

# Erste Erfahrungen in der industriellen Anwendung von Topologieoptimierung für Crash mit GENESIS und LS-TaSC

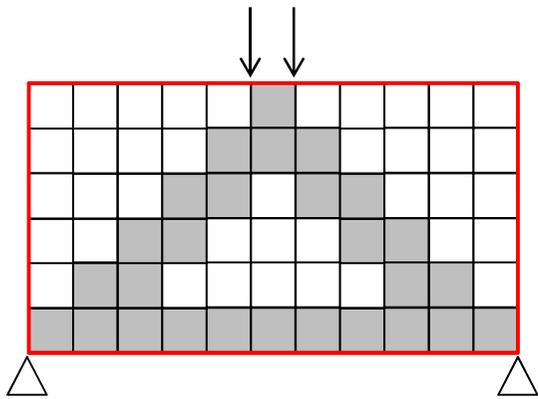
Dr. Andrea Erhart  
Peter Schumacher  
DYNAmore GmbH

Stuttgart, 21. Mai 2012

# Nichtlineare Topologieoptimierung

## Topologieoptimierung

Im Entwurfsraum:  
Völlige Freiheit der Form



### Designvariablen:

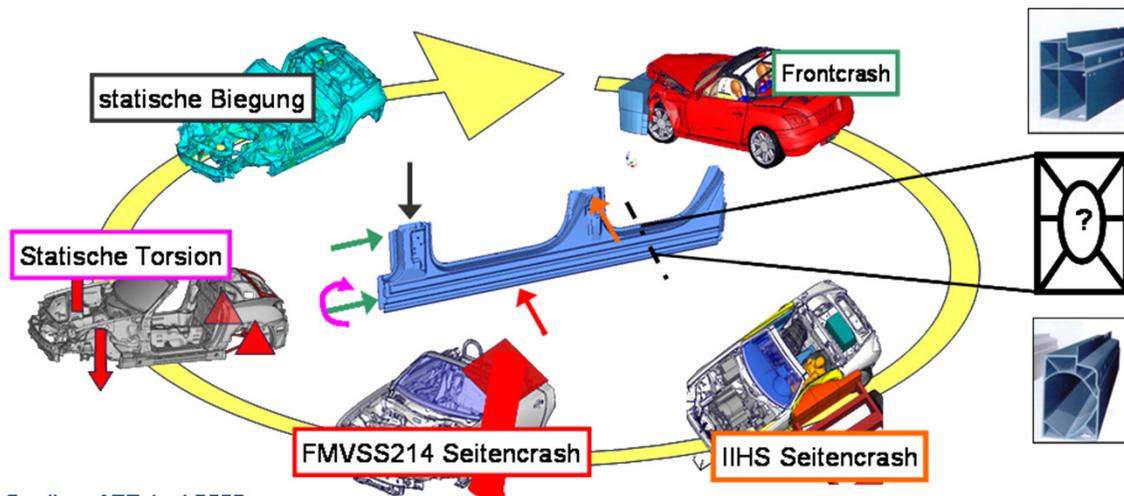
relative Dichte in jedem Element

### Ergebnis:

Pixelartige Materialverteilung  
Topologischer Aufbau

➔ Etabliert: Lineare Topologieoptimierung

➔ Neu: Topologieoptimierung für crashbeanspruchte Fahrzeugstrukturen



Quellen: ATZ Juni 2008

Dynamik, Kontakt, nichtlineares Materialverhalten, große Deformationen

➔ zwei Verfahren:

- LS-TaSC: Hybrid Cellular Automata (HCA)
- Genesis-ESL: Equivalent Static Loads (ESL)

# (Topologie)- Optimierungsverfahren

## Heuristische Verfahren

- mehr oder weniger intelligente Suche nach Optimum
- langsame Konvergenz ☹
- viele, schnelle Iterationen
- robust ☺
- Erweiterung auf Nichtlinearität relativ einfach
- unflexibel bezüglich Zielfunktion
- Problem: Nebenbedingungen

## Gradientenbasierte Verfahren

- gezielte Suche nach Optimum
- Aufwand zur Berechnung der Sensitivitäten bei vielen Designvariablen ☹
- schnelle Konvergenz ☺
- wenige, langsame Iterationen
- robust
- beschränkt auf lineares Verhalten
- flexibel bezüglich Zielfunktion und Nebenbedingungen

**hierauf aufbauend:**

→ Hybrid Cellular Automata - Methode

→ Equivalent Static Load - Methode

**LS-TaSC**  
**Hybrid Cellular Automata -**  
**Methode**

# LS-TaSC: Hybrid Cellular Automata

- **Ursprung:**

Dissertation Neal M. Patel: “Crashworthiness Design using Topology Optimization”  
Universität Notre Dame (Indiana, US)

- **Ziel: Homogenisierung der inneren Energiedichte ( $IED$ ).**

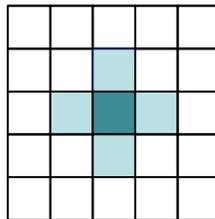
Gleichmäßige Materialbeanspruchung bei vorgegebener Masse

- **Systemanalyse** zur Bestimmung der inneren Energiedichte

$$IED = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon^{final}} \sigma d\varepsilon$$

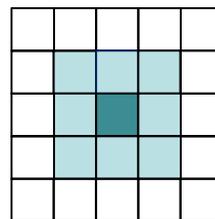
- Auswertung von **Nachbarschaftsinformationen** – Mittelung der inneren Energiedichte  $\widetilde{IED}$

Typische Nachbarschaften (Cellular Automata):



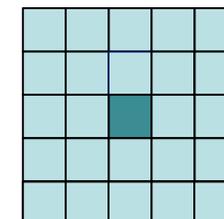
4 Nachbarn (2D)

6 Nachbarn (3D)



8 Nachbarn (2D)

26 Nachbarn (3D)



24 Nachbarn (2D)

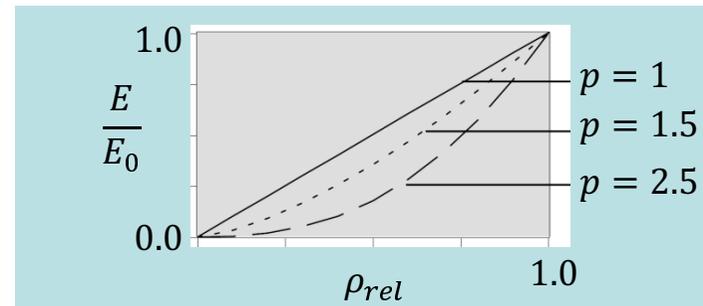
124 Nachbarn (3D)

- Material anlagern in Bereichen hoher  $\widetilde{IED}$ , Elemente mit geringer  $\widetilde{IED}$  werden entfernt.

## Materialparametrisierung:

### Erweiterung des üblichen SIMP-Ansatzes für nichtlineares Materialverhalten

- Relative Dichte  $\rho_{rel}(x) = \frac{\rho(x)}{\rho_0}$  mit  $(0 \leq \rho_{rel}(x) \leq 1)$
- Diskontinuierliches 0 oder 1 Problem  $\rightarrow$  **Kontinuierliches Materialverteilungsproblem**
- **Materialparametrisierung über die Dichte: SIMP - Ansatz:**  
**(Solid Isotropic Material with Penalization of intermediate density)**



### Standard:

E-Modul  $E(x, \rho_{rel}) = (\rho_{rel}(x))^p E_0$  mit Ausgangsmodul  $E_0$

### Erweiterung für nichtlineares Materialverhalten:

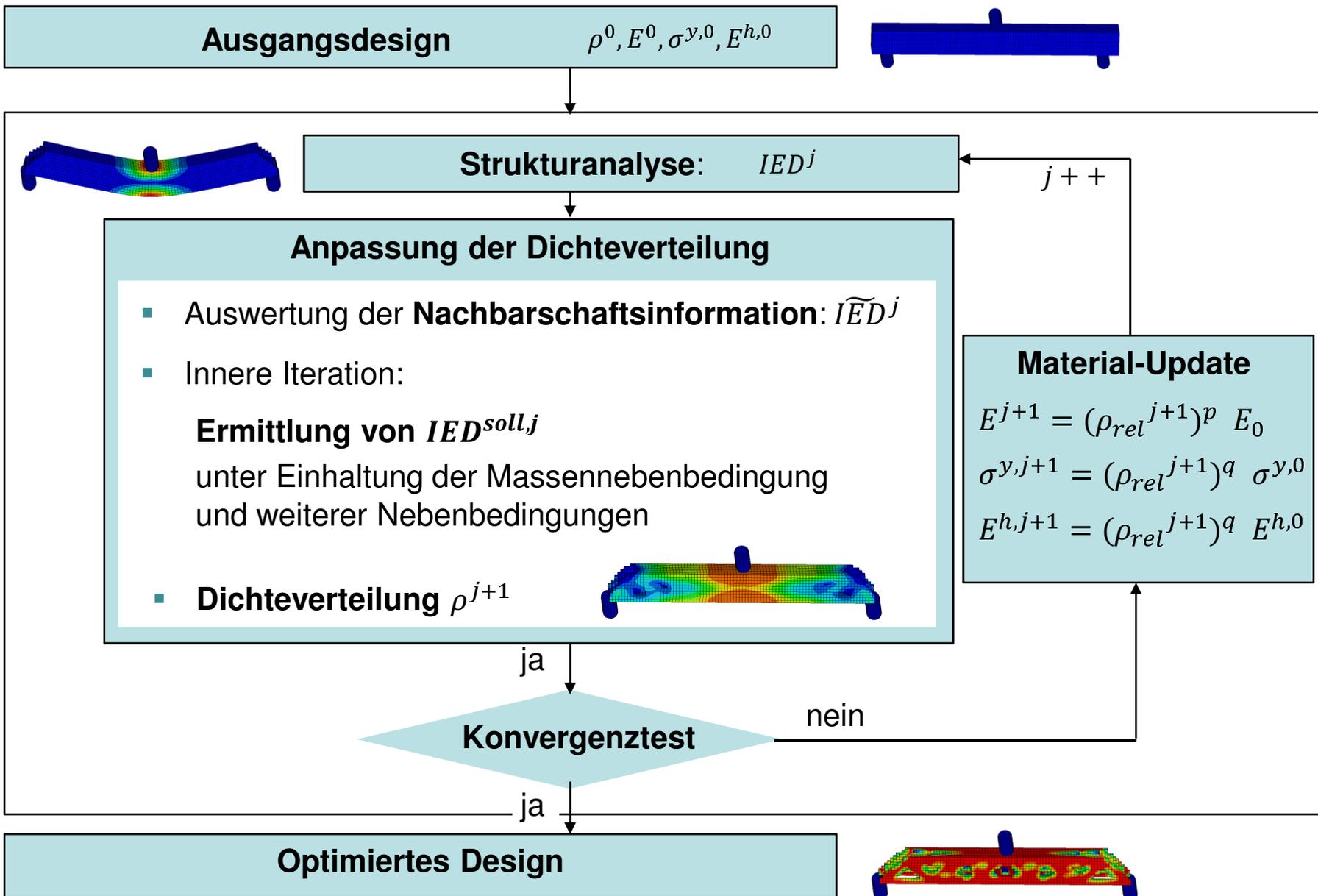
Fließspannung  $\sigma^y(x, \rho_{rel}) = (\rho_{rel}(x))^q \sigma^{y,0}$  mit Ausgangsfließspannung  $\sigma^{y,0}$

