



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge



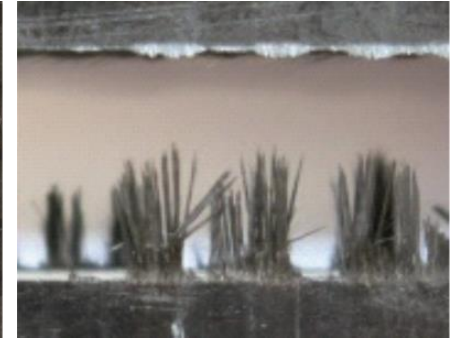
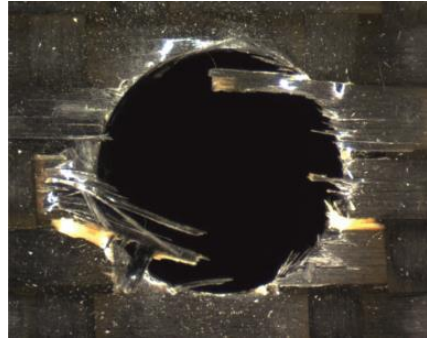
Hoch-qualitative Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe

C. Freitag, M. Wiedenmann,
R. Weber, T. Graf

Bearbeitung Carbonfaser verstärkte Kunststoffe (CFK)

Potential

- Mechanische Bearbeitung herausfordernd
 - Delamination, Ausbrüche, Ausfransungen, Verschleiß...



Quelle: A. Gebhardt, „Neue Ansätze zur spanenden Endbearbeitung von CFK“, CFK-Workshop 2015



Alternative: Laser

- Vorteile:
 - Gute Automatisierbarkeit
 - Verschleißfreie Bearbeitung
 - Kraftfreie Bearbeitung



Laserschneiden von CFK

Herausforderung

- **Laser** ist ein **thermisches Werkzeug**
- **Thermische Eigenschaften** der Verbundkomponenten

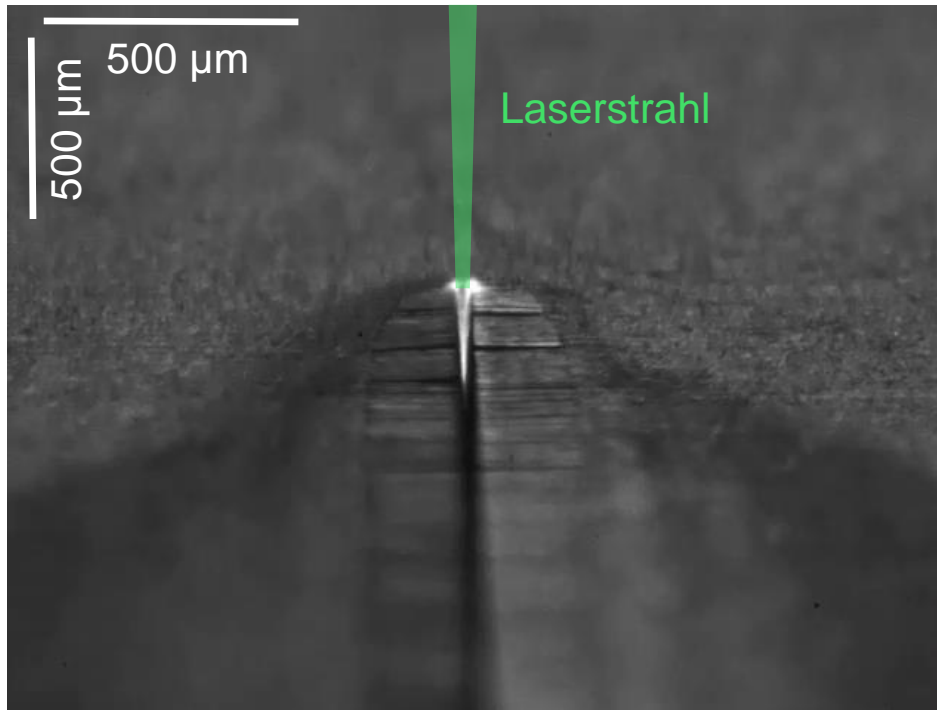
Thermische Eigenschaften	Matrix	Carbonfasern
Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)	0,23	50 / 5 (/ ⊥)
Verdampfungstemperatur in °C	500	3650
Spezifische Verdampfungsenthalpie in kJ/kg	996	43225

- Wärmeleitung hauptsächlich entlang der Carbonfasern
- Stark unterschiedliche Verdampfungstemperaturen und spez. Verdampfungsenthalpien der Verbundkomponenten

Laserschneiden von CFK

Herausforderung

- **Laser** ist ein **thermisches Werkzeug**
- **CFK**: Ausbildung einer **Matrixverdampfungszone (MVZ)**



Parameter:

Mittlere Leistung

22 W

Wellenlänge

515 nm

Pulsfrequenz

800 kHz

Pulsdauer

8 ps

Fokusbereich

33 µm

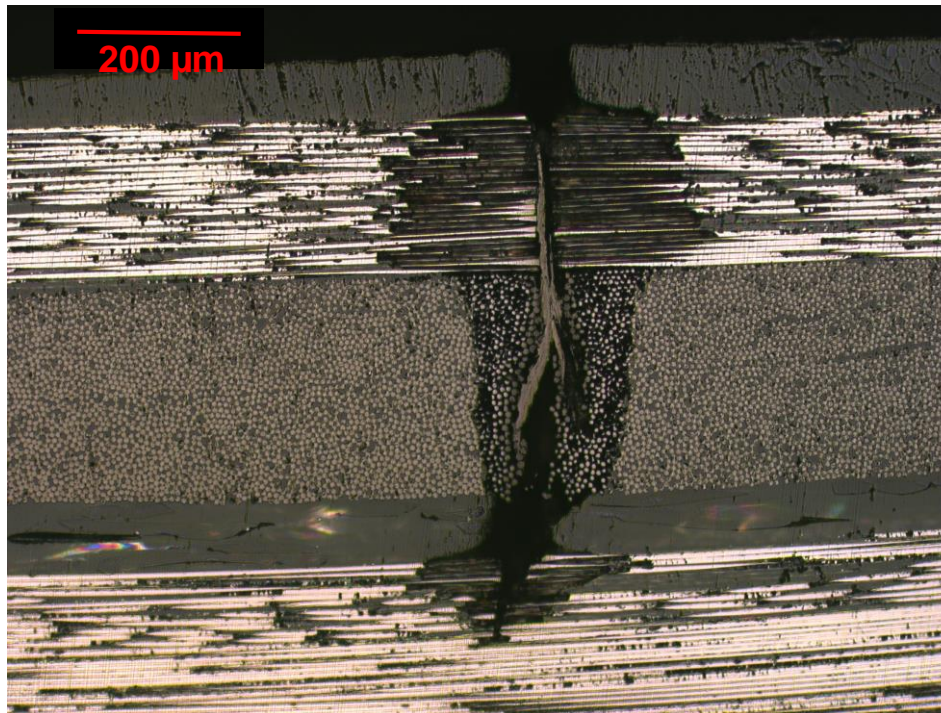
Vorschub

2000 mm/min

Laserschneiden von CFK

Herausforderung

- **Laser** ist ein **thermisches Werkzeug**
- **CFK**: Ausbildung einer **Matrixverdampfungszone (MVZ)**



