

# STEIGERUNG DER ROBUSTHEIT VON STRUKTURELLEN KLEBUNGEN MITTELS SURFACE TOUGHENING AM BEISPIEL HAP

M.Sc. Martin J. Schollerer, M.Sc. Florian Kreissig, M.Sc. Thomas Gesell, Dr.-Ing. Steffen Niemann, Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne – Institut für Systemleichtbau (DLR-SY)

20.Sep.2023, Stuttgart



# Technologie Demonstrator HAP-alpha

## HAP – solarbetriebene Höhenplattform



- Spannweite 27 m
- Abfluggewicht 138 kg
- Dienstgipfelhöhe bis zu 22 km
- 5 kg Nutzlastkapazität
- Entwickelte Nutzlasten:
  - MACS-HAP: Hochauflösende Kamera
  - HAPSAR: Radar mit synthetischer Apertur

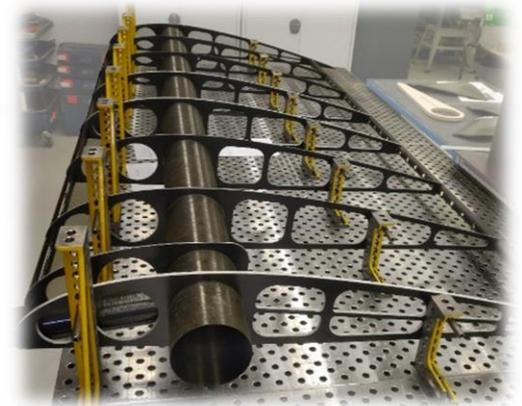


# Strukturaufbau HAP - alpha

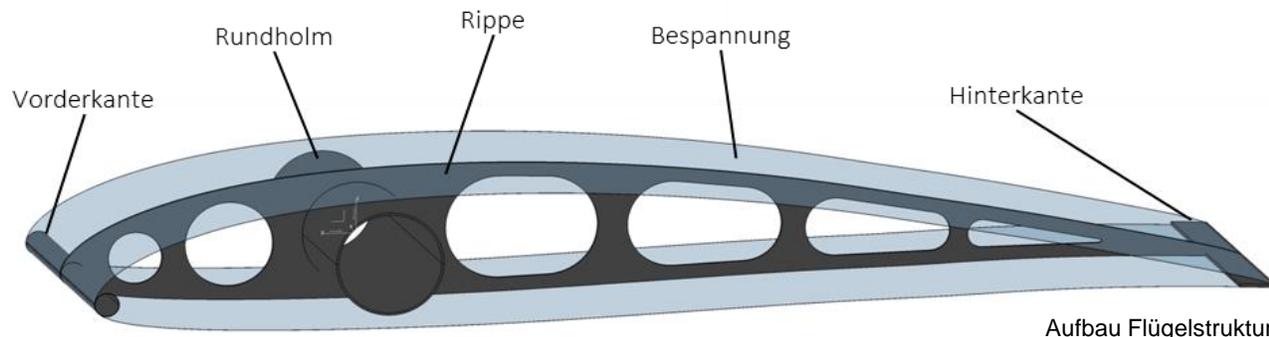
Fakten:

- 138 kg MTOW
- 38 kg Strukturmasse
- 90 Tage Flugzeit

Extreme Leichtbaugüte mit robustem Design!



3m Einzelsegment

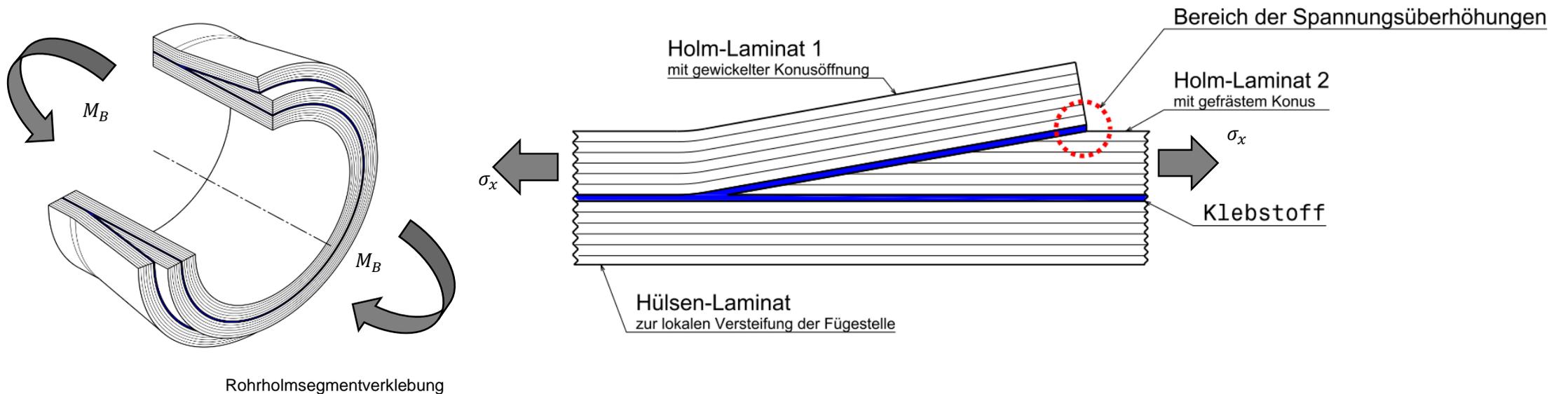


Aufbau Flügelstruktur

HAP alpha

# Analyse der Schäftverbindung

- Flügelbiegung verursacht Biegemoment auf die Holmverklebung

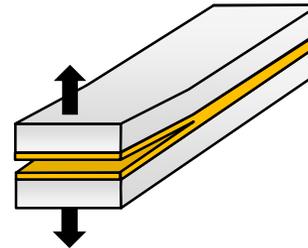


Detailuntersuchung FEM T. Gesell [1]

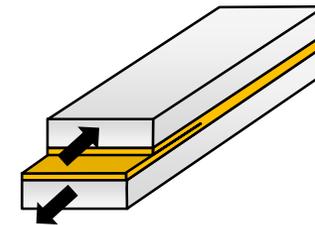
# Exkurs: Klebverbindungen unter Belastung

Spannungskonzentrationen an Klebrändern sind versagensinitiierend und führen zum Risswachstum

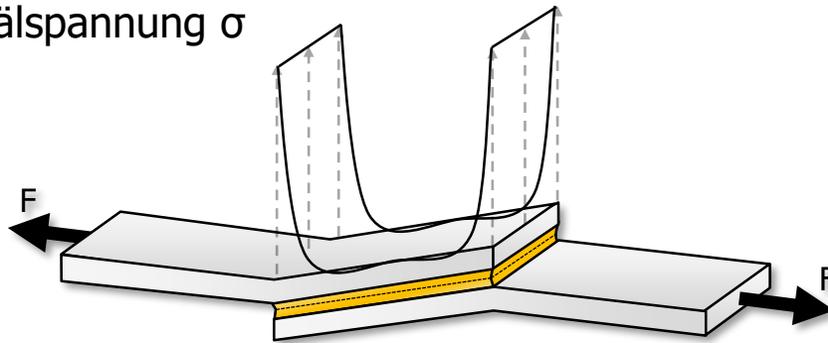
Mode I:  
Schälbelastung



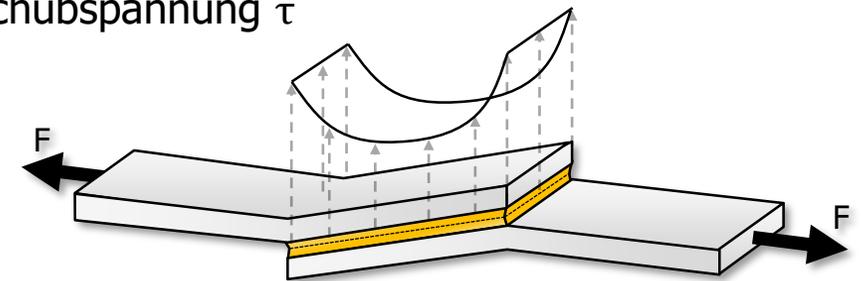
Mode II:  
Schubbelastung



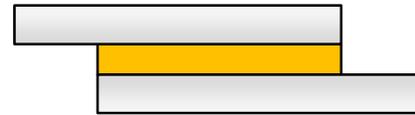
Schälspannung  $\sigma$



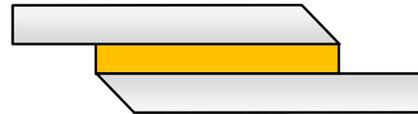
Schubspannung  $\tau$



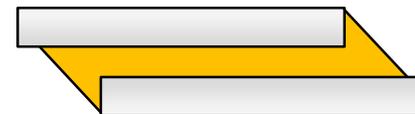
# Maßnahmen aus dem Stand der Technik zur Spannungsreduktion in Klebungen



