

# **Numerische Simulation von Schlagbelastungen an unsymmetrischen CFK-Sandwich Platten**

Falk Hänel

Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland



5. LS-DYNA FORUM 2006

**Numerische Simulation von Schlagbelastungen  
an unsymmetrischen CFK-Sandwich-Platten  
mit NOMEX<sup>®</sup>- Honigwabenkern**

F. Hähnel, K. Wolf  
Institut für Luft- und Raumfahrttechnik  
Lehrstuhl für Luftfahrzeugtechnik

12./13. Oktober 2006, Ulm

---

## Inhalt



Einleitung

Schlagschädigung von CFK-Sandwich

Modelle zur Simulation von Sandwich-Strukturen

Simulation von Schlagbelastungen an  
CFK-Sandwich



Zusammenfassung

## Einleitung

### Hintergrund:

→ Gefährdung von Sandwich-Strukturen durch aufschlagende Objekte:

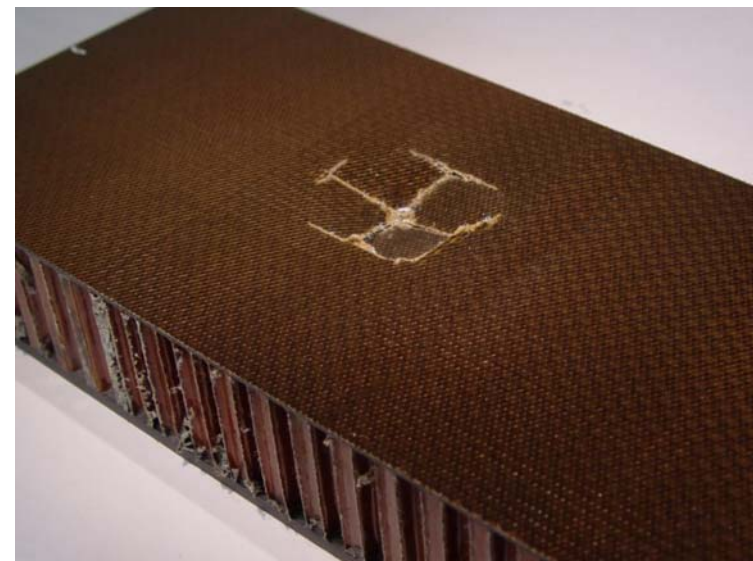
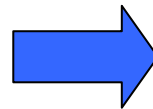
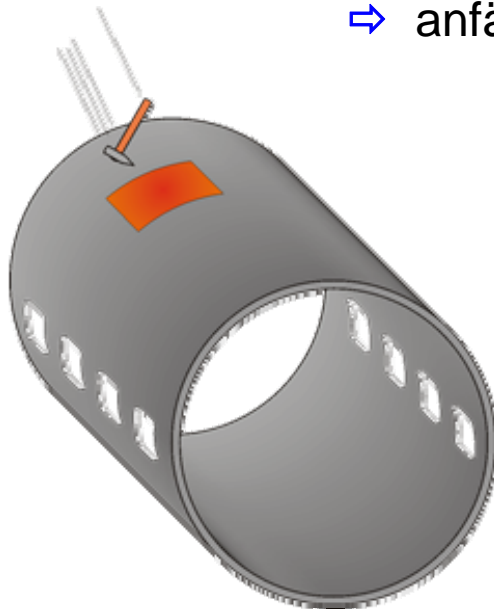
- „Tool Drop“, Steinschlag, Hagel
- Vogelschlag
- Triebwerksschaufeln
- u. ä.



## Einleitung

### Hintergrund:

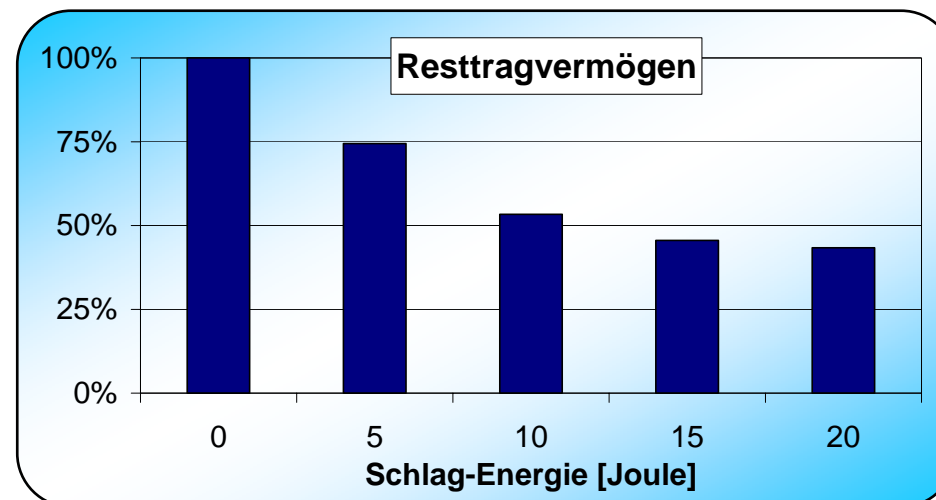
- Gefährdung von Sandwich-Strukturen durch aufschlagende Objekte:
- CFK-Sandwich mit NOMEX<sup>®</sup>- Honigwabenkern:
  - hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten
  - dünne, spröde Deckschichten, weicher Kern
  - ⇒ anfällig gegenüber Schlagbelastungen



## Einleitung

### Hintergrund:

- Gefährdung von Sandwich-Strukturen durch aufschlagende Objekte:
- CFK-Sandwich mit NOMEX<sup>®</sup>- Honigwabenkern:
  - hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten
  - dünne, spröde Deckschichten, weicher Kern
    - ⇒ anfällig gegenüber Schlagbelastungen
- Schlagschäden reduzieren das Resttragvermögen



## Einleitung

### Hintergrund:

- Gefährdung von Sandwich-Strukturen durch aufschlagende Objekte:
- CFK-Sandwich mit NOMEX<sup>®</sup>- Honigwabenkern:
  - hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten
  - dünne, spröde Deckschichten, weicher Kern
    - ⇒ anfällig gegenüber Schlagbelastungen
- Schlagschäden reduzieren das Resttragvermögen
- Nachweis der Schadenstoleranz von Primärstrukturen
  - gegenwärtig: experimentelle Untersuchungen ⇒ teuer
  - zukünftig: Simulation ⇒ wenige Versuche zur Verifikation

## Einleitung

### Hintergrund:

- Gefährdung von Sandwich-Strukturen durch aufschlagende Objekte:
- CFK-Sandwich mit NOMEX<sup>®</sup>- Honigwabenkern:
  - hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten
  - dünne, spröde Deckschichten, weicher Kern
    - ⇒ anfällig gegenüber Schlagbelastungen
- Schlagschäden reduzieren das Resttragvermögen
- Nachweis der Schadenstoleranz von Primärstrukturen
  - gegenwärtig: experimentelle Untersuchungen ⇒ teuer
  - zukünftig: Simulation ⇒ wenige Versuche zur Verifikation

### Zielstellung:

- Entwicklung von Simulationsmethoden:
  1. Schadensentstehung in Sandwich-Strukturen bei Schlagbelastungen
  2. Vorhersage des Resttragvermögens der geschädigten Strukturen



