

# Berechnung und Optimierung von Faserverbundstrukturen

J. Weiße

6. Dezember 2010

# Übersicht

## ■ Lehrstuhl

## ■ Schadenstoleranzuntersuchungen

- Hintergrund
- Nichtlineare Berechnung mit LS-Dyna

## ■ Optimierung von Faserverbunden

- Hintergrund
- Optimierung mit evolutionären Algorithmen in GEOpS<sup>2</sup>
- (Formeloptimierung)

## ■ Berechnungen von Faserverbunden

- Hintergrund
- Lineare Berechnungen mit FiPPS

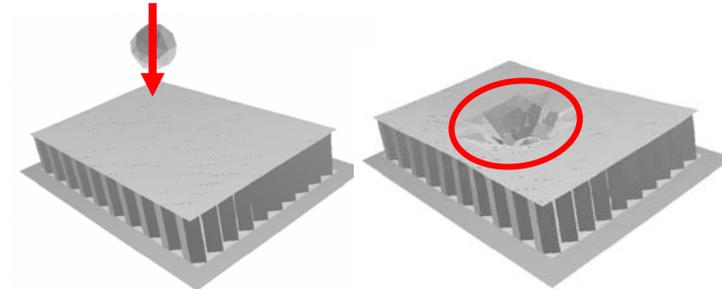
## ■ HPC am ZIH

- Programme, Besonderheiten und Probleme

## Lehrstuhl

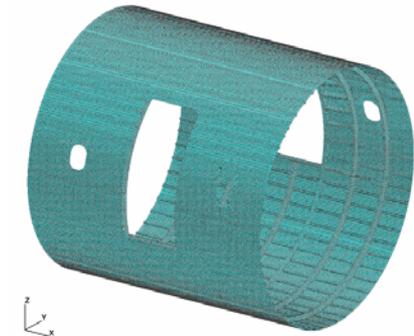
### ■ Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen:

- Impact bei Faserverbundstrukturen
- Restfestigkeit von geschädigten Bauteilen
- Lebensdauer von geschädigten Bauteilen
- Experimente, numerische Simulation



### ■ Optimierung von Luftfahrzeugstrukturen

- Auslegung von Luftfahrzeugstrukturen mit Hilfe von Evolutionsstrategien
- Mehrziel-Optimierung



### ■ Auslegung von adaptiven und aktiven Luftfahrzeugstrukturen:

- Optimierung von adaptiven Rotorblättern
- Auslegung von Sensor/Aktuator-Positionen



# Übersicht

## ■ Lehrstuhl

### ■ Schadenstoleranzuntersuchungen

- Hintergrund
- Nichtlineare Berechnung mit LS-Dyna

### ■ Optimierung von Faserverbunden

- Hintergrund
- Optimierung mit evolutionären Algorithmen in GEOpS<sup>2</sup>
- (Formeloptimierung)

### ■ Berechnungen von Faserverbunden

- Hintergrund
- Lineare Berechnungen mit FiPPS

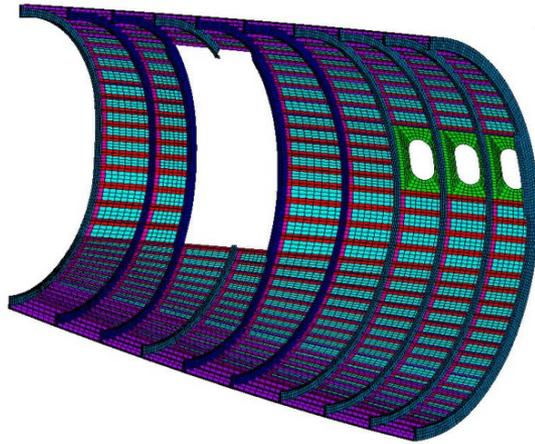
### ■ HPC am ZIH

- Programme, Besonderheiten und Probleme

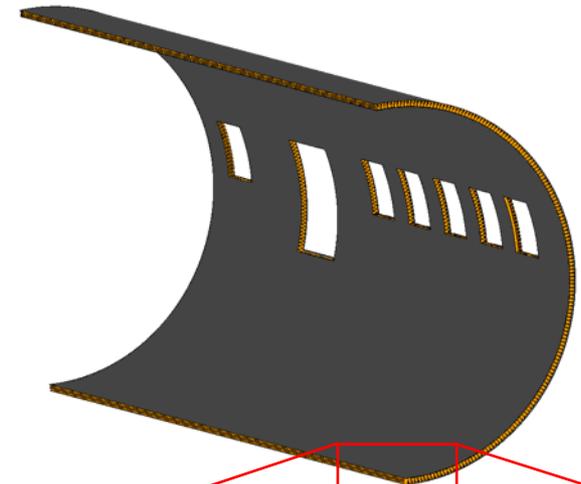
# Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen

## ■ Neue Rumpfkonzeppte

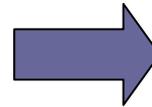
metallische Stringer-  
Spant-Struktur



z.B. CFK-Sandwich



neue Flugzeug-  
rumpfgeneration

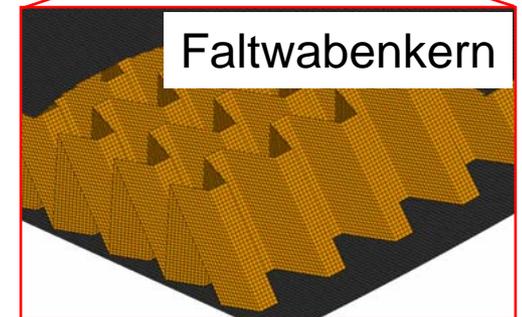


Projektziele 30/40/++:

- minus 40% Kosten
- minus 30% Gewicht
- keine Dauerfestigkeitsprobleme
- keine Korrosion

Quelle: C. Rückert, Airbus, "Validierung von Bauweisen für einen CFK-Rumpf – Werkstoff und Verfahrensauswahl" DGLR-JT2003-117

Faltwabenkern



# Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen

## ■ Sichtbare Schäden

- Vogelschlag
- Triebwerksschaufeln
- ...



