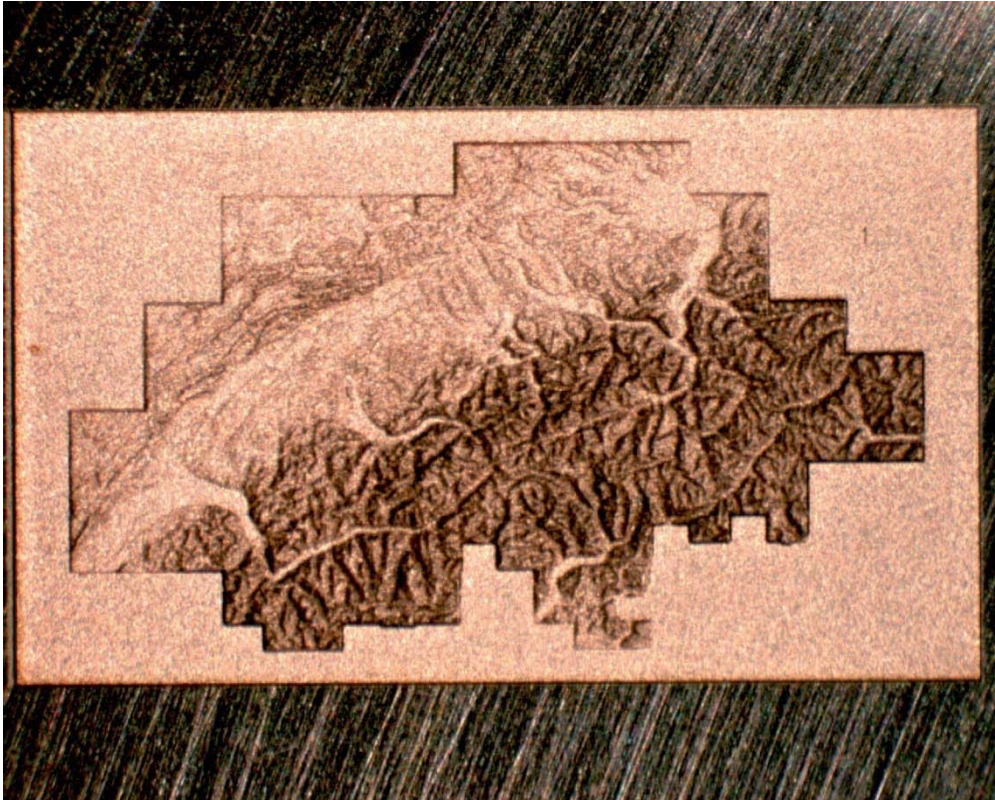
$$\phi_{th} = 0.08 \text{ J/cm}^2, \quad \delta = 6 \text{ nm}$$

$$\frac{\dot{V}_{\text{max}}}{P_{\text{av}}} = \frac{2}{e^2} \cdot \frac{\delta}{\phi_{th}} = 0.12 \frac{\text{mm}^3}{\text{min} \cdot \text{W}}$$

$$\frac{f_{\text{opt}}}{P_{\text{av}}} = \frac{2}{e^2} \cdot \frac{1}{\pi \cdot w_0^2} \cdot \frac{1}{\phi_{th}}$$

Die optimale Repetitionsrate kann bei mittleren Leistungen von einigen Watt rasch in den Bereich einiger MHz gehen.

Prozesseffizienz



Neben der Qualität ist vor allem die Prozesseffizienz $\Delta V/\Delta t$ von Interesse.

Die Prozesseffizienz ist vor allem auch eine Frage der mittleren Leistung P_{av} .

$$P_{av} = 4 \text{ W} \quad ; \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = 0.25 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

$$P_{av} = 40 \text{ W} \Rightarrow \frac{\Delta V}{\Delta t} = 2.5 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \quad ?$$

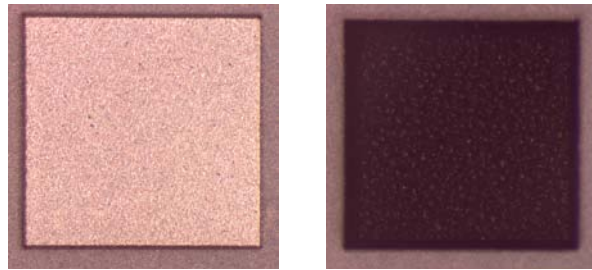
Die Prozesseffizienz skaliert linear mit der mittleren Leistung, aber nur wenn die Repetitionsrate optimal gewählt wird.

