



Thermochemisches Recycling glasfaserverstärkter Kunststoffe mittels Pyrolyse

Sascha Roeske

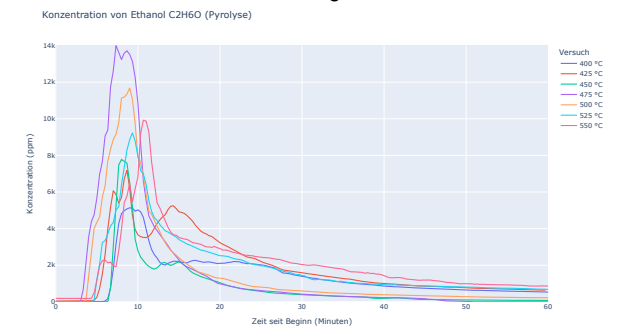
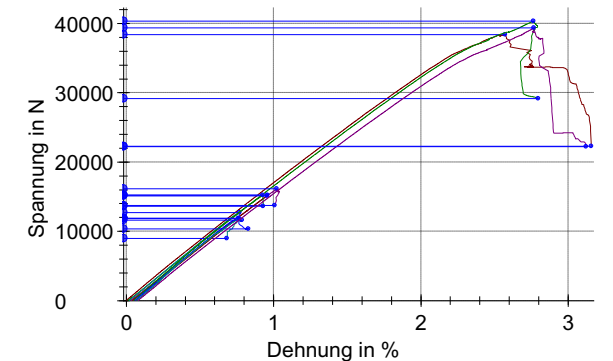
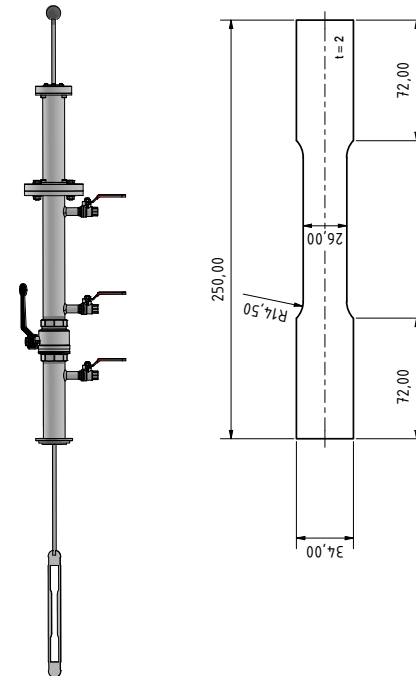
Agenda

Einführung
GFK & Recycling

Forschungsfragen

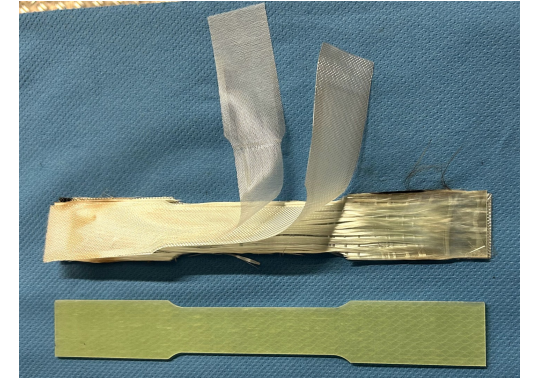
Durchführung
Probenherstellung
Konstruktion
Pyrolyse
Mechanische Analyse

Ergebnisse
Diskussion



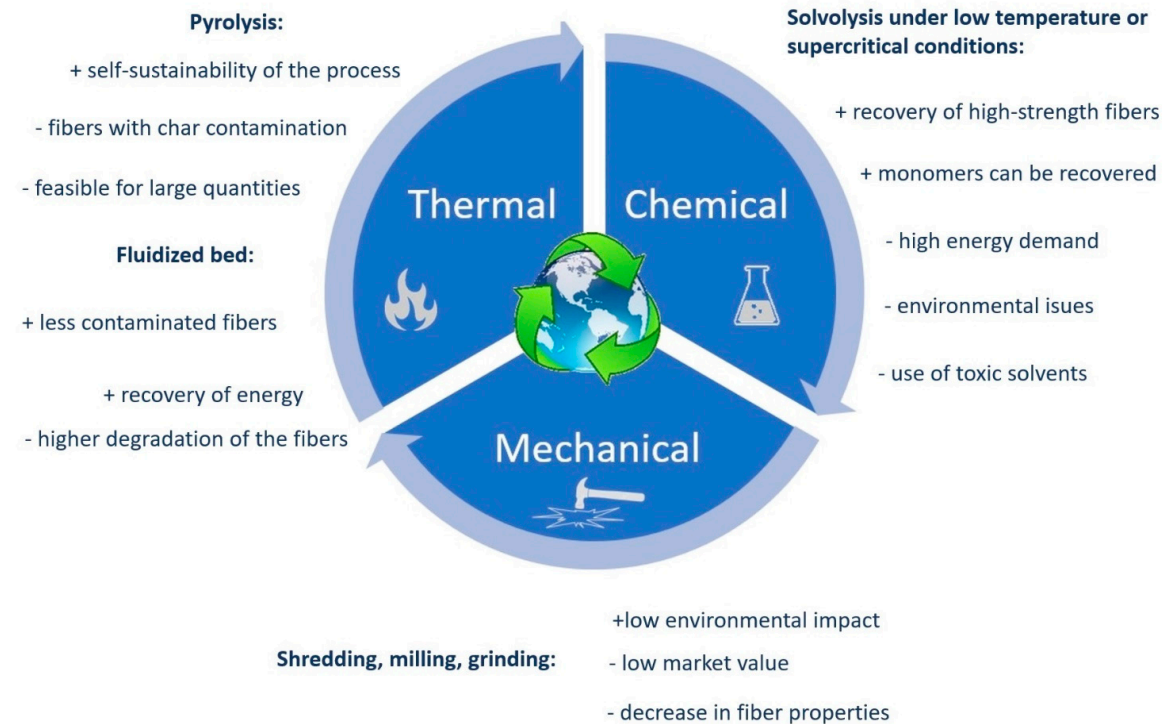
Glasfaserverstärkte Kunststoffe - Einführung

- Verbundmaterial: Fasern und Matrix
- Vorteile:
 - Hochfeste Bauteile bei geringem Gewicht
 - Formgebungsfreiheit
 - Widerstandsfähigkeit



Glasfaserverstärkte Kunststoffe – Mengen & Recycling

- Gesamtproduktionsvolumen duroplastischer GFK in Europa 2023: 1.073.000.000 t (Witten und Mathes, 2023, S. 11)
- Abfallmengen Windkraftanlagen bis 2050: über 2.000.000 t pro Jahr (Liu und Barlow, 2017, S. 229)



