



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge

IFSW

Hochpräzise Bearbeitung von CFK mittels gepulster Laserstrahlung

**Dr.-Ing. Christian Freitag, Daniel Holder,
Dr. Taras Kononenko*, Dr. Maxim Komlenok*,
Matthias Buser, Steffen Boley,
Dr. Rudolf Weber, Prof. Dr. Thomas Graf**

*General Physics Institute, Moskau

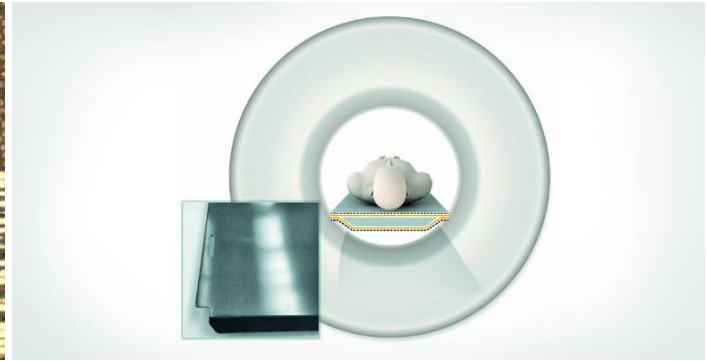
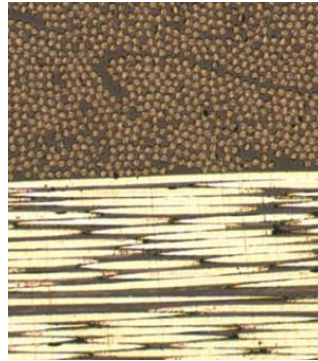
Potential von Carbonfaser verstärkte Kunststoffen (CFK)

Beispiel Medizintechnik

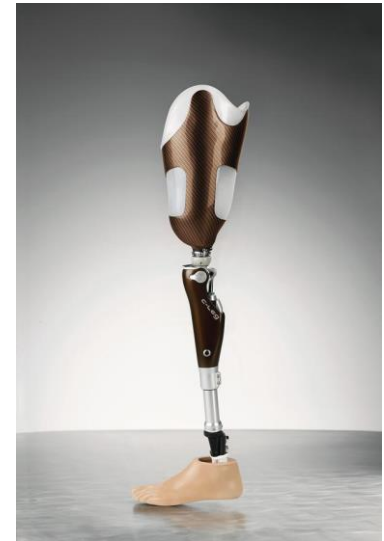
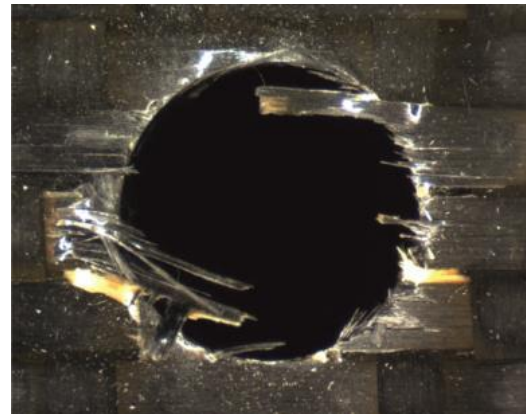
- CFK bestehen aus **Carbonfasern** eingebettet in ein **Matrixmaterial**
- Idealer Leichtbau-Werkstoff
- Mechanische Bearbeitung herausfordernd
 - Delamination, Ausbrüche, Ausfransungen, Verschleiß...



Alternative: Laser



Quelle: www.carbon-composites.eu



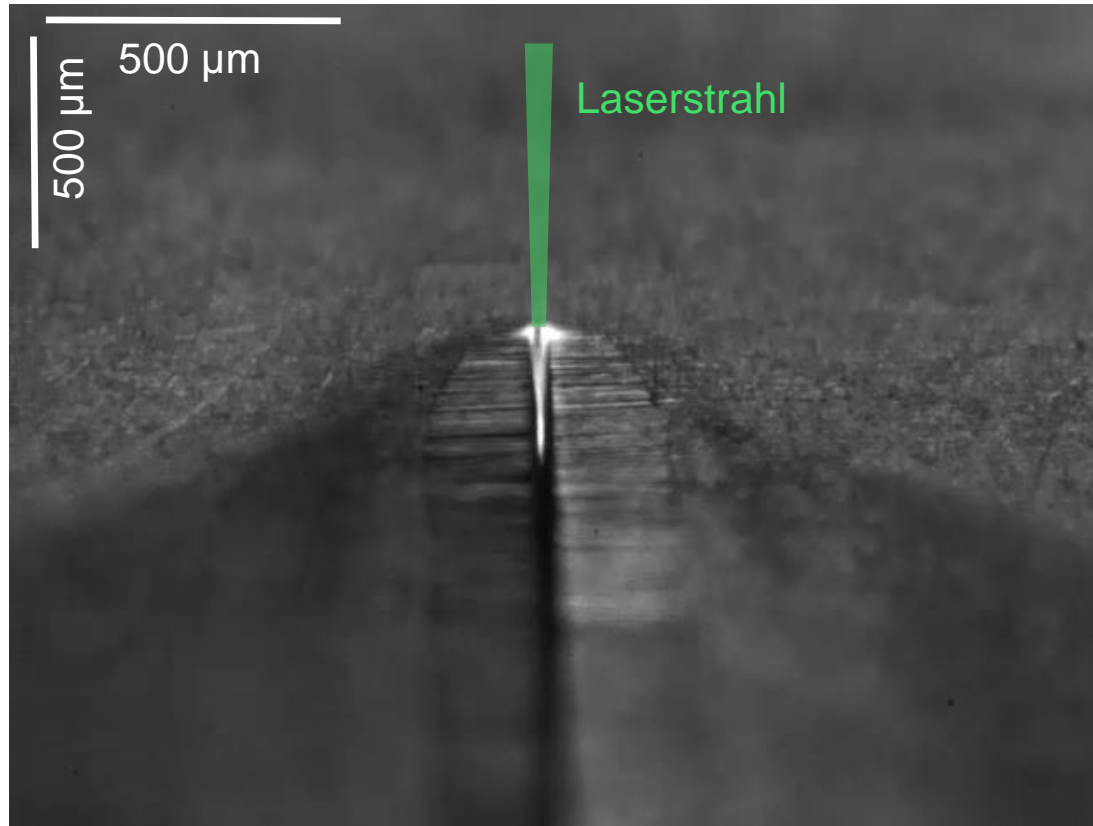
Quelle:

<https://industrieanzeiger.industrie.de>

Laserbearbeitung von CFK

Herausforderungen

1. Ausbildung einer thermischen Schädigung



Parameter:

