



Deutschlandpreis 2024 des Fachbereichstags Maschinenbau

Erweiterung der multi-level *hp* Finite Cell Methode für eine effiziente thermo-viskoplastische Analyse

Oliver Wege, M.Sc.

wege@cats.rwth-aachen.de

betreut von

Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Ruess

University of Applied Sciences Düsseldorf · Germany

Kaiserslautern, DE · 14. November 2024

Grundlegende Methoden

Finite Cells mit hierachischen multi-level hp Netzverfeinerungen

Die Finite Cell Methode

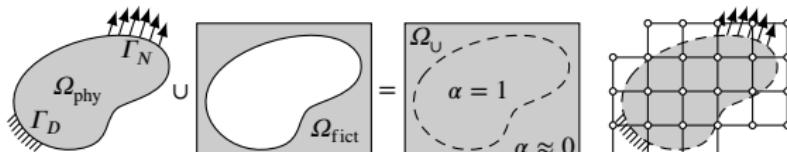


Abb.: Einbettung der Struktur nach der Embedded Domain Methode

- *Embedded Domain* Methode mit Elementen hoher Approximationsordnung [Schillinger and Ruess, 2015]

Multi-level hp Netzverfeinerung

- Lokale Verfeinerungen durch Superposition [Zander et al., 2015]

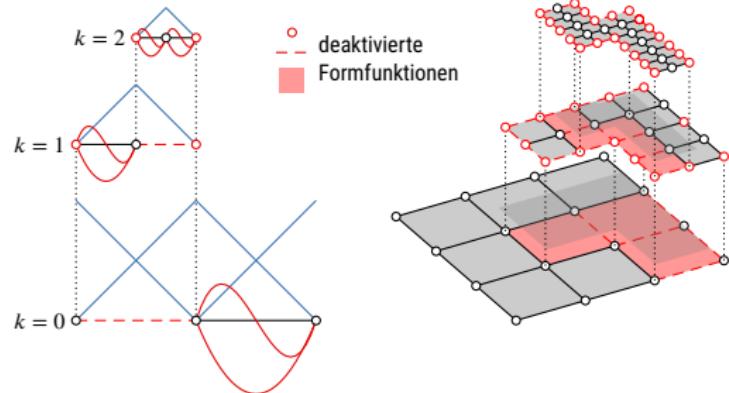


Abb.: Multi-level hp Schema in 1D und 2D mit $k = 2$ Levels.

Effiziente Integration geschnittener Zellen

Numerische Integration durch *Non-negative moment fitting*

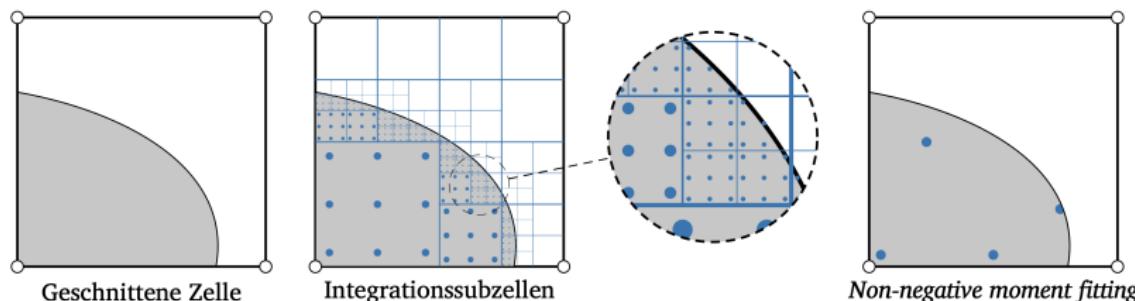


Abb.: Numerische Integrationsstrategien für geschnittene Zellen.

Rekursive Bisektion

- Zerteilung der geschnittenen Zelle in Integrationssubzellen
- Viele Integrationspunkte nötig für eine hohe Genauigkeit
- Hoher numerischer Aufwand für wiederkehrende Integration in nichtlinearen Analysen

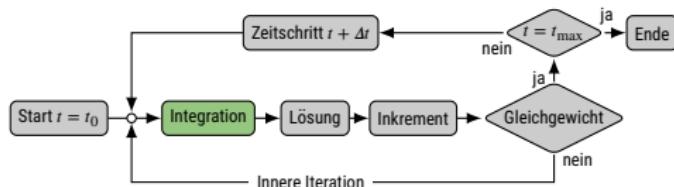


Abb.: Nichtlineares Lösungsschema.

Non-negative moment fitting

- Moment fitting Gleichungen für m Formfunktionen $N_j(\xi)$
- $$\sum_{i=1}^n N_j(\xi_i) w_i = \int_{\Omega_{\text{phy}}} N_j(\xi) d\Omega \quad j = 1, \dots, m$$
- Initialisierung mit n festen Punkten ξ_i und Unbekannten w_i

Thermo-viskoplastisches Modell

Von Mises Plastizität mit thermo-elastischer Kopplung

- Zerlegung der Dehnungen in thermisch, elastisch und plastisch

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{th}} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{e}} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{p}}$$

- Von Mises Fließbedingung mit Dehngrenze σ_f

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}, \bar{\varepsilon}^{\text{p}}, T) = \sigma_{\text{vM}}(\boldsymbol{\sigma}) - \sigma_f(\bar{\varepsilon}^{\text{p}}, T) \begin{cases} < 0 & \text{elastisch } (\dot{\gamma} = 0) \\ \geq 0 & \text{plastisch } (\dot{\gamma} \neq 0) \end{cases}$$

- Viskoplastische Konstitutivgleichung nach [Perzyna, 1971]

$$\dot{\gamma}(\boldsymbol{\sigma}, \bar{\varepsilon}^{\text{p}}, T) = \begin{cases} \frac{1}{\mu(T)} \left[\frac{\sigma_{\text{vM}}(\boldsymbol{\sigma})}{\sigma_f(\bar{\varepsilon}^{\text{p}}, T)} - 1 \right]^{1/m(T)} & , \Phi \geq 0 \\ 0 & , \Phi < 0 \end{cases}$$

mit Relaxionszeit $\mu(T)$ und viskoplastischen Exponent $m(T)$

- Exponentielle isotropische Verfestigung/Erweichung
[Oppermann et al., 2022]

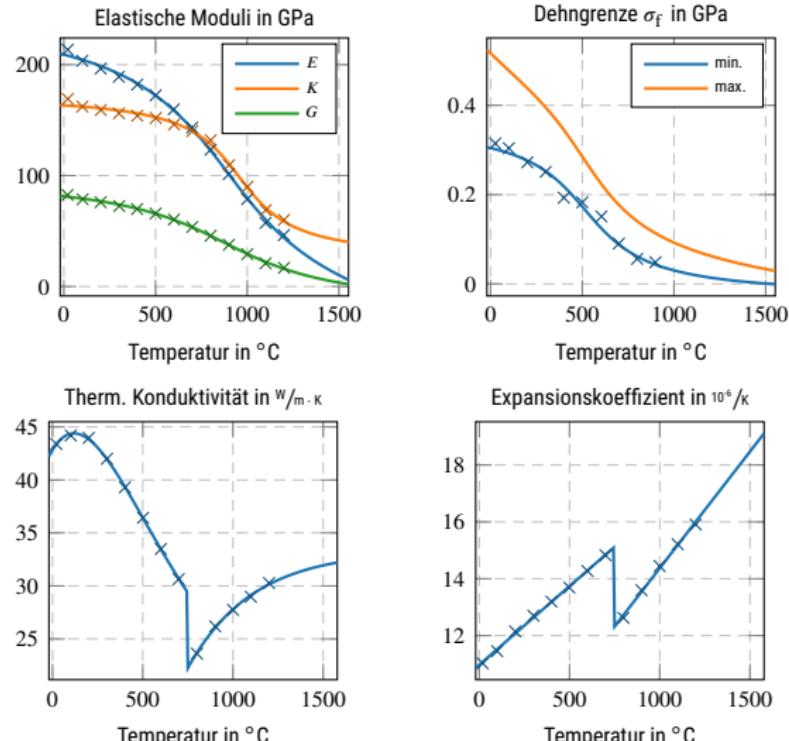


Abb.: Interpolation der Materialparameter für 16MnCr5 Einsatzstahl.

Anwendungsbeispiele

Porosität

Porositätsdefekte

- Unzureichende Verschmelzung in additiven Fertigungsprozessen
- Gasinklusionen und Lunker

Konsequenzen

- Reduktion der Tragfähigkeit
- Erhöhtes Risiko für Rissbildung
- Üblicherweise nicht per Sichtprobe zu entdecken

Analyse via *Finite Cell* Methode

- Zerstörungsfreie Prüfung via Computertomografie (CT)
- CT-Daten direkt geeignet zur Verarbeitung im *Finite Cell* Netz

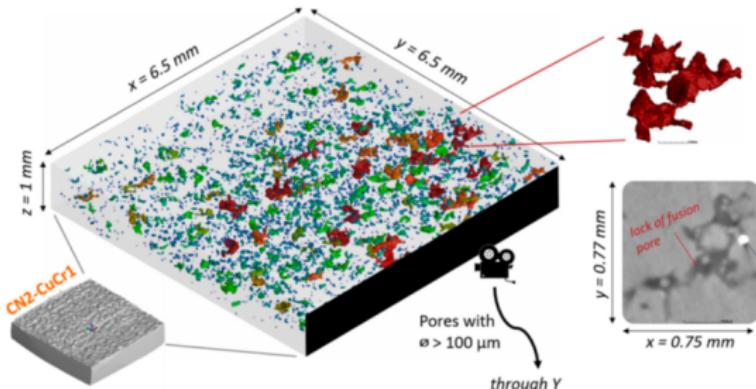


Abb.: CT-Scan von Porositäten im Selektiven Lasersintern (SLS).^a

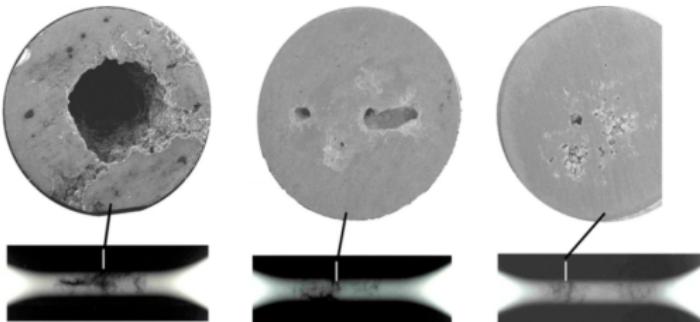


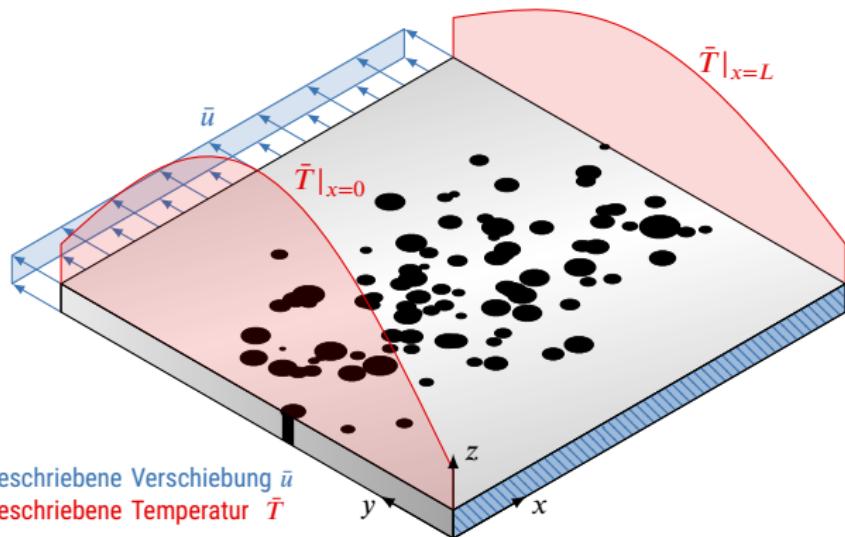
Abb.: CT-Scans von Porositäten in gegossenen Zugproben.^b

^a Sinico, M. et. al. (2021) in Materials, 14(8):1995.

^b Hardin, R.A. et. al. (2007) in Metallurgical and Materials Transactions A, 38(12):2992-3006.

Anwendungsbeispiele

Thermo-viskoplastische Platte mit Porosität



Vorgeschriebene Verschiebung \bar{u}

Vorgeschriebene Temperatur \bar{T}

Abb.: Randbedingungen des thermo-mechanischen Problems.

- Basisnetz aus $10 \times 10 \times 1$ Elementen mit Approximationsordnung $p = 2$
- Deformationsrate $\dot{u} = 0.1 \text{ mm/s}$

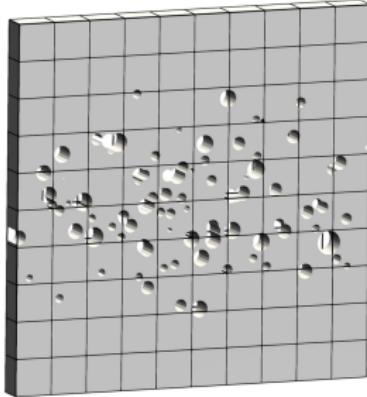


Abb.: Das Basisnetz.

Temperature [°C]

520.0
515.0
510.0
505.0
500.0

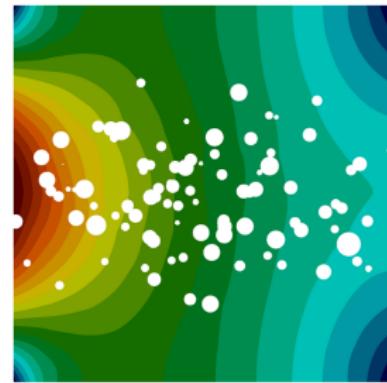
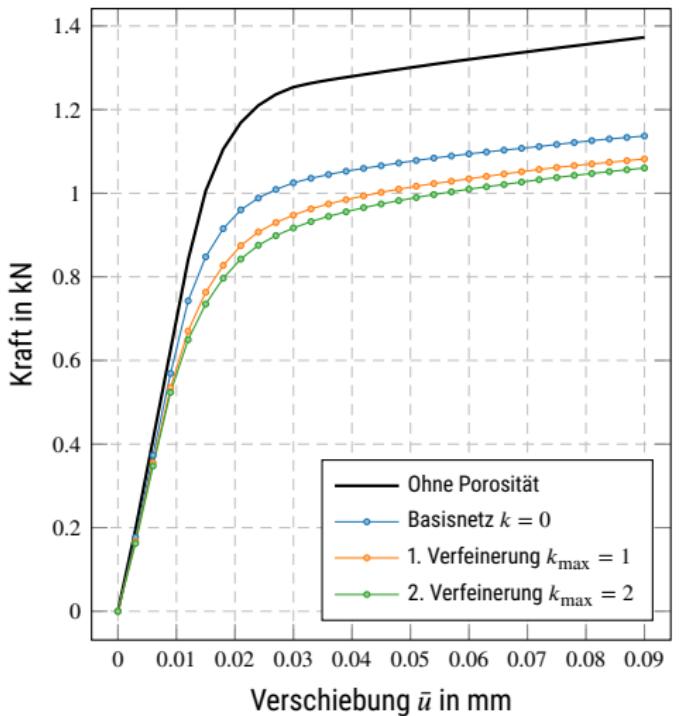


Abb.: Lösung des Temperaturfelds.

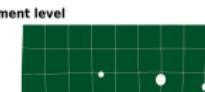
Anwendungsbeispiele

Thermo-viskoplastische Platte mit Porosität



Verfeinerungslevel

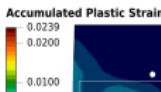
Refinement level



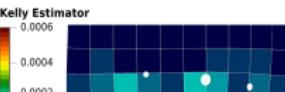
Refinement level



Plastische Dehnung ε^P



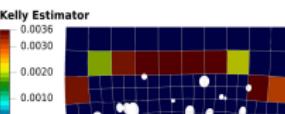
Verfeinerungsmetrik



Refinement level



Accumulated Plastic Strain



Anwendungsbeispiele

Thermo-viskoplastische Platte mit Porosität

Accumulated Plastic Strain

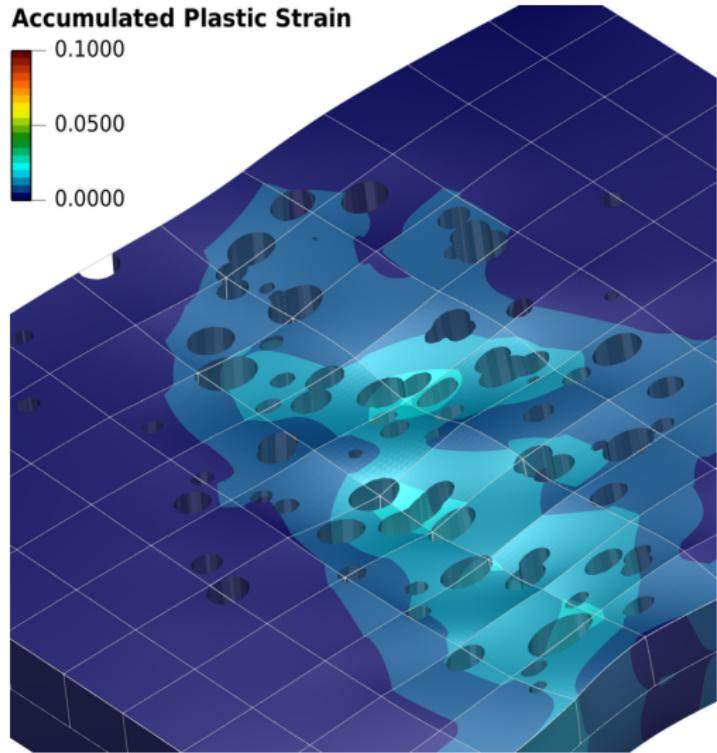
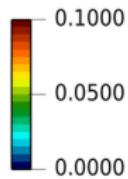


Abb.: Basisnetz (skaliert mit Faktor 30).

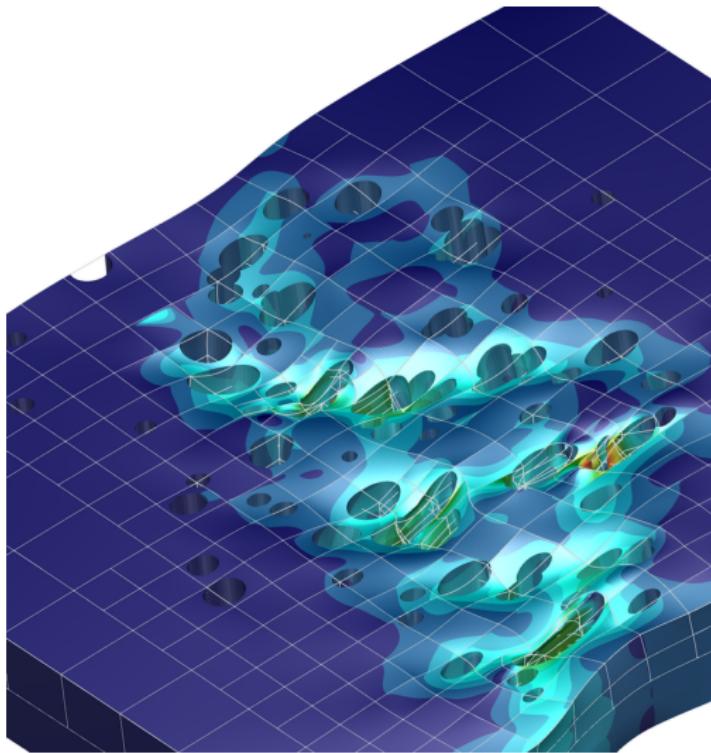


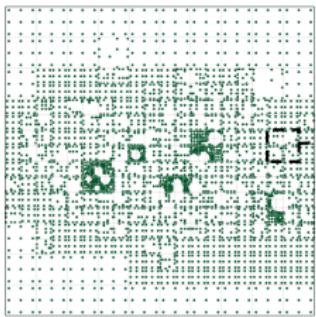
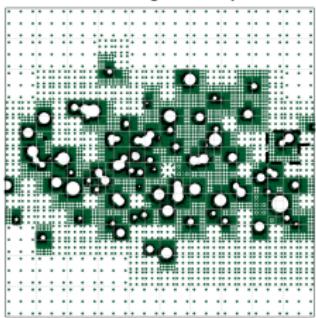
Abb.: 2. Verfeinerung (skaliert mit Faktor 30).

Anwendungsbeispiele

Thermo-viskoplastische Platte mit Porosität

Rekursive Bisektion

769 601 Integrationspunkte



30 295 Integrationspunkte

Non-negative moment fitting

RB → Rekursive Bisektion

NNMF → *Non-negative moment fitting*

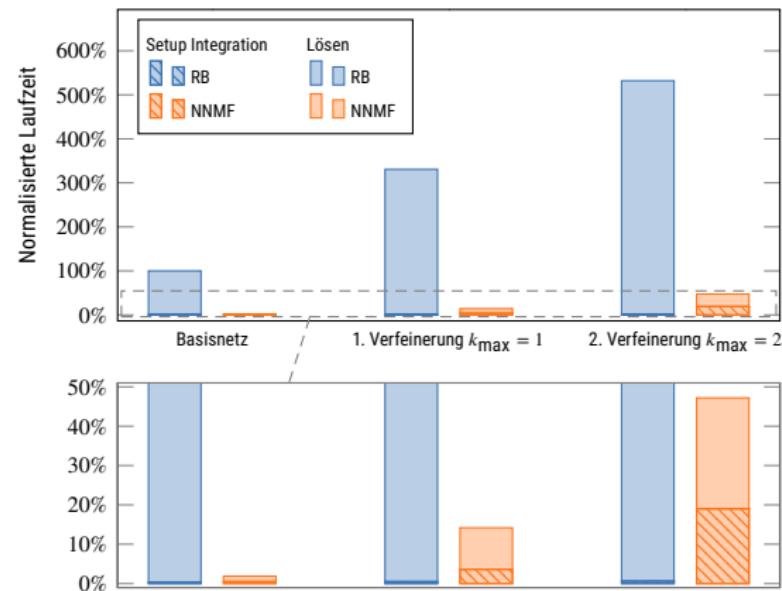


Abb.: Laufzeit der Analyse.

Anwendungsbeispiele

CT-Scan einer Metallschaumpore

- Geometrie durch einzelne Bilder in Grauwerten dargestellt
- Indikatorfunktion $\alpha(x)$ basierend auf den Voxel-Daten

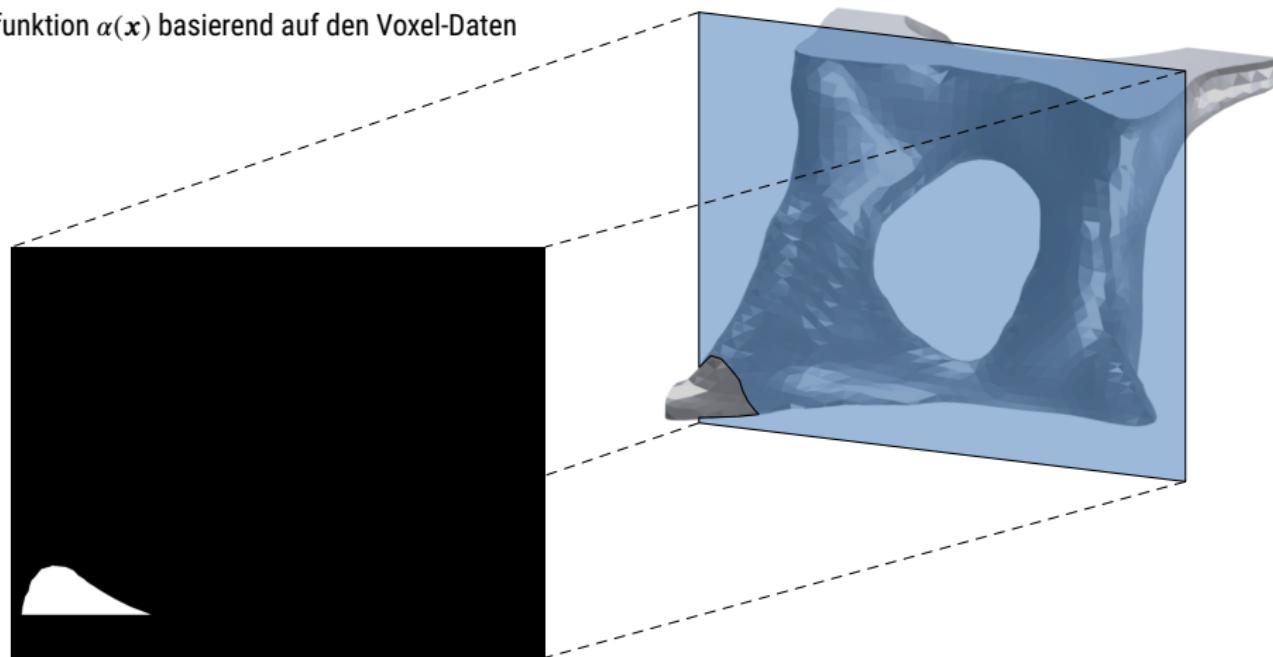


Abb.: Gewinnung der Voxel-Daten durch einzelne Bilder entlang der Tiefe.

Anwendungsbeispiele

CT-Scan einer Metallschaumpore

- Bei gleichmäßiger Temperatur 20°C und 100°C
- Anzahl der Integrationspunkte

Rekursive Bisektion	8 860 050
<i>Non-negative moment fitting</i>	131 715
Reduktion	98.51%

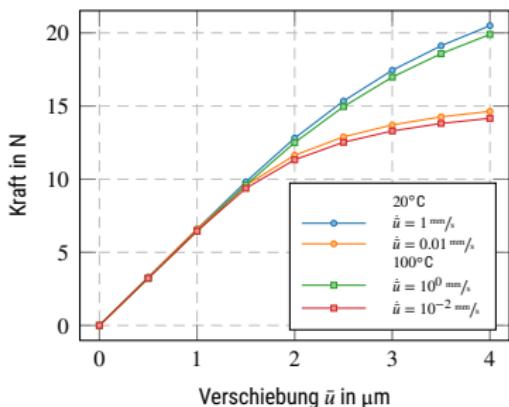


Abb.: Kraft-Verschiebung Diagramm.

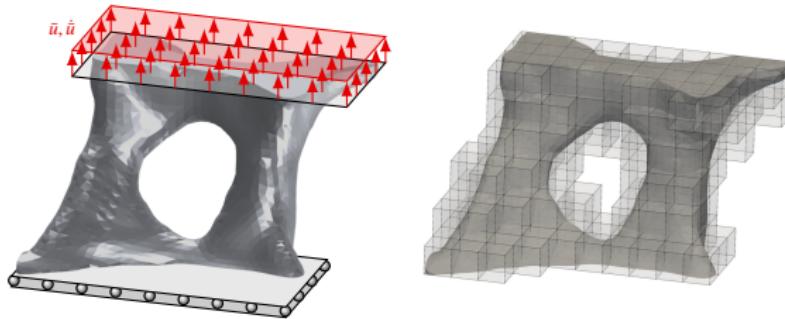


Abb.: Randbedingungen der Metallschaumpore und das Basisnetz.

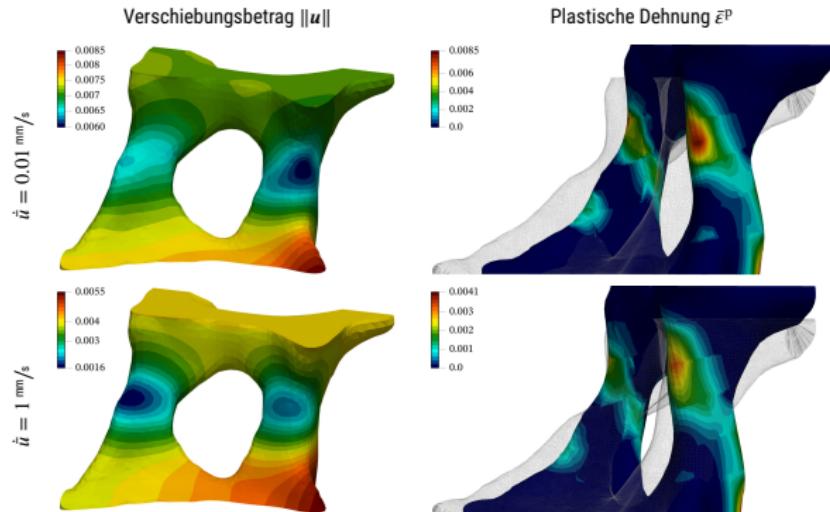


Abb.: Ergebnisse bei 100°C.

Zusammenfassung

- Reduktion der Anzahl von Integrationspunkten: 75% bis 98%
- Reduktion des Rechenaufwands: 30% - 95% (stark Problem-abhängig)
- Effiziente Methode zur Analyse thermo-viskoplastischer Phänomene in komplexen Strukturen
- *Multi-level hp* Verfeinerungen liefern genauere Approximation des plastischen Flusses

Ausblick

- Bi-direktionale thermo-viskoplastische Kopplung und Einbezug nichtlinearer Verformungen
- Spezifische Verfeinerungsmetrik für Viskoplastizität und anisotrope Verfeinerung
- Experimentelle Kriechversuche zur Validierung des Modells an porösen Proben



Deutschlandpreis 2024 des Fachbereichstags Maschinenbau

Erweiterung der multi-level *hp* Finite Cell Methode für eine effiziente thermo-viskoplastische Analyse

Oliver Wege, M.Sc.

wege@cats.rwth-aachen.de

betreut von

Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Ruess

University of Applied Sciences Düsseldorf · Germany

Kaiserslautern, DE · 14. November 2024

Referenzen

-  Oppermann, P., Denzer, R., and Menzel, A. (2022).
A thermo-viscoplasticity model for metals over wide temperature ranges-application to case hardening steel.
Computational Mechanics, 69(2):541–563.
-  Perzyna, P. (1971).
Thermodynamic theory of viscoplasticity.
Advances in applied mechanics, 11:313–354.
-  Schillinger, D. and Ruess, M. (2015).
The finite cell method: A review in the context of higher-order structural analysis of cad and image-based geometric models.
Archives of Computational Methods in Engineering, 22:391–455.
-  Zander, N., Bog, T., Kollmannsberger, S., Schillinger, D., and Rank, E. (2015).
Multi-level hp-adaptivity: high-order mesh adaptivity without the difficulties of constraining hanging nodes.
Computational Mechanics, 55(3):499–517.