Parameter:

Mittlere Leistung

22 W

Wellenlänge

515 nm

Pulsfrequenz

800 kHz

Pulsdauer

8 ps

Fokusbereich

33 µm

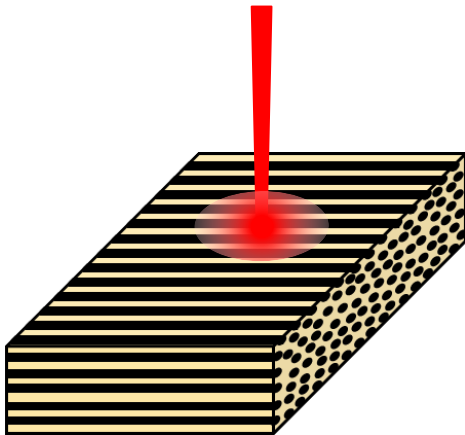
Vorschub

2000 mm/min

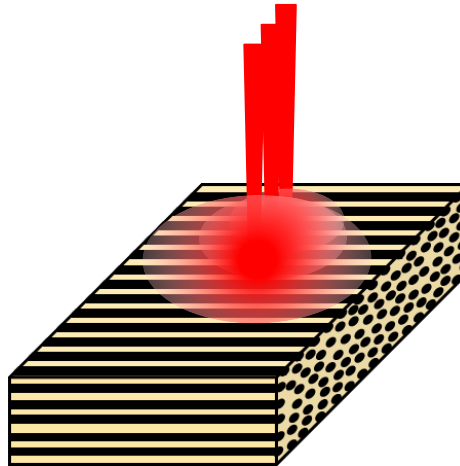
Gepulste Laserbearbeitung von CFK

Drei wesentliche Schädigungsmechanismen

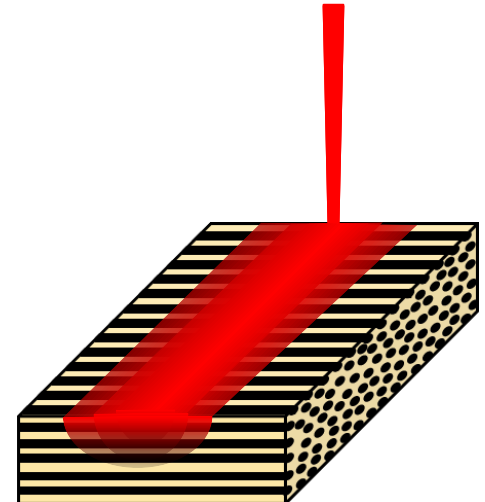
1. Wärmeleitung
während eines
einzelnen Laserpuls



2. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Laserpulsen



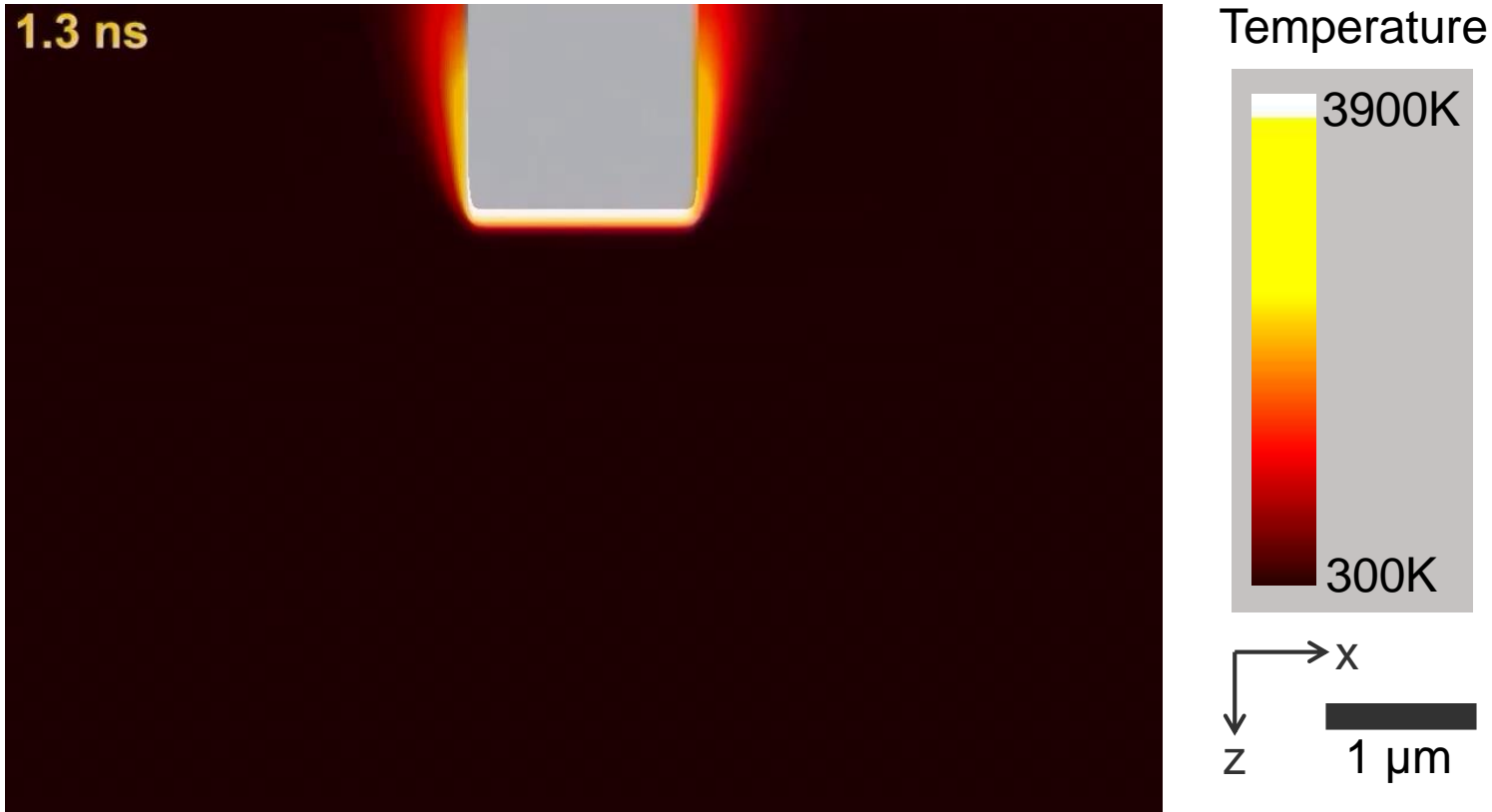
3. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Überfahrten



