



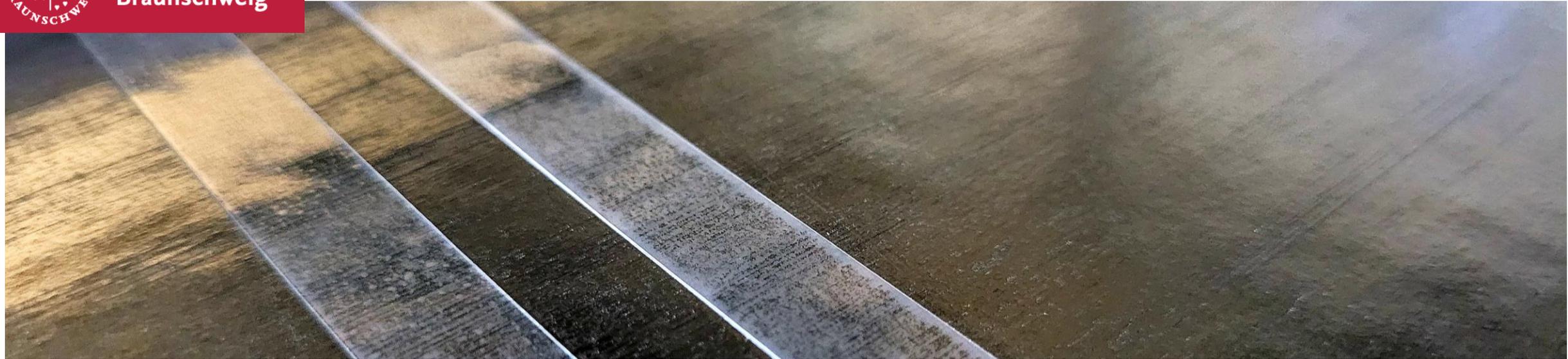
Technische
Universität
Braunschweig



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
Institut für Systemleichtbau



Institut für
Mechanik und Adaptronik **ima**



Steigerung der Robustheit von strukturellen Verklebungen in der Luftfahrt mittels lokaler Oberflächenzähmodifikation

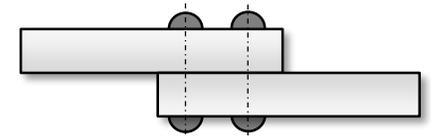
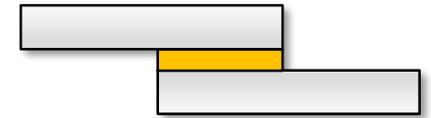
Martin J. Schollerer

- **Motivation und Problemstellung**
- **Die lokale Oberflächenzähmodifikation als robuste Rissstopptechnologie**
- **Anwendungsbeispiel für die Industrie**

- **Motivation und Problemstellung**
- Die lokale Oberflächenzähmodifikation als robuste Rissstopptechnologie
- Anwendungsbeispiel für die Industrie

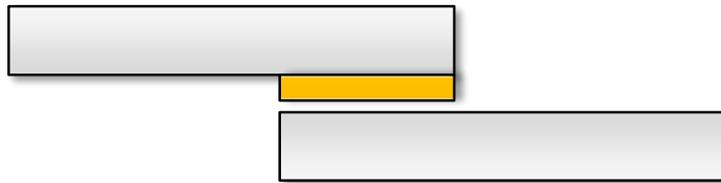
Kleberbindung vs. Bolzenverbindung

Vorteile	Nachteile
Kleberbindungen	
Kaum Spannungsspitzen	Dickenlimitierung bei der Verbindung
Steife Verbindung	Schwierige Qualitätssicherung
Gute Ermüdungseigenschaften	Aufwändige und teure Fertigung
Schutz gegen Korrosion	Umweltbeeinflusst
Geringe Masse	Nicht demontierbar
Gute Schadenstoleranz	
Gut bei FKV	
Toleranzausgleich	
Bolzenverbindung	
Demontierbar	Hohe Spannungskonzentrationen
Keine Dickenlimitierung	Rissbildung
Einfache Qualitätssicherung	Nietfeld schädigt FKV
Nicht umweltbeeinflusst	Anfällig für Korrosion
	Toleranzeinhaltung der Bohrungen
	Massenzuwachs
	Kein Toleranzausgleich

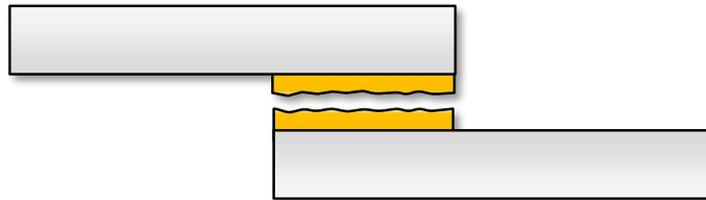


Brucharten von Klebverbindungen

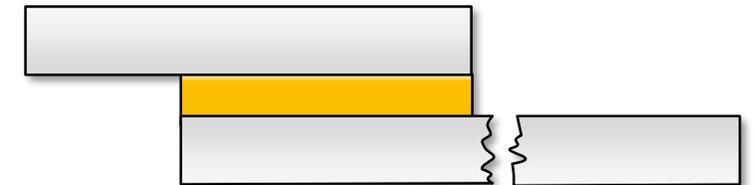
Adhäsionsbruch



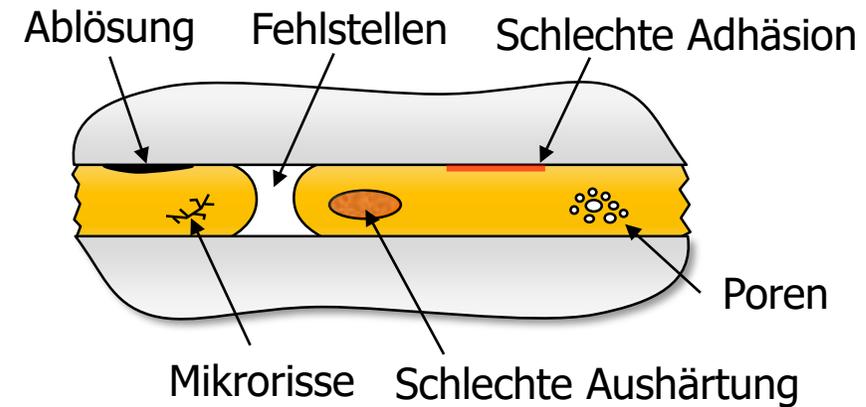
Kohäsionsbruch



Fügeteilbruch



Ursachen für eine schlechte Klebverbindung



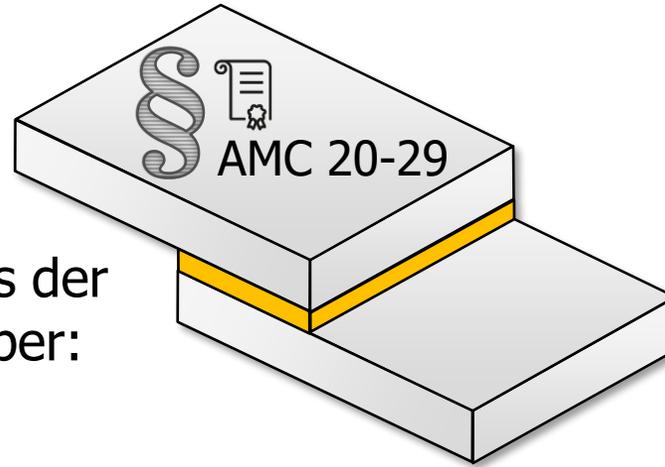
Zulassungsvorschriften für strukturelle Klebverbindungen in der Luftfahrt

AMC = Zulässige Maßnahmen zur Einhaltung der Vorschriften

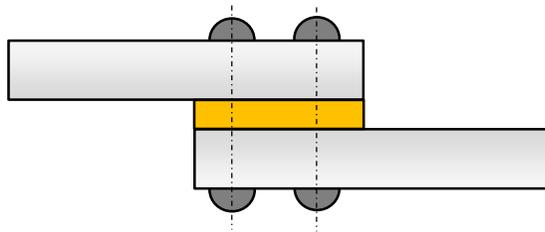


EASA Bauvorschriften CS 25

Festigkeitsnachweis der Klebverbindung über:



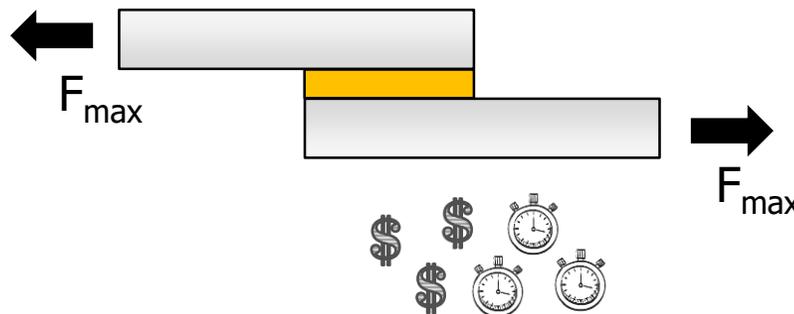
(i) Zusätzliche Designelemente



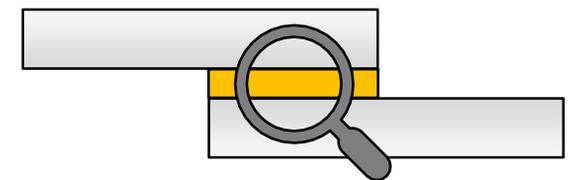
Nachteil:



(ii) Belastungsversuche



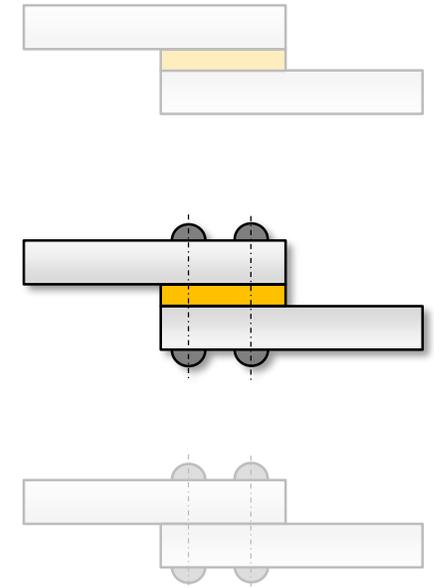
(iii) Inspektion



Gibt es nicht.

