

IN REGELMÄSSIGER FOLGE stellen wir Ihnen an dieser Stelle die wichtigsten Institutionen, Institute, Verbände und Organisationen im Bereich der elektrothermischen Prozesstechnik vor. In dieser Ausgabe im Profil: Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL.

Lesen Sie alle Beiträge dieser Rubrik kostenlos im Internet unter: WWW.PROZESSWAERME.NET

Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL

Das Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL entwickelt neue Werkstoffe und Komponenten für den Einsatz bei hohen Temperaturen. Es charakterisiert Material- und Prozesseigenschaften während der Wärmebehandlung und optimiert Wärmebehandlungsprozesse im Hinblick auf Energieeffizienz und Produktqualität. Das HTL wurde 2012 aus drei bestehenden Arbeitsgruppen des Mutterinstituts, dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC in Würzburg, gegründet. Das ISC gehört zu den ältesten Instituten in der Fraunhofer-Gesellschaft. Es entstand bereits 1926 in Berlin als Kaiser-Wilhelm-Institut, wurde 1948 als Max-Planck-Institut in Würzburg fortgeführt und gehört seit 1971 zur Fraunhofer-Gesellschaft. Das ISC entwickelt innovative Werkstoffe: Gläser, Keramiken sowie anorganisch-organische Hybridmaterialien. Im Fokus stehen dabei die stetige Verbesserung der Herstellprozesse sowie neue – multifunktionale – Materialien.

Das HTL bündelt die Keramikforschung des Mutterinstituts. Es verfügt an seinen drei Standorten Bayreuth, Würzburg und Münchberg über 80 Mitarbeiter und ca. 2.000 m² Laborfläche. Hauptstandort ist Bayreuth, wo 2015 ein eigens errichteter Neubau bezogen wurde (**Bild 1**). Das HTL ist nach ISO 9001:2008 zertifiziert. Wie bei Fraunhofer üblich führt es anwendungsnahe F&E durch und bietet seine Leistungen für die Auftragsforschung an. Anwendungsschwerpunkte sind die Energie-, Antriebs- und Wärmetechnik. Der Materialfokus liegt bei den technischen Keramiken, Feuerfest sowie anorganischen Kompositen.

MARKENZEICHEN THERMO-OPTISCHE MESSANLAGEN

Bereits seit den 1990er Jahren werden von den Mitarbeitern des HTL sogenannte ThermoOptische Messanlagen (TOM) entwickelt. Heute nimmt das HTL eine international führende Rolle auf dem Gebiet der Hochtemperaturmessverfahren ein. Es führt Hochtemperaturmessungen im Rahmen seiner Auftragsforschung durch und bietet bei Bedarf kundenspezifische TOM-Anlagen extern an. Mit den TOM-Anlagen können Material- und Prozesseigenschaften bis zu sehr hohen Temperaturen (2200 °C) detektiert werden. Sie füllen eine Lücke, die sich zwischen den kommerziell verfügbaren Thermoanalyseverfahren und industriellen Hochtemperatur-Testverfahren auftut. Z. B. liegen typische Probengrößen bei den TOM-Verfahren im Bereich 10–100 cm³. Thermoanalyseverfahren können i. d. R. nur weniger als 1 cm³ Probenmaterial vermessen, während die industriellen Testverfahren oft große Proben mit mehr als 1.000 cm³ benötigen. Der von den TOM-Anlagen abgedeckte mittlere Größenbereich hat den Vorteil, dass er ein repräsentatives Probenvolumen erfasst

– auch wenn die untersuchten Werkstoffe heterogen aufgebaut sind. Andererseits liefert er noch definierte Messbedingungen, was bei größeren Proben aufgrund der darin auftretenden Gradienten häufig nicht mehr der Fall ist.

