

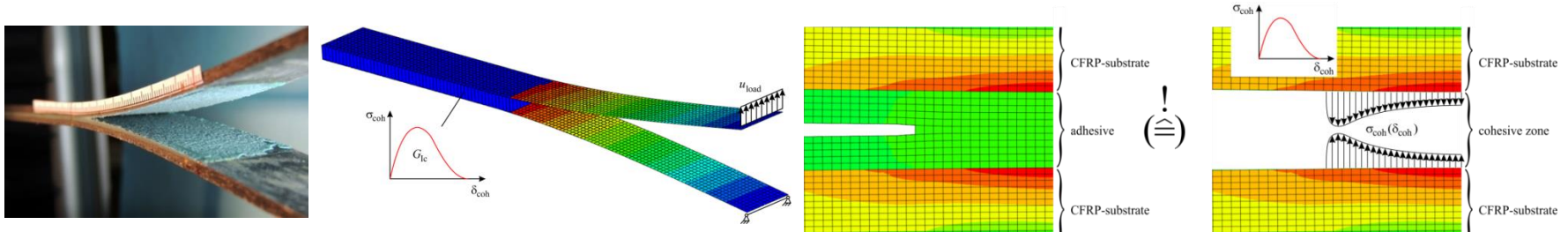
SIMULATION VON KLEBEFÜGUNGEN IN COMPOSITE-STRUKTUREN

M. Gall^a, M. Luke^a, L. Kärger^b, H. Paul^a, J. Hohe^a

^a Fraunhofer-Institut Werkstoffmechanik IWM, Freiburg im Breisgau

^b Institut für Fahrzeugsystemtechnik FAST, Karlsruher Institut für Technologie KIT

Kontakt: monika.gall@iwm.fraunhofer.de

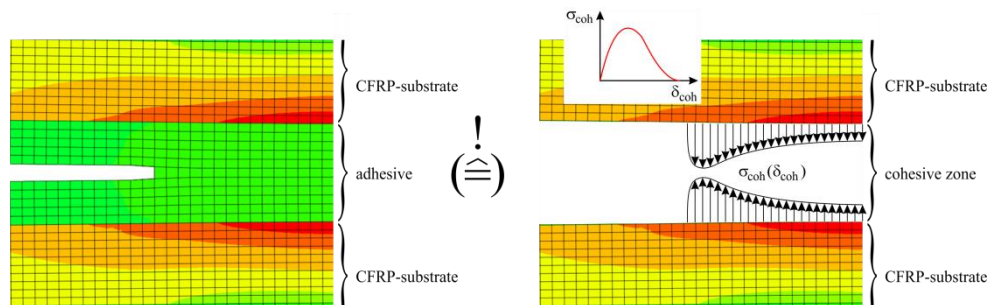
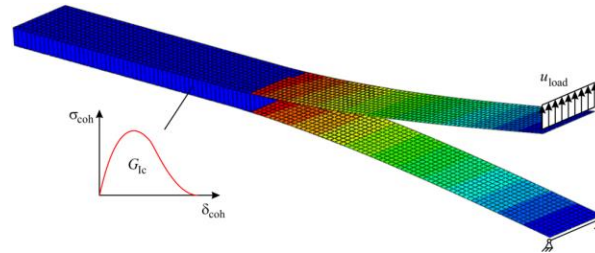
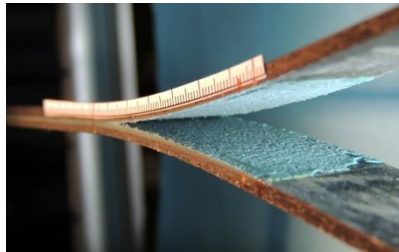


Fachkongress Composite Simulation, 26. Februar 2015, Fellbach

Simulation von Klebefügungen in Composite-Strukturen

Gliederung

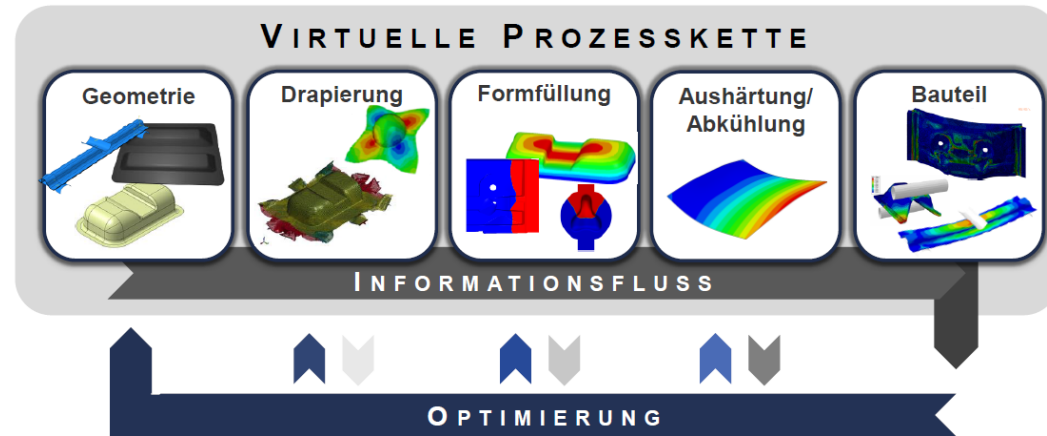
- Projekt TC² RTM CAE/Cax
- Experimentelle Charakterisierung und Simulation der Klebefügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung
- Konzept zur virtuellen Ermittlung von Kohäsivzonenparametern



Simulation von Klebefügungen in Composite-Strukturen

Teil einer Simulationskette für effizienten Leichtbau

- Aufbau einer durchgängigen CAE/CAX-Kette für das RTM-Verfahren zur Berücksichtigung von Fertigungseffekten in der Bauteilsimulation:
 - Drapiersimulation, Formfüllsimulation, Aushärtésimulation
 - Simulation des Verhaltens unter statischer, crashartiger und Ermüdungs-Belastung
 - Simulation von Klebefügungen



Projekt RTM-CAE/CAX: virtuelle Prozesskette,
Projektpartner: FAST, IFB, ITV, HTWG, IKT, HSE, IWM, EMI
[Quelle: L. Kärger, TC² Abschlussworkshop]



Verbundprojekt gefördert im „Technologiecluster Composites Baden-Württemberg TC²“ durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie die Baden-Württemberg Stiftung GmbH

„kein effizienter Leichtbau ohne effiziente Füge- und Verbindungstechnik“

Simulation von Klebefügungen in Composite-Strukturen

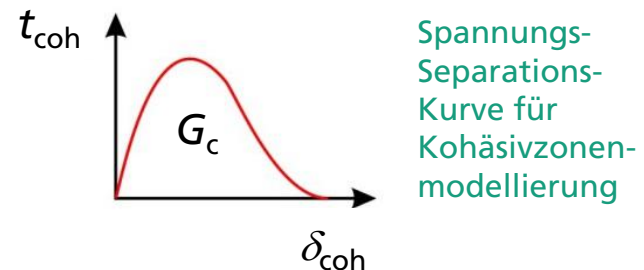
Motivation

- Ziel: Zuverlässige Auslegung und Anwendung von Klebefügungen in Leichtbau Composite-Strukturen
 - keine Fasern durchtrennt für Fügung
 - Klebstoff und Fügepartner aus ähnlichem Material
 - Ausgleich von Fertigungstoleranzen durch variable Klebstoffdicke
- Anspruch: validierte, effiziente Methoden für sichere Auslegung
 - Kohäsivzonenmodellierung etabliert
 - benötigt abgestimmte Modellparameter für zutreffende Vorhersage
- Herausforderung: komplexe Einflüsse von Material- und Strukturparametern
 - Klebstoff- und Substrateigenschaften
 - Klebstoffdicke und Lagenaufbau CFK-Substrat

Simulation von Klebefügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung

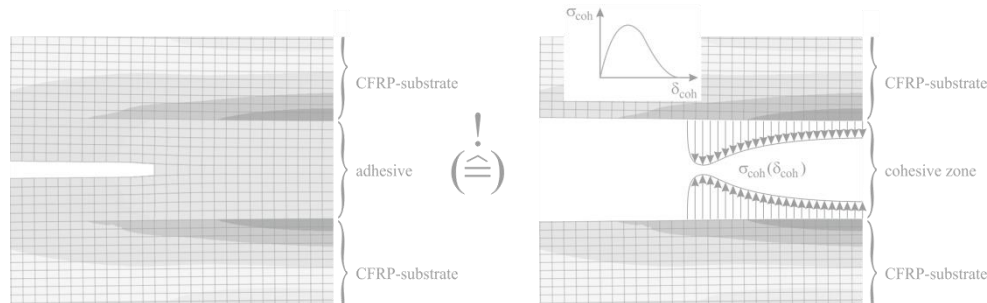
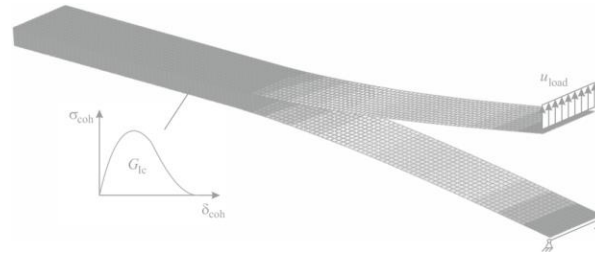
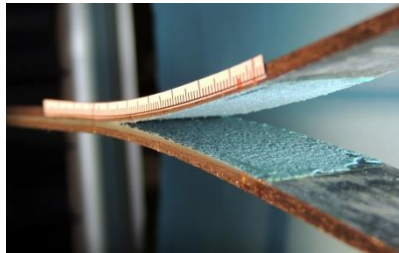
Deformations- und Versagensverhalten

- Ersatzmodell für Prozesszone
 - beinhaltet alle Vorgänge beim Versagen
 - abgebildet im Spannungs-Separationsverhalten
- Bruchmechanische Experimente zur Parameterermittlung
 - Ermittlung der Energiefreisetzungsrate beim Rissfortschritt
 - Kurvenverlauf durch Abgleich der Simulation mit Experiment



Simulation von Klebefügungen in Composite-Strukturen

- Projekt TC² RTM CAE/Cax
- Experimentelle Charakterisierung und Simulation der Klebefügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung
- Konzept zur virtuelle Ermittlung von Kohäsivzonenparametern



Experimentelle Charakterisierung des mechanischen Verhaltens geklebter CFK-Fügungen

Versuchsmatrix

- Bruchmechanische Charakterisierung geklebter CFK-Fügungen
 - Mode I Belastung im DCB-Versuch (Double Cantilever Beam)
 - Mode II Belastung im ENF-Versuch (End-Notch Flexure)
 - Mixed-Mode Belastung im MMB-Versuch (Mixed Mode Bending)
- Probengeometrien, Durchführung und Auswertung jeweils in Anlehnung an Normen zur bruchmechanischen Charakterisierung von unidirektional verstärkten FVK
- Werkstoffe
 - Klebstoffe: EP = Epoxid Betamate 2098 (blaue Färbung)
PU = Polyurethan Betamate 2850 (weiße Färbung)
 - CFK-Substrat: Kohlefaser Gelege, Epoxidharzmatrix
8-lagig, quasiisotrop $[0/90/+45/-45]_s$, Dicke ca. 2,7 mm

Experimentelle Charakterisierung des mechanischen Verhaltens geklebter CFK-Fügungen

