



**DHBW**

Duale Hochschule  
Baden-Württemberg  
Stuttgart



# Numerische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen an einem CFK-Werkstoff für einen Formula Student Monocoque

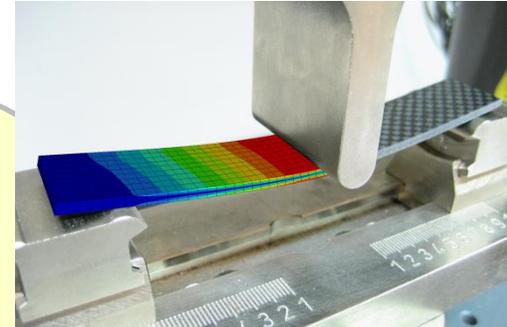
T. Bantle, Prof. Dr.-Ing. H. Mandel;

2. Technologietag der Fakultät Technik | 12.07.2012

[www.dhbw-stuttgart.de](http://www.dhbw-stuttgart.de)

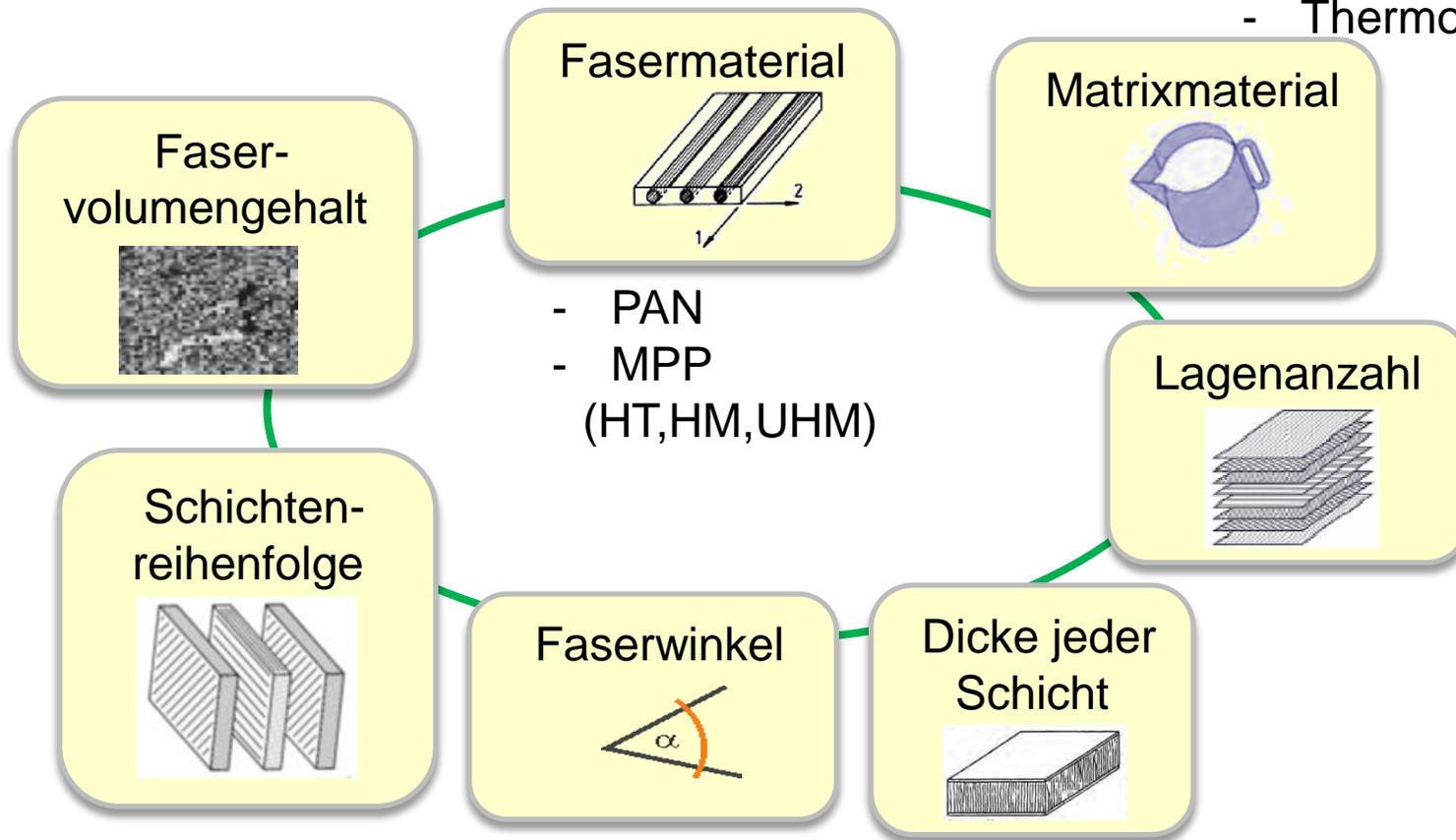
## Numerische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen an einem CFK-Werkstoff für einen Formula Student Monocoque

