



**TUBAF**

Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.



GAS- UND  
WÄRMETECHNISCHE  
ANLAGEN

# MIKROWELLENUNTERSTÜTZTE PYROLYSE ZUM VOLLSTÄNDIGEN STOFFLICHEN RECYCLING VON CFK-ABFÄLLEN

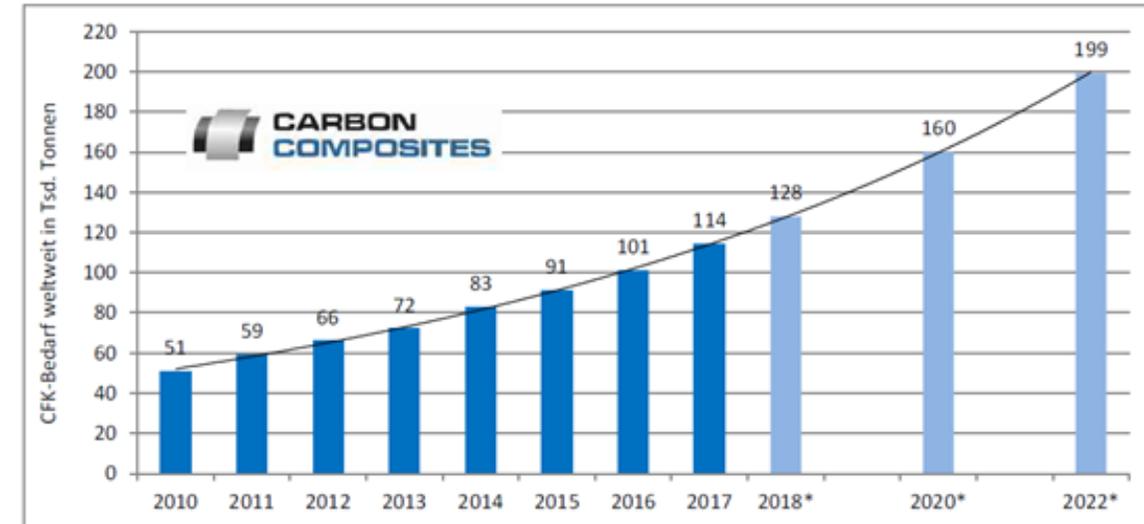
*Muralimohan Juttu, Ralph Behrend, Mareen Zöllner, Hartmut Krause*

18.10.2023 | 4. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium

TU Bergakademie Freiberg - Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik (IWTT)  
Lehrstuhl für Gas- und Wärmetechnische Anlagen

# Motivation

- Jahresbedarf von 191.000 Tonnen CFK im Jahr 2022 weltweit
- Herstellung von CFK ist energetisch aufwändig - 0,4 bis 0,95 GJ/kg<sub>CFK</sub>
- Verordnung des europäischen Parlaments (2000/53/EG)
  - Automobilhersteller verpflichtet 85 % Prozent der Fahrzeugmasse zu recyceln

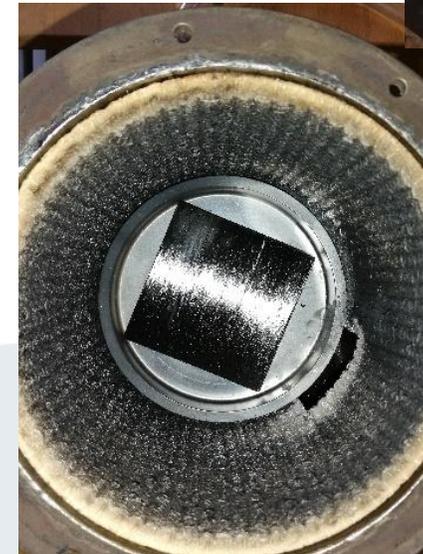


Entwicklung des globalen CFK-Bedarfes in Tsd.t von 2010 bis 2022 (\*Schätzungen; 11/2018).

\*Sauer M und Kühnel M - Composites-Marktbericht 2018

# Mikrowelle Pyrolyse: Vorteile

- Selektive volumetrische Erwärmung → Hoher Wirkungsgrad
- Hohe Aufheizgeschwindigkeit
- Mikrowellenerwärmung ermöglicht
  - Einsatz elektrischer, regenerativ erzeugter Energie
  - Schnelles An- und Abfahren
  - Leistungsbereich modulierbar
  - Einfache Atmosphärentrennung