Verfestigungsverhalten  $E^h(x, \rho_{rel}) = (\rho_{rel}(x))^q E^{h,0}$  mit Ausgangsverfestigungsmodul  $E^{h,0}$

$\rightarrow$  Exponenten  $p$  und  $q$  bestrafen Dichtezustände zwischen 0 und 1

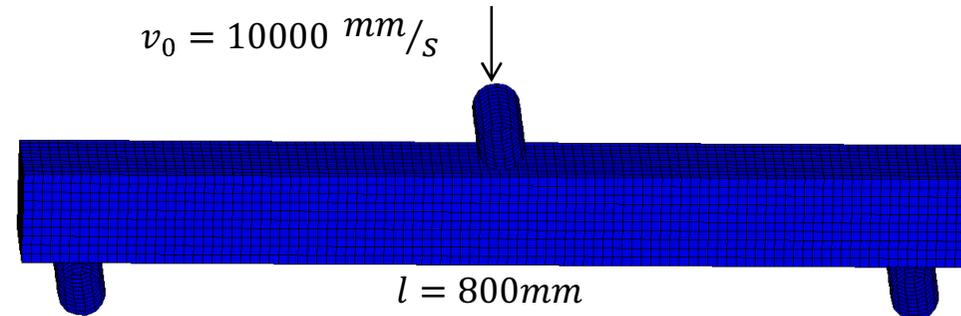
$\rightarrow$  SIMP forciert klare 0 oder 1-Topologien

# LS-TaSC: Algorithmische Umsetzung



# Verdeutlichendes Beispiel LS-TaSC

Ausgangsdesign



Nebenbedingungen:

$$M_{rel,soll} = 0.25$$

$$|d_{eindring}| < 70.0 \text{ mm}$$

➔ Ziel: Vergleichmäßigung der inneren Energiedichte:

Material mit  $\rho_{rel} \approx 1$  in Bereichen hoher  $IED$ , Material entfernen in Bereichen  $IED \approx 0$

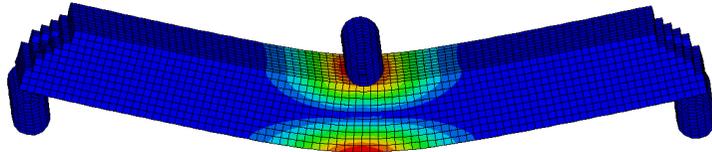
➔ Wirkungsweise von SIMP: Zunehmend deutliche 0 oder 1 Dichteverteilung

# Verdeutlichendes Beispiel LS-TaSC

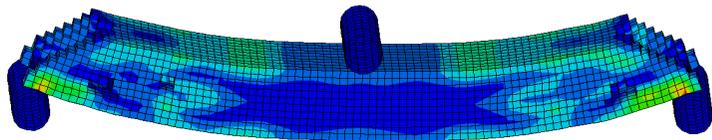
0.Iteration:  $\rho_{rel} = 0.25$  im gesamten Entwurfsraum

Strukturanalyse:  $IED [0, 22.0 \text{ N/mm}^2]$

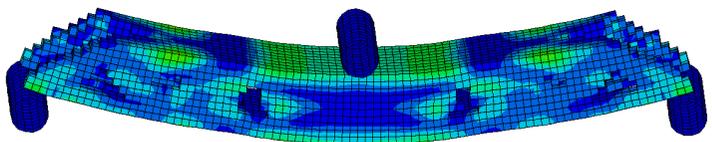
4.Iteration:



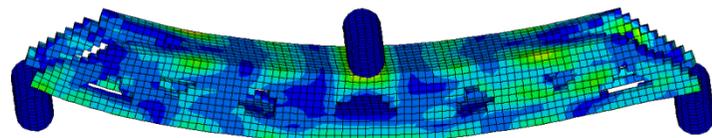
9.Iteration:



15.Iteration:

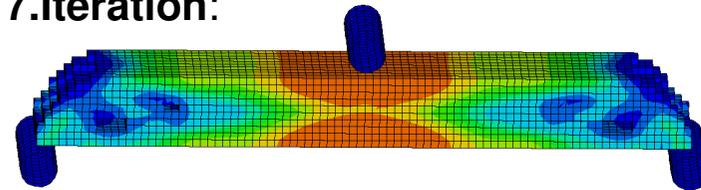


25.Iteration:

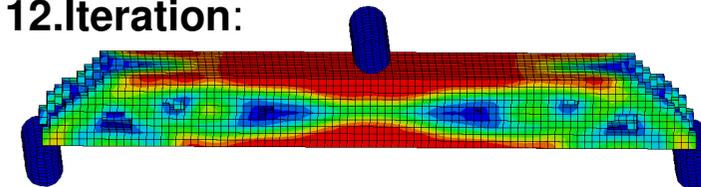


Anpassung der Dichteverteilung:  $\rho_{rel} [0,1]$

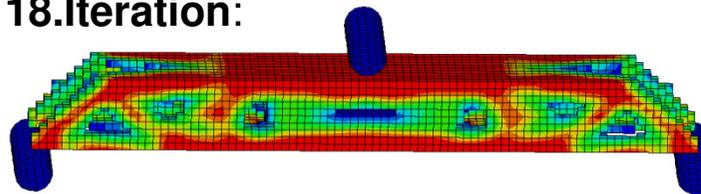
7.Iteration:



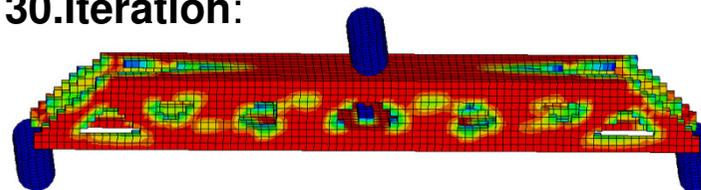
12.Iteration:



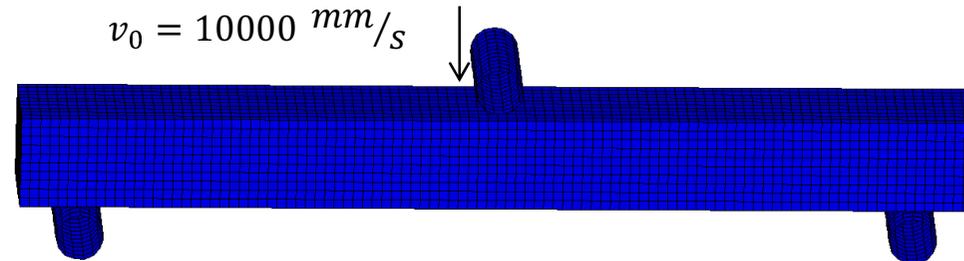
18.Iteration:



30.Iteration:



# Verdeutlichendes Beispiel LS-TaSC

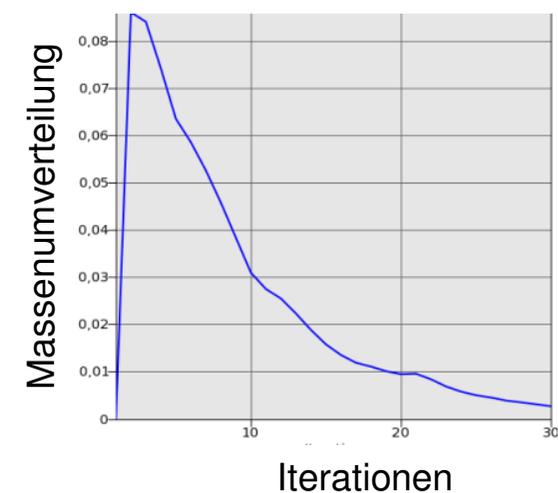
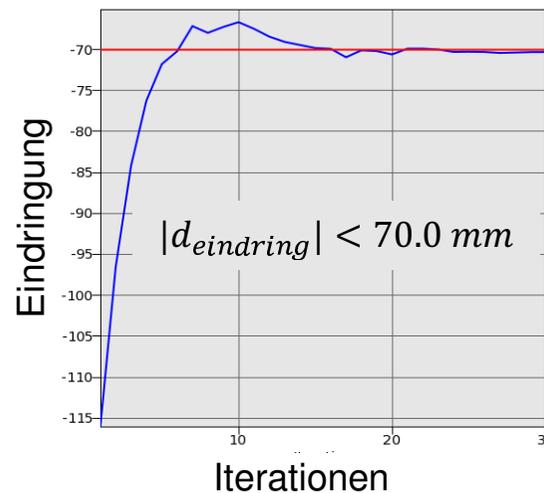
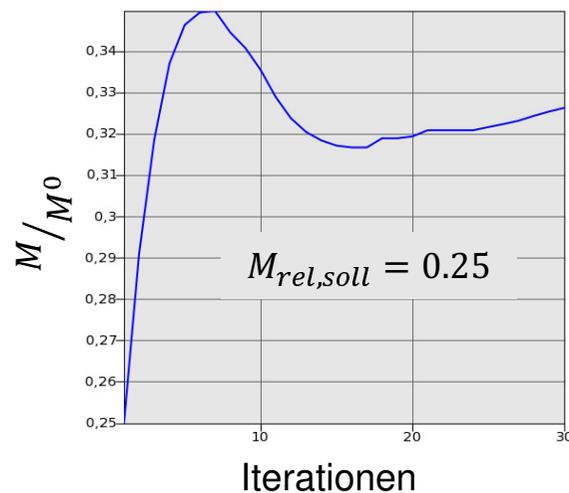


