

# **Thermoprozesstechnik am Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL und an der Universität Bayreuth**

M. Kirschen, G. Seifert, H. Friedrich, F. Raether

Fraunhofer ISC - Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL

Das Fraunhofer ISC - Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL hat sich in den letzten Jahren Alleinstellungsmerkmale in der Material- und Bauteilentwicklung und deren Charakterisierung bei hohen Temperaturen erarbeitet. Forschungsschwerpunkte sind Keramiken, keramische Matrix-Komposite (CMC), Metall-Keramik-Komposite, Beschichtungen, Fügetechnik, Keramikfasern und Bauteildesign. Thermo-optische Prüfstände wurden speziell für die Hochtemperatur-Charakterisierungen von heterogenen Werkstoffen (Feuerfestwerkstoffe, Hybrid-Bauteile, Faserverbundwerkstoffe, Keramikfasern, -schäume, Kompositwerkstoffe etc.) entwickelt. Damit validierte Materialmodelle für Trocknen, Entbinderung, Sintern, Metallinfiltration etc. werden für multiphysikalische FEM-Simulationen zur Optimierung der Thermoprozesse herangezogen. Durch eine neu an der Universität Bayreuth eingerichtete Professur „Thermoprozesstechnik“ werden die bisherigen Aktivitäten für material- und energieeffiziente, emissionsarme, industrielle Wärmeprozesse weiter ausgebaut.

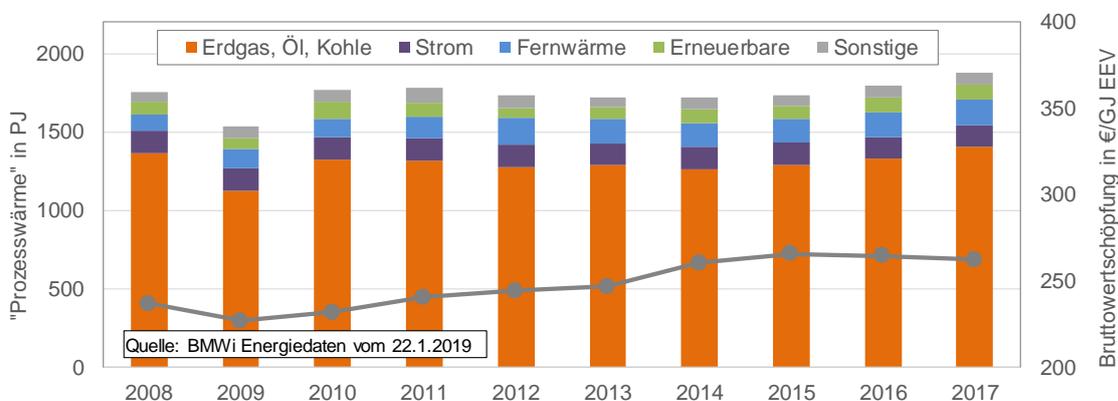
Keywords: Thermoprozesstechnik, Energieeffizienz, HT-Charakterisierung, Material- und Bauteilentwicklung

## **1. Effiziente und emissionsneutrale Energienutzung**

Etwa 29% des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland bezieht das verarbeitende Industriegewerbe und Bergbau (2700 PJ, 2017), davon etwa 55 % über fossile Energieträger; etwa zwei Drittel wird für Prozesswärme benötigt (Abb. 1) [1]. Europa- und weltweit steigen die Anforderungen, die Energieversorgung und -verwendung mittelfristig nahezu vollständig auf emissionsneutrale Energieträger umzustellen. Dadurch ergibt sich, in Verbindung mit dem industriemmanenten Druck zur kontinuierlichen Steigerung der Material- und Kosteneffizienz, ein großer Bedarf, neue Technologien für energieeffiziente und

emissionsarme Thermoprozesse zu entwickeln. Oft - wenn auch nicht immer - wird eine höhere Energieeffizienz durch eine höhere Prozesstemperatur oder einen erhöhten Leistungseintrag erreicht. In aller Regel werden in diesen Fällen die möglichen Prozessverbesserungen durch Materialversagen bei hohen Temperaturen begrenzt, sei es durch thermische Überlastung, erhöhten thermochemischen Verschleiß der Ofenzustellung oder durch Qualitätseinbußen des zu erwärmenden Guts aufgrund kinetisch bedingter Prozesse (z.B. Trocknen, Sintern, Kristallwachstum, Ausscheidungen, Rissbildung etc). Eine bessere Kenntnis des Material- und vor allem Bauteilverhaltens bei hohen Temperaturen ist daher erforderlich für weitere Entwicklungen.