## Inhalt

Einleitung



Schlagschädigung von CFK-Sandwich

Modelle zur Simulation von Sandwich-Strukturen

Simulation von Schlagbelastungen an  
CFK-Sandwich



Zusammenfassung

# Schlagschädigung von CFK-Sandwich

Beispiel: 15J Impact, 1" Impactor

## Deckschichtschädigung



sichtbar:

- Risse sowie
- Eindruck der Deckschicht

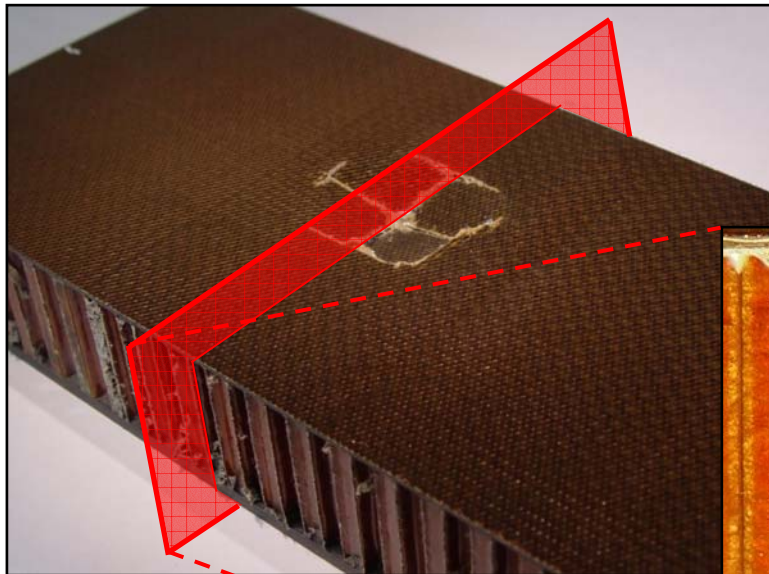
nicht sichtbar:

- Faser- und Matrixbrüche
- Delaminationen

# Schlagschädigung von CFK-Sandwich

Beispiel: 15J Impact, 1" Impactor

## Deckschichtschädigung



## Kernschädigung

zertrümmerter Honigwabenkern -  
durch Stabilitäts- und Festigkeits-  
versagen der Wabenwände



### Schlagschädigungen sind strukturseitig abhängig von:

- Steifigkeiten, Versagenseigenschaften des Deckschichtlaminats
- Stabilitäts- und Verformungsverhalten der Kernstruktur (Wabenwände)
- Interaktion von Deckschicht und Kernstruktur - bestimmt durch deren Eigenschaften

## Inhalt

Einleitung

Schlagschädigung von CFK-Sandwich



Modelle zur Simulation von Sandwich-Strukturen

Simulation von Schlagbelastungen an  
CFK-Sandwich

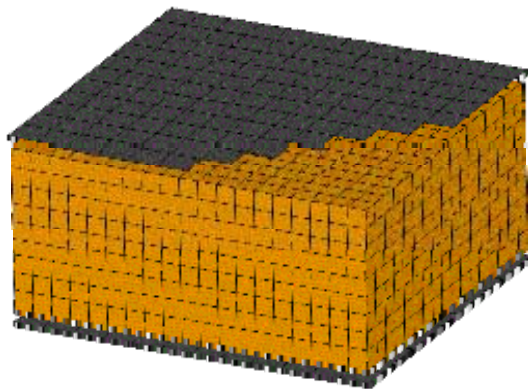


Zusammenfassung

## Modelle zur Simulation von Sandwich-Strukturen

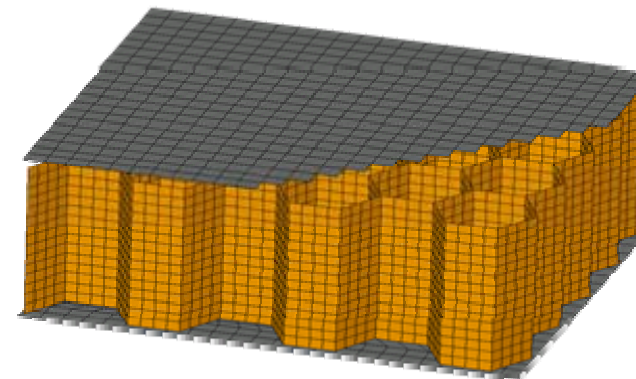
- Untersuchung der Schadensentstehung und -ausbreitung in Sandwich-Strukturen (z.B. durch Schlagbelastung) ⇒ 3D-Simulation
- Strukturmodellierung:
  - Deckschichten ⇒ Schalenelemente,
  - Kernstruktur ⇒

a) makro-mechanischer Ansatz



- globales Verhalten der Kernstruktur in Volumenelemente integriert
- lokale Versagensphänomene können nicht betrachtet werden

b) meso-mechanischer Ansatz



- Honigwabenkern: Zellwände ⇒ Schalenelemente
- Einfluss lokaler Versagensmechanismen der Zellwände wird beachtet

