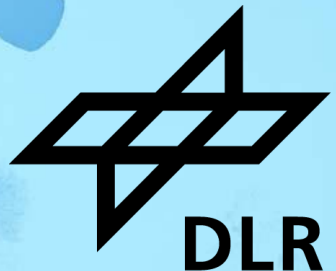


ANWENDUNG VON AD-PLASMA BEI LOKAL OBERFLÄCHENZÄHMODIFIZIERTEN KLEBVERBINDUNGEN FÜR DIE LUFTFAHRT

47. ak-adp Workshop 13.11.2024, Jena

Dr. Martin Schollerer, Prof. Dr. Christian Hühne, Institut für Systemleichtbau, DLR e.V.

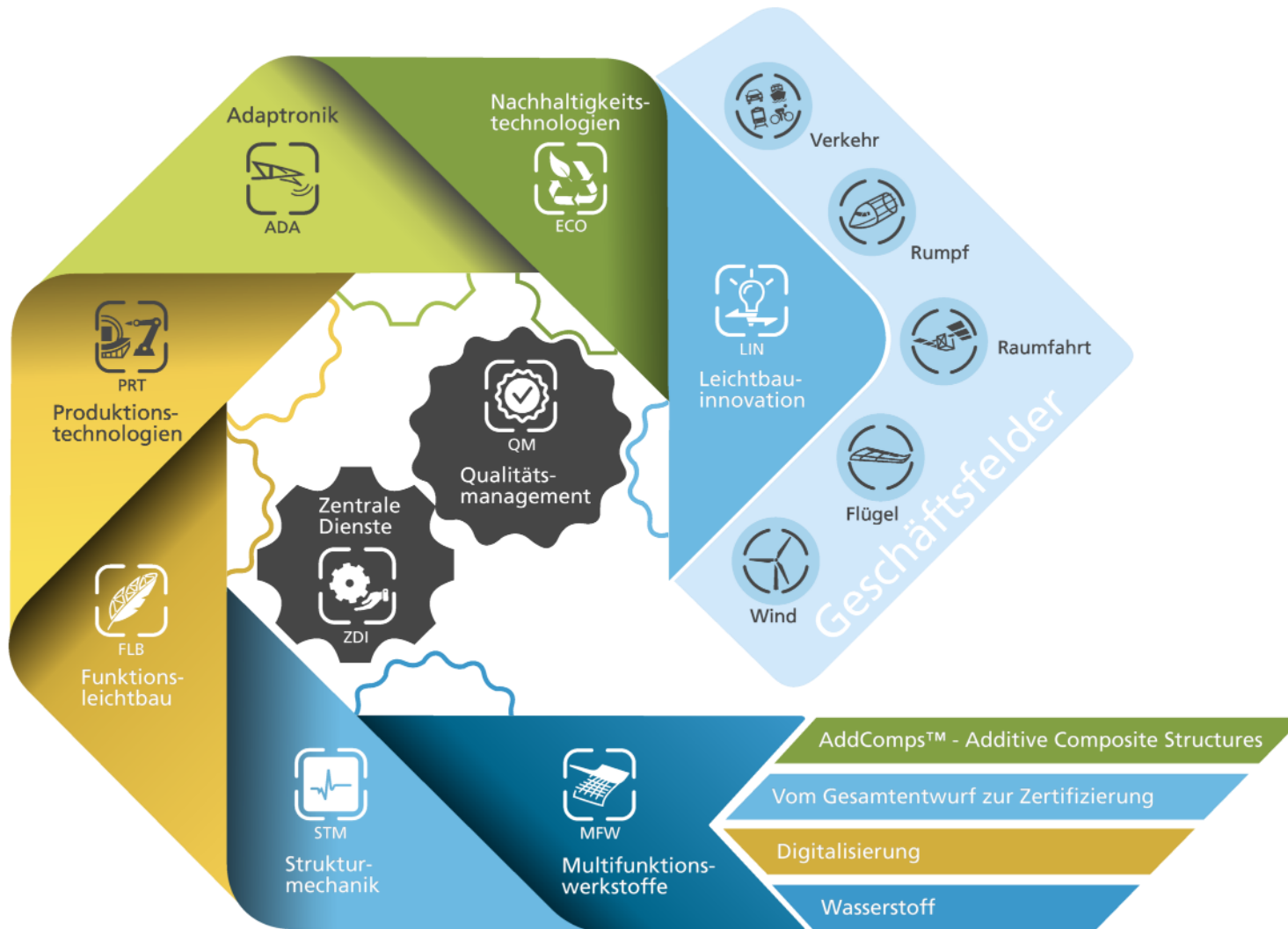


Standorte des DLR



- 54 Institute und Einrichtungen an 30 Standorten
- 4 Auslandsbüros
- 8 Forschungsstationen
- Mehr als 10.000 Mitarbeitende





7 Wissenschaftliche Forschungsbereiche

- Komplette Prozesskette für den Systemleichtbau der Zukunft
- 180 Mitarbeiter in Braunschweig, Stade, Bremen, Aachen, Cochstedt

Qualitätsmanagement – zertifiziert nach:

- ISO 9001
- Testlabore DIN ISO 17025 und Nadcap



Zentrale Dienste

- Administrative Dienstleistungen für das Institut

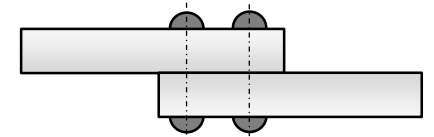
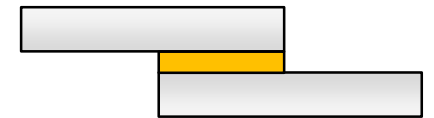
Agenda

- Einleitung
- Klebungen in der Luftfahrt
- Lokale Oberflächenzähmodifikation
- Oberflächenvorbehandlungsverfahren
- Festigkeitsuntersuchungen
- Fazit



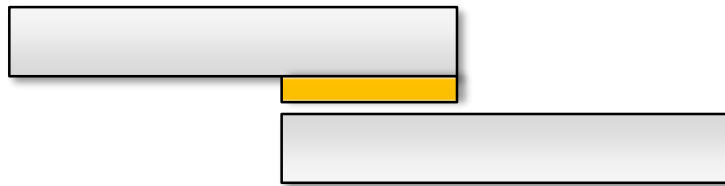
Kleberbindung vs. Bolzenverbindung

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

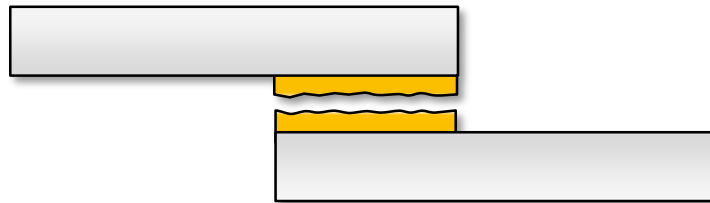


Brucharten von Klebverbindungen

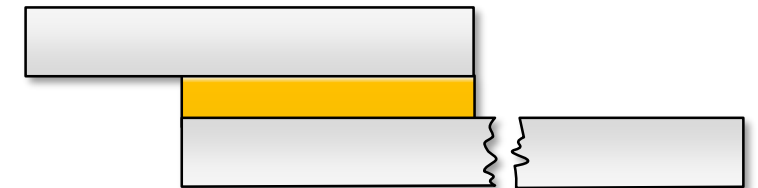
Adhäsionsbruch



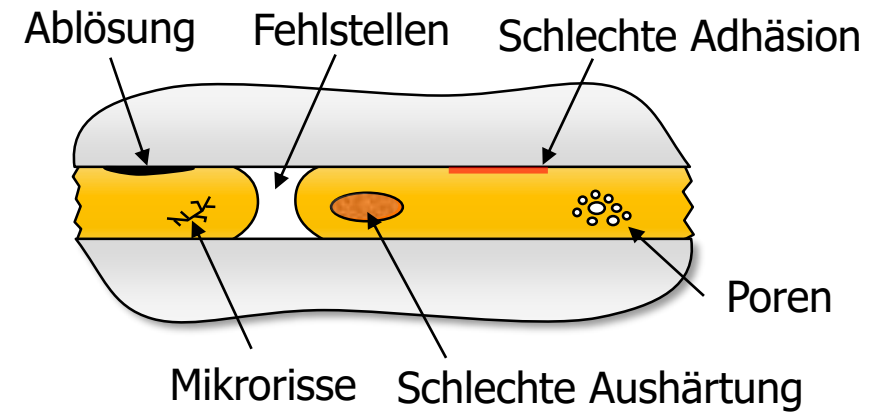
Kohäsionsbruch



Fügeteilbruch



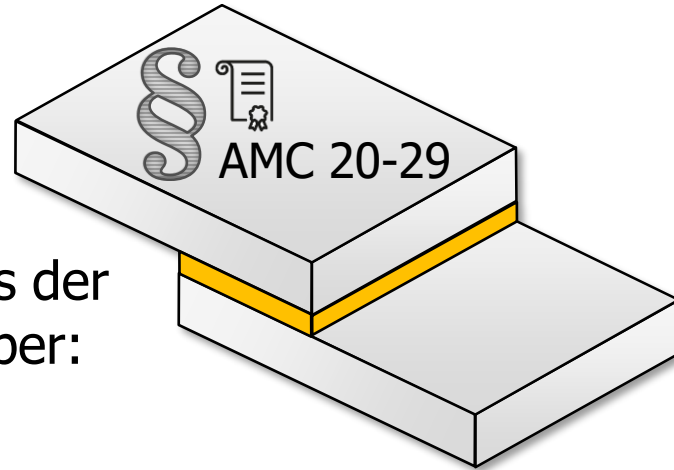
Ursachen für eine schlechte Klebverbindung



Zulassungsvorschriften für strukturelle Klebverbindungen in der Luftfahrt

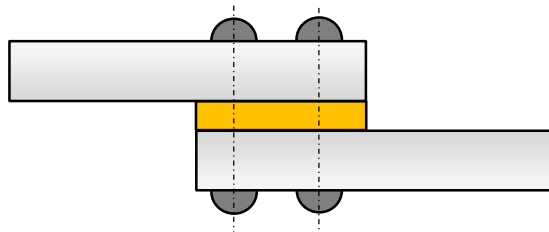
AMC = Zulässige Maßnahmen zur Einhaltung der Vorschriften

Festigkeitsnachweis der Klebverbindung über:



