

Temperatur- und Strömungsfeld in Höchsttemperatur-Ofenanlagen

von **Uwe Lohse, Jakob Lohse**

Höchsttemperatur-Ofenanlagen eröffnen neue Möglichkeiten im Hochtechnologiesektor, insbesondere bei der Herstellung neuartiger Materialien, welche oftmals eine klar definierte thermische Behandlung in einer Schutzatmosphäre benötigen. Die offene Simulationssoftware OpenFOAM® wird in der vorliegenden Arbeit dazu benutzt, die beiden wichtigsten Parameter im Inneren einer solchen Anlage zu simulieren. Für die Berechnung des Temperatur- sowie Geschwindigkeitsfeldes müssen dabei Interaktionen von Wärmeleitung, -konvektion, -strahlung, Wärmequellenverteilung sowie die Umströmung der komplexen Geometrie berücksichtigt werden. Eine Validierung der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten einer eigens entworfenen Versuchsanlage zeigt eine sehr gute Übereinstimmung und bemächtigt diese numerische Methode, den Auslegungsprozess einer solchen Anlage signifikant zu verbessern.

Temperature and flow field in high-temperature furnaces

High-temperature furnaces are enabling critical processes in the high-tech materials industry, as many of today's advanced materials can only be characterized and processed under extremely hot and defined atmospheric conditions. Key performance parameters of such a furnace are the internal temperature field and the motion of the inert gas. Simulations with the open source software OpenFOAM® demonstrate considerable potential to provide this data to improve the design process for such a device. Those simulations deal with the interdependencies of convection, conduction, radiation, joule heating and a complex multi-material geometry. After calibrating the numerical model and the material properties against experimental data from a newly designed state-of-the-art test furnace with a graphite heater, excellent agreement between experiment and simulation was achieved.

Diskontinuierliche Höchsttemperatur-Ofenanlagen mit Arbeitstemperaturen oberhalb von 2.000 °C werden in zunehmendem Maße in Hochtechnologiebereichen eingesetzt. In diesem technologischen Grenzbereich ist die Kenntnis der auftretenden Temperatur- und Strömungsfelder aus Simulationen besonders nützlich und hilfreich, da die Möglichkeiten der direkten Messung sehr eingeschränkt sind.

Zur Bestimmung dieser Felder wurde ein Versuchsofensystem entwickelt und gebaut. Anschließend wurden die Ergebnisse der Messung mit denen der numerischen Simulation verglichen.

Als Ofenbauer ergeben sich dabei völlig neue Möglichkeiten, um solche Systeme im Höchsttemperaturbereich

auslegen zu können. Die Qualität der in diesen Ofenanlagen gefertigten Güter kann bedeutend gesteigert werden, da diese mit der Homogenität des Temperatur- und Strömungsfeldes im Nutzraum einhergehen. Weiterhin können teure Schadensfälle oder Ausfallzeiten durch Übertemperaturen mit geeigneten konstruktiven Maßnahmen im Vorfeld vermieden werden.

Aufbau von Höchsttemperatur-Ofenanlagen

Ofensysteme für Temperaturen oberhalb von 2.000 °C sind als Kaltwandöfen aufgebaut. Sowohl das oder die Heizelemente und die gesamte thermische Isolation befinden sich innerhalb eines Edelstahlkessels. Dieser Kessel ist komplett doppelwandig ausgeführt, um an allen Stellen

eine intensive Wasserkühlung zu gewährleisten. Die relativ geringe Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl erzwingt eine komplette, vollflächige Kühlung. Durch eine oder mehrere Entlüftungsschrauben wird die Bildung von Luftblasen vermieden, die ansonsten lokale thermische Probleme hervorrufen können.

Als Kesselmaterial findet der Edelstahl 1.4301 weite Verwendung, für korrosive Prozesse werden auch höherlegierte Stähle eingesetzt.

Als Material für die Heizleiter finden Wolfram und Graphit Verwendung. Im Beitrag werden ausschließlich graphitbeheizte Öfen betrachtet.

In graphitbeheizten Öfen können sowohl CFC (Carbon

Reinforced Carbon) oder isostatisch gepresstes Graphit als Heizelementmaterial eingesetzt werden. CFC ist kleineren Anlagen mit einer Maximaltemperatur von ca. 2.300 °C vorbehalten, besitzt aber einen weiten Spielraum zur geometrischen Gestaltung und bietet Vorteile aufgrund des relativ hohen spezifischen Widerstandes. Isostatisch gepresstes Graphit ist leicht zu bearbeiten und wird meist in die Form stehender Zylinder gebracht, da diese sehr robust ist.