Nebenbedingungen:

$$M_{rel,soll} = 0.25$$

$$|d_{eindring}| < 70.0 \text{ mm}$$

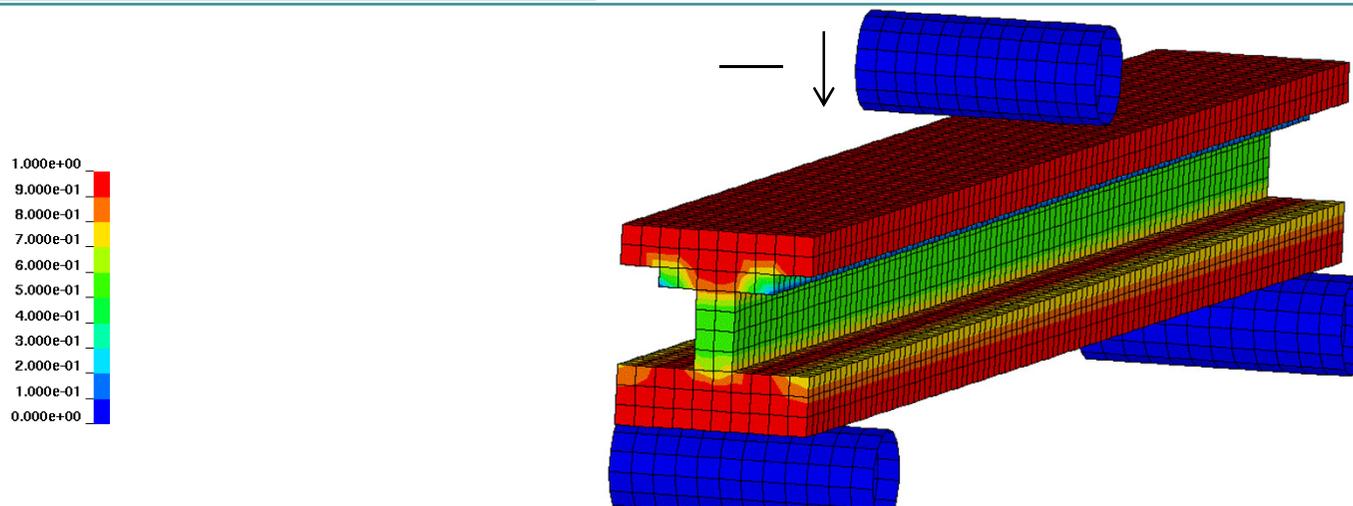
➔ Erfüllung von Massen- und Verschiebungsnebenbedingung, Konvergenz:



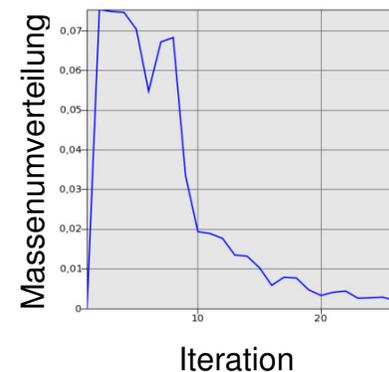
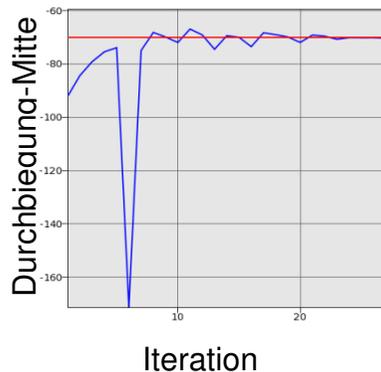
Minimale Masse, die die Verschiebungsnebenbedingung einhalten kann wird angestrebt

# Fabrikationszwänge, z.B. Extrusion

- Ziel: Homogenisierung der inneren Energiedichte
- Nebenbedingungen: Masse:  
Verschiebung:  
Extrusion

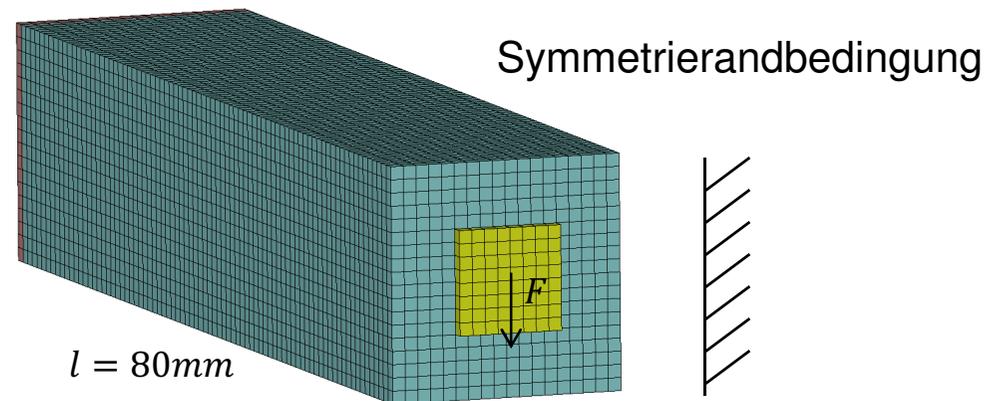


## Konvergenz (Massenumverteilung) - Verschiebungsnebenbedingung



# Beispiel LS-TaSC: Kragarm

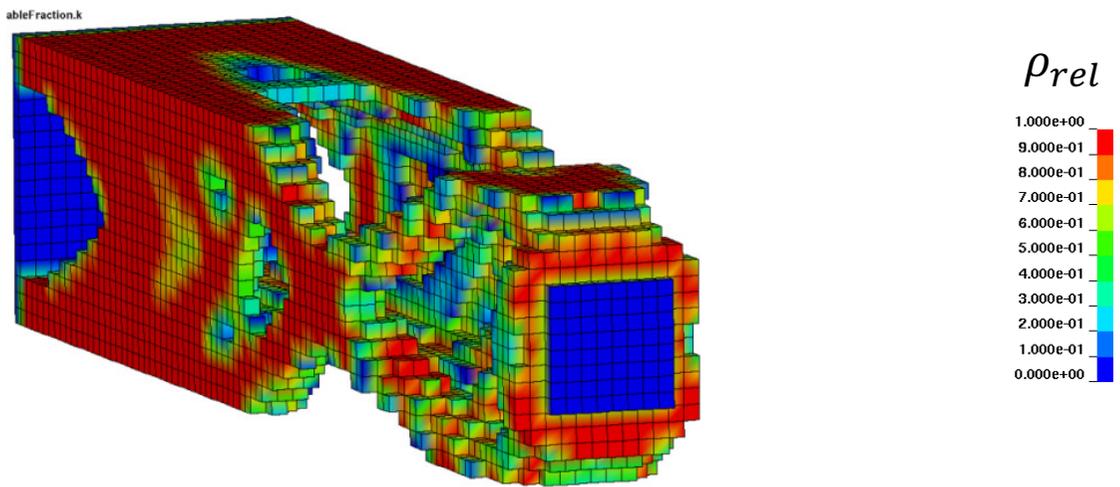
- **Beanspruchung:** quasi-statische Einzellast an starrer Platte  $F = 400\text{ N}$
- **Nebenbedingung:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.2$   
Verschiebung:  $|d_F| < 0.1\text{ mm}$
- **Diskretisierung:** 26000 solids (1mm),  
unterintegriert 1 GP mit Hourglassstabilisierung (ELFORM=1 IHQ=6)
- **Material:** Aluminium



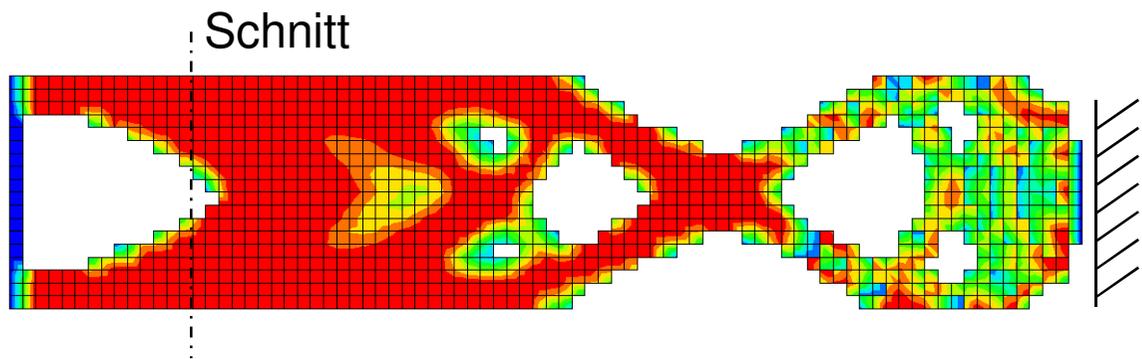
- **Quasistatische Belastung**

# Beispiel LS-TaSC: Kragarm

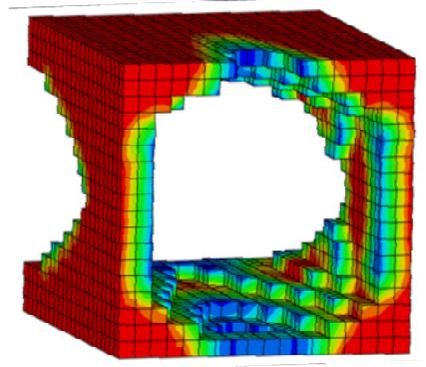
- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.2$   
Verschiebung:  $|d_F| < 0.1 \text{ mm}$



Seitenansicht:

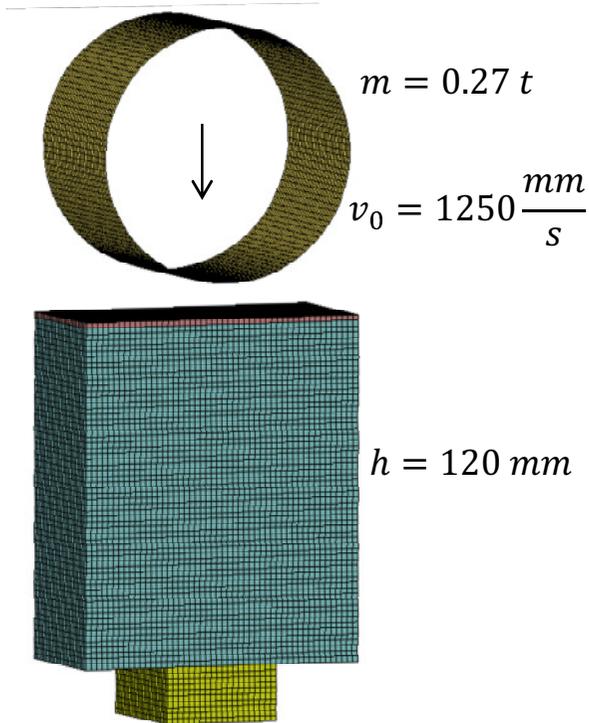


Schnitt:

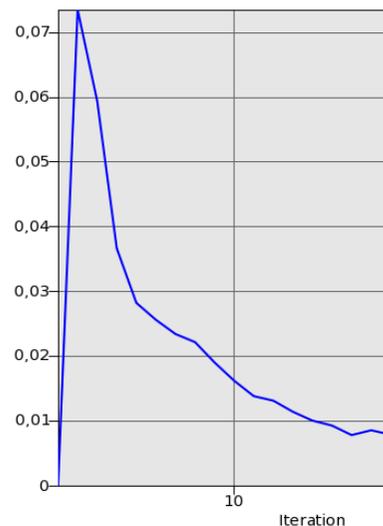


# Beispiel LS-TaSC: Knieaufprall

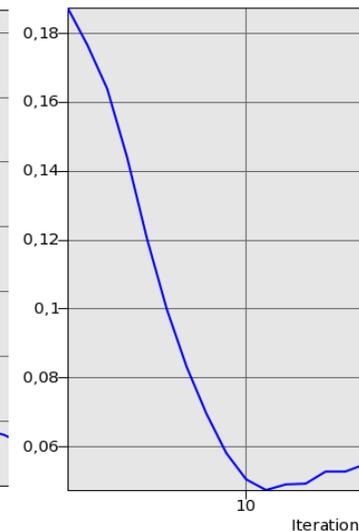
- **Beanspruchung:** Knieaufprall Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 1250 \frac{mm}{s}$
- **Nebenbedingung:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.19$   
Verschiebung:  $|d_F| < 2.0 mm$
- **Diskretisierung:** 75000 solids (2 mm),  
unterintegriert 1 GP mit Hourglassstabilisierung (ELFORM=1 IHQ=6)
- **Material:** Aluminium