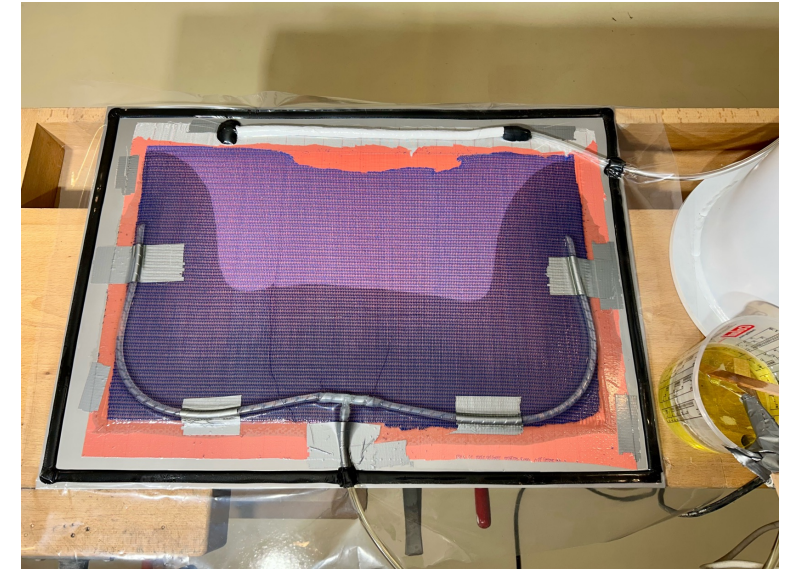
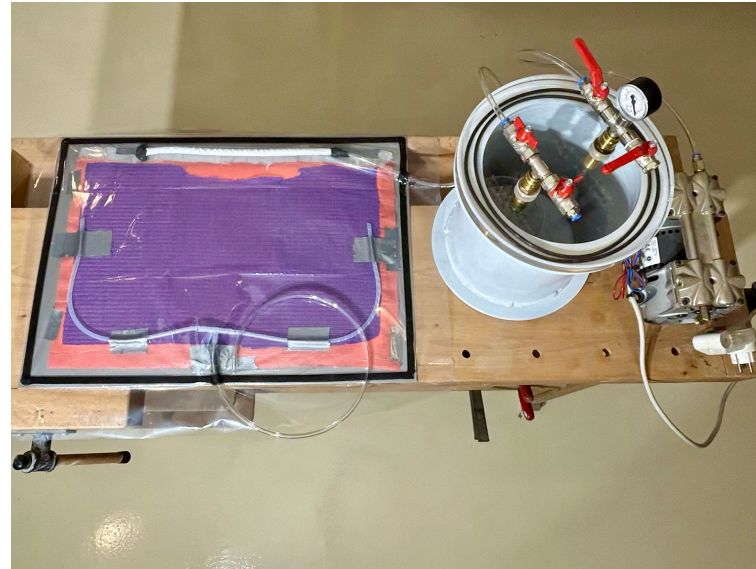
(Zieminska-Stolarska et al., 2024, S. 4)

Forschungsfragen

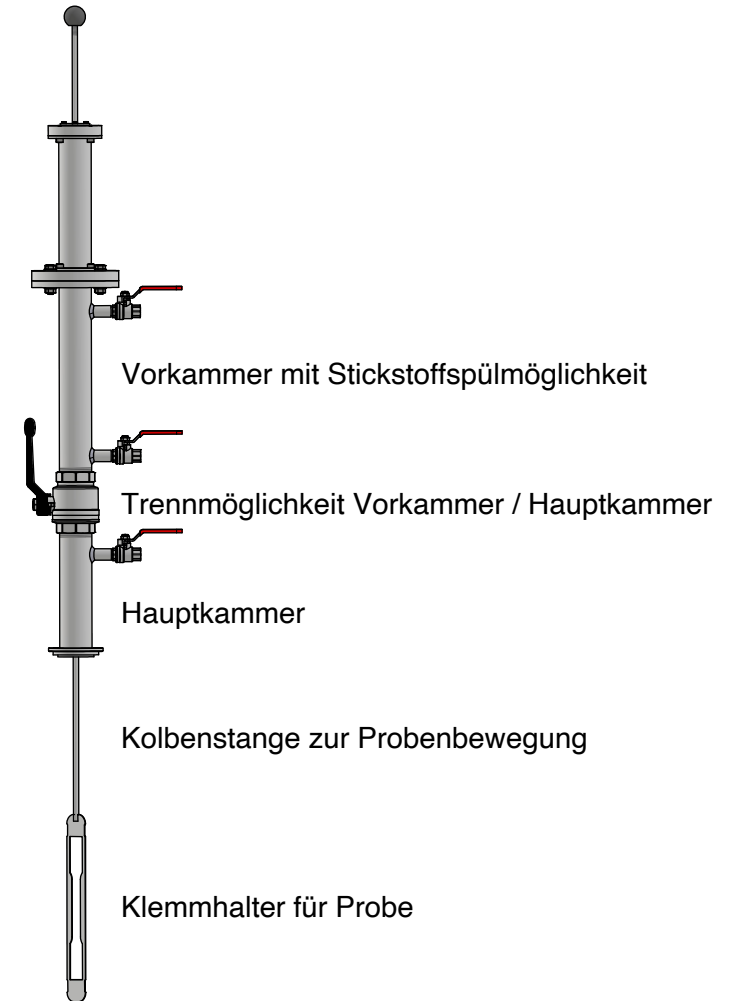
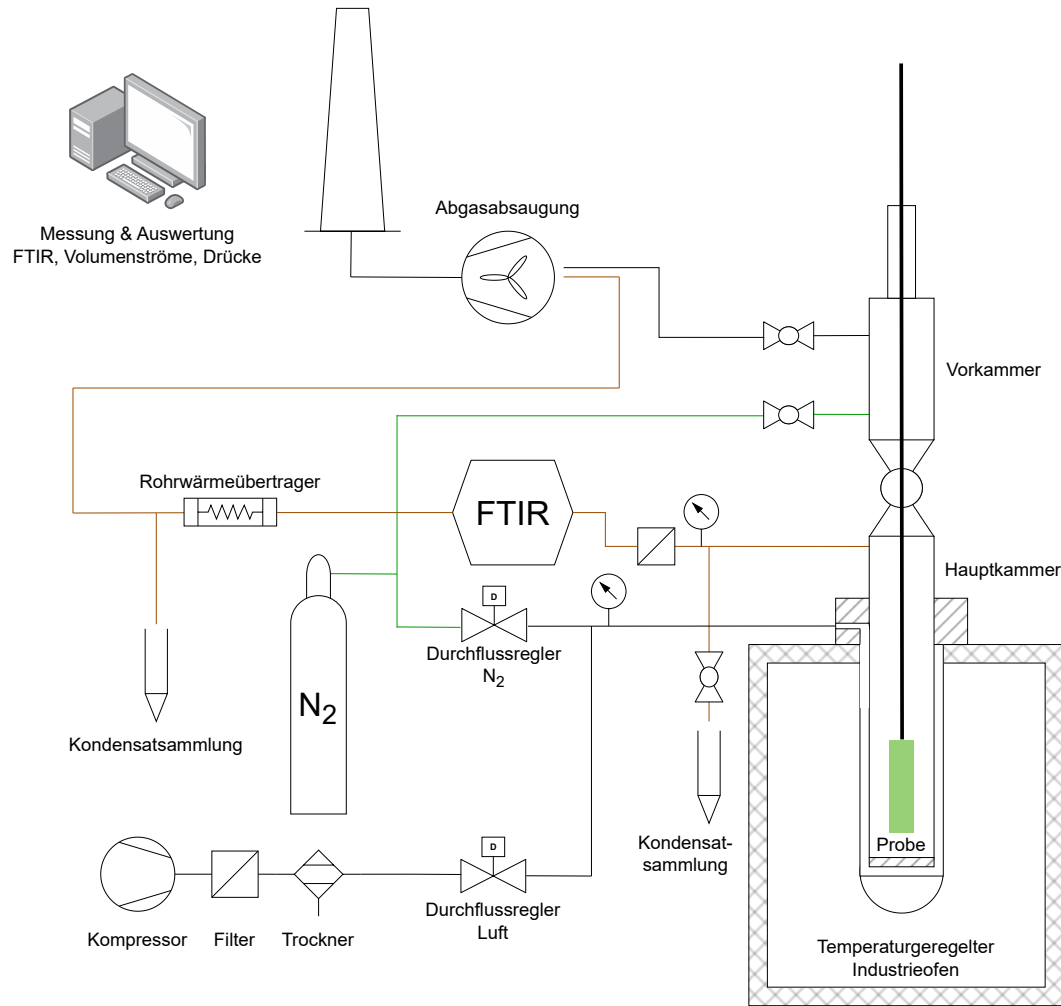
- Wie können geeignete Proben hergestellt werden?
- Wie kann ein Reaktorkopf zur Pyrolyse von ebenen Proben konstruiert werden?
- Welche Pyrolyseprodukte entstehen und wie können diese charakterisiert werden?
- Wie kann die mechanische Festigkeit der zurückgewonnenen Fasern bewertet werden?