Die Kontaktierung erfolgt üblicherweise von unten, sodass sich der stehende Heizelement-Zylinder nach oben frei ausdehnen kann. Die Kontaktierung kann drei-, sechs-, oder neunphasig erfolgen. Die Erhöhung der Kontaktanzahl ist bei größeren Nutzraumvolumina notwendig, um den Heizstrom nicht zu stark ansteigen zu lassen.

Die thermische Isolation wird durch Graphitfilze erreicht. Es finden sowohl Hart- als auch Weichfilze Verwendung. Dieses poröse Material begrenzt naturgemäß den erreichbaren Enddruck beim Evakuieren. Solche porös gedämmten Ofensysteme erreichen Enddrücke im Bereich 10^{-4} mbar. Für Fälle, bei denen dies nicht ausreichend ist, besteht die Möglichkeit, CFC-Platten oder Ringe als Strahlenschutzschirme einzusetzen, dann sind Enddrücke bis in den Bereich 10^{-6} mbar möglich, allerdings mit deutlich geringerer Dämmwirkung im Schutzgasbetrieb.

Der Ofenherd ist ebenfalls aus Graphit und Graphitfilz gefertigt.

Anwendungsfelder

Die hauptsächlichen Anwendungsgebiete für Ofensysteme graphitischer Hochtemperatursysteme sind das Sintern von Nichtoxidkeramiken und das Graphitieren von Kohlenstoffmaterialien.

Weiterhin finden diese Ofentypen Verwendung zum Abscheiden von Schichten und quasi als Gegenteil davon zum Reinigen, d. h. Entfernen von unerwünschten Schichten auf Substraten. Beiden Applikationen ist gemeinsam, dass neben der Temperaturverteilung die Gasströmung im Ofen einen entscheidenden Faktor darstellt.

In **Bild 1** ist ein Ofensystem für die Herstellung von Bornitrid-Tiegeln mit CVD (Chemical Vapour Deposition) dargestellt. Dabei erfolgt eine Substratbeschichtung durch eine Hochtemperaturreaktion in der Gasphase.

Bei einem Nutzraumdurchmesser von 1.000 mm und einer Nutzraumhöhe von 1.400 mm sind Temperaturen bis zu 2.200 °C möglich. Fünf Gasstränge, jeweils mit hochgenauer Gasflussregelung, ermöglichen die exakte Einstellung der Atmosphäre.

Um eine möglichst große Homogenität der Temperatur zu erzielen, ist das Heizsystem dreizonig ausgeführt. In jeder Zone kann die Temperatur mit zwei Pyrometern erfasst werden.

Für ein gleichmäßiges Schichtwachstum ist eine Führung des Gasstromes unabdingbar. Dabei stehen als Inst-



Bild 1: Innenaufbau CVD-Produktionsanlage (Nutzraumdurchmesser 1.000 mm)



Bild 2: Versuchs-Ofensystem

mentarium verschiedene konstruktive Möglichkeiten zur Verfügung: Mehrfach-Gaseinlässe, Mehrfach-Gasauslässe, Strömungsdiffusoren, Prallplatten etc.

Die Wirkung dieser Maßnahmen experimentell zu erfassen, ist sehr zeit- und kostenaufwendig. Ein kompletter Beschichtungszyklus kann bis zu 120 h dauern, erst nach Ablauf dieser Frist sind die Auswirkungen messbar.

Um hier wesentlich effektiver vorgehen zu können, wurde eine Methode entwickelt, welche rechnergestützte Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics – CFD) einsetzt. Die Ergebnisse wurden zudem durch Experimente an einem geeigneten Versuchs-Ofensystem validiert.

Versuchs-Ofensystem

Das Versuchs-Ofensystem (**Bild 2**) ist mit 0,2 l Nutzraum zwar kleinbauend, aber prinzipiell gleich aufgebaut wie die wesentlich größeren Systeme für die Produktion.

Die Anlage ist als Hubbodenanlage aufgebaut, d. h. zur Beladung wird der untere Boden mitsamt dem Ofenherd elektromotorisch abgesenkt. Der Ofenkörper inklusive des Heizelementes und der thermischen Isolierung bleibt dabei unbewegt.

Ein robuster Stahlrahmen haust das gesamte System ein und erlaubt durch Bodenrollen und Kranösen eine räumlich flexible Aufstellung.