Konvergenz:



MassenNB:  
relative Masse

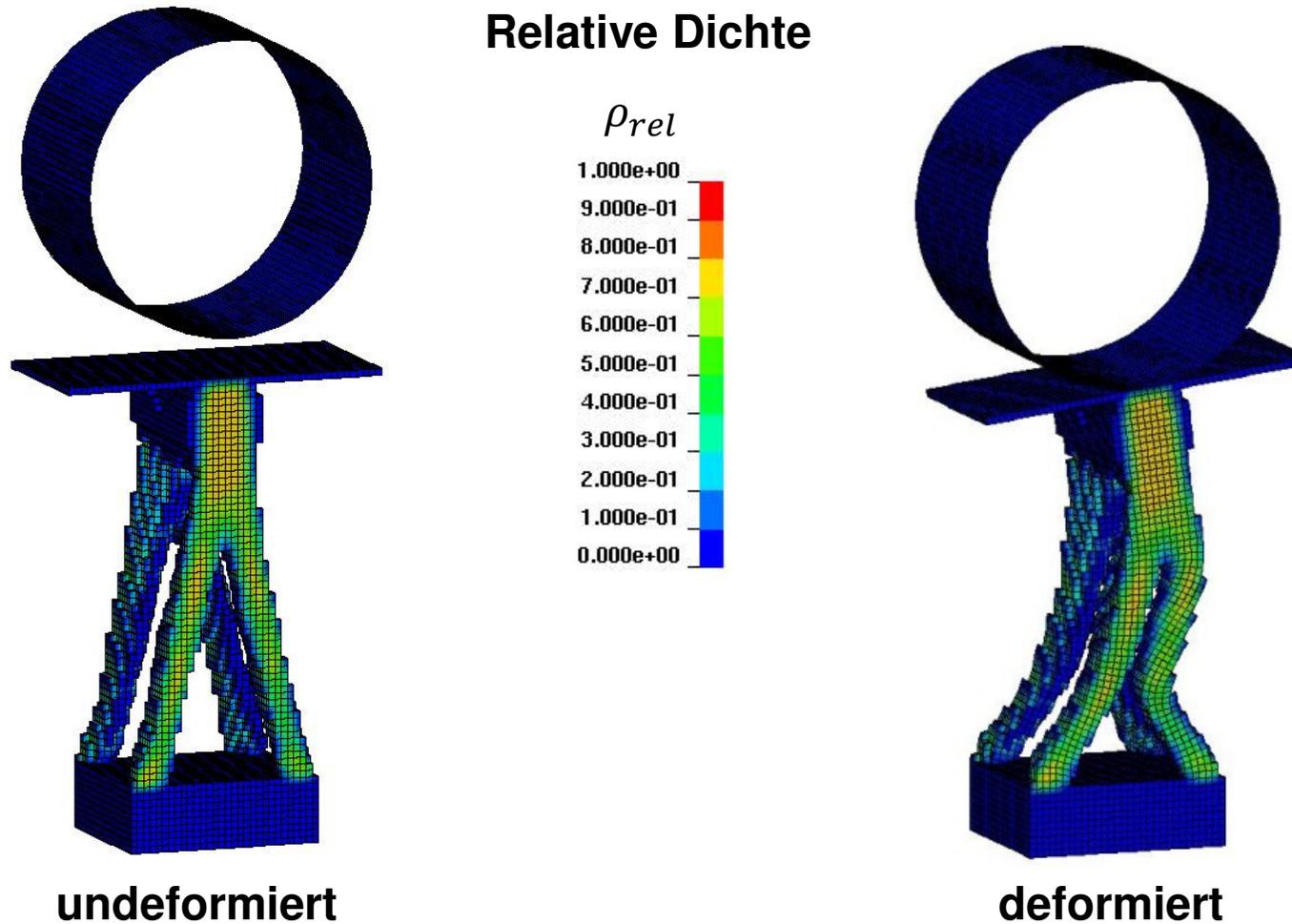


VerschiebungsNB:  
Eindringung [mm]



# Beispiel LS-TaSC: Knieaufprall

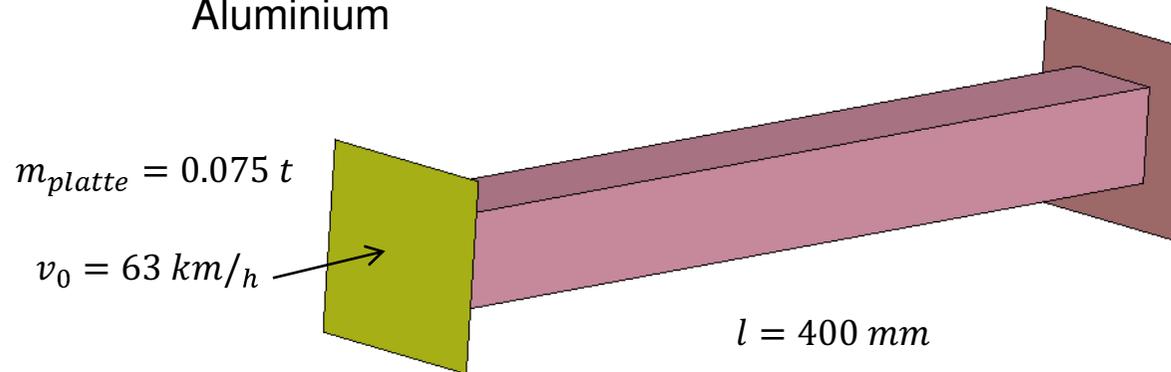
- Ziel: Homogenisierung der inneren Energiedichte
- Nebenbedingungen: Masse:  $M_{rel,soll} = 0.19$   
Verschiebung:  $|d_{ein}| < 2 \text{ mm}$



# Crashboxmodell Frontalaufprall

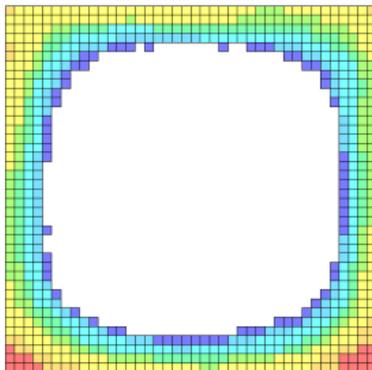
- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Frontalaufprall, Geschwindigkeit  $v_0 = 63 \frac{km}{h}$
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.2$   
Extrusion

- **Material:** Aluminium

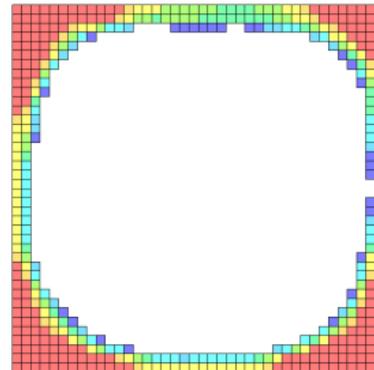


## Topologie, relative Dichte:

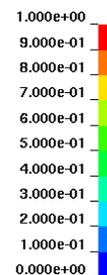
Iteration 10:



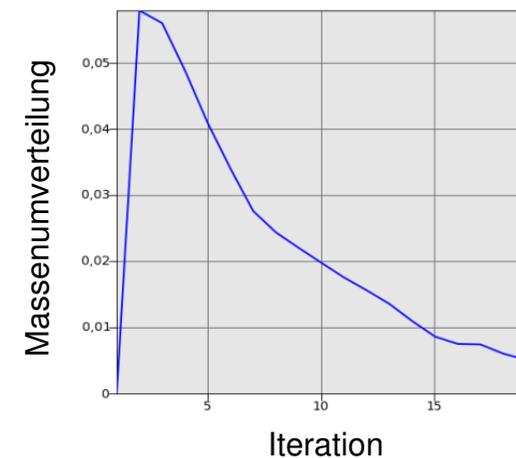
Iteration 20:



$\rho_{rel}$



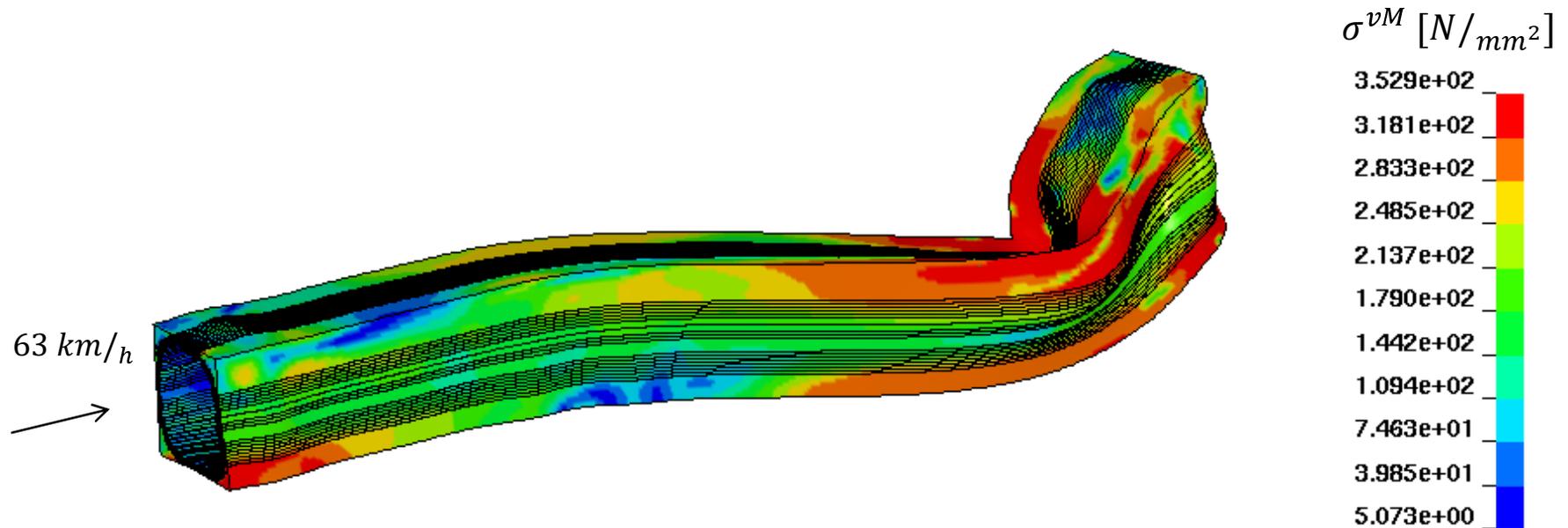
## Konvergenz:



# Crashboxmodell Frontalaufprall

- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Frontalaufprall, Geschwindigkeit  $v_0 = 63 \frac{km}{h}$
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.2$   
Extrusion

**Deformation, v.Mises Spannung**  $t=0.042s$ ,  
Topologie Iteration 20:

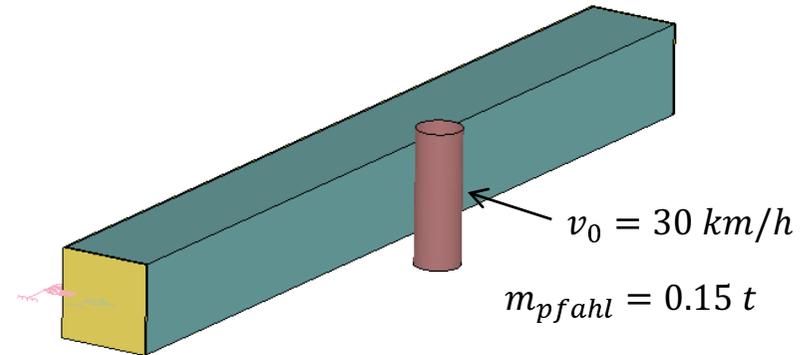
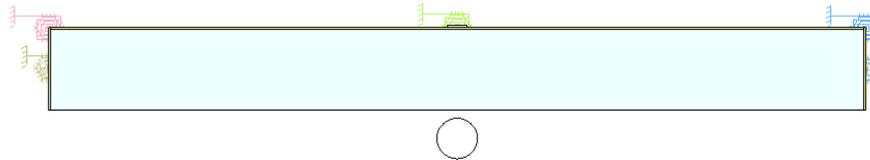


# Crashboxmodell Seitenaufprall

- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Seitenaufprall, Geschwindigkeit  $v_0 = 30 \frac{km}{h}$
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.3$   
Extrusion

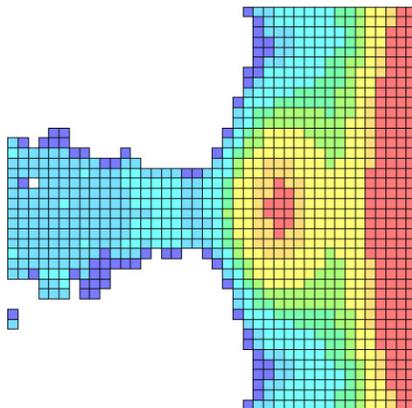
■ **Material:** Aluminium

$$l = 400 \text{ mm}$$

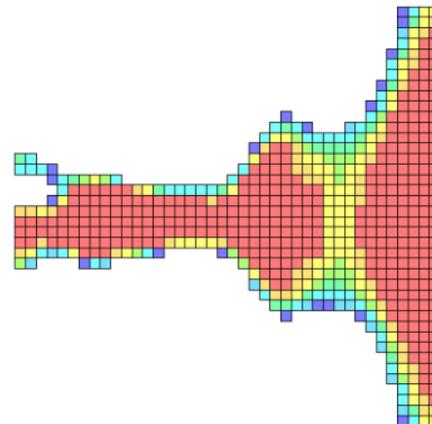


## Topologie, relative Dichte:

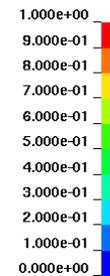
Iteration 10:



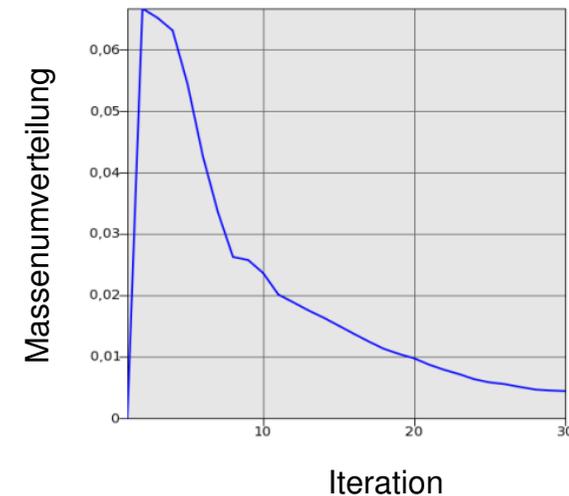
Iteration 25:



$\rho_{rel}$



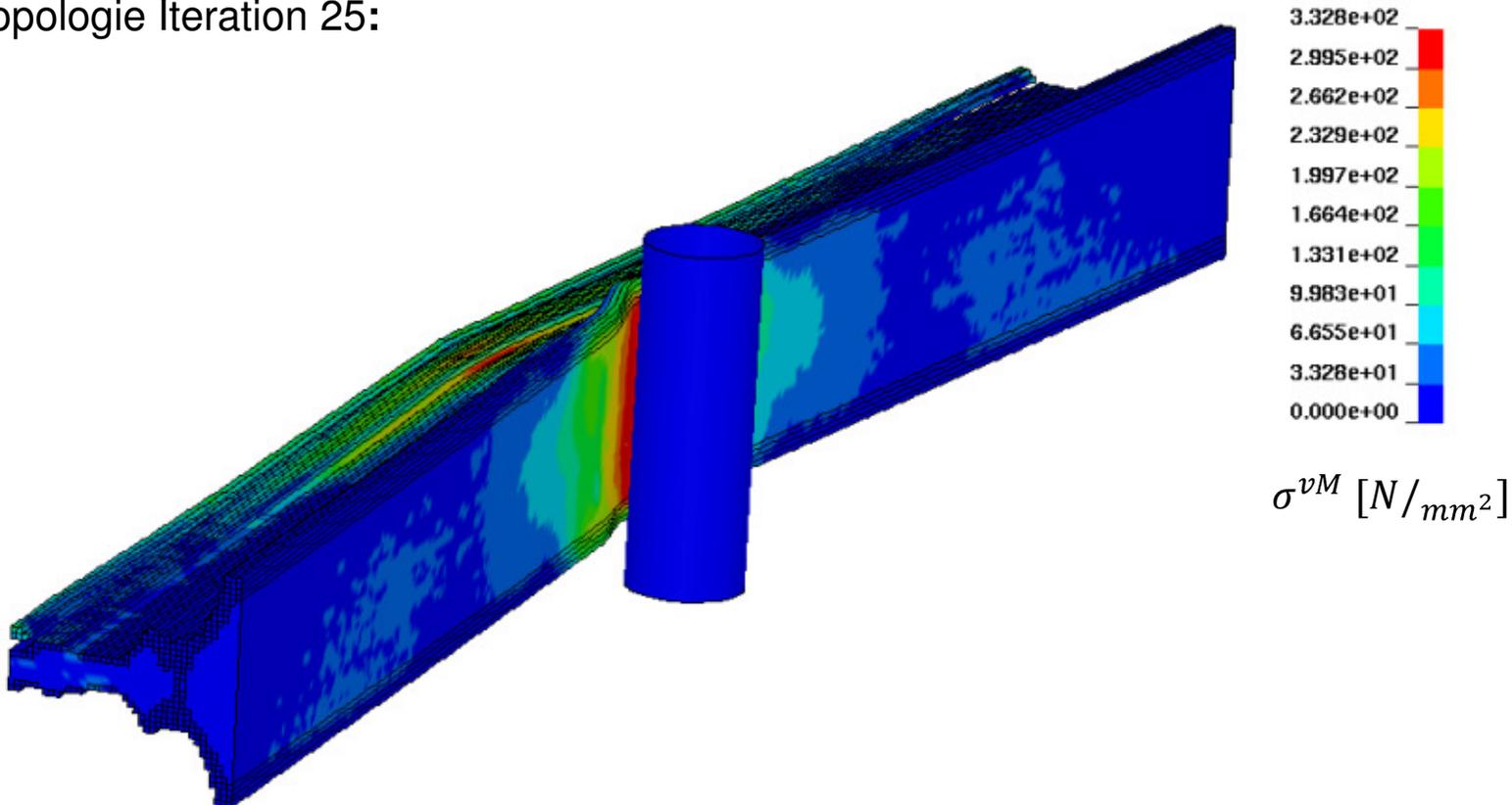
## Konvergenz:



# Crashboxmodell Seitenaufprall

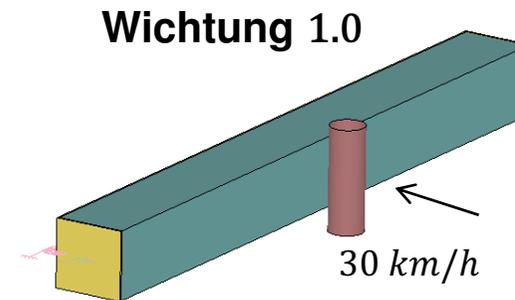
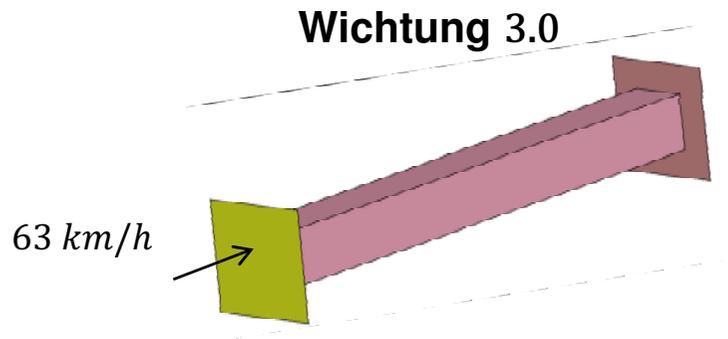
- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Seitenaufprall, Geschwindigkeit  $v_0 = 30 \frac{km}{h}$
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.3$   
Extrusion

**Deformation, v. Mises Spannung**  $t=0.0025s$ ,  
Topologie Iteration 25:



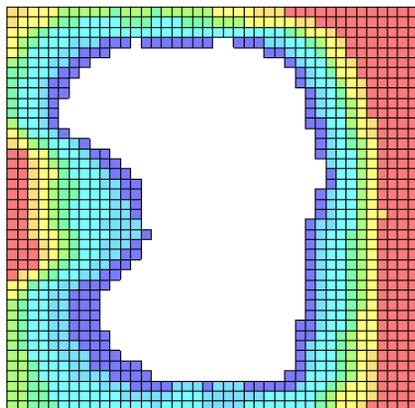
# Crashboxmodell Frontal und Seite

- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Frontal- und Seitenaufprall (Wichtung 3:1)
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.3$   
Extrusion

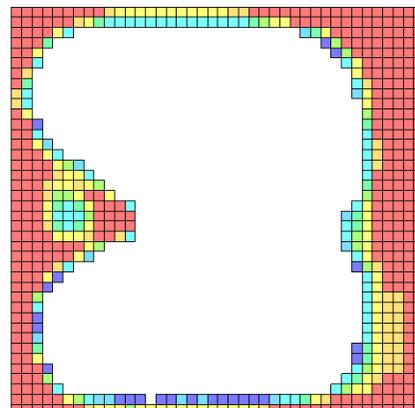


**Topologie, relative Dichte:**

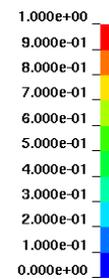
Iteration 10:



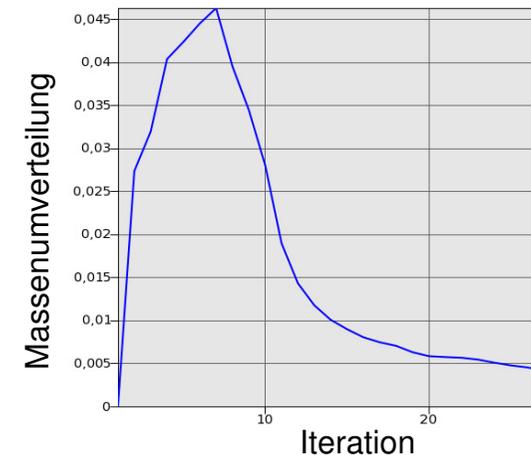
Iteration 25:



$\rho_{rel}$



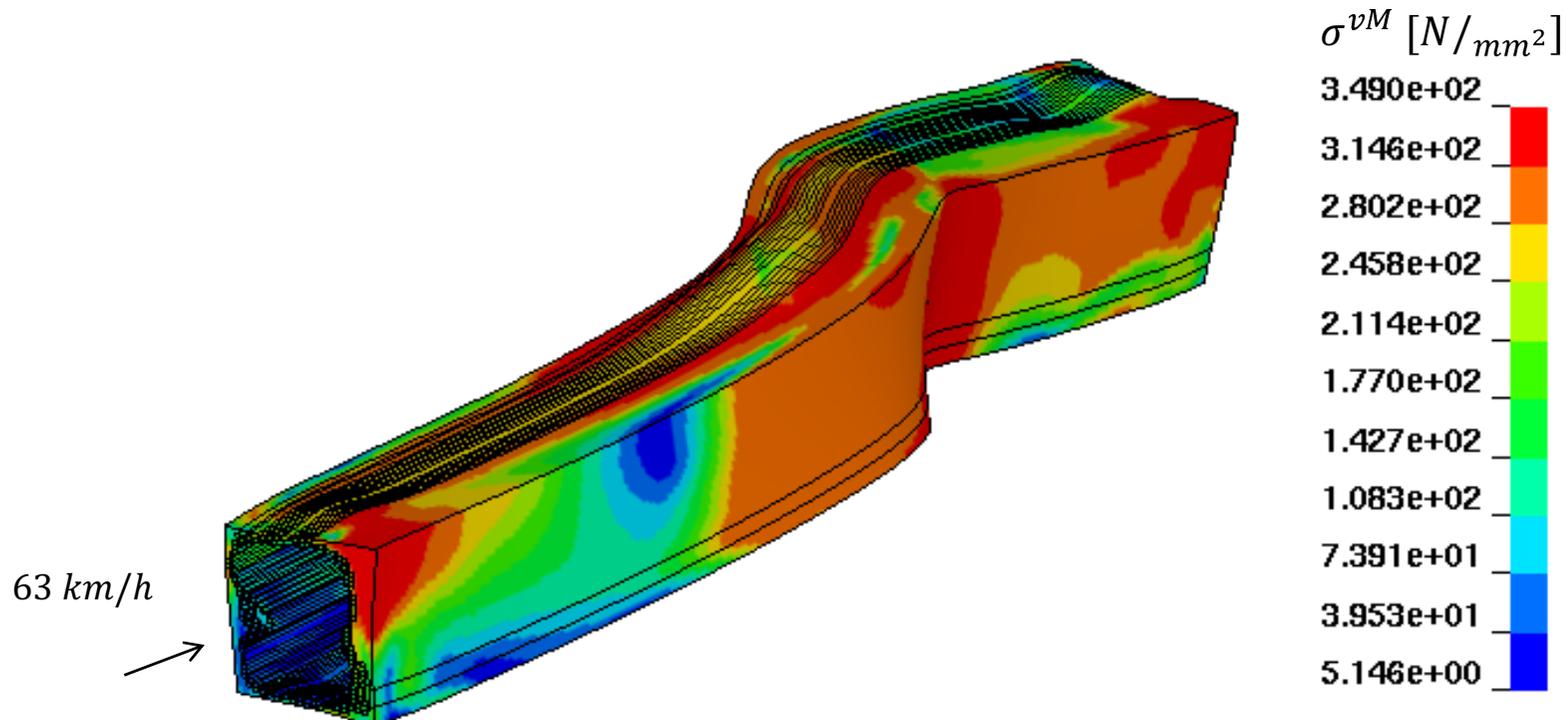
**Konvergenz:**



# Crashboxmodell Frontal und Seite

- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Frontal- und Seitenaufprall (Wichtung 3:1)
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.3$   
Extrusion

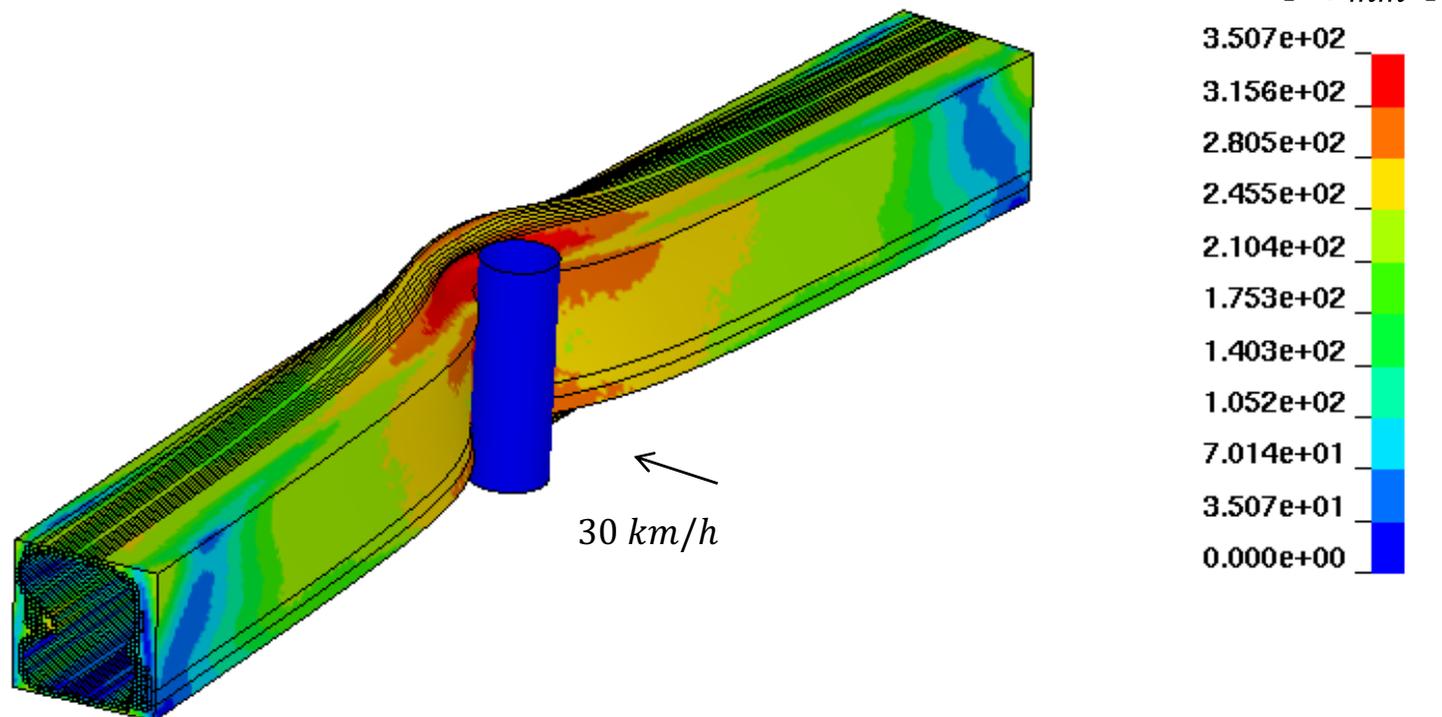
**Lastfall Frontalaufprall, v. Mises Spannung**  $t=0.00325$  s,  
Topologie Iteration 25:



# Crashboxmodell Frontal und Seite

- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Frontal- und Seitenaufprall (Wichtung 3:1)
- **Nebenbedingungen:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.3$   
Extrusion

**Lastfall Seitenaufprall, v. Mises Spannung  $t=0.002$  s,**  
Topologie Iteration 25:



- ➔ Sinnvolle Optimierungsergebnisse für anwendungsnahe Testbeispiele (Dynamik, Kontakt, Materielle Nichtlinearität, große Verformungen, Extrusion)
- ➔ Heuristisches Optimierungsverfahren mit obligatorischer Zielfunktion: Homogenisierung der *IED*
- ➔ Nebenbedingungen:  
werden indirekt über Anpassung der Massennebenbedingung eingebracht
- ➔ Zielfunktion: Homogenisierung der *IED*  
Materialanlagerung in Bereichen großer Beanspruchung:
  - in Bereichen konzentrierter Lasteinleitung, bzw. Lagerung
  - in Bereichen großer Biegespannungen
  - Zug-/Druck beanspruchte Bereiche (z.B. Stege) werden u.U. gelöscht
  - kann zu zerrissenen Topologien führen
  - Nebenbedingungen können dieses Problem vermeiden

# Bemerkungen zu LS-TaSC

---

- ➔ robuste Implementation, anwenderfreundliche GUI
  
- ➔ Features aktuelle Version LS-TaSC 2.1:
  - Einbringen von Nebenbedingungen (Verschiebungen, Beschleunigungen, Kräfte)
  - Nichtlineares Materialverhalten, große Deformationen
  - Multilastfalloptimierung, Wichtung der Lastfälle
  - Fabrikations-Zwänge, z.B. Extrusion, auch entlang gekrümmter Linien und Aussparungen
  - Erweitert auch auf Schalendickenoptimierung

**Genesis:  
Equivalent Static Loads -  
Methode**

# Genesis: Equivalent Static Load



## ■ Ursprung:

Hanyang University, Korea:

Shin MK, Park KJ, Park GJ (2007): "Optimization of structures with nonlinear behavior using equivalent load", *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.*

Kim YI, Park GJ (2010): "Nonlinear dynamic response structural optimization using equivalent static loads", *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.*

## ■ Idee:

Zerlegung der nichtlinearen dynamischen Optimierungsaufgabe in:



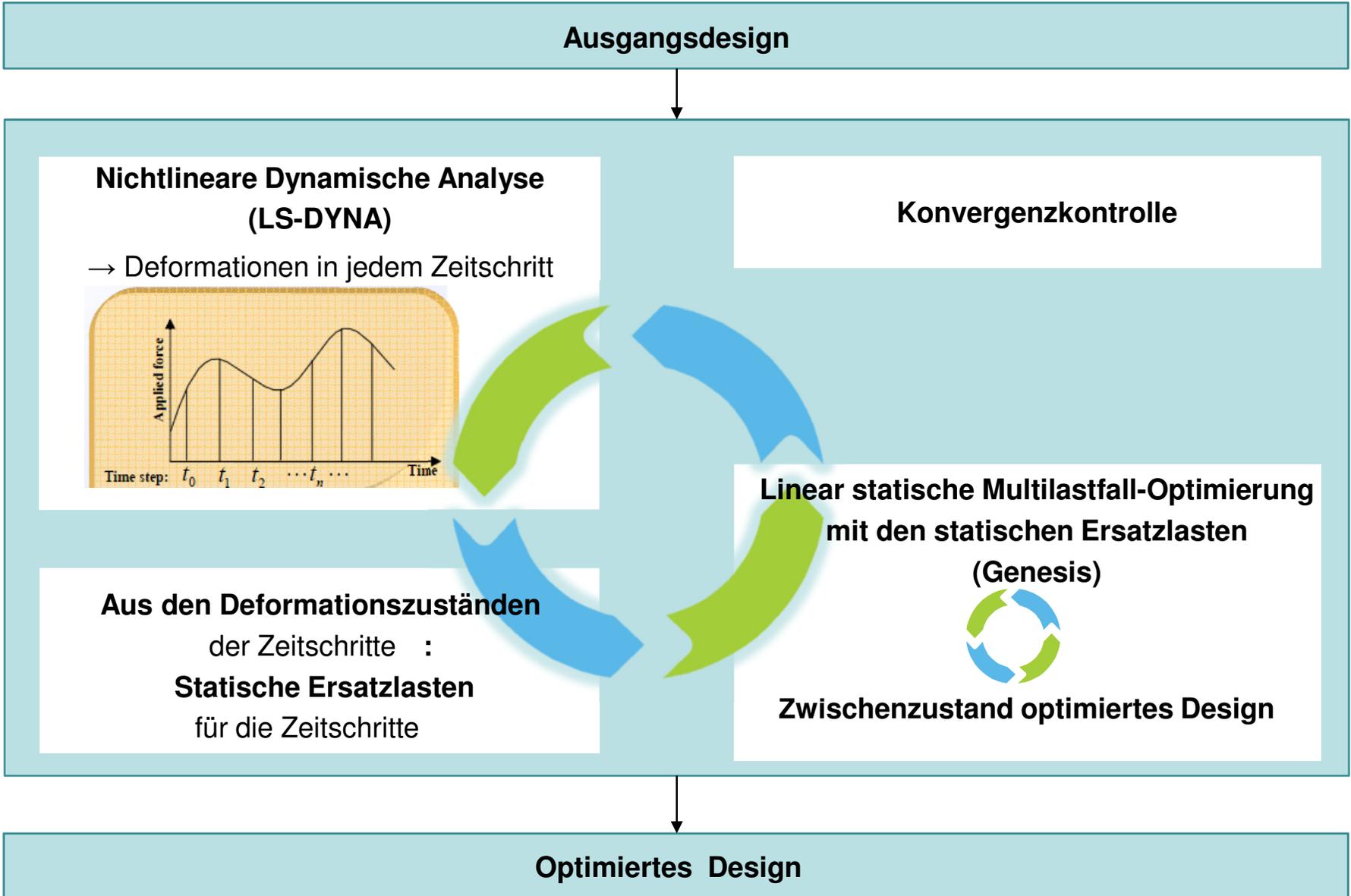
Iterativer Prozess (Konvergenz der Zielfunktion und Erfüllung der Nebenbedingungen)

## ■ Umsetzung von VR&D:

nichtlinearer FE-Solver: **LS-DYNA**

linearer Topologieoptimierer: **Genesis**

# ESL: Algorithmische Umsetzung



# ESL: Verdeutlichendes Beispiel

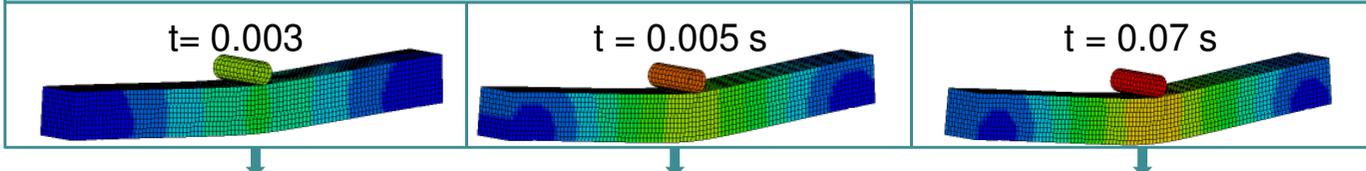
**Ausgangstopologie**

$v_0 = 10000 \text{ mm/s}$

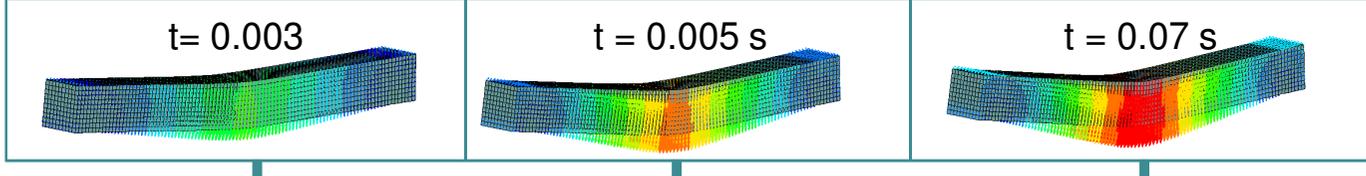
$l = 800\text{mm}$

Ziel: min. innere Energie  
NB: Masse:  $M_{rel,soll} = 0.2$ , Extrusion

**Nichtlineare Dynamische Analyse (LS-DYNA)**  
→ **Deformationen** in diskreten Zeitschritten  $t_i$ :



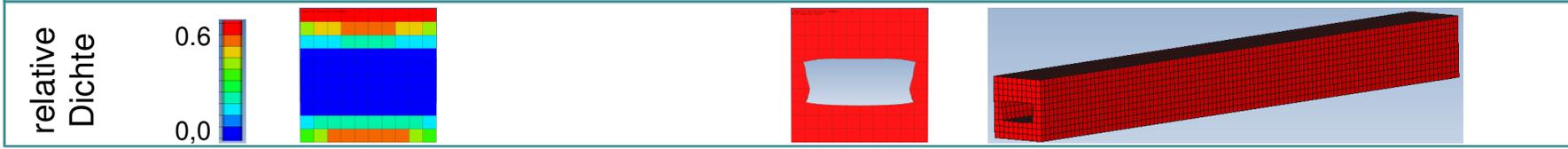
→ **Statische Ersatzlasten** für Zeitschritte  $t_i$



**Linear statische Multilastfall - Optimierung mit Ersatzlasten (Genesis)**



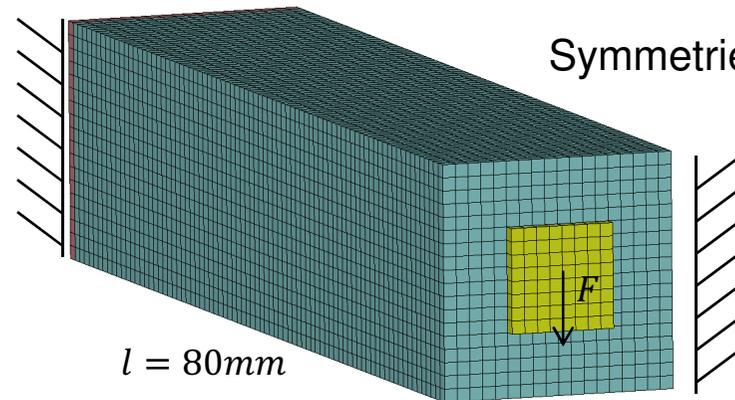
**Optimierte Topologie – Dichteverteilung - Isofläche**



# Beispiel Genesis ESL: Kragarm

- **Beanspruchung:** quasi-statische Einzellast an starrer Platte  $F = 400\text{ N}$
- **Nebenbedingung:** Masse:  $M_{rel,soll} = 0.2$   
Verschiebung:  $|d_F| < 0.1\text{ mm}$
- **Diskretisierung:** 26000 solids (1mm),  
unterintegriert 1 GP mit Hourglassstabilisierung (ELFORM=1 IHQ=6)
- **Material:** Aluminium

Einspannung



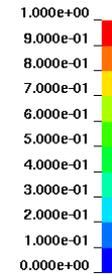
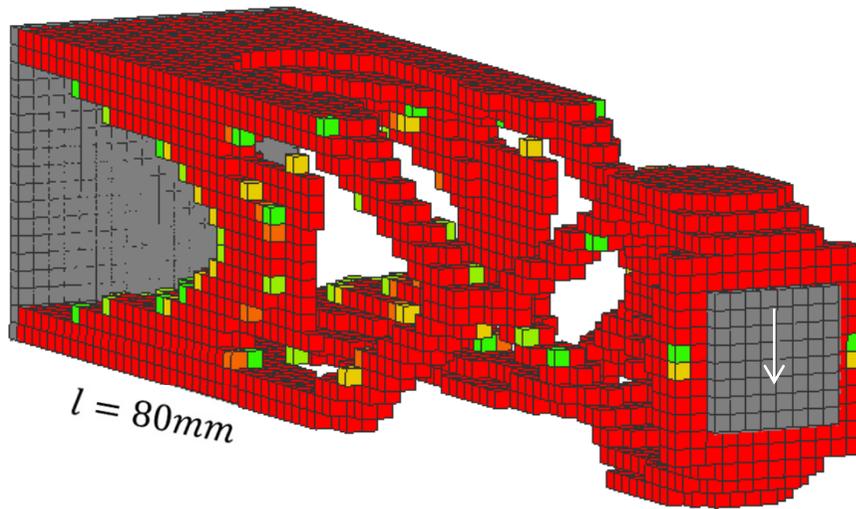
Symmetrierandbedingung