1. Simulation von Faserverbund Kunststoffen (FVK)
2. Das Formula Student Team der DHBW-Stuttgart
3. CFK im Wettbewerb Formula Student
4. Erste Untersuchungen an CFK-Materialien
5. Zusammenfassung / Fazit / Ausblick



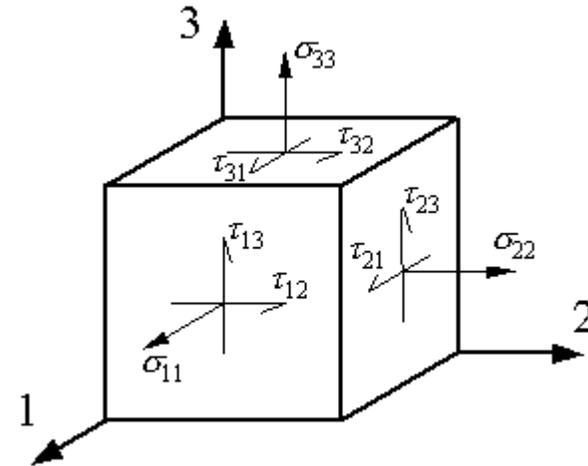
Simulation von Bauteilen aus FVK

- Durolast (Harze, VE)
- Thermoplast (PEEK)



### Verallgemeinerte Spannungstensor

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{21} \end{bmatrix}$$



Für isotropes Materialverhalten sind 2 Parameter notwendig: (E und  $\nu$ )

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix}$$

Für orthotropes Materialverhalten sind 9 Parameter notwendig: (3x E, 3x G, 3x  $\nu$ )

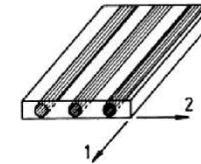
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix}$$

*Symm.*

### Eingabedaten

- Faser (Gewebe) und Matrix

<b>Steifigkeitskennwerte der Faser:</b>	E-Modul längs zur Faser	$E_{F1}$
	E-Modul quer zur Faser	$E_{F2}$
	Schubmodul der Faser	$G_F$
	Querdehnung der Faser	$\nu_F$
<b>Steifigkeitskennwerte der Matrix:</b>	E-Modul	$E_H$
	Schubmodul	$G_H$
	Querdehnung	$\nu_H$
<b>Laminatkennwert</b>	Faservolumenanteil	$\varphi$



## Berechnungsschritte im Einzelnen

**1. Schritt:** Bestimmung der Steifigkeiten der Einzelschichten  $[Q]_k$

$$[Q]_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_1}{E_2}} & \frac{\nu_{12} \cdot E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_1}{E_2}} & 0 \\ \frac{\nu_{12} \cdot E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_1}{E_2}} & \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_1}{E_2}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}$$

**2. Schritt:** Transformation der Steifigkeiten der Einzelschichten in ein globales Koordinatensystem

$$[Q]_{gKS,k} = [T]_k \cdot [Q]_{lKS,k} \cdot [T]_k^T$$

**3. Schritt:** Berechnung der Steifigkeitsmatrix des Laminats:

$$[A] = \sum_k \frac{t_k}{t_{Lam}} [Q]_{gKS,k}$$

## Berechnungsschritte im Einzelnen

**4. Schritt:** Invertierung der Steifigkeitsmatrix des Laminats:

$$[a] = [A]^{-1}$$

**5. Schritt:** Berechnung der Verzerrungen des Laminat

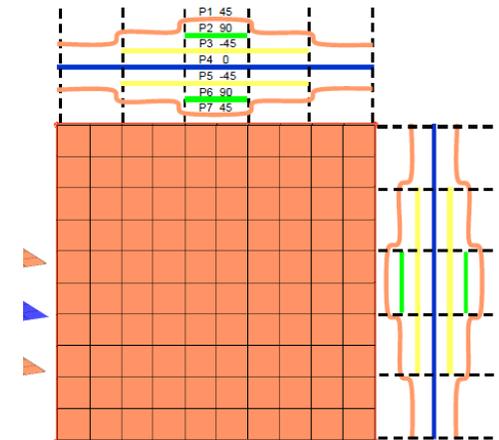
$$\{\varepsilon\} = [A]^{-1} \cdot \{\sigma\}$$