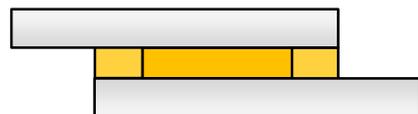
Referenz



Modifikation des Fügeteils



Modifikation des Klebstoffauslaufs



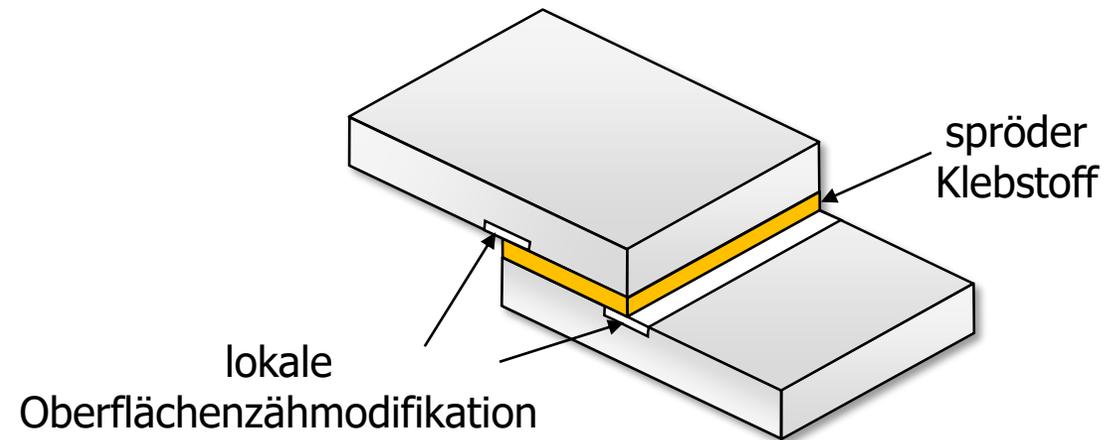
Klebstoffgradierung



Klebstoffmodifikation

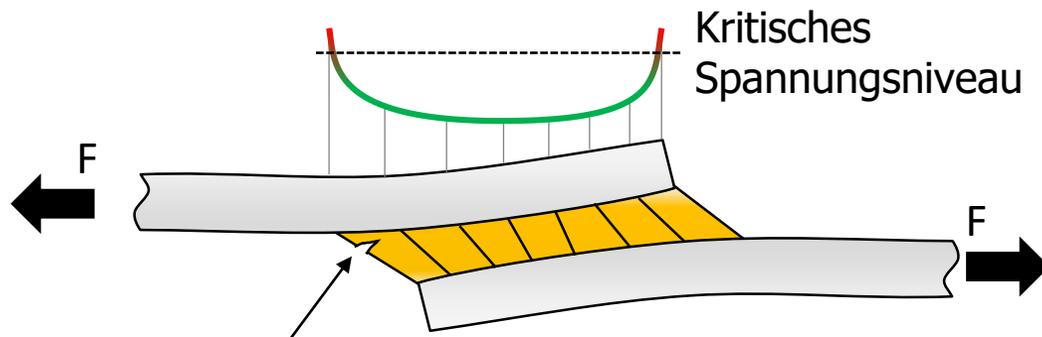
**Kein Konzept erfüllt die Anforderungen an eine robuste Klebung am HAP!**

# Die lokale Oberflächenzähmodifikation – Surface Toughening (ST) engl.



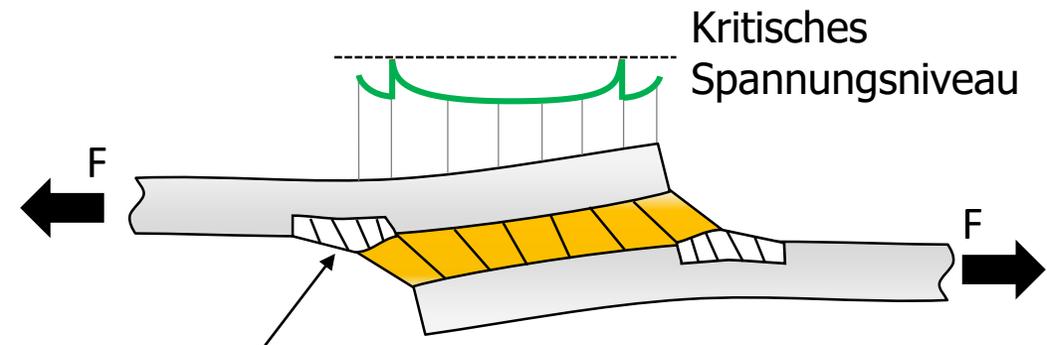
# Die lokale Oberflächenzähmodifikation - Funktionsweise

Referenz



Spannungskonzentrationen  
führen zu Anriss

Mit lokaler Oberflächenzähmodifikation

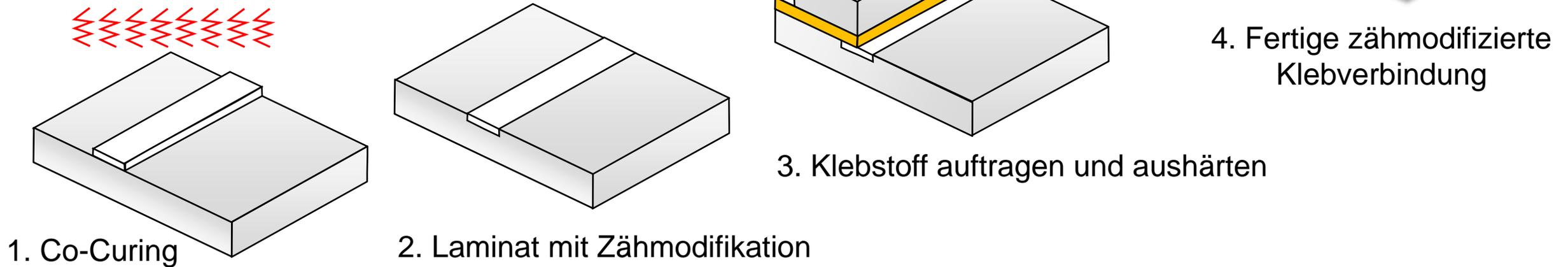


Duktiles Material nimmt  
Dehnungen auf und reduziert  
Spannungskonzentrationen

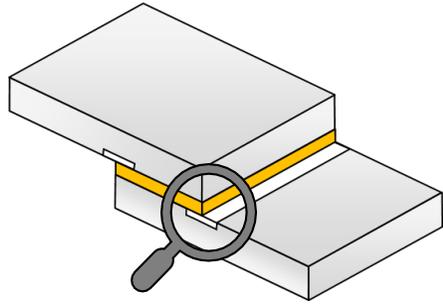
# Fertigung am Beispiel des Prepregverfahrens

hochratenfähige, reproduzierbare Fertigung  
über automatisiertes Fiberplacement (AFP)  
mittels Roboter möglich

Keine Beeinflussung des Klebprozesses  
oder Veränderung am Fertigungsverfahren



# Schliffbild und Materialien



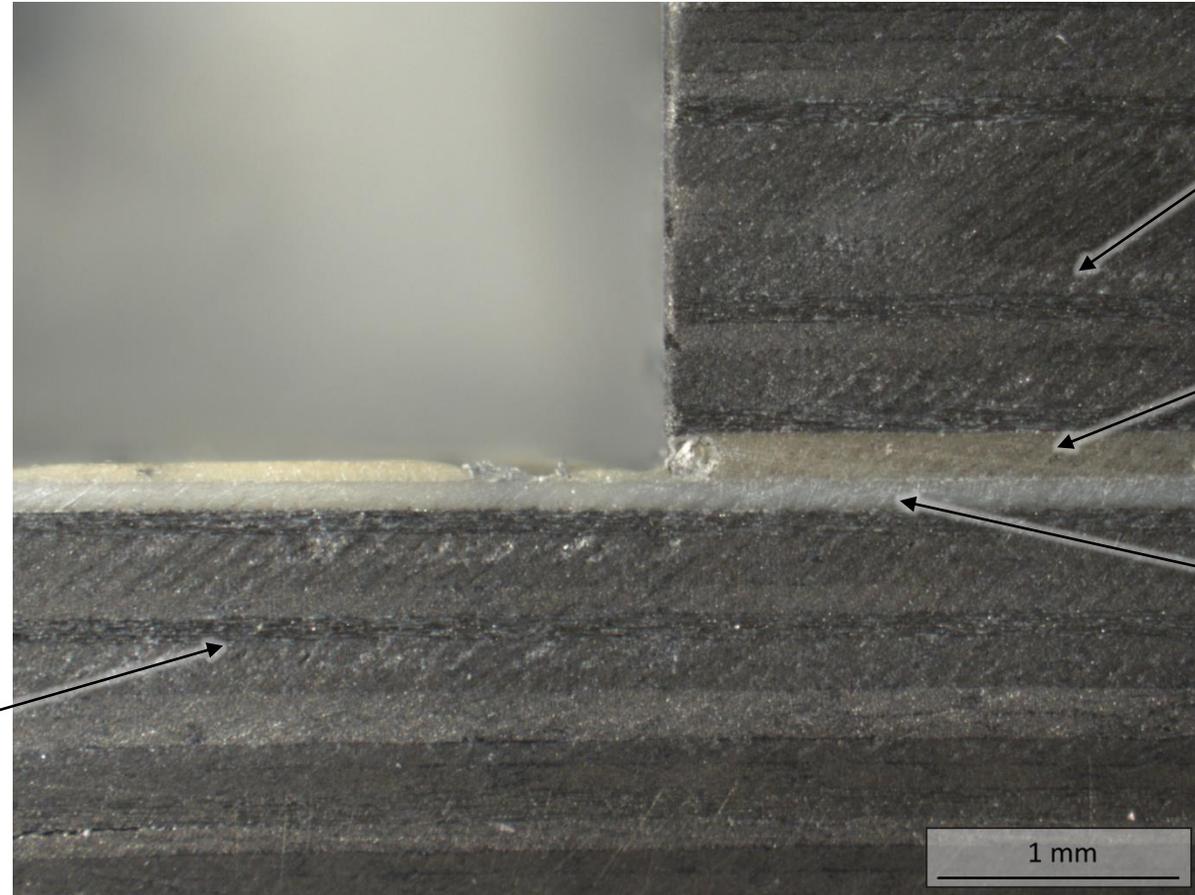
Elastizitätsmoduln:

$$E_{8552 \text{ IM7}} = 60.600 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{EA9695}} = 2.577 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{PVDF}} = 1.716 \text{ MPa}$$

Fügeteil 1  
**8552 IM7**



Fügeteil 2  
**8552 IM7**

Filmklebstoff  
**EA9695 NW**  
 $t_{\text{KI}} \sim 0,12 \text{ mm}$ )

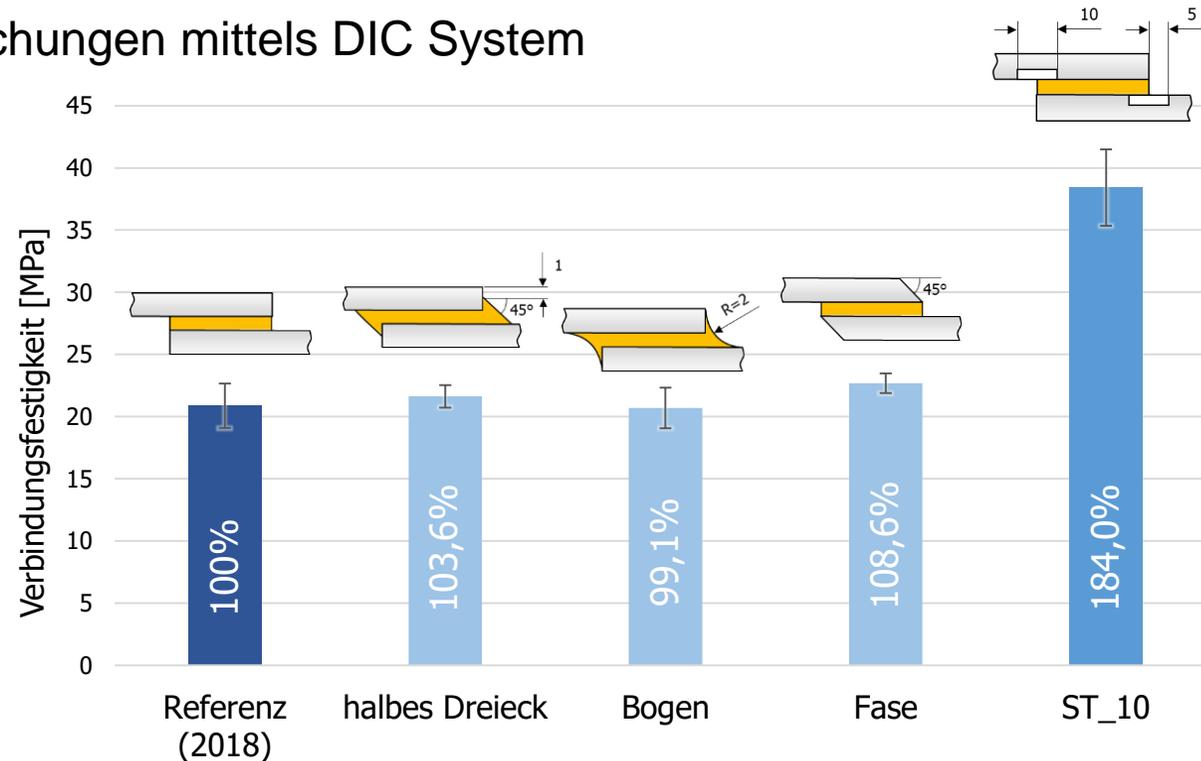
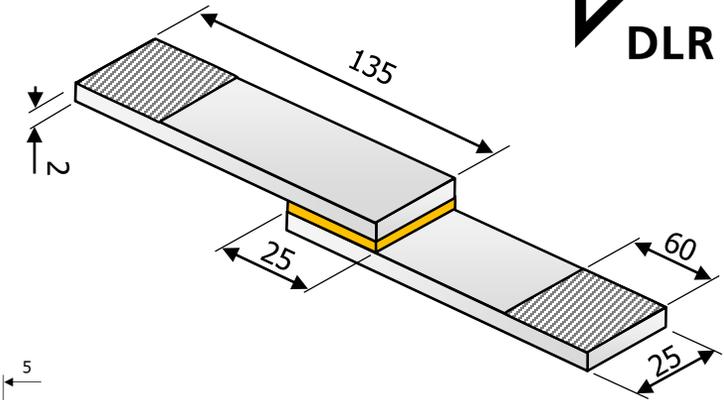
ST-Material  
**PVDF**  
 $t_{\text{ST}} \sim 0,1 \text{ mm}$

1 mm

# Festigkeitssteigerung bei SLS – Mode I + Mode II



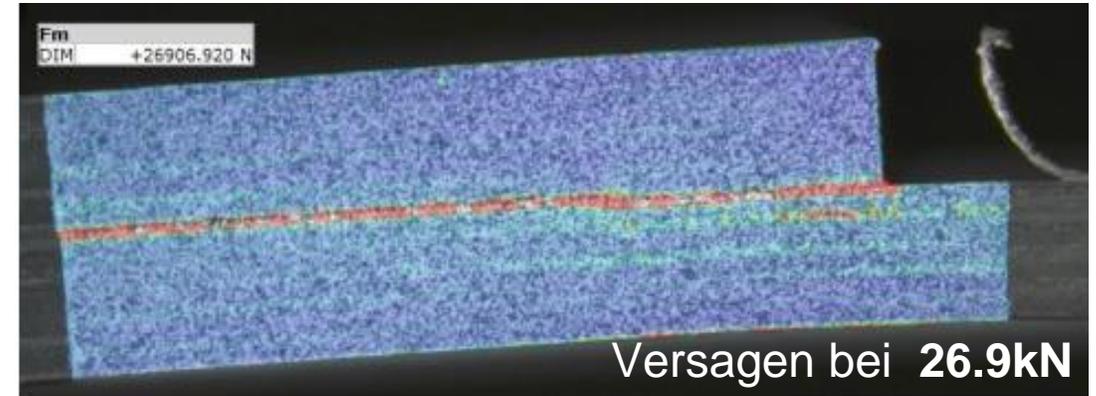
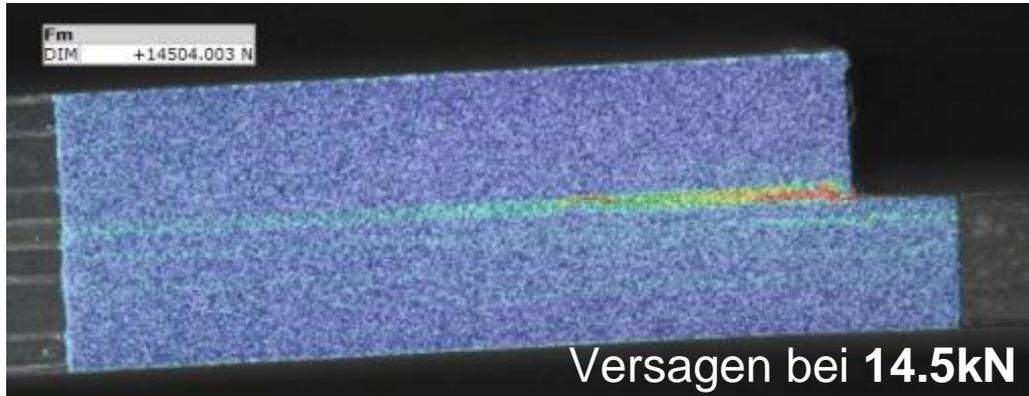
- Festigkeitssteigernde Maßnahmen der Literatur ohne großen Effekt
- Festigkeitssteigerung durch ST um 84%
- Optische Untersuchungen mittels DIC System