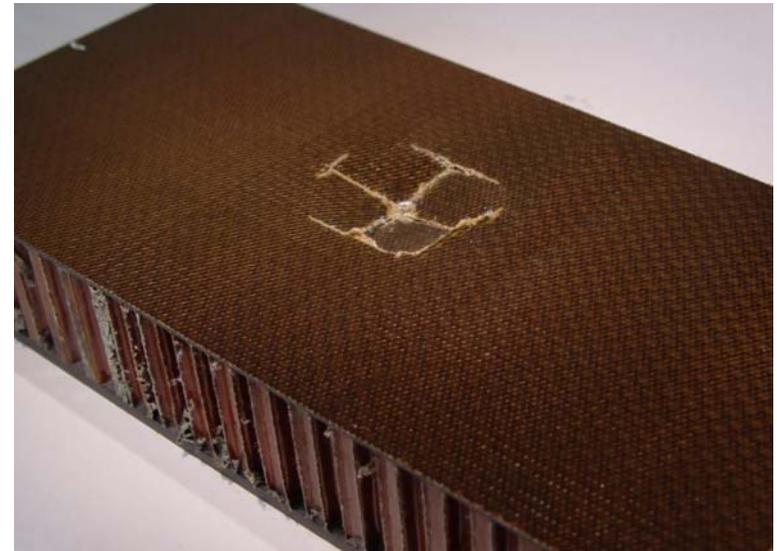
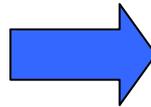
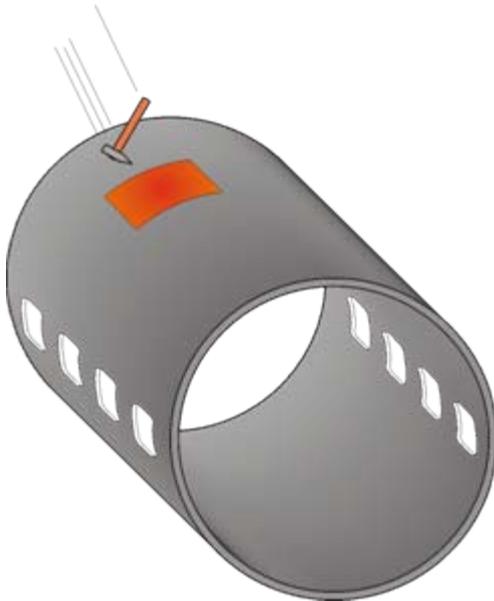
Quelle: [www.telegraph.co.uk](http://www.telegraph.co.uk)



Quelle: [www.spiegel-online.de](http://www.spiegel-online.de)

# Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen

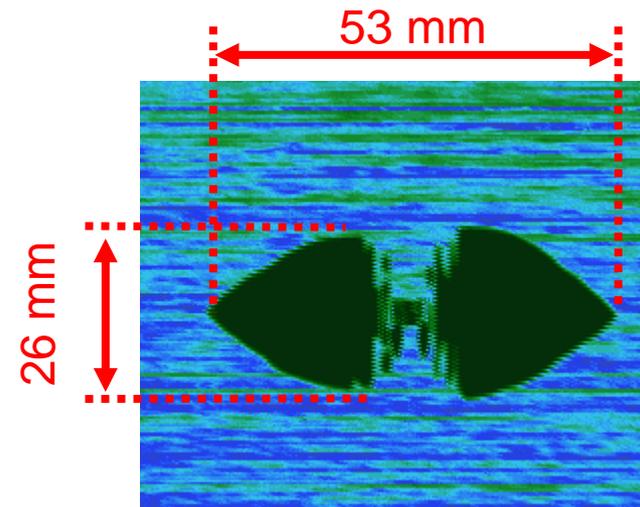
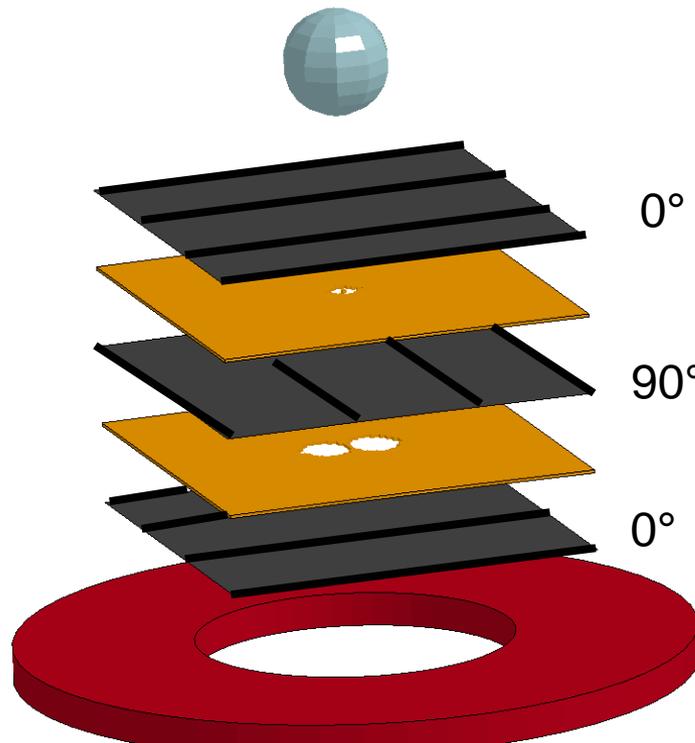
- **Nicht bzw. kaum sichtbare Schäden in Faserverbunden I**
  - Fertigungsfehler
  - Wartungsfehler
  - z.B. Schlagbelastungen mit niedrigerer Energie („tooldrop“)
  - ...



# Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen

## ■ Nicht bzw. kaum sichtbare Schäden in Faserverbunden II

- Schlagbelastungen mit niedrigerer Energie („tooldrop“)  
z.B: CFK-Laminat
  - sehr gute mechanische intralaminare Eigenschaften
  - geringe interlaminare Festigkeitskennwerte
  - Neigung zu Delaminationen (Versagen der Schichtverbindungen)