## Inhalt

Einleitung

Schlagschädigung von CFK-Sandwich

Modelle zur Simulation von Sandwich-Strukturen



Simulation von Schlagbelastungen an  
CFK-Sandwich

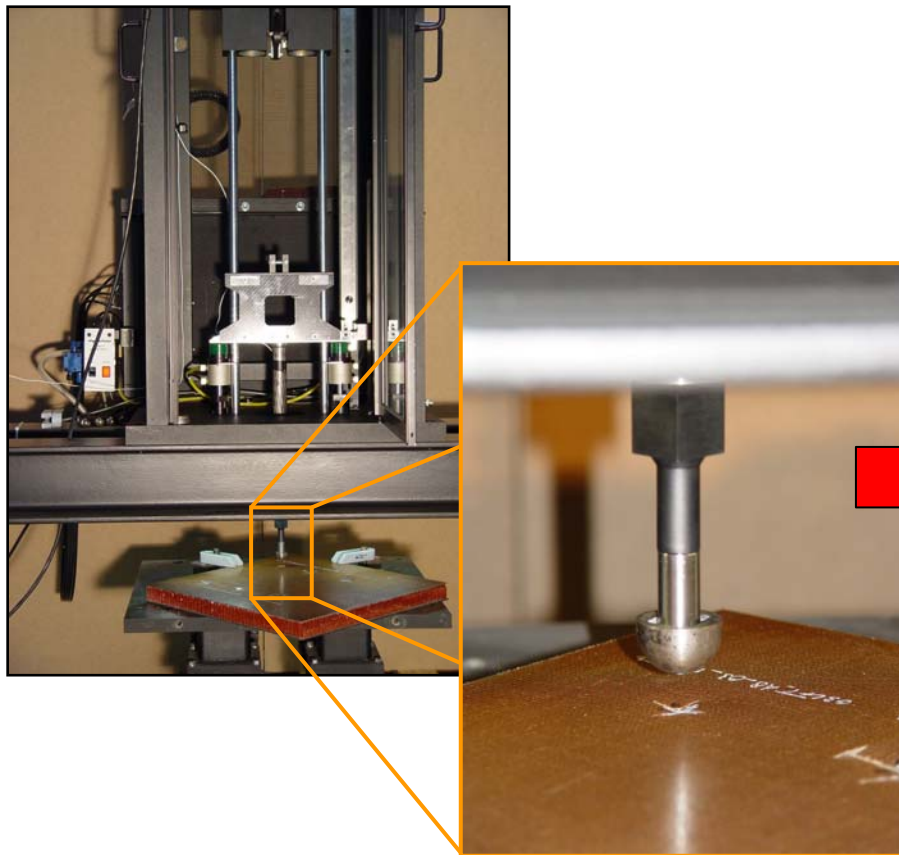


Zusammenfassung

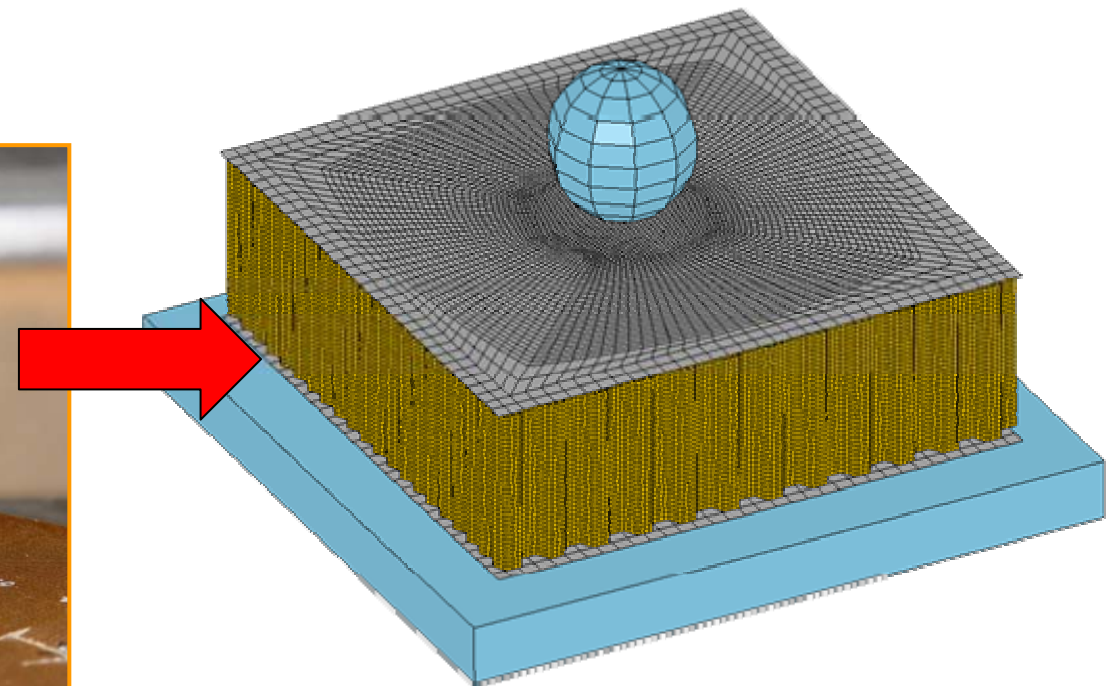
# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

Versuchsaufbau – Ableitung FE-Modell

## Konfiguration im Experiment



## Simulationsmodell



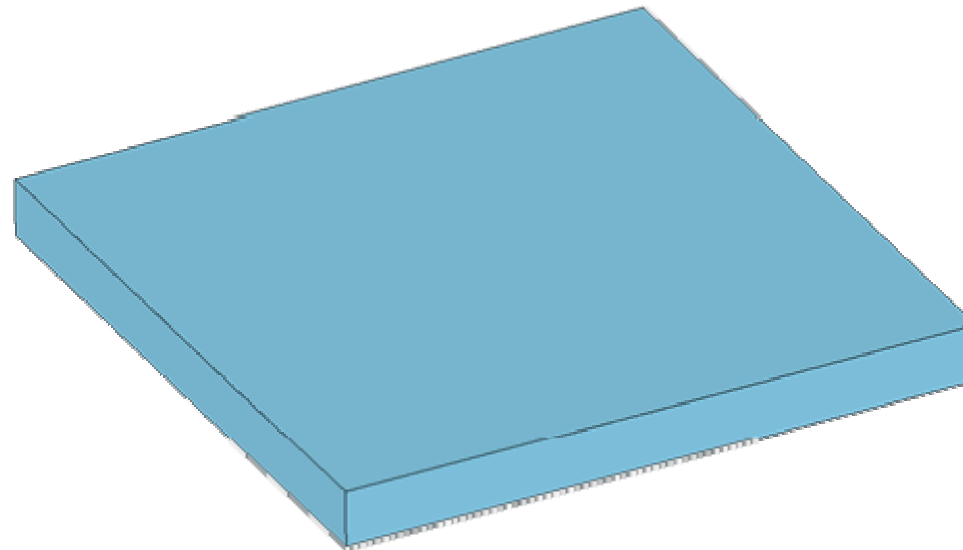
Ausschnitt der Sandwich-Platte:  
100 mm x 100 mm

# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

Aufbau FE-Modell

Konfiguration im Experiment

Simulationsmodell



→ Probenauflage: Stahlplatte

Sandwich-Platte:  
100 mm x 100 mm

→ starre Platte  
MAT\_rigid

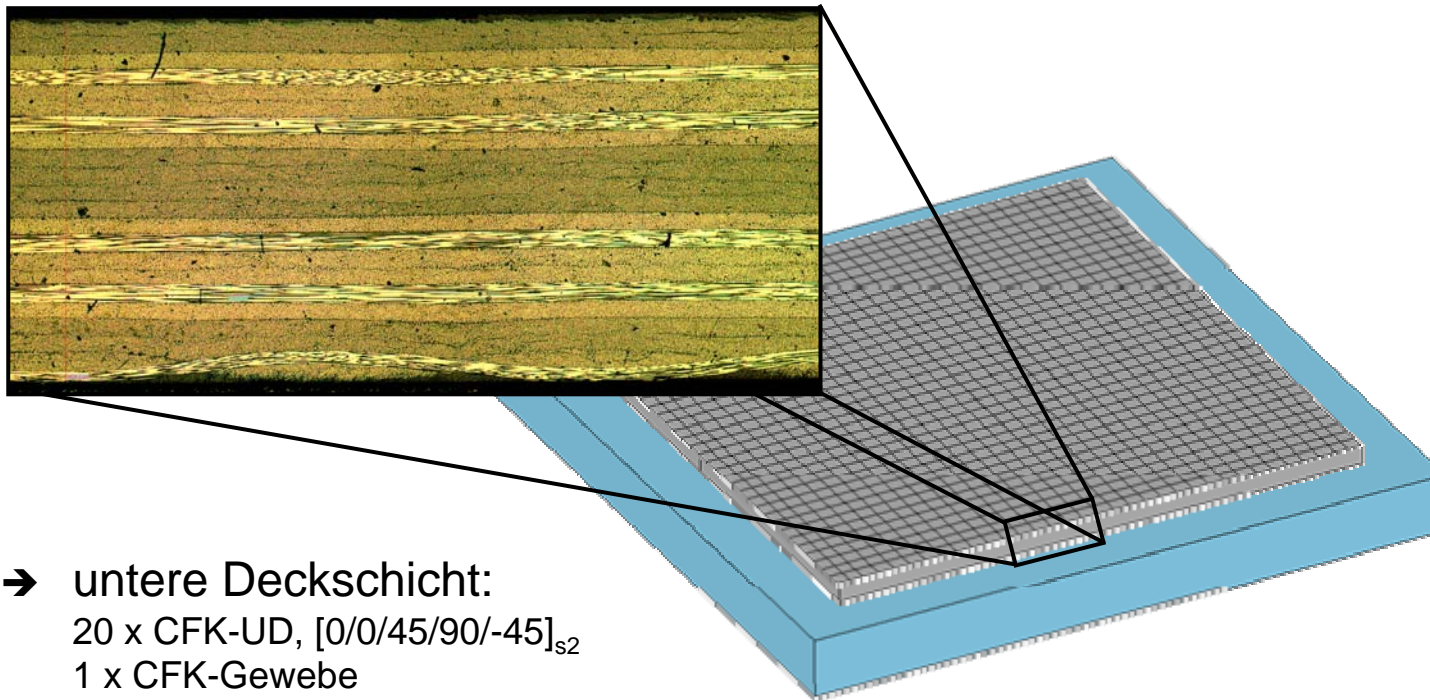


# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

Aufbau FE-Modell

Konfiguration im Experiment

Simulationsmodell



→ untere Deckschicht:  
20 x CFK-UD, [0/0/45/90/-45]<sub>s2</sub>  
1 x CFK-Gewebe

