



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

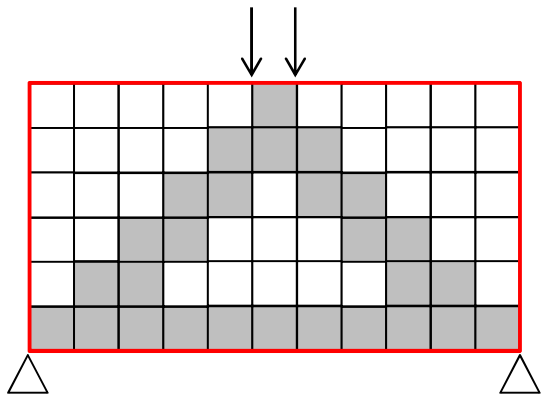
Dr. Andrea Erhart
Peter Schumacher
DYNAmore GmbH

Stuttgart, 21. Mai 2012

Nichtlineare Topologieoptimierung

Topologieoptimierung

Im Entwurfsraum:
Völlige Freiheit der Form



Designvariablen:

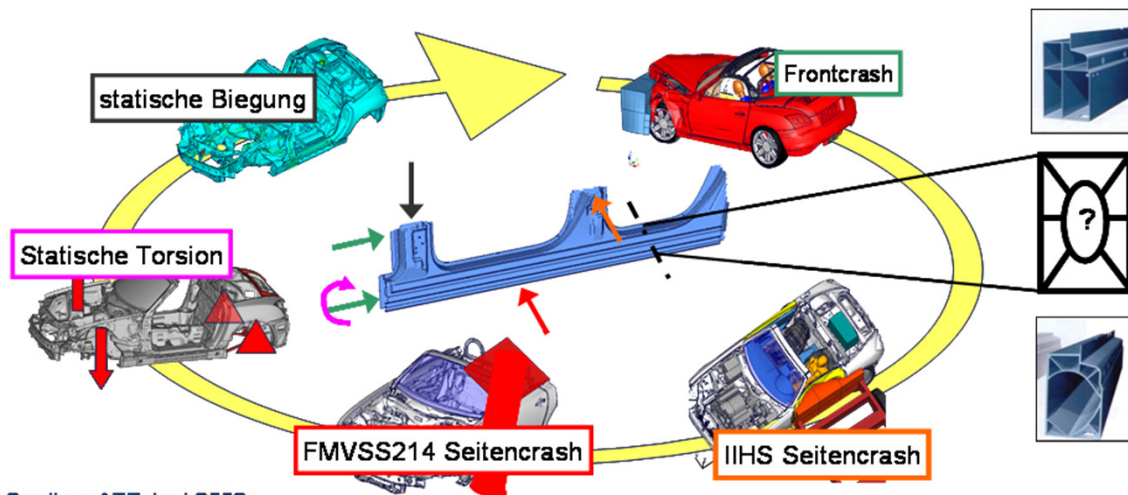
relative Dichte in jedem Element

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).**

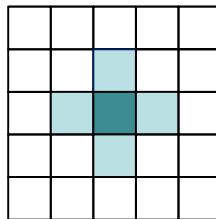
Gleichmäßige Materialbeanspruchung bei vorgegebener Masse

- **Systemanalyse** zur Bestimmung der inneren Energiedichte

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

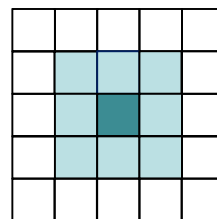
- Auswertung von **Nachbarschaftsinformationen** – Mittelung der inneren Energiedichte \widetilde{IED}

Typische Nachbarschaften (Cellular Automata):



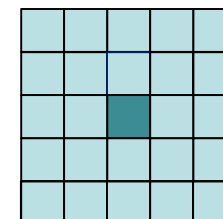
4 Nachbarn (2D)

6 Nachbarn (3D)



8 Nachbarn (2D)

26 Nachbarn (3D)



24 Nachbarn (2D)

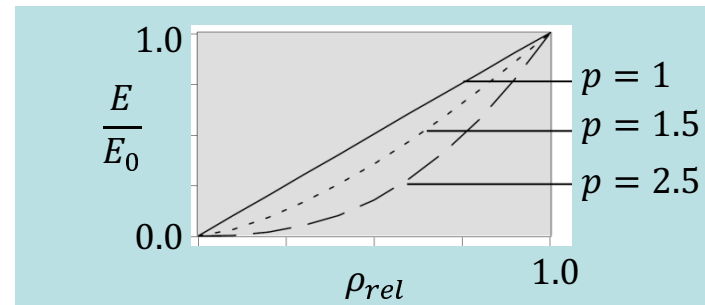
124 Nachbarn (3D)

- 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 indermediate density)



Standard:

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

Erweiterung für nichtlineares Materialverhalten:

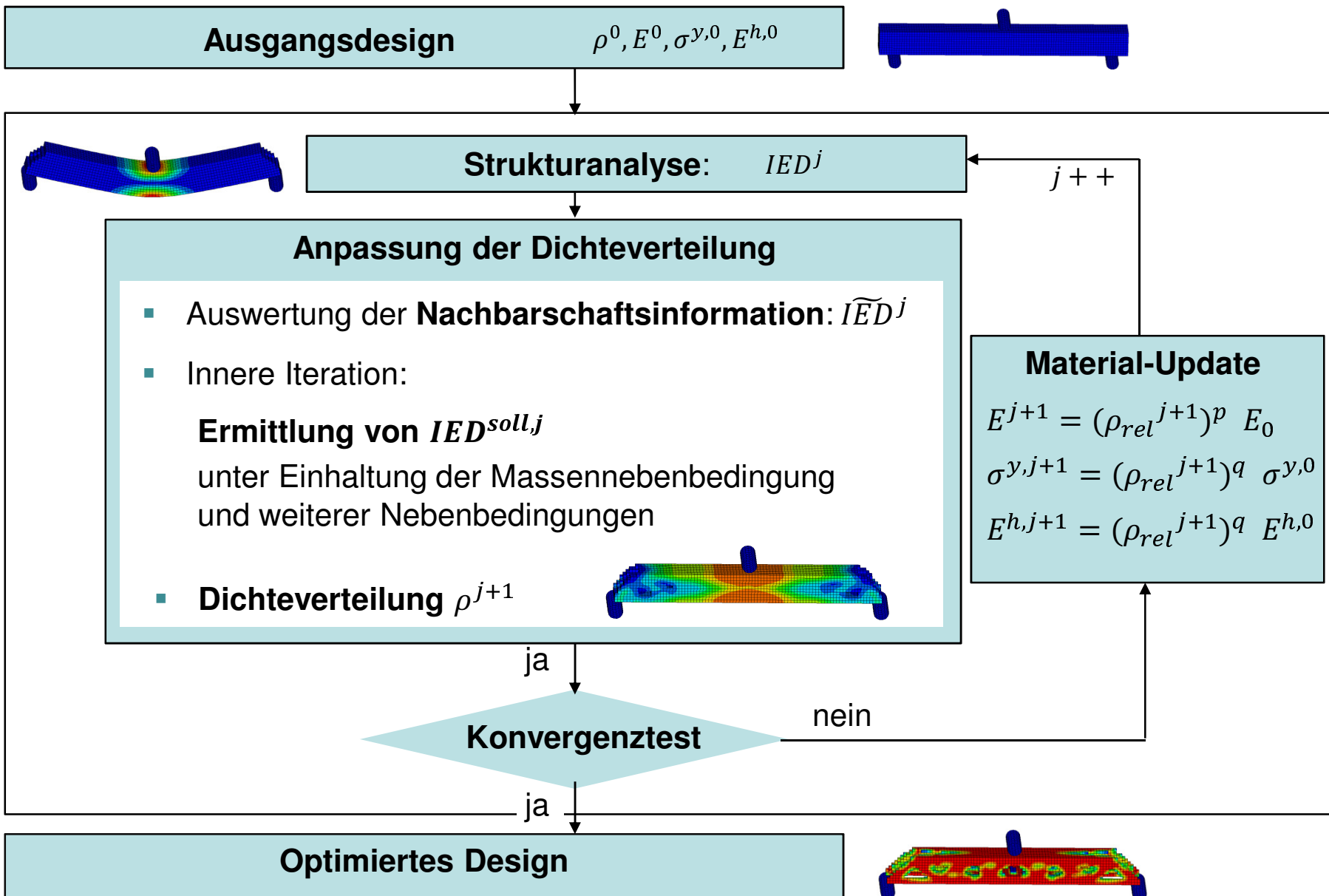
Fließspannung $\sigma^y(x, \rho_{rel}) = (\rho_{rel}(x))^q \sigma^{y,0}$ mit Ausgangsfließspannung $\sigma^{y,0}$

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

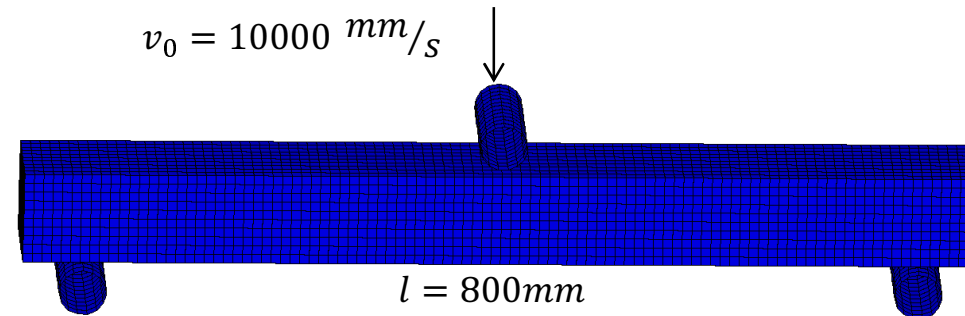
\rightarrow SIMP forciert klare 0 oder 1-Topologien

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 $IED \approx 0$

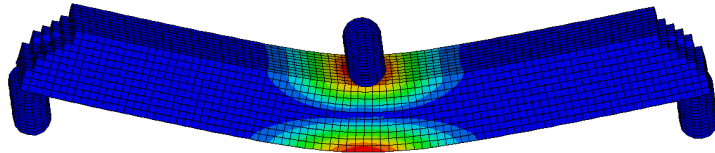
➡ Wirkungsweise von SIMP: Zunehmend deutliche 0 oder 1 Dichteverteilung

