

# Herausforderungen und unterschiedliche Modellierungsansätze für stark ondulierte Faserhalbzeuge

3. Fachkongress Composite Simulation, Fellbach,  
20. März 2014

Dr.-Ing. Martin Perterer, Tim Funke

# KTM Technologies - Fakten

- 2008: Spin-off des KTM „X-BOW“ Entwicklungsteams
- Circa 30 hochqualifizierte Spezialisten im Bereich Faserverbundwerkstoffe
- Circa 140 Mitarbeiter am Standort Anif bei Salzburg, Österreich

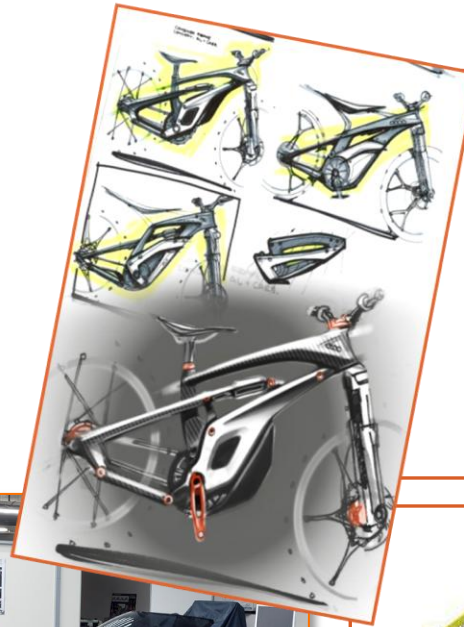


X-Bow GT mit Straßenzulassung

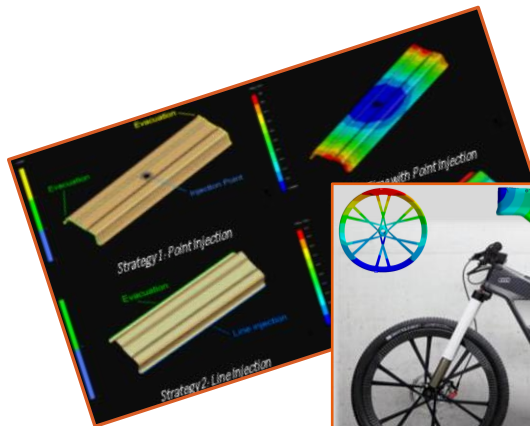


# KTM Technologies - Schwerpunkte

- Konzeptentwicklung
- Technologieentwicklung
- Engineering & Simulation

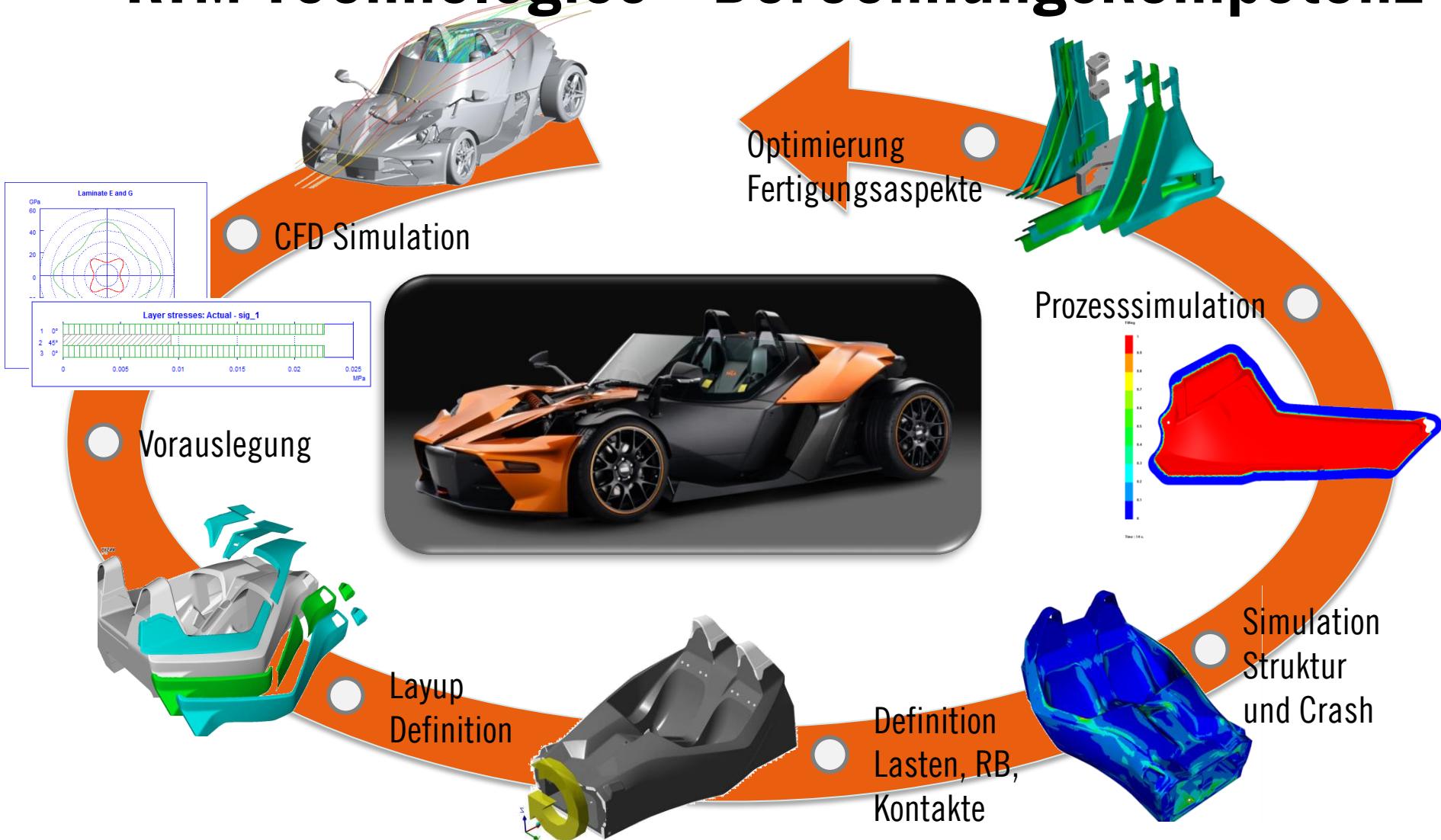


Hennecke Streamline 65



Presse Langzauner LZT-OK-130