FE Simulation

Numerische Simulation des Wärmefluss eines Pulses

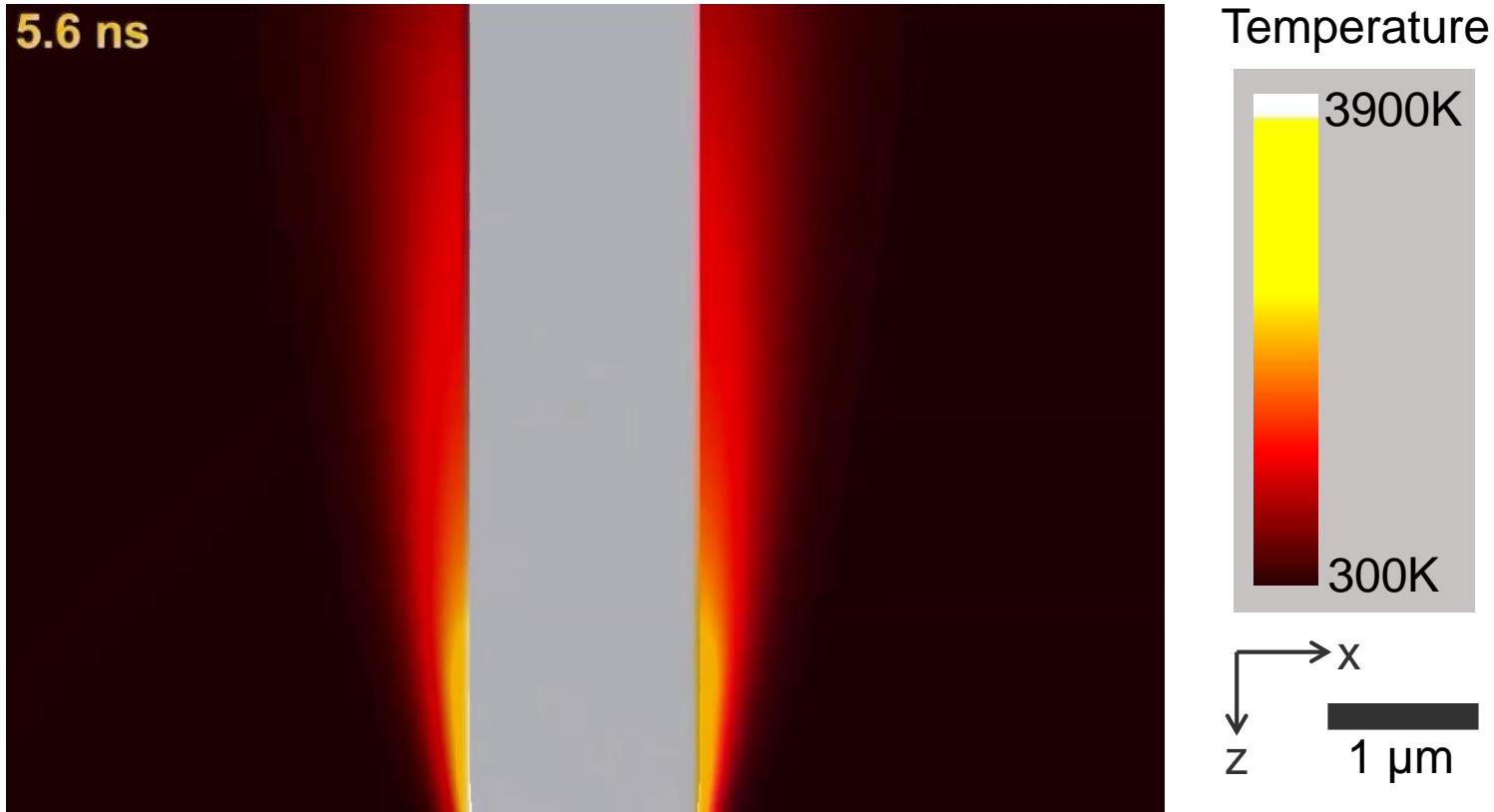
- $I_{\text{Abs}} = 10^{11} \text{ W/cm}^2$, Flat-top Intensitätsprofil, einzelne Carbonfaser



FE Simulation

Numerische Simulation des Wärmefluss eines Pulses

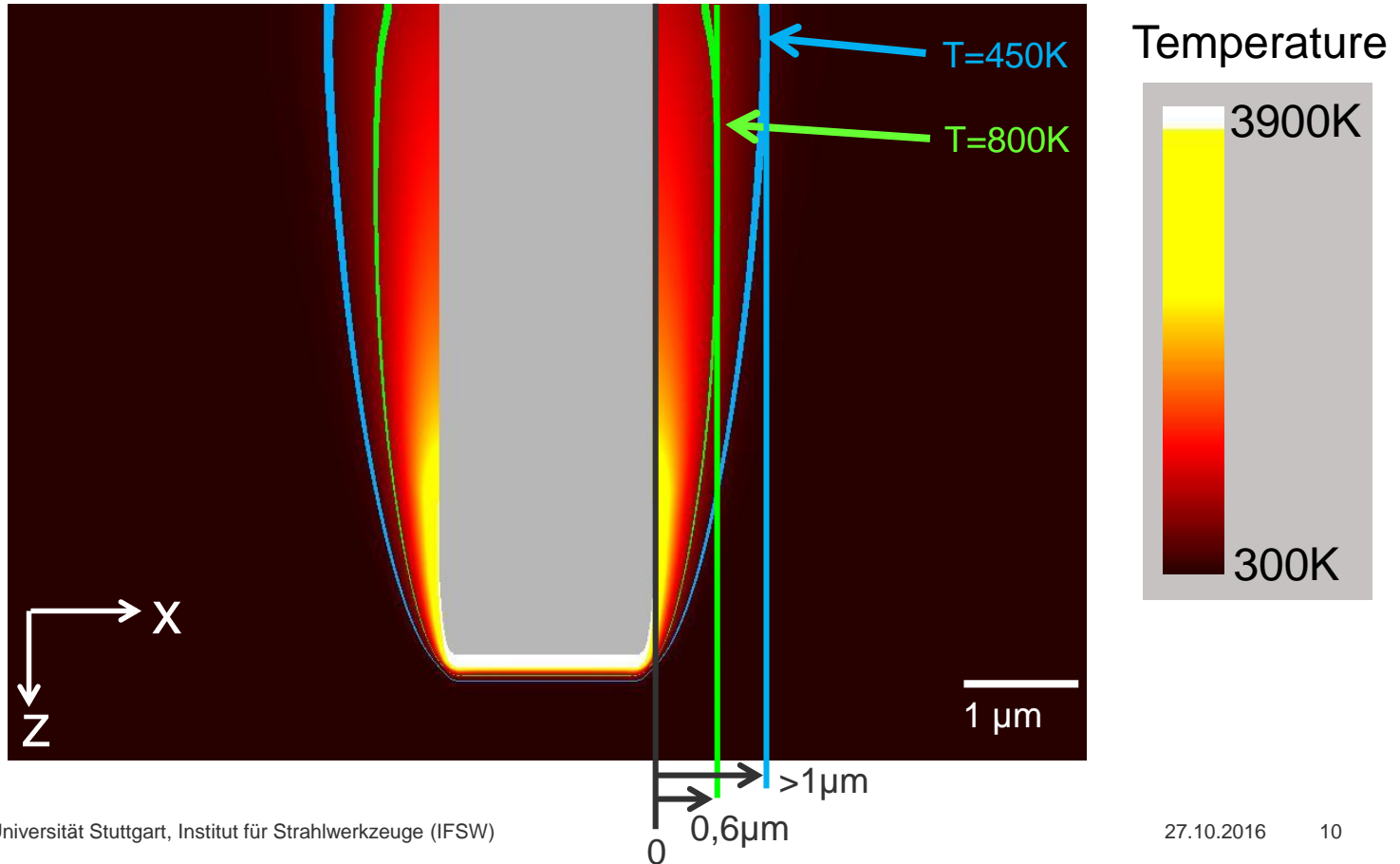
- $I_{\text{Abs}} = 10^{11} \text{ W/cm}^2$, Flat-top Intensitätsprofil, einzelne Carbonfaser



