

Simulation innovativer Sandwichbauteile

Jan Teßmer, Luise Kärger, Anja Wetzel

12. Nationales SAMPE Symposium Braunschweig 2006

 Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



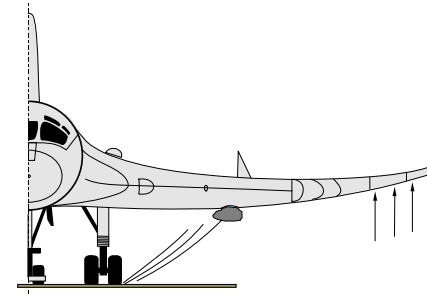
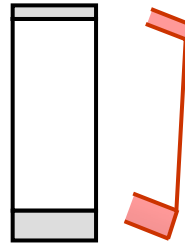


Gliederung

1 FE-Tool CODAC

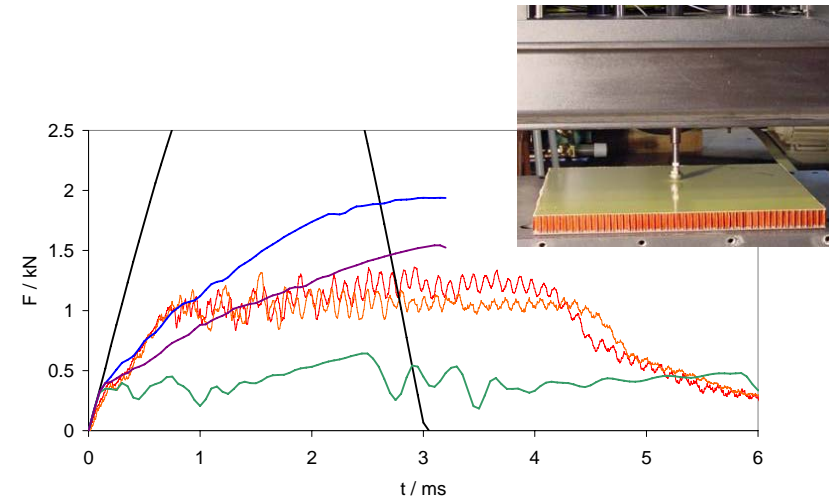
2 Finite Sandwich-Elemente

- 2.1 Modellierungsaspekte
- 2.2 Element S89
- 2.3 Element S815
- 2.4 Beispiel



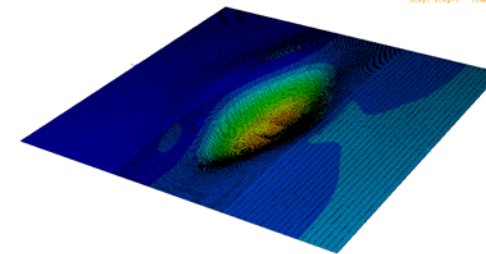
3 Impactsimulation

- 3.1 Impactversuche
- 3.2 Transiente Analyse
- 3.3 Degradation des Kerns
- 3.4 Simulationsergebnisse
- 3.5 Zerstörungsfreie Schadensdetektion



4 Ermittlung der Restfestigkeit

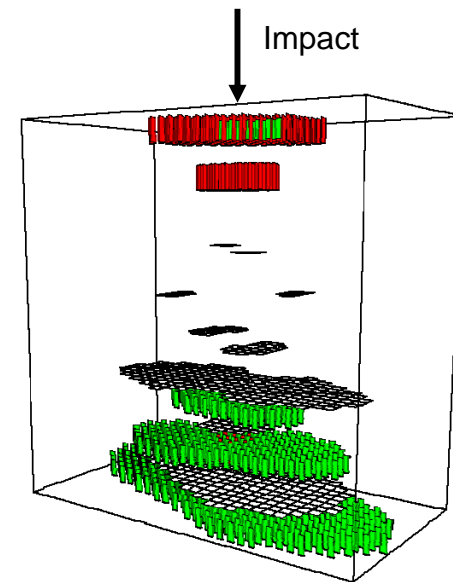
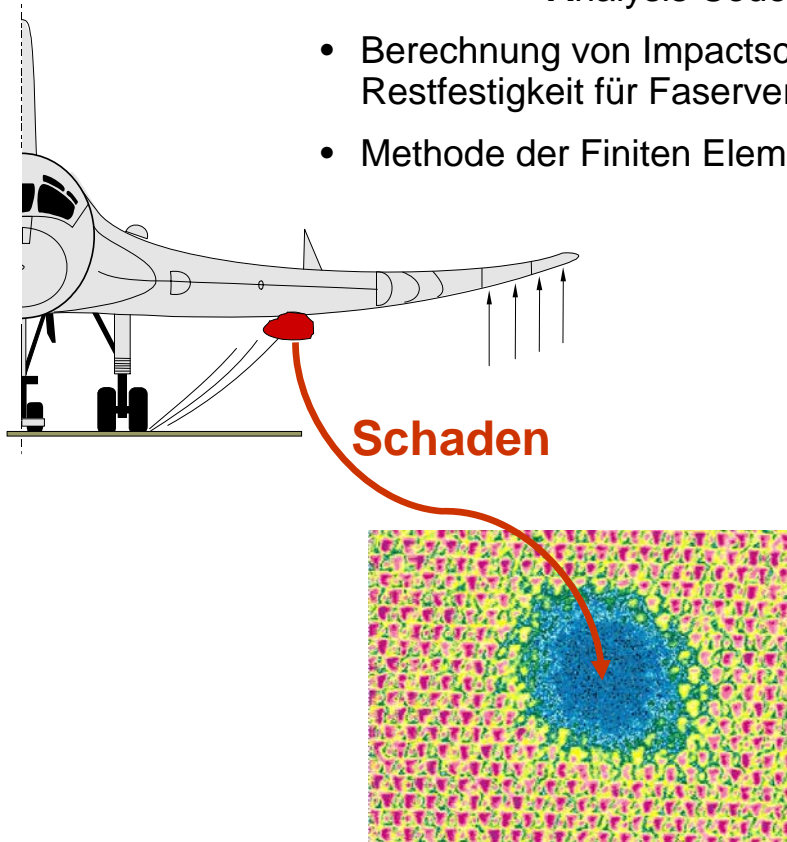
- 4.1 CAI-Versuche
- 4.2 Geom. nichtlineare Simulation mit ABAQUS





1 FE-Tool CODAC

- **CODAC = Composite Damage Tolerance Analysis Code**
- Berechnung von Impactschäden und Restfestigkeit für Faserverbunde
- Methode der Finiten Elemente



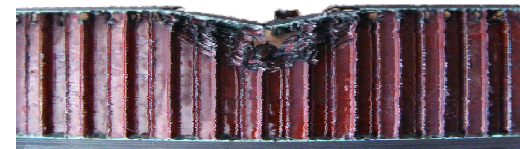
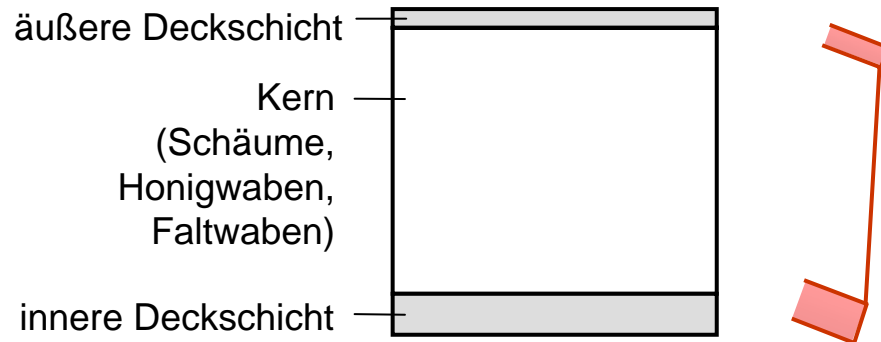
-  Faserbruch
-  Matrixriß
-  Delamination



2 Finite Sandwich-Elemente - 2.1 Modellierungsaspekte

Anforderung an die Modellierung:

- schnell & ausreichend genau
- Berücksichtigung der speziellen Verformungscharakteristik:



Entwicklung von zwei neuen Schalenelementen

Publikationen:

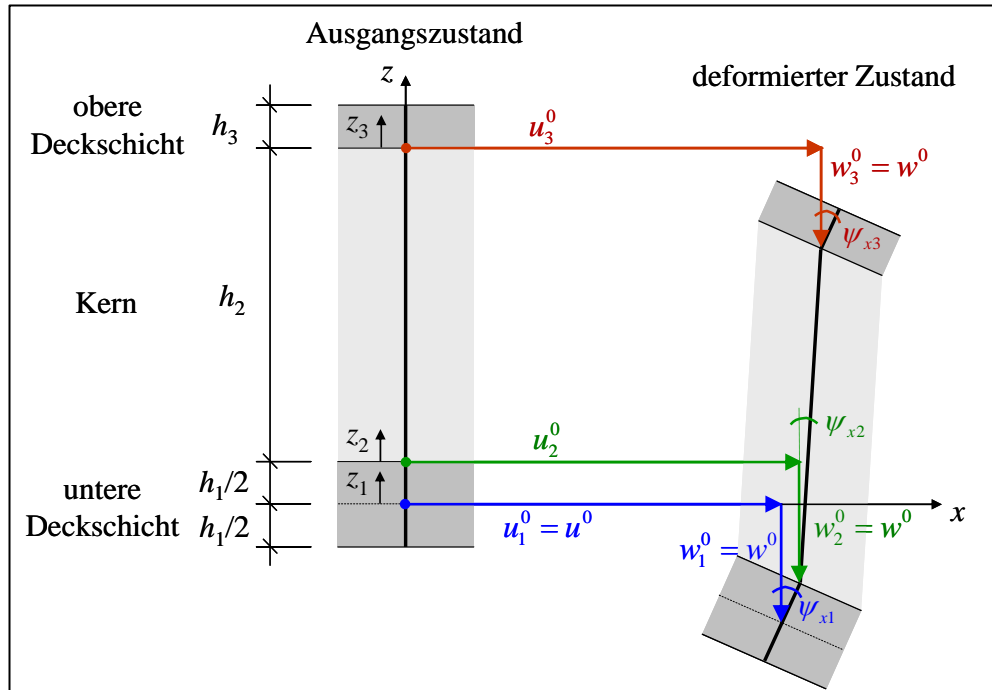
Element S89: Kärger, Wetzel, Rolfes, Rohwer. *Computers & Structures*, accepted 2006.

