

# ThermoOptische Messverfahren (TOM) für die Hochtemperatur-Prüfung von Feuerfestwerkstoffen

von **Friedrich Raether, Holger Friedrich, Jens Baber**

Feuerfestwerkstoffe sind der Schlüssel für die Entwicklung neuer energieeffizienter Thermoprozesse. Bei deren Hochtemperatur-Charakterisierung bestehen Lücken, die durch eine neue Generation von ThermoOptischen Messanlagen (TOM) geschlossen werden. Mit den neuen Verfahren wird das thermophysikalische und thermochemische Materialverhalten bis zu Temperaturen von ca. 1.800 °C unter definierten Bedingungen erfasst. Neue Feuerfestmaterialien und Thermoprozesse können damit zielgerichteter entwickelt werden.

## ThermoOptical Measuring methods (TOM) for high-temperature testing of refractories

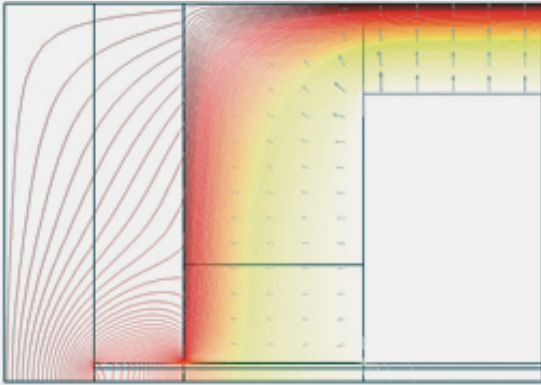
Refractories are the key for the development of new energy efficient thermal processes. Existing deficiencies in their high-temperature characterization are closed by a new generation of ThermoOptical Measuring devices (TOM). Using the new methods enables the characterization of thermochemical and thermophysical material behaviour up to temperatures of 1,800 °C. By that, new refractories and thermal processes can be developed more purposefully.

Wärmeprozesse sind für einen großen Teil des Energieverbrauchs im verarbeitenden Gewerbe verantwortlich: 2016 wurden in der Bundesrepublik ca. 1.700 PJ (1.015 Joule) für Prozesswärme benötigt, davon mehr als die Hälfte für Hochtemperatur-Prozesse mit Temperaturen über 1.000 °C. Das entspricht ca. 20 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland [1]. Hinzu kommen weitere Wärmeprozesse vor allem bei der Energieerzeugung und in privaten Heizanlagen. Um die Klimaschutzziele aus dem Parisabkommen gemäß den Vorgaben der EU umzusetzen, d. h. 40 % Absenkung der Treibhausgasemissionen bis 2030 in Bezug zum Vergleichsjahr 1990, sind drastische Verbesserungen bei der Energieeffizienz von Wärmeprozessen erforderlich. Feuerfestwerkstoffe leisten dazu einen wesentlichen Beitrag. Als Wärmeisolierung verhindern sie unerwünschte Verluste von Prozesswärme, und als Formgebungs- bzw. Brennhilfsmittel dienen sie zur Abtrennung und Halterung des Erwärmungsguts. Als Ofenauskleidung benötigen Feuerfestwerkstoffe insbesondere eine niedrige Wärmeleitfähigkeit; aber auch eine

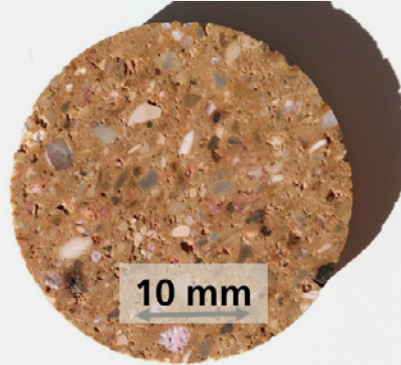
gute Dimensionsstabilität ist wichtig, um die Ausbildung von Wärmelecks im Langzeiteinsatz zu vermeiden. Bei Formgebungs- und Brennhilfsmitteln sind in erster Linie eine niedrige Wärmekapazität und ein niedriges Gewicht erforderlich, weil deren zyklische Erwärmung jedes Mal zusätzliche Energie kostet. Darüber hinaus benötigen Feuerfestwerkstoffe häufig eine hohe Thermoschockbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Kriechfestigkeit. Diese Eigenschaften erhöhen die Lebensdauer von Feuerfestprodukten. Sie tragen damit entscheidend zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Feuerfestwerkstoffe bei. Da Feuerfestwerkstoffe zumeist in energieaufwändigen Wärmeprozessen erzeugt werden, leistet auch die Prozessoptimierung der Herstellprozesse von Feuerfestwerkstoffen einen wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz [2].

### Anforderungen an Hochtemperatur-Messsysteme für Feuerfestwerkstoffe

Die Entwicklung neuer energieeffizienterer Wärmeprozesse erfordert nicht nur Feuerfestwerkstoffe mit verbesserten



**Bild 1:** Querschnitt durch einen Rollenofen: FE-Simulation zu Wärmeströmen (Pfeile) und Isothermen (Linien) in der Ofenisolierung



**Bild 2:** Typisches Feuerfestmaterial (Bauxitstein B80)

werden, können viele Hochtemperatur-Eigenschaften von Feuerfestwerkstoffen bisher nicht ausreichend genau gemessen werden. Herkömmliche Methoden zur thermischen Analyse besitzen meistens ein kleines Messvolumen [3]. Feuerfestwerkstoffe sind jedoch sehr heterogen aufgebaut (**Bild 2**), was große Messvolumina im Bereich von einigen 10 cm<sup>3</sup> erfordert, um hinreichend repräsentative Messergebnisse zu erhalten. Deshalb sind spezielle genormte Testverfahren

Eigenschaften. Für die Auslegung der entsprechenden Thermoprozessanlagen ist auch eine genaue Kenntnis der Einzeleigenschaften der verwendeten Feuerfestmaterialien erforderlich. Diese Auslegung beruht zunehmend auf Computersimulationen – z. B. mit Finite-Elemente (FE)- oder Finite-Volumen (FV)-Verfahren (**Bild 1**). Die Computersimulation benötigt exakte Eingangsgrößen für die Materialeigenschaften der Feuerfestwerkstoffe. Anders als bei Werkstoffen, die bei Raumtemperatur verwendet

für großvolumige Feuerfestproben im Gebrauch. Diese ermöglichen einen direkten Vergleich verschiedener Materialien bei gleicher Geometrie und gleichen Versuchsbedingungen. Sie liefern jedoch nicht die für die Computersimulation benötigten exakten Materialeigenschaften.

Beispielsweise werden Thermoschockeeigenschaften gemessen, indem Feuerfeststeine auf eine definierte Temperatur erwärmt und dann in einem kalten Medium (Wasser, Gasstrom) abgeschreckt werden [4]. Aus der Abnahme der Festigkeit oder anderer mit der Festigkeit korrelierter Kenngrößen wie der Ultraschallgeschwindigkeit wird dann eine so genannte Thermoschockfestigkeit abgeleitet. Diese ist für den direkten Vergleich verschiedener Feuerfeststeine gut geeignet, ermöglicht aber keine Vorhersagen, wie diese sich unter Einsatzbedingungen bei ganz anderen zeitabhängigen Temperaturfeldern verhalten.

Eine andere sehr wesentliche Anforderung ist die Kontrolle der Atmosphäre, bei der Hochtemperatur-Eigenschaften von Feuerfestwerkstoffen gemessen werden. Dies gilt besonders, wenn oxidationsempfindliche Materialien wie Metallschmelzen oder kohlenstoffhaltige Feuerfestwerkstoffe untersucht werden. Auch bei In-situ-Messungen während der Wärmebehandlung zur Herstellung von Feuerfestwerkstoffen ist eine exakte Reproduktion praxisrelevanter Ofenatmosphären unter Laborbedingungen erforderlich [5].

