



## **Bearbeiten von transparenten Materialien mit ps-Laserpulsen**

Team Laser Surface Engineering:

Dr. Guido Bucher, Dipl. Ing. Christian Nussbaum, Dipl. Ing. Benjamin Joss, Dipl. Ing. Martin Muralt  
Dipl. Ing. Michael Affolter, Joseph Zürcher, Peter Schütz, Urs Hunziker

- Markieren
- Strukturieren
- Bohren von Lithium Niobat
- Beschichten

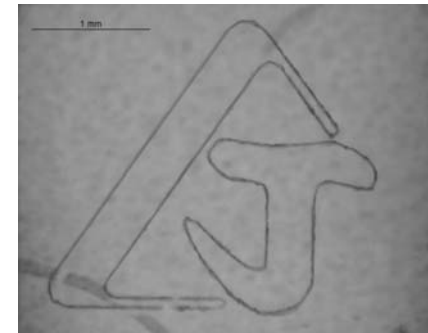
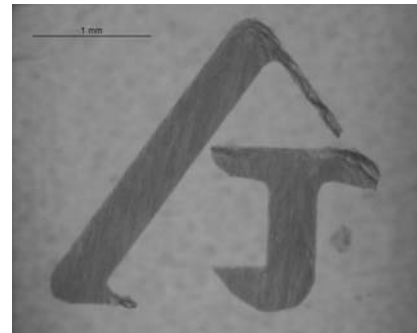


## Innenmarkieren von Saphir

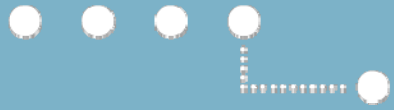
Uhrenglas aus Saphir:



Mit 355 nm Wellenlänge lässt sich sehr gut eine Innengravur von Saphir erzielen.



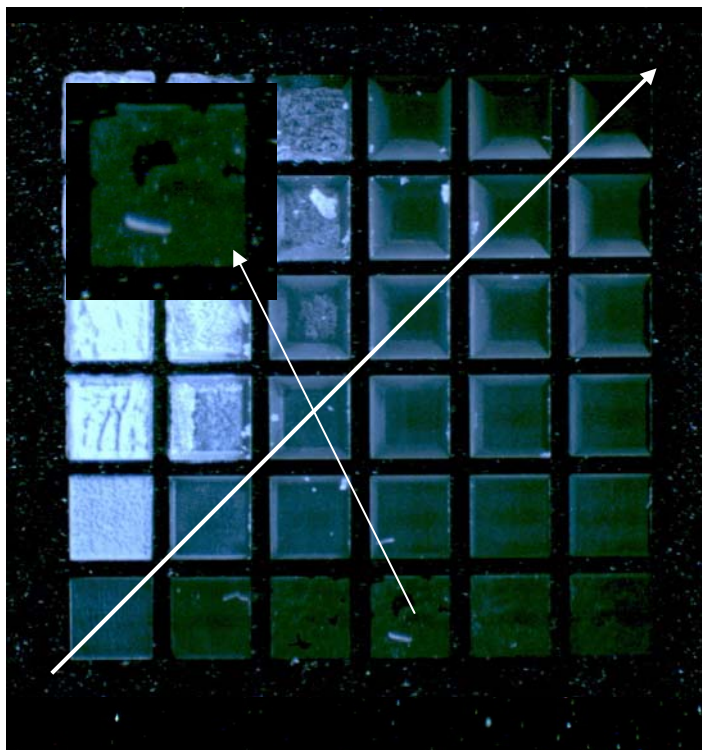
Übung macht den Meister.



## Strukturieren

### Strategien:

Mehrmaliges, kreuzweises abfahren einer Ebene mit unterschiedlichen Pulsenergien und Vorschubgeschwindigkeiten.



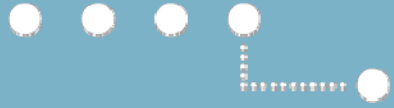
Grosse Auswürfe bei hohen Pulsenergien und kleinen Vorschubgeschwindigkeiten.

-> Reinigen

Geeignete Kombinationen bezüglich Geschwindigkeit und Oberflächenqualität.

Hohe Geschwindigkeiten bei tieferen Pulsenergien führen zu einem unvollständigen Abtrag.

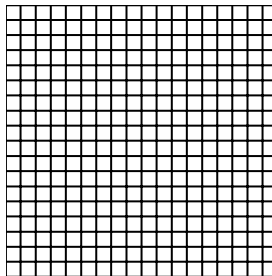
Ev. kein reiner Verdampfungsprozess, sondern mechanischen „abplatzen“.

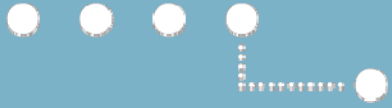


## Strukturieren

### Strategien:

Die Oberflächenqualität kann gesteigert werden, wenn das Kreuzmuster von Ebene zu Ebene langsam gedreht wird.

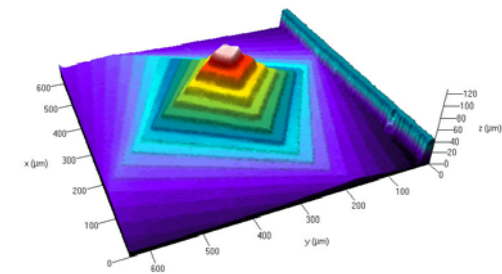
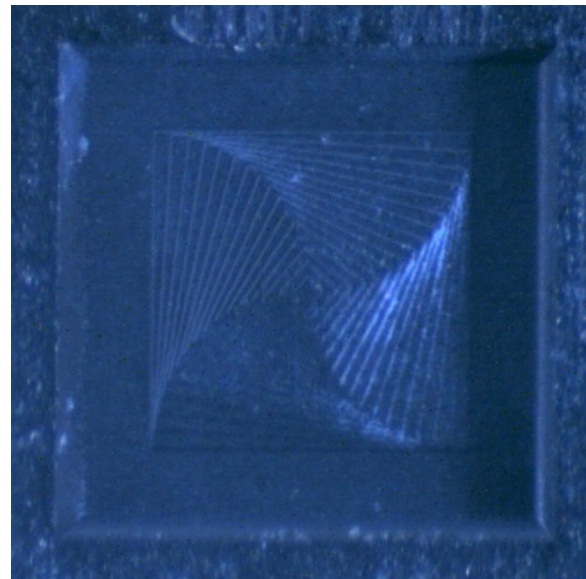
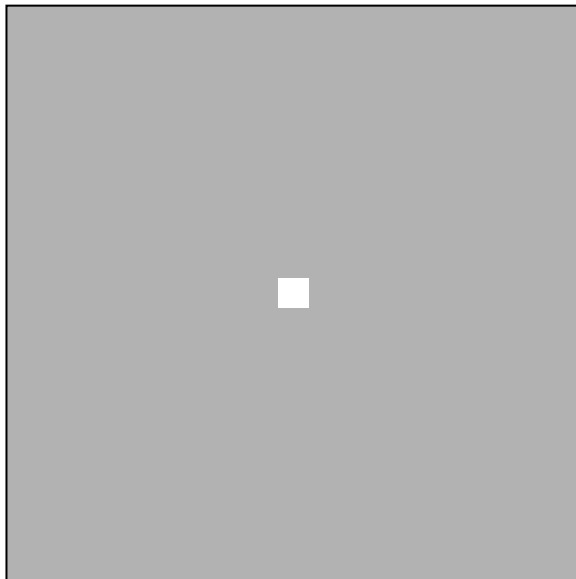




## Strukturieren

Strategien:

Die gewünschte Struktur wird in mehrere Ebenen zerlegt, die einzeln abgefahren werden.

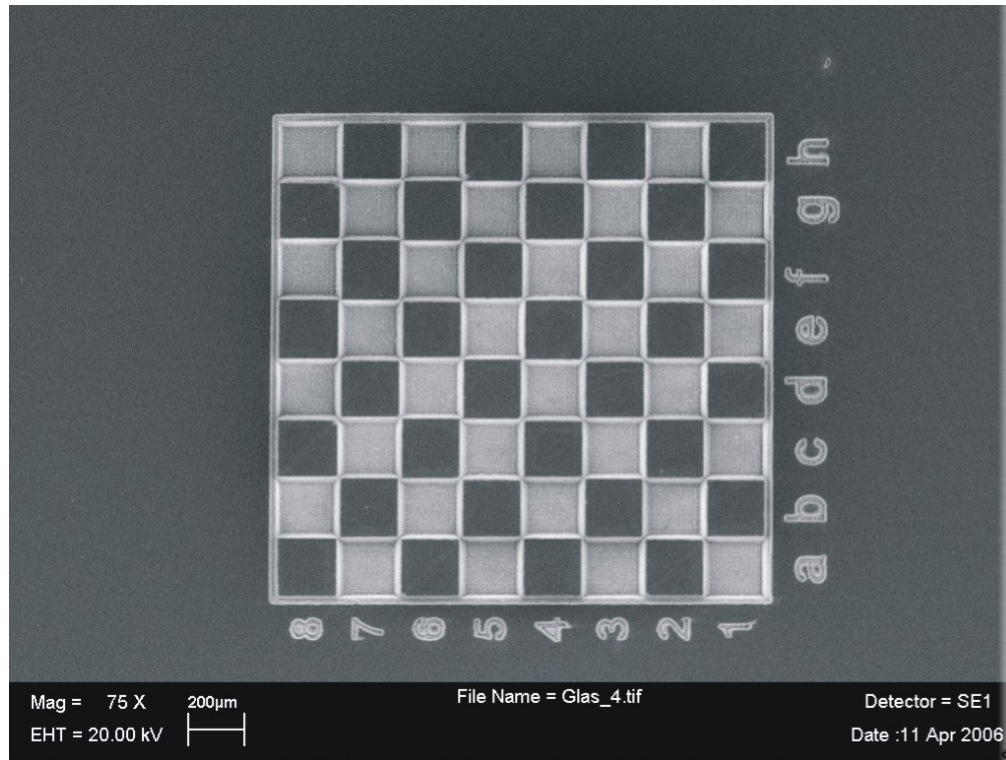


Verdrillte Pyramide in Saphir.

