KUNSTSTOFF TECHNIK LEOBEN

KONSTRUIEREN IN KUNST- UND VERBUNDSTOFFEN

Simulation polymerer Verbundwerkstoffe zwischen Theorie und Praxis

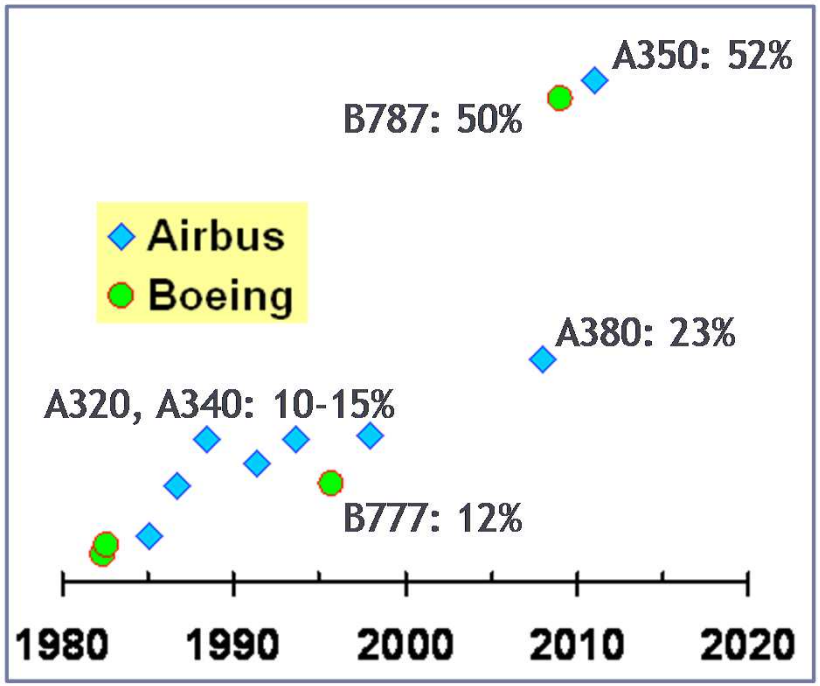
Univ. Prof. Clara Schuecker

Department of Polymer Engineering and Science
Montanuniversität Leoben

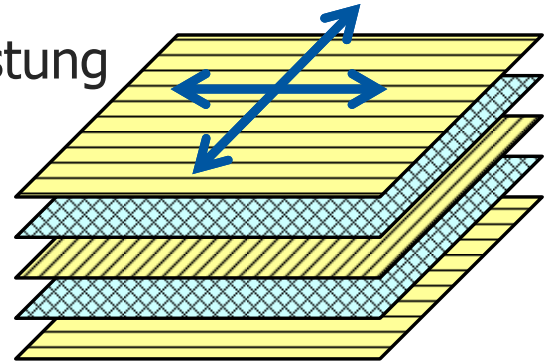
MONTAN UNIVERSITÄT

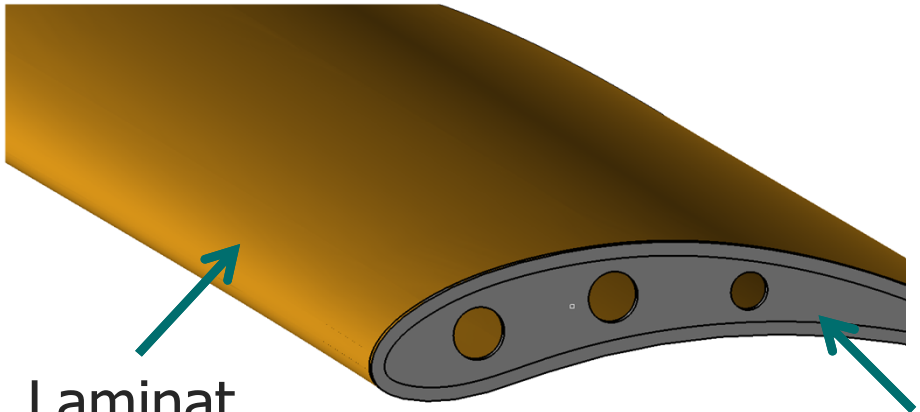
Otto Gloeckel-Strasse 2, A-8700 Leoben, Tel.: +43 3842 402 2501
verbund@unileoben.ac.at
www.kunststofftechnik.at

Entwicklung Endlosfaser Verbundwerkstoffe

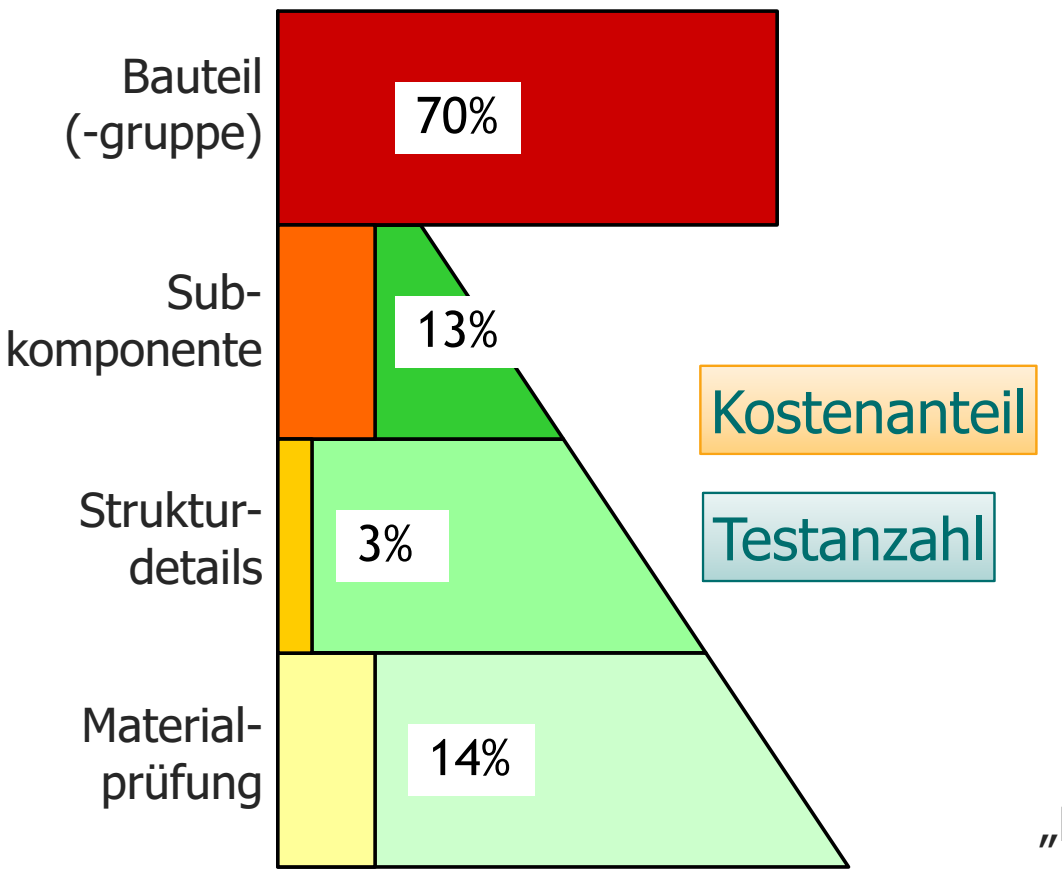


ebene Belastung

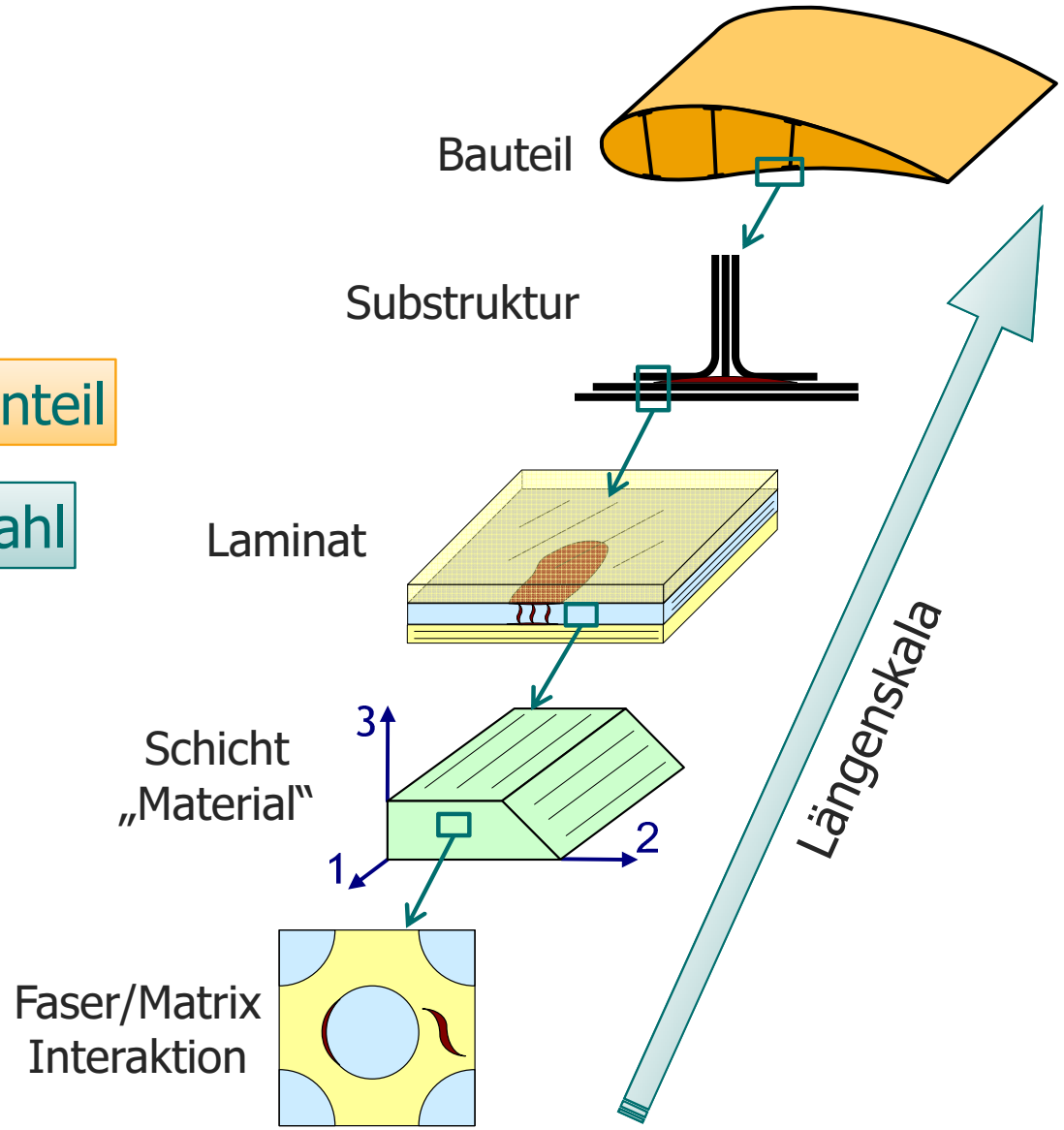




Hierarchische Struktur

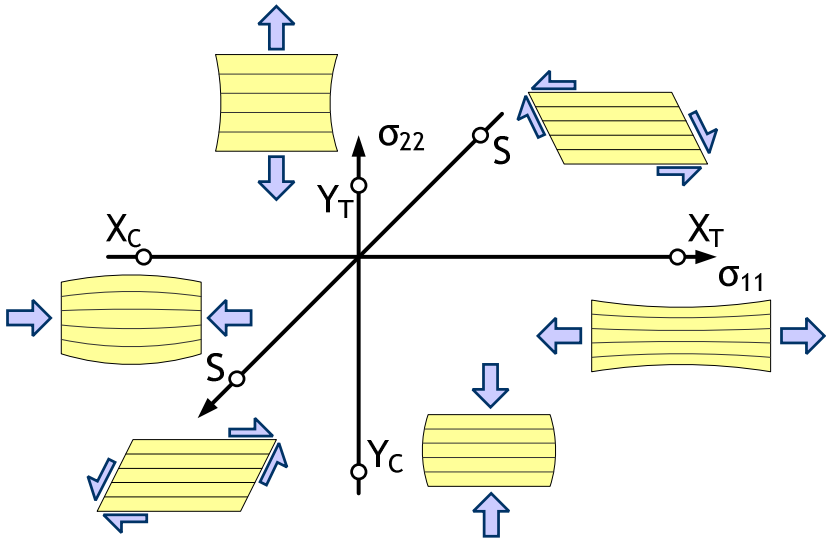


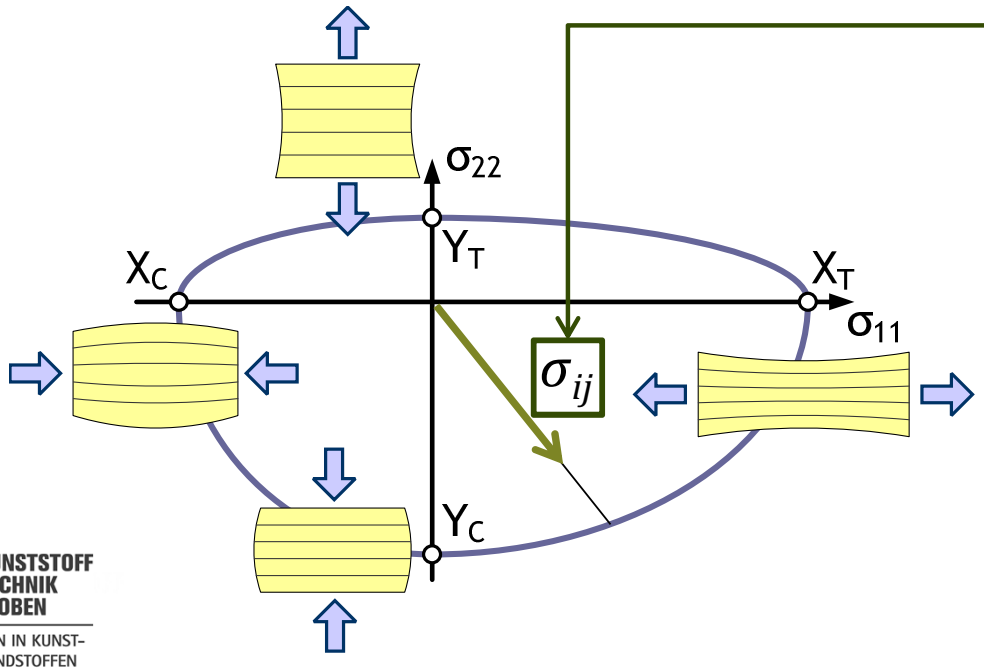
[Lang, Tesch 1988]



