

# Beton aus dem 3D-Drucker

Modellierung und Simulation eines additiven Betondruckprozesses unter stochastischer Betrachtung von Material- und Prozessparametern

A. Schmidt<sup>1</sup>, T. Lahmer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

<sup>2</sup> Bauhaus-Universität Weimar, Institut für Strukturmechanik



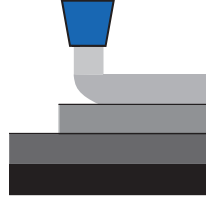
## Motivation

voll-digitalisierte, automatisierte Produktion

Kostenreduktion durch Personal- und Materialersparnis

Komplexe Formen auch ohne teure Schalung möglich, z.B. für Topologieoptimierung

- Anwendung eines **Extrusionsverfahrens**
- schichtweises** Ablegen von zementhaltigem Material
- Komponenten: Pumpe, Extrusionsdüse, Bewegungseinheit, Steuerung



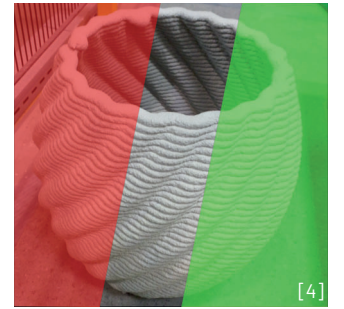
## Stand und Probleme



- Wahl von Material- und Prozessparametern durch **Trial-and-Error-Versuche**
- natürliche Variation** führt zu Unregelmäßigkeiten
- Prognose des komplexen, **zeitabhängigen Verfahrens** (z.B. Aushärten des Betons) schwierig

## Konzept

- zeitlich abhängiges **numerisches Modell** des Druckprozesses
- Stochastische **Material- und Prozessparameter**
- Zuverlässigkeitsanalyse: fail / safe**, Abschätzung einer **Versagenswahrscheinlichkeit**

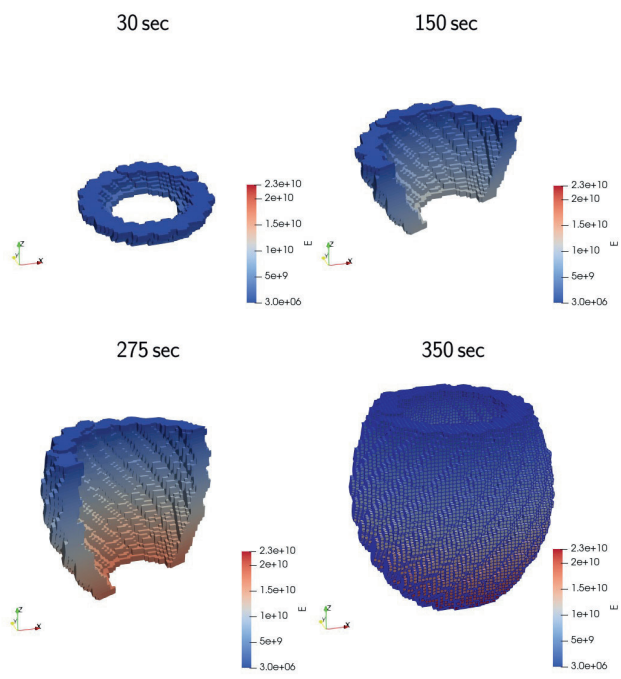


## FE-Modell

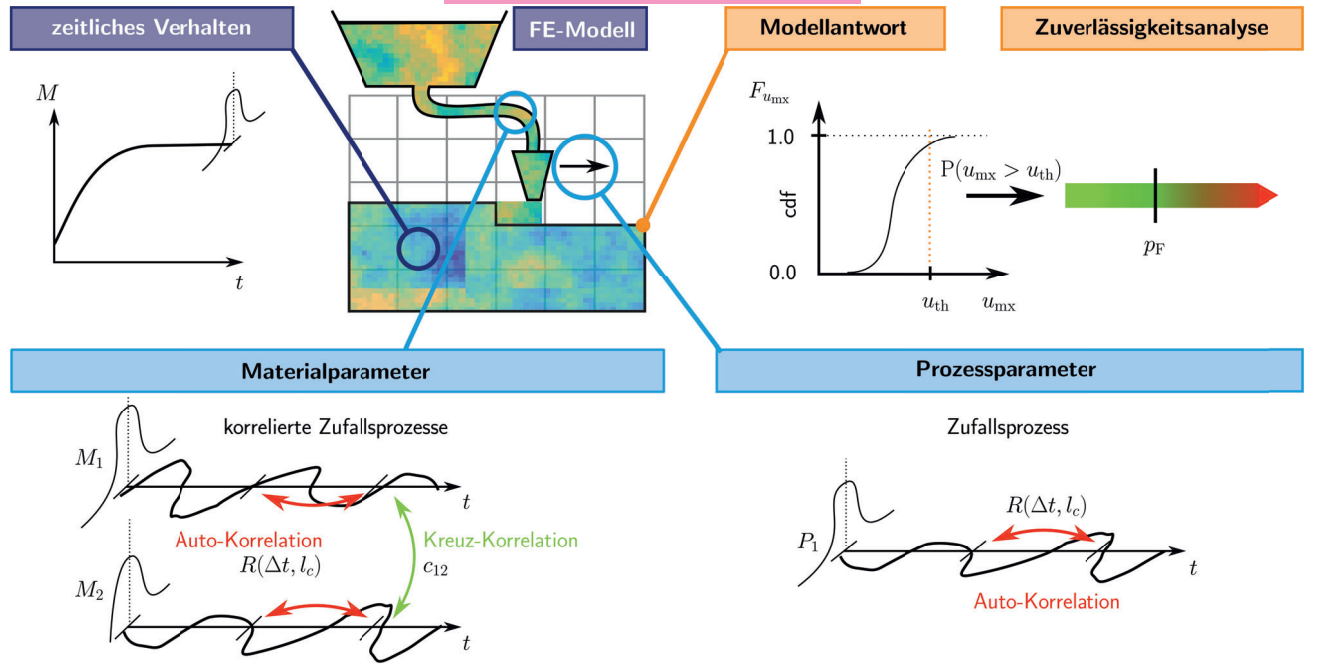
- struktur-mechanisches **Finite-Elemente-Modell (FE-Modell)**
- Geometrie: 3D, "Vase", ca.  $d = 0.2 \text{ m} \dots 0.4 \text{ m}$ ,  $h = 0.4 \text{ m}$
- Netz: 50k **Voxel-Elemente**, **schichtweise Element-Aktivierung**
- Belastung: **Eigengewicht** mit konst.  $\rho = 2020 \text{ kg/m}^3$
- Materialverhalten:** linear-elastisch, **zeit- ( $t$ )** und **ortsabhängig ( $\vec{r}$ )**, skaliert über Pseudo-Dichte  $\tilde{\rho}$ 
  - zeit-abhängige Steifigkeit **E-Modul**:  $E(\vec{r}, t) = \tilde{\rho}(\vec{r})E_0(\vec{r}) + E_1 \cdot t$
  - zeitabhängige **Bruchspannung**:  $\sigma_{y,i}(\vec{r}, t) = \tilde{\rho}(\vec{r})\sigma_{y,0}(\vec{r}) + \sigma_{y,1} \cdot t$
- Prozess-Parameter:**
  - konst. Druck-Geschwindigkeit  $v_p = 200 \text{ mm/s}$ , Schichtdicke 7 mm
  - Pseudo-Dichte  $\tilde{\rho} \in [0, 1]$**  zur Modellierung einer variablen Materialstromdichte  $Q_m(t) = \frac{Q_m(t)}{Q_{m,0}} \rightarrow \tilde{\rho}$ ,  $Q_m \in [0, Q_{m,0}]$



