Parameterabhängigkeiten bei Topologieoptimierungsalgorithmen und die Auswirkung auf den Konstruktionsprozess

15. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag

18. September 2013

Stefan Hautsch, M.Sc.

Überblick
Gliederung

- **Theoretischer und mathematischer Hintergrund der Optimierung**
- **Einführung in die Topologieoptimierungsalgorithmen von TOSCA Structure**
- **Analyse der Parameterabhängigkeiten**
  - FE-Netzfeinheit
  - FE-Elementtyp
  - Interpolationsmethode / Penalty-Faktoren / Filter-Radius
  - Fertigungsrandbedingungen
  - Iterationsanzahl / Abbruchkriterium
  - Glättungsalgorithmus
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Theoretische Grundlagen

Der simulationsgestützte Optimierungsprozess

- Simulationsmodell = **Finite-Elemente-Analyse** → berechnet Systemantworten
- Startentwurf / Modell = **Bauraum mit Lasten/Randbedingungen**
- **Parameter** = Restriktionen und spezifische Einstellungen des Optimierungsalgorithmus
- **Designvariablen** = normierte E-Moduli bzw. Elementdichten
- **Modifikation der Designvariablen**, d.h. Änderung der Geometrie des Bauteils durch Beeinflussung der Elementdichte bzw. des E-Moduls
- Iterative Berechnung der jeweils aktualisierten Geometrie, bis das Optimum oder Abbruchkriterium erreicht ist

Mathematische Grundlagen

Optimierungsalgorithmen

- **Optimalitätskriterienverfahren** (OC – Optimality Criteria): intuitive bzw. auf Erfahrungen basierende Verfahren
  - Kein „mathematisches“ Verfahren, sondern aus Naturbeobachtungen entstanden
  - z.B. Fully Stressed Design (FSD) = voll beanspruchtes Tragwerk
  - Oder auf Basis der adaptiven biologischen Wachstumsregel (Bionik): das **SKO-Verfahren** (Soft Kill Option), welches Material an Stellen mit geringer Spannung eliminiert
- **MMA-Verfahren**: Methode der bewegten Asymptoten (Method of Moving Asymptotes)
  - Lösung über die Lagrange-Formulierung des Optimierungsproblems, z.B. mit der dualen Methode; hierzu ist eine Approximation nötig!
  - Approximation der Ziel-/Restriktionsfunktion über das allgemein formulierte MMA-Verfahren (dies erlaubt alle Zwischenstufen zwischen linearer und reziproker Approx.)

Mathematische Grundlagen

E-Modul-Dichte-Beziehung in der Topologieoptimierung (1)

- Für Topologieoptimierung: Zusammenhang zwischen Dichte und E-Modul gesucht → nur Dichte 0 und 1 sind relevant (Loch/Vollmaterial)!

- **SIMP-Ansatz** (Solid Isotropic Material with Penalization)

  → Penalty-Faktor bestraft mittlere Dichten, in der Praxis: $2 \leq p \leq 4$

$$\frac{E_i}{E_i^0} = \left(\frac{\rho_i}{\rho_i^0} \right)^p$$

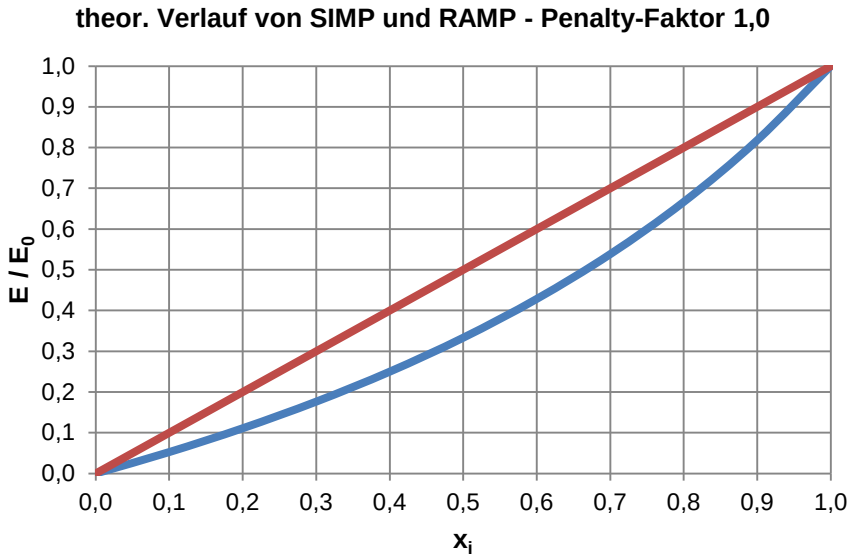
- **RAMP-Ansatz** (Rational Approximation of Material Properties)

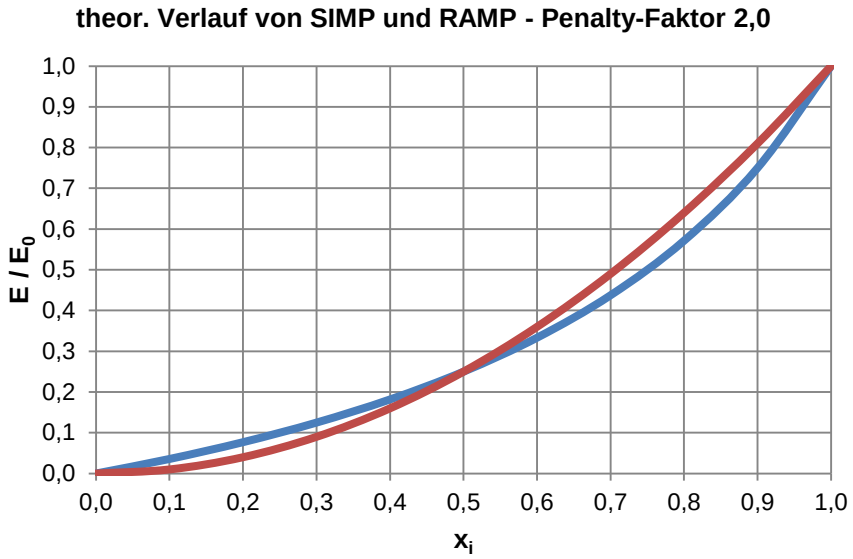
  → Verlauf entspricht dem Hashin-Shtrikman-Materialverhalten (bei passender Wahl von *p*)

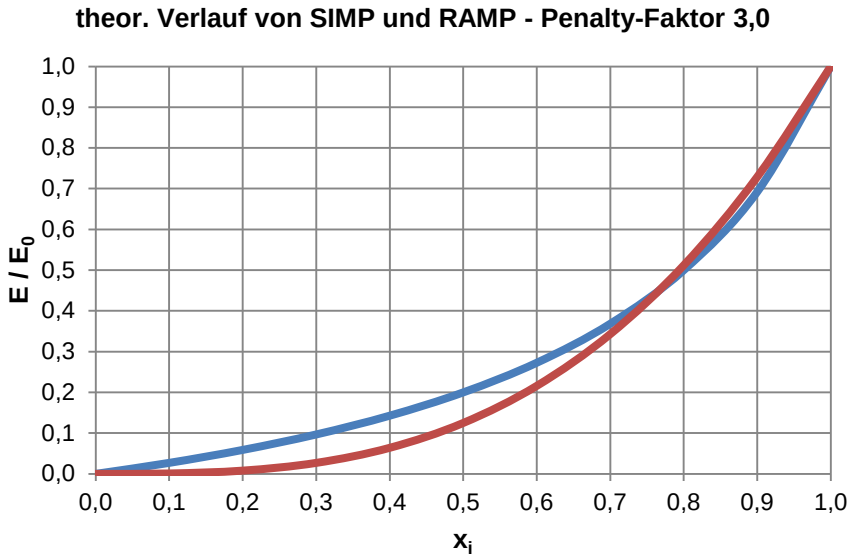
$$\frac{E_i}{E_i^0} = \frac{\left(\frac{\rho_i}{\rho_i^0} \right)}{1 + p \cdot \left(1 - \frac{\rho_i}{\rho_i^0} \right)}$$