Mittlere Leistung

22 W

Wellenlänge

515 nm

Pulsfrequenz

800 kHz

Pulsdauer

8 ps

Fokusbereich

33 µm

Vorschub

2000 mm/min

Laserbearbeitung von CFK

Herausforderungen

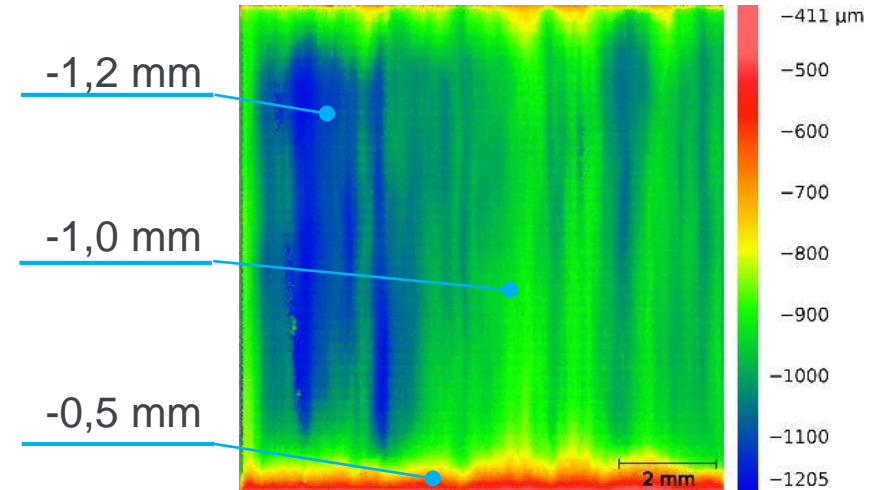
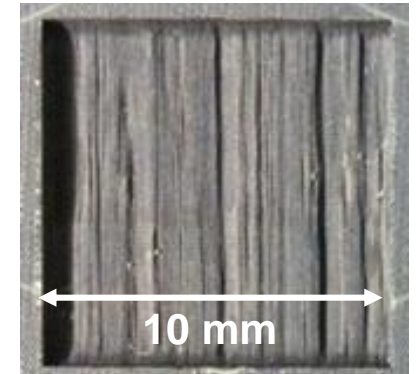
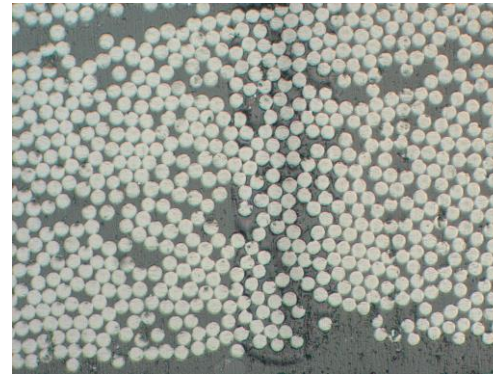
2. Inhomogener Materialabtrag

Standard Abtragsprozess:

- CFK sehr inhomogenes Material
- Zunehmende Rauheit der Oberfläche mit zunehmender Abtragstiefe
- Mittlere Rauheit R_a von bis zu $350 \mu\text{m}$ bei 1 mm tiefem Abtrag!

Lagengenauer Abtrag von CFK mit einem Standard-Hatchingprozess quasi unmöglich.

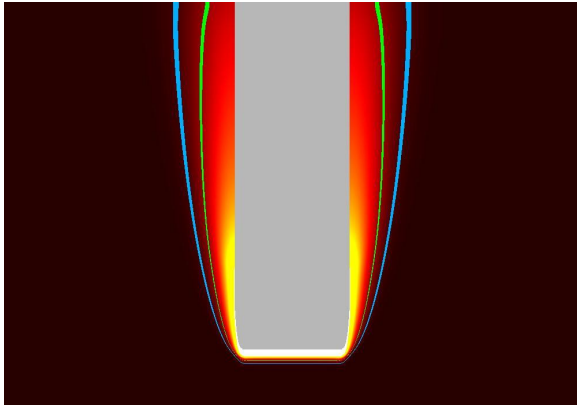
Unidirektionales CFK



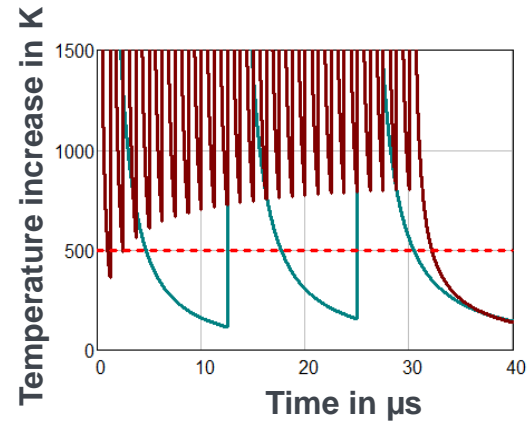
Laserbearbeitung von CFK

Strategien zur Erreichung höchster Präzision

- Ausreichend hohe Intensität



- Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten



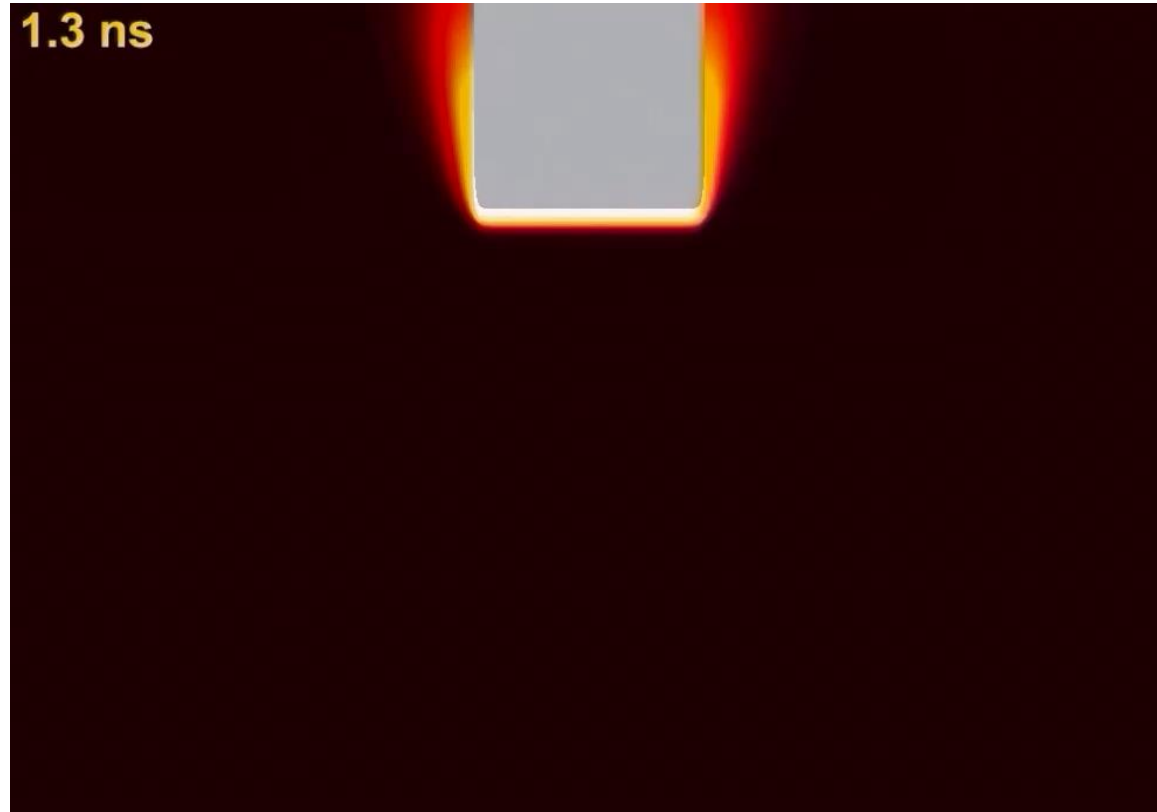
- Prozessregelung



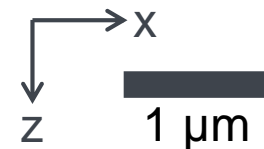
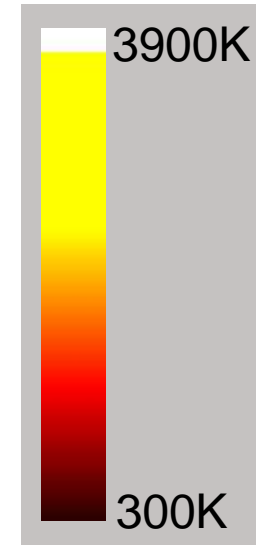
Strategien für höchste Präzision

1. Ausreichend hohe Intensität

- $I_{\text{Abs}} = 10^{11} \text{ W/cm}^2$, Flat-top Intensitätsprofil, einzelne Carbonfaser