Messtechnisches Rückgrat der TOM-Anlagen ist eine sehr genaue und reproduzierbare Dimensionsmessung. Mit der neuesten Anlagengeneration (**Bild 2**) können noch Dimensionsänderungen von 0,1 µm aufgelöst werden (bei einem Probendurchmesser von 10–30 mm). Die Reproduzierbarkeit – gemessen an der mittleren Standardabweichung bei wiederholt durchgeführten Messungen der Sinterschwindung – liegt bei 0,3 %. Die Dimensionsmessung ist flexibel einsetzbar. Sie wird nicht nur zur Bestimmung von Schwindungen und Ausdehnungen, sondern auch zur Analyse von Verformungen genutzt. Beispielsweise werden Kriechprozesse untersucht, indem Materialproben einachsigt belastet werden und das Verformungsverhalten in Lastrichtung und senkrecht dazu gemessen wird. Neben der uniaxialen Viskosität kann somit auch die viskose Poissonzahl ermittelt werden. Beide Kennzahlen werden benötigt, wenn



Bild 1: Neubau des Fraunhofer-Zentrums für Hochtemperatur-Leichtbau HTL am Standort Bayreuth



Bild 2: ThermoOptische Messanlage TOM_air



Bild 3: ThermoOptische Messanlage TOM_wave

das Hochtemperaturverhalten von Komponenten mittels Finite-Elemente-Methoden simuliert werden soll. Die berührungsfreie optische Messung erlaubt auch die Visualisierung vieler Hochtemperaturphänomene: So werden Schmelz- und Benetzungsprozesse ebenso gemessen wie der Verzug durch Schwerkrafteinfluss oder unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die optische Dimensionsmessung lässt sich mit vielen anderen Messverfahren kombinieren, sodass alle relevanten Hochtemperatüreigenschaften erfasst werden können.

Insgesamt verfügt das HTL über zwölf unterschiedliche TOM-Anlagen. Davon wurden mit dem Bezug des Neubaus in Bayreuth allein fünf völlig neuartige TOM-Anlagen konzipiert und aufgebaut. Die Messöfen sind

zumeist elektrisch beheizt und für oxidische, inerte oder reduzierende Atmosphären ausgelegt. Teilweise können sie auch mit der Abluft eines gasbeheizten Ofens betrieben werden, um spezielle Effekte zu untersuchen, die durch Gasbrenneratmosphären verursacht werden. Folgende Hochtemperatüreigenschaften werden erfasst:

- Festigkeit / Steifigkeit / Bruchdehnung
- Schwingfestigkeit / Druckerweichung / Kriechen
- Thermoschock- / Thermozyklrierbeständigkeit
- Dynamisches Elastizitätsmodul
- Temperatur- / Wärmeleitfähigkeit
- Emissivität integral / spektral
- Erosionsverhalten durch Gas- und Partikelströme

■ Elektrische Impedanz.

Als Beispiel ist in **Bild 3** die neue Anlage TOM_wave zu sehen, die einzigartige Möglichkeiten bietet, um das Thermoschock- und Thermozyklieverhalten von Materialien bei hohen Temperaturen unter definierten Bedingungen zu untersuchen.

OPTIMIERUNG VON WÄRME-BEHANDLUNGSPROZESSEN

Das HTL optimiert industrielle Wärmebehandlungsprozesse im Hinblick auf Kosten- und Energieeffizienz, Durchsatz, Ausschussraten und Produktqualität. Die Prozessoptimierung erfolgt sowohl aus der Ofenperspektive als auch aus der Perspektive des Erwärmungsguts. Während die Ofenperspektive für Kosten- und Energieeffizienz sowie Durchsatz entscheidend ist, wird die Prozessoptimierung aus Sicht des Erwärmungsguts für die Minimierung des Ausschusses und die Maximierung der Produktqualität benötigt. Folgende Wärmebehandlungsprozesse stehen im Mittelpunkt: Binderausbrand bzw. Pyrolyse, Trocknung und Dehydratation sowie Sinterung bzw. Schmelzinfiltration.

Die Prozessoptimierung aus Sicht des Erwärmungsguts startet mit einem Nachstellen der industriellen Wärmebehandlung in den TOM-Anlagen des HTL. Dabei werden die für den jeweiligen Wärmebehandlungsprozess wichtigen Eigenschaften in situ gemessen. Eine Besonderheit der TOM-Anlagen ist, dass sie die sehr unterschiedlichen Ofenatmosphären von Industrieöfen in speziell dafür konzipierten Messöfen nachbilden. Auf diese Weise können industrielle Wärmebehandlungsprozesse im Labor unter realistischen Bedingungen vermessen werden. Die Messergebnisse werden dann für eine gezielte Optimierung der Prozessparameter genutzt. Die Prozessoptimierung erfolgt anschließend am Computer mit eigener Software zur präzisen Vorhersage der Reaktionskinetik sowie mit Finite-Elemente-Modellen zur Berücksichtigung von Bauteileigenschaften. Die optimierten Wärmebehandlungsprozesse werden dann zunächst in den TOM-Anlagen überprüft, bevor sie im Industrieofen umgesetzt werden.

