

*Think ultrafast. Think precise. Think ahead.*



# Industrielle Lasermikrobearbeitung und dabei auftretende Sekundäremissionen

10.10.2018

Dr.-Ing. Frank Siegel

MedTech und Präzision – Burgdorf CH

Agenda.

Folie 2



Kurzvorstellung GFH GmbH

Laserbohren – Plasmaüberwachung zur Online-Prozesskontrolle

Effizientes Laserdrehen – Laserinduzierte, ionisierende Strahlung

Zusammenfassung

Das Unternehmen.

Folie 3

**GFH**<sup>®</sup>  
laser micro machining



## DEUTSCHLAND. BAYERN. DEGGENDORF

- 31.400 Einwohner
- Technische Hochschulstadt
- Tor zum Bayerischen Wald in der Donauebene
- 146 km nach München / 576 km nach Berlin





**GLcompact**<sup>®</sup>

Präzision auf kleinstem Raum



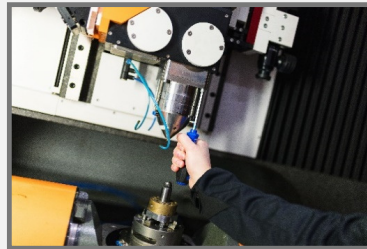
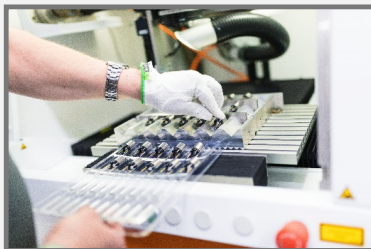
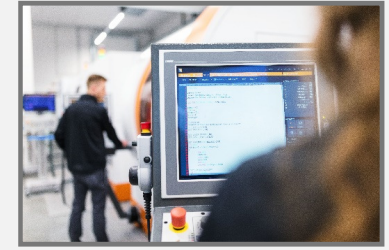
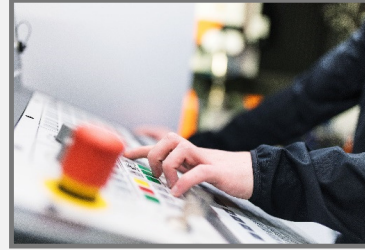
**GLevo**<sup>®</sup>

höchste Dynamik und Präzision von 1g bis 100kg

Präzisionsfertigung.

Folie 5

**GFH** GmbH®  
laser micro machining



# „Time is money“

Benjamin Franklin



- Neben Qualität ist auch Produktivität für einen wirtschaftlichen Einsatz gefordert
- Mikrobearbeitung erfordert häufig kleinste Geometrien auf kleinen Bauteilabmessungen
- Daher hohe Laserleistung in der Mikrobearbeitung oftmals nicht umsetzbar (kleiner Fokusspot, kurze Verfahrswege, keine parallelisierbaren Prozesse, ...)
- Lösung über innovative Prozesse und hohes Prozessverständnis

Agenda.

Folie 7

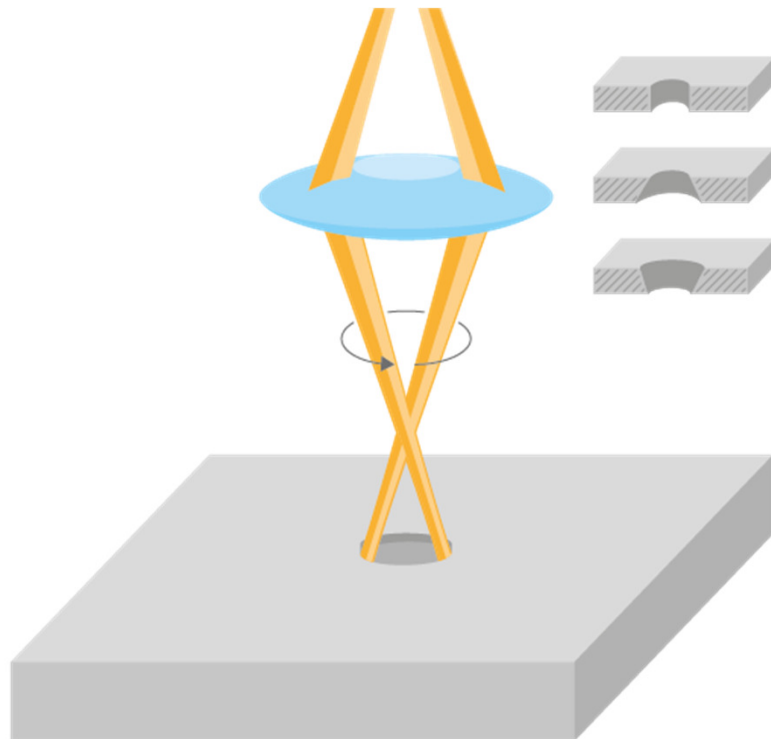


Kurzvorstellung GFH GmbH

Laserbohren – Plasmaüberwachung zur Online-Prozesskontrolle

Effizientes Laserdrehen – Laserinduzierte, ionisierende Strahlung

Zusammenfassung

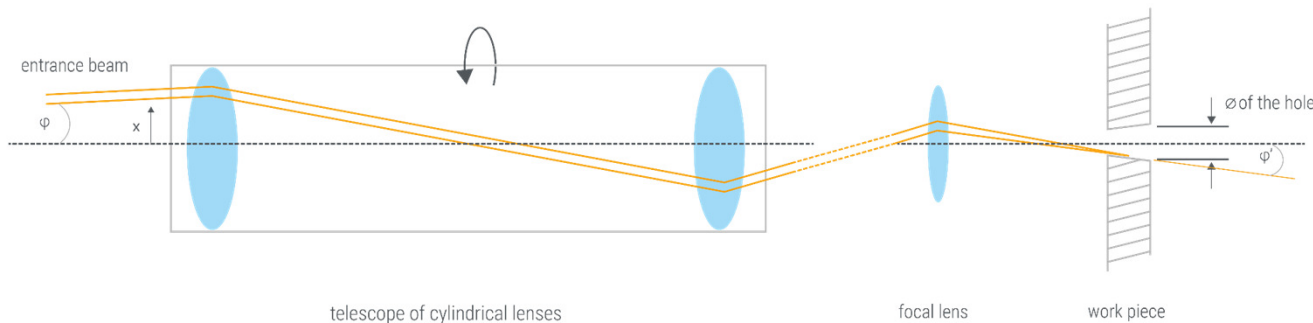


## Mikrobohren

- Kombination von Rotation und Anstellung des Laserstrahls
- Strahlrotation definiert den Bohrdurchmesser
- Anstellung definiert den Winkel
- Zylindrische und positiv/negativ konische Bohrungen möglich
- Positioniergenauigkeit abhängig vom Achssystem

GL.trepan.

Folie 9



Standardabweichung des Bohrdurchmessers:

$$\sigma_{\phi} \leq 0,3\mu m + \frac{0,02\mu m * L}{100\mu m} + 0,1\mu m \left| \frac{\phi'}{10^\circ} \right|$$

Bohrdurchmesser: 100μm

Bohrlänge: 0.5mm

Wandwinkel φ': 0° (zylindrisch)

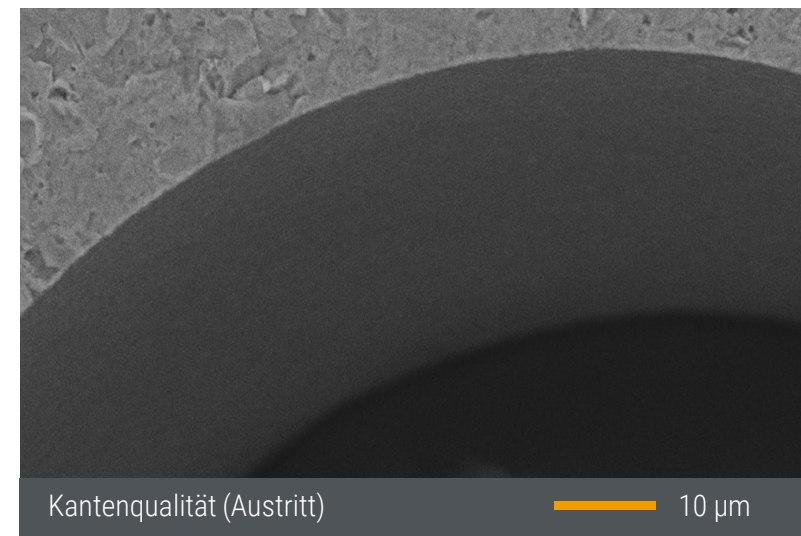
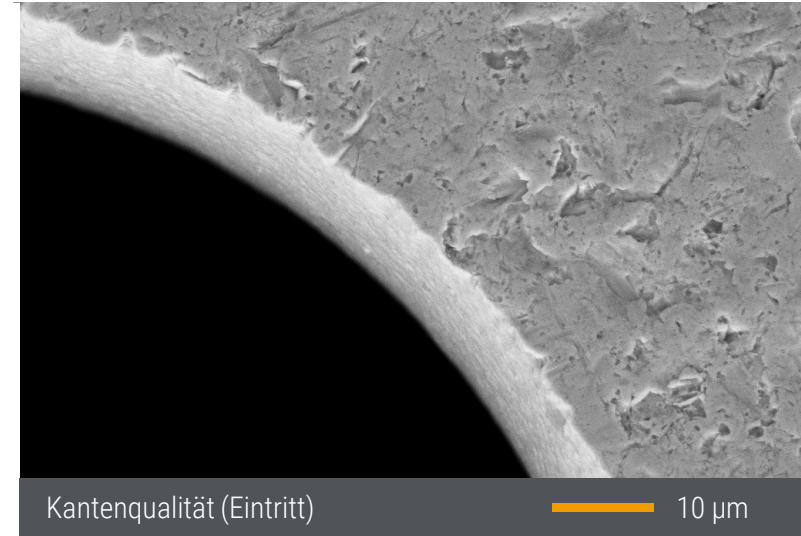
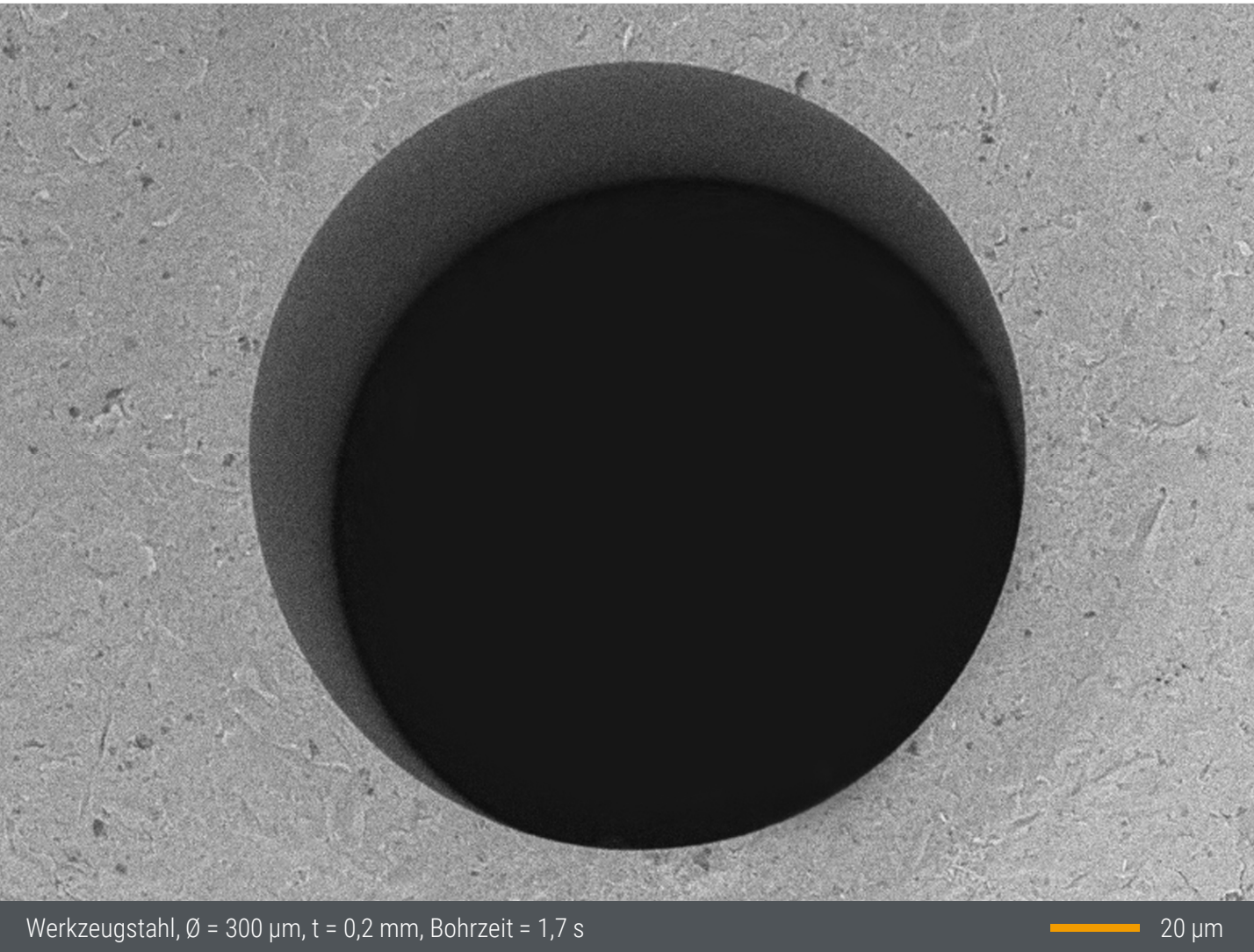
$$\Rightarrow \sigma \leq 0,4\mu m$$