EASA Bauvorschriften CS 25

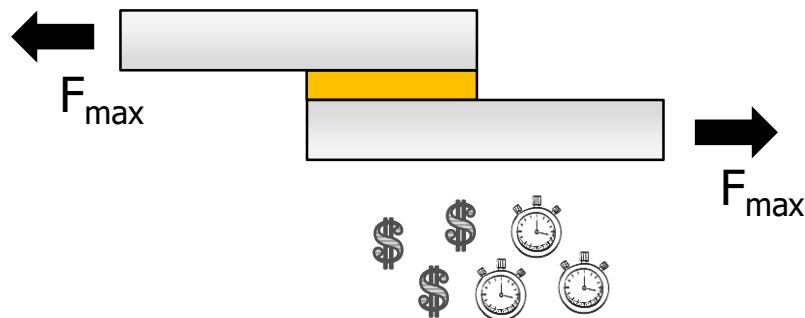
(i) Zusätzliche Designelemente



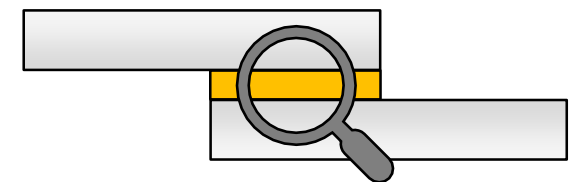
Nachteil:



(ii) Belastungsversuche



(iii) Inspektion

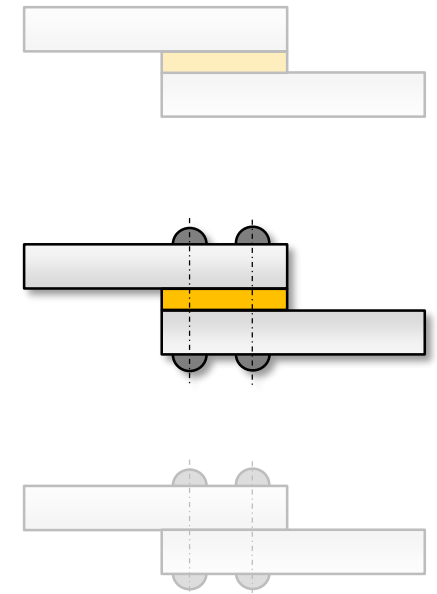


Gibt es nicht.

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

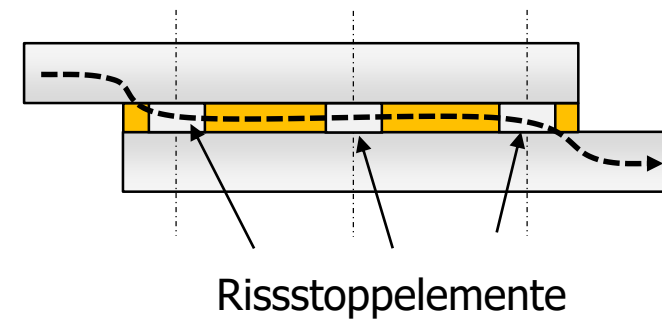
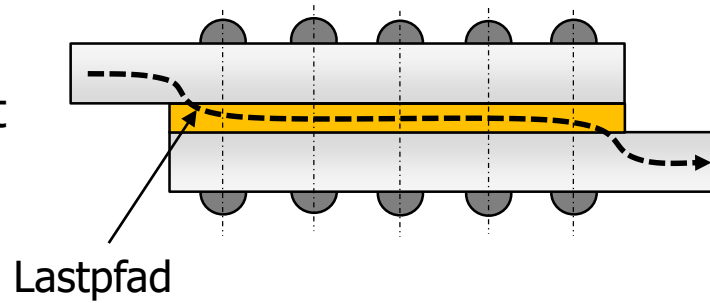


Von der gebolzten zur geklebten Verbindung

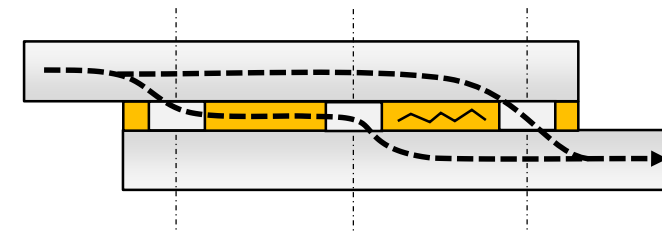
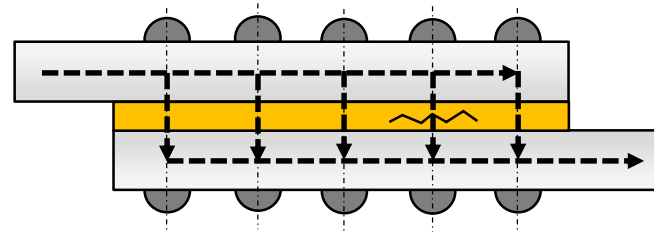
Fail Safe Design

Maximum Disbond Design

ungeschädigt



geschädigt

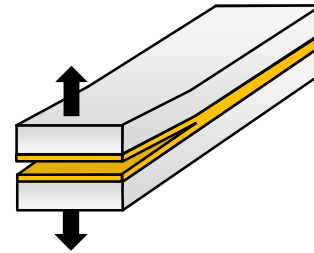


Ziel: Robuste reine Klebverbindung mit Risstoppwirkung!

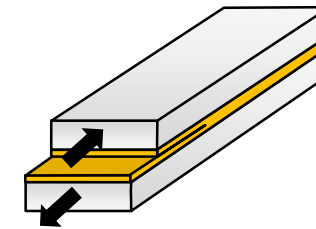
Kleverbindungen unter Belastung

Spannungskonzentrationen an Klebrändern sind versagensinitiiierend und führen zum Risswachstum

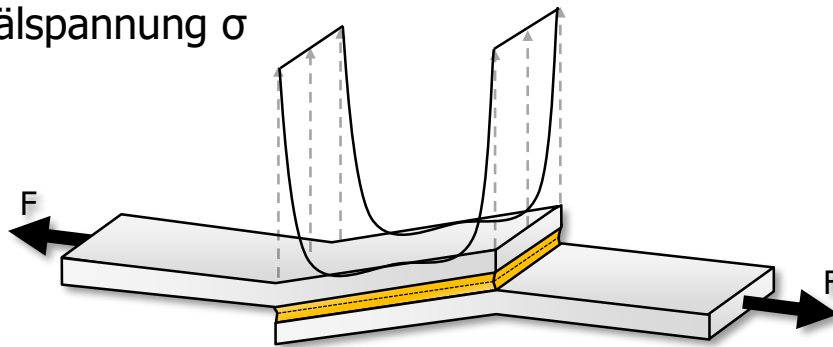
Mode I:
Schälbelastung



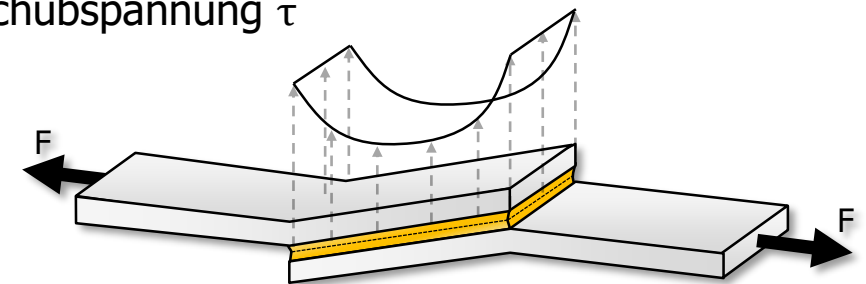
Mode II:
Schubbelastung



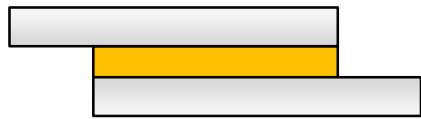
Schälspannung σ



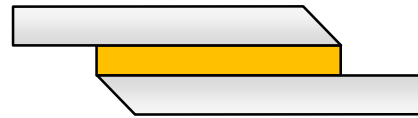
Schubspannung τ



Maßnahmen aus dem Stand der Technik zur Spannungsreduktion



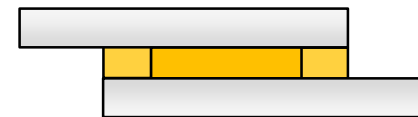
Referenz



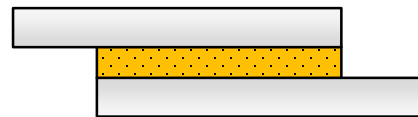
Modifikation des Fügeteils



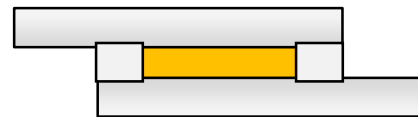
Modifikation des Klebstoffauslaufs



Klebstoffgradierung



Klebstoffmodifikation

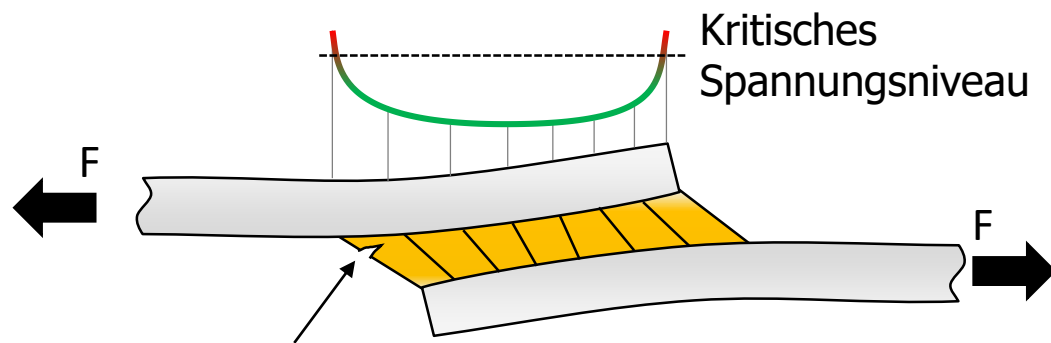


Hybrid Bondline

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

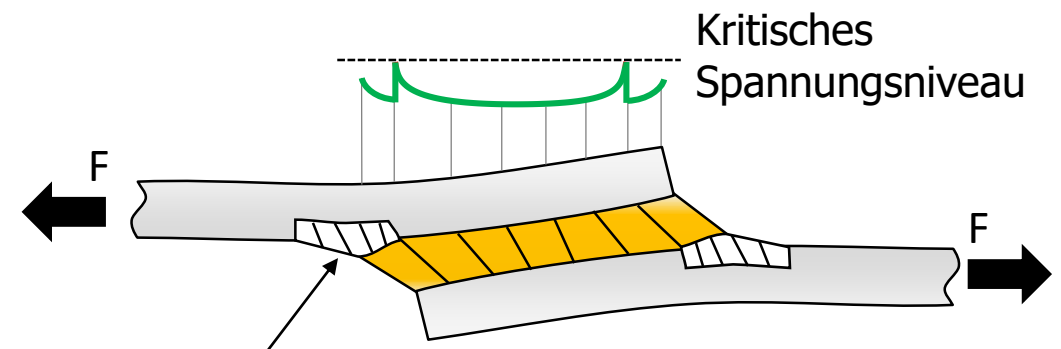
Die lokale Oberflächenzähmodifikation - Funktionsweise