Begrenzende und limitierende Faktoren

Aufheizen der Oberfläche:

Auch im Fall ultrakurzer Pulse wird ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt. Für hohe mittlere Leistungen führt dies zu Aufschmelzen und Oxidieren der Oberfläche.

-> Die Energie der Laserstrahlung muss auf einem genügend grossen Gebiet eingebracht werden, d.h. der Strahl muss über die Oberfläche bewegt werden.

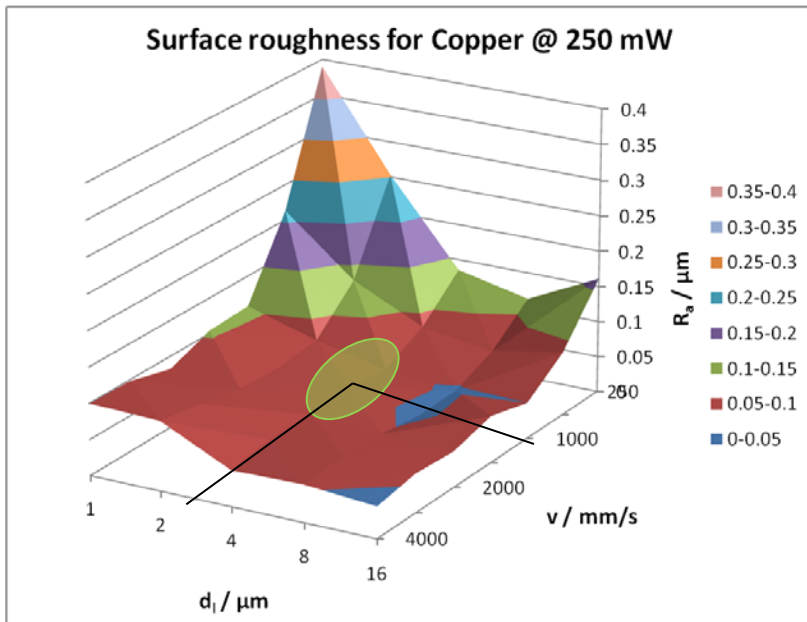


Um eventuelles „Particle shielding“ zu vermeiden, sollte der nachfolgende Puls genügend weit entfernt auftreten.

Ab Repetitionsraten von ungefähr 1 MHz sollte der Strahl zwischen zwei Pulsen um einen Fokusbereich bewegt werden.

Begrenzende und limitierende Faktoren

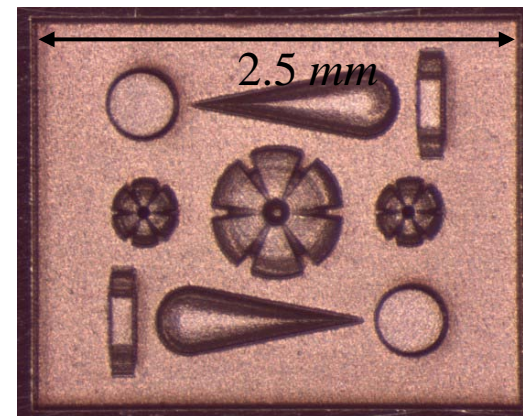
Mittlere Oberflächenrauheit:



$$w_0 = 7 \mu m, \quad f = 250 \text{ kHz}$$

$$v_{opt} \geq w_0 \cdot f_{rep} \quad d_L \approx w_0 / 2$$

Gute Rauheiten werden mit einem Pulsabstand ab einem Fokusradius und einem Schraffurabstand von einem halben Fokusradius erreicht.

