

# Beurteilung von belastungsbedingten Schädigungszuständen in CFK mit Spannungskonzentrationen mithilfe der Puls-Thermographie

Günther MAYR<sup>1</sup>, Jürgen GRUBER<sup>1</sup>, Thomas SCHEDLBERGER<sup>1</sup>,  
Christian GUSENBAUER<sup>1</sup>, Günther HENDORFER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University of Applied Sciences Upper Austria, School of Engineering, Wels, Österreich

Kontakt E-Mail: [guenther.mayr@fh-wels.at](mailto:guenther.mayr@fh-wels.at)

## Kurzfassung

Das Ermüdungsverhalten von Faserverbundwerkstoffen in Bereichen von Spannungskonzentrationen, wie z.B. bei Delaminationen, ist von großem Interesse für die Auslegung von Mehrschichtverbunden. Von diesen induzierten Fehlstellen gehen infolge von mechanischer Belastung Schädigungen aus, welche zu einer Festigkeitsreduktion und zu einer Verringerung der Lebensdauer führen. Die Modellierung der Schädigungsursache und dessen Fortschritt ist bei multidirektionalen Mehrschichtverbunden deutlich komplexer als bei Einzelschichten. Durch die Anwendung der Puls-Thermographie als zerstörungsfreien Prüfmethode kann der Schädigungszustand in-situ bei steigender Schwingungszahl ermittelt werden, wodurch bruchmechanische Berechnungsmethoden validiert und optimiert werden können.

Für die experimentellen Studien wurden für die thermische Anregung Blitzleuchten und für die Temperaturmessung eine Mega-Pixel IR-Kamera verwendet. Die Anwendung der Puls-Phasen-Thermographie erlaubt eine detaillierte Detektion von ermüdungsbedingten Delaminationen. Die Prüfung kann dabei bei laufender zyklischer Belastung durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen den Ausgangspunkt für die Delaminationen und deren Wachstum in einem multidirektionalen Laminat mit einem Lagenaufbau von [0/90/+45]s. Als Spannungskonzentrationen wurden Impact-Schädigungen mit Energien von 1 bis 4 J gewählt. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Computertomographie und der Thermographie zeigen dabei eine sehr gute Übereinstimmung.



## Beurteilung von belastungsbedingten Schädigungszuständen in CFK mit Spannungskonzentrationen mithilfe der Puls-Thermographie

G. Mayr, J. Grüber, T. Schedlberger, C. Gusenbauer & G. Hendorfer

Research Group of Thermography & NDT ([www.thermo-ndt.com](http://www.thermo-ndt.com))  
University of Applied Sciences Upper Austria, School of Engineering, Wels, Austria

HAGENBERG | LINZ | STEYR | WELS



UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES  
UPPER AUSTRIA

## Motivation

In-situ Erfassung des Schädigungsfortschritts in CFK

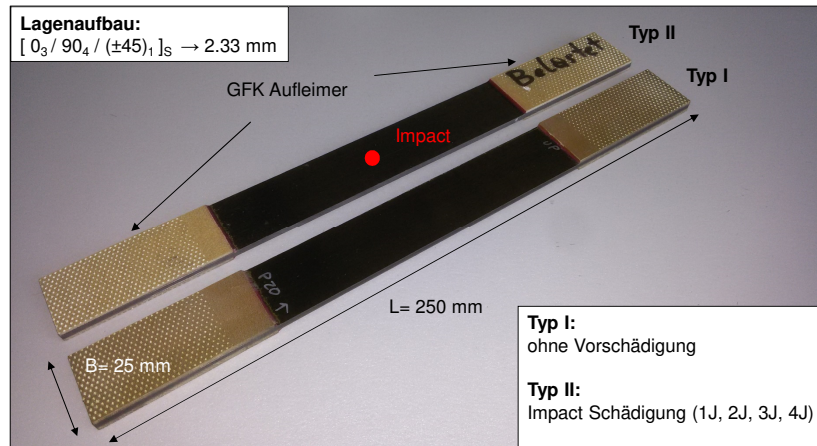


### Ziele:

- Detektion der ersten Schädigung
- Erfassung des Schädigungsfortschritts
- Untersuchungen bei quasi-statischer und dynamischer Belastung