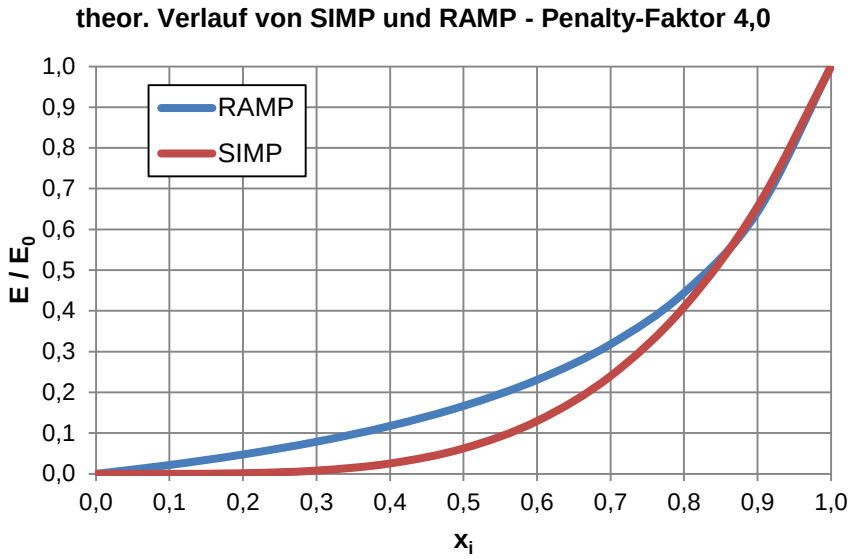
Mathematische Grundlagen

E-Modul-Dichte-Beziehung in der Topologieoptimierung (2)





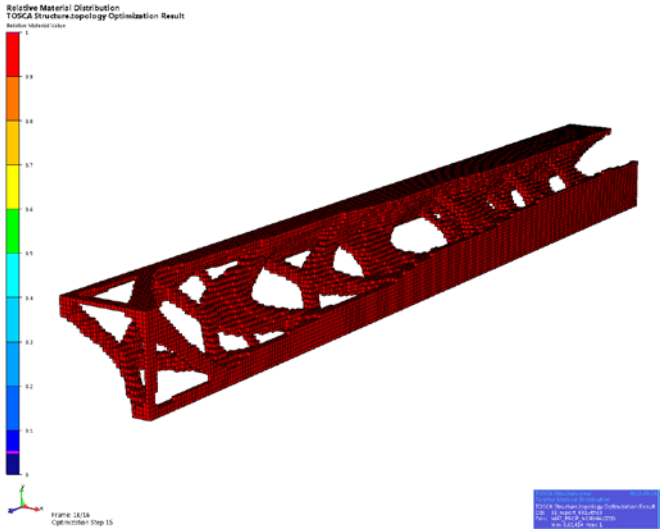




Die Algorithmen von TOSCA Structure

TOPO_CONTROLLER

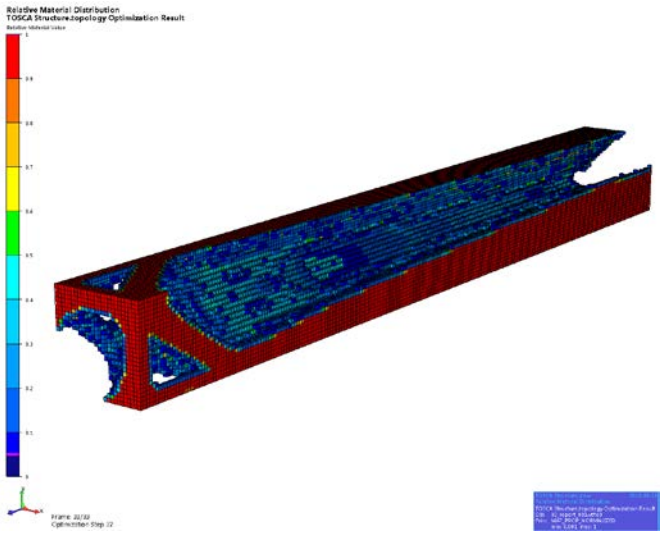
- Der Controller-Algorithmus verfährt *wahrscheinlich* nach dem Prinzip der **Optimalitätskriterien**, z.B. dem SKO-Verfahren
- Zielfunktion: **minimale Nachgiebigkeit**
- Benötigt Knotenspannungen und Dehnungsenergie aus der FEA (keine Sensitivitäten nötig!)
- Beginnt mit Vollmaterial, d.h. relative Dichte 1,0
- Feste Anzahl Iterationen (Standard 15)
- Schnelle Konvergenz, 0-1-Struktur als Ergebnis



Die Algorithmen von TOSCA Structure

TOPO_SENSITIVITY

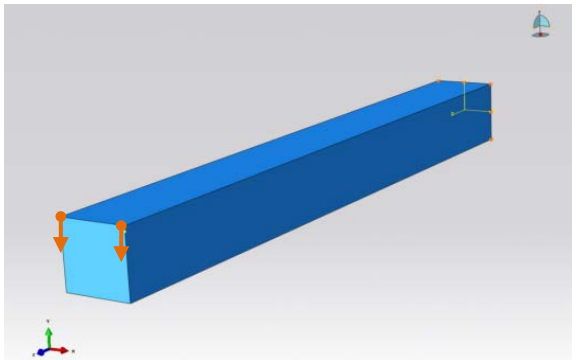
- Der Sensitivity-Algorithmus ist ein **gradientenbasierter Algorithmus**, welcher die Methode der bewegten Asymptoten (**MMA**) nutzt und das Material mit SIMP oder RAMP interpoliert
- Zielfunktion: **minimale Nachgiebigkeit** oder maximale Eigenfrequenz
- Benötigt neben Knotenspannungen und Dehnungsenergie zusätzlich Gradienten/**Sensitivitäten** (1. Ableitung)
- Startwert der relativen Dichte ist die vor-eingestellte Volumenrestriktion (z.B. 30%)
- Variable Iterationsanzahl
- Elemente mittlerer Dichten im Ergebnis (keine 0-1-Struktur)