Element S815: Wetzel, Kärger, Rolfes, Rohwer. *Computers & Structures* 83. 2005.

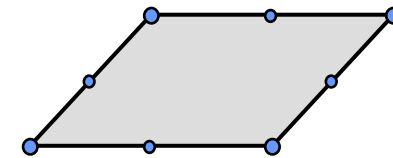


2 Finite Sandwich-Elemente - 2.2 Element S89

3-schichtiges Element mit 2-D Spannungsanalyse ($\sigma_{zz} = 0$)



8-Knoten-Schalenelement:



Kinematik der Schicht L :

$$\begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ w_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_L^0 \\ v_L^0 \\ w_L^0 \end{bmatrix} + z_L \begin{bmatrix} \psi_{xL} \\ \psi_{yL} \\ 0 \end{bmatrix}$$

→ 9 Fhg. pro Knoten

schichtweise reduziertes Materialgesetz: $\sigma_L = \mathbf{Q}_L \varepsilon_L$

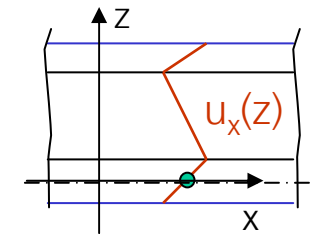


2 Finite Sandwich-Elemente - 2.2 Element S89

Transversale Spannungen und Steifigkeit

ebener Spannungszustand → Materialgesetz liefert:

- überschätzte transv. Schubsteifigkeiten
- schichtweise konstante transv. Schubspannungen
- keine transv. Normalspannungen



Ziel: verlässlicher & vollständiger 3D-Spannungszustand für Schadensanalyse

Gleichgewichtsansatz nach Rolfes & Rohwer auf dreischichtige Schale erweitert:

→ verbesserte transv. Schubsteifigkeiten, Schubspannungen und Normalspannungen

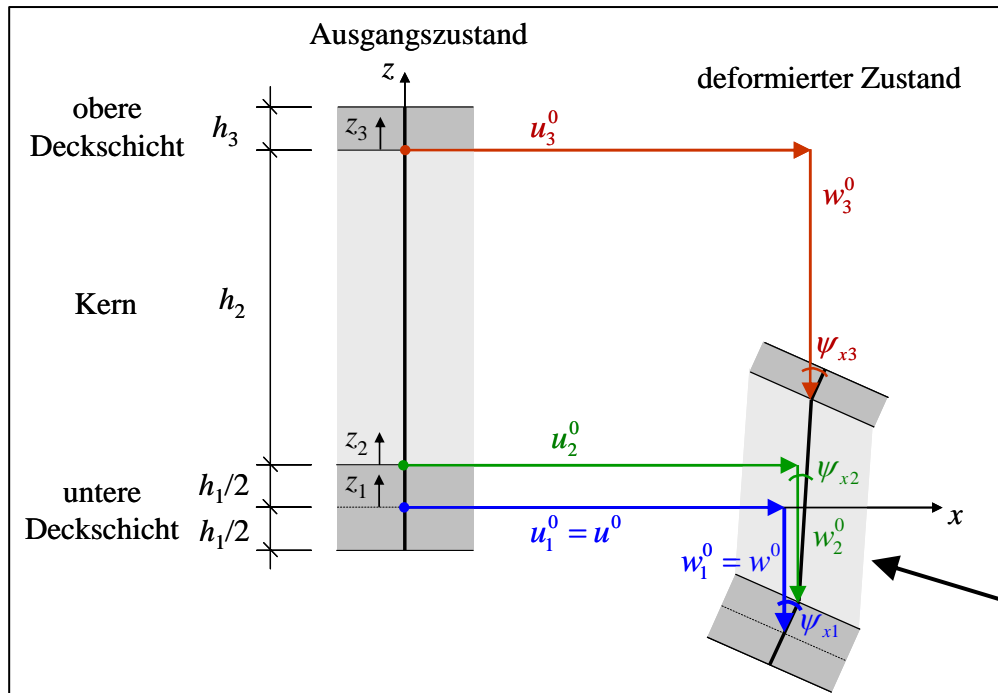
$$\mathbf{H} = \left[\int_{-h_1/2}^{h_1/2} \tilde{\mathbf{f}}_1^T \mathbf{G}_1^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_1 dz + \int_{h_1/2}^{h_1/2+h_2} \tilde{\mathbf{f}}_2^T \mathbf{G}_2^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_2 dz + \int_{h_1/2+h_2}^{h_1/2+h_2+h_3} \tilde{\mathbf{f}}_3^T \mathbf{G}_3^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_3 dz \right]^{-1}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{zL}(z) = \mathbf{f}_L(z) \mathbf{R} + \boldsymbol{\tau}_{zL-1}(z_{L0})$$



2 Finite Sandwich-Elemente – 2.3 Element S815

3-schichtiges Element mit 3-D Spannungsanalyse



Kinematik der Schicht L :

$$\begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ w_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_L^0 \\ v_L^0 \\ w_L^0 \end{bmatrix} + z_L \begin{bmatrix} \psi_{xL} \\ \psi_{yL} \\ \psi_{zL} \end{bmatrix} + z_L^2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \varphi_{zL} \end{bmatrix}$$

→ 15 Fhg. pro Knoten

Kompressibilität in z-Richtung

schichtweise vollständiges 3D-Materialgesetz: $\sigma_L = C_L \varepsilon_L$

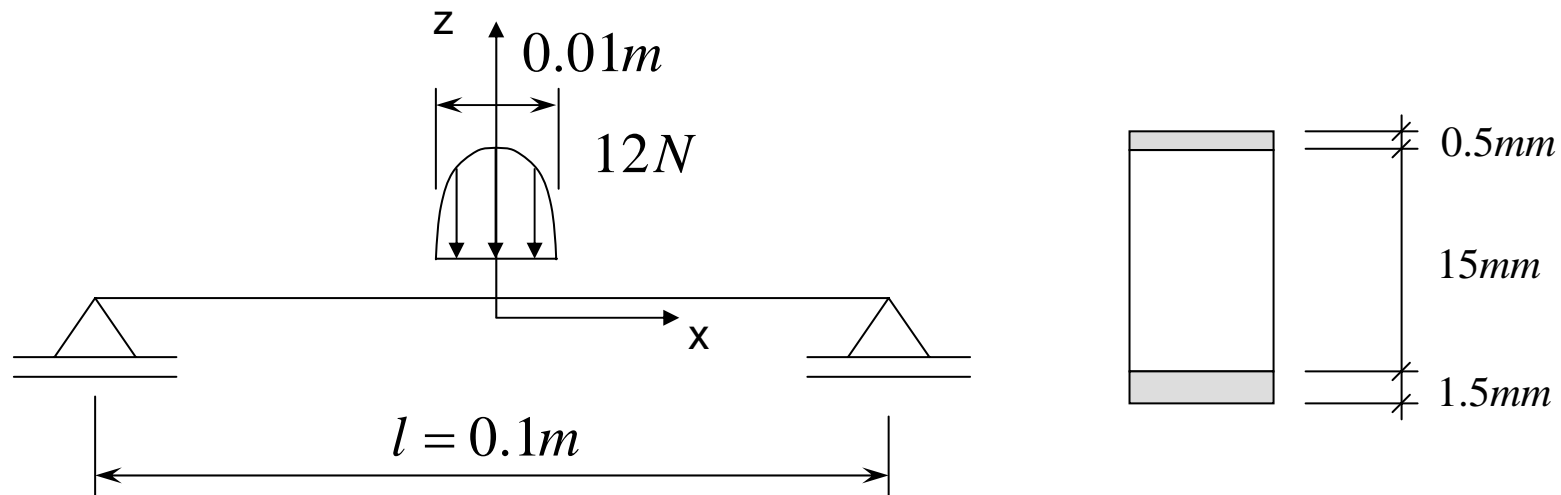
- gute transv. Schubsteifigkeiten
- schichtweise quadratische transv. Schubspannungen
- schichtweise lineare transv. Normalspannungen