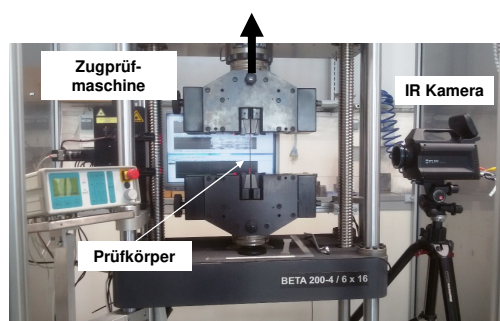
# Prüfkörper

Multidirektionales CFK ohne und mit Impact-Schädigung



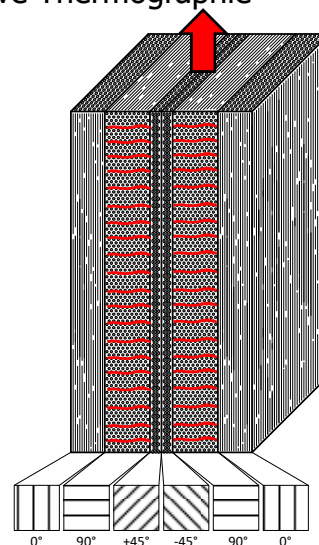
# Quasi-statischer einachsiger Zugversuch

Experimenteller Aufbau – In-situ Passive Thermographie



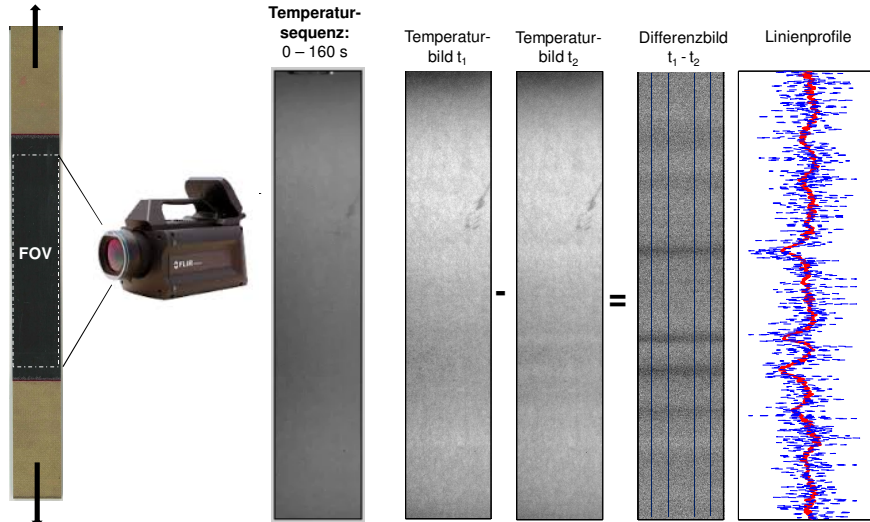
**IR Kamera**  
 FLIR X8400sc  
 1024 x 256 Pixel  
 50 Bilder pro Sekunde

**Zugprüfmaschine**  
 Messphysik BETA 200-4/6X16  
 Vorschub: 2 mm / min  
 Max. Spannung:  $\sigma_{\max} = 550 \text{ MPa}$



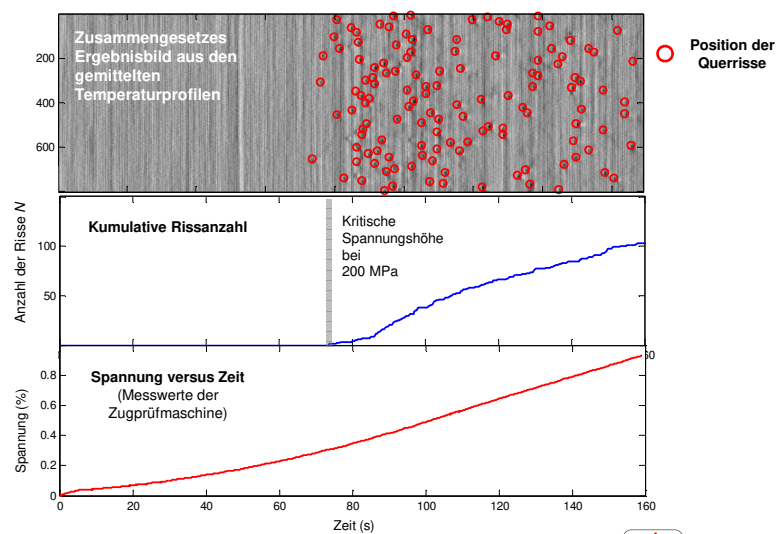
# Quasi-statischer einachsiger Zugversuch