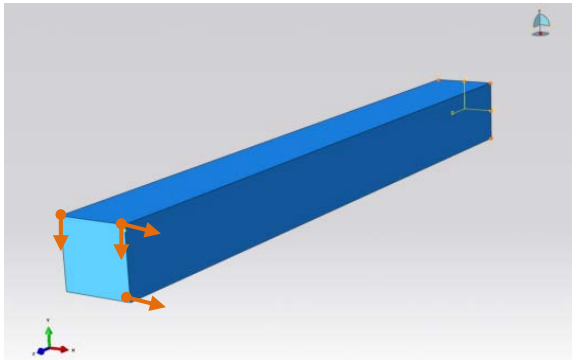
Vorbereitung der Analysen

Wahl der Algorithmen, Bauteile und Randbedingungen

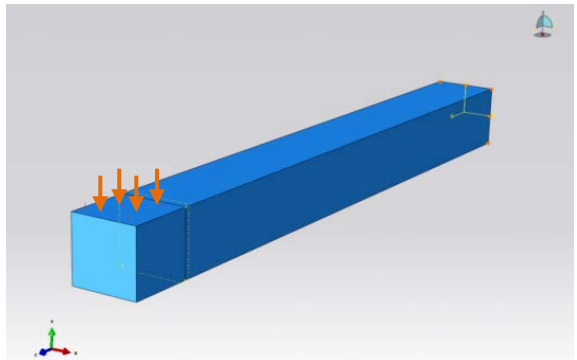
- Analyse der Algorithmen aus **TOSCA Structure V.7.1.1** (FE-Design)
- Externer FE-Solver: **Abaqus/CAE v.6.11-2**
- Preprocessing in ABAQUS → Export als INP-Datei (*solver deck*)
- Bauteil: Kragbalken (2000 x 200 x 200 mm³) mit 3 Lastfällen (vgl. Abbildungen), Kräfte je 1000 N, Drucklast 1000 MPa auf 200 x 200 mm²
- Linear statische Rechnung; Stahl mit E = 206.000 N/mm² und v = 0,3
- Zielfunktion: minimale Nachgiebigkeit; Volumenrestriktion 30%