# KTM Technologies - Berechnungskompetenz

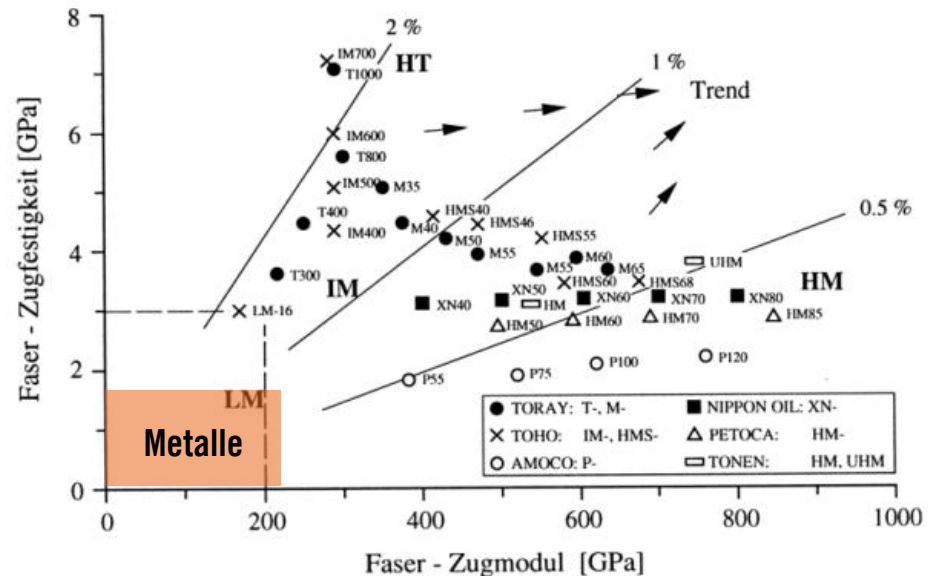


# Inhalt

- Grundlagen Faserverbundhalbzeuge
- Schädigung und Versagen von Faserverbundwerkstoffen
- Mögliche Modellierungsansätze
- Simulationsmodelle
  - » Beschreibung und Gegenüberstellung
  - » Vergleich mit mechanischen Tests
- Zusammenfassung / Ausblick

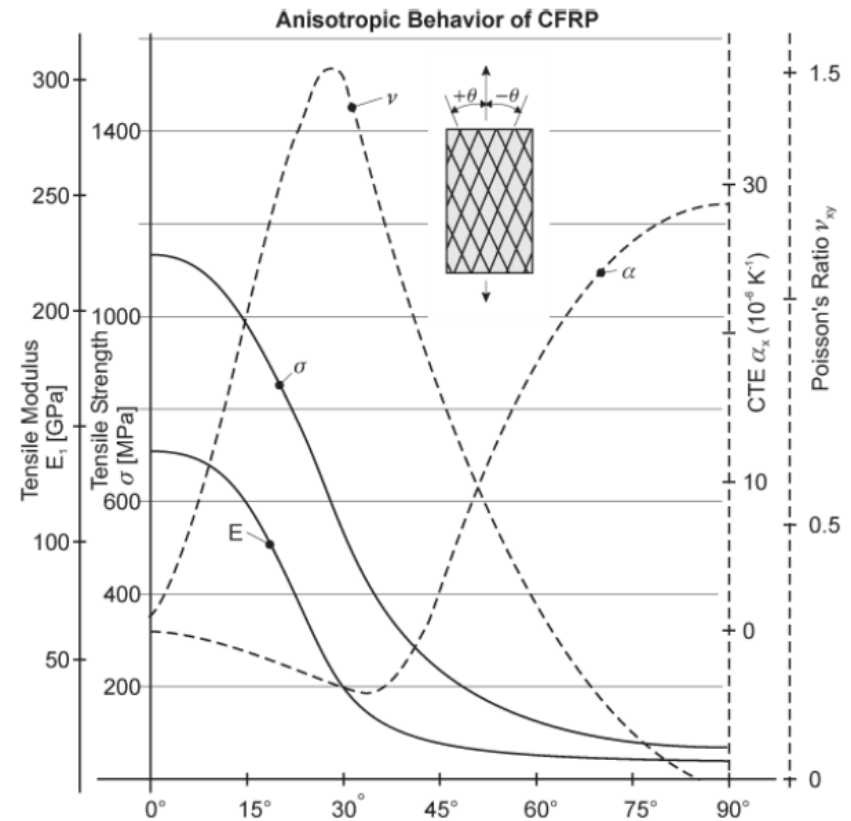
# Grundlagen Faserverbundwerkstoffe

- Hohes Leichtbaupotenzial
  - » Geringe Dichte
  - » Hohe Steifigkeit
  - » Hohe Festigkeit
- Konstruktionswerkstoff
  - » Dreidimensionalität
  - » Lastpfadgerecht



# Grundlagen Faserverbundwerkstoffe

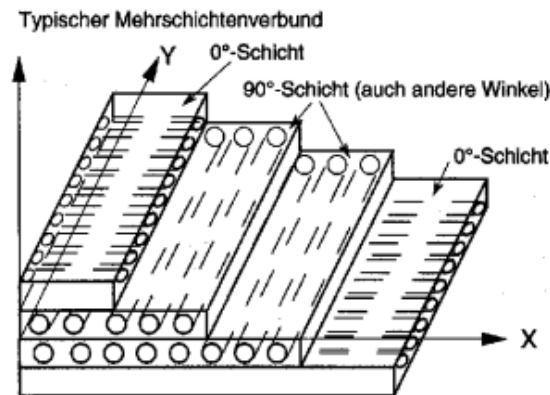
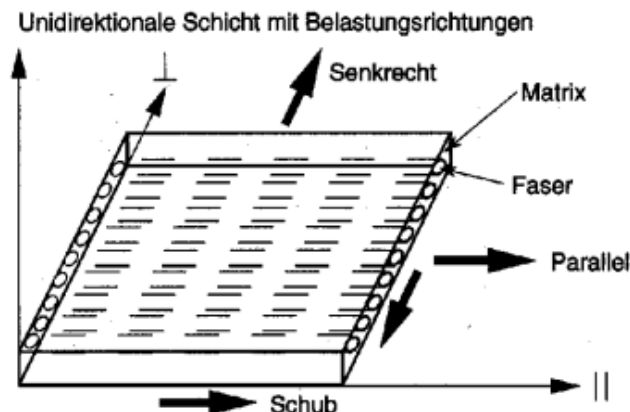
- Hoher Anisotropiegrad
  - » Steifigkeit
  - » Festigkeit
  - » Wärmedehnung