Durchführung - Probenherstellung

- Probengeometrie aus großem Laminat heraustrennen
- Harzinfusionsverfahren
- Faserauswahl für beste mechanische Eigenschaften



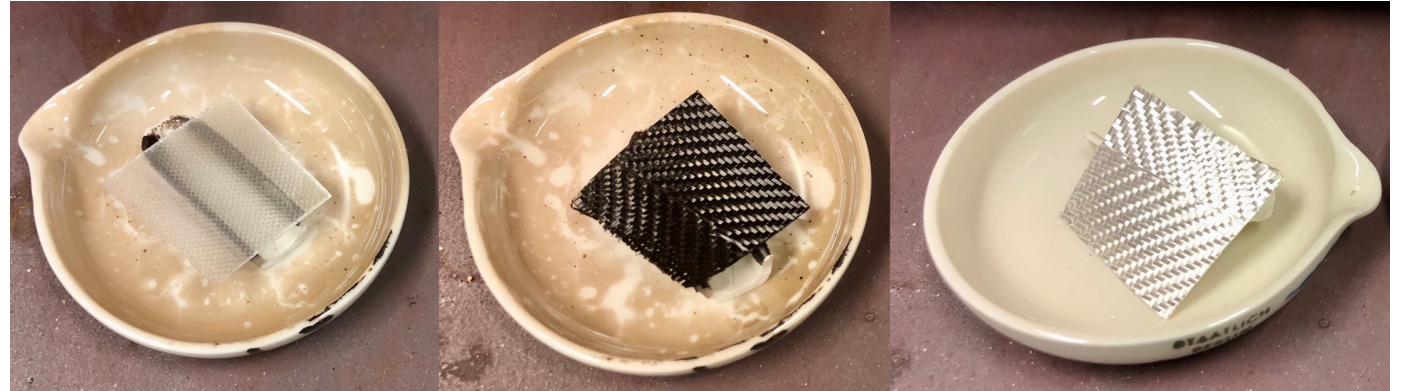
Durchführung – Konstruktion Reaktorkopf



Durchführung - Pyrolysebedingungen

- Festlegung anhand von Vorversuchen und Literaturwerten

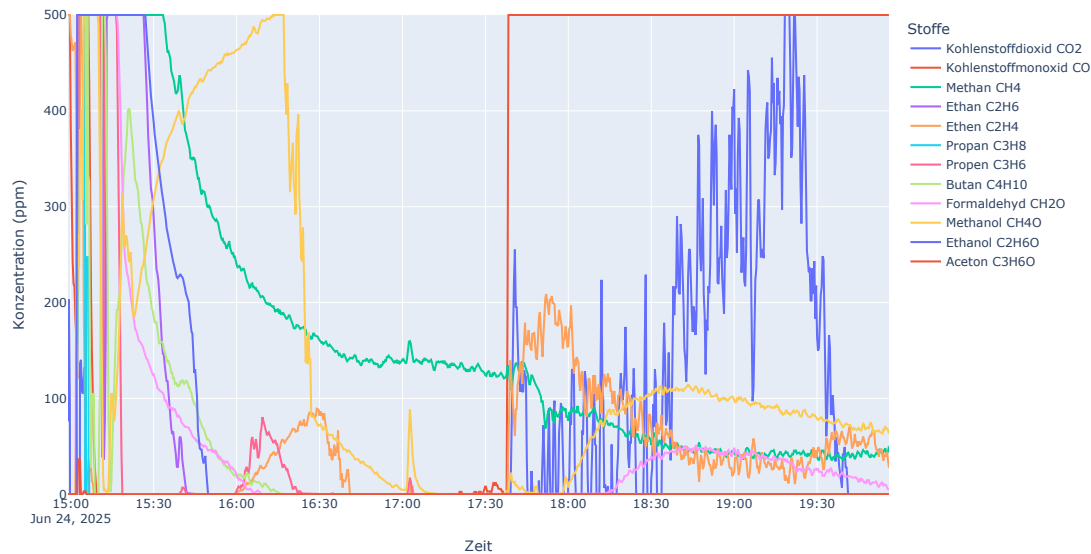
Probe	Behandlung
1 - 2	Prüfung ohne thermische Behandlung (Referenz)
3	Pyrolyse und Abbrand bei 400 °C
4	Pyrolyse und Abbrand bei 425 °C
5	Pyrolyse und Abbrand bei 450 °C
6	Pyrolyse und Abbrand bei 475 °C
7	Pyrolyse und Abbrand bei 500 °C
8	Pyrolyse und Abbrand bei 525 °C
9	Pyrolyse und Abbrand bei 550 °C
10 - 11	Reserve, falls Proben beschädigt werden