Lastfall 1



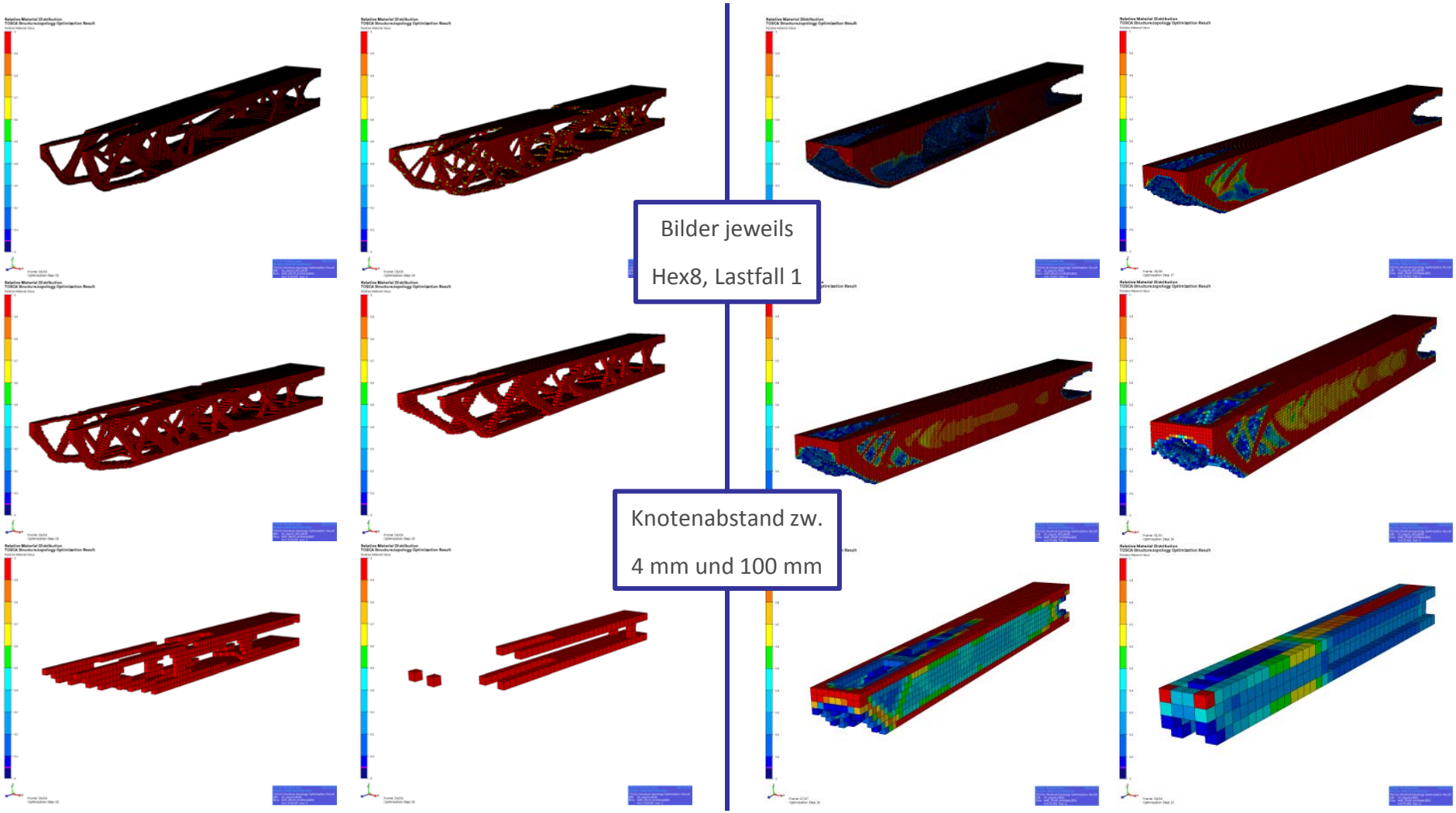
Lastfall 2



Lastfall 3

Analyse der Parameterabhängigkeiten

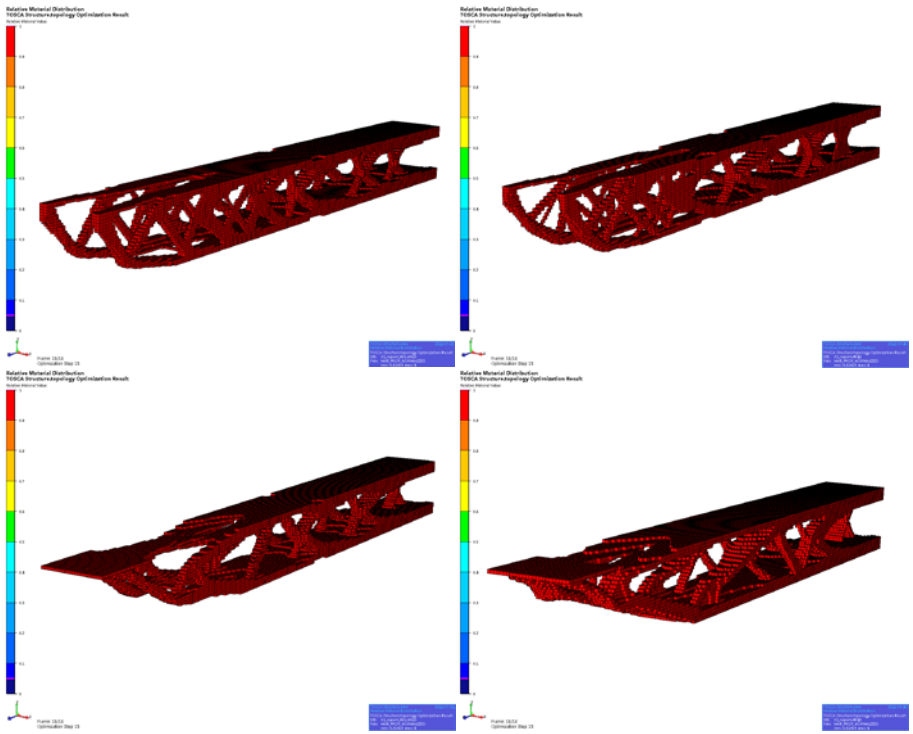
Finite-Elemente-Netz-Feinheit



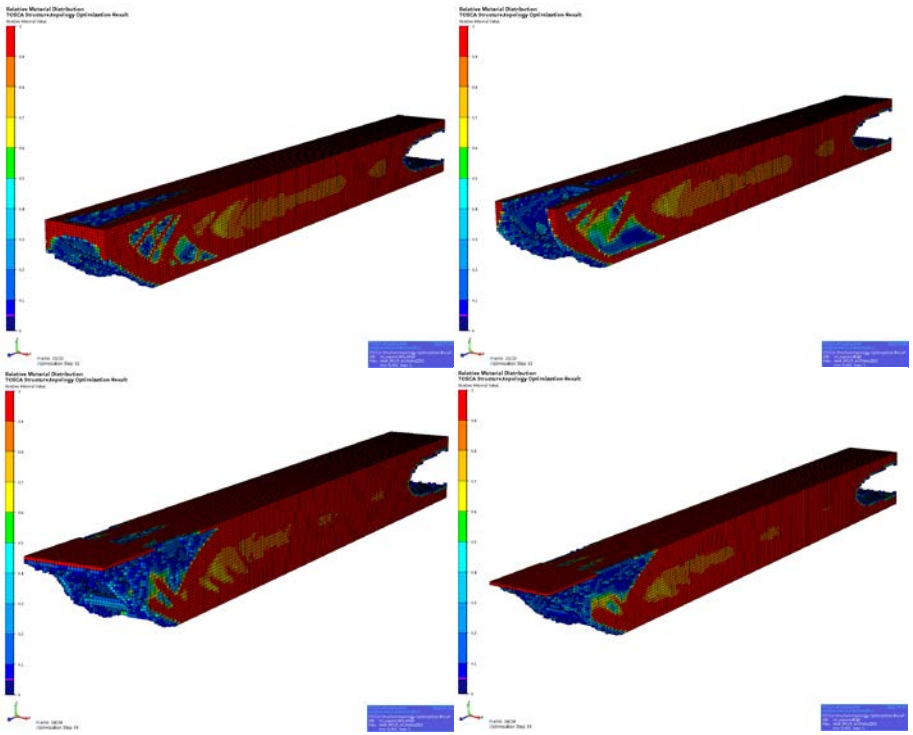
Analyse der Parameterabhängigkeiten

Elementtyp

Controller



Sensitivity



Jeweils Hex8 (Spalte 1 und 3) und Hex20 (Spalte 2 und 4), unterschiedliche Netzfeinheiten

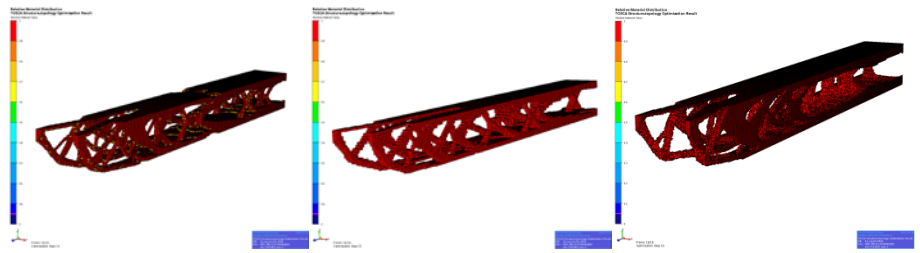
Es empfehlen sich für die beiden Algorithmen **lineare Hexaeder** bzw. **lineare Tetraeder**