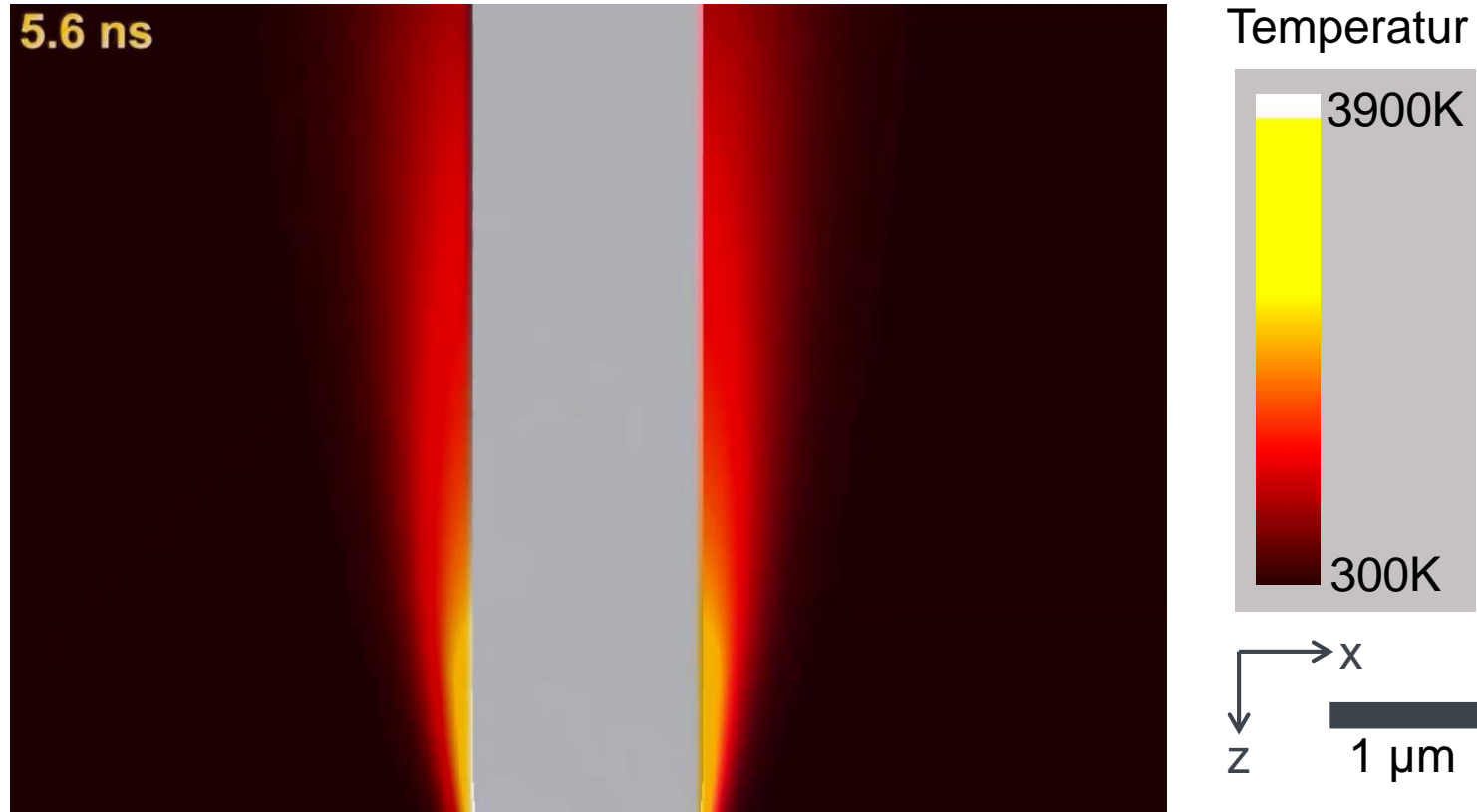
Temperatur



Strategien für höchste Präzision

1. Ausreichend hohe Intensität

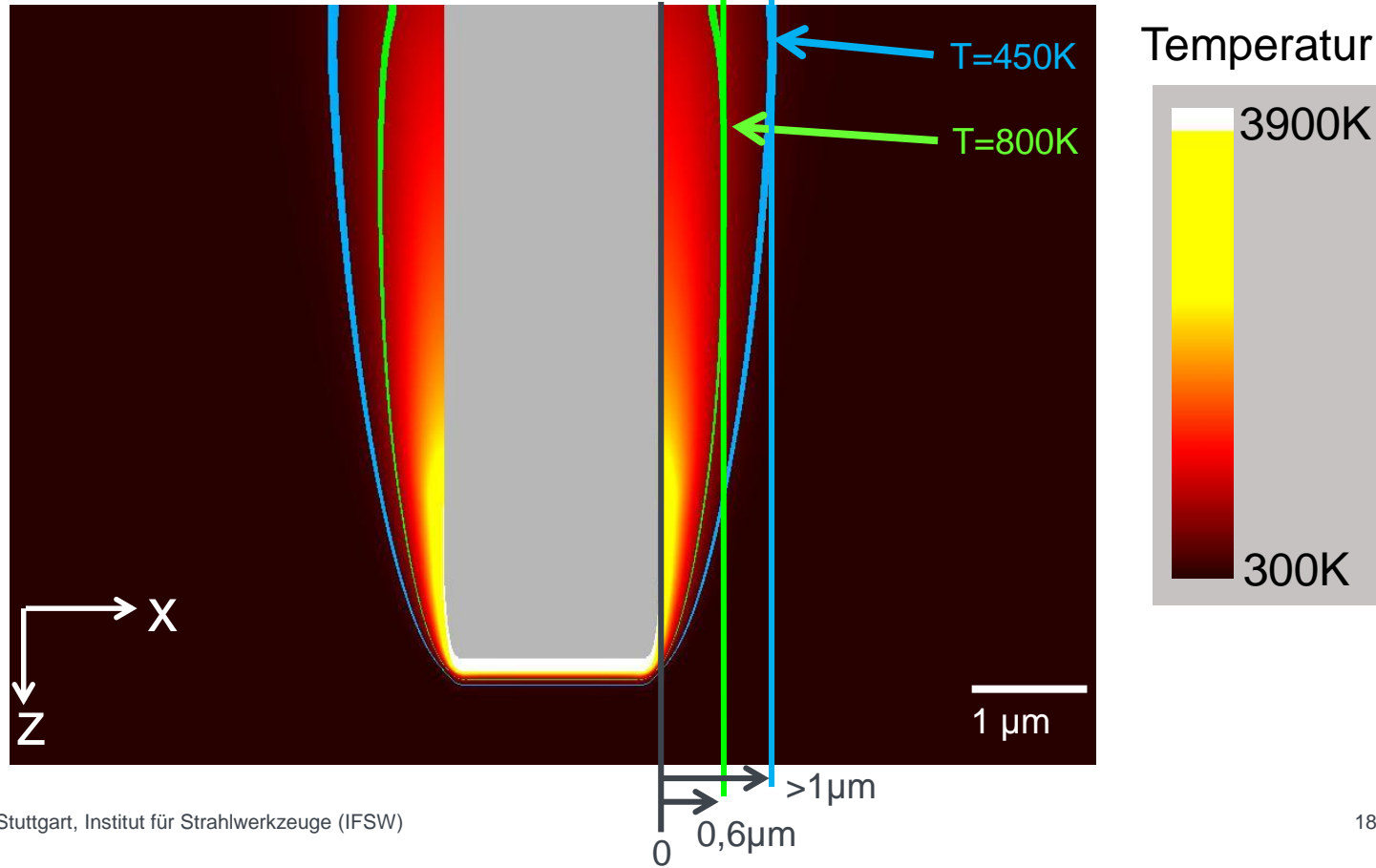
- $I_{\text{Abs}} = 10^{11} \text{ W/cm}^2$, Flat-top Intensitätsprofil, einzelne Carbonfaser