Referenz



Spannungskonzentrationen
führen zu Anriss

Mit lokaler Oberflächenzähmodifikation

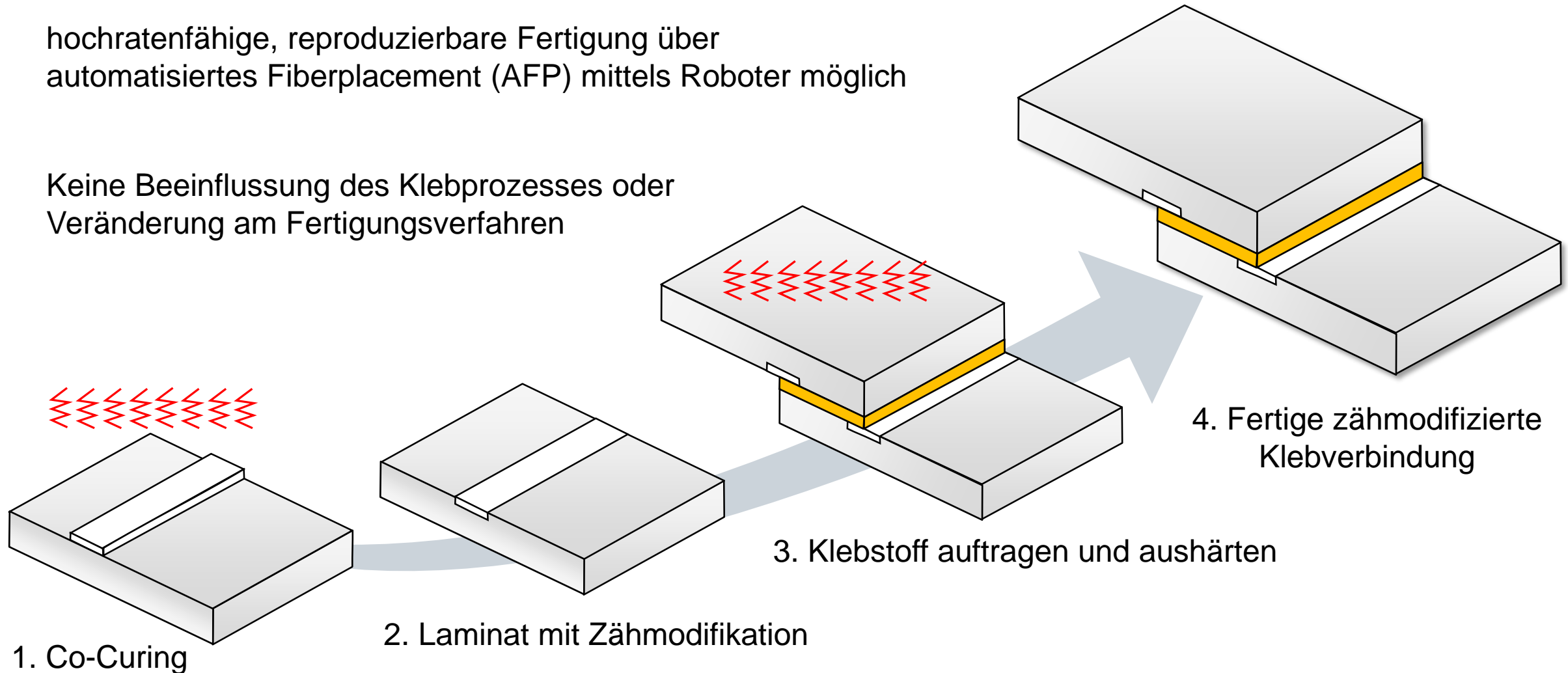


Duktileres Material nimmt
Dehnungen auf und reduziert
Spannungskonzentrationen

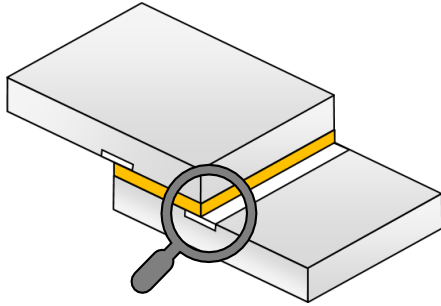
Fertigung am Beispiel des Prepregverfahrens

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

Keine Beeinflussung des Klebprozesses oder Veränderung am Fertigungsverfahren



Schliffbild und Materialien



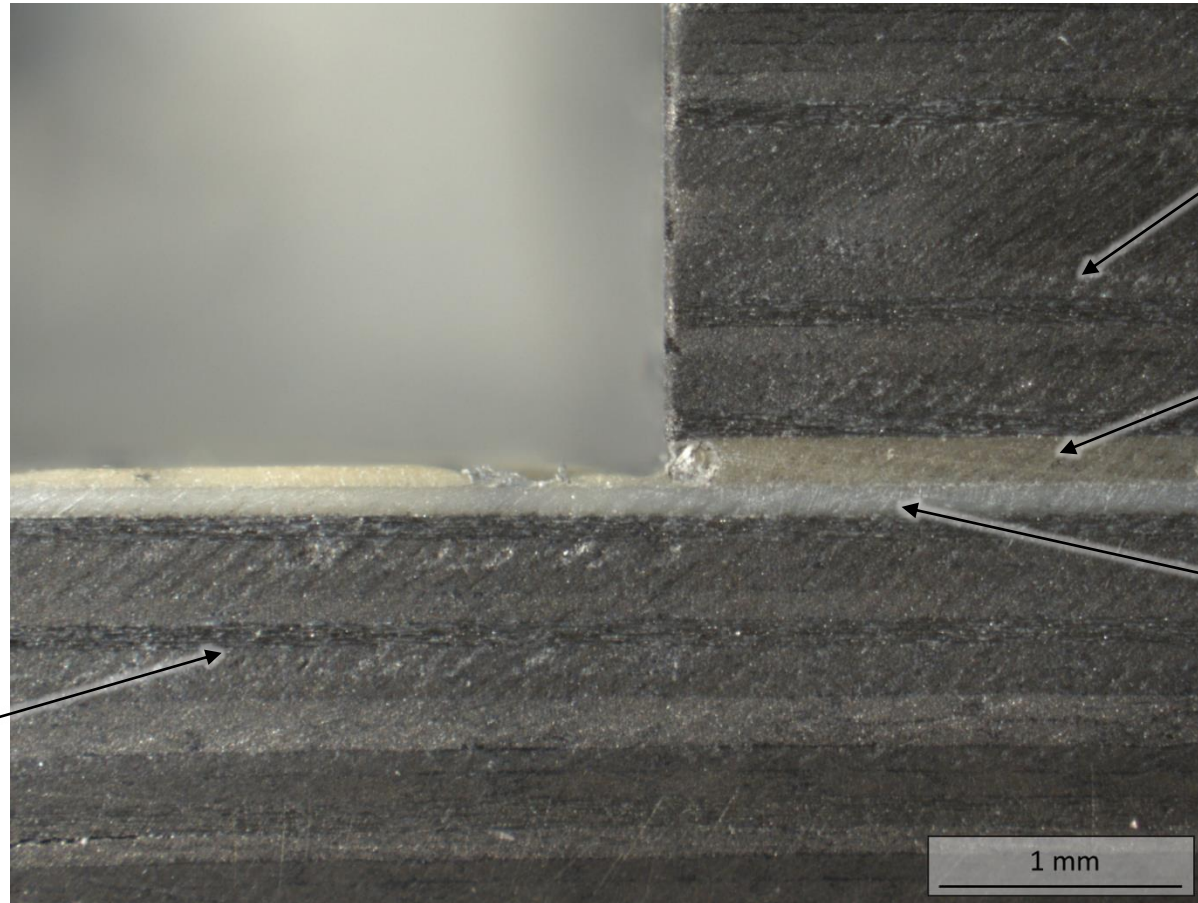
Elastizitätsmoduln:

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

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

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

Fügeteil 1
8552 IM7



Fügeteil 2
8552 IM7

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

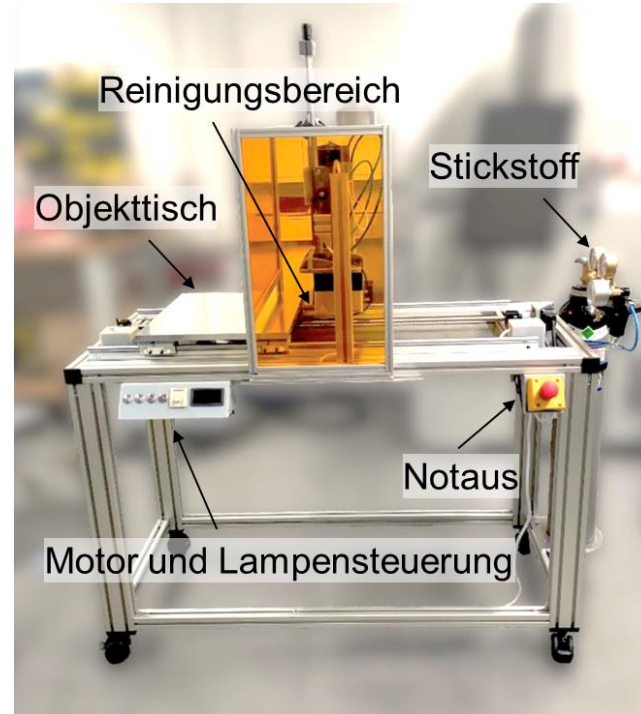
ST-Material
PVDF
 $t_{\text{ST}} \sim 0,1 \text{ mm}$