# Grundlagen Faserverbundhalbzeuge

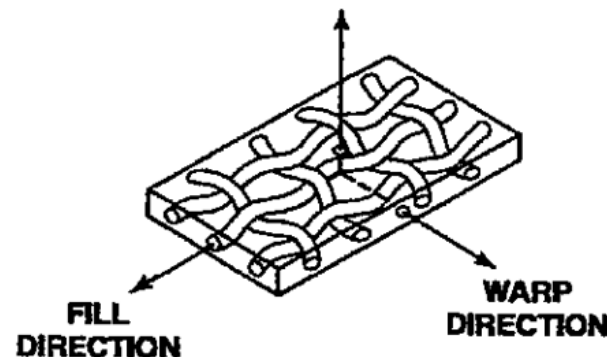
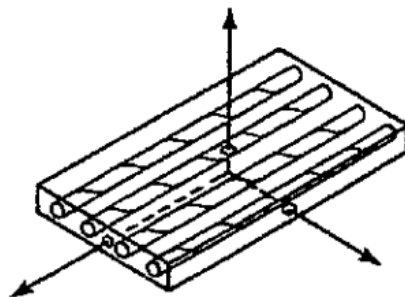
- Geschichtetes unidirektionales Laminat
  - » Optimale Ausnutzung Anisotropie
  - » Berechnungsmethoden bekannt
  - » Probleme bei stark gekrümmten Geometrien (Drapierbarkeit)





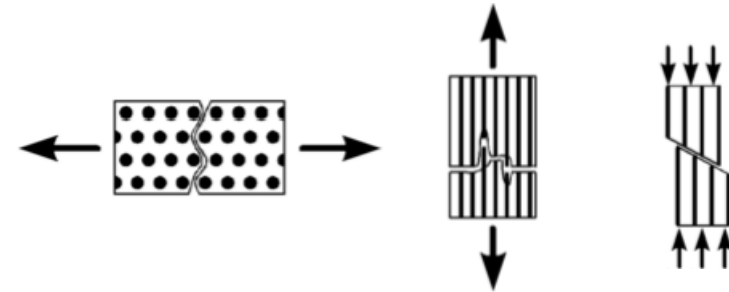
# Grundlagen Faserverbundhalbzeuge

- Geschichtetes Gewebe
  - » Hohe Drapierfähigkeit
  - » Einfache Verarbeitung
  - » Berechnungsmethoden nur teilweise bekannt
    - » Komplexe Interaktion Kett- und Schussfäden
    - » Schädigungsmechanismen Stand der Forschung

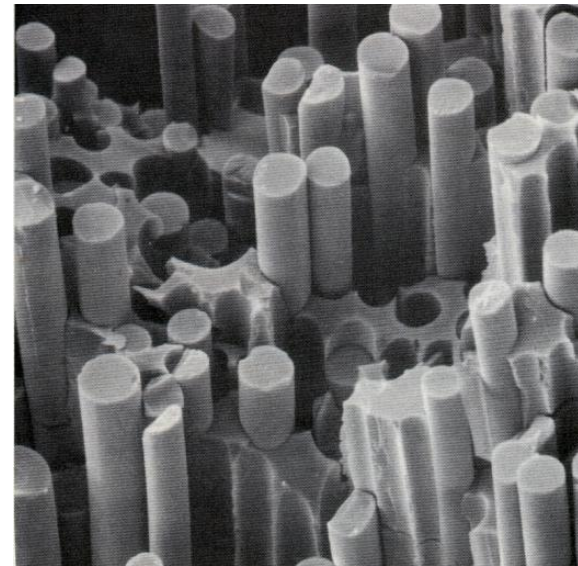


# Schädigung und Versagen von FVW

- Sprödes und abruptes Versagen
  - » Matrix
  - » Fasern
  - » Interface
- Effiziente Berechnungsmethoden zur Vorhersage erforderlich



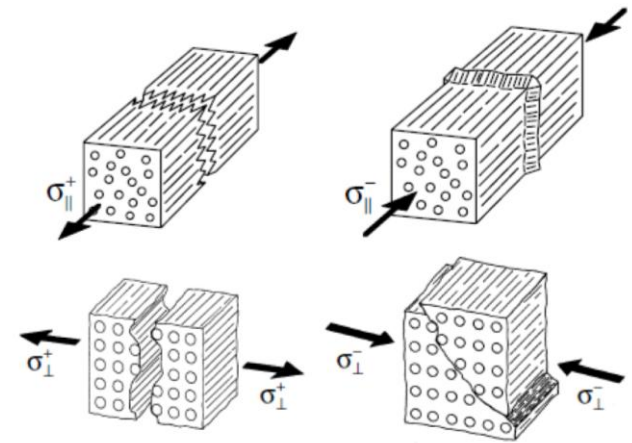
Beispielehafte Versagensmodi



Bruchfläche einer Faserverbundstruktur

# Schädigung und Versagen von FVW

- Vorgehen geschichtete UD Laminate
  - » Definition Versagenskriterien
    - » Physikalisch begründet
      - » Puck, Cuntze, Hashin, etc.
    - » Phänomenologisch
      - » Max. Stress, Tsai Wu, etc.
  - » Abgleich mit mechanischen Tests
    - » Bestimmung / Abgleich Konstanten

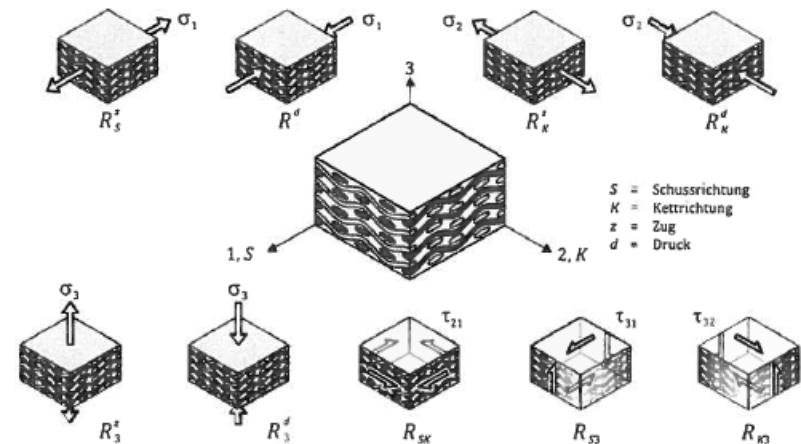


# Schädigung und Versagen von FWV

## ■ Vorgehen geschichtete Gewebe

### » Kein validiertes Versagenskriterium vorhanden

- » Komplexe Kopplung
- » UD- Kriterien nicht gültig
- » Ansatz von Hr. Cuntze
  - » 9 Bruchmoden
  - » 6 Invarianten
  - » 10 Mech. Tests erforderlich