## GL.trepan

- Strahlrotation bis zu 30.000 rpm
- Exzellente Langzeitstabilität
- Bohrdurchmesser: 0,03 – 1,2 mm (IR)
- Materialstärke bis 1,5 mm (high quality) ohne Nachfokussierung
- Aspektverhältnis < 20
- Anstellwinkel: bis +/- 20°

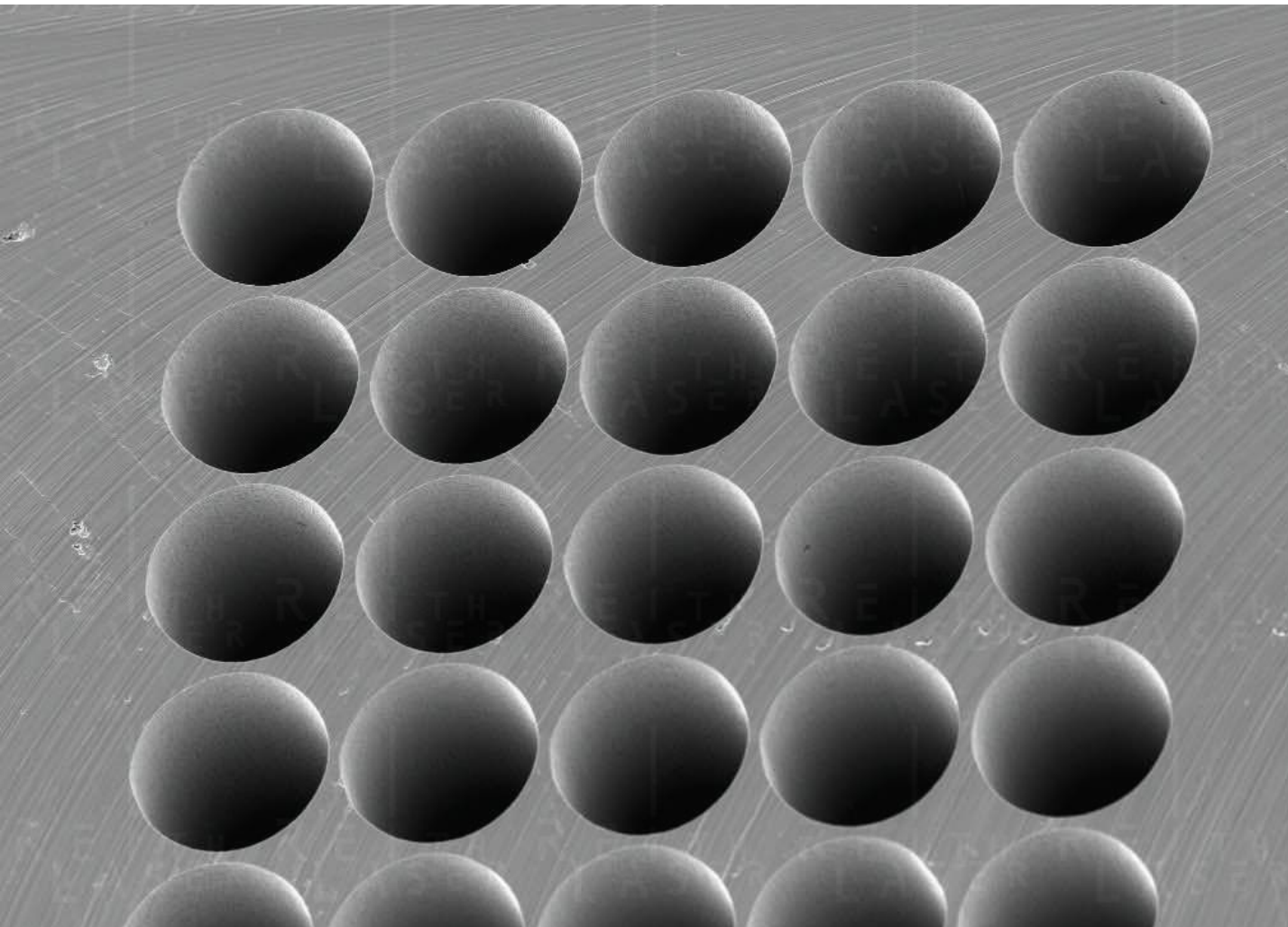
# Laserbohren – zylindrisch.

Folie 10



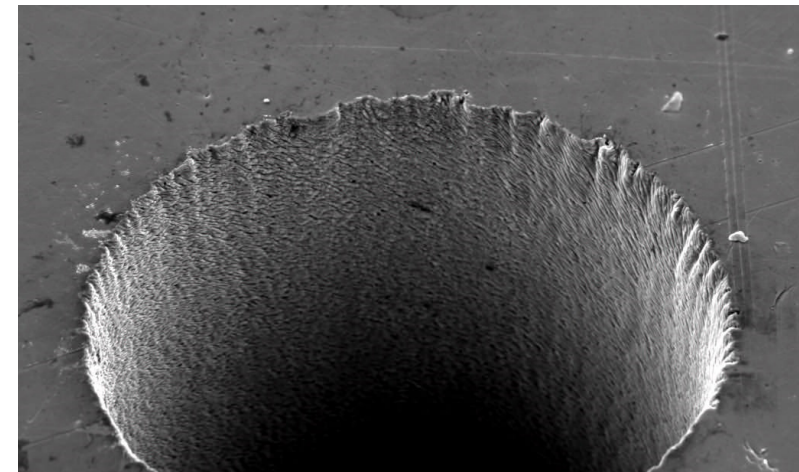
Laserbohren – zylindrisch.

Folie 11



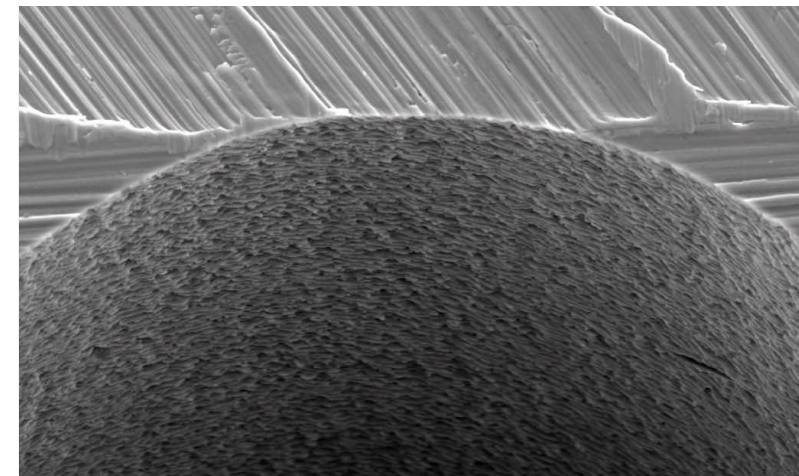
Edelstahl,  $\varnothing = 115 \mu\text{m}$ ,  $t = 0,8 \text{ mm}$

70  $\mu\text{m}$



REM-Aufnahme Bohrungseintritt

15  $\mu\text{m}$

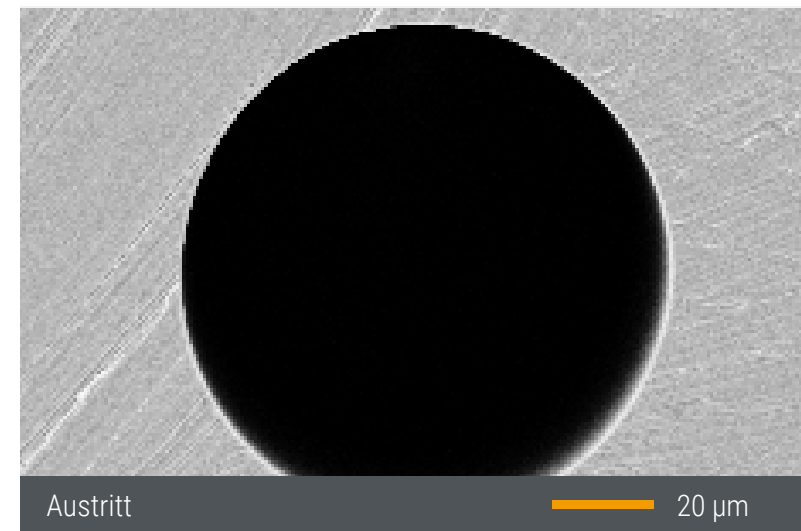
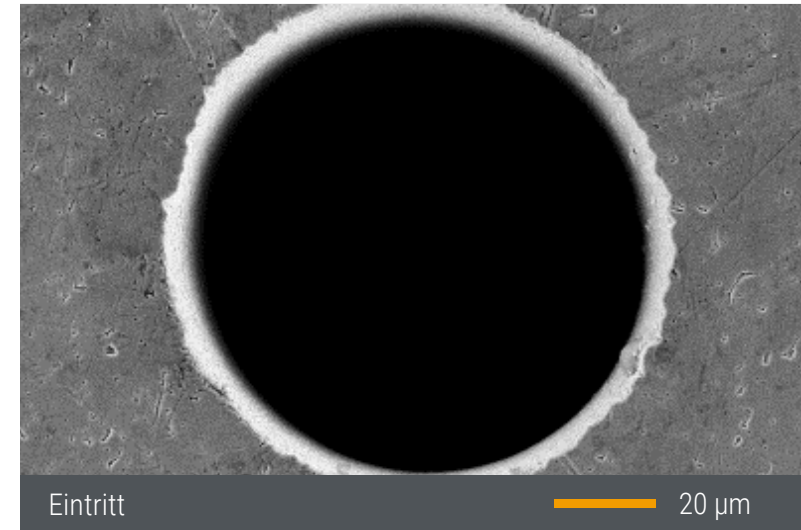
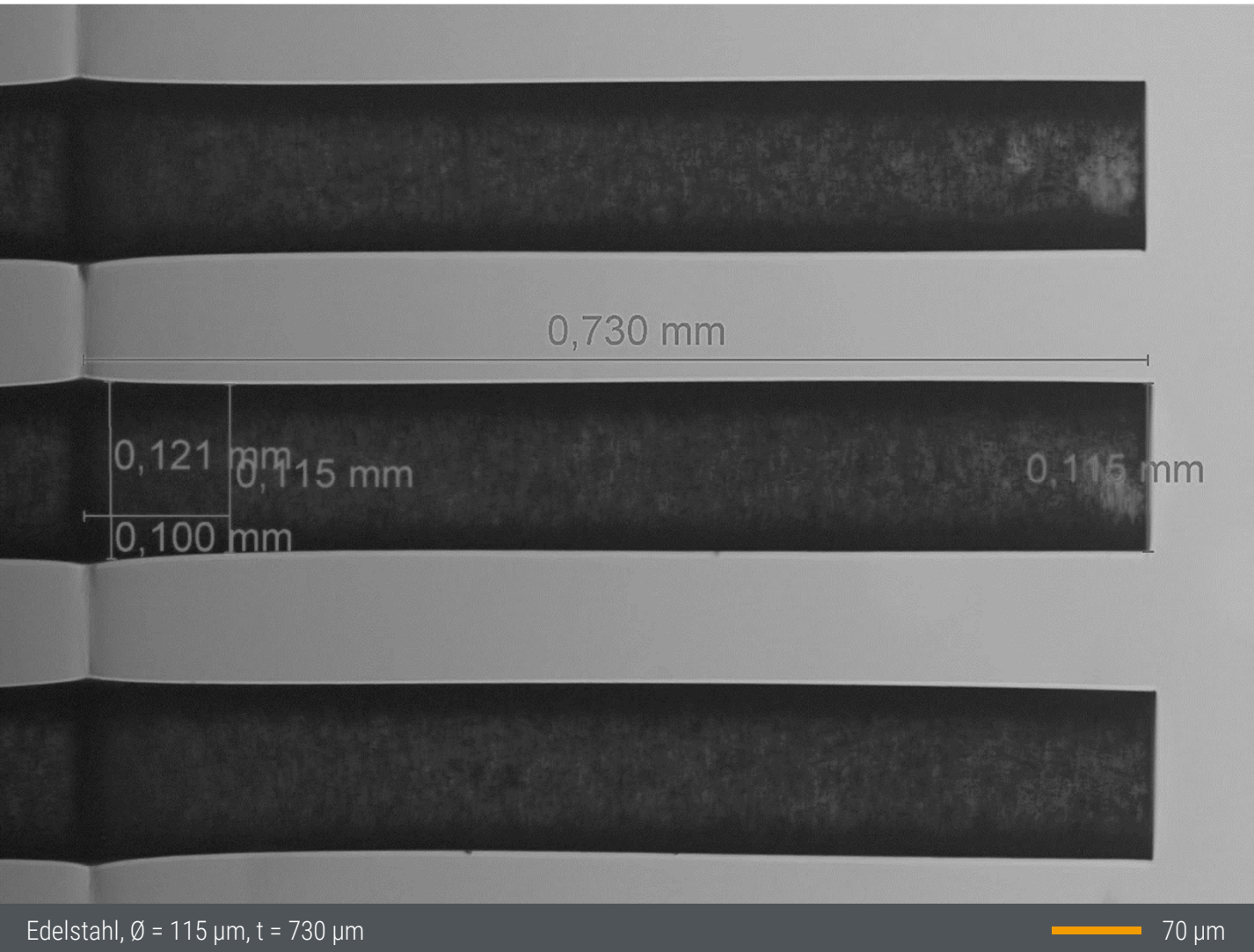


REM-Aufnahme Bohrungsausritt

10  $\mu\text{m}$

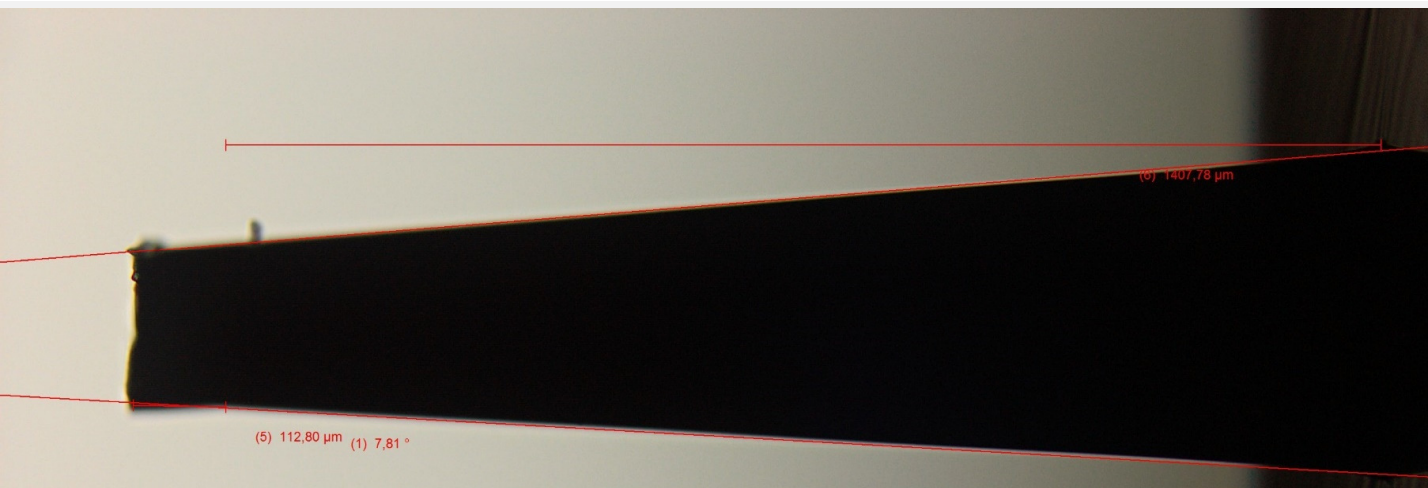
Laserbohren – zylindrisch.

