Prozesskette zur strukturmechanisch begründeten Reparatur

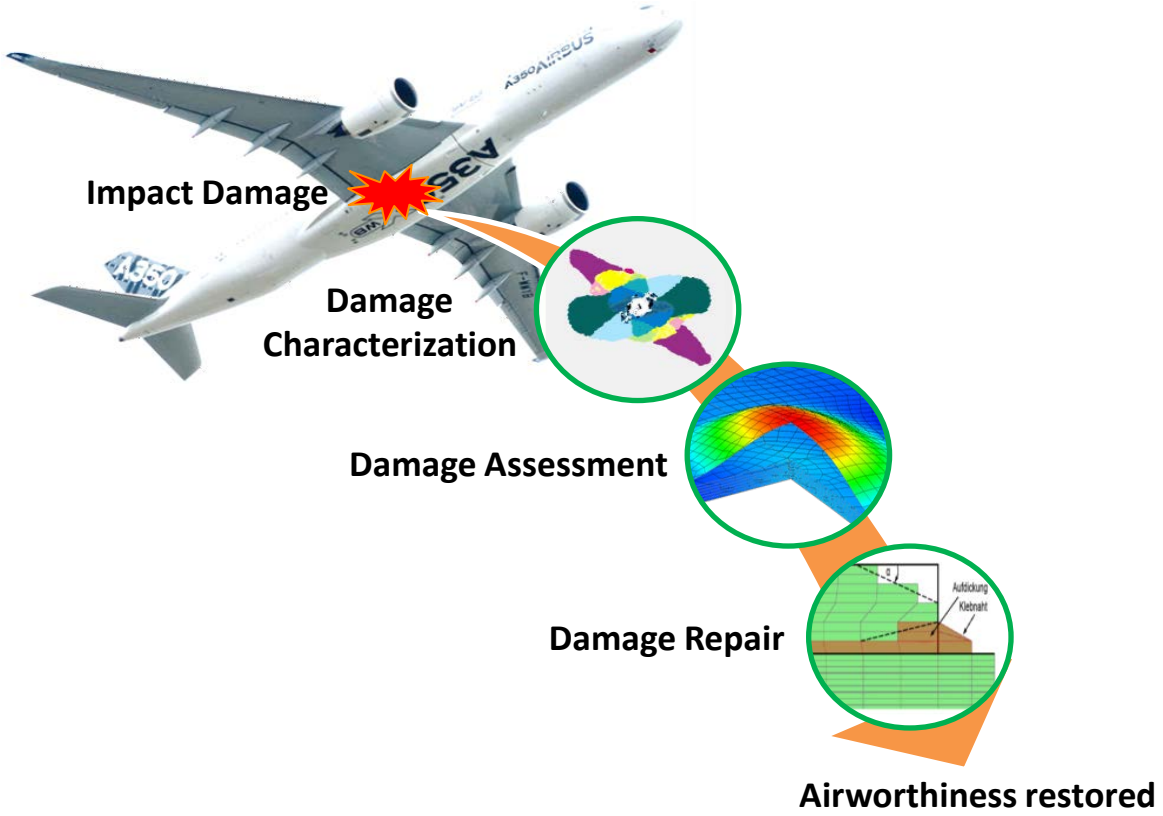
Dipl.-Ing. Christoph P. Dienel, Dr.-Ing. Tobias Wille

Abteilung für Strukturmechanik
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
DLR e.V.

DLR

Gliederung

- **Hintergrund und Motivation**
- **Schadenscharakterisierung**
- **Schadensbewertung und Reparaturnachweis**
- **Zusammenfassung**



A350 Picture by © Airbus S.A.S, 2014

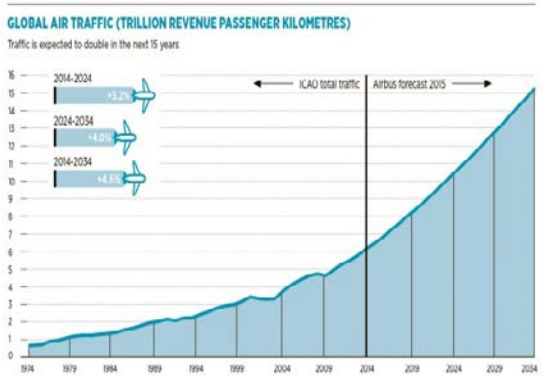
Hintergrund und Motivation

Wachsende Anforderungen an die Luftfahrt verlangen nach neuen Schadensbewertungsmethoden

Wettbewerbsfähigkeit

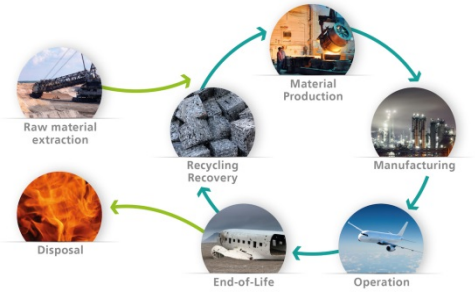
Posted by: Bo Langkilde

Verfügbarkeit



Source: Internactional Civil Aviation Organization (ICAO)/ Airbus 2015

Eco-Design



Source: CleanSky

Sicherheit

Source: Embry-Riddle Aeronautical University

Passagier-Zufriedenheit

Source:Topsy.one

Neue Schadensbewertungsmethoden erfordern die Akzeptanz der Behörden, Hersteller und Betreiber.

Hintergrund und Motivation

F: Wann muss eigentlich repariert werden?

A: siehe herkömmlichen Schadensbewertungsprozess

Schadensdetektion
- Sichtprüfung
- Zerstörungsfreie Prüfung
- Structural Health Monitoring

Beschreibung des Schadens
- Identifizierung der beschädigten Struktur
- Beschreibung des Schadens

Schadensbewertung

basierend auf Structural Repair Manual (SRM)

Zulässige Schäden

→ kosm. Reparatur

Unzulässige Schäden

→ strukt. Reparatur od. Austausch

- **Die entscheidende Rolle des Structure Repair Manuals:**
  - Definiert zulässige Schadensgrößen
  - Spezifiziert Reparaturmaßnahmen

- **Spezifikationen des SRM wirken sich auf die Verfügbarkeit, Umweltfreundlichkeit, Wettbewerbsfähigkeit, Kundenzufriedenheit und Sicherheit des Flugzeugs aus**

Hintergrund und Motivation

F: Was ist die Grundlage des Structure Repair Manuals?