Verdeutlichendes Beispiel LS-TaSC

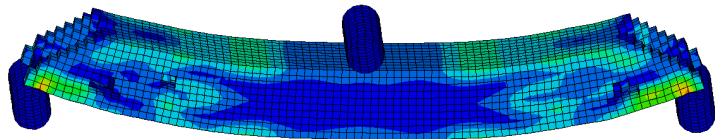
0.Iteration: $\rho_{rel} = 0.25$ im gesamten Entwurfsraum

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

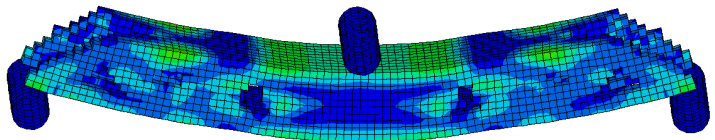
4.Iteration:



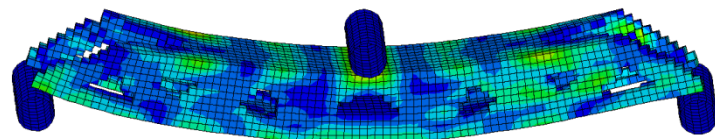
9.Iteration:



15.Iteration:

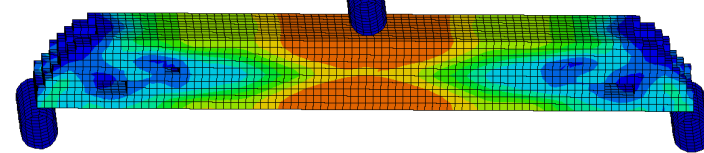


25.Iteration:

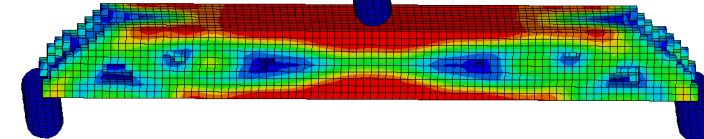


Anpassung der Dichteverteilung: $\rho_{rel} [0,1]$

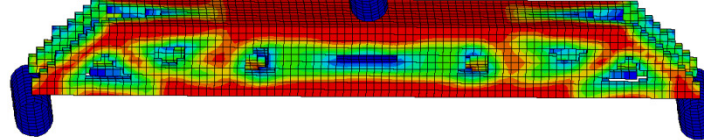
7.Iteration:



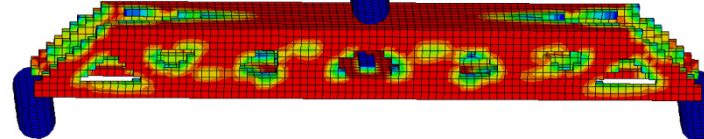
12.Iteration:



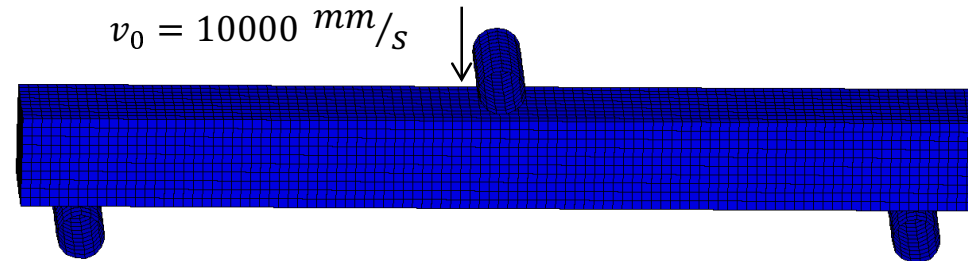
18.Iteration:



30.Iteration:

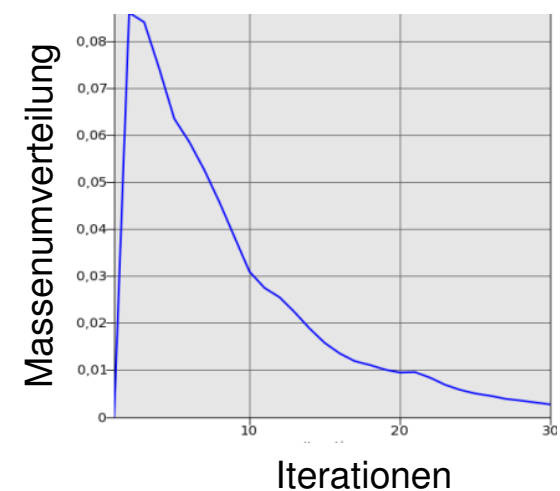
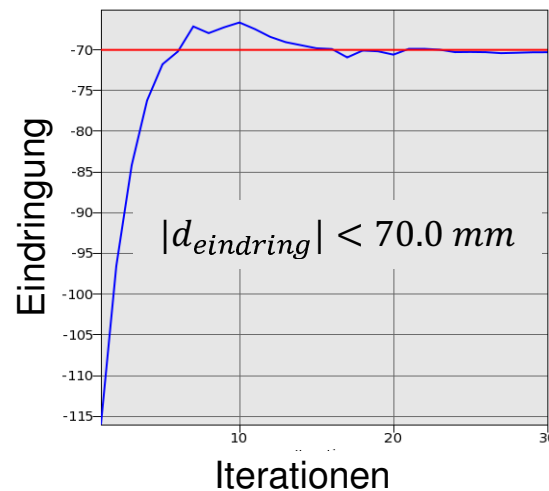
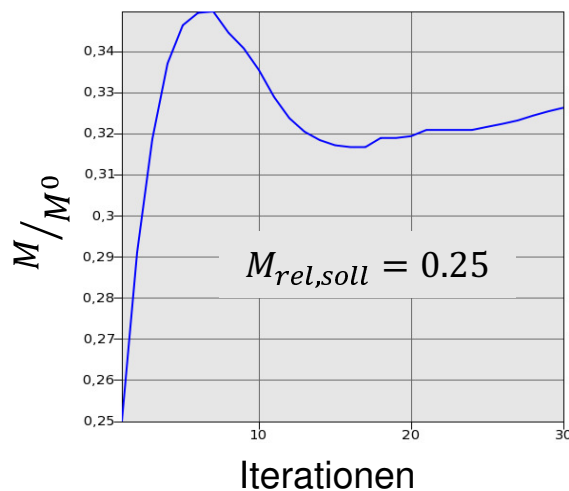


Verdeutlichendes Beispiel LS-TaSC



Nebenbedingungen: $M_{rel,soll} = 0.25$ $|d_{eindring}| < 70.0 \text{ mm}$

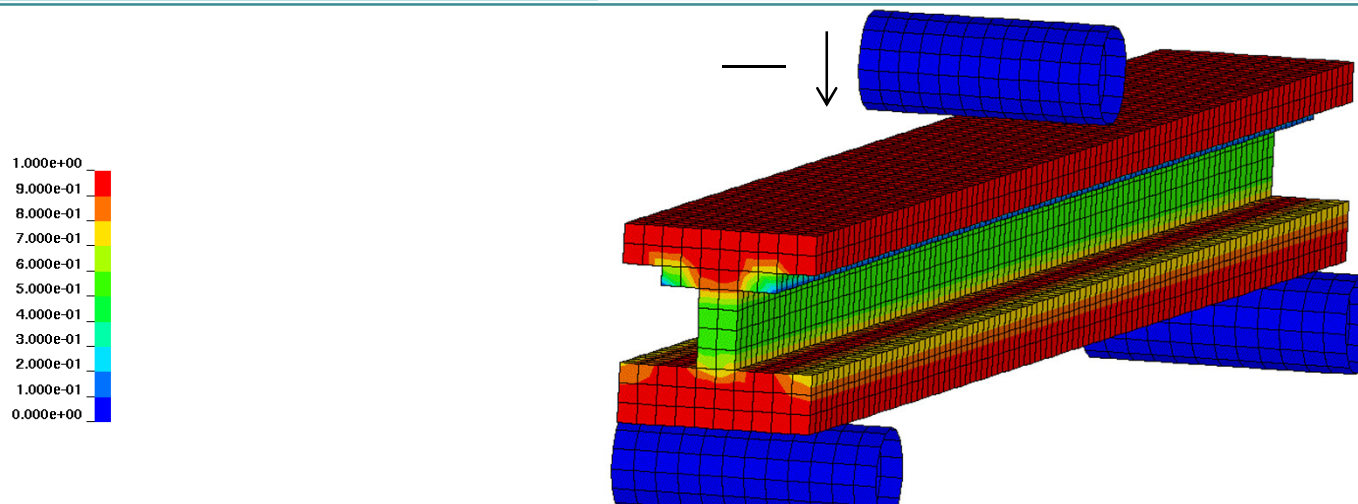
➔ Erfüllung von Massen- und Verschiebungsnebenbedingung, Konvergenz:



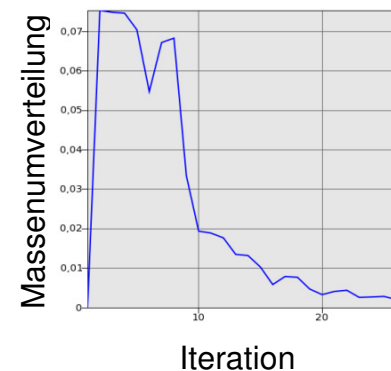
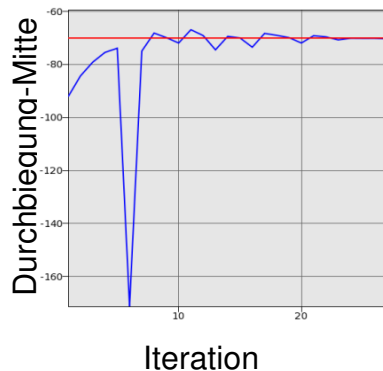
Minimale Masse, die die Verschiebungsnebenbedingung einhalten kann wird angestrebt

