



**Universität Stuttgart**  
Institut für Strahlwerkzeuge

**IFS**  
**W**

# 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

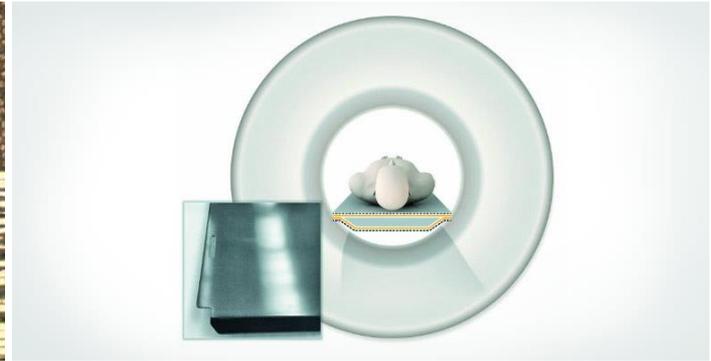
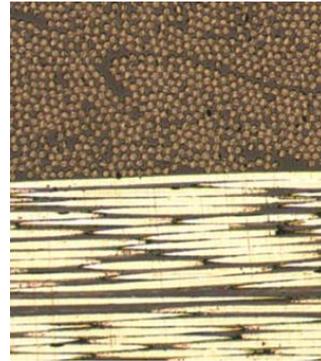
# Potential von Carbonfaser verstärkte Kunststoffen (CFK)

## Beispiel Medizintechnik

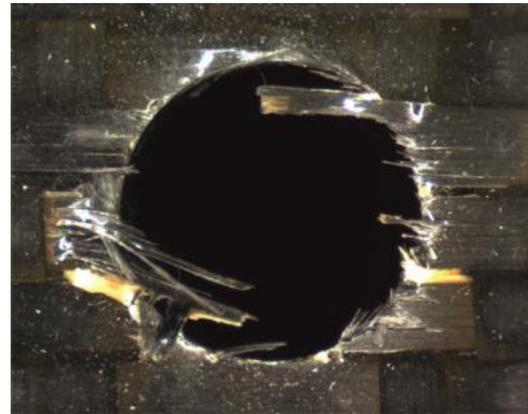
- CFK bestehen aus **Carbonfasern** eingebettet in ein **Matrixmaterial**
- Idealer Leichtbau-Werkstoff
- Mechanische Bearbeitung herausfordernd
  - Delamination, Ausbrüche, Ausfransungen, Verschleiß...



**Alternative: Laser**



Quelle: [www.carbon-composites.eu](http://www.carbon-composites.eu)



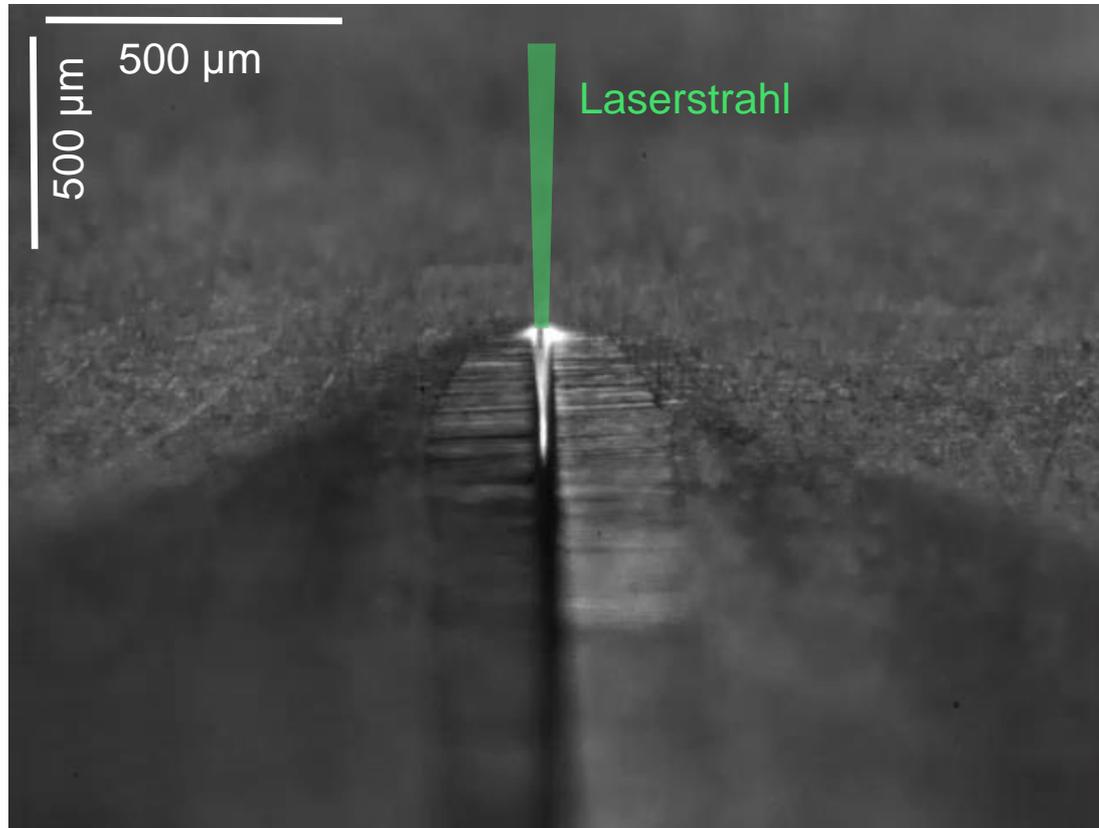
Quelle:

<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

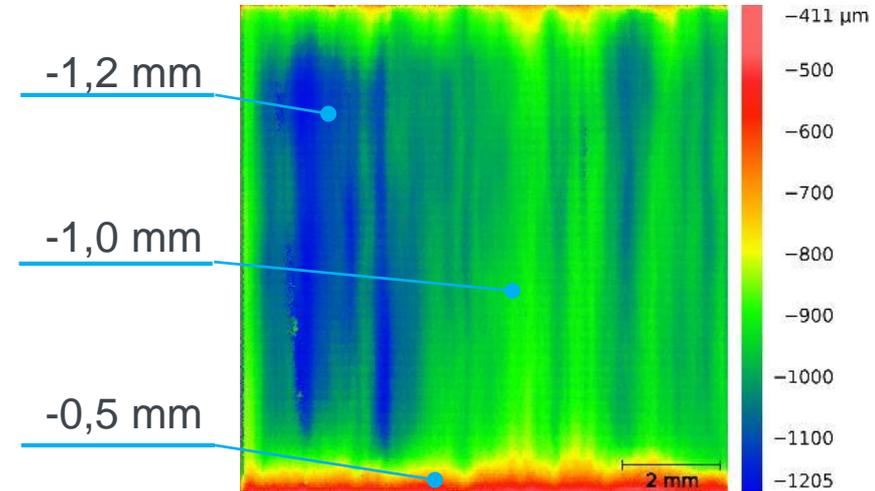
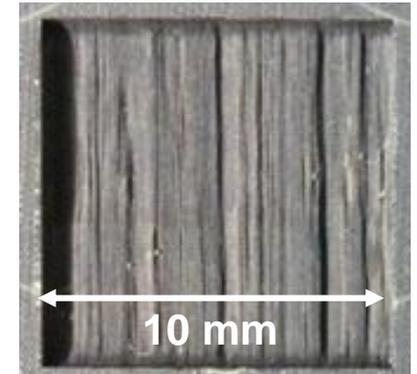
### 2. Inhomogener Materialabtrag

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  $1 \text{ mm}$  tiefem Abtrag!