**6. Schritt:** Rücktransformation in das jeweilige lokale Koordinatensystem der Einzelschichten

$$\{\varepsilon\}_{lKS,k} = [T_\varepsilon]_k \cdot \{\varepsilon\}_{gKS,k}$$

**7. Schritt:** Berechnung der Spannungen in den Einzelschichten

$$\{\sigma\}_{ES} = [Q]_{lKS,k} \cdot \{\varepsilon\}_{lKS,k}$$



Quelle: Altair

## Fazit -I-

- Heute erhältliche kommerzielle Software hilft extrem gut bei der Beurteilung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften von FVK-Konstruktionen.
- Zusätzlich werden verlässliche Daten der Komponenten Faser / Matrix benötigt.
- Für die Berechnung von FVK ist aber auch Know-How des Herstellprozesses der FVK-Bauteile notwendig.
- **Aber:**  
Ohne Theoriewissen ist die Gefahr der Fehlanwendung von Berechnungstools extrem groß

## DHBW Engineering Stuttgart e.V.

### SAISON 2009

- FSG Hockenheim                      Zweitbester Newcomer
- 1. Platz Business Plan

### SAISON 2010

- FSG Hockenheim                      28. Platz im Endurance
- FS Spain Barcelona                      7. Platz Overall

### SAISON 2011

- FSG Hockenheim                      18. Platz
- FS Spain Barcelona                      1. Platz Overall

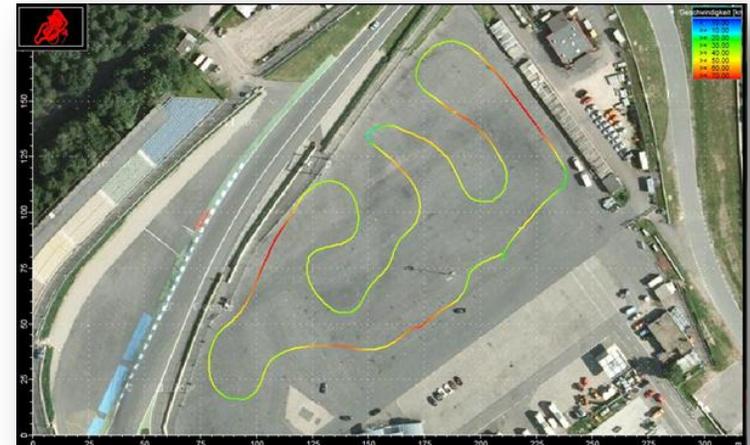
### SAISON 2012

- Start in der FSE (Formula Student Electric)
- aktuell ca. 60 Studierende aller Fakultäten