Gleichgewichtsansatz nach Rolfes & Rohwer: Verbesserung der transv. Spannungen



2 Finite Sandwich-Elemente - 2.4 Beispiel

gelenkig gelagerter Balken mit konzentrierter Last

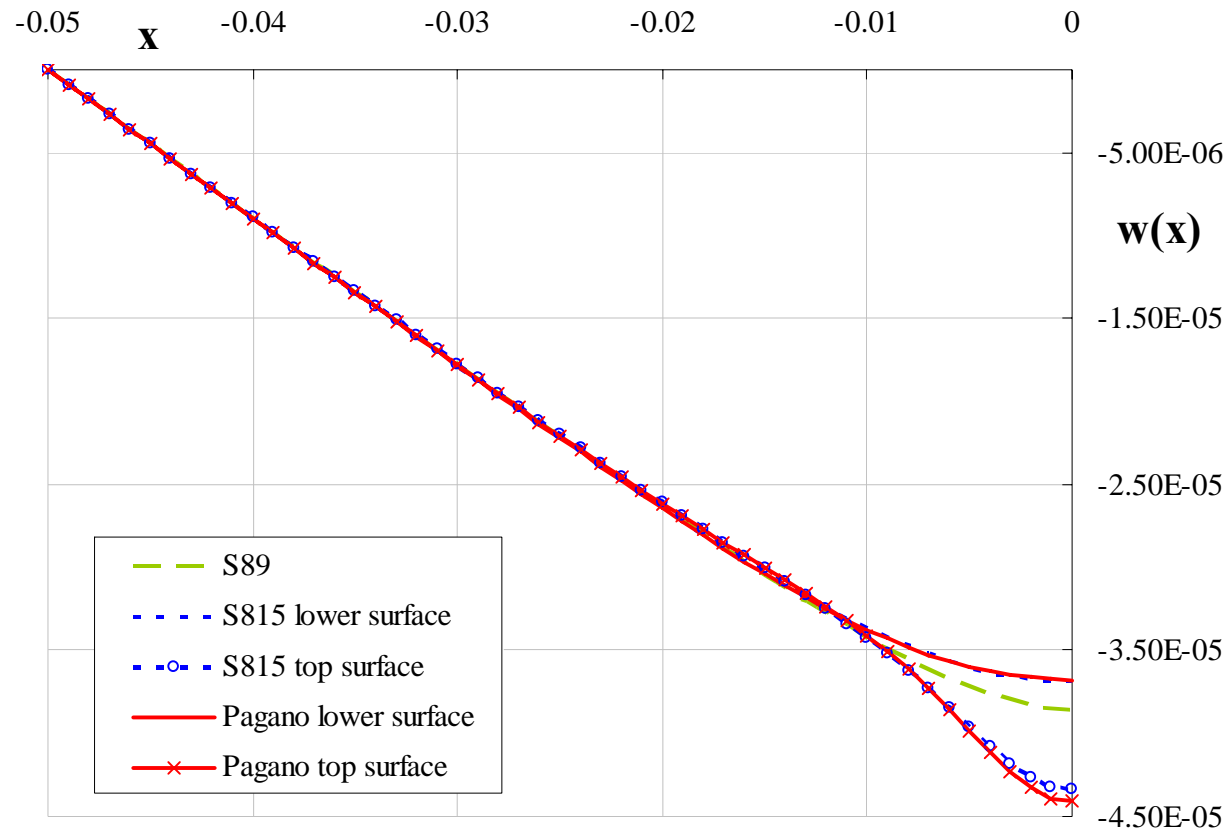


Deckschichten: Prepreg HTA/6376C, lay-ups: $[0/90]_s$ und $[0/90_2/0_2/90]_s$
Kern: ähnlich Nomex Honeycomb HRH10-1/8-3.0



2 Finite Sandwich-Elemente - 2.4 Beispiel

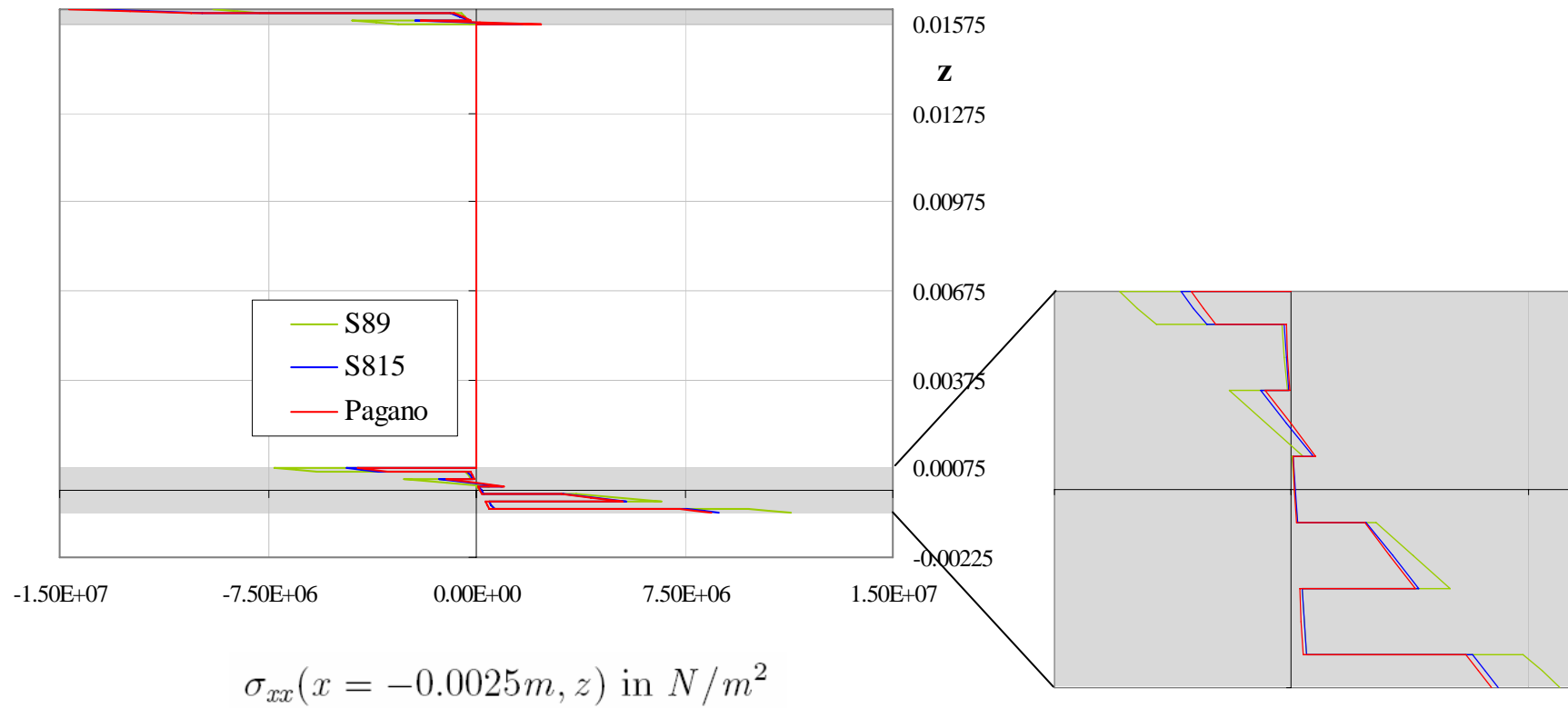
transversale Verschiebung $w(x)$ entlang der halben Balkenlänge