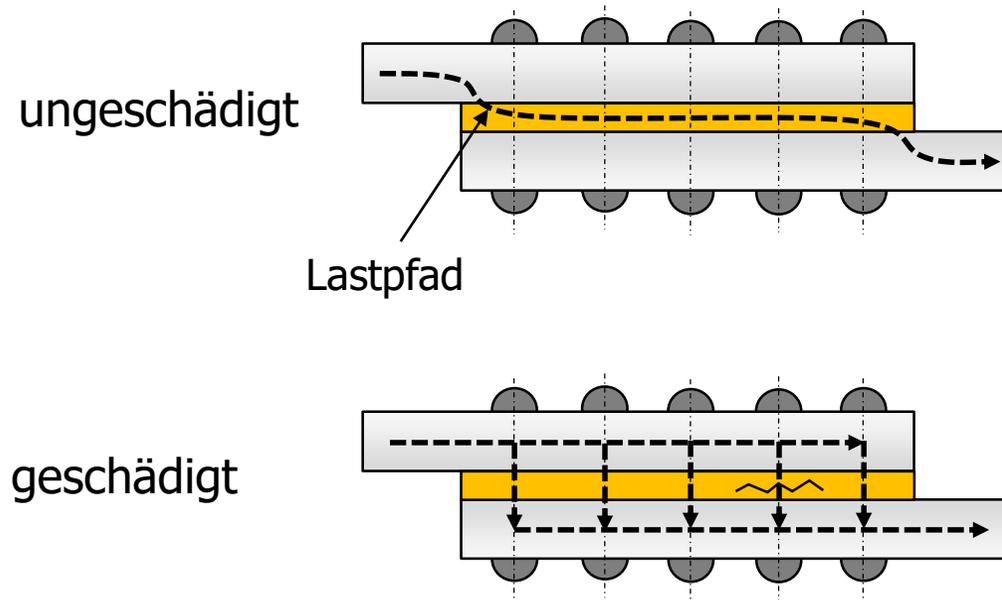
Kombination von Klebverbindung und Bolzenverbindung

Vorteile	Nachteile
Klebverbindungen	
Kaum Spannungsspitzen Steife Verbindung Gute Ermüdungseigenschaften Schutz gegen Korrosion Geringe Masse Gute Schadenstoleranz Gut bei FKV Toleranzausgleich	Dickenlimitierung bei der Verbindung Schwierige Qualitätssicherung Aufwändige und teure Fertigung Umweltbeeinflusst Nicht demontierbar
Bolzenverbindung	
Demontierbar Keine Dickenlimitierung Einfache Qualitätssicherung Nicht umweltbeeinflusst	Hohe Spannungskonzentrationen Rissbildung Nietfeld schädigt FKV Anfällig für Korrosion Toleranzeinhaltung der Bohrungen Massenzuwachs Kein Toleranzausgleich

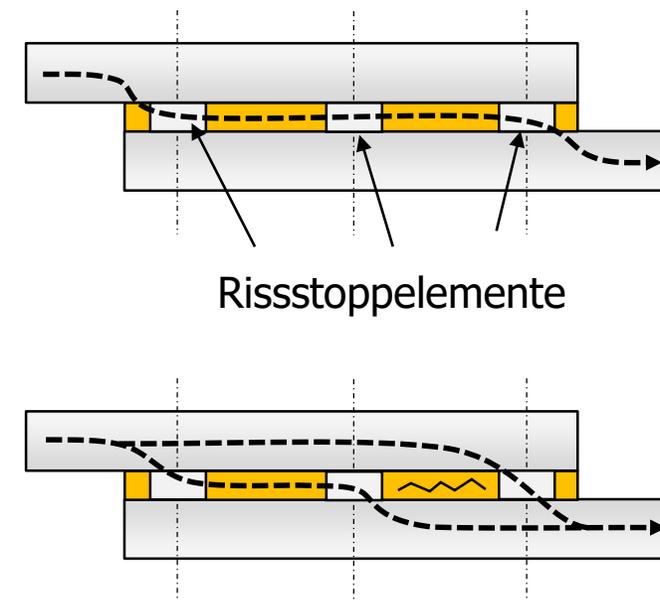


Von der gebolzten zur geklebten Verbindung

Fail Safe Design



Maximum Disbond Design

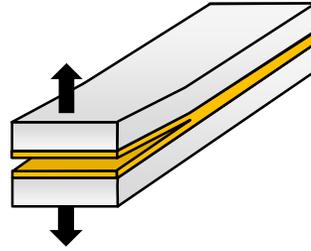


Ziel: Robuste reine Klebverbindung mit Risstoppwirkung!

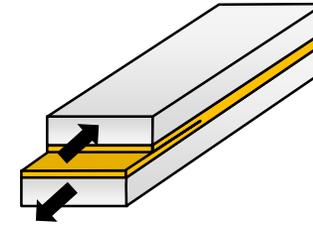
Kleerverbindungen unter Belastung

Spannungskonzentrationen an Klebrändern sind versagensinitiiierend und führen zum Risswachstum

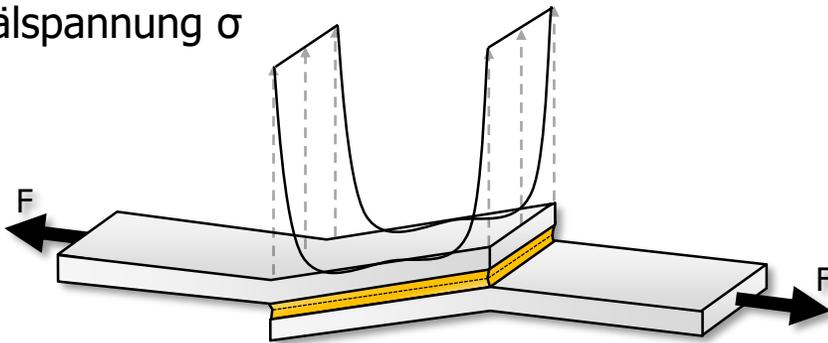
Mode I:
Schälbelastung



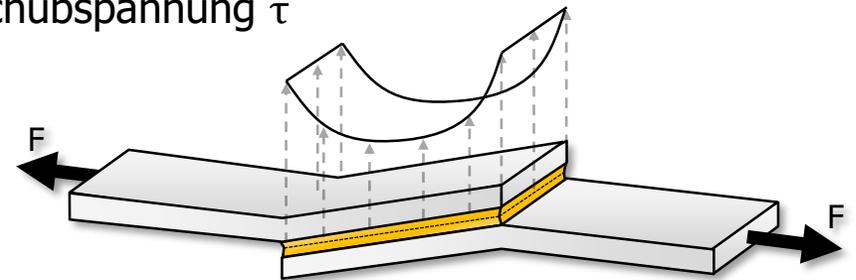
Mode II:
Schubbelastung



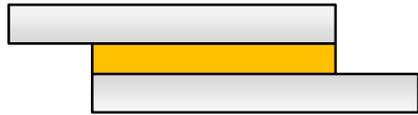
Schälspannung σ



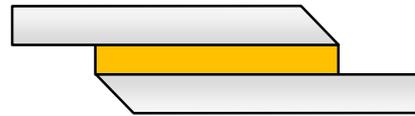
Schubspannung τ



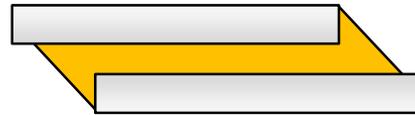
Maßnahmen aus dem Stand der Technik zur Spannungsreduktion



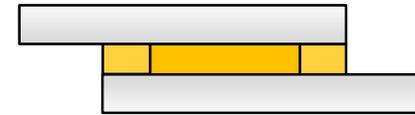
Referenz



Modifikation des Fügeteils



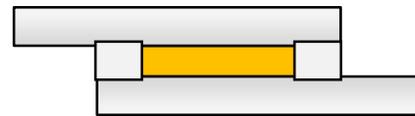
Modifikation des Klebstoffauslaufs



Klebstoffgradierung



Klebstoffmodifikation

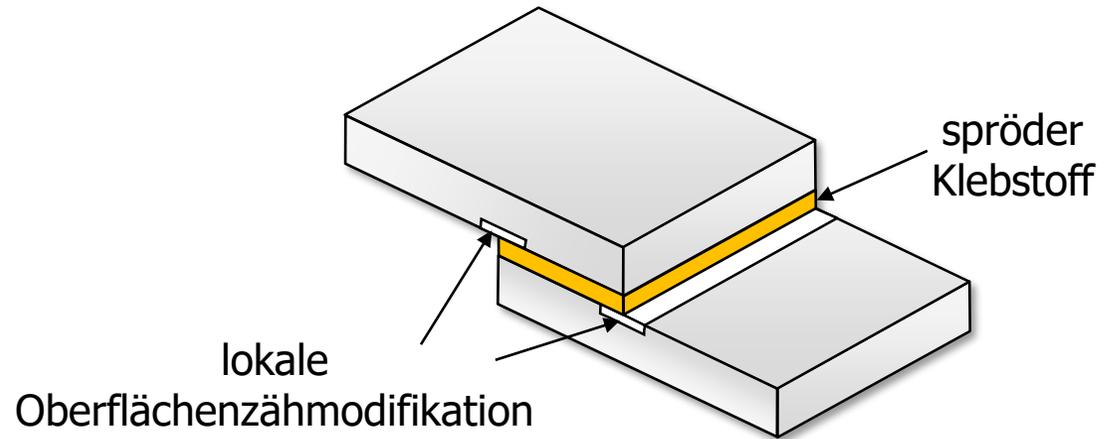


Hybrid Bondline

Kein Konzept erfüllt die Anforderungen an eine robuste Klebung mit Rissstoppfunktion!

- Motivation und Problemstellung
- **Die lokale Oberflächenzähmodifikation als robuste Rissstopptechnologie**
- Anwendungsbeispiel für die Industrie

Die lokale Oberflächenzähmodifikation – Surface Toughening (ST) engl.



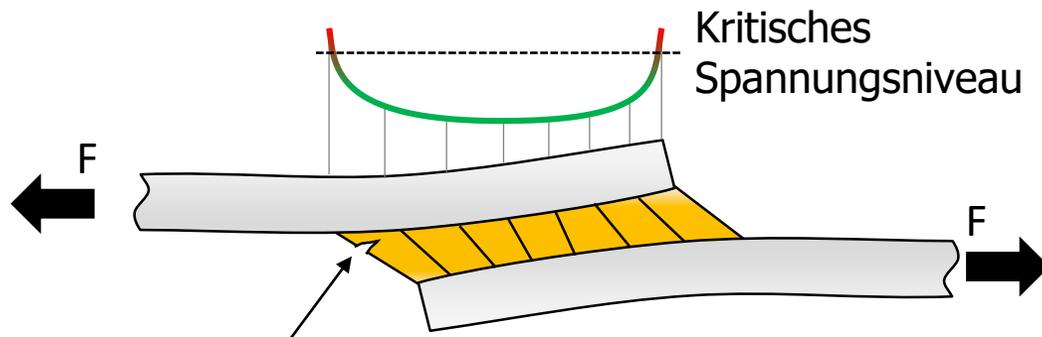
Forschungshypothesen:

Durch gezielte Anordnung der lokalen Oberflächenmodifikation in der Klebung wird die Lastverteilung verbessert und somit die Verbindungsfestigkeit gesteigert.

Ein Risswachstum in der Klebverbindung wird mittels einer lokalen Oberflächenzähmodifikation und der dadurch auftretenden Reduktion von Spannungskonzentrationen gestoppt.