→ Probenaufgabe: Stahlplatte

Sandwich-Platte:  
100 mm x 100 mm

→ Schalenelemente,  
EF2, MAT58  
(2x16 Parameter)

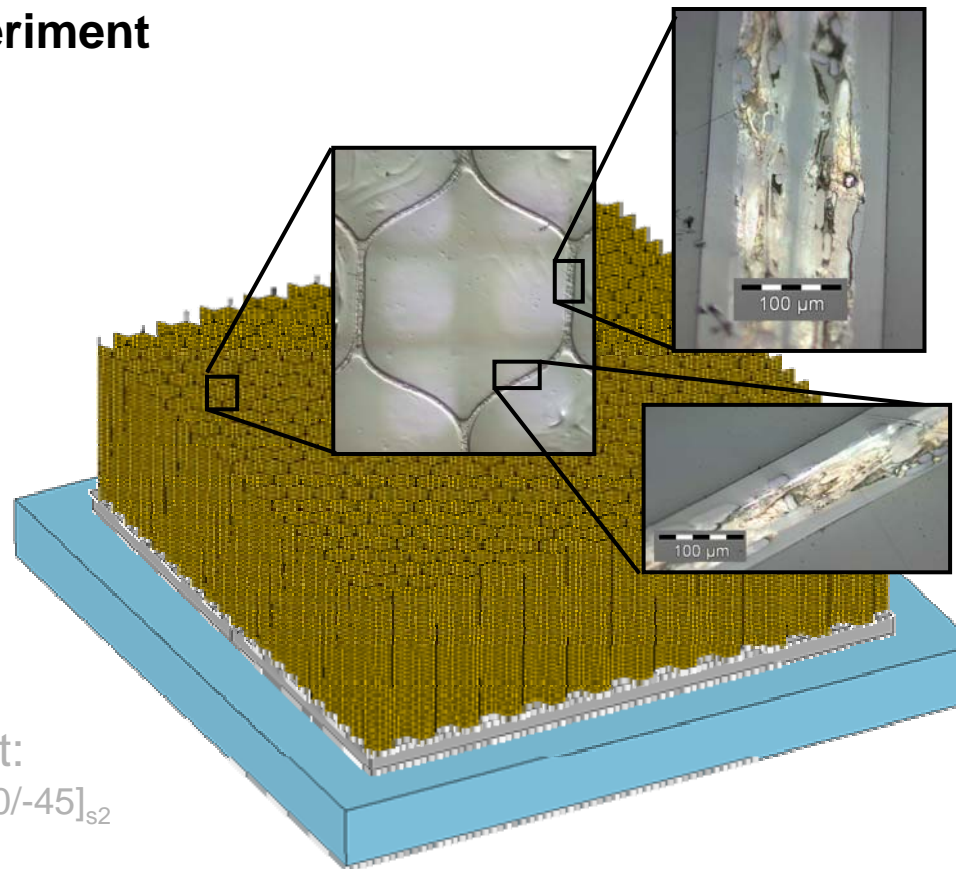
→ starre Platte  
MAT\_rigid

# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

## Aufbau FE-Modell

### Konfiguration im Experiment

### Simulationsmodell



→ Kern:  
NOMEX®- Honigwabe  
4.8-48, 28 mm hoch

→ untere Deckschicht:  
20 x CFK-UD,  $[0/0/45/90/-45]_{s2}$   
1 x CFK-Gewebe

→ Probenaufgabe: Stahlplatte

Sandwich-Platte:  
100 mm x 100 mm

→ Schalenelemente,  
EF6, MAT58  
(2x16 Parameter)

→ Schalenelemente,  
EF2, MAT58  
(2x16 Parameter)

→ starre Platte  
MAT\_rigid

# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

## Aufbau FE-Modell

### Konfiguration im Experiment

### Simulationsmodell

→ obere Deckschicht:

- 1 x Cu-Netz
- 1 x GFK-Gewebe, 0°
- 3 x CFK-Gewebe, 0°
- 1 x GFK-Gewebe, 0°

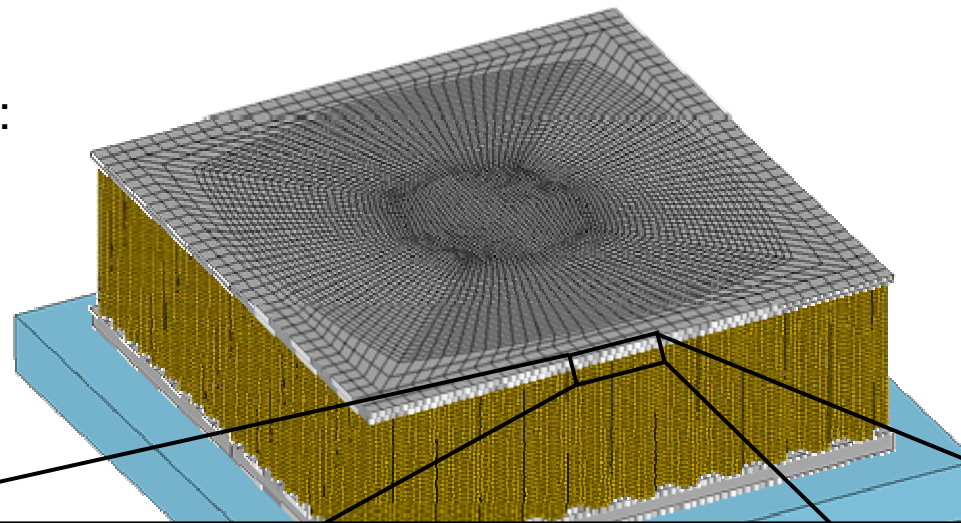
→ Kern:

- NOMEX®- Honigwabe
- 4.8-48, 28 mm hoch

→ untere Deckschicht:

- 20 x CFK-U
- 1 x CFK-Ge

→ Probenau



→ Schalenelemente,

- EF6, MAT58
- (2x16 Parameter)

→ Schalenelemente,

- EF6, MAT58
- (2x16 Parameter)

→ Schalenelemente,

- MAT58
- (6 Parameter)