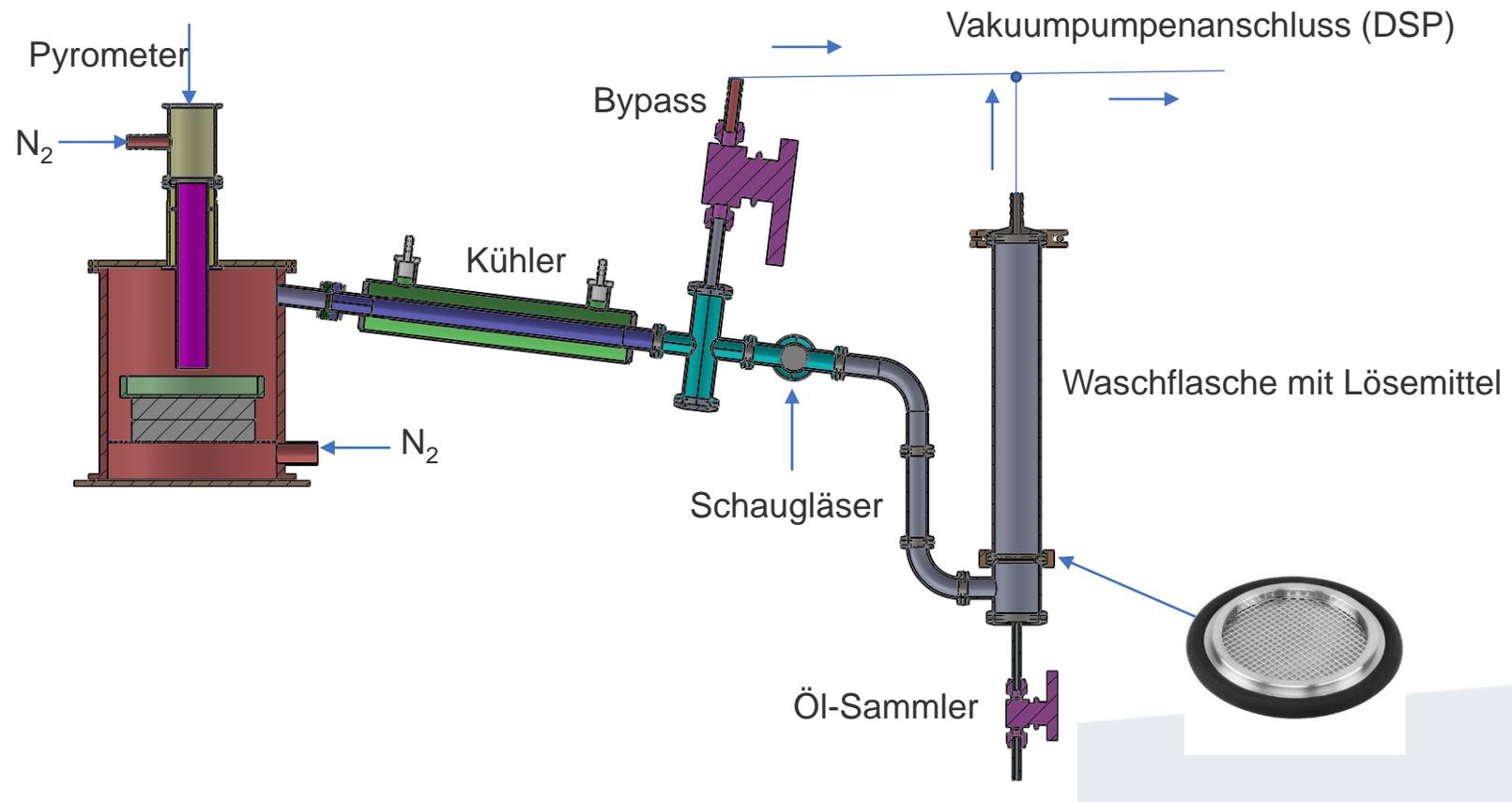
# Kohlefasern

Die wichtigsten Eigenschaften von Recyclingfasern sowie rCF-Halbzeugen

C-Faser	Kennwerte für Halbzeuge / Endprodukte
Faserlängen - Verteilung	Faserlänge – Verteilung
Faserdurchmesser- Verteilung	Gleichmäßigkeit Flächengewicht
Faserfestigkeit / E-Modul	Faserfestigkeit / E-modul
Beschlichtungsgrad	Flächengewicht
Verunreinigungen / Restanhaftungen	Isotropie