FE Simulation

Minimal mögliche Schädigung als Isotherme

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

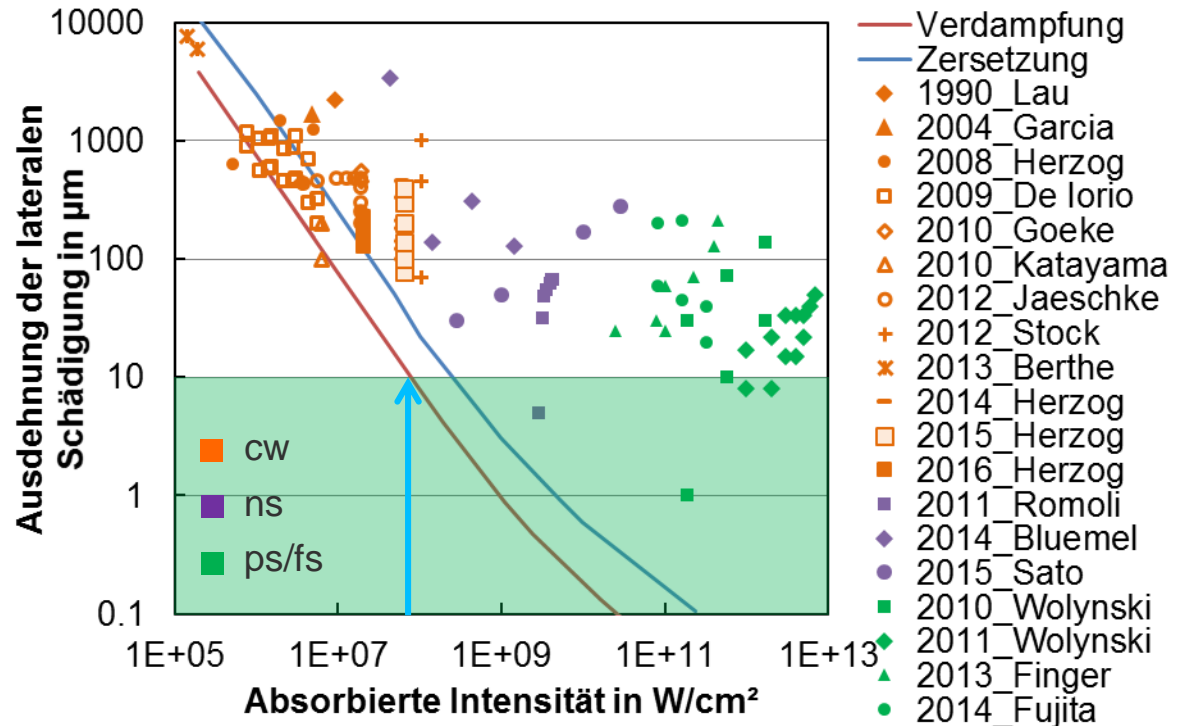


Minimal mögliche Schädigung

Vermeiden von Einzelpulsschädigung

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.

Gepulste Laserbearbeitung von CFK

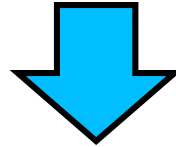
Drei wesentliche Schädigungsmechanismen

- **Schädigungsmechanismus:**

1. Wärmeleitung
während eines
einzelnen Laserpuls

2. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Laserpulsen

3. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Überfahrten



- **Prozessstrategie zur hochqualitativen Bearbeitung:**

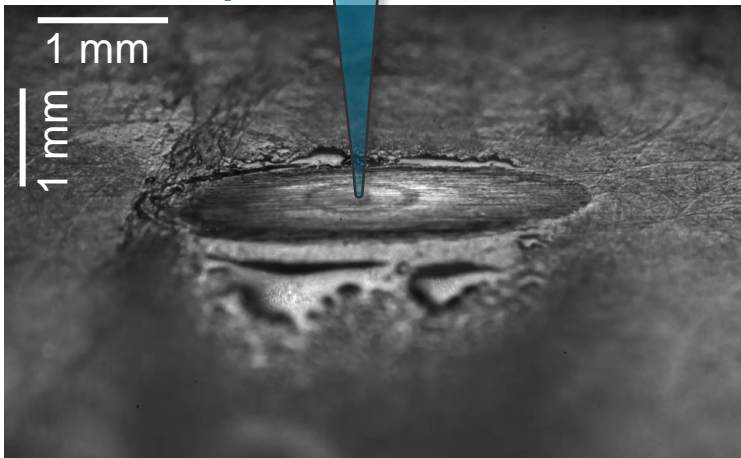
**Ausreichend hohe
Intensität $>10^8 \text{ W/cm}^2$**

Wärmeakkumulation zwischen mehreren Pulsen

Beispiel: Perkussionsbohrprozess

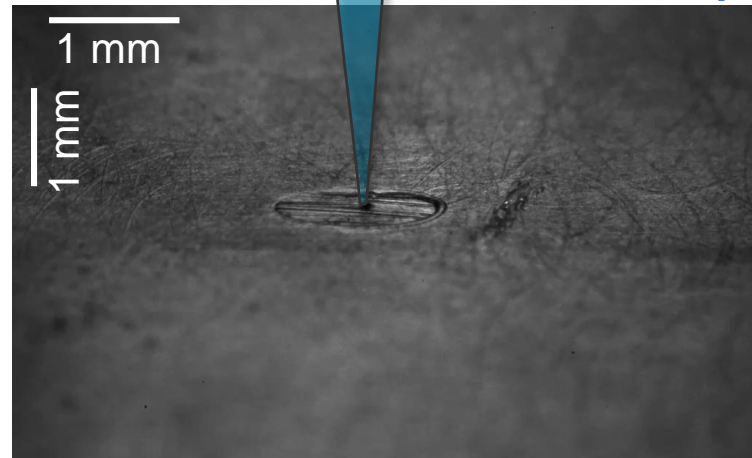
- Perkussionsbohrungen mit gleicher mittlerer Laserleistung, aber unterschiedlicher Pulswiederholfrequenz / Pulsenergie