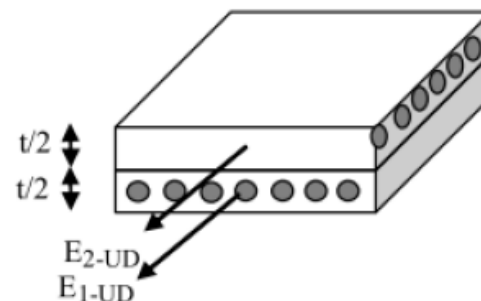
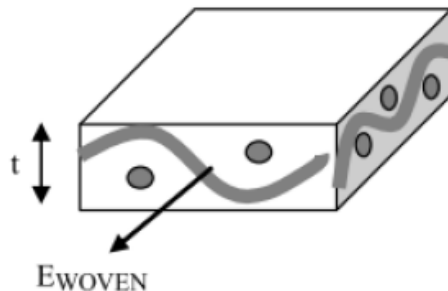


Schematische Darstellung der 9 Bruchmoden nach Cuntze

- » Forschungsbedarf zum Schädigungsverhalten von Geweben vorhanden

# Mögliche Modellierungsansätze

- Stand der Technik
  - » Vereinfachung Gewebe durch zwei UD Schichten
    - » Berechnung analog geschichtete UDs
      - » Steifigkeit
      - » Festigkeit
  - » Keine Abbildung des realen Strukturverhaltens



# Mögliche Modellierungsansätze

- Multiskalenmodellierung

- » Mikromodell

- » Grundverständnis  
Versagen

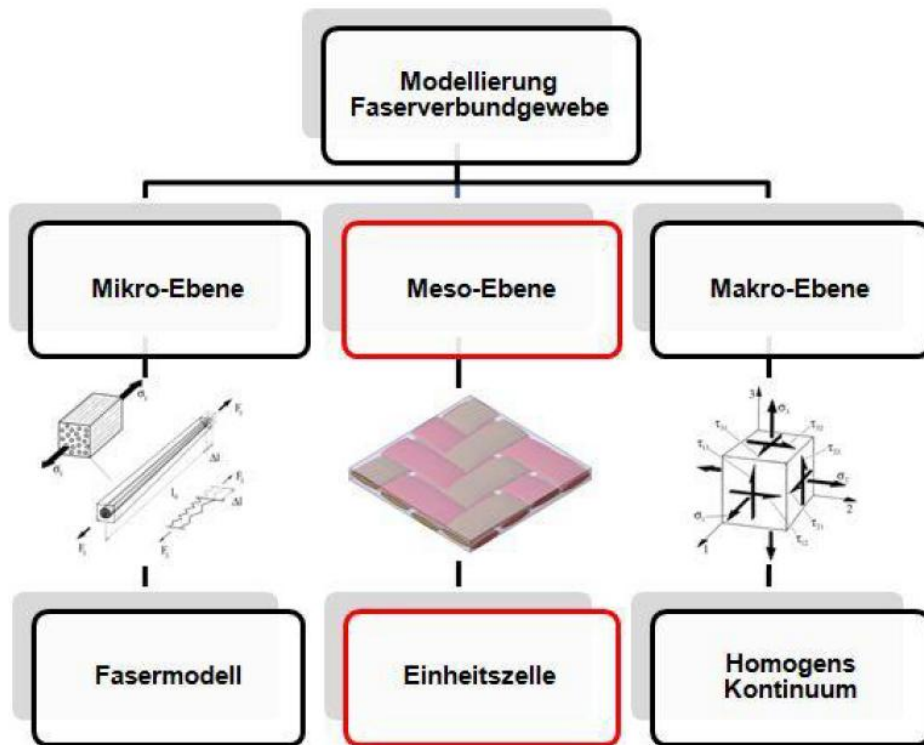
- » Mesomodell

- » Lokale Beanspruchung

- » Schadensinitiierung

- » Makromodell

- » Strukturverhalten



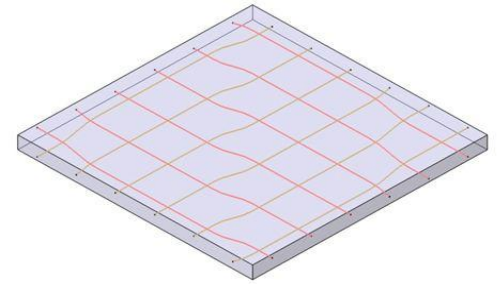
# Simulationenmodelle - Modellbeschreibung

- Freie Parameter
  - » Gewebeaufbauten
  - » Flächengewichte
- Bewertung Gesamtsteifigkeit
  - » Modellvalidierung
- Bewertung lokaler Spannungsspitzen
  - » Beanspruchung Einzelkomponenten
  - » Korrelation mit Schädigungsmechanismen



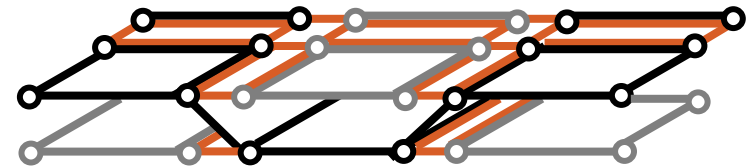
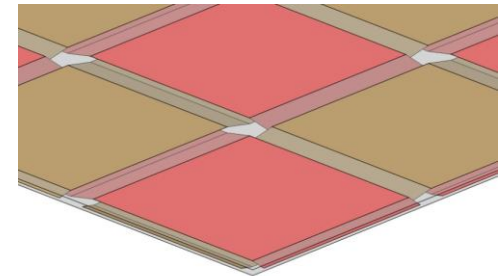
# Simulationenmodelle - Modellbeschreibung

- Balkenmodell
  - » RVE Matrixeigenschaften
  - » Balken mit red. Fasereigenschaften
    - » Steifigkeitsabgleich mit mech. Tests
  - » Direkte Knotenkopplung, keine Kontakte