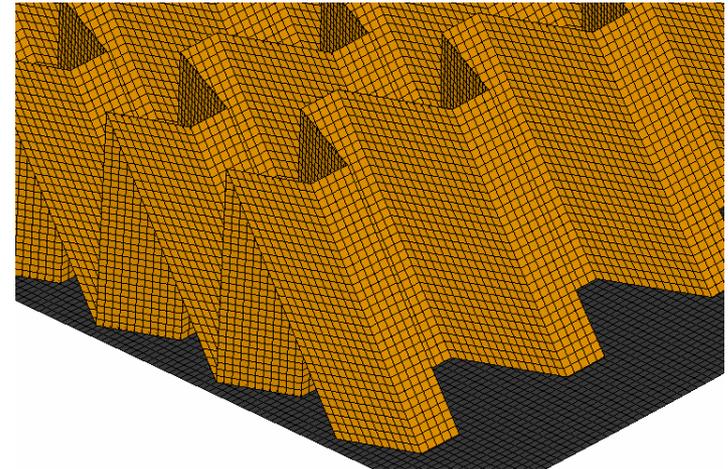
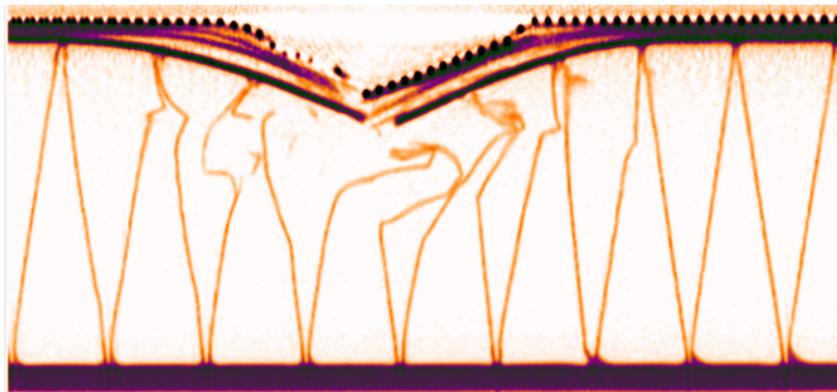
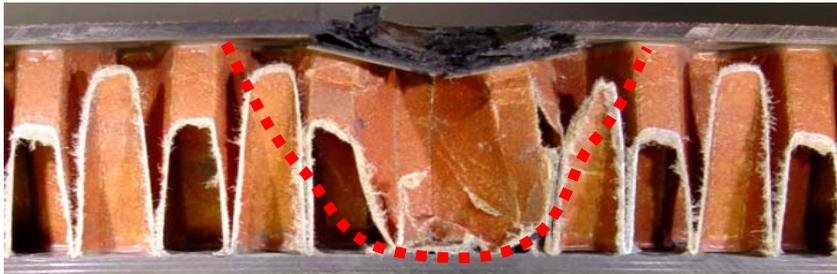


C-Bild (Fehlerecho) eines  
5 Joule Impacts auf ein  
2mm dickes  $[0_4/90_8/0_4]$  Laminat

## Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen

### ■ Nicht bzw. kaum sichtbare Schäden in Faserverbunden III

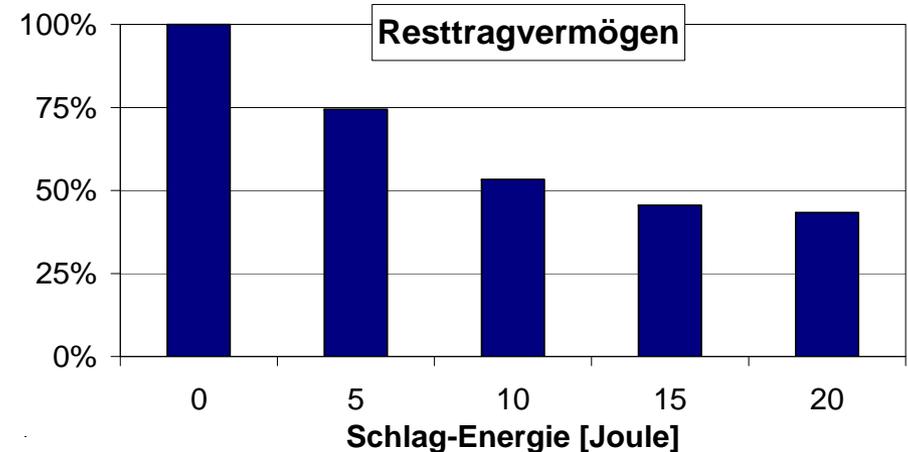
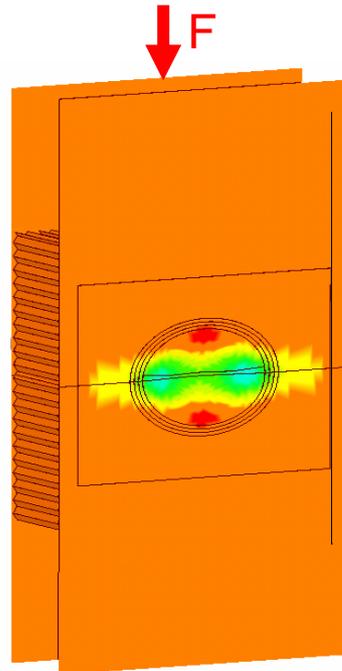
- Schlagbelastungen mit niedrigerer Energie („tooldrop“)  
z.B: CFK-Sandwich mit Falzwabenkern:
  - hohe gewichtsspezifische Steifigkeiten und Festigkeiten
  - dünne, spröde Deckschichten, weicher Kern
  - anfällig gegenüber Schlagbelastungen



- Falzwabenwände mit Shell-Elementen modellieren
- Einfluss lokaler Schädigungsmechanismen berücksichtigen

# Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen

- **Nicht bzw. kaum sichtbare Schäden in Faserverbunden IV**
  - Schlagschäden reduzieren das Resttragvermögen



5J : 1kg aus 51cm Höhe fallen lassen

# Schadenstoleranz von Flugzeugstrukturen

## ■ Entwicklung von Simulationsmethoden

- Schadensentstehung in Faserverbundstrukturen bei Schlagbelastungen
- Vorhersage des Resttragvermögens der geschädigten Strukturen

## ■ Experimentelle Untersuchungen

## ■ Numerische Untersuchungen

- explizites Finite Element Programm „LS-Dyna“ (LSTC)
- Kennwertermittlung für die Materialien (viele kleine Modelle)
- detaillierte FE-Modelle für Deckschichten und Kerne
- Delaminationsmodelle (90 x 90 mm, 40.000 bis 500.000 Elemente)
- Kernmodelle (100 x 100 mm, 100.000 Elemente)
- Impactmodelle (ab 150x150 mm, 200.000 bis max. 10 Mio. Elemente)
- Restfestigkeitsmodelle (ab 200.000 Elemente)
- Rechenzeiten: ca. 100 CPU-Stunden pro 100.000 Elemente
- Speicherbedarf: ca. 50 GB pro 100.000 Elemente (16 TB, 5. Platz)

# Übersicht

## ■ Lehrstuhl

## ■ Schadenstoleranzuntersuchungen

- Hintergrund
- Nichtlineare Berechnung mit LS-Dyna

## ■ Optimierung von Faserverbunden

- Hintergrund
- Optimierung mit evolutionären Algorithmen in GEOpS<sup>2</sup>
- (Formeloptimierung)