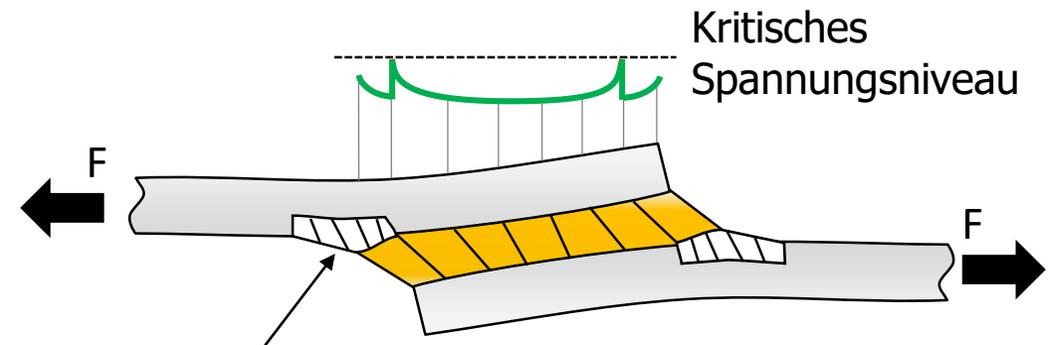
Die lokale Oberflächenzähmodifikation - Funktionsweise

Referenz



Spannungskonzentrationen
führen zu Anriss

Mit lokaler Oberflächenzähmodifikation

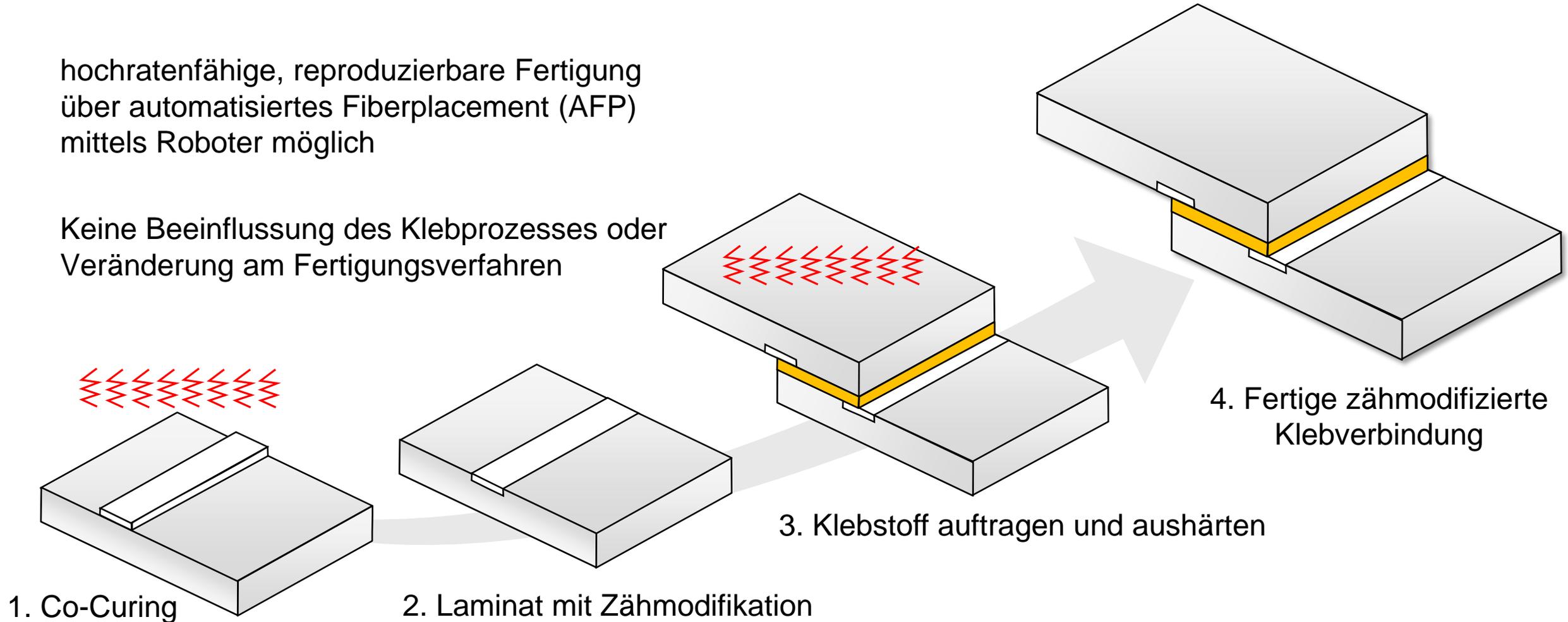


Duktiler Material nimmt
Dehnungen auf und reduziert
Spannungskonzentrationen

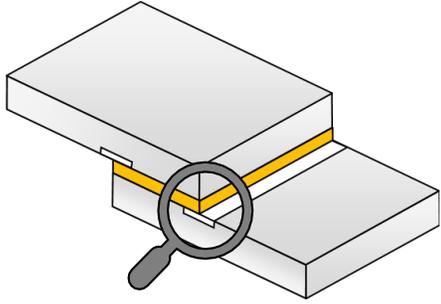
Fertigung am Beispiel des Prepregverfahrens

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

Keine Beeinflussung des Klebprozesses oder
Veränderung am Fertigungsverfahren



Schliffbild und Materialien



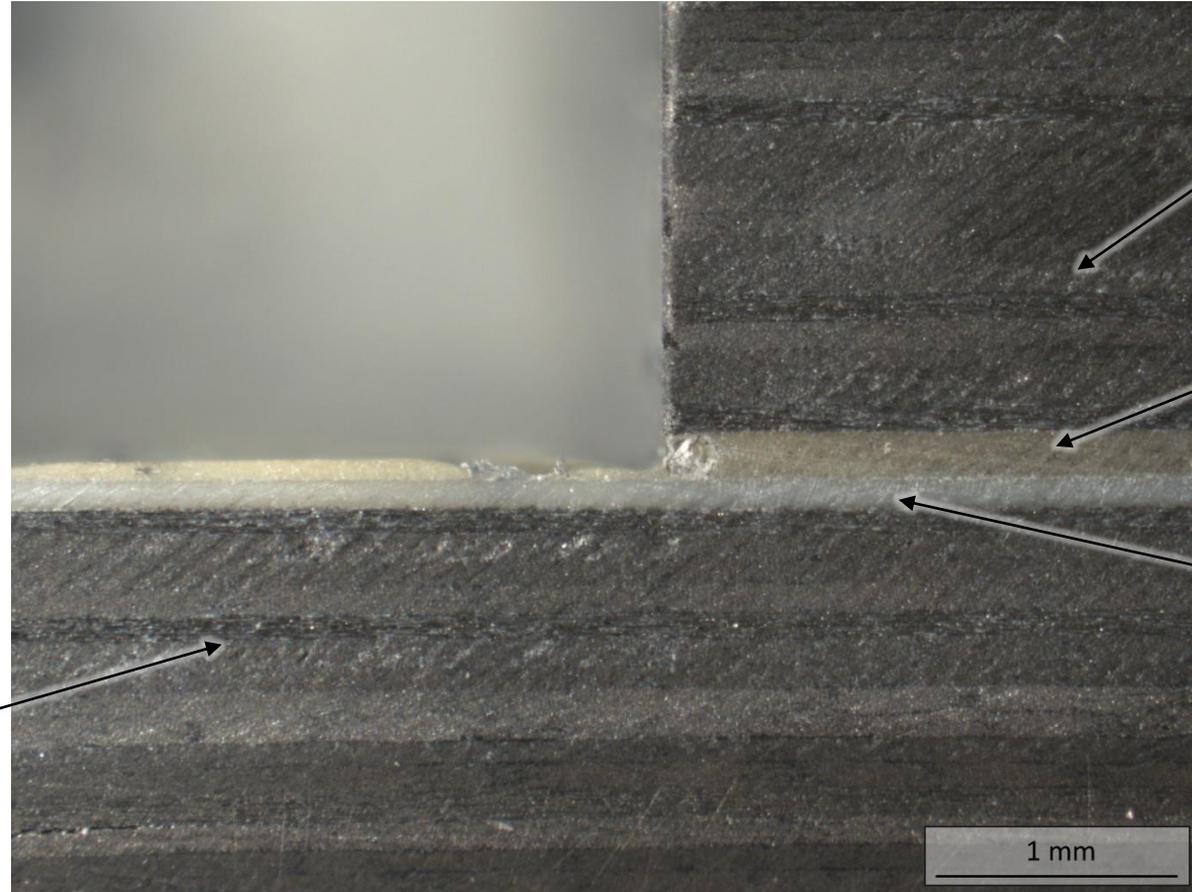
Elastizitätsmoduln:

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

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

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

Fügeteil 1
8552 IM7



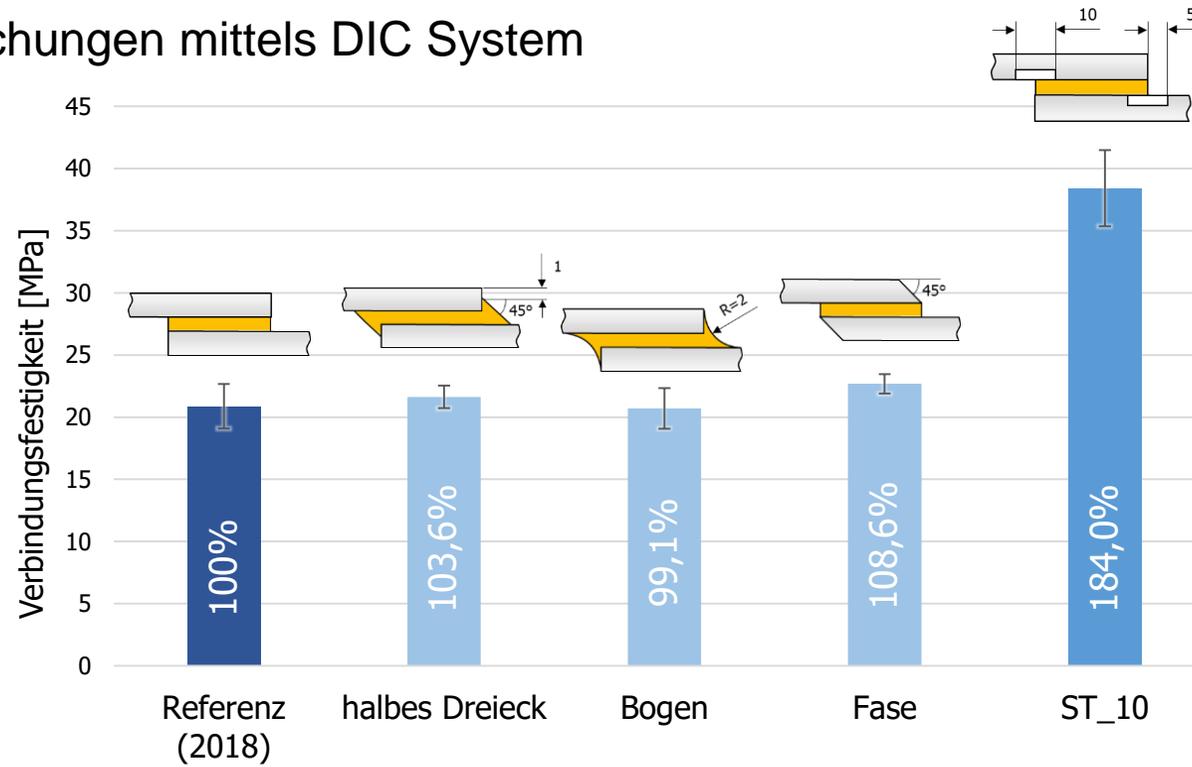
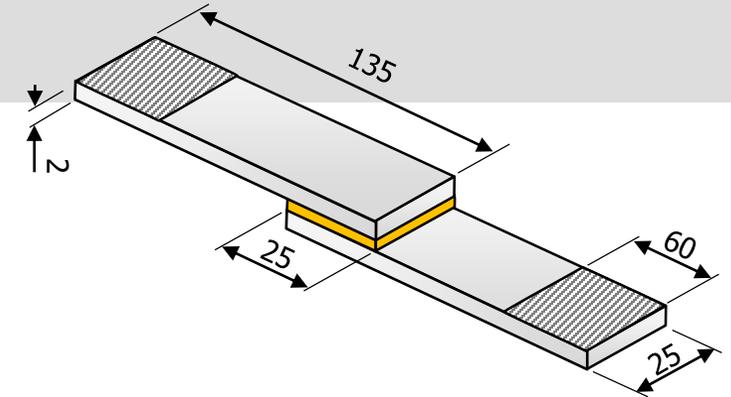
Fügeteil 2
8552 IM7