### ThermoOptische Messanlagen (TOM)

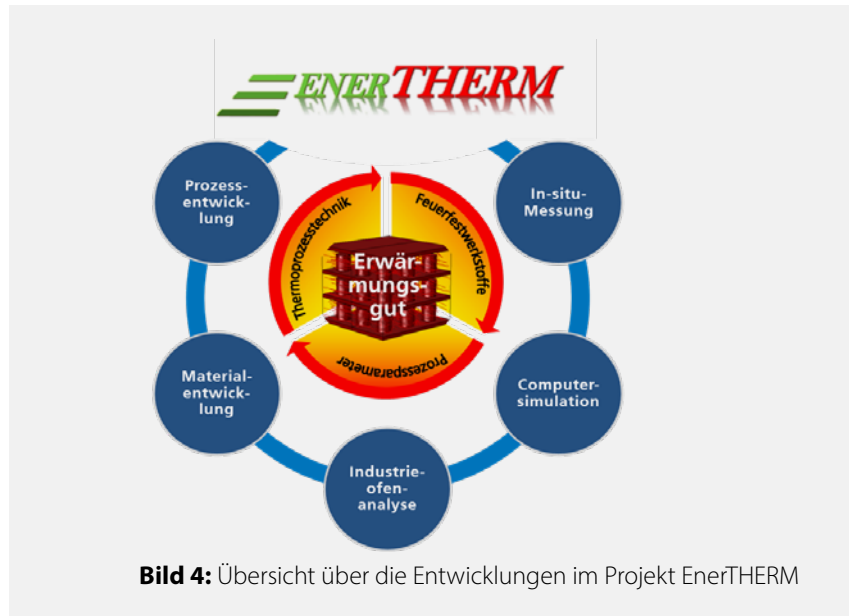
ThermoOptische Messanlagen – kurz TOM-Anlagen – werden bereits seit den 1990er Jahren entwickelt [6]. Sie basieren auf berührungslosen – optischen – Dimensionsmessverfahren. Die Proben befinden sich in einem Messofen unter definierter Temperatur und Atmosphäre. Durch ein spezielles Schattenwurfverfahren und eine eigens entwickelte Bildanalysesoftware konnten eine



**Bild 3:** ThermoOptische Messanlage TOM\_ac zur In-situ-Messung von Wärmeprozessen in inerter und reduzierender Atmosphäre

sehr hohe Messauflösung und insbesondere auch eine exzellente Reproduzierbarkeit erreicht werden [7]. Die Messauflösung für einfache Dimensionsgrößen wie der Probenhöhe oder -breite liegt mittlerweile bei ca. 0,2 µm. Die an Sinterversuchen gemessene Reproduzierbarkeit beträgt 0,013 % und wird augenscheinlich nur durch Schwankungen in der Gründichte der verwendeten Proben limitiert. Es wurde gezeigt, dass die optische Dimensionsmessung mit anderen berührungslosen Messverfahren kombiniert werden kann. Z. B. wurde ein spezielles Laser-Flash-Messverfahren entwickelt, mit dem die Temperaturleitfähigkeit bis zu sehr hohen Temperaturen von ca. 2.000 °C ohne Probenkontakt und ohne die sonst notwendigen zusätzlichen Beschichtungen gemessen werden kann [8]. Beschichtungen oder Verfahren, bei denen Kontakt zu anderen Materialien wie Thermoelementen erforderlich ist, führen zu Artefakten bei der Laser-Flash-Messung – insbesondere bei sehr hohen Temperaturen. Bei herkömmlichen Laser-Flash-Verfahren ist das Messvolumen stark limitiert, weil die Auswertung der Messdaten einen eindimensionalen Wärmefluss erfordert [9]. Für die TOM-Anlagen konnte das sehr kleine Messvolumen wesentlich erweitert werden, indem eine inverse FE-Simulation der Temperaturfelder durchgeführt wurde. Damit wurde die für Feuerfestwerkstoffe relevante Probengröße von einigen 10 cm<sup>3</sup> erreicht [10].