1 mm

Oberflächenvorbehandlung



Laser-Anlage



VUV-Anlage



AD-Plasma

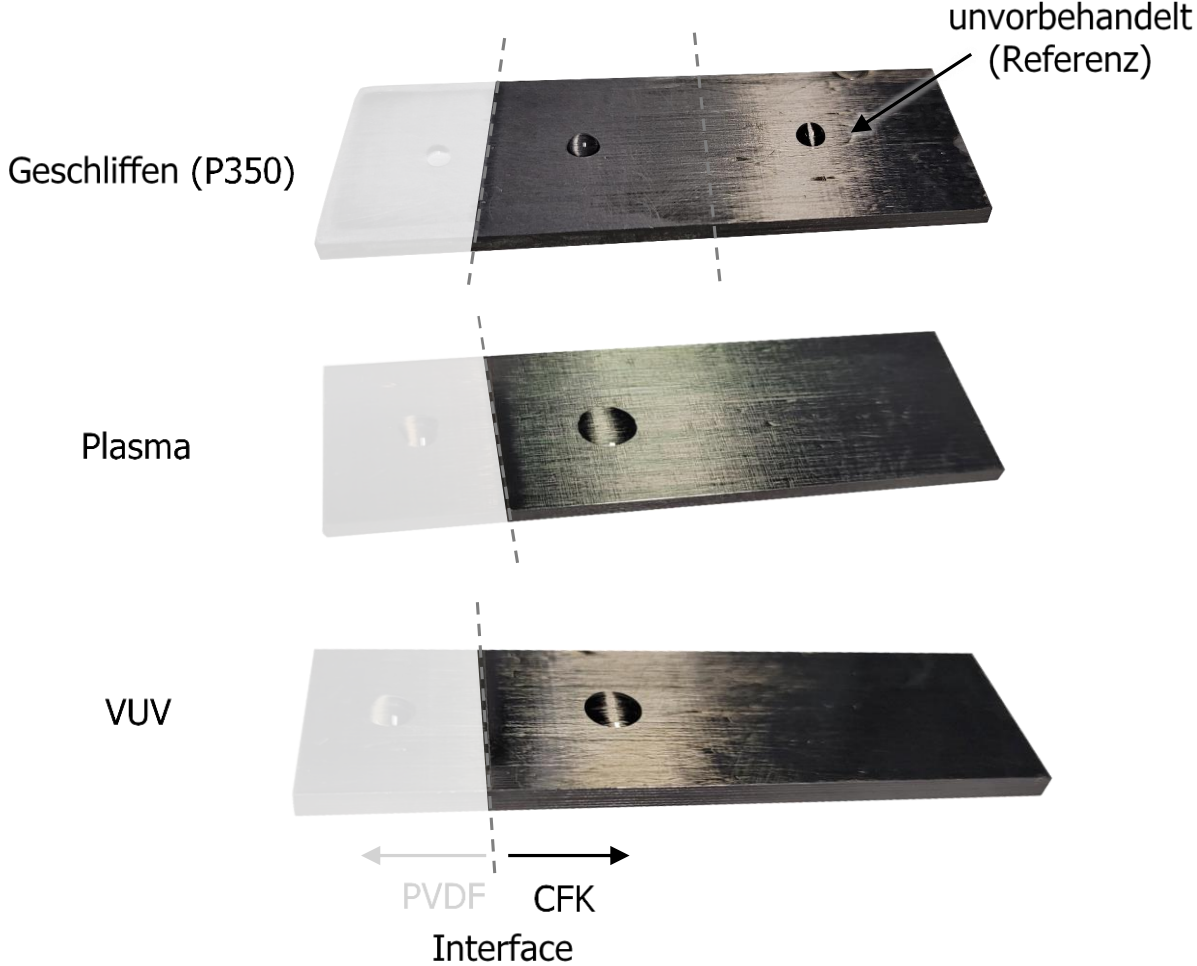
Quantifizierung

1. Referenz
2. Schleifen P350
3. AD-Plasma
4. VUV

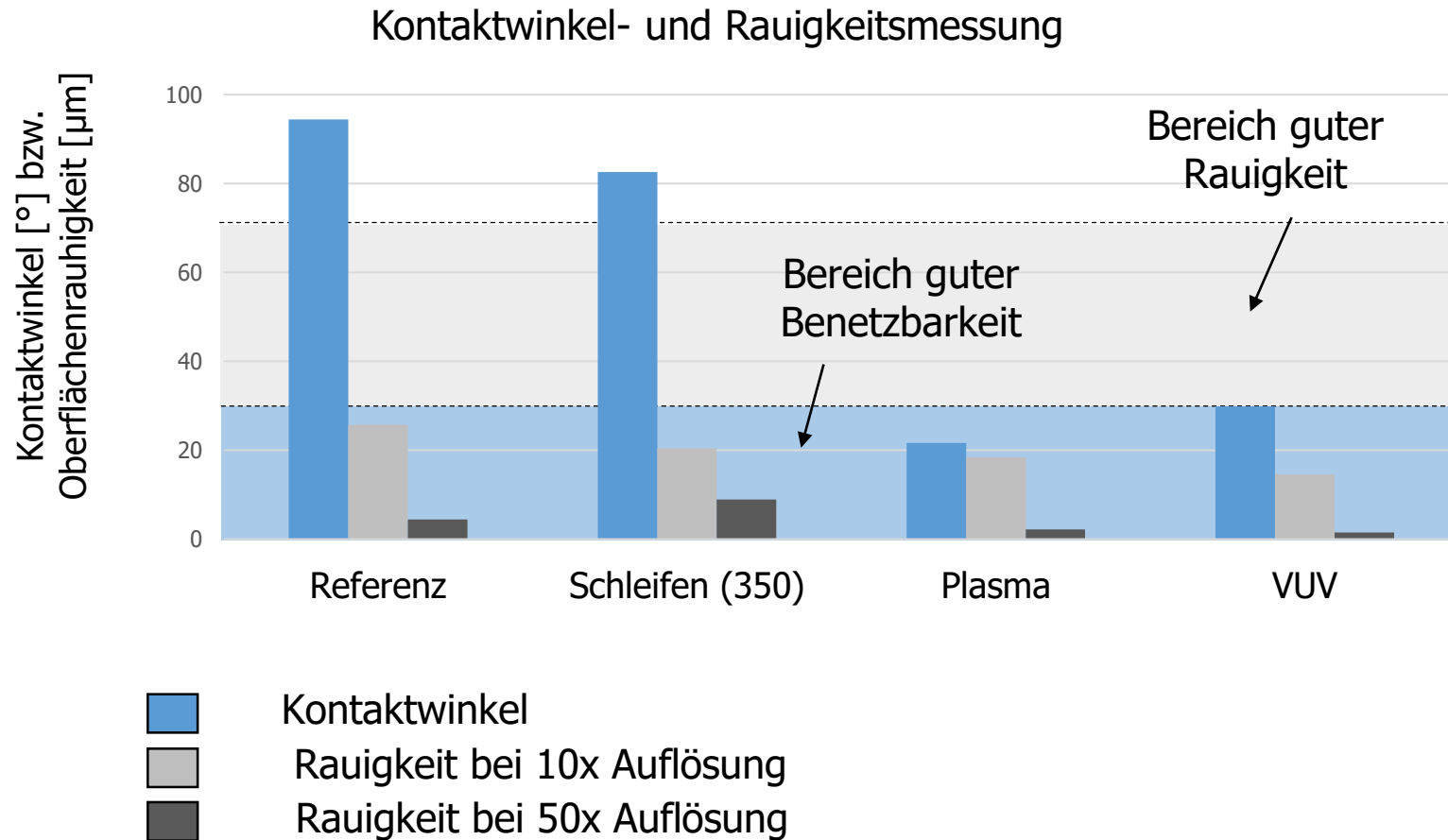
AD-Plasma	
Parameter	Einheit
Frequenz	23kHz
Spannung	280V
Düsen Geschwindigkeit	100 mm/s
Durchflussmenge	2670l/h
Düsenkopf	PTF 2645-2
Düsenabstand	15 mm
Zeilenabstand	3 mm

VUV	
Parameter	
Lampe	ExciJet 55-130
Leistungsabgabe der Lampe	20mJ/cm ²
Spannung	24V
Bestrahlungsenergie	540mJ/cm ²
Abstand zur Lampe	0,5 mm

Quantifizierung CFK

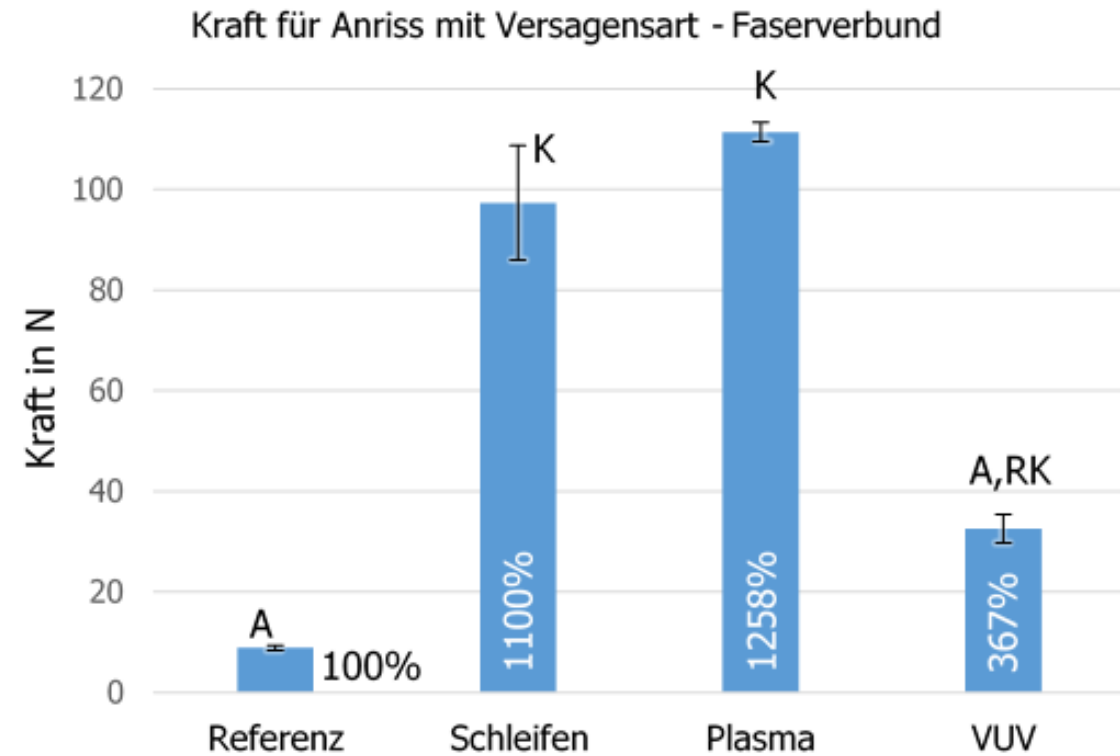
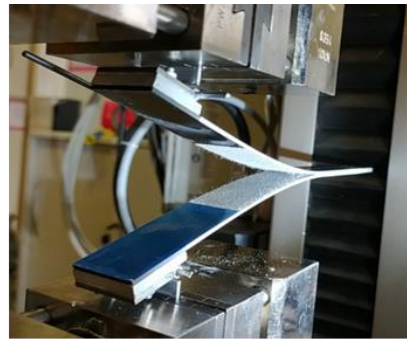
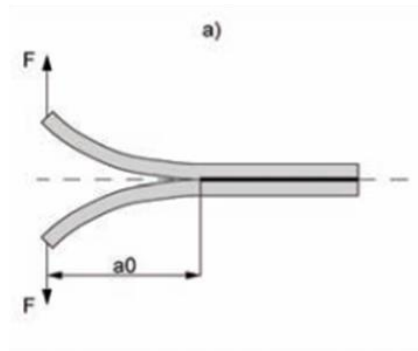