*FOREL-Studie 2015 und Schlichter*

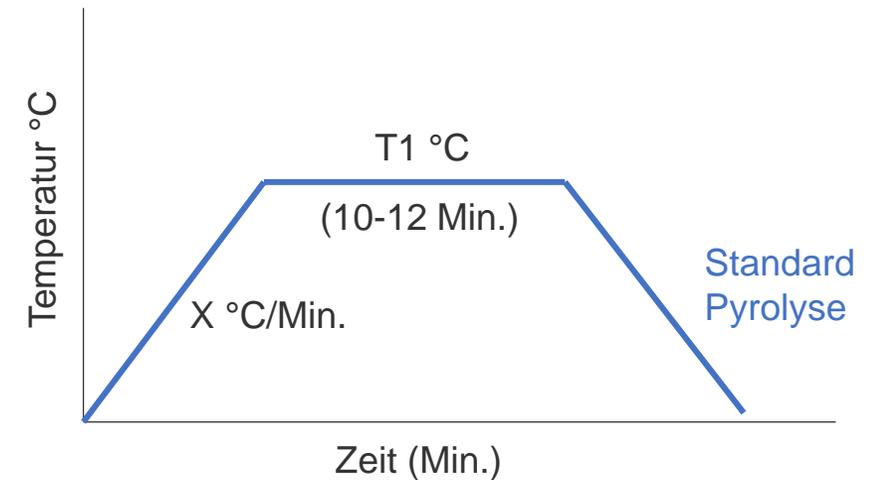
# Prüfstand - Umbau



# Laborversuche Mikrowellen-Pyrolyse

## Versuchsparameter – Standard Pyrolyse

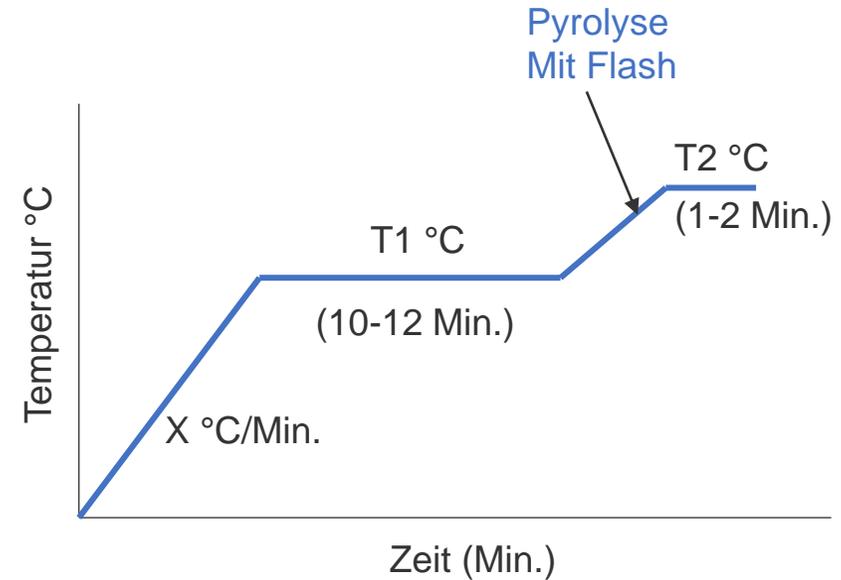
- Pyrolyse von CFK im Temperaturbereich von 350-550 °C
- Leichter Systemunterdruck (50 mbar)
- Spülgas - Stickstoff (1-3 l/min)
- Proben Abmessungen - 80 x 80 mm<sup>2</sup>
- 80–90 g CFK pro Versuch beladen
- CFK-Probe – 3-lagiges, unidirektionales CF, 33 Gew.-% transparentes Epoxidharz



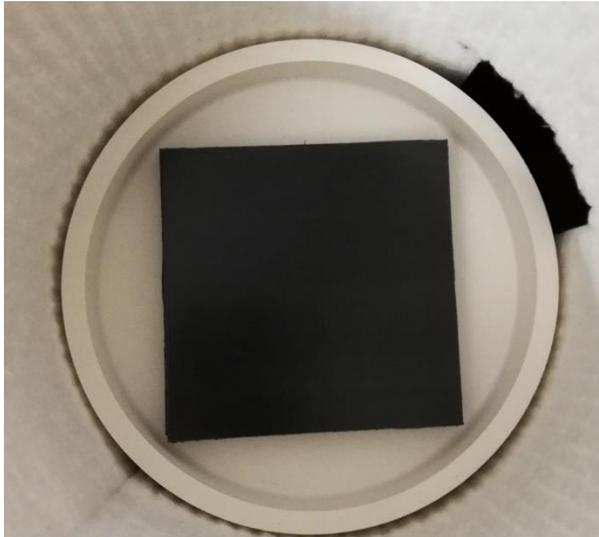
# Laborversuche Mikrowellen-Pyrolyse

## Pyrolyse mit Sauerstoff Flash

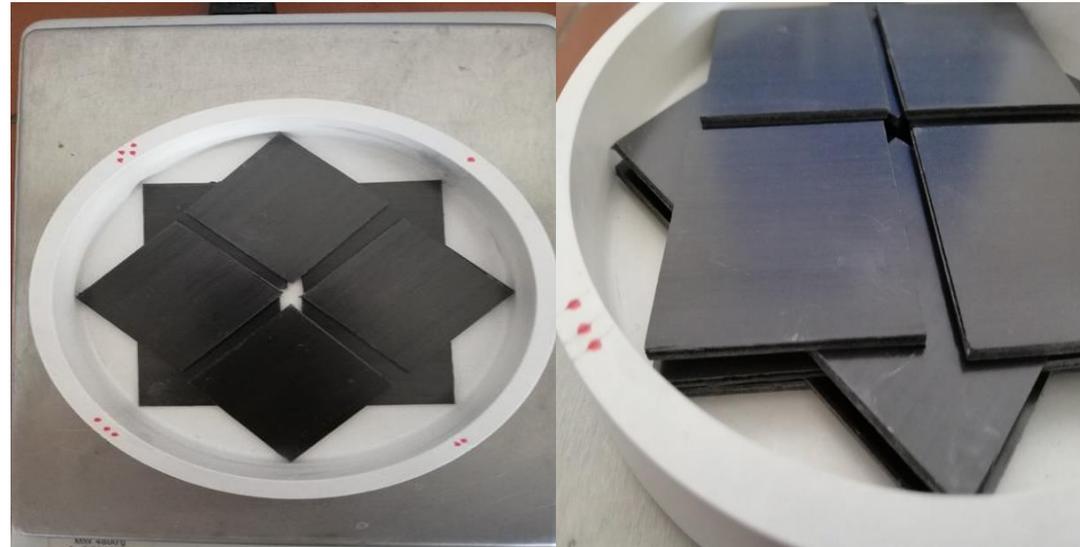
- Bessere Freilegung der Fasern/ Entfernung von Koksrückständen.
- Der Sauerstoff-Flash wird am Ende der Pyrolyse bei höherer Temperatur durchgeführt.
- Temperatur:  $T1 + 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- Zeitdauer: 1 min
- Spülgas: Luft (1-3 l/min)