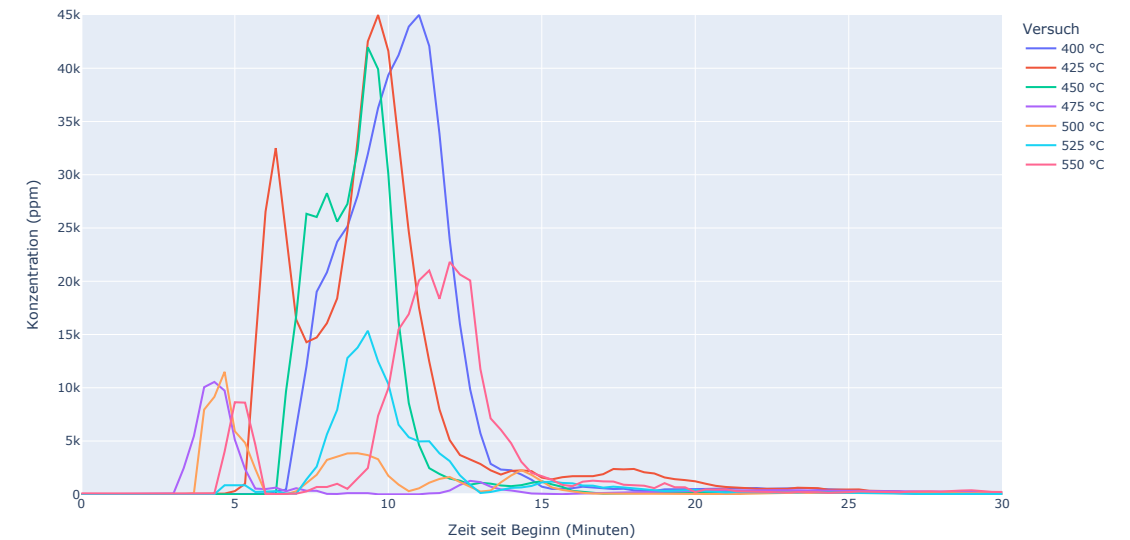
Ergebnisse - Pyrolyse

- Hohe Konzentrationen von
 - Methan (max. 357.000 ppm bei 550 °C),
 - Ethan (max. 265.000 ppm bei 500 °C),
 - Formaldehyd (max. 49.500 ppm bei 500 °C),
 - Butan (max. 45.000 ppm bei 425 °C) und
 - Propen (max. 22.000 ppm bei 500 °C) messbar
- Ermittelte Substanzen zeigen große Übereinstimmung mit Ergebnissen aus der Literatur

Konzentrationen bei 475 °C



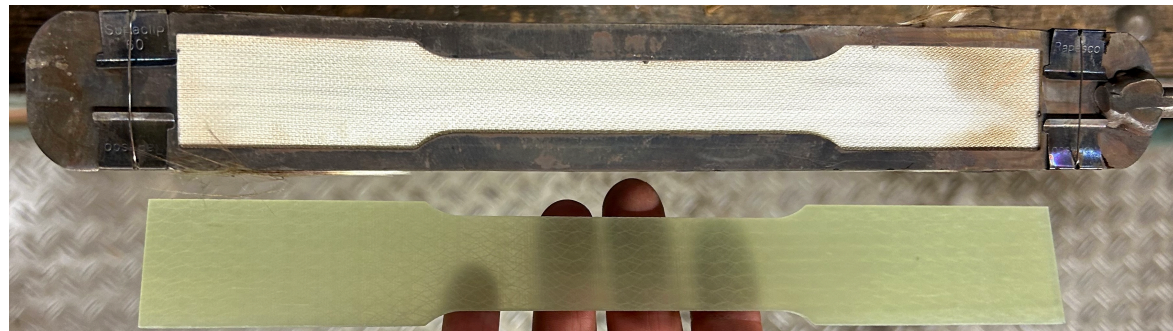
Konzentration von Butan C4H10 (Pyrolyse)



Ergebnisse - Pyrolyse

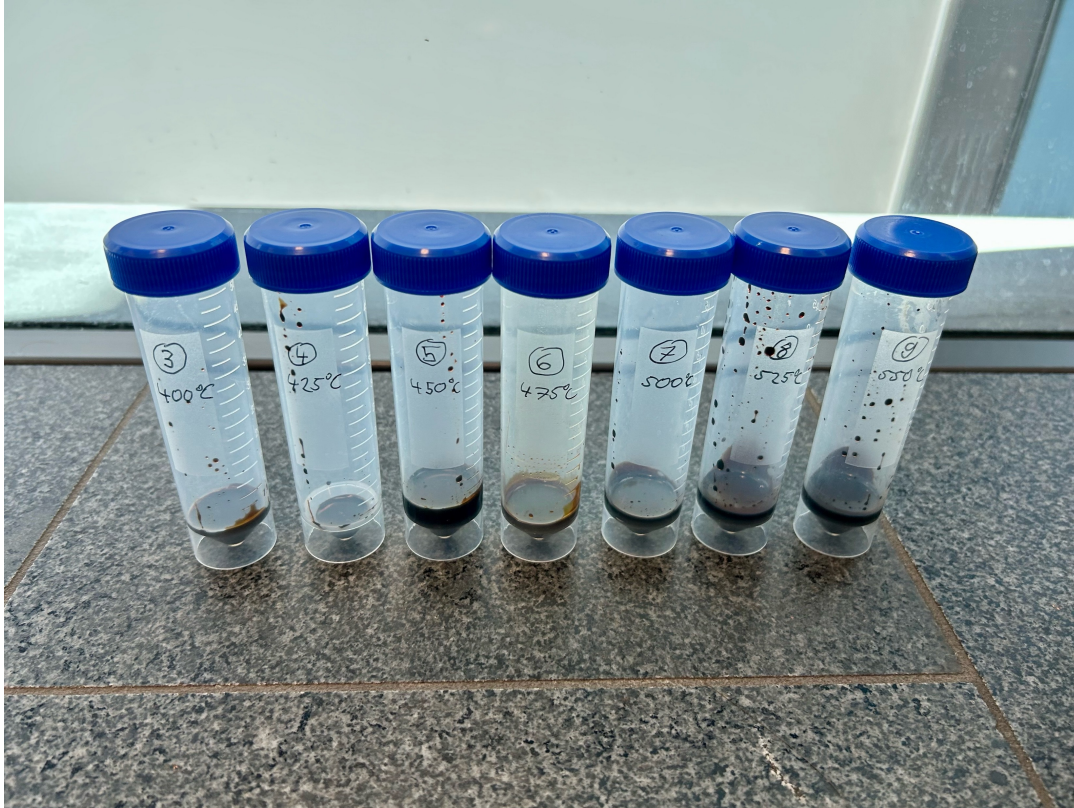
Probe	Temp.	Masse Probe	Pyrolyse [hh:mm]	Abbrand [hh:mm]	Masse Fasern	Masse Pyrolyseöl
3	400 °C	28,45 g	03:55	04:01	23,42 g	2,04 g
4	425 °C	28,38 g	03:33	03:09	22,69 g	0,77 g
5	450 °C	28,48 g	03:29	01:36	20,72 g	5,51 g
6	475 °C	28,40 g	02:36	02:24	19,88 g	2,57 g
7	500 °C	28,51 g	01:58	02:13	19,47 g	3,22 g
8	525 °C	28,54 g	01:54	01:09	19,03 g	3,79 g
9	550 °C	28,39 g	02:11	01:18	19,21 g	3,83 g