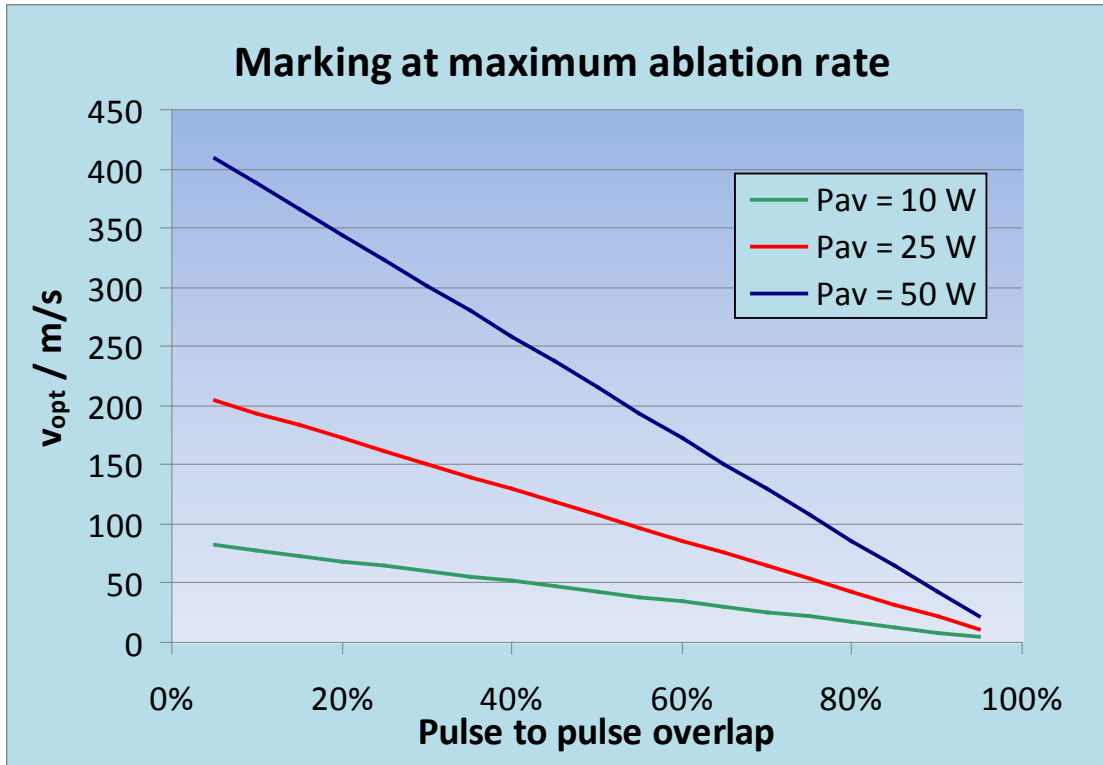


Ein Puls zu Puls Abstand von einem Strahldurchmesser ist auch hier vorteilhaft.