Folie 12



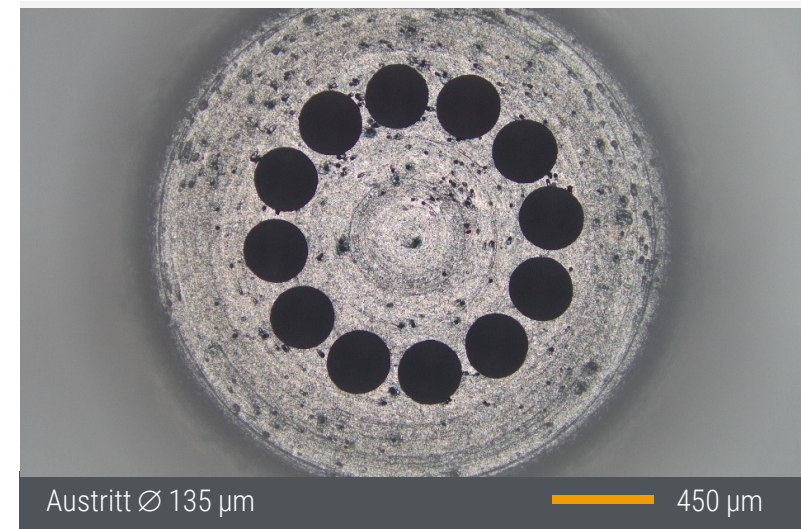
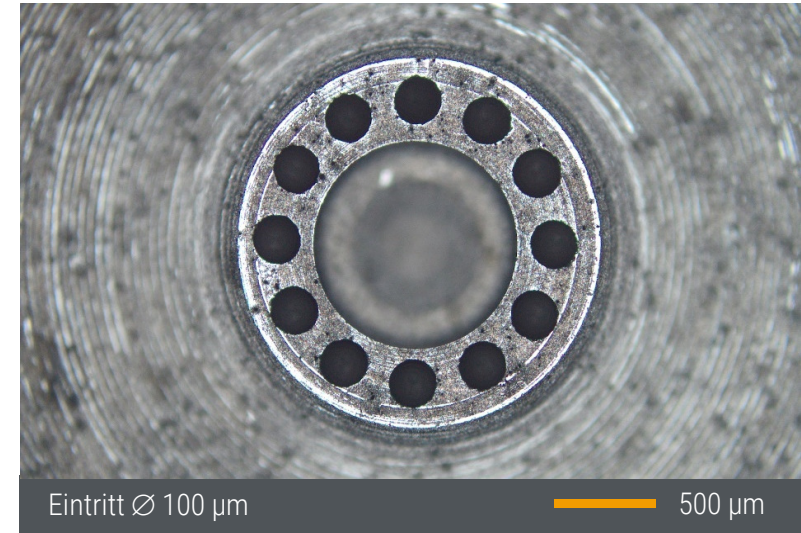
## Laserbohren – positiv konisch.

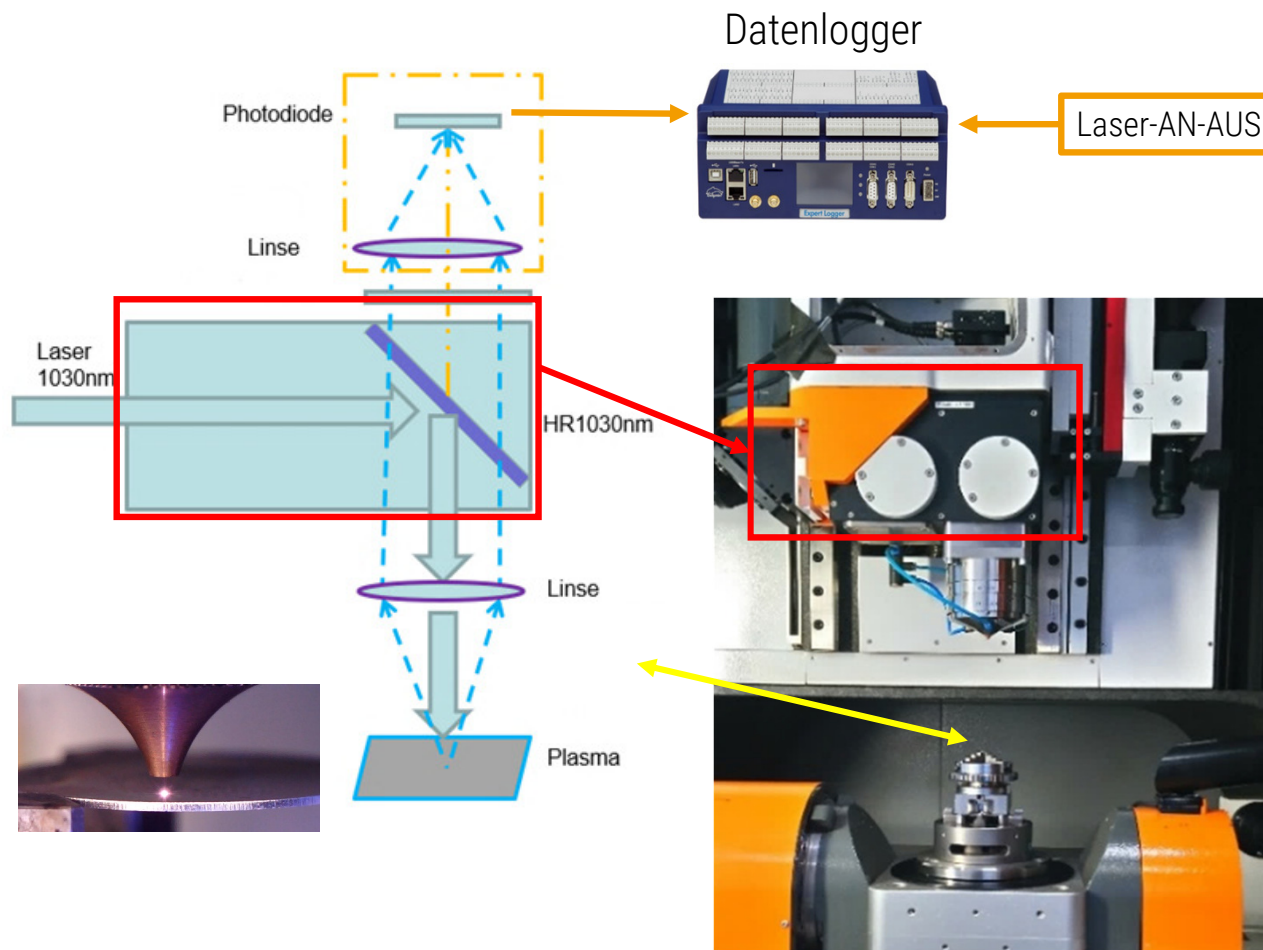
Folie 13



Laserbohren – negativ konisch.

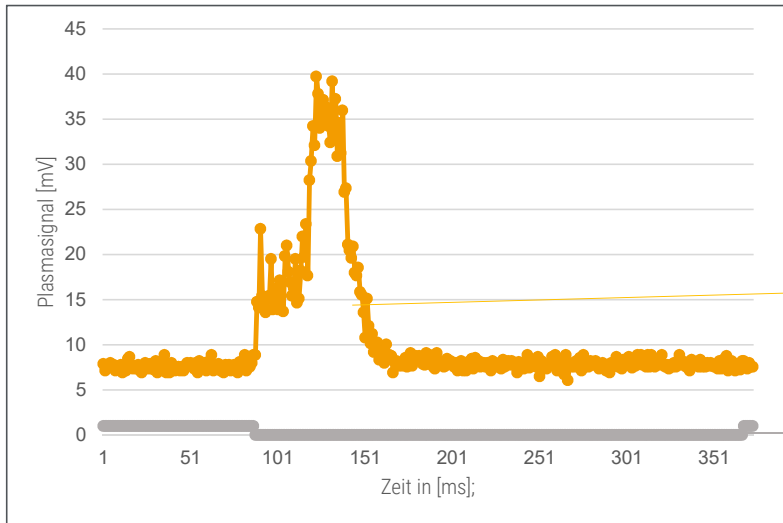
Folie 14





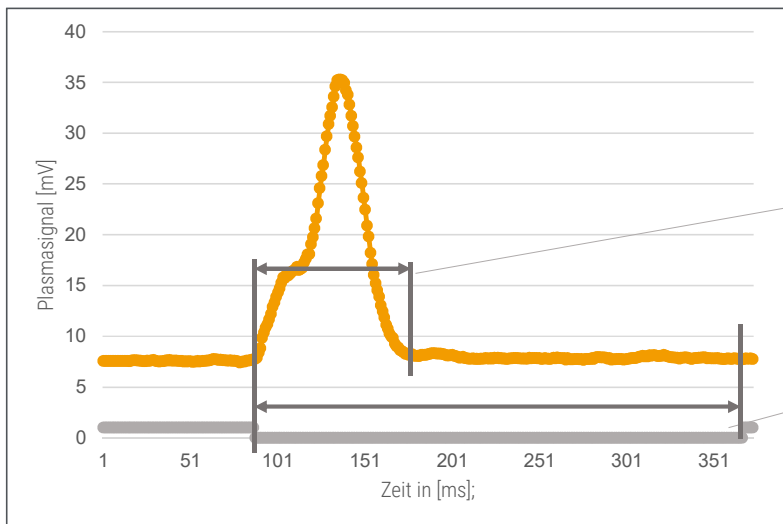
## Aufbau

- Auswertung über Datenlogger
- Eingang für Laser-on-Signal und Plasmapegel
- Onlinebetrachtung durch Prozessoptik



Photodiodensignal

Lasersteuerungssignal

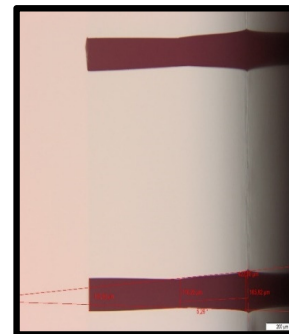
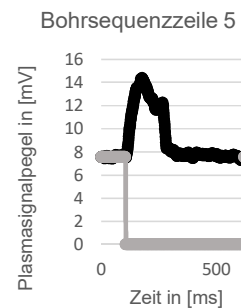
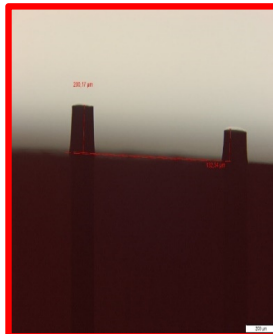
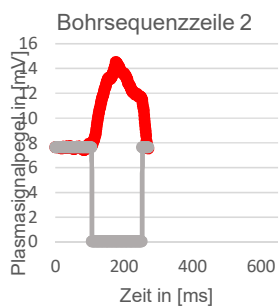
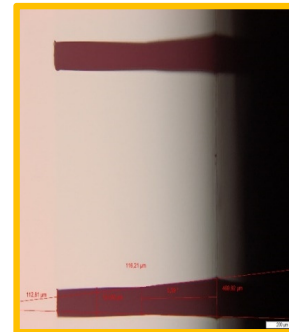
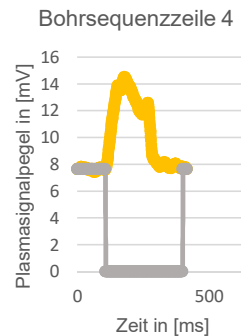
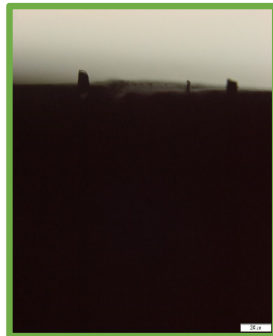
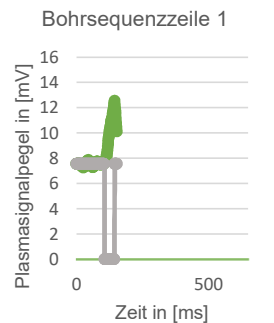
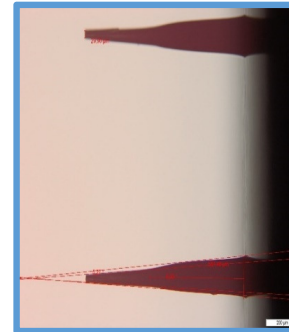
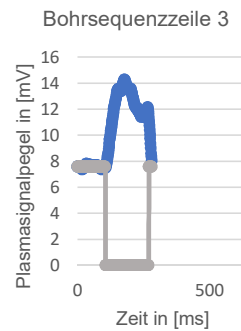
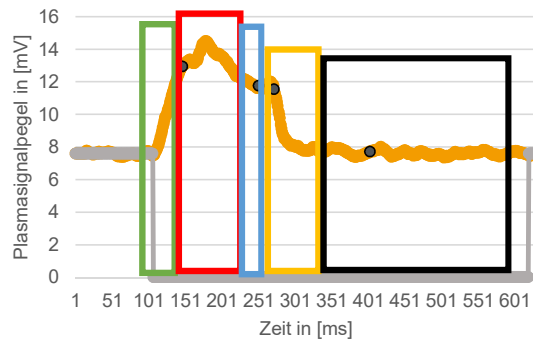