A: Schadenstolerante Auslegungsphilosophie

- Forderung: Bis zur Schadensdetektion muss die beschädigte Struktur *Ultimate Load* ertragen können, ohne zu versagen.
- „Impact Threat“ Charakterisierung stellt Zusammenhänge zwischen
  - Auftretenswahrscheinlichkeit und Einschlagenergie,
  - Einschlagenergie und Sichtbarkeit des Schadens bzw. Schadensgröße und
  - Schadensgröße und Restfestigkeit her.
- Struktur wird so ausgelegt, dass der kritische „Impact Threat“ einen per Sichtprüfung detektierbaren Schaden (BVID) hinterlässt.
- Strukturauslegung (Design-Phase) und Schadensbewertung (Betrieb) erfolgen für BVID

Zusammenhänge werden durch viele Parameter beeinflusst, die nicht individuell berücksichtigt werden können → konservative Kriterien für Auslegung und Schadens-bewertung

Dieser konservative Ansatz beeinträchtigt die Erfüllung der wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen

„Impact Threat“-Charakterisierung

Erfassung realer Betriebsschäden

↓

Reproduktion der erfassten Schäden an repräsentativen Teststrukturen

↓

Ableitung des „Impact Threat“[1]

↓

Kritischste „Impact Threat“ je Bauteil ist dimensionierend

↓

Tests auf Coupon- bis Komponenten-Level

↓

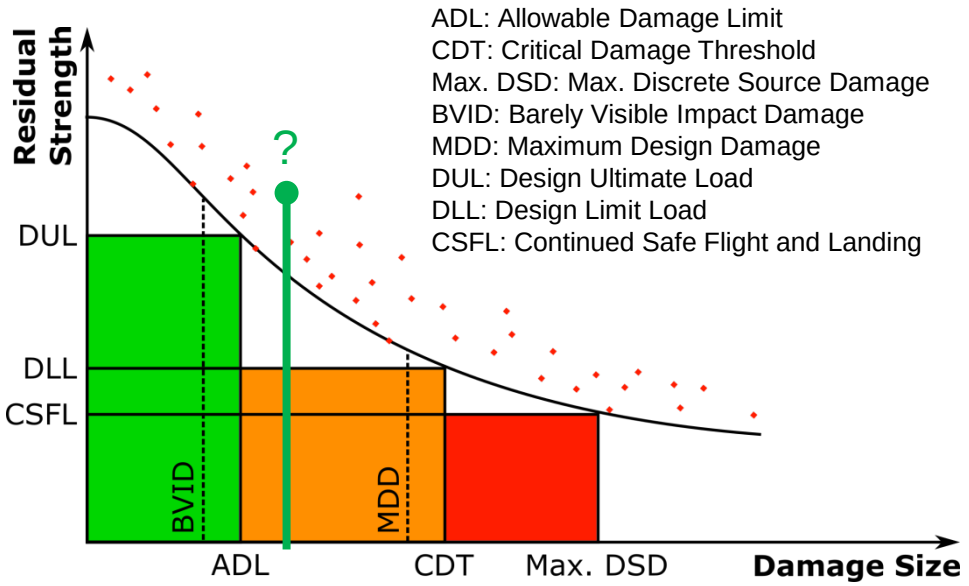
Ableitung und Validierung der Auslegungskriterien

[1] „Impact Threat“: Mathematische Zusammenhang zwischen der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Einschlags bei einer bestimmten Einschlagsenergie.

Hintergrund und Motivation

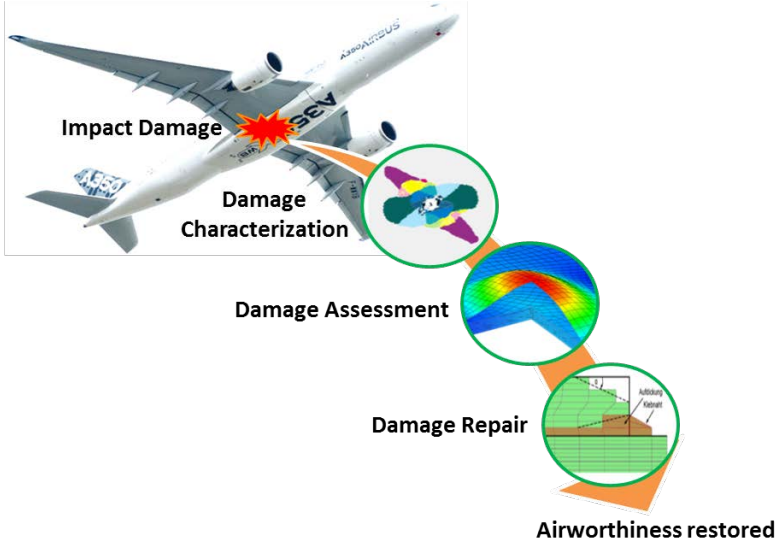
Herkömmlicher Ansatz zur Schadensbewertung:

- Kategorisierung der Schäden nach Detektierbarkeit und Größe der Schadenseinhüllenden
  - =ADL: detektierbar durch Sichtprüfung → Reparatur bei nächster Inspektion
  - >ADL: kurzfristig detektierbar → sofortige Reparatur
  - >CDT: sofort detektierbar → sofortige Reparatur
- Konservativer Zusammenhang zwischen Schadensgröße und Restfestigkeit



Vorgestellter Ansatz zur ergänzenden Schadensbewertung:

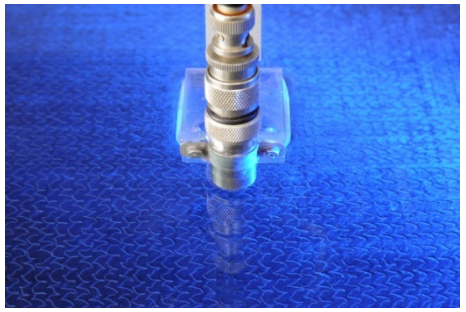
- Erfassung aller strukturmechanisch relevanten Schadensmerkmale
- Individuelle Schadensbewertung durch Berechnung der Restfestigkeit
- Reparaturnachweis durch Restfestigkeitsberechnung



A350 Picture by © Airbus S.A.S, 2014

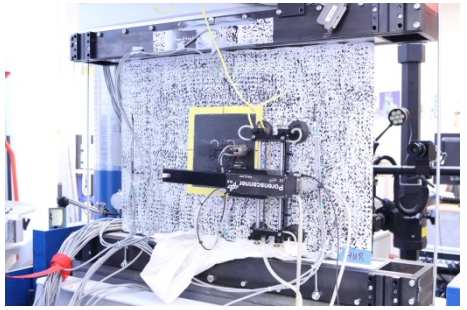
Schadenscharakterisierung

- **Schadensbild zeigt verschiedene aus verschiedenen Schadensmodi**
  - Delaminationen
  - Faserbrüche
  - Matrixrisse, *fiber pull-out*, Faser-Matrix-Ablösung, plastische Verformung, etc.
- **Die Komplexität des Schadensbildes bedarf komplementärer ZfP-Methoden**
  - Pulse-Echo-Ultraschall: Charakterisierung des Delaminationsschadens
  - Röntgen-basierte Methoden (Mikro-CT, Laminographie, Stereo-Röntgen, etc.): Charakterisierung von Matrix- und Faserbrüchen sowie von Delaminationen
- **Schritte zur Identifikation der Schadensmodi**
  1. Datensegmentierung
  2. Datenklassifizierung
  3. Dateninterpretation



Pulse-echo ultrasonic inspection by © DLR, 2014

X-ray micro-CT by © TPW Prüfzentrum, 2016

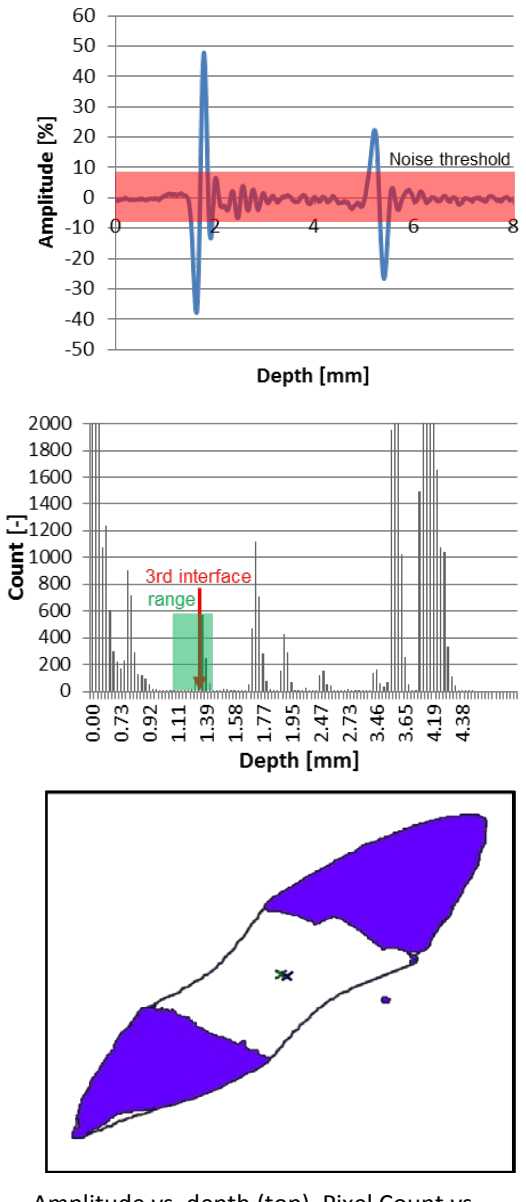


US-Inspektion an repräsentativem Paneel © DLR, 2016

Schadenscharakterisierung

Verarbeitungsschritte zur Auswertung des Ultraschall-Inspektionsergebnisses
Erfassung von Echo-Amplituden (C-Scan) und Impuls-Laufzeit (D-Scan) für jeden Messpunkt (Pixel)

- **Daten-Segmentierung:**
  - Unterscheidung zwischen relevanten Amplituden und Signal-Rauschen
- **Daten-Klassifizierung:**
  - Voraussetzung: vorgegebener Lagenaufbau und -Dicke
  - Annahme: Delaminationen stellen sich zwischen Lagen unterschiedlicher Orientierung ein
  - Pixel in der Umgebung einer bestimmten Interface-Tiefe werden zusammengetragen und einer Delamination zugewiesen
- **Daten-Interpretation:**
  - Physikalisch sinnvolle Ableitung der Delaminationskontur unter Berücksichtigung empirischer Beobachtungen