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

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

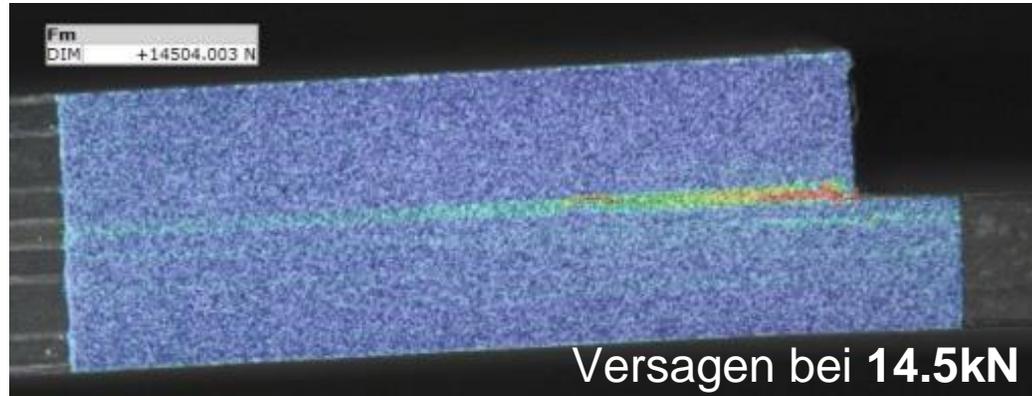
Festigkeitssteigerung bei SLS – Mode I + Mode II

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

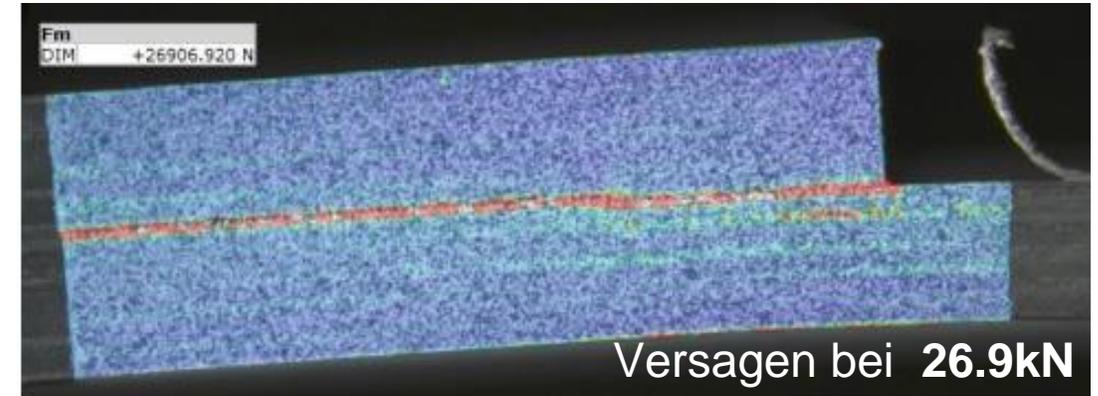


Festigkeitssteigerung bei SLS – Mode I + Mode II – High Res DIC

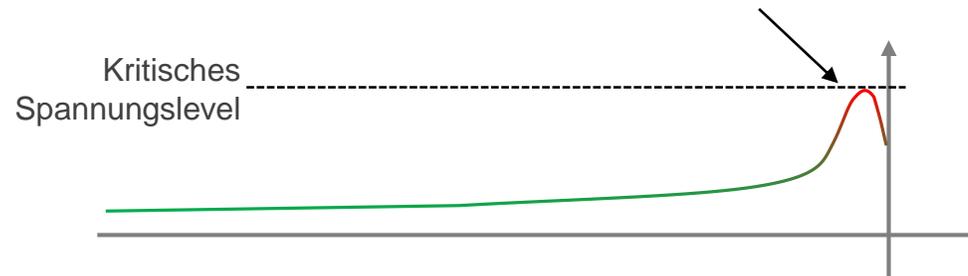
Referenz



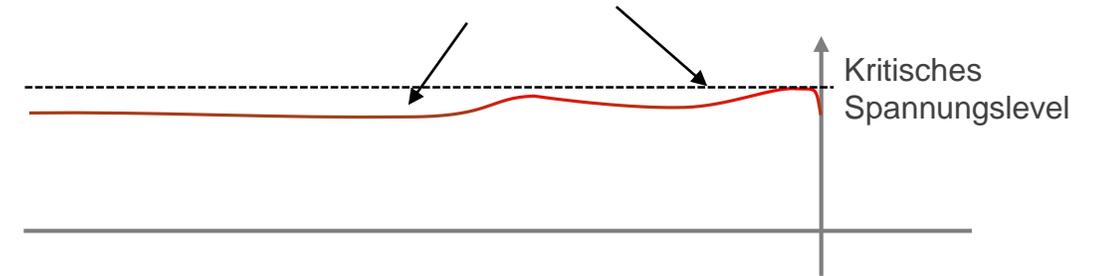
mit Oberflächenzähmodifikation



Spannungskonzentrationen



ST homogenisiert den Spannungsverlauf

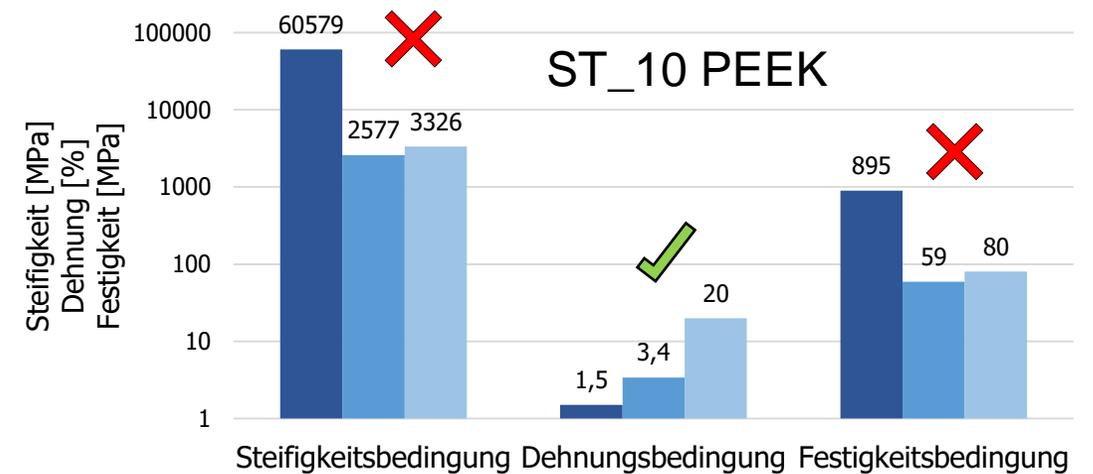
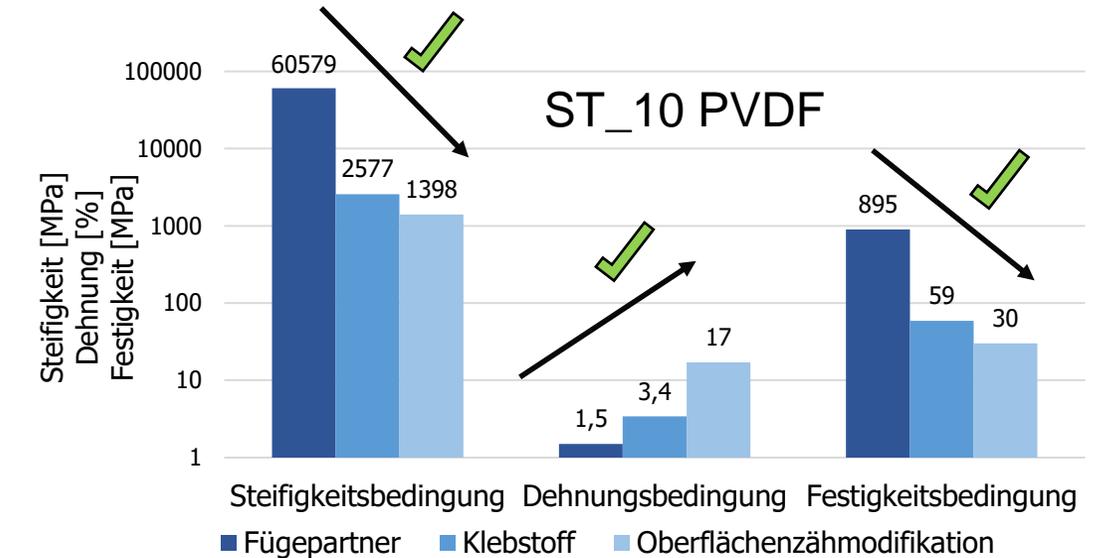
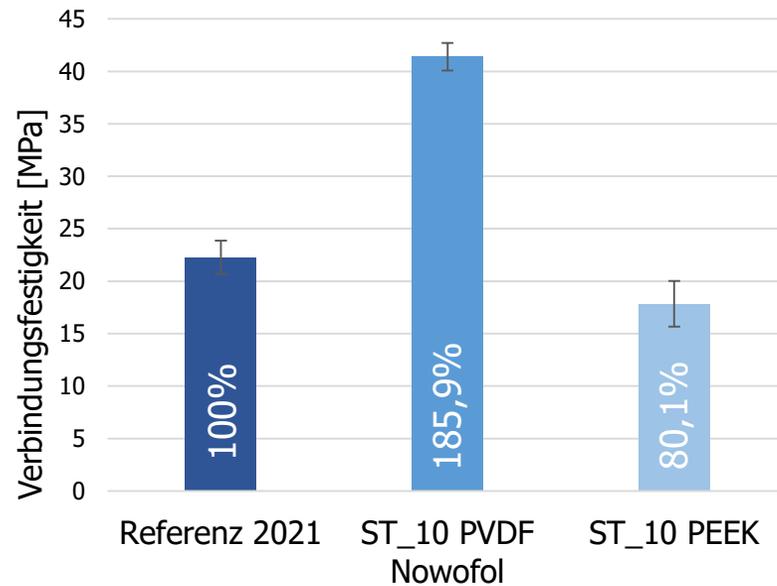


Lastumlagerung nachgewiesen!