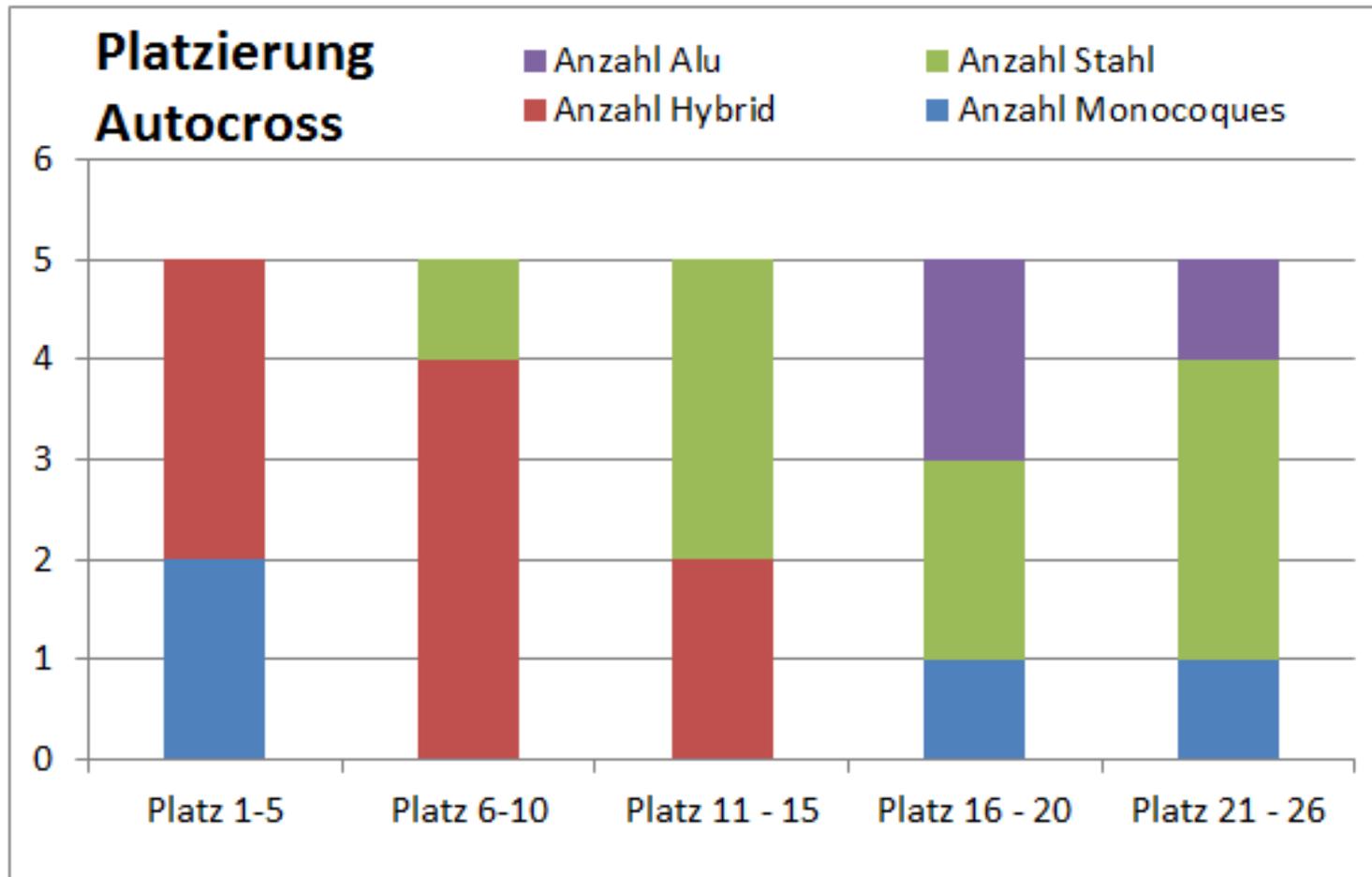


## Formula Student Electric – die neue Herausforderung

- Studentischer Konstruktionswettbewerb speziell für elektrisch betriebene Formelrennwagen
- Weltweit 89 Electric-Teams aus 27 Ländern
- Unser Ziel: „Mit Hochspannung in die Top10 in Hockenheim“
- Hauptaufgabe 2012: Integration des elektrischen Antriebsstrangs
- Hauptaufgabe 2013: Optimierung des Fahrwerk- und Rahmenkonzepts → Monocoque



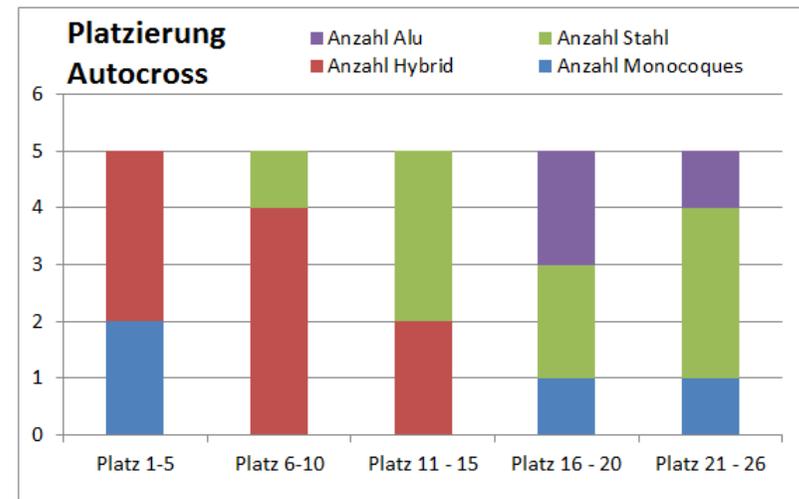
Motivation für den Bau eines Monocoques



## Motivation für den Bau eines Monocoques

### Wettbewerbsanalyse der FSG 2011:

- Topteams fahren vor allem Hybrid-Monocoques
  - 9 Fahrzeuge der Top 15
  - Insgesamt 12 FZG mit Hybridbauweise
- Reines Monocoque in der Umsetzung schwierig
  - Bei guter Umsetzung Top-Resultate
- Stahlgitterrohrrahmen solides Konzept, aber nicht Spitzenfähig
- Aluminiumrahmen bleibt eher ein Exot



Motivation für den Bau eines Monocoques

Potential des Monocoques:

- Gewicht des Chassis
  - -20 bis 30% bei Hybridbauweise
  - -30 bis 40% beim Vollmonocoque
- ...bei 20-30% höherer Steifigkeit