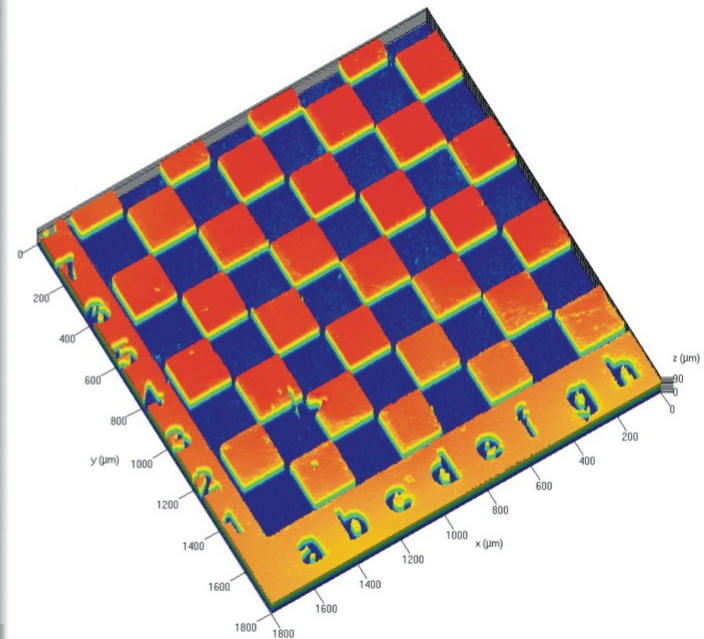


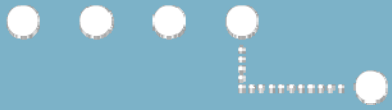
# Strukturieren

Einige Beispiele:



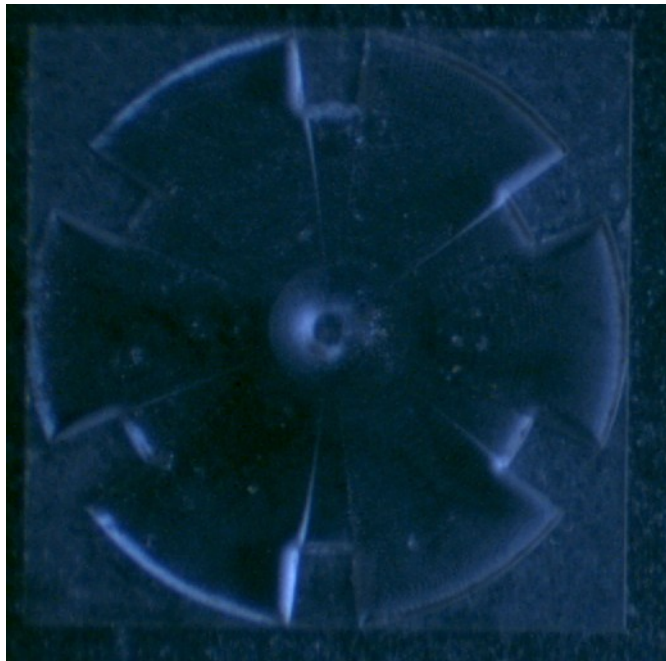
Schachbrett in Glas



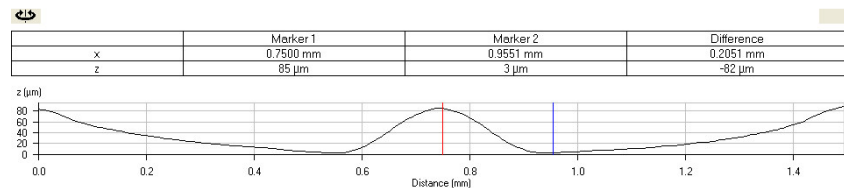
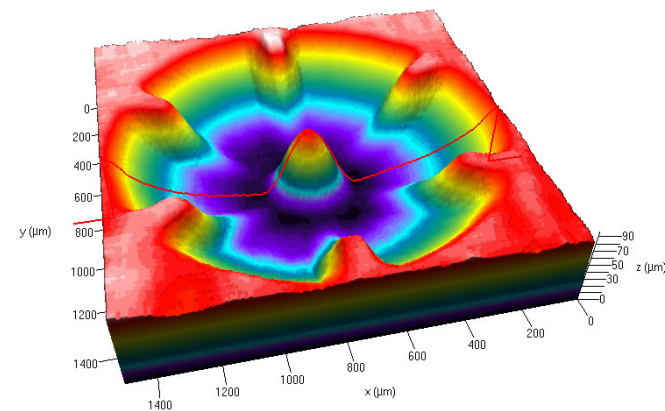


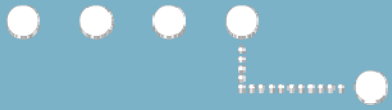
# Strukturieren

Einige Beispiele:



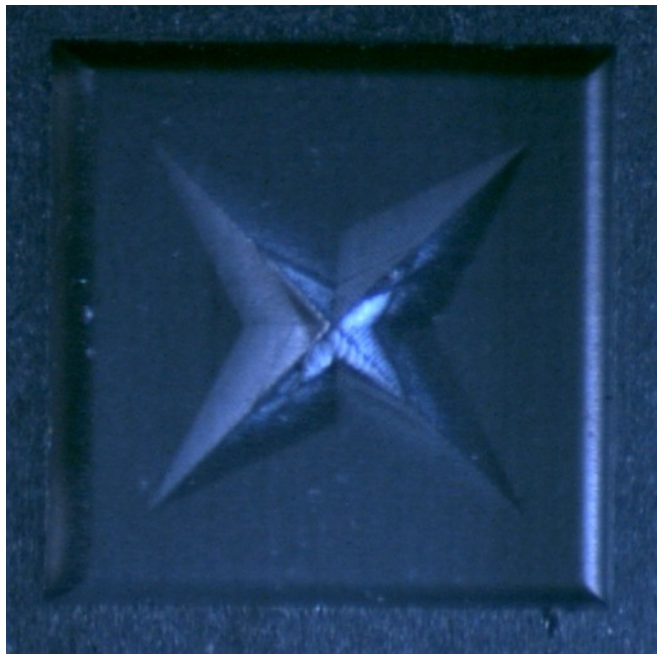
3d Struktur in Saphir



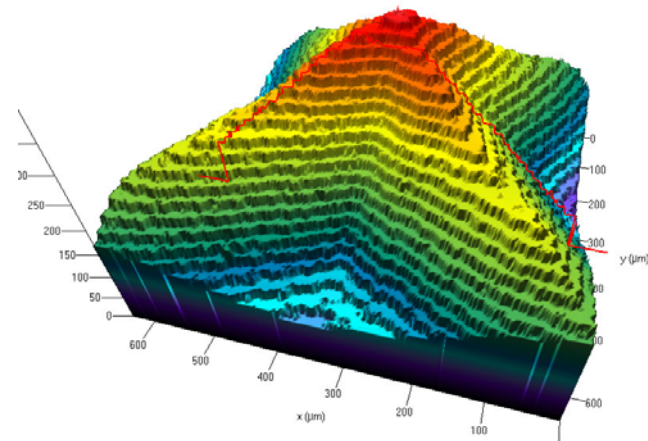


# Strukturieren

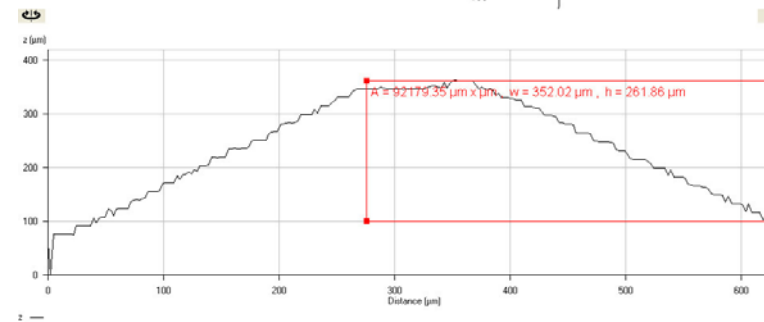
Einige Beispiele:



Pyramide in Saphir

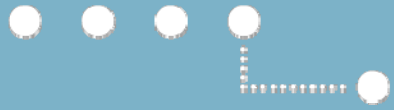


31



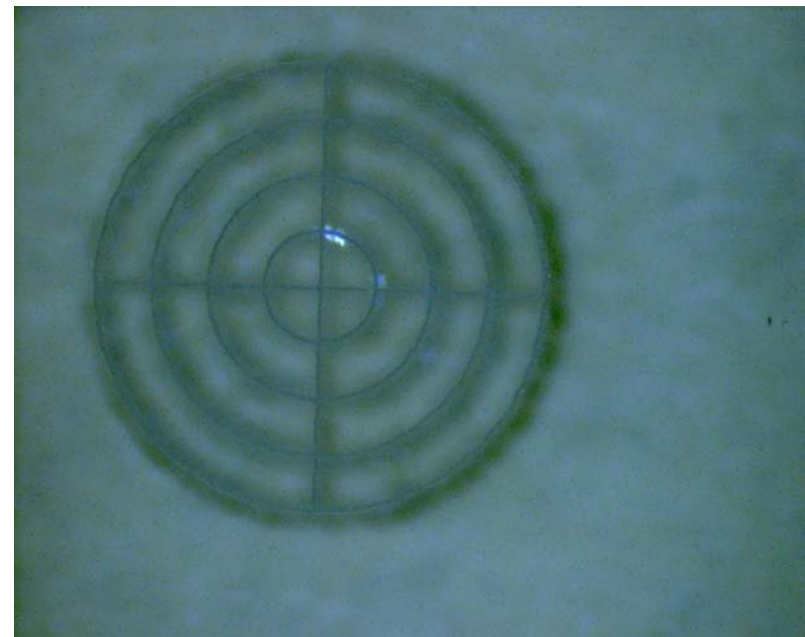
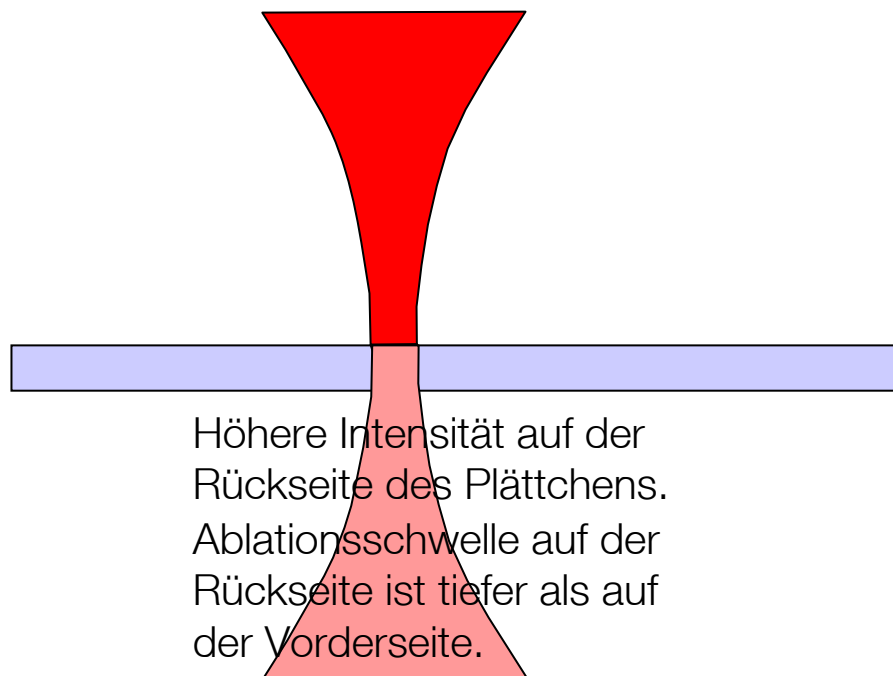
z



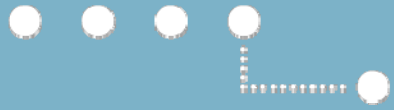


## Strukturieren

Selbstfokussierung durch Kerr-Effekt:

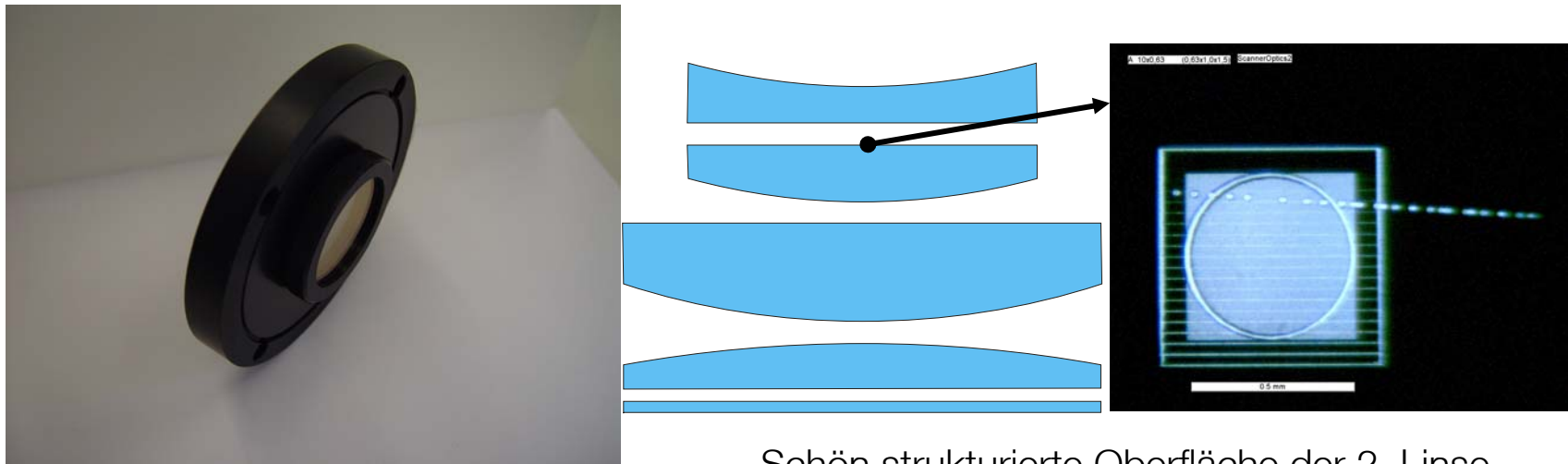


Möglichkeit zum Generieren desselben Musters auf der Rückseite und auf der Vorderseite.



## Strukturieren

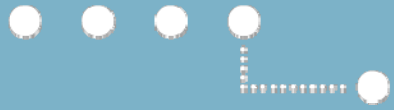
Schaden an einem telezentrischen Objektiv für 355 nm:



Schön strukturierte Oberfläche der 2. Linse.

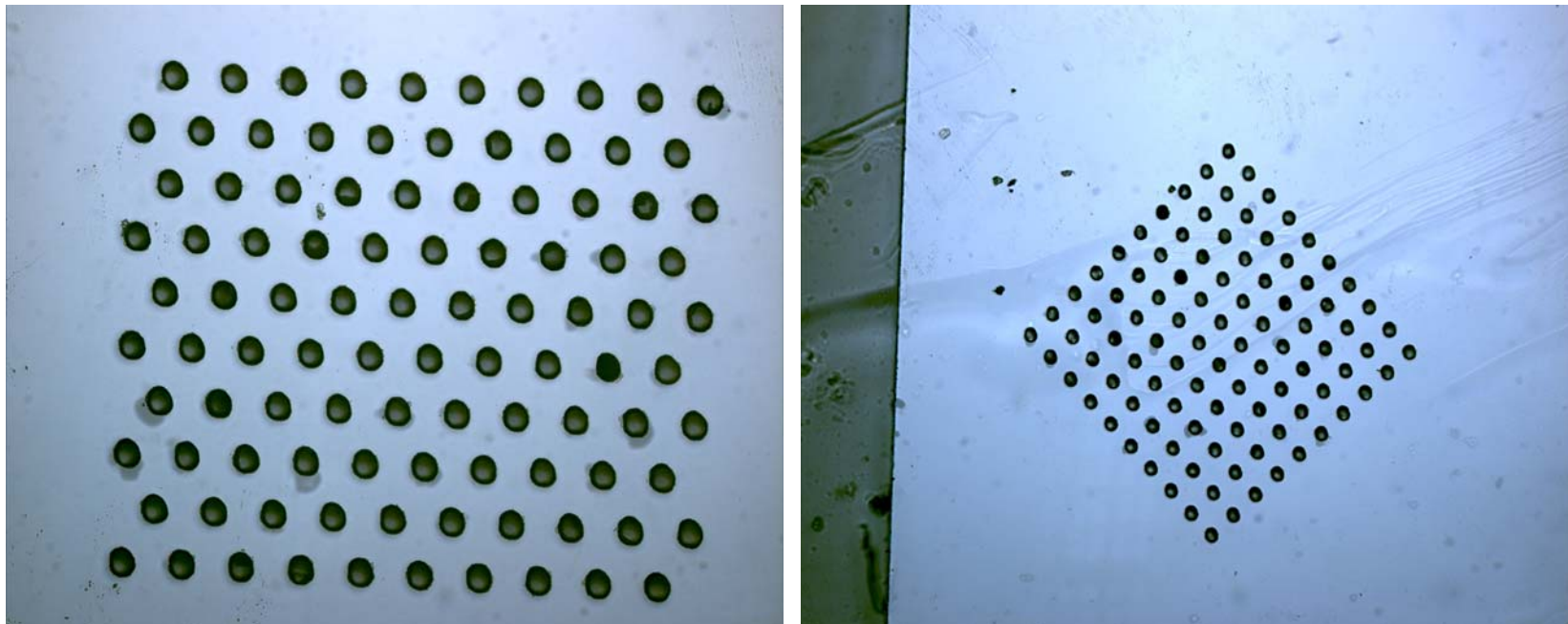
Wahrscheinlich Rückreflexe von einer Oberfläche die nicht exakt in der Fokusebene lag.

Wir sehen, mit ps-Pulsen lassen sich sehr gut transparente Materialien strukturieren, manchmal auch an unerwünschten Orten.

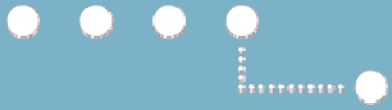


## Bohren von Lithium Niobat

Ziel: Herstellung photonischer Kristalle für THz Wellen

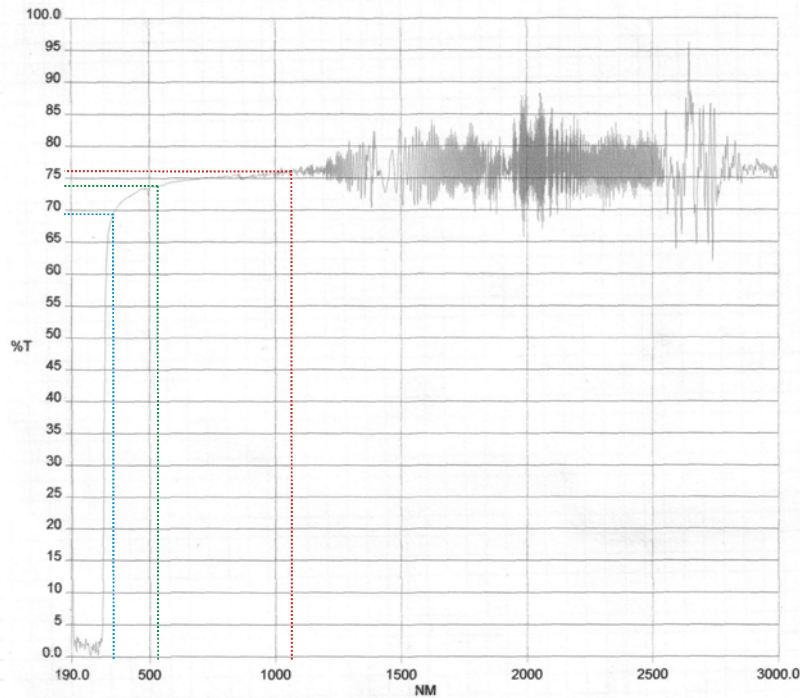


Gefordert: Speziell Anordnung zylindrischer Bohrungen mit einem Durchmesser von ca.  $50\ \mu\text{m}$  in Lithium Niobat-Plättchen von  $100\ \mu\text{m}$ ,  $200\ \mu\text{m}$  und  $500\ \mu\text{m}$  Dicke.