800 kHz, 7 μJ



5,5 W

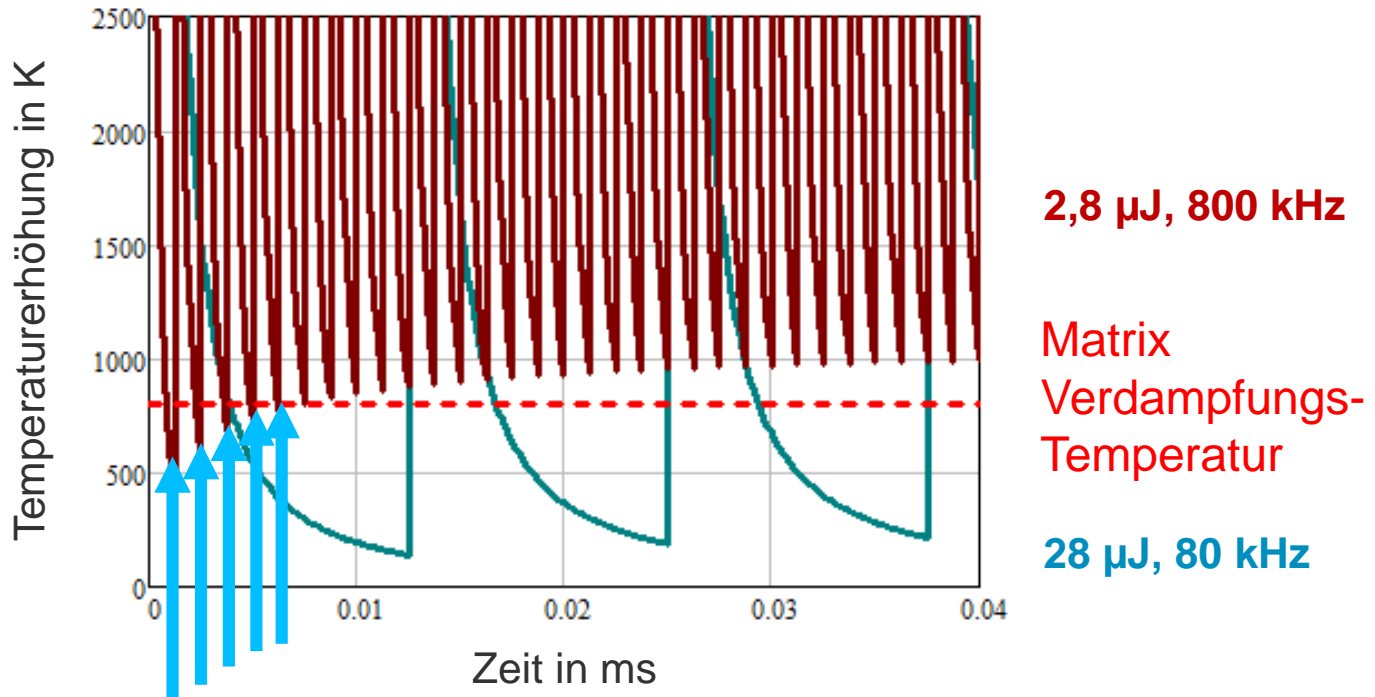
200 kHz, 28 μJ



Wärmeakkumulation zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Pulsen (WAP)
ausschlaggebend für Ausbildung der MVZ!

Wärmeakkumulation zwischen mehreren Pulsen

Analytische Beschreibung



Vermeidung der Wärmeakkumulation: Limitierung der Anzahl an Pulsen

Schnelle Strahlbewegung, z.B. $v_{\text{Feed}} \cong d_{\text{Focus}} \cdot f_{\text{Pulses}}$ (Pulsseparation)
(Ausnahme: Perkussionsbohren)

Gepulste Laserbearbeitung von CFK

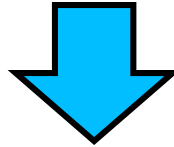
Drei wesentliche Schädigungsmechanismen

- **Schädigungsmechanismus:**

1. Wärmeleitung
während eines
einzelnen Laserpuls

2. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Laserpulsen

3. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Überfahrten



- **Prozessstrategie zur hochqualitativen Bearbeitung:**

**Ausreichend hohe
Intensität $>10^8 \text{ W/cm}^2$**

**Niedrige
Pulswiederholfrequenz
oder
Schnelle
Strahlbewegung**

Wärmeakkumulation zwischen mehreren Überfahrten

Auswirkung

Bi-axiales CFK, 2 mm

Kreise mit 5 cm Durchmesser

Mittlere Laserleistung: 0.4 kW

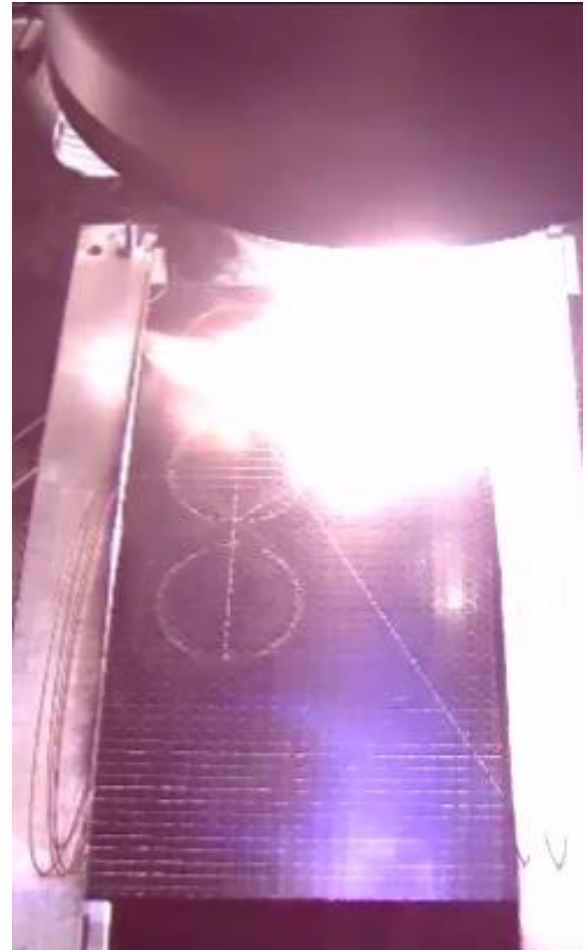
Pulswiederholfrequenz: 300 kHz,

Pulsenergie: 1.3 mJ

→ **Intensität:** $2.7 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$ (> min. I)