2 Finite Sandwich-Elemente - 2.4 Beispiel

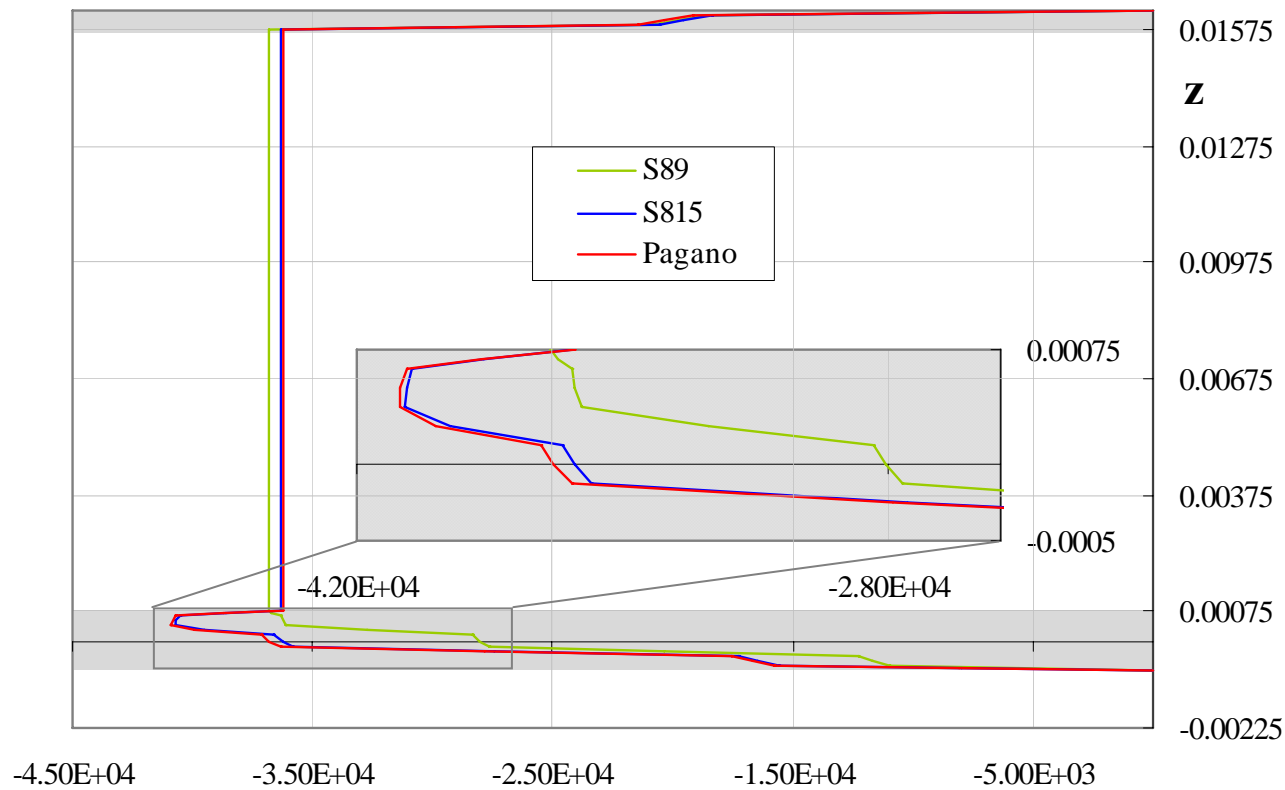
in-plane Normalspannungen





2 Finite Sandwich-Elemente - 2.4 Beispiel

transversale Schupspannungen



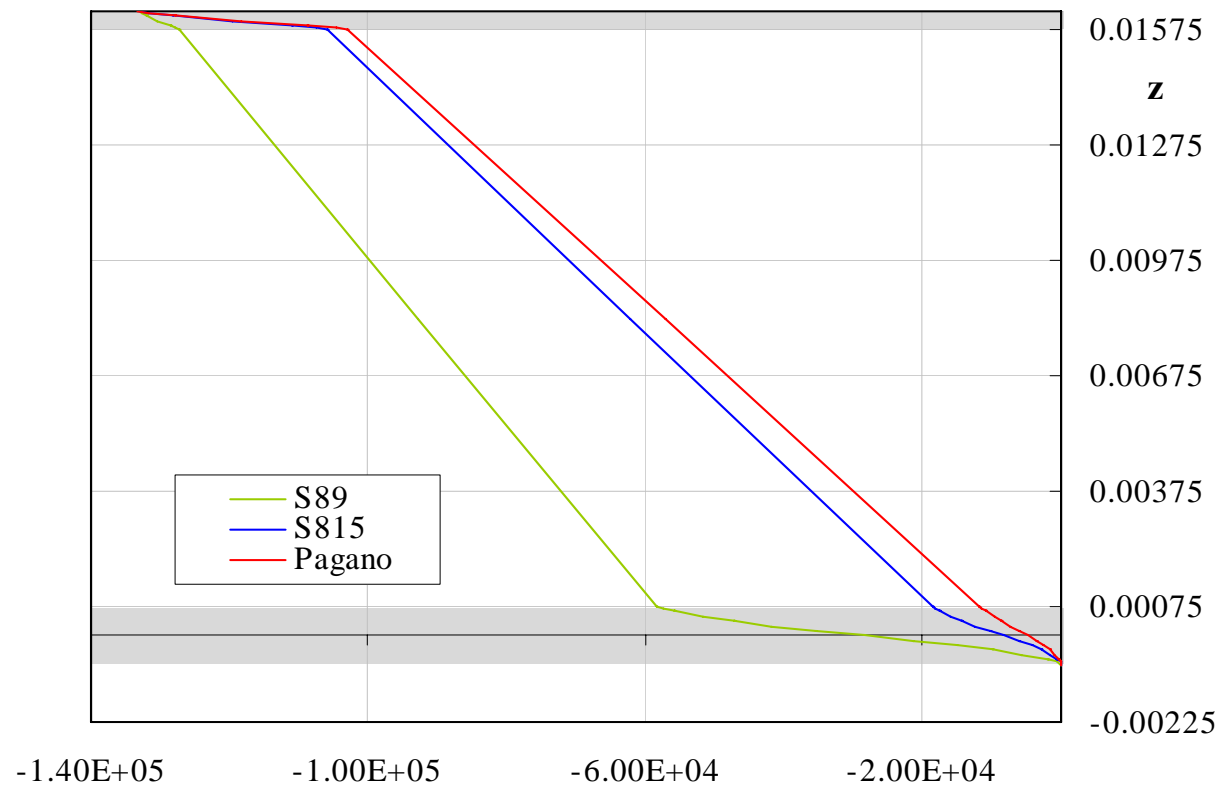
$$\tau_{xz}(x = -0. - 0.0252m, z) \text{ in } N/m^2$$





2 Finite Sandwich-Elemente - 2.4 Beispiel

transversale Normalspannungen



$$\sigma_{zz}(x = -0.0025m, z) \text{ in } N/m^2$$

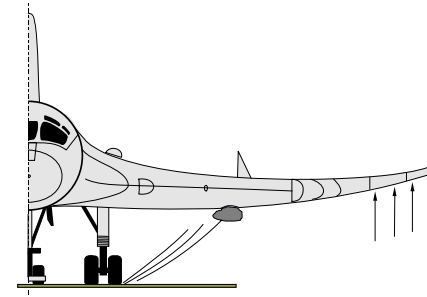
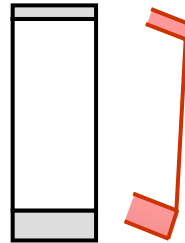


Gliederung

1 FE-Tool CODAC

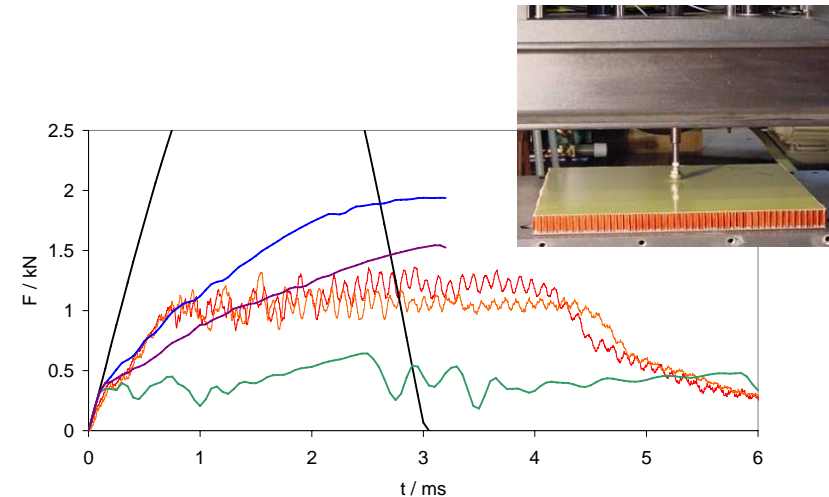
2 Finite Sandwich-Elemente

- 2.1 Modellierungsaspekte
- 2.2 Element S89
- 2.3 Element S815
- 2.4 Beispiel



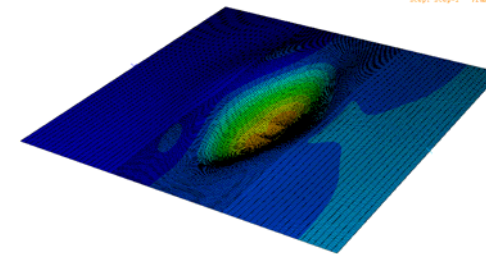
3 Impactsimulation

- 3.1 Impactversuche
- 3.2 Transiente Analyse
- 3.3 Degradation des Kerns
- 3.4 Simulationsergebnisse
- 3.5 Zerstörungsfreie Schadensdetektion



4 Ermittlung der Restfestigkeit

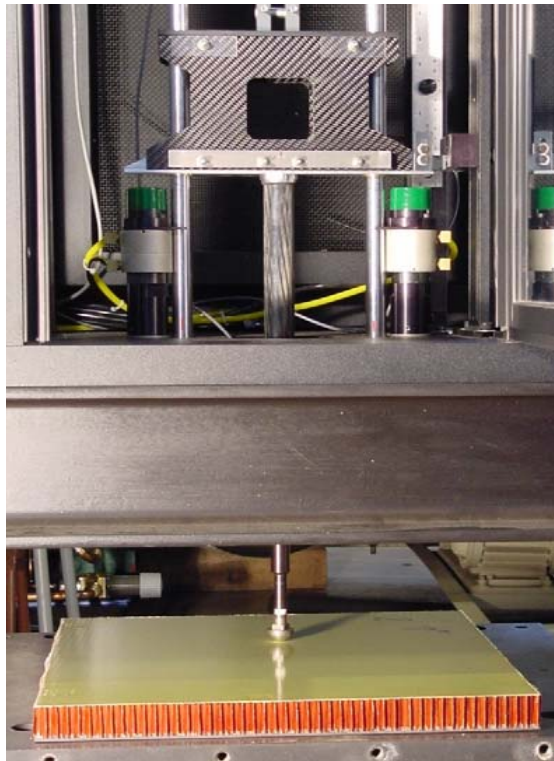
- 4.1 CAI-Versuche
- 4.2 Geom. nichtlineare Simulation mit ABAQUS



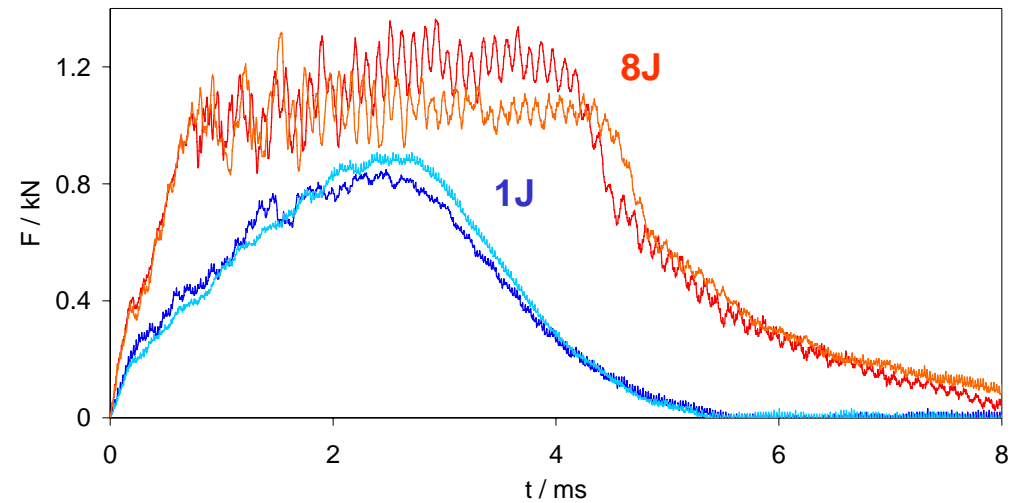


3 Impactsimulation - 3.1 Impactversuche

Impactversuche am ILR, TU Dresden:



Kontaktkraft-Zeit-Verläufe:



Lagenaufbau:

- obere Deckschicht (0,6mm): 3 CFK-Gewebelagen
- Kern (28,4mm): Honeycomb 4.8-48
- untere Deckschicht (2,7mm) : 1 CFK-Gewebelage + 20 CFK-Tape

vollflächige Lagerung





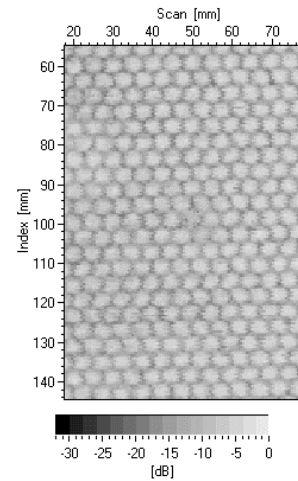
3 Impactsimulation - 3.1 Impactversuche

Ultraschallprüfung

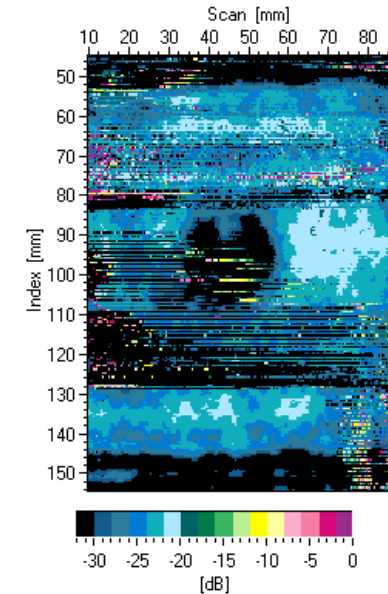
1 Joule:



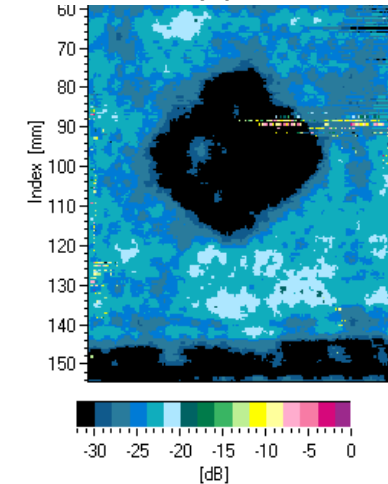
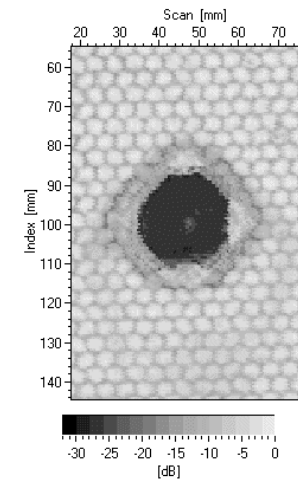
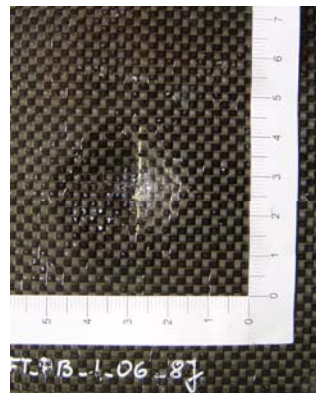
Rückwandeche
obere Deckschicht



Rückwandeche
Deckschicht



8 Joule:



Aufnahmen: ILR TU Dresden



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

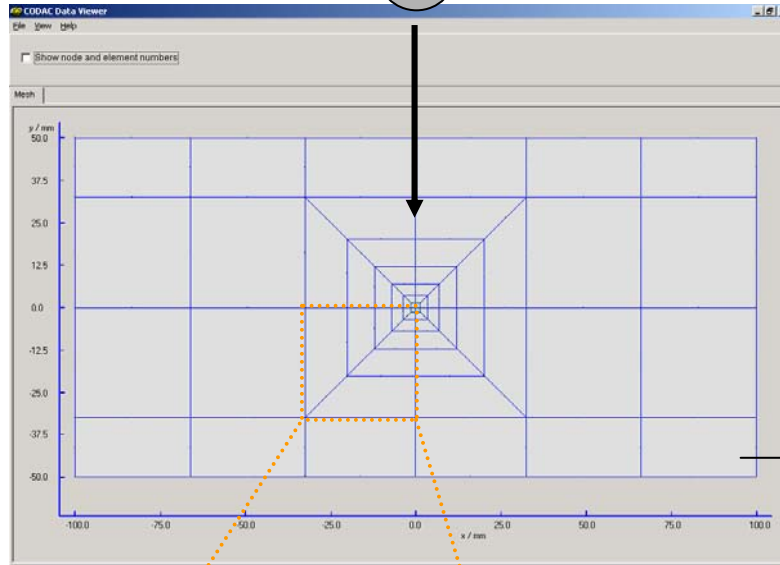


Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik



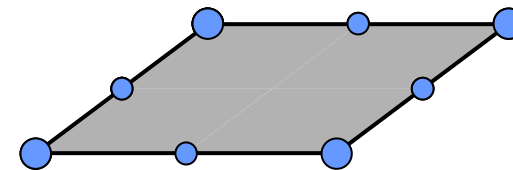
3 Impactsimulation - 3.2 Transiente Analyse

Impactor (*25.4 mm) als Punktmasse:
einzelne Knotenkraft oder parabolisch verteilte Flächenlast



transiente Impactanalyse:
dynamische FEA mit Newmark-Verfahren,
Verwendung von:
Bewegungsgleichung des Impactors
Bewegungsgleichung der Platte
Hertzsches Kontaktgesetz

Sandwichplatte mit S815 - Elementen:



Randbedingung für alle Knoten: $w^0 = 0$



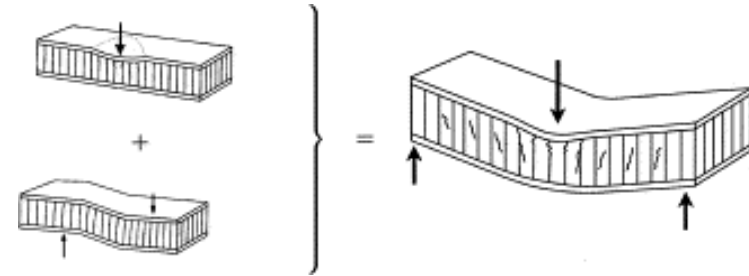
3 Impactsimulation - 3.3 Degradation des Kerns

Transversales Schub-Druck-Versagen von Honigwabenkernen:

Spannungsbasiertes Kriterium nach Besant et al. (2001):

$$\left(\frac{\sigma_{zz}}{\sigma_{cc}} \right)^n + \left(\frac{\tau_{xz}}{\tau_{cls}} \right)^n + \left(\frac{\tau_{yz}}{\tau_{cts}} \right)^n = 1$$

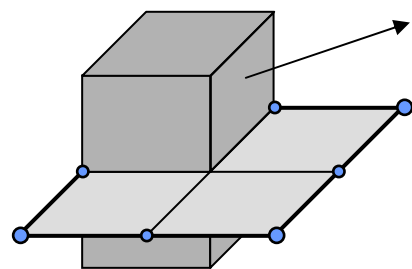
(n = 1.0..2.0)



Quelle: Petras, Sutcliffe (2000)

Degradation:

Unit-weise Berechnung des 3D-Spannungszustands und Materialdegradation:



Degradation bei Kernschädigung:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}^* \\ \sigma_{yy}^* \\ \sigma_{zz}^* \\ \tau_{yz}^* \\ \tau_{xz}^* \\ \tau_{xy}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}C_{11} & D_{12}C_{12} & D_{13}C_{13} & & & \\ & D_{22}C_{22} & D_{23}C_{23} & & & \\ & & D_{33}C_{33} & & & \\ & & & D_{44}C_{44} & & \\ & & & & D_{55}C_{55} & \\ & & & & & D_{66}C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^* \boldsymbol{\epsilon}$$

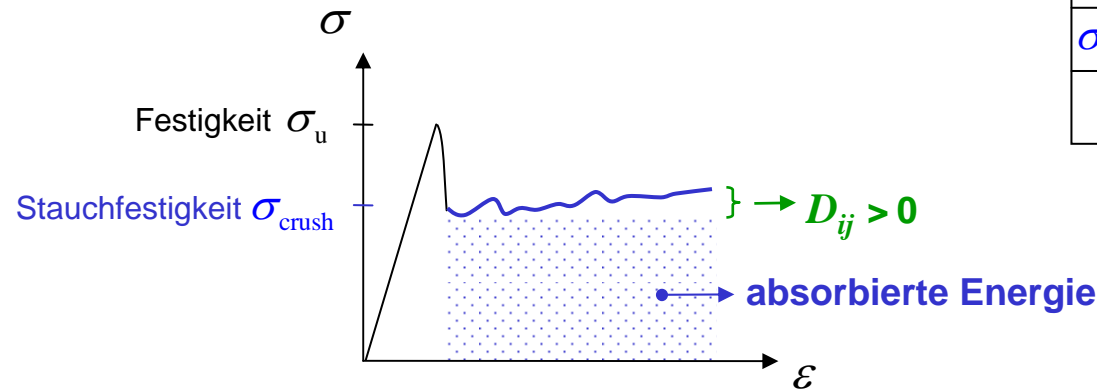
sym.

totale Degradation: $D_{ij} = 0$



3 Impactsimulation - 3.3 Degradation des Kerns

Elastisch - plastisches Verhalten :



	Druck	Schub xz	Schub yz
$\sigma_{crush} / \sigma_u$	0.3	0	0
D_{ij}	0.02	0.3	0.4

Prinzip der Virtuellen Arbeit: absorbierte Energie: $\partial W_{i,pl} = \int_V \sigma_{crush} \partial \epsilon dV$