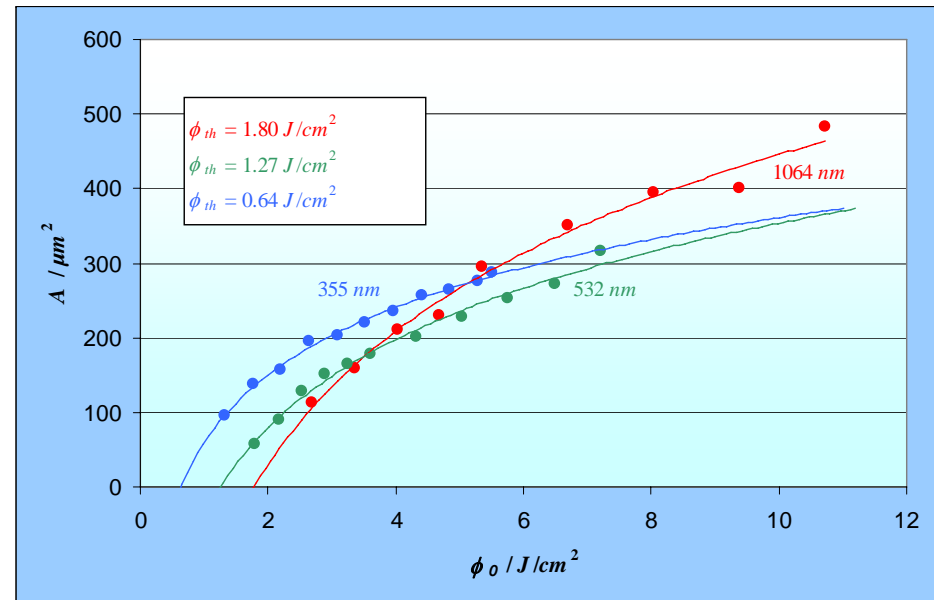


# Bohren von Lithium Niobat

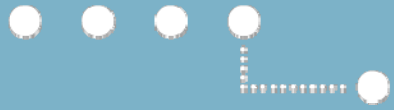
Transmission:



Wir erwarten tiefere Schwellen bei kleineren Wellenlänge.

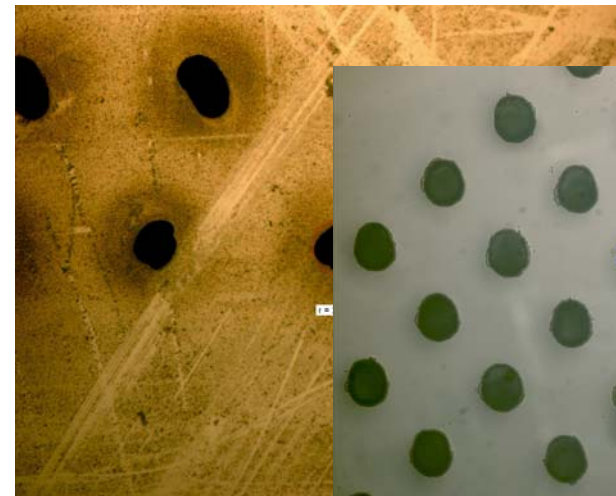
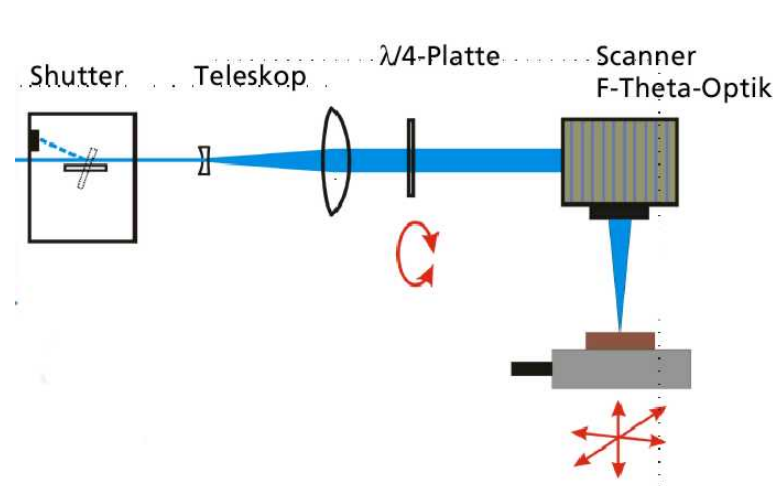


Bohren bei 355 nm.



## Bohren von Lithium Niobat

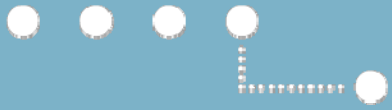
Wendelbohren mit Scanner und F-Theta-Optik:



Problem:

Mehrmaliges Abfahren eines Kreises von ca. 50 µm Durchmesser bei einer Scanner-Auflösung von ca. 10 µm.

-> Viel Arbeit bei der Optimierung der Scannerparameter (Delay-Zeiten)



## Bohren von Lithium Niobat

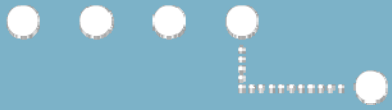
Bohrkanäle:



Der Durchmesser des Bohrkanals nimmt nach unten hin ab. Der Effekt wird stärker, je dicker das Plättchen ist.

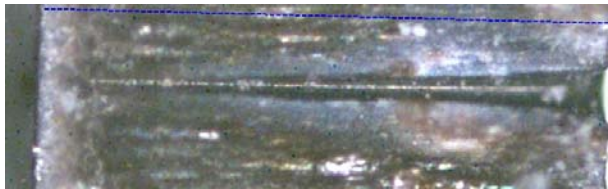
Der Austrittsdurchmesser lässt sich durch die Bohrdauer kaum beeinflussen. Ist die Bohrung einmal „durch“, bleibt sie praktisch unverändert.

Eine Erhöhung der Pulsenergie führt zu Ausbrüchen am Ein- und am Austritt der Bohrung.

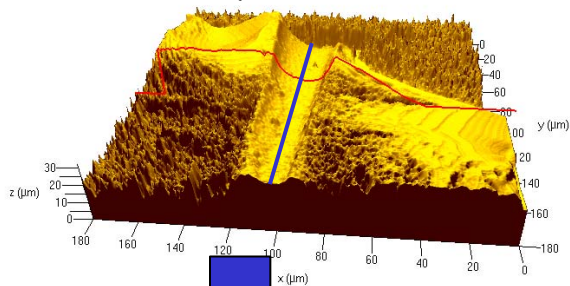


## Bohren von Lithium Niobat

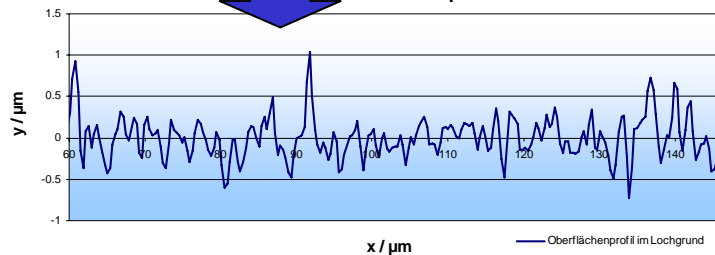
Bohrkanäle:



LSM Messung



Linienprofil



Oberflächenrauheit:

$$R_t = y_{\max} - y_{\min} = 1.8 \mu\text{m}$$

$$R_a = 0.190 \mu\text{m} \rightarrow N3$$

Die mittlere Oberflächenrauheit im Bereich der Wellenlänge führt zu starker Streuung an den Wänden des Bohrkanals.

Ob das für die Stagnation der Ablation im Bohrkanal verantwortlich ist entzieht sich unserer Kenntnis.

Wendelbohroptik wäre von Vorteil.



FGSW

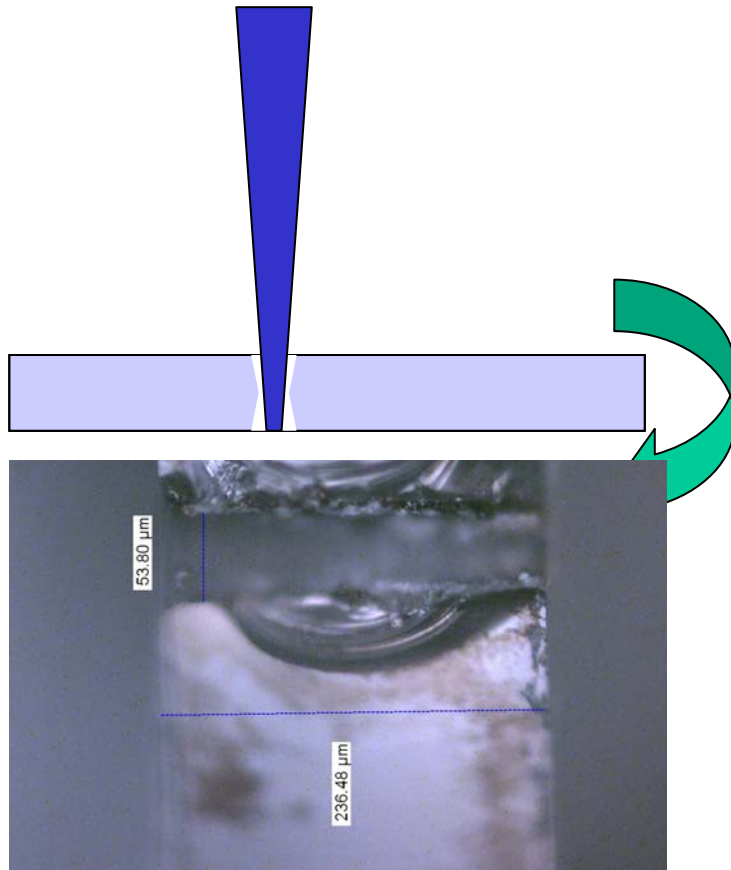


ILT



## Bohren von Lithium Niobat

Zweiseitiges Bohren:



Bohren von einer Seite

Plättchen kehren

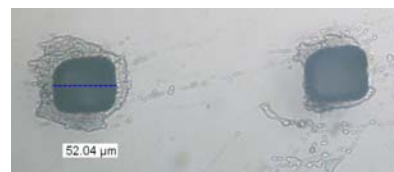
Erneut Bohren

Wir erwarten einen wesentlich zylinderförmigeren Bohrkanal

Generell ist aber festzuhalten, dass Scanner zum Mikrobohren nur bedingt geeignet sind.