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

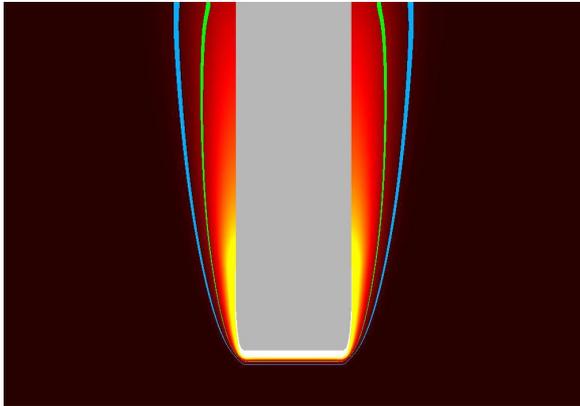
Unidirektionales CFK



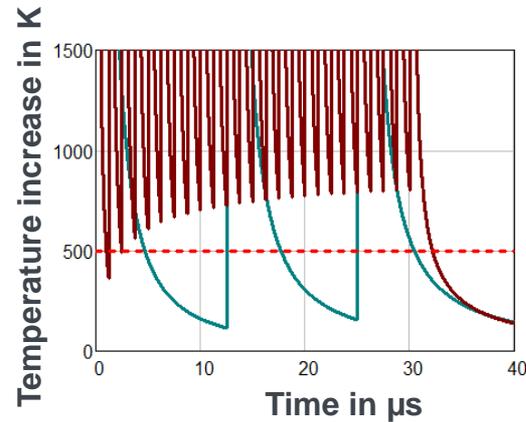
# Laserbearbeitung von CFK

## Strategien zur Erreichung höchster Präzision

- Ausreichend hohe Intensität



- Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten



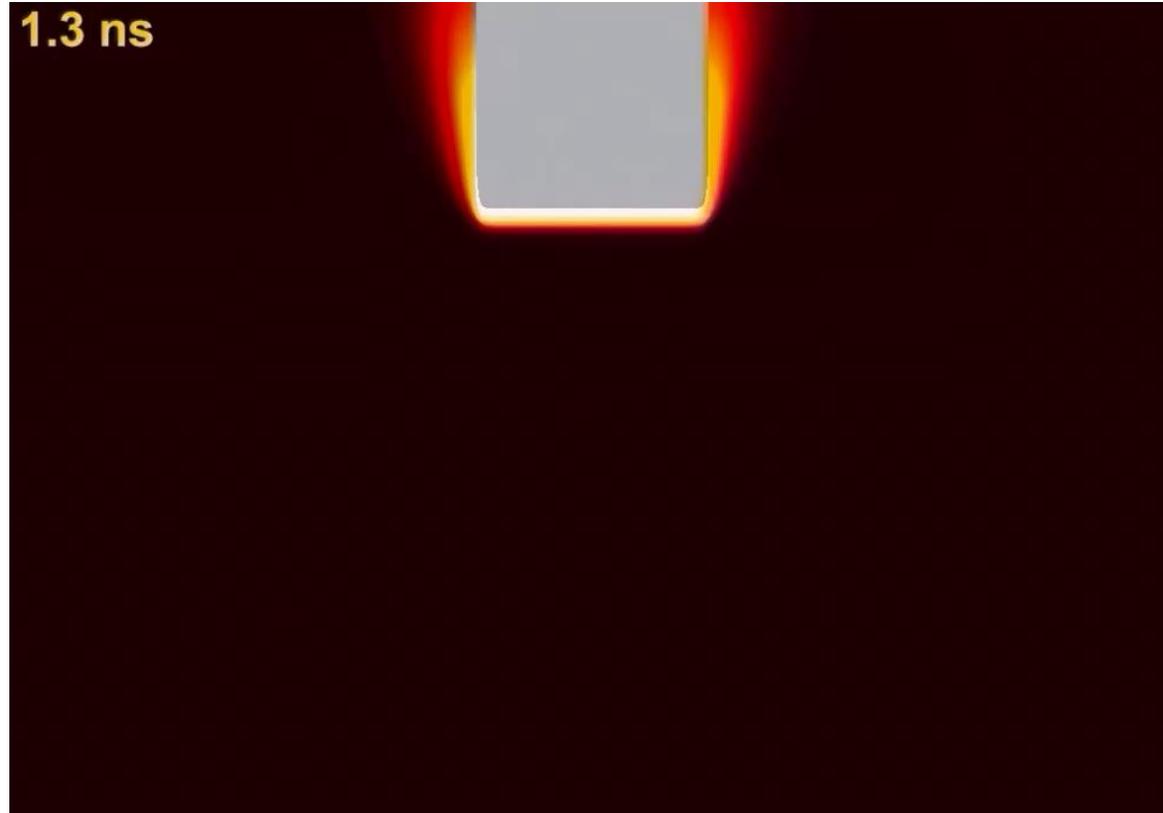
- Prozessregelung