→ untere Platte

- MAT\_rigid

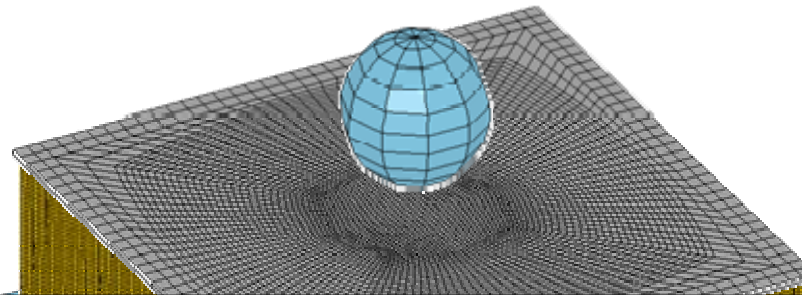
# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

## Aufbau FE-Modell

### Konfiguration im Experiment

→ Fallgewicht:  
m = 1,1 kg; Stoßspitze  
Stahlhalbkugel, d = 1"

→ obere Deckschicht:  
1 x Cu-Netz  
1 x GFK-Gewebe, 0°  
3 x CFK-Gewebe, 0°  
1 x CFK-Gewebe, 0°



### Simulationsmodell

→ starre Kugel  
MAT\_rigid

→ Schalenelemente,  
EF10, MAT58  
(2x16 Parameter)

→

⇒ separate Verifikation der Sandwich-Strukturelemente für  
erfolgreiche Simulation der Gesamtstruktur erforderlich

→

→

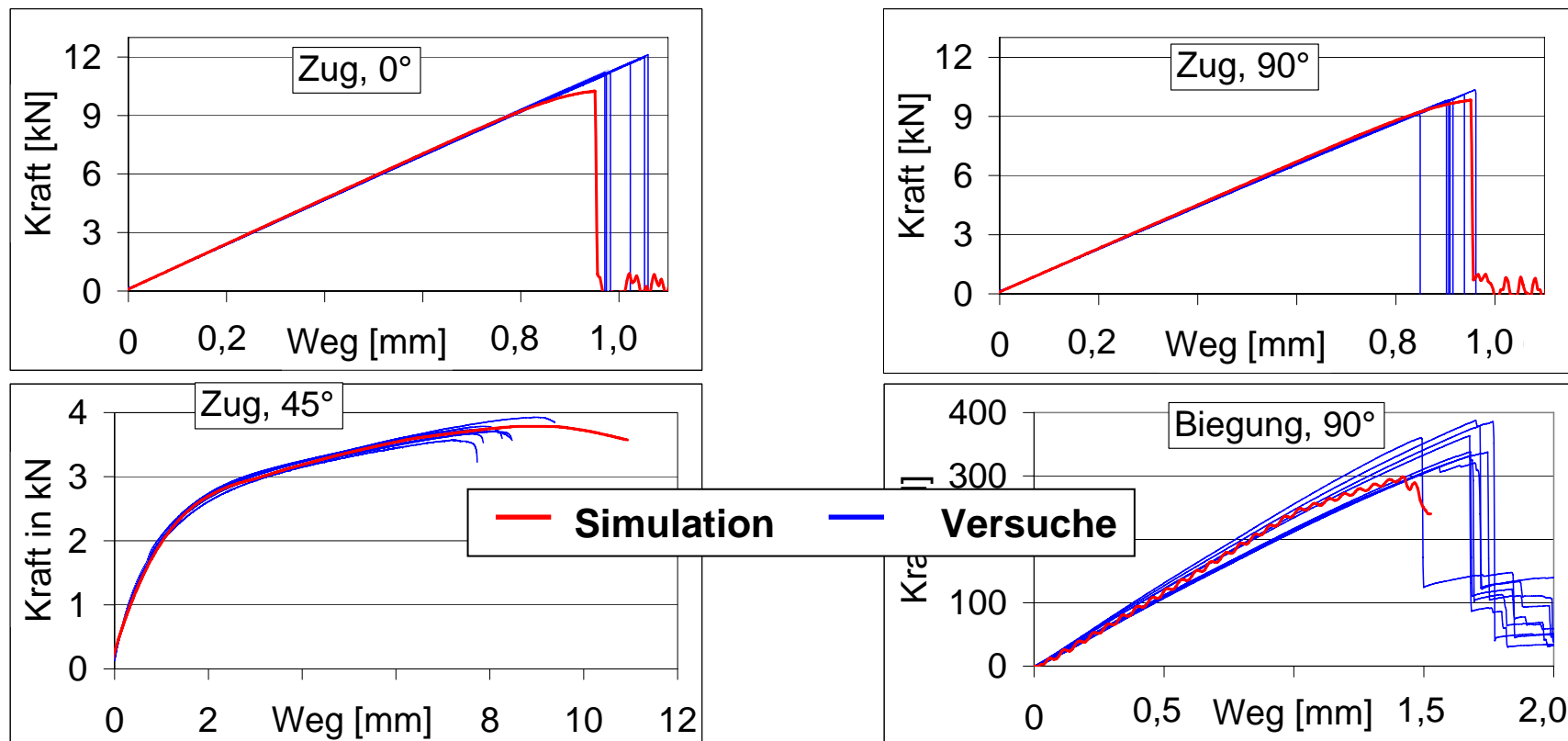
100 mm x 100 mm

MAT\_rigid

# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

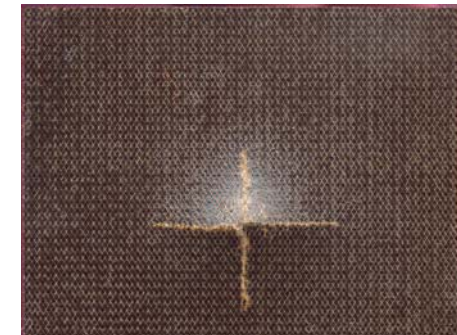
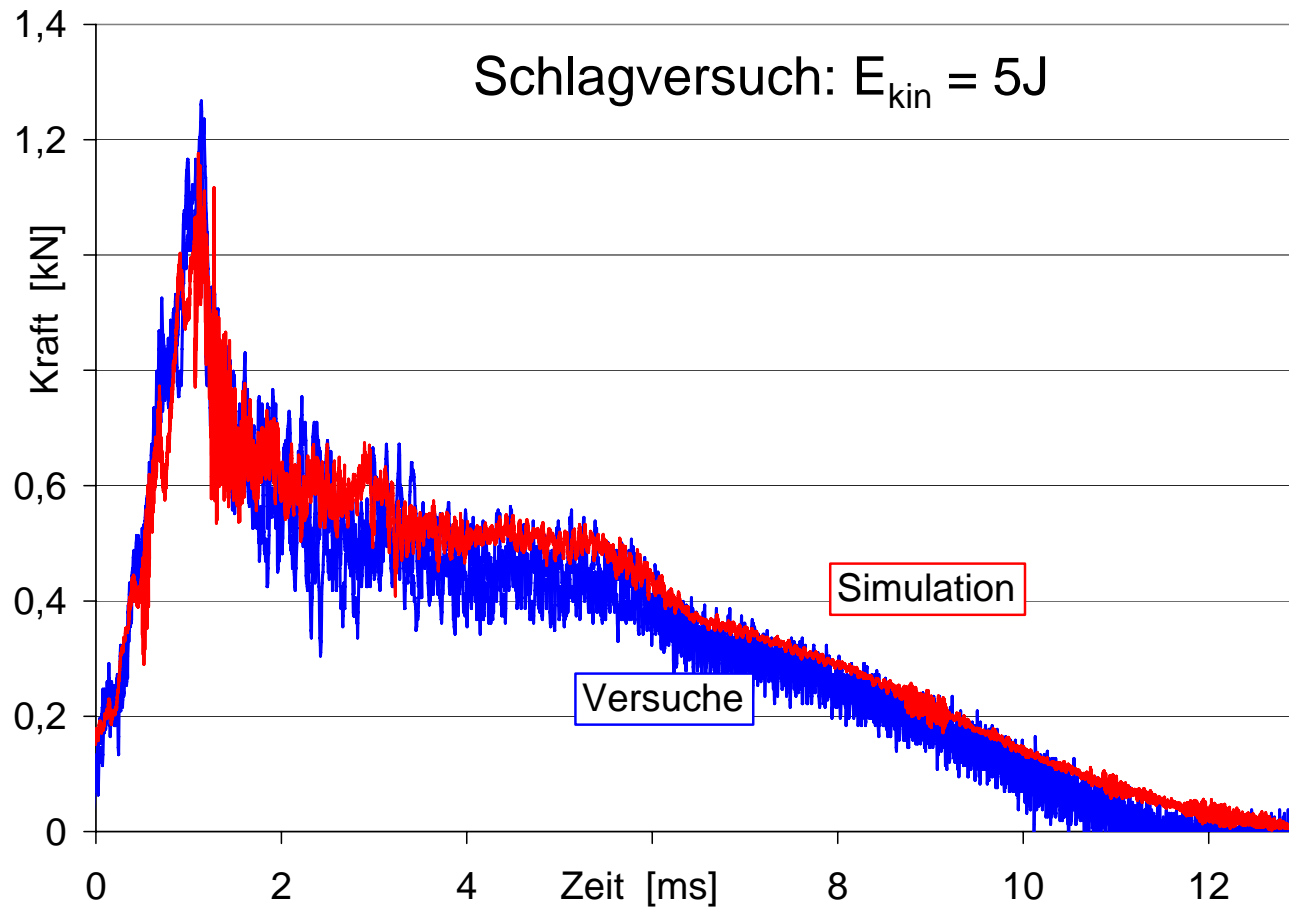
## Verifikation Deckschicht