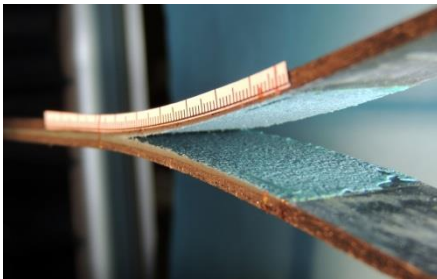
DCB-Versuche in Anlehnung an ASTM D 5528-01

■ Versuchsaufbau

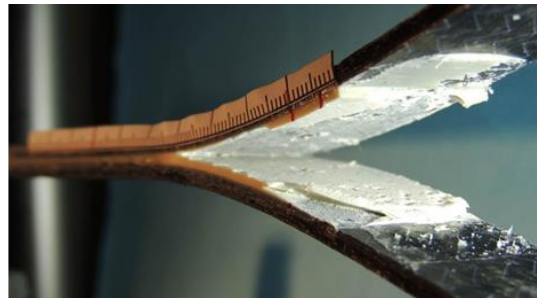
- Substrate werden auseinander gezogen, Kraft- und Wegdatenerfassung, gleichzeitig Erfassung des Rissfortschritts

■ Experimentelle Herausforderungen

- starker Einfluss der Probenpräparation, besonders Randbearbeitung!
- bei hoher Bruchzähigkeit versagt häufig das CFK-Substrat unter Biegebeanspruchung bevor ein Risswachstum zu beobachten ist



EP-Klebstoff: mittig verlaufender Riss, Klebstoffdicke ca. 0,4 mm



PU-Klebstoff: grenzflächennaher Rissverlauf, Klebstoffdicke ca. 1,2 mm (mit Glaskugeln als Abstandshalter)

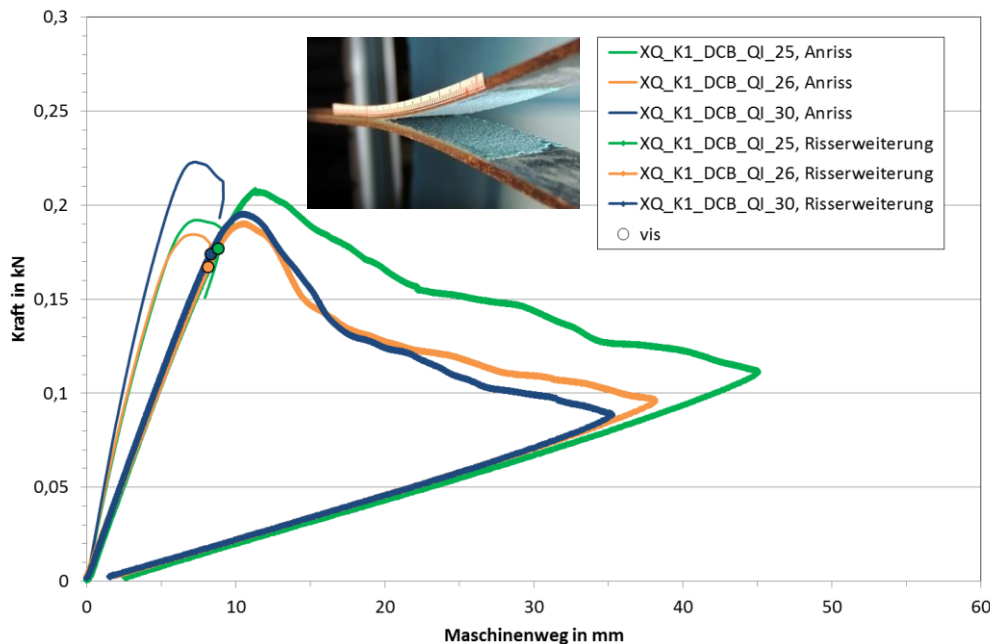


PU-Klebstoff: Substratbruch im oberen Biegearm

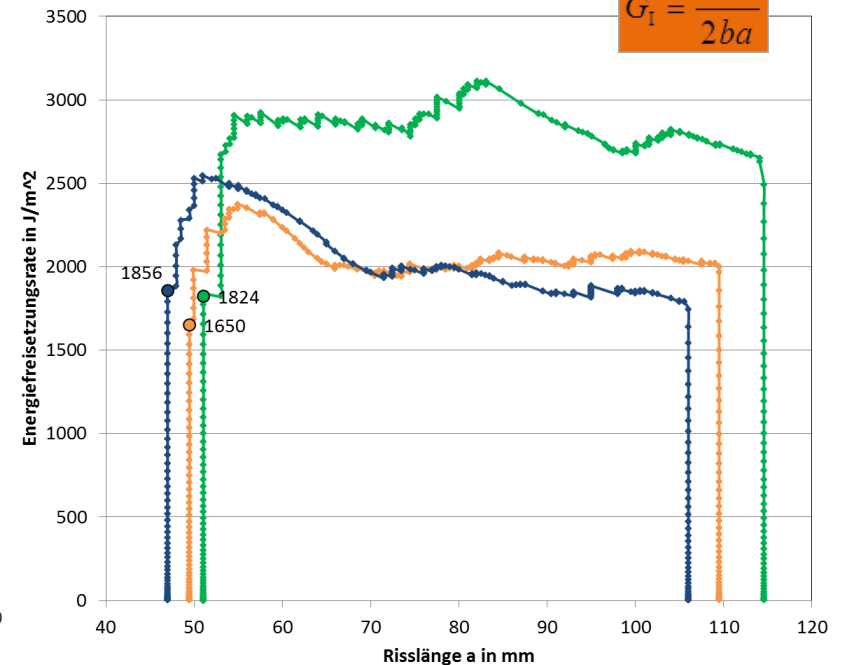
Experimentelle Charakterisierung des mechanischen Verhaltens geklebter CFK-Fügungen

DCB-Versuche in Anlehnung an ASTM D 5528-01

■ Energiefreisetzungsrate EP: $G_{Ic, vis, EP} = 1,8 \pm 0,1 \text{ kJ/m}^2$



Kraft-Wegkurven der geprüften EP-Klebproben für die 1. Belastung (Anriss) und die 2. Belastung (Risserweiterung)

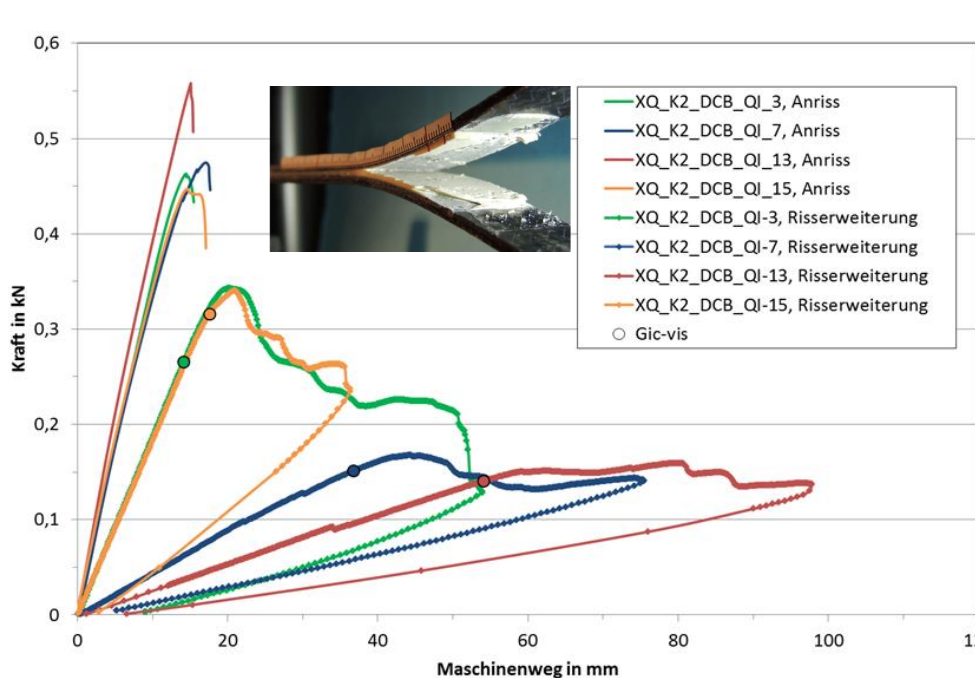


Risswiderstandskurven der EP-Klebproben (Risserweiterung)

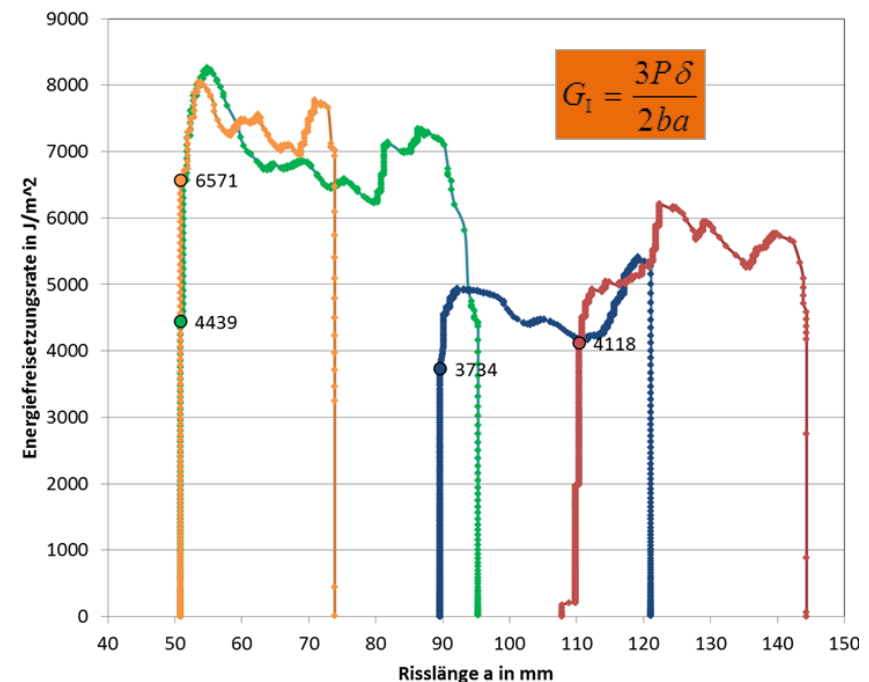
Experimentelle Charakterisierung des mechanischen Verhaltens geklebter CFK-Fügungen

DCB-Versuche in Anlehnung an ASTM D 5528-01

■ Energiefreisetzungsrate PU: $G_{Ic, vis, PU} = 4,7 \pm 1,3 \text{ kJ/m}^2$



Kraft-Wegkurven der geprüften PU-Klebproben für die 1. Belastung (Anriss) und die 2. Belastung (Risserweiterung)



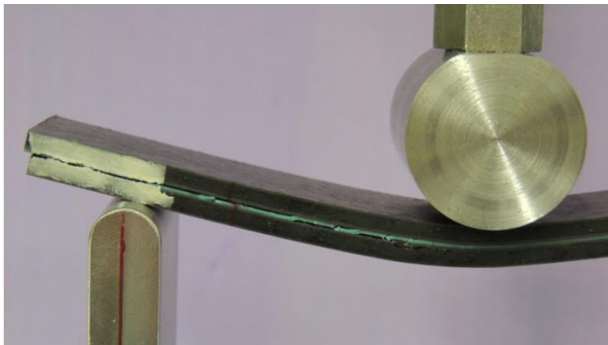
Risswiderstandskurven der PU-Klebproben (Risserweiterung)

Experimentelle Charakterisierung des mechanischen Verhaltens geklebter CFK-Fügungen