In der aktuellen Umstellungsphase der deutschen Energiewirtschaft werden energieintensive Industriebetriebe mit einem zunehmenden Bedarf für Lastmanagement konfrontiert. Dies kann zu einer zunehmenden Flexibilisierung der Betriebszeiten der Öfen und daher einer höheren thermischen Wechselbelastung führen. Andererseits erfordert die Umstellung eines gasbeheizten Wiedererwärmungsofens mit einem typischen Leistungsdurchsatz um 180 t/h auf einen Ofen vergleichbarer Größe mit elektrischer Widerstandsheizung Oberflächenbelastungen der Heizleiter, die die aktuell gängigen Materialien überfordern [2]. Infolgedessen werden hybride Heizkonzepte diskutiert, u.U. mit Auswirkungen auf Ofenatmosphären und Verschleiß. Die Weiterentwicklung industrieller Thermoprozesse zu höherer Material- und Energieeffizienz und sehr niedrigen spezifischen Emissionen erfordert daher nicht nur neue Methoden der Sensorik, Datenerfassung, -auswertung, Prozessregelung und -simulation, sondern stellt auch hohe Anforderungen an die Material- und Bauteilentwicklung für Öfen.



**Abbildung 1:** Anteil der Prozesswärme des industr. Endenergieverbrauchs [1]

## 2. Material- und Bauteilentwicklung am Fraunhofer HTL

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten des Fraunhofer-Zentrums für Hochtemperatur-Leichtbau HTL liegt seit vielen Jahren auf der Materialentwicklung von Keramiken, Beschichtungen, Füge-technik, Komposite und Bauteildesign (3d-Druck, Ceramic Matrix Composite CMC), entsprechende Wärmeprozesse und Materialuntersuchungen und -charakterisierungen. Aktuelle Werkstoffentwicklungen umfassen z.B. Metall-Keramik-Komposite, poröse Keramiken [3], keramische Schäume [4] (Abb. 2), CMC-verstärkte Bauteile [5] für hohe Festigkeit und hohe Temperaturwechselbeständigkeit. Oxidische CMC-Materialien zeichnen sich dazu durch verminderte Sprödigkeit bei hohen Temperaturen aus (Abb. 3). Mit der vollständigen Fertigungstiefe von der Fasererzeugung über die CMC-Bauteilkonstruktion und -fertigung bis zur zerstörungsfreien Prüfung steht dem HTL ein Alleinstellungsmerkmal für oxidische CMC-Bauteile zur Verfügung. Als Beispiele zeigt Abbildung 3 ein Hubtor mit über 1 Mio. zyklischer Anwendungen bei 1280°C in einer Formiergas-Atmosphäre und eine Heißgasklappe. Im April 2019 wurde am HTL eine europaweit einzigartige Faserpilotanlage eröffnet, die eine eigenständige europäische Fertigung von Keramikfasern auf den Weg bringen soll. Dadurch wird die bisherige Faserfertigung vom Technikumsmaßstab auf einige Tonnen pro Jahr ausgebaut und die Verfügbarkeit von Faserverbundwerkstoffen für Hersteller und Anwender deutlich verbessert.



**Abbildung 2:** Poröse  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik (links oben) [3], keramische Schäume mit einstellbarer Porosität [4] und CMC-verstärktes Bauteil [5].