Typ I – Querrissbildung in der Epoxidharzmatrix



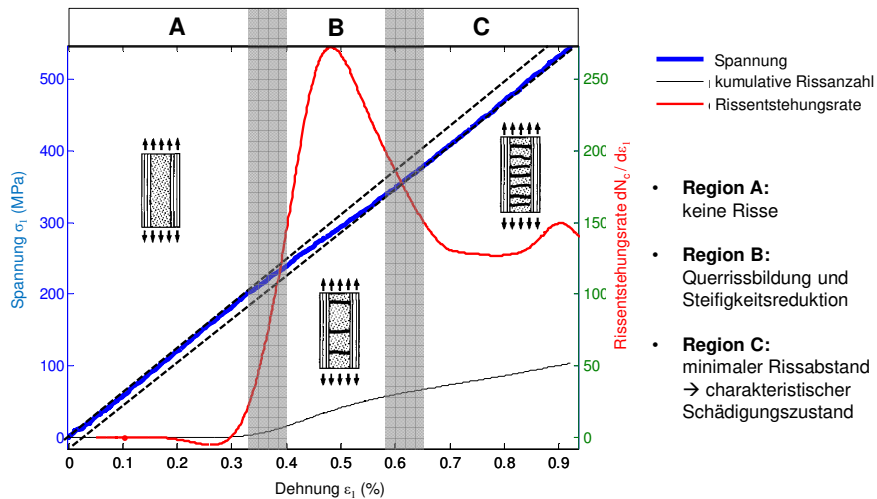
# Quasi-statischer einachsiger Zugversuch

Typ I – Querrissbildung in der Epoxidharzmatrix



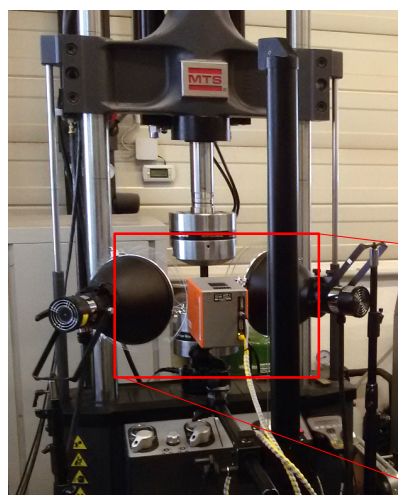
## Quasi-statischer einachsiger Zugversuch