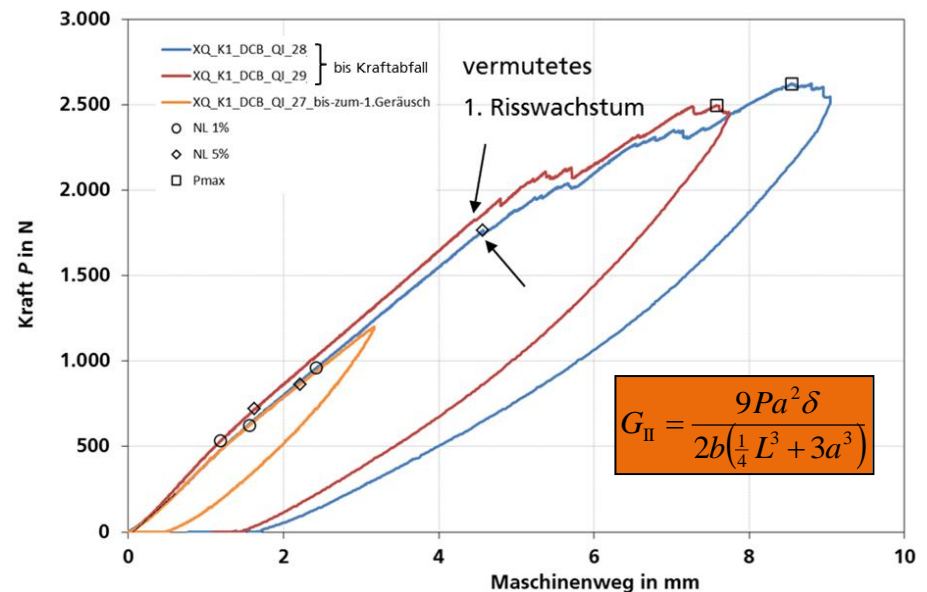
ENF-Versuche

- Versuchsaufbau: 3-Punkt-Biegung an Probe mit seitlichem Anriss
 - Rissbeginn schwierig zu erkennen, Beobachtung Rissfortschritt nicht möglich; bei PU-Klebstoff: Substratbruch bei allen Proben
- Energiefreisetzungsrate EP:

$$G_{IIc, vis, EP} = 4,8 \pm 0,1 \text{ kJ/m}^2$$



ENF-Versuch mit EP-Probe, seitlicher Anriss aus DCB-Belastung



Kraft-Wegkurven für EP-Klebproben

Experimentelle Charakterisierung des mechanischen Verhaltens geklebter CFK-Fügungen

MMB-Versuche in Anlehnung an ASTM D 6671

■ Versuchsaufbau: gewählt $c/L = 1,4 \rightarrow G_{II}/G_I = \text{ca. } 0,38$

■ Energiefreisetzungsraten

$$G_{I,EP} = 1,44 \pm 0,36 \text{ kJ/m}^2; G_{II,EP} = 0,55 \pm 0,11 \text{ kJ/m}^2$$

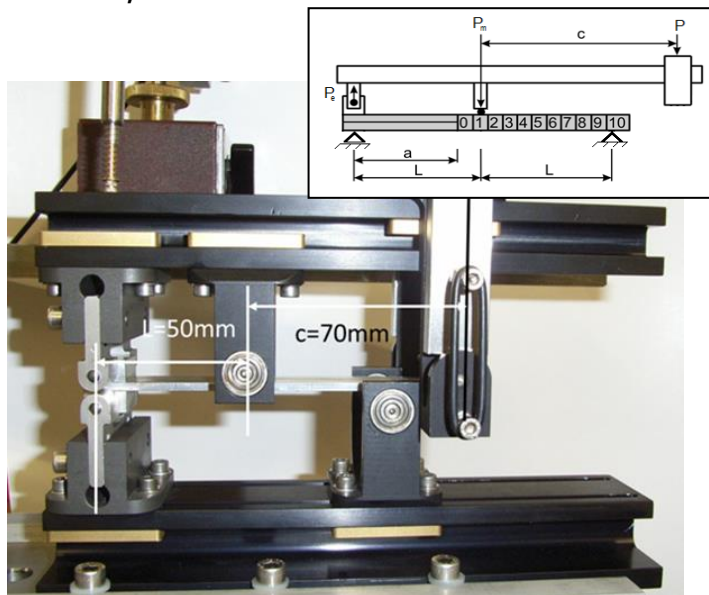
$$G_{I,PU} = 3,51 \pm 0,16 \text{ kJ/m}^2; G_{II,PU} = 1,30 \pm 0,09 \text{ kJ/m}^2$$

$$G_I = \frac{12P^2 (3c - L)^2}{16b^2 h^3 L^2 E_{lf}} (a + \chi h)^2$$

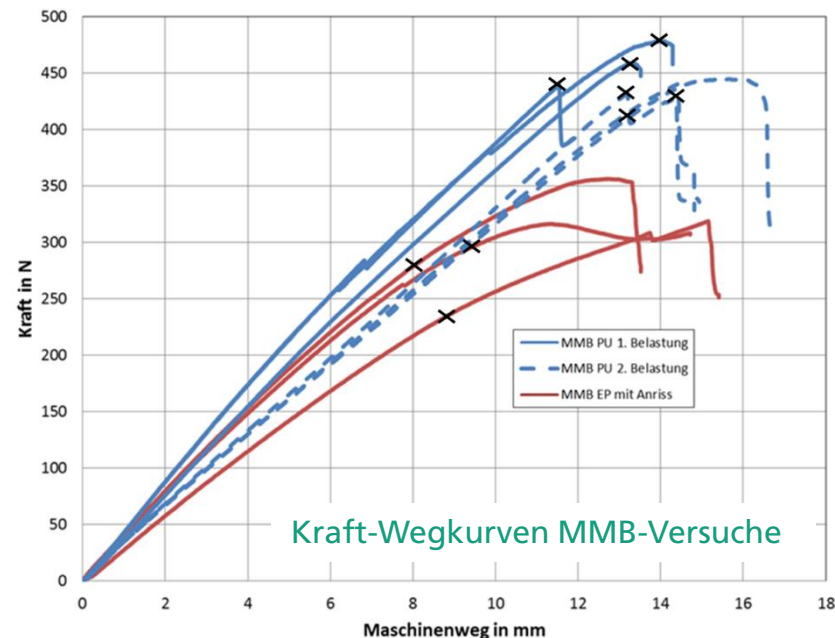
$$G_{II} = \frac{9P^2 (c + L)^2}{16b^2 h^3 L^2 E_{lf}} (a + 0.42\chi h)^2$$

$$\chi \equiv \sqrt{\frac{E_{11}}{11G_{13}} \left\{ 3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right\}}$$

$$\Gamma \equiv 1.18 \frac{\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{13}}$$

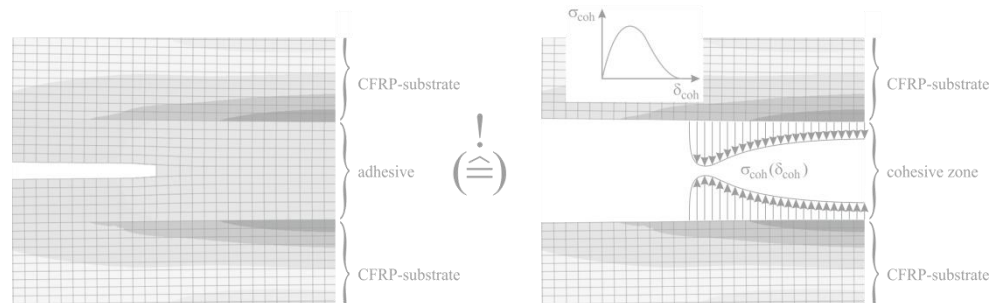
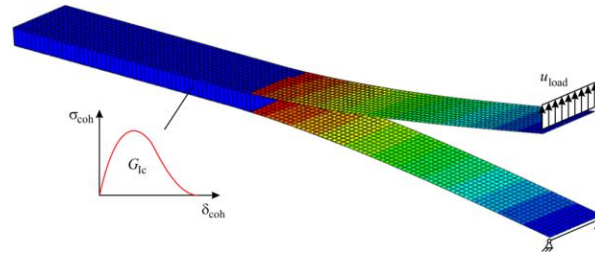
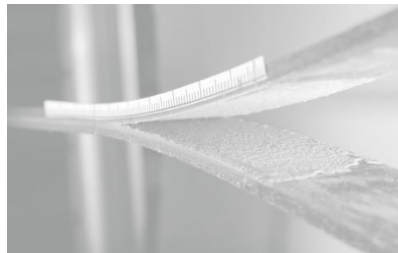


Prüfvorrichtung für MMB-Versuch



Simulation von Klebefügungen in Composite-Strukturen

- Projekt TC² RTM CAE/Cax
- Experimentelle Charakterisierung und Simulation der Klebefügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung
- Konzept zur virtuelle Ermittlung von Kohäsivzonenparametern

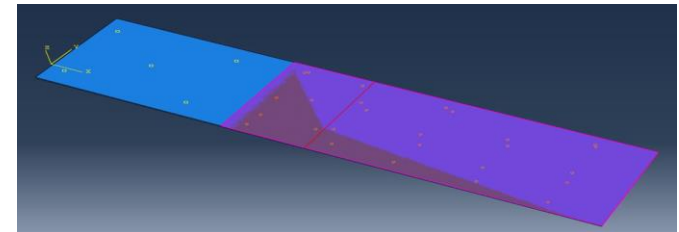
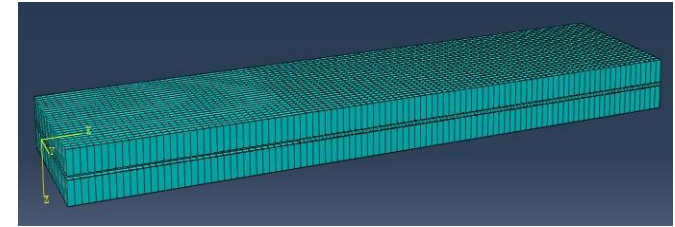


Simulation geklebter CFK-Fügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung

Modellaufbau und Materialdaten

Referenzmodell: Grundlage für Parameterstudien

- Substrate aus S4R-Schalenelementen (ohne Berücksichtigung von Schädigung)
- kohäsiver Bereich aus COH3D8-Elementen mit energiebasierter Schädigungsdefinition
- verklebter Bereich: Verbindung Substrat und kohäsiver Elemente über „Tie Constraints“
- unverklebter Bereich: Kontaktdefinition mit reibungsfreiem Verhalten zur Vermeidung von Durchdringung

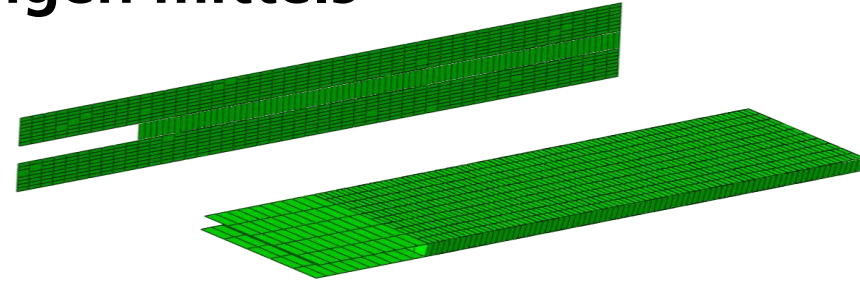


QI CFK	Zug	Druck
E1 [MPa]	112800	115600
E2 [MPa]	8950	8770
ν_{12}	0,3	0,3
G12 [MPa]	4050	4050
G13 [MPa]	4000	4000
G23 [MPa]	2500	2500