Strategien für höchste Präzision

1. Ausreichend hohe Intensität

- $I_{\text{Abs}} = 10^{11} \text{ W/cm}^2$, Flat-top Intensitätsprofil, einzelne Carbonfaser



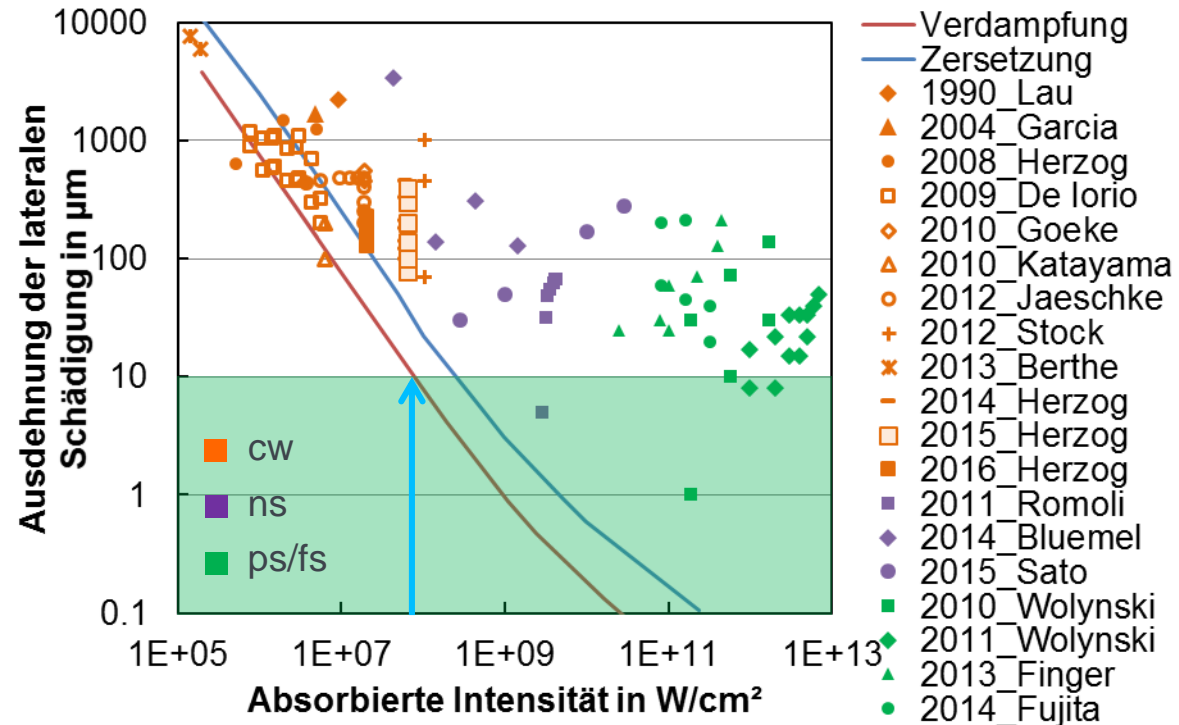
Strategien für höchste Präzision

1. Ausreichend hohe Intensität

Ausreichend
hohe
Intensität:

MVZ < 10 μm

$I > 10^8 \text{ W/cm}^2$



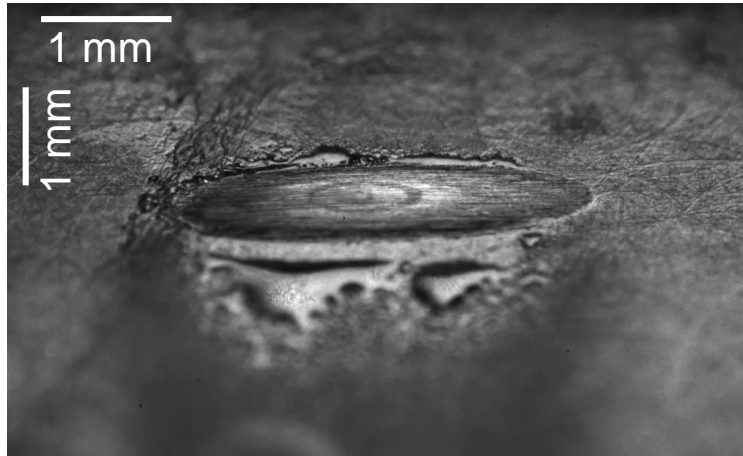
R. Weber, M. Hafner, A. Michalowski, T. Graf, "Minimum Damage in CFRP Processing". Phys. Procedia 12, 2011, 302-307.

Strategien für höchste Präzision

2. Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten

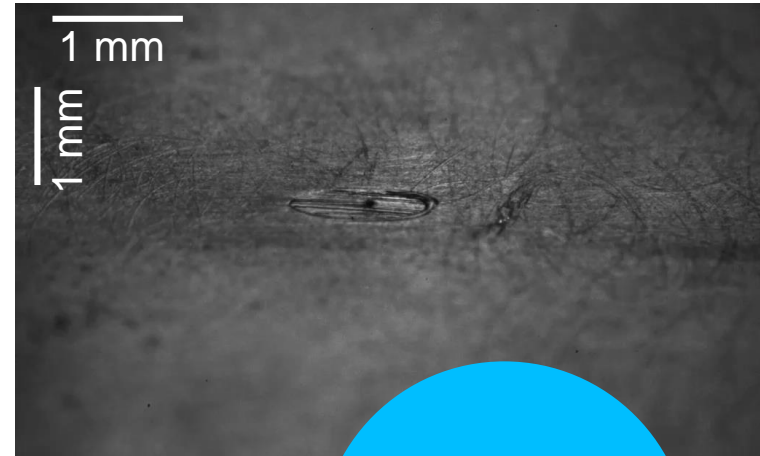
- Perkussionsbohrungen mit gleicher mittlerer Laserleistung aber unterschiedlicher Pulsfrequenz / Pulsenergie

800 kHz, 7 μ J



$\lambda = 515 \text{ nm}$, $\tau = 8 \text{ ps}$, $d_f = 33 \text{ }\mu\text{m}$

5,5 W



200 kHz, 28 μ J

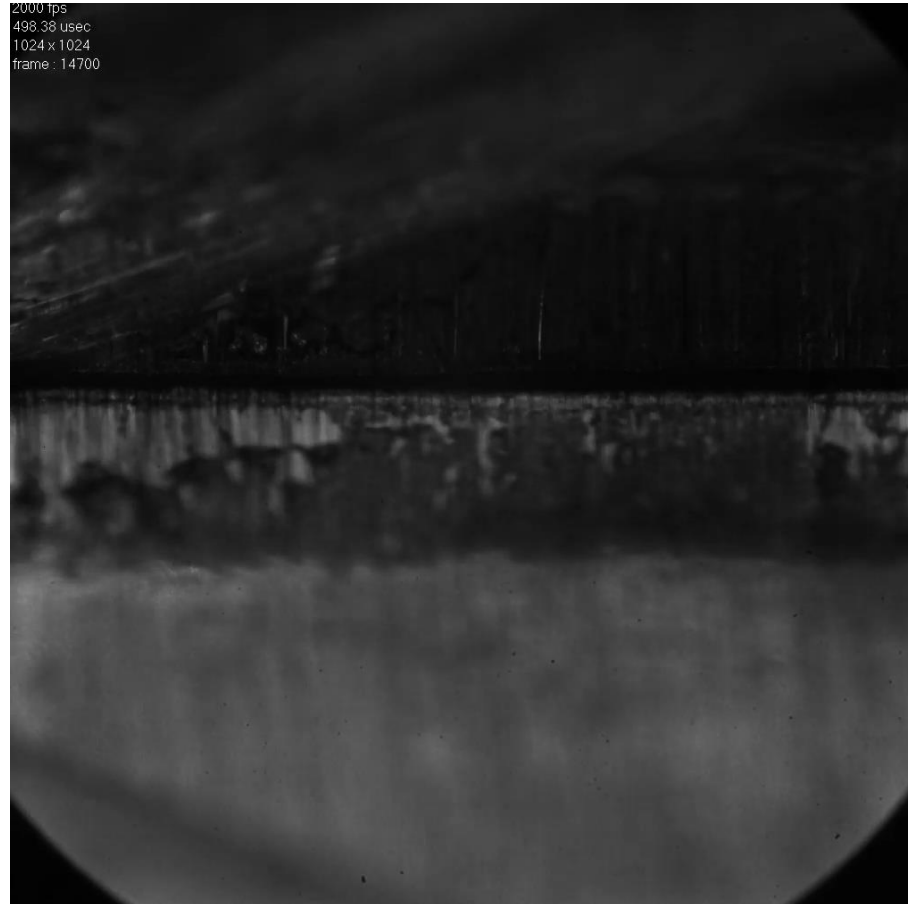
Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen (WAP)