Versagensbewertung – First Ply Failure

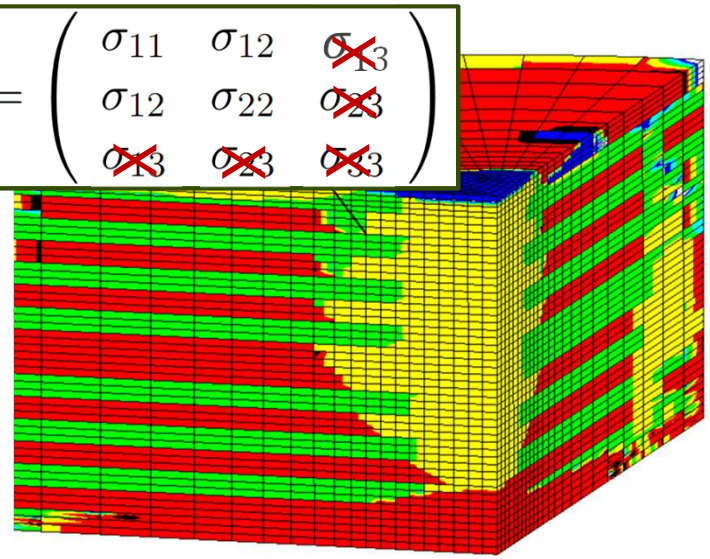
- Materialcharakterisierung (ESZ)
  - Tests an UD-Proben:
    - » 3 Steifigkeiten
    - » 5 Festigkeiten
- Grundannahme:
  - Einzelschicht verhält sich wie Schicht im Schichtverbund
  - Schichtversagen = Laminatversagen
- orthotrope Versagensfläche





ESZ

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cancel{\sigma_{13}} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \cancel{\sigma_{23}} \\ \cancel{\sigma_{13}} & \cancel{\sigma_{23}} & \cancel{\sigma_{33}} \end{pmatrix}$$



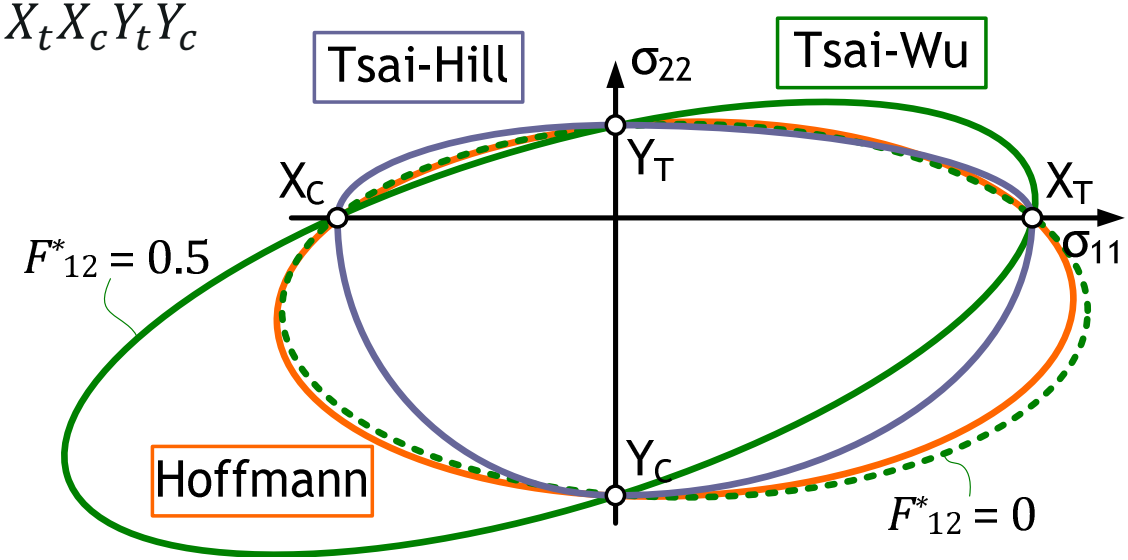
Tsai-Wu Kriterium (1971)

- quadrat. Polynom: $f = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12}$
- Definition der Koeffizienten:
  - reine Schubbelastung von Vorzeichen unabhängig → F6 = 0
  - weitere 5 Terme aus einachsigen Versuchen:

$$\Rightarrow \quad f = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + 2\boxed{F_{12}}\sigma_1\sigma_2$$

  - zusätzlicher Parameter F_{12}
    - » aus biaxialen Versuchen
    - » typische Annahme $F_{12} = -0.5/\sqrt[2]{X_t X_c Y_t Y_c}$

- Problem: nicht konservativ!
  v.a. bei UD-Schicht Faser-Druck
- weitere Kriterien
  - Tsai-Hill
  - Hoffmann
  - ...

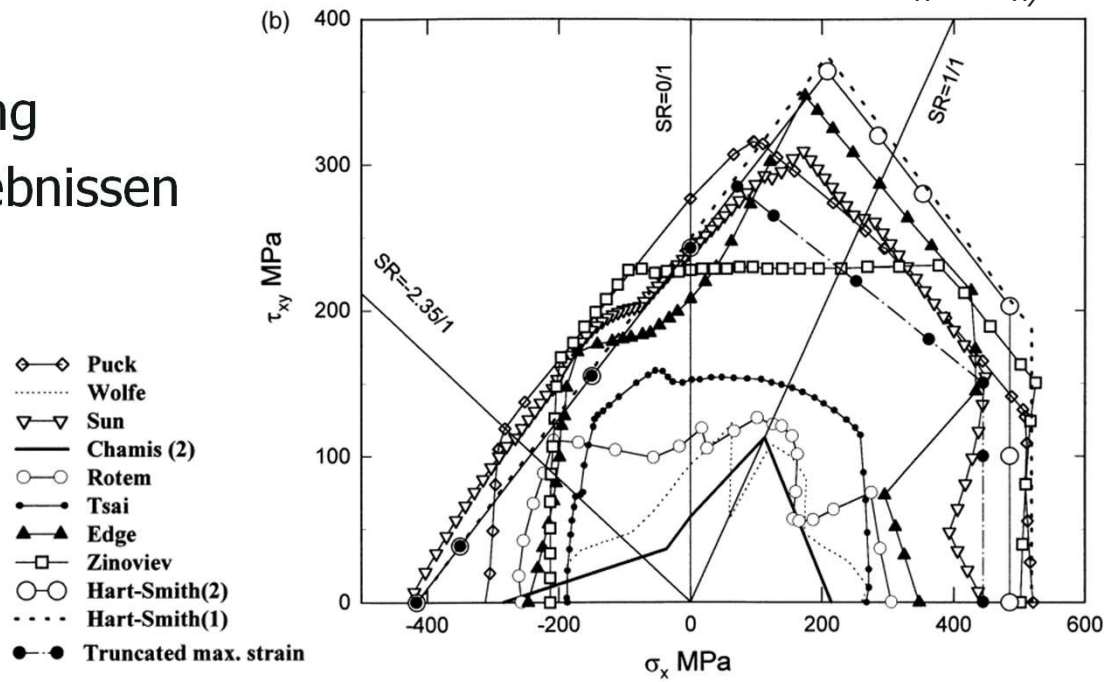


World-Wide Failure Exercise (1998 – 2002)

- 14 definierte Test Cases (CFK / GFK, UD- und Mehrachsige Gelege)
  - Vorgegebene Materialparameter
  - Uni- und Biaxiale Belastung
  - Gesucht: Spannungs/Dehnungs-Kurven, Biaxiale „Failure Envelopes"
- Blindstudie – gleichzeitige Evaluierung der Test-Cases durch:
  - 12 ausgewählte Versagenskriterien
  - experimentelle Tests
- 3-Teilige Publikation:
  - Part A: Vorhersage Berechnung
  - Part B: Vergleich mit Testergebnissen
  - Part C: Anpassungen, zusätzliche Kriterien, Empfehlungen

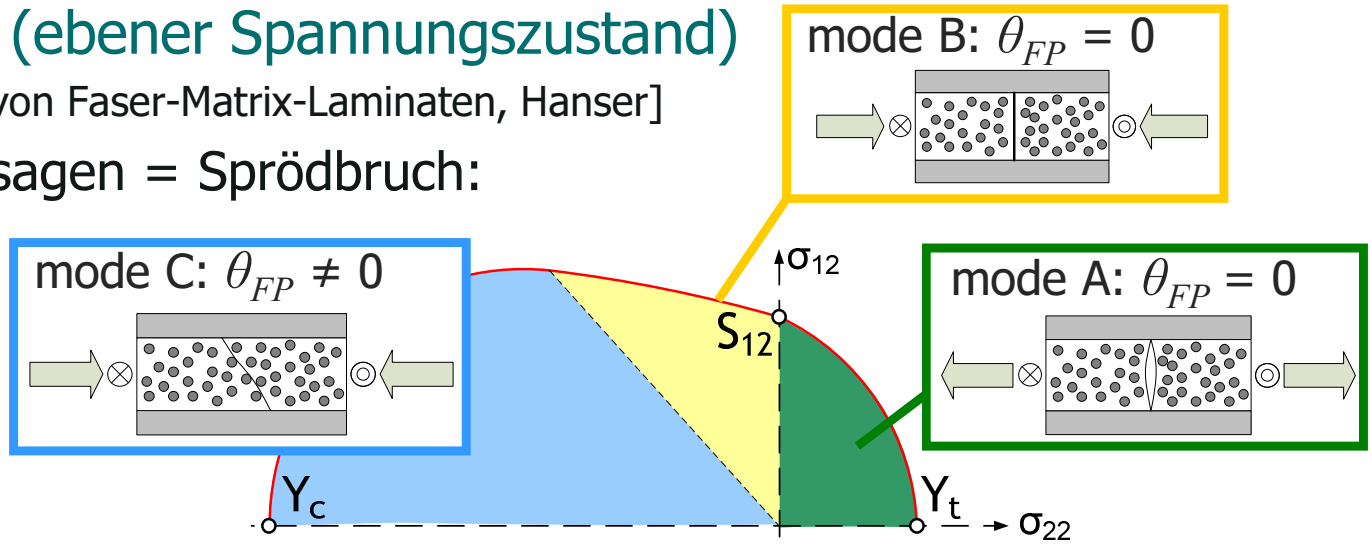
[Hinton, Kaddour, Soden, Special Issue: Composites Science and Technology; Elsevier 2004]

E-glass/LY556 (90/±30/90)
final failure stress envelope (σ_x vs τ_{xy})

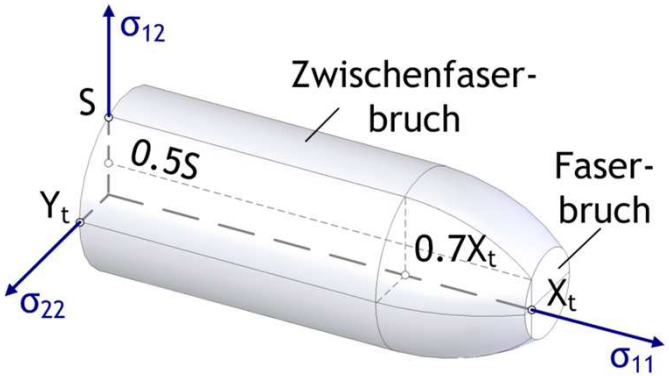


WWFE Erkenntnisse

- Sieger: Puck Kriterium (ebener Spannungszustand)
  [Puck 1996: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten, Hanser]
  - Matrixdominiertes Versagen = Sprödbruch:
    - » Zugbruch ($\sigma_{22} > 0$)
    - » Schubbruch mit Druckbehinderung ($\sigma_{22} < 0$)