Klebstoffe	EP	PU
Festigkeit [MPa]	22	10
E-Modul [MPa]	1100	24

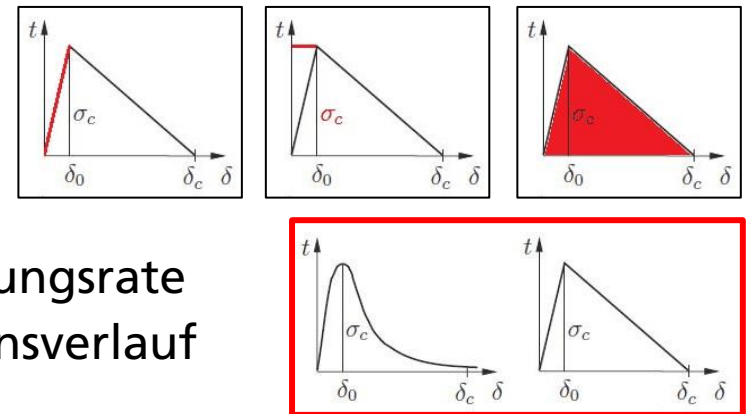
Simulation geklebter CFK-Fügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung

DCB-Versuch



Parameterstudien

- FE-Modell: 2D-Modell, 3D-Modell mit Schalenelementen, Kontinuums-Schalenelementen oder Volumenelementen
- Netzfeinheit
- Viskosität im Schädigungsverhalten
- Klebstoffsteifigkeit
- Schadensinitiierung (Festigkeiten)
- Schadenswachstum: krit. Energiefreisetzungsrate
- Schadenswachstum: lin./exp. Degradationsverlauf



Fazit

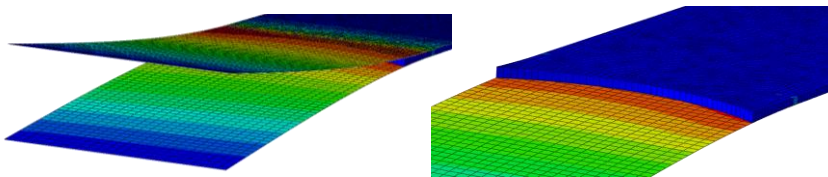
- Netzfeinheit und Viskosität muss ausreichend genau gewählt sein, um netzunabhängige, stabile Ergebnisse zu erzielen
- Parameter zur Schadensentwicklung (Energiefreisetzungsrate und Degradationsverlauf) haben den größten Einfluss auf die Strukturantwort

Simulation geklebter CFK-Fügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung

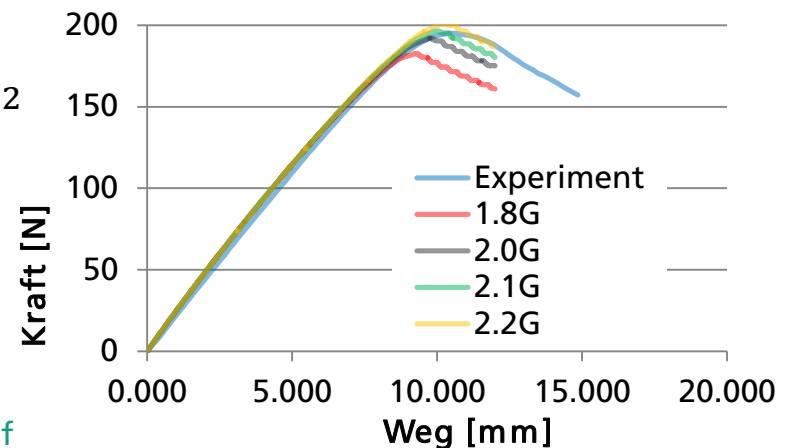
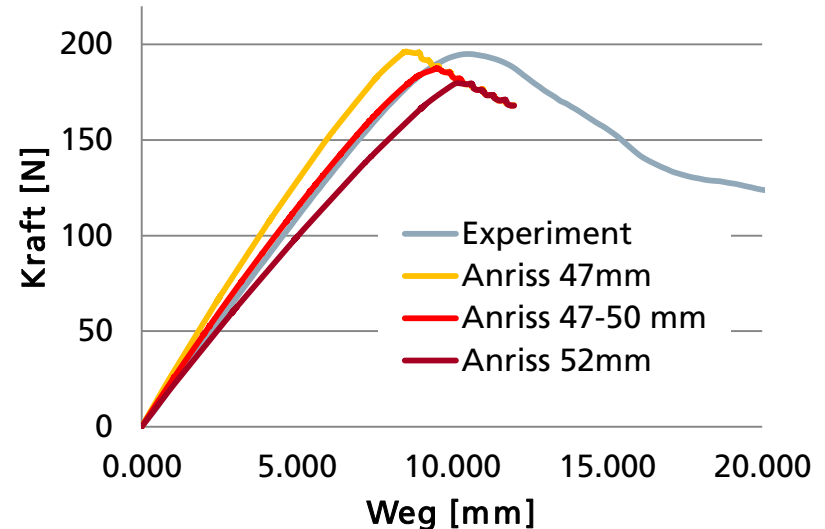
DCB-Versuch

Variation Anrissgeometrie und Energiefreisetzungsrate

- Anriss: aufgrund der größeren Querdehnungsbehinderung in Probenmitte kommt es zu einer gekrümmten Rissfront
- Energiefreisetzungsrate: im Versuch schwankte $G_{IC}=1,8\text{--}2,5\text{ kJ/m}^2$, in Simulation ist G_{IC} immer konstant
- gekrümmter Anriss mit $G_{IC}=2,0\text{--}2,2\text{ kJ/m}^2$ trifft Versuchskurve am besten



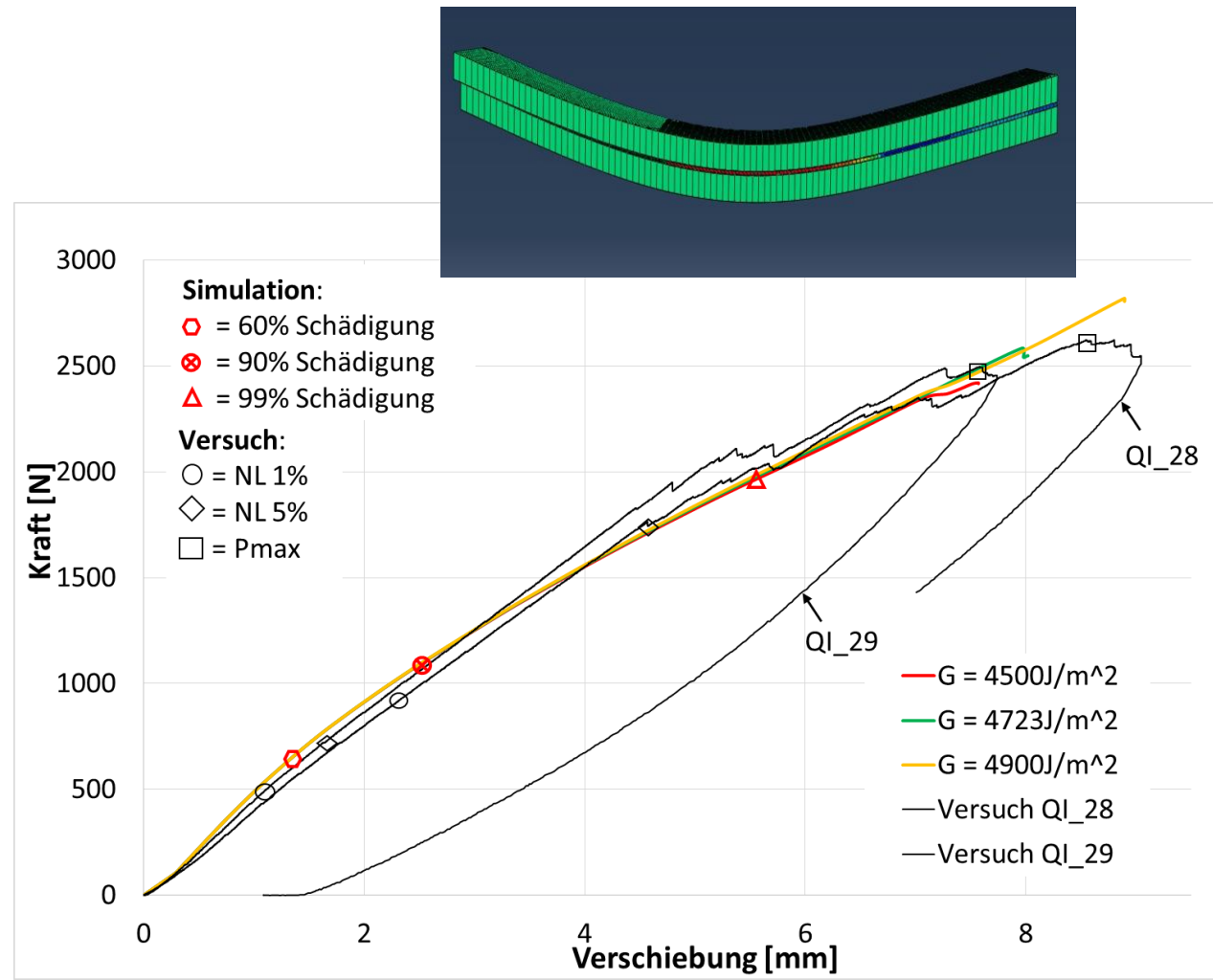
Verlauf der Rissfront passend zum berechneten Spannungsverlauf



Simulation geklebter CFK-Fügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung

ENF-Versuch

- Variation Energiefreisetzungsrates
- $G_{IIc} = 4723 \text{ J/m}^2$ (aus Versuch) ergibt sehr gute Übereinstimmung mit Versuchskurve



Simulation geklebter CFK-Fügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung

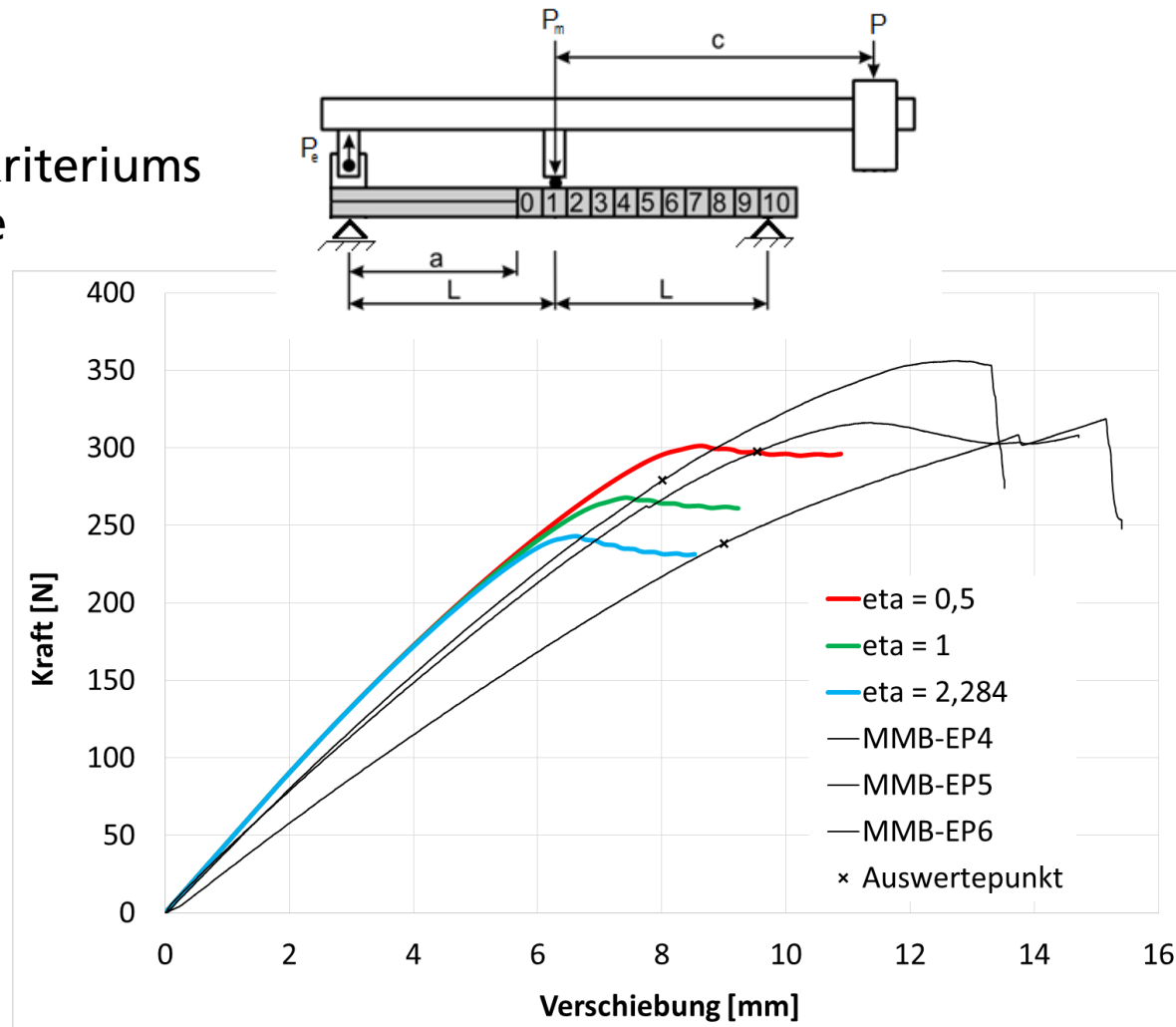
MMB-Versuch

Variation des Schädigungskriteriums nach Benzeggagh – Kenane

- Verschiebungsrandbedingung für Mode I- und II-Belastung wie Versuch
- $G_{Ic} = 1777 \text{ J/m}^2$ und $G_{IIc} = 4800 \text{ J/m}^2$ aus DCB- und ENF-Versuchen
- BK-Kriterium bestimmt krit. Energie-freisetzungsrate

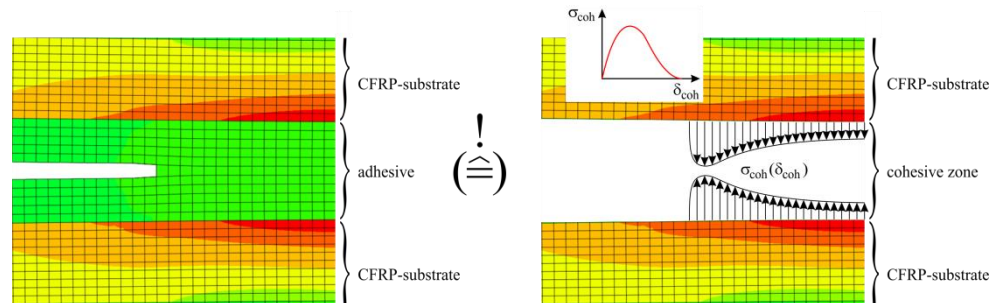
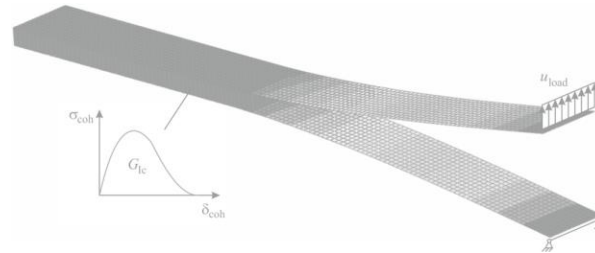
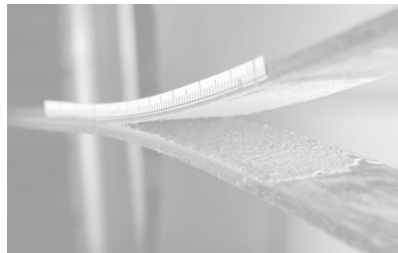
$$G_c = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II}}{G_T} \right)^\eta$$

$$G_T = G_I + G_{II}$$
- Je höher G_c desto später tritt Versagen auf
 $\rightarrow \eta = 0,5$ verschiebt das Ergebnis näher an den Versuch



Simulation von Klebefügungen in Composite-Strukturen

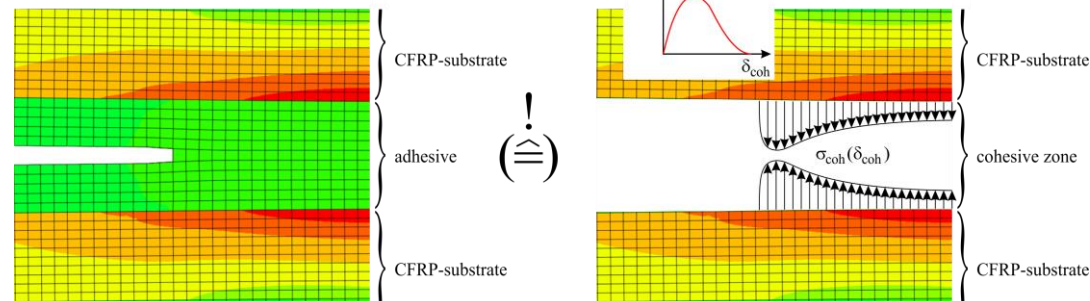
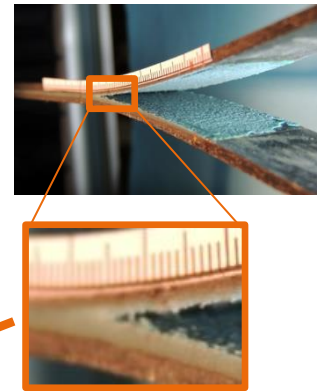
- Projekt TC² RTM CAE/Cax
- Experimentelle Charakterisierung und Simulation der Klebefügungen mittels Kohäsivzonenmodellierung
- Konzept zur virtuelle Ermittlung von Kohäsivzonenparametern



Kontinuumsmechanische Simulation der Klebefügung zur virtuellen Ermittlung der Kohäsivzonenparameter

Motivation und Ansatz

- Motivation: Variation von Klebschichtdicken und Substrataufbau im virtuellen Experiment anstelle zusätzlicher Versuche
- Ansatz: Detailmodellierung des Rissfortschritts in der Klebung
 - Trag- und Versagensverhalten des Klebstoffs durch kontinuumsmechanisches Materialmodell beschreiben
 - Steifigkeits- und Versagensparameter für reinen Klebstoff aus Abgleich mit zusätzlichen Experimenten
- Homogenisierungsansatz
 - Ermittlung des Trag- und Versagensverhaltens vom Detailmodell
 - Übertragung auf Kohäsivzonenmodell



Kontinuumsmechanische Modellierung des EP Klebstoffs

Plastisches Deformationsverhalten

- Hier: Deshpande-Fleck Modell ¹⁾
- Berücksichtigt volumetrisches Fließen im hydrostatischen Spannungszustand (Porenbildung)
- Hier: mit isotroper Verfestigung und gleichem Verhalten unter Zug- und Druckbeanspruchung
- Verfestigungskurve beschreibt Zugspannung als Funktion der plastischen Dehnung

Fließfläche

$$F = \sqrt{\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_h^2} + \sigma_y (\varepsilon_{ij}^{pl}) = 0$$

v. Mises Vergleichsspannung $\sigma_e = \left(\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}$

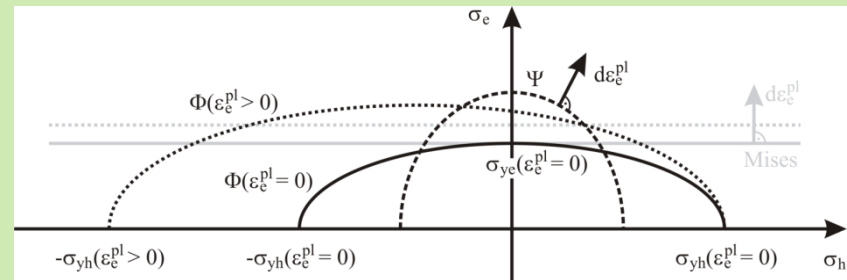
Deviatorische Spannung $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$

Hydrostatische Spannung $\sigma_h = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$

Fließspannung (Material-eigenschaft) mit Verfestigung $\sigma_y (\varepsilon_{ij}^{pl})$

Nicht-assoziiertes Fließgesetz $d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{\partial \Psi}{\partial \sigma_{ij}}$

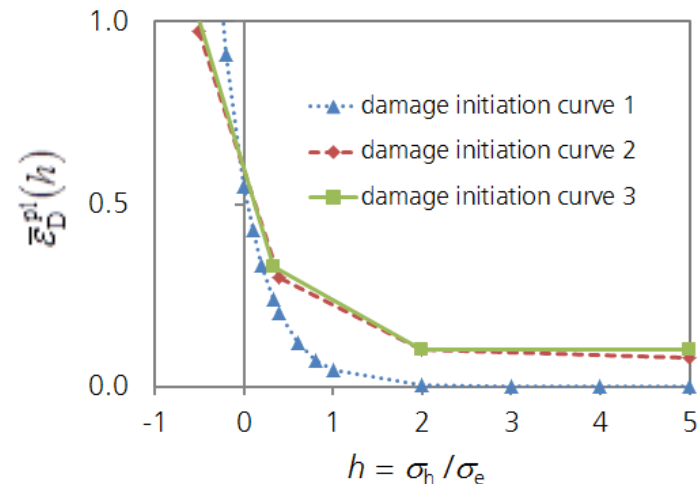
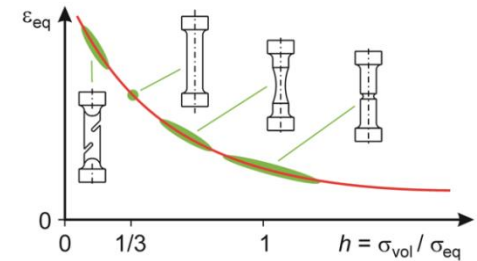
Fließpotential für isotropes Verfestigungsmodell $\Psi = \sqrt{\sigma_e^2 + \beta^2 \sigma_h^2} = 0$



Kontinuumsmechanische Modellierung des EP Klebstoffs

Schädigungsverhalten

- Dehnungsbasierte Versagensgrenzkurve, mit Fließen unter hoher Spannungsmehrachsigkeit
- Anpassung der Schädigungsparameter an bruchmechanische Versuche (DCB)
- Schadensentwicklung: Degradation der Fließspannung, hier: lineare Degradation bis zum Erreichen der plastischen Grenzdehnung