Nachrechnung von Zug- und Biegebelastungen an  
0°-, 45°- und 90°-Proben der oberen Deckschicht

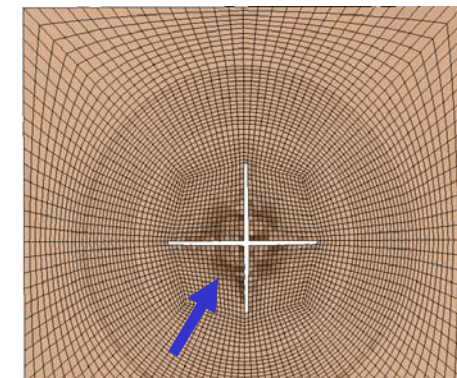


# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

## Verifikation Deckschicht



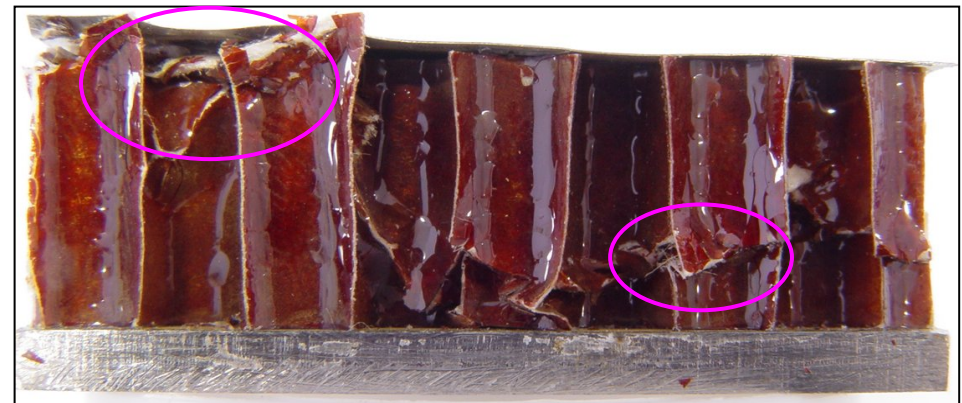
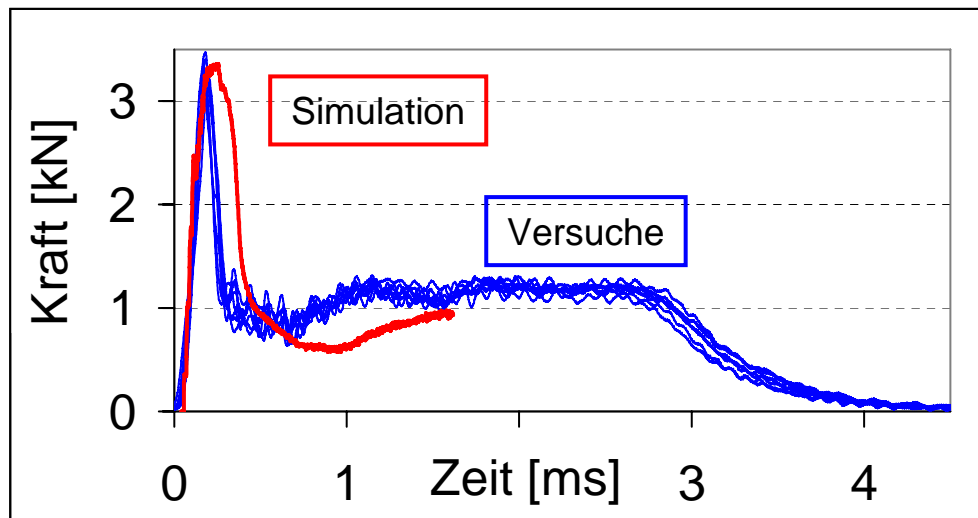
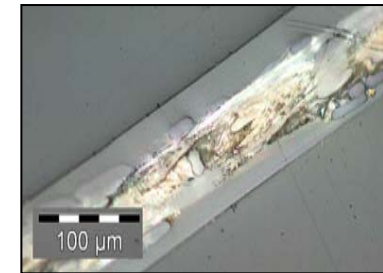
sichtbares Aufreißen der Deckschicht im Versuch