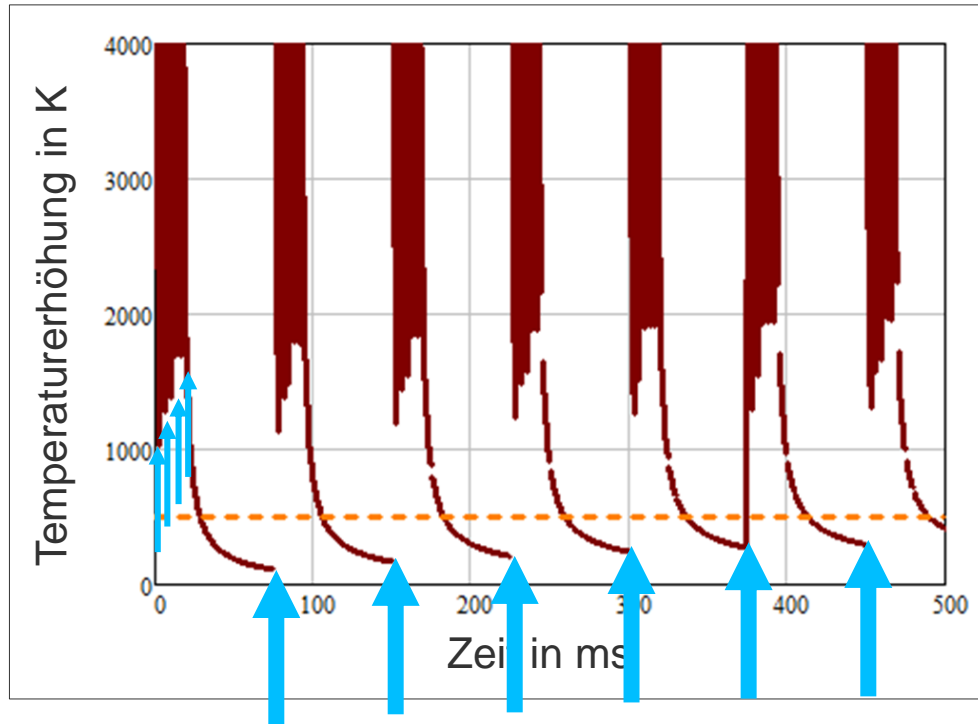
→ **Geschwindigkeit:** 30 m/s ($N_{\text{Pulse}} \approx 1$)

- **Starke Akkumulation von Wärme mit zunehmender Anzahl an Überfahrten**
- **Brennen für >300 Überfahrten**



Wärmeakkumulation zwischen mehreren Überfahrten

Analytische Beschreibung



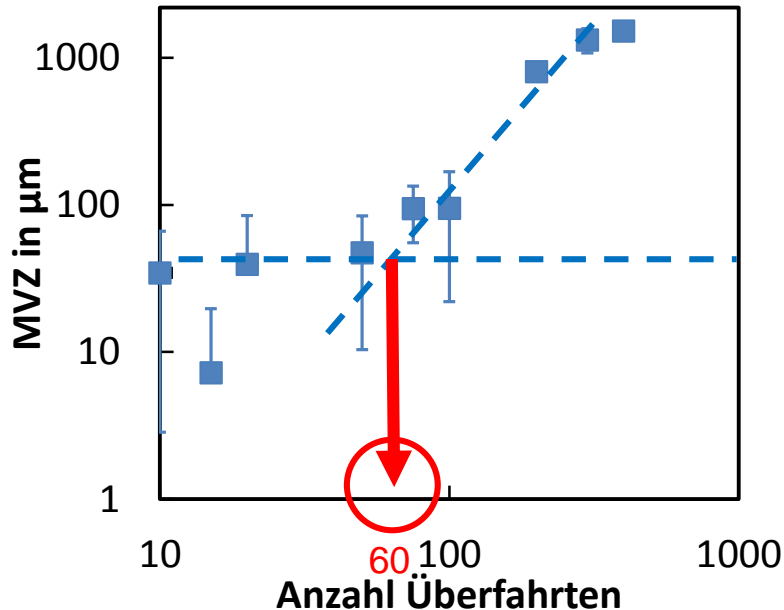
Matrix
Verdampfungs-
Temperatur

- $N_{\text{Scans}} > 2000$ für tiefe Strukturen
- Wie kann die Wärmeakkumulation zwischen mehreren Überfahrten charakterisiert werden?

Wärmeakkumulation zwischen mehreren Überfahrten

Kritische Anzahl an Überfahrten

MVZ für 1.1 kW, 30 m/s, Ø 5 cm:



Charakteristischer Wert für die Wärmeakkumulation zwischen mehreren Überfahrten:

Kritische Anzahl Überfahrten

N_{Critical}

⇒ **Näherungsformel für N_{Critical} ?**

Wärmeakkumulation zwischen mehreren Überfahrten

Näherungsformel

Näherung für die kritische Anzahl an Überfahrten N_{Critical}
für eine maximale Temperturerhöhung ΔT_{Max}

$$N_{\text{Critical}} \cong C_{\text{Mat},1D}^2 \cdot \Delta T_{\text{Max}} \cdot \frac{d_{\text{Mat}}^2 \cdot v_{\text{Feed}} \cdot \ell_{\text{Contour}}}{4 \cdot \bar{P}_{\text{Laser}}^2}$$

Wärmeakkumulation zwischen mehreren Überfahrten kann vermieden werden durch:

- Einführen von Prozesspausen ($N_{\text{Scans}} < N_{\text{Critical}}$)
- Begrenzung der mittleren Laserleistung pro Kontur
z.B. durch parallele Bearbeitung mehrerer Konturen
- Vergrößerung der Konturlänge
z.B. durch sequentielle Bearbeitung mehrerer Konturen

R. Weber, T. Graf, C. Freitag, A. Feuer, T. Kononenko, V. Konov, "Processing constraints resulting from heat accumulation during pulsed and repetitive laser materials processing". Opt. Express 25(4), 3966-3979 (2017).

Gepulste Laserbearbeitung von CFK

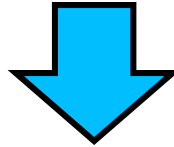
Drei wesentliche Schädigungsmechanismen

- **Schädigungsmechanismus:**

1. Wärmeleitung
während eines
einzelnen Laserpuls

2. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Laserpulsen

3. Wärmeakkumulation
zwischen mehreren
Überfahrten



- **Prozessstrategie zur hochqualitativen Bearbeitung:**

**Ausreichend hohe
Intensität $>10^8 \text{ W/cm}^2$**

**Niedrige
Pulswiederholfrequenz
oder
Schnelle
Strahlbewegung**

**Prozesspausen
oder
Lange
Bearbeitungskontur
oder
Parallele Bearbeitung**

Anwendungsbeispiele

IFSW kW-class-ps-Laser (Passive Multipass Amplifier)



Laser 0,65 kW

$\lambda = 1.03 \mu\text{m}$

$\tau = 8 \text{ ps}$

$f_p = 300 \text{ kHz}$

$E_p = 2.2 \text{ mJ}$

Scanner

$f = 340 \text{ mm}$

$d_f = 120 \mu\text{m}$

C. Freitag et al., Applied Physics A, 119(4) (2015)

Anwendungsbeispiele

Schneiden von 10 mm dickem CFK

Intensität:

Mittlere Laserleistung: 500 W @ 300 kHz

→ Pulsenergie 1,7 mJ

→ **Intensität $3,3 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2 > 10^8 \text{ W/cm}^2$**