Die Vorgehensweise wird am Beispiel der Optimierung einer Temperatur-Zeit-Kurve für die Entbinderung verdeutlicht. Ziel ist hier die größtmögliche Verkürzung der Entbinderungsdauer bei sicherer Vermeidung von Bauteilschäden. Im ersten Schritt wird der Gewichtsverlust beim Aufheizen von Grünproben mit unterschiedlichen Aufheizraten gemessen. Daraus werden Temperaturzyklen berechnet, bei denen die Entbinderungsrate während der gesamten Entbinderung nahezu konstant bleibt. Die entsprechenden Temperaturzyklen bestehen aus ca. 10–20 Segmenten mit konstanten Aufheizraten. Die maximal zulässige Entbinderungsrate wird dann experimentell für die berechneten Temperaturzyklen ermittelt, indem Probenschädigungen mittels einer eigens entwickelten Schall-emissionsanalyse detektiert werden. In den TOM-Anlagen können kleinere Bauteile bis zu einem Gewicht von ca. 500 g entbindert werden. Bei großen Bauteilen muss ergänzend noch eine FE-Simulation durchgeführt werden, um die Druck- und Temperaturgradienten auf Bauteilgröße hochzuskalieren. Mit dieser Methode können Entbinderungszyklen oft um die Hälfte verkürzt werden.

Neben der Verkürzung der Prozessdauer spielen häufig auch die endformnahe Herstellung und die Homogenität der Bauteile eine wichtige Rolle. Die genaue Dimensionmessung während der Wärmebehandlung in den TOM-Anlagen ermöglicht es,

Ursachen für einen Verzug wie Gründichte-Gradienten, Schwerkrafteinfluss, Temperaturgradienten, Reibung etc. zu ermitteln. Die Homogenität kann zudem mittels einer speziell dafür entwickelten Hochtemperatur-Computertomografie während der Wärmebehandlung überwacht werden.

Die Perspektive des Industrieofens wird durch Messungen vor Ort berücksichtigt. Dazu wurde am HTL ein mobiler Messstand entwickelt, mit dem Temperaturverteilungen sowie Wärme- und Gasströme am und im Produktionsofen gemessen werden. Die Messdaten dienen dazu, Schwachpunkte der Ofenisolierung zu identifizieren, Energiebilanzen aufzustellen bzw. Gradienten im Ofen zu erfassen (**Bild 4**). Ergänzend können die Hochtemperatureigenschaften von Brennhilfsmitteln und Isolationswerkstoffen mit den TOM-Anlagen am HTL gemessen und bewertet werden. Die Messungen dienen auch als Eingangsgrößen für eine FE-Simulation des Industrieofens und / oder Brennstapels, die bei Bedarf durchgeführt wird, um die beiden Perspektiven des Ofens und des Erwärmungsguts zusammenzuführen.

HOCHTEMPERATURWERKSTOFFE UND -KOMPONENTEN

Das HTL entwickelt monolithische Hochtemperaturwerkstoffe, aber auch keramische Fasern, Beschichtungen, Schäume sowie Verbundwerkstoffe. Keramische Fasern werden für Isolations- und Verstärkungsanwendungen eingesetzt. Am HTL werden sowohl

oxidische als auch nicht-oxidische Keramikfasern entwickelt und im Technikumsmaßstab hergestellt. Mit der Entwicklung von keramischen Verstärkungsfasern soll der Aufbau einer eigenen europäischen Faserfertigung unterstützt und die Abhängigkeit von japanischen und US-amerikanischen Importen reduziert werden. Der Schwerpunkt bei den Beschichtungen liegt auf kundenspezifischen Entwicklungen von Precursoren, die nasschemisch, z. B. durch Tauchen, Sprühen oder Streichen, appliziert und durch einen Brennpfrozess keramisiert werden. Die Beschichtungen können für den Korrosionsschutz, zur gasdichten Versiegelung oder zur Einstellung bestimmter Benetzungseigenschaften eingesetzt werden. Die Schaumentwicklung konzentriert sich auf kostengünstige Direkt-schäumverfahren für oxidkeramische Werkstoffe, die für Hochtemperaturisolationen verwendet werden können.