# Festigkeitssteigerung bei SLS – Mode I + Mode II – High Res DIC

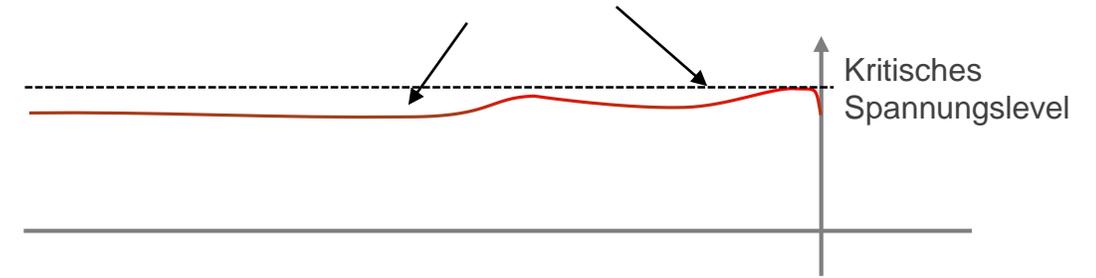
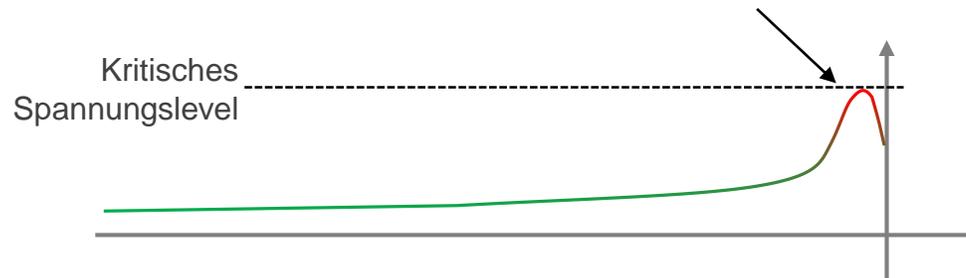
Referenz

mit Oberflächenzähmodifikation



Spannungskonzentrationen

ST homogenisiert den Spannungsverlauf



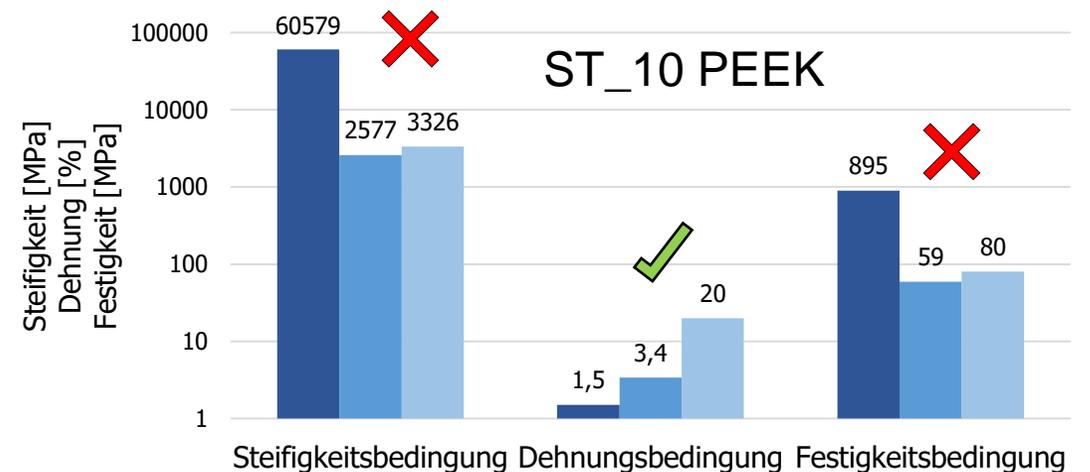
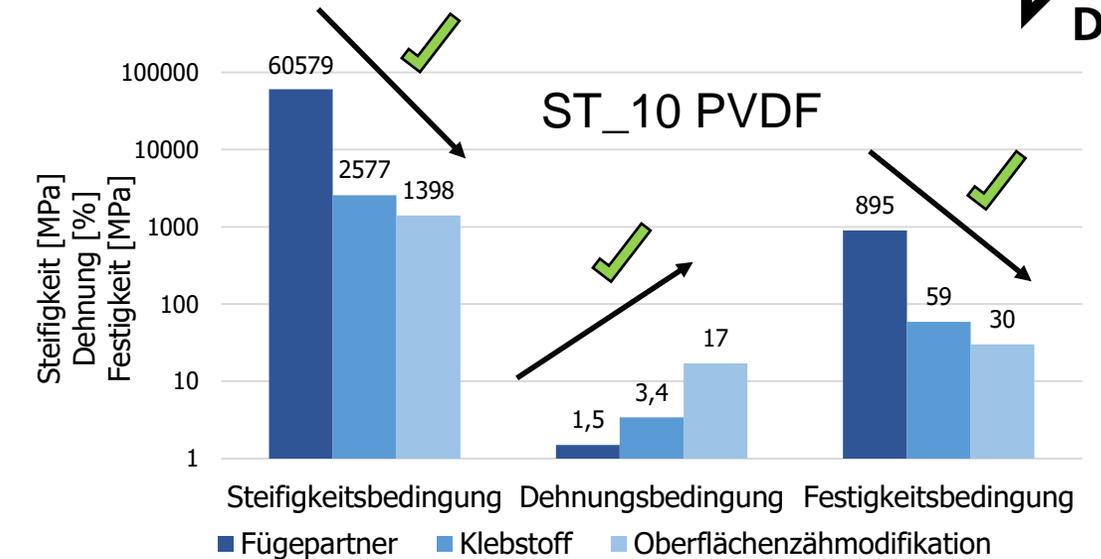
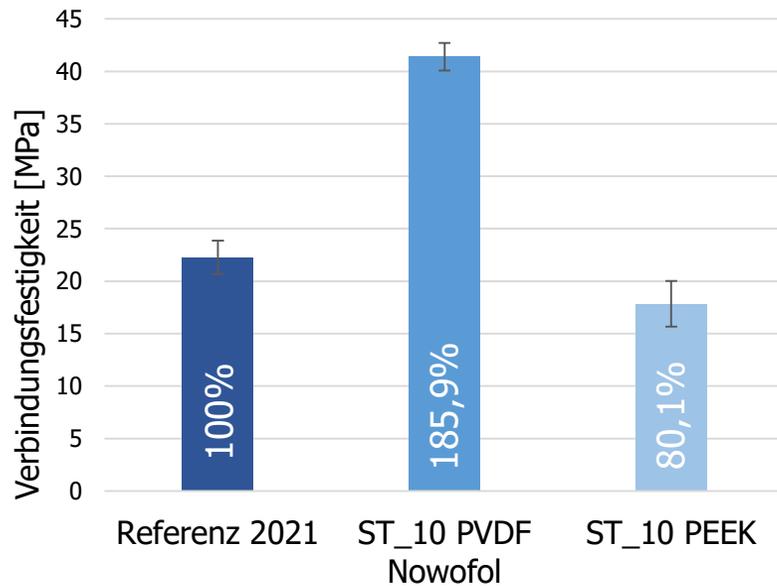
**Lastumlagerung nachgewiesen!**

# Auswahl einer geeigneten Materialkombination für ST



Identifikation einer:

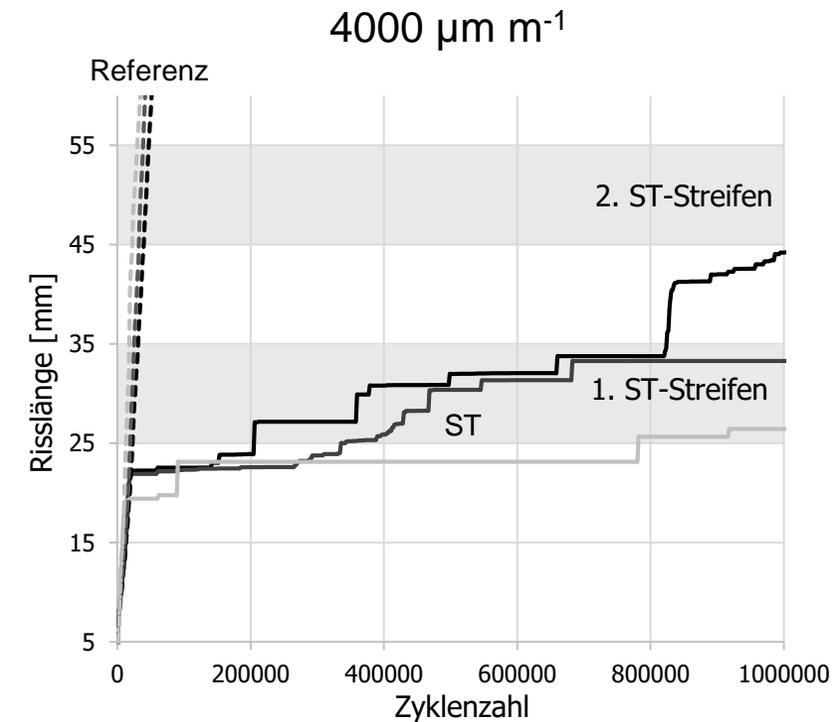
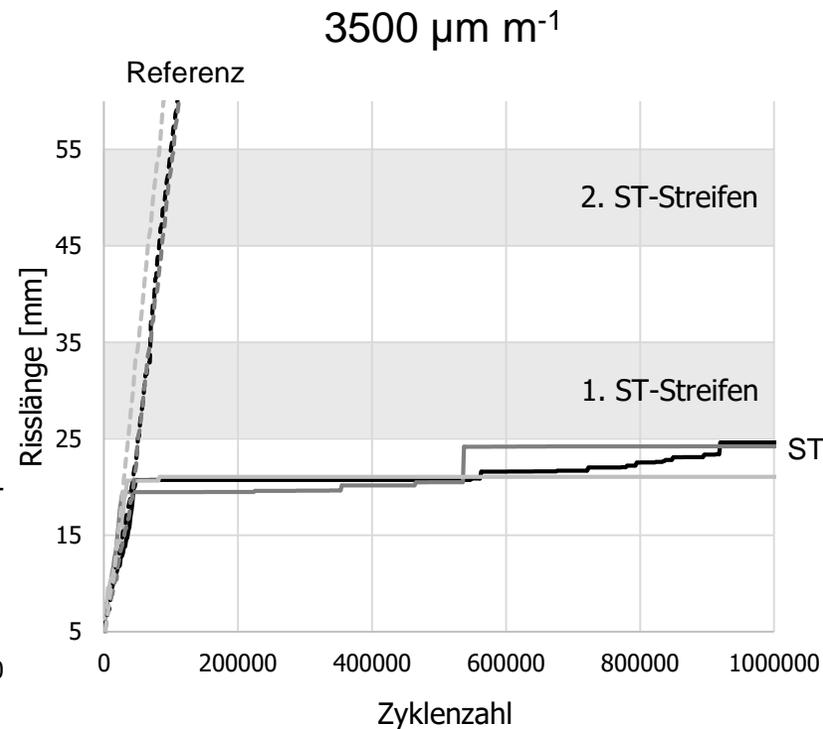
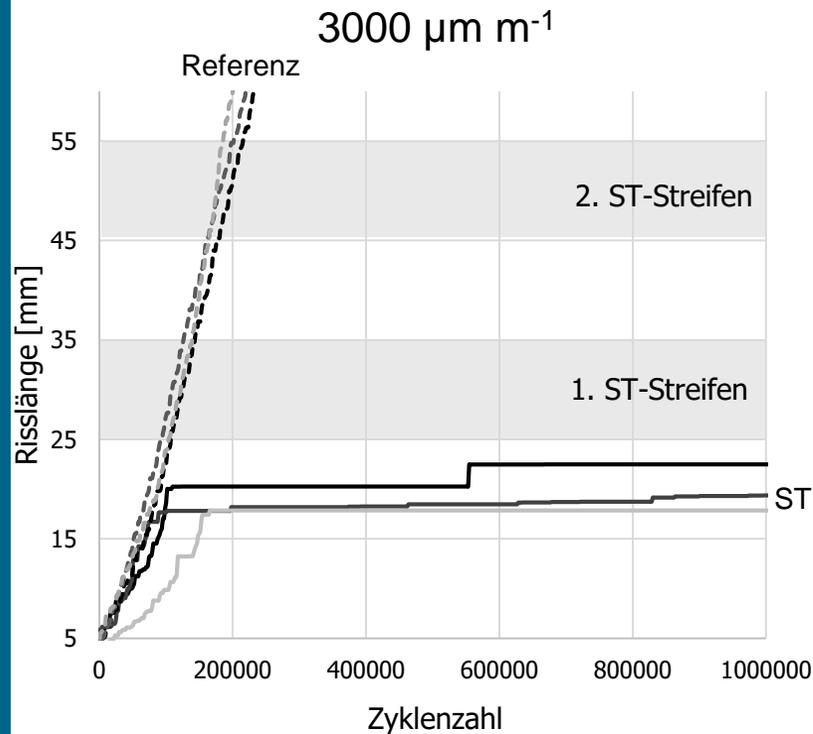
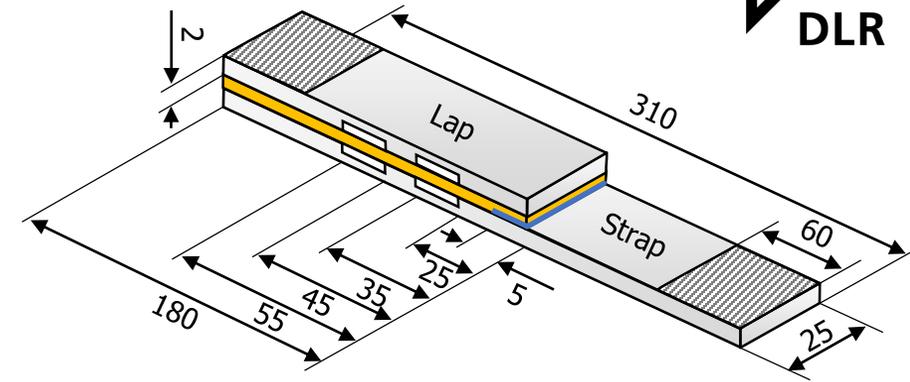
**Steifigkeitsbedingung**  
**Dehnungsbedingung**  
**Festigkeitsbedingung**



# Ermüdungsfestigkeitssteigerung bei CLS Proben

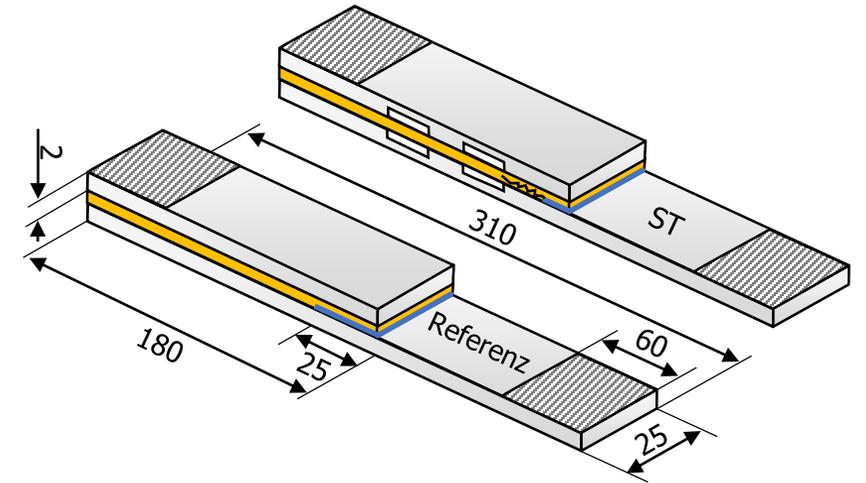
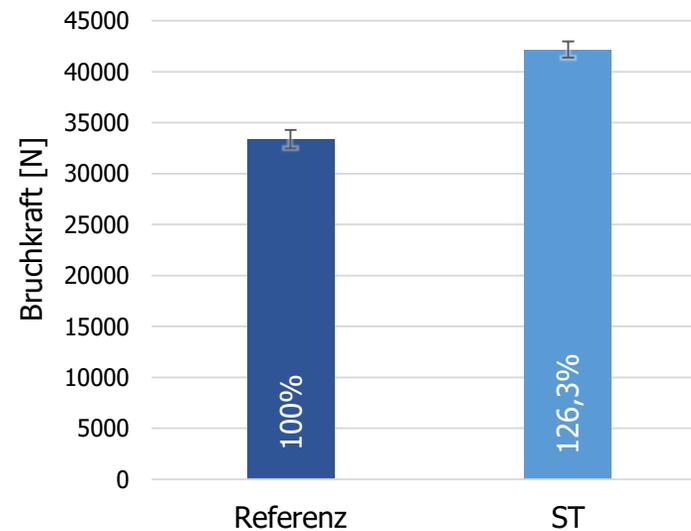


- sicherer Rissstopp bis  $3000 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$  Betriebslast
- sicherer Rissstopp bis  $3500 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$  117% der Betriebslast
- verlangsamter Rissstopp bis  $4000 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$  133% der Betriebslast