Typ I – Querrissbildung in der Epoxidharzmatrix



## Dynamischer einachsiger Zugversuch

Experimenteller Aufbau – In-situ Puls-Thermographie



### Servo-hydraulische Zugprüfmaschine

MTS 370.10 Landmark  $\pm 100$  kN

Frequenz = 10 Hz

Max. Spannung:  $\sigma_{\max} = 500$  MPa

Min. Spannung:  $\sigma_{\min} = 50$  MPa

### Optisch angeregte Puls-Thermographie

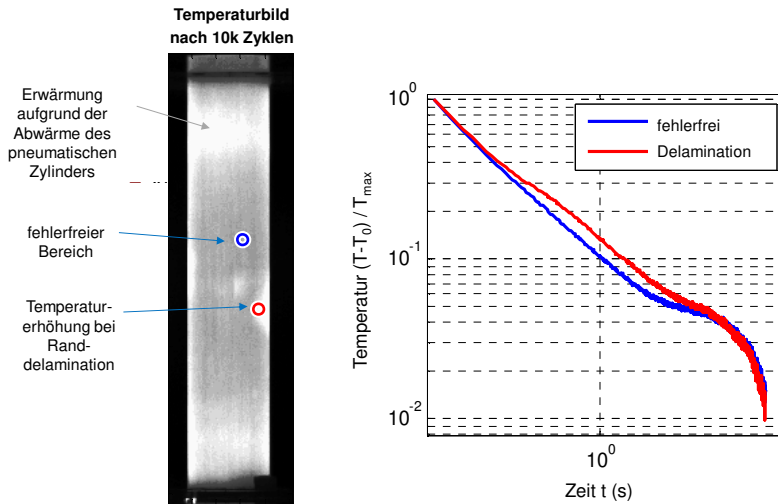
IR-Kamera: FLIR X8400sc

Blitzlampen: Bläsing G6000Z



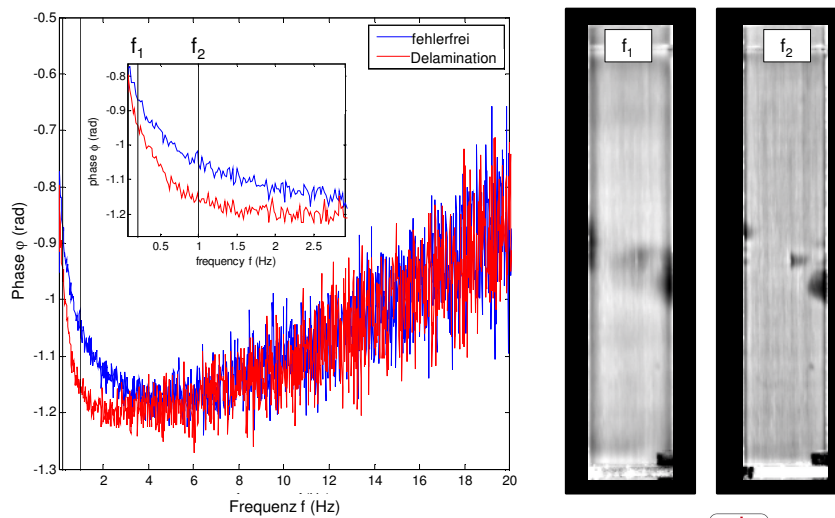
# Dynamischer einachsiger Zugversuch

## Puls-Thermographie: Temperaturentwicklung



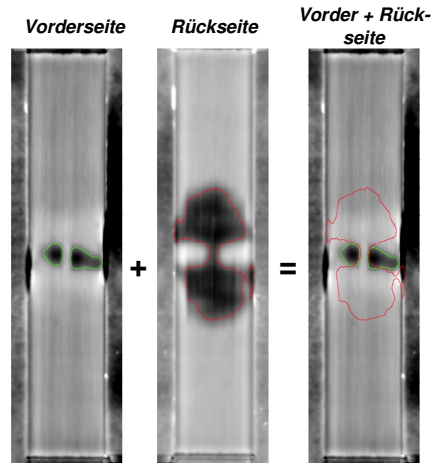
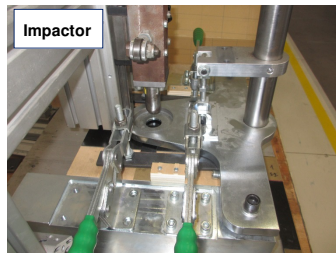
# Dynamischer einachsiger Zugversuch

## Auswertung der Puls-Phasen-Thermographie (PPT)



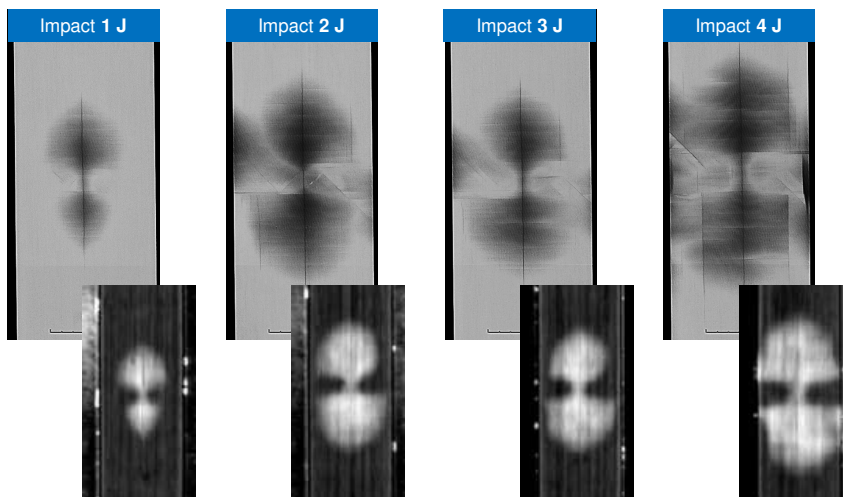
## Dynamischer einachsiger Zugversuch

Typ II: Initiale Impact-Schädigung ohne Zugbelastung



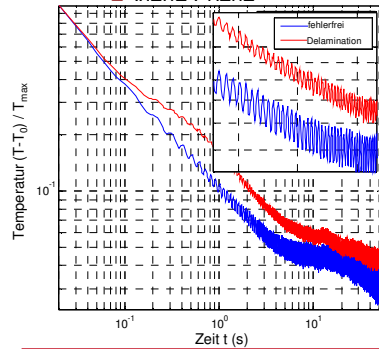
## Dynamischer einachsiger Zugversuch

Typ II: Vergleich mit 3D-Röntgen Computertomographie (XCT)