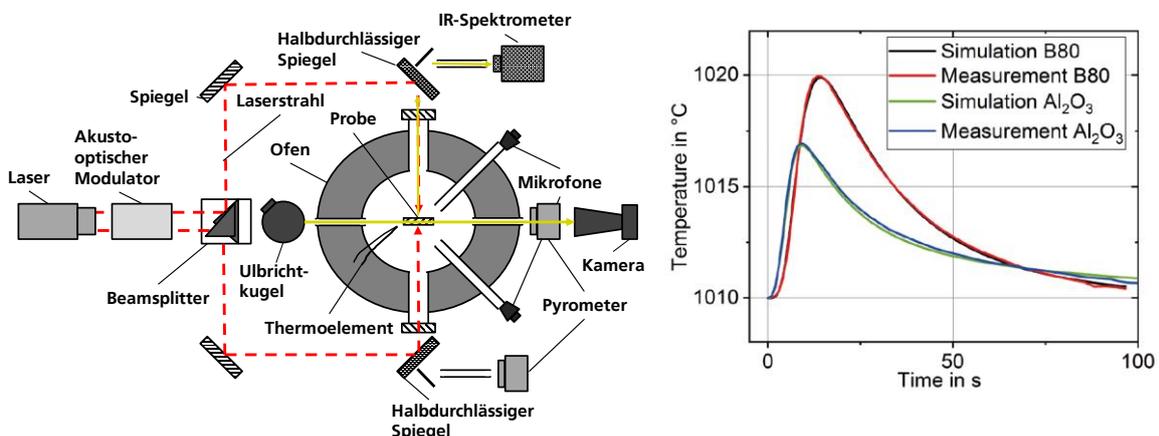


**Abbildung 3:** Hubtor und Heißgasklappe aus CMC mit quasi-duktilen Verhalten [6]

## 2.1 Materialcharakterisierung

Zur Charakterisierung der HT-Eigenschaften heterogener Werkstoffe wurden thermo-optische Messverfahren (TOM) entwickelt bzw. weiterentwickelt. Diese basieren auf präzisen optischen Messungen von Längen- und Formänderungen als Funktion der Temperatur zur Messung von z.B. Schwindungsverhalten beim Sintern oder thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Weitere optische Messverfahren erlauben die Bestimmung von Wärmekapazitäten, Wärmeleitfähigkeiten oder Emissivitäten größerer Proben (Abb. 4). Rissbildungen bei Thermoschockversuchen werden akustisch detektiert, wodurch auch die Untersuchung unterkritischen Risswachstums möglich ist [7, 8]. Die Ergebnisse illustrieren den Einfluss der Materialtemperatur auf die Rissbildung und das Thermoschockverhalten [7]. Andere TOM-Anlagen dienen zur Untersuchung von Biegefestigkeiten, E-Modul, Benetzbarkeiten, Kriechen, etc. bei kontrollierten Atmosphären bis zu 2200°C, oder Probengewichten in partikel-beaufschlagten Gasströmen.

Durch inverse FEM-Simulationen der Messgrößen werden die nicht direkt gemessenen Materialeigenschaften bestimmt, wobei durch die Berücksichtigung einer größeren Probengeometrie auch heterogene Werkstoffe reproduzierbare Ergebnisse mit hoher Genauigkeit liefern (Abb. 4).

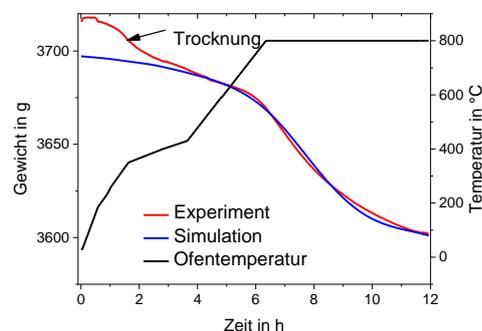


**Abbildung 4:** Thermo-optische Messanlage (TOM\_wave) für Laser Flash-, Emissivitäts-, Dilatometrie oder Thermoschockmessungen und Vergleich der gemessenen mit der FEM-simulierten T-Antwort für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Keramik und einen Bauxit FF-Stein [7].