$l = 80\text{mm}$

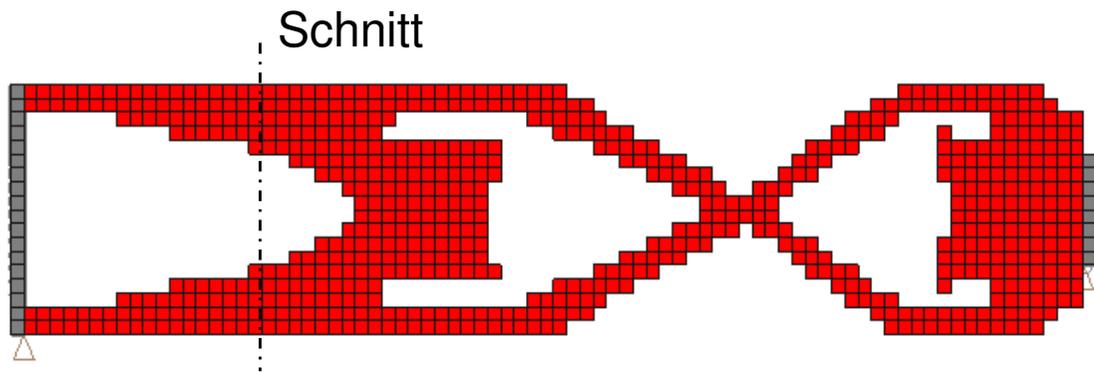
- **Quasistatische Belastung**

# Beispiel Genesis ESL: Kragarm

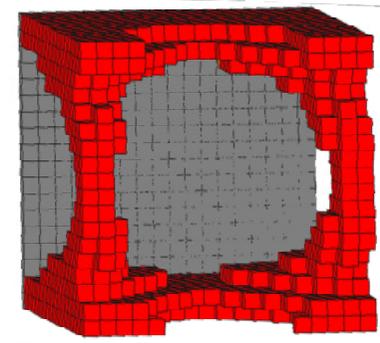
- Ziel: Maximale Steifigkeit
- Nebenbedingungen: Masse:  
Verschiebung:



**Seitenansicht:**



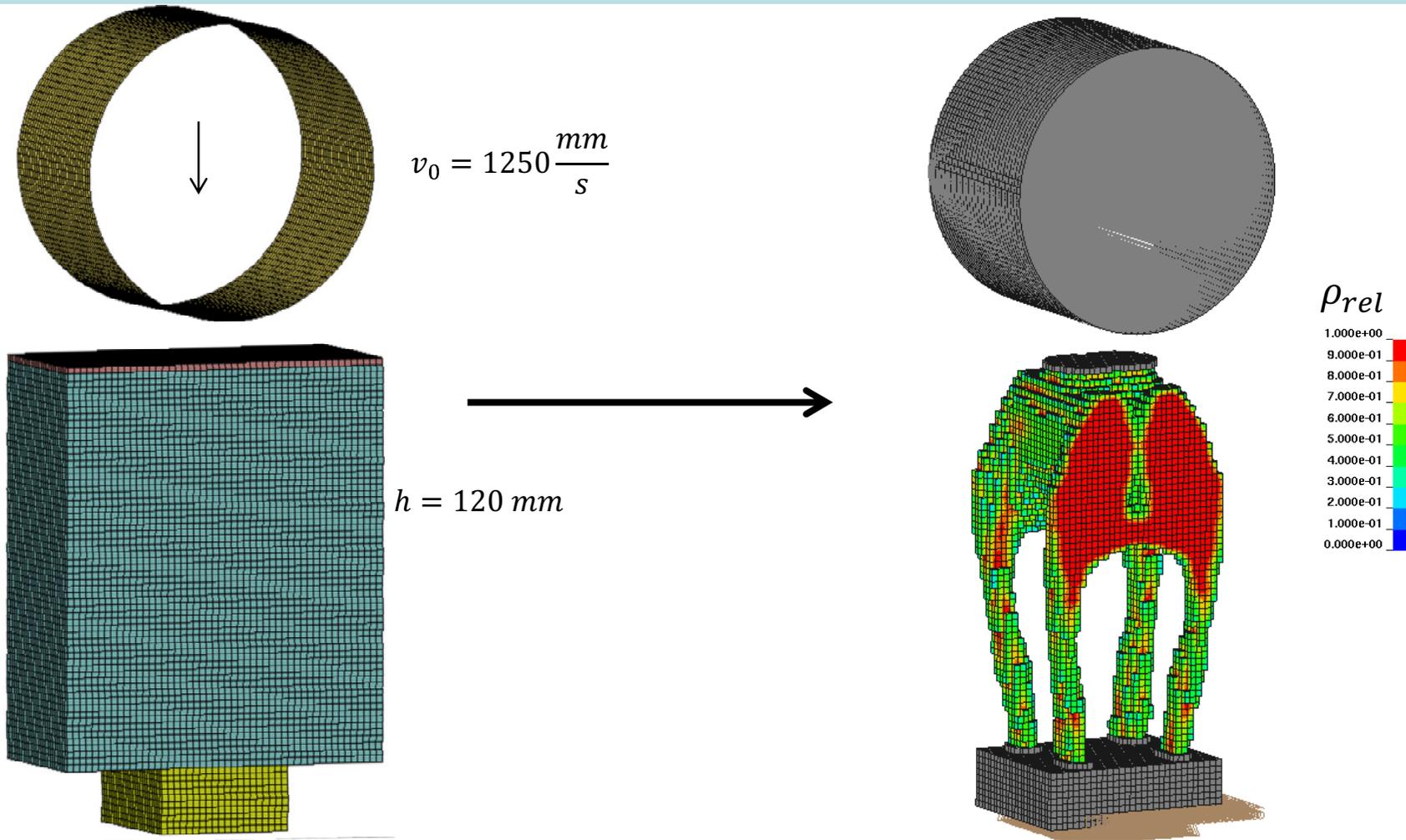
**Schnitt:**



# Beispiel Genesis ESL: Kniefänger

- Ziel: Maximale Steifigkeit
- Nebenbedingungen: Masse:

$$M_{f,soll} = 0.15$$



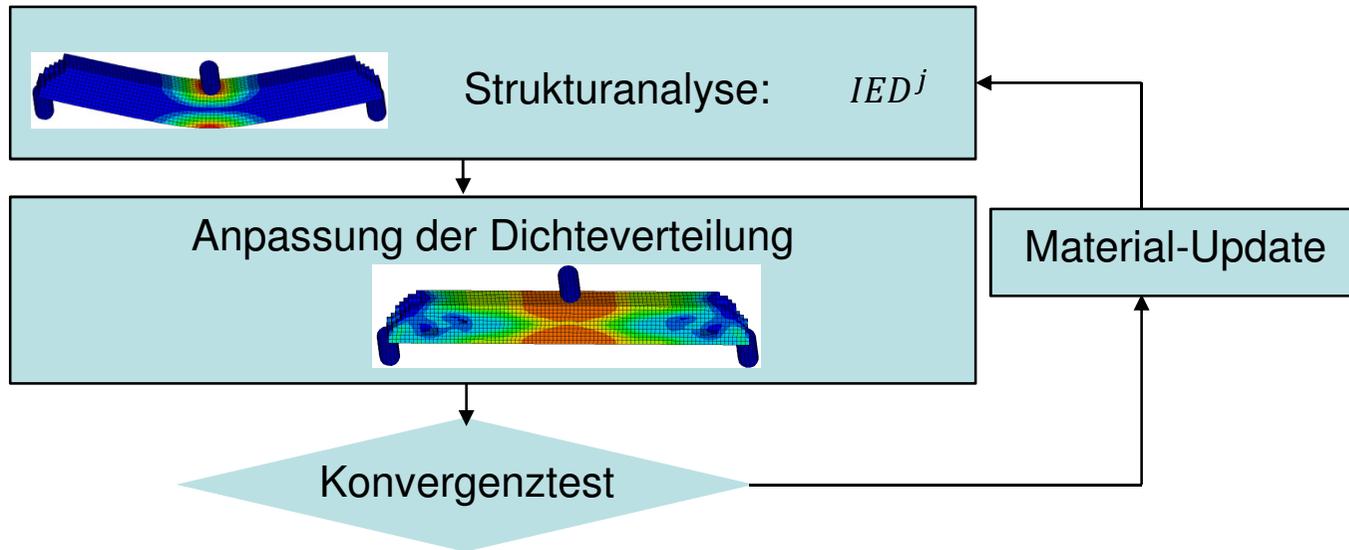
# Bemerkungen zu Genesis - ESL

---

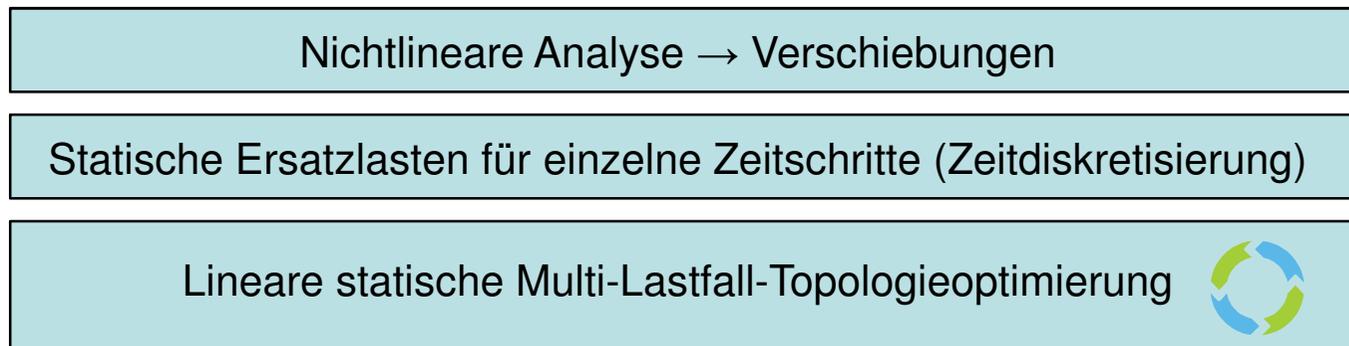
- ➔ Genesis: Etabliertes Optimierungsprogramm für lineare Optimierung,
  - Genesis und ESL nicht auf Topologieoptimierung beschränkt, sondern auch Shape-, Sizing-, Topometrieoptimierung,... möglich
  - Vielfältige Wahl Zielfunktionen und Nebenbedingungen
  - Multilastfälle
  - Fabrikationszwänge
  - Gradientenbasierte Optimierungsverfahren
  
- ➔ ESL: Erweiterung von Genesis für große Deformationen und nichtlineares Materialverhalten
  
- ➔ automatisierte Prozesskette zwischen LS-DYNA und Genesis
  
- ➔ lineare Optimierung beinhaltet implizite Analyse:
  - lineares implizites Eingabefile wird von Genesis erzeugt

# Zusammenfassung

## LS-TaSC:



## Genesis - ESL:



## Vergleich:

- ➔ HCA und ESL: Plausible Optimierungsergebnisse für anwendungsnahe Testbeispiele: Kontakt, Dynamik, materiell und geometrisch nichtlinear
- ➔ Thema Rechenzeit:  
Iterationen am Beispiel Kniefänger:  
LS-TaSC: 18 Iterationen (18 LS-DYNA-Analysen)  
ESL-Genesis: 5 Iterationen (5 LS-DYNA-Analysen), dazwischen jeweils 5 lineare Optimierungsiterationen (5 implizite Analysen + Sensitivitäten)
- ➔ LS-TaSC: viele Iterationen; robuste Konvergenz
- ➔ ESL-Genesis: wenige Iterationen; Konvergenz des linearisierten Verfahrens?

## Ausblick:

- ➔ Weiterer Vergleich HCA – ESL, Eignung der Methoden, Problemklassen für die Anwendung der jeweiligen Methode feststellen, Empfehlungen zu den Methoden
- ➔ Topologieoptimierung von Bauteilen realer Crash-Modelle