Die weiteren technischen Daten sind der **Tabelle 1** zu entnehmen, eine prinzipielle Darstellung der einzelnen Regionen und Materialien findet sich in **Bild 3**.

Gesteuert wird die Anlage durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (Eurotherm EPC). Dieser Aufbau erlaubt die Speicherung der gewonnenen Daten entsprechend der Norm AMS2725E auch ohne zusätzlichen Schreiber. Diese Maßnahme dient dazu, die Ergebnisse schnellstmöglich in den Designprozess für Öfen mit dieser Anforderung aus

Tabelle 1: Technische Daten Versuchs-Ofensystem

Maximaltemperatur	2.500 °C
Nutzraum	Durchmesser: 50 mm Höhe: 110 mm Volumen: 220 ml
Drucksensoren	1 x Differenzdrucksensor 1 x Absolutdrucksensor
Temperatursensoren	Max. 8 x Thermoelemente (Typ C und Typ N) 1 x Pyrometer
Enddruck Vakuum	<10 ⁻³ mbar
Heizmaterial	Graphit
Thermische Isolation	Graphitfilz
Kessel	Edelstahl, doppelwandig wassergekühlt
Heizleistung	32 kW

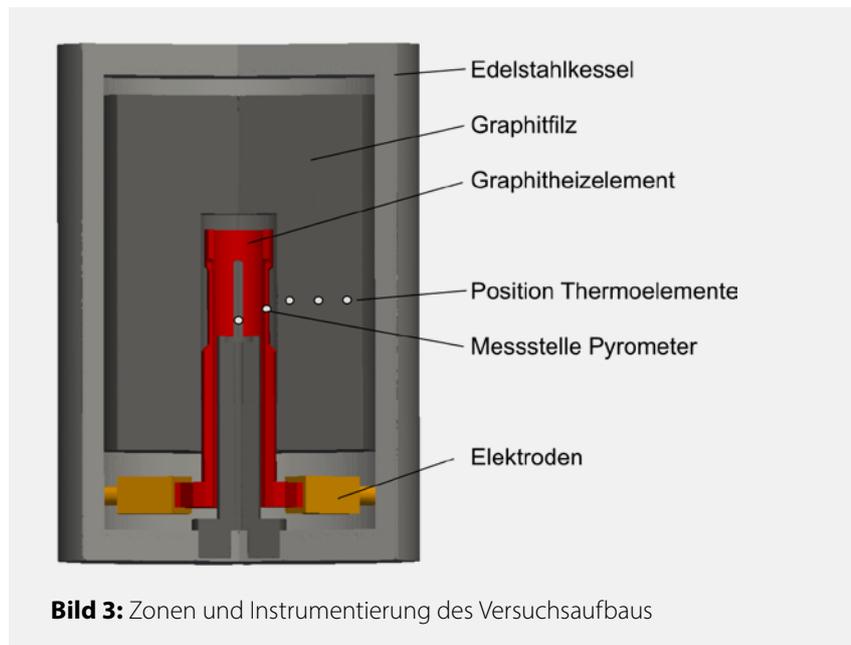


Bild 3: Zonen und Instrumentierung des Versuchsaufbaus

der Luftfahrt einfließen zu lassen.

Ein großer Touchscreen erlaubt auf sehr intuitive Weise die Bedienung der Anlage. Das System lässt sich wahlweise vollautomatisch oder manuell steuern.

Instrumentierung des Ofensystems

Zur Temperaturmessung ist die Versuchsanlage mit mehreren Temperaturmessstellen bestückt.

Ein Pyrometer misst die Temperatur direkt am Heizelement. Der Strahlengang verläuft durch ein Schauglas in der Kesselwandung durch ein offenes Pyrometerschauhrohr bis zum Heizelement. Gemessen wird dabei im Spektralbereich 0,8 ... 1,1 µm, der Messbereich beginnt bei 900 °C und reicht bis zur Maximaltemperatur. Das Pyrometer besitzt eine integrierte Kamerafunktion, sodass über einen in der Tür eingebauten 7" Monitor ständig der Messort und die Durchlässigkeit des Schaurohres überprüft werden kann.

Auf der gleichen horizontalen Ebene sind drei Thermoelemente positioniert. Ein Thermoelement Typ C (Wolfram-5 % Rhenium / Wolfram-26 % Rhenium) wird durch den Herd geführt und misst direkt im Nutzraum. Drei weitere Thermoelemente Typ N dienen zur Temperaturmessung innerhalb des Graphitfilzes. In diesem Bereich zwischen dem Heizer und der wassergekühlten Kesselwandung liegen die Temperaturen unterhalb von 1.200 °C.