Bewegter Strahl?

Strategien für höchste Präzision

2. Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten

**Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
aufeinanderfolgenden
Scans (WAS)**



Pulsfrequenz:

300 kHz

Pulsenergie:

230 μ J

Vorschub:

1,5 m/s

**Anzahl Pulse
pro Ort:**

8

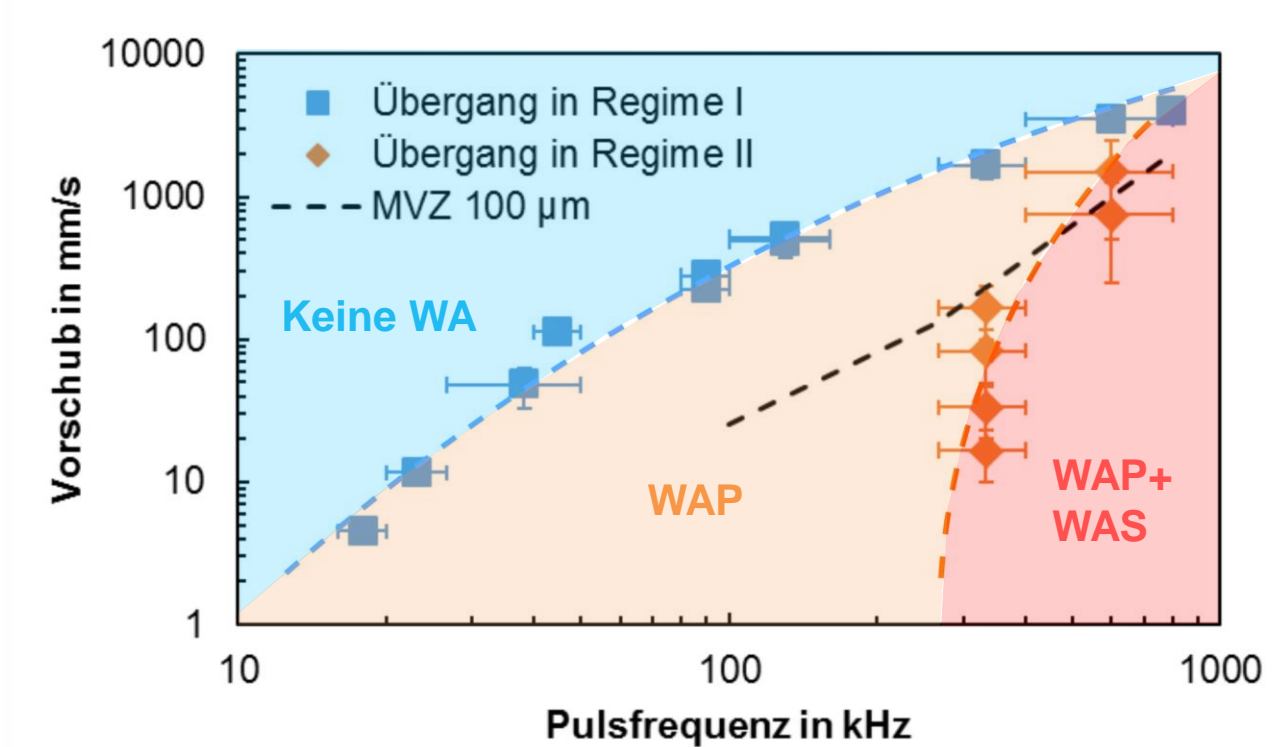
**Anzahl
Überfahrten:**

500

Strategien für höchste Präzision

2. Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten

Vermeiden der Wärmeakkumulation zwischen mehreren Pulsen:



$E_p = 30,8 \mu\text{J}$, $\lambda = 515 \text{ nm}$, $\tau = 8 \text{ ps}$, $d_f = 38 \mu\text{m}$, $N_s = 400$, $L = 14 \text{ mm}$, $v_b = 10 \text{ m/s}$

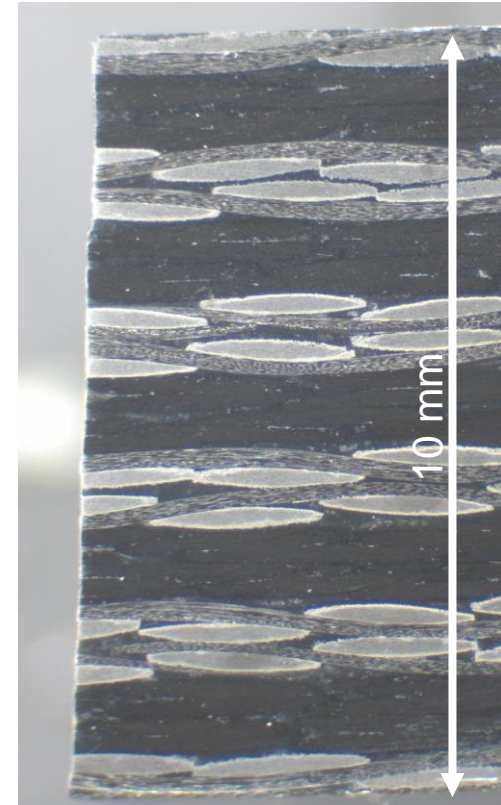
Strategien für höchste Präzision

2. Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten

Vermeiden der Wärmeakkumulation zwischen mehreren Scans:

$$N_{Critical} \cong C_{Mat,ID}^2 \cdot \Delta T_{Max} \cdot \frac{d_{Mat}^2 \cdot v_{Feed} \cdot \ell_{Contour}}{4 \cdot \bar{P}_{Laser}^2}$$

- Einführen von Prozesspausen ($N_{Scans} < N_{Critical}$)
→ Reduktion der effektiven mittleren Laserleistung
- Begrenzen der mittleren Laserleistung pro Kontur
z.B. durch **parallele Bearbeitung** mehrerer Konturen
- Erhöhung der Konturlänge
z.B. durch **sequentielles Bearbeiten** mehrerer Konturen