Vermutliche Bohrzeit

Laser-on-Zeit

## Auswertung des Signals

- Grundrauschen vorhanden
- Anstieg sobald Laser eingeschaltet wird
- Abfall auf Grundrauschen sobald Loch fertig gebohrt
- Glättung des Signals
- Große Abweichung zwischen vermutlicher Bohrzeit und Laser-on-Zeit



## Auswertung Bohrfortschritt

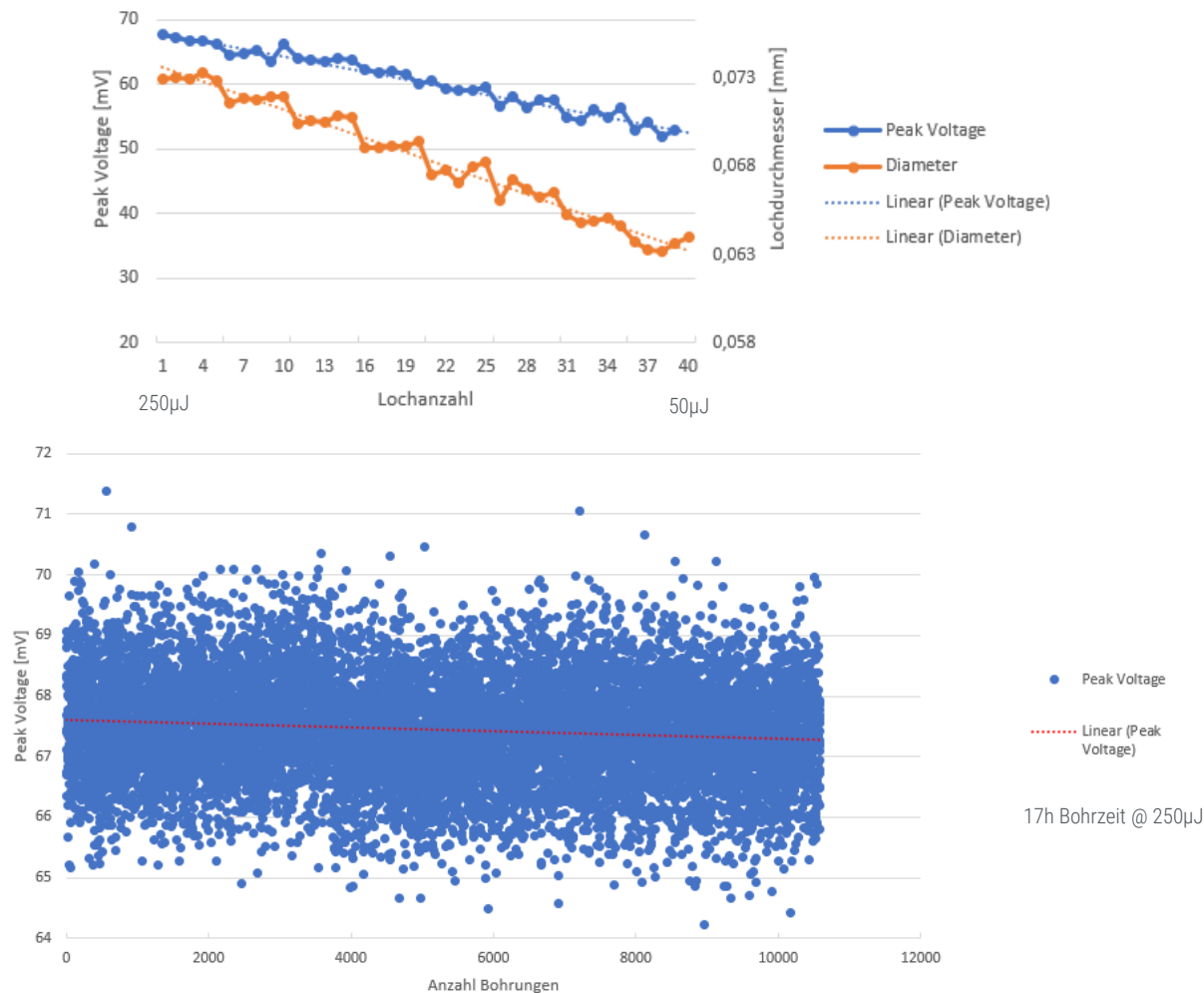
- Unterschiedliche Plasmaentwicklung gemäß Strategie
- Plasmaabfall auf Grundrauschen in Sequenz 4
- Bohrfortschritt zeigt keinen Unterschied zwischen Sequenzen 4 und 5

⇒ Plasmaabfall auf Grundrauschen ist Indikator für Fertigstellung der Bohrung

⇒ Plasmakurve spiegelt einzelne Bearbeitungsschritte wieder

## Auswertung des maximalen Plasmapegels

- Plasmapegel fällt mit abnehmender Pulsenergie (250µJ => 50µJ)
- Direkter Zusammenhang zwischen Pulsenergie und Bohrungsdurchmesser
- Signalstärke liefert Rückschluss auf Energie am Bauteil
- Auswertung des maximalen Pegels liefert Informationen über den Maschinenzustand (z.B. Verschmutzung Schutzglas)



Benefit.

Folie 19

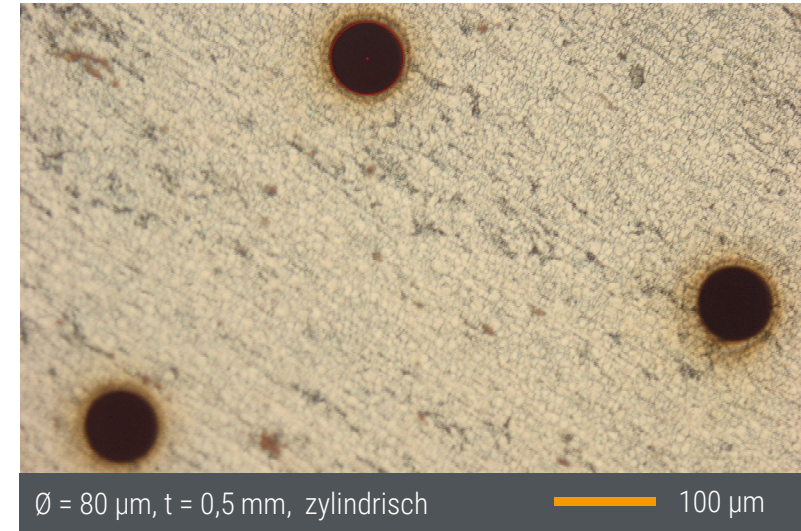
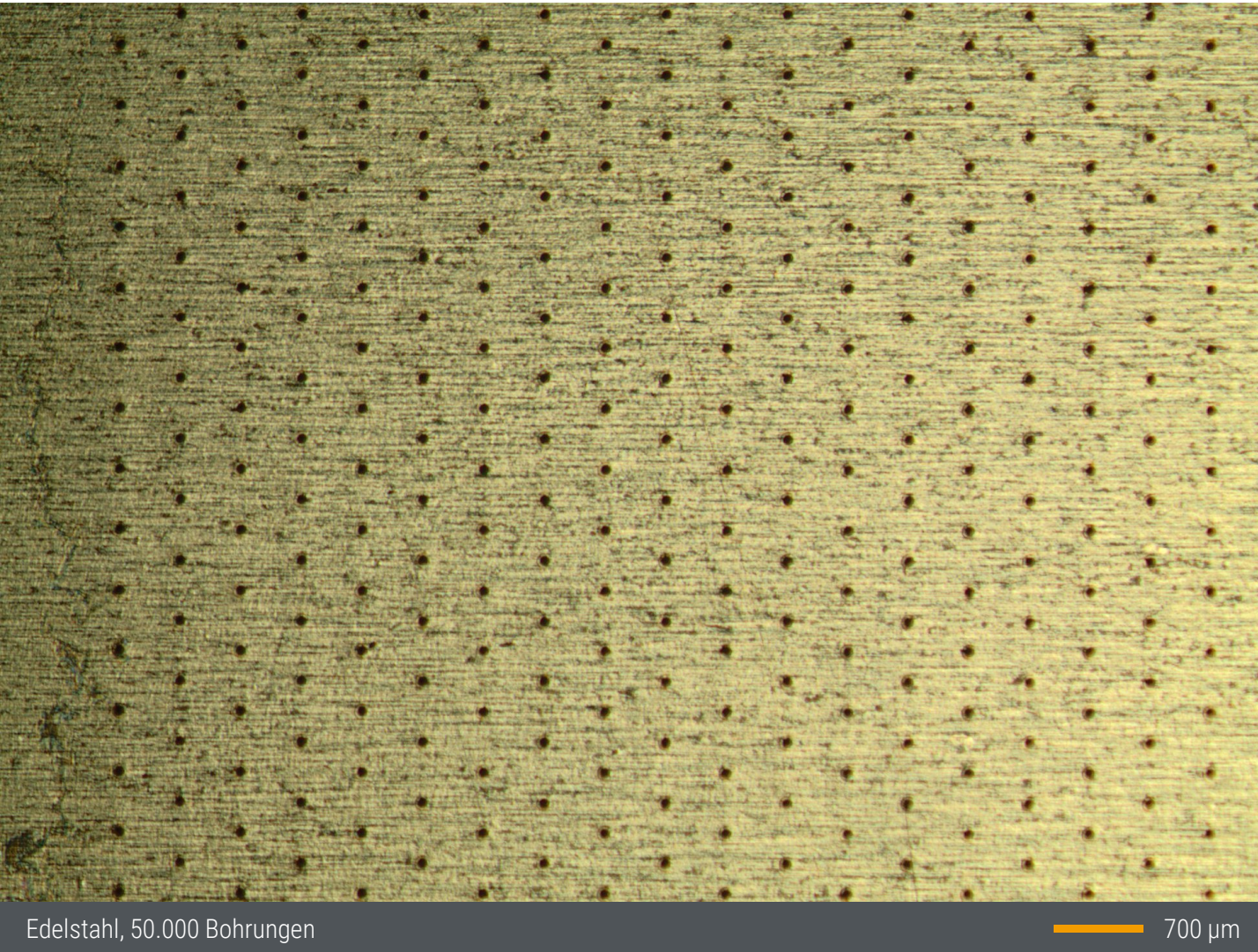
Auswertung von Plasmakurve und maximalem Plasmapegel ermöglicht:

- Verkürzung der Bohrzeiten auf das Notwendigste
- Vorausschauende Wartung (z.B. bei Verschmutzung der Optiken)
- 100%-Kontrolle bei Serienprozessen (Anwesenheit und Qualität)

Industrielle Anwendung – Lochplatte.

Folie 20

**GFH**<sup>®</sup>  
laser micro machining



Agenda.