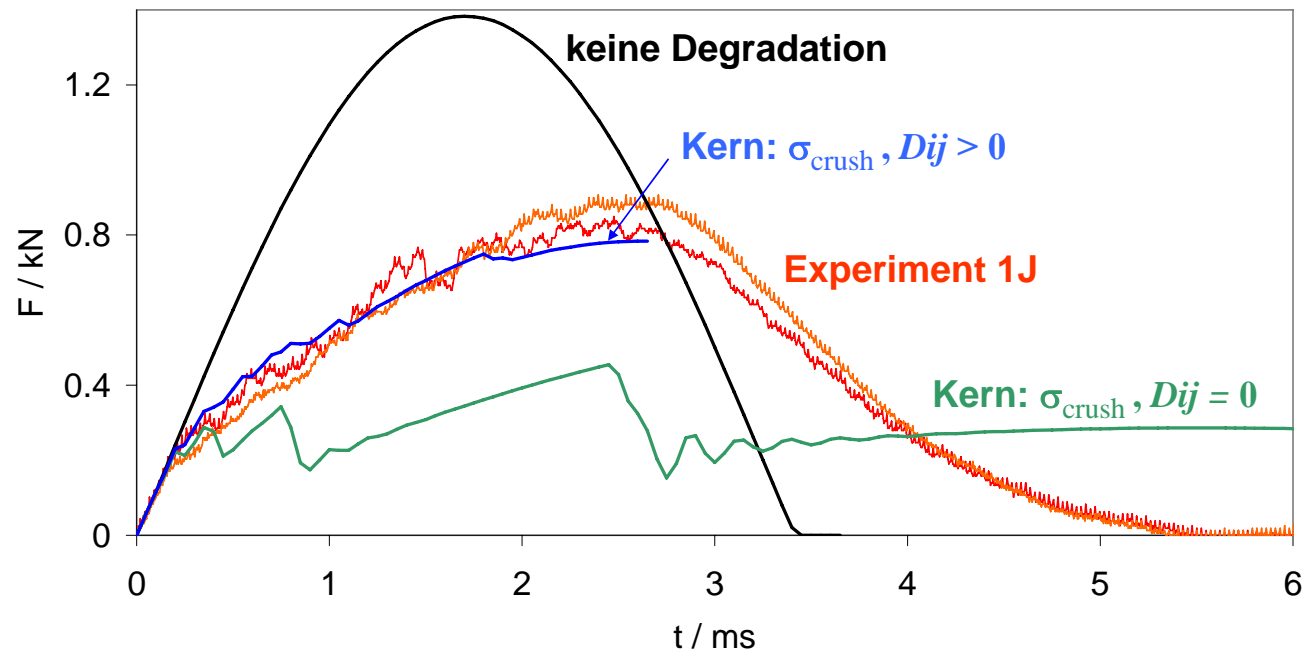
innere Kraft: $F_{i,pl} = \frac{\delta W_{i,pl}}{\delta v^e} = \int_A \left(\int_h \sigma_{crush} \mathbf{D} dz \right) \mathbf{N} dA$

$\Rightarrow \mathbf{F}_0 - \mathbf{F}_{i,pl} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{v}^e$

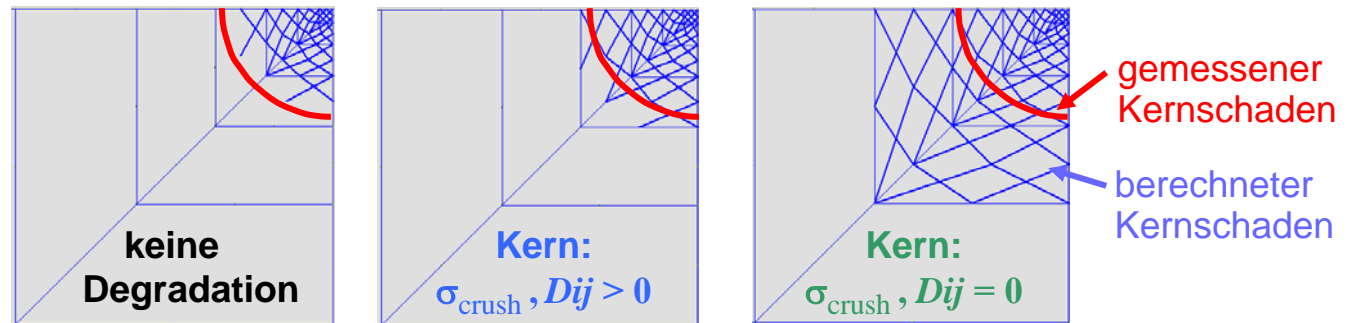


3 Impactsimulation - 3.4 Simulationsergebnisse

1J Impact

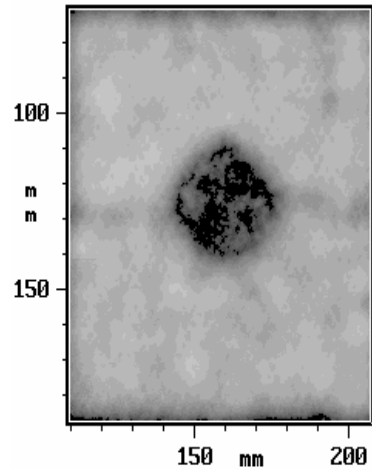


Kernschaden

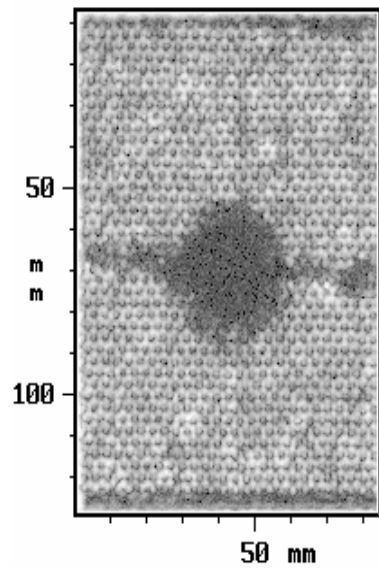




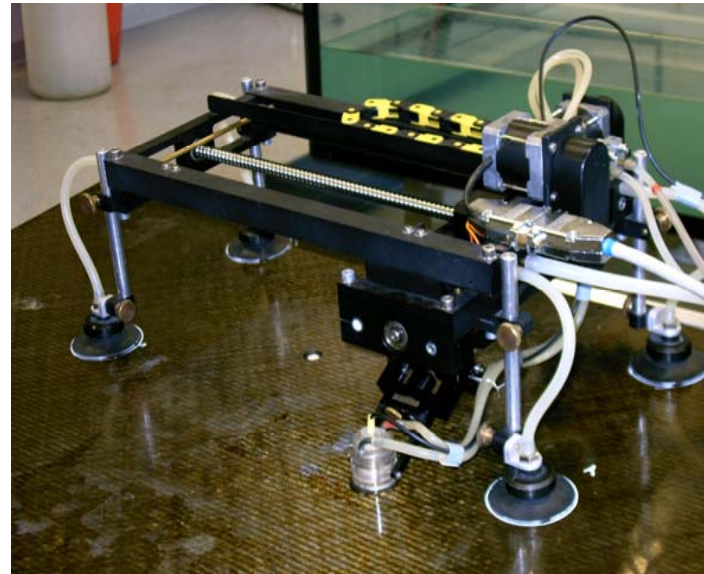
3 Impactsimulation - 3.5 Zerstörungsfreie Schadensdetektion



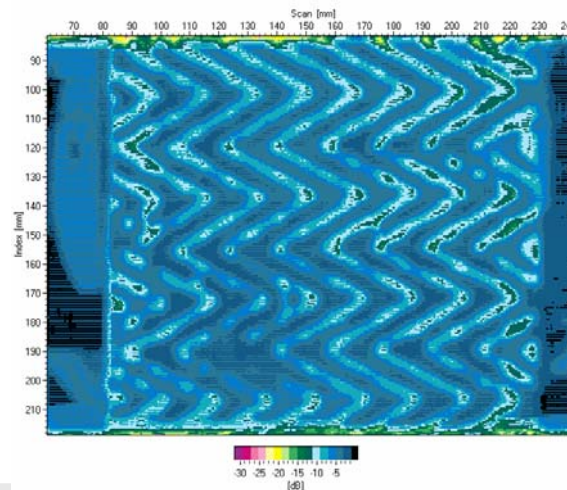
Wasserkopplung



Luftankopplung



MUSE



Deckschicht-Faltwaben-Anbindung

Forschungsbedarf:
Zerstörungsfreie Schadensdetektion in
Faltwabenkernen

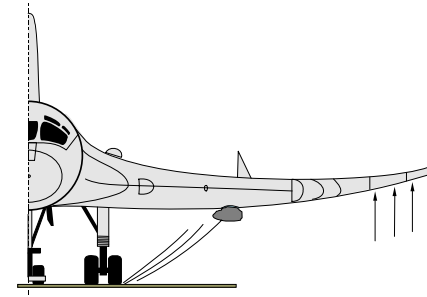
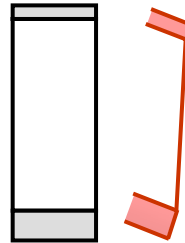


Gliederung

1 FE-Tool CODAC

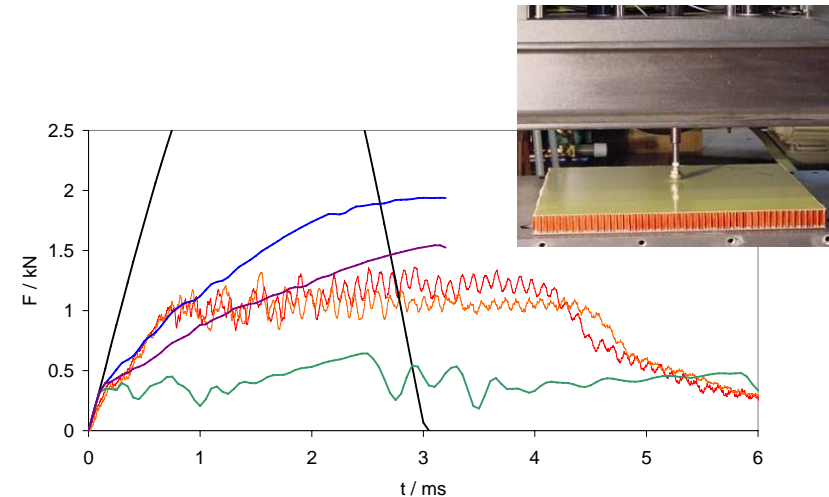
2 Finite Sandwich-Elemente

- 2.1 Modellierungsaspekte
- 2.2 Element S89
- 2.3 Element S815
- 2.4 Beispiel



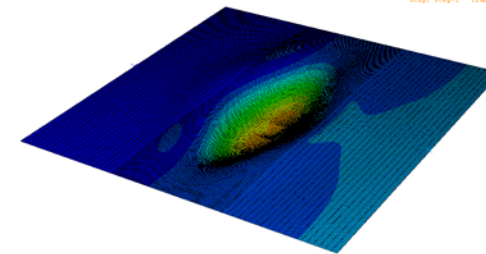
3 Impactsimulation

- 3.1 Impactversuche
- 3.2 Transiente Analyse
- 3.3 Degradation des Kerns
- 3.4 Simulationsergebnisse
- 3.5 Zerstörungsfreie Schadensdetektion