  - Faserversagen:
    - » max.Spannung in Faser-Richtung
    - » Interaktion wenn $|\sigma_{11}| > 70\%\ X_{t,c}$

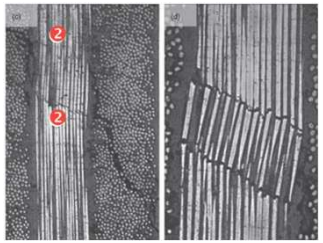


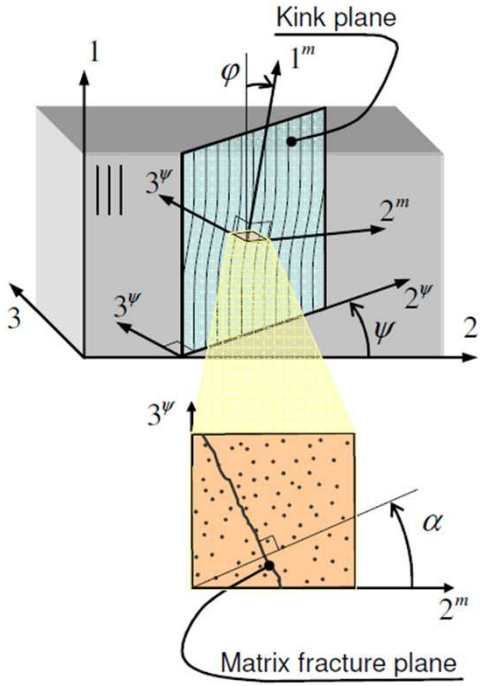
- teilweise erhebliche nicht-lineare Effekte
- Empfehlung für Kriterien basierend auf Mechanismen:
  - bessere Übereinstimmung
  - zusätzliche Information über Schadensmechanismus

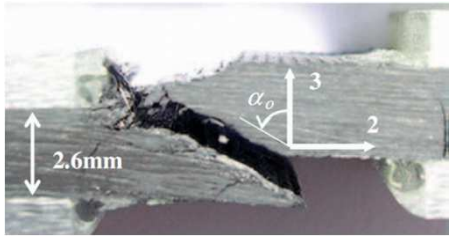
Erweiterung für 3-dimensionale Belastung

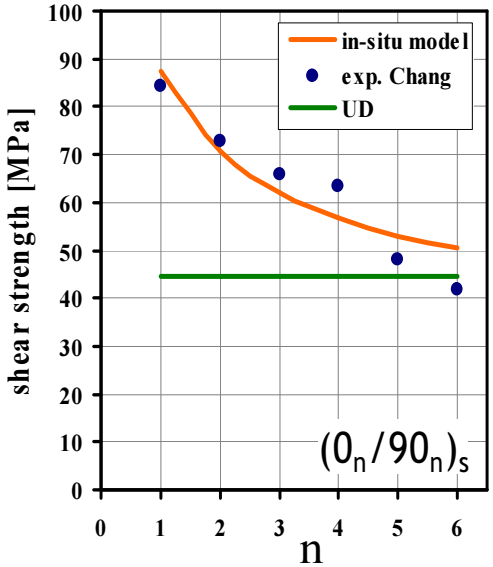
[Pinho, Darvizeh, Robinson, Schuecker, Camanho; J.Comp.Mat 2012]

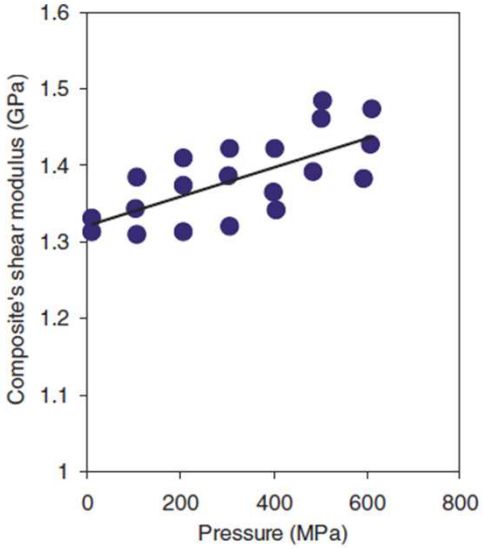
- LaRC04 Versagenskriterium:
  - Faser-Zugversagen → max. Spannung in Faserrichtung
  - Faser-Druckversagen durch „Kinking"
    - » Versagen durch Matrixbruch in Kink-Ebene (φ, ψ)
  - Matrixbruch (spröde):
    - » Zugbruch ($\sigma_{22} > 0$)
    - » Druckbruch ($\sigma_{22} < 0$) ...ähnlich Puck Ansatz
- In-Situ Effekt
- hydrostatischer Effekt







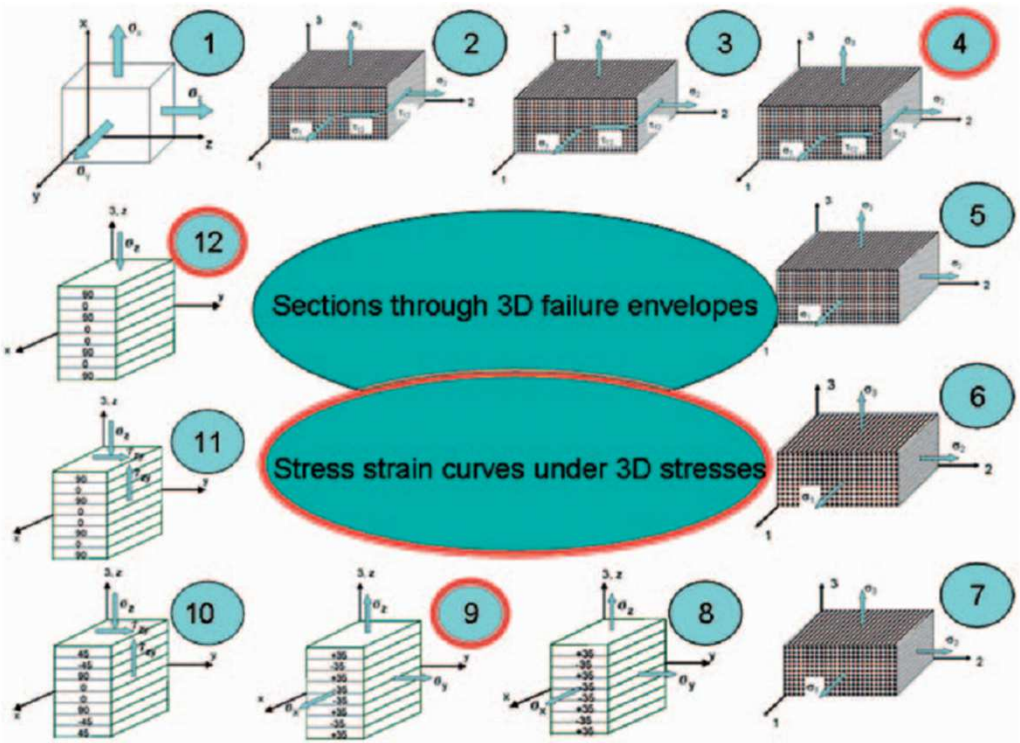




World-Wide-Failure-Exercise II

- Vergleich 3-dimensionaler Versagenskriterien
  - 12 Test Cases – Fokus auf 3-achsige Spannungszustände
  - 12 Versagenskriterien:
    - » Bogetti, Carrere, Christensen, Cuntze, Hansen, Hashin, Huang,
    - » Pinho, Puck, Tsai-Ha, Wolfe

- Blindstudie
  - WWFEii-Part A:
    Vorhersage Berechnung
    - » J.Comp.Mat. special Issue
      Sept. 2012; 46 (19-20)
  - WWFEii-Part B:
    Vergleich mit Testergebnissen
    - » J.Comp.Mat. special Issue
      March 2013; 47 (6-7)



WWFEii – 3D-failure

- J-Comp-Mat Special Issues: Part A 9/2012, Part B 3/2013
  - Pinho, Robinson, Schuecker, Camanho; J.Comp.Mat 2012

Test Case	Bogetti	Carrere	Cuntze	Tsai-Ha	Hansen	Huang	Hashin	Pinho	Puck	Rotem	Wolfe	Christensen
1	X	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓
2	X	X*	✓	✓	✓	X	X	X*	X	✓	X	X
3	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓	X	X	X
4	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓	X	✓	X	X
5	X	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
6	X	X	X	X	✓	X	X	✓	X	X	X	X
7	X	X	X	X	✓	X	X	✓	X	X	X	X
8	X	✓	X	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
9	X	✓	X	✓	✓	X	X	X	✓	X	X	X
10	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
11	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

✓ ...response captured by model X ...data fitting X ...needs work

*

WWFEii – 3D-failure

- J-Comp-Mat Special Issues: Part A 9/2012, Part B 3/2013

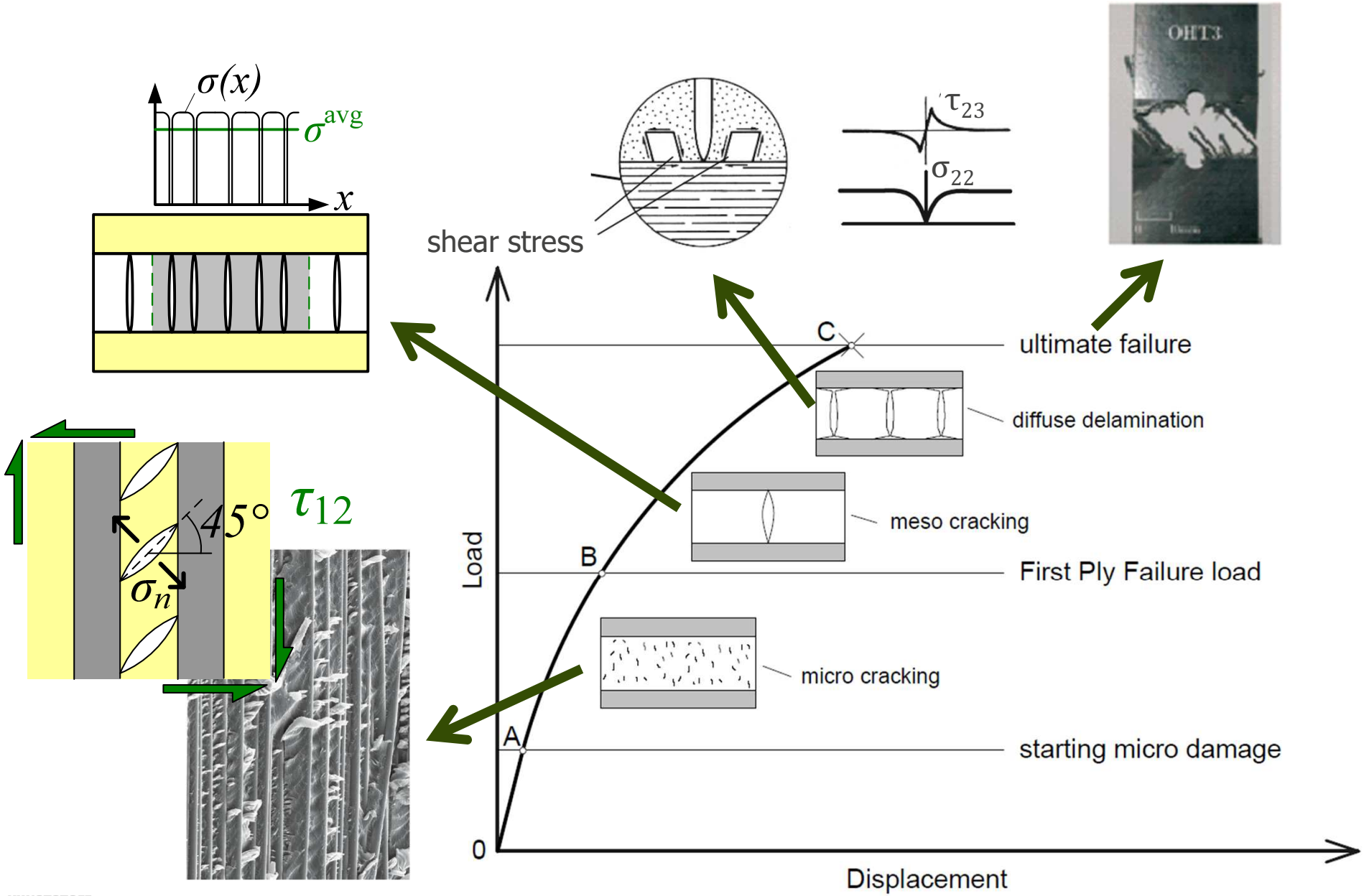
Verbesserung Formulierung Nicht-Linearität
korrigierte Inputparameter