Quadratische Ansätze haben nur bei Drucklasten Vorteile, rechnen dafür länger

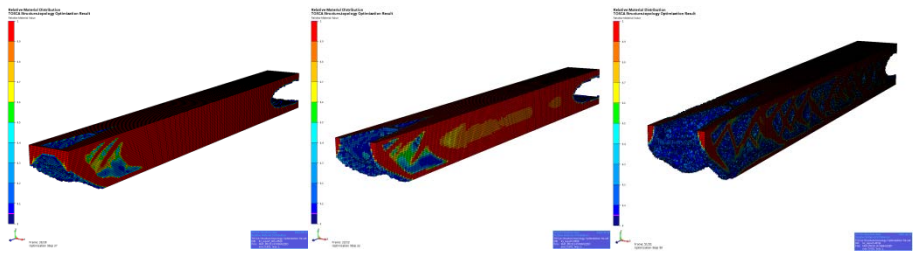
Analyse der Parameterabhängigkeiten

Elementtyp bei gleicher Anzahl an Freiheitsgraden

Controller

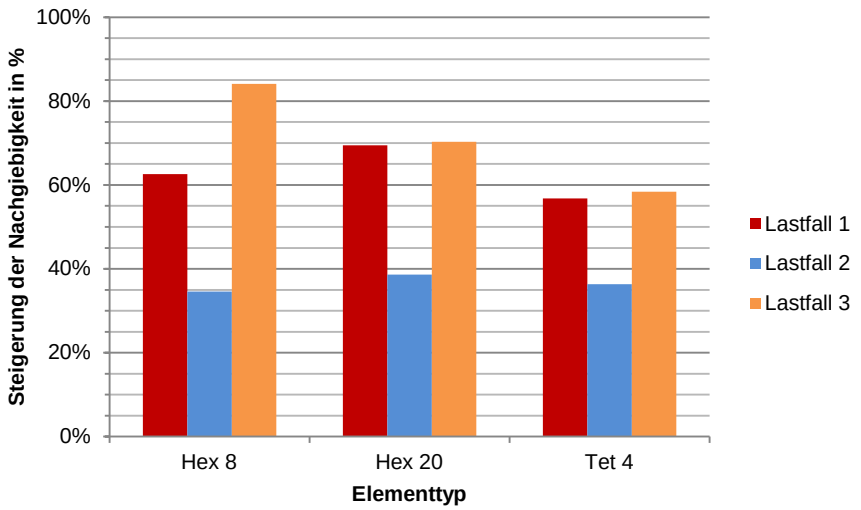


Sensitivity

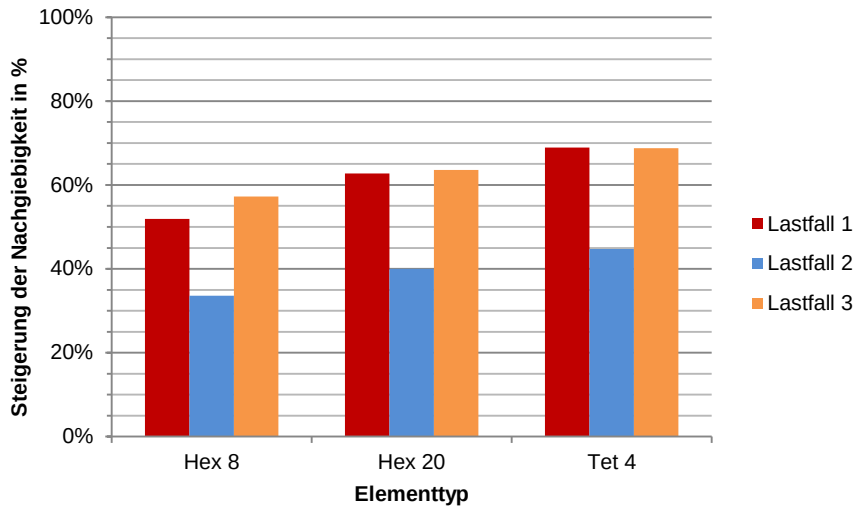


Bilder: jeweils Lastfall 01, fein vernetzt

Controller-Algorithmus, fein vernetzt



Sensitivity-Algorithmus, fein vernetzt

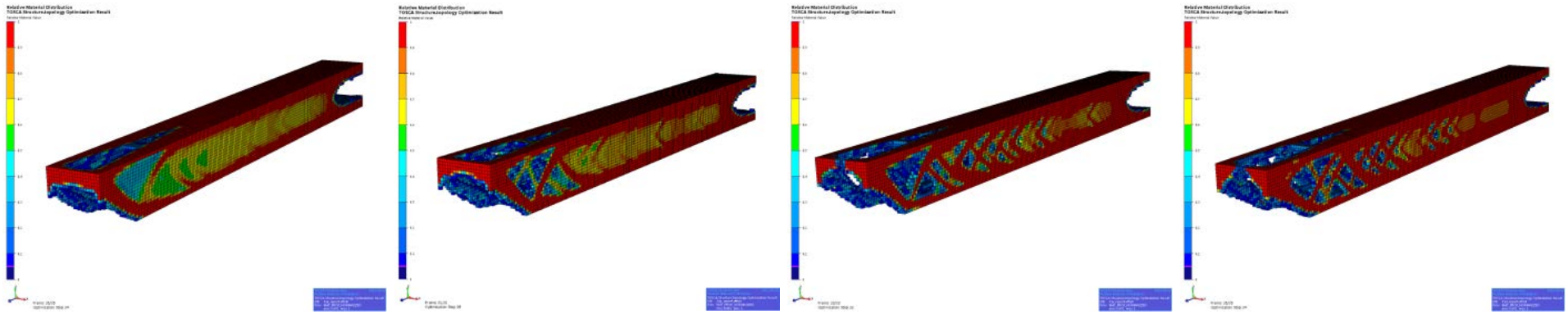


Bei gleichen Anzahl an Freiheitsgraden rechnen **Tet4-Elemente** (**Controller**) bzw. **Hex8-Elemente** (**Sensitivity**) am Besten und sind somit für diese Algorithmen vorzuziehen

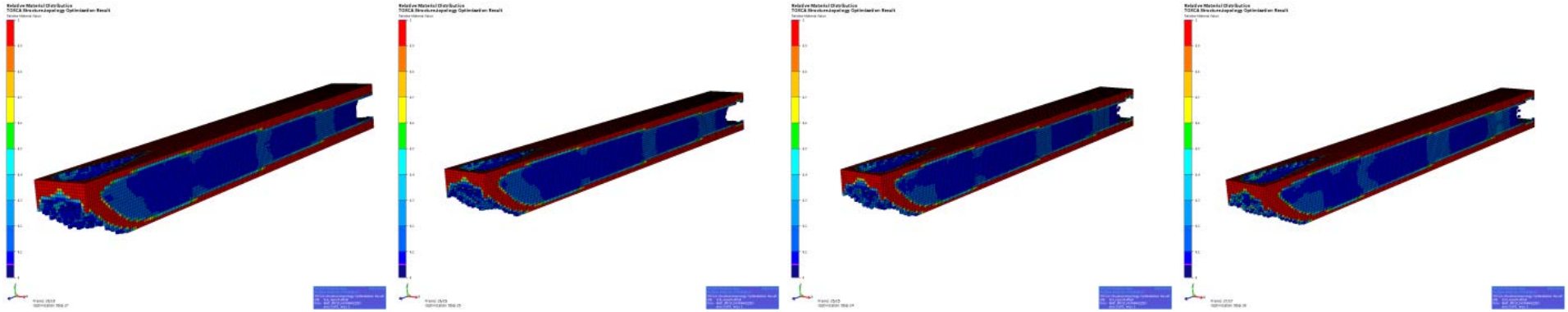
Analyse der Parameterabhängigkeiten

Sensitivity-spezifische Parameter – Interpolation (1)

SIMP mit Penalty-Faktoren zwischen 2,0 und 5,0



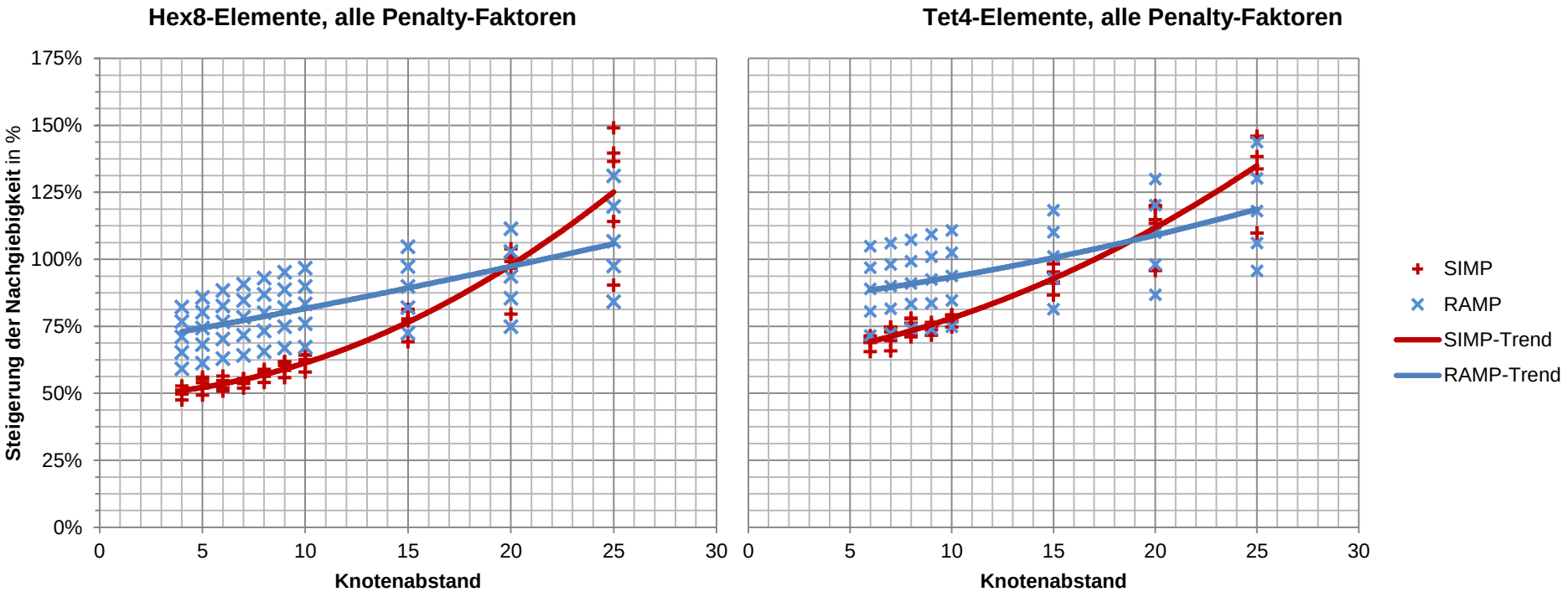
RAMP mit Penalty-Faktoren zwischen 2,0 und 5,0