# Laborversuche Mikrowellen-Pyrolyse

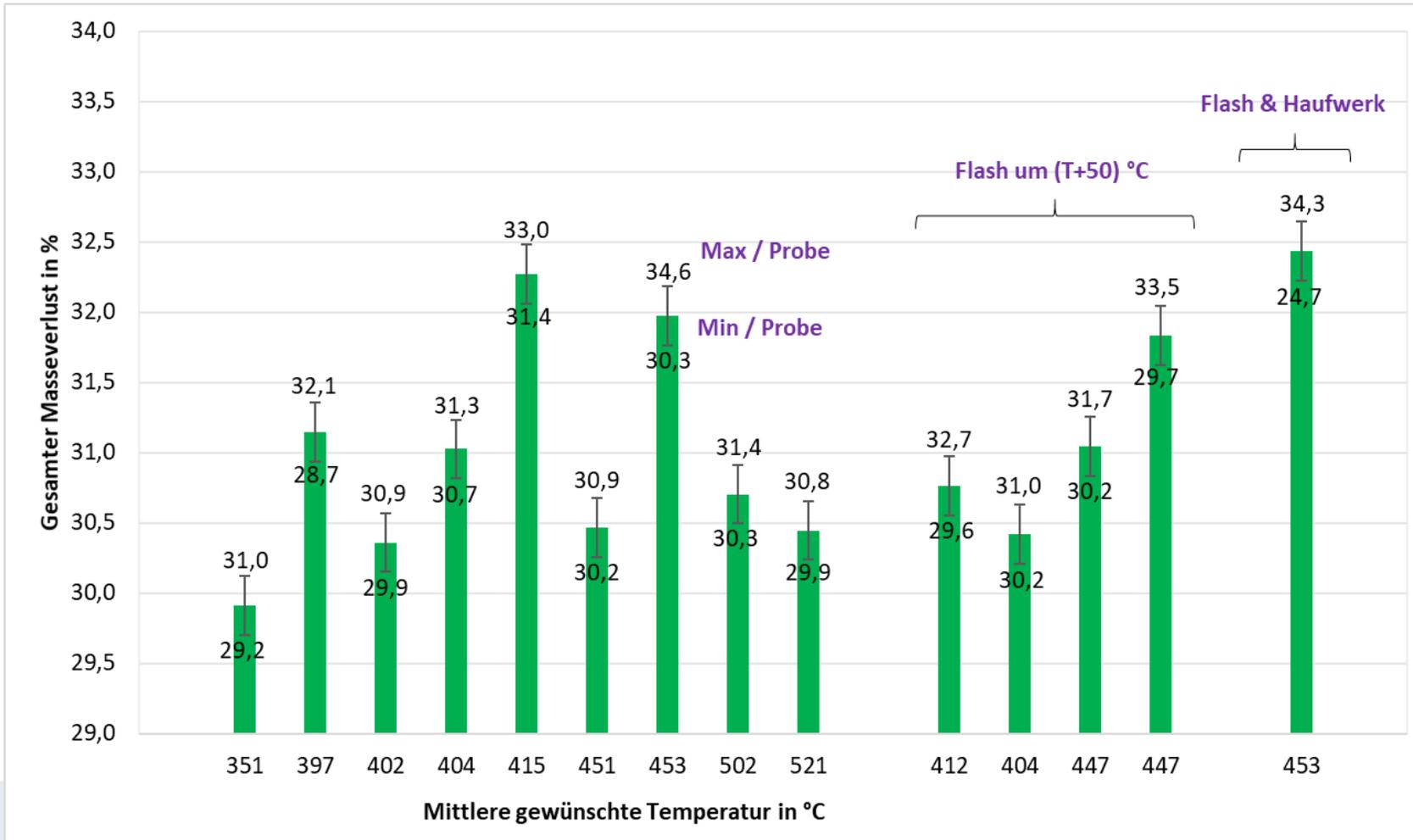


Stapel-Probenanordnung

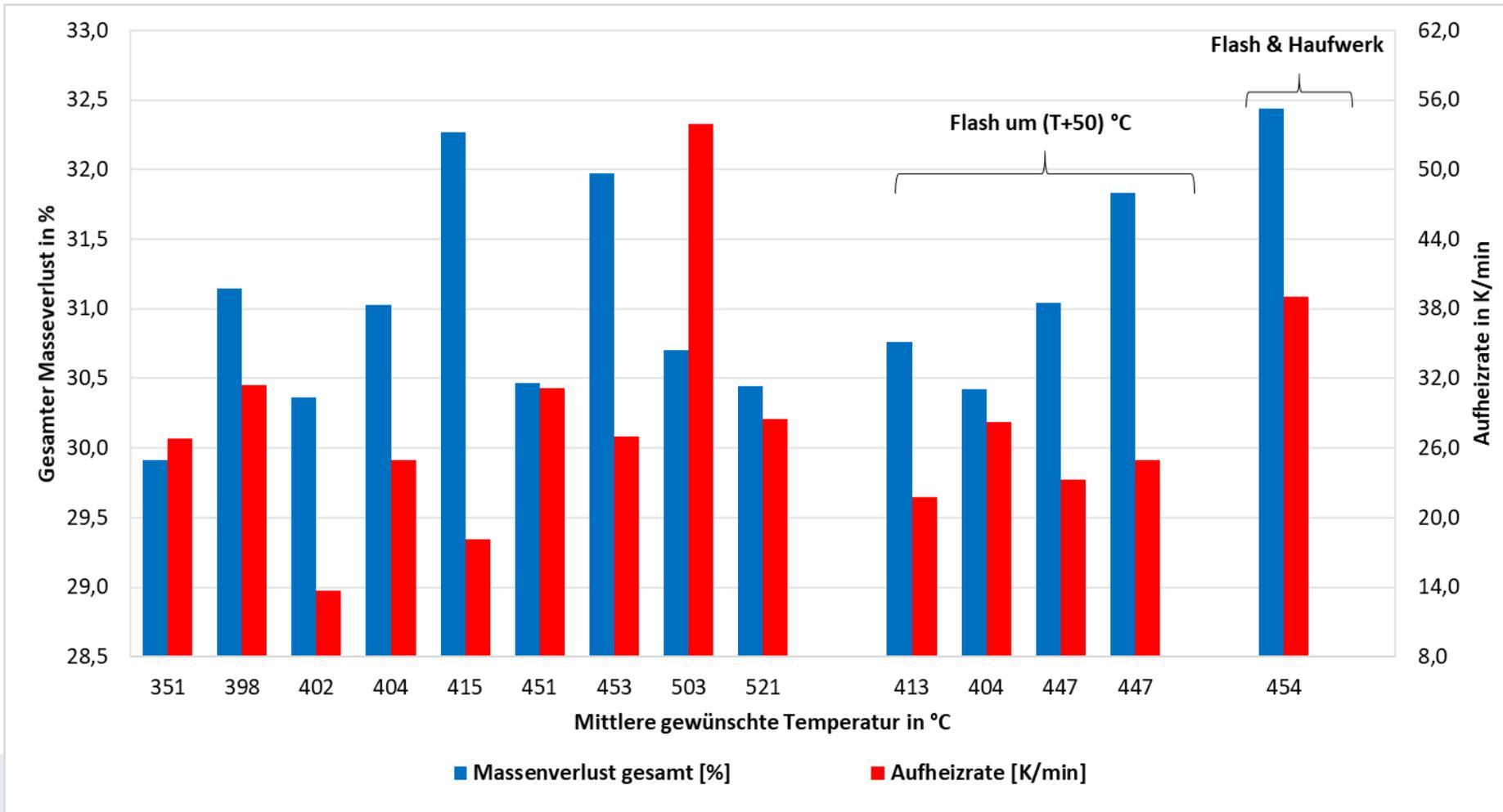