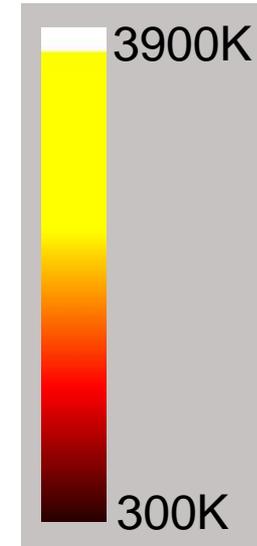
# Strategien für höchste Präzision

## 1. Ausreichend hohe Intensität

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



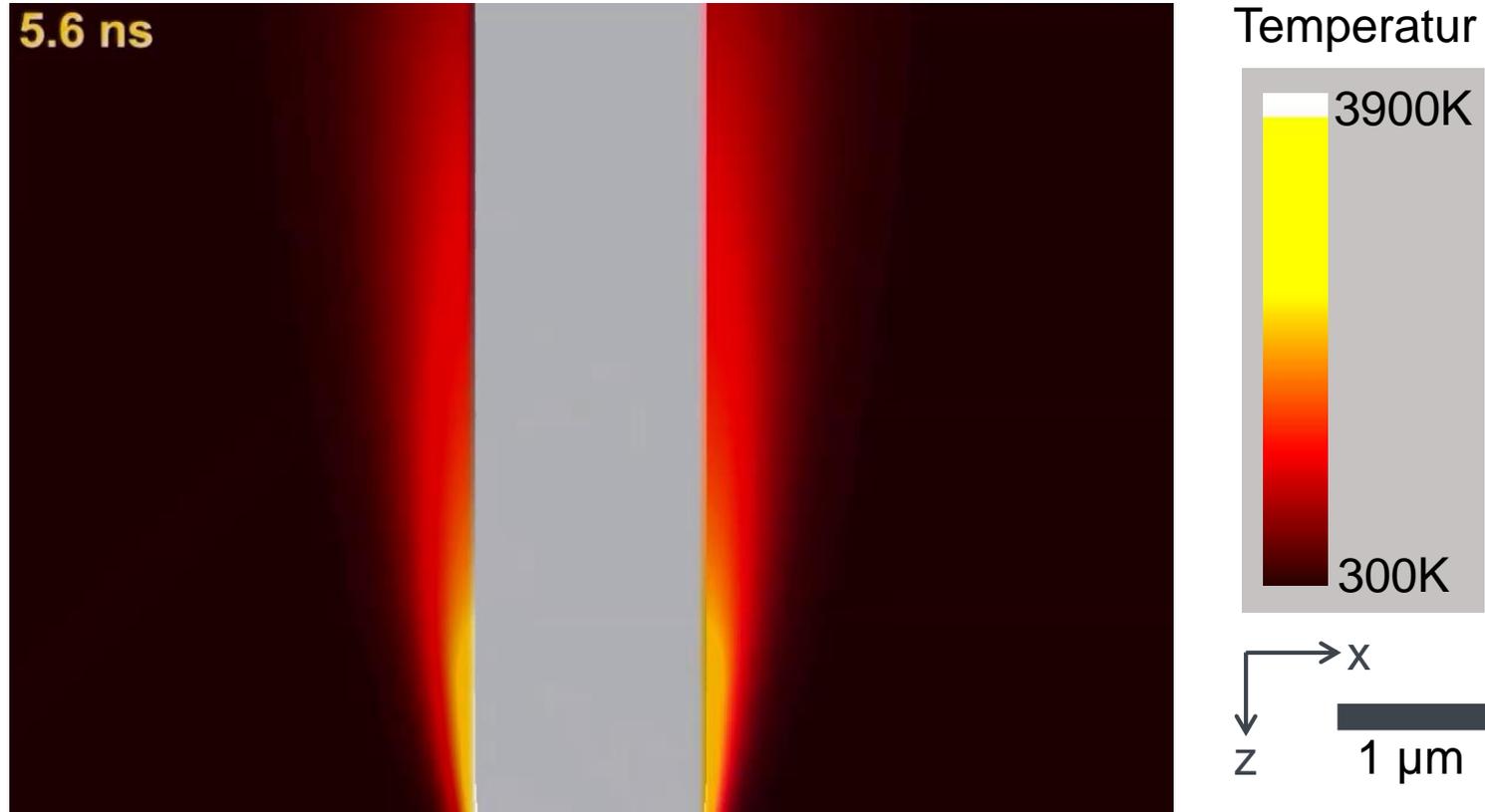
Temperatur



# Strategien für höchste Präzision

## 1. Ausreichend hohe Intensität

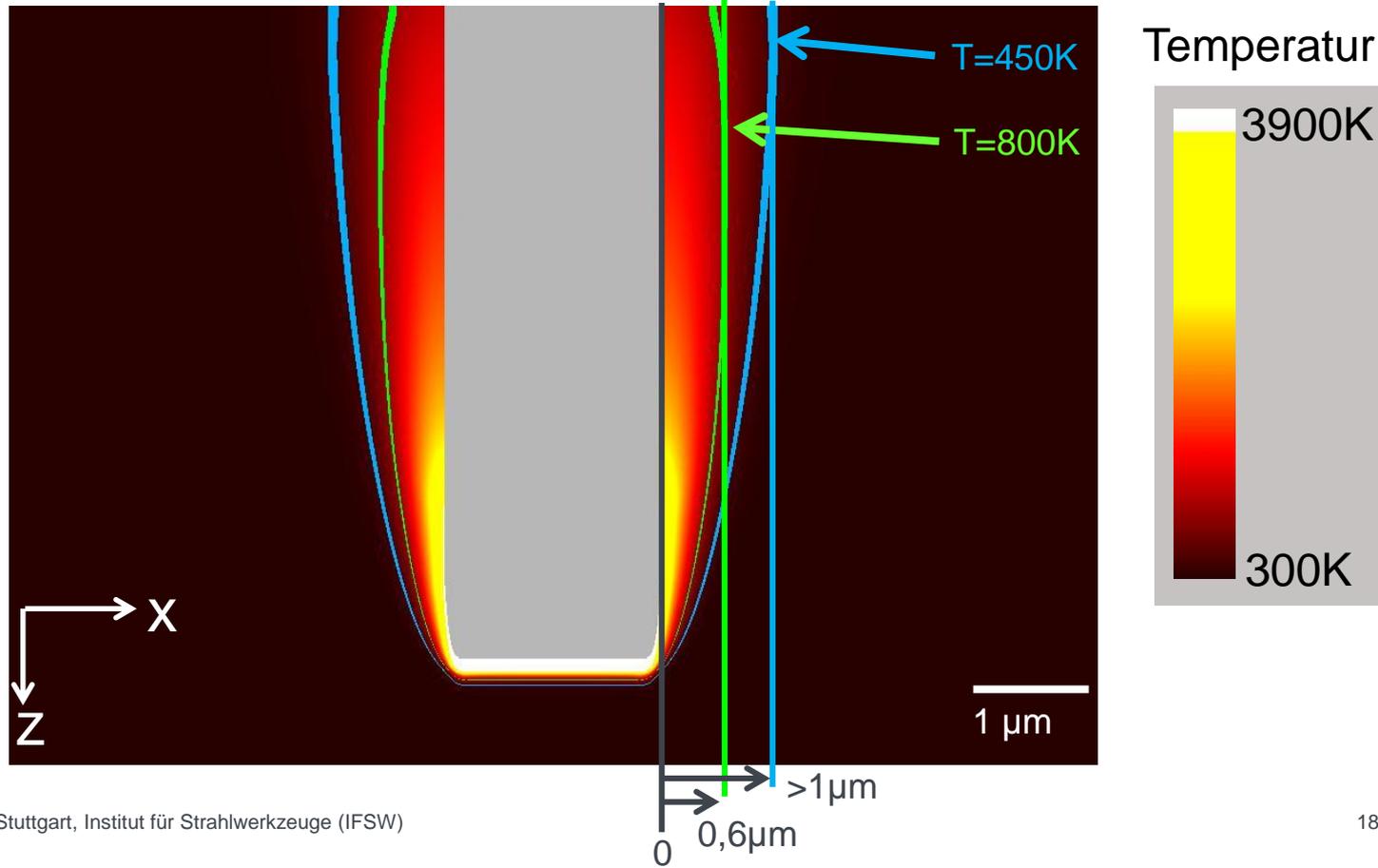
- $I_{\text{Abs}} = 10^{11} \text{ W/cm}^2$ , Flat-top Intensitätsprofil, einzelne Carbonfaser