Quantifizierung CFK – Kontaktwinkel / Rauigkeit

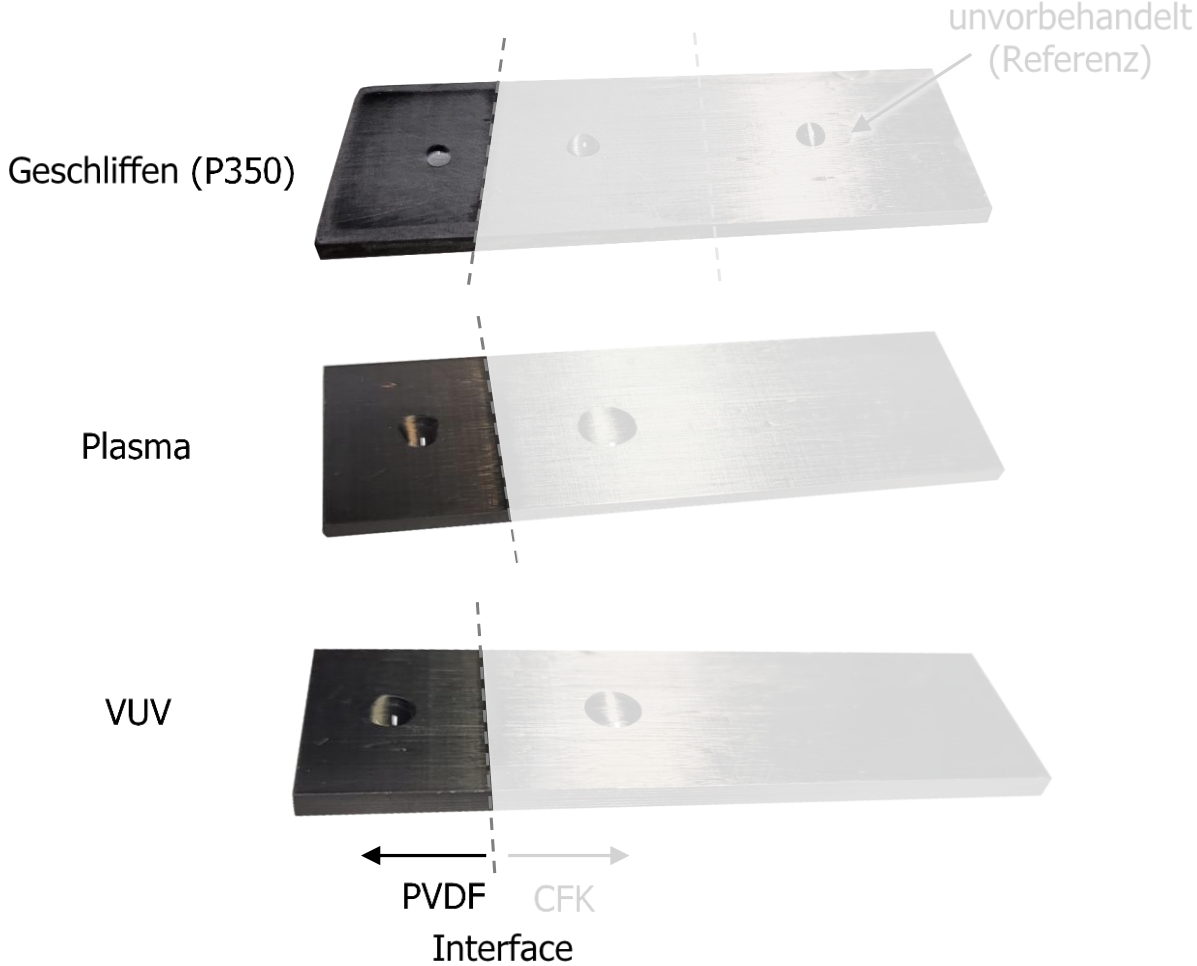


Quantifizierung CFK – Verbindungsfestigkeit DCB

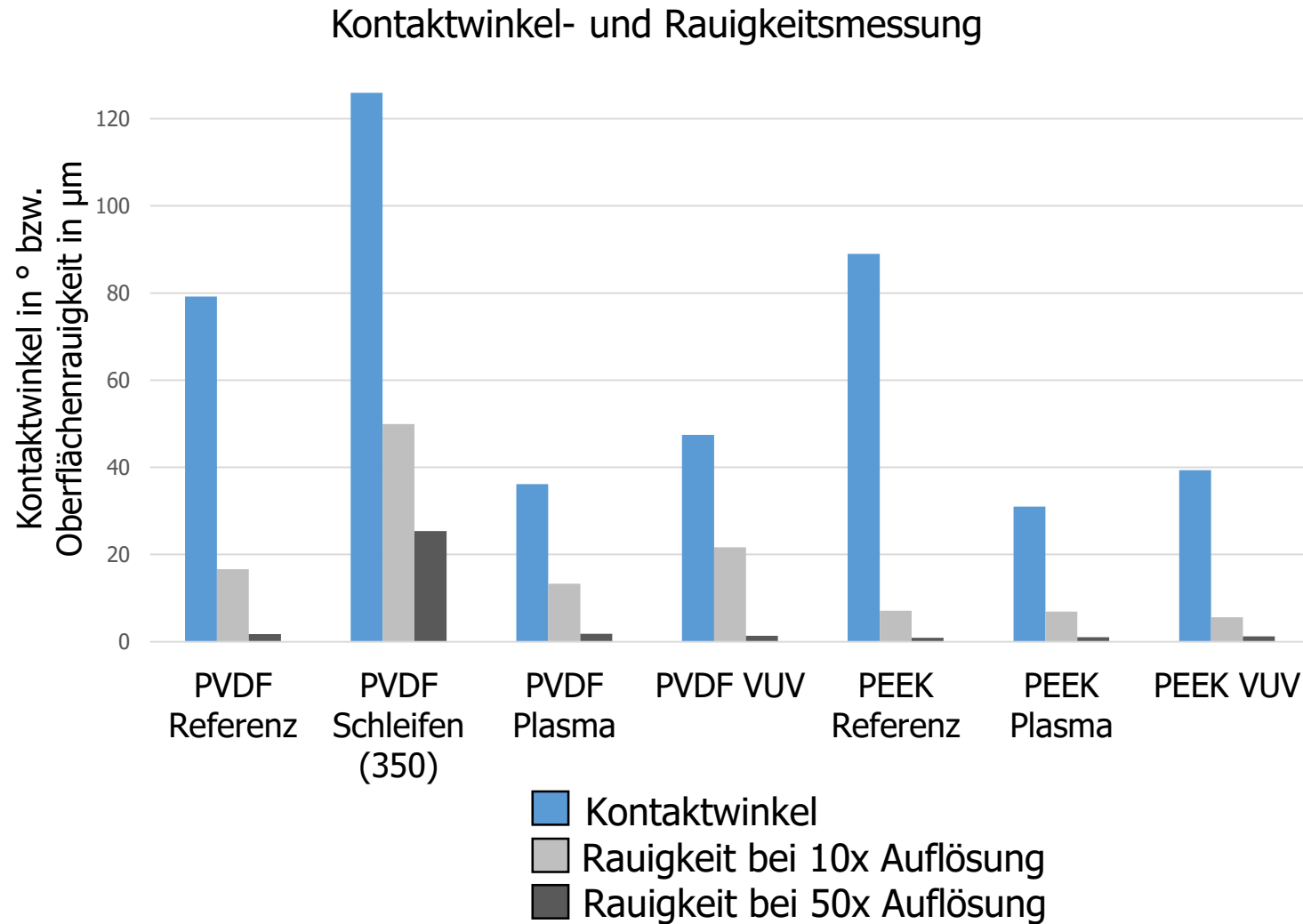
- DCB Probe nach ASTM D 5528
- Klebstoff Henkel EA9695 NW



Quantifizierung Thermoplast (PVDF und PEEK)

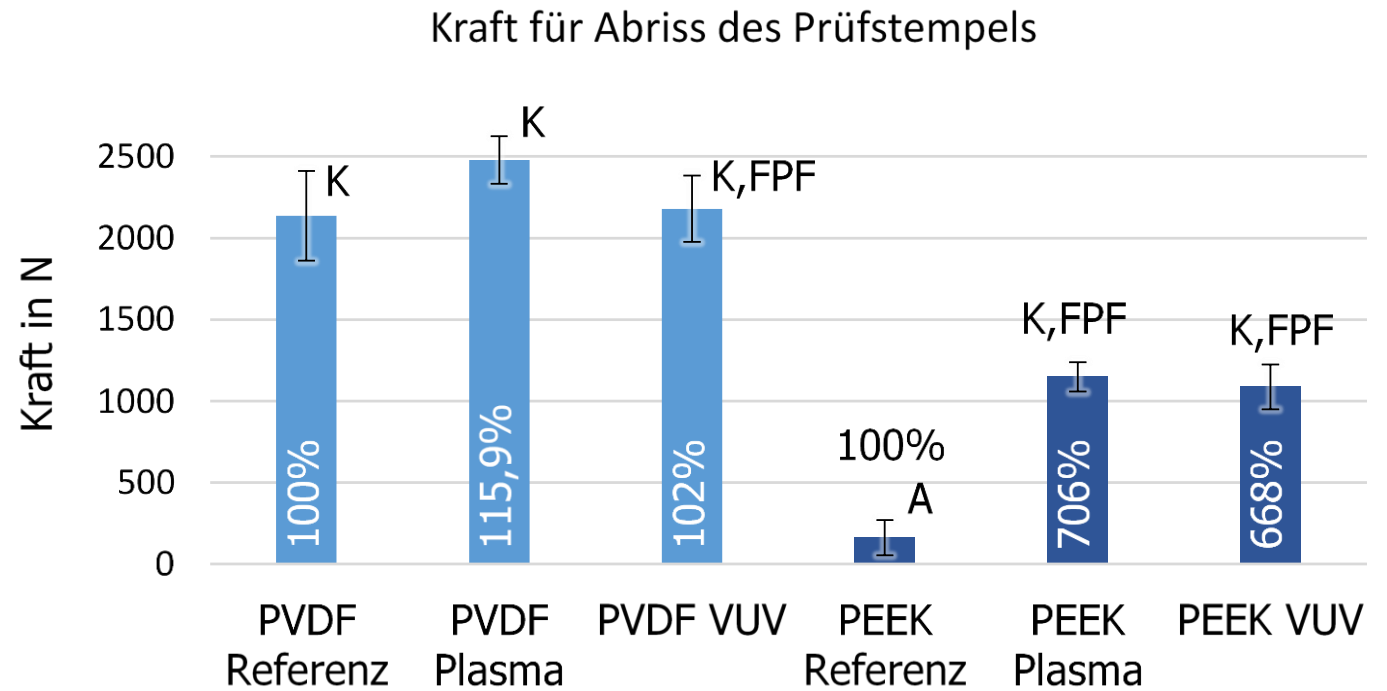
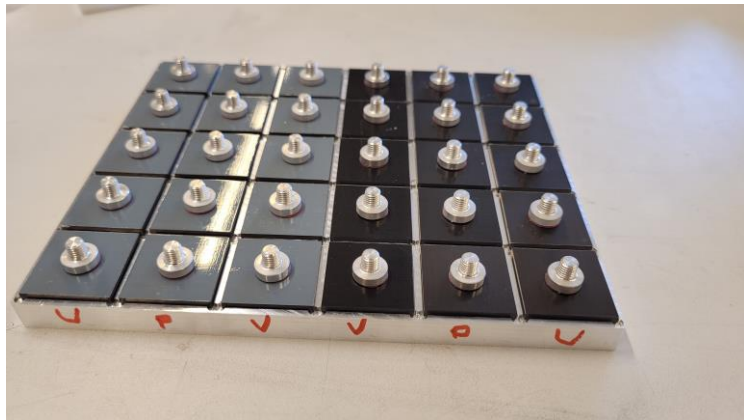