Test Case	Bogetti-B	Carrere-B	Cuntze-B	Tsai-Ha-B	Huang-B	Hashin-B	Pinho-B	Rotem-B	Wolfe-B	Christensen-B
1	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	X	X*	X*	✓	X	✓	X*	✓	X*	X
3	X	✓	X*	✓	X	X	✓	X	X*	X
4	X	✓	X*	✓	X	X*	✓	✓	X*	X
5	X	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	X
6	X	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X*	X
7	X	✓	✓	✓	X		✓	X	X*	X
8	X	✓	✓	✓	X		✓	✓	✓	X
9	X	✓	X*	X	X	X	✓	X	✓	X
10	X	✓	X*	✓	X	X	✓	X	✓	X*
11	X	✓	X*	✓	X	X	X	X	X	X*
12	X	X	X*	X	X	X*	✓	X	X	X*

✓ ...response captured by model X ...data fitting X ...needs work

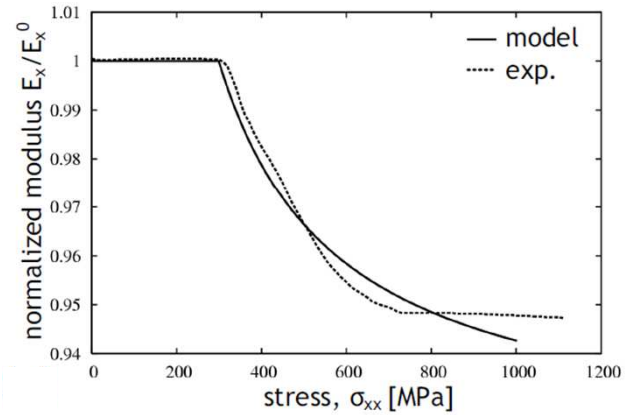
*

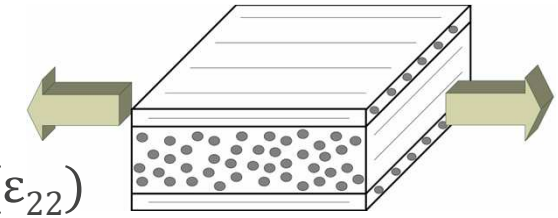
Schädigungsfortschritt in Laminaten



Konstitutivgesetz für anisotrope Schädigung

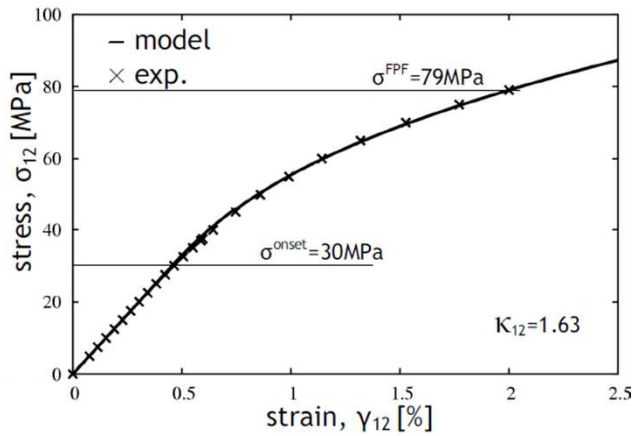
- Interaktion zwischen Belastungsrichtung

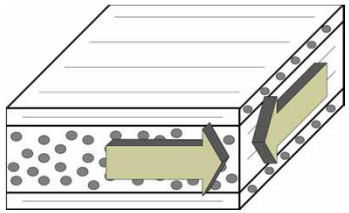




$\sigma_{22} = f(\varepsilon_{22})$

Interaktion?

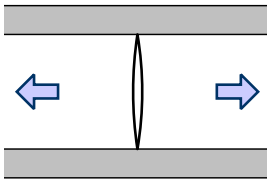




$\tau_{12} = f(\gamma_{12})$

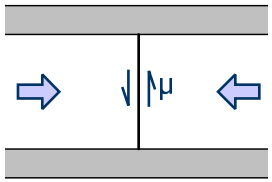
- Effekt nicht-monotoner Belastung

offener Riss → verringerte Steifigkeit



$\sigma_{22} > 0$
→ E, G = f(d)

geschlossener Riss → Rückgewinnung Steifigkeit



$\sigma_{22} < 0$
→ $E = E_0$, $G = f(d,\mu)$

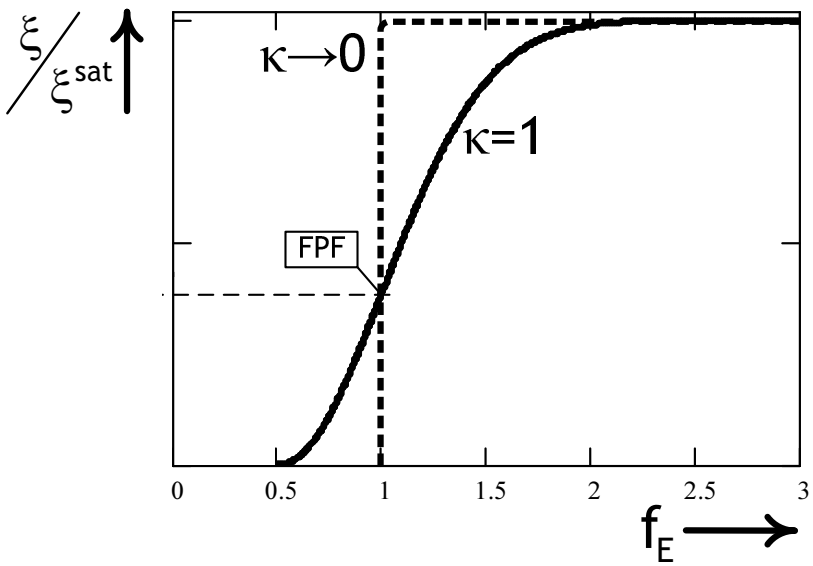
Zusammenhang durch physikalischen Hintergrund

Physikalisch basiertes Schädigungsmodell

[Schuecker, Pettermann; Comp.Struct. 2006]

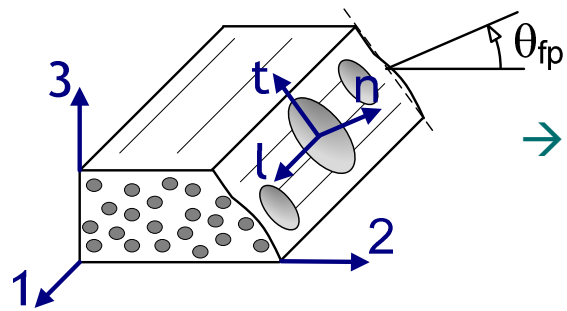
max. Last in Lastgeschichte

momentane Last



pseudo Mori-Tanaka Methode

rissartige Inklusionen



→ offen:

$E_{incl} = 0$

→ geschlossen:

$E_{incl} = E_0$

$G_{incl} = \mu \cdot \sigma_{nn}$

L (f_E) → D (ξ) → E

Last — Damage — Steifigkeit

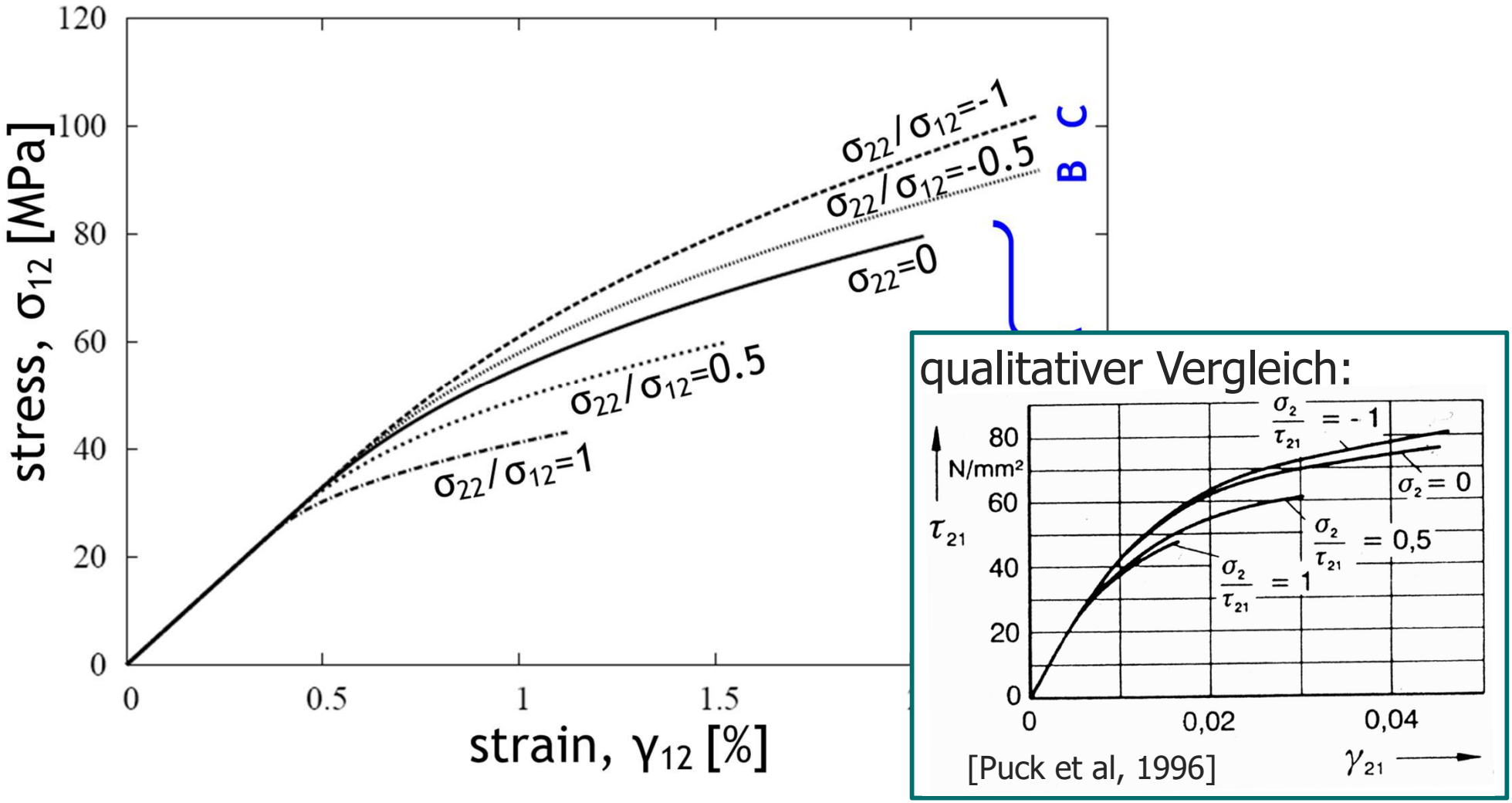
Lastfaktor (Puck)

Schädigungszustand

Interaktion mit Nachbarschichten

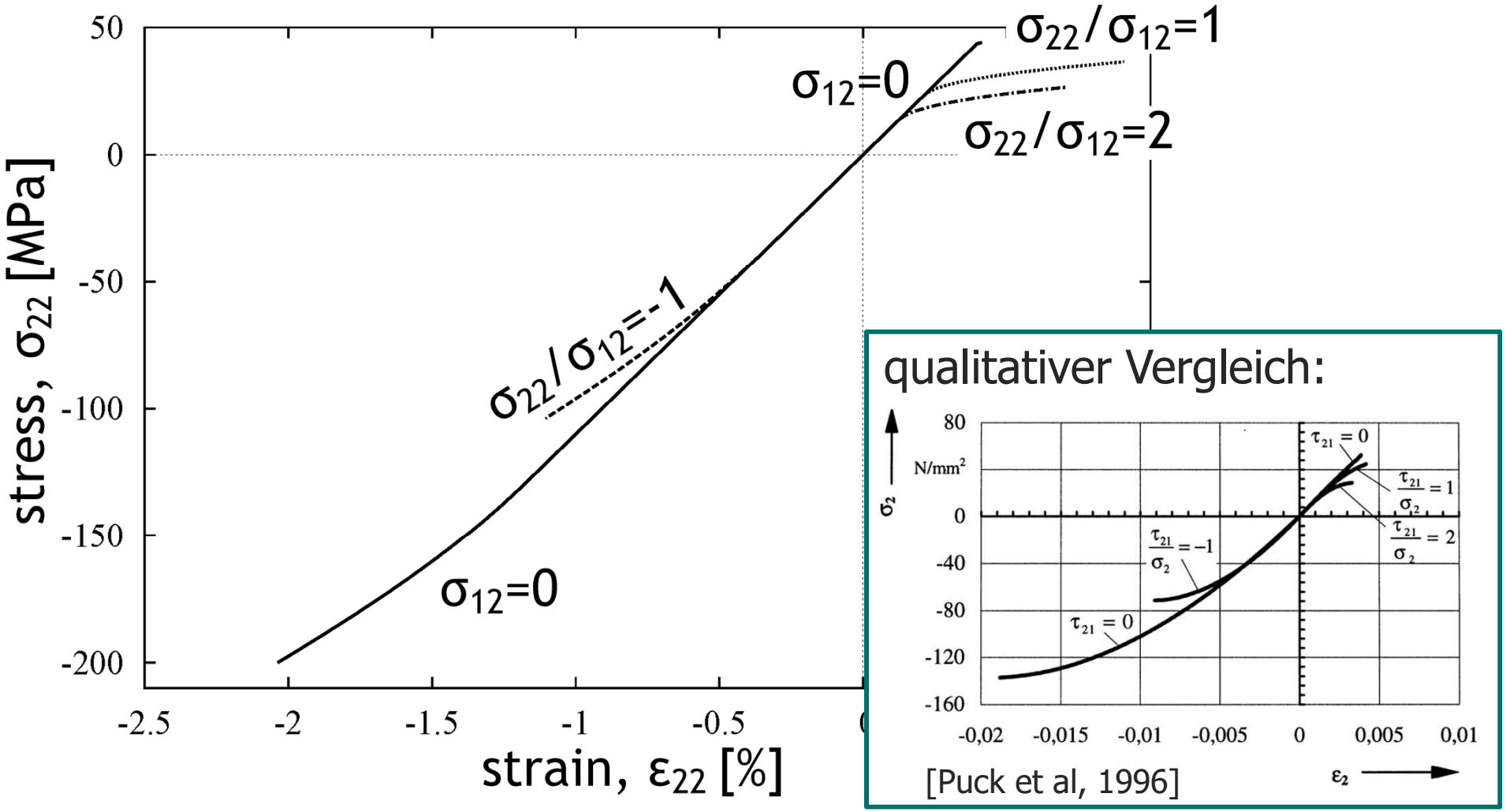
Schubverhalten mit Einfluss σ_{22}

[Schuecker, Pettermann; Comp.Struct. 2006]