in der Simulation berechneter Riss der Deckschicht

## Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich Verifikation Kern

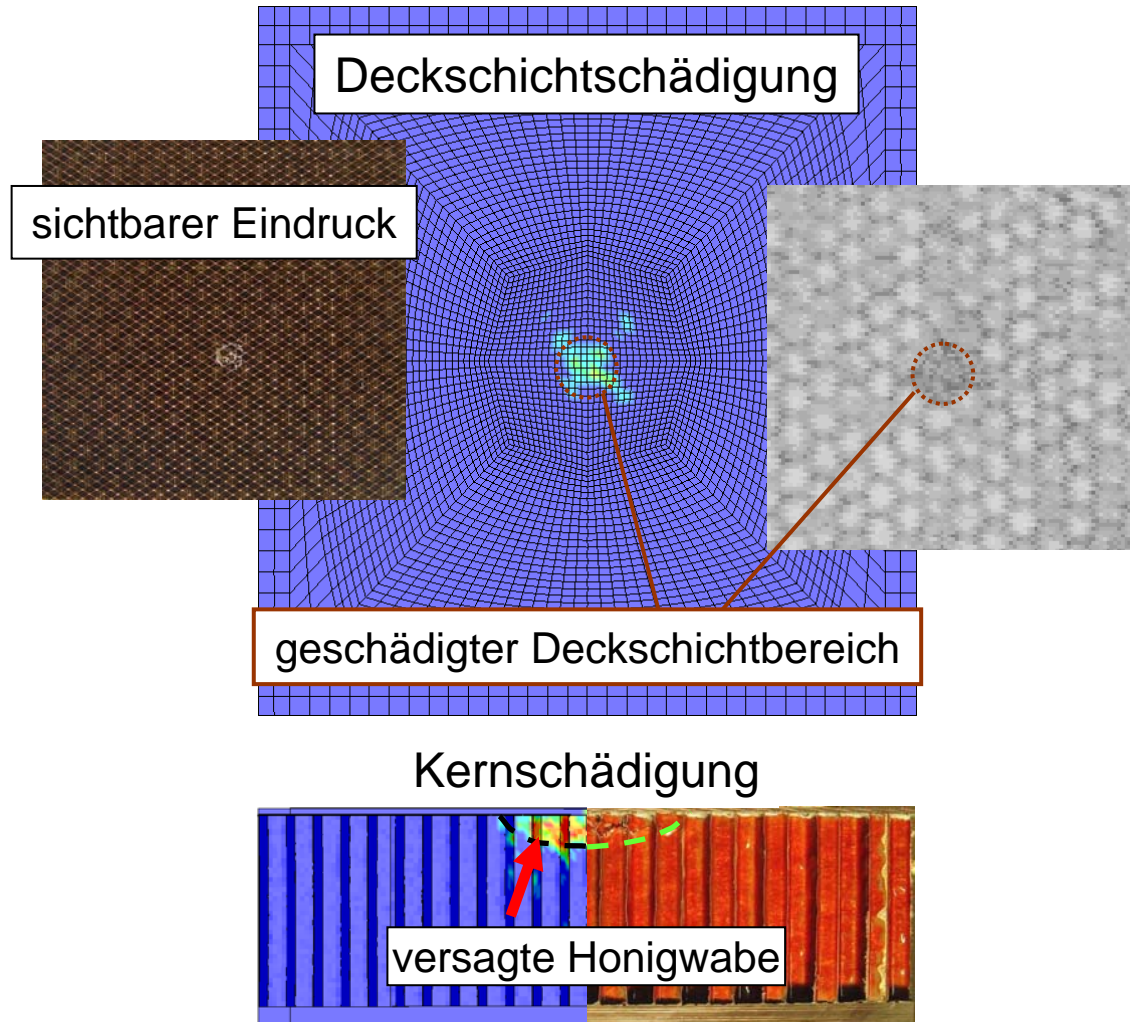
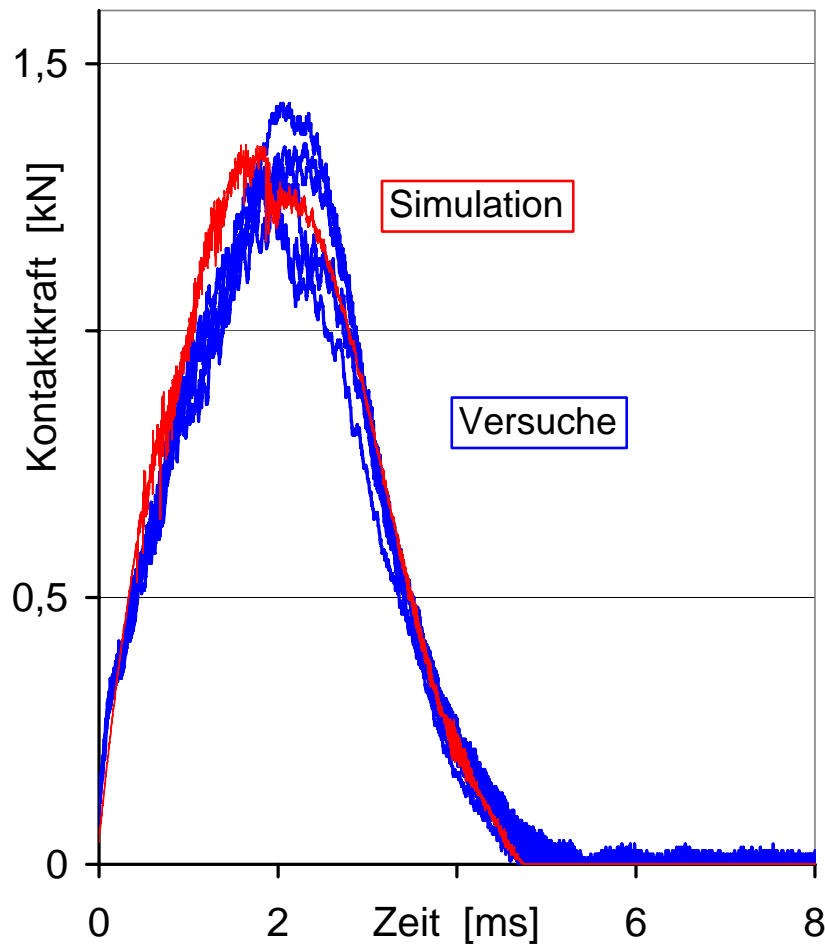
- meso-mechanischen Ansatz ⇒ Materialkennwerte der Wabenwände erforderlich
- experimentelle Datenermittlung an Wabenwand nicht möglich ⇒ Kennwerte an Papierproben bestimmt
- Nachrechnung von Crash-Versuchen an NOMEX® -Honigwaben mit homogenisierter Wabenwand