Folie 21

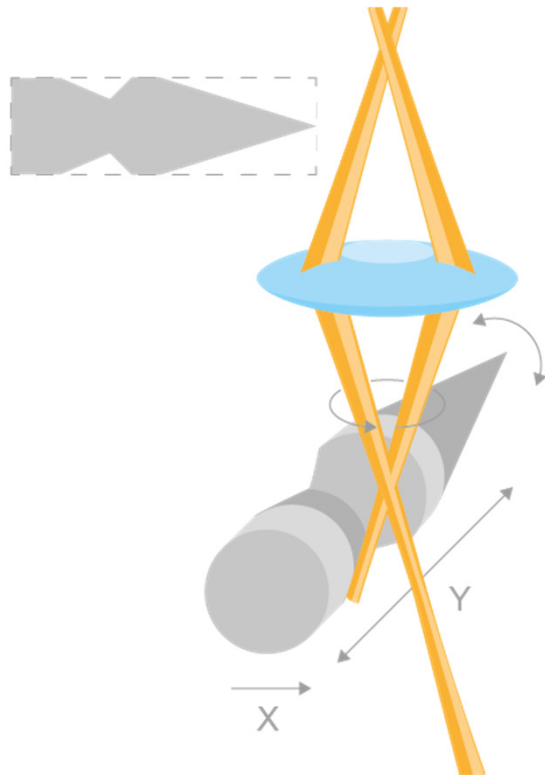


Kurzvorstellung GFH GmbH

Laserbohren – Plasmaüberwachung zur Online-Prozesskontrolle

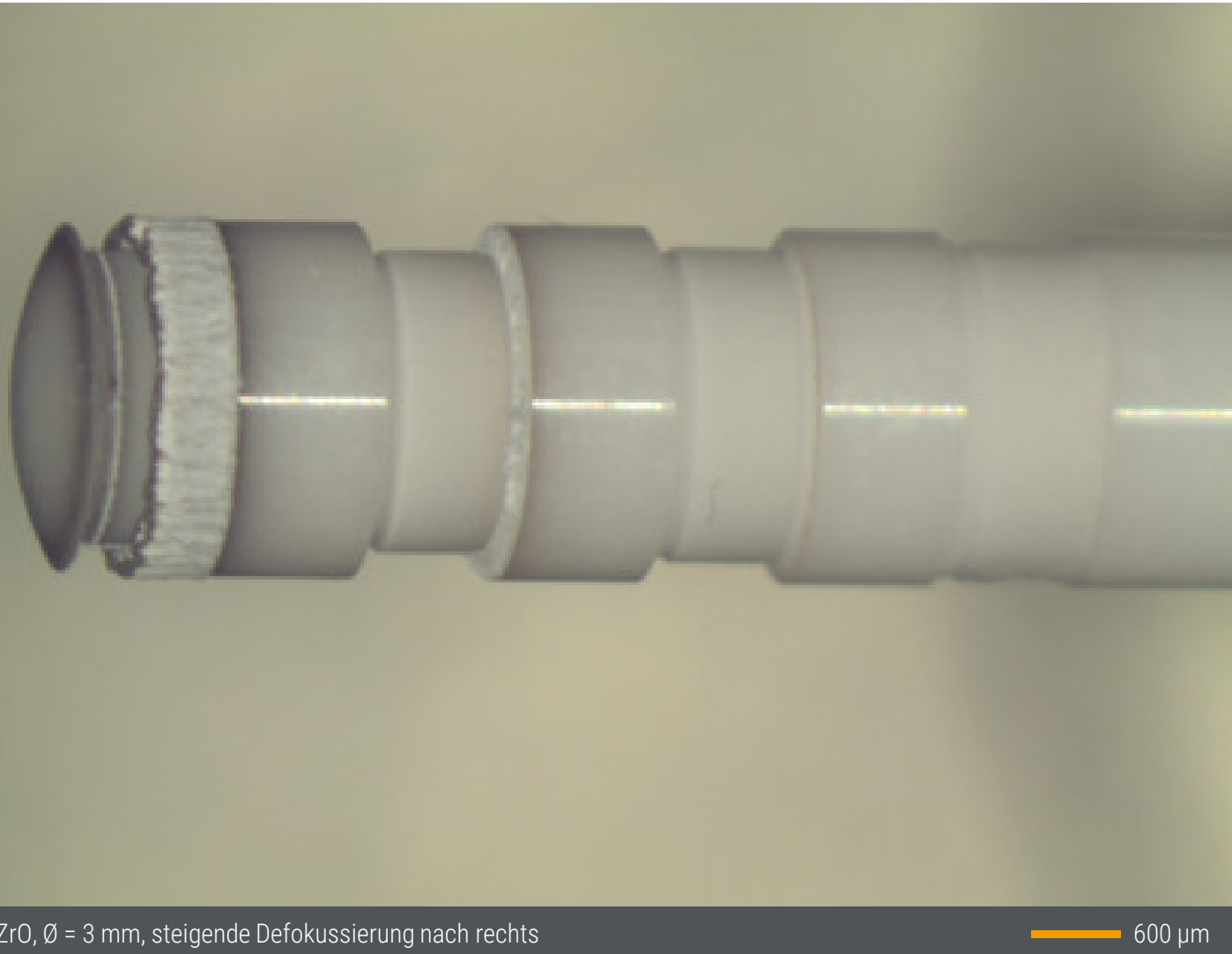
Effizientes Laserdrehen – Laserinduzierte, ionisierende Strahlung

Zusammenfassung



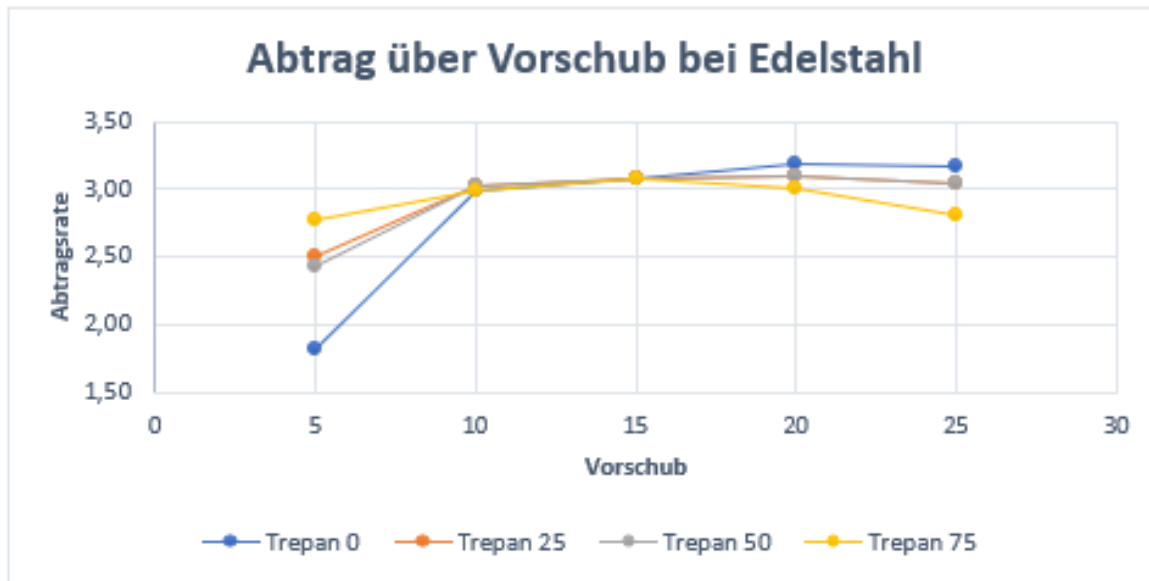
## Laserdrehen

- Kontinuierliche Bauteildrehung
- Rundlauf der Achse definiert die Genauigkeit des Teils
- Laserstrahl ist seitlich im Eingriff
- Axiale und radiale Zustellung über Linearachsen
- Schruppen und Schlichten ohne Qualitätsverlust möglich



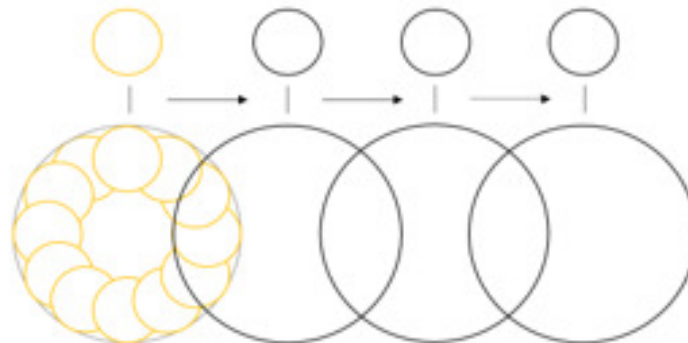
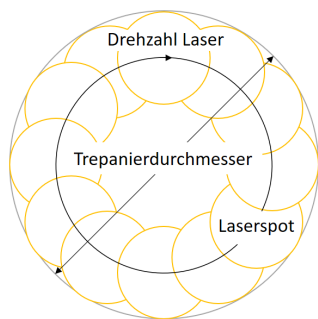
## Schruppen

- Volle Ausnutzung der Laserleistung
- Hohe axiale Zustellung
- Zu hohe Fluenz führt zu Umschmelzen
- Zu niedrige Fluenz senkt den Abtrag
- Fokussierung gemäß optimaler Fluenz für maximalen Abtrag

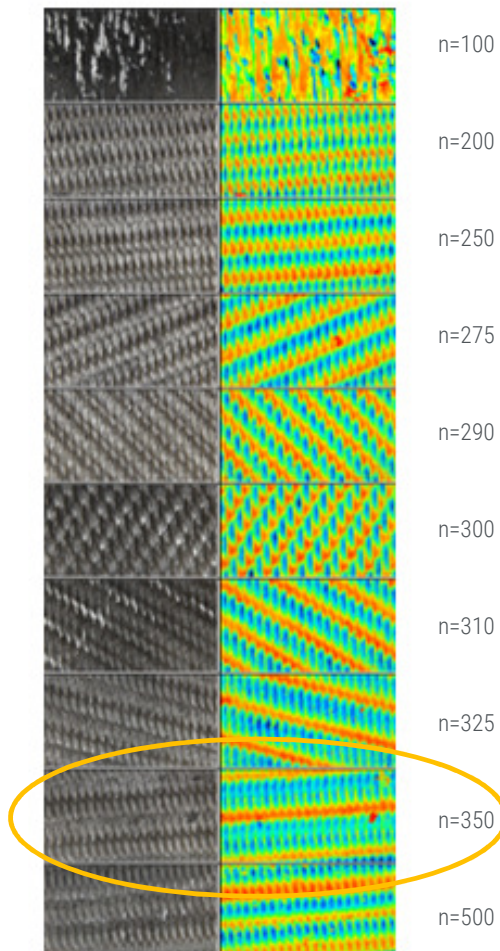


## Schruppen

- Rotation des Laserstrahls bringt nur bei sehr geringen Vorschub eine Erhöhung des Abtrags ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )
- Bei hohem Linearvorschub ( $\text{mm}/\text{min}$ ) sinkt mit Rotationsdurchmesser der Abtrag
- Aber durch Rotation wird höherer Pulsüberlapp in der Linearbewegung erzielt
- Folglich bessere Oberflächenqualität und Erleichterung des Schlichtvorgangs



Edelstahl



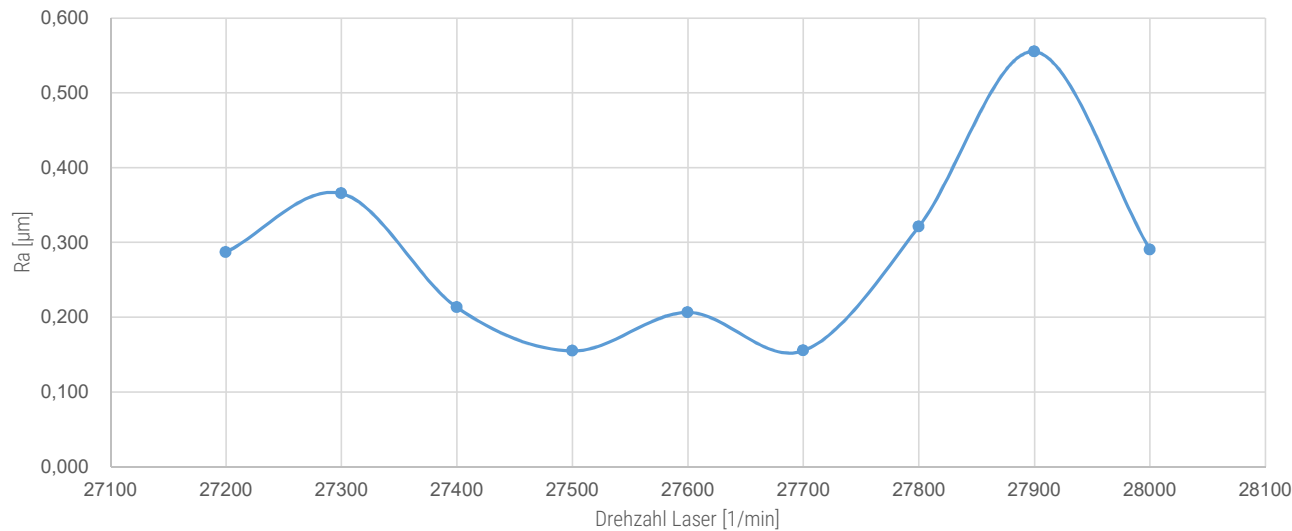
| Drehzahlen<br>[1/min] | Ra<br>[µm] | Rz<br>[µm] |
|-----------------------|------------|------------|
| 100                   | 3,925      | 26,004     |
| 200                   | 0,943      | 6,218      |
| 250                   | 0,842      | 5,008      |
| 275                   | 1,388      | 9,289      |
| 290                   | 1,286      | 6,053      |
| 300                   | 1,393      | 5,716      |
| 310                   | 1,249      | 5,640      |
| 325                   | 0,928      | 5,482      |
| 350                   | 0,902      | 9,887      |
| 500                   | 1,141      | 5,973      |

Minimale Rauigkeit:  
Ra = 0,902 µm

## Schlichten

- Laserleistung und Zustellung sind reduziert
- Konstanter Vorschub, Fluenz und Rotationsgeschwindigkeit der Lasers
- Änderung der Bauteilrotation
- Signifikanter Änderung der Rauigkeit
- Wellenmuster ändert Steigung
- Muster scheint sich zu wiederholen

Ra über Laserdrehzahl bei Edelstahl



Rauigkeit vor Optimierung :  $R_a = 0,902 \mu\text{m}$

## Schlichten

- $R_a$  ändert sich mit der Wellenstruktur
- Ausprägung von Wellen entlang der Umfangsrichtung
- Bauteil- und Laserdrehzahl bestimmen die Anzahl der Wellen in Umfangsrichtung
- Zwei Minima prägen sich aus
- $R_a$ : Verbesserung um Faktor 6!
- Kurve wiederholt sich