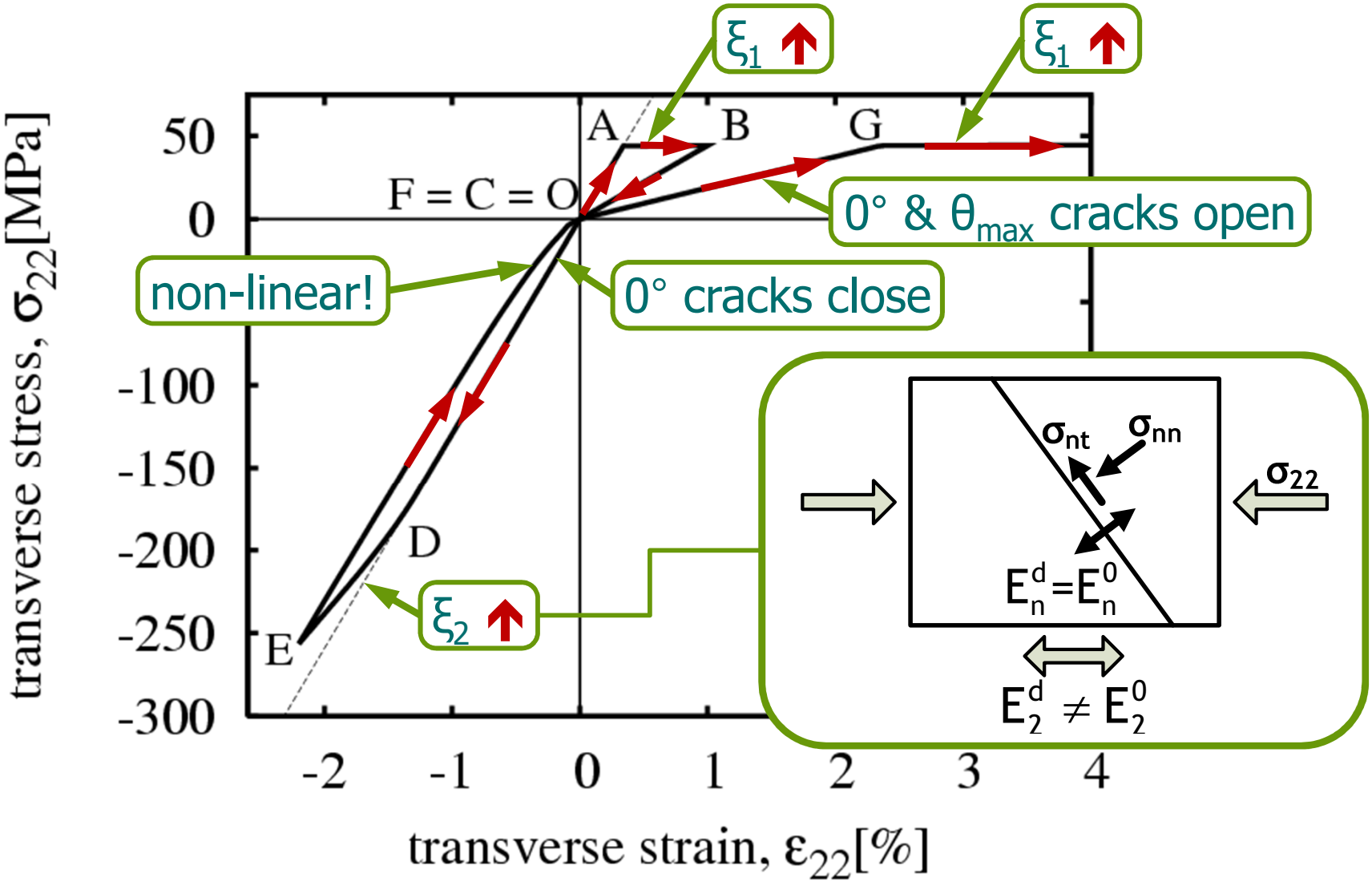
Quer-Zug / Druck mit Einfluss σ_{12}

[Schuecker, Pettermann; Comp.Struct. 2006]



Zug-Druck-Zug Belastungssequenz

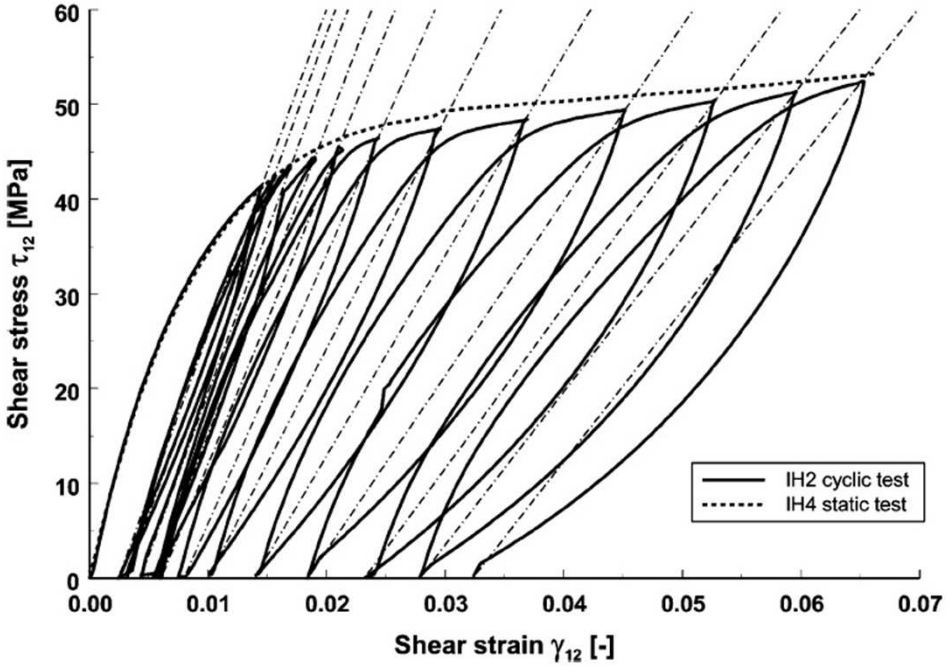
[Schuecker, Pettermann; Comput.Struct. 2008]



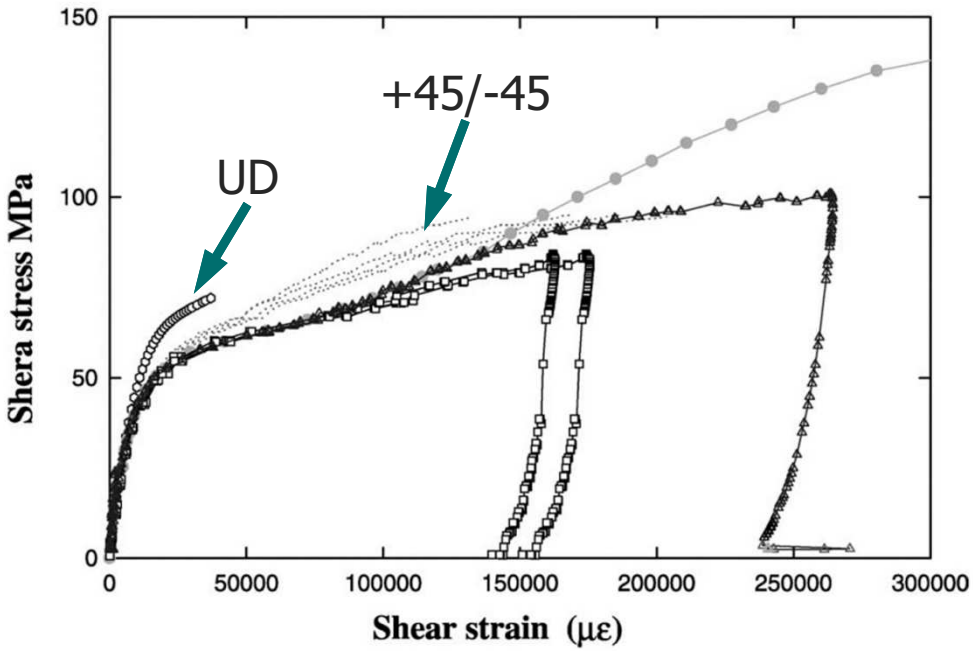
Nicht-linearität bei Schubbelastung

- hohe nicht-linearität – aber keine Risse
  [Varna 1999, Joffe 2001, Petterson 2005]

- Restdehnungen nach Entlastung
  [VanPaepegem 2006]



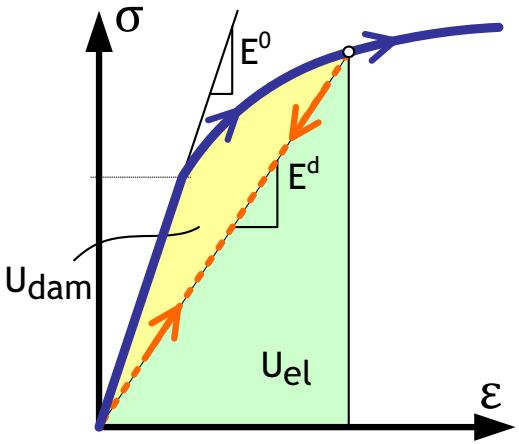
- Unterschied UD vs. Laminat
  [Kaddour 2003]



Schädigung vs. Plastizität

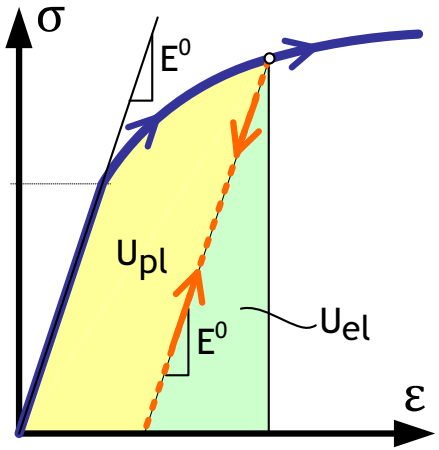
- Spannungs- / Dehnungsverhalten
  - Schädigung

    $E_d = (1-d)\, E_0$
    $d = f(\sigma, \sigma_{max})$



  - Plastizität

    $E = \text{const.}$
    $\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}$



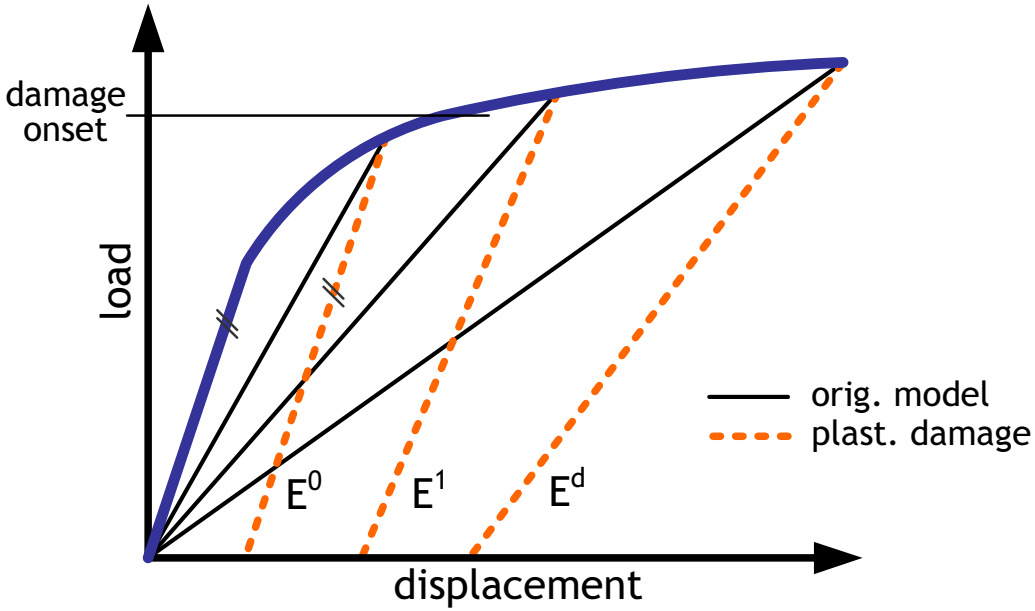
- gekoppeltes Konstitutivgesetz (anisotrop)