## ■ Berechnungen von Faserverbunden

- Hintergrund
- Lineare Berechnungen mit FiPPS

## ■ HPC am ZIH

- Programme, Besonderheiten und Probleme

# Optimierung von Faserverbunden – GEOpS<sup>2</sup>

## ■ Klassische Ziele der Optimierung

- „besser“ werden
- Der Klassiker: billiger
- geringerer Fertigungsaufwand
- geringere Masse
- höhere Steifigkeit
- ausreichenden Beulstabilität
- ...
- Optimierung des Impactverhaltens
- ...
- Immer unter Berücksichtigung vielfältiger Lastkombinationen

→ Mehrzieloptimierung

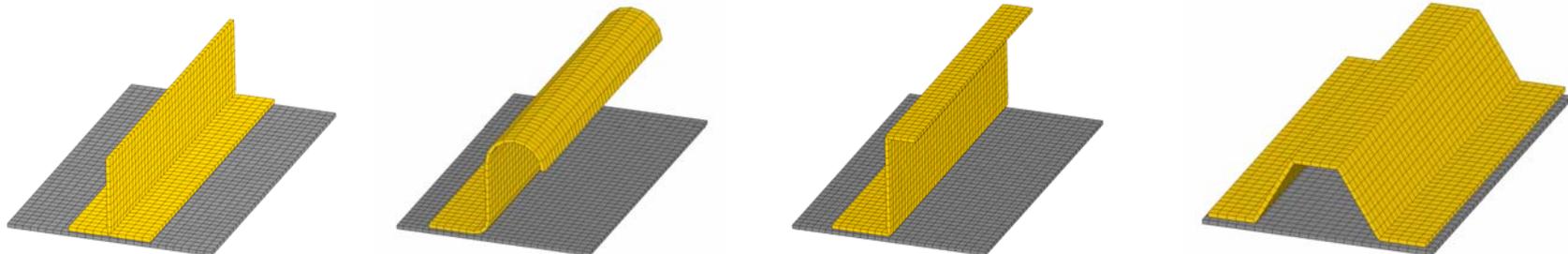
## Optimierung von Faserverbunden – GEOpS<sup>2</sup>

### ■ Wahl eines geeigneten Laminataufbaus

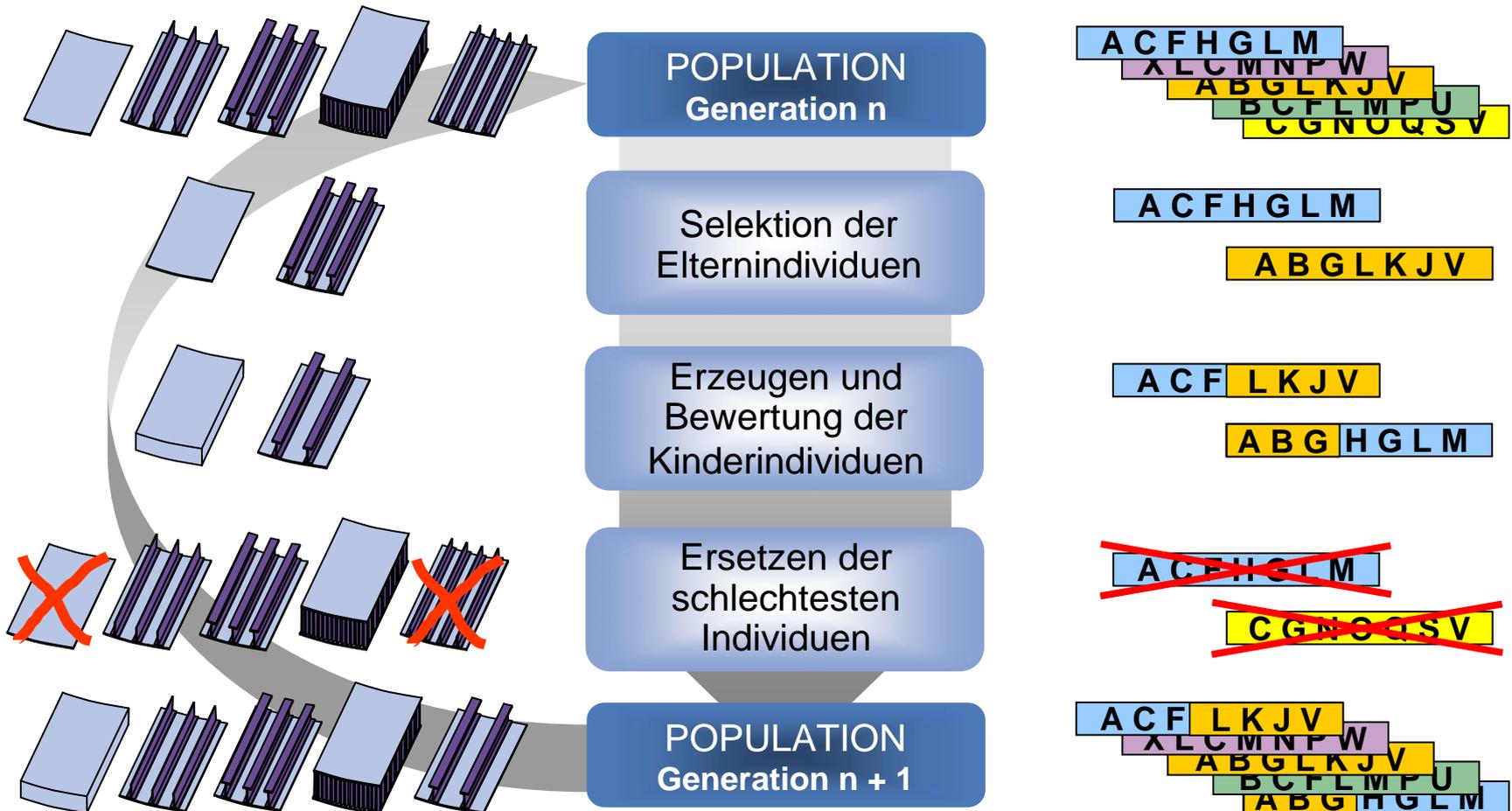
- Material (verschiedene Kohle-, Glas-, Aramidfasern in Verbindung mit unterschiedlichen Harzsystemen)
- Schichtanzahl
- Ausrichtung der Fasern
- Anordnung der Einzellagen (Schichtreihenfolge)