Die am HTL entwickelten Verbundwerkstoffe umfassen keramische und metallische Materialien. Der Fokus liegt auf faserverstärkten Keramiken (CMC). Anders als monolithische Keramiken besitzen CMC schadenstolerante Eigenschaften, weil das ansonsten spröde Bruchverhalten der Keramiken durch die Fasern abgeschwächt wird. In dieser Hinsicht ähneln CMC metallischen Werkstoffen, besitzen jedoch höhere Einsatztemperaturen. Ein Beispiel sind Hubtore aus einem oxidkeramischen CMC, die gemeinsam mit der Firma Pritzkow für den Hochtemperatur-

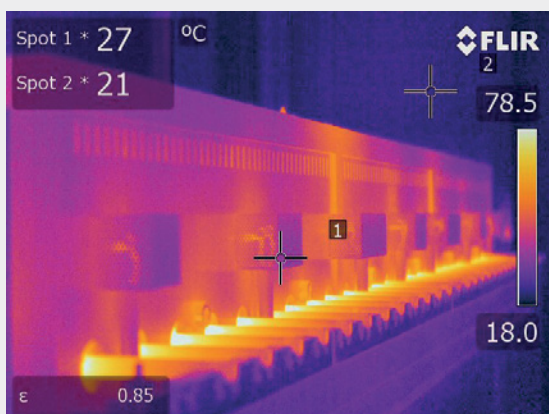


Bild 4: Vermessung eines Industrieofens mit Thermokamera

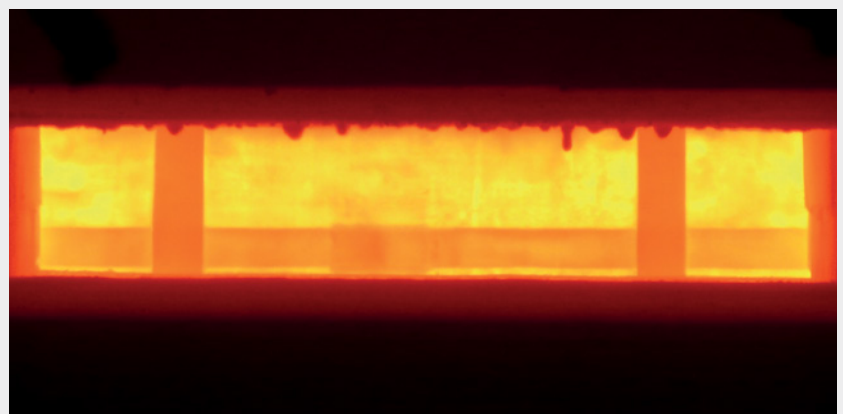


Bild 5: Hubtor aus einem oxidischen CMC im Hochtemperatureinsatz

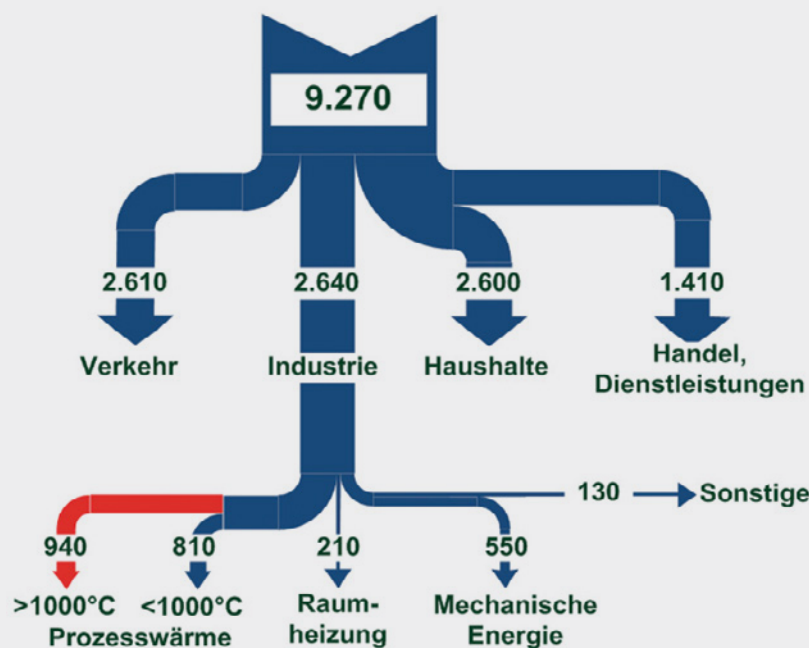


Bild 6: Endenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland 2013
(Zahlen in PJ, Quelle: AGEB)