CFK-Plättchen (40x40 mm<sup>2</sup>) - Haufwerk

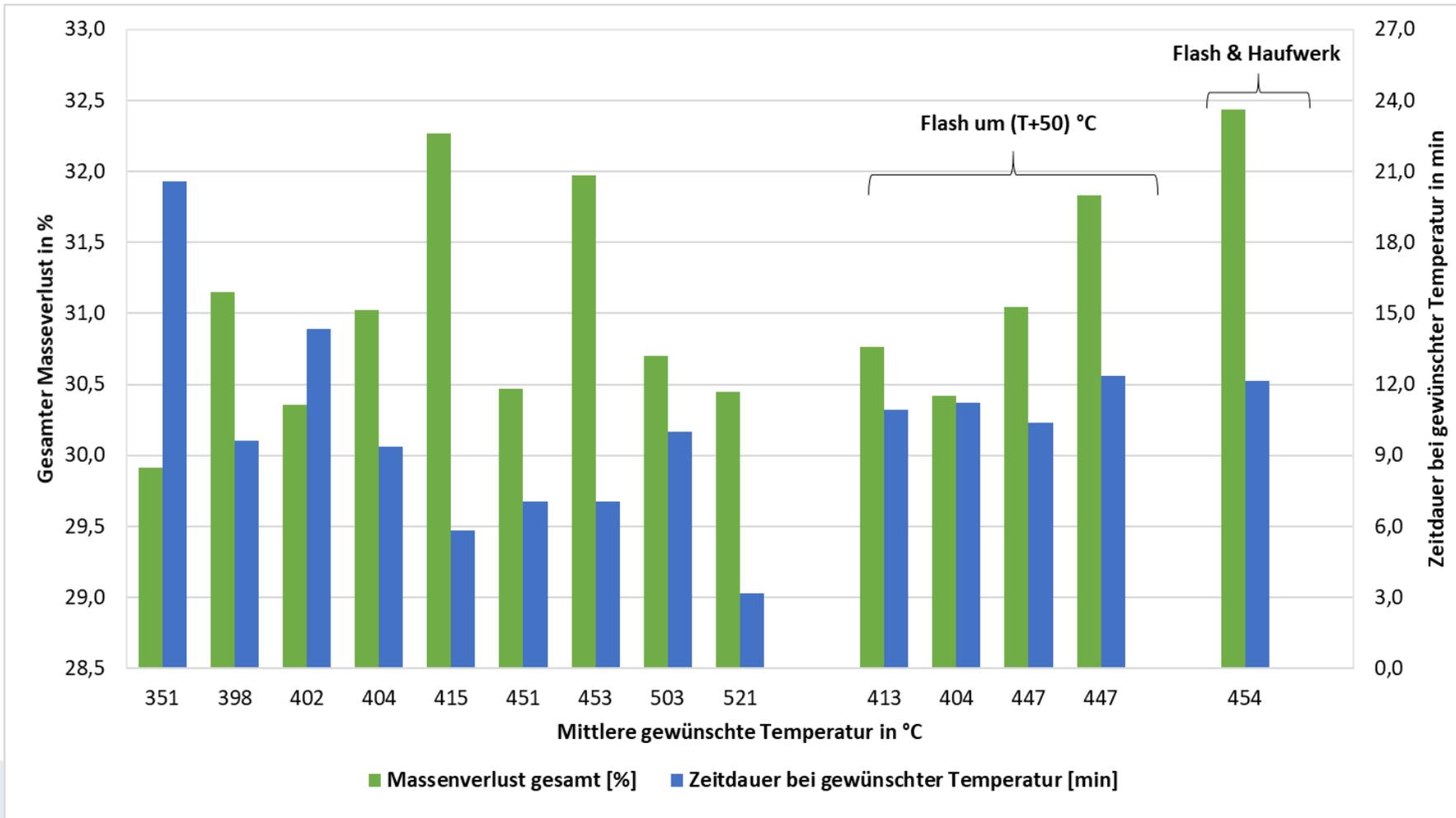
# Auswertung – T vs $\Delta m$



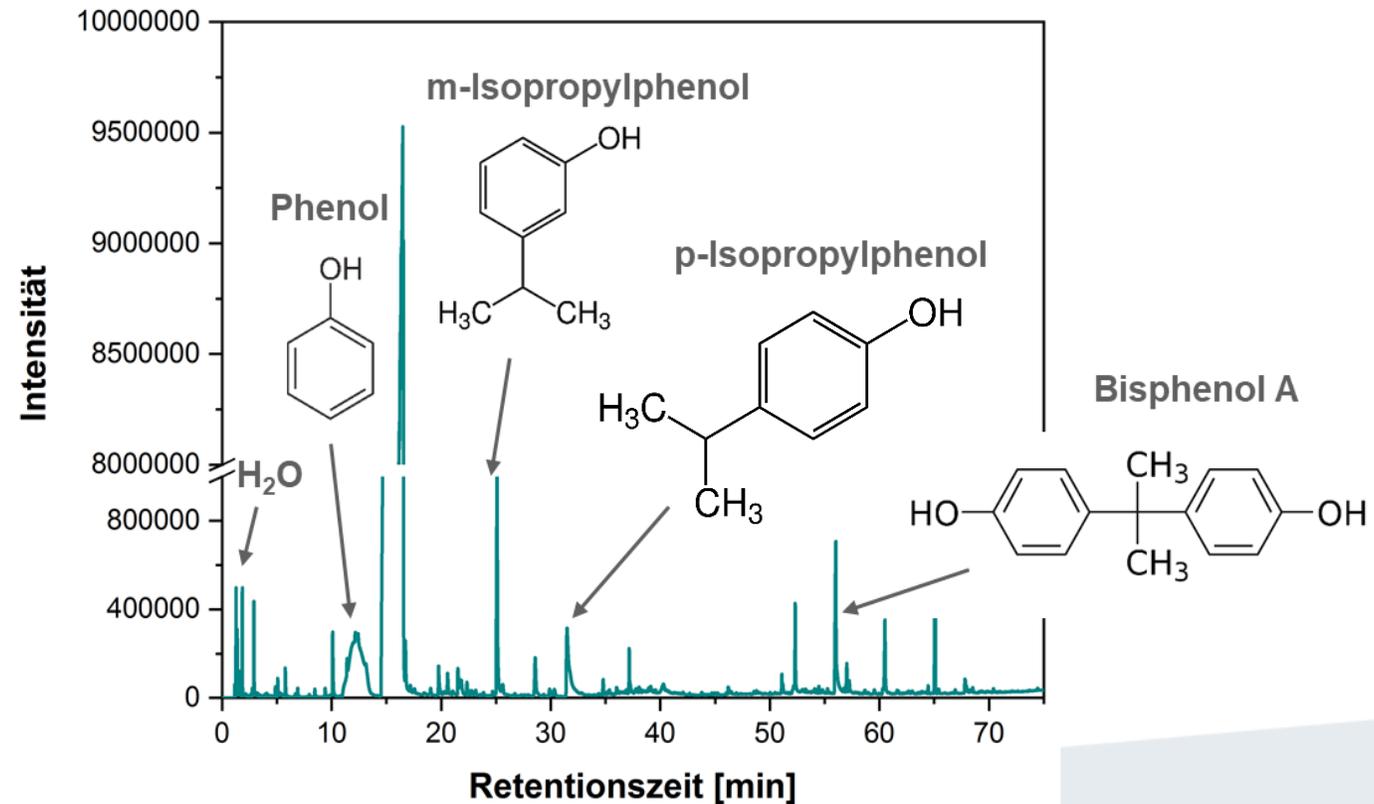
# Auswertung - T vs $\Delta