  [Schuecker, Pettermann; Comput.Struct. 2008]

$$\boldsymbol{\sigma} = \boxed{\boldsymbol{E}^{\mathrm{d}}} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boxed{\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}})$$

plastische Dehnung

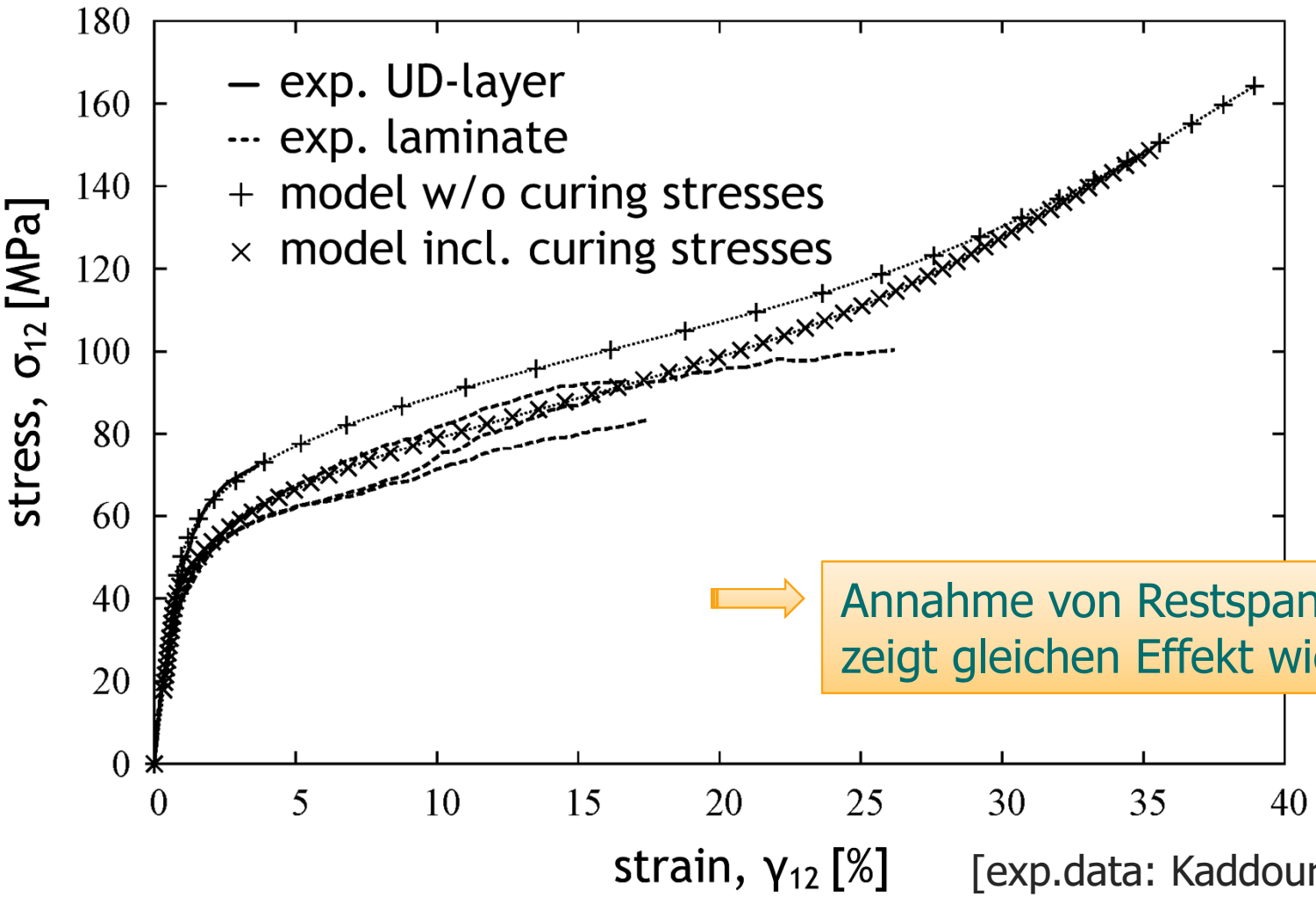
geschädigter E-Tensor:
$\boldsymbol{E}^{\mathrm{d}} = f(\mathbf{D})\, \boldsymbol{E}_0$



Temperatureffekt

[Schuecker, Pettermann; Arch.Comp.Meth.Eng.2008]

- Glasfaser / Epoxy

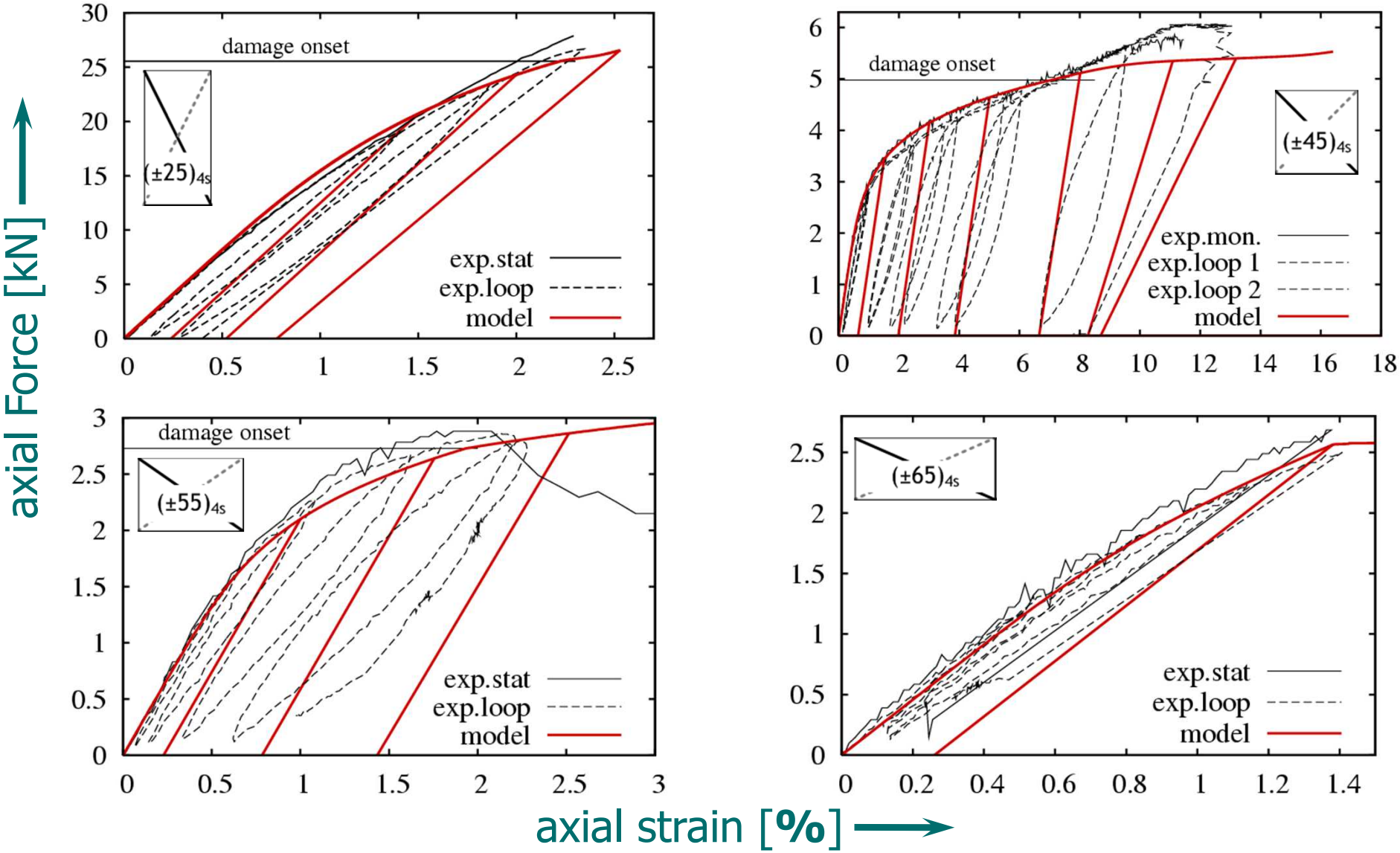


Annahme von Restspannungen zeigt gleichen Effekt wie Experiment

[exp.data: Kaddour 2003]

Tension test with unlaoding & reloading (CFRP)

[Schuecker, Pettermann; Arch.Comp.Meth.Eng.2008]



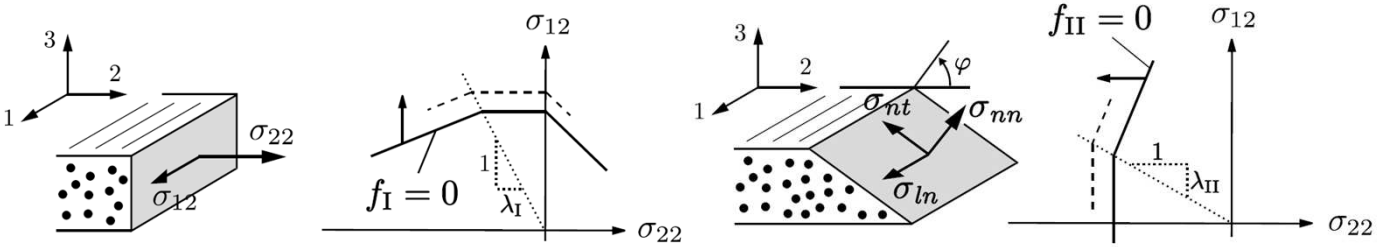
[Tests Polymer Competence Center Leoben, Austria]

Plastizität – Lastpfad-Abhängigkeit

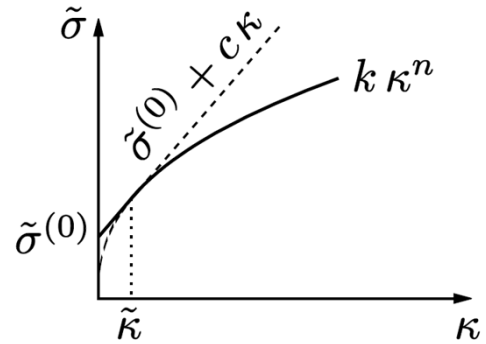
[Flatscher, Schuecker, Pettermann; Int.J.Fract 2009]