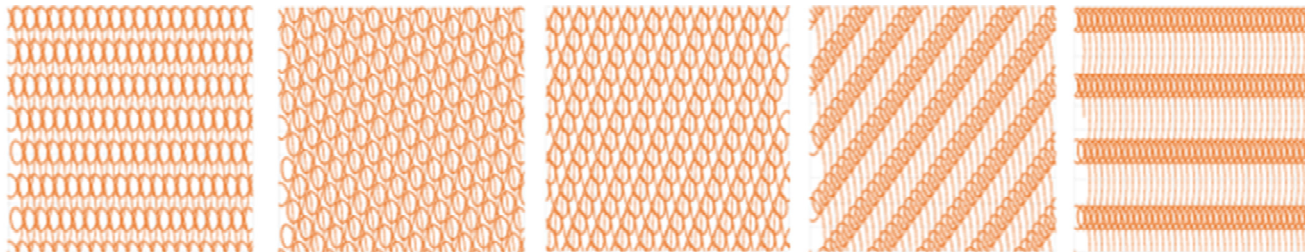
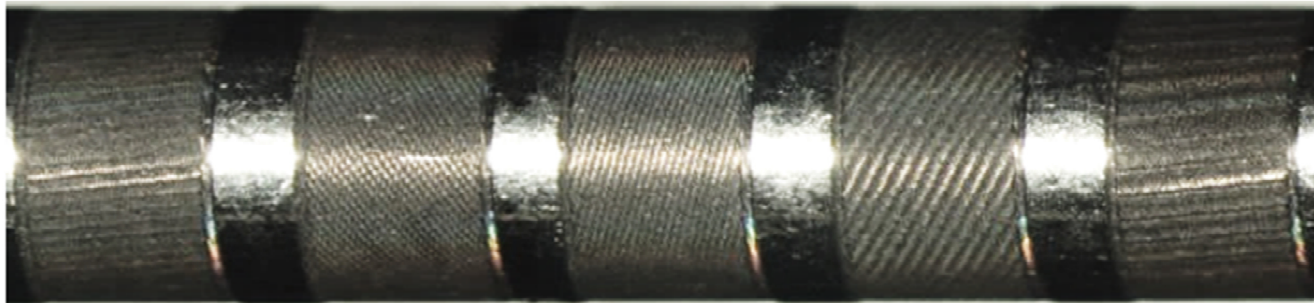
27600 rpm

27700 rpm

27800 rpm

27900 rpm

28000 rpm



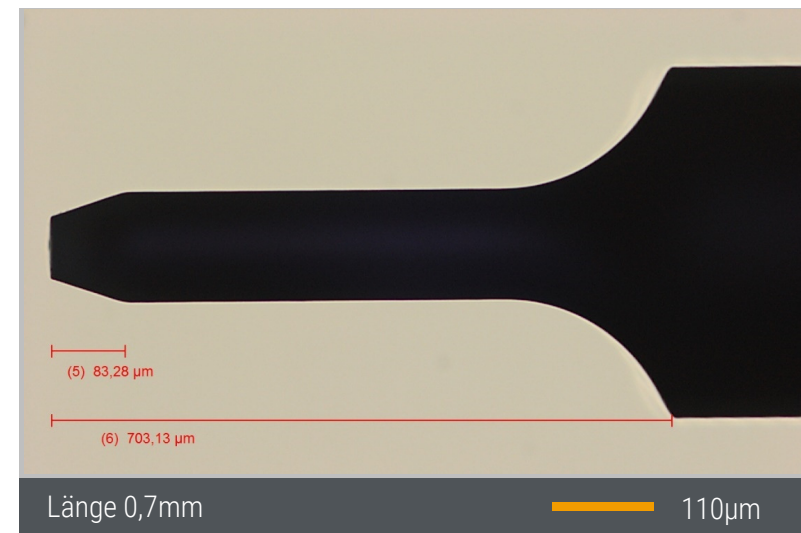
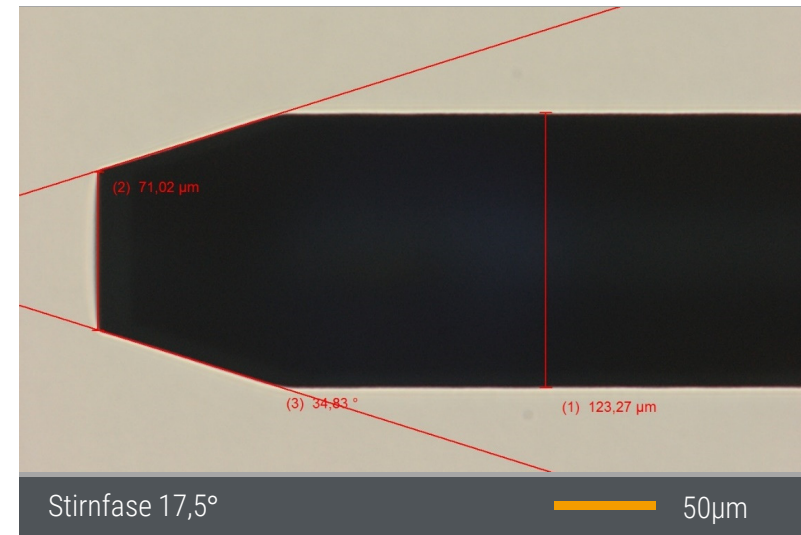
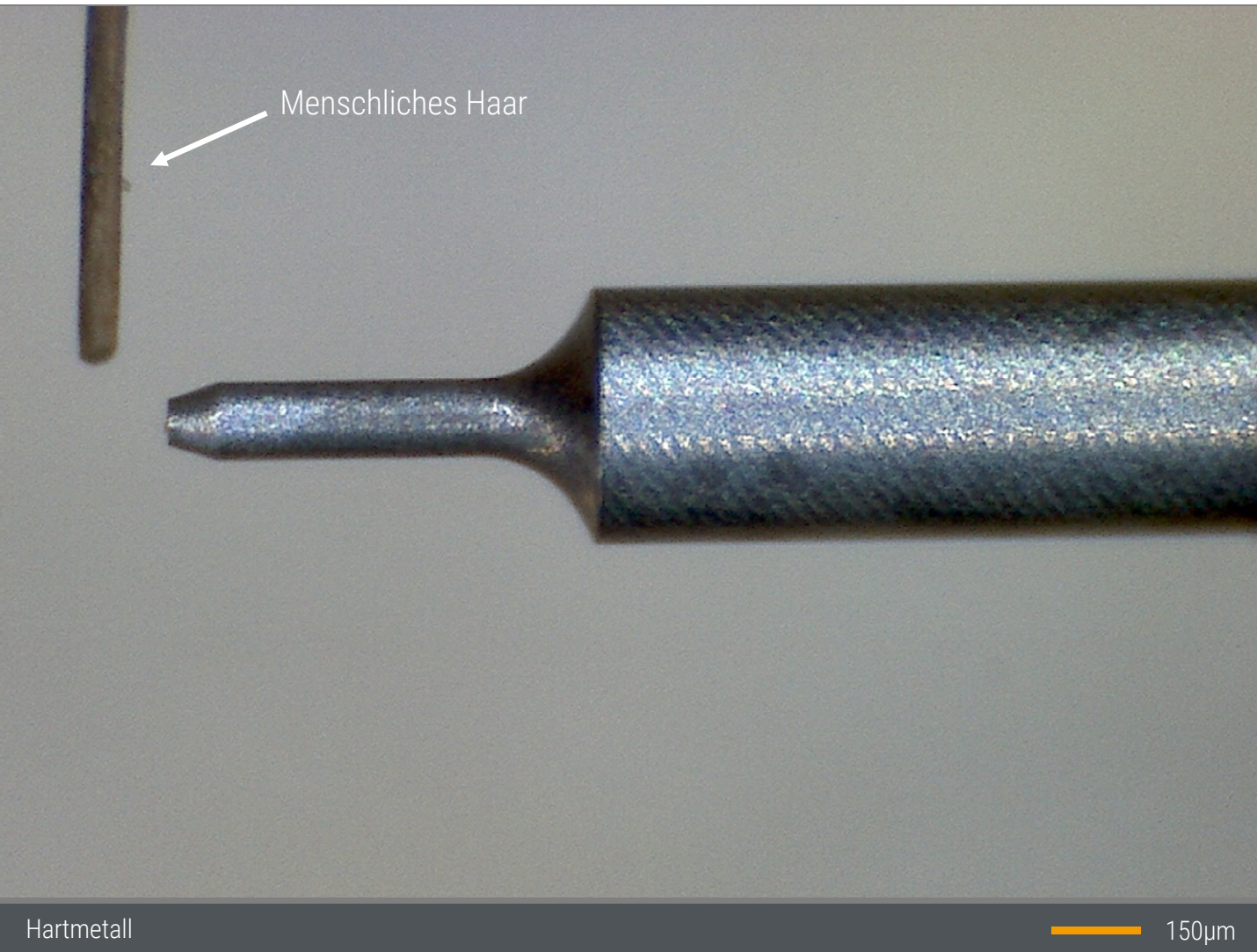
## Schlichten

- Mathematische Bestimmung der Wellenstruktur möglich
- Vorhersage / Abschätzung des optimalen Arbeitspunkts möglich

- Schruppen ist ein abtragender Prozess, der die optimale Fluenz benötigt
- Strahlrotation bringt keinen Vorteil hinsichtlich Abtragsrate, verbessert jedoch die Oberflächenqualität
- Beim Schlichten entsteht eine Wellenstruktur durch Überlagerung der Rotationsbewegungen des Bauteils und des Lasers
- Minimale Rauigkeit entsteht bei optimalem Versatz zwischen den Wellen von aufeinanderfolgenden Umfangslinien
- Mathematische Vorhersage führt zu deutlich reduzierter Einstellzeit

Laserdrehen – industrielle Anwendung.

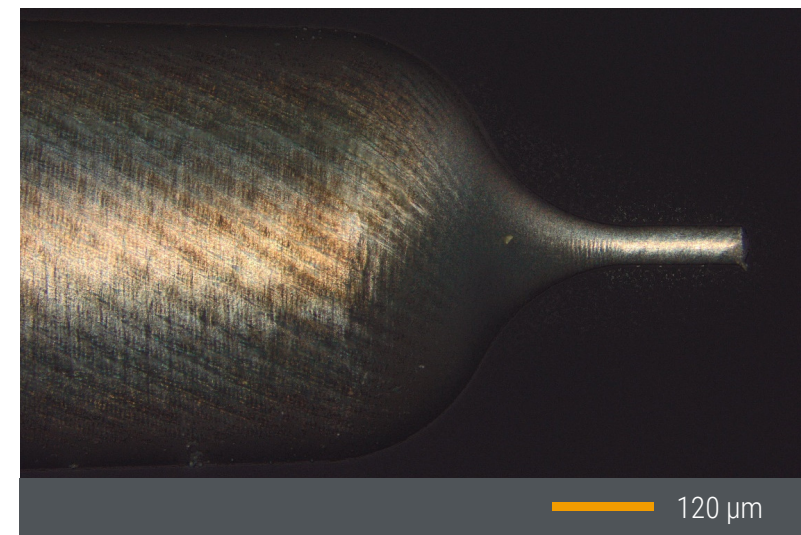
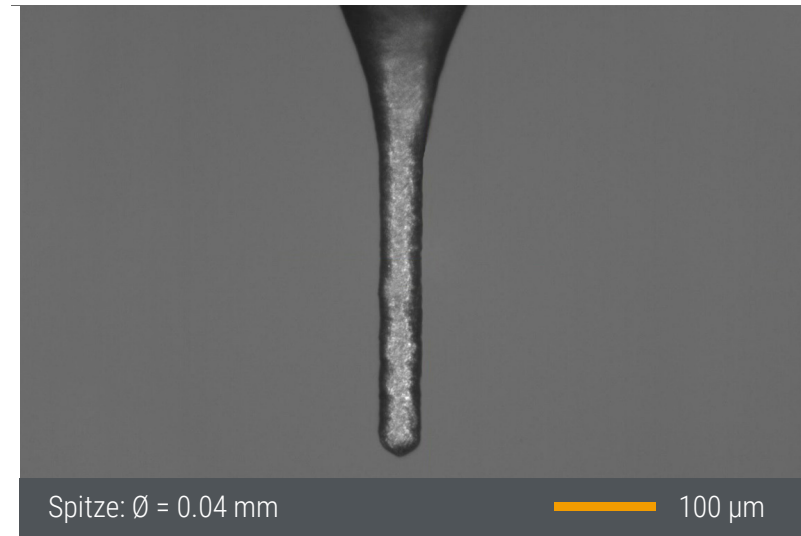
Folie 29

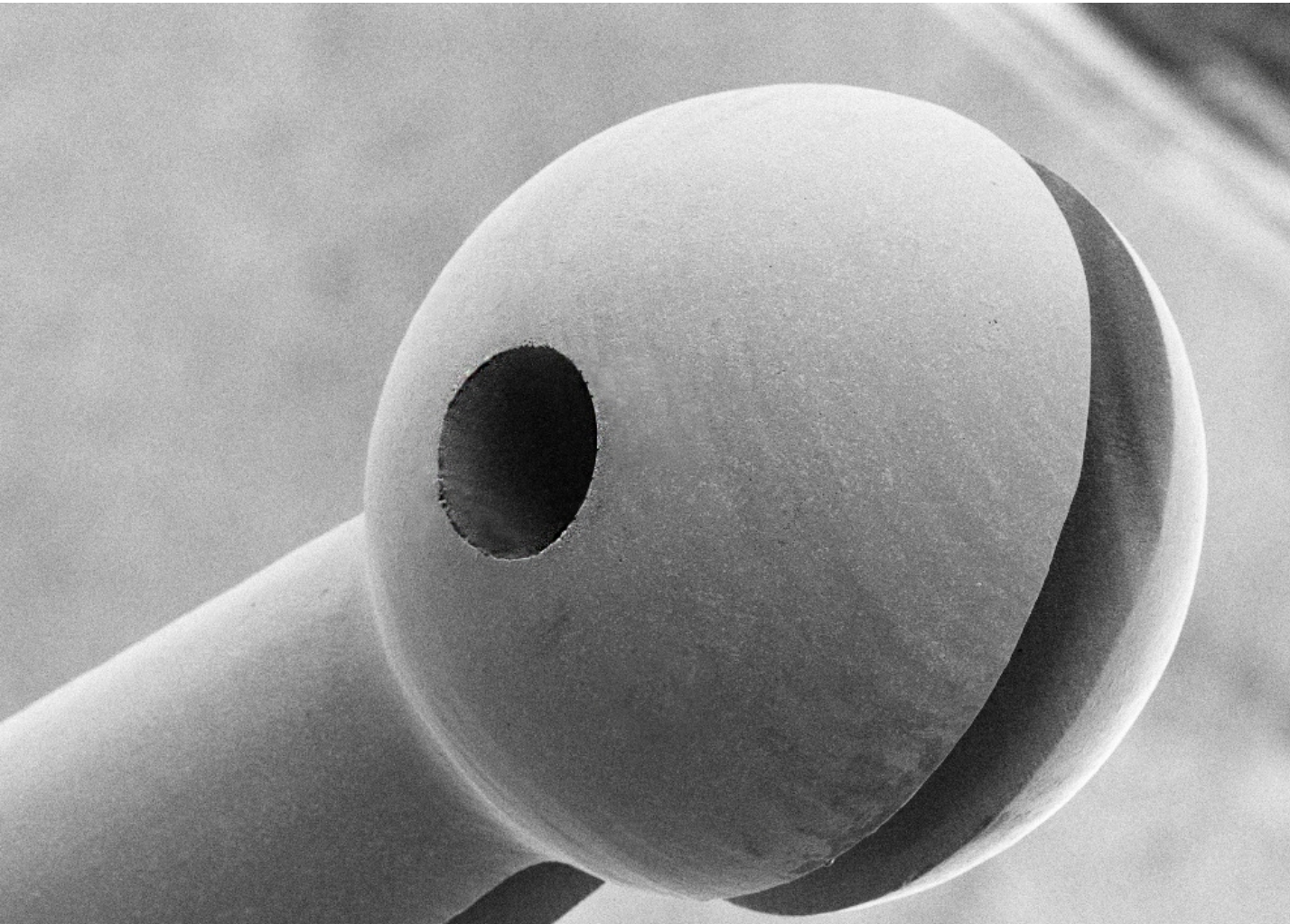


Laserdrehen – industrielle Anwendung.