Auswahl einer geeigneten Materialkombination für ST

Identifikation einer:

Steifigkeitsbedingung
Dehnungsbedingung
Festigkeitsbedingung

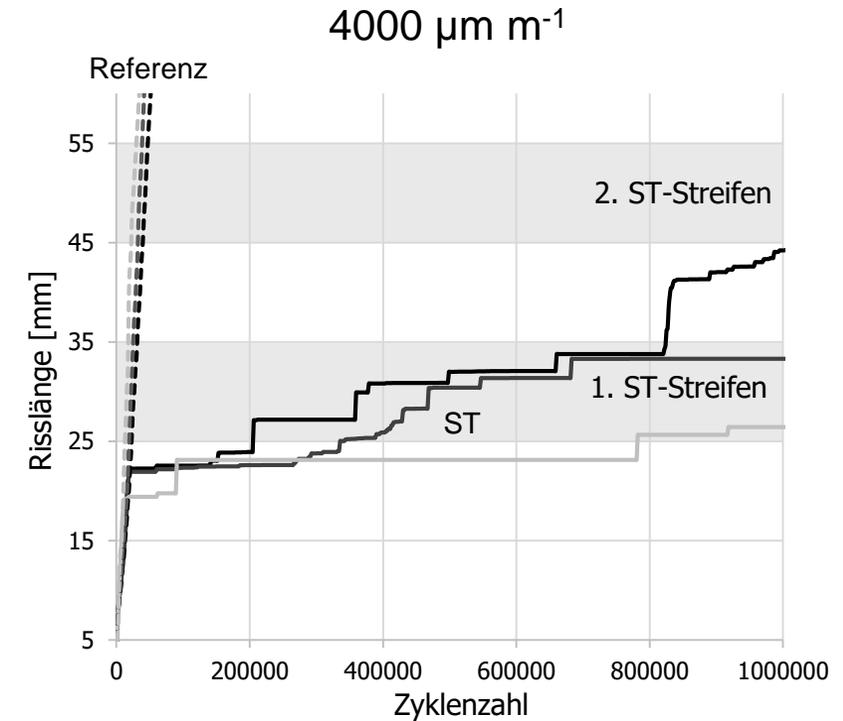
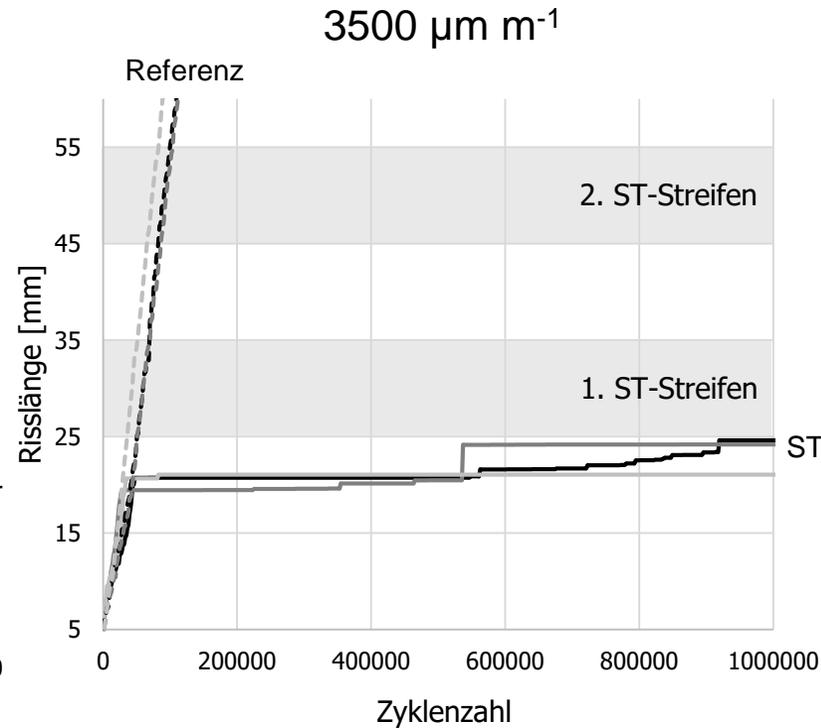
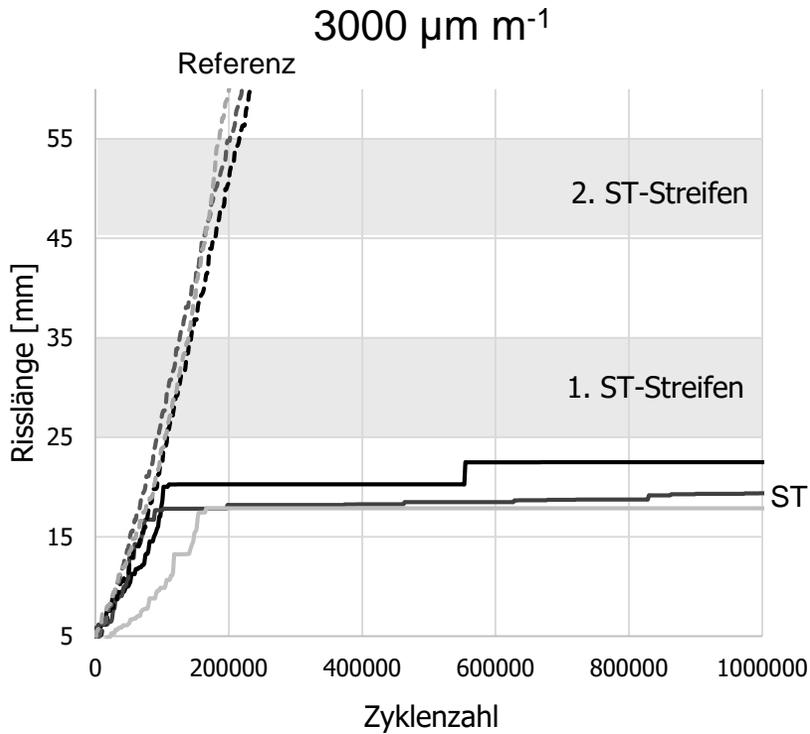
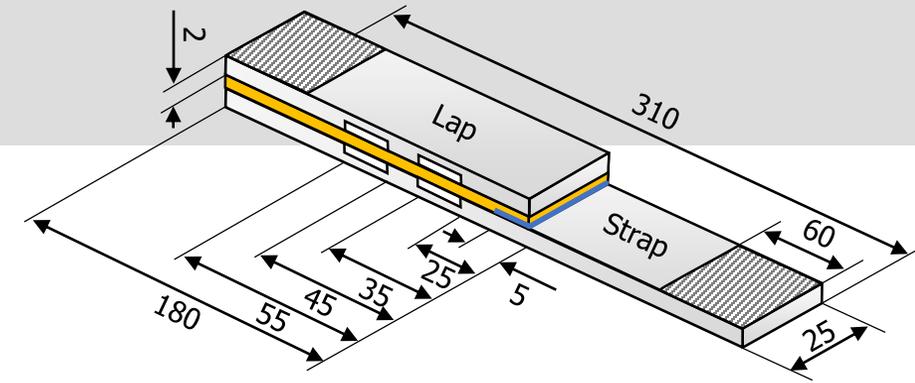


Ermüdungsfestigkeitssteigerung bei CLS Proben

sicherer Rissstopp bis $3000 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$ Betriebslast

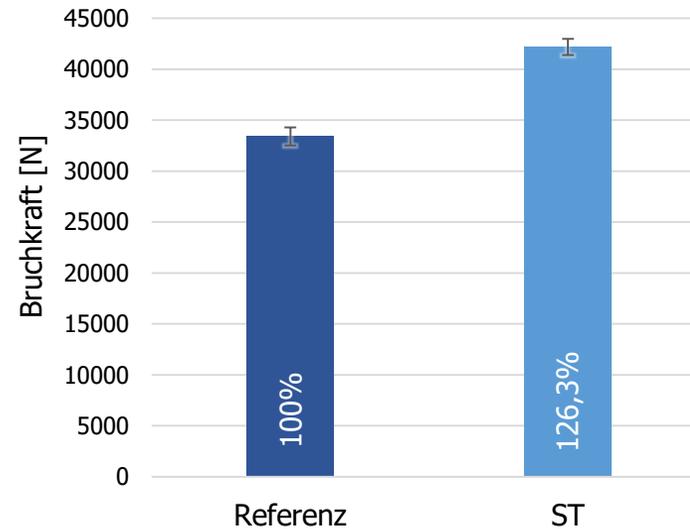
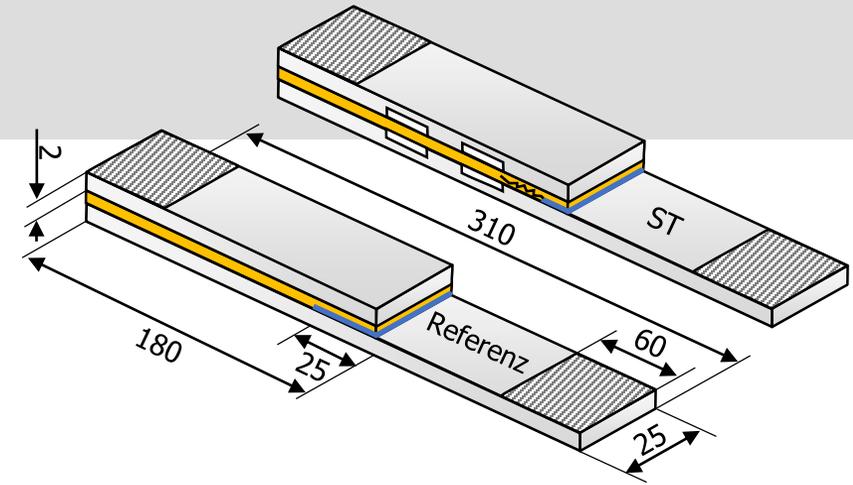
sicherer Rissstopp bis $3500 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$ 117% der Betriebslast

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!