# Strategien für höchste Präzision

## 1. Ausreichend hohe Intensität

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



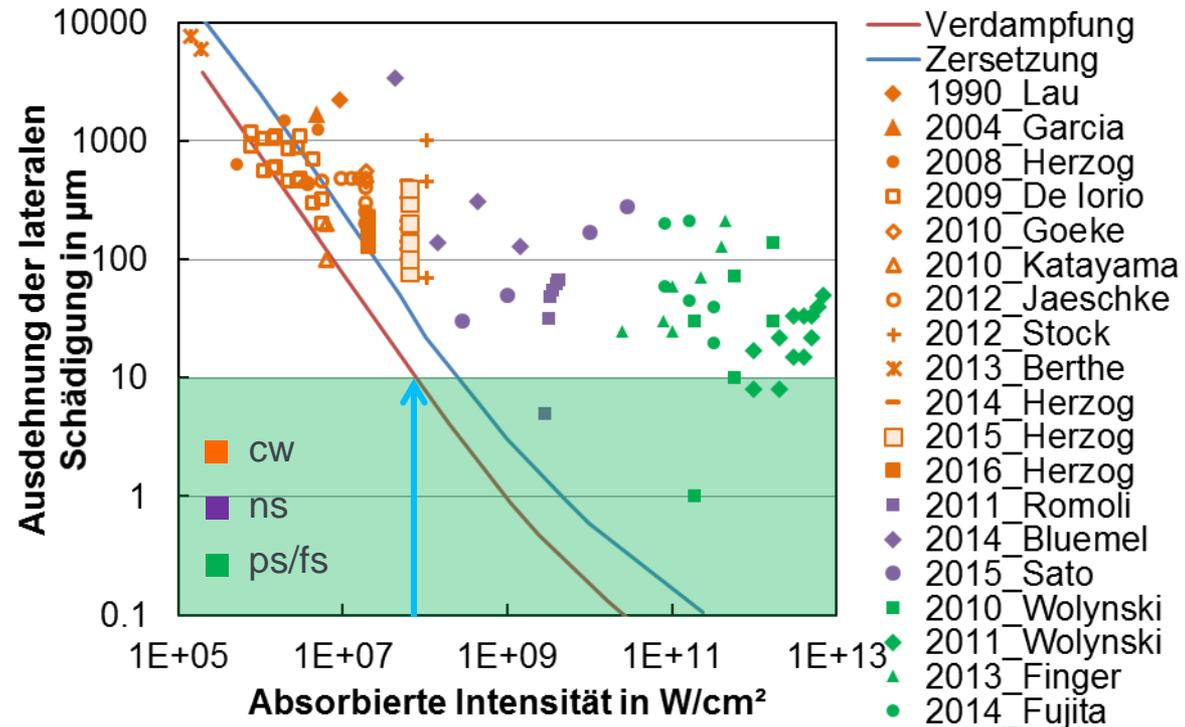
# Strategien für höchste Präzision

## 1. Ausreichend hohe Intensität

Ausreichend  
hohe  
Intensität:

MVZ < 10  $\mu\text{m}$

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



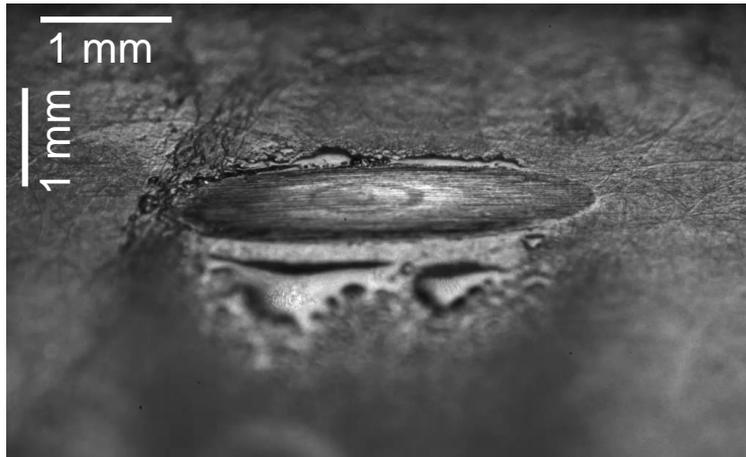
R. Weber, M. Hafner, A. Michalowski, T. Graf, "Minimum Damage in CFRP Processing". *Phys. Procedia* 12, 2011, 302-307.

# Strategien für höchste Präzision

## 2. Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten

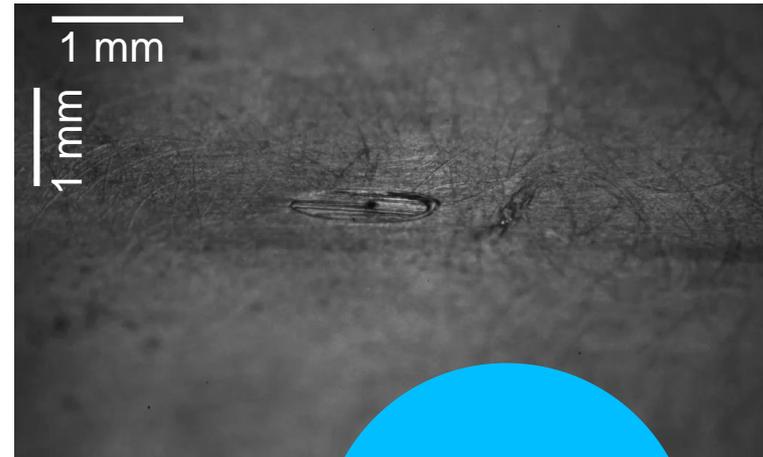
- Perkussionsbohrungen mit gleicher mittlerer Laserleistung aber unterschiedlicher Pulsfrequenz / Pulsenergie

800 kHz, 7  $\mu$ J



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

5,5 W



200 kHz, 28  $\mu$ J

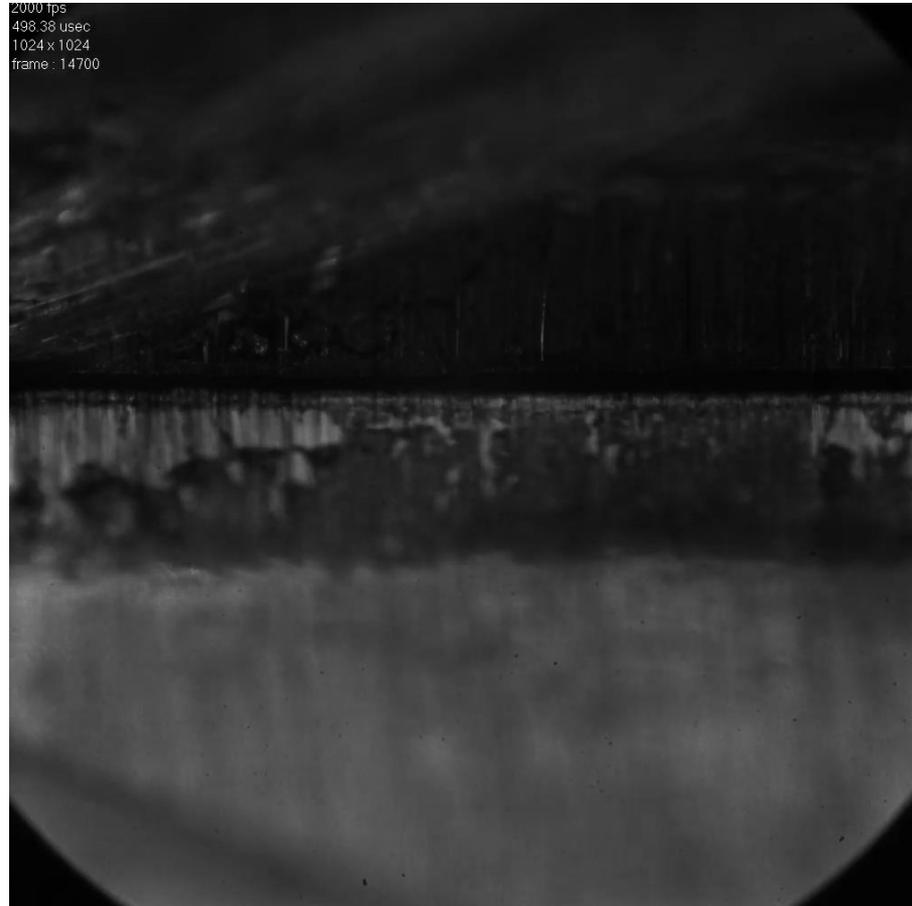
**Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen (WAP)**