### ■ Optimierung der Geometrie und Topologie

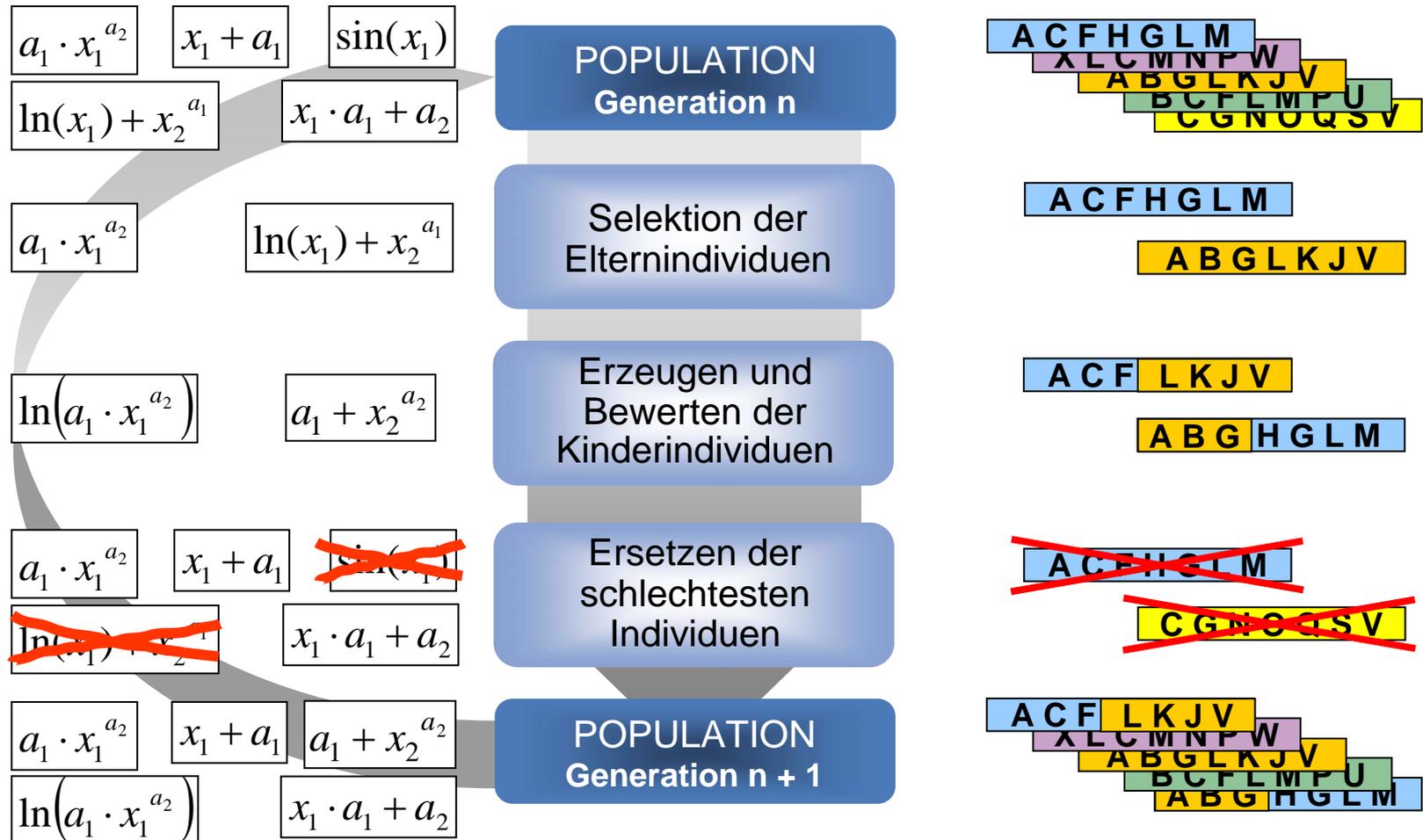
- Stringer- und Spanttyp
- Stringer- und Spantanordnung
- Laminataufbau im gewählten Stringer oder Spant
- ...



# Numerische Optimierung mit GEOpS<sup>2</sup>



# Symbolische Regression auf der Basis evolutionärer Optimierung (Formeloptimierung)



# Symbolische Regression auf der Basis evolutionärer Optimierung (Formeloptimierung)

## verwendete mathematische Operatoren

### unäre Operatoren

|            |            |
|------------|------------|
| $\sin(x)$  | $1/x$      |
| $\cos(x)$  | $e^x$      |
| $\tan(x)$  | $\ln(x)$   |
| $\sinh(x)$ | $\lg(x)$   |
| $\cosh(x)$ | $\sqrt{x}$ |
| $\tanh(x)$ |            |

### binäre Operatoren

|             |
|-------------|
| $x + y$     |
| $x - y$     |
| $x \cdot y$ |
| $x \div y$  |
| $x^y$       |

## Beispiel einer Approximation

$$\hat{t}_{skin.iso} = a_1 \tanh \left[ a_2 \sin \left( a_3 \hat{n}_x \hat{b} - a_4 \hat{n}_x \hat{n}_y - a_5 \hat{n}_x \cos(a_6 \hat{n}_x) \right) - a_7 \tan \left( a_8 \hat{b} - a_9 \right) \right. \\ \left. - a_{10} \hat{n}_{xy} \cos(a_{11} \hat{n}_y) + a_{12} \tan(a_{13} \hat{n}_x) \hat{n}_{xy} + a_{14} \right] \\ + a_{15} \cos(a_{16} \hat{n}_y + a_{17} \hat{n}_x) - a_{18} \tanh(a_{19} \hat{n}_y) - a_{20} \hat{n}_x + a_{21}$$

# Numerische Optimierung mit GEOps<sup>2</sup>

## Paralleler Einsatz von verschiedenen Evolutionären Algorithmen

**Genetische Algorithmen**  
Binäre Kodierung

**Problemstellung:**  
Diskrete Entwurfparameter und Kombinatorik

**Wichtigste Operatoren:**  
Crossover, Mutation

Eltern-Bit-Vektor

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

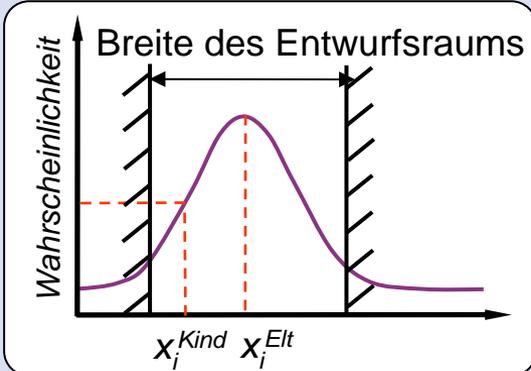
Kinder-Bit-Vektor

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

**Evolutionsstrategien**  
Reelle Kodierung

**Problemstellung:**  
Kombination von kontinuierlichen und diskreten Entwurfparametern

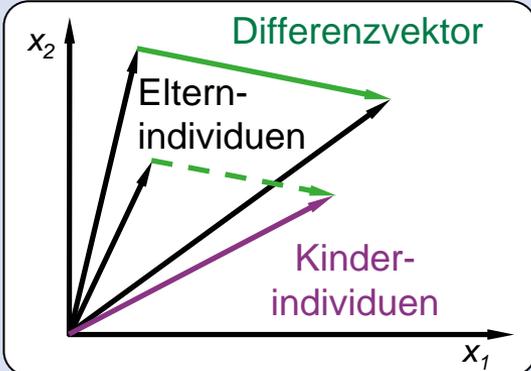
**Wichtigste Operatoren:**  
Mutation, Rekombination