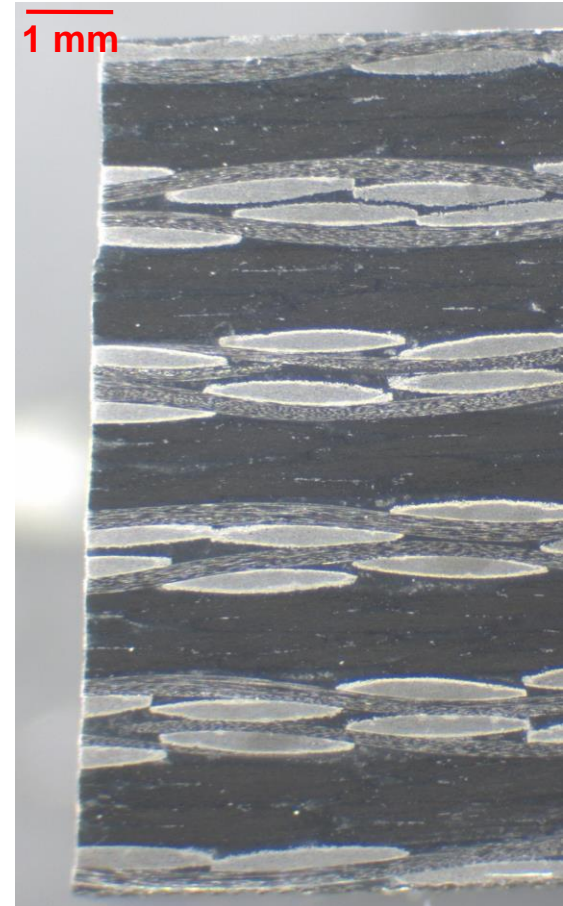
**Vermeidung der Wärmeakkumulation
zwischen mehreren Pulsen:**

Vorschubgeschwindigkeit 25 m/s

→ **Anzahl Pulse pro Ort 1,5 (Pulsüberlapp 25%)**

**Vermeidung der Wärmeakkumulation
zwischen mehreren Überfahrten:**

Prozesspause nach 600 Überfahrten von 30s

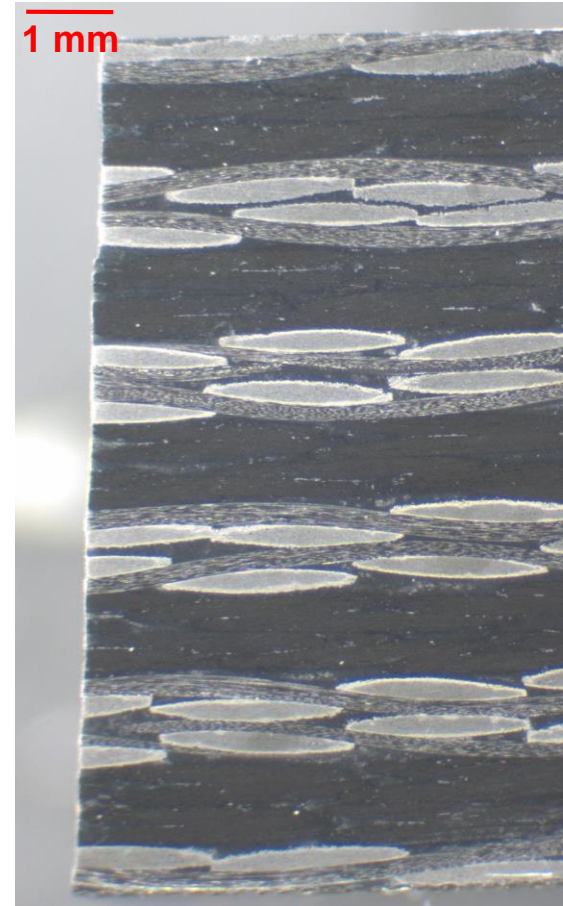
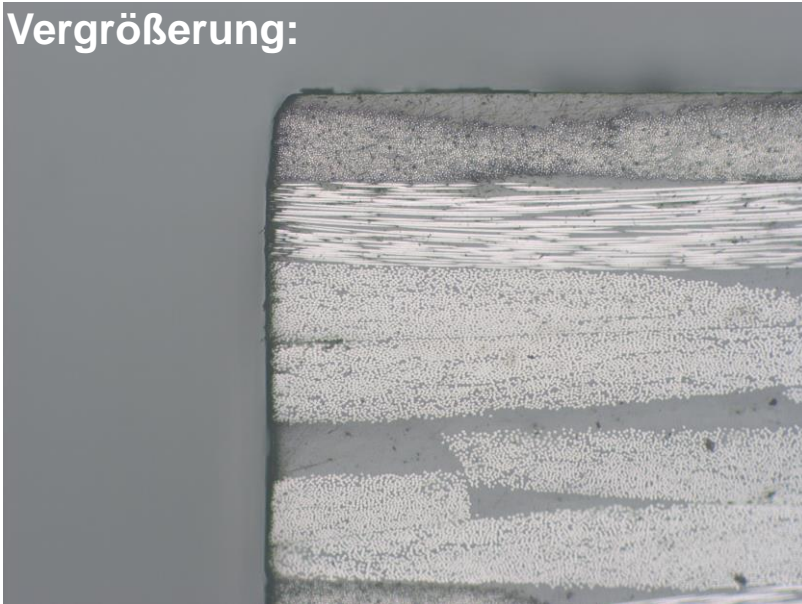


Anwendungsbeispiele

Schneiden von 10 mm dickem CFK

- **Thermische Schädigung:**
 - Meist keine Schädigung messbar
 - Vereinzelt MVZ $\approx 45 \mu\text{m}$
- **Effektive Schneidgeschwindigkeit**
13,9 mm/min

Vergrößerung:

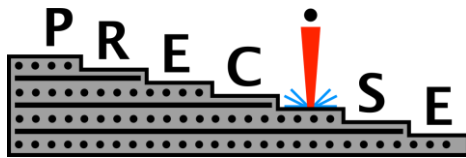


Anwendungsbeispiele

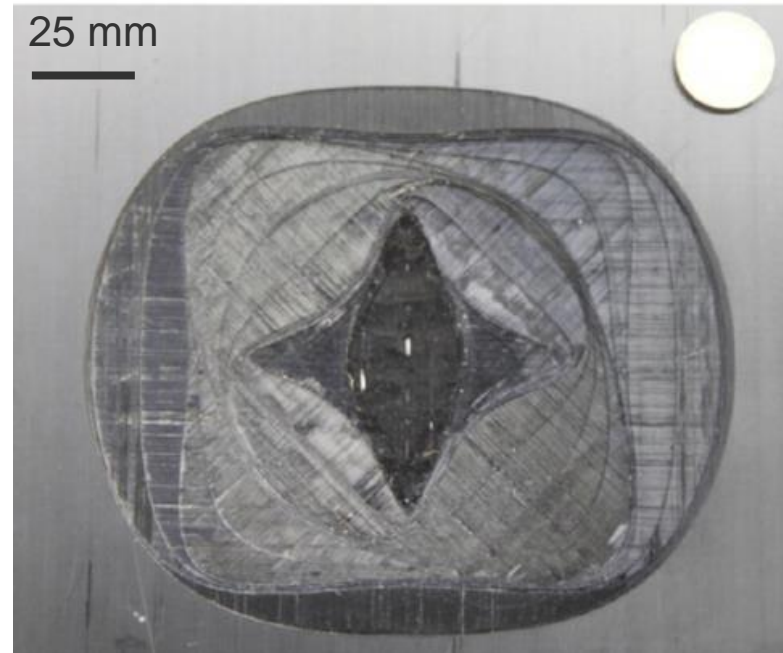
Abtrag von Flächen zur Reparaturvorbereitung