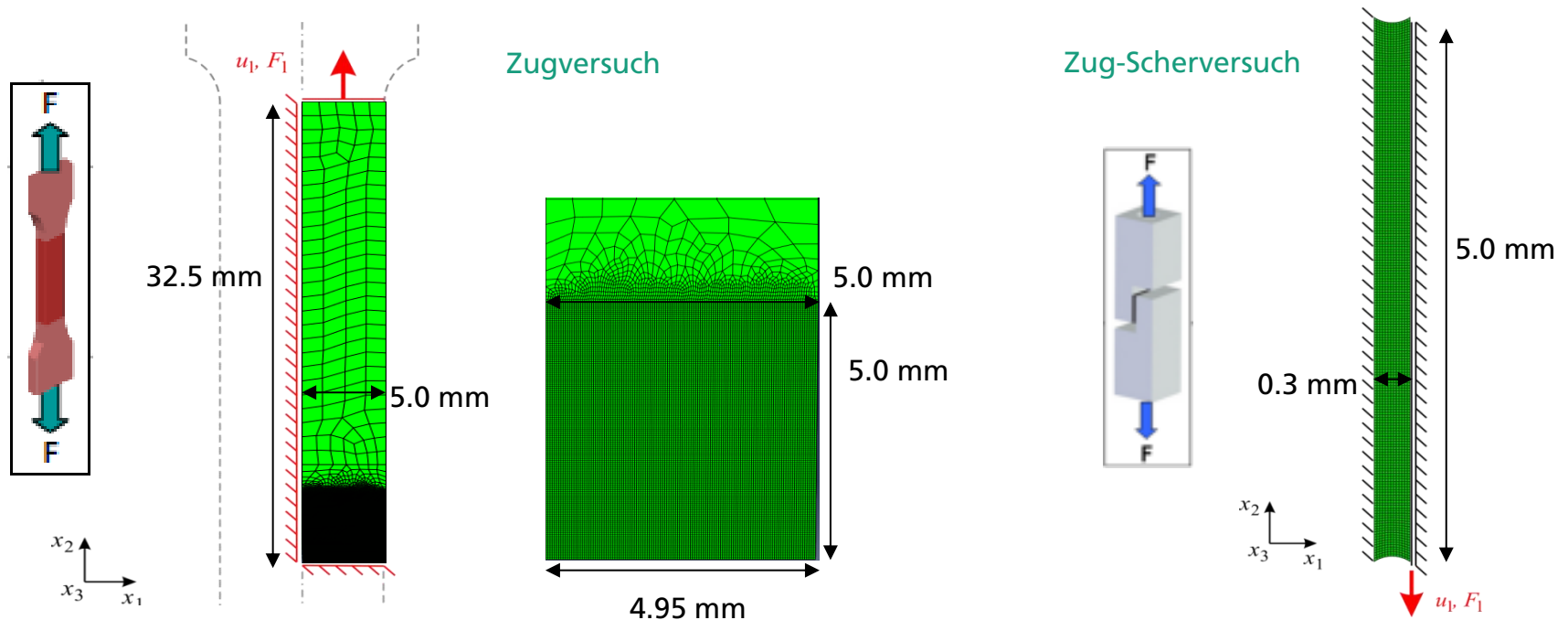
Dehnungsbasierte Versagensgrenzkurven für EP-Klebstoff:

Kurven 1 bis 3 mit steigender plastischer Vergleichsdehnung bei hoher Spannungsmehrachsigkeit, Anpassung auf DCB-Versuche

Kontinuumsmechanische Modellierung des EP Klebstoffs

Modellparameter aus Abgleich mit Experimenten

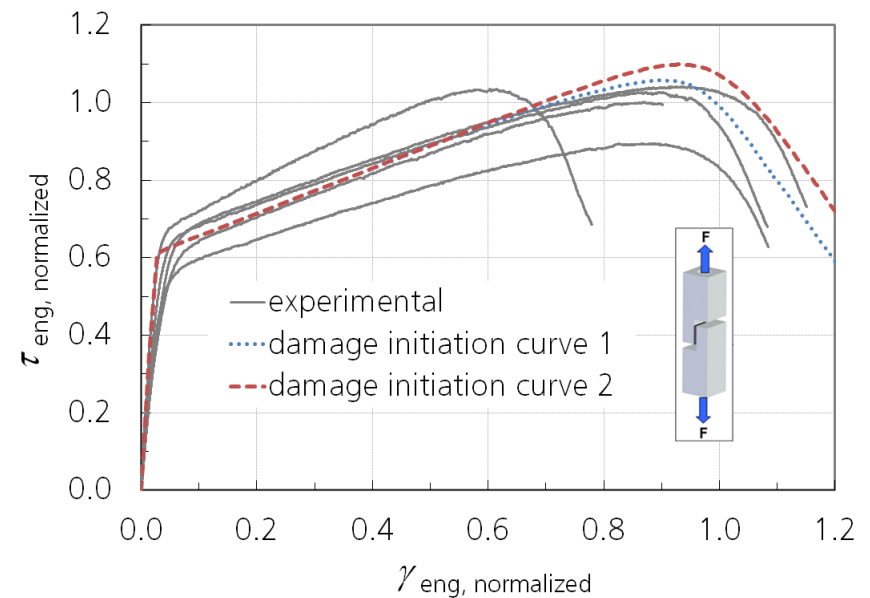
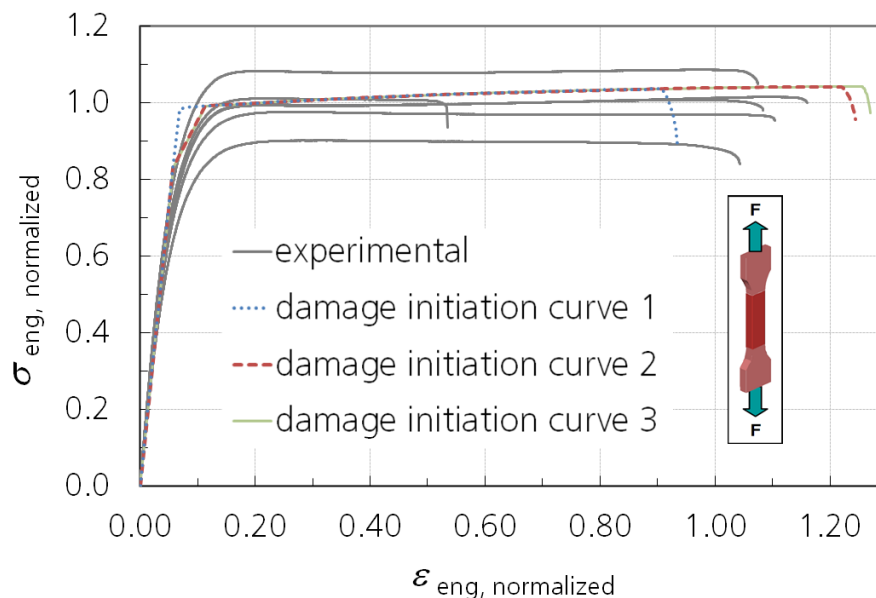
- Ermittlung von Steifigkeit und Schädigungsparametern aus Abgleich mit Zug- und Zug-Scher-Experimenten an Klebstoff-Proben



Kontinuumsmechanische Modellierung des EP Klebstoffs

Modellparameter aus Abgleich mit Experimenten

- Ermittlung von Steifigkeit und Schädigungsparametern aus Abgleich mit Zug- und Zugscher-Experimenten an Klebstoff-Substanzproben*

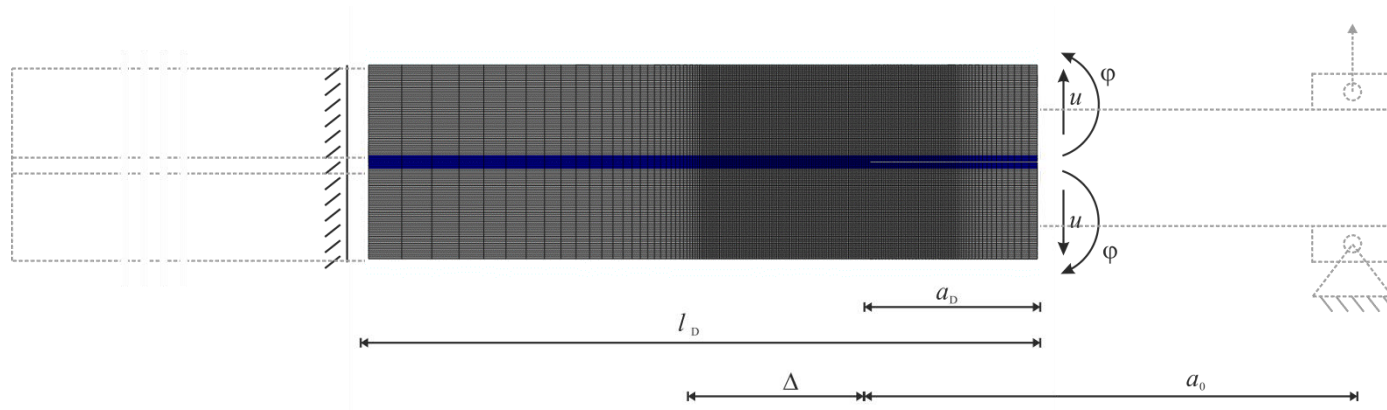
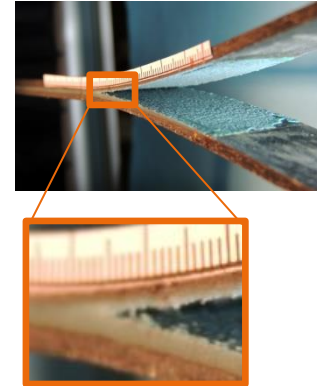


*Versuchsdaten durch Daimler AG zur Verfügung gestellt

Kontinuumsmechanische Simulation der Klebefügung

Detailmodell DCB-Versuch

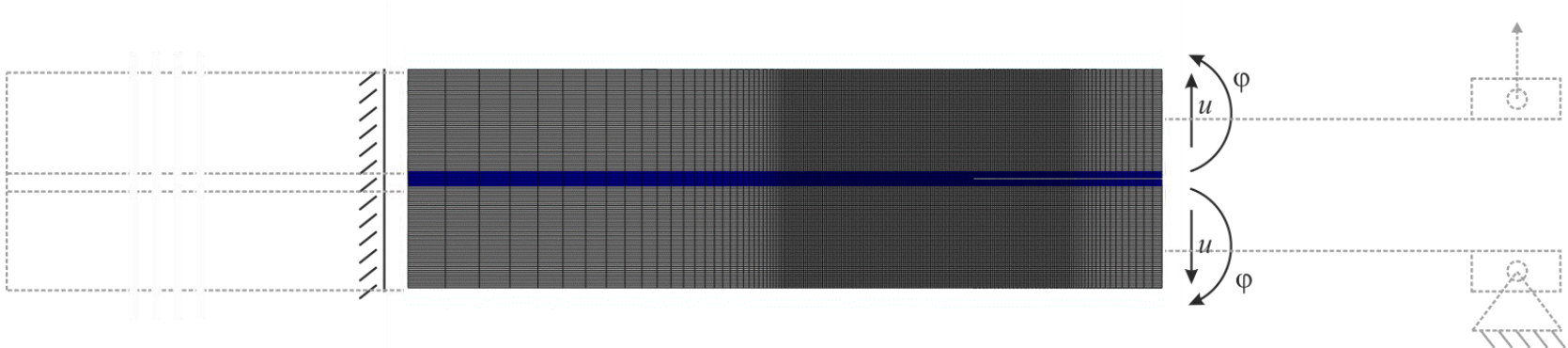
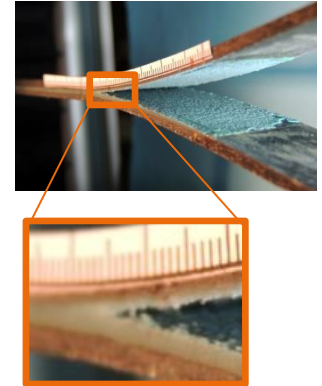
- Double Cantilever Beam mit quasiisotropem CFK-Substrat, $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$, $h_{\text{CFK}} = 2.7 \text{ mm}$, $l_{\text{CFK}} = 255 \text{ mm}$
- EP Klebstoff, $h_{\text{adh}} = 0.4 \text{ mm}$
- Anrisslänge im Experiment: $a_0 = 47 \text{ mm}$,
Risswachstum Δ
- Detailmodell: Länge $l_D = 20 \text{ mm}$, Anrisslänge $a_D = 5 \text{ mm}$