- durch Homogenisierung keine Abbildung von Harzbrüchen möglich

# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

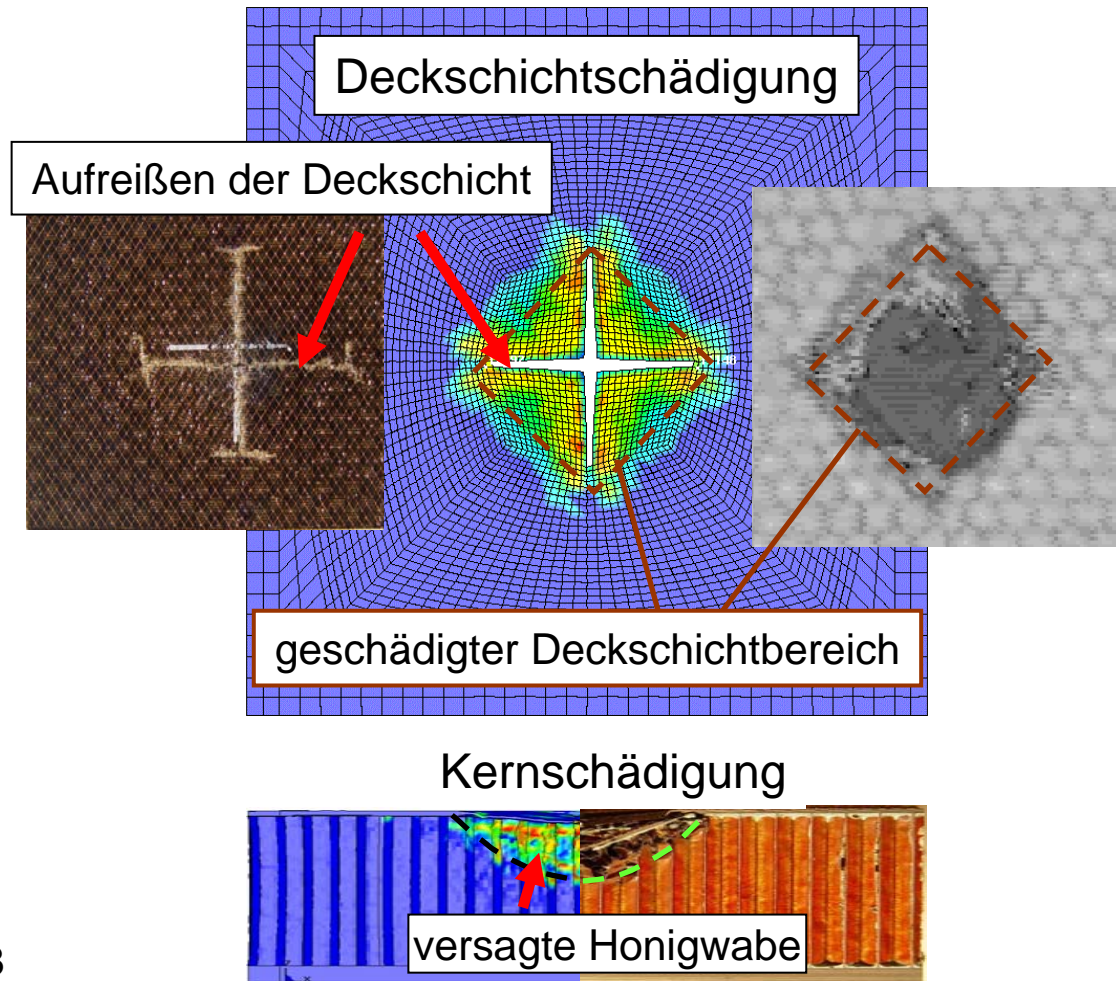
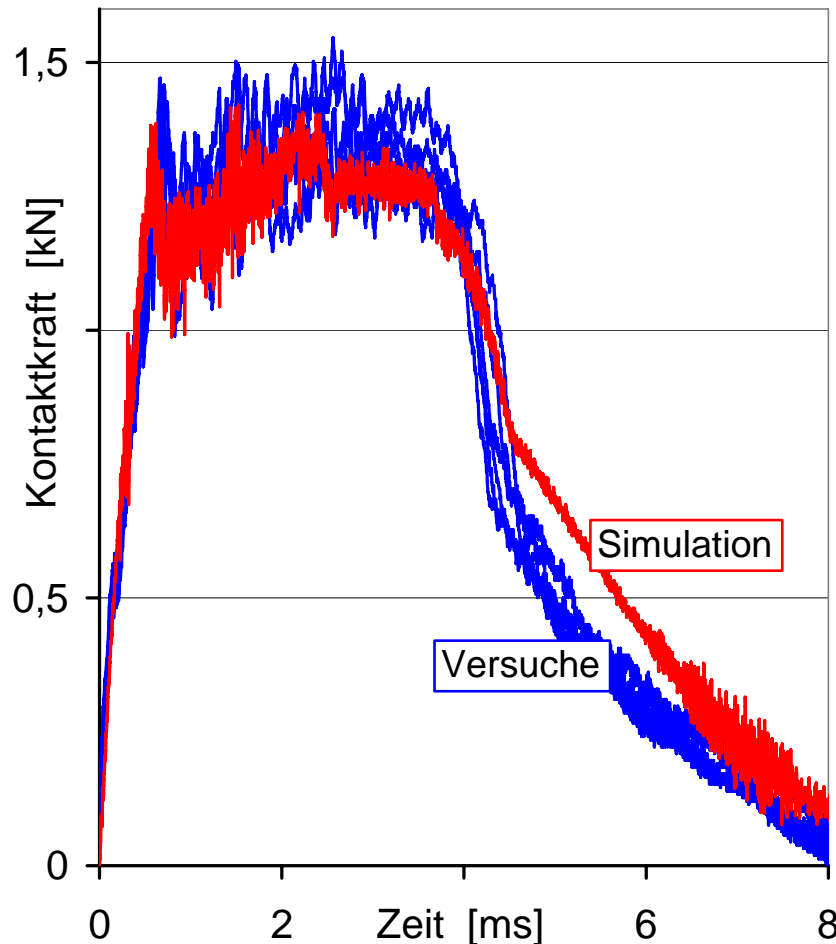
Beispiel  $E_{kin} = 2J$





# Simulation von Schlagbelastungen an CFK-Sandwich

Beispiel  $E_{kin} = 10J$



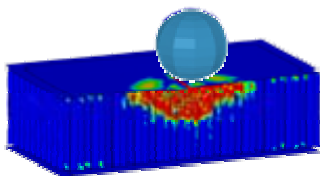
## Inhalt

Einleitung

Schlagschädigung von CFK-Sandwich

Modelle zur Simulation von Sandwichstrukturen

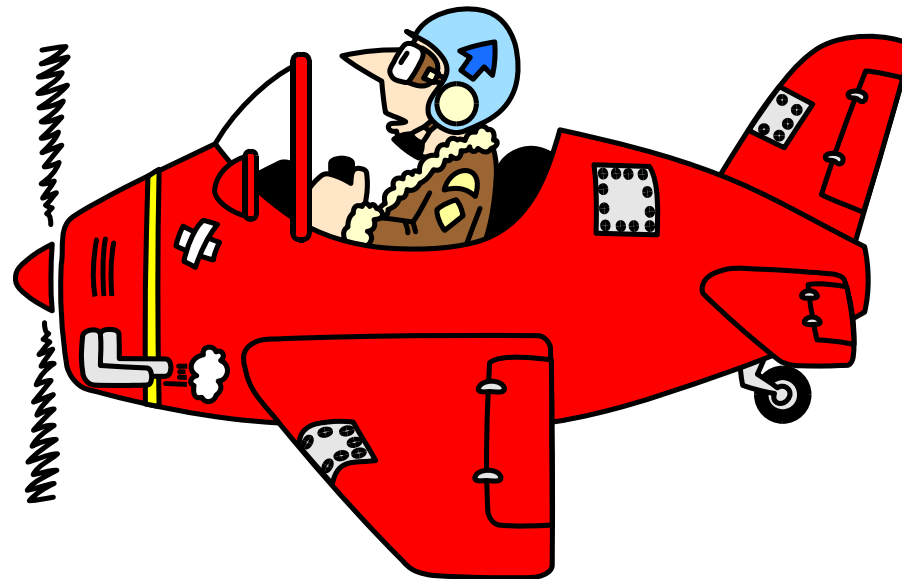
Simulation von Schlagbelastungen an  
CFK-Sandwich



Zusammenfassung

## Zusammenfassung

- **komplexes Schädigungsverhalten** von CFK-Sandwich-Strukturen mit Honigwabenkernen bei Schlagbelastungen
- **meso-mechanischer Ansatz** der Strukturmodellierung zur Betrachtung **lokaler Versagensmechanismen** der Honigwabenstruktur erforderlich
- die **Verifikation von Teilstrukturen** ist Voraussetzung für **erfolgreiche Simulation** von gesamten Sandwich-Strukturen
- **sehr gute Abbildung** realer Schlagbelastungen an CFK-Sandwich mit Honigwabenkernen **mit entwickeltem Simulationsmodell** möglich



**Danke für die Aufmerksamkeit**