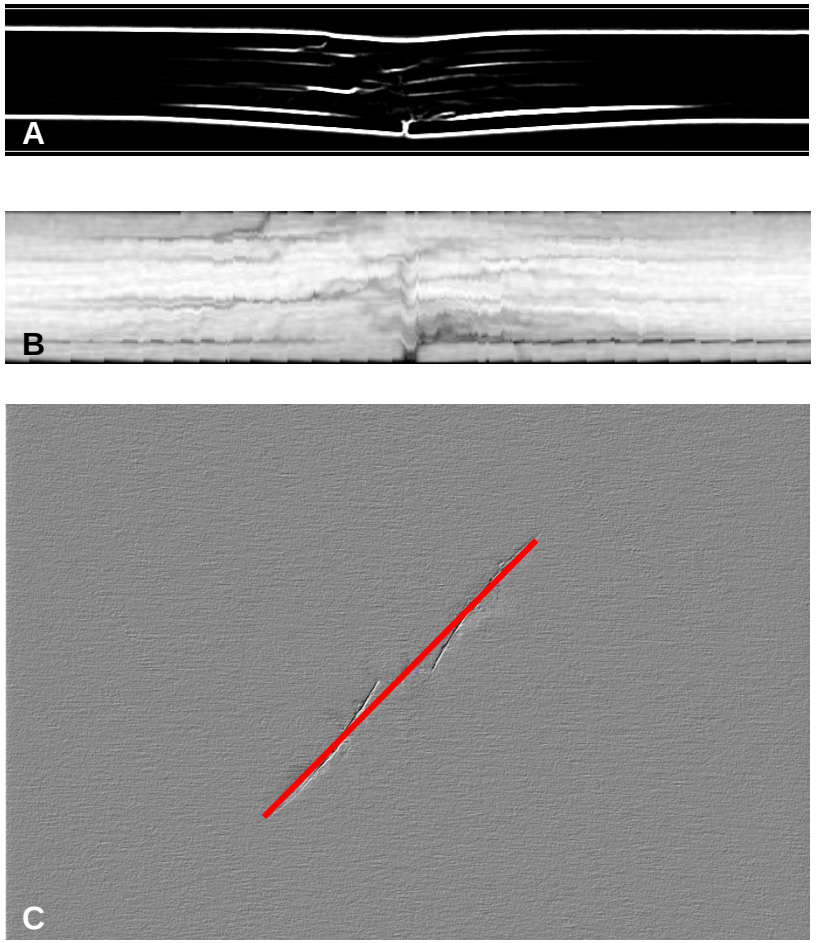
Amplitude vs. depth (top). Pixel Count vs. Depth (center). D-Scan (bottom)

Schadenscharakterisierung

Verarbeitungsschritte zur Auswertung des Mikro-CT-Inspektionsergebnisses
Wiedergabe der räumlichen Verteilung der Röntgen-Strahlungs-Absorption im Probekörper

- **Daten-Segmentierung**
  - Weiterentwicklung des Frangi-Filters[1] zur Hervorhebung von Defektkanten und Unterdrückung von Signal-Rauschen bzw. sehr kleinen Defekten
- **Daten-Klassifikation:**
  - Unterscheidung der Defekte entsprechend ihrer Orientierung zu Faser- und Zwischenfaserbruch sowie Delaminationen
- **Data Interpretation:**
  - Strukturmechanisch sinnvolle Ableitung der FB-Geometrie
  - Zuweisung zu entsprechender Schicht

[1] Frangi et al. – 1998 – „Multiscale Vessel Enhancement Filtering“

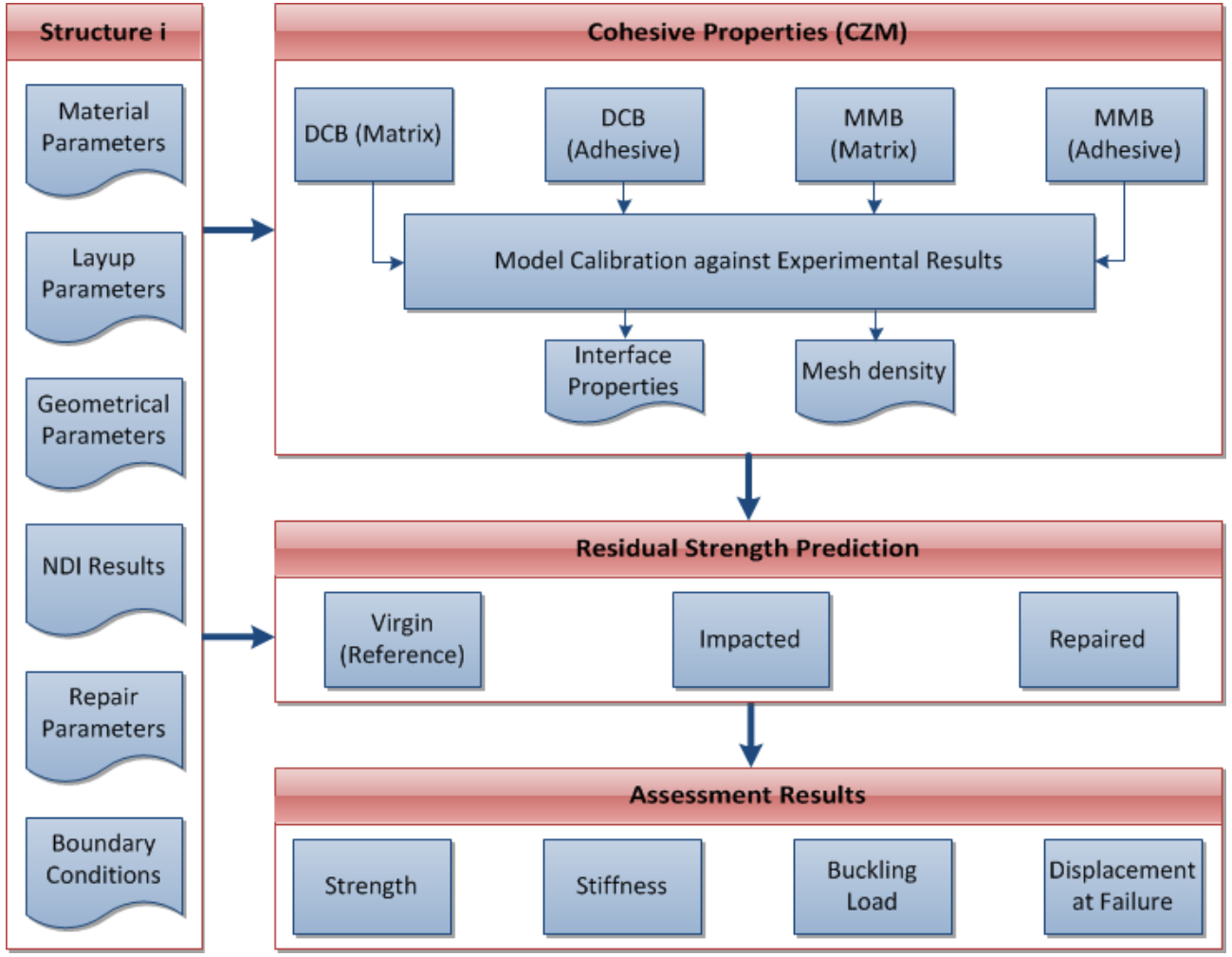


Mikro-CT-Auswertung: Filter-Antwort(A), Schadensklassifikation (B) und Interpretation des Schadensbildes (C)