Dafür lassen sich alternative Lochformen realisieren.

Quadratische Löcher

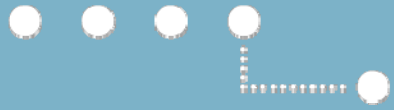


Eintritt

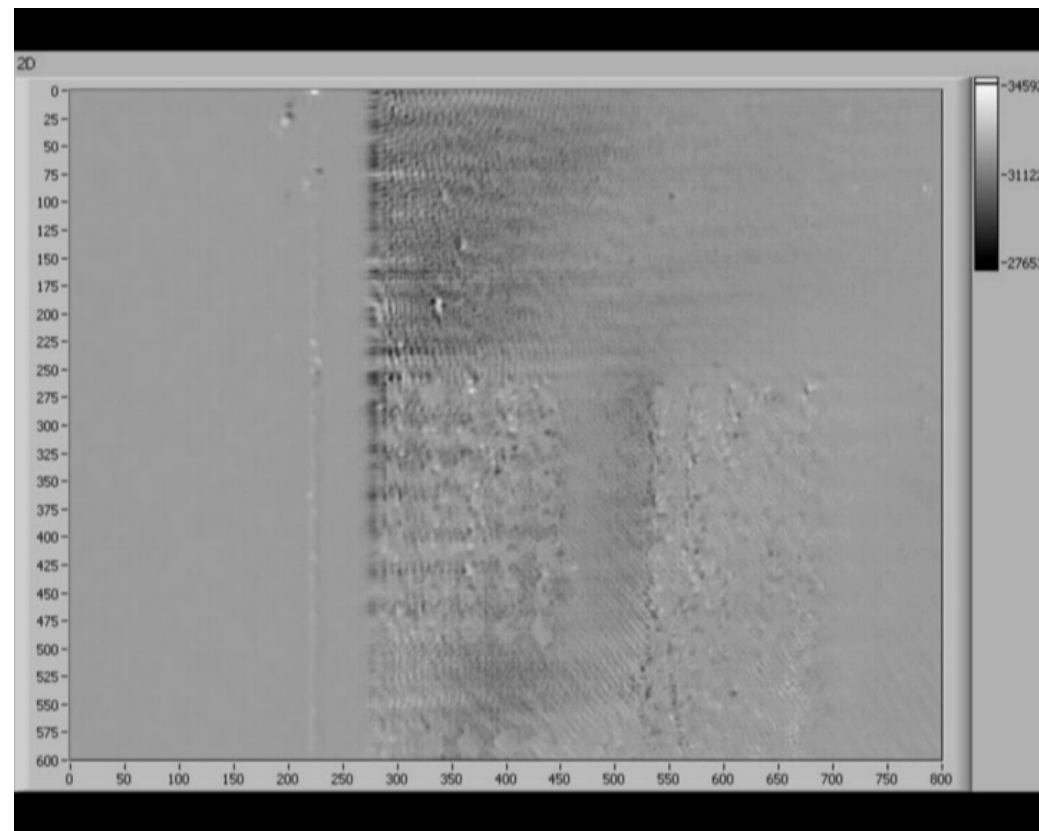


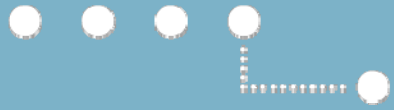
Austritt





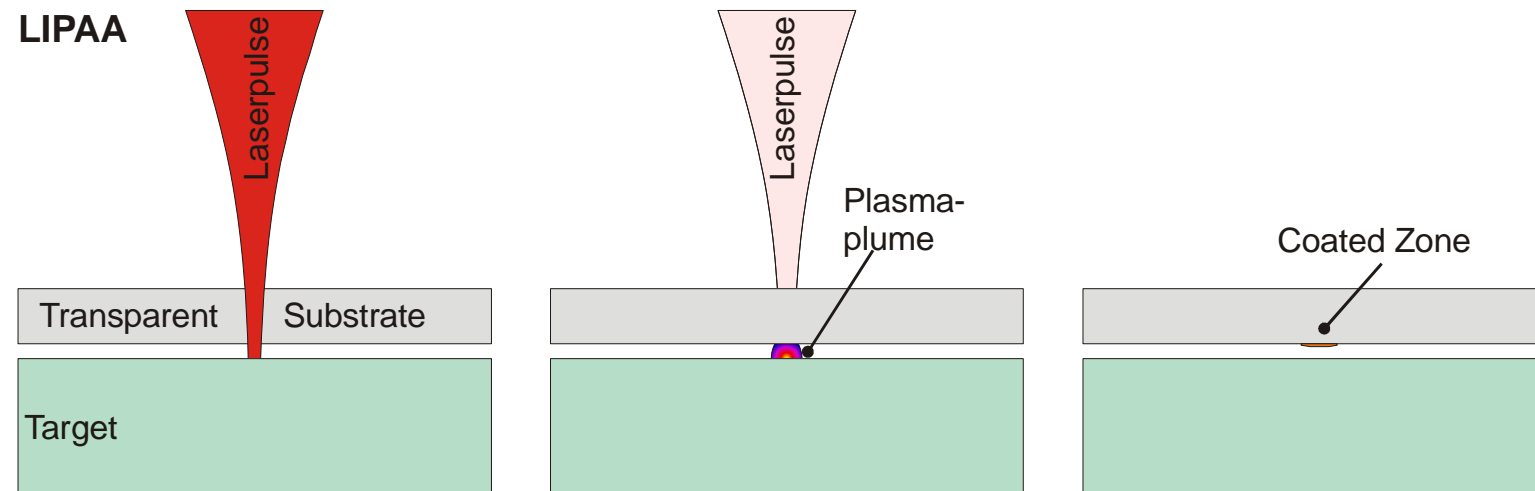
## Bohren von Lithium Niobat





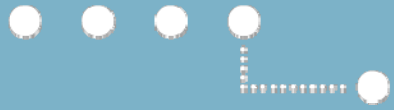
## Beschichten

Beschichten mit einem LIPAA-Prozess:



Variiert werden:

- Target Material
- Pulsenergie
- Vorschubgeschwindigkeit
- Abstand Target Substrat
- Umgebungsbedingungen (Druck, Schutzgas)



## Beschichten

Einzelpunkte ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $E_p = 3 \mu\text{J}$ ,  $w_0 = 12.5 \mu\text{m}$ , Target Aluminium):

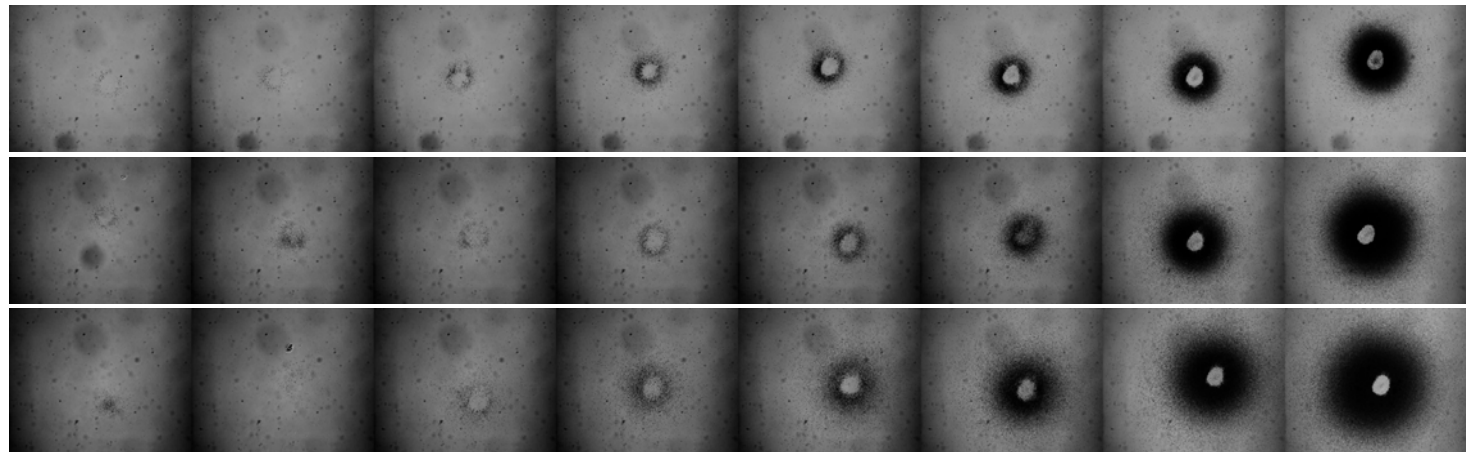
Anzahl Pulse    1        2        4        8        16        32        64        128

Abstand

10  $\mu\text{m}$

50  $\mu\text{m}$

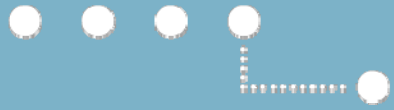
100  $\mu\text{m}$



Bei wenigen Pulsen ergibt sich bei kleinem Abstand eine ringförmige und bei grossem Abstand eine kreisförmige Struktur.