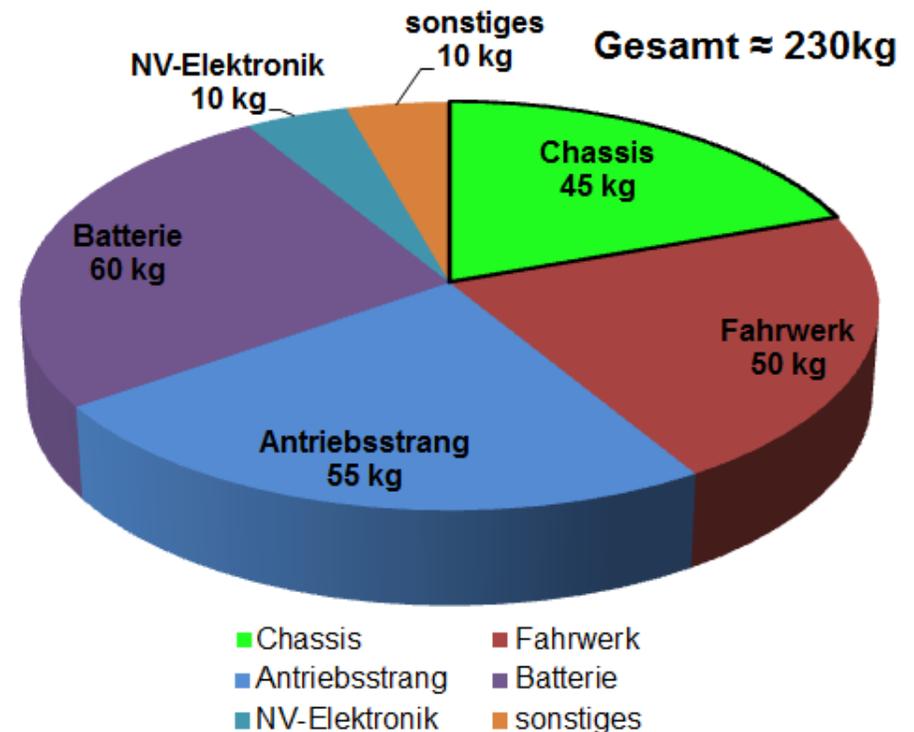
**Aber:**

Nur bei optimaler Auslegung des Faserverbunds auf die Beanspruchung

**Voraussetzung:**

bekanntes Materialverhalten

Gewichtsverteilung mit Stahlrahmen



Motivation für den Bau eines Monocoques

Potential des Monocoques:

- Gewicht des Chassis
  - -20 bis 30% bei Hybridbauweise
  - -30 bis 40% beim Vollmonocoque
- ...bei 20-30% höherer Steifigkeit

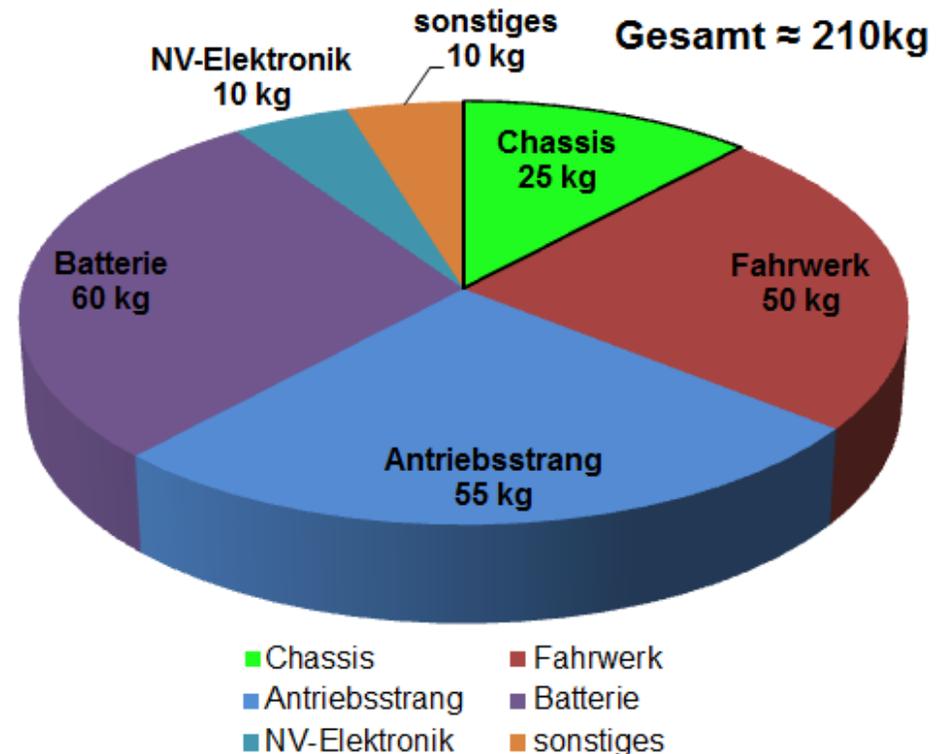
**Aber:**

Nur bei optimaler Auslegung des Faserverbunds auf die Beanspruchung

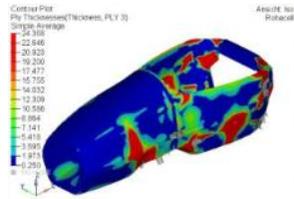
**Voraussetzung:**

bekanntes Materialverhalten

Gewichtsverteilung mit Monocoque



Geplantes Vorgehen



Finaler Aufbau des Monocoques als 3D-Modell und iterative FEM-Simulation zur Optimierung