Quantifizierung Thermoplast – Kontaktwinkel / Rauigkeit



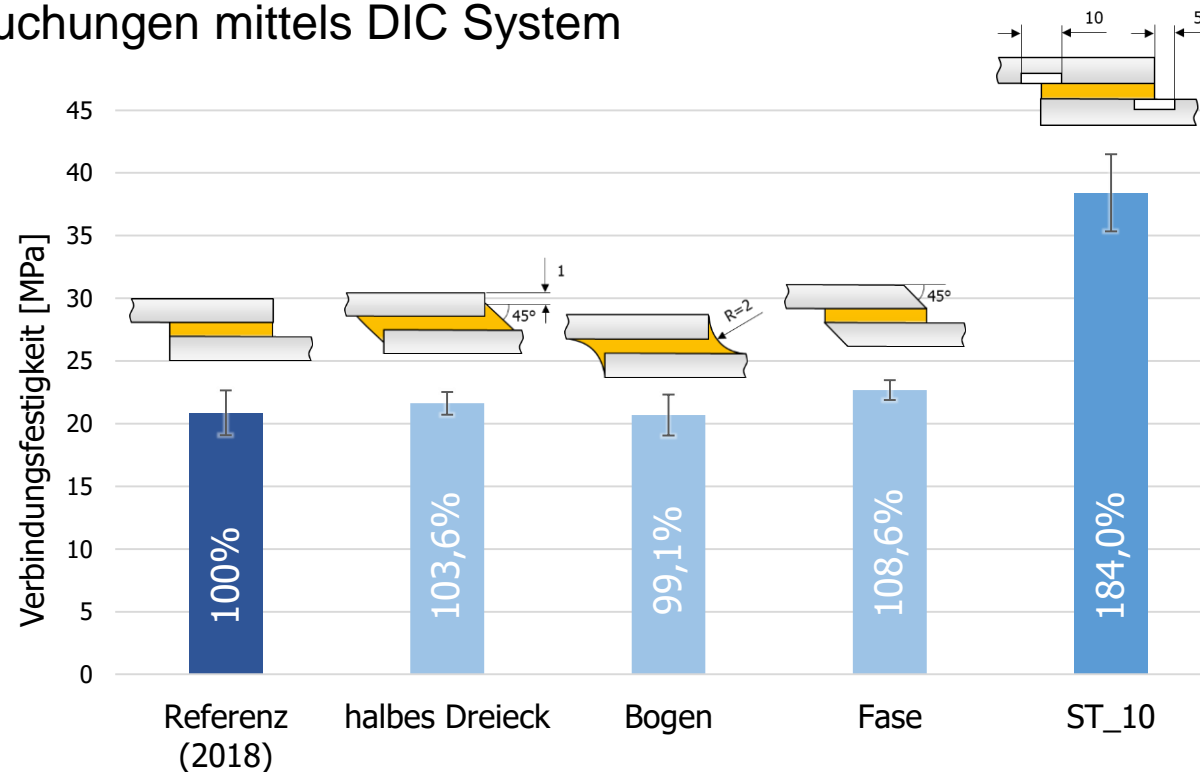
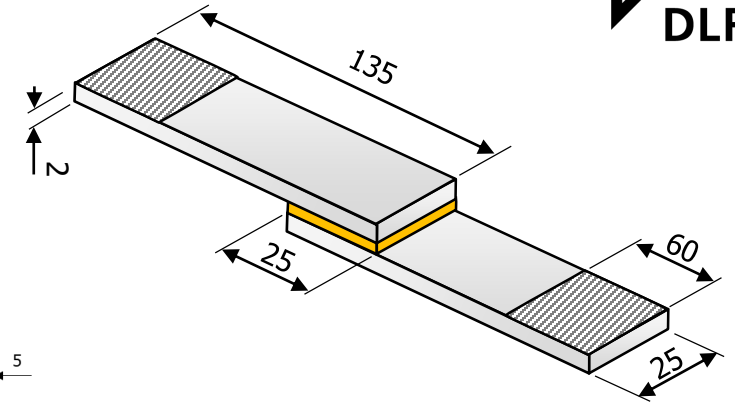
Quantifizierung Thermoplast – Verbindungsfestigkeit KZP

- Kopfzugproben (KZP)
- Geprüft in Lumifrac Prüfzentrifuge

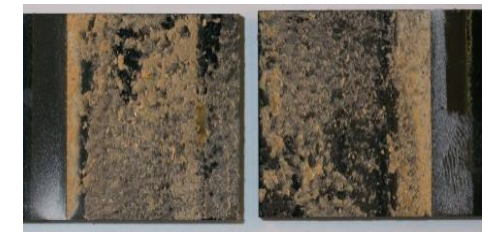


Festigkeitssteigerung bei SLS

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



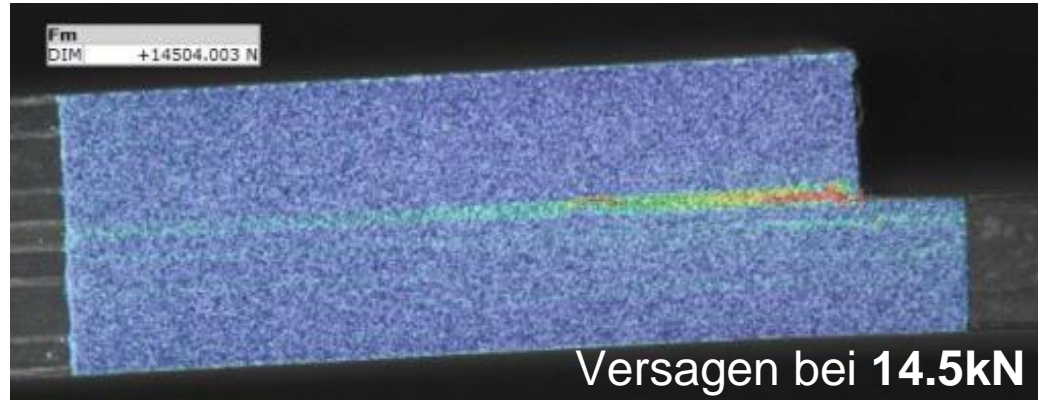
Referenz



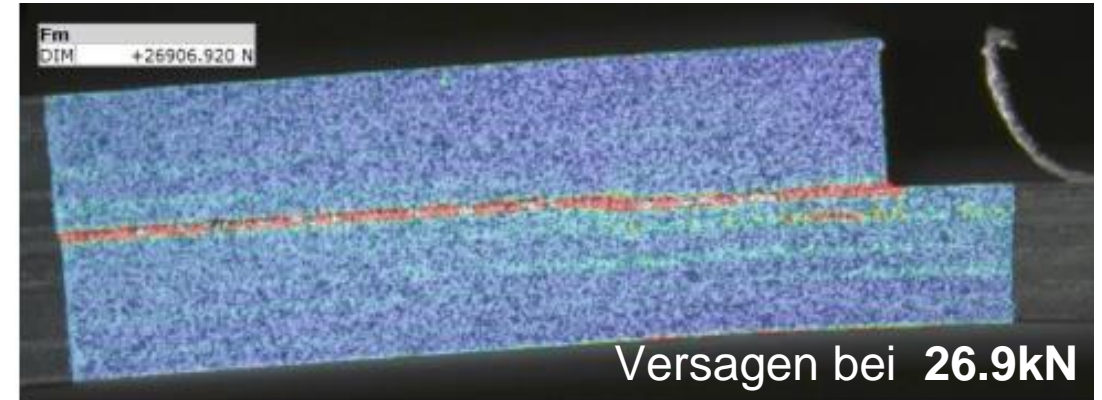
ST_10

Festigkeitssteigerung bei SLS - Res DIC

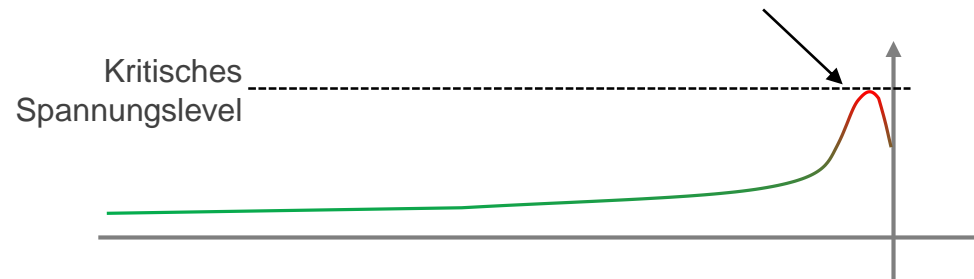
Referenz



mit Oberflächenzähmodifikation

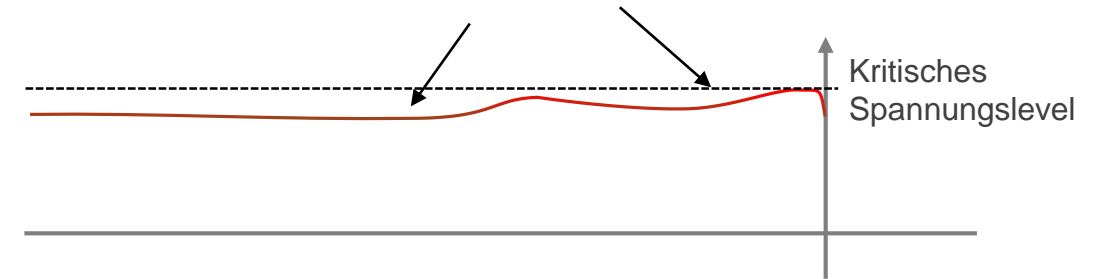


Spannungskonzentrationen

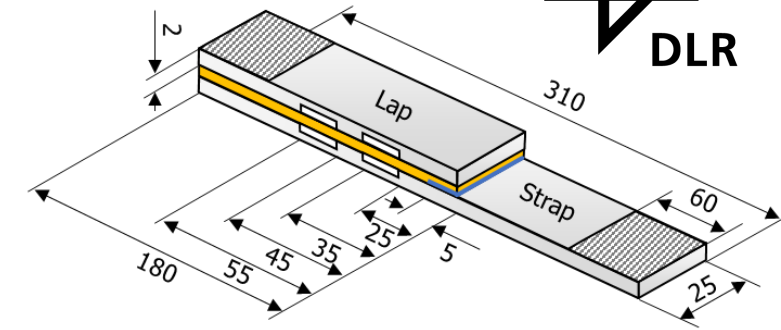


Lastumlagerung nachgewiesen!