Kontinuumsmechanische Simulation der Klebefügung

Detailmodell DCB-Versuch

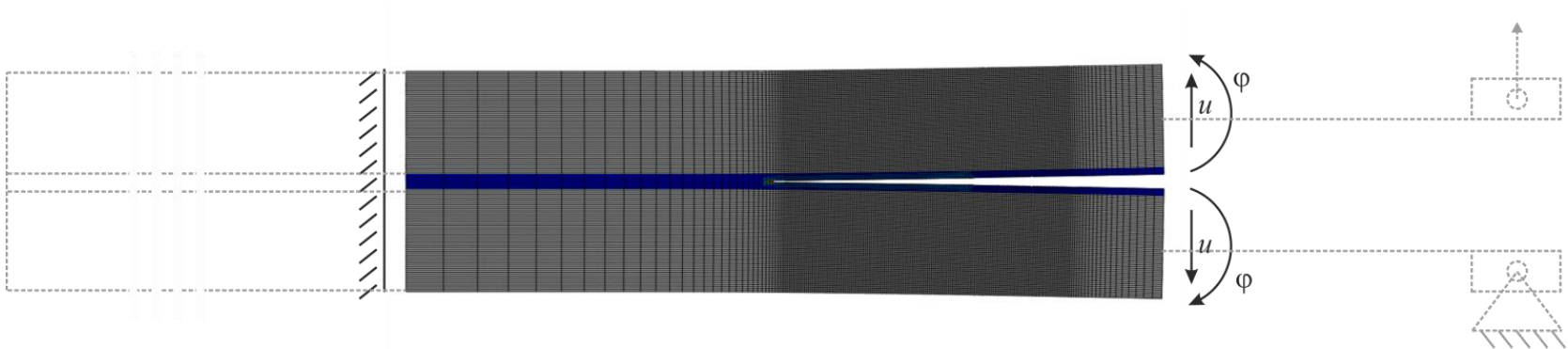
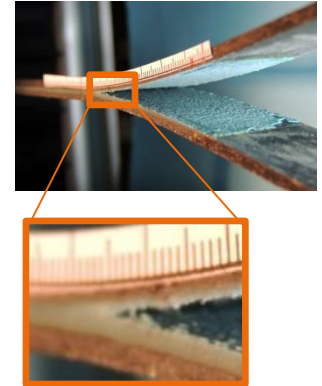
- 3D Modell mit C3D8 Solid-Elementen
- in Rissnähe (inklusive Risswachstum) sehr fein vernetzt, EL-Kantenlänge ca. 0.04 mm
- Mode I Belastung → Risswachstum



Kontinuumsmechanische Simulation der Klebefügung

Detailmodell DCB-Versuch

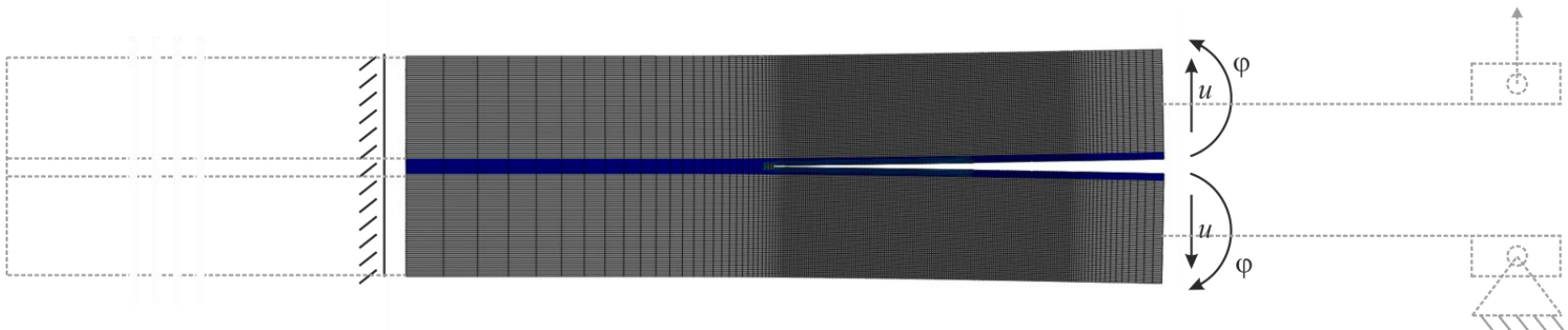
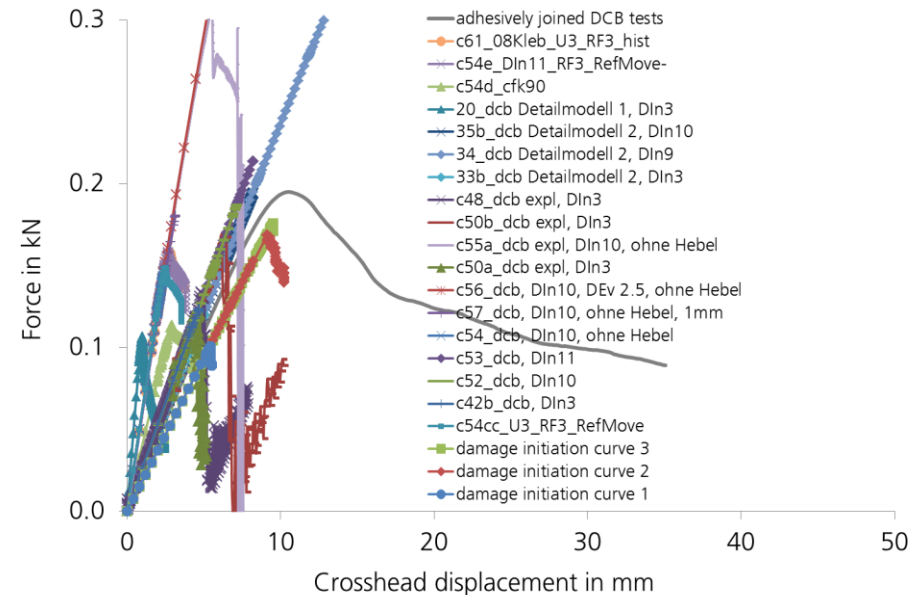
- 3D Modell mit C3D8 Solid-Elementen
- in Rissnähe (inklusive Risswachstum) sehr fein vernetzt, EL-Kantenlänge ca. 0.04 mm
- Mode I Belastung → Risswachstum



Kontinuumsmechanische Simulation der Klebefügung

Detailmodell DCB-Versuch

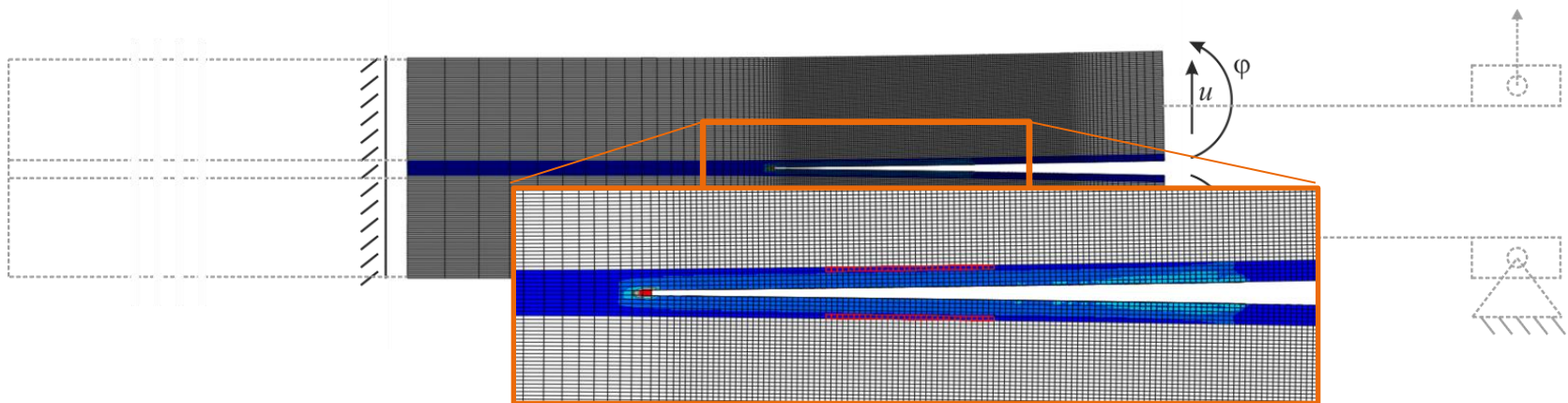
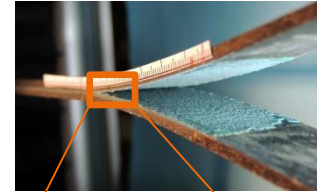
- 3D Modell mit C3D8 Solid-Element
- in Rissnähe (inklusive Risswachstum
EL-Kantenlänge ca. 0.04 mm
- Mode I Belastung → Risswachstum
 - Anpassung Klebstoff-Schädigungsparameter an DCB-Versuch



Kontinuumsmechanische Simulation der Klebefügung

Detailmodell DCB-Versuch

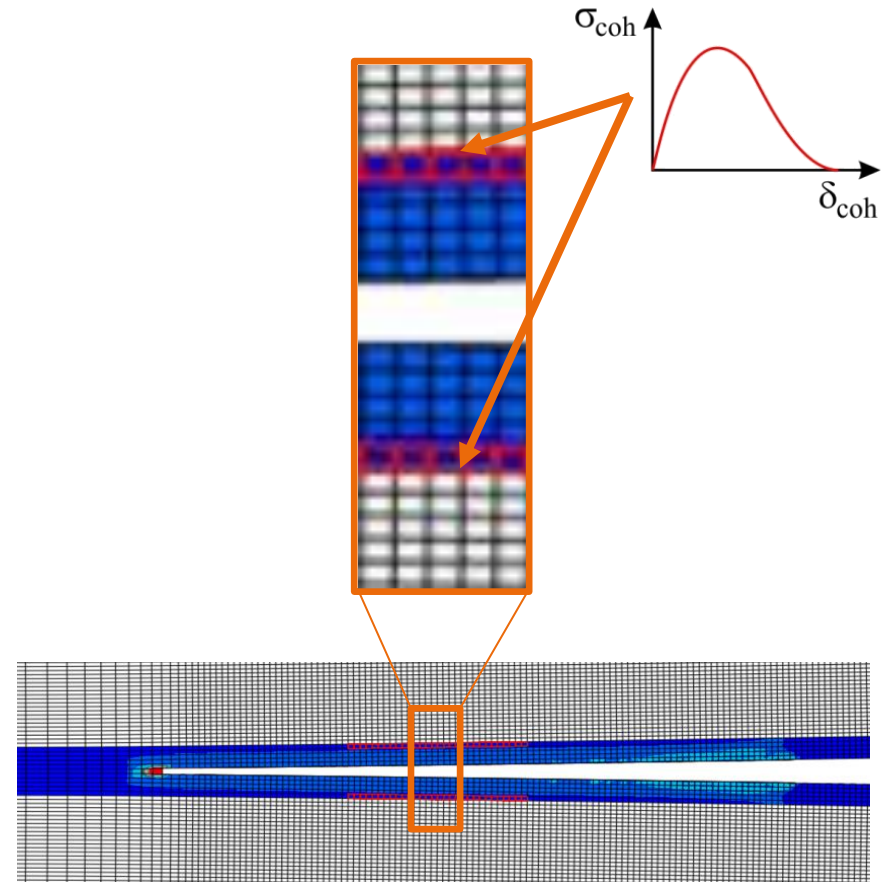
- 3D Modell mit C3D8 Solid-Elementen
- in Rissnähe (inklusive Risswachstum) sehr fein vernetzt, EL-Kantenlänge ca. 0.04 mm
- Mode I Belastung → Risswachstum
 - Anpassung Klebstoff-Schädigungsparameter an DCB-Versuch