**Bewegter Strahl?**

# Strategien für höchste Präzision

## 2. Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten

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



**Pulsfrequenz:**

300 kHz

**Pulsenergie:**

230  $\mu$ J

**Vorschub:**

1,5 m/s

**Anzahl Pulse  
pro Ort:**

8

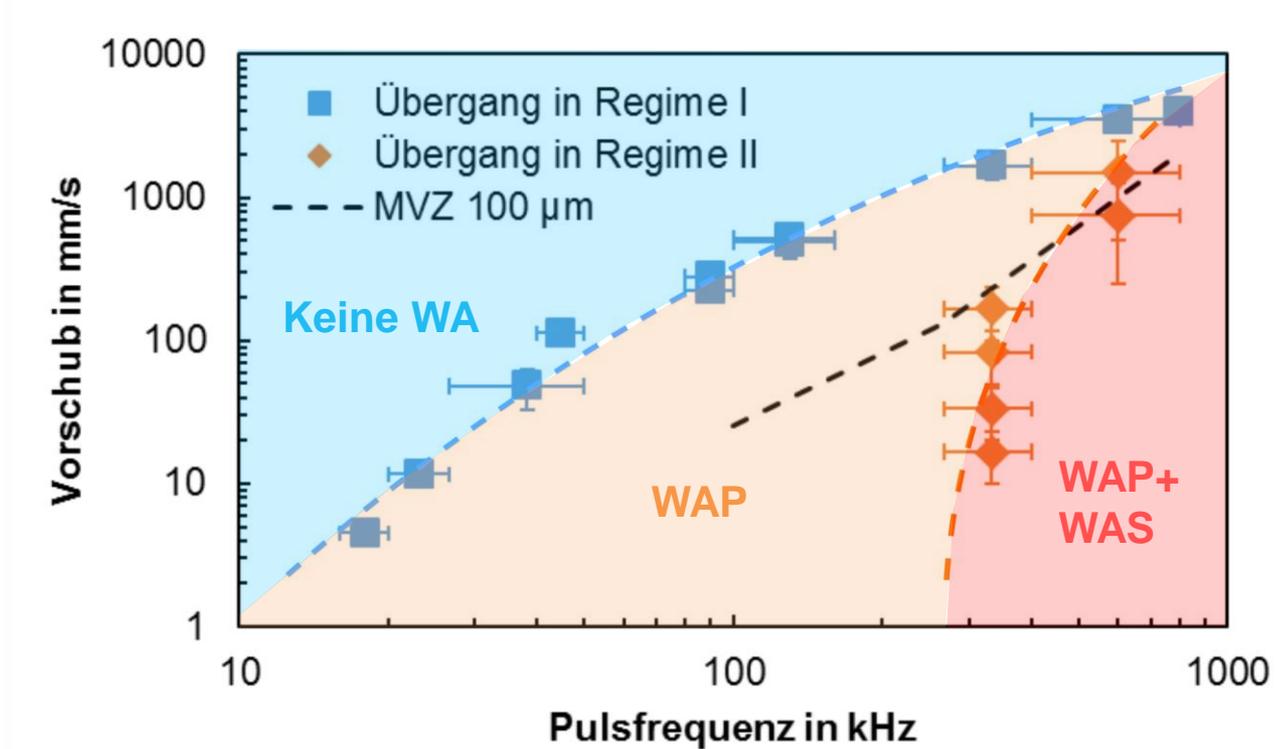
**Anzahl  
Überfahrten:**

500

# Strategien für höchste Präzision

## 2. Vermeidung von Wärmeakkumulationseffekten

### Vermeiden der Wärmeakkumulation zwischen mehreren Pulsen:



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

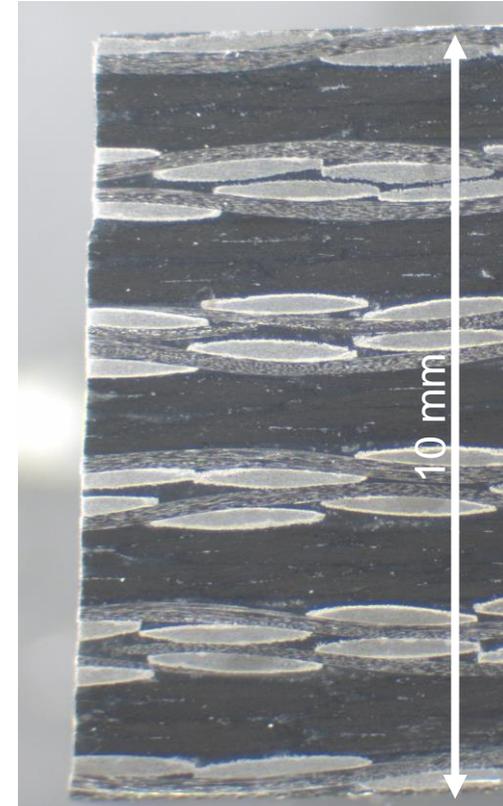
# Strategien für höchste Präzision

## 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

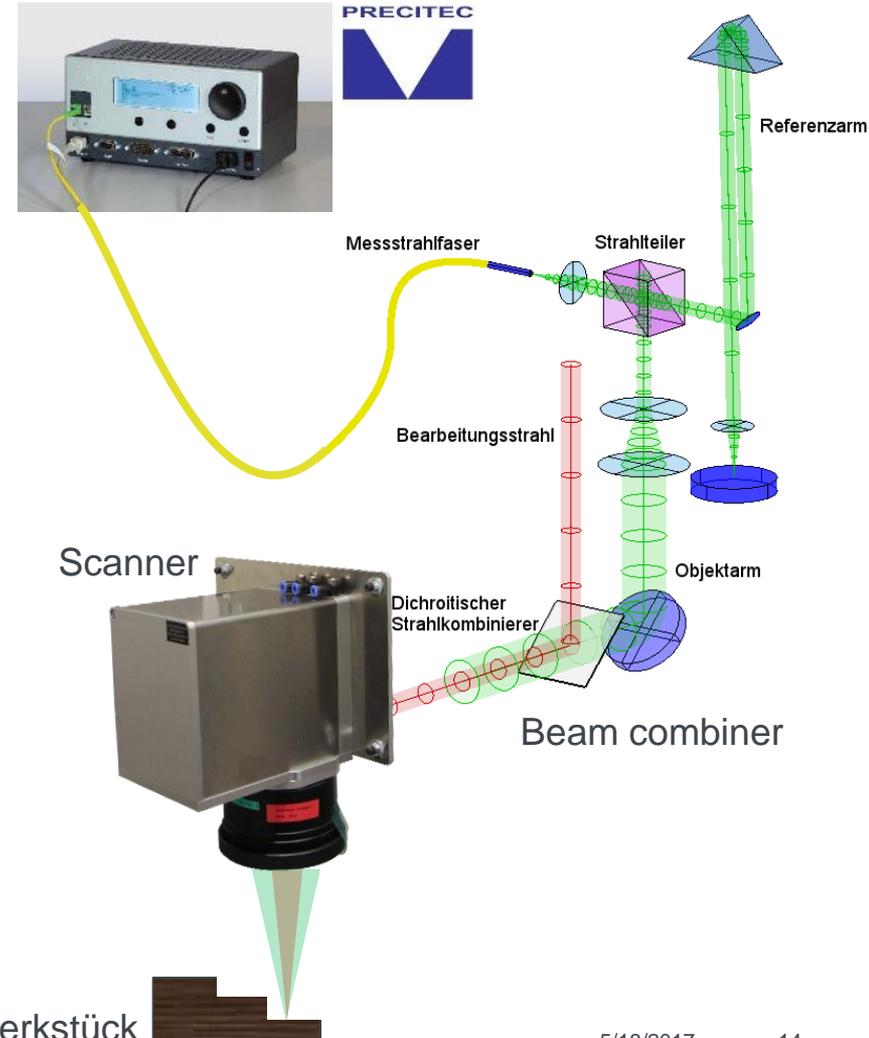
PRECITEC CHRocodile2

Wellenlänge	<b>1080 ± 20 nm</b>
Messfrequenz	70 kHz
Tiefengenauigkeit	<b>±1 µm</b>
Spotdurchmesser	15 µm