Analyse der Parameterabhängigkeiten

Sensitivity-spezifische Parameter – Interpolation (2)

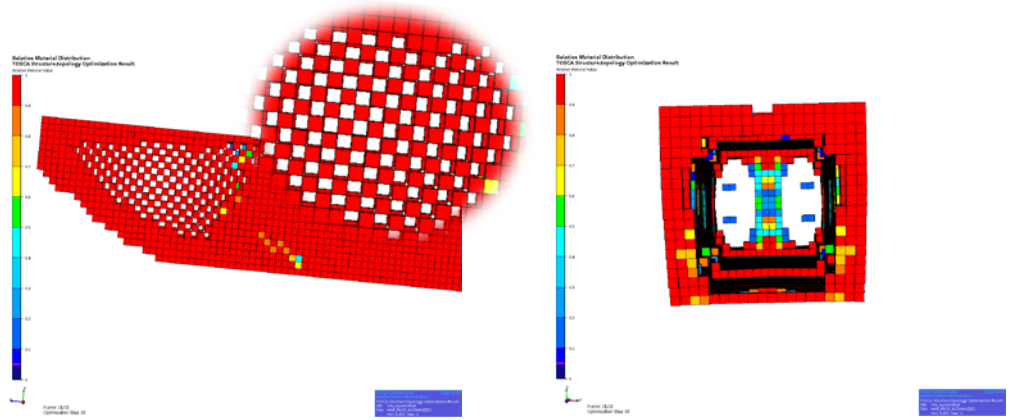
Vergleich von **SIMP** und **RAMP** mit Penalty-Faktoren zwischen 2,0 und 5,0 jeweils für lineare Hexaeder und lineare Tetraeder



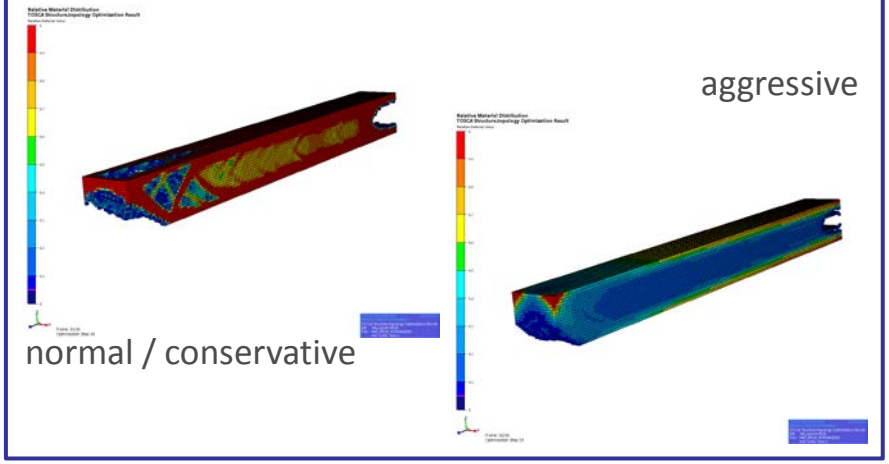
Analyse der Parameterabhängigkeiten

Sensitivity-spezifische Parameter – Filter-Radius/Density-Update

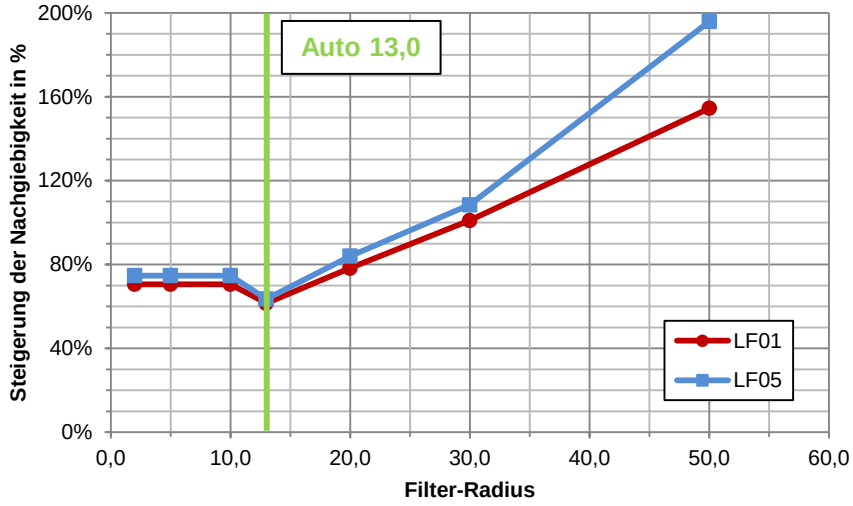
Filter-Radius Probleme:
Hex8, Lastfall 1 mit Filter-Radius 2,0