Beispiel: Einzelne Linien 50µm Breite in Stahl 1.4301

Parameter: $\phi_{th} = 0.08 \text{ J/cm}^2$, $\delta = 6 \text{ nm}$

Spot radius: $w_0 = 25 \text{ }\mu\text{m}$



$$\frac{\dot{V}_{max}}{P_{av}} = 0.12 \frac{mm^3}{min \cdot W}$$

$$f_{opt} = 1.7 \text{ MHz @ } 10W$$

$$f_{opt} = 4.3 \text{ MHz @ } 25W \quad (\checkmark)$$

$$f_{opt} = 8.6 \text{ MHz @ } 50W$$

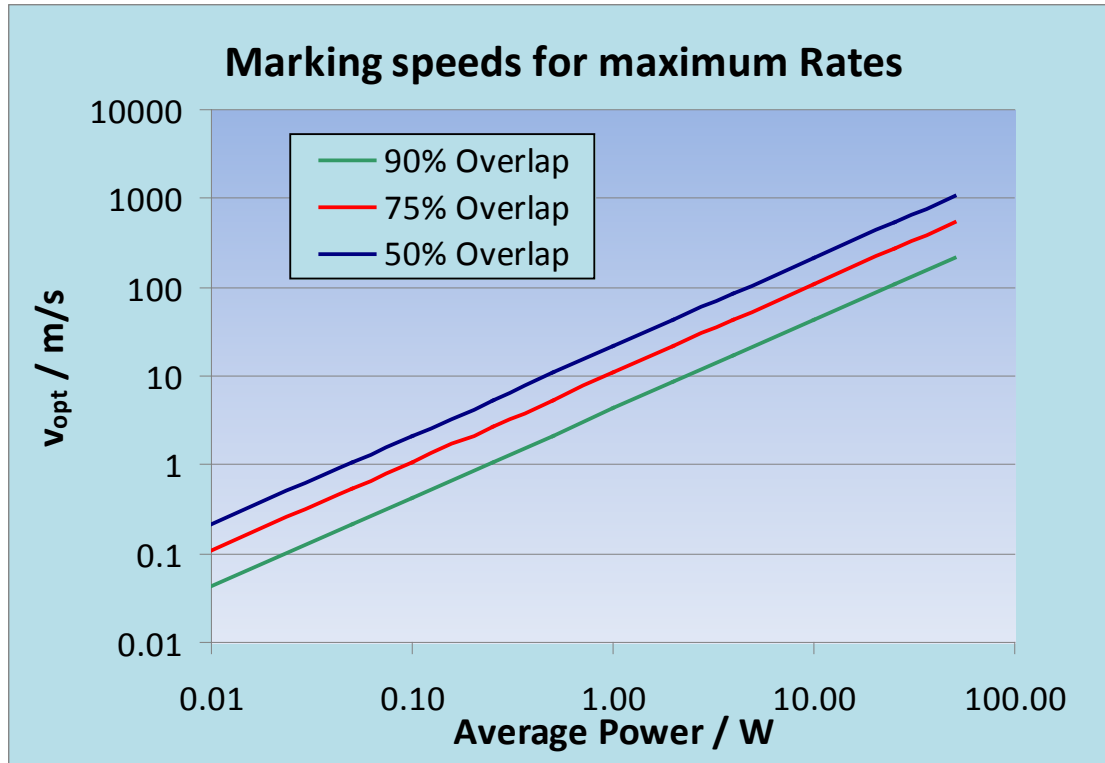
Benötigt werden markiergeschwindigkeiten von einigen 10 m/s bis zur Schallgeschwindigkeit.



Beispiel: Oberflächenstrukturierung von Stahl 1.4301

Parameter: $\phi_{th} = 0.08 \text{ J/cm}^2$, $\delta = 6 \text{ nm}$

Spot radius: $w_0 = 5 \mu\text{m}$



$$\frac{\dot{V}_{\max}}{P_{av}} = 0.12 \frac{\text{mm}^3}{\text{min} \cdot \text{W}}$$

Ein Spotradius von $5 \mu\text{m}$ benötigt typischerweise eine $f = 50 \text{ mm}$ Optik.

Die Markiergeschwindigkeit von 1 m/s kann nur bis ca. 100 mW erreicht werden.

Für 10 W und mehr mittlere Leistung übersteigen die Geschwindigkeiten 10 m/s .

Im Moment existieren keine Strahlführungssysteme die diese Geschwindigkeiten bei der nötigen Auflösung ermöglichen, d.h. das Arbeiten am optimalen Punkt ist ab einigen Watt mittlerer Leistung nicht mehr möglich.

Zusammenfassung

Neue Laserquellen eröffnen neue Möglichkeiten bestehende Prozesse effizienter und billiger zu gestalten oder qualitative bessere Resultate zu erzielen.

Mit ultrakurzen Pulsen können trotz moderaten mittleren Leistungen sehr hohe Spitzenleistungen erzielt werden. Deshalb eignen sie sich hervorragend zur Bearbeitung von Metallen, Halbleitern und Isolatoren.

Bestehende Prozesse müssen angepasst werden, z.B. Schneiden.

Insbesondere bei Metallen skaliert die Abtragleistung mit der mittleren Leistung, wenn die optimale Repetitionsrate gewählt wird. Diese Repetitionsraten gehen sehr schnell in den Bereich einiger MHz.

Ein Puls zu Puls Abstand von einem Spotradius und mehr ist von Vorteil. Das führt zu Markiergeschwindigkeiten die die Möglichkeiten heutiger Strahlführungssysteme für die Oberflächenstrukturierung bei weitem überschreiten.

Fazit

Der grosse „Flaschenhals“ zur möglichst effizienten Nutzung ultrakurz gepulster Hochleistungssysteme sind im Moment nicht die Lasersysteme selbst, sondern die Strahlführung.



Damit das Mögliche entsteht,
muss immer wieder das Unmögliche
versucht werden

Hermann Hesse