Folie 30

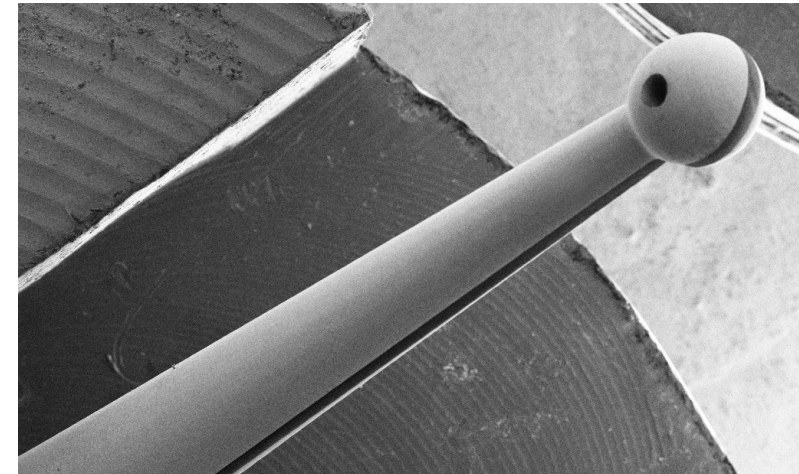
**GFH**<sup>®</sup>  
laser micro machining



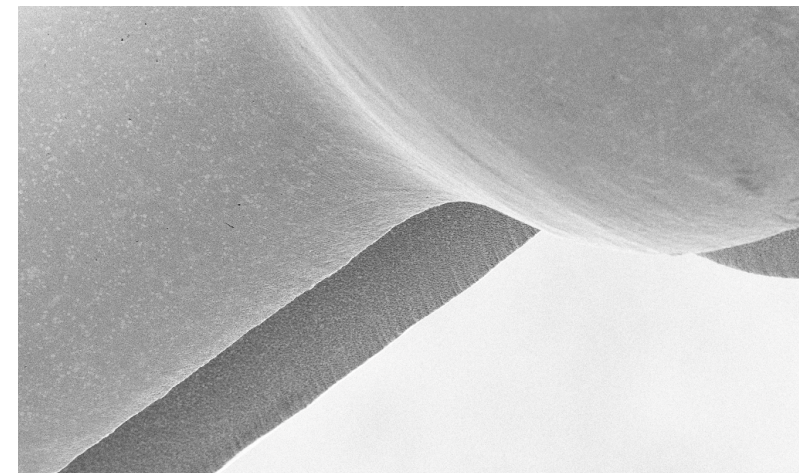


Hartmetall, Mikropinzette mit Kugelkopf

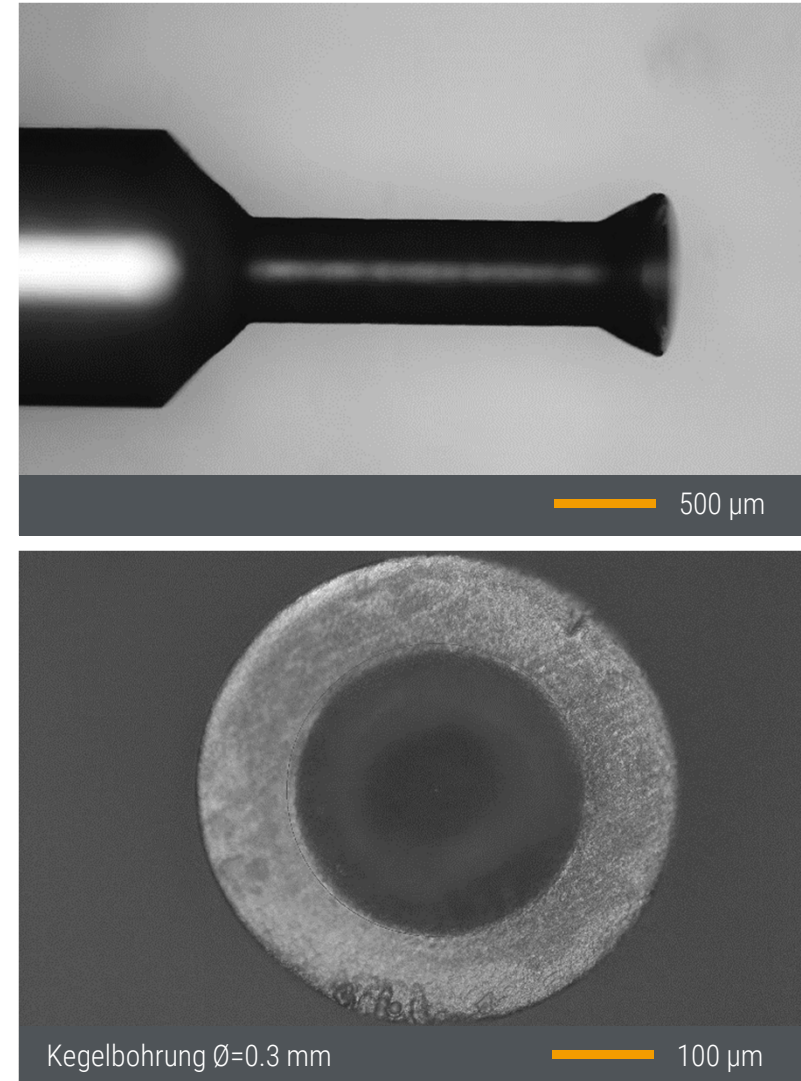
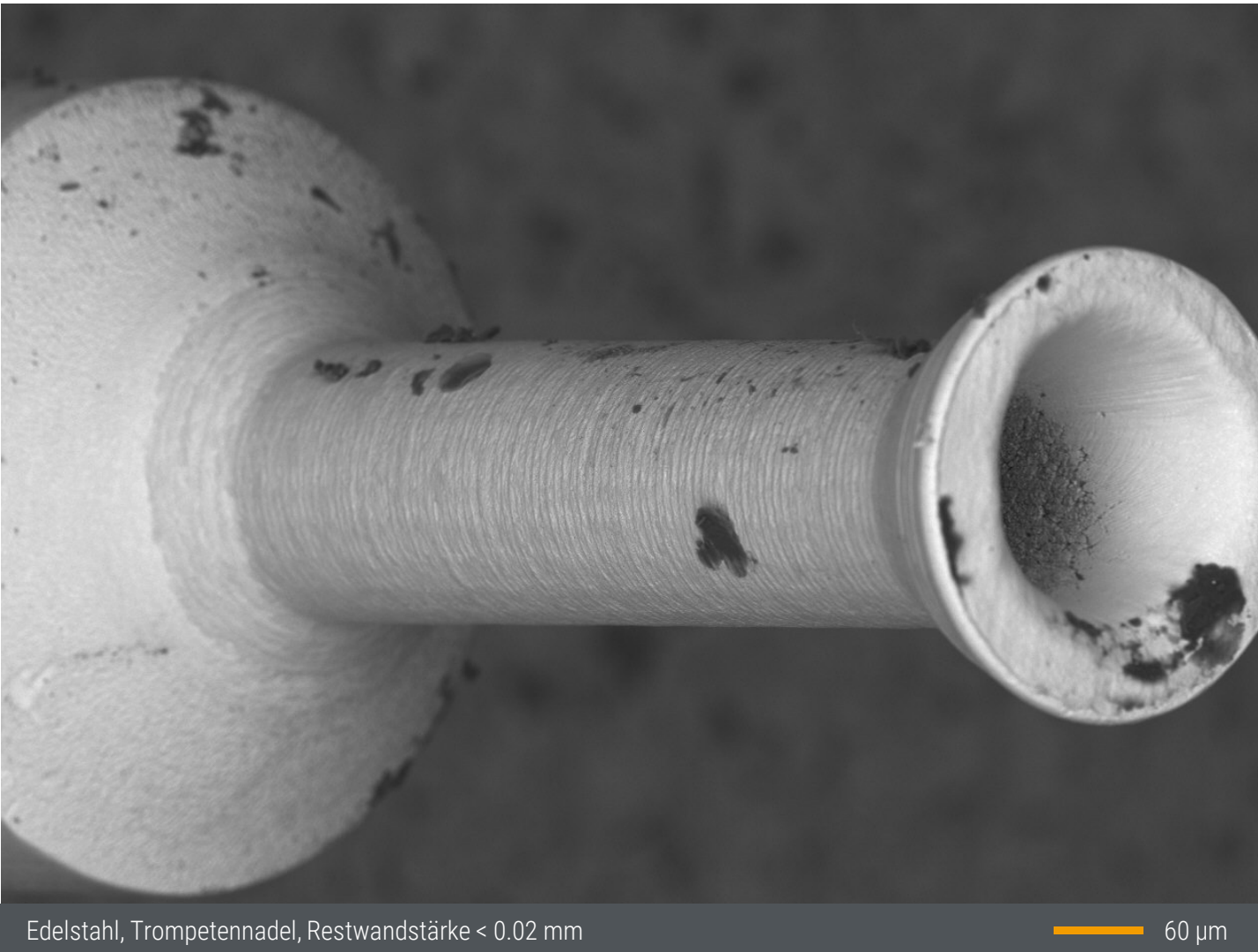
60 µm