einsatz entwickelt wurden (**Bild 5**). Trotz der höheren Herstellkosten kann sich der Einsatz von CMC-Komponenten in der Wärmetechnik lohnen – aufgrund der signifikant längeren Lebensdauer im Vergleich zu monolithischen Bauteilen. Eine andere wichtige Anwendung für CMC-Bauteile sind Gasturbinen. Der Wirkungsgrad von Gasturbinen steigt mit der Betriebstemperatur. Die Betriebstemperatur konnte in der Vergangenheit durch Entwicklung von metallischen Speziallegierungen sowie durch Wärmeschutzschichten und spezielle Kühlkonzepte gesteigert werden. In Zukunft werden jedoch CMC-Bauteile benötigt, um die Betriebstemperaturen von Gasturbinen weiter erhöhen zu können. Als einzige Forschungseinrichtung in Europa deckt das HTL die gesamte Herstellkette für CMC von der Keramikfaserherstellung über die textile Faserverarbeitung bis hin

zur Einbringung der Matrix und die Wärmebehandlung ab. Auch Fügeverfahren mit speziellen Hochtemperaturlöten werden am HTL entwickelt, z. B. um die Gasdichtigkeit zu gewährleisten.

Metallische und metallkeramische Verbundwerkstoffe werden am HTL in erster Linie über additive Fertigungsverfahren und anschließende Infiltrationsprozesse hergestellt. Anwendungen liegen in der raschen Herstellung von Prototypen sowie in der Realisierung sehr komplexer Geometrien, die mit konventionellen Formgebungsverfahren gar nicht oder nur mit hohem Aufwand realisierbar sind. Mittels 3D-Druck können z. B. Formwerkzeuge hergestellt und optimiert werden.

ENERGIEEFFIZIENZ VON HOCHTEMPERATURPROZESSEN

Eine wichtige umweltpolitische Aufgabe

sieht das HTL in der Verbesserung der Energieeffizienz von Hochtemperaturprozessen. In Deutschland werden 28 % der gesamten Endenergie vom verarbeitenden Gewerbe verbraucht (**Bild 6**). Davon entfällt ca. ein Drittel auf Hochtemperaturprozesse, die Temperaturen über 1000 °C benötigen. Dies entspricht einer Energiemenge von jährlich ca. 900 PJ bzw. der Energieerzeugung von 30 Kernkraftwerken mit einer Durchschnittsleistung von 1 GW. Auf der anderen Seite wurden von der Bundesregierung im Einklang mit dem Parisabkommen strenge Einsparziele für die Treibhausgasemissionen vorgegeben: ca. 40 % bis 2020 sowie 80-95 % bis 2050 – im Vergleich zum Stand von 1990. Eine Verlagerung der energieintensiven Industrien in Schwellenländer, um die deutschen Klimaschutzziele zu erreichen, ist nicht zielführend: Durch die Verlagerung würden die globalen Emissionen – aufgrund laxerer Umweltvorschriften in den Schwellenländern – möglicherweise noch erhöht, keinesfalls jedoch reduziert werden. Stattdessen muss zusätzlich zur Einführung regenerativer Energien die Energieeffizienz gesteigert werden. Dies gilt besonders für Hochtemperaturprozesse, für die die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen angesichts sehr langer Investitionszyklen besonders dringlich ist. Das HTL arbeitet mit Keramik- und Feuerfestindustrie, Werkstoffherstellern sowie Herstellern von Wärmebehandlungsanlagen und Systemkomponenten zusammen mit dem Ziel, energieeffiziente Wärmeprozesse mit hohem Qualitätsstandard umzusetzen.

Kontakt:

Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL

PD Dr. Friedrich Raether
Gottlieb-Keim-Straße 62
95448 Bayreuth

Tel.: 0921 / 78510-002
friedrich.raether@isc.fraunhofer.de
www.htl.fraunhofer.de