FE Ergebnisse: **Zeitabhängiges E-Modul**

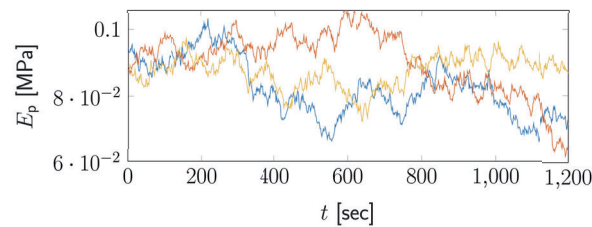


## Gesamtschema



## Material- und Prozessparameter

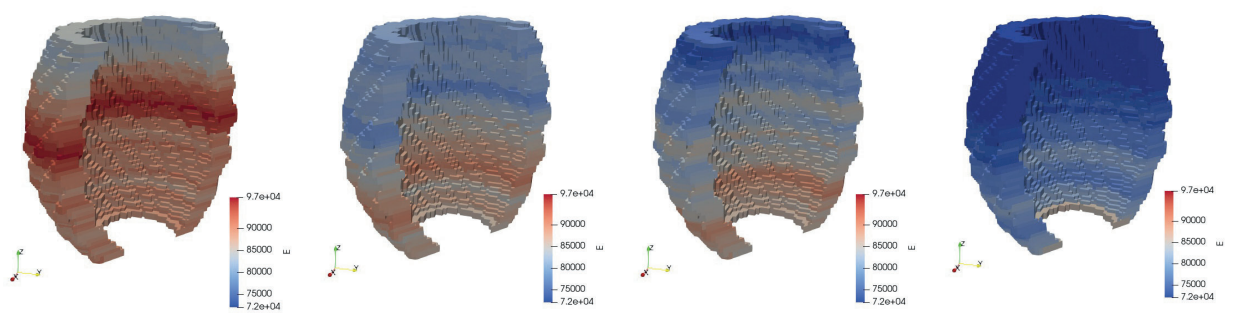
Stichproben des Zufallsprozesses für E-Modul des **gepumpten Materials**



Stochastische Materialbeschreibung

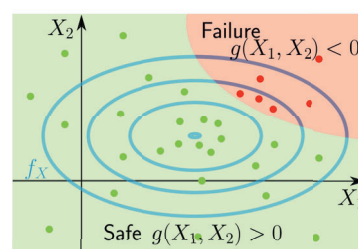
- Zufallsprozess  $E_p(t)$**  beschreibt Materialparameter des gepumpten Materials
- Abbildung des Zufallsprozesses auf den ortsabhängigen Materialparameter als **Zufallsfeld  $E_0(\vec{r})$**
- Erzeugung von  $N_s$  Stichproben (samples)** zur stochastischen Analyse

Stichproben des Zufallsfeldes für E-Modul des **gedruckten Materials**

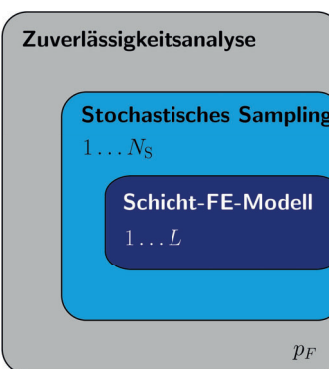


## Zuverlässigkeitsanalyse

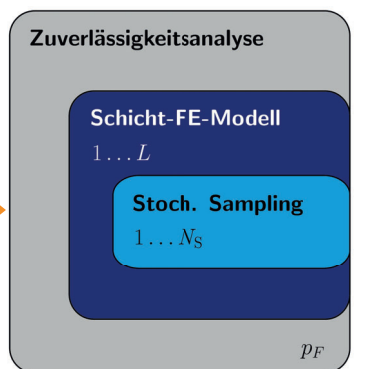
- Definition eines **Versagenskriteriums**: Grenzzustandsfunktion  $g(\vec{X})$
- Versagenswahrscheinlichkeit**  $p_F = \text{Prob}[g(\vec{X}) < 0] = \int_{g(\vec{X}) < 0} f_{\vec{X}} d\vec{X}$
- Approximation durch **Monte-Carlo-Sampling** ( $N$  zufällige Stichproben):  $p_F = N_F/N$  wobei  $N_F$  Anzahl der Failure-Samples ist  
Eingesetzte, effizientere Verfahren: z.B. Subset-Simulation, Importance-Sampling
- Festlegung einer **tolerierbaren Versagenswahrscheinlichkeit**: z.B.  $p_F < 1 \times 10^{-4}$
- Beispiel** Versagenskriterium: max. Deformation  $\epsilon_{th}$ :  $g(\vec{X}) = \epsilon_{th} - \epsilon_{max}(\vec{X})$ , mit  $\vec{X}$  als Vektor der Zufallsvariablen des Zufallsprozesses



Stochastisches **Standard-Schema**



**Schichtweise-stochastisches Schema**



Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystr. 9  
99423 Weimar  
Web: www.mfpa.de

Ansprechpartner:  
Albrecht Schmidt  
Telefon: +49(3643)564-408  
E-Mail: albrecht.schmidt@mfpa.de



Quellen Literatur



Deutsche Forschungsgemeinschaft



Website