### Bearbeitungslaser

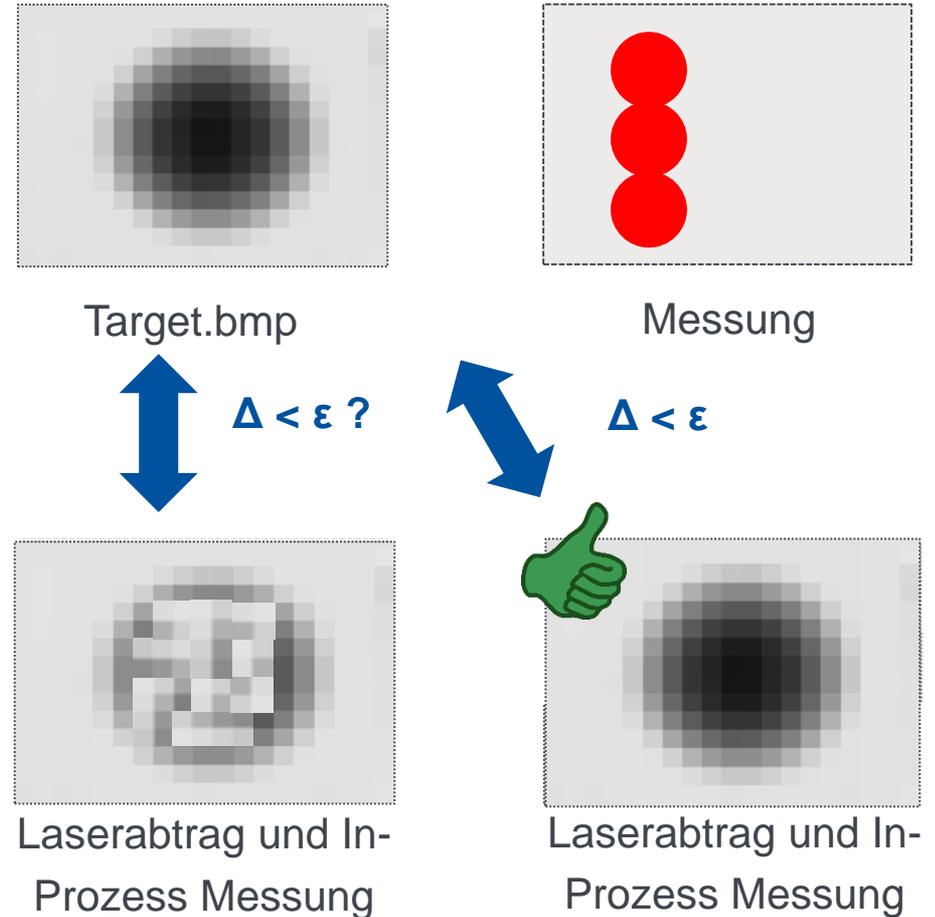
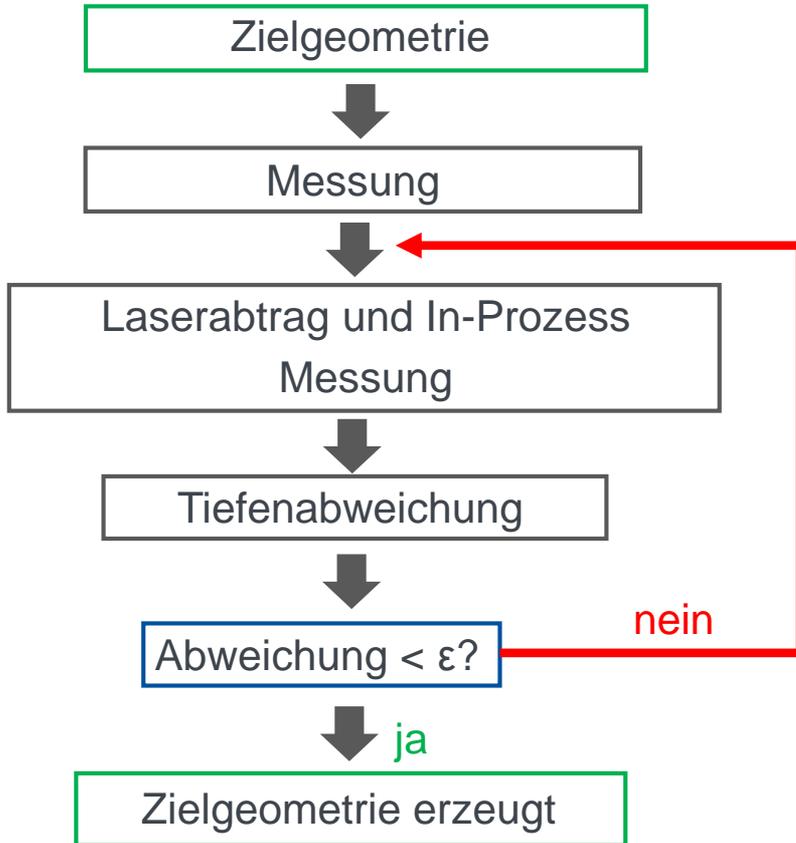
TRUMPF TL 20-1 FQ

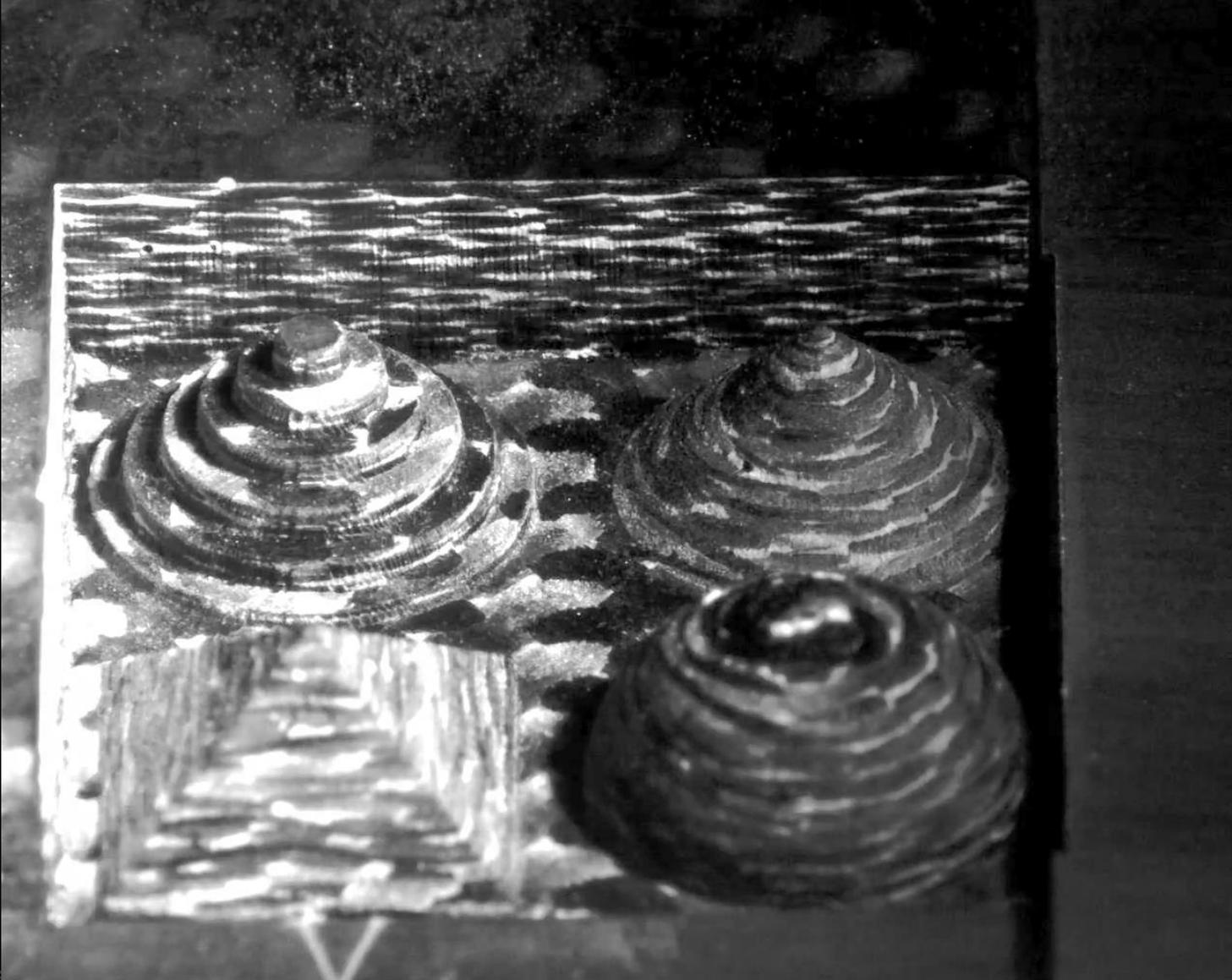
Wellenlänge	<b>1047 nm</b>
Pulsdauer	60 ns
M <sup>2</sup>	<1,2
Mittlere Leistung	21 W
Repetitionsrate	15 kHz