**Differenzielle Evolution**  
Reelle Kodierung

**Problemstellung:**  
Kontinuierliche Entwurfparameter and lokale Suche

**Wichtigste Operatoren:**  
Mutation, Rekombination

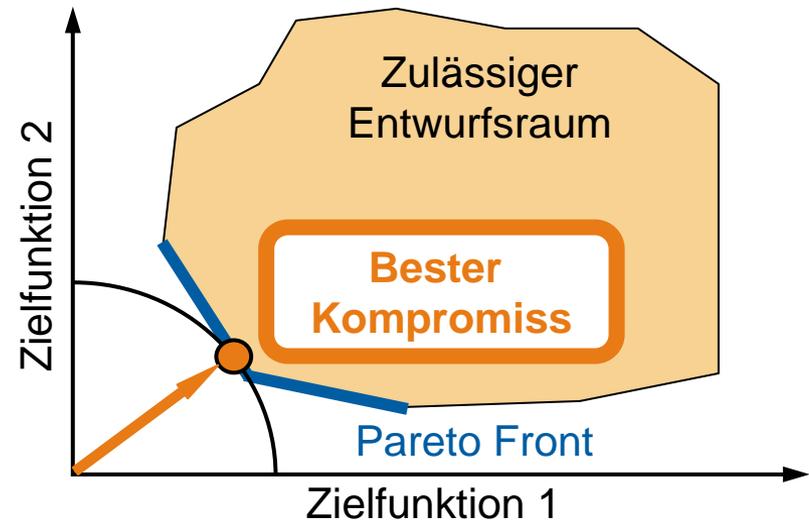
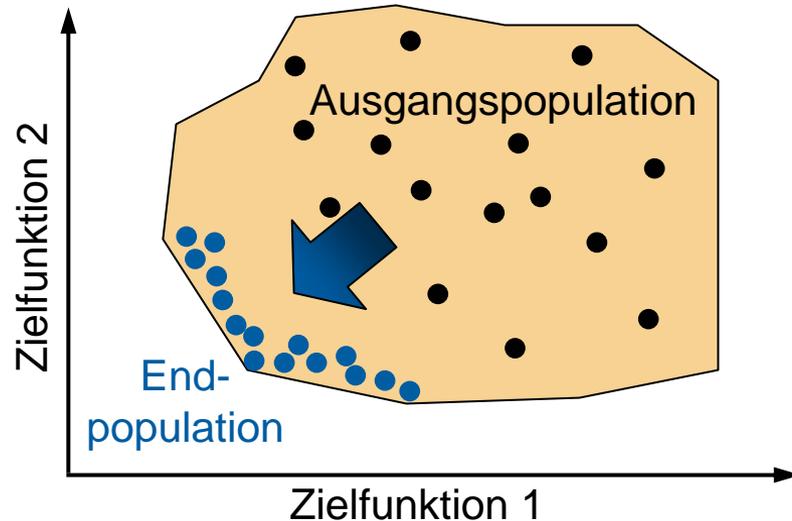


# Numerische Optimierung mit GEOpS<sup>2</sup>

## Mehrzieloptimierung

Ergebnis: Satz von nicht-dominierten pareto-optimalen Lösungen

Dominanz Kriterium:  $f_1(\mathbf{x}_i) \geq f_1(\mathbf{x}_j) \wedge f_2(\mathbf{x}_i) \geq f_2(\mathbf{x}_j) \wedge \dots \wedge f_q(\mathbf{x}_i) \geq f_q(\mathbf{x}_j)$   
 $\wedge \exists k \in \{1, 2, \dots, q\}$  mit  $f_k(\mathbf{x}_i) > f_k(\mathbf{x}_j)$

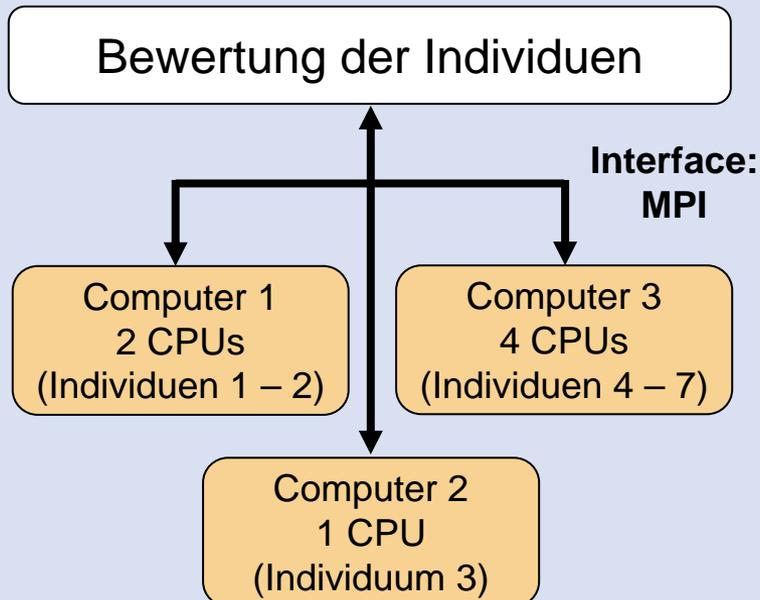


# Numerische Optimierung mit GEOps<sup>2</sup>

## Verfahren zur Beschleunigung der Optimierungsrechnungen

### Parallele Bewertung von Individuen

Beispiel: Parallele Bewertung von 7 Individuen

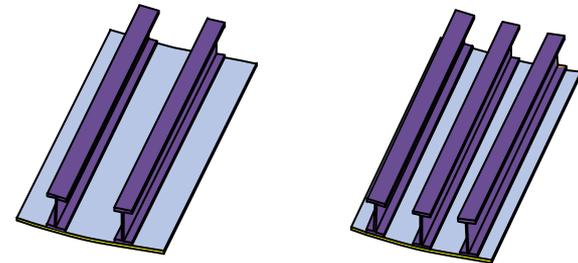


### Entwurfsraumanpassung

Beispiel: Versteifungsanzahl

Entwurfsraum beim Start:  
0 – 5 Versteifungen

Beste Individuen nach 50 Generationen:  
2 – 3 Versteifungen



Angepasster Entwurfsraum:  
1 – 4 Versteifungen

# Übersicht

## ■ Lehrstuhl

## ■ Schadenstoleranzuntersuchungen

- Hintergrund
- Nichtlineare Berechnung mit LS-Dyna

## ■ Optimierung von Faserverbunden

- Hintergrund
- Optimierung mit evolutionären Algorithmen in GEOpS<sup>2</sup>
- (Formeloptimierung)