# Simulationenmodelle - Modellbeschreibung

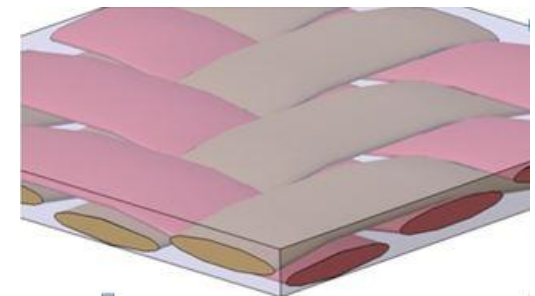
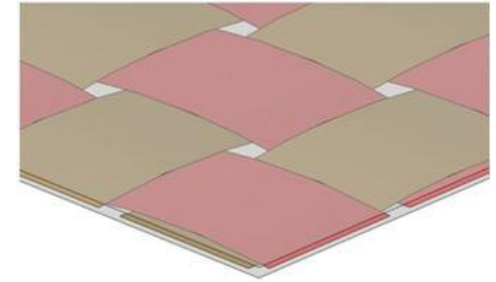
- Vereinfachtes Flächenmodell
  - » Faser: lineare Teilstücke
  - » Matrix an Ober- und Unterseite
  - » Mech. Eigenschaften über Dickendefinition
    - » Fasern Rechteckquerschnitt
    - » Matrix Querschnitt gemäß  $\phi_F$
  - » Verbindung über Kontaktformulierung
    - » Dickeneffekte Miteinbezogen



— Matrix  
— Kettfaser  
— Schussfaser

# Simulationenmodelle - Modellbeschreibung

- Detailliertes Flächenmodell
  - » Analog vereinfachtes Modell
  - » Realer Faserverlauf (Splines)
- Volumenmodell
  - » Direkte Kopplung „Shared Topology“
  - » Elliptische Faserquerschnitte



# Simulationsmodelle - Modellbeschreibung

- Verwendetes Kontaktmodell

- » Verbundkontakt

- » Formulierung

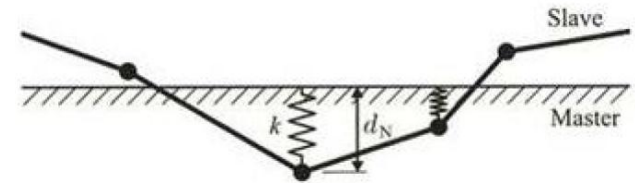
- » Multi Body Constraint (MPC)

- » Steifigkeit Simulationsmodell im Vergleich zu Mech. Tests zu hoch

- » Pure Penalty

- » Numerische Durchdringung zulässig

- » Steifigkeitsanpassung möglich



Prinzipskizze Kontaktformulierung Pure Penalty

# Simulationsmodelle - Modellbeschreibung

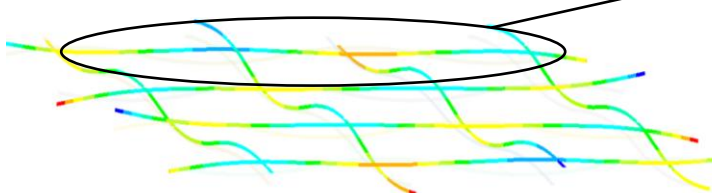
## ■ Vergleich Simulationsmodelle

Kriterium	Modell			
	Balkenmodell	Shell vereinfacht	Shell exakt	Solid
Kontakte vorhanden	nein	ja	ja	nein
Dickeneffekte berücksichtigt	nein	ja	ja	ja
Modellierungsaufwand CAD	mittel	gering	mittel	hoch
Modellierungsaufwand Simulation	gering	mittel	hoch	hoch
Rechenzeit	gering	mittel	mittel	hoch

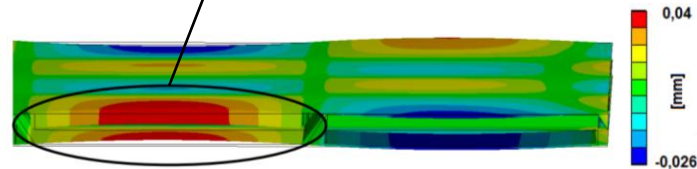
# Simulationsmodelle - Vergleich

- Makroskopische Bewertung bei 0,01% Dehnung (0° Zug)

Makroskopische Kennwerte	Modell			
	Balkenmodell	Shell vereinfacht	Shell exakt	Solid
E-Modul [Gpa]	30,4	31,3	51,0	52,3
Spannung [Mpa]	398	312	511	522



Dickeneffekte Fasern nicht berücksichtigt; geringere Steifigkeit wegen großem Harzzwischenraum  
Streckung der Fasern in Zugrichtung überhöht



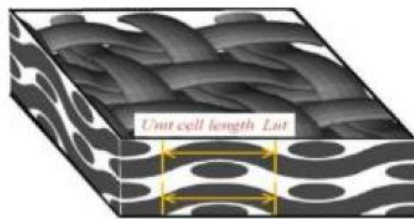
Unrealistische Verformung in Dickenrichtung aufgrund von linearen Teilstücken

# Vergleich mit Mech. Tests - Probenkollektiv

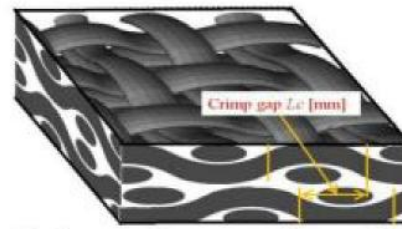
- Probenkollektiv
  - » 0° Zugversuch
  - » 45° Zugschubversuch

Webart	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Dicke je Lage [mm]	Anzahl an Lagen	Probenbreite [mm]	Probindicke [mm]
Twill 2x2	200	0,23	7	35	1,61
	380	0,42	7	25	2,94
	800	0,89	4	25	3,56
Plain Weave	200	0,23	7	35	2,07
Twill 4x4	280	0,32	5	35	1,6

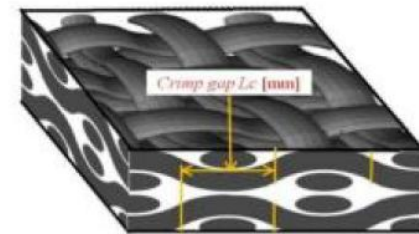
- Stapelung der Einzellagen



(a) Parallel sequence ( $\alpha=0^\circ$ )



(b) Staggered sequence ( $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ )

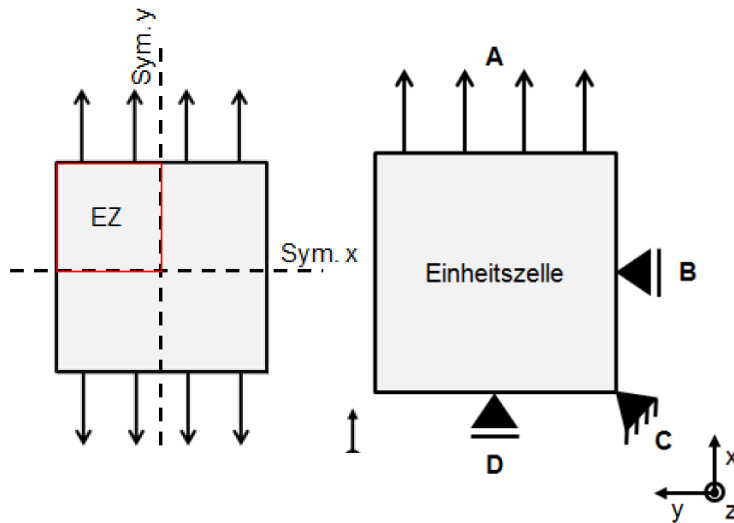


(c) Symmetry sequence ( $\alpha=180^\circ$ )