4 Ermittlung der Restfestigkeit

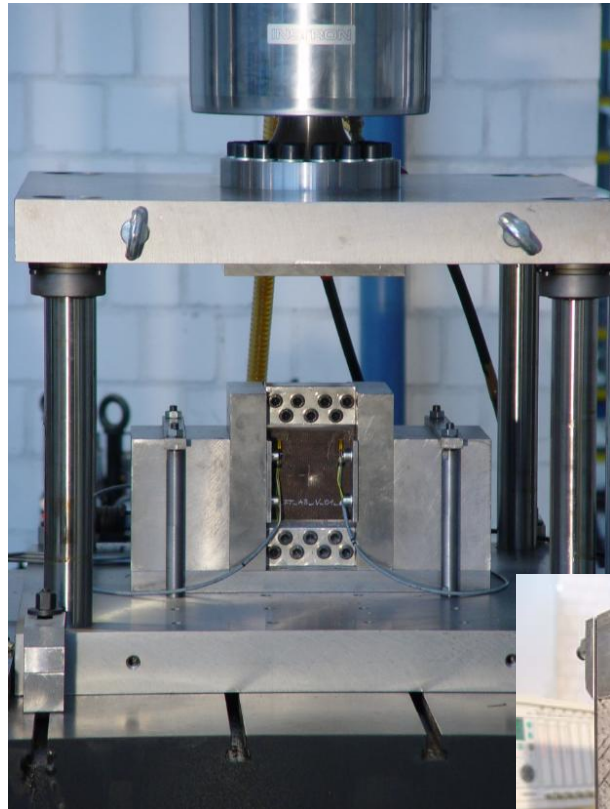
- 4.1 CAI-Versuche
- 4.2 Geom. nichtlineare Simulation mit ABAQUS



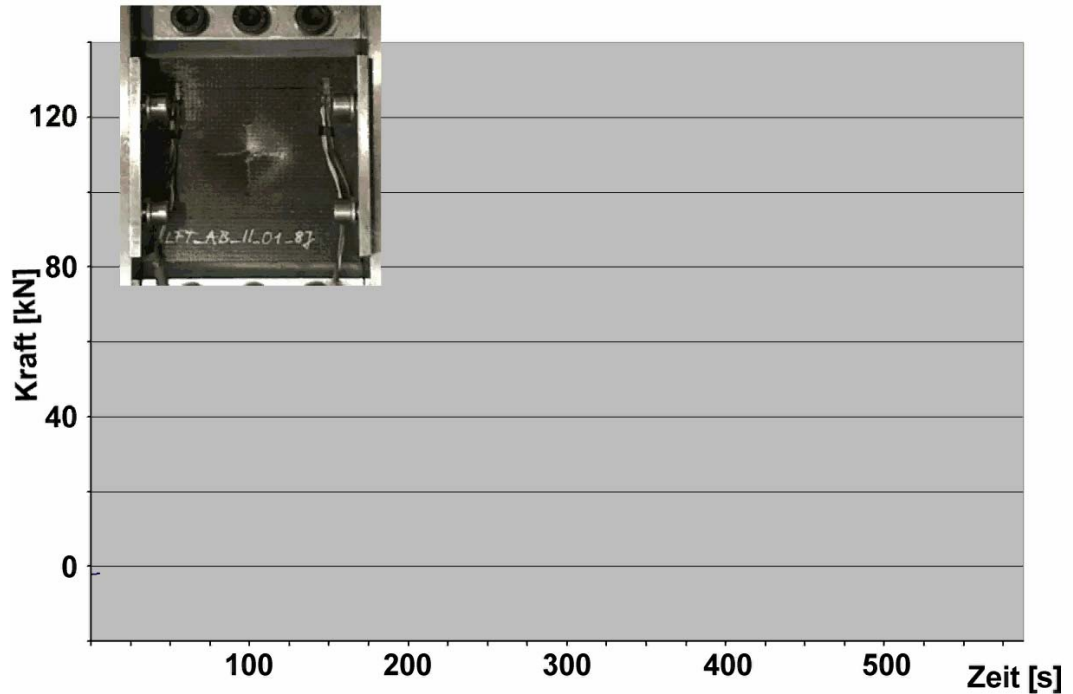


4 Simulation der Restfestigkeit - 4.1 CAI-Versuche

CAI-Versuchs-Aufbau:



Aufnahmen: ILR TU Dresden



Versagen:

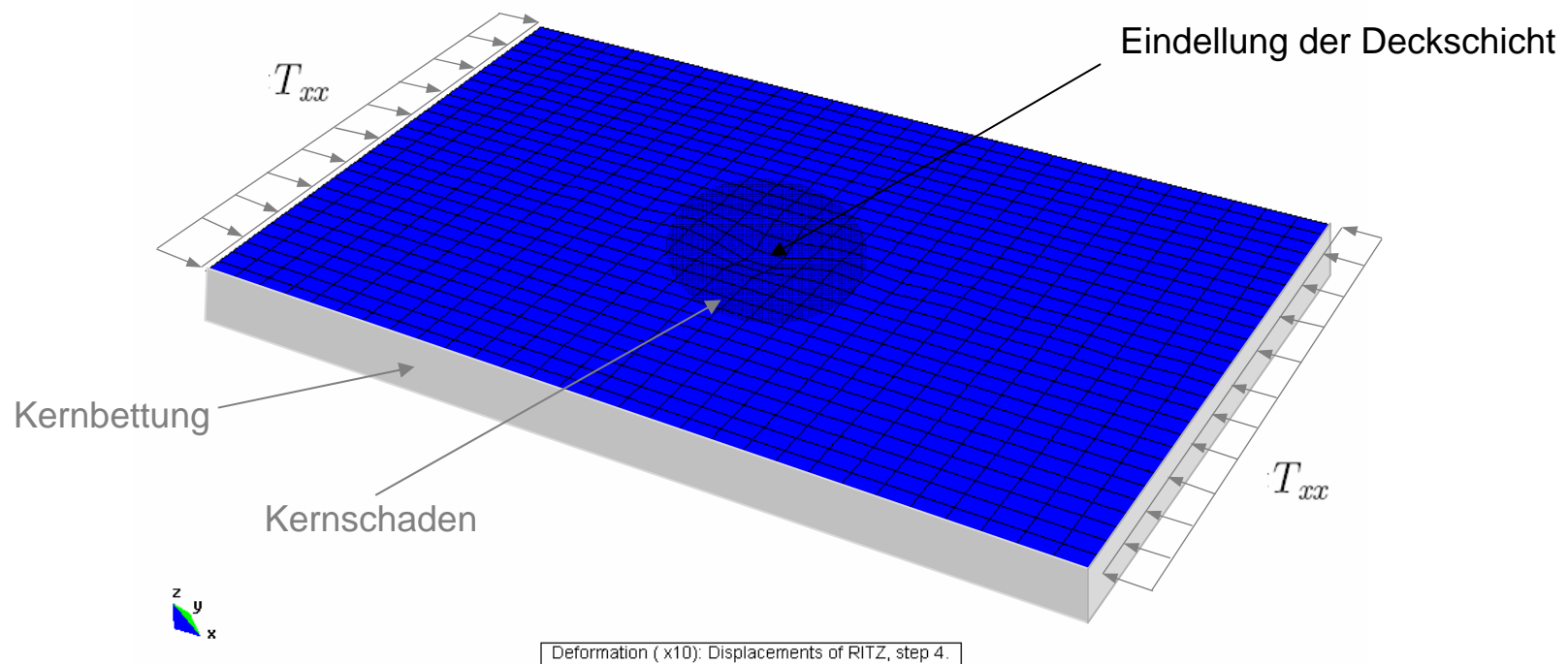
- Ausbreitung der Eindellung in impactierter Deckschicht:
 - quer zur Belastungsrichtung
 - bis zum Rand der Probe
- plötzliches Versagen der impactierten Deckschicht
- Versagen der anderen Deckschicht



4 Simulation der Restfestigkeit - 4.2 Geom. nichtlineare Simulation mit ABAQUS

Beulanalyse der impactierten Deckschicht mit Kernbettung unter Berücksichtigung:

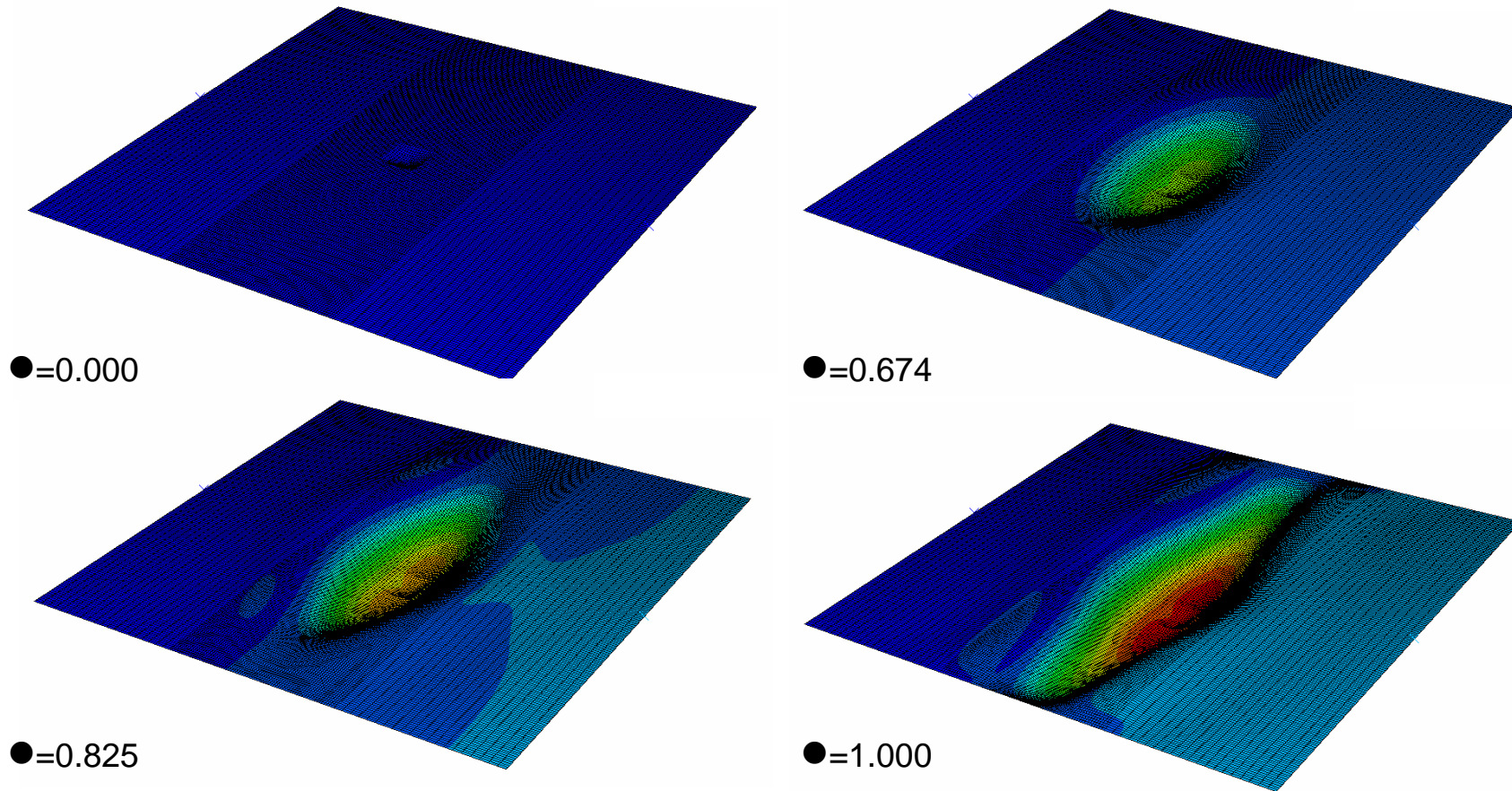
- der Eindellung der impactierten Deckschicht
- des Kernschadens