## ■ Berechnungen von Faserverbunden

- Hintergrund
- Lineare Berechnungen mit FiPPS

## ■ HPC am ZIH

- Programme, Besonderheiten und Probleme

# Berechnungen von Faserverbunden - FiPPS

## ■ Warum eigenes Tool?

- pro Individuum ein oder mehrere Lastfälle
- pro Individuum statische Rechnung(en) und evt. Eigenwertanalyse
- Performance und Speicherbedarf
  
- Ansys (nicht genügend Lizenzen + keine vernünftige Reservierung + „Ansys wartet nicht richtig“ (Fehlermeldung, wenn keine Lizenz verfügbar), „Festplattenmörder“)
- Nastran/Patran (Token, kaputter Lizenzmanager)
- LS-Dyna implizit
  
- überschaubarer Funktionsumfang
- Weil wir's schon immer mal machen wollten 😊

# Berechnungen von Faserverbunden - FiPPS

## ■ FiPPS – Features

- Lineare statische Berechnungen
- Linearisiertes Beulen als Eigenwertproblem
- Geschichtete Schalen- und Balkenelemente
- 8-Knoten Vierecks- und Balkenelemente (4 Knoten Viereck, 3 Knoten Dreieck, ...)
- Beliebige homogene Randbedingungen und Kopplung von Freiheiten (inhomogene Randbedingungen, ...)
- Massiv Parallel mittels MPI
- Sparse Matrix
- Statischer Gleichungssystemlöser PETSc + MUMPS (linear)
- Eigenwertlöser SLEPc

# Berechnungen von Faserverbunden - FiPPS

## ■ FiPPS – Performance

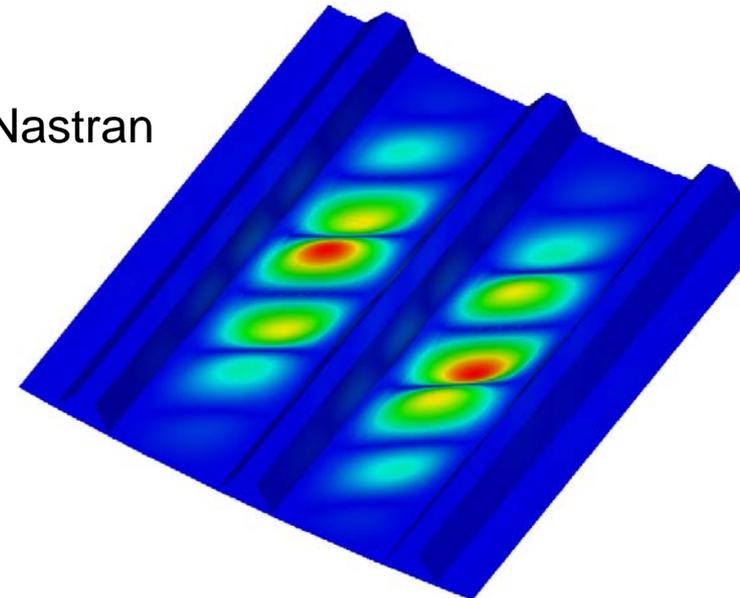
- 3 x schneller als Ansys
- Nur 1/3 Speicherbedarf von Ansys
- Cholesky-Zerlegung (direktes Verfahren, aufwändig)
- Mehrere Lastfälle
- Eigenwertproblem (Beulen)

## ■ FiPPS - Verifikation

- Analytische Modelle
- Vergleichsmodelle für Ansys und MSC/Nastran

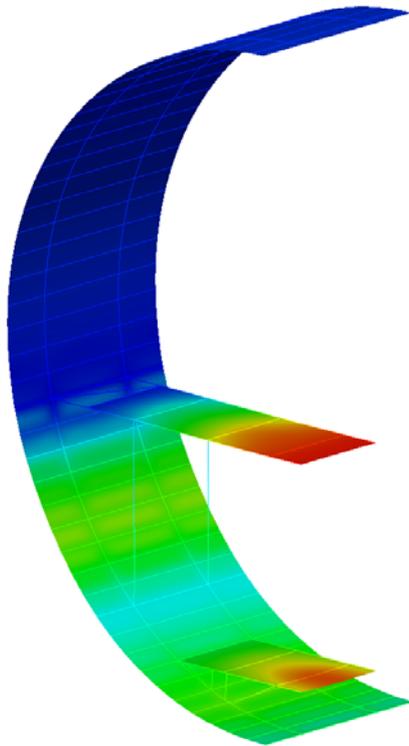
## ■ FiPPS – Ergebnisdarstellung

- Ergebnisse im VTK-Format
- Betrachten mit Paraview, ...

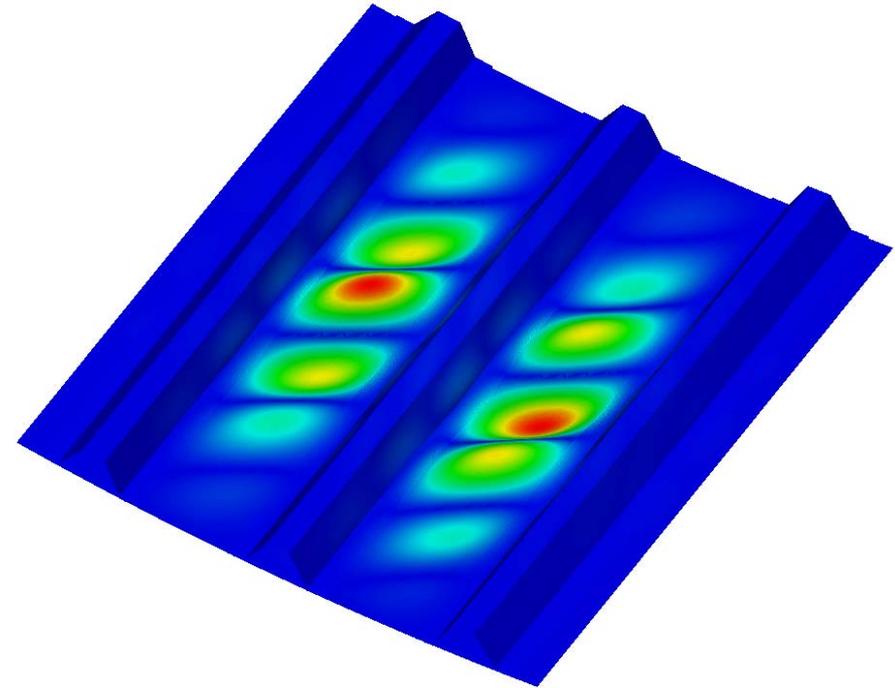


# Berechnungen von Faserverbunden - FiPPS

## ■ FiPPS – Beispiele



Verformung eines Rumpfsegments  
(Konzeptoptimierung)