- Theoretische Fasermasse: 18,85 g



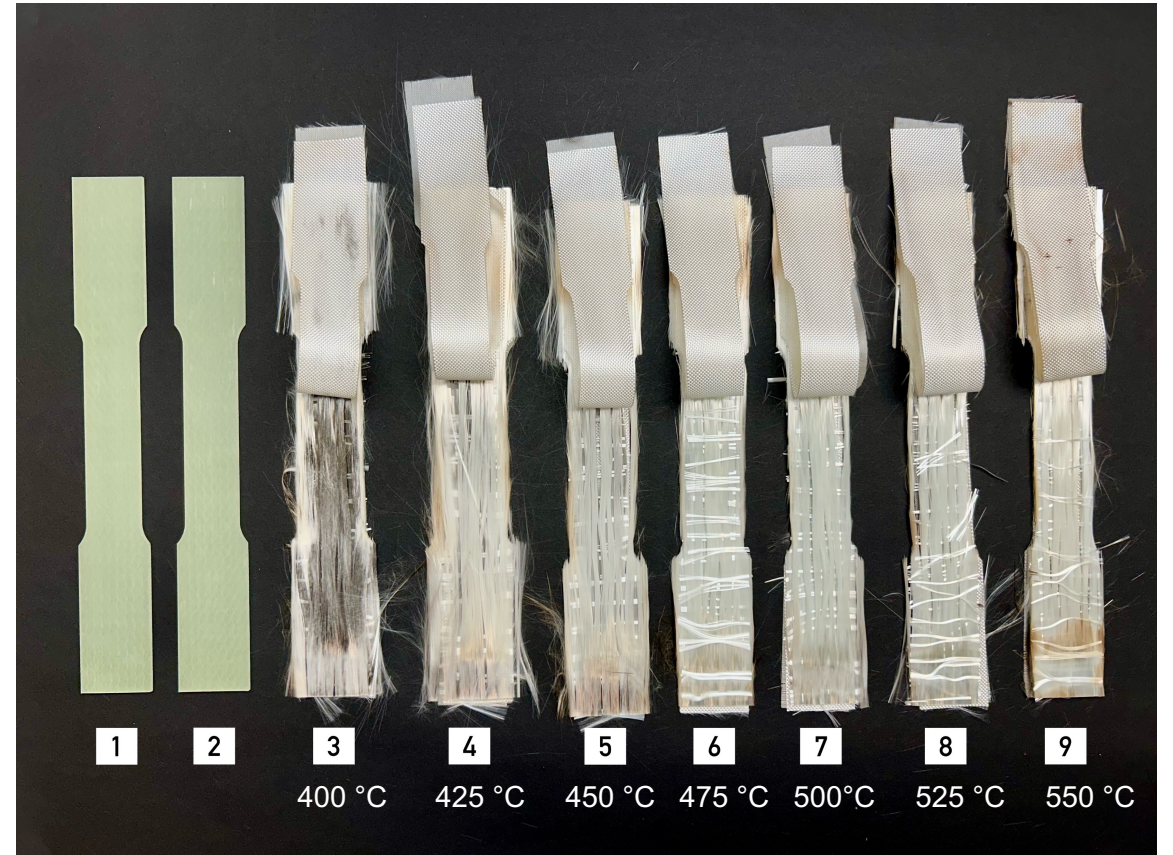
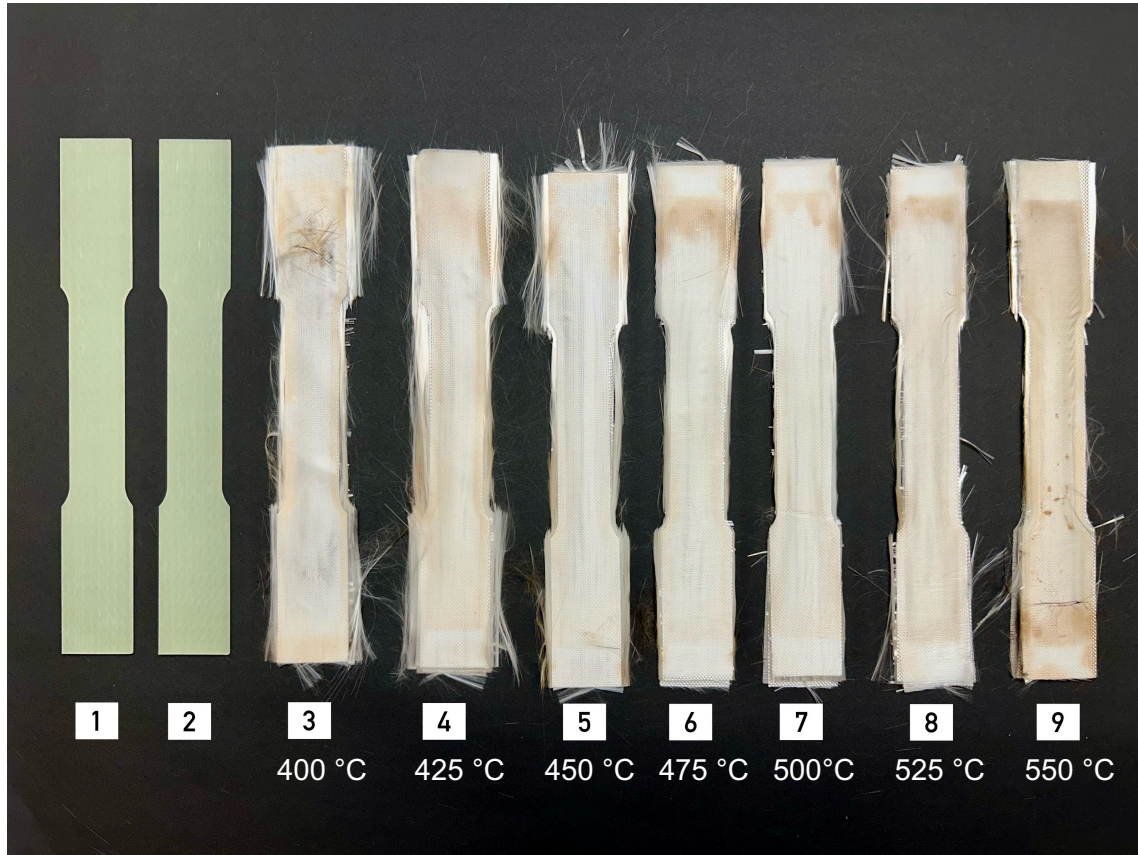
Ergebnisse - Pyrolyse: Sonstige Pyrolyseprodukte

- Gewinnung Pyrolyseöl direkt am Reaktorkopf
- Klares Kondensat und weitere Öl-artige Flüssigkeit im nachgeschalteten Rohrwärmeübertragen