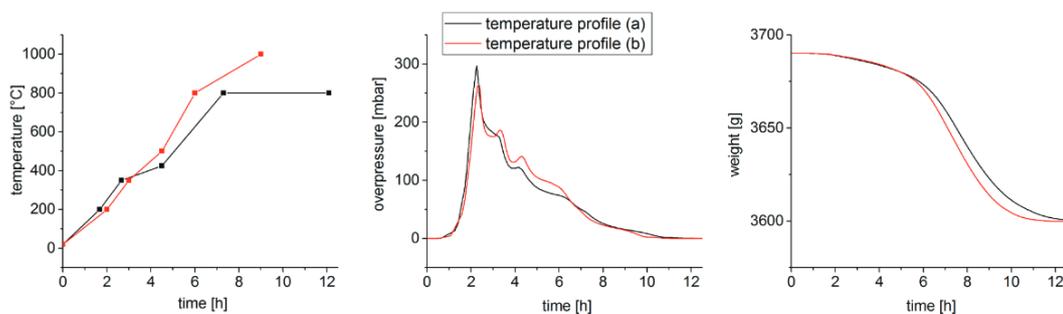
Neben Standardverfahren für mechanische und zerstörungsfreie Prüfungen, DSC, DTA stehen weitere TOM-Anlagen, CT für in-situ Messungen, etwa 40 Öfen und Ofenmesstechnik zur Verfügung, sowie der Zugang zu Röntgen- und EMS-Analysen.

## 2.2 Prozessmodellierung

Die gemessenen Materialeigenschaften bei hohen Temperaturen liefern die notwendigen Informationen und Stützstellen für validierte FE-Simulationen des Werkstoffverhaltens in Thermoprozessen. Mit Hilfe dieser materialbezogenen Simulationen werden Alternativen zu bestehenden Thermoprozessen belastbar bewertet und Risiken bei der Realisierung von Produktionsversuchen minimiert. Für ein effizienteres Entbindern eines Bauxit-FF-Leichtsteins z.B. wurden die Binderzusammensetzung, die thermische Leitfähigkeit und die Gaspermeabilität gemessen und der Entbinderungsprozess simuliert (Abb. 5). In diesem Fall kann die optimierte Wärmebehandlung deutlich verkürzt werden (rote Kurven in Abb. 6), ohne den resultierenden maximalen internen Gasdruck – und damit das Risiko von Rissen – zu vergrößern.

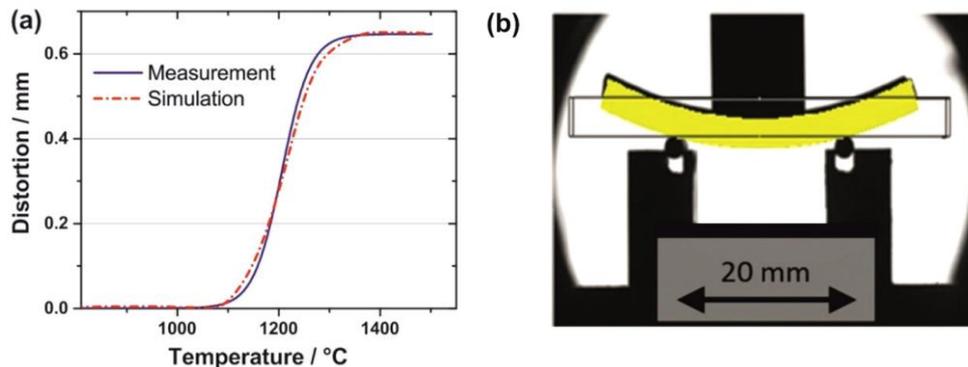


**Abbildung 5:** FEM-Simulationen zur Entbinderung eines Bauxit FF-Steins [9].



**Abbildung 6:** Optimierung des Thermoprozesses durch validierte Simulation der Entbinderung eines Bauxit FF-Steins [9].

Mit einer analogen Methode wurde das Sinterverhalten einer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik modelliert und die komplexen Materialvorgänge unter Last bei hohen Temperaturen im Detail reproduziert (Abb. 7, [10]). In einem anderen Projekt konnte die thermische Behandlung von großvolumigen Keramikisolatoren um 40% verkürzt werden durch Optimierungen des Designs und der Brennprogramme.