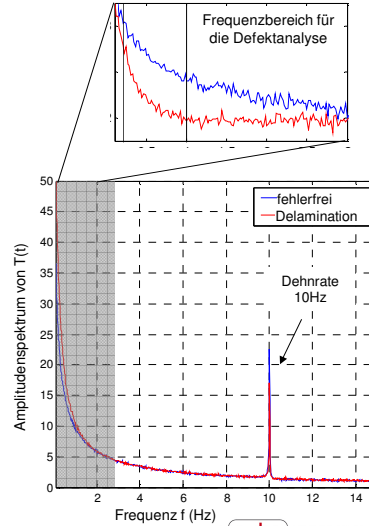


## Dynamischer einachsiger Zugversuch

In-situ PPT bei dynamischen Versuch: Separation der Dehnrates



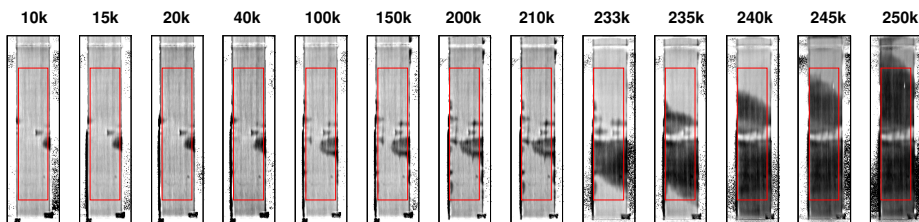
FFT



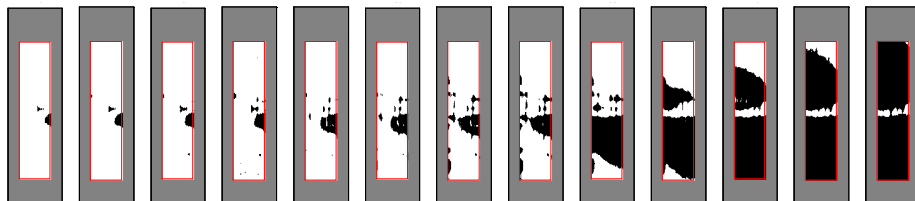
## Dynamischer einachsiger Zugversuch

Schädigungsfortschritt bei zunehmender Zyklenzahl

Zunehmende Zyklenzahl bis 250.000



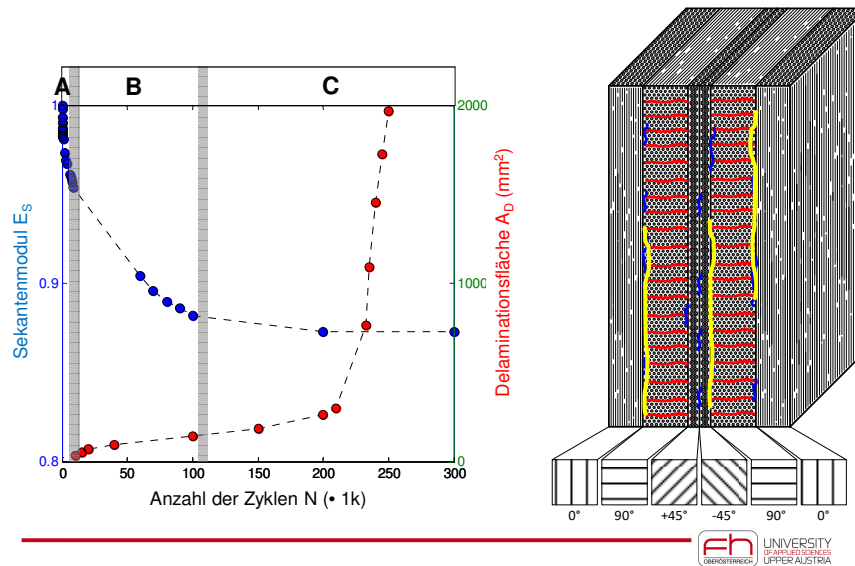
Bildsegmentierung für die Bestimmung der Delaminationsfläche





## Dynamischer einachsiger Zugversuch

Schädigungsfortschritt bei zunehmender Zyklenzahl



## Zusammenfassung

- Die **Querrissbildung** in der Matrix und deren **Fortschritt** kann **berührungslos** und **in-situ** mit **passiver Thermographie** erfasst und **quantifiziert** werden
- Die **gemessene Rissentsteigerungsrate** korreliert mit der **Steifigkeitsreduktion** bei zunehmender Zugbelastung
- Die **Trennung der Frequenzbereiche** bei der **PPT** erlaubt eine **in-situ Bestimmung** der **Delaminationsfläche während** der **zyklischen Belastung**
- Die **Bestimmung der Delaminationsfläche** in Abhängigkeit der **Zyklenzahl** hilft bei der **Interpretation** des gemessenen **Sekantenmoduls**