Ergebnisse – Pyrolyse: Fasern

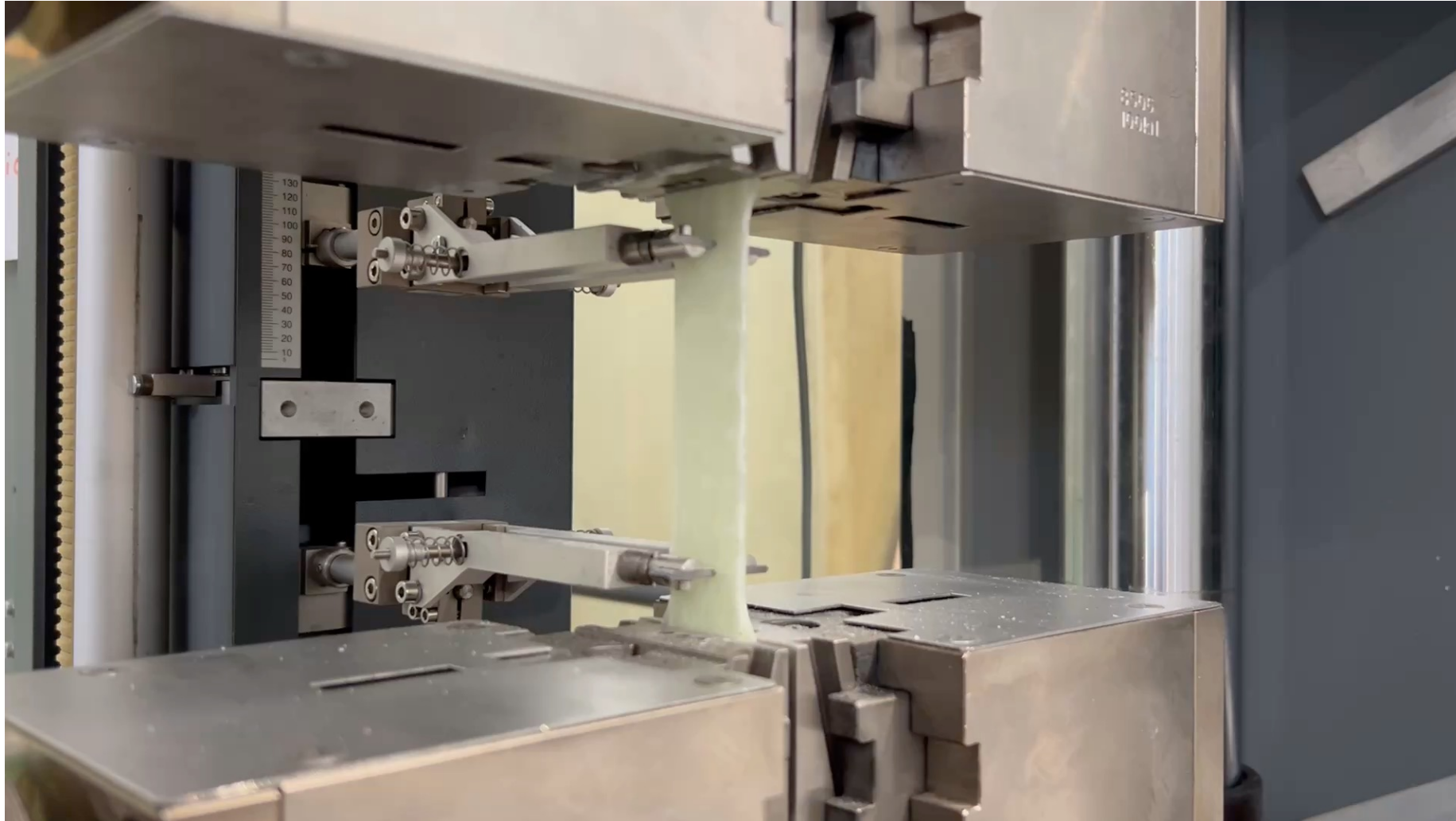
- Nahezu vollständig, beschädigungsfrei und in ursprünglicher Orientierung