Schadensbewertung und Reparaturnachweis

Individuelle Berechnung der Restfestigkeit für verschiedene Strukturzustände mit FEM

- Eingaben:
  - Materialparameter (aus Versuchen)
  - Lagenaufbau
  - Bauteilgeometrie
  - Schadensgeometrie (aus DaMapper)
  - Reparatur-Parameter
  - Randbedingungen
  - Kohäsive Eigenschaften (aus Kalibrierung)
- Ausgaben:
  - Restfestigkeit
  - Reststeifigkeit
  - Beullast
  - Bruchverschiebung

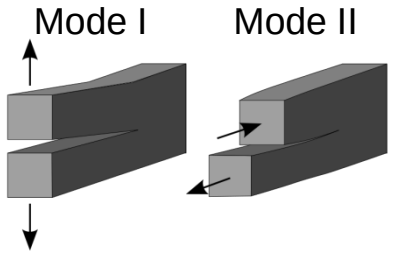


Flussdiagramm über individuelle Berechnung der Restfestigkeiten

Schadensbewertung und Reparaturnachweis

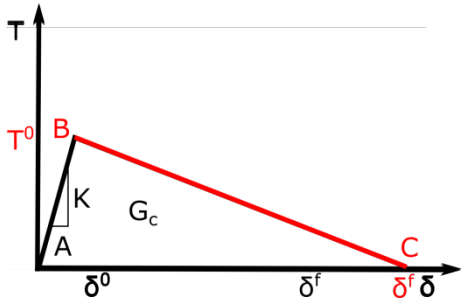
Strukturverhalten bestimmende Phänomene müssen vom Modell hinreichend abgebildet werden:

- **Initiierung und Fortschritt von kohäsivem Versagen in der Matrix und in der Klebschicht wird durch kohäsives Zonen Modell beschrieben**
  - Definition der CZM-Parameter:
    - Energie-Freisetzungsraten für verschiedene gemischte Modi R aus Versuchen (G_{ic}, G_{IIc} und η)
    - Steifigkeit K aus numerischen Parameterstudien
    - Traktion τ^0 und min. Elementkantenlänge l_e aus Simulation für „worst-case“ $R = 0$ (Mode I)
  - Modellierung der Matrix-Interfaces mittels CZM-Kontaktbedingungen
  - Abbildung der Klebschichten mittels kohäsiven 3D-Elementen
- **Kontaktbedingung gegen Körper-Durchdringung**
- **Intralaminares Versagen**



Benzeggagh-Kenane-Gesetz für mixed-Mode

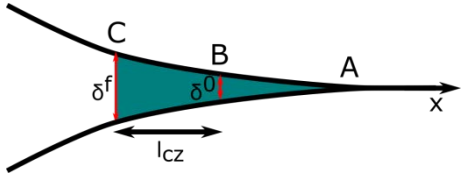
$$G_c = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \cdot R^{\eta}$$



Bi-lineares Traktions-Rissöffnungsgesetz

Element-Kantenlänge

$$l_e = \frac{1}{4} M \frac{E' \cdot G_c(h)}{(\tau^0)^2}$$



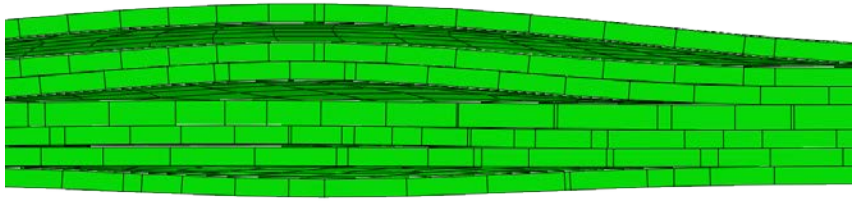
Kohäsive Zone

A: mathematische Riss-Spitze
B: Kohäsive Riss-Spitze
C: Materielle Riss-Spitze

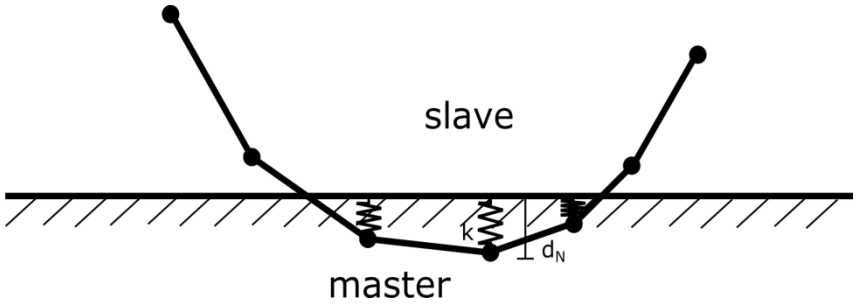
Schadensbewertung und Reparaturnachweis

Strukturverhalten bestimmende Phänomene müssen vom Modell hinreichend abgebildet werden:

- **Initiierung und Fortschritt von kohäsivem Versagen in der Matrix und in der Klebschicht wird durch kohäsives Zonen Modell beschrieben**
- **Kontaktbedingung gegen Körper-Durchdringung bei Sublaminat-Beulen**
  - Penalty-Methode führt Feder an jedem Kontaktpunkt ein, die der Körper-Durchdringung entgegen wirkt.
  - Penalty-Steifigkeit K möglichst gering ($O(E_{33}/t_{layer})$)
- **Intralaminares Versagen**



Interaktion zwischen Sublaminaten (Schnittansicht)