- Motivation und Problemstellung
- Die lokale Oberflächenzähmodifikation als robuste Rissstopptechnologie
- **Anwendungsbeispiel für die Industrie**

Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP



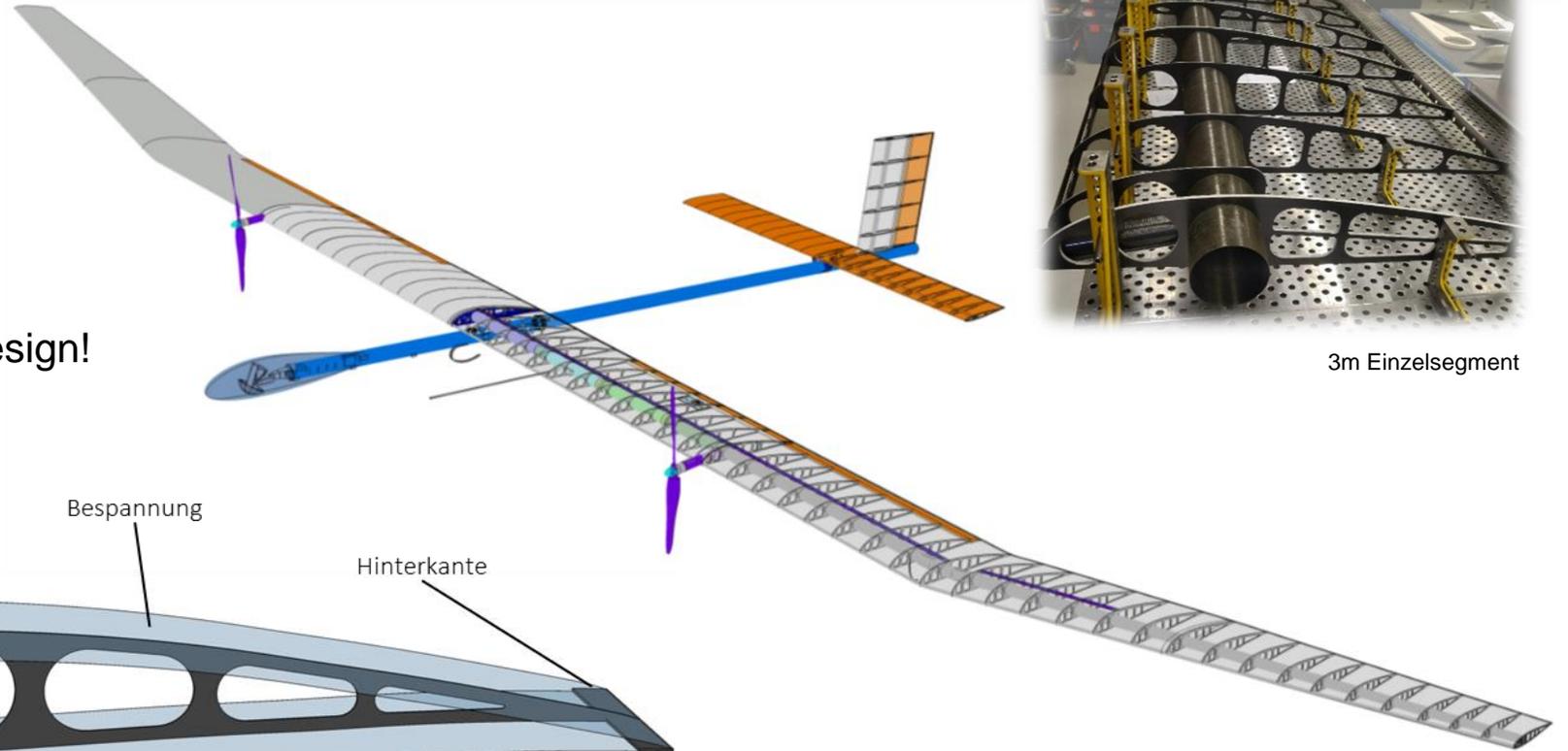
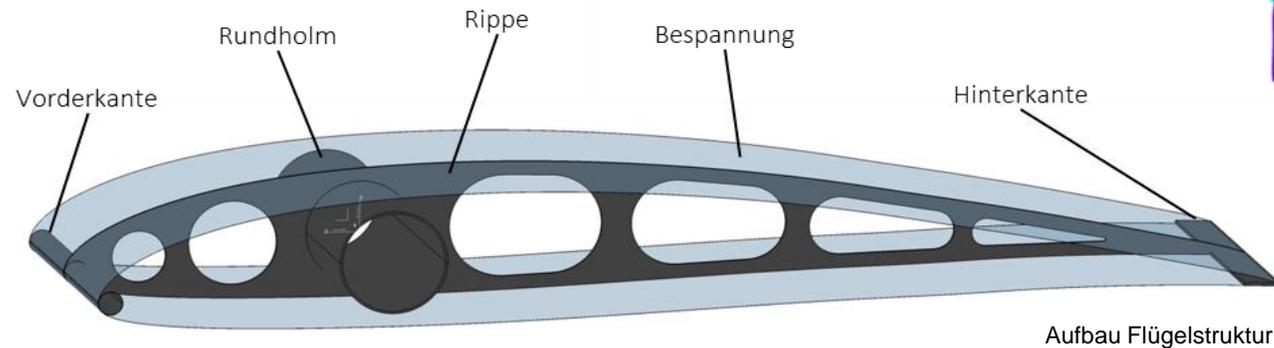
DLR HAP stratosphärentaugliches Höhenflugzeug

Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

Fakten

- 27 m Spannweite
- 135 kg MTOW
- 38 kg Strukturmasse
- 22 km Flughöhe
- 90 Tage Flugzeit

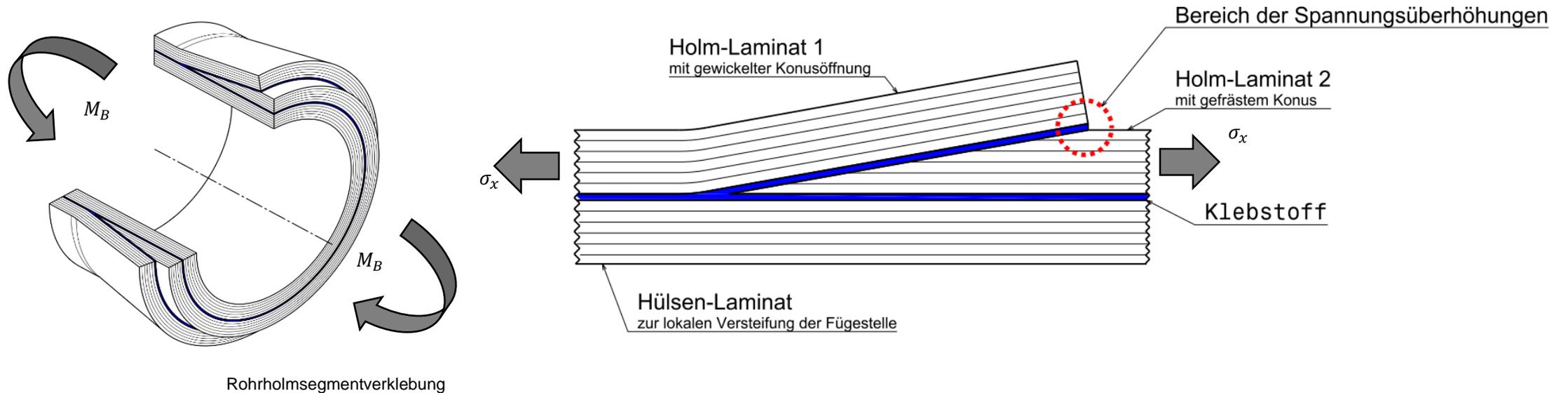
Extreme Leichtbaugüte mit robustem Design!



HAP alpha

Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

- Flügelbiegung verursacht Biegemoment auf die Holmverbindung

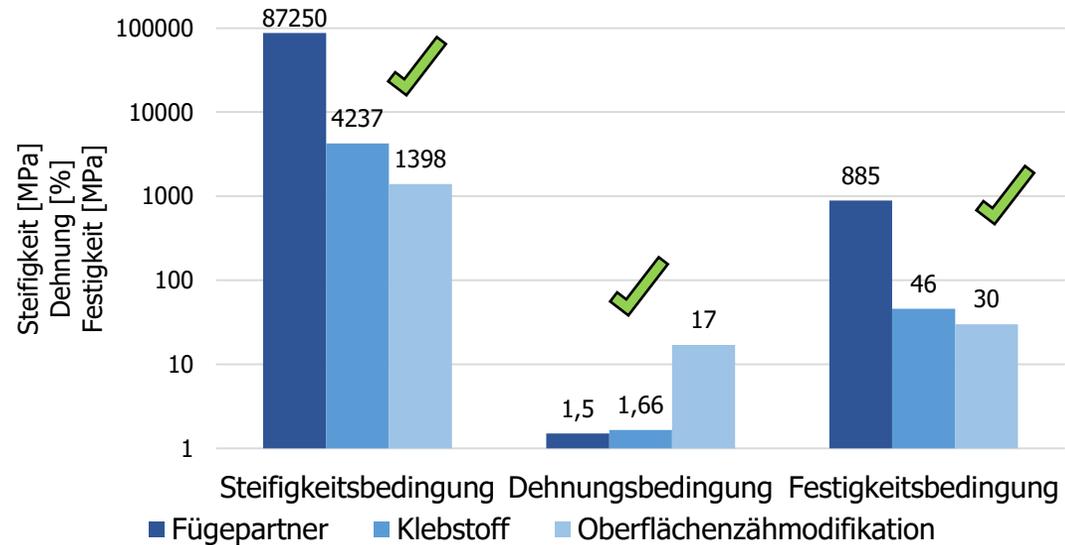


Detailuntersuchung FEM T. Gesell [1]

Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

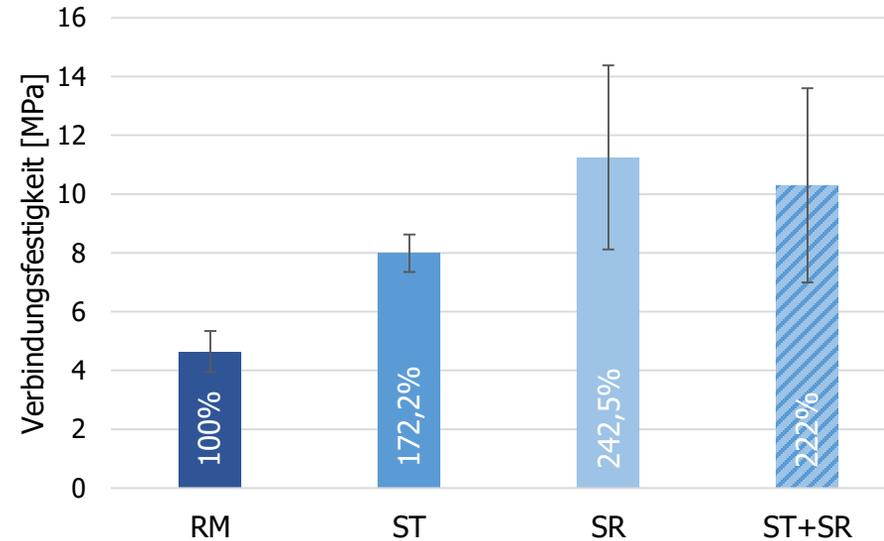
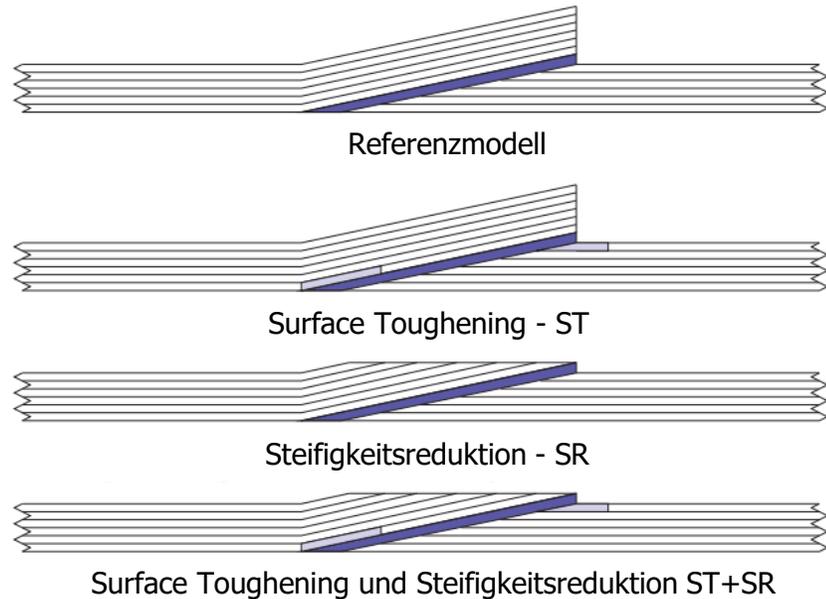
- Materialkombination prüfen

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



Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

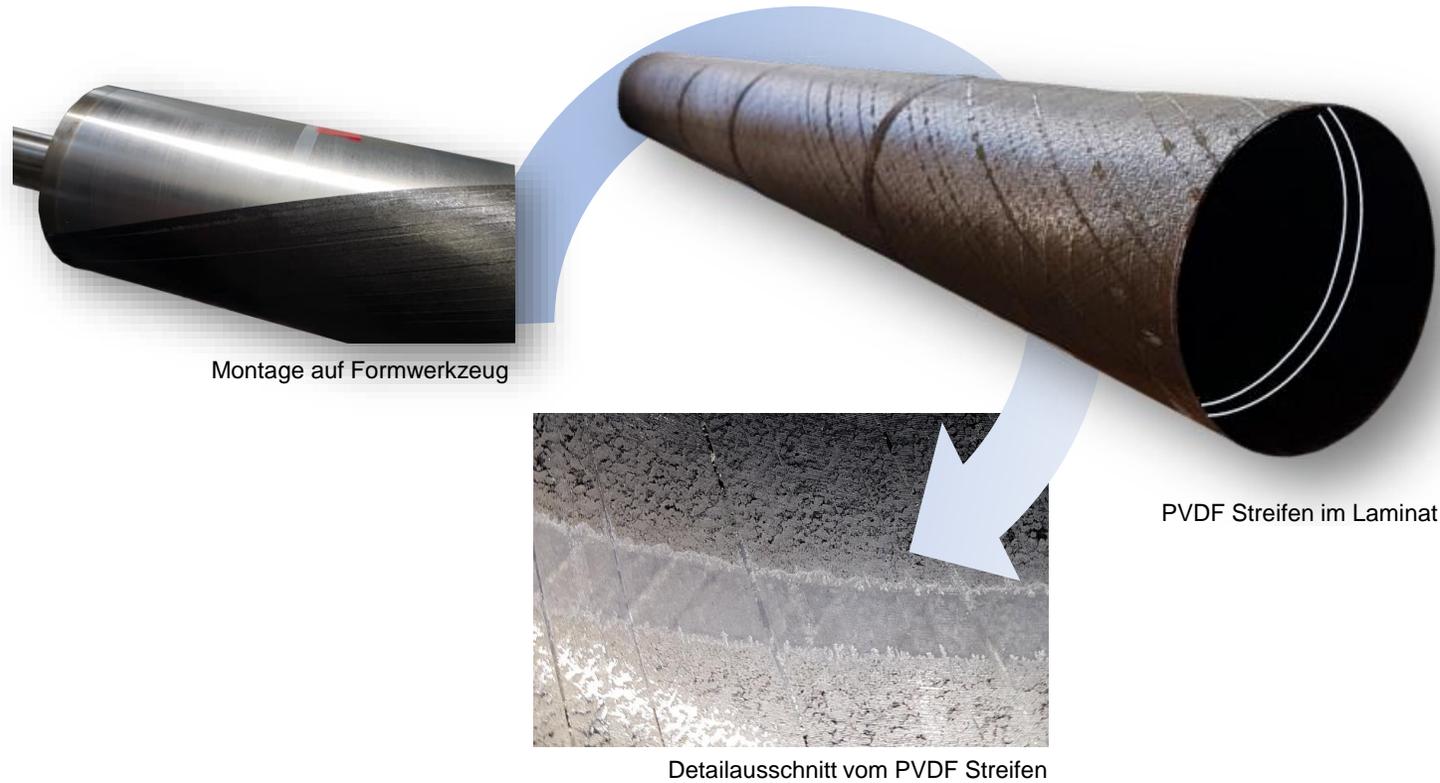
- Experimenteller Nachweis mittels Couponproben



Masterarbeit F. Kreisig [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

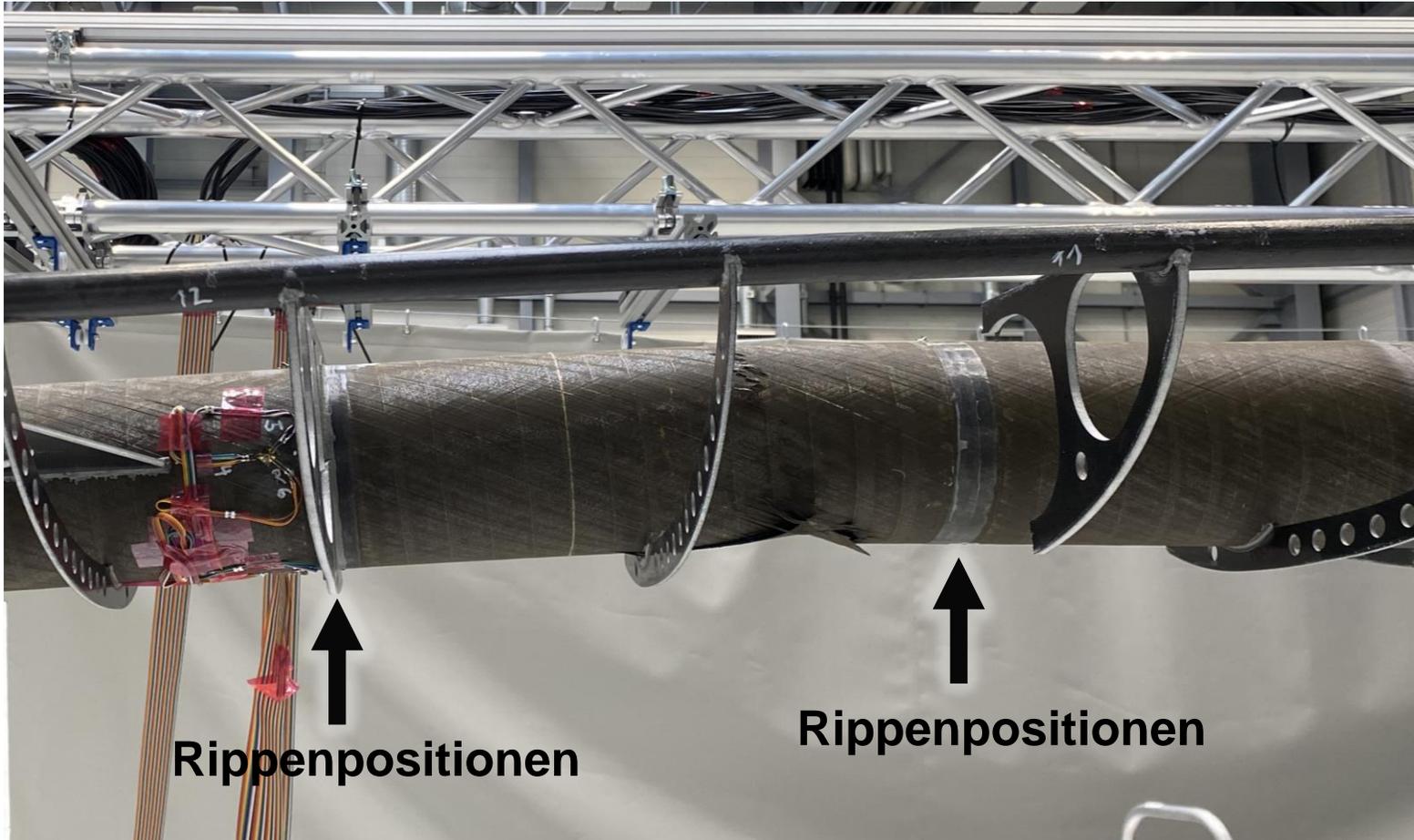
- Laminatbruch auf Grund von Stabilitätsversagen im Holm