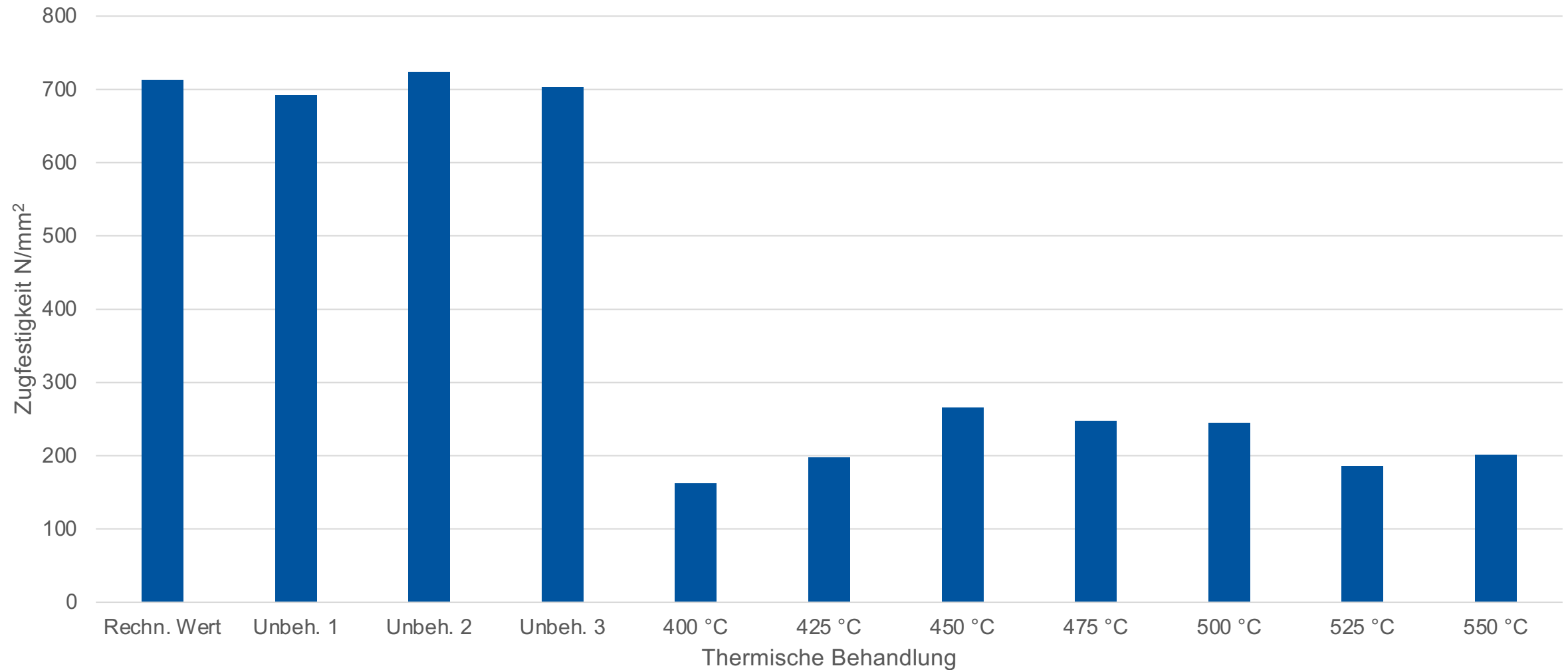
Ergebnisse – Fasern relaminieren



Ergebnisse - Zugversuch

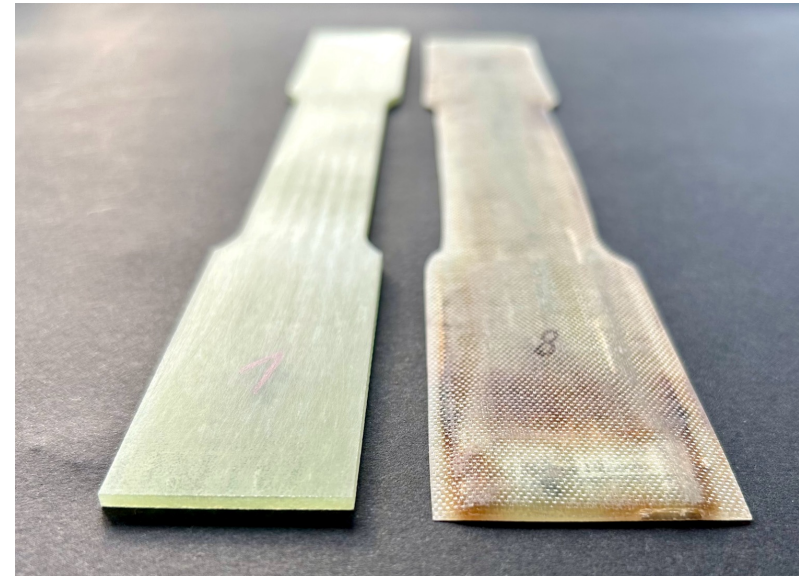


Ergebnisse - Zugversuch



Diskussion

- Trockene Stellen: Verlust Oberflächenbehandlung
 - Maximaltemperatur 350 °C (Chandekar et al., 2010, S. 2747)
- Bei relaminieren Proben: Ungünstiger Rissverlauf, kein rechteckiger Querschnitt
- Zugfestigkeit reiner Glasfasern nach thermischer Behandlung:
 - 30 Minuten bei 450 °C: 23 % der urspr. Festigkeit (Feih et al., 2009, S. 392–395)
- Ursache Festigkeitsreduktion:
 - U. a. Anwachsen von Oberflächenfehlern (Feih et al., 2009, S. 399)



Diskussion

- Zurückgewinnung Fasern in ursprünglicher Orientierung und Länge
- Gasförmige Pyrolyseprodukte: Nutzung als Rohstoffe
- Bedingte Übertragbarkeit auf reelle Bauteile
- Anwendungsszenarien prüfen: Erhöhung Anzahl Fasern vs. Leichtbaupotential
- Nicht betrachtet: Wirtschaftlichkeit, Energieeinsatz

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

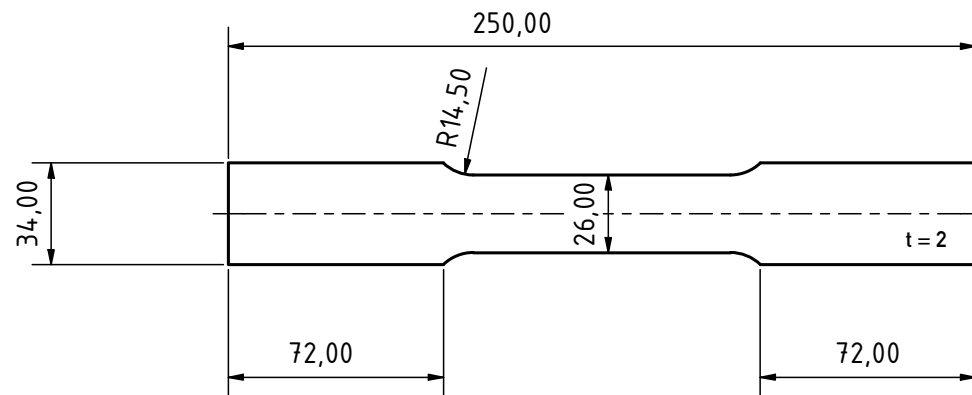
Sascha Roeske
Sascha.Roeske@RWTH-Aachen.de

Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung
RWTH Aachen University

www.wsa.rwth-aachen.de

Durchführung - Probenherstellung

- DIN 65469 (Faserverstärkte Kunststoffe: Zugversuch): Proben aus großem Laminat heraustrennen
- DIN 50125 (Zugproben): Probengeometrie
- Randbedingungen:
 - Vergleichbarkeit: Laminat möglichst gleichmäßig
 - Geringe Beeinflussung der Proben durch Schnittverfahren
 - Herstellbarkeit im Labormaßstab mit gebräuchlichen Mitteln
- Kriterien für die Auswahl der Verstärkungstextilien:
 - Bestmögliche mechanische Eigenschaften für großen Prüfbereich
 - Gerichtetes Einbringen der Fasern
 - Fasern in Bauteillänge
- Auswahl von unidirektionalen Fasergelegen und Epoxidharz



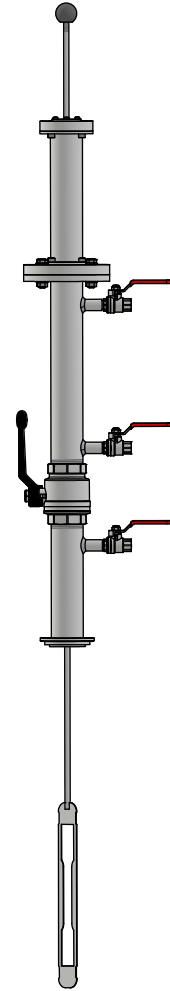
Durchführung - Probenherstellung

Lage	Faserhalbzeug
1	25 g/m ² Glasseidengewebe Leinwandbindung
2	163 g/m ² Glasseidengewebe Leinwandbindung
3	597 g/m ² unidirektionales Glasgelege
4	597 g/m ² unidirektionales Glasgelege
5	597 g/m ² unidirektionales Glasgelege
6	163 g/m ² Glasseidengewebe Leinwandbindung
7	25 g/m ² Glasseidengewebe Leinwandbindung