Penalty-Methode

Schadensbewertung und Reparaturnachweis

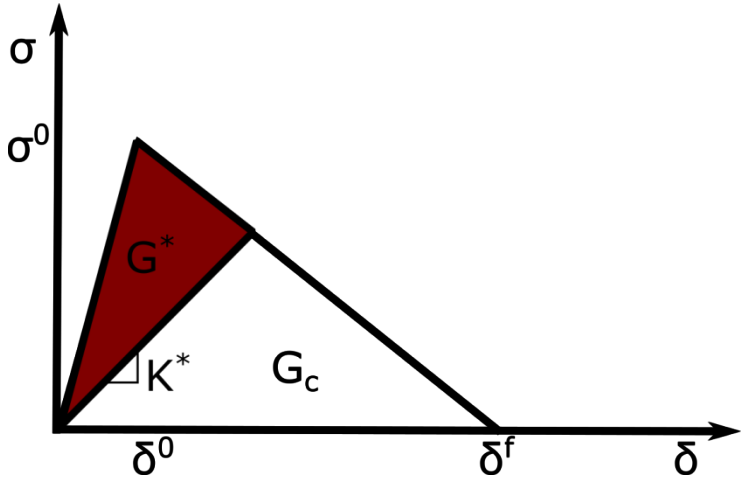
Strukturverhalten bestimmende Phänomene müssen vom Modell hinreichend abgebildet werden:

- **Initiierung und Fortschritt von kohäsivem Versagen in der Matrix und in der Klebschicht wird durch kohäsives Zonen Modell beschrieben**
- **Kontaktbedingung gegen Körper-Durchdringung**
- **Intralaminares Versagen**
  - Schädigungsbeginn durch Hashin-Kriterium beschrieben
  - Schadensfortschritt beschrieben durch Degradation der Steifigkeitsmatrix als Funktion der dissipierten Energie
  - Materialparameter:
    - Festigkeiten und Steifigkeiten experimentell ermittelt
    - Bruchzähigkeiten für Faser und Matrix aus Literatur bzw. Versuchen

$$F^{FT} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T}\right)^2 \quad F^{FC} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^C}\right)^2 \quad F^{MT} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2$$

$$F^{MC} = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \cdot \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2$$

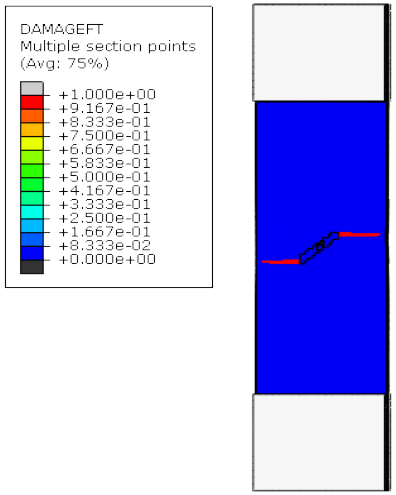
Schadensinitiierung nach Hashin
(FT: Zugversagen an Faser, FC: Druckversagen an Faser,
MT: Zugversagen an Matrix, MC: Druckversagen an Matrix)



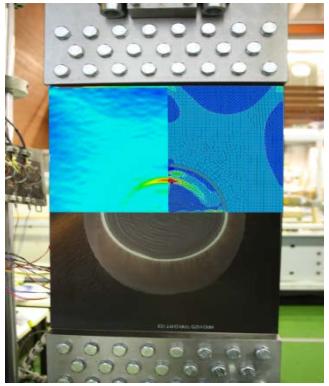
Schadensbewertung und Reparaturnachweis

Coupon-Zugversuche (quasi-statisch)

- Tension after Impact (TAI) @ 40J
  - Lasteinleitung über Aufleimer
  - Restfestigkeit deutlich von Faserbrüchen abhängig
- Tension repaired (TEN) @ ratio 1:30
  - Lasteinleitung über Aufleimer
  - Mit Decklagen (oben/unten) und einer Füll-Lage
  - Reparatur stellt ursprüngliche Festigkeit nicht gänzlich her
- Schlupf und Verformung durch Lochleibung in den Modell-Randbedingungen nicht abgebildet. Daher Unterschätzung der Restfestigkeit.