Weiterhin werden die Effektivwerte der elektrischen Ströme und Spannungen an den Elektroden erfasst. Dadurch ist die eingespeiste elektrische Leistung zu jedem Zeitpunkt bekannt.

Numerisches Setup

Die Simulation des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes innerhalb des Höchsttemperatur-Ofens erfolgte

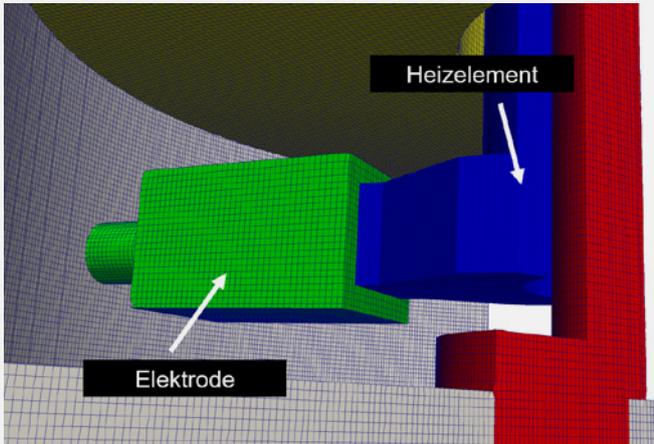


Bild 4: Berechnungsgitter im Bereich Elektrode

durch instationäre und stationäre Reynolds-gemittelte Navier-Stokes Simulationen. Sowohl die Generierung des unstrukturierten Berechnungsgitters, als auch die Lösung der erforderlichen Gleichungen wurde innerhalb des freien Simulationssoftwarepakets OpenFOAM® realisiert. Das Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) stellte die notwendigen Rechenkapazitäten im Rahmen des EU-Forschungsprojektes Fortissimo 2 zur Verfügung.

Aufgrund der axialsymmetrischen Konstruktion musste für die Simulationen lediglich ein Drittel der Anlage vergittert werden und die Originalabmessungen konnten erhalten bleiben, ohne dabei die Anzahl der Zellen unpraktikabel zu erhöhen. Die Erstellung des volumenzellen-basierten Gitters erfolgte unter Verwendung von snappyHexMesh. Dieser Gittergenerator ermöglicht die weitestgehend automatische Vergitterung komplexer Geometrien, welche in Form von triangulierten Oberflächennetzen (stl- oder obj-Format) aus der CAD-Konstruktion in OpenFOAM® importiert werden. Über mehrere Iterationsschritte werden

anschließend Gitterzellen um die vorgegebenen Bauteilgeometrien erzeugt.

Der Einfluss der Zellengröße auf die Simulationsergebnisse konnte ab einer Zellanzahl von 8 Mio. vernachlässigt werden. In **Bild 4** ist ein Ausschnitt des numerischen Rechnetzes zu sehen, welches den Bereich der Verbindung von Elektrode und Heizelement zeigt. Dargestellt sind hier nur die Gitter der Festkörper. Das Gitter des Schutzgases Argon ist aus Gründen der besseren Sichtbarkeit ausgespart, umschließt in der Realität jedoch sämtliche Bauteile. Die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Bauteile wurden jeweils temperaturabhängig spezifiziert, um den Einfluss der zu erwartenden, immensen Temperaturgradienten entsprechend abbilden zu können. Dafür wurde auf bereits vorhandene Datenbanken sowie auf die Spezifikationen der Hersteller zurückgegriffen.

Für die Simulation des Wärmetransports wurden ausgehend vom elektrischen Heizer, über das Schutzgas Argon, die Isolationsschichten aus Graphitfilz und den Edelstahlkessel, sämtliche Übertragungsmechanismen berücksichtigt. Neben der Wärmeleitung, der erzwungenen sowie der natürlichen Konvektion, ist aufgrund der hohen Temperaturen vor allem die Wärmestrahlung von gesteigerter Bedeutung. Für deren Simulation eignet sich in dem vorliegenden Falle das fvDom-Modell (Finite Volume Discrete Ordinates Method), da hier die Strahlung durch das vorhandene, partizipierende Medium mit guter Genauigkeit abgebildet wird.

Für die Berechnung des elektrischen Aufheizvorganges (Joule Heating) musste der elektrische Widerstand des verwendeten Materials sowie die Eingangsspannung gesetzt werden. Die maximale Leistungsentnahme der Anlage lag für die vergleichenden Untersuchungen bei 6.000 W.