Strategien für höchste Präzision

3. Prozessregelung

Tiefenmessung

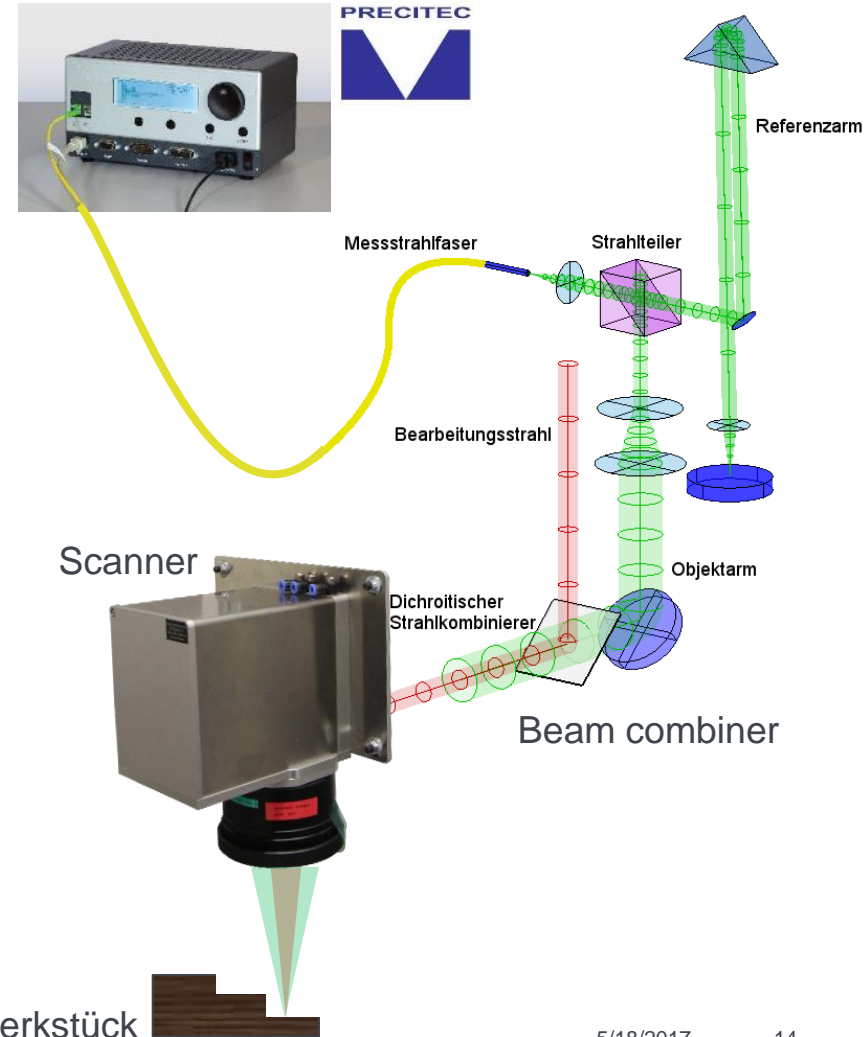
PRECITEC CHRcodile2

Wellenlänge	1080 ± 20 nm
Messfrequenz	70 kHz
Tiefengenauigkeit	±1 µm
Spotdurchmesser	15 µm

Bearbeitungslaser

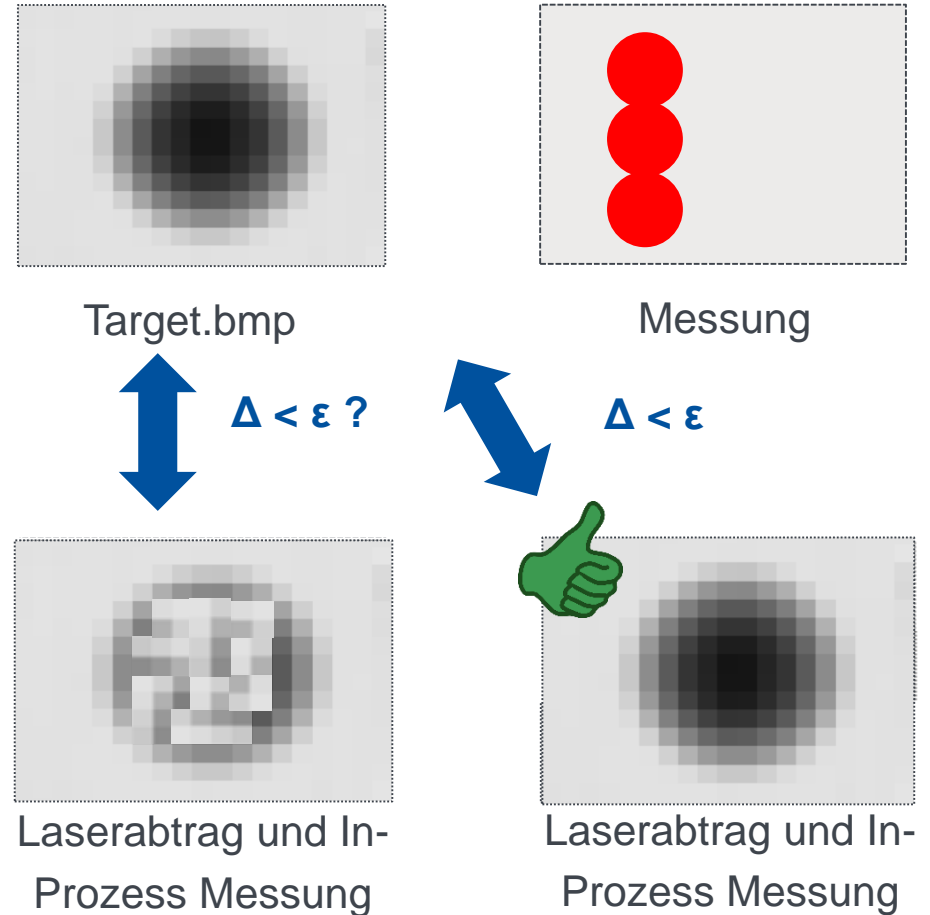
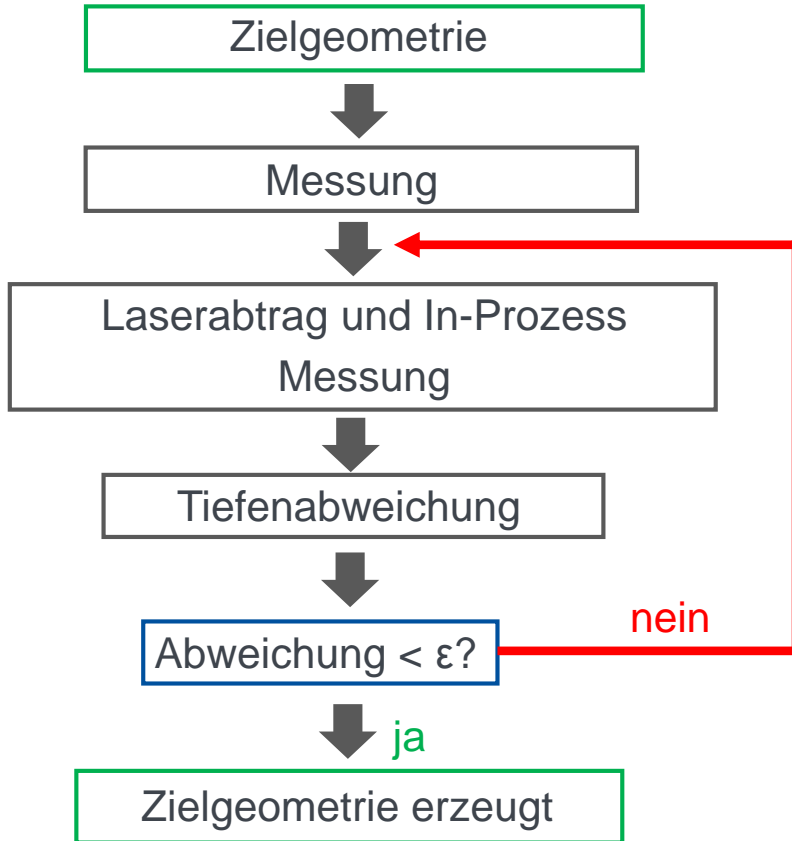
TRUMPF TL 20-1 FQ

Wellenlänge	1047 nm
Pulsdauer	60 ns
M ²	<1,2
Mittlere Leistung	21 W
Repetitionsrate	15 kHz