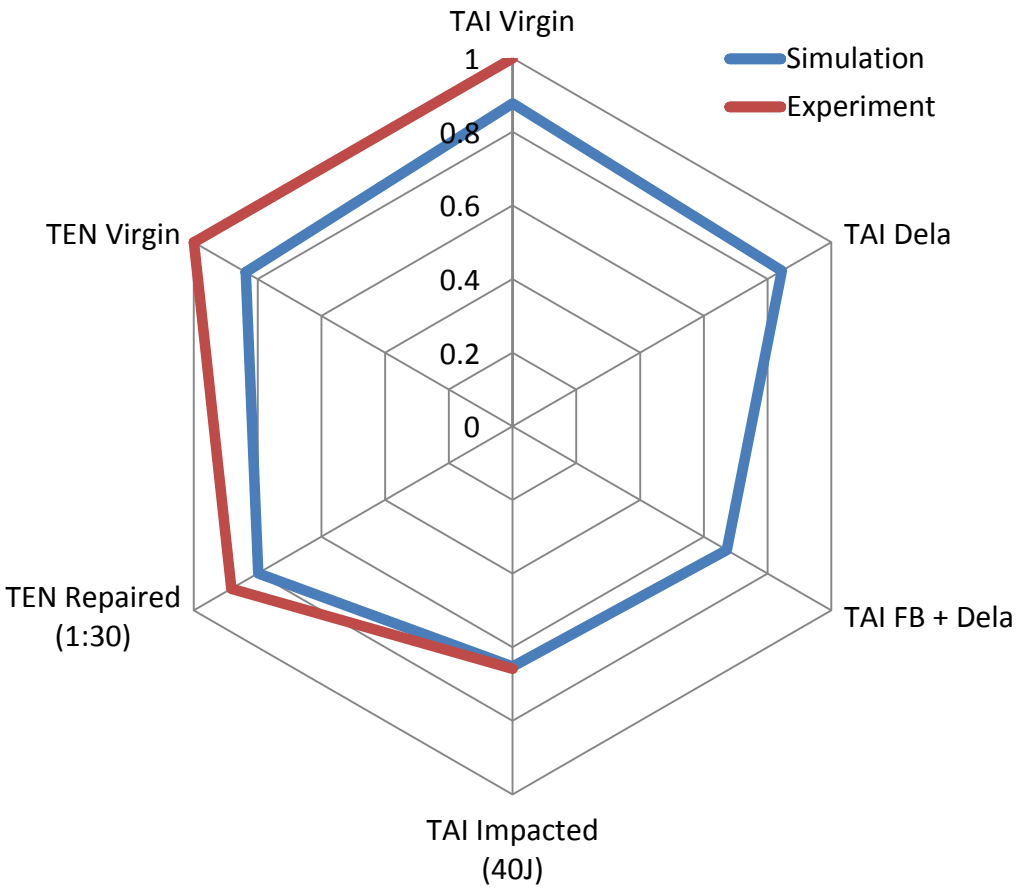


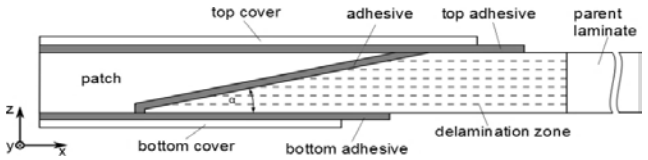
TAI: berechneter Faserbruch in 0°-Lage



TEN-Probe: Dehnungsverteilung mit DIC gemessen (o.l.) und berechnet (o.r.)

Zug-Restfestigkeit (normiert)



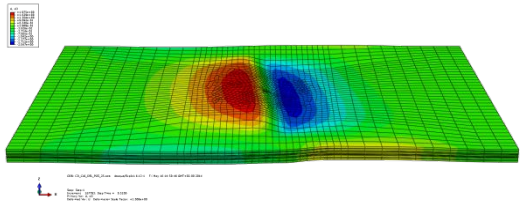


Schematische Darstellung der Klebereparaturausführung

Schadensbewertung und Reparaturnachweis

Coupon-Druckversuch (quasi-statisch)

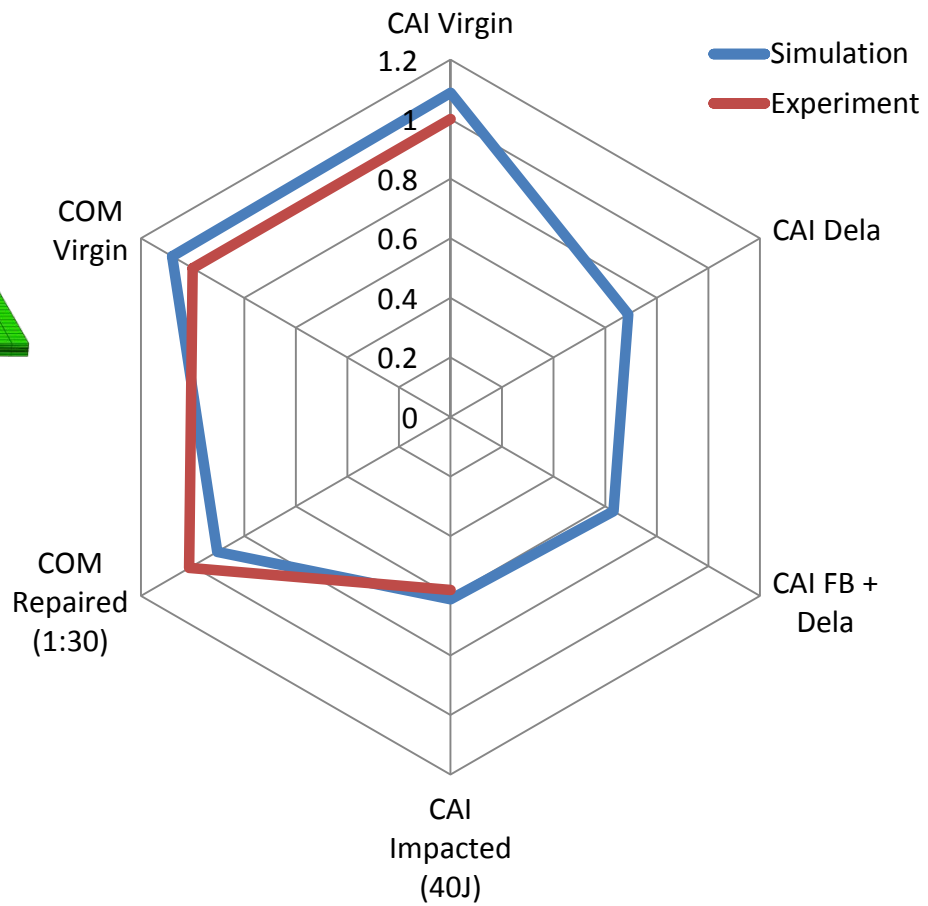
- Compression after Impact (CAI) @ 40J
  - Versuchsaufbau verhindert Stabknicken
  - Delaminationen → Sublaminatbeulen → Absenkung der Restfestigkeit
- Compression repaired (COM) @ ratio 1:30
  - Mit Decklagen (oben/unten) und einer Füll-Lage
  - Reparatur stellt ursprüngliche Festigkeit gänzlich her
- Druck-Restfestigkeit ist von lokalen Imperfektionen in der Probe und Lasteinleitung abhängig.