- FEM Impolementierung

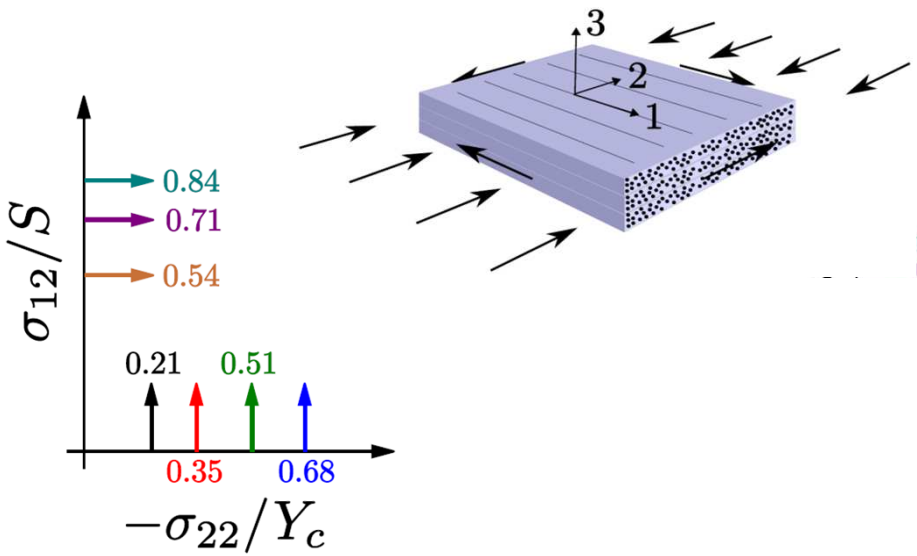
2 Plastizitäts-Mechanismen



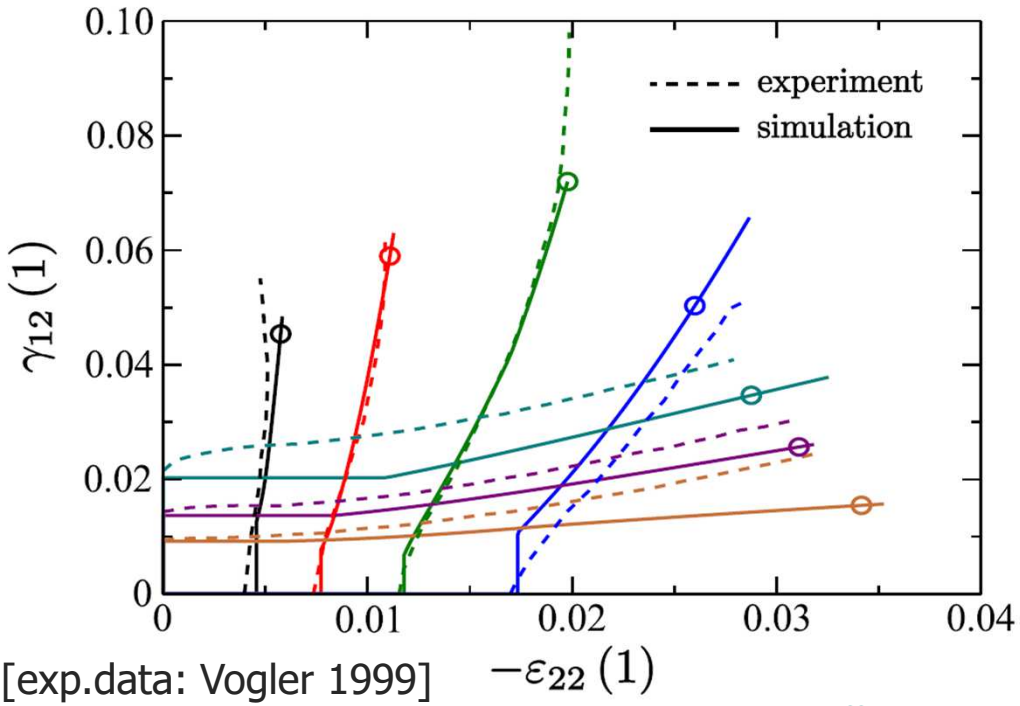
Hardening Law nach Ludwik



- Lastpfad-Abhängigkeit



Model vs. Test:

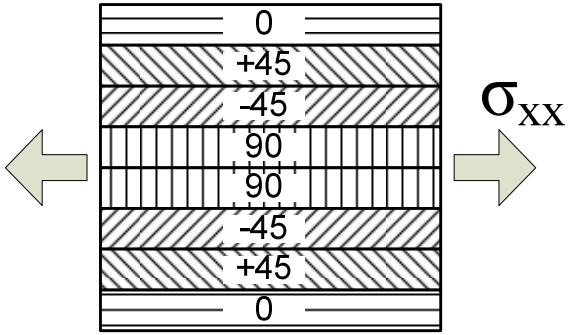


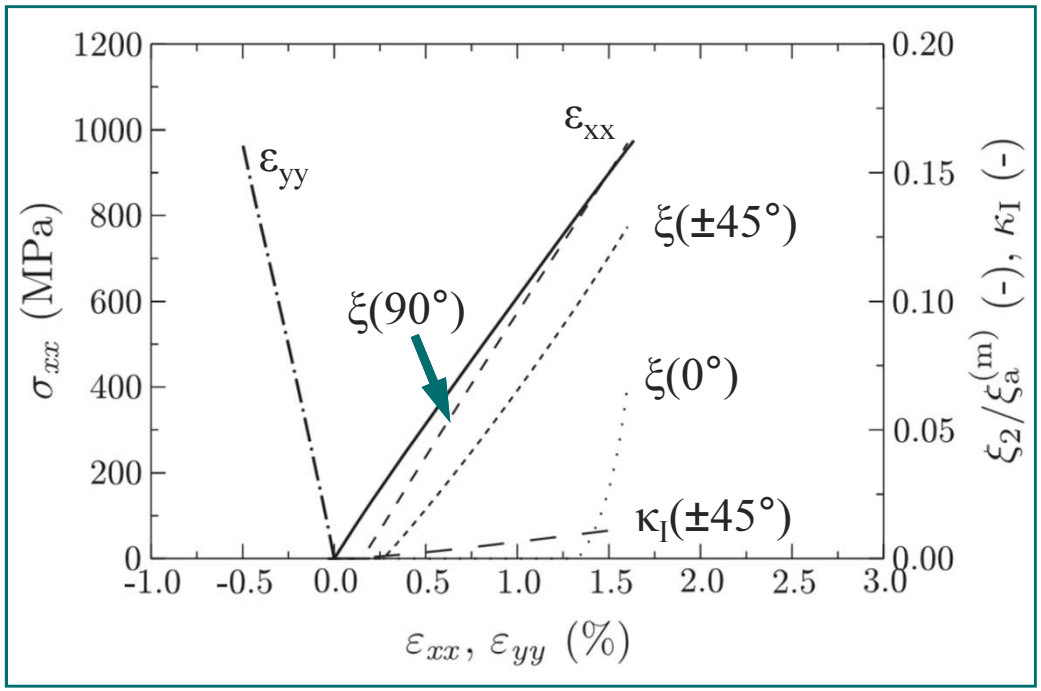
[exp.data: Vogler 1999]

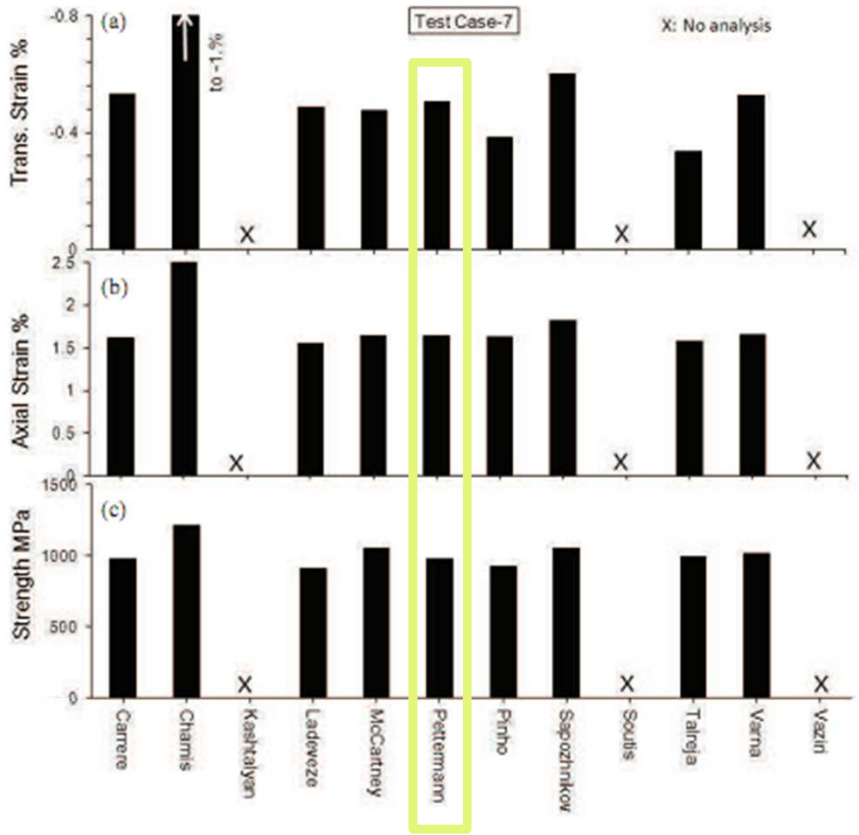
WWFEiii-Part A – Non-Linear Response

[Flatscher, Schuecker, Pettermann; J.Comp.Mat 2013]

- Test Case 7

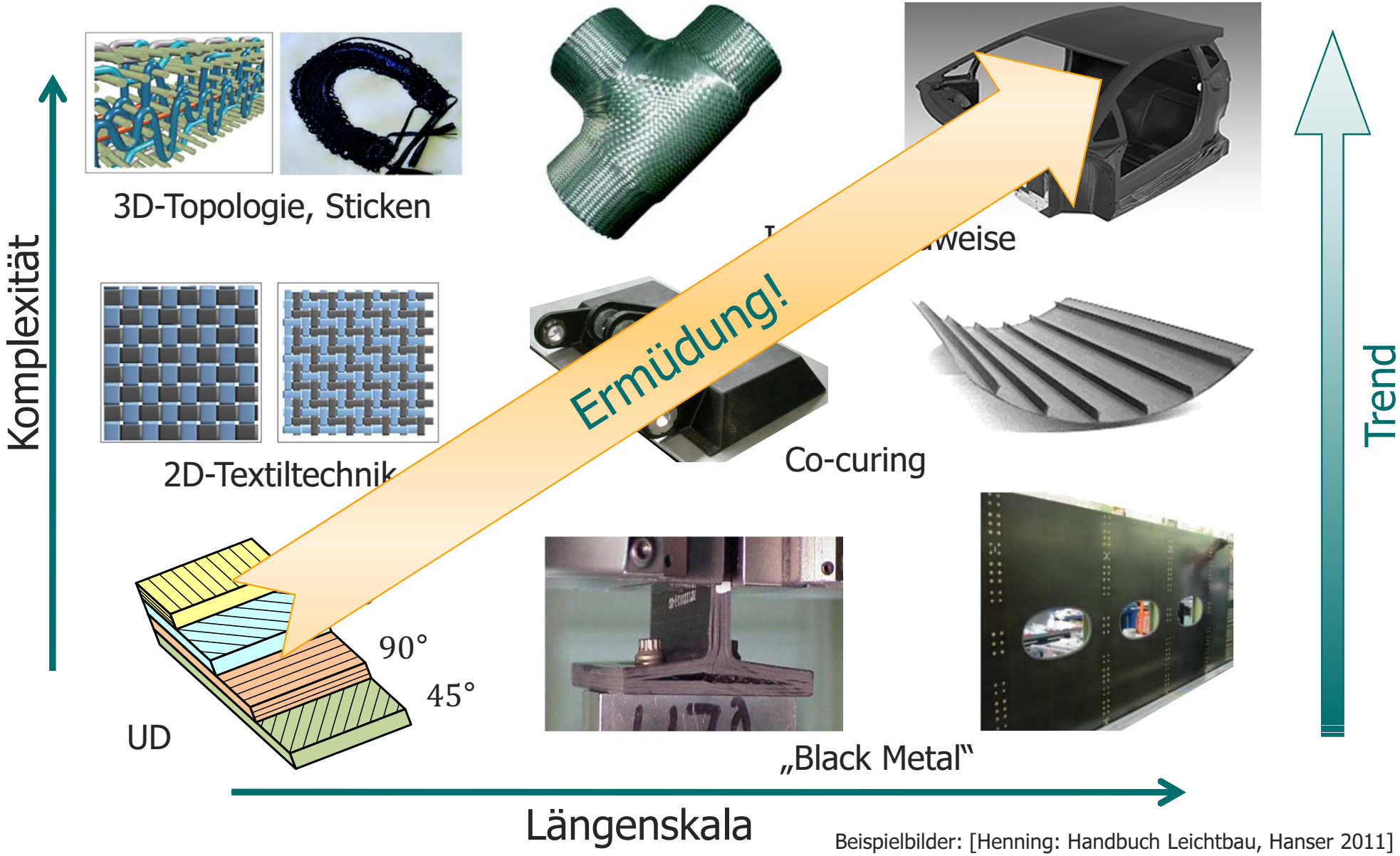






[Kaddour, Hinton, Li, Smith ICCM19, 2013]

Strukturhierarchie & -komplexität

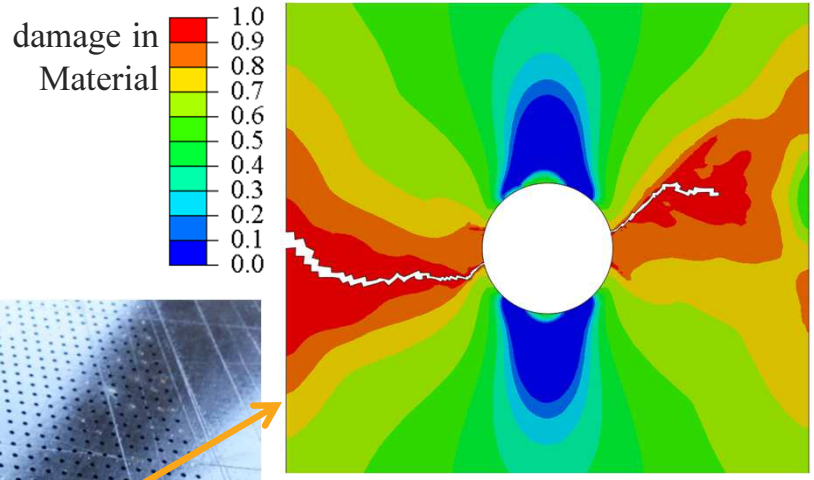


Beispielbilder: [Henning: Handbuch Leichtbau, Hanser 2011]
[Friedrich: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Springer 2013]

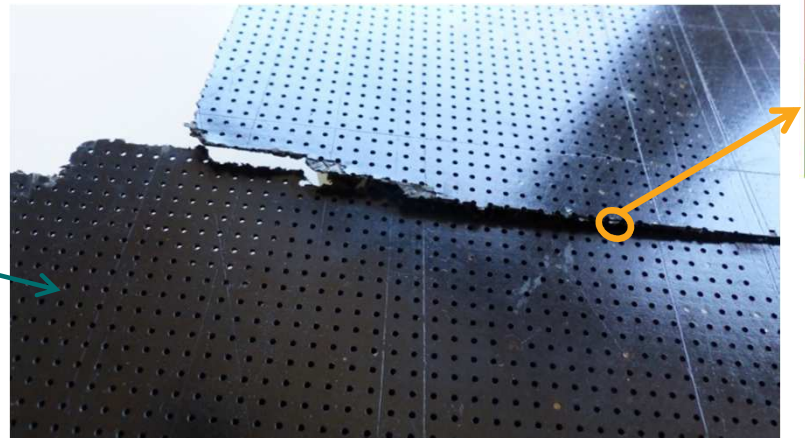
Bauteilversagen bei Verbundwerkstoffen

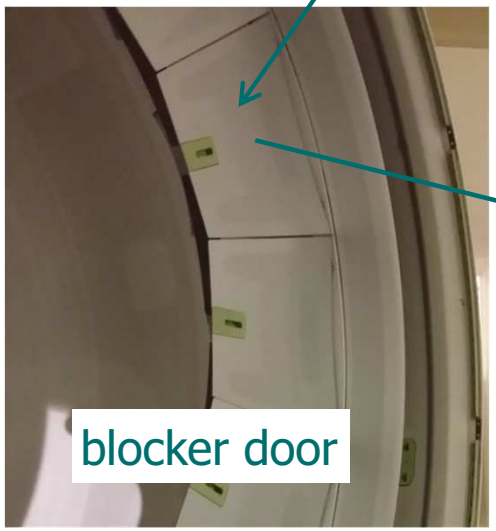
Triebwerk
Schubumkehr

Versagensausgang am Loch

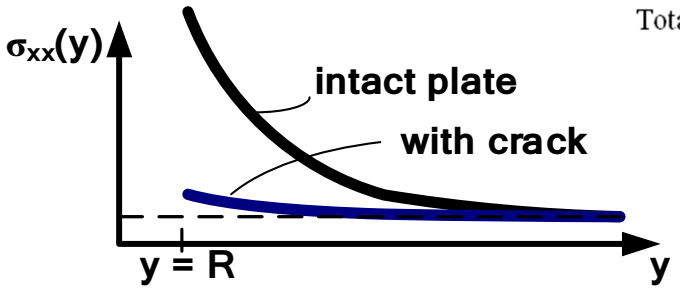


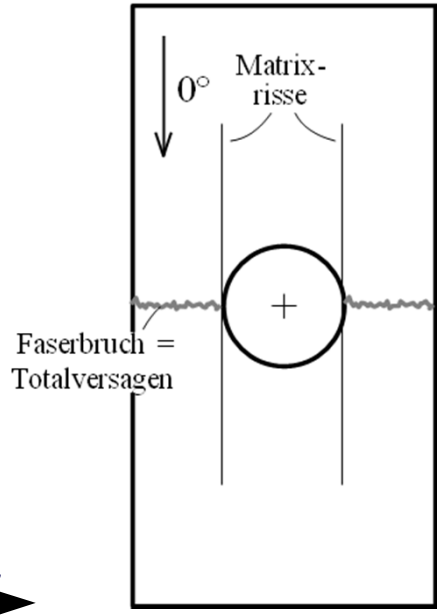
akkustisches Laminat





- Lochplatte
  - Isotrop: K = 3
  - UD-Platte: Intakt → K ~ 8
    mit Riss → K ~ 1

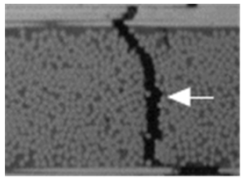




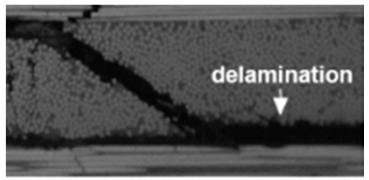
Versagensmechanismen in Laminaten

- Matrixversagen

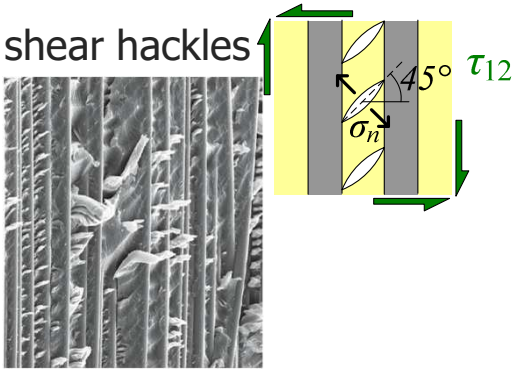
matrix tension



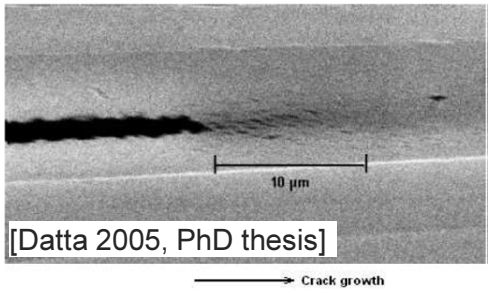
matrix compression



shear hackles



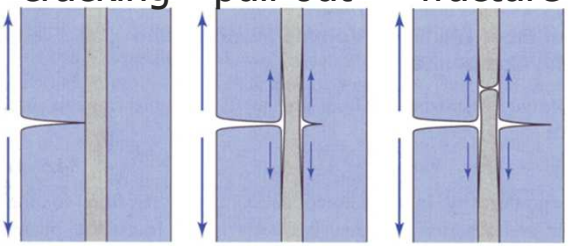
delamination

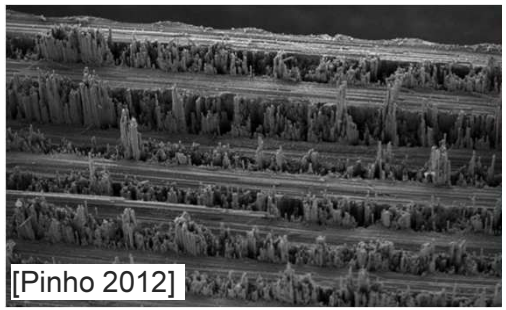


[Datta 2005, PhD thesis]

- Faserversagen
  - mehrere Mechanismen
  - ausgelöst durch Matrixrisse

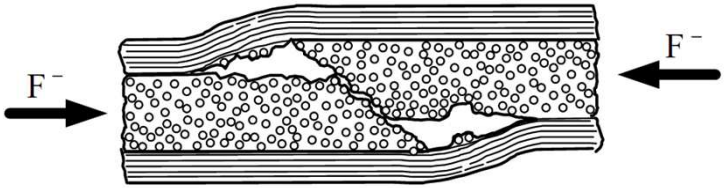
matrix cracking | fiber pull-out | fiber fracture



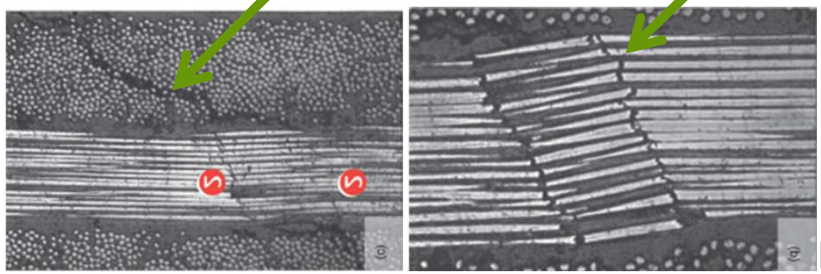


[Pinho 2012]

- Interaktion zwischen Schichten



wedge crack | fiber kinking



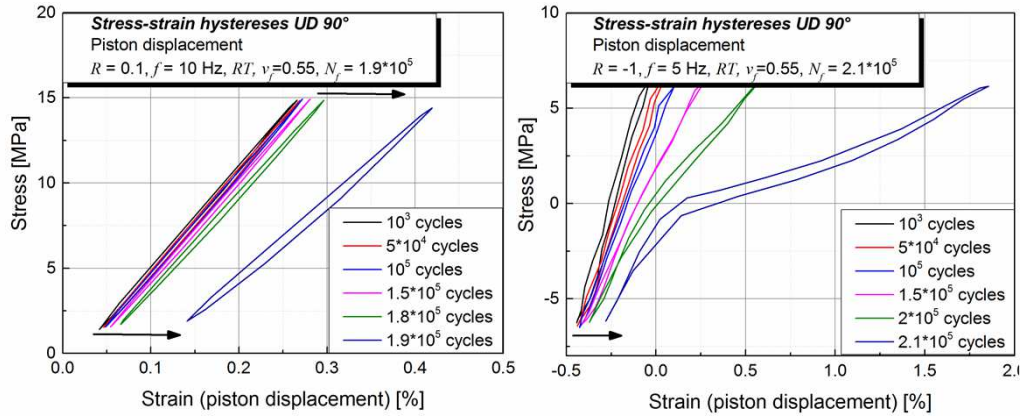
[Pinho2012]

Effekt der Mechanismen muss erfasst werden (qualitativ)

Verbessertes Fatigue Konzept

- Fokus:
  - Endlosfaser Verbundwerkstoffe
  - High-Cycle Fatigue → Spannungsbasiert

- Methode: erweitertes Wöhlerkonzept
  - Unterscheidung von Versagensmechanismen, Modewechsel & -interaktion
  - erweiterte Datenerfassung und inverse Methoden (z.B. Steifigkeitsänderungen, Temperatur- & Dehnungsfelder)



Ziele:
- verlässliche & übertragbare Ermüdungsbewertung
- geringere Anzahl an Charakterisierungstests

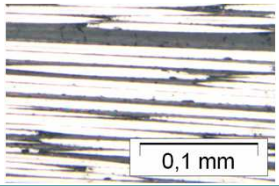
Interdisziplinärer Ansatz

Prüfung

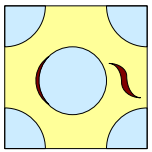
- "adding simulation to physics"
  - Testdatenverarbeitung durch Abgleich mit Simulationsmethoden
  - verbesserte Prüfmethoden durch parallele Simulation

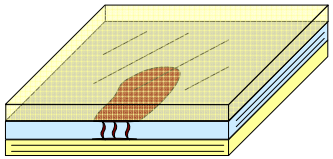
Simulation

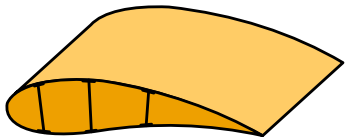
- "adding physics to simulation"
  - physikalisch basierter Modellierungsansatz
  - Berücksichtigung von Prüfmethoden für Modellkalibrierung



mikro — Mechanismen verstehen → meso — Charakterisierung & Modellierung → makro — Anwendung auf Bauteile →







Ziele:

- Entwicklung von Testmethoden um (Mikro-) Mechanismen zu verstehen
- parallele Entwicklung von Ermüdungsmodell & Charakterisierungsmethoden
- Methode zur Parameterbestimmung aus definierten Prüfmethoden

Wissenstransfer in industrielle Anwendung

- Praktikabilität des Prüfprogramms:
  - einfache Prüfmethoden für praktische Umsetzbarkeit
  - geringe Anzahl erforderlicher Tests

- Anwendbarkeit der Modellierungsstrategie:
  - ausreichende Effizienz für Anwendung auf Bauteilebene
  - eindeutig Kalibrierbare Modellparameter

- Berücksichtigung realer Bedingungen:
  - Lastpfadeffekte (nicht-monotone Belastung, Lastumkehr, ...)
  - 3-achsige Spannungszustände, textile Faserarchitekturen
  - Einfluss von Verarbeitungseffekten und anderen Abweichungen

⇨ Ziele:
- Tests & Simulation „so einfach wie möglich, so genau wie nötig"
- Richtlinien für Design, Prüfprogramme & Modellierung
- Genauigkeitsabschätzung der Ermüdungsvorhersage

Forschungsprojekt

- Christian Doppler Laboratory (CDL)
  - Anwendungsorientierte Grundlagenforschung auf hohem Niveau
  - Einbettung in wiss. Umfeld der Universität
  - strenge wissenschaftliche Qualitätskontrolle
  - bottom-up Orientierung
  - Flexibilität und geringe administrative Kosten
  - gemeinsame Finanzierung durch öffentliche Hand & Industriepartner

Christian Doppler Forschungsgesellschaft

- CDL Composite Fatigue
  - 7 years (2017 – 2024)
  - 8 Dissertationen
  - Industriepartner: 175 000 €/year
  - Förderung: 175 000 €/year

} ⇨ zuverlässige Ermüdungsbewertung von Verbundbauteilen

» **Phase 1: verlässliche Ermüdungsvorhersage für UD-Laminate**

» **Phase 2: Erweiterung der Ansätze auf komplexe, reale Probleme**