Kontinuumsmechanische Simulation der Klebefügung

Methodik zur Ermittlung der Kohäsivzonenparameter

- Direkte Übertragung des Spannungs-Separationsverhaltens
 - Steigung in Anfangsregion
 - Schadensinitiierung: beginnende Nichtlinearität
 - Schadensentwicklung: genaue Abbildung des Kurvenverlaufs durch tabellarische Eingabe der Schädigungsvariablen D



Virtuelle DCB-Experimente mit Material und Strukturänderungen im Detailmodell

Spannungs-Separations-Kurven

■ Einfluss Klebstoff-Material: Detailmodell mit verschiedenen Versagensgrenzkurven

Kurven 1 bis 3 mit steigender plastischer
Vergleichsdehnung bei hoher
Spannungsmehrachsigkeit

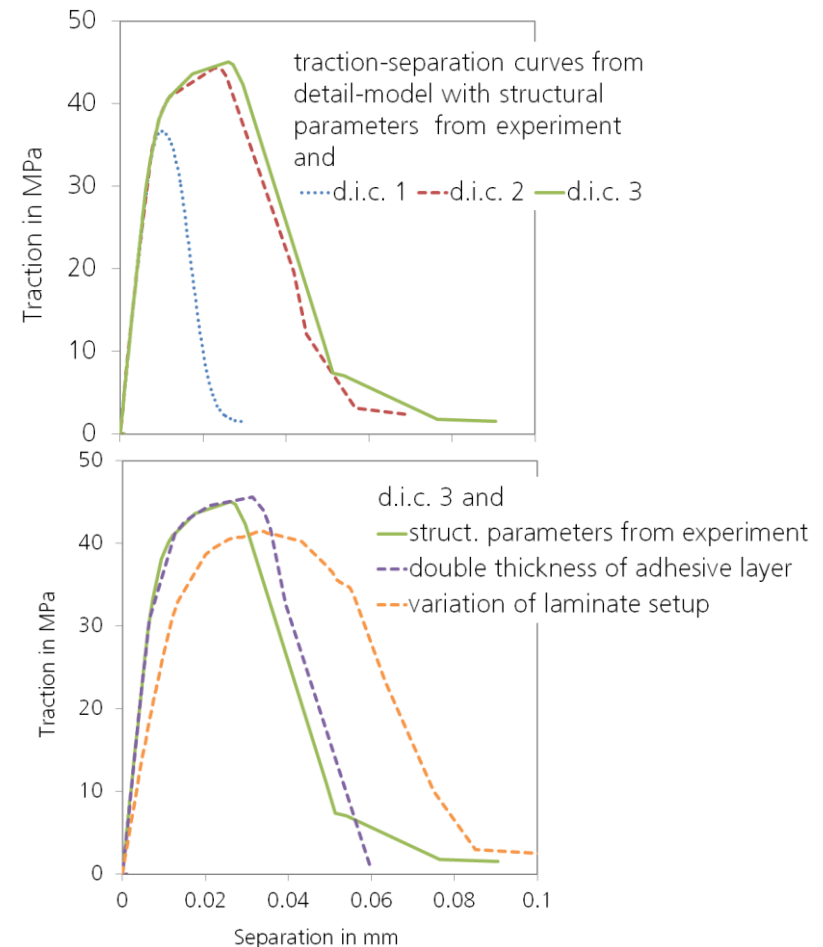
■ Einfluss Strukturparameter im Detailmodell

■ doppelte Klebstoffdicke

(mit Versagensgrenzkurve 3)

■ Schichtaufbau Laminat geändert

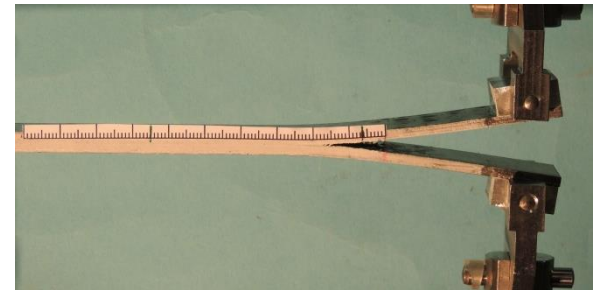
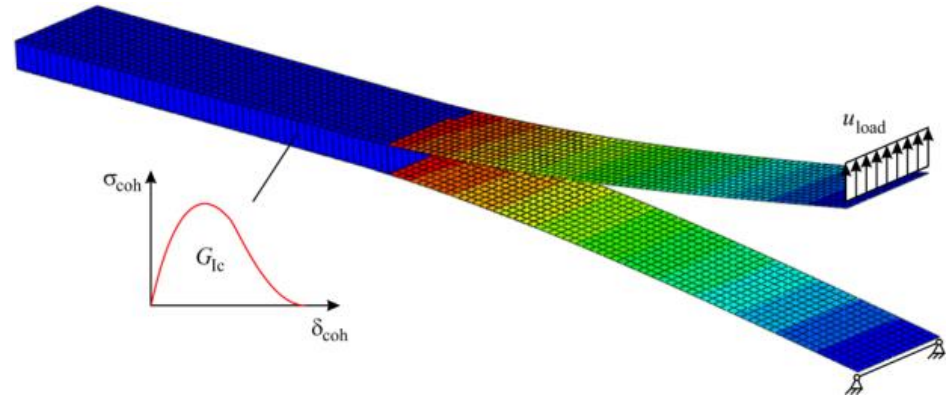
0° und 90° Lagen vertauscht,
(mit Versagensgrenzkurve 3)



Struktursimulation DCB-Versuch

Kohäsivzonenparameter aus Detailmodellierung

- effizientes FE-Modell
 - CFK-Substrate: Schalenelemente mit Composite Lagenaufbau
 - Klebstoffschicht: 8-Knoten Kohäsivzonenelemente
- Validierung durch Vergleich mit Experiment
 - Anrisslänge!



Breite: 24.78 mm

Gesamtdicke, gemessen: 5.76 mm

Modell: 2 x 2.7 mm (CFK-Substrate) + 0.4 mm (Klebstoffdicke) = 5.8 mm

Anfangsrisslänge a_0 (nach erster Anriss-Belastung): 47 mm

Struktursimulation DCB-Versuch

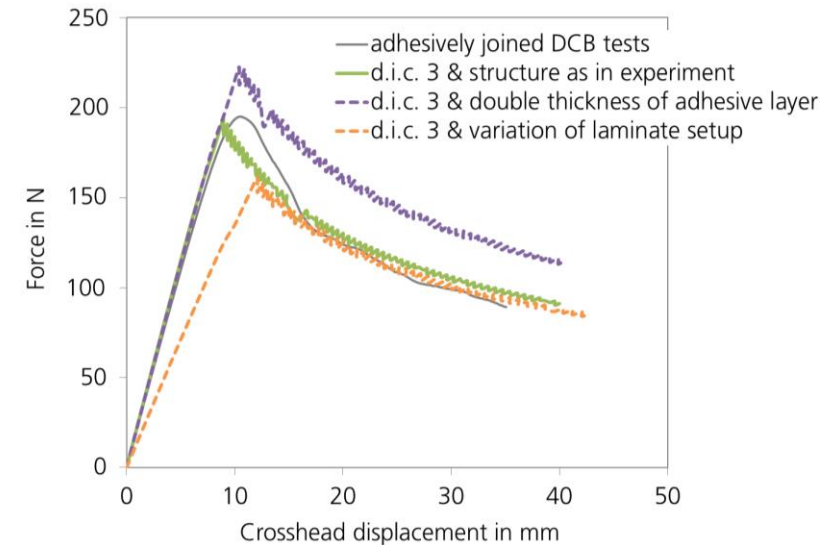
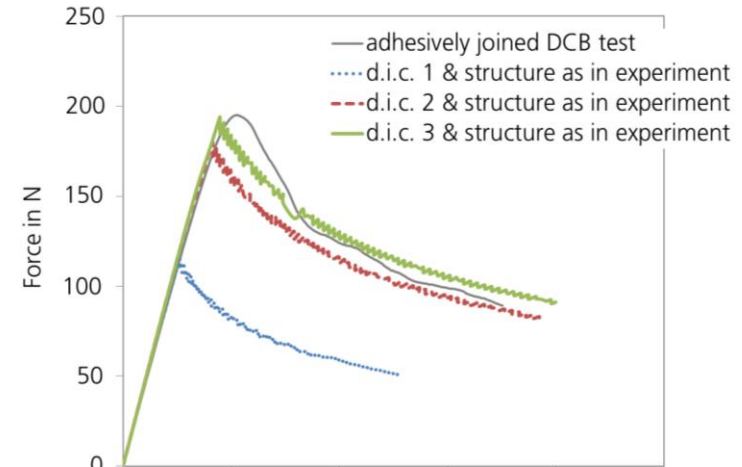
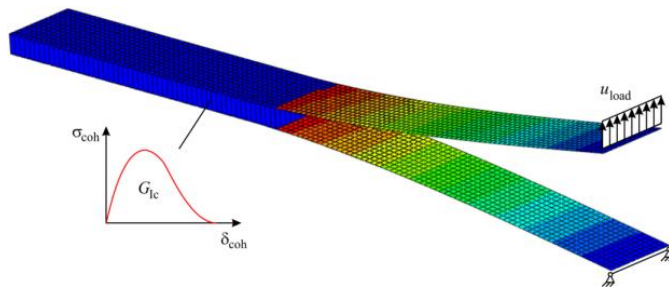
Kohäsivzonenparameter aus Detailmodellierung

■ Vergleich Kohäsivzonenmodellierung mit Experiment

■ Kraft-Wegkurven

oben: Kohäsivzonenparameter aus Detailmodell mit Variation Klebstoff-Materialparameter

unten: aus Detailmodell mit Variation Klebstoffdicke und Substrataufbau



Experimentelle Charakterisierung und Simulation des mechanischen Verhaltens geklebter CFK-Fügungen

Zusammenfassung

- Numerisch effiziente Modellierung mit Kohäsivzonenmodellen in guter Vorhersagequalität möglich
 - Modellparameter durch bruchmechanische Versuche ermittelt
- Methodik zur virtuellen Ermittlung von Kohäsivzonenparametern erarbeitet und ebenfalls gute Vorhersagequalität erreicht
 - Aufwand zur Ermittlung der Klebstoffmaterialparameter nötig
 - dann virtuelle Experimente mit geänderten Parametern relativ einfach durchführbar

Danksagungen:

Die Arbeiten wurden durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg und die Baden-Württemberg Stiftung GmbH im Rahmen des „Technologiecluster Composites Baden-Württemberg TC²“ gefördert.

Die Klebungen der untersuchten CFK-Fügungen wurden dankenswerter Weise durch die Dow Europe GmbH ausgeführt.

Die Daten aus Scherzug- und Zugversuchen an Klebstoff-Substanzproben wurden dankenswerter Weise durch die Daimler AG zur Verfügung gestellt.