m$ vs $\Delta T/t$



# Auswertung - T vs $\Delta m$ vs t



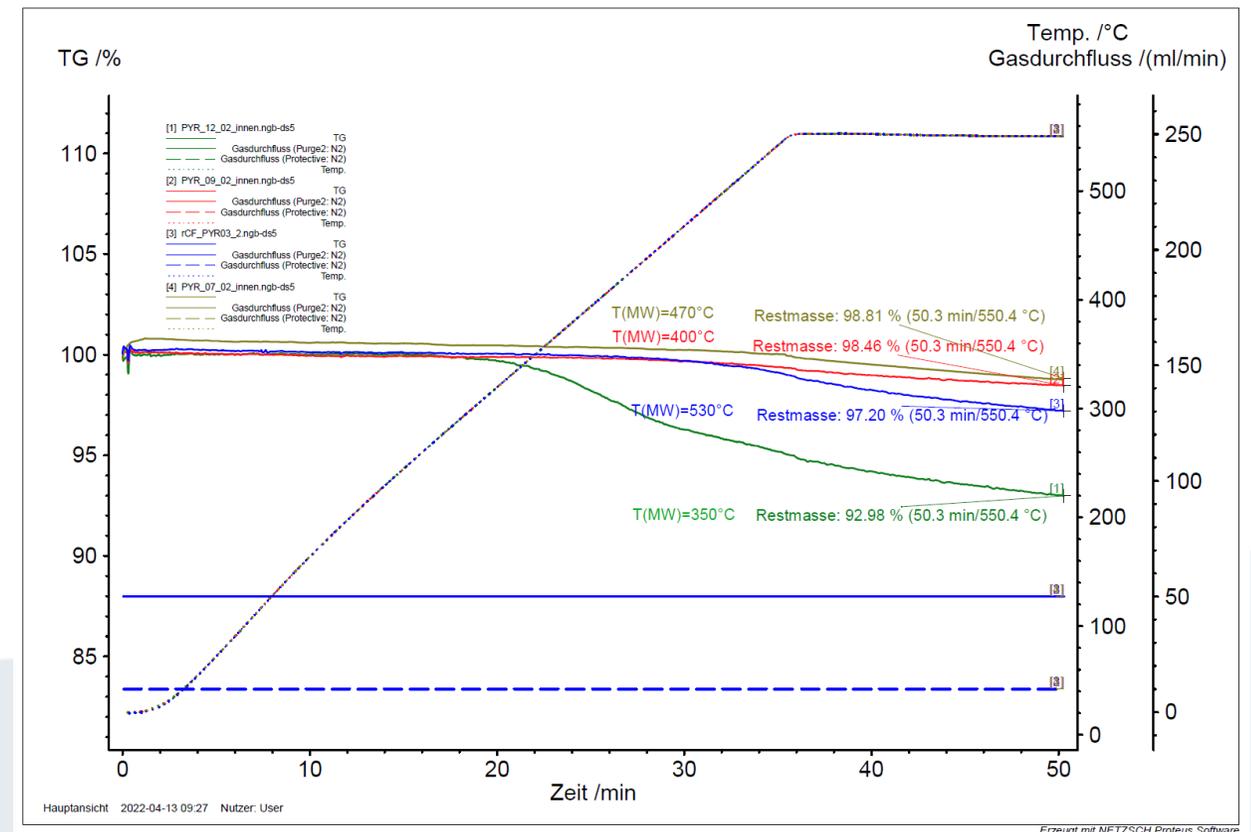
# Durchführung von Analysen zur Beeinflussung der Pyrolyseprodukte