Da für das Schutzgas Argon sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten bei sehr hohen Temperaturen vorliegen, kann die Strömung laminar simuliert werden. Die zu erwartenden Reynoldszahlen sind sehr klein und stets unter den kritischen Werten für laminar-turbulente Transitionsszenarien.

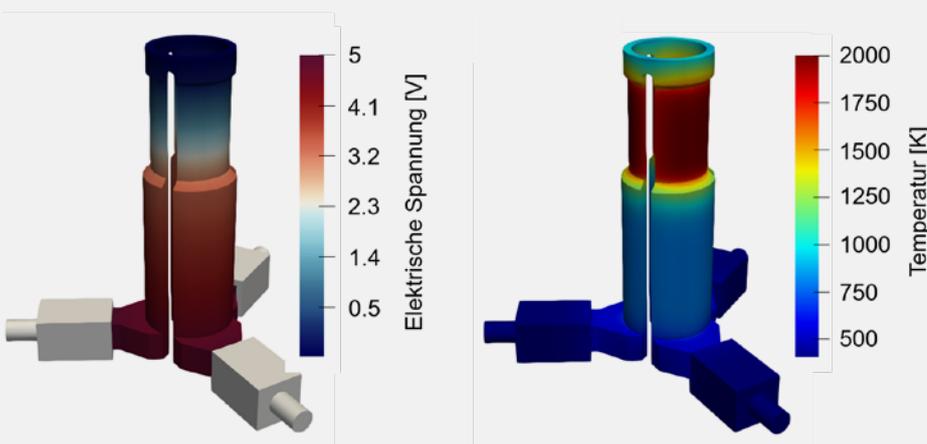


Bild 5: Spannungs- und Temperaturverteilung am Heizelement

Ergebnisse – Vergleich Messung zu Simulation

Simulation eines einzelnen Heizelementes ohne Isolation und Ummantelung

Das Heizelement besteht aus isostatisch gepresstem Graphit und ist in einer Sternschaltung mit drei Elektroden angeordnet. **Bild 5** zeigt sowohl die Spannungsverteilung (links) als auch die aus dem elektrischen Wider-

stand resultierende Temperaturverteilung (rechts) innerhalb des Bauteils für eine Eingangsspannung von $U_{\text{RMS}} = 5 \text{ V}$. Im Experiment liegt an jeder Elektrode eine phasenversetzte Wechselspannung an, welche in den stationären Simulationen durch den Effektivwert (Root Mean Square) des Spannungssignals an einer Elektrode approximiert wurde.

Wie erwartet, zeigt sich die stärkste Aufheizung im Bereich der Materialverjüngung im oberen Bereich des Heizers. Dort findet auch der stärkste Spannungsabfall statt, da der elektrische Widerstand aufgrund des verringerten Bauteilquerschnitts am größten ist.

Zusätzlich wurden vergleichende transiente Simulationen mit einer zeitabhängigen Wechselspannung als elektrischer Randbedingung durchgeführt. Damit konnte verifiziert werden, dass sowohl die Annahme des RMS-Wertes der Spannung als auch die Reduktion auf ein Drittel Ofensegment mit symmetrischen Rändern keine Veränderungen in den Ergebnissen zeigen.

Simulation der gesamten Anlage

Eine transiente Simulation der gesamten Höchsttemperatur-Ofenanlage ist numerisch sehr aufwendig, da es aufgrund der Isolationsschichten sehr viel Zeit benötigt, bis ein stationärer Endzustand erreicht wird. Für eine stabile und korrekte Simulation sind zudem nur kleine Zeitschritte möglich. Daher wurden die hier gezeigten Simulationen, bei denen sowohl das Temperatur- als auch das Strömungsfeld berechnet wurde, in zwei Teilschritten durchgeführt. Zunächst wird eine stationäre Berechnung gestartet mit dem Ziel, den Aufheizvorgang aller Bauteile zu simulieren, während der Wärmetransport durch Konvektion und die Gasbewegung des Schutzgases nicht mitberücksichtigt wird („Frozen Flow“). Da hier nur die Wärmeleitungs- sowie die Strahlungsgleichungen gelöst werden müssen, ist dieser Teil numerisch günstig und benötigt wenig Zeit und Ressourcen.

Ist das Temperaturfeld eingestellt, schließt eine transiente Simulation an, bei der zusätzlich auch das Strömungsfeld und die damit einhergehende erzwungene sowie natürliche Konvektion in die Erhaltungsgleichungen einfließen. Für Courant-Zahlen kleiner 1