Holmbruch außerhalb der Klebverbindung

Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

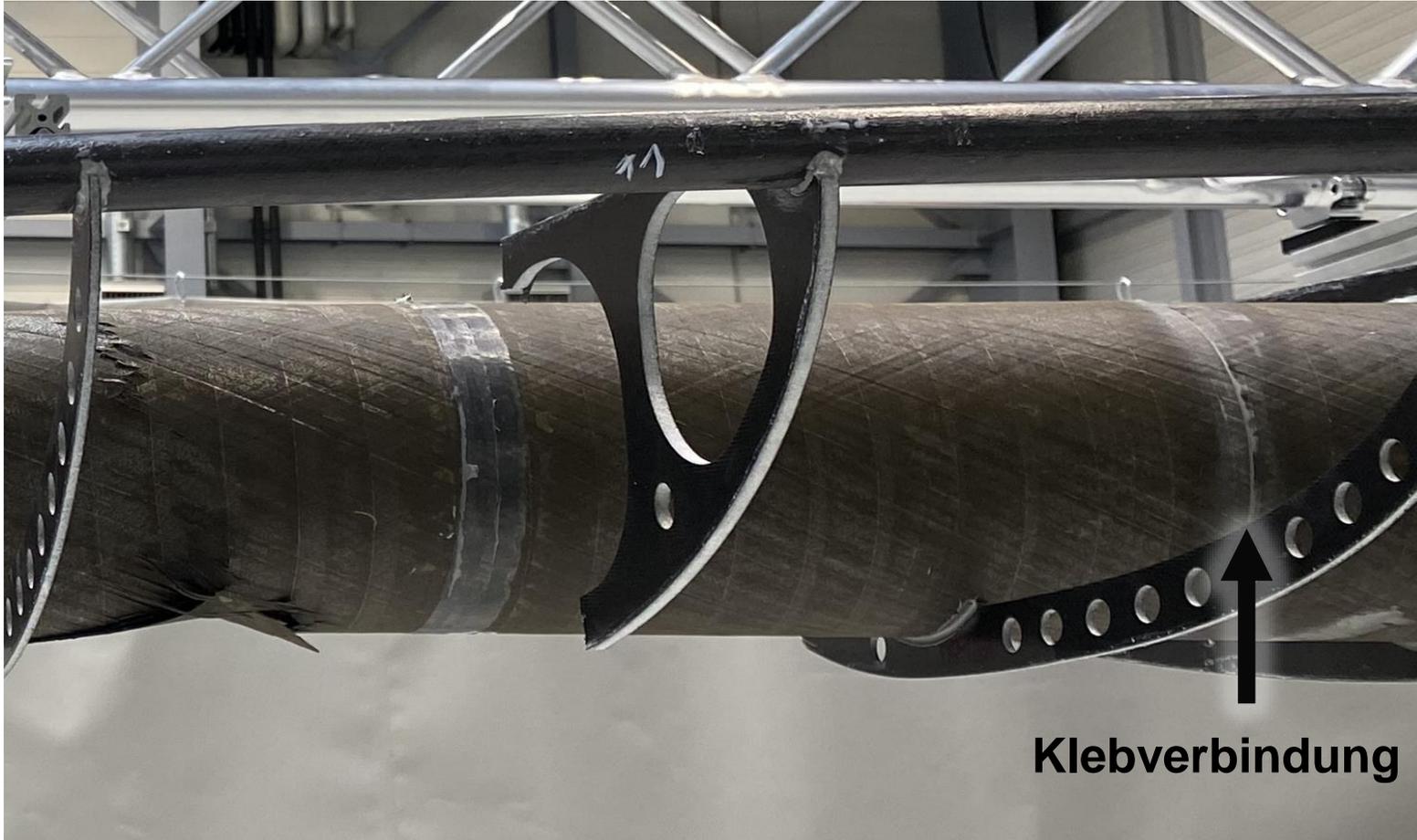
- Laminatbruch auf Grund von Stabilitätsversagen im Holm



Holmbruch außerhalb der Klebverbindung

Anwendung der lokalen Oberflächenzähmodifikation am Beispiel DLR HAP

- Laminatbruch auf Grund von Stabilitätsversagen im Holm



Holmbruch außerhalb der Kleilverbindung

Zusammenfassung

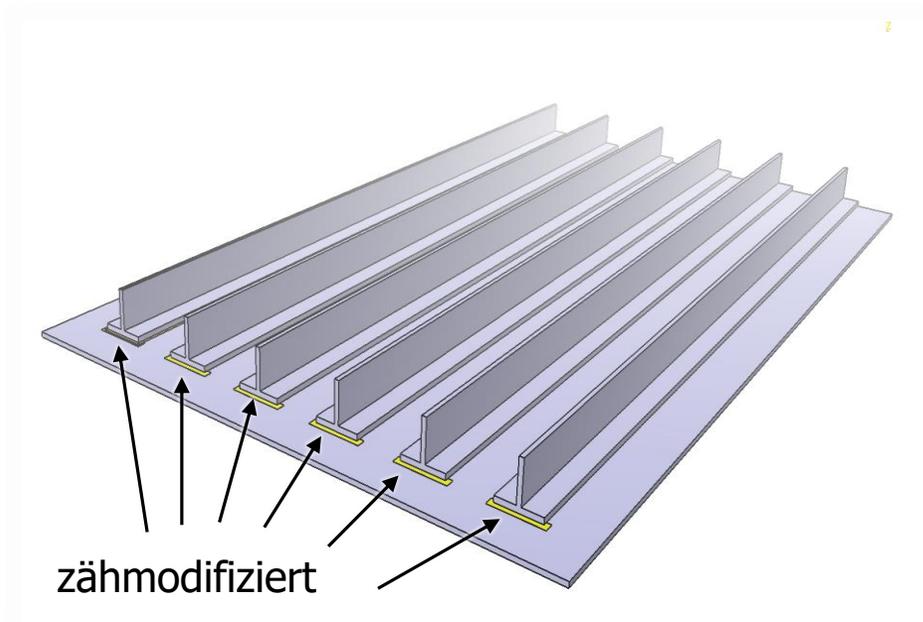
Die lokale Oberflächenzähmodifikation...

- ...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!

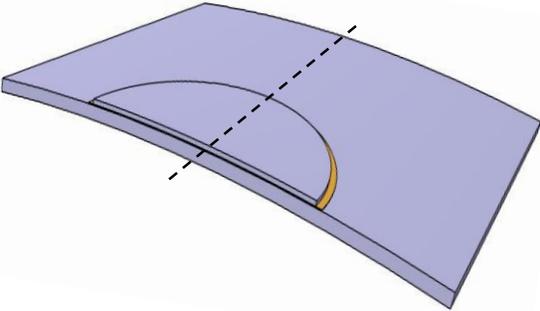
Ausblick – Weitere Anwendungsbeispiele

Reduktion des Fertigungsaufwandes bei Stringerausläufen von versteiften Hautfeldern

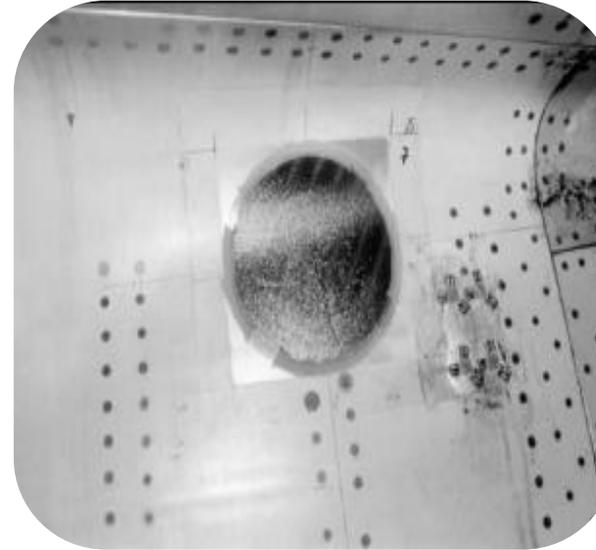


Ausblick – Weitere Anwendungsbeispiele

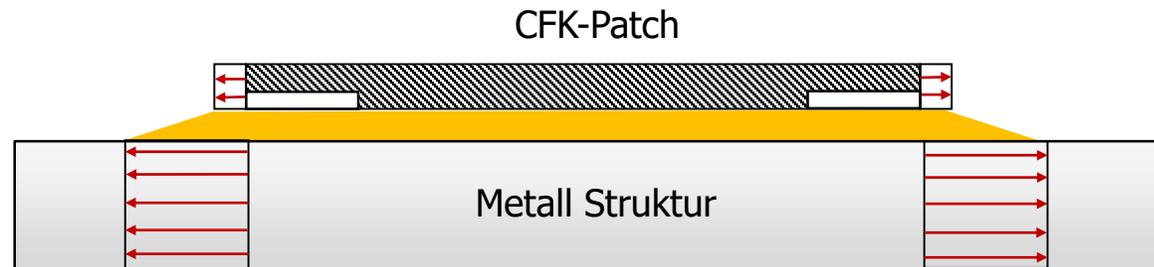
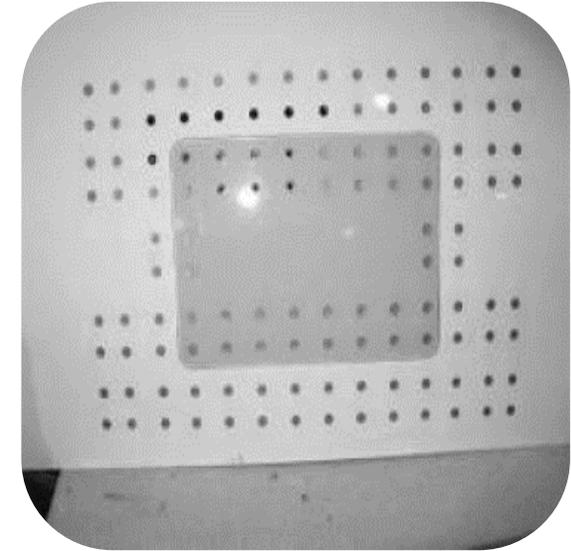
Vereinfachung von strukturellen Reparaturen an Flugzeughäuten durch zähmodifizierte CFK-Patches



geklebt

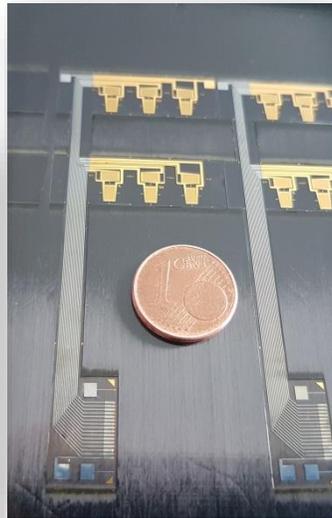
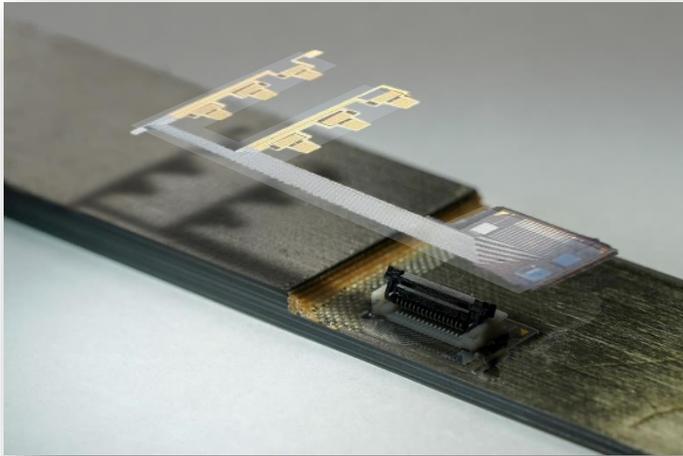


gebolzt



Ausblick – Weitere Anwendungsbeispiele

Sensierung von Rissstoppfern zur Rissüberwachung



Sensorintegration in Laminat



Landeklappendemonstrator mit sensierter Klebung



Belastungsmessung im Klebstoff



Literaturquellen

- [1] Steffen Niemann, Thomas Gesell, Martin Schollerer, Sarah Froese, Dirk Röstermundt, and Michael Hanke, **ADHESIVELY BONDED JOINTS OF THE PRIMARY STRUCTURE WITHIN THE HAP PROJECT: 2021.**
- [2] F. Kreißig and S. Niemann, “Untersuchung des Einflusses von Surface Toughening auf die Verbindungsfestigkeit einer Holm-Holm-Verklebung,” TU Braunschweig, 2022.

Surface Toughening

**Kleiner Streifen,
große Wirkung!**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!