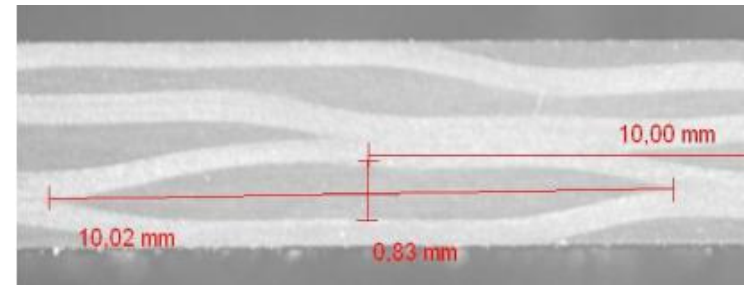


# Vergleich mit Mech. Tests - Modellierung

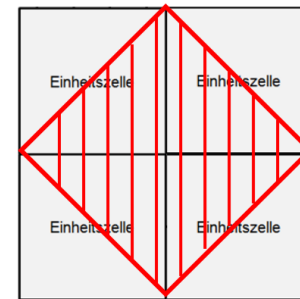
- Virtueller Zugversuch
  - » Tatsächliche Geometrie
  - » Modellierung Zugproben



Prinzip zur Berücksichtigung Einheitszelle im  $0^\circ$  Zugversuch (links) und Nutzung der Symmetrieeigenschaften (rechts)



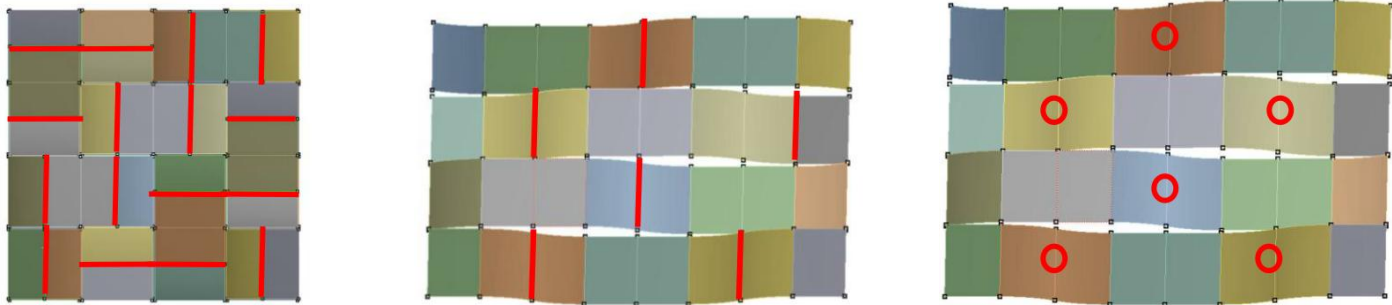
Schliffbild GG800T Twill 2x2– 0,5fache Vergrößerung



Erstellung erweiterter Einheitszelle für  $\pm 45^\circ$  Zugversuch

# Vergleich mit Mech. Tests - Modellierung

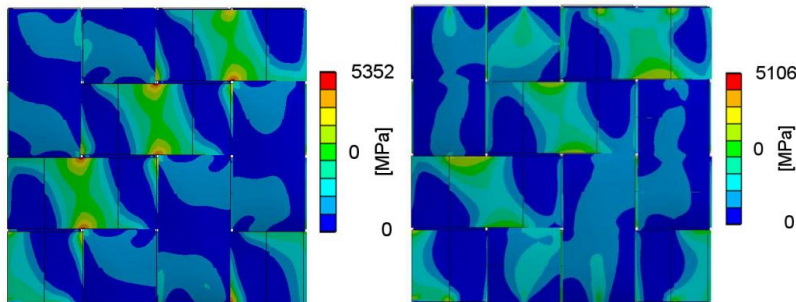
- Berücksichtigung Stützwirkung Einzellagen
  - » Untersuchung unterschiedlicher Randbedingungen
    - » Bewertung der Out of Plane Verformung
    - » Bewertung der lokalen Spannungen



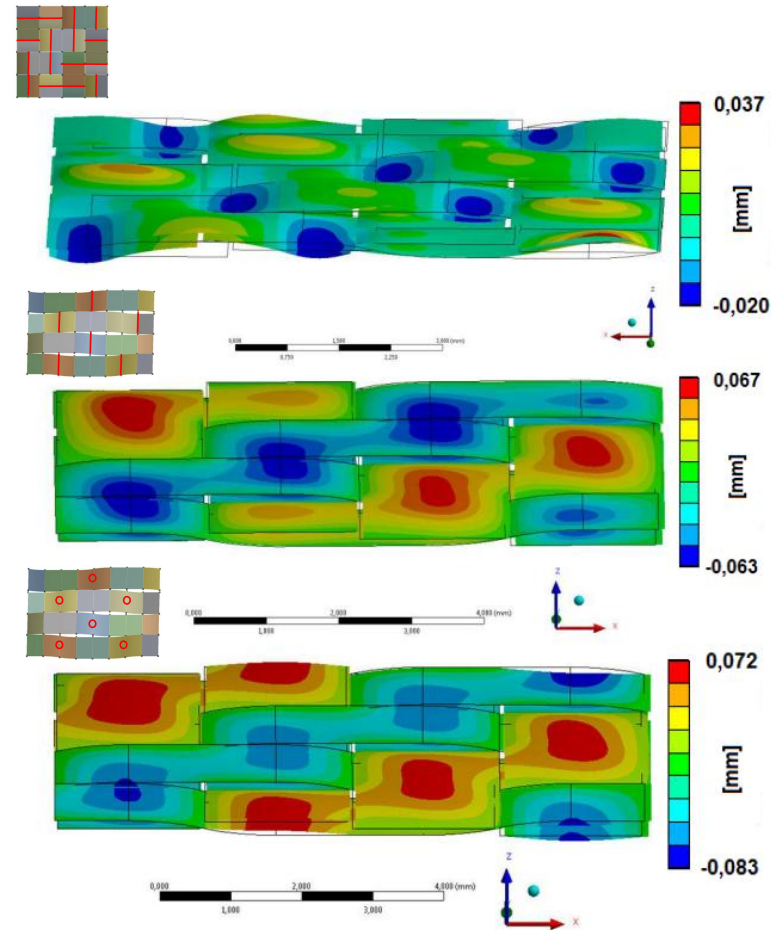
Variante 1: Sperrung der rot markierten Linien an der Oberfläche in z-Richtung (links), Variante 2: Sperrung der rot markierten Linien in xy-Ebene in Mittelfläche der Einzellage (Mitte) und Variante 3: Sperrung einzelner Knoten auf xy-Ebene in Mittelfläche der Einzellage (rechts).