# Matrixrückstände auf Probenoberfläche - Prüfung durch TGA

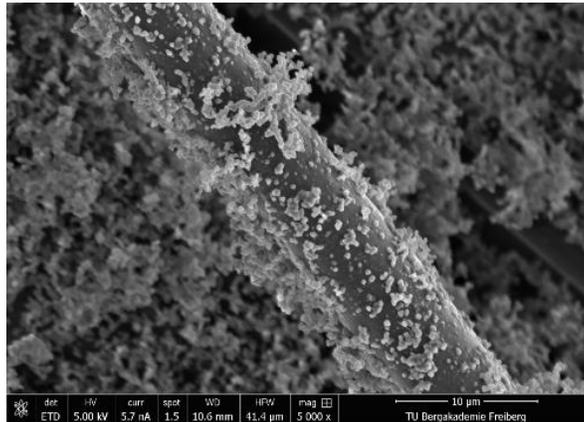
## Einfluss der Behandlungstemperaturen

- 530°C/470°C/400°C/350°C
- Tendenziell sinkt die Reinheit der rCF mit sinkender Behandlungstemperatur (Ausnahme T(MW)=530°C → wurde Dauer (3 min) der Verweilzeit variiert).
- Insbesondere bei T(MW)= 350°C beträgt Restmasseanteil an rCF ca. 7% → Fasern liegen hier nicht frei vor, Temperatur zu niedrig.
- Temperatur von T=400°C als untere Grenze empfohlen.

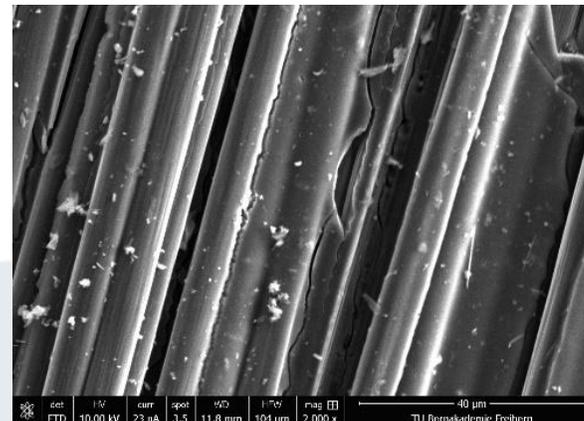
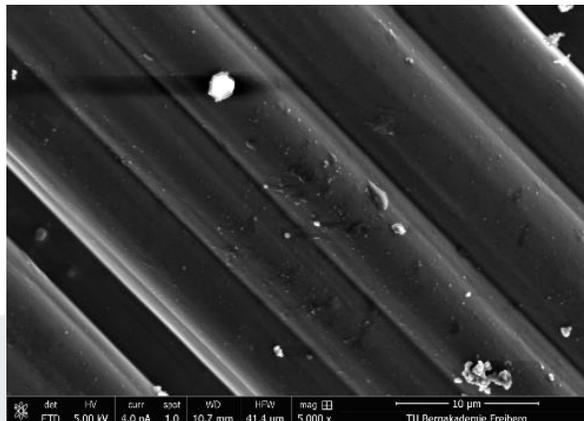
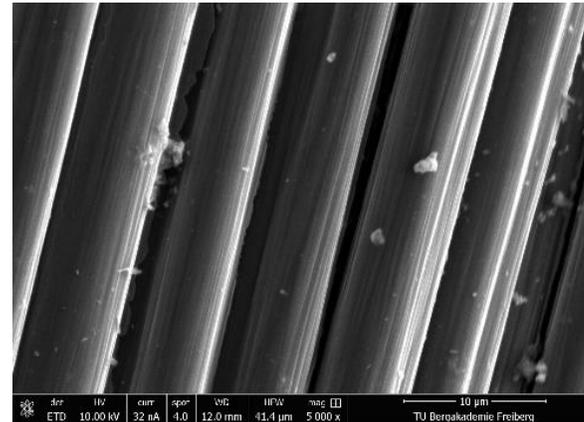