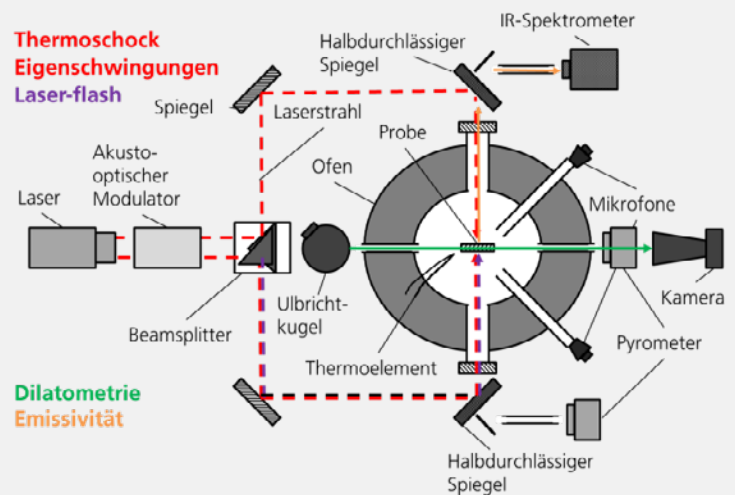
**Bild 3** zeigt als Beispiel die ThermoOptische Messanlage TOM\_ac. Die Anlage verfügt über einen grafitbeheizten Ofen mit einer Maximaltemperatur von 2.200 °C, in dem inerte oder reduzierende Atmosphären realisiert werden können. Zur Messung dienen der optische Strahlengang und eine Thermowaage. Außerdem können bei Bedarf definierte uniaxiale Kräfte auf die zu untersuchende Probe



**Bild 4:** Übersicht über die Entwicklungen im Projekt EnerTHERM

ausgeübt und die resultierenden Verformungen mittels der optischen Dimensionsmessung erfasst werden. In TOM\_ac werden z. B. Benetzungsversuche von Metallen gegenüber Feuerfestwerkstoffen durchgeführt. Außerdem werden das Pyrolyse-, Sinter- und Kriechverhalten von Feuerfestwerkstoffen untersucht. Diese Daten dienen als Input für FE-Simulationen, mit denen Prozessparameter optimiert werden [2]. Da nicht alle industrierelevanten Ofenatmosphären in einem Ofen realisiert werden können, wurden vier weitere TOM-Anlagen für Luft-, Wasserstoff- bzw. Brenngasatmosphäre aufgebaut.

Im Rahmen eines vom Bayerischen Wirtschaftsministerium geförderten großen F&E-Projekts wurde am Fraunhofer-Zentrum HTL eine neue Generation von ThermoOptischen Messanlagen entwickelt, mit denen Materialeigenschaften



**Bild 5:** ThermoOptische Messanlage TOM\_wave (links) sowie schematische Darstellung der Messmodi (rechts)

von großen Proben bei hohen Temperaturen unter definierten Atmosphären gemessen werden können. Das Projekt mit dem Titel „Nachhaltige Wärmeprozesse“ (Akronym EnerTHERM) hatte die Verbesserung der Energieeffizienz von industriellen Wärmeprozessen zum Ziel [11]. Es wurde 2013 begonnen und 2018 abgeschlossen. Neben neuen Hochtemperatur-Messverfahren wurden auch Simulationsverfahren entwickelt, mit denen die Prozessparameter bei Trocknungs-, Entbinderungs-, Sinterungs- und Infiltrationsprozessen gezielt optimiert werden können [12]. Außerdem wurden neue Feuerfestwerkstoffe und Verbundkeramiken für den Hochtemperatur-Einsatz entwickelt (Bild 4).