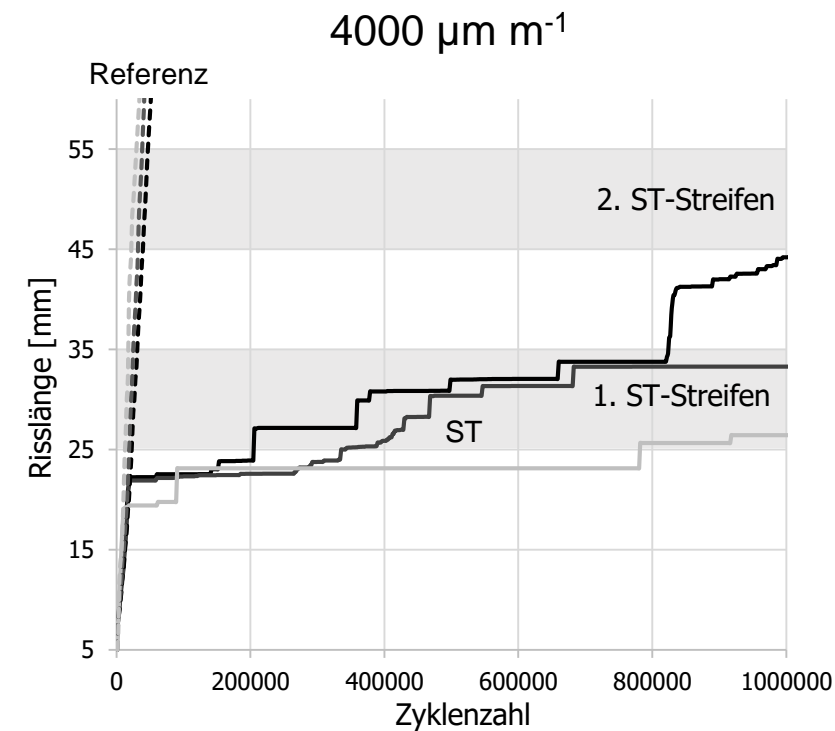
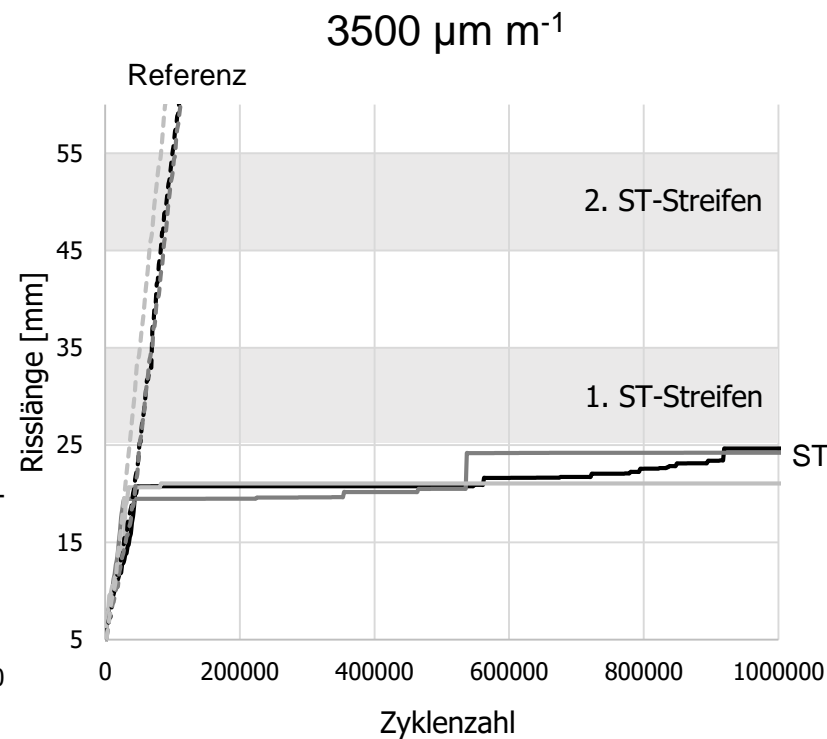
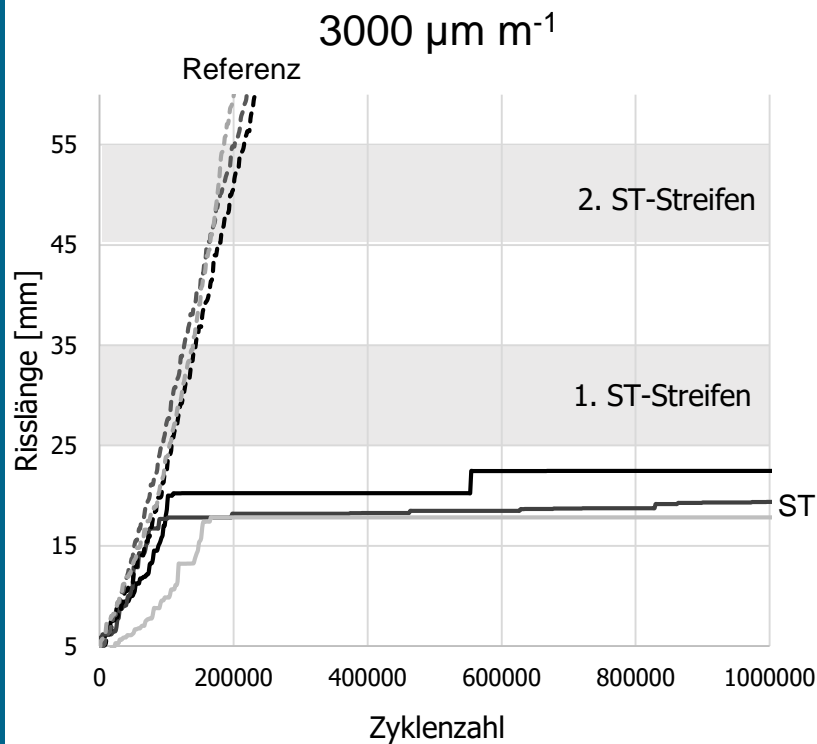
ST homogenisiert den Spannungsverlauf



Ermüdungsfestigkeitssteigerung CLS

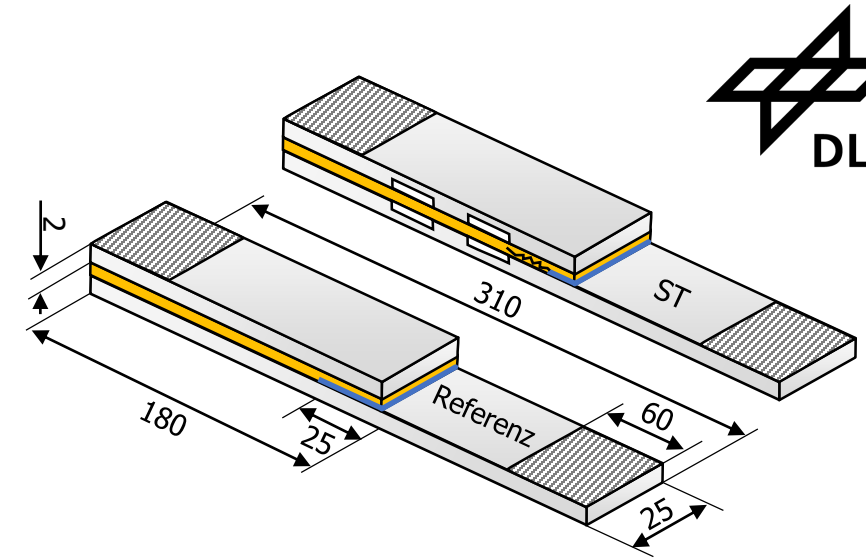
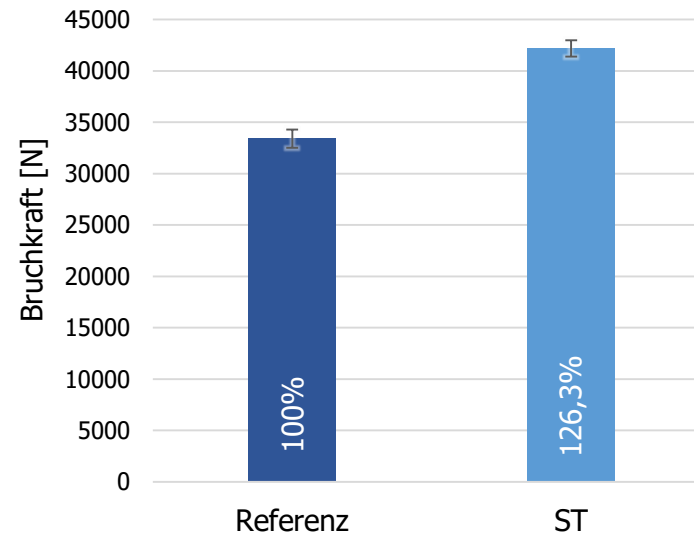


sicherer Rissstopp bis $3000 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$ Betriebslast
 sicherer Rissstopp bis $3500 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$ 117% der Betriebslast
 verlangsamter Rissstopp bis $4000 \mu\text{m m}^{-1} \triangleq$ 133% der Betriebslast