# Vergleich mit Mech. Tests - Modellierung

- Vergleich Verformung
  - » V1: einseitig
  - » V2 und V3: symmetrisch
- Vergleich lokale Spannung
  - » V3 realistisches Bild



Vergleich ersten Hauptspannung in Fasern: Variante 2 (links) und Variante 3 (rechts)



Vergleich der Verformung in z-Richtung: Variante 1 (oben), Variante 2 (Mitte) und Variante 3 (unten)

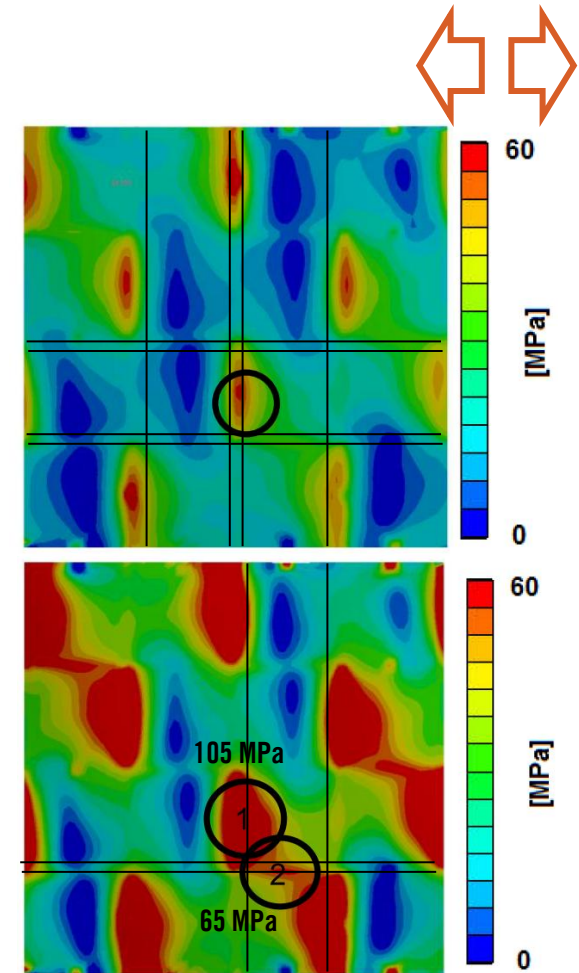
# Vergleich mit Mech. Tests - Ergebnisse

- Exemplarisch GG200T Twill 2x2
  - » Vergleich Kennwerte
  - » Lokale Bewertung der ersten Schädigung

	Simulation	Mechanische Tests
FVG [%]	57,10	57,06
Dehnung [%]	1,10	1,10
Spannung [MPa]	728,79	773,00
E-Modul [GPa]	66,70	64,43

# Vergleich mit Mech. Tests - Ergebnisse

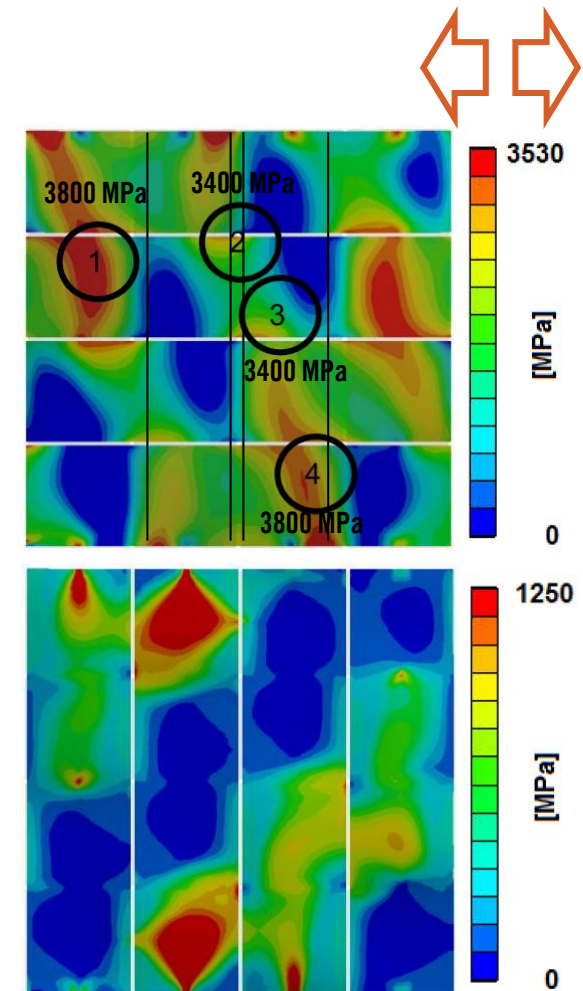
- Exemplarisch GG200T Twill 2x2
  - » Bewertung Matrix
    - » Erstes Überschreiten  $\sigma_{Zul}$ 
      - » 57% der Bruchdehnung
      - » Zwischen Querfasern
      - » Bei max. Faserauslenkung Längsfasern im Vergleich zur Belastungsrichtung
    - » Bei weiterer Steigung Last
      - » Kopplung zweier Bereiche mit initialer Spannungsüberschreitung durch horizontale Bereiche (2)



Maximalspannung in der Matrix bei einer Dehnung von 0,63% (oben) und einer Dehnung von 1,10% (unten)