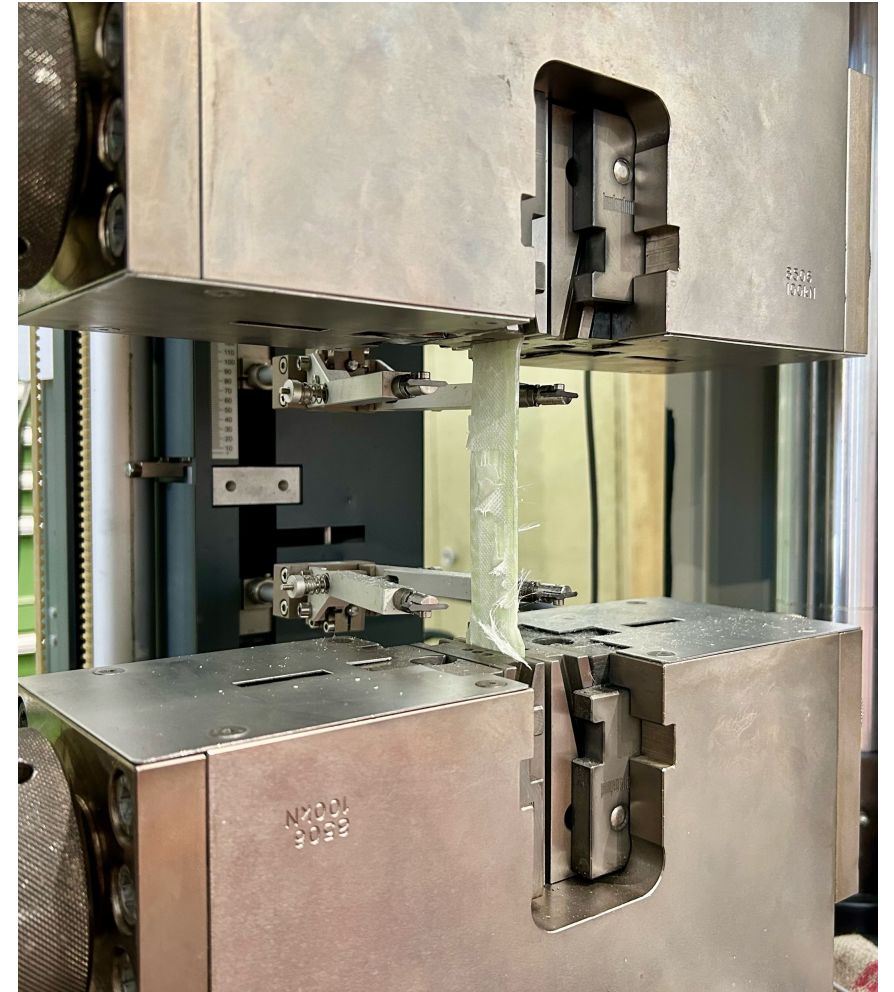
Durchführung - Konstruktion Reaktorkopf

- Anforderungen:
 - Vorhandene Pyrolysekammer im Industrieofen
 - Abtrennbare Vorkammer mit Stickstoffspülmöglichkeit
 - Lineares Bewegen der Werkstoffprobe zwischen Pyrolysekammer und Vorkammer
 - Möglichkeit zum Koksabbrand
- Umsetzung:
 - Konstruktion aus Chrom-Nickel-Stahl Rohren und Kugelventilen
 - Klemmhalter für Probe
 - Kugelhahn zur Trennung Vorkammer / Pyrolysekammer
 - Gasversorgungsanlage Stickstoff / Luft Pyrolysekammer



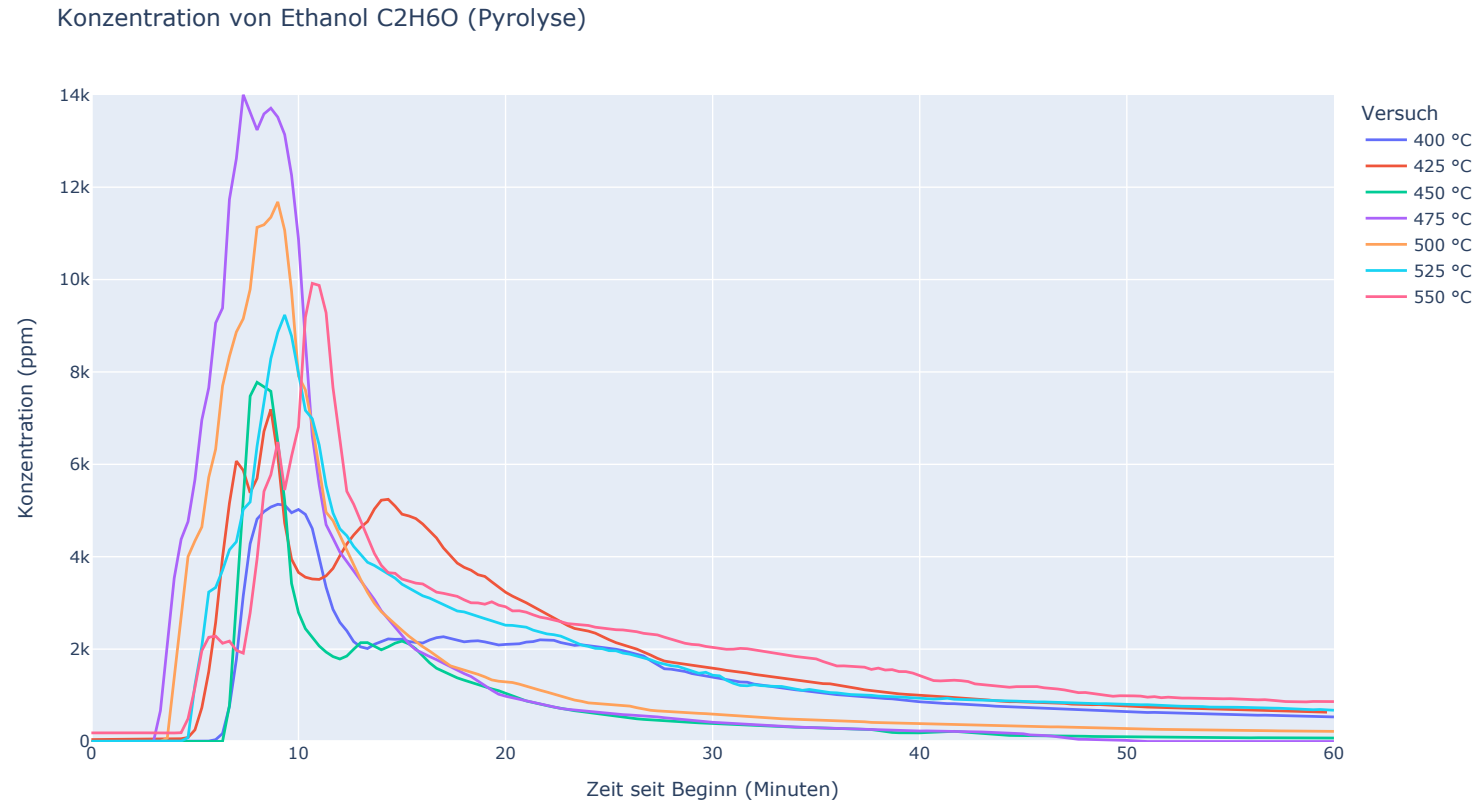
Durchführung - Mechanische Prüfung

- Ziele
 - Fokus auf einen Werkstoffparameter und auf die Glasfasern
 - Beanspruchung muss reproduzierbar sein
- Auswahl:
 - Zugversuch mit Universalprüfmaschine
- Zugversuch ist geeignet, um die Festigkeit der enthaltenen Glasfasern zu bestimmen (Selden 1967, S. 347 f.)
- Viele Werkstoffkennwerte von GFK werden durch Zugversuche bestimmt (VDI 2014 Blatt 3 S. 28)
- Zugbeanspruchung ist in definiertem Winkel reproduzierbar aufbringbar



Ergebnisse - Pyrolyse: Ethanol

- Höchste Konzentration bei 475 °C
- Positive Korrelation zwischen Temperatur und Konzentration bei 400 °C – 450 °C
- Konzentrationsverläufe bei allen Temperaturen ähnlich



Ergebnisse - Zugversuch

- Zugfestigkeit unbehandelter Proben in Größenordnung theoretischer Wert
- Keine direkte Temperaturabhängigkeit ersichtlich
- Probe 450 °C: 37,55 % des Mittelwertes der Zugfestigkeit der unbehandelten Proben
- Literaturwert Reduktion Zugfestigkeit reine Glasfaser bei 550 °C: 80 % (Pickering et al., 2000, S. 515)
- Im Versuch trotz Bruch an Einspannung: lediglich 71,49 %