# Restfestigkeit der CLS Proben

**Referenz:** Klebstoff bricht kohäsiv  
**mit ST:** Substrat bricht



**Die lokale Oberflächenzähmodifikation stoppt Risse und steigert die Verbindungsfestigkeit!**

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP - alpha

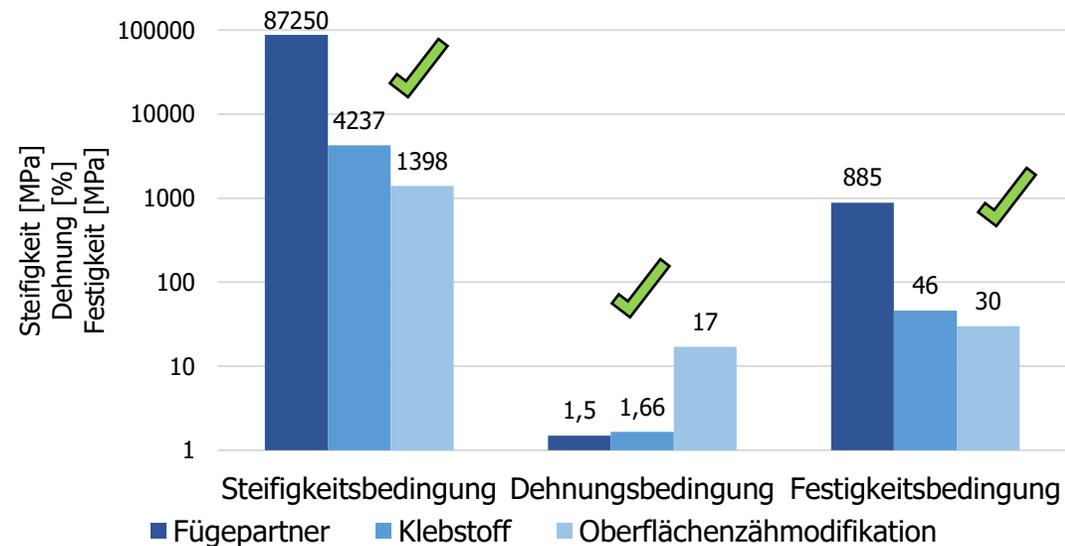


DLR HAP stratosphärentaugliches Höhenflugzeug

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

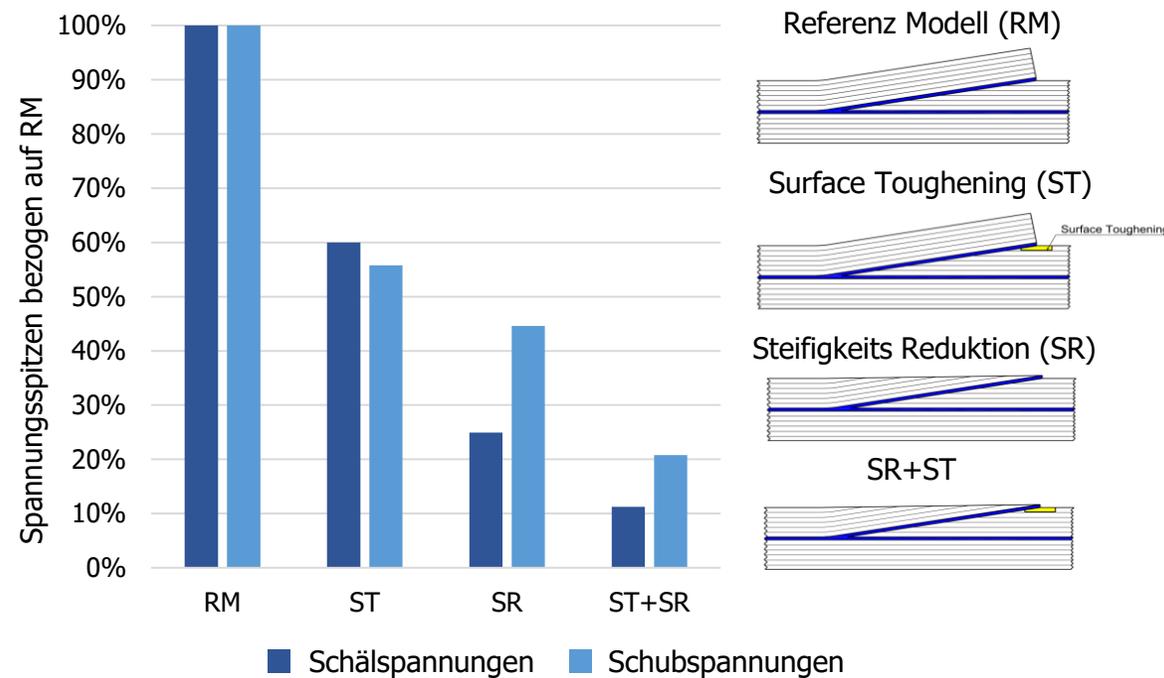
- Materialkombination prüfen

Fügepartner: M21E IMA, Klebstoff: EA9394, Oberflächenzähmodifikation: PVDF



# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

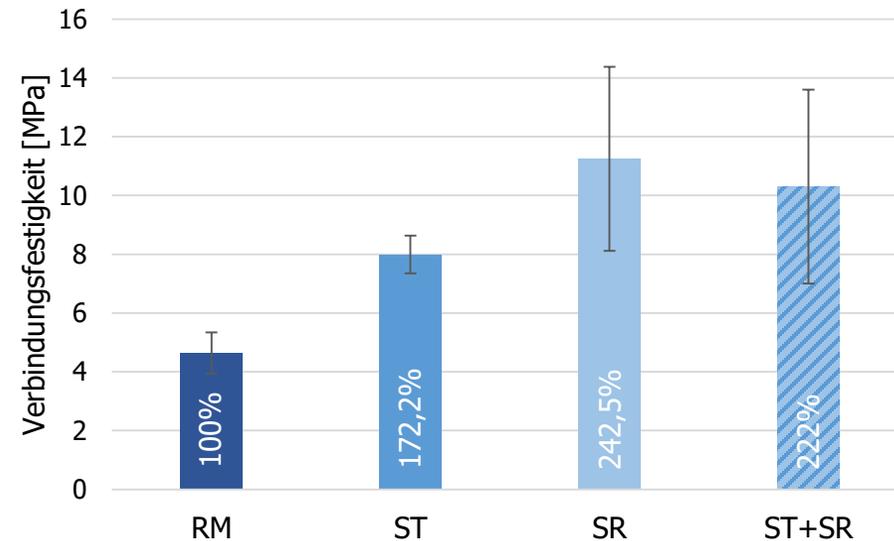
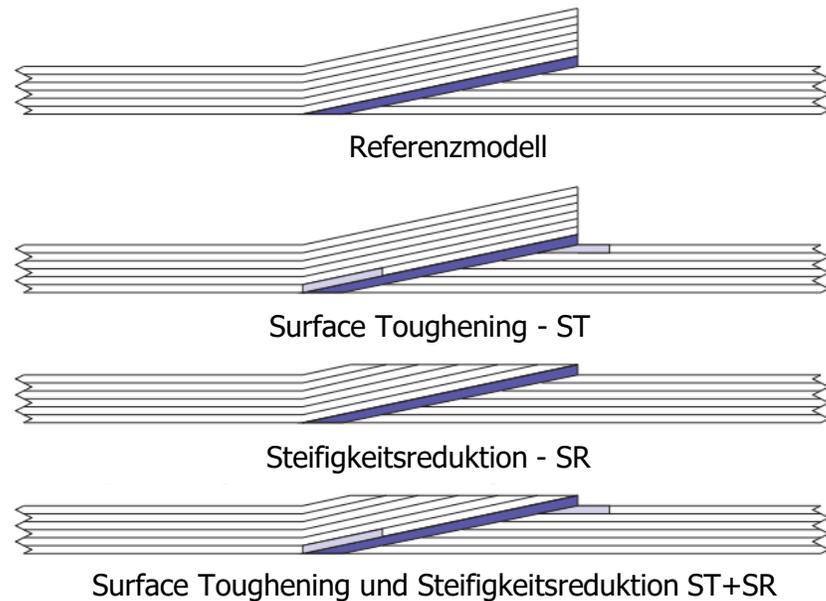
- FEM Untersuchung zu spannungsreduzierende Maßnahmen



Detailuntersuchungen T. Gesell [1]