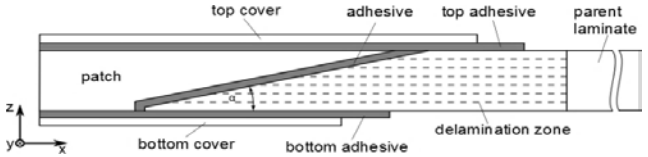


CAI: Stabilitäts-getriebenes Versagen

Versuchsaufbau für druckbeanspruchte Reparatur-Probe

Druck-Restfestigkeit (normiert)



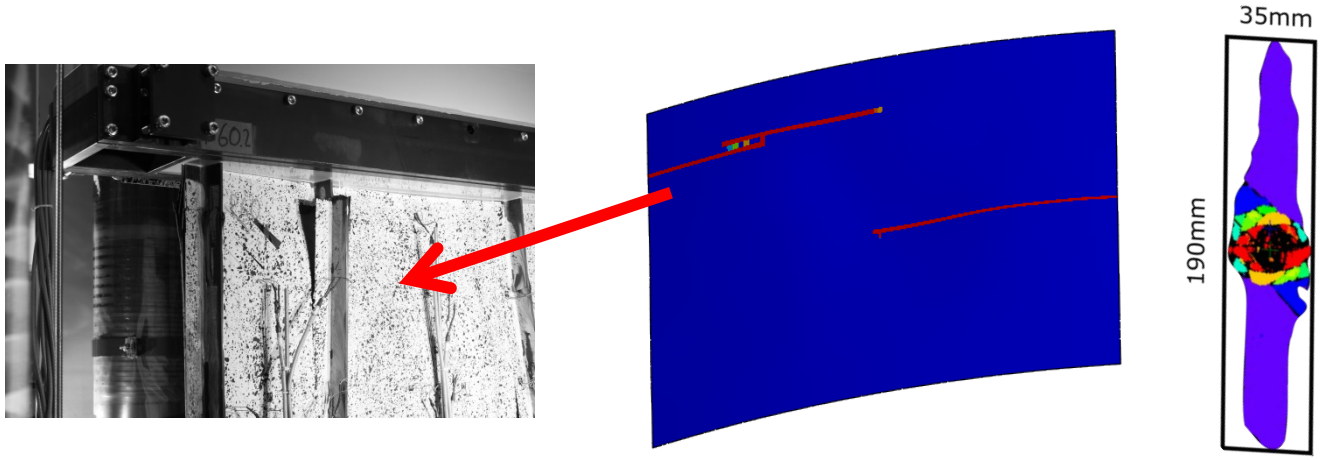


Schematic of the parametric model definition

Schadensbewertung und Reparaturnachweis

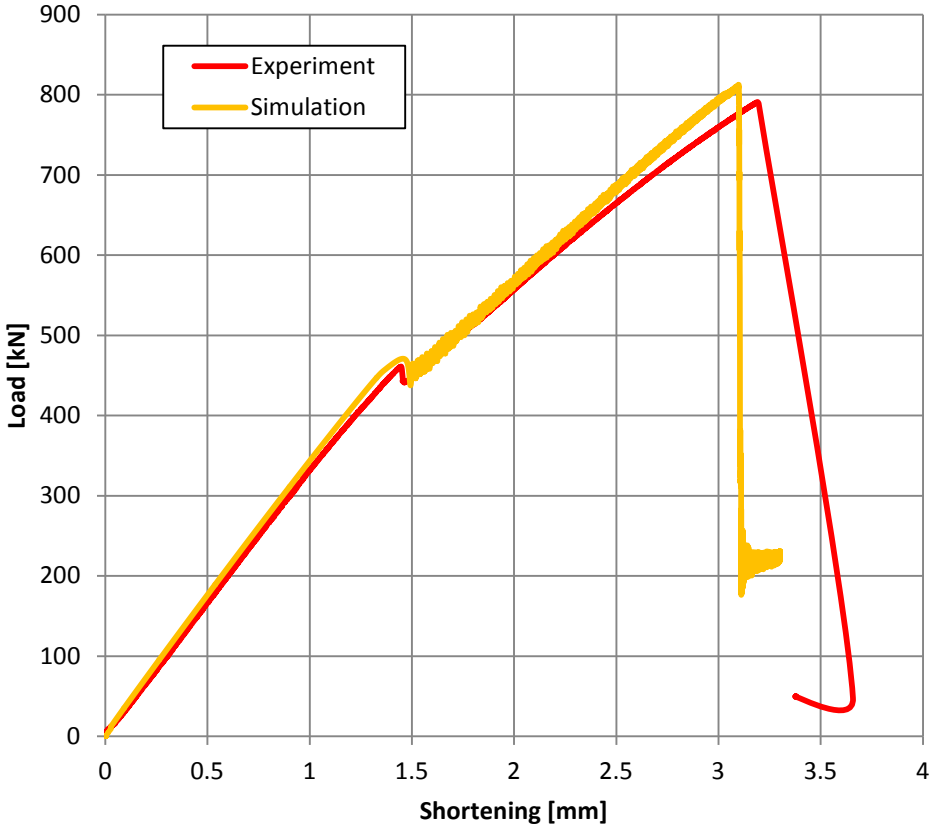
Validierung durch Paneel-Versuche (quasi-statisch)

- Impact mit 140J im eingespannten Zustand
- In-Situ Ultraschall: Einhüllendes Schadensrechteck: ca. 190mm x 35mm
- Automatisches Schadensübertragung und Strukturanalyse
- Abweichung zwischen Experiment und Simulation für Beullast und Restfestigkeit beträgt <3%



Versagen am Paneel im Versuch (links) , berechneter Faserbruch am Paneel (links), Delaminationsschaden nach 140J- Einschlag

Last-Stauchungs-Kurve des beschädigten Paneels



Zusammenfassung

- Automatische Schadensübertragung von NDT zu Strukturanalyse entwickelt
- Neue individuelle Schadensbewertung ermöglicht
  - Verringerung von Konservatismen in der Schadensbewertung
  - Reduktion von Reparaturmaßnahmen durch strukturmechanische Betrachtung
- Nachweis der Vorhersage-Qualität an Coupons und Paneelen gezeigt unter Beachtung von erforderlichen Materialmodelle und Randbedingungen
- Ausblick: Anwendung und Erweiterung der Methode auf Herstellungsdefekte (Delaminationen und Porositäten)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dipl.-Ing. Christoph P. Dienel

Tel. +49 (0)40 513096-819
Christoph.Dienel@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Faserverbundleitbau und Adaptronik
Abteilung Strukturmechanik
Hein-Saß-Weg 22
21129 Hamburg