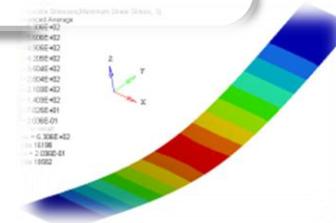
Werkstoffverhalten in Realversuchen mit Datenblattwerten vergleichen

2012  
2013

Aufsuchen möglicher Fertigungs- und Sponsoringpartner

Vergleich Realverhalten mit FEM-Simulation durch Altair Hyperworks

2011  
2012



## Schritt 1: Das praktische Werkstoffverhalten im Dreipunkt-Biegeversuch

### Faserprepregs (Grundmaterial)

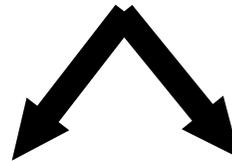
	SIGRATEX Prepreg	SIGRAFIL UD-Prepreg
E-Modul (0°)	60 GPa	110 GPa
E-Modul (90°)	60 GPa	15 GPa
R <sub>m</sub> (0°)	950 MPa	1.550 MPa
R <sub>m</sub> (90°)	900 MPa	50 MPa
Querdehnung	0,1	0,3
Faservolumenanteil	55%	56 %
Garnfeinheit	200 tex	3500 tex
Bindungsart	Körperbindung 2/2	Unidirektional
Hersteller	SGL Group	SGL Group
Matrixwerkstoff	E201 (Epoxid)	E201 (Epoxid)

## Schritt 1: Das praktische Werkstoffverhalten im Dreipunkt-Biegeversuch

### Standardlaminat mit Gewebedeckschicht



- Drei Schichten UD-Prepreg (0/90/0)
- Zwei Decklagen Gewebeprepreg



### UD-Laminat Hochfest



- Vier Schichten des UD-Prepreg

### Versuchsziele

- Ist das teurere UD-Laminat überlegen?
- Inwieweit kann das UD-Laminat Kräfte zwischen den Schichten übertragen?
  - Einfluss der Gewebedeckschicht aus 0/90° Körperbindung
  - Vergleich Datenblattwerte – Realwerte