### Der Thermolastprüfstand TOM\_wave

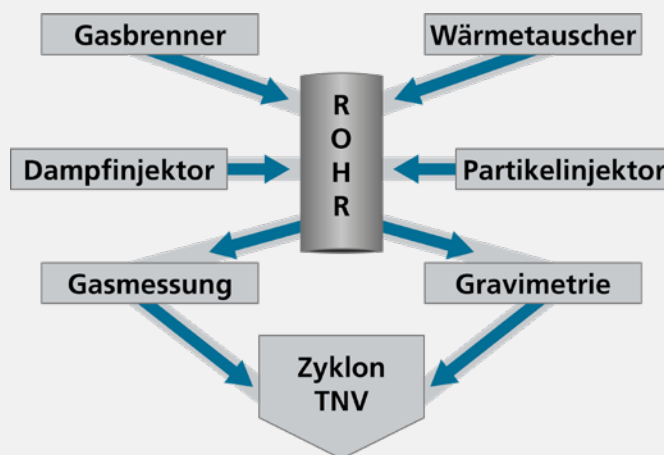
**Bild 5** zeigt die ThermoOptische Messanlage TOM\_wave, die zur Hochtemperatur-Prüfung thermomechanischer Materialeigenschaften konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen wurde. Die Anlage wurde für den so genannten heißen Thermoschock ausgelegt, weil dieser unter sehr viel definierteren Bedingungen durchgeführt werden kann als der übliche kalte Thermoschock. Entsprechende Versuche wurden seit den 1990er Jahren zunächst mittels Infrarotheizung [13] und später mittels Laserbestrahlung [14] publiziert. Aber auch der heiße Thermoschock wurde bisher immer nur gegenüber Raumtemperatur als Vergleichstemperatur durchgeführt, was nicht den typischen Belastungen von Feuerfestwerkstoffen entspricht.

TOM\_wave kombiniert einen Hochtemperatur-Ofen mit einem 600 Watt CO<sub>2</sub>-Laser, speziellen optischen Strahlengängen und einem automatischen Probenwechsler. Auf diese Weise kann das Materialverhalten unter variabler thermischer Beanspruchung untersucht werden. Der Strahlengang für den Laser wurde so konzipiert, dass wahlweise eine ein- oder beidseitige Erwärmung der scheibenförmigen Proben möglich ist. Der Strahldurchmesser auf der Probe kann zwischen

2 und 20 mm, die Laserintensität in Rampen in kurzen Zeiten zwischen 0 und 100 % verändert werden. Zusätzlich kann der Laser auch gepulst arbeiten und die Proben innerhalb von wenigen Sekunden um ca. 1.000 K aufwärmen. Bei beidseitiger Bestrahlung können die für Thermoschock- und Thermozyklierversuche benötigten thermischen Lasten eingebracht werden. Die einseitige Bestrahlung der Proben erlaubt mittels zweier auf die Rückseite bzw. auf den Rand der Proben ausgerichteter Pyrometer die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit und mittels vierer durch Schallrohre an den Ofen gekoppelter Mikrophone die Messung von Eigenfrequenzen. Für die Berechnung der Temperaturleitfähigkeit aus den Pyrometersignalen wird in der bereits oben erwähnten Auswertemethodik eine inverse Simulation der Wärmeausbreitung in den Proben mittels eines 2½ D FE-Modells durchgeführt. Auch die Interpretation der Eigenschwingungssignale und die Umrechnung in Elastizitätsmoduln erfolgen mit FE-Verfahren. Die eingesetzten Mikrophone ermöglichen eine Laufzeitfilterung der von der Probe emittierten Schallsignale, was wichtig ist, um Störgeräusche aus dem Ofen oder der Umgebung zu unterdrücken. Die nachzuweisenden Geräusche von der Probe liegen in einem Frequenzbereich bis 40 kHz, was hohe Datenaufnahmeraten der Mikrophone erforderlich macht. Bei der Schallemissionsmessung fallen also sehr große Datenmengen an. Deren Filterung erfolgt über Laufzeitunterschiede mittels Kreuzkorrelationsfunktionen, die paarweise für je zwei Mikrophone berechnet werden. Die Datenverarbeitung wird mit hochgradig parallelisierten Prozessoren durchgeführt.