500 µm

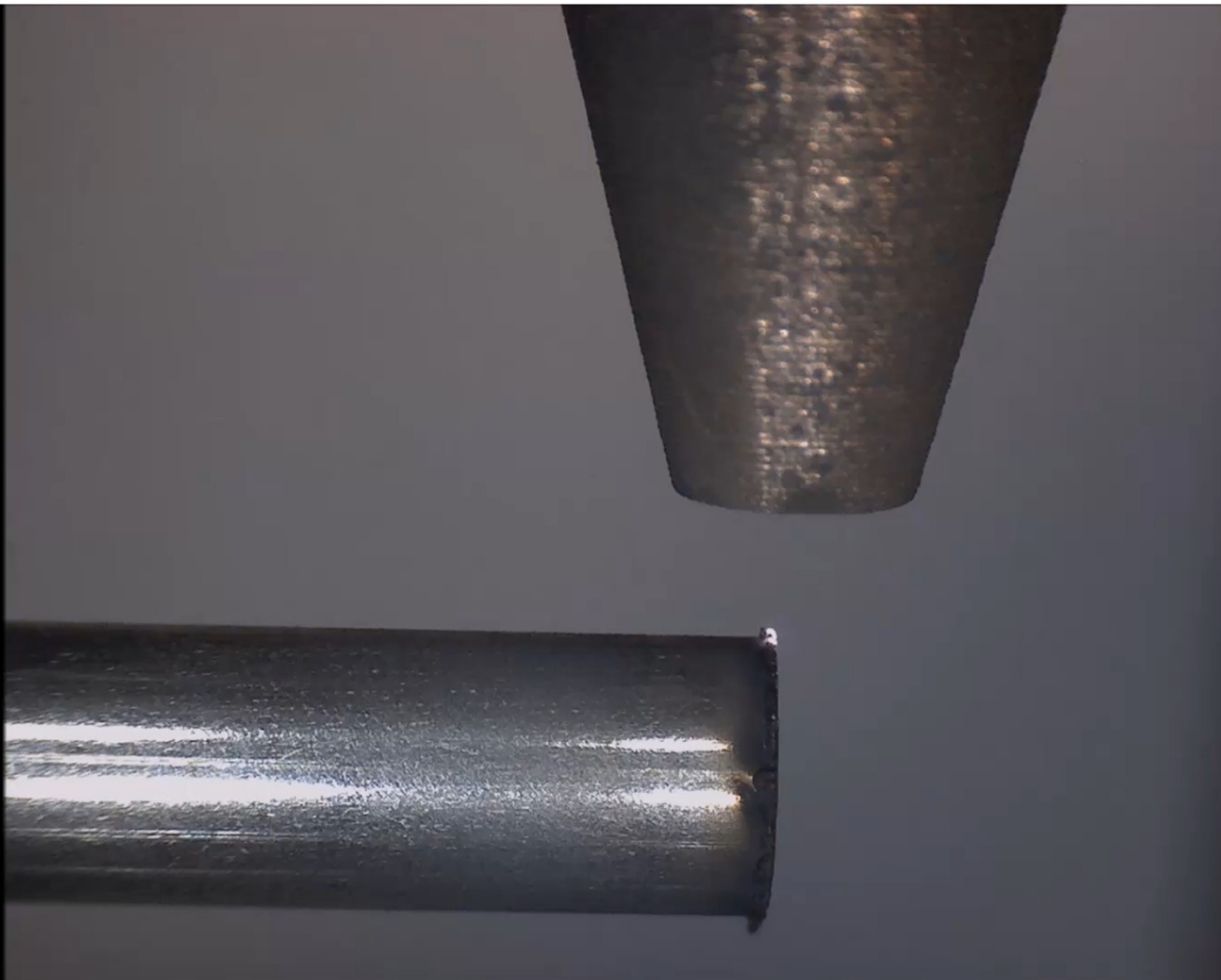


50 µm



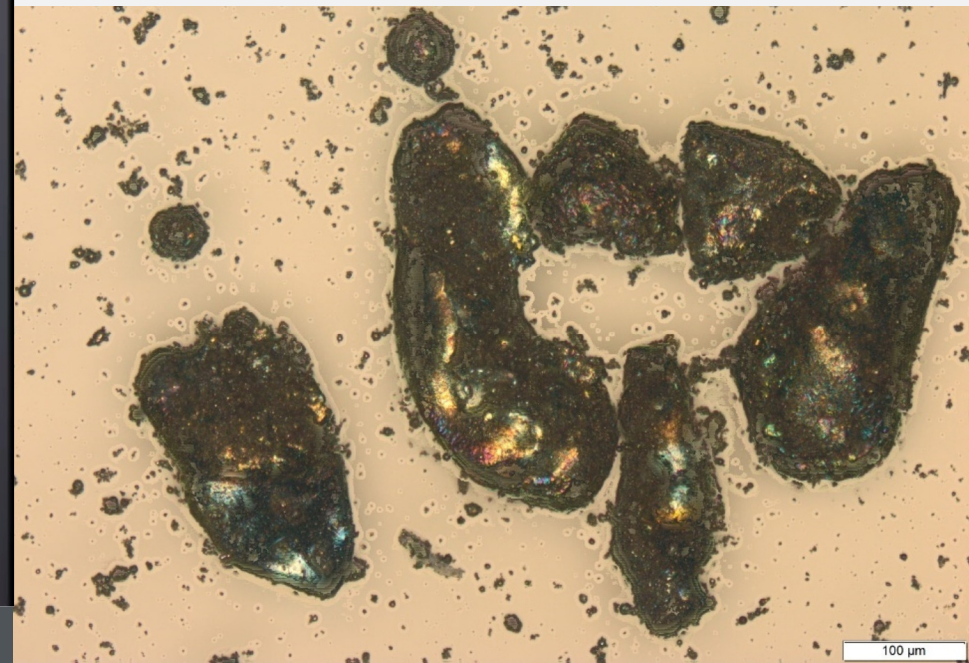
## Optimiertes Schrappen

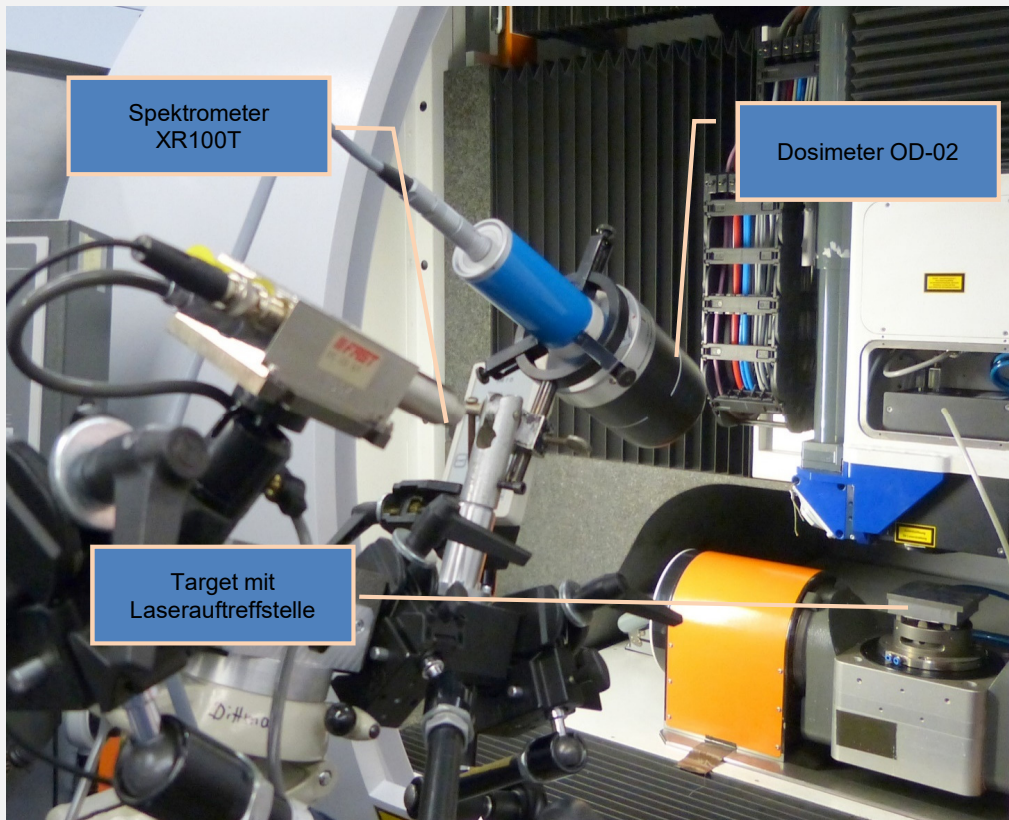
- Zeitersparnis > Faktor 7
- Kein rein ablativer Prozess
- Herausbrechen von Partikel bis 500µm
- Abtragsrate 12mm<sup>3</sup>/min (20W, 1.030nm, 800fs)



Cr-Ni-Stahl, Video-Geschwindigkeit 8x

500 µm

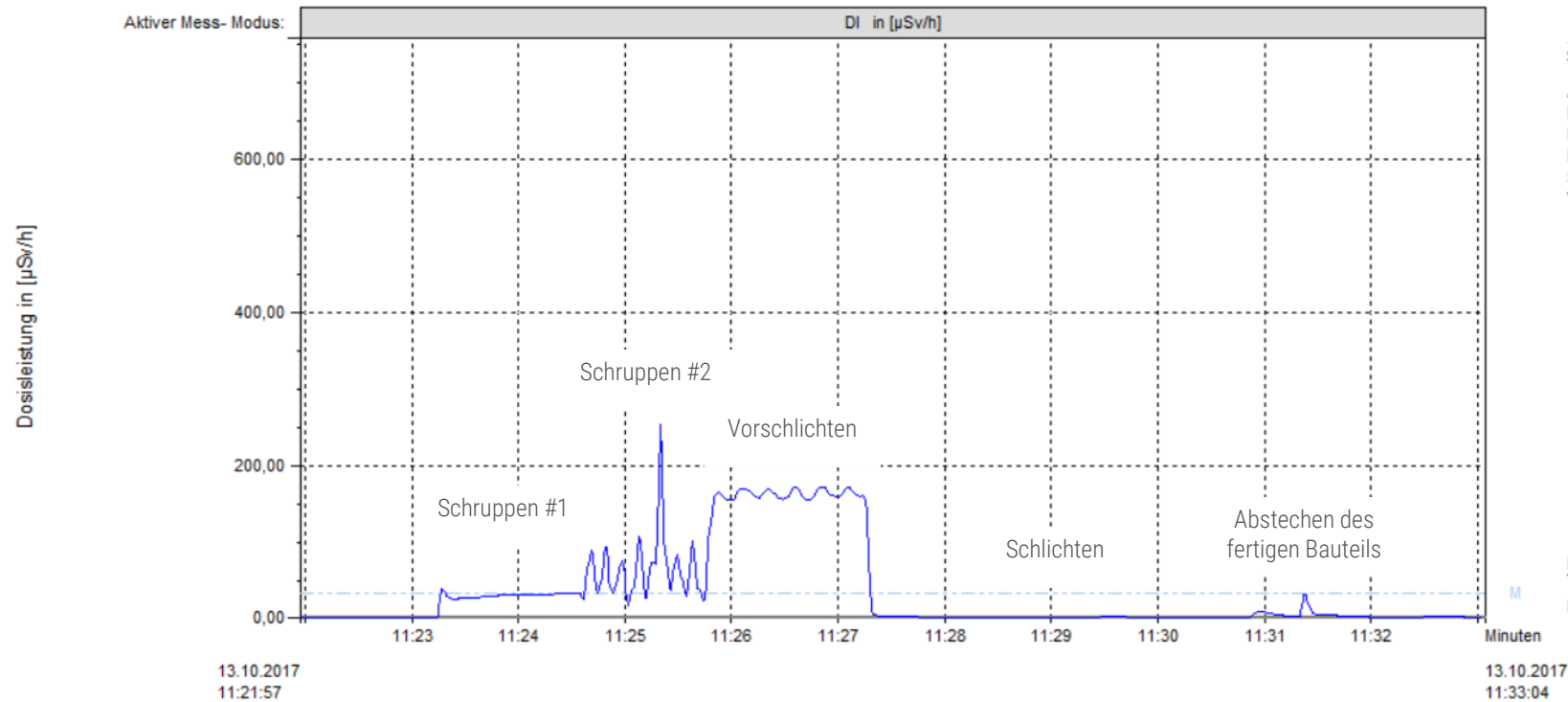




## Messmittel

- Ortsdosimeter OD-02 von Fa. Step
- Spektrometer XR100T mit CdTe-Detektor von Fa. Amptek mit und ohne Wolfram-Zylinder (Leihgabe vom BAM)
- Taschenradiometer SM 7 D zum Vergleich / zur Evaluierung
- Aktivitätsnormal Fe-55 zur Dosimeter-Überprüfung

## Röntgenstrahlung – UKPL – Messergebnis Laserdrehen.



### Zusatzinformationen für aktuellen Diagramm- Ausschnitt:

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| Anzahl Messwerte:      | 658                   |
| Mittelwert:            | 34.0 $\mu\text{Sv/h}$ |
| Maximalwert:           | 252 $\mu\text{Sv/h}$  |
| Minimalwert:           | 0.03 $\mu\text{Sv/h}$ |
| Standard-Abweichung:   | 56.1 $\mu\text{Sv/h}$ |
| Variationskoeffizient: | 164.8 %               |

Leistung: 10 W (50  $\mu\text{J}$  @ 200 kHz)

### Informationen zur Maus-Position:

Messwert:

Abstand: 210 mm  
Mittelwert: 34,0  $\mu\text{Sv/h}$

Hintergrundstrahlung: 0,25  $\mu\text{Sv/h}$   
Maximalwert: 252  $\mu\text{Sv/h}$

Europäischer Grenzwert: 1,0  $\mu\text{Sv/h}$

- Gesetzliche Basis – Arbeitsschutz gilt immer; Strahlenschutz in Klärung
  - EU-Strahlenschutzrichtlinie 2015; Europäischer Grenzwert  $<1\mu\text{Sv/h}$  (100mm Abstand von berührbarer Oberfläche)
  - Maschinen gemäß Maschinenrichtlinie (Sicherheitseinrichtungen)
  - Maschinen fallen vermutlich unter Strahlenschutz – Strahlenschutzverordnung aktuell im Bundesrat zur Verabschiedung
  - Strahlenschutzbeauftragte? Zukünftig UKPL-spezifische Strahlenschutz Ausbildung geplant
- Sicherheit der Maschinenumhausungen
  - Neumaschinen mit Röntgenschutzscheibe; Nachrüstung für Bestandsmaschinen
  - Einzelabnahme jeder Maschine durch Messung der Dosisleistungen außerhalb der Schutzumhausung bei Worst-Case-Bearbeitungsszenarien
- Information an Kunden
  - Kunde wird entsprechend der aktuellen Situation und Kenntnisstand informiert
  - Kunde muss sich an die benannte Stelle (länderabhängig) wenden
- Austausch mit diversen Industriepartnern (Trumpf, Bosch, Step)
- Unterweisung der GFH Mitarbeiter im Rahmen der regelmäßigen Sicherheitsunterweisungen

Agenda.

Folie 37



Kurzvorstellung GFH GmbH

Laserbohren – Plasmaüberwachung zur Online-Prozesskontrolle

Effizientes Laserdrehen – Laserinduzierte, ionisierende Strahlung

Zusammenfassung

- Ultrakurzpulslaser haben herausragende Eigenschaften für die Präzisionsfertigung
- Aber Qualität alleine reicht nicht: „Time is money“
- Umsetzen hohe Laserleistung bedarf Maschinenteknik und Prozessverständnis => Produktivität
- Plasmaanalyse ermöglicht Bohrzeitverkürzung, vorausschauende Wartung und 100%-Kontrolle
- Simulation der Rotationsbewegungen beim Laserdrehen liefert optimale Parametereinstellung für minimale Rauigkeit
- Weitere Prozessfenster zur deutlichen Abtragssteigerung beim Schruppen möglich
- Thematik UKPL-Röntgenstrahlung durch entsprechende maschinenbauliche Maßnahmen sicher
- Vorgaben, Messvorschriften etc. seitens der Behörden noch in Klärung



*Think ultrafast. Think precise. Think ahead.*

# Herzlichen Dank.

GFH GmbH  
Großwalding 5  
94469 Deggendorf

Dr.-Ing. Frank Siegel  
[frank.siegel@gfh-gmbh.de](mailto:frank.siegel@gfh-gmbh.de)  
[www.gfh-gmbh.de](http://www.gfh-gmbh.de)  
+49 991 290 92 170