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

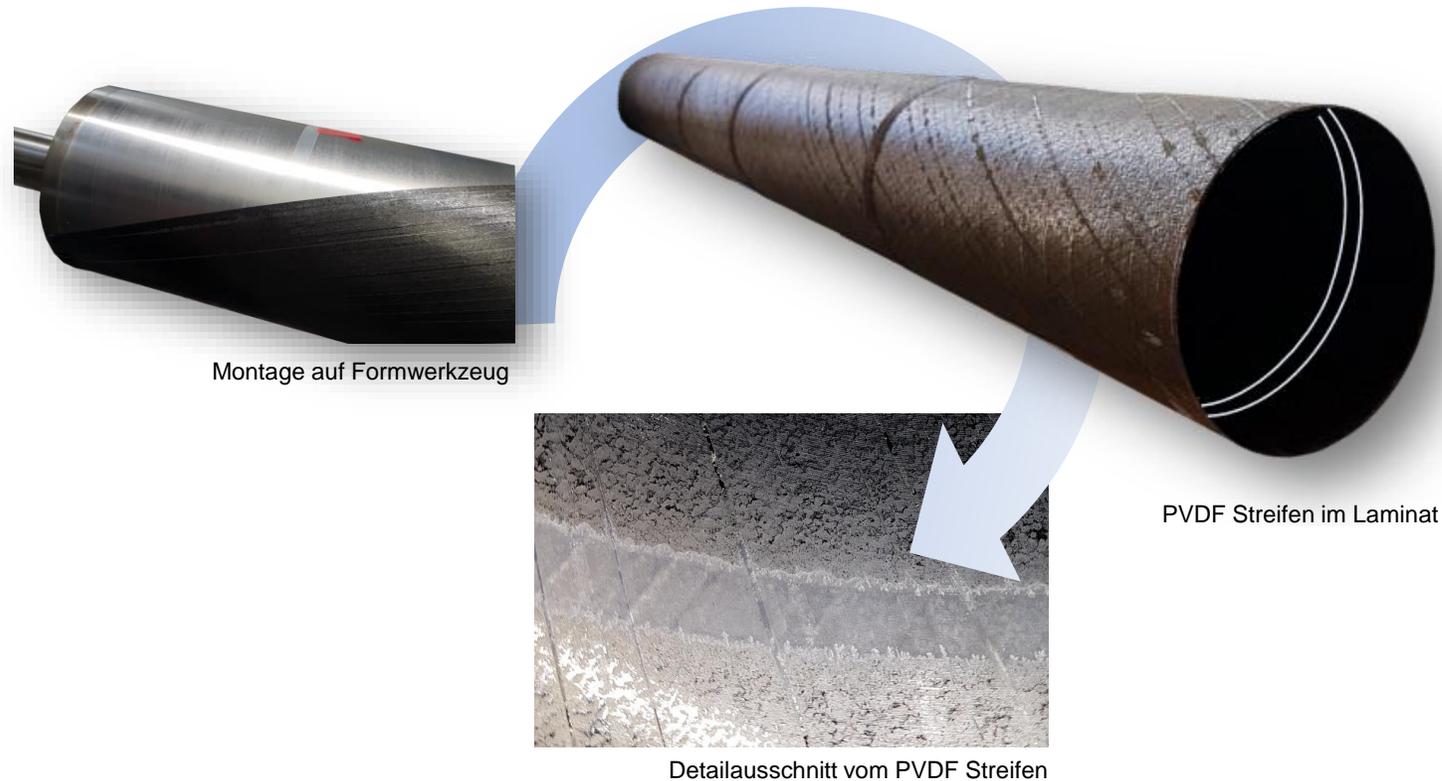
- Experimenteller Nachweis mittels Couponproben



Masterarbeit F. Kreissig [2]