TOM\_wave verfügt außerdem über einen optischen Strahlengang zur Messung von Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten werden u. a. benötigt, um die thermischen Spannungen zu berechnen, die bei den Thermoschockversuchen entstehen. Die entsprechenden FE-Simulationen benötigen außerdem die Elastizitätsmoduln

sowie die Temperaturleitfähigkeiten, die alle an derselben Anlage temperaturabhängig gemessen werden können. Erste Experimente an TOM\_wave zeigen eine gute Übereinstimmung von gemessenem und simuliertem Thermoschockverhalten [15]. Weiterhin ist ein IR-Spektrometer an TOM\_wave angeflanscht, mit dem die spektrale Emissivität



**Bild 6:** Korrosionsprüfstand TOM\_chem (links) sowie Prinzipschema zum Gasfluss (rechts)

von Feuerfestmaterialien bis zu sehr hohen Temperaturen gemessen werden kann. Die spektrale Emissivität ist eine wichtige Größe bei Wärmetransportberechnungen in Thermoprozessanlagen und häufig nicht genau genug bekannt.

### Der Korrosionsprüfstand TOM\_chem

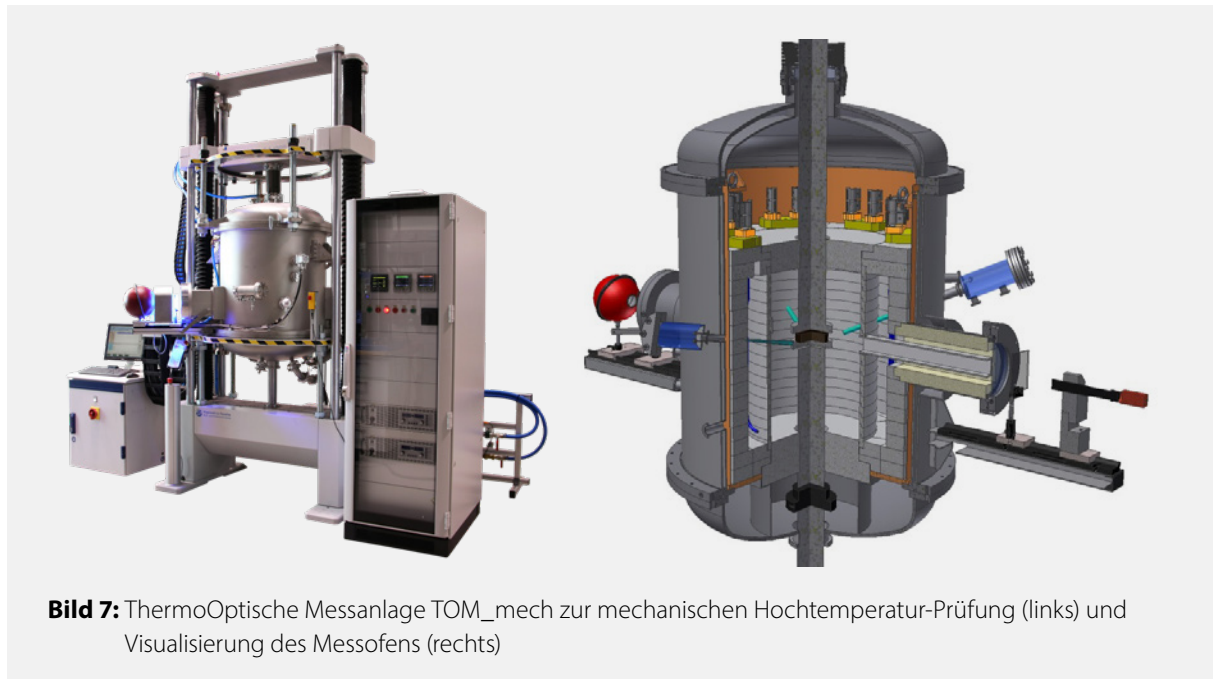
Zur Messung des Hochtemperaturkorrosionsverhaltens von Werkstoffen unter industrierelevanten Atmosphären dient die

neue ThermoOptische Messanlage TOM\_chem (**Bild 6**). Durch die weitestgehend korrosions-, erosions- und hitzebeständige Innenauskleidung aus Nitrid-gebundenem Siliziumcarbid können Proben hochaggressiven Medien über lange Zeit ausgesetzt werden. Die Proben werden dazu in einem Heißgasstrom mit kontrollierter Strömungsgeschwindigkeit ausgelagert, der über eine Verdampfer-einheit mit genau dosierten, korrosiven Dämpfen und über einen Partikelinjektor mit abrasiven Staubpartikeln beladen werden kann. Der Partikelinjektor kann Staubpartikel im Größenbereich von 20 bis 250 µm mit einem Massenstrom zwischen 0,1 und 10<sup>4</sup> g pro Stunde zuführen.

Die Detektion von Gewichtsänderungen der Probe erfolgt berührungslos mittels einer Magnetschwebewaage, deren empfindliche Elektronik vom Rezipienten gasdicht entkoppelt ist. Bei einem maximalen Probengewicht von 50 g besitzt die Waage eine Auflösung von 10 mg. Während der Wägung wird der Gasstrom automatisch an der Probe unterbrochen und über einen Nebenstrang umgeleitet. Zusätzlich werden Gaszusammensetzung, Volumenstrom und Temperatur überwacht. Die Gasmessungen erfolgen mittels einer im Projekt EnerTHERM entwickelten Messlanze mit 3D-gedruckter Sensortspitze. Zur Erzeugung des Volumenstroms wurde ein Ventilator in den Abgasstrang eingebaut. Ein Zyklon ermöglicht die vorherige Abtrennung der Partikel, sodass der Ventilator vor Abrasion geschützt ist. TOM\_chem kann bis zu Temperaturen von 1.450 °C und Gasströmen bis ca. 20 m/s eingesetzt werden.

### Der mechanische Hochtemperatur-Prüfstand TOM\_mech

**Bild 7** zeigt die neue ThermoOptische Messanlage TOM\_mech für mechanische Hochtemperatur-Prüfungen, die im



**Bild 7:** ThermoOptische Messanlage TOM\_mech zur mechanischen Hochtemperatur-Prüfung (links) und Visualisierung des Messofens (rechts)

Rahmen des Projekts EnerTHERM entwickelt wurde. Durch die Kopplung eines Hochtemperatur-Ofens mit optischer Achse mit einem Universalprüfrahmen erlaubt TOM\_mech die Untersuchung des mechanischen Verhaltens von großen Proben unter unterschiedlichen mechanischen Lasten: Biege-, Druck- und Zugversuche sowie tribologische Untersuchungen bei Temperaturen bis 1.750 °C. Die maximale Druckkraft beträgt 150 kN, das maximale Drehmoment 500 Nm. Durch eine integrierte Muffel und separate Gasführungen zu den Heizern sind auch Messungen unter nicht-oxidischer Atmosphäre möglich. Für TOM\_mech wurden spezielle Probenhalter konzipiert, um die Krafteinleitung über massive Druckstangen aus Feuerfestmaterial realisieren und gleichzeitig variable Lasten auf die Proben übertragen zu können. Die Verformungen werden mittels der optischen Messtechnik im heißen Bereich des Ofens gemessen, sodass im Unterschied zu herkömmlichen Hochtemperatur-Prüfanlagen Verfälschungen durch Temperaturgradienten in den Druckstangen ausgeschlossen sind. Ein weiterer Vorteil der optischen Dimensionsmessung in Verbindung mit uniaxialen Druckversuchen ist die gleichzeitige Erfassung von axialen und transversalen Dehnungen. Auf diese Weise kann neben der uniaxialen Viskosität auch die viskose Poissonzahl ermittelt werden. Beide Kennzahlen werden in FE-Simulationen benötigt, um das Verformungsverhalten von Bauteilen bei hohen Temperaturen zu berechnen.

### Fazit

Im Rahmen des gerade abgeschlossenen Projekts EnerTHERM wurde eine neue Generation von ThermoOptischen Messverfahren entwickelt, mit denen Hochtemperatur-Eigenschaften von Feuerfestwerkstoffen gemessen werden [16].