Photonisch basierter Reparaturprozess:

- Schadenserkennung
- Berechnung der Reparaturgeometrie
- Entfernen der beschädigten Lagen
- Oberflächenbehandlung
- Integration des Reparaturstücks
- Qualitätssicherung



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Anwendungsbeispiele

Abtrag von Flächen zur Reparaturvorbereitung

Messsystem

Precitec Chrocodile2 / Scanlab intelliSCAN 30

Tiefenmessbereich: <6 mm

X-/Y-Auflösung: 20 μm

Z-Auflösung: $\pm 1 \mu\text{m}$

Messfrequenz: max. 70 kHz

Messgeschwindigkeit: 3,5 m/s



ns-Laser

Wellenlänge: 1047 nm

Pulsfrequenz: 15 kHz

Pulsleistung: 1,4 mJ

Bearbeitung: 0,6 m/s

Hatchabstand: 60 μm



Anwendungsbeispiele

Abtrag von Flächen zur Reparaturvorbereitung

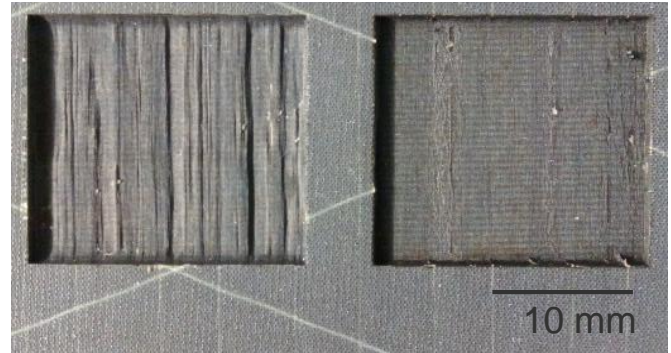
Vergleich ohne / mit Regelung

Ohne Regelung: 1090 μm mittlere Tiefe
 $S_a = 85 \mu\text{m}$

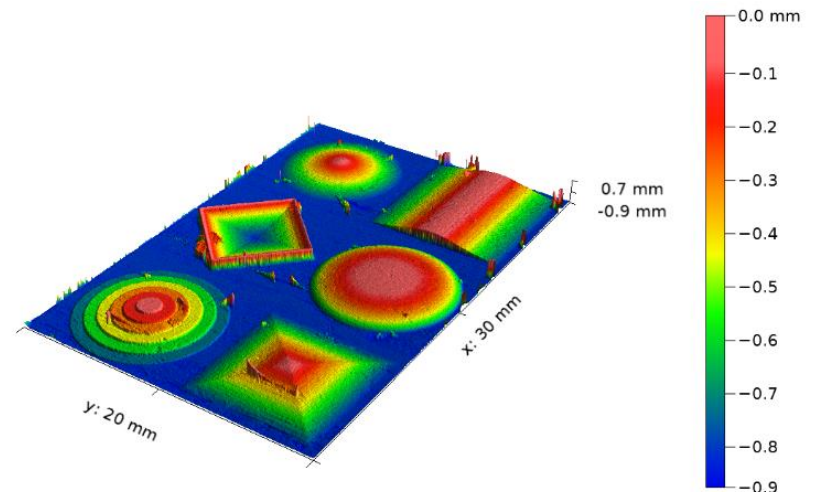
Mit Regelung: 1020 μm mittlere Tiefe
 $S_a = 7 \mu\text{m}$

Ohne Regelung

Mit Regelung



5 mm



27.10.2016

26

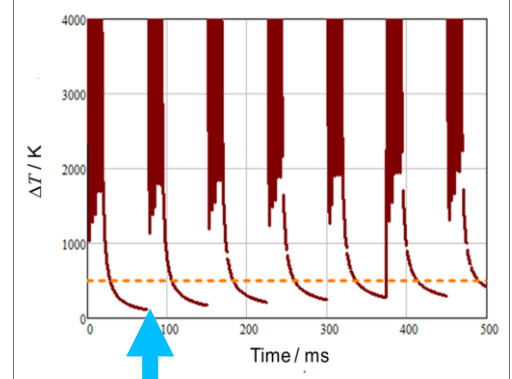
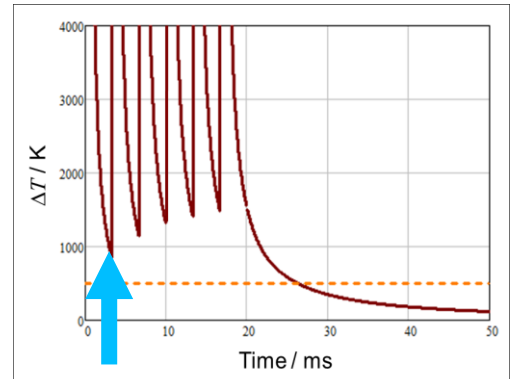
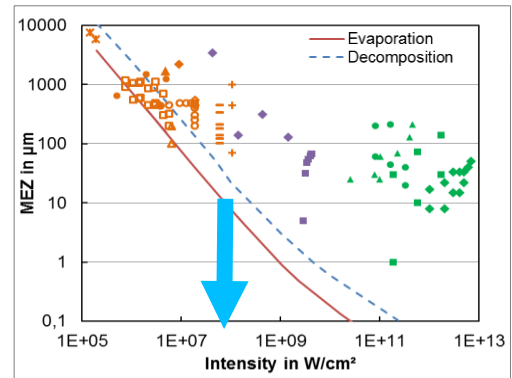
Zusammenfassung

Hochqualitative Laserbearbeitung von CFK möglich.

**Ausreichend hohe
Intensität $>10^8 \text{ W/cm}^2$**

**Niedrige
Pulswiederholfrequenz
oder
Schnelle
Strahlbewegung**

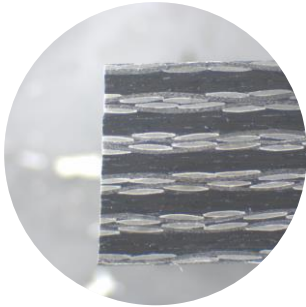
**Prozesspausen
oder
Lange
Bearbeitungskontur
oder
Parallele Bearbeitung**





Universität Stuttgart

Vielen Dank!



Christian Freitag

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

Telefon +49 (0) 711 685-69759

Fax +49 (0) 711 685-66842

Universität Stuttgart

Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Pfaffenwaldring 43, 70569 Stuttgart