Steigt die Anzahl Pulse an, wird in der Mitte ein grosser Teil der Beschichtung wieder zerstört.

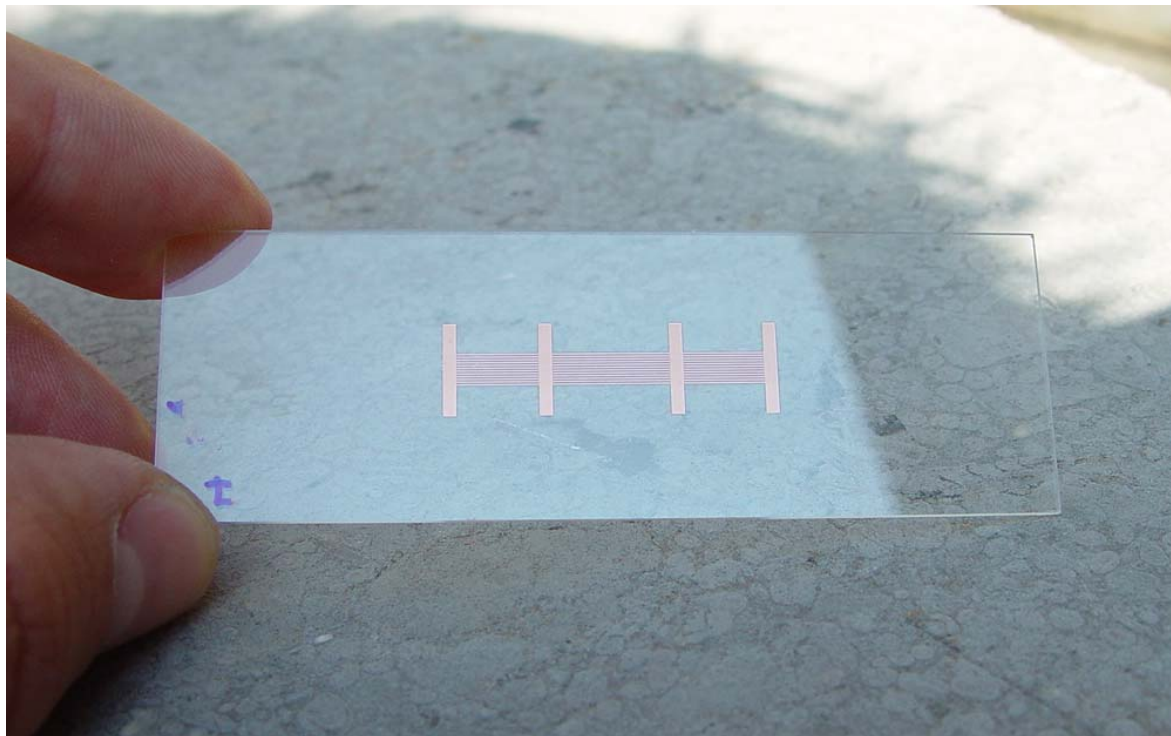
Der Durchmesser der beschichteten Region steigt mit dem Abstand an.



## Beschichten

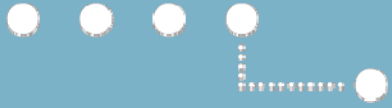
Linien:

Mit einem Scanner können ganze Strukturen erzeugt werden. Als Beispiel dienen einfache Linien.



11 parallele Linien mit Kupfer Target, vorbereitet für 4-Punkt Messung.

Das Aussehen (Glanz) lässt vermuten, dass die Linien elektrisch leitend sind.

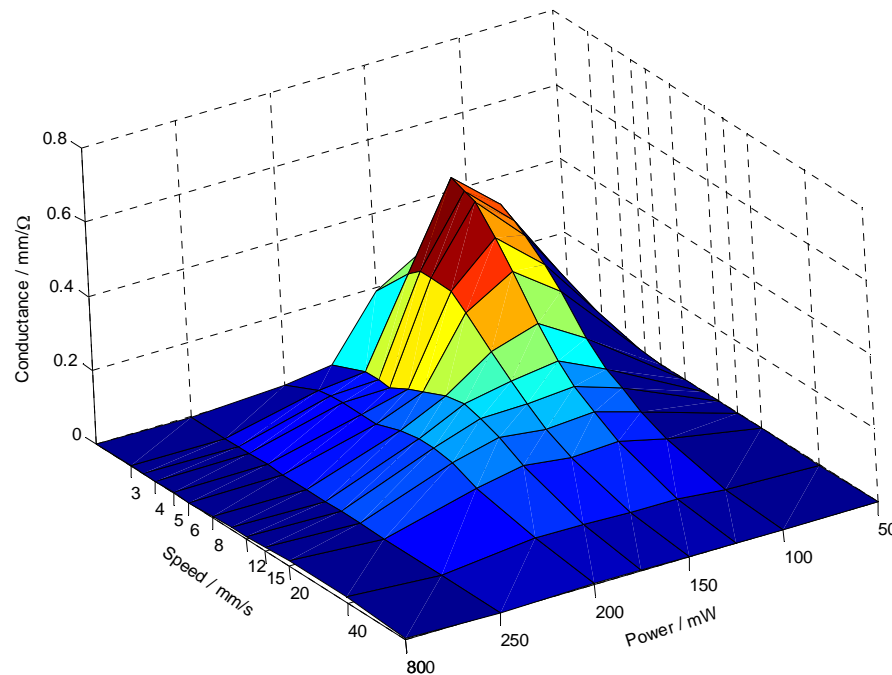


## Beschichten

Schreiben von einzelnen Linien:

Länge 20mm,  $\lambda = 532\text{nm}$ ,  $w_0=12.5\ \mu\text{m}$ ,  $f = 50\ \text{kHz}$ , Abstand  $100\ \mu\text{m}$ , Target Aluminium, 50 mbar Argon

Spezifische Leitfähigkeit:



Es ist möglich direkt leitende Bahnen zu erzeugen.

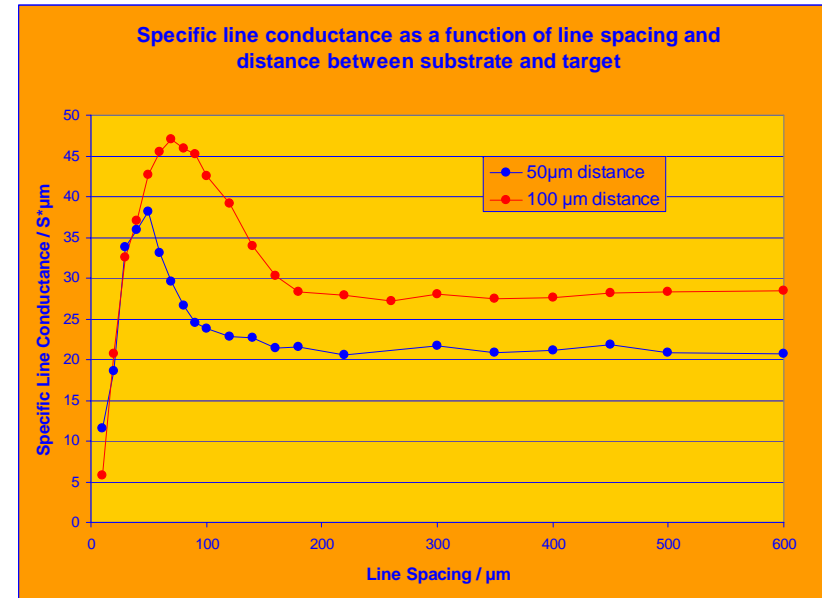
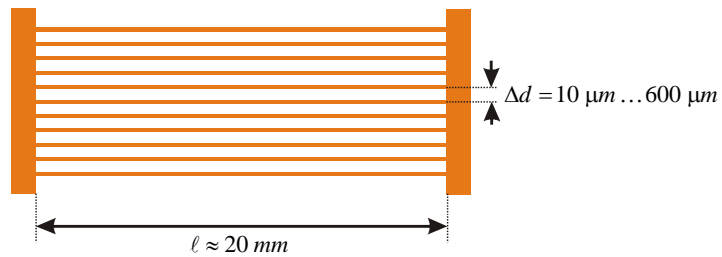
Die Leitfähigkeit einer Bahn kann mittels der Laserparameter über einen weiten Bereich variiert werden.



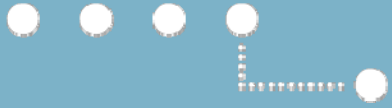
## Beschichten

Schreiben von parallelen Linien:

11 parallele Linien, Target Kupfer

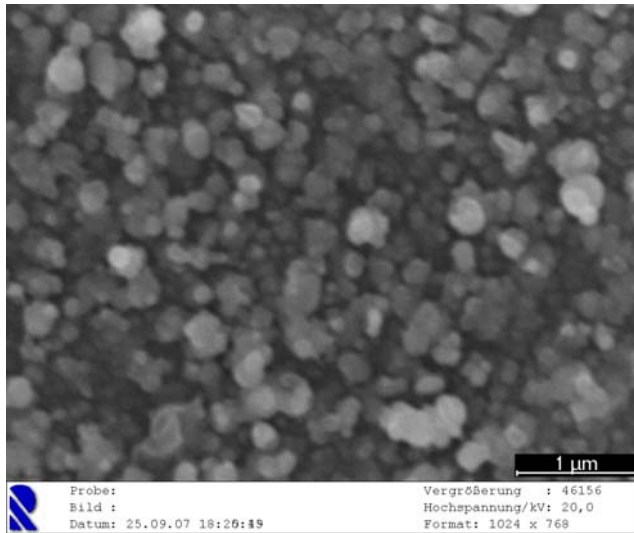


Die Leitfähigkeit hängt vom Linienabstand ab, zeigt mit zunehmendem Abstand ein Optimum und pendelt sich anschliessend auf einem Sättigungswert ein.