## Schritt 1: Das praktische Werkstoffverhalten im Dreipunkt-Biegeversuch



## Schritt 1: Das praktische Werkstoffverhalten im Dreipunkt-Biegeversuch



**Standardlaminat mit Gewebedeckschicht**

- Versagen durch Bruch der Zuglage



**UD-Laminat Hochfest**

- Versagen durch Delamination der Drucklage

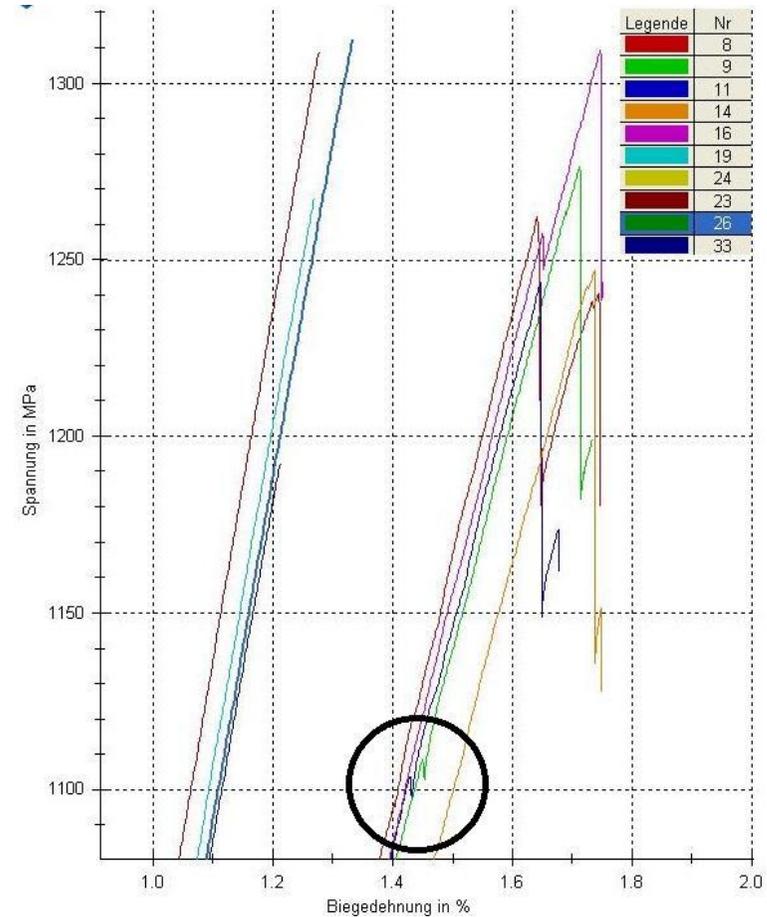
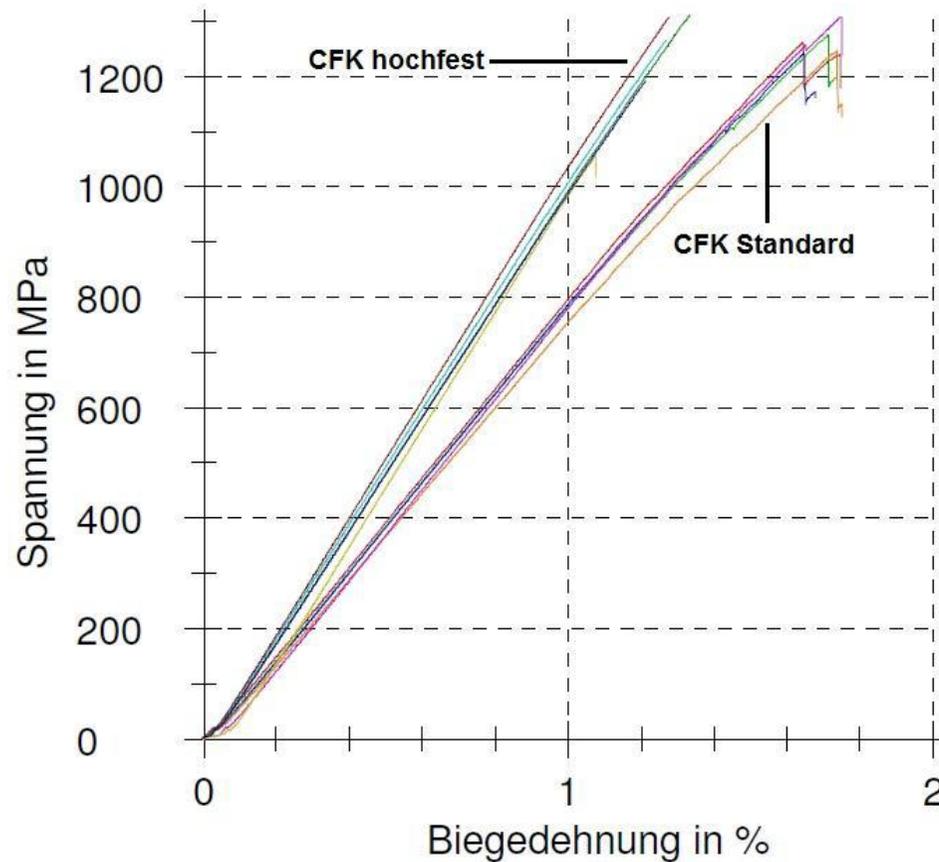
Schritt 1: Das praktische Werkstoffverhalten im Dreipunkt-Biegeversuch

Resultate

	Standardlaminat	UD-Laminat
E-Modul	80,9 GPa	105 GPa
Schwankung	78,2 – 81,8 GPa	102 – 107 GPa
Biegefestigkeit	1250 MPa	1.280 MPa
Schwankungen	1240 – 1310 MPa	1.050 – 1310 MPa
Bruchdehnung	1,6 – 1,7 %	1,1 – 1,3 %



### Schritt 1: Das praktische Werkstoffverhalten im Dreipunkt-Biegeversuch



## Schritt 1: Das praktische Werkstoffverhalten im Dreipunkt-Biegeversuch

### Fazit – II –

- 12,5% teureres UD-Laminat erzielte im Biegeversuch keine höheren Festigkeiten
  - Grund: Anisotropie des Werkstoffs
  - Vorsicht bei Festigkeitswerten für einfache Belastungen aus dem Datenblatt (!)
- Stärkere Neigung zur Delamination beim UD-Laminat
  - Grund: geringere Schichtdicke = besserer Zusammenhalt
- Höherer Einfluss der Materialqualität beim UD-Laminat (Schwankungen)

## Schritt 2: Die numerische Simulation mit Altair HyperWorks

### Aufbau der Laminare mit HyperLaminate

- HyperLaminate
  - Internes Tool in HyperWorks für FKV
  - Aus Einzelschichten Verbund aufbauen
  - Dicke und Winkel sowie Material zuweisbar
- Schichtaufbau
  - Standardlaminat: 3 UD-Schichten und 2 Gewebesichten
  - HF-Laminat mit 4 UD-Schichten

