


Experiment-basierte Simulationsverfahren zur Herstellung und zur Versagens- wahrscheinlichkeit von Feuerfestbauteilen

Gerhard Seifert, Stefanie Kimmig, Heiko Ziebold

Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL,
Bayreuth

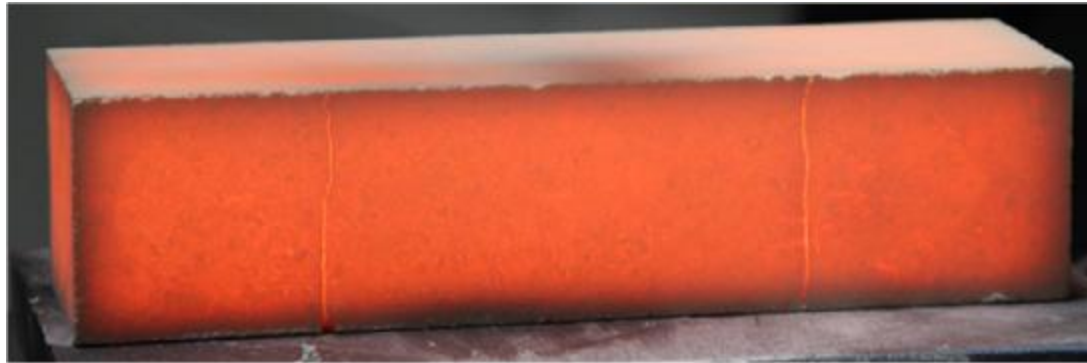
3. Freiburger Feuerfest-Symposium, 25. April 2018

© Fraunhofer



 **Fraunhofer**
ISC / Zentrum HTL

Inhalt



- n Teil 1: Versagenswahrscheinlichkeiten von FF-Bauteilen**
 - n Motivation**
 - n Konzept experiment-basierter Simulationen**
 - n Ergebnisbeispiele an Feuerfeststeinen**

- n Teil 2: Simulationen zur Optimierung der FF-Herstellung**
 - n Motivation**
 - n Konzept zur FE-Simulation von Prozesskinetik**
 - n Beispiel: Entbinderung von Schamottesteinen**

- n Zusammenfassung**

Lebensdauersimulation Feuerfest – Motivation

- n Generell: Kosten-, Energie- und CO₂-Minimierung durch Nutzung der maximalen Lebensdauer von Feuerfest-Bauteilen**
- n Speziell: „einfache“ Methode zur Vorhersage der Versagenswahrscheinlichkeit (P_f) von FF-Steinen / geformten FF-Komponenten**
 - n flexibel: Materialien, Bauteilform, Lastfall**
 - n auf Basis etablierter Versagensmodelle**
 - n Beschränkung auf thermomechanische Lasten**
 - n experimentelle Validierung der Vorhersage**

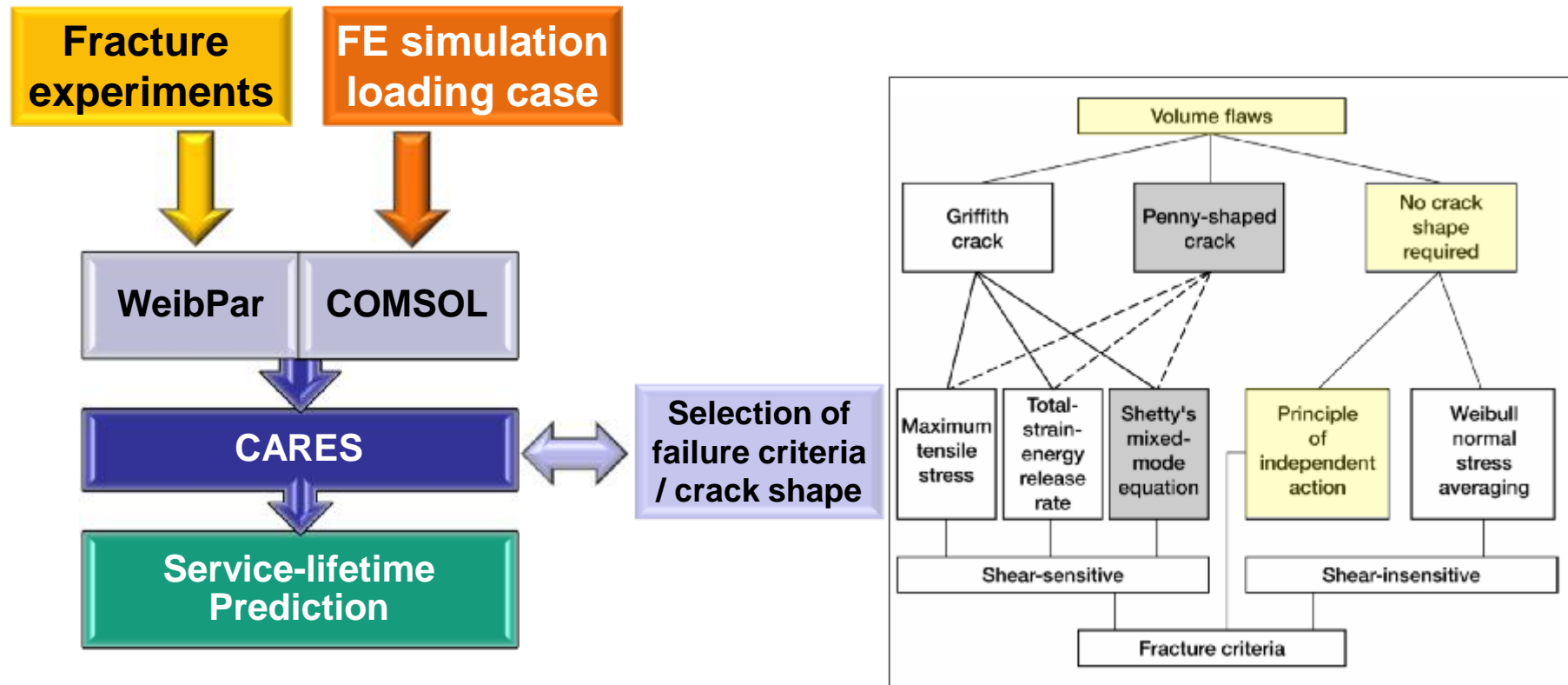
Lebensdauersimulation Feuerfest – Konzept

- n **Nutzung einer etablierten Methodik für Technische Keramik⁽¹⁾:**
 - n Annahmen: Volumendefekte dominieren Bruchverhalten, Degradation durch unterkritisches Risswachstum (subcritical crack growth - SCG)
 - n Statische Parameter (Weibull) aus „fast fracture“ Biegebruchversuchen
 - n Ermüdungsparameter n , B_0 (für SCG) aus Biegebruchversuchen mit verschiedenen Belastungsraten ermittelt
 - n Lastfall für die Komponenten durch FE-Simulation nachgestellt
 - à Vorhersage der lastspezifischen Versagenswahrscheinlichkeit

- n **Eingesetzte Software Tools:**
 - n **CARES** *life* (**C**eramics **A**nalysis and **R**eliability **E**valuation of **S**tructures)
 - n Finite-Elemente-Simulationen à **COMSOL** Multiphysics

(1) *Lifetime Reliability Prediction of Ceramic Structures Under Transient Thermomechanical Loads*, Noel N. Nemeth, N.N.; Jadaan, O.M.; Gyekenyesi, J.P., NASA/TP-2005-212505, **2005**

Lebensdauersimulation Feuerfest – Übersicht



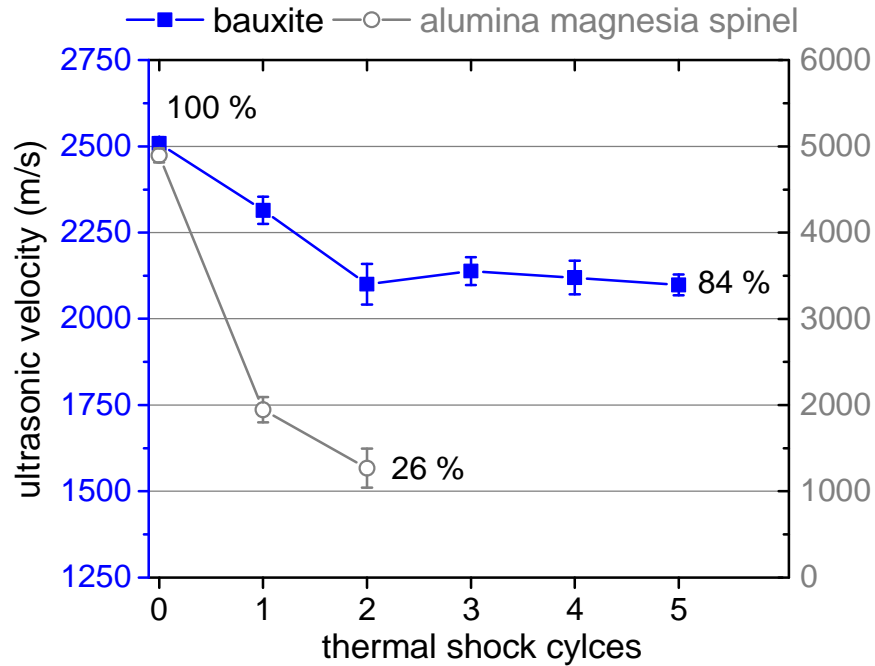
source: *Lifetime Reliability Prediction of Ceramic Structures Under Transient Thermomechanical Loads*, Noel N. Nemeth, N.N.; Jadaan, O.M.; Gyekenyesi, J.P., NASA/TP-2005-212505, 2005

Materialauswahl und Experimente

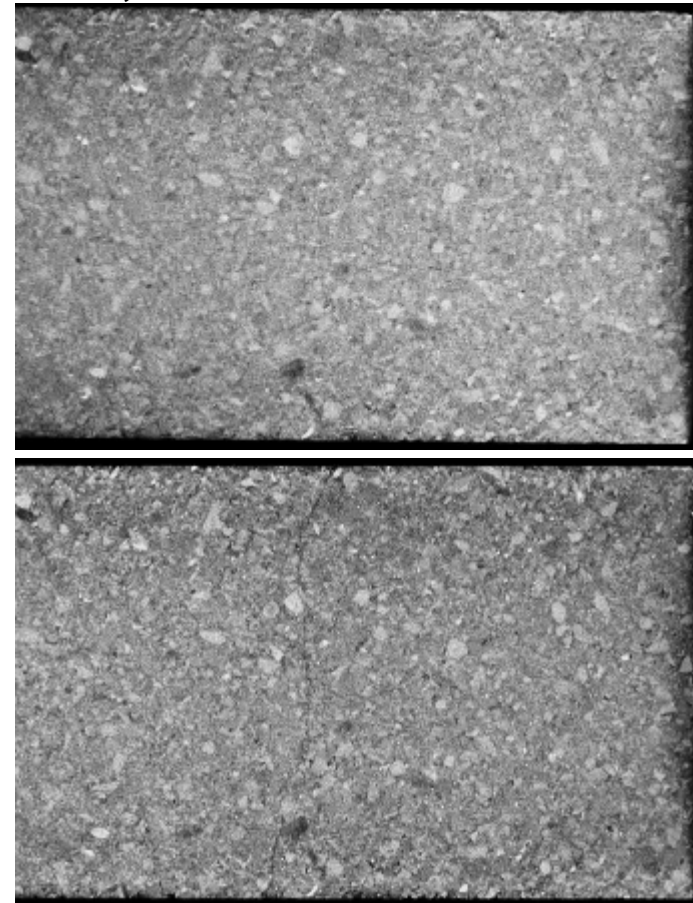
- n Bauxitsteine mit hoher Thermoschock-Beständigkeit (Alurath B80)**
- n Thermoschock-Messungen**
 - n normgerecht gemäß DIN EN 993-11 (5x, 950°C bis RT, Luft)
 - n Messung der Ultraschallgeschwindigkeit nach jedem Thermoschock
- n 3-Punkt-Biegeversuche (B80 Stäbchen, 19x19x60 mm³), Variation von:**
 - n Temperatur – Raumtemperatur (RT) und 800°C (HT)
 - n Belastungsrate zwischen 0.001 MPa/s und 10 MPa/s
 - n "Stufentest" als zeitabhängiger Lastfall
- n Bestimmung der Massendichte der Biegestäbchen**

Thermoschockversuche, Bauxit B80

Ultraschallgeschwindigkeit



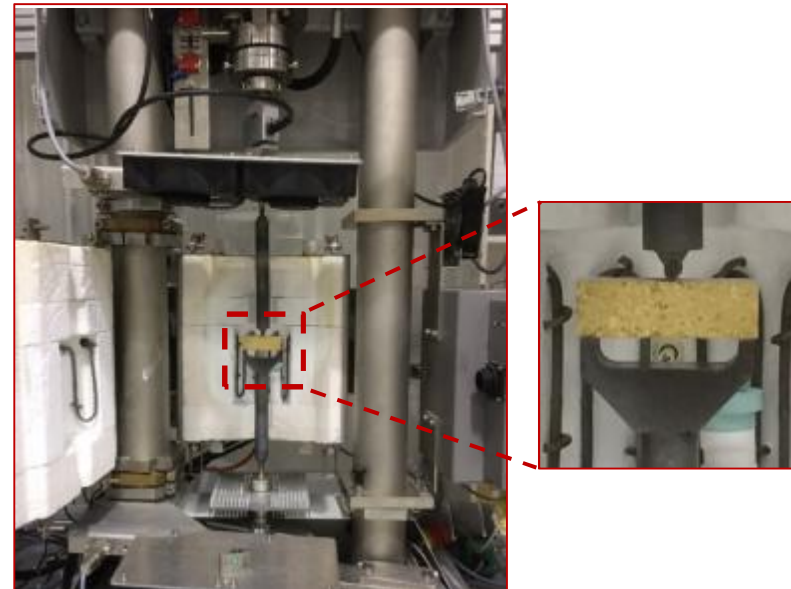
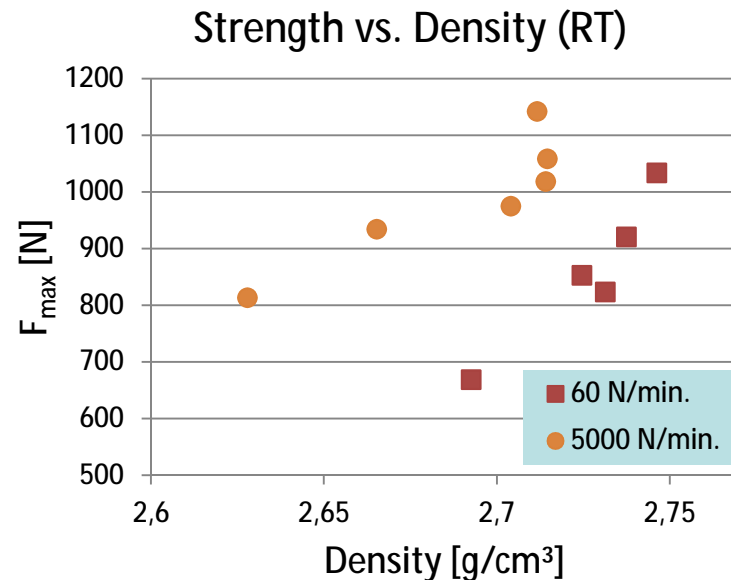
Computertomografie (CT) B80, neu



nach 5 Thermoschock-Zyklen

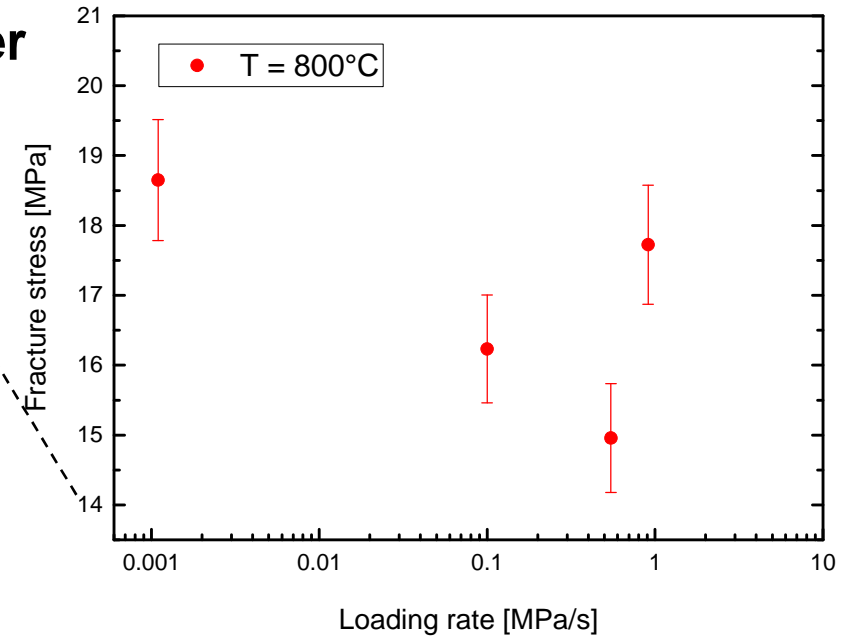
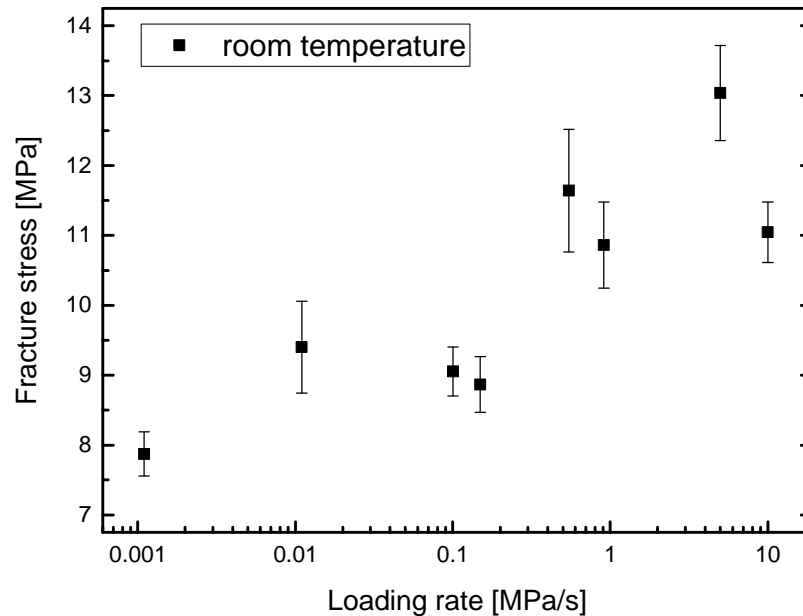
n beide Verfahren zeigen, dass unterkritisches Risswachstum vorhanden

Vorversuche: 3-Punkt-Biegefestigkeit und Dichte der Biegestäbchen



- n Korrelation zwischen Dichte und Festigkeit
- n deutet ebenfalls auf Volumendefekte als bruchauslösend

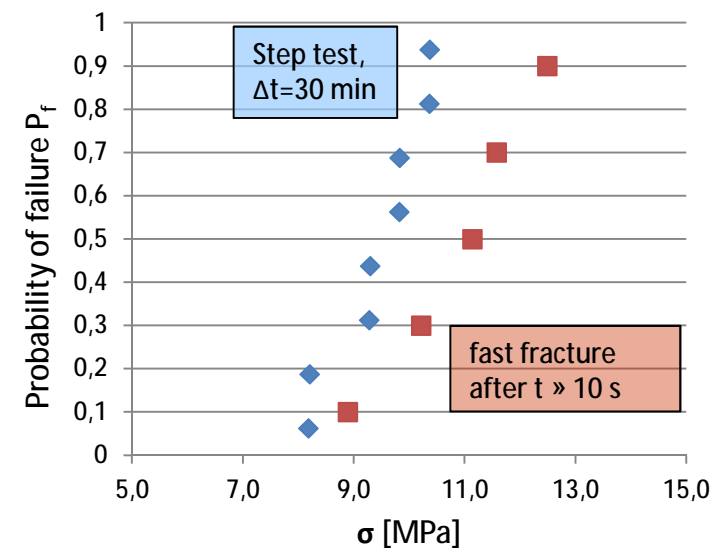
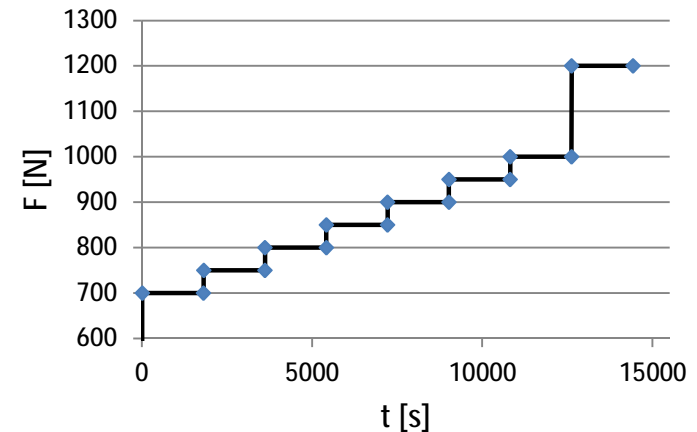
Abschätzung der Weibull-Parameter aus 3 Punkt-Biege-Versuchen



- n bei RT: Bruchspannung von Belastungsrate $\dot{\sigma}$ abhängig: SCG**
 Parameter aus doppelt-logarithmischer Auftragung: $\log \sigma_f = \log B_0 + 1/(n + 1) \log \dot{\sigma}$
- n bei 800°C: höhere Festigkeit, unabhängig von $\dot{\sigma}$; offensichtlich SCG**
 durch Glasphase in Bauxit B80 unterdrückt

Stufentest (zeitabhängiger Lastfall)

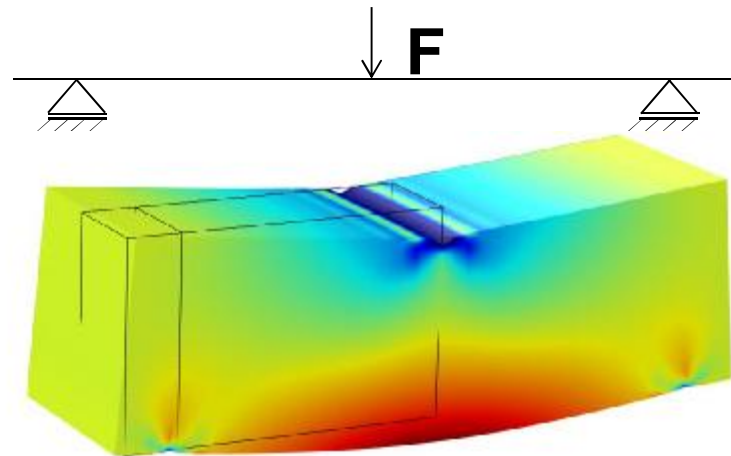
- n **Stufentest in 3-Punkt-Biege-Versuch**
 - n Start bei » 50-70% der Bruchspannung
 - n schrittweise Zunahme der Last nach jeweils 30 Minuten
 - n Bruch bei $F = \text{const.}$ (Ermüdung)
- n **Denkbar als beschleunigter Proof-Test** (wurde bereits für techn. Keramik eingesetzt)⁽²⁾
- n **Experimentelles Ergebnis:**
 - n niedrigere Festigkeit als bei schneller Belastung (Bruch nach ca. 10 Sek.)
 - n SCG relevant auf Zeitskala des Stufentests (einige Stunden)



⁽²⁾ P. Nadler, Dissertation, Technical University Freiberg/Germany, 1989

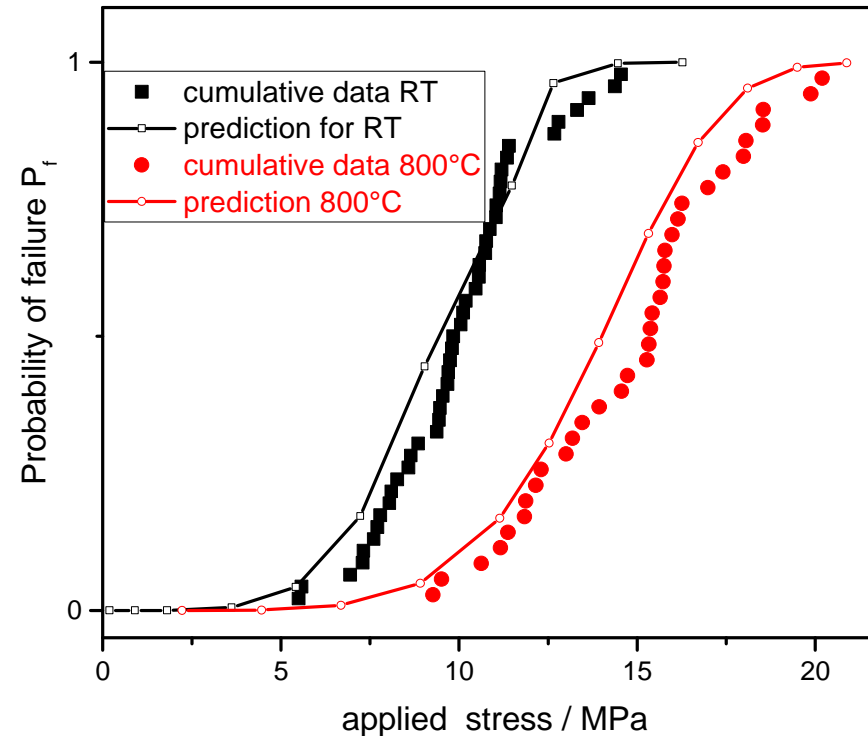
FE-Simulation des Lastfalls

- n Spannungsverteilung für 3-Punkt-Biege-Experiment
- n COMSOL-Modell, 2 Fälle:
 - n Schneller Bruch – Modell zeitunabhängig
 - n Stufentest – zeitabhängige Zunahme der Last im Modell



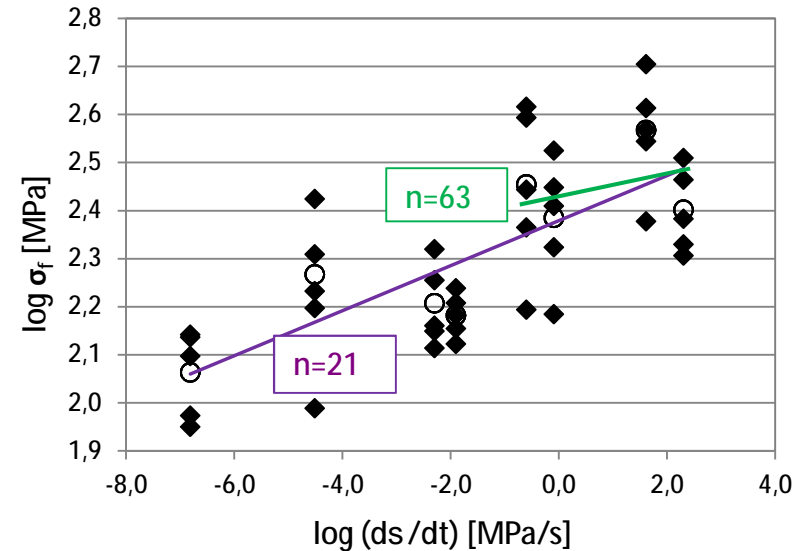
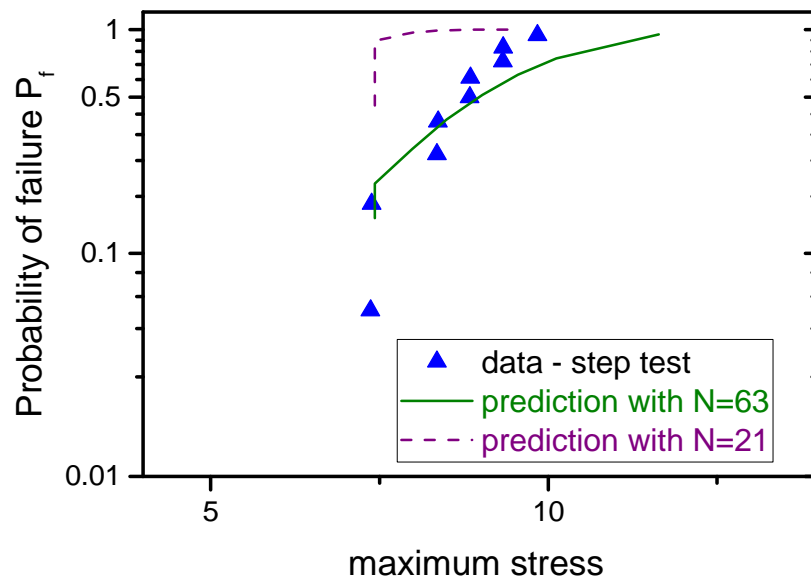
- n Vorhersage von P_f für beide Fälle via CARES, auf Basis der bei RT ermittelten SCG Parameter

Vorhersage – schneller Bruch



- n Validierung mit den kumulierten Ergebnissen (weiterer) 3-Punkt-Biegeversuche
- n → hinreichende Genauigkeit der “inerten” Materialparameter

Prognose – zeitabhängiger Bruch (Stufentest)



- n** Versagenswahrscheinlichkeit P_f hängt stark vom Risswachstums-Exponenten n ab
- n** Zuverlässige Prognosen für zeitabhängiges Versagen bedürfen einer hinreichend guten Datenbasis

Zusammenfassung des Teils 1:

- n Methodik zur Ermittlung der last- und zeitabhängigen Versagenswahrscheinlichkeit von Feuerfestbauteilen vorgestellt**
 - n Parameter zur Materialermüdung aus Biegebruchexperimenten unter verschiedenen Belastungsraten**
 - n Finite-Elemente-Modell des thermomechanisches Belastungszenarios für (beliebiges) Feuerfestbauteil**
 - n Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit P_f für individuellen Lastfall auf Basis etablierter Modelle für Materialermüdung**
- n Machbarkeit des Ansatzes für Feuerleichtsteine (Bauxit B80) gezeigt**
 - n Unterkritisches Risswachstum als Ermüdungsmechanismus in diesem Fall identifiziert**

Optimierung FF-Herstellprozesse – Motivation

- n Ziel der Prozessoptimierung:**
 - n Minimierung von Energieverbrauch, Prozessdauer, Ausschussrate – und natürlich Kosten**
 - n Maximierung Ofendurchsatz**
 - n Nebenbedingung: keine Qualitätseinbußen beim Produkt**
- n Rein empirische Optimierung sehr zeitaufwändig und teuer**
- n Ansatz Fraunhofer HTL:**
 - n experiment-basierte Prozess-Simulation**
 - n Optimierung am Computer**
 - n Rückübertragung auf Produktionsofen**

Konzept der Modellierung am Beispiel Entbinderung

- n **Notwendige physikalische Phänomene im Modell:**
 - n **Wärmeübertragung**
 - n **Chemische Reaktionen des Binders (Oxidation, Pyrolyse)**
 - n **Exo- und endotherme Reaktionen (Reaktionswärmen)**
 - n **Gasfluss und Druckaufbau im Prozess**
 - n **Mechanische Antwort (Spannungen im Material)**

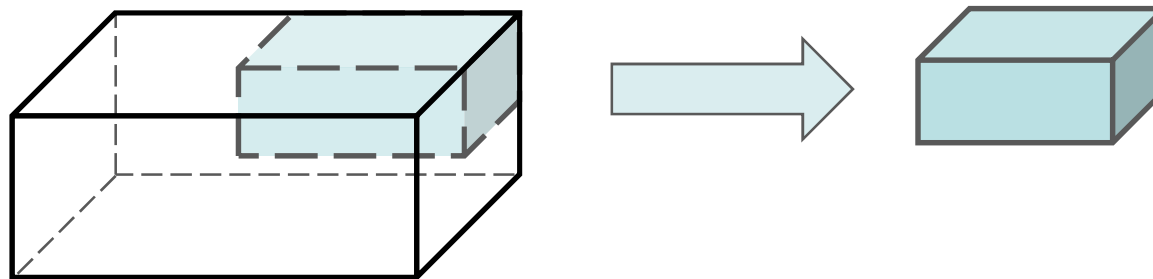
- n **Gekoppeltes Finite-Elemente Modell der Prozesse im Bauteil**
 - n **Basis: präzise In-situ Messungen von Entbinderungskinetik und Materialparametern**
 - n **formal-kinetische Beschreibung der Massenabnahme (kinetic field)**

Entbinderungsmodell

- n Entbinderung eines Schamottesteins
- n Finite-Elemente-Simulation mit COMSOL Multiphysics



- n Nutzung der Symmetrie für die Modellierung:



COMSOL-Modell

- n Heat transfer equation

$$m c_p \frac{dT}{dt} + \nabla(-\lambda \nabla T) = \dot{Q}$$

- n Porous media flow (Darcy-Flow)

$$\rho[(v \nabla)v] = \nabla \left[-p + \mu \Delta v - \frac{2\mu}{3} (\nabla v) \right]$$

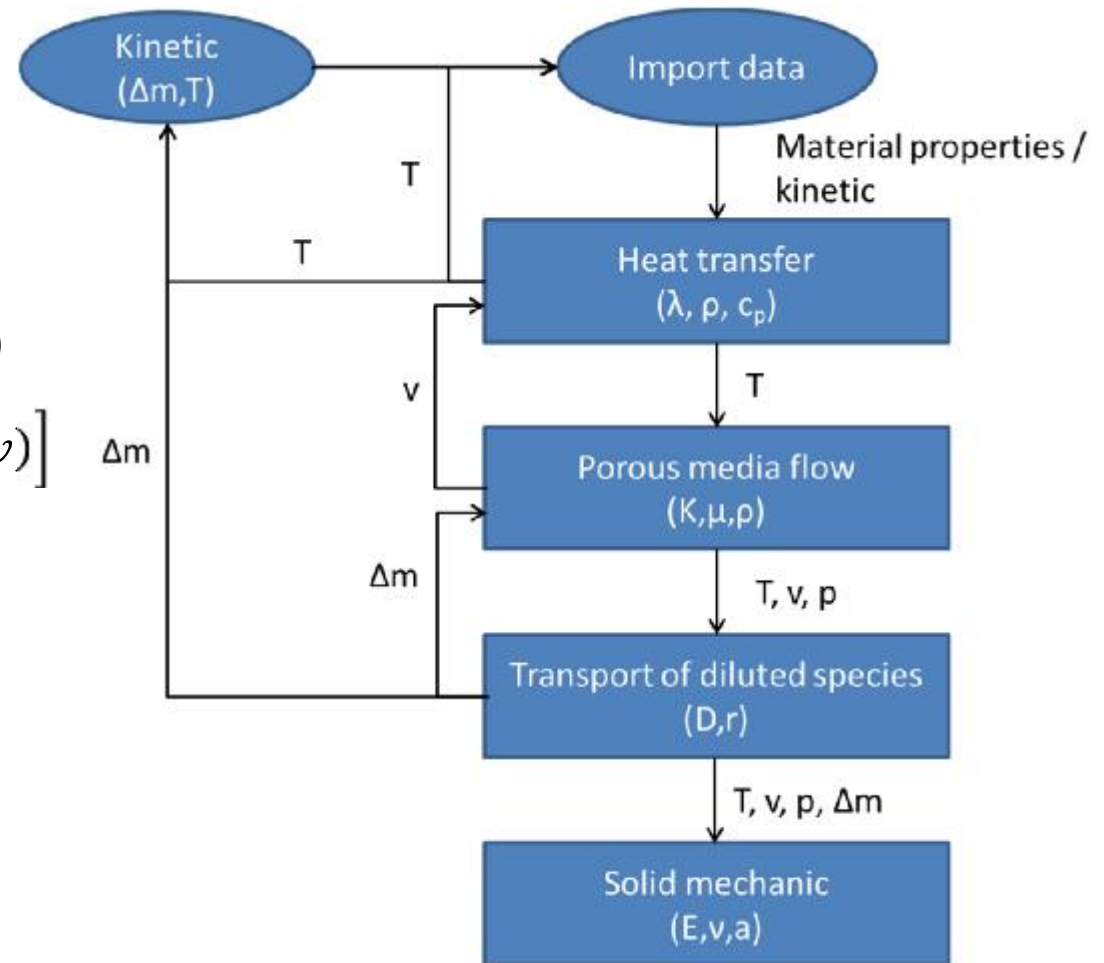
$$-\left(\frac{\mu}{K} + Q_{mass} \right) v + F_v$$

- n Transport of diluted species

$$\nabla(-D_i \nabla c_i) + v c_i = r_i$$

- n Solid mechanics

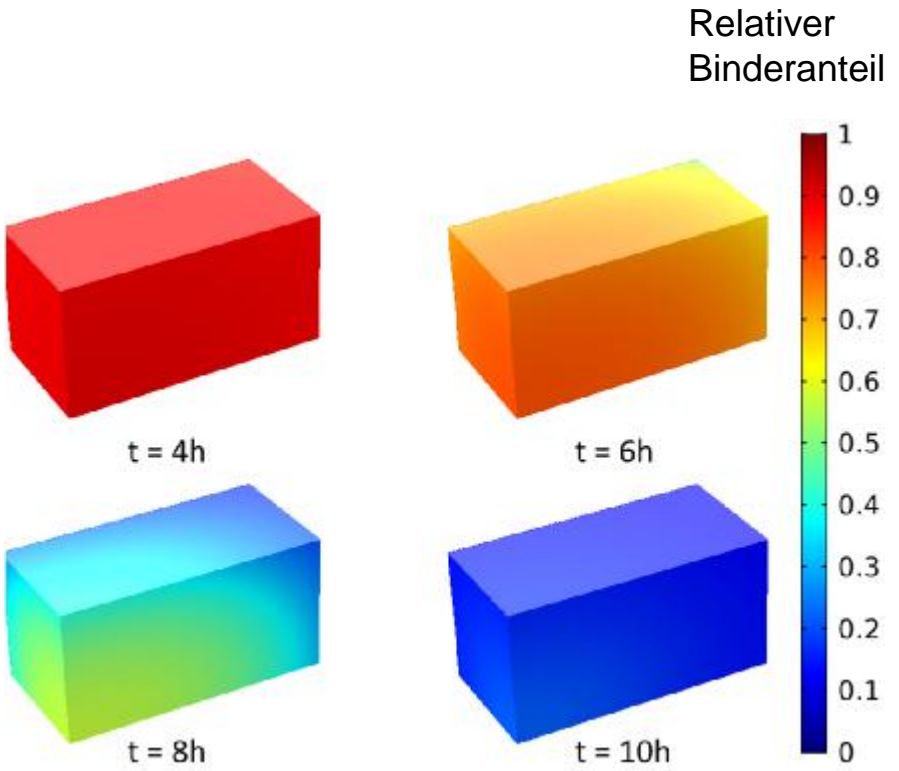
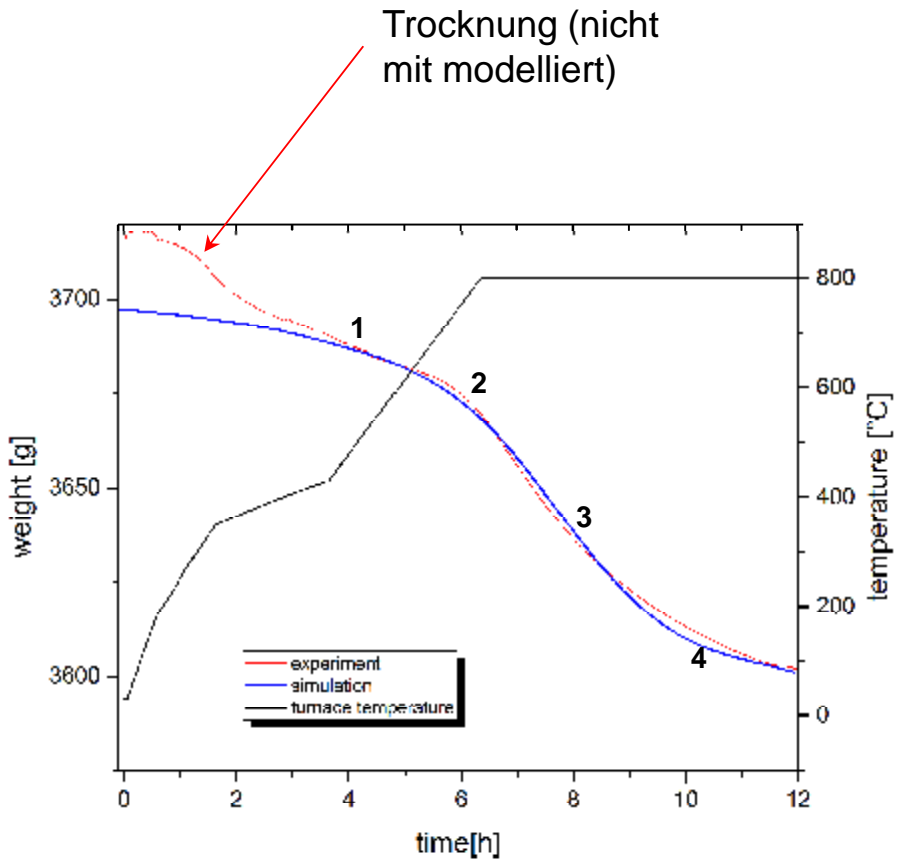
$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \sum F$$



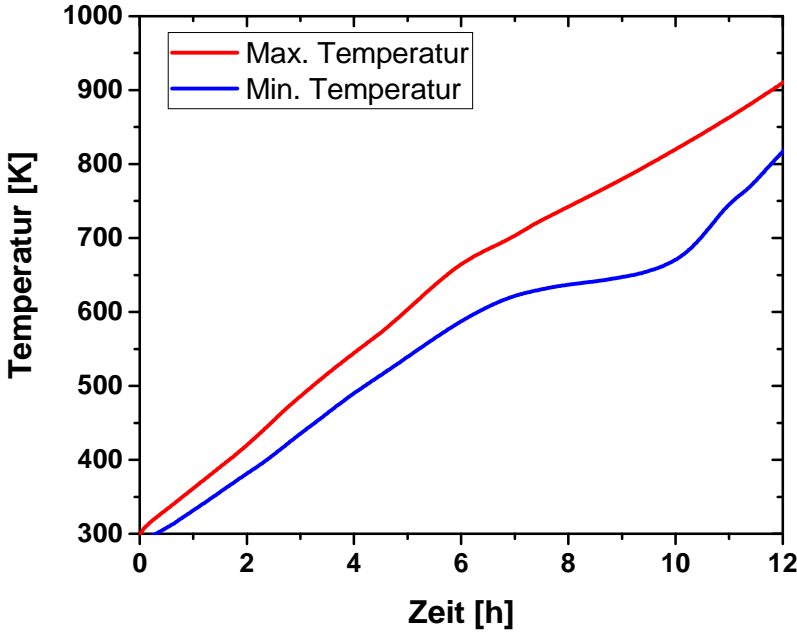
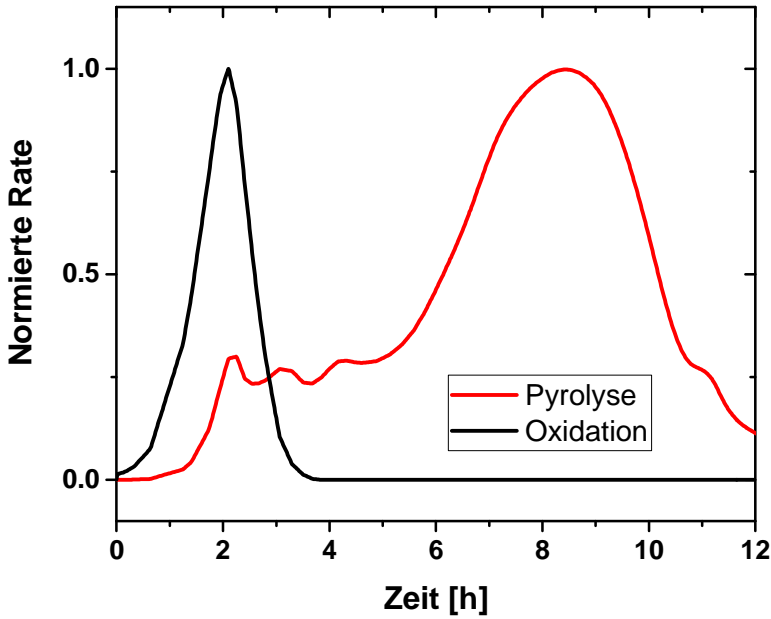
Notwendiger Input / In-situ-Messgrößen

- n Für die Simulation benötigte Material- und Prozessparameter:**
 - n Wärmeleitfähigkeit**
 - n Gaspermeation**
 - n Binder-Zusammensetzung (nötige Information kann indirekt aus Zersetzungsprodukten gefolgert werden)**
 - n Reaktionskinetik / kinetic field (Messung des Masseverlustes für mehrere Heizraten)**

Ergebnisse

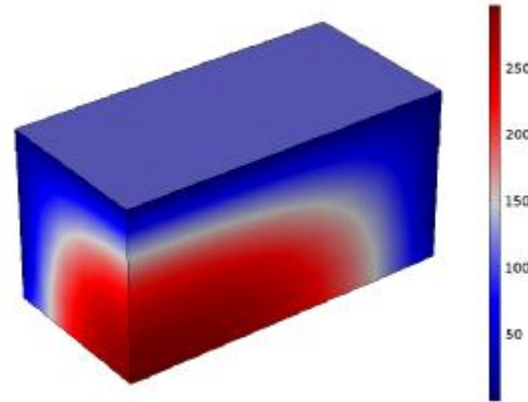
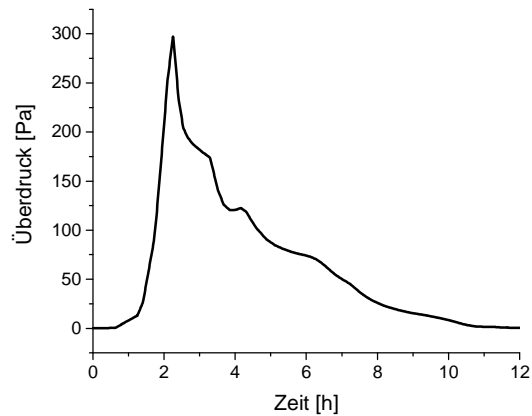


Ergebnisse

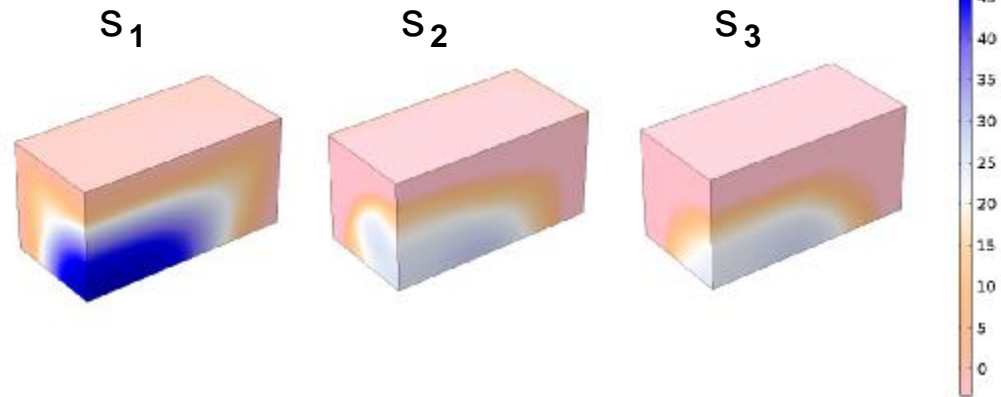
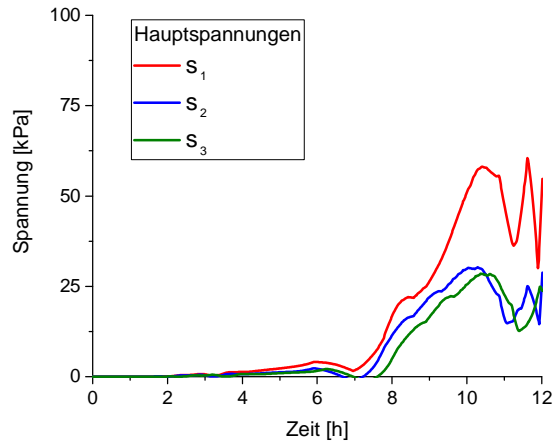


Ergebnisse

n Überdruck

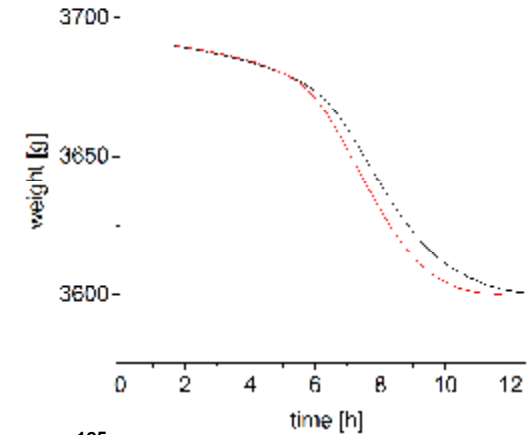
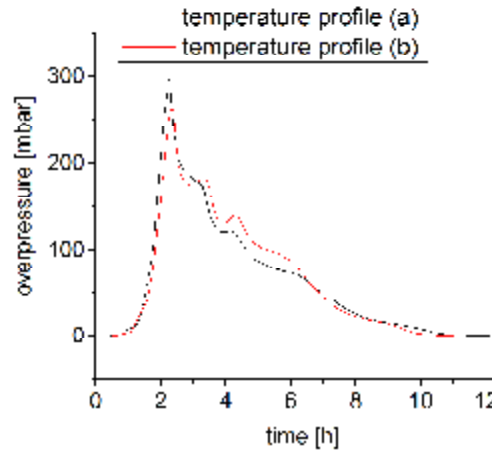
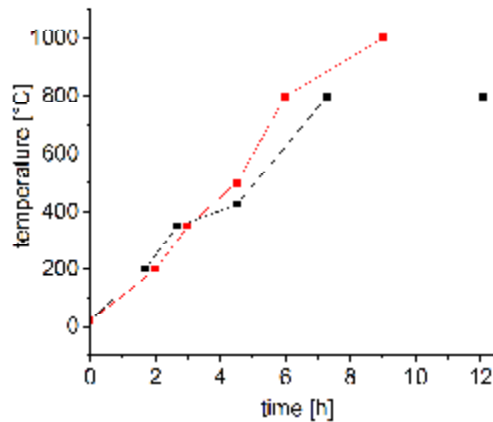


n Spannungsverteilung

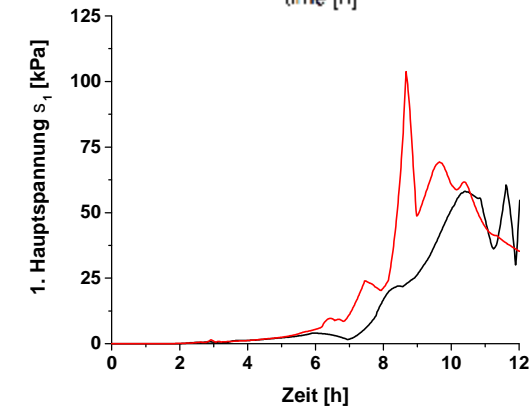


Ergebnisse

n Zeit- und Energieersparnis durch verschiedene Temperaturzyklen



n Validierung z.B. durch akustische Rissdetektion in TOM_Pyr (s. Vortrag F. Raether)



Zusammenfassung des Teils 2:

- n Methode zur Optimierung der FF-Herstellprozesse durch experiment-basierte Prozess-Simulation vorgestellt**
 - n Grundlage der Modellierung: In-Situ-Messungen der Prozess- und Materialparameter (z.B. in TOM-Anlagen des Fraunhofer HTL)**
 - n Erarbeitung verkürzter Heizzyklen bei konstanter Produktqualität (Betrachtung der inneren Spannungen im Bauteil während Prozess)**
- n Konkretes Beispiel: Entbinderung von Schamottesteinen**
- n Analoge Methodik auch für andere Prozessschritte (Sintern, Trocknung) verfügbar**

Danksagung

- n Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Energie und Technologie (StMWi Bayern) im Rahmen des Projektes EnerTHERM finanziell unterstützt.



www.htl-enertherm.eu