Fabrikationszwänge, z.B. Extrusion

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

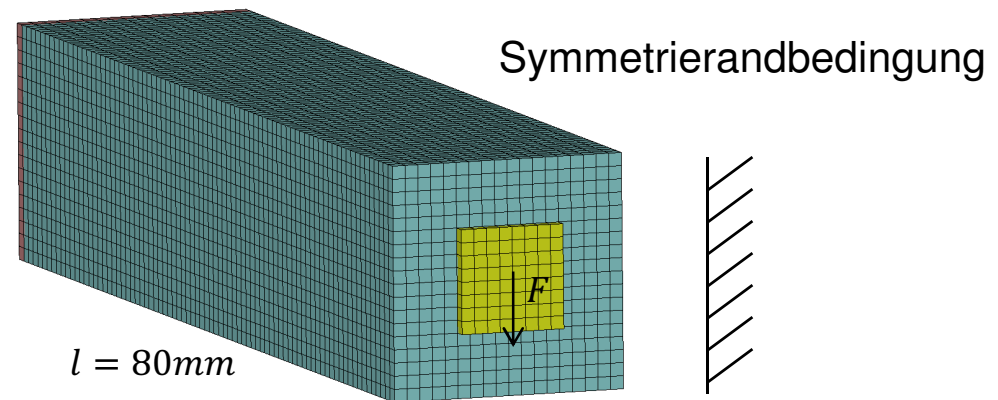


Konvergenz (Massenumverteilung) - Verschiebungsnebenbedingung



Beispiel LS-TaSC: Kragarm

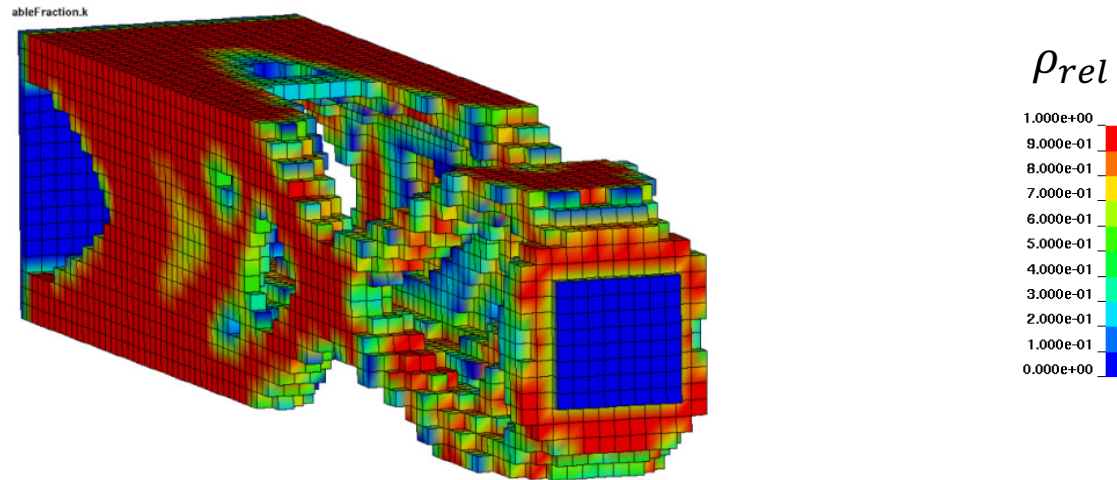
- **Beanspruchung:** quasi-statische Einzellast an starrer Platte $F = 400\text{ N}$
- **Nebenbedingung:** Masse: $M_{rel,soll} = 0.2$
Verschiebung: $|d_F| < 0.1\text{ mm}$
- **Diskretisierung:** 26000 solids (1mm),
unterintegriert 1 GP mit Hourglassstabilisierung (ELFORM=1 IHQ=6)
- **Material:** Aluminium



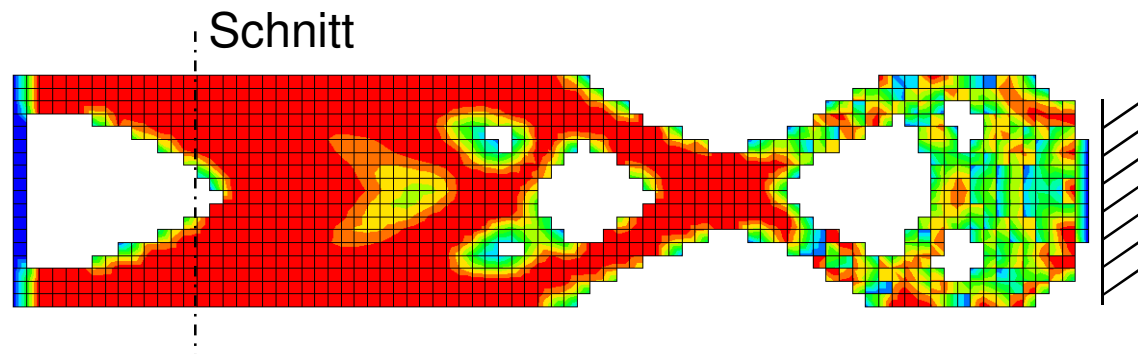
- **Quasistatische Belastung**

Beispiel LS-TaSC: Kragarm

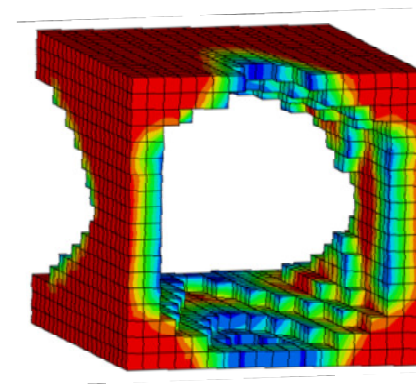
- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Nebenbedingungen:** Masse: $M_{rel,soll} = 0.2$
Verschiebung: $|d_F| < 0.1 \text{ mm}$



Seitenansicht:

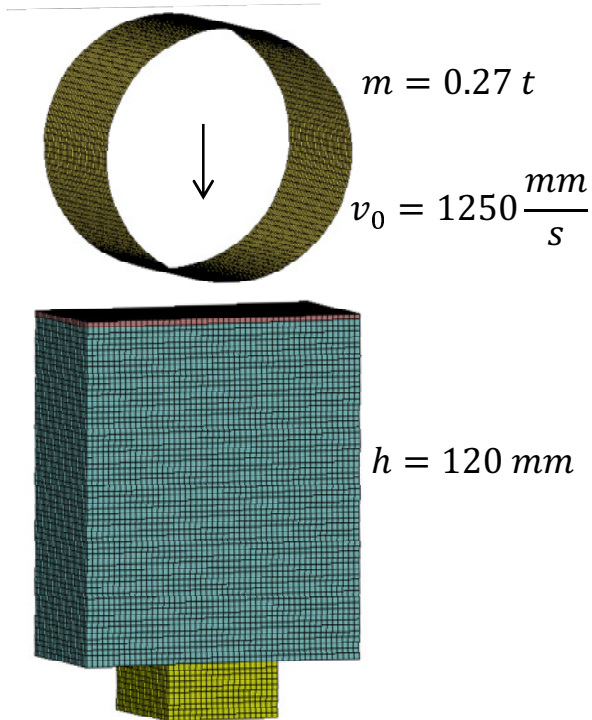


Schnitt:

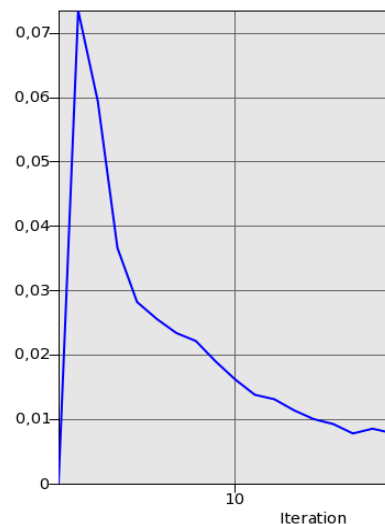


Beispiel LS-TaSC: Knieaufprall

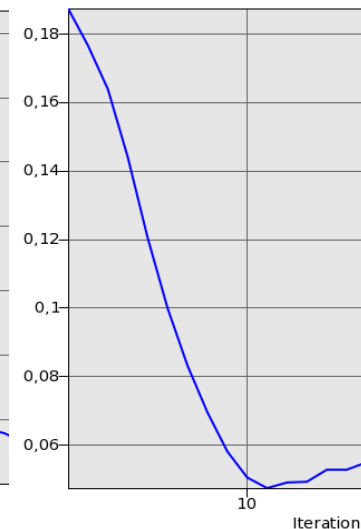
- **Beanspruchung:** Knieaufprall Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 1250 \frac{mm}{s}$
- **Nebenbedingung:** Masse: $M_{rel,soll} = 0.19$
Verschiebung: $|d_F| < 2.0 mm$
- **Diskretisierung:** 75000 solids (2 mm),
unterintegriert 1 GP mit Hourglassstabilisierung (ELFORM=1 IHQ=6)
- **Material:** Aluminium



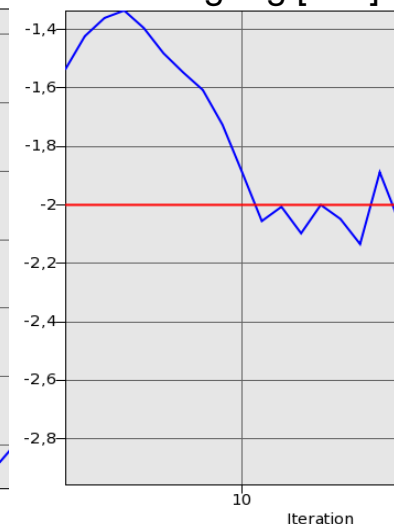
Konvergenz:



MassenNB:
relative Masse

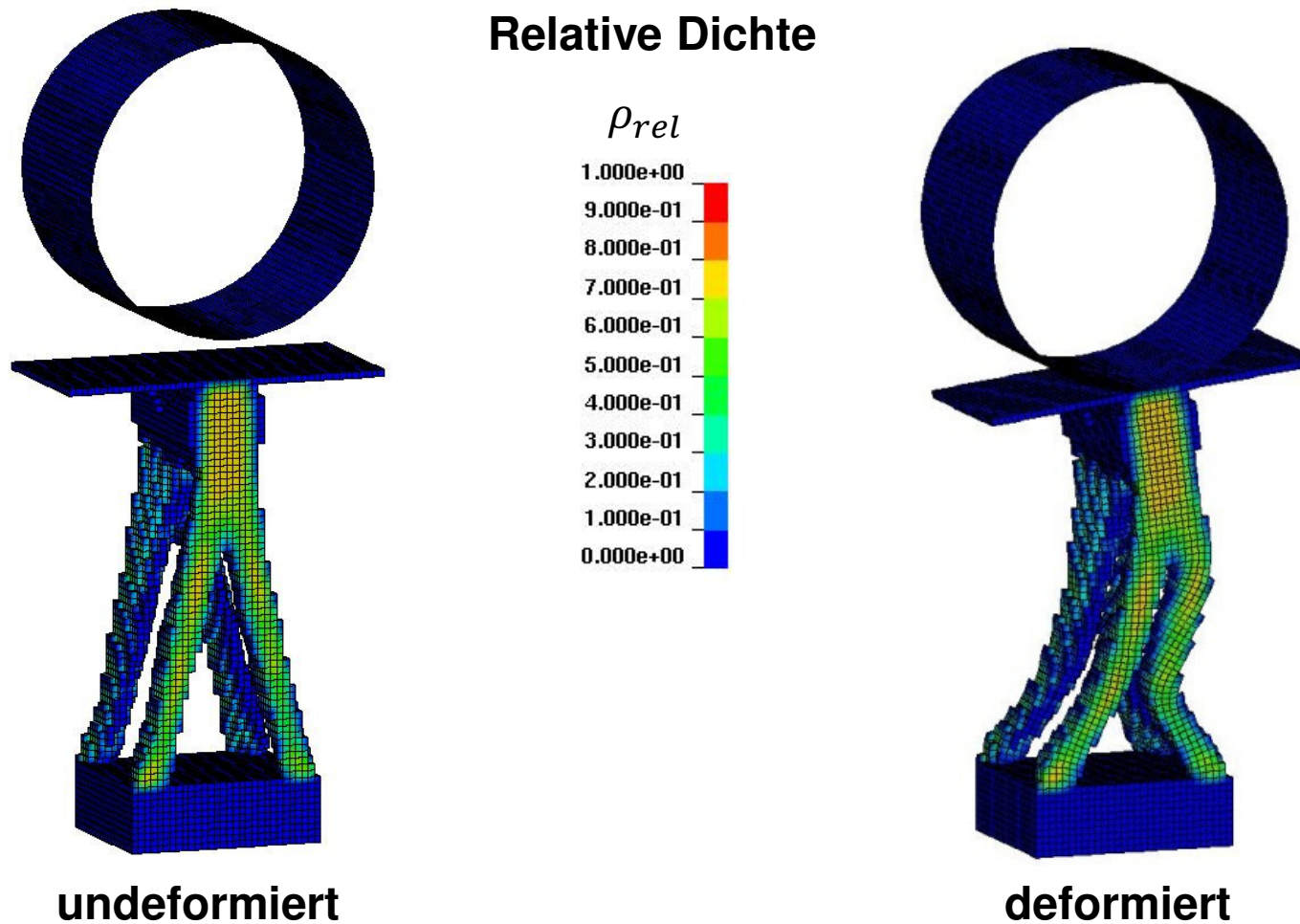


VerschiebungsNB:
Eindringung [mm]



Beispiel LS-TaSC: Knieaufprall

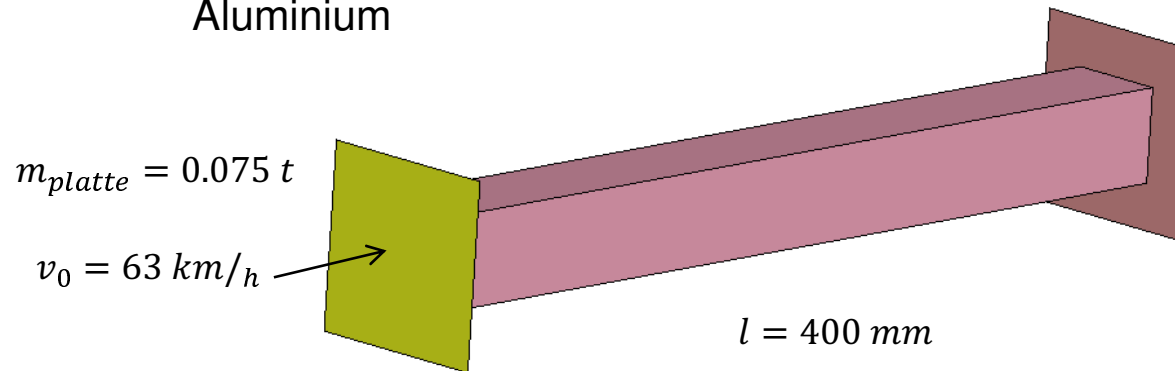
- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Nebenbedingungen:** Masse: $M_{rel,soll} = 0.19$
Verschiebung: $|d_{ein}| < 2 \text{ mm}$



Crashboxmodell Frontalaufprall

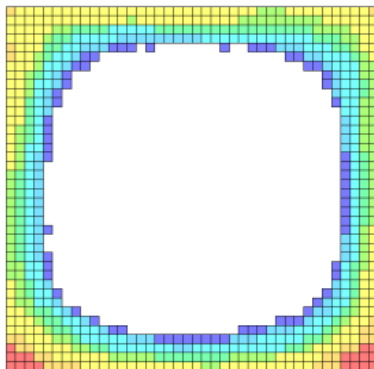
- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Frontalaufprall, Geschwindigkeit $v_0 = 63 \frac{km}{h}$
- **Nebenbedingungen:** Masse: $M_{rel,soll} = 0.2$
Extrusion

- **Material:** Aluminium

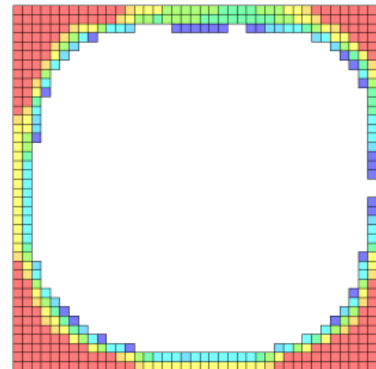


Topologie, relative Dichte:

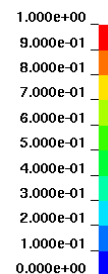
Iteration 10:



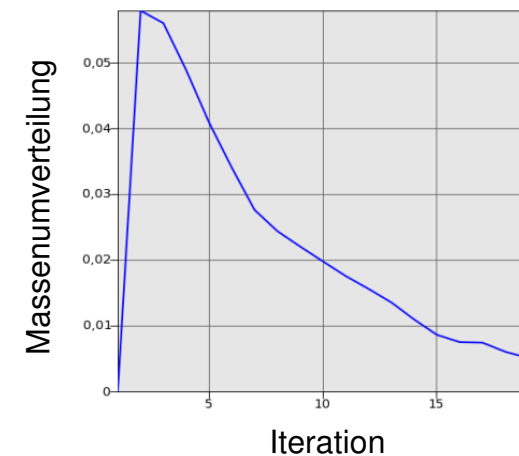
Iteration 20:



ρ_{rel}



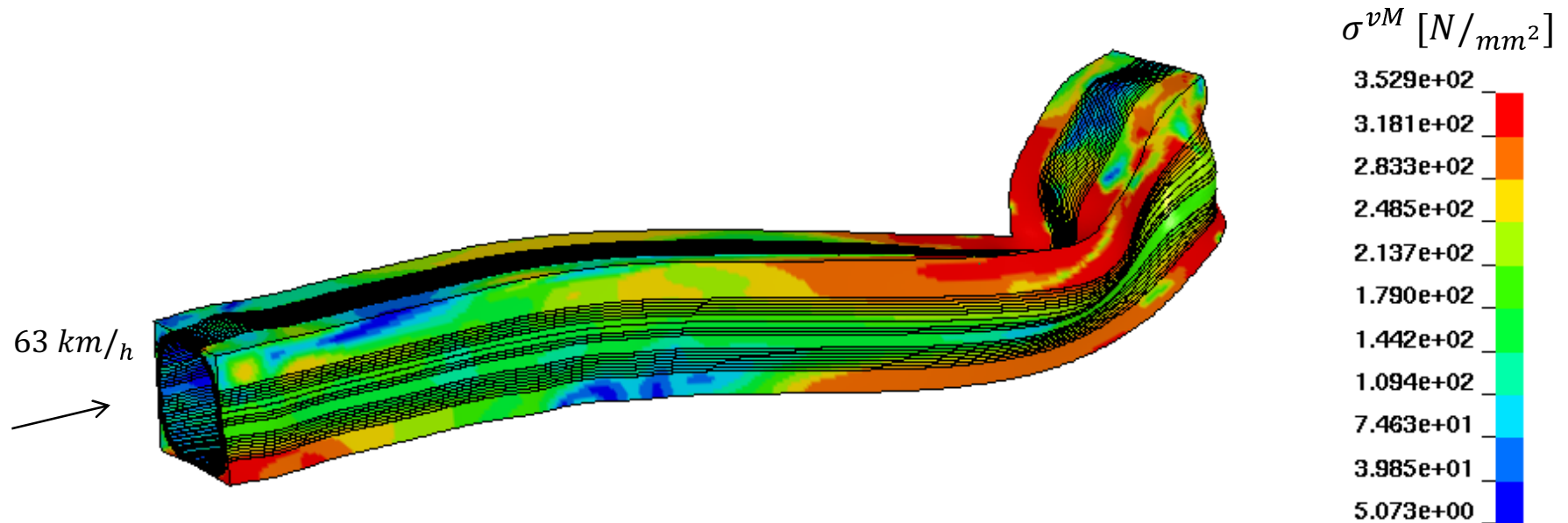
Konvergenz:



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:

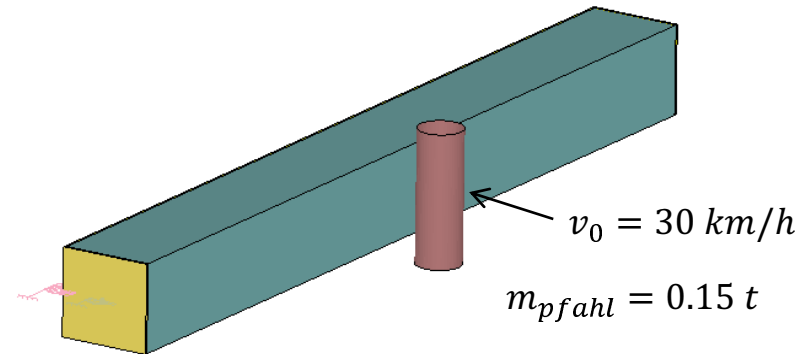
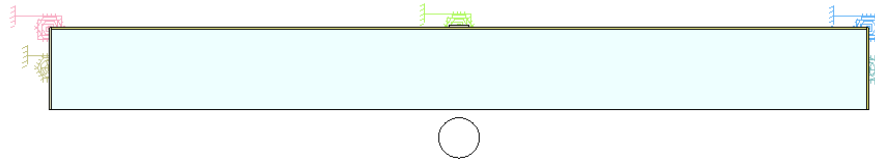


Crashboxmodell Seitenaufprall

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

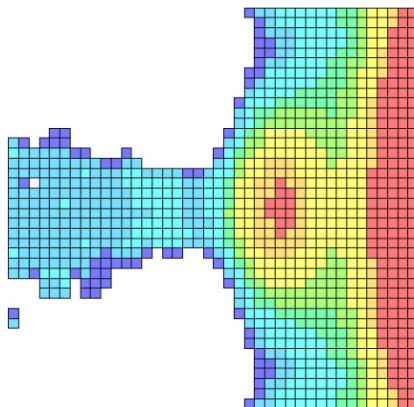
■ **Material:** Aluminium

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

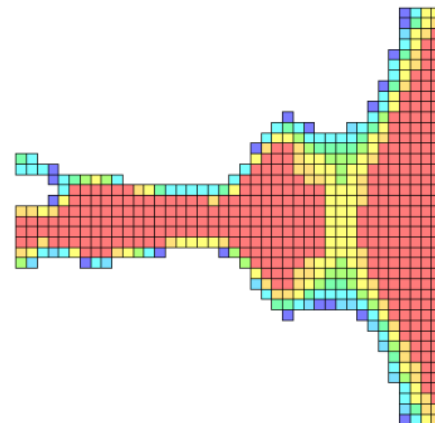


Topologie, relative Dichte:

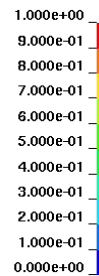
Iteration 10:



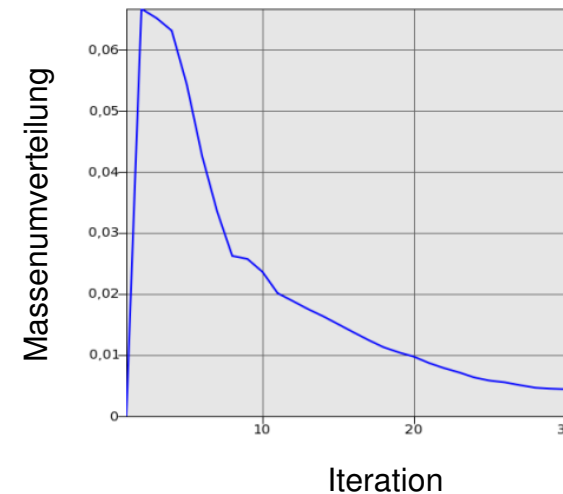
Iteration 25:



ρ_{rel}



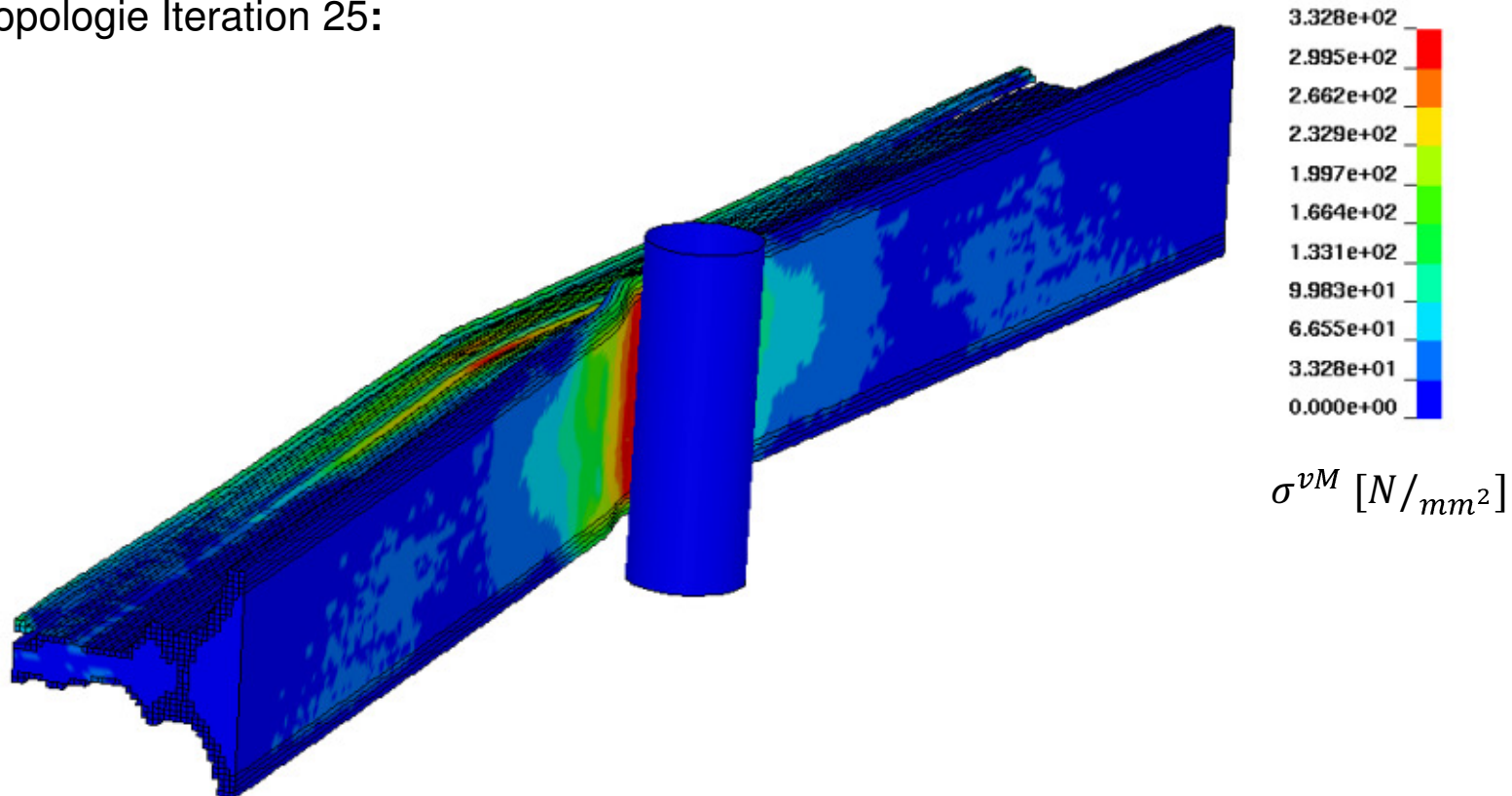
Konvergenz:



Crashboxmodell Seitenaufprall

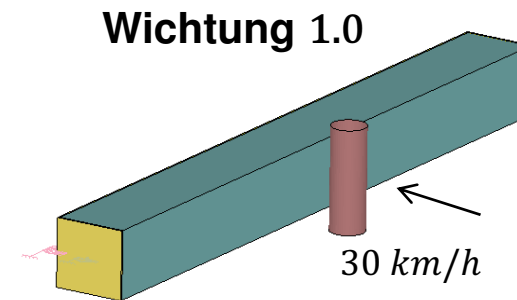
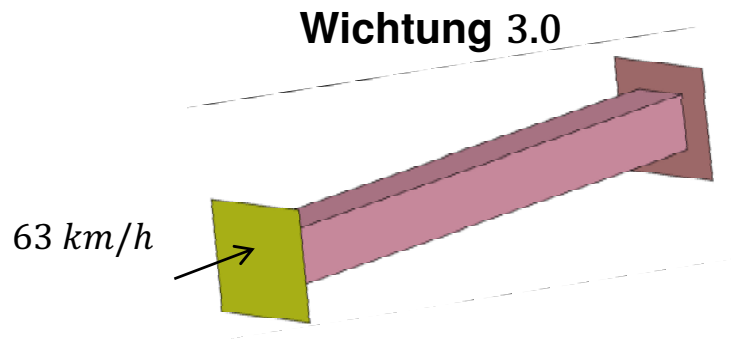
- **Ziel:** Homogenisierung der inneren Energiedichte
- **Beanspruchung:** Seitenaufprall, Geschwindigkeit $v_0 = 30 \frac{km}{h}$
- **Nebenbedingungen:** Masse: $M_{rel,soll} = 0.3$
Extrusion

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



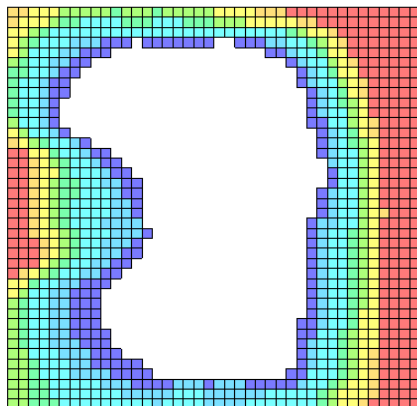
Crashboxmodell Frontal und Seite

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

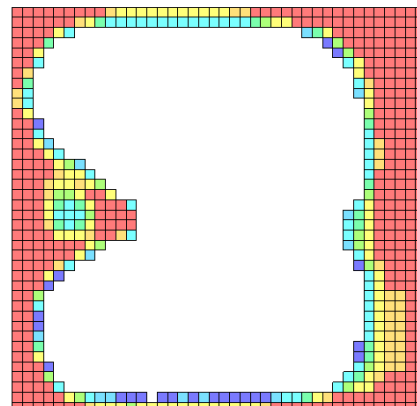


Topologie, relative Dichte:

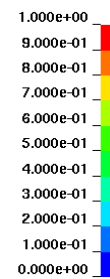
Iteration 10:



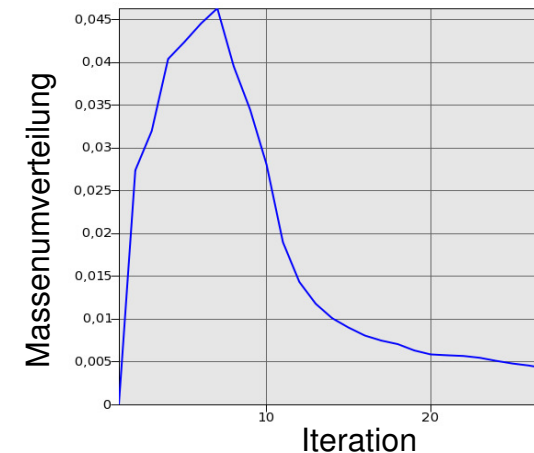
Iteration 25:



ρ_{rel}



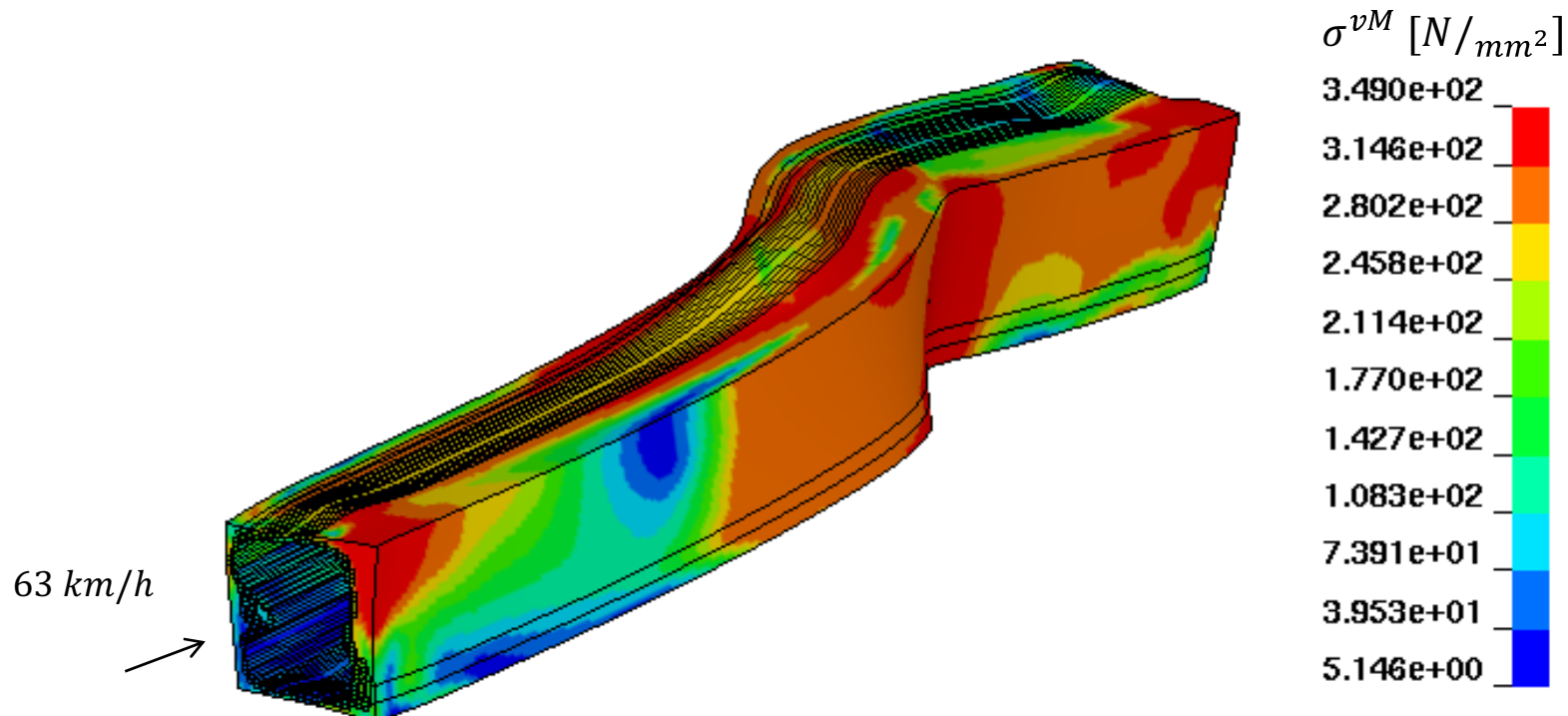
Konvergenz:



Crashboxmodell Frontal und Seite

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

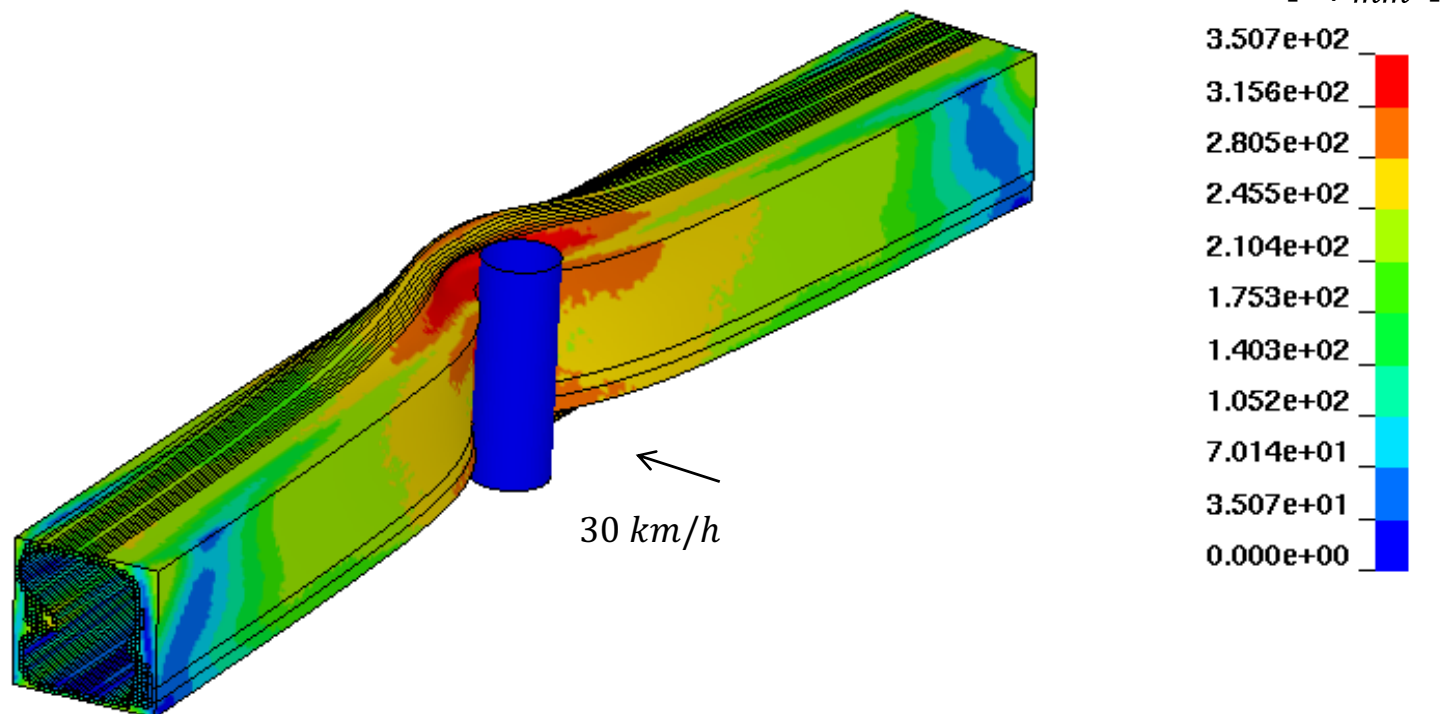
Lastfall Frontalaufprall, v. Mises Spannung $t=0.00325$ s,
Topologie Iteration 25:



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:

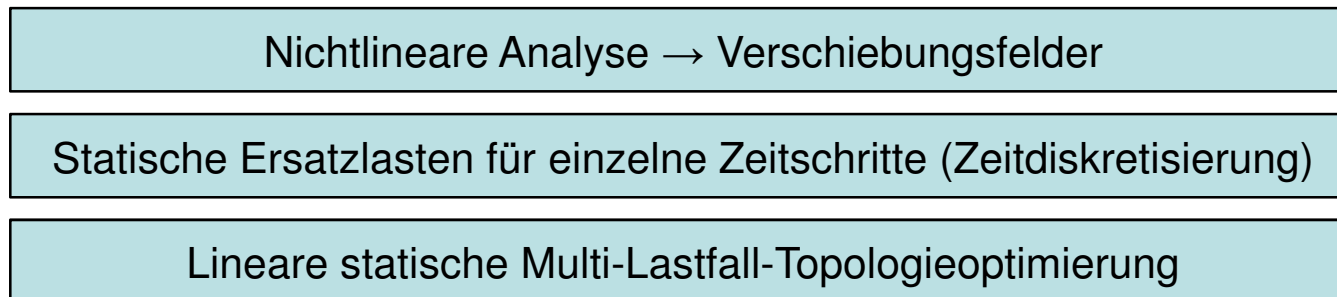
Hanyang University, Korea:

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:



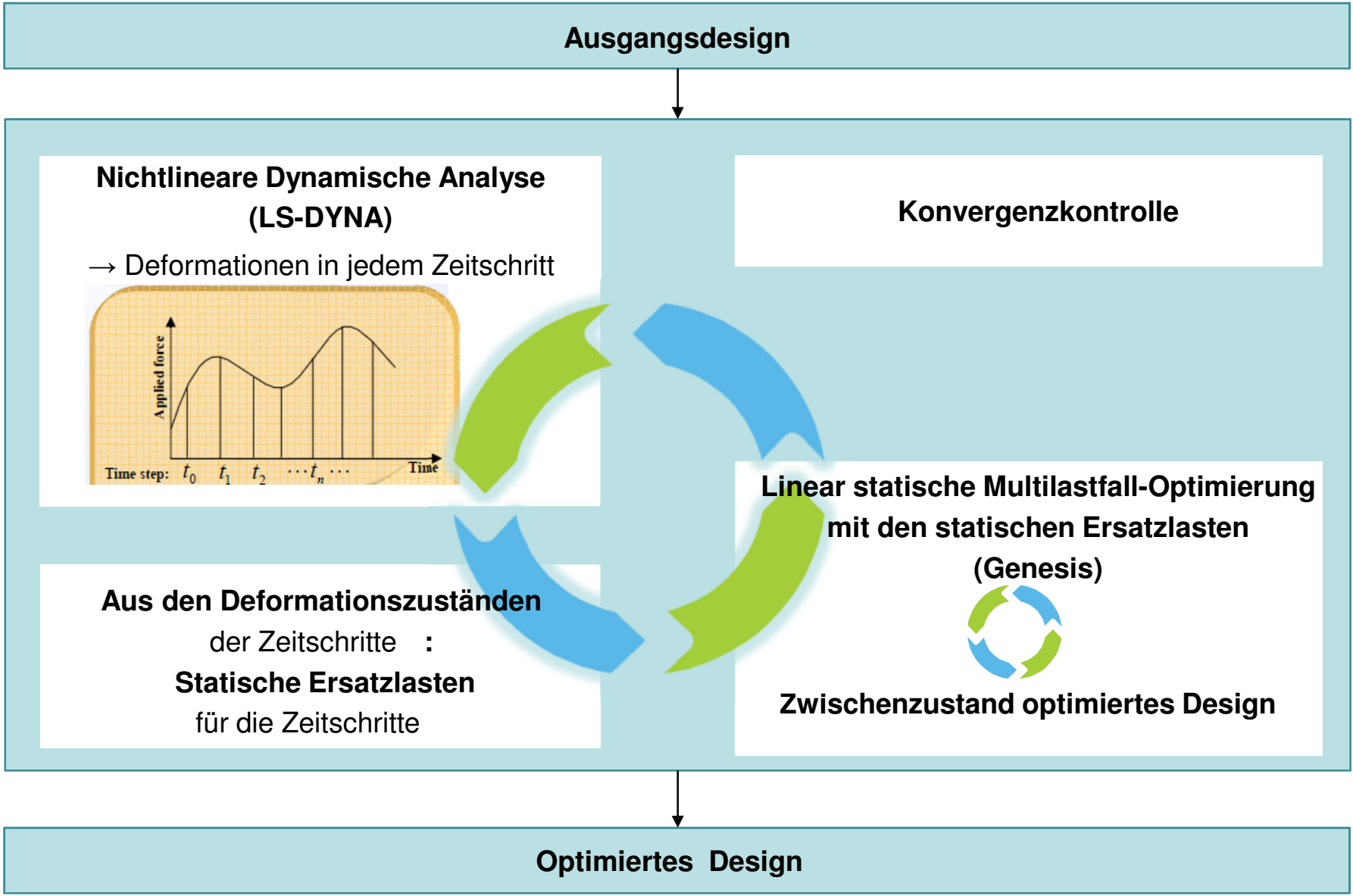
Iterativer Prozess (Konvergenz der Zielfunktion und Erfüllung der Nebenbedingungen)

■ Umsetzung von VR&D:

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

linearer Topologieoptimierer: **Genesis**

ESL: Algorithmische Umsetzung



ESL: Verdeutlichendes Beispiel

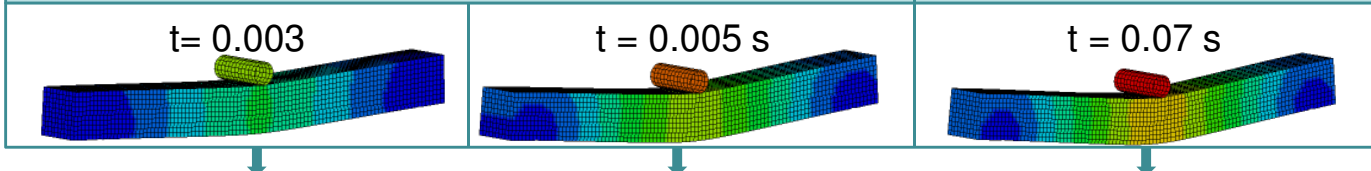
Ausgangstopologie

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

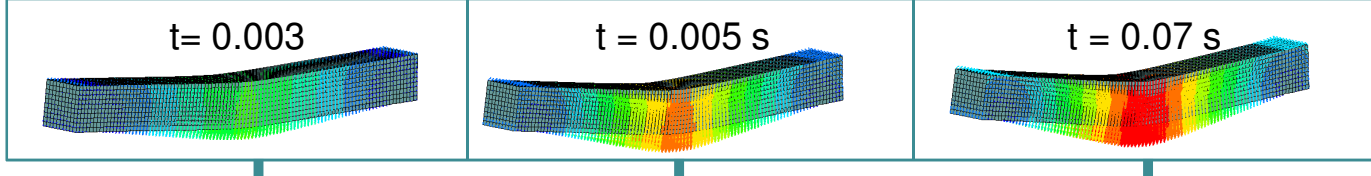
$l = 800\text{mm}$

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

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



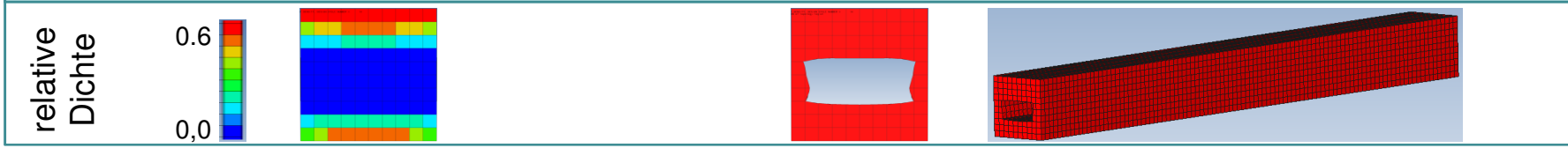
→ **Statische Ersatzlasten** für Zeitschritte t_i



Linear statische Multilastfall - Optimierung mit Ersatzlasten (Genesis)



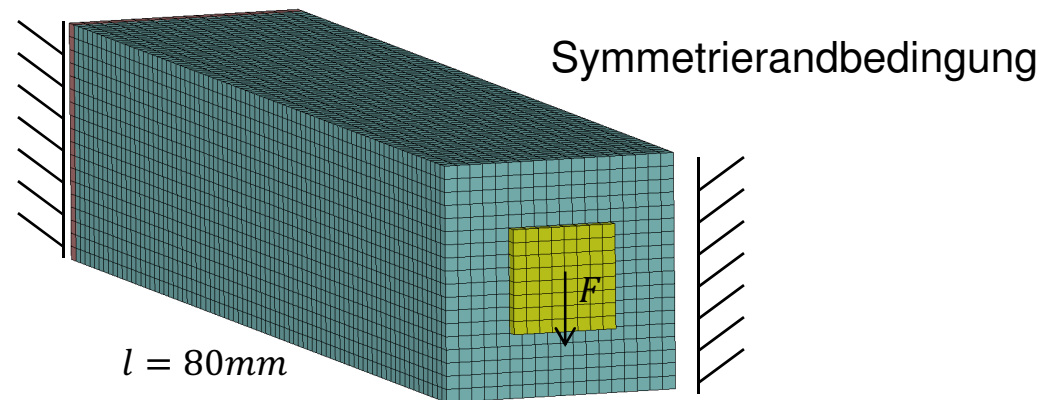
Optimierte Topologie – Dichteverteilung - Isofläche



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 Hourglasstabilisierung (ELFORM=1 IHQ=6)
- **Material:** Aluminium

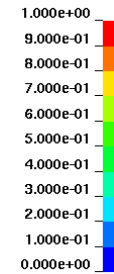
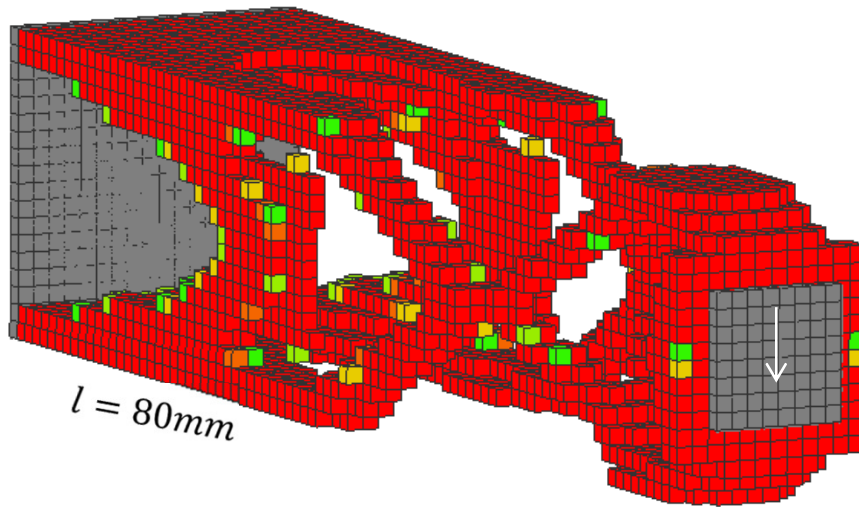
Einspannung