4 Simulation der Restfestigkeit - 4.2 Geom. nichtlineare Simulation mit ABAQUS

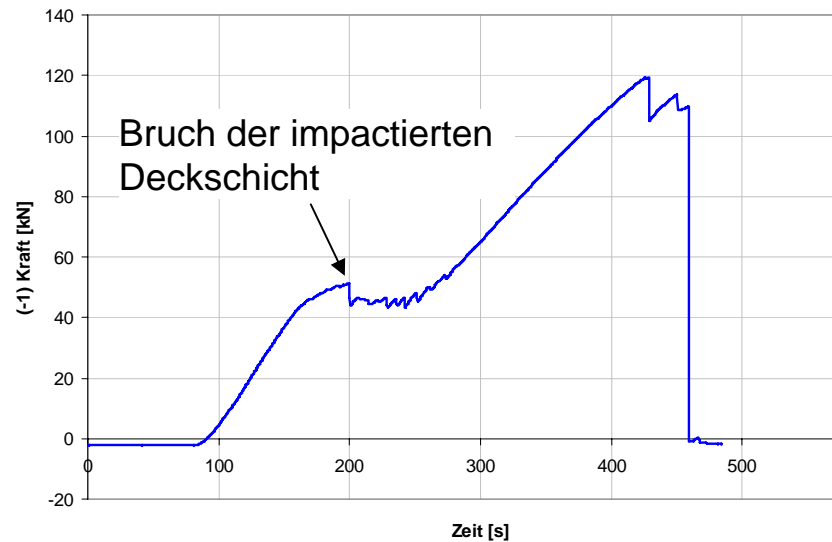
Verschiebungen mit zunehmender in-plane Verschiebung des rechten Randes





4 Simulation der Restfestigkeit - 4.2 Geom. nichtlineare Simulation mit ABAQUS

Vergleich Experiment - Simulation

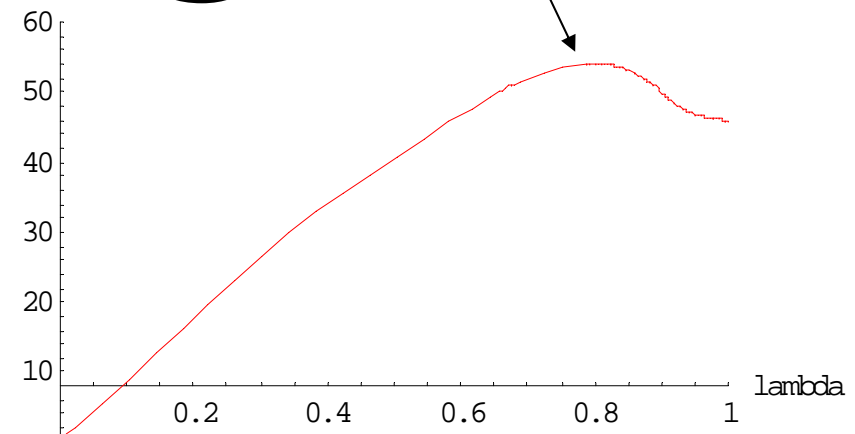


Experiment

Aufnahmen: ILR TU Dresden



max. mögliche
Druckkraft



Simulation

→ Die Umrechnung der Druckspannung der impactierten Deckschicht in die auf das gesamte Sandwich wirkende Druckkraft ergibt eine gute Übereinstimmung zwischen Bruchkraft im Experiment und maximaler Druckspannung in der Simulation.



Zusammenfassung und Ausblick

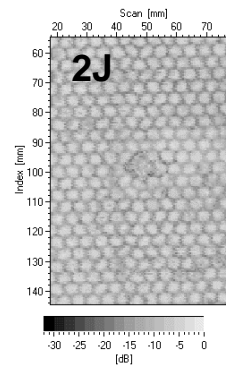
Ergebnisse

Sandwichelemente

effiziente Spannungs- und Verformungsanalyse bei kleinen Verformungen

Impactsimulation

Simulation von Impacts mit kaum sichtbarem Schaden



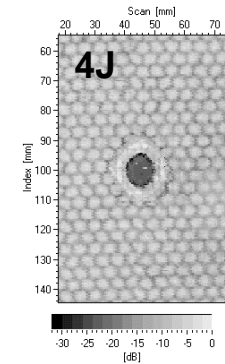
Restfestigkeit

Simulation der Dellenausbreitung in der impactierten Deckschicht quer zur Belastungsrichtung mit ABAQUS

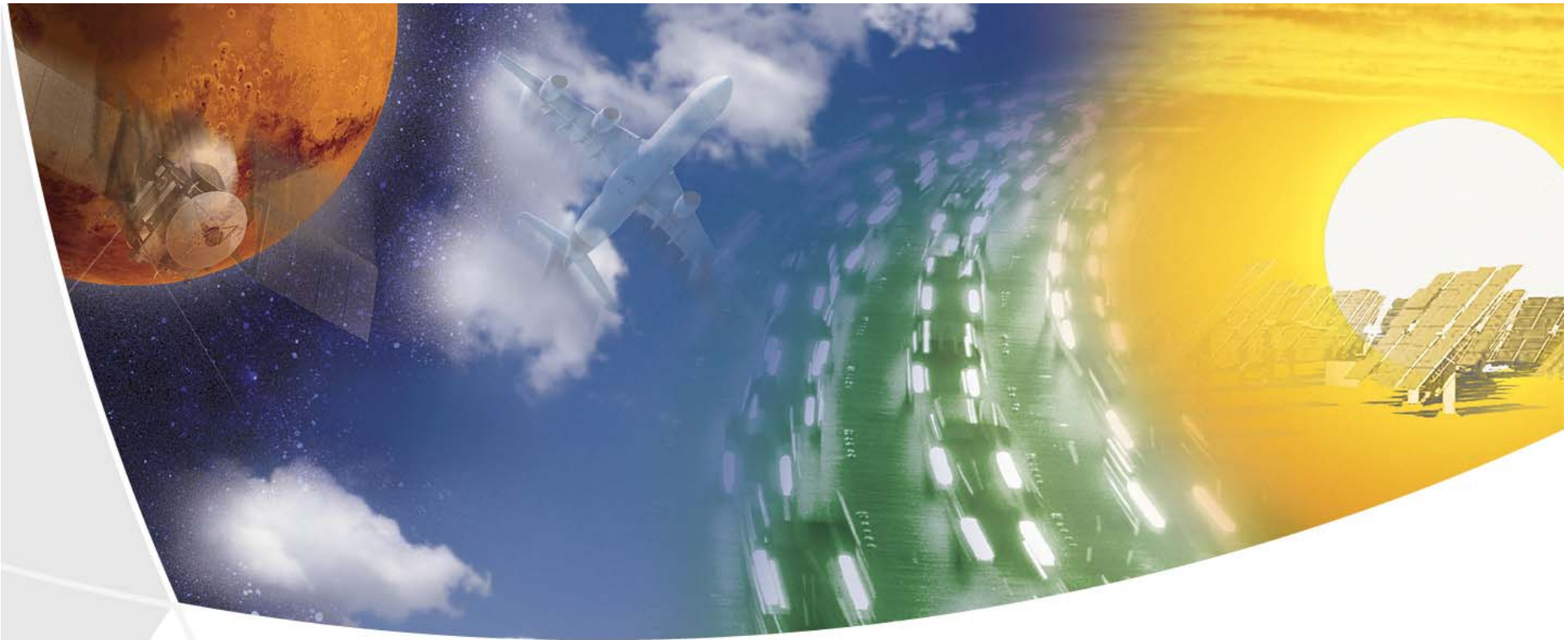
Ausblick

Berücksichtigung der geom. Nichtlinearität im Element S815 (für große Verformungen der impactierten Deckschicht)

Modellierung des Deckschichtversagens
→ Impactsimulation bei deutlich sichtbarem Schaden



Vergleich der ABAQUS-Rechnungen mit semi-analytischem Verfahren
geometrisch nichtlineare Beulanalyse des gesamten Sandwiches unter Berücksichtigung des Schadens



Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt:

Dr.-Ing. Jan Teßmer
jan.tessmer@dlr.de
0531 / 295 – 2288



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft