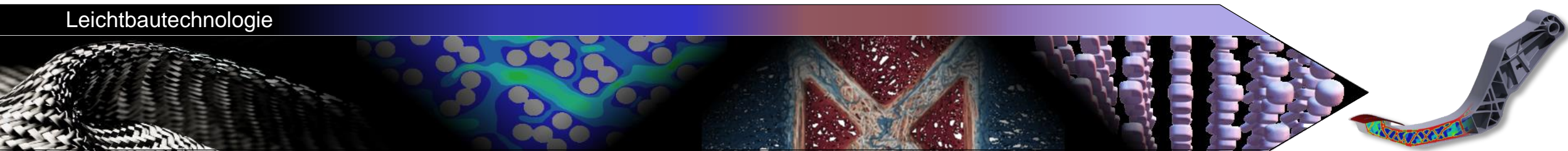


## NAFEMS DACH Regionalkonferenz 2022

CAE-Simulationskette zur Werkzeug- und Prozessauslegung von Carbonfaser-SMC-Bauteilen

Leichtbautechnologie



4. Oktober 2022

Shubham Gorde, Constantin Krauß, Miriam Bartkowiak und Luise Kärger

- Motivation
- Konzept CAE-Kette
- SMC-Fließpresssimulation
- Schnittstellenoperation - Mapping
- Verzugs- und Aushärtensimulation
- Numerische Studie
- Ergebnisse und Diskussion
- Zusammenfassung & Ausblick
- Quellen

# Motivation

## Bauteil- und Prozessdesign für CF-SMC

- Carbonfaserverstärktes SMC (CF-SMC)
  - exzellente gewichtsspezifische Eigenschaften
  - hohe Funktionsintegration.
  - Unzureichende Vorhersagbarkeit der Bauteileigenschaften



© eacc.de

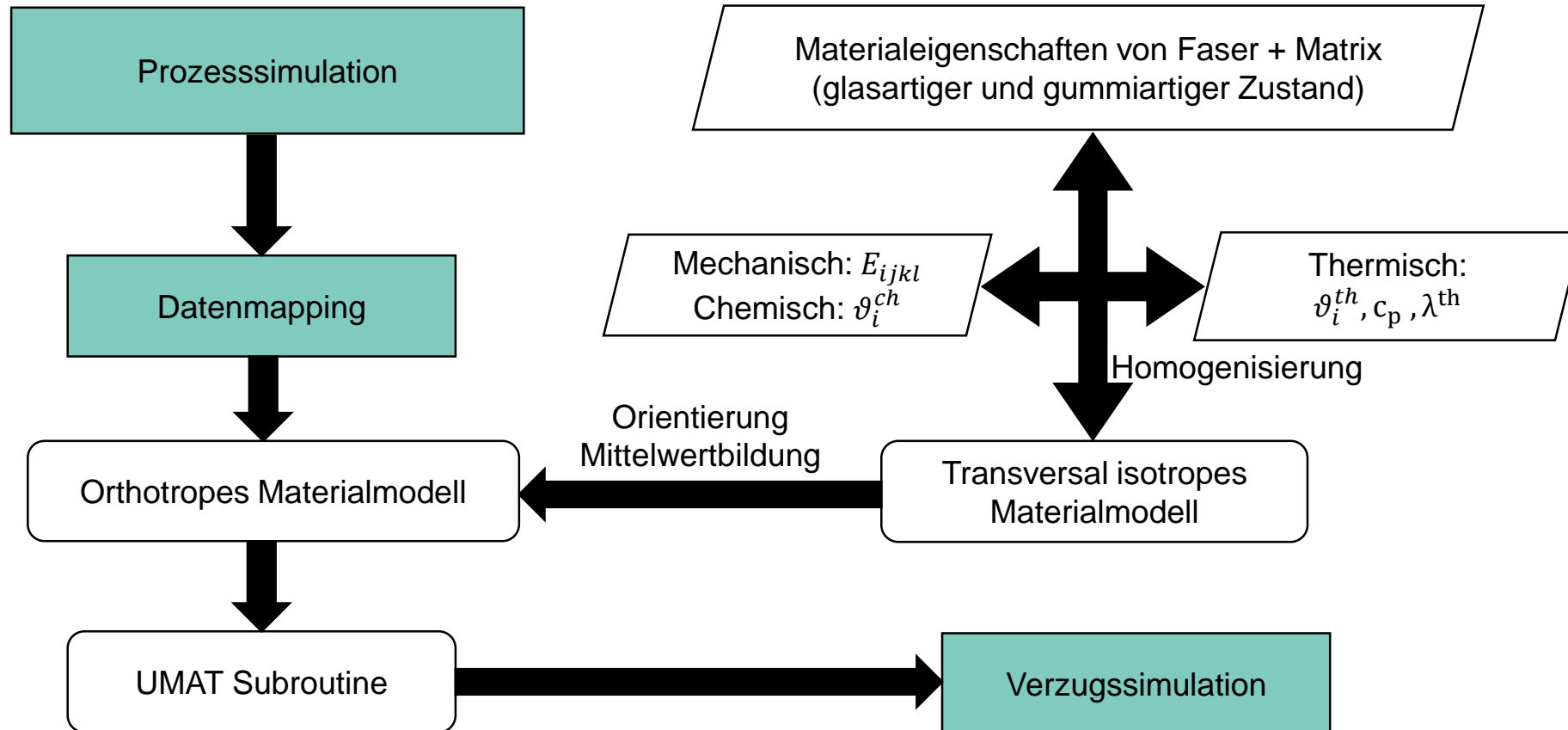
→ kontinuierliche CAE-Kette



- CAE-Kette ermöglicht:
  - individuelle virtuelle Absicherung von Bauteil- und Prozess
  - Berücksichtigung von Fertigungseffekten

# Virtuelle Prozesskette

## Konzept und Datenfluss

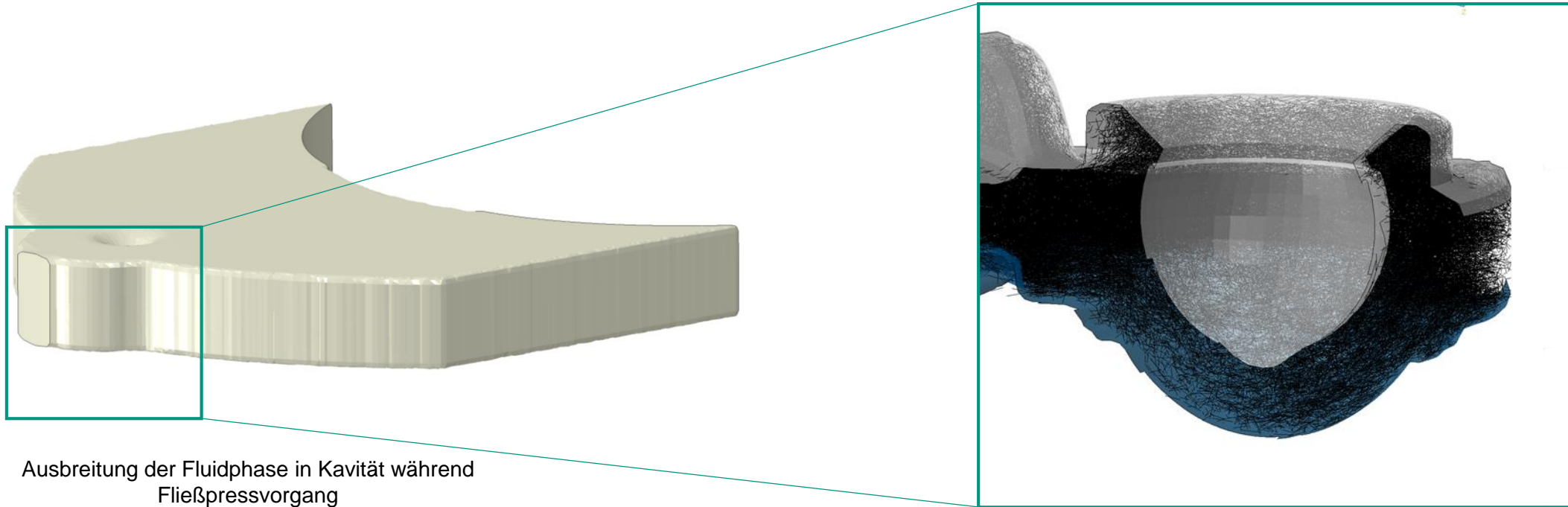


### Datenübertragung für die Verzugsanalyse

# SMC-Fließpresssimulation

## Modellierungsansatz und Ergebnisse

- Mesoskopische Prozesssimulation
  - Betrachtung einzelner Faserbündel innerhalb fluiden Matrix
  - vollständige Struktur-Struktur-Fluid-Kopplung



Ausbreitung der Fluidphase in Kavität während Fließpressvorgang

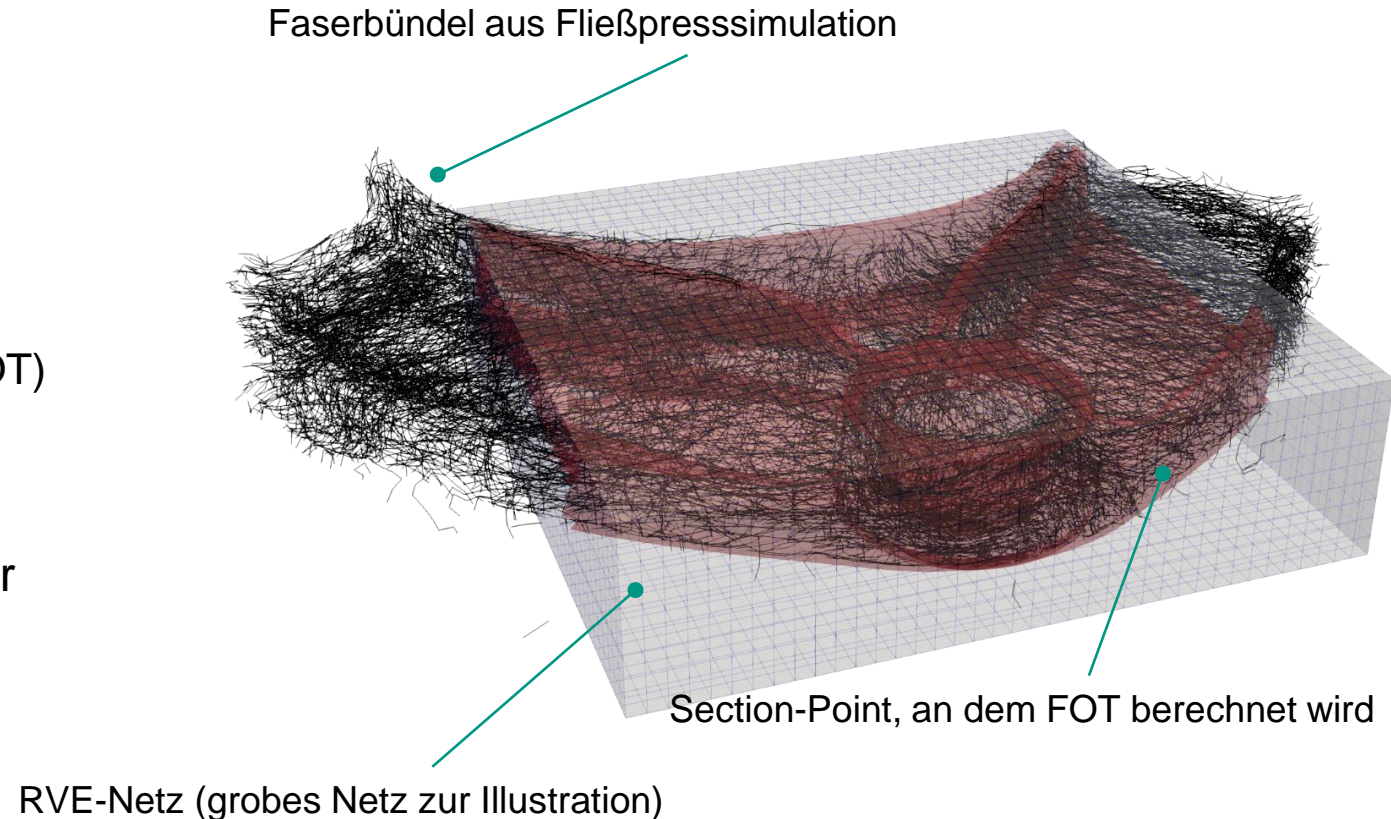
# Mapping der Prozesssimulationsergebnisse

Immersive Methode

## ■ Dreistufiger Prozess

- Einbettung der Geometrie in Voxel-Grid
- Berechnung der statistischen Faserorientierungstensoren (FOT)
- Mapping auf Verzugsnetz

→ ermöglicht Verwendung von feiner Diskretisierung in Verzugsnetz





# Verzugs- und Aushärtessimulation

Thermo-chemo-mechanische Materialmodellierung

- Verzugssimulation mit Informationen aus Formfüllsimulation und Materialzustand.
- CHILE Modell für Matrix[4, 5]:

$$\sigma(t) = \int_0^t E(\xi) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi = \int_0^t E(T, \alpha) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi$$
$$E(T, \alpha) = \begin{cases} E_r, & T_g(\alpha) - T < \Delta T_{c_1} \\ E_r + \frac{T_g(\alpha) - T - \Delta T_{c_1}}{\Delta T_{c_2} - \Delta T_{c_1}} (E_g - E_r), & \Delta T_{c_1} \leq T_g(\alpha) - T \leq \Delta T_{c_2} \\ E_g, & T_g(\alpha) - T > \Delta T_{c_2} \end{cases}$$

$E(T, \alpha)$  : Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von Temperatur  $T$  und Aushärtungsgrad  $\alpha \in [0; 1]$ .

$\sigma(t)$  : Spannung,  $E_r$  &  $E_g$  : gummiartiger und glasartiger Modul,  $T_g$ : Glasübergangstemperatur

# Verzugs- und Aushärtensimulation

Modellierung der exothermen Aushärtereaktion

- Aushärtungskinetik mit Kamal-Malkin-Modell [8]

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha)^n$$

Empirische Parameter :  $m, n$ . Parameter  $K_1$  und  $K_2$  -- durch eine Arrhenius-Approximation

$$K_i = A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T}\right)$$

$A_i, E_i$  und  $R$  : Zeitkonstante, Aktivierungsenergie und universelle Gaskonstante.

- Mechanische, thermische und chemische Dehnung berücksichtigt:

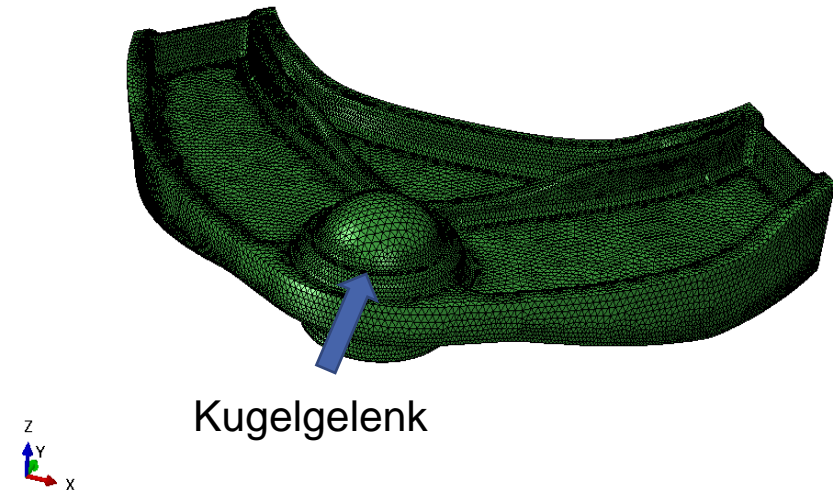
$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij}^{mech} + \Delta\varepsilon_{ij}^{th} + \Delta\varepsilon_{ij}^{ch}$$



### Thermo-mechanische Simulation in ABAQUS

- Vernetzung in HYPERMESH
- Input Verzuganalyse:
  - Faserorientierung
  - Temperatur
  - Aushärtungsgradverteilung
- Anfangstemperatur ist vorgegeben
- UMAT-Subroutine für orthotropes Materialmodell und Inhouse Mapping Tool wurde verwendet.
- Simulationsschritte:
  1. Formhalten
  2. Aushärten
  3. Abkühlen: Freie oder erzwungene Konvektion

### SMC Querlenker-Ausschnitt



Kugelgelenk

# Numerische Studie

## Vollfaktorielle Untersuchung

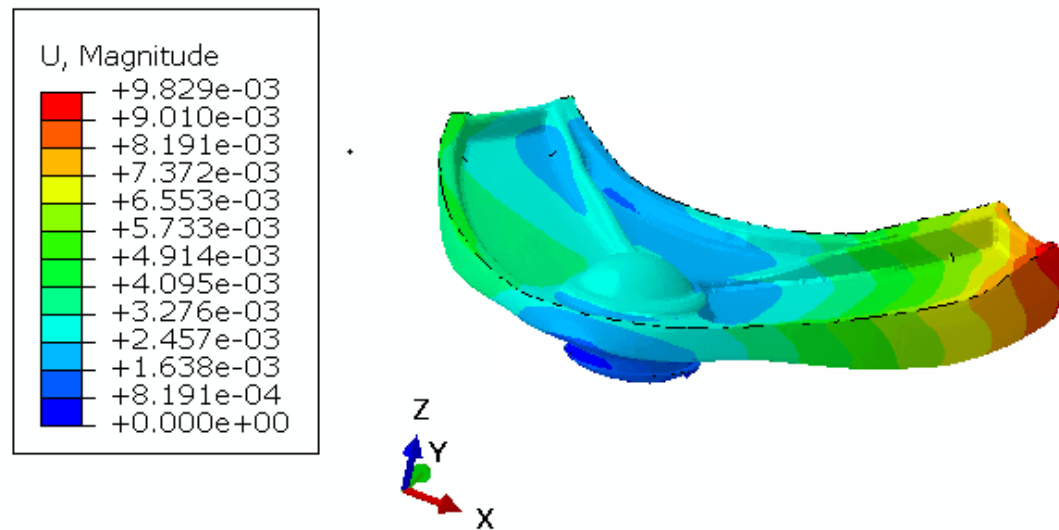
- Aushärtungstemperatur ( $T_c$ ), Aushärtungszeit ( $t_{cure}$ ) und Konvektionsfilmkoeffizient ( $h$ ) - variieren zwischen einzelnen Simulationen.

Aushärtungstemperatur $T_c$ (°C)	Aushärtungszeit $t_{cure}$ (min)	Konvektionsfilmkoeffizient $h$ ( $\frac{W}{m^2K}$ )
140	15, 20, 25, 30	15, 20, 50
145	15, 20, 25, 30	15, 20, 50
150	15, 20, 25, 30	15, 20, 50

konstante Wärmeübergangskoeffizient und Aushärtungstemperatur,  $t_{cure}$  ↓ , Verschiebung ↑

$$t_{cure} = 1 \text{ min}, T_c = 140^\circ\text{C}, h = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

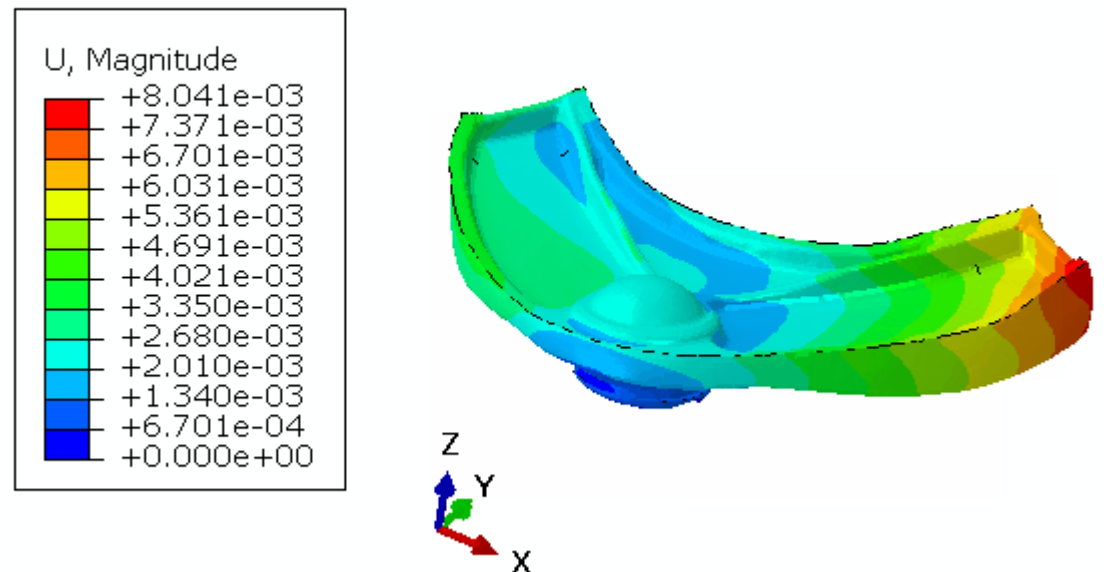
Verschiebung in m



$$t_{cure} = 15 \text{ min}, T_c = 140^\circ\text{C}, h = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

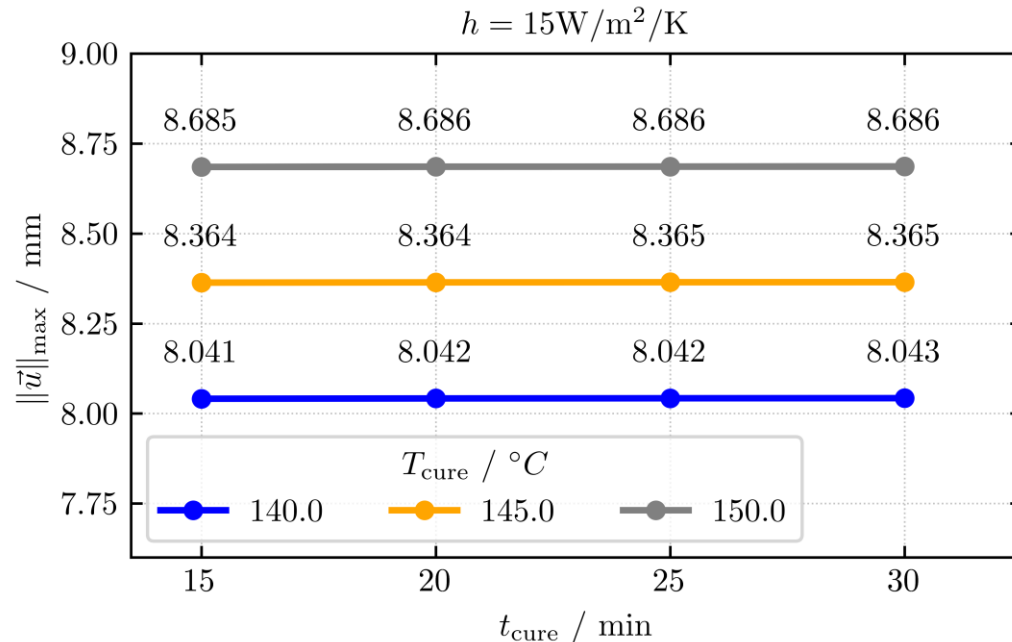
Verschiebung in m

18.19% Abnahme



Verformung des Modells bei Aushärtungszeit 1 min (links) und Aushärtungszeit 15 min (rechts)

### konstanter Wärmeübergangskoeffizient

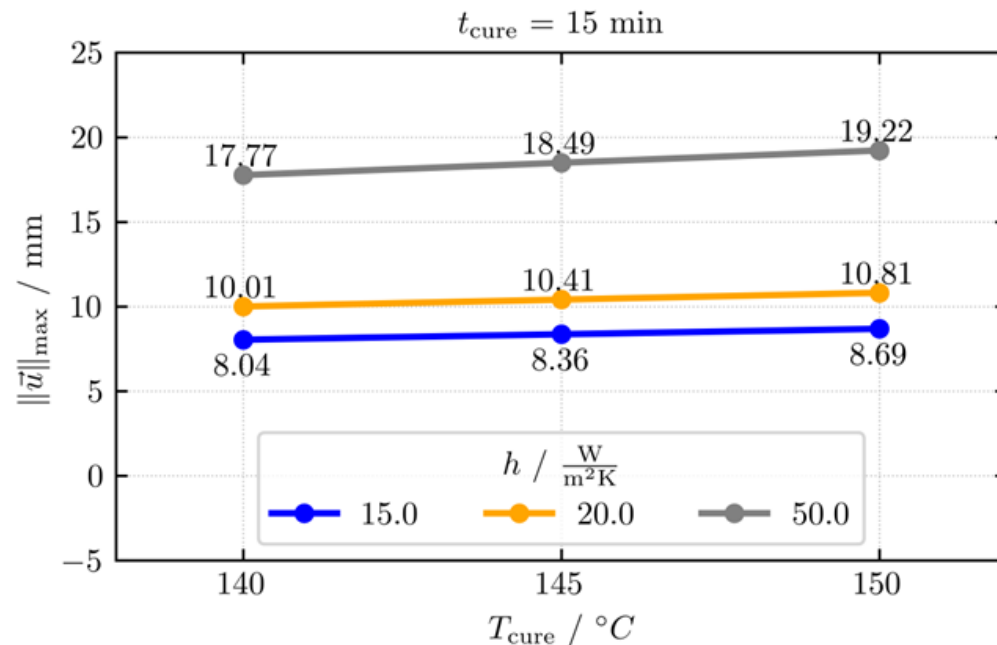


Einfluss der Aushärtungszeit und -temperatur auf die Verschiebung

### Interpretation

- Daumenregel: 1 min/ 1 mm  $\rightarrow$  20 min
- Konstanter Filmübergangskoeffizient von
$$h = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$
- **keine nennenswerte Auswirkung** auf den Verzug beobachtbar in den vorgegeben Aushärtgrenzen zwischen 15 und 30 Minuten.
- Vollständige Aushärtung des Materials bereits vor 15 min.

### konstante Aushärtezeit



Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten und der Aushärtungstemperatur auf die Verschiebung

### Interpretation

- **Kopplung** zwischen Prozessparametern Aushärtetemperatur und Wärmeübergangskoeffizient beobachtbar
- Erhöhter Wärmeübergangskoeffizient ermöglicht ein schnelleres Abfließen der Wärme über die Bauteiloberfläche → Zunahme des thermochemischen Verzugs.
- Zwischen Aushärtetemperatur und Verzug: linear approximiert.
- Reduktion des Wärmeübergangskoeffizienten → Abnahme der Aushärtetemperatursensitivität

# Zusammenfassung & Ausblick

- Orthotropes CHILE-Modell mit Mapping von Prozessfeldern – erfasst Verzug von faserverstärkten SMC-Bauteilen in Abhängigkeit von Prozessverständnis, Prozessparametern, Faserorientierungsverteilung und Aushärtungsreaktion.
- Weitere Untersuchungen zu Materialparametern und Verzugsexperimente mit SMC-Bauteilen müssen durchgeführt werden, um die Methode zu validieren.
- Langfristiges Ziel: Optimierung der Prozesse/Strukturen in der Industrie.

1. Görthofer, Johannes, et al. "Virtual process chain of sheet molding compound: Development, validation and perspectives." *Composites Part B: Engineering* 169 (2019): 133-147.
2. Meyer, N., et al. "Direct Bundle Simulation approach for the compression molding process of Sheet Molding Compound." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 132 (2020): 105809.
3. Bernath, Alexander, et al. "Experimental and numerical study of the spring-in of angled brackets manufactured using different resins and fiber textiles." *Journal of Composite Materials* 53.28-30 (2019): 4173-4188.
4. A. Johnston, "An Integrated Model of the Development of Process-Induced Deformation in Autoclave Processing of Composite Structures," Dissertation, University of British Columbia, 1997
5. Johnston, A., Vaziri, R., & Poursartip, A. (2001). A plane strain model for process-induced deformation of laminated composite structures. *Journal of composite materials*, 35(16), 1435-1469.
6. Bernath A. Numerical prediction of curing and process-induced distortion of composite structures: Doctoral Thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT); 2020.
7. Adolf D, Martin JE. Calculation of Stresses in Crosslinking Polymers. *Journal of Composite Materials* 1996;30(1):13–34.
8. M. R. Kamal and S. Sourour, "Kinetics and thermal characterization of thermoset cure," *Polymer Engineering and Science*, vol. 13, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1973
9. <https://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/en/documents/pressreleases/2022/Press%20release%20Eco%20Dynamic%20SMC%20Project.pdf>
10. Wolf, Klaus, et al. "MpCCI: Neutral interfaces for multiphysics simulations." *Scientific Computing and Algorithms in Industrial Simulations*. Springer, Cham, 2017. 135-151.



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Die präsentierten Forschungsergebnisse sind Resultate der Förderung durch

- Bundesministerium für Energie und Klimaschutz (BMWK) durch das Forschungsprojekt *EcoDynamicSMC*
- der Vector-Stiftung innerhalb der Young Investigator Group *Green Mobility*



Kontakt

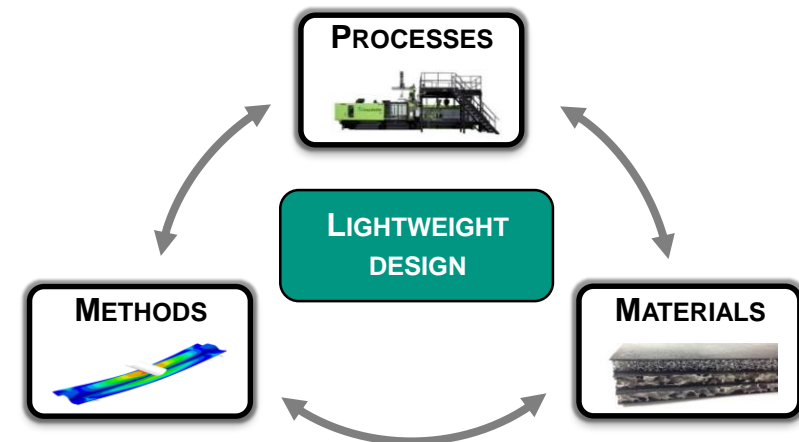
**Shubham Gorde, M. Sc.**

shubham.gorde@kit.edu

+49 721 608-45383

**KIT** | Karlsruher Institut für Technologie  
Institute für Fahrzeugsystemtechnik – Digitalisierung im Leichtbau  
Rintheimer Querallee 2 | Geb. 70.04  
76131 Karlsruhe

Lightweight Design Network



[www.leichtbau.kit.edu](http://www.leichtbau.kit.edu)