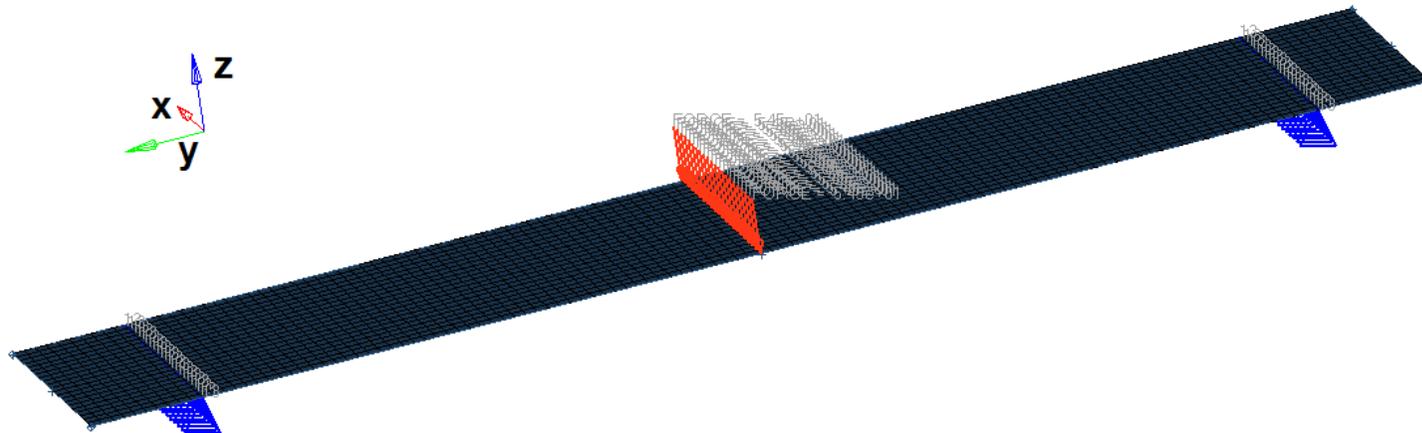
Ply lay-up: BIEGEPROBE.PRT  
 Total number of plies: 5  
 Total thickness: 2.41

	Ply	Material	Thickness T1	Orientation Degrees
	1	CFK_Gewebe	0.2	0.0
	2	CFK_0 90	0.67	0.0
	3	CFK_0 90	0.67	90.0
	4	CFK_0 90	0.67	0.0
	5	CFK_Gewebe	0.2	0.0

## Schritt 2: Die numerische Simulation mit Altair HyperWorks

### Aufbau der Laminare mit HyperLaminare

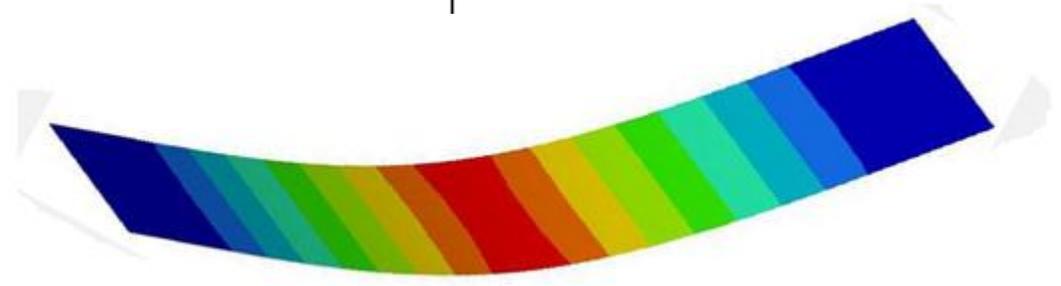
- Ziele der Simulation:
  - Vergleich Realverhalten – Simulation (Versagen)
  - Abweichungen bei UD-Laminat (entspricht exakt Aufbau im Modell)
  - Eignung des Rechenmodells für Gewebe



Schritt 2: Die numerische Simulation mit Altair HyperWorks

Resultat

	Standardlaminat	UD-Laminat
Max. Vergleichsspannung	1523 MPa	1526 MPa
Max. Scherspannung	526 MPa	630 MPa
Versagensindex auf:	(1=Versagen)	(1=Versagen)
Druckseite	1,3	1,8
Zugseite	1,1	0,8



## Schritt 2: Die numerische Simulation mit Altair HyperWorks

### Fazit – III –

- Simulation zeigt klare Übereinstimmung mit Realverhalten
- Dennoch:
  - Kunst liegt darin, die Ergebnisse der Simulation richtig zu interpretieren
  - Überprüfung verschiedener Spannungen und Versagenskriterien notwendig
- Ohne Kenntnis des Werkstoffverhaltens seitens des Ingenieurs sind Berechnungen sehr unsicher und unzuverlässig

## Abschließende Empfehlungen

### Bau eines Hybrid-Monocoques

- Optimum aus Herstellbarkeit, Kosten, Aufwand und Gewicht
- Konstruktion ist ein iterativer Prozess aus Simulation und Versuch
  - Aufwand muss klar sein
- Werkstoffkenntnis und Versuche sind unerlässlich für eine optimale Auslegung
- FE-Programme ermöglichen bei richtiger Benutzung hochrealistische Ergebnisse