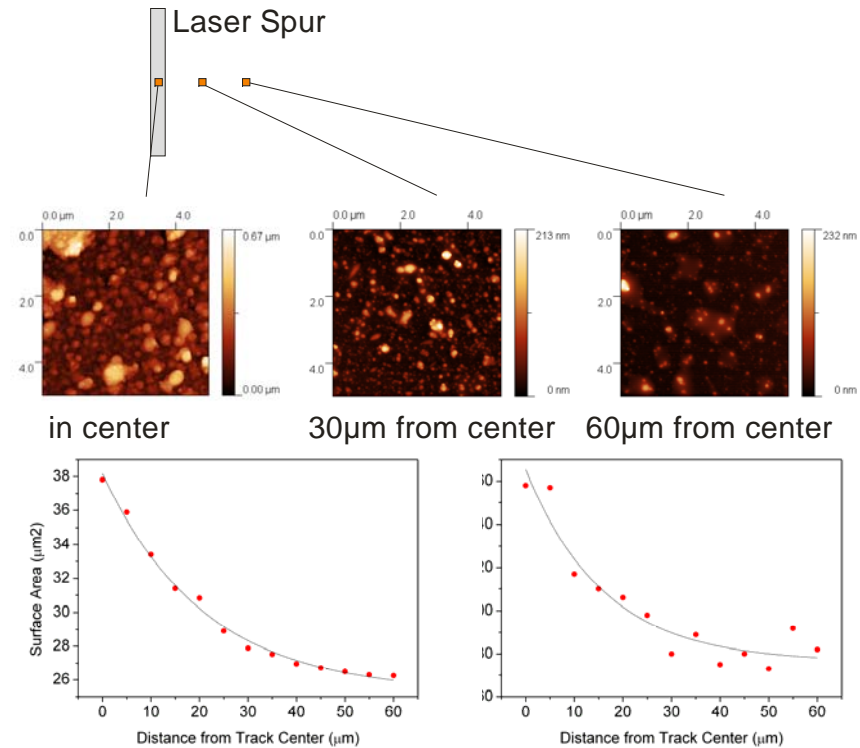


# Beschichten

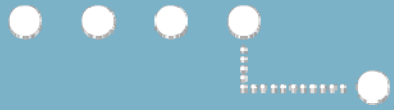
Schreiben von parallelen Linien:



Die generierten und abgeschiedenen Partikel sind typisch im sub- $\mu\text{m}$  Bereich.

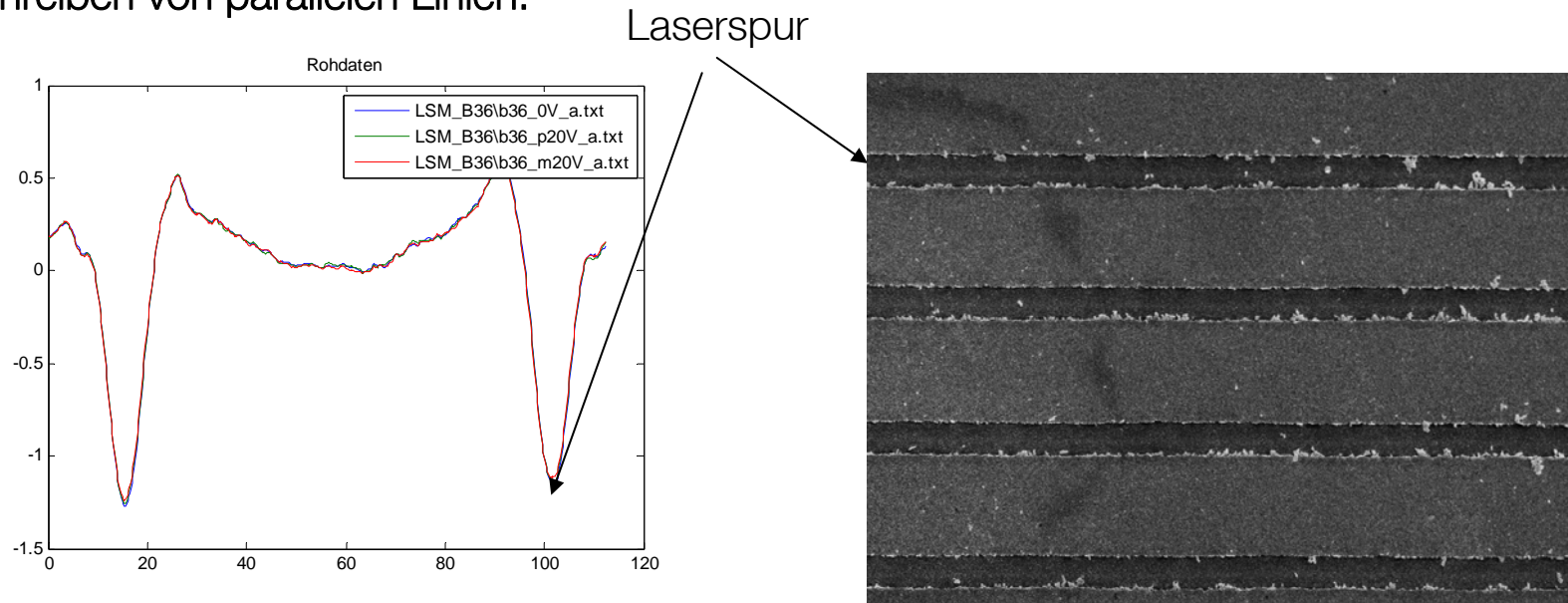


Sowohl Partikeldichte als auch Partikelgrösse nehmen annähernd exponentiell mit dem Abstand zur Spur ab.



## Beschichten

Schreiben von parallelen Linien:



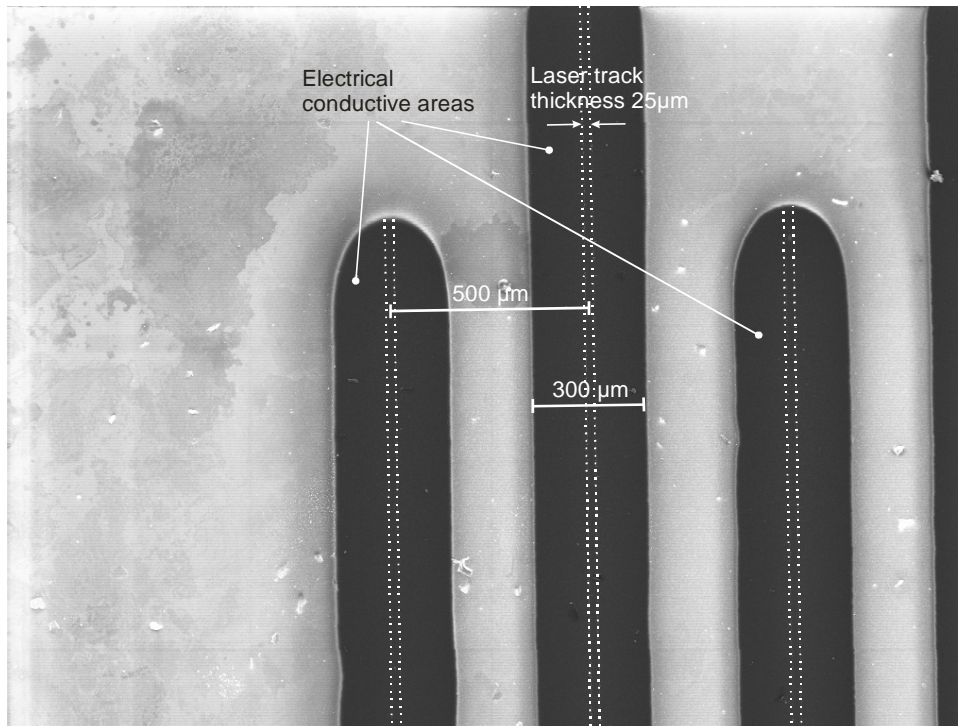
Durch den kleinen Pitch (Abstand von Puls zu Puls) wird in der Laserspur das deponierte Material teilweise wieder entfernt und teilweise mit dem Substrat verschmolzen.





## Beschichten

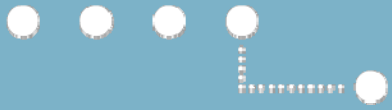
### Ladungskontrast REM:



Eine Analyse unter dem REM (Ladungskontrast) zeigt, dass die Bahnen bis zu einem gewissen Abstand zur Spur, der Perkolationschwelle, leitend und anschliessend isolierend sind.

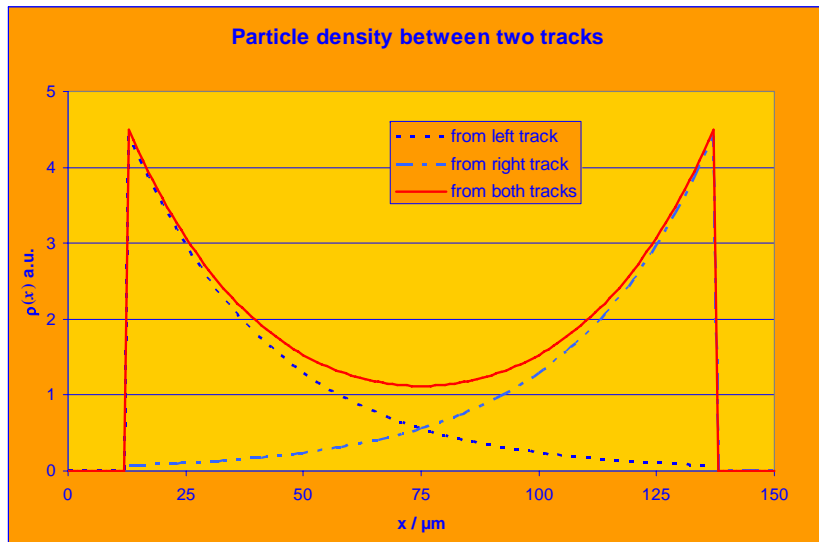
Die Breite der leitenden Spur hängt unter anderem vom Abstand Target- Substrat ab (hier 50 µm).