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

- Applikation im Slittape-Wickelverfahren



# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

- Experimenteller Nachweis mittels Strukturtest



27m HAP Flügel



Flügel im Strukturtest

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

- Experimenteller Nachweis mittels Strukturtest



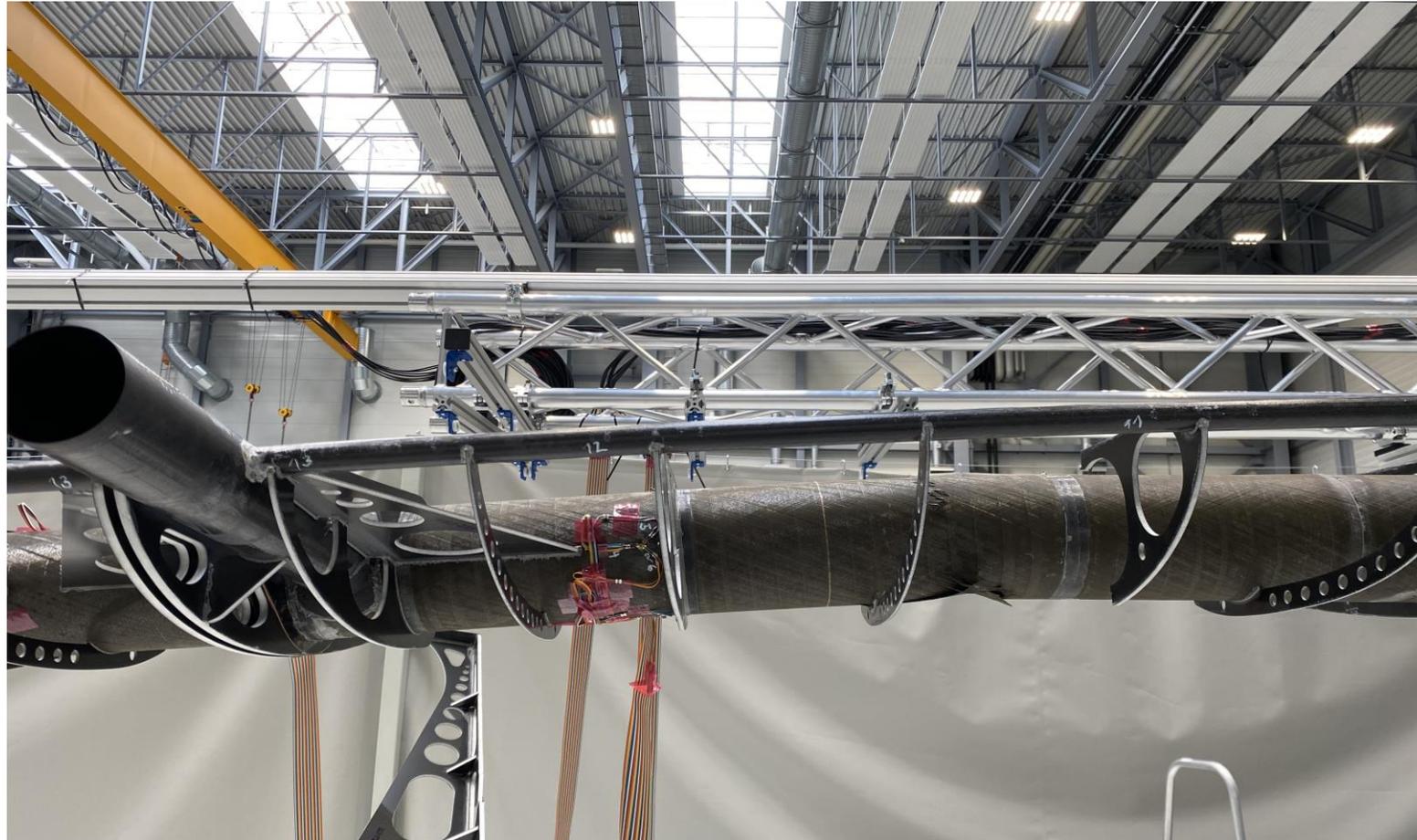
Flügelbruchvideo



Flügel im Strukturtest

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

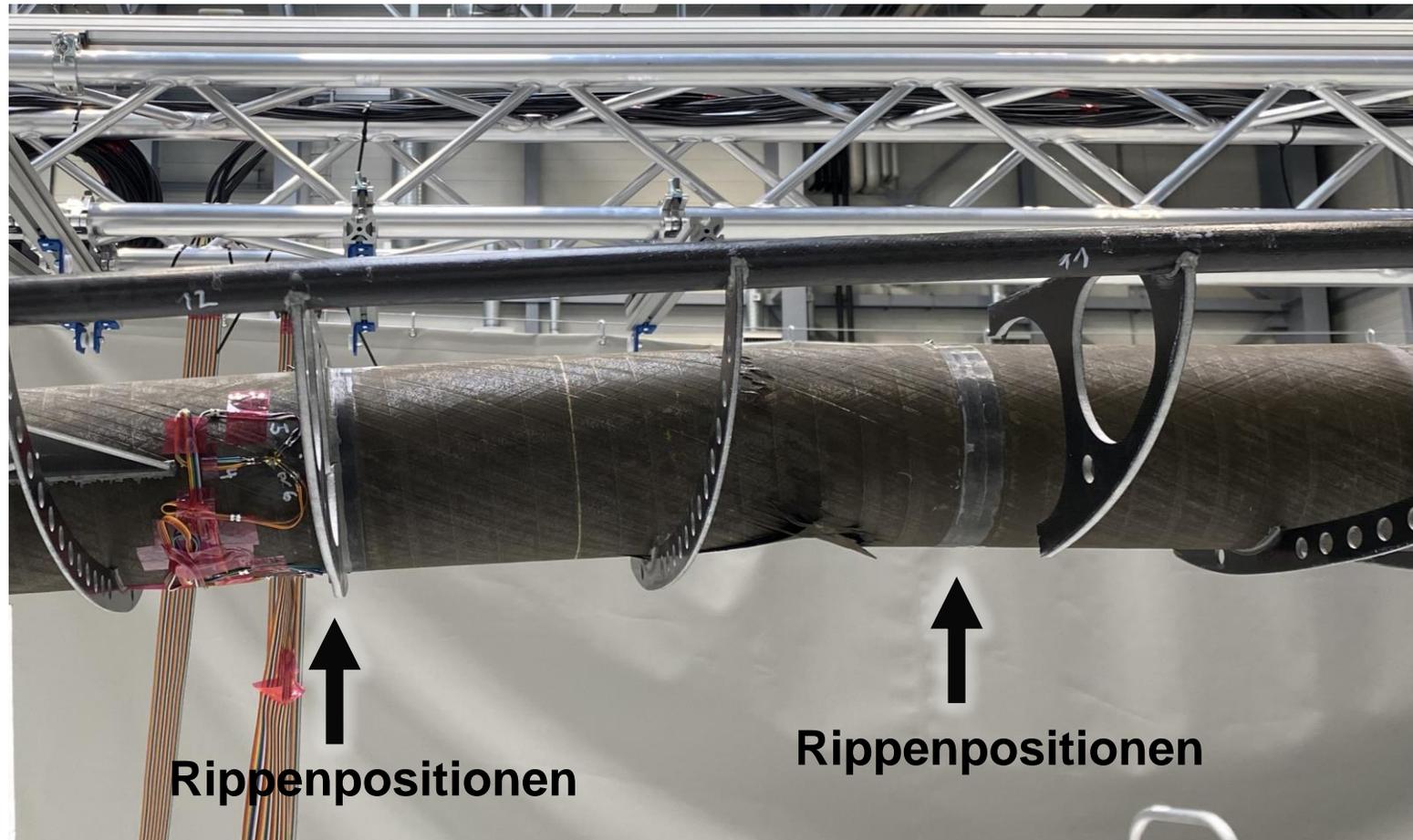
- Laminatbruch auf Grund von Stabilitätsversagen im Holm



Holmbruch außerhalb der Kleberbindung

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

- Laminatbruch auf Grund von Stabilitätsversagen im Holm



Holmbruch außerhalb der Klebverbindung

# Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

- Laminatbruch auf Grund von Stabilitätsversagen im Holm



**Kleerverbindung**

Holmbruch außerhalb der Kleerverbindung

Die lokale Oberflächenzähmodifikation...

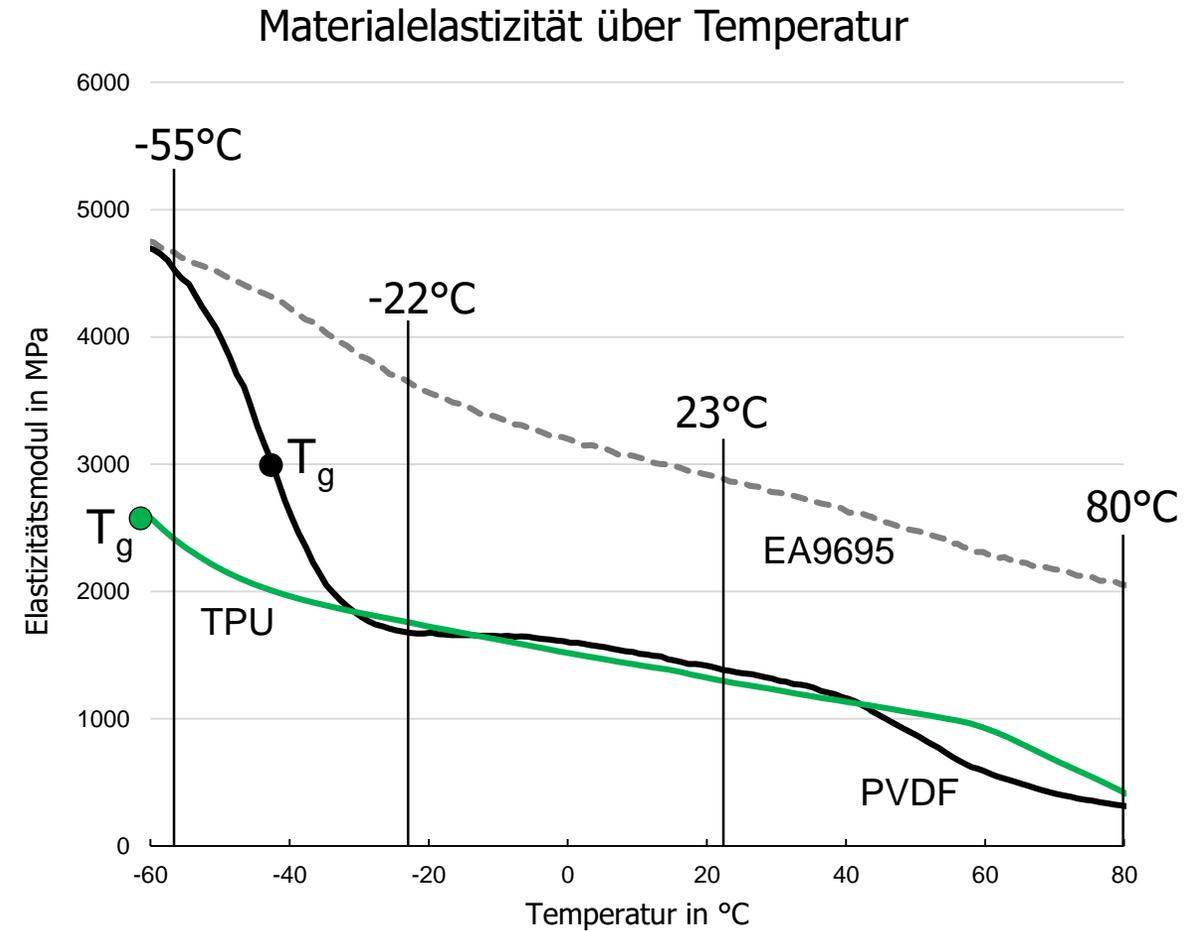
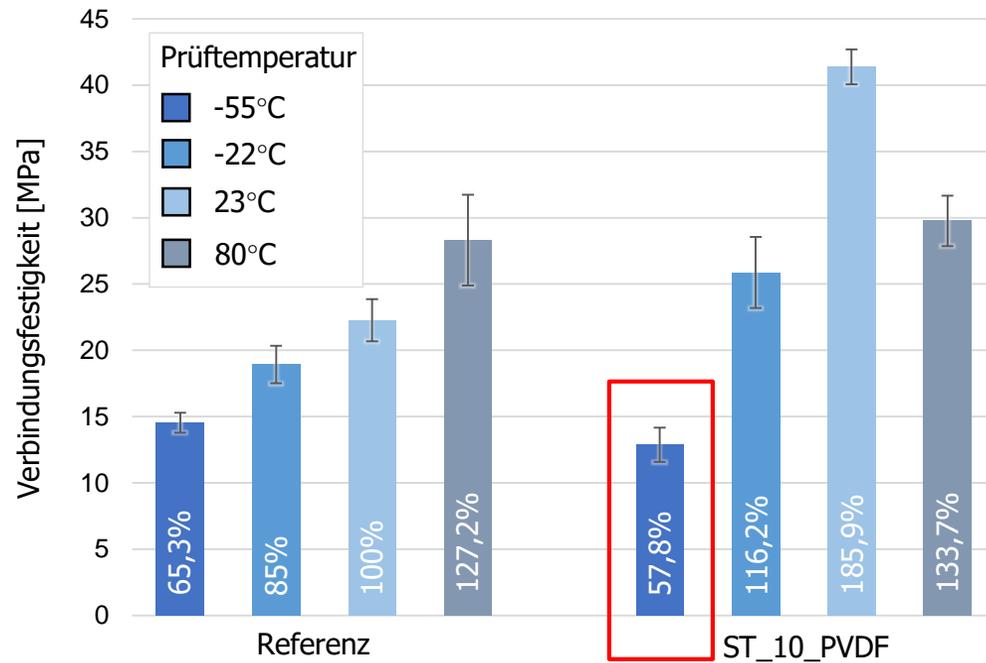
...steigert die Verbindungsfestigkeit um **bis zu 84%** bzw. **bis zum Fügeteilbruch**.

... besitzt eine **sichere rissstoppende Wirkung** über die Betriebslast hinaus auf **117% LL**.

... ist **einfach, schnell** und **preiswert** anzuwenden.

**...ist eine robuste und reine Klebverbindung mit Rissstoppwirkung!**

- TPU als Ersatz für PVDF verwenden



## Surface Toughening

Kleiner Streifen,  
große Wirkung!

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

**Martin Schollerer**  
**DLR Braunschweig e.V.**  
**Martin.schollerer@dlr.de**