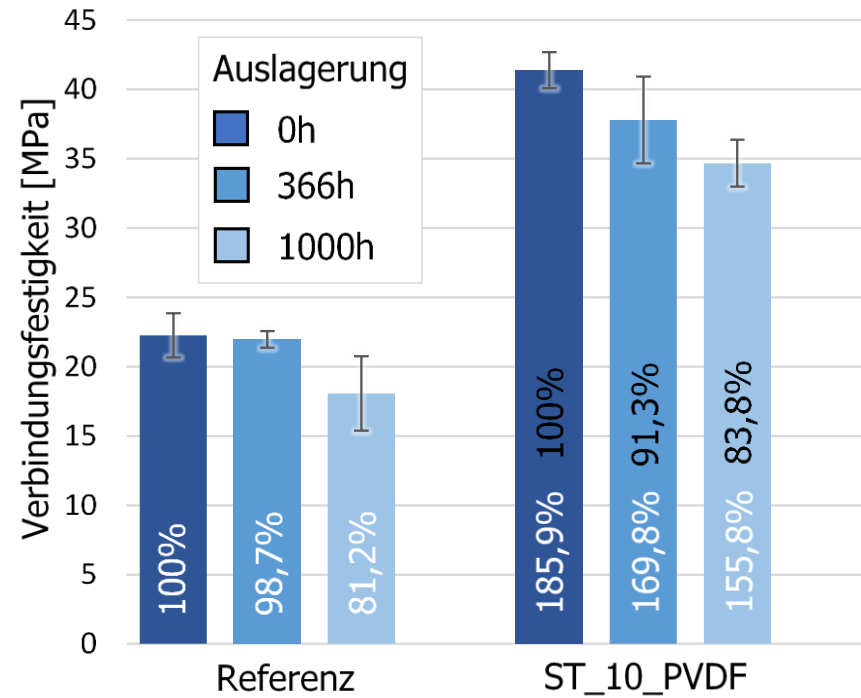
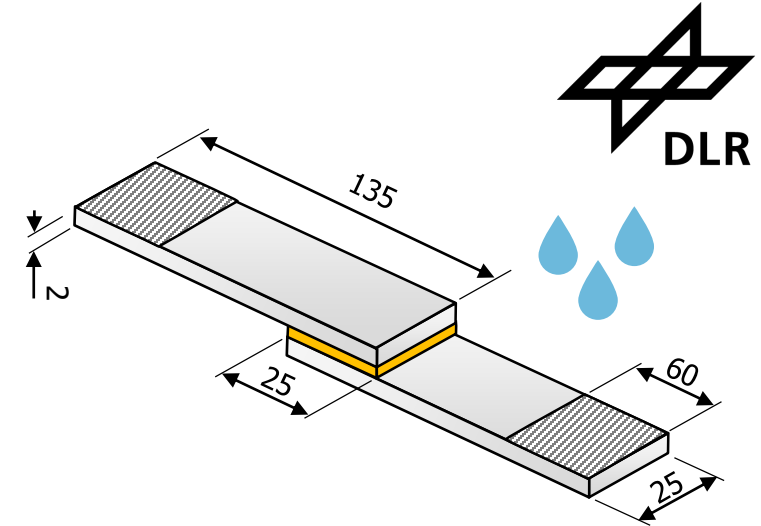
Restfestigkeit der CLS

Referenz: Klebstoff bricht kohäsiv
mit ST: Substrat bricht



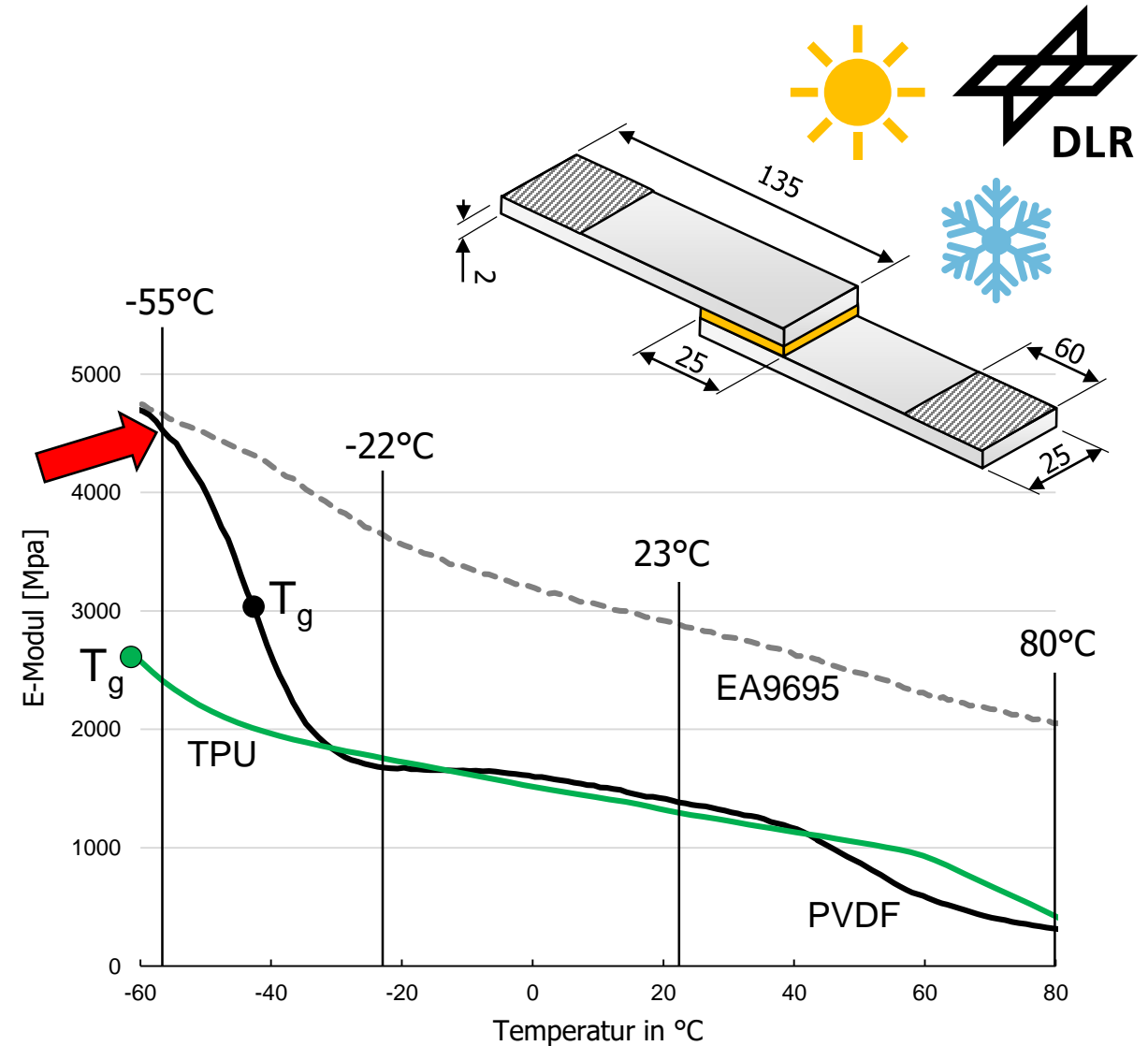
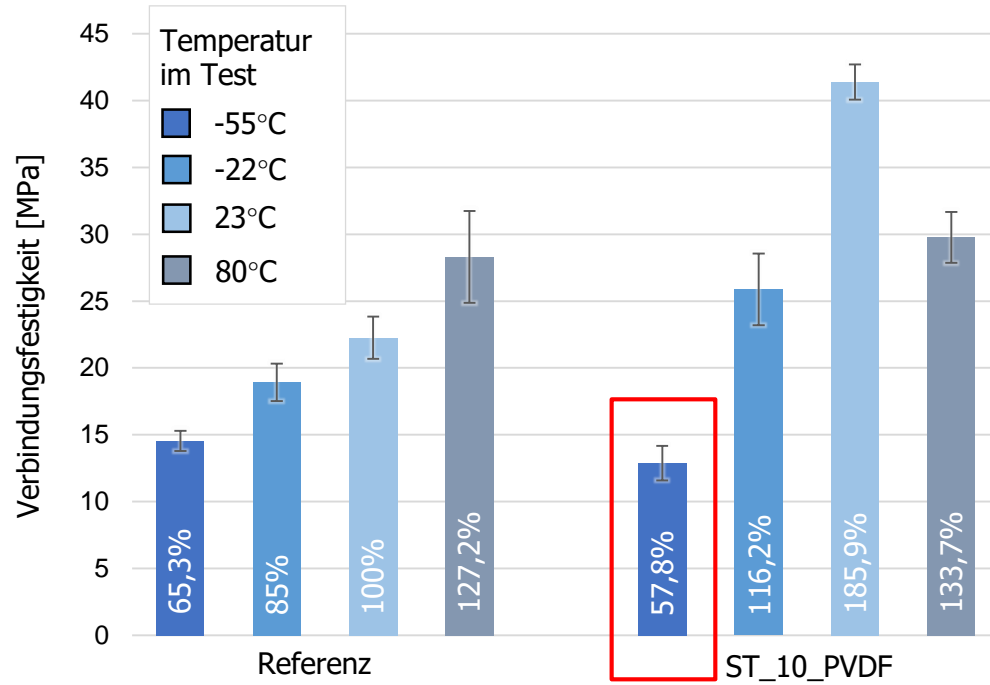
Die lokale Oberflächenzähmodifikation stoppt Risse und steigert die Verbindungsfestigkeit!

Verbindungsfestigkeit bei Auslagerung SLS

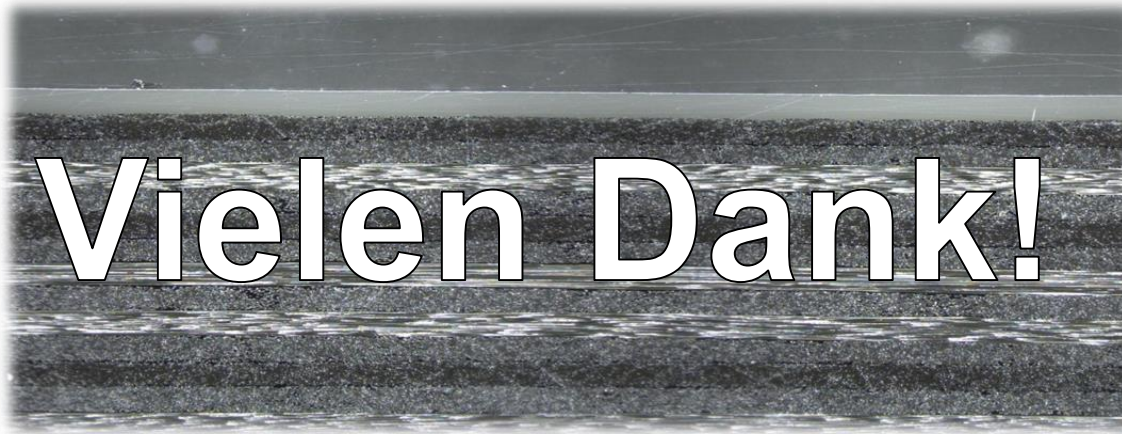


- Die lokale **Oberflächenzähmodifikation** (Surface Toughening, ST) **steigert die Verbindungsfestigkeit** deutlich und führt zu einem **sicheren Rissstopp** in strukturellen Klebungen
- Das **AD-Plasma** eignet sich **hervorragend für die Oberflächenvorbehandlung** der hybriden Materialkombination
- Das **AD-Plasma** weist eine **sehr geringe Standartabweichung** auf und ist somit sehr **reproduzierbar in der Qualität**

Ausblick



→TPU für nächste Versuche!



Thema: Anwendung von AD-Plasma bei lokal oberflächenzäh-modifizierten Klebverbindungen für die Luftfahrt

Autor: Dr. Martin J. Schollerer

Institut: Institut für Systemleichtbau

Bildnachweis: “DLR (CC BY-NC-ND 3.0)”