In den nichtleitenden Gebieten sind nach wie vor Partikel vorhanden, jedoch ist ihre Dichte so gering, dass unter ihnen keine elektrische Verbindung mehr besteht.



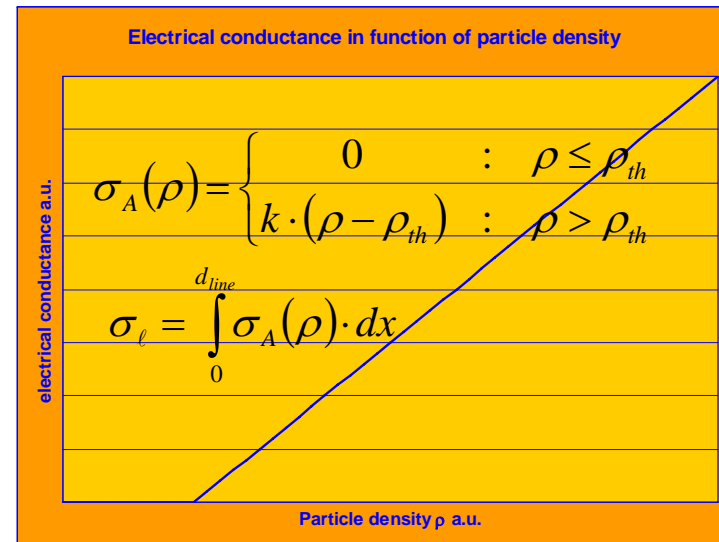
# Beschichten

Model:

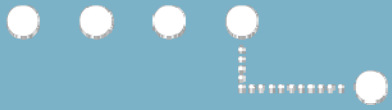


Spuren als nicht leitend angenommen.

Die Partikeldichte nimmt exponentiell mit dem Abstand zur Spur ab.

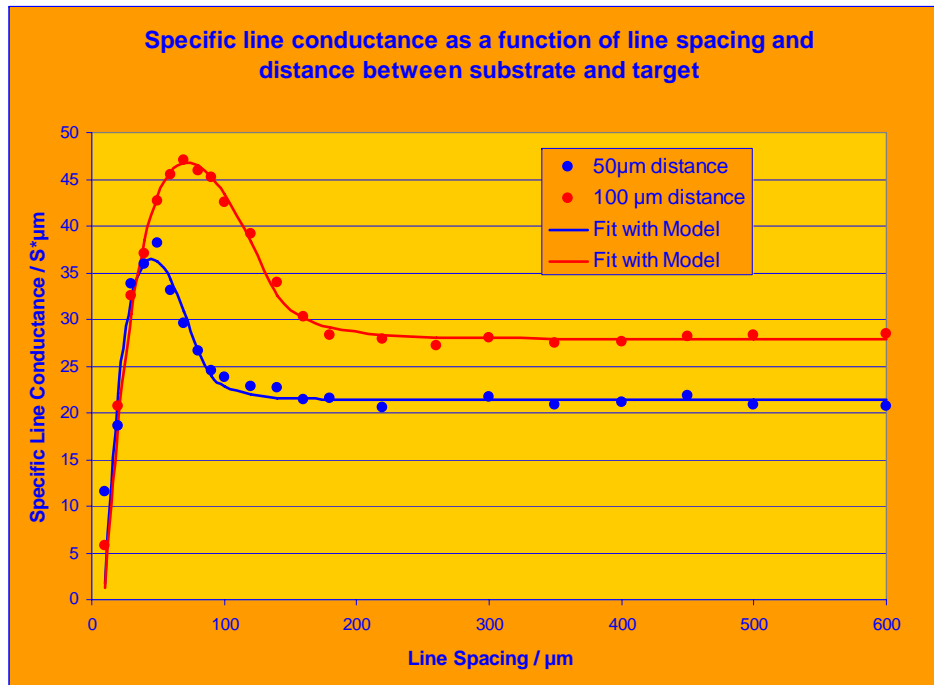


Ab einer gewissen Partikeldichte nimmt die elektrische Leitfähigkeit linear mit der Dichte zu.



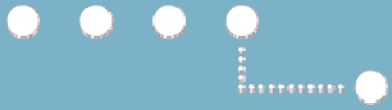
# Beschichten

Model:



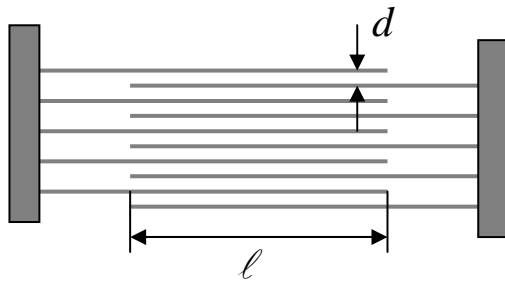
Die einfachen Annahmen bilden das Verhalten der Leitfähigkeit sehr gut nach.

Bei 50  $\mu m$  Abstand Substrat Target tritt Sättigung ab einem Linienabstand von ca. 150  $\mu m$  auf.



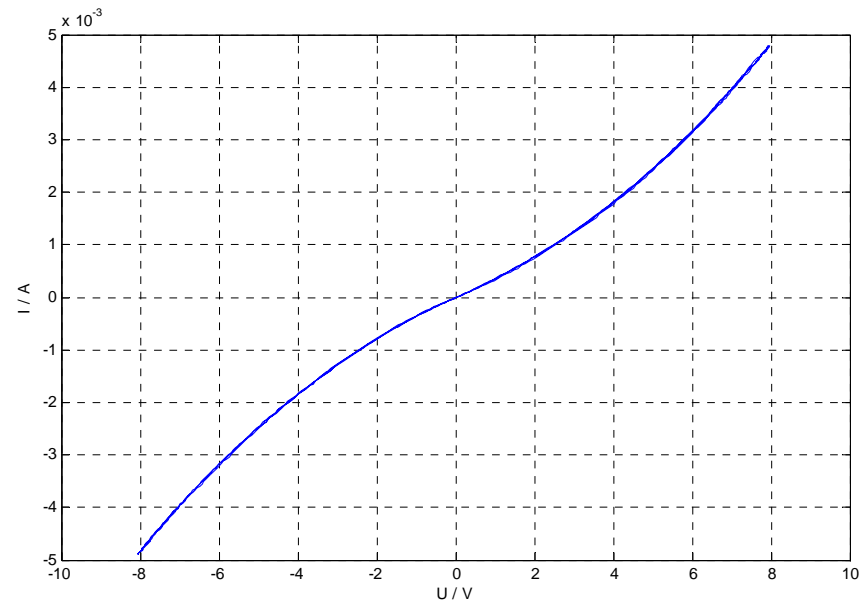
## Beschichten

Fingerstrukturen:

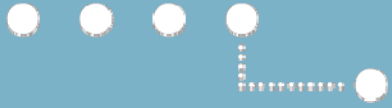


Variiert werden neben den Laserparametern der Abstand  $d$  und der Überlapp  $l$ .

U-I Diagramm für Fingerstrukturen Aluminium

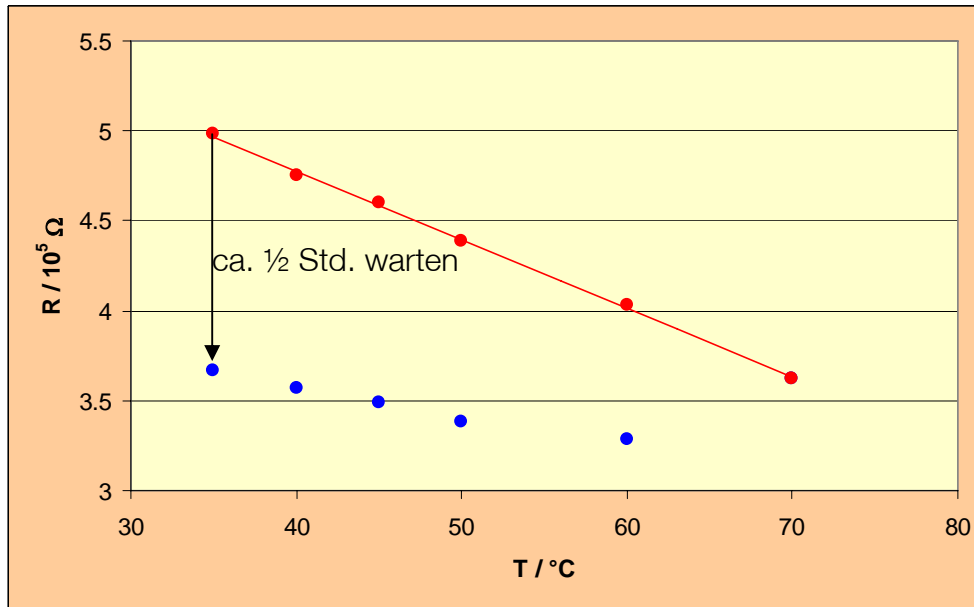


Hypothese: Sehr viele kleine Partikel mit kleinem Abstand (sub nm) -> Tunneleffekt.



## Beschichten

Fingerstrukturen: Temperaturverhalten von Kupfer



Manchmal ist das Verhalten auch nicht reversibel.

Erklärung noch nicht gefunden.



## Fazit

- ps-Pulse eignen sich sehr gut um transparente Materialien zu bearbeiten.
- Manchmal muss man sich vor nichtlinearen Effekten und „unerwünschten Reflexionen“ in Acht nehmen.
- Wir versprechen uns viel von der Kombination Strukturieren – Beschichten im Hinblick auf Sensorik und Mikroreaktoren.
- Der Einsatz von ps-Pulsen beschränkt sich bei weitem nicht auf transparente Materialien (-> weitere Vorträge)