**Abbildung 7:** FEM-Simulationen der Verformung unter Last während des Sinterns (in b ist die berechnete finale Form (gelb), leicht verschoben gegenüber der beobachteten Form zur besseren Vergleichbarkeit) [10]

### 3. Thermoprozesstechnik in Bayreuth

Die für die klimapolitischen Kernziele 2030 der EU notwendigen Entwicklungen für flexible, energieeffiziente und emissionsarme Thermoprozesse erfordern

- Entwicklung von leichten, HT-stabilen Werkstoffen und Bauteilen mit hoher Temperaturwechsel- und Korrosionsbeständigkeit.
- Experimentell validierte Modellbildung für Werkstoff- und Bauteil-Vorgänge bei hohen Temperaturen (z.B. Sintern, Risswachstum, Kriechen, Korrosion)
- Modelle zur Beurteilung der Energieeffizienz bei variablen Einsatz verschiedener Energieträger und flexiblem Ofenbetrieb
- Simulationsgestützte Optimierung bestehender und Entwicklung neuer Thermoprozesse

Neuartige keramische Werkstoffe mit erhöhter Porosität, korrosionsstabilen Beschichtungen, keramische oder metallisch-keramische Verbundwerkstoffe, Faserverbundwerkstoffe werden eine wichtige Rolle spielen.

Der Aufbau eines großvolumigen 2-Kammer-Ofens soll Charakterisierungen von größeren Bauteilen bei hohen Temperaturen und praxisnahen thermischen

Gradienten ermöglichen, den Einfluss des Bauteildesigns auf das HT-Verhalten klären, betriebliche Tests und Markteinführung deutlich abkürzen und die Weiterentwicklung von komplexen Bauteilen und Ofenelementen vorantreiben.

Die Thermoprozesstechnik ist als gemeinsame Berufung von Fraunhofer-Gesellschaft und Universität Bayreuth in die Fakultät Ingenieurwissenschaften der Universität Bayreuth eingebunden, die etwa 1000 der knapp 13.500 eingeschriebenen Studenten betreut. Ein Schwerpunkt der ingenieurwissenschaftlichen Forschungsaktivitäten sind die Materialwissenschaften. Der Aufbau eines KeyLabs am Campus als Bindeglied zwischen dem Fraunhofer-Institut und der Universität hat zum Ziel, die dort etablierten Grundlagenforschung für keramische und metallische Werkstoffe noch stärker für energieeffiziente industrielle Anwendungen bei hohen Temperaturen zu nutzen.

## Literatur

- [1] Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi vom 22.01.2019. <http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html>
- [2] Pfeifer, H.: Trends in der Thermoprozesstechnik. 1. *Aachener Ofenbau- und Thermoprozess Kolloquium*, 11-12. Mai 2017, Aachen, Deutschland, S. 9-24
- [3] Nöth, A.; Neubauer, G.: High Temperature Ceramics for Light-Weight Kiln Furniture. *cfi ceramic forum international / Berichte der DKG 94* (2017) Nr. 11-12, S. E24-E28
- [4] Vogt, J.: Cost-Efficient Directly Foamed Ceramics for High-Temperature Thermal Insulation, *Ceramic Applications 7* (2019) Nr. 1, S. 50-55
- [5] Nöth, A.; Rüdinger, A.; Pritzkow, W.: Oxide Ceramic Matrix Composites – Manufacturing, Machining, Properties and Industrial Applications. *Ceramic Applications 3* (2015), Nr. 2, S. 48-54
- [6] Gadelmeier, C.; Schmidt, J.: Joining of Ceramic and Metal Parts. *Ceramic Applications 5* (2017), Nr. 1, S. 59-66
- [7] Raether, F.; Baber, J.; Friedrich, H.: Thermal Management of Heating Processes - Measuring Heat Transfer Properties. *Refractories Worldforum 11* (2019) Nr. 2, S. 59-65
- [8] Seifert, G.; Raether, F.; Baber, J.: A New Device for Measuring Hot Thermal Shock, Thermal Cycling and Other High Temperature Properties of Refractories. *Refractories Worldforum 10* (2018) Nr. 1, S. 77-80
- [9] Zibold, H.; Raether, F.; Seifert, G.: Radical Time Reduction of Debinding Processes by Combined in-situ Measurements and Simulation, *cfi ceramic forum international / Berichte der DKG 95* (2018) No. 1-2, E37-E40
- [10] Raether, F.; Seifert, G.; Zibold, H.: Simulation of Sintering across Scales. *Advanced Theory and Simulations 2* (2019) Nr. 7, S. 1-19