Die Verfahren verfügen über die dafür nötigen Voraussetzungen, indem sie ein ausreichendes Messvolumen, eine definierte Atmosphäre und definierte Temperaturen bieten. Sie erfassen die für den Einsatz von Feuerfestwerkstoffen relevanten thermophysikalischen und thermochemischen Materialeigenschaften: Thermoschockbeständigkeit, Thermozyklrierbarkeit, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Wärmedehnung, Emissivität, Elastizitätsmoduln, Kriechfestigkeit, Hochtemperatur-Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Insbesondere wurden sie dafür ausgelegt, Eingangsgrößen für FE-Simulationen von Hochtemperatur-Prozessen zu liefern. Die Auslegung neuer Thermoprozesse soll dadurch zielgerichteter durchgeführt, die Materialauswahl erleichtert werden. Erste erfolgreiche Messungen an den neuen TOM-Anlagen zeigen das Potenzial für die Entwicklung energieeffizienter Thermoprozesse auf.

## LITERATUR

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB 2018, <https://ag-energiebilanzen.de/2-0-Daten-und-Fakten.html>
- [2] Raether, F. (Hrsg.): Energieeffizienz bei der Keramikherstellung: Abschlussbericht Projekt ENITEC. Frankfurt: VDMA-Verlag, 2013
- [3] Raether, F.: Thermische Eigenschaften. In: Technische Keramik, Kollenberg, W. (Hrsg.), 3. Auflage. Essen: Vulkan Verlag, 2018, S. 84-108
- [4] ASTM C 1525:2004, Advanced technical ceramics-methods of testing monolithic ceramics-thermomechanical properties-Part 3: determination of resistance to thermal shock by water quenching, ASTM Int., West Conshohocken, PA
- [5] Raether, F.: Current state of in situ measuring methods for the control of firing processes. *Journal of the American Ceramic Society* 92.2 (2009), S. 146-152
- [6] Raether, F.; Müller, G.: Fourth euro ceramics: proceedings of the fourth European Ceramic Society (1995), S. 103-112
- [7] Raether, F.; Springer, R.; Beyer, St.: Optical dilatometry for the control of microstructure development during sintering. *Material Research Innovations* 4 (2001), S. 245-250
- [8] Raether, F.; Hofmann, R.; Müller, G.; Sölter, H.J.: A novel thermo-optical measuring system for the in situ study of sintering processes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 53 (1998), S. 717-735
- [9] Parker, W.J.; Jenkins, R.J.; Butler, C.P.; Abbott, G.L.: Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics* 32 (1961), S. 1679-1684
- [10] Raether, F.; Klimera, A.; Baber, J.: In situ measurement and simulation of temperature and stress gradients during sintering of large ceramic components. *Ceramics International* 34.2 (2008), S. 385-389
- [11] Projekt EnerTHERM: [www.htl-enertherm.eu](http://www.htl-enertherm.eu)
- [12] Ziebold, 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*, 95.1-2 (2018), S. E37-E40
- [13] Schneider, G.A.; Petzow, G.: Thermal shock testing of ceramics – A new testing method. *Journal of the American Ceramic Society* 74.1 (1991), S. 98-102
- [14] Pulz, R.: Laserthermoschockversuche – Durchführung und Auswertung für unterschiedliche Hochleistungskeramiken. Dissertation, TU Hamburg-Harburg (2014)
- [15] 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* 10.1 (2018), S. 77-80
- [16] Raether, F. (Hrsg.): Nachhaltige Wärmebehandlungsprozesse systematisch entwickeln, Abschlussbericht Projekt EnerTHERM. Frankfurt: VDMA Verlag, 2018

## AUTOREN



PD Dr. **Friedrich Raether**  
 Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL  
 Bayreuth  
 Tel.: 0921 / 78510-002  
[friedrich.raether@isc.fraunhofer.de](mailto:friedrich.raether@isc.fraunhofer.de)



Dr. **Holger Friedrich**  
 Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL  
 Bayreuth  
 Tel.: 0921 / 78510-300  
[holger.friedrich@isc.fraunhofer.de](mailto:holger.friedrich@isc.fraunhofer.de)



Dipl.-Ing. (FH) **Jens Baber**  
 Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL  
 Bayreuth  
 Tel.: 0931 / 4100-248  
[jens.baber@isc.fraunhofer.de](mailto:jens.baber@isc.fraunhofer.de)