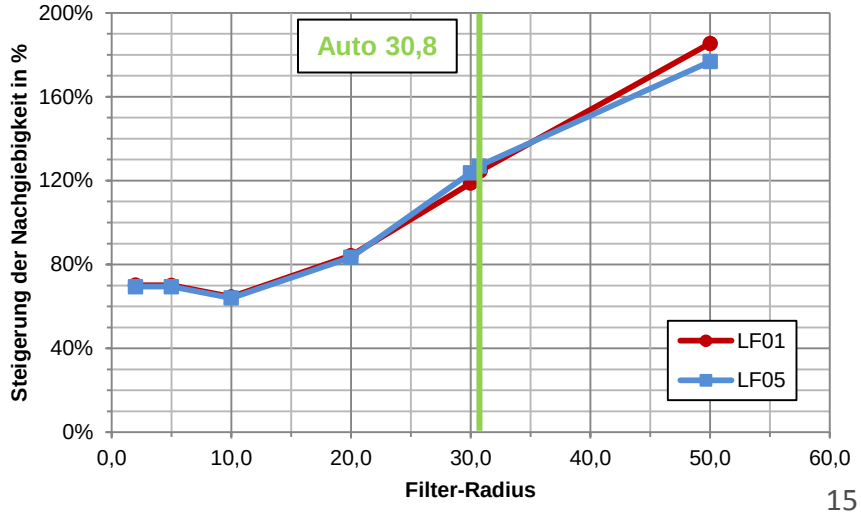
Density-Update



Filter-Radius, Hex8-Elemente



Filter-Radius, Tet10-Elemente

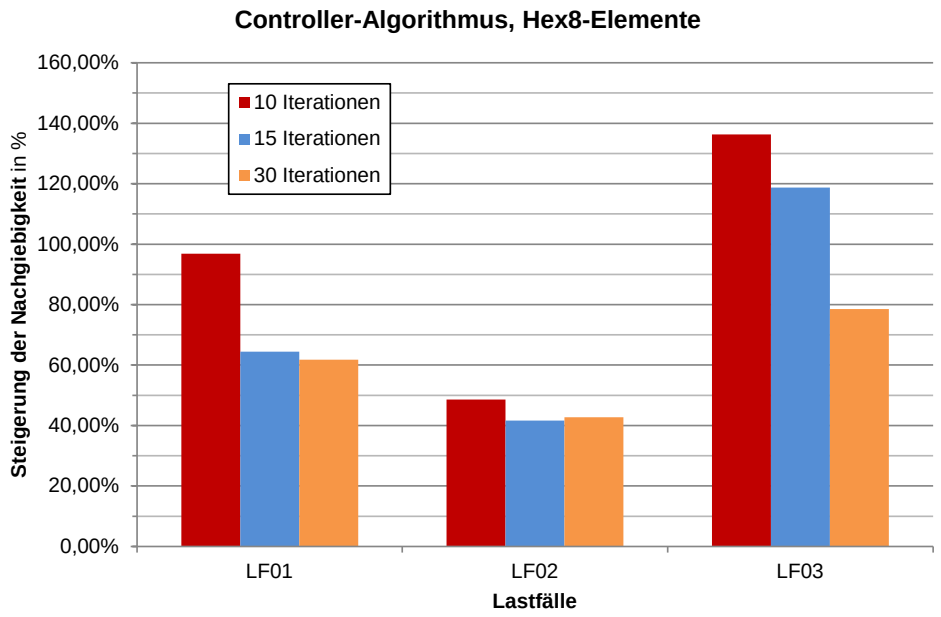


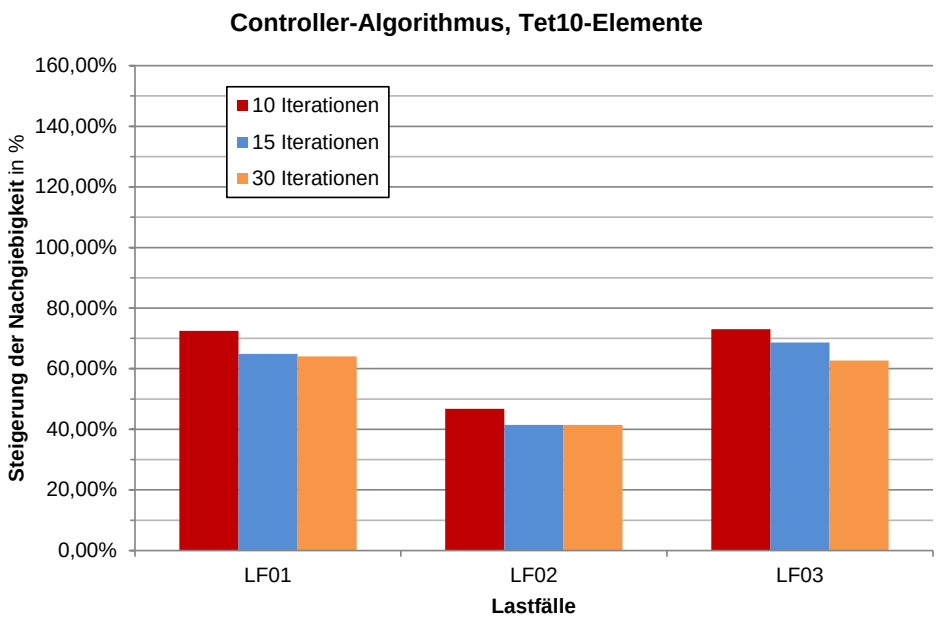
Analyse der Parameterabhängigkeiten

Controller-spezifische Parameter – Iterationszahl

- Variation der Iterationsanzahl von 10 bis 30 Iterationen (Standard 15)
- Einstellung der Geschwindigkeit (VERY_SLOW, SLOW, MODERATE, MEDIUM, FAST) legt Iterationszahl jeweils automatisch fest, verschlechtert aber Rechenzeit bzw. Nachgiebigkeit