# Strategien für höchste Präzision

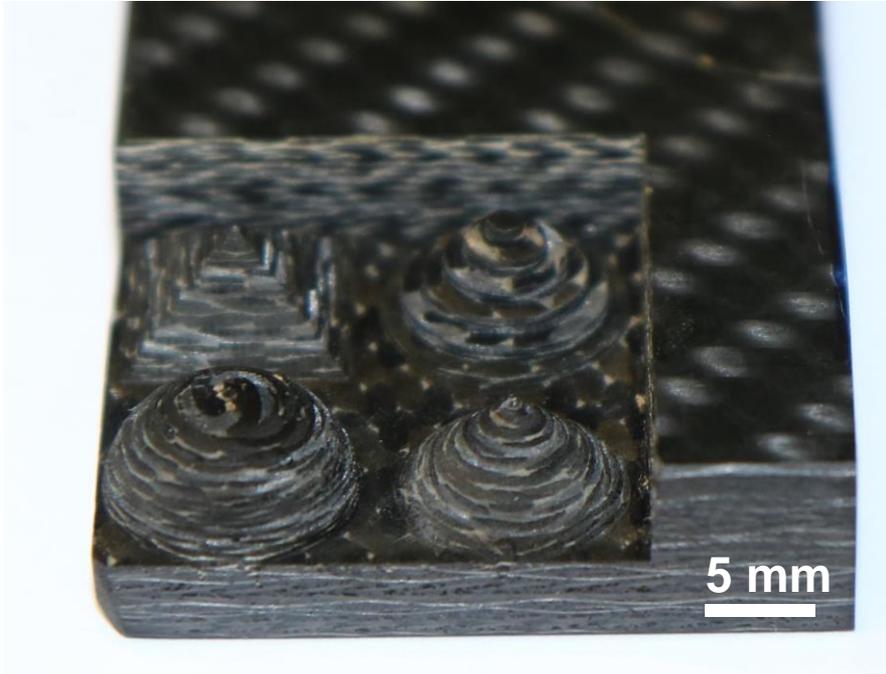
## 3. Prozessregelung



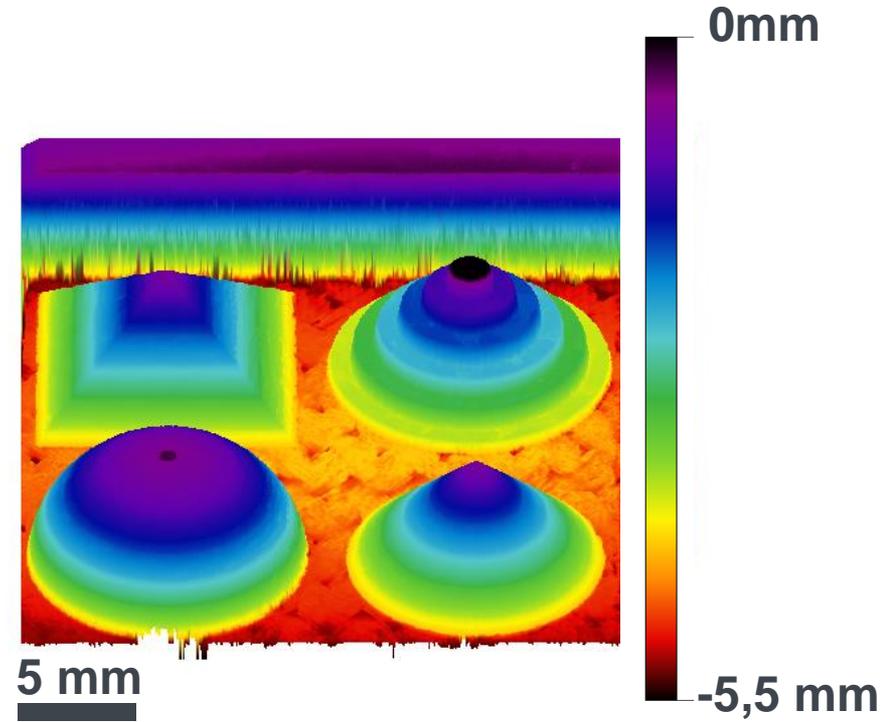


# Strategien für höchste Präzision

## 3. Prozessregelung



Fotografie

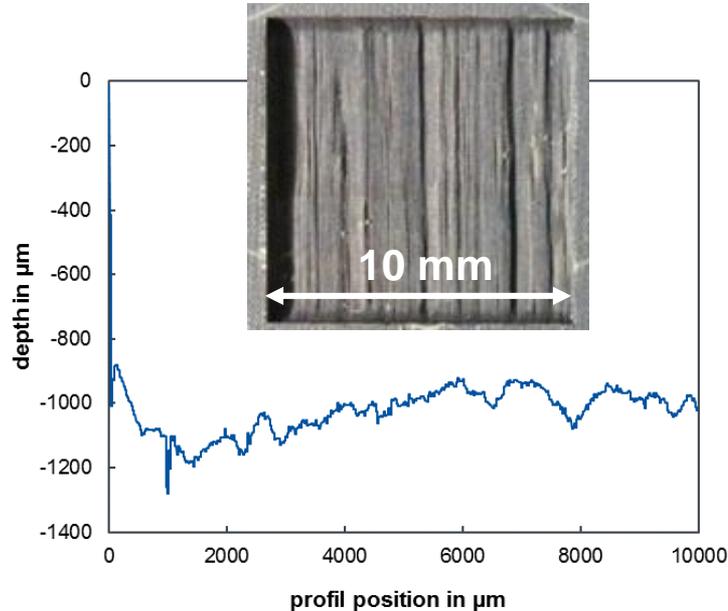


Gemessene Geometrie

# Strategien für höchste Präzision

## 3. Prozessregelung

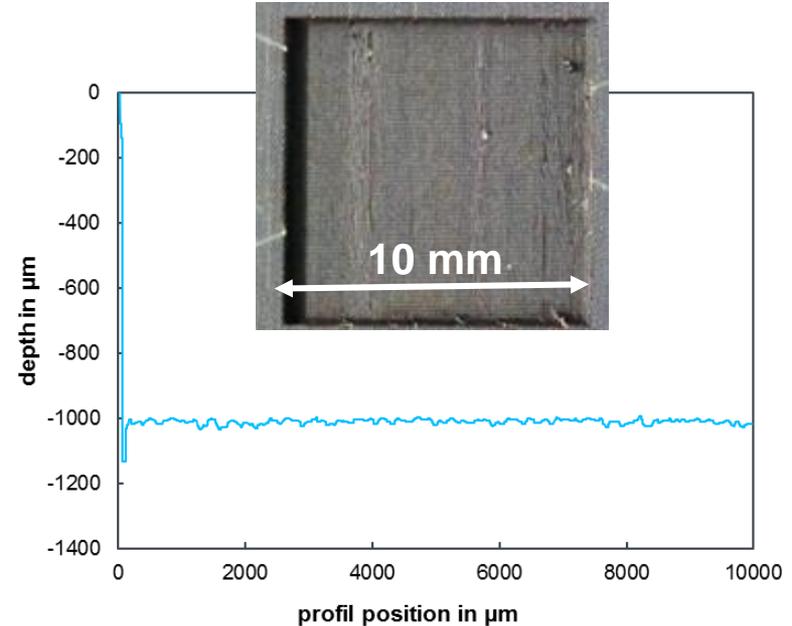
### Ungeregelt



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

**Faktor 10**

### Geregelt

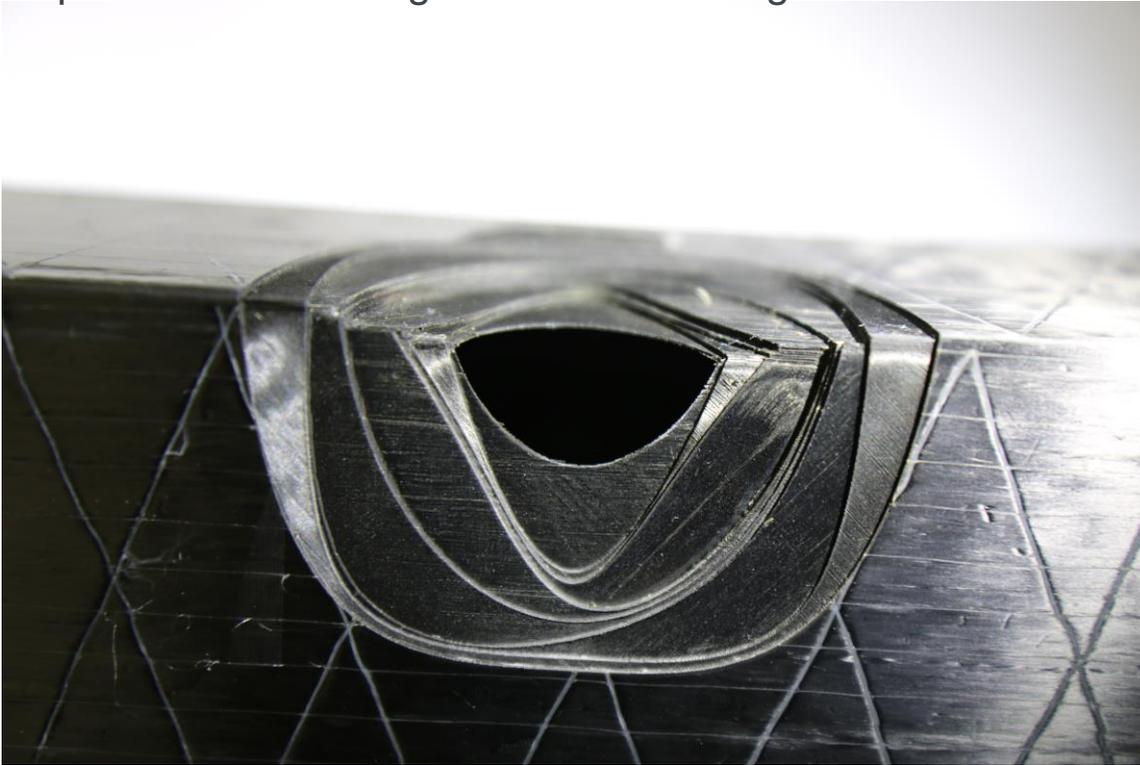


- Tiefenabweichung kleiner  $\pm 20 \mu\text{m}$
- $R_a = 7 \mu\text{m}$

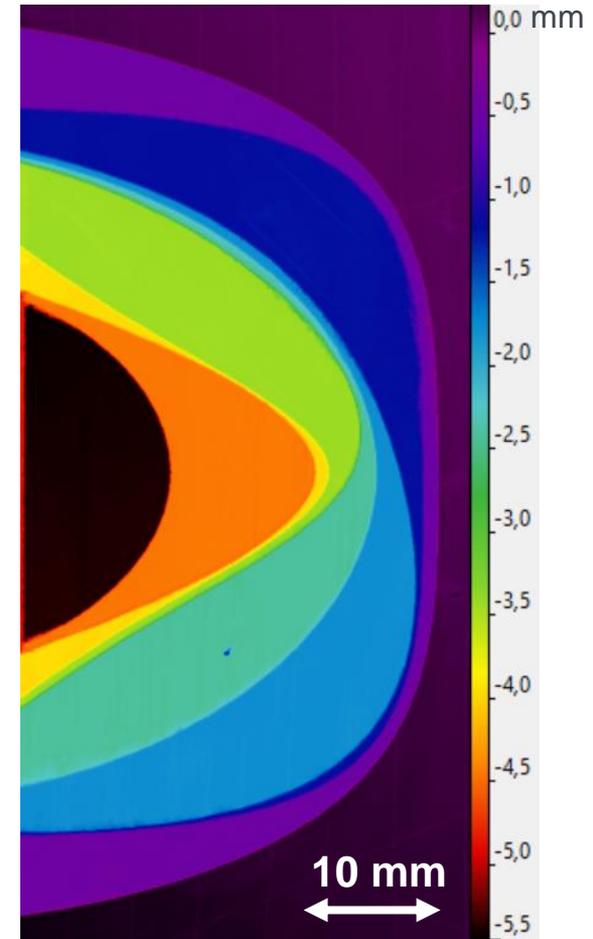
# Hochpräzise Bearbeitung von CFK

Anwendungsbeispiel

Reparaturvorbereitung eines CFK-Auslegers



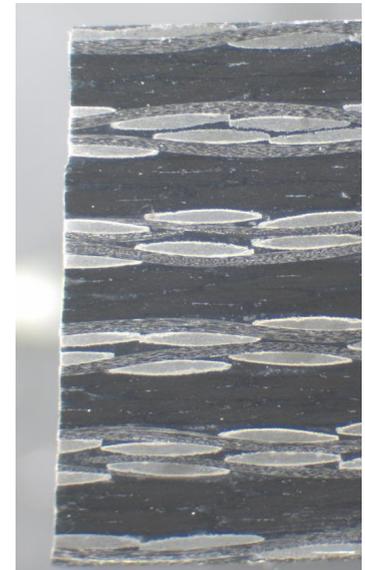
Mehrlagiges CFK 4,8 mm dick



# Hochpräzise Bearbeitung von CFK mittels gepulster Laserstrahlung

## Zusammenfassung

- Strategien für die hochpräzise Laserbearbeitung von CFK:
  1. Ausreichend hohe Intensitäten  $> 10^8 \text{ W/cm}^2$
  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.

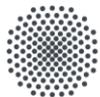
Wir bieten:

**Auftragsfertigung und Technologieberatung zur Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Lasern**

**Contact us:**

**[info@light-pulse.de](mailto:info@light-pulse.de)**





**Universität Stuttgart**  
Institut für Strahlwerkzeuge

# Vielen Dank!



**Dr.-Ing. Christian Freitag**

E-Mail [Christian.Freitag@ifsw.uni-stuttgart.de](mailto:Christian.Freitag@ifsw.uni-stuttgart.de)

Telefon +49 (0) 711 685-69759

[www.ifsw.uni-stuttgart.de](http://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**