Strategien für höchste Präzision

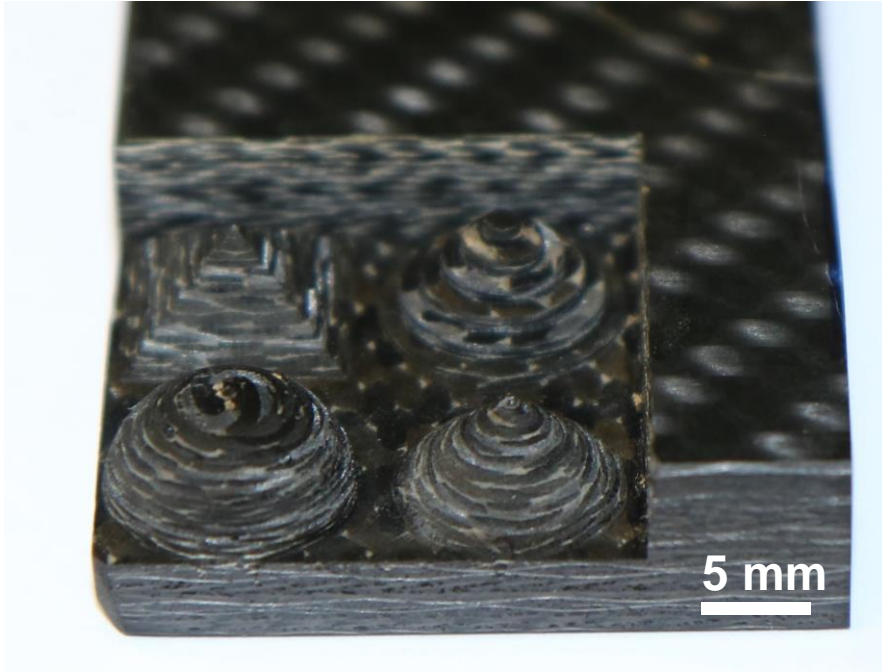
3. Prozessregelung



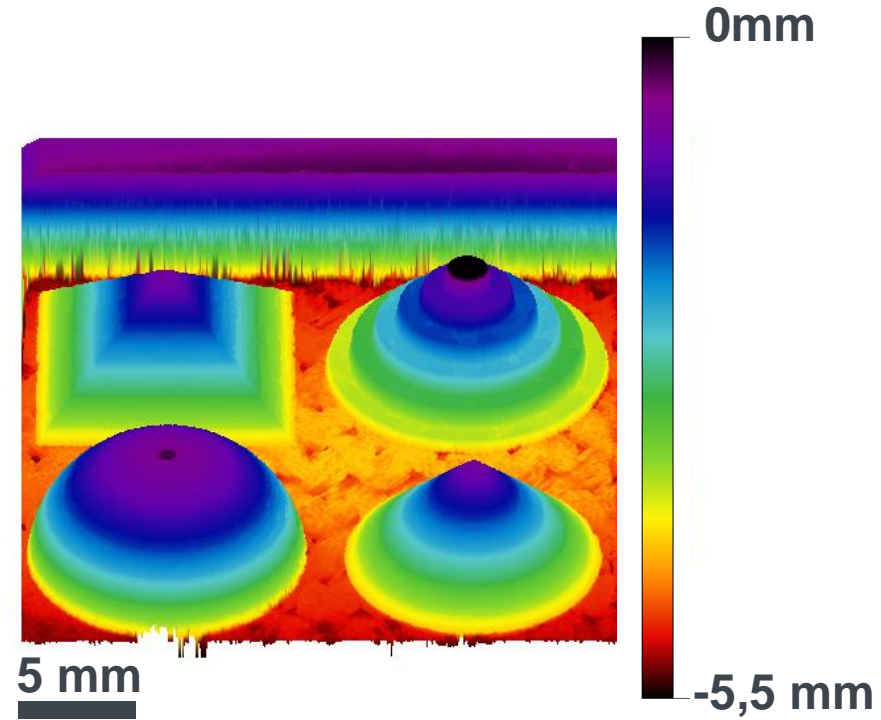


Strategien für höchste Präzision

3. Prozessregelung



Fotografie

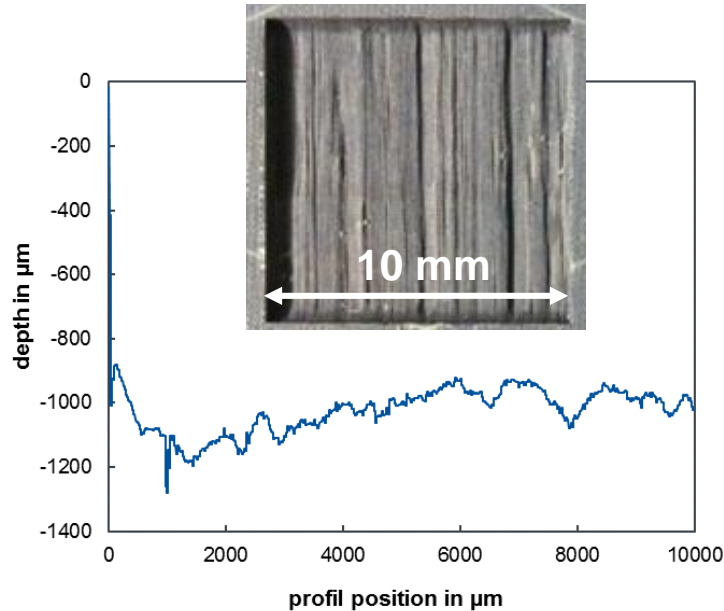


Gemessene Geometrie

Strategien für höchste Präzision

3. Prozessregelung

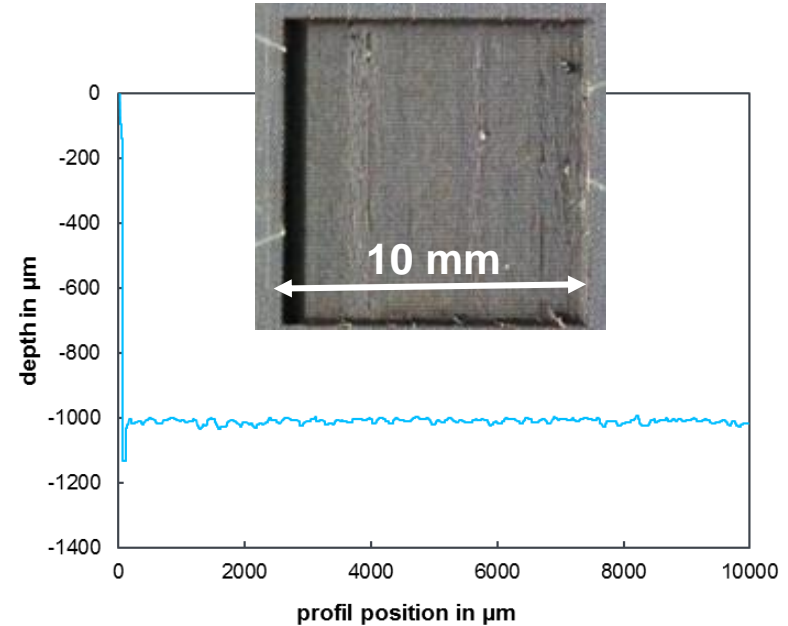
Ungeregelt



- Tiefenabweichung bis zu $\pm 200 \mu\text{m}$
- $R_a = 60 \mu\text{m}$

Faktor 10

Geregelt

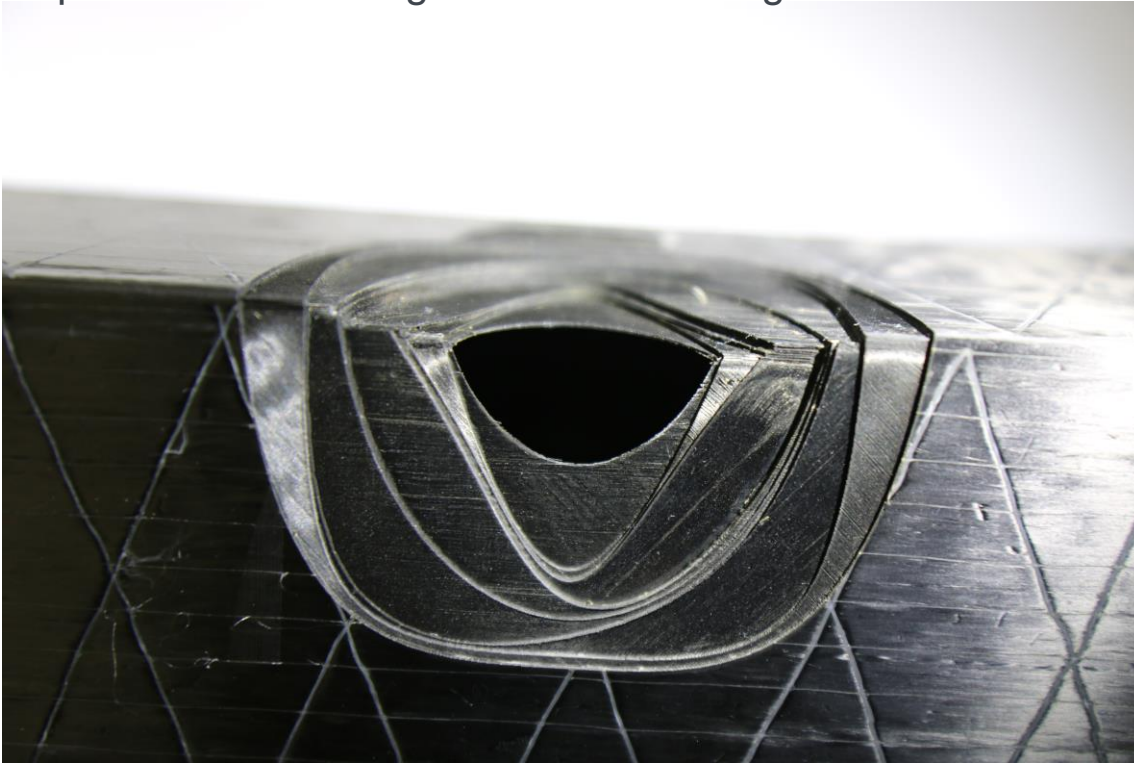


- Tiefenabweichung kleiner $\pm 20 \mu\text{m}$
- $R_a = 7 \mu\text{m}$

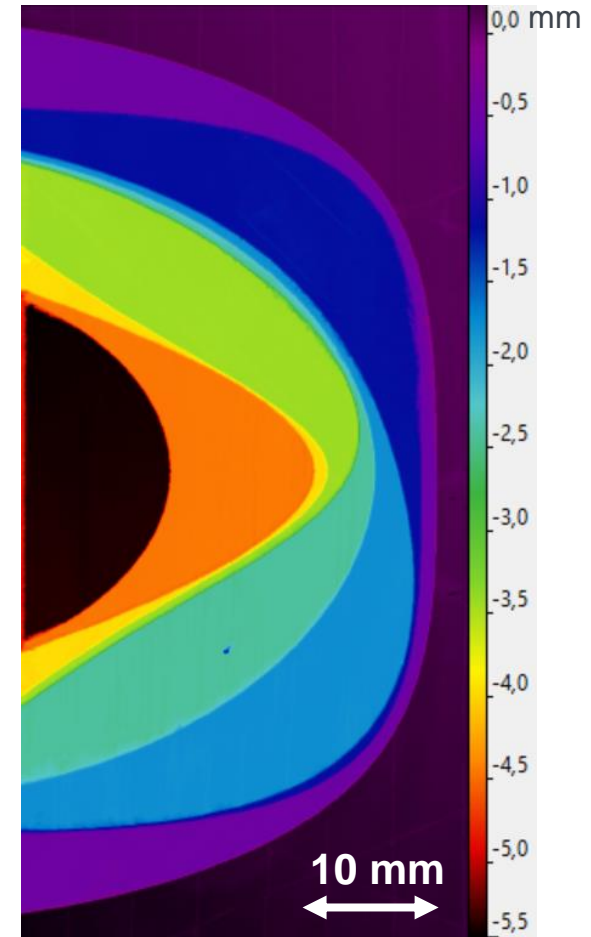
Hochpräzise Bearbeitung von CFK

Anwendungsbeispiel

Reparaturvorbereitung eines CFK-Auslegers



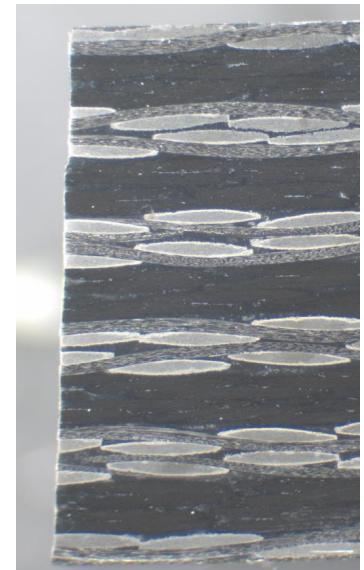
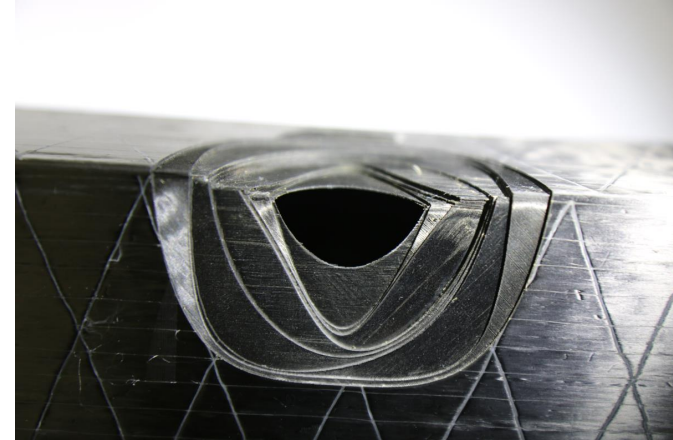
Mehrlagiges CFK 4,8 mm dick



Hochpräzise Bearbeitung von CFK mittels gepulster Laserstrahlung

Zusammenfassung

- Strategien für die hochpräzise Laserbearbeitung von CFK:
 1. Ausreichend hohe Intensitäten $> 10^8$ W/cm²
 2. Vermeidung der Wärmeakkumulation zwischen mehreren Pulsen:
 - Hohe Vorschubgeschwindigkeit
 - Niedrige Repetitionsrate
 3. Vermeidung der Wärmeakkumulation zwischen mehreren Scans:
 - Anzahl an Scans kleiner als kritischer Wert
 - Angepasste Prozessstrategien
 4. Tiefenregelung für lagengenauen Abtrag





LightPulse – eine Ausgründung des IFSW

Im März 2018 von Dr.-Ing. Christian Freitag und Daniel Förster gegründetes Start-up.

Wir bieten:

Auftragsfertigung und Technologieberatung zur Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Lasern

Contact us:

info@light-pulse.de





Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge

Vielen Dank!



Dr.-Ing. Christian Freitag

E-Mail Christian.Freitag@ifsw.uni-stuttgart.de

Telefon +49 (0) 711 685-69759

www.ifsw.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)
Pfaffenwaldring 43, 70569 Stuttgart

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Projekt:

ProCaV
PRECISE

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

ENTRANCE