→ **15 Iterationen erzielen optimales Nachgiebigkeits-/Rechenzeitverhältnis**

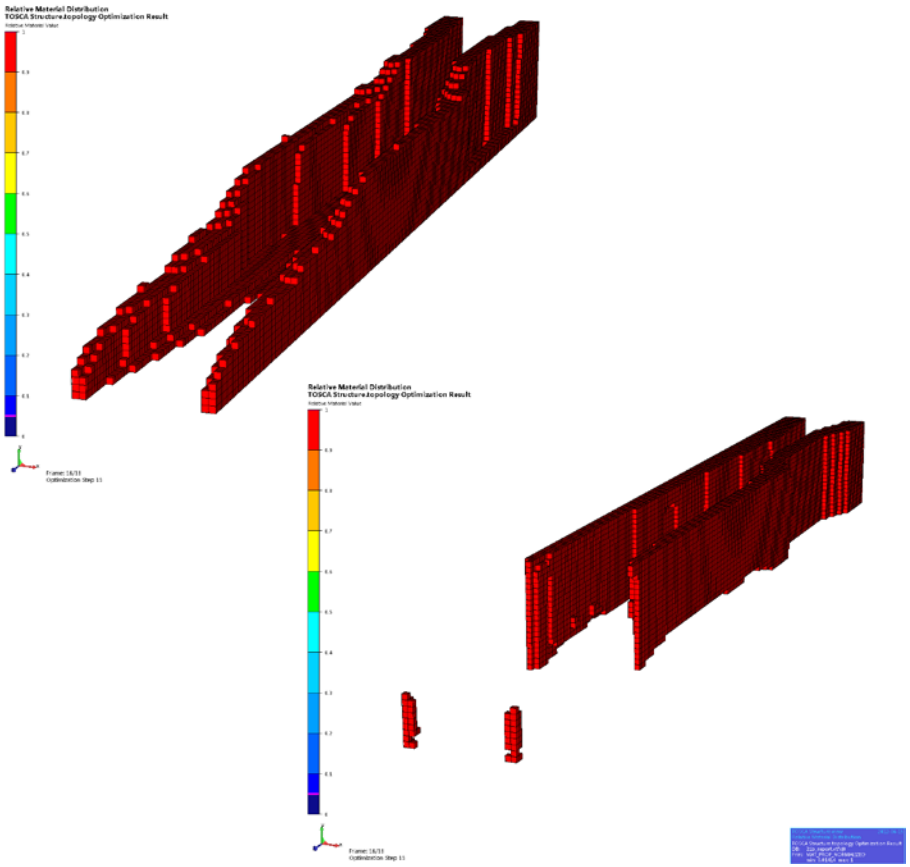




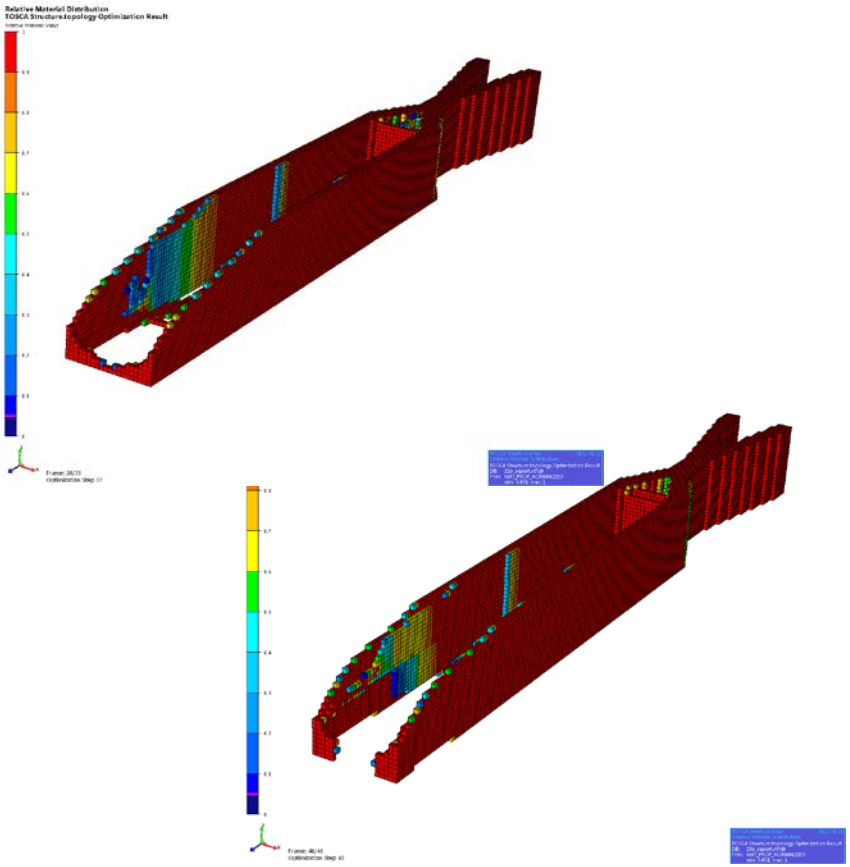
Analyse der Parameterabhängigkeiten

Fertigungsrandbedingungen

Controller



Sensitivity

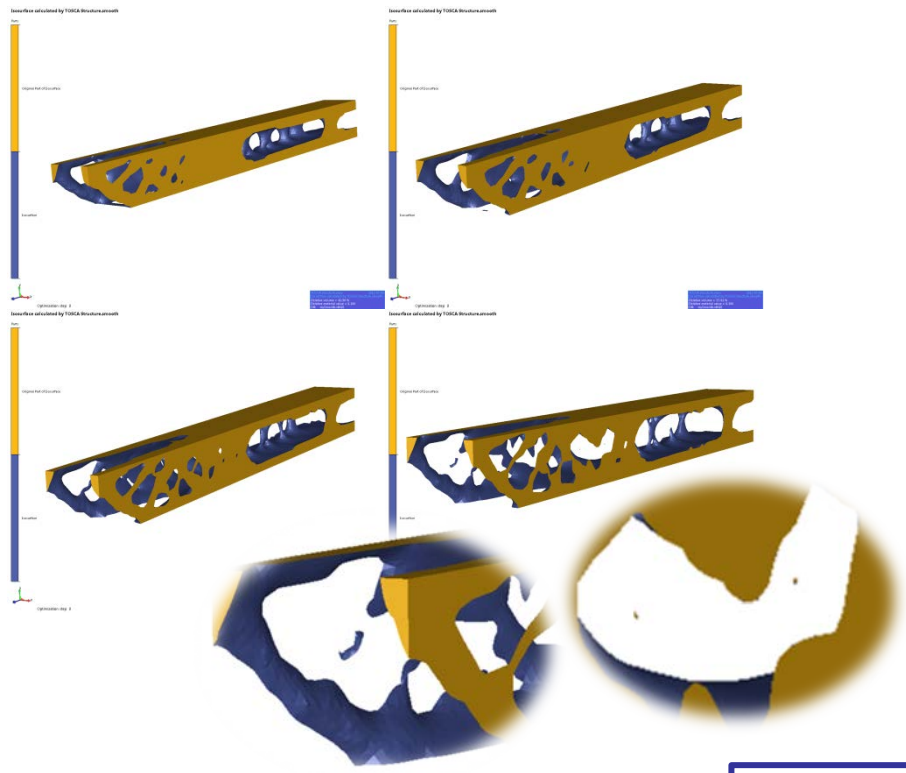


Fertigungsrestriktionen nicht zielführend, da keine fertigungsgerechten Geometrien erzeugt werden (Entformungsschrägen, etc.)

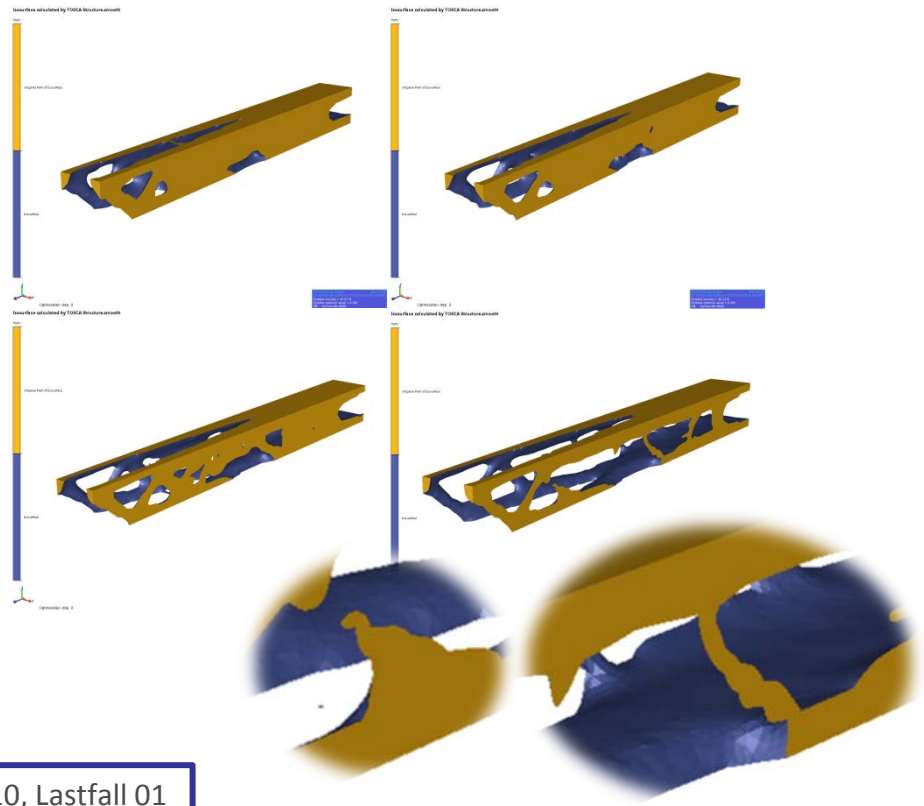
Analyse der Parameterabhängigkeiten

Smooth / Glättung

Controller



Sensitivity



Bilder: Jeweils Tet10, Lastfall 01

Ausleitung in CAD-Systeme weder einfach möglich noch sinnvoll, da die **erzeugten Strukturen nicht fertigungsgerecht** sind und stellenweise frei schwebende Elemente beinhalten

Fazit und Ausblick

- → Viele verschiedene Parameter haben Einfluss auf das Optimierungsergebnis
- → Wissen über die optimalen Einstellungen minimiert Fehlversuche und führt schnell zum optimalen Bauteil
- → Direkte Integration der Optimierung in den Konstruktionsprozess ist schwierig, da die Ergebnisdaten nicht im CAD-System verwendbar sind → Ergebnis nur als Designvorschlag für Konstruktionsänderung/Neukonstruktion
- → Fertigungsrandbedingungen sind ebenso wenig hilfreich und liefern keinen verwertbaren Designvorschlag
- → Prozessrandbedingungen werden bisher nicht berücksichtigt

Die Präsentation ist beendet

Haben Sie noch Fragen?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Bitte stellen Sie nun Ihre Fragen…