Schubbeulen einer  $\Omega$ -Stringer  
versteiften Schale

# Übersicht

## ■ Lehrstuhl

## ■ Schadenstoleranzuntersuchungen

- Hintergrund
- Nichtlineare Berechnung mit LS-Dyna

## ■ Optimierung von Faserverbunden

- Hintergrund
- Optimierung mit evolutionären Algorithmen in GEOpS<sup>2</sup>
- (Formeloptimierung)

## ■ Berechnungen von Faserverbunden

- Hintergrund
- Lineare Berechnungen mit FiPPS

## ■ HPC am ZIH

- Programme, Besonderheiten und Probleme

## HPC am ZIH

### ■ LS-Dyna (MPP-Version) auf Altix

- Benutzung

```
% module load ls-dyna/971
% mpirun -np 6 mpp971_s_R5.0 .....
```
- neue Versionen auspacken und los

```
% tar xvfz mpp971_s_R5.0_ia64_SGIAltixPP5.tar.gz
% export PATH=${PATH}:$PFAD_ZUM_BINARY
% export LD_LIBRARY_PATH=
    $PFAD_ZUM_BINARY:$LD_LIBRARY_PATH
```
- läuft auf fast allen Planeten unproblematisch
- MPP auf Neptun: verschiedene MPI-Rechnungen (auch von unterschiedlichen Nutzern) werden auf die selben CPU's gepinnt
  - entweder selber „pinnen“ (böse)

```
% export MPI_DSM_CPULIST=0-5
% mpirun -np 6 ...
```
  - oder besser auf CPU-Pinning komplett verzichten (Performance)

```
% export MPI_DSM_DISTRIBUTE=0
```
  - oder noch besser ... eine clevere Lösung (Aufwand/Nutzen)

## HPC am ZIH

### ■ LS-Dyna (MPP-Version) auf Altix (Fortsetzung)

- Zerlegung der Modelle erfolgt nur auf einer CPU benötigt aber viel Zeit und RAM (günstig: große SMP-Maschine)s bei großen Modellen (> 5 Mio Elemente):
  - 8 oder 16 CPUs reservieren (oder Neptun)
  - Zerlegung durchführen
  - zerlegtes Modell speichern
  - bsub -n 256 ...
- Lizenzserver time-out nach ca. 1 Stunden (LS-Dyna hängt) (ASSUME\_DEAD)

### ■ LS-Dyna (SMP-Version) auf Altix

- skaliert nicht wirklich (Ursache ???)

### ■ LS-Prepost

- Nur alte Versionen für Itanium-CPU's verfügbar
- Itanium kann auch i686 (32 bit) ausführen (Emulation)

## HPC am ZIH

### ■ FiPPS „bauen“

- SLEPc benötigt PETSc (und kleinen Patch)
- Für PETSc benötigte Bibliotheken
  - MUMPS
  - Intel MKL (oder andere LAPACK, BLAS-Bibliotheken)
- eine MPI-Version
- Kompilieren mit Intel C/C++ und Fortran
  
- Neue PETSc und SLEPc Versionen funktionieren auf Altix nicht mehr ????

### ■ FiPPS im Einsatz

- läuft auf allen Planeten unproblematisch
- Statische Lösung (PETSc) skaliert gut
- Eigenwertlösung (SLEPc) skaliert gut
- Erstellen der Elementsteifigkeitsmatrizen ist momentan nicht parallelisiert
- Im Zusammenspiel mit GEOpS<sup>2</sup> ist die Altix gerade richtig 😊

# HPC am ZIH

## ■ GEOpS<sup>2</sup>

- eine MPI-Version
- Intel Fortran
- Kompilieren ...
  
- läuft auf allen Planeten unproblematisch
- Skaliert gut

# HPC am ZIH

## ■ Probleme:

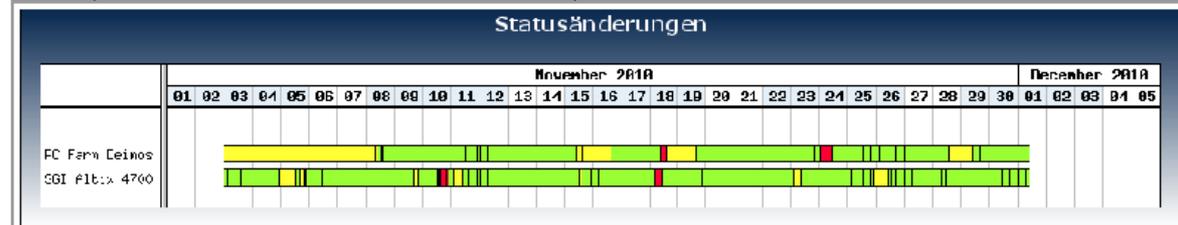
- defekte Speicherriegel
- defektes Lustre
- Klimaanlage
- ganz normale Abstürze
- ...

### BETRIEBSTATUS DER HOCHLEISTUNGSRECHNER

Letzte Aktualisierung: 01.Dezember 2010 10:10

[Zum Betriebsstatus der ZIH-Dienste](#)

| SGI Altix 4700 |                    | PC Farm Deimos                 |
|----------------|--------------------|--------------------------------|
| ●              | SGI Altix 4700     | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Jupiter          | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Saturn           | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Uranus           | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Mars             | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Neptun           | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Batch-System     | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | PC Farm Deimos     | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Login-Knoten     | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Compute-Knoten   | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Batch-System     | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - Home-Verzeichnis | Es gibt keine Einschränkungen. |
| ●              | - FastFS           | Es gibt keine Einschränkungen. |





## HPC am ZIH

**Vielen Dank ans ZIH für die  
Rechenpower**



# Institut für Luft- und Raumfahrttechnik

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**