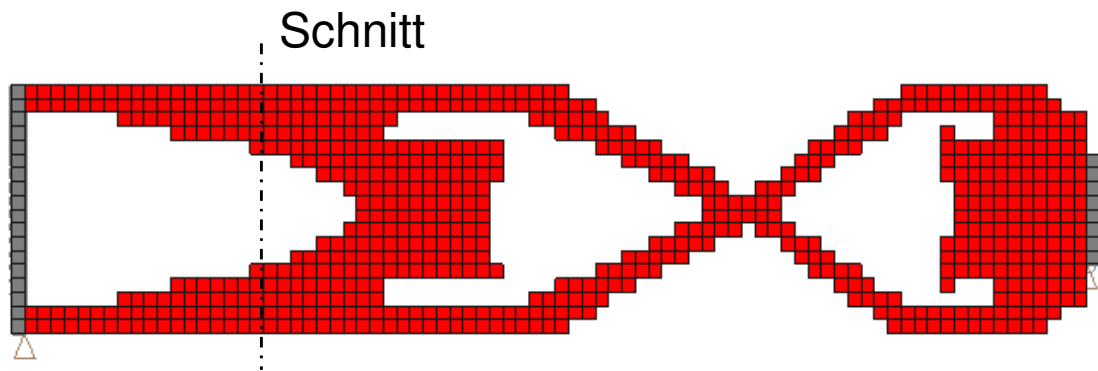
- **Quasistatische Belastung**

Beispiel Genesis ESL: Kragarm

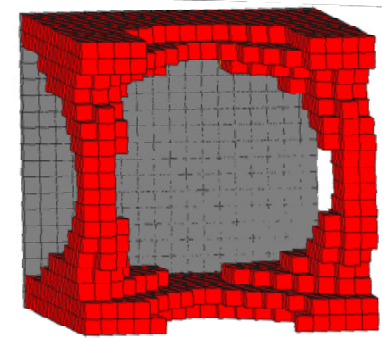
- Ziel: Maximale Steifigkeit
- Nebenbedingungen: Masse:
Verschiebung:



Seitenansicht:



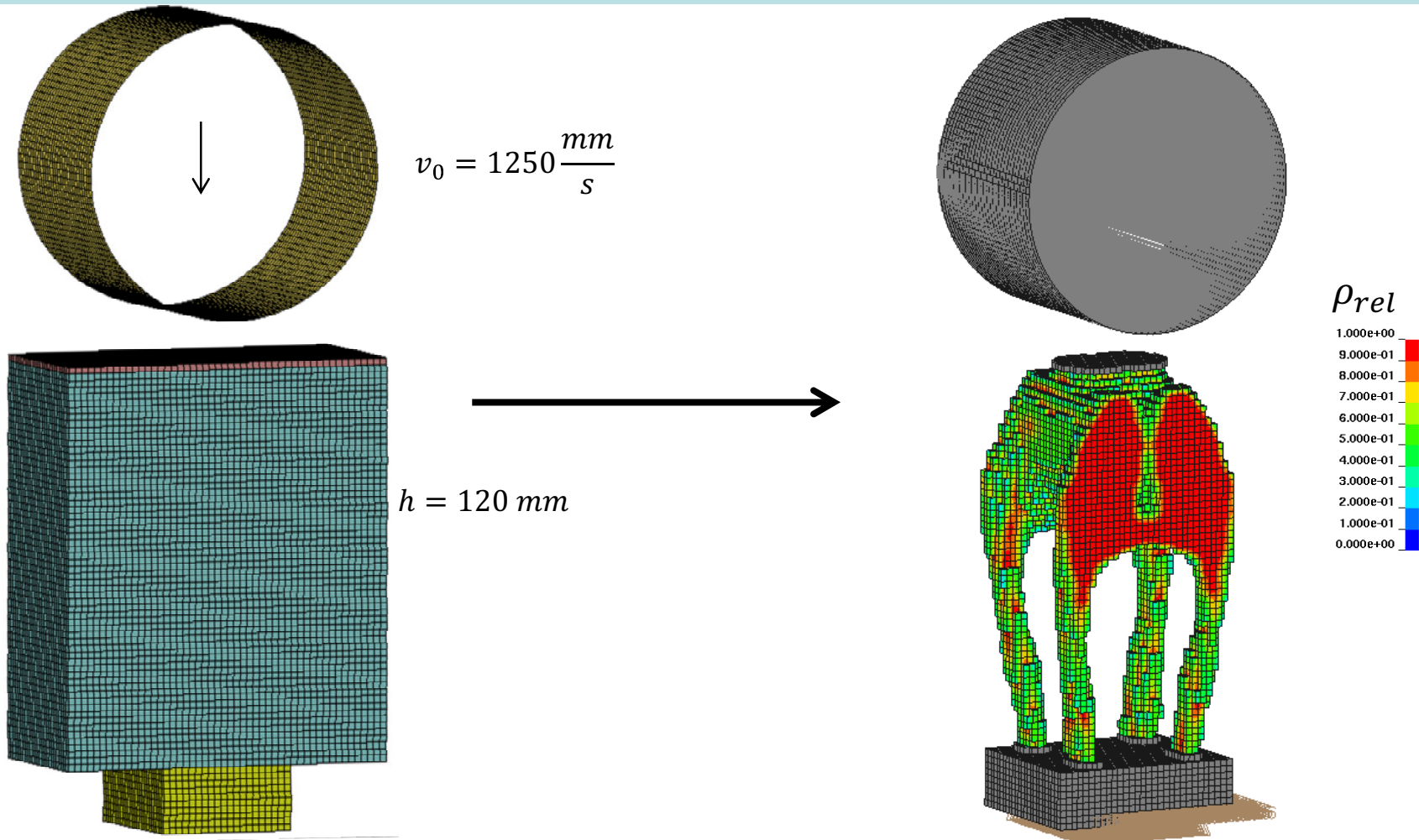
Schnitt:



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

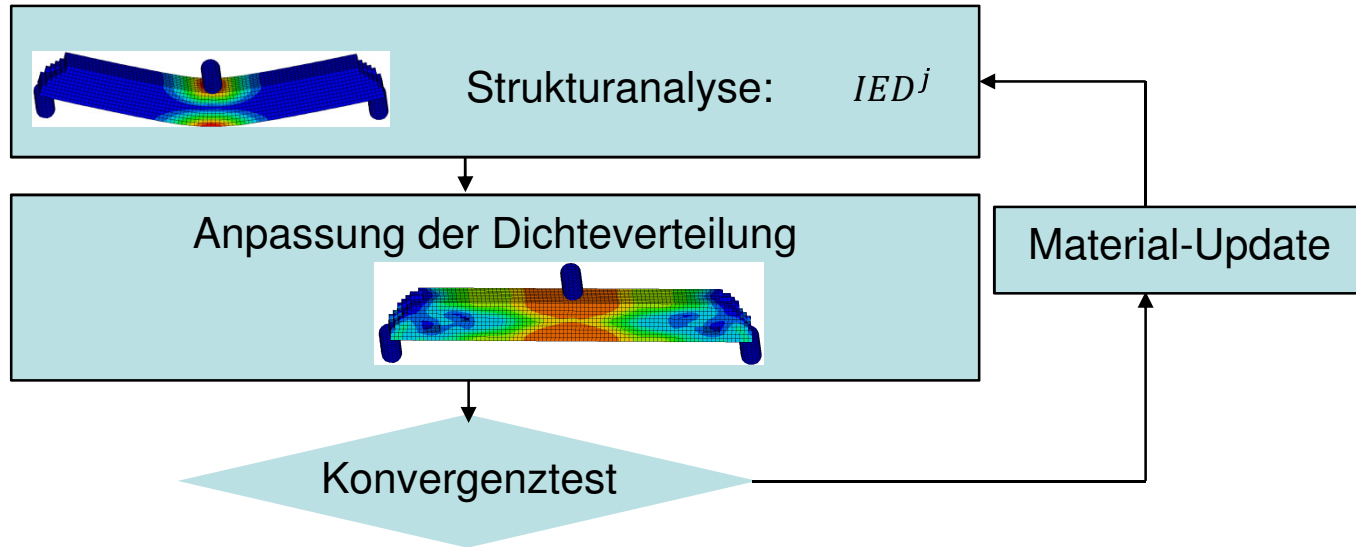
- ➔ ESL: Erweiterung von Genesis für große Deformationen und nichtlineares Materialverhalten

- ➔ automatisierte Prozesskette zwischen LS-DYNA und Genesis

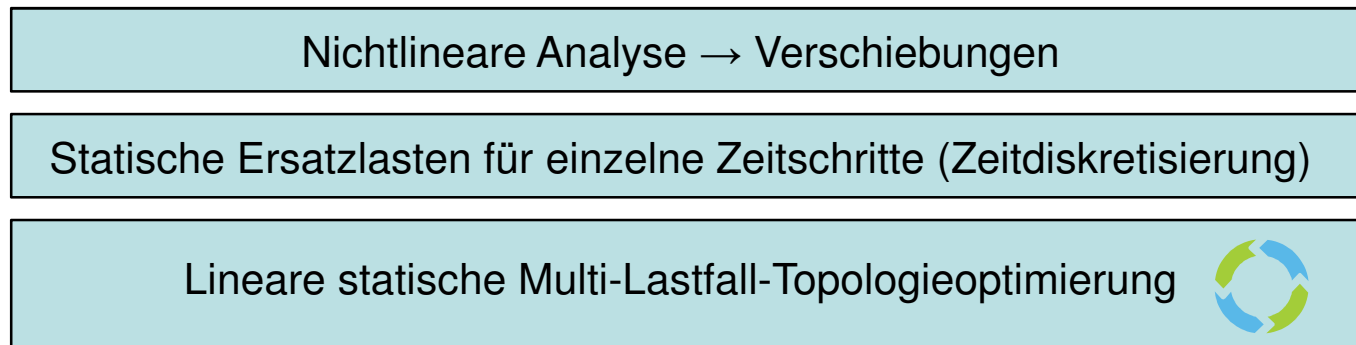
- ➔ lineare Optimierung beinhaltet implizite Analyse:
 - lineares implizites Eingabefile wird von Genesis erzeugt

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