# Faserschädigung - Faseroberfläche Prüfung durch REM-Aufnahmen

Oberste Schicht



Mittlere Schicht

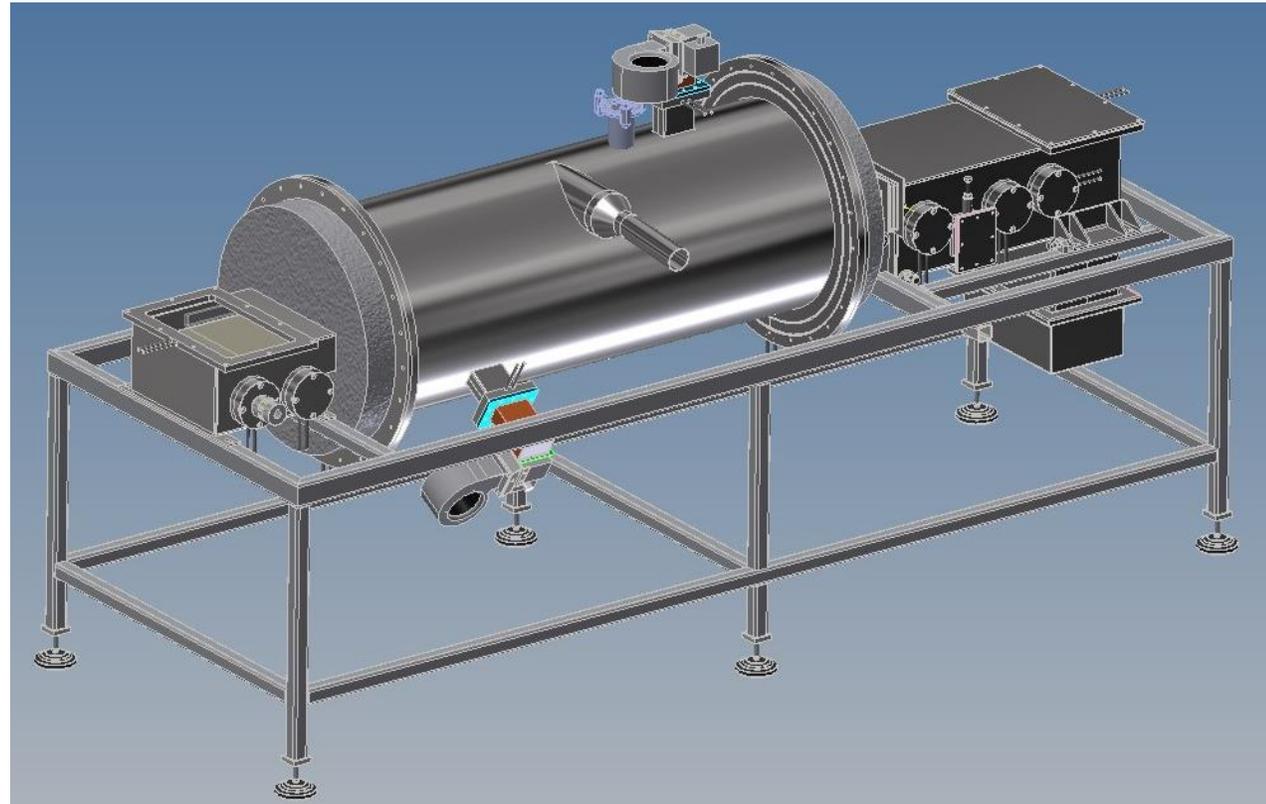


Probe 16 (450°C mit Flash @500°C)

# Zusammenfassung

- Bei allen bisherigen Untersuchungen der MW-Pyrolyse bleibt Schädigung der Faseroberfläche aus.
- Faserlänge: nicht gekürzt durch Mikrowellenpyrolyse.
- Maximale Reinheit der rCF mittels  $T(\text{MW})=450^{\circ}\text{C}$  mit  $T(\text{Flash})=500^{\circ}\text{C}$  erreicht.
- Obere Schichten des CFK-Platten-Stapels weisen höhere Rückstände auf als mittlere/untere Schichten.
- REM-Analysen decken sich mit TGA-Erkenntnissen.

# Demonstrator



# Ausblick

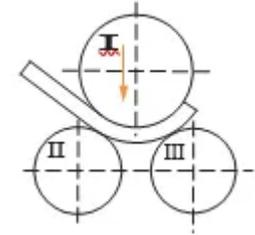
## ➤ Mechanische Vorbearbeitung von CFK-Proben

- Um die Bindung zwischen Matrixmaterial (Epoxidharz) und der Kohlefaser zu schwächen
- Proben werden in einer 3-Walzen-Biegemaschine gebogen – IART Vorschlag

## ➤ Weitere geplante Versuche

- Pyrolyse durchführen bei
  - Sauerstoff Flash um  $T_2 = T + 50$  °C und  **$T + 100$**  °C
  - Sauerstoff Flash für 1-2 Minuten durchgeführt
  - Stickstoff Durchfluss variieren (1, 2, 3 l/min)
  - Wasser als Lösungsmittel

## ➤ Herstellung Recyclingprodukte





# TUBAF

Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.



## GAS- UND WÄRMETECHNISCHE ANLAGEN

*Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!*

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Krause  
Lehrstuhlinhaber für Gas- und Wärmetechnische Anlagen  
im Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik  
Tel.: +49 3731 39-3941  
Email: [hartmut.krause@iwtt.tu-freiberg.de](mailto:hartmut.krause@iwtt.tu-freiberg.de)

M.Sc. Ralph Behrend  
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik  
Email: [ralph.behrend@iwtt.tu-freiberg.de](mailto:ralph.behrend@iwtt.tu-freiberg.de)

M.Sc. Muralimohan Juttu  
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik  
Email: [muralimohan.juttu-vidyasagar@iwtt.tu-freiberg.de](mailto:muralimohan.juttu-vidyasagar@iwtt.tu-freiberg.de)



Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik (IWTT)  
Anschrift: Lampadiusbau,  
Gustav-Zeuner-Str 7  
09599 Freiberg