# Vergleich mit Mech. Tests - Ergebnisse

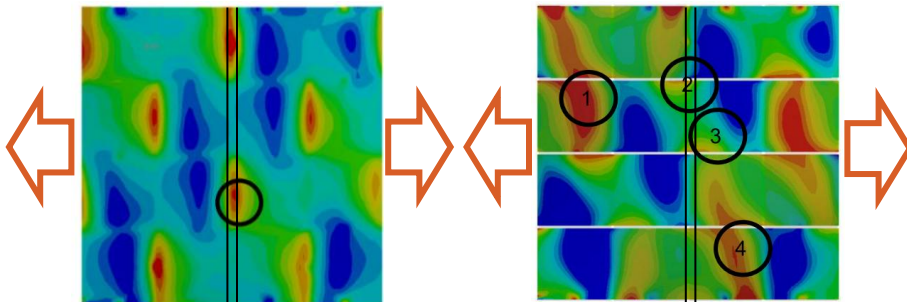
- Exemplarisch GG200T Twill 2x2
  - » Bewertung Fasern
    - » Überschreitung Kettrichtung
      - » (1) und (4) ideal steife Verbindung Kett- und Schussfäden
        - Einfluss Kontakte
      - » (2) und (3) an Faserzwischenräumen bei max. Faserauslenkung Längsfasern im Vgl. zur Belastungsrichtung
        - plausibel
    - » Unkritisch Schussrichtung



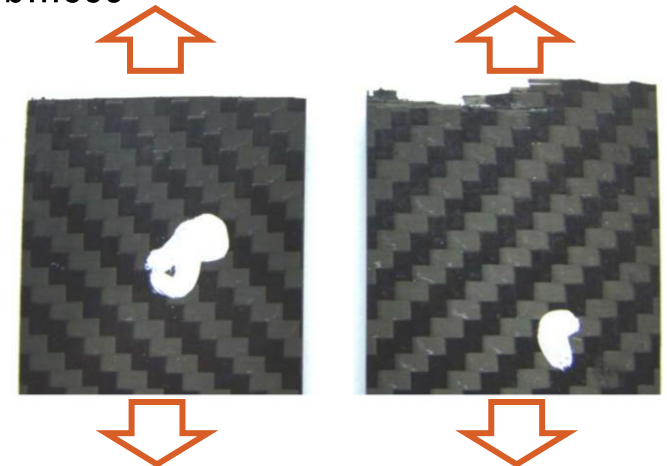
Maximalspannung in den Kett-Fasern (oben) und in den Schuss-Fasern (unten) bei einer Dehnung von 1,1%

# Vergleich mit Mech. Tests - Ergebnisse

- Exemplarisch GG200T Twill 2x2
  - » Bewertung Bruchfläche
    - » Bruchinitiierung in Faserzwischenräumen
    - » Gute Übereinstimmung Simulationsergebnisse



Maximalspannung: Matrix (links) Kettfasern (rechts); Skalierung unterschiedlich: Rote Zonen zeigen Bereiche mit  $\sigma > \sigma_{Zul}$



Versagensbilder an zwei Proben: Bruchinitiierung in Faserzwischenräumen

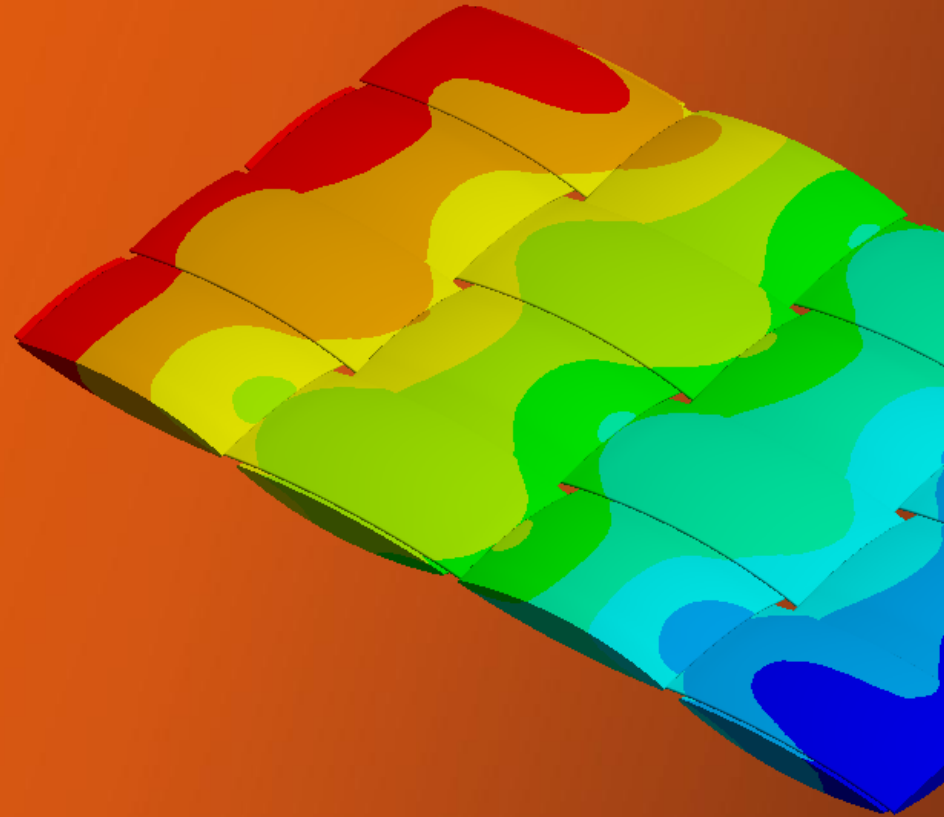


# Zusammenfassung / Ausblick

- Unterschiedliche Modellierungsansätze für Mesomodelle von Faserverbundgeweben möglich
  - » Großer Einfluss von Simulationsrandbedingungen
  - » Kalibrierung mit mech. Tests erforderlich
- Überführung der Erkenntnisse in Makromodellierung
  - » Ableiten von Versagensmodellen /-kriterien in Analogie zu unidirektionalen Gelegen erforderlich
    - » Akzeptable Rechenzeiten
    - » Strukturen mit hoher Leichtbaugüte

# Kontakt

Dr.-Ing. Martin Perterer  
KTM Technologies GMBH  
St. Leonharder Straße 4  
5081 Salzburg/Anif



# Quellenverzeichnis

- [1] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [2] Nasdala, L.: *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik, Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks*, Springer Viewig, Wiesbaden 2012
- [3] R. Cuntze.: *Failure Conditions for Isotropic Materials, Unidirectional Composites, Woven Fabrics - their Visualization and Links -*, Conference on Damage in Composite Materials, Stuttgart, 2006
- [4] Jones, R. M.: *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, Philadelphia (PA), 1975
- [5] Flemming, M., Ziegmann, G., Roth, S.: *Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices*, Springer-Verlag, Berlin, 1995
- [6] Matthews , F. L., Rawlings , R. D.: *Composite Materials – Engineering and Science*, Chapman & Hall, 1994.
- [7] Herakovich, C. T.: *Mechanics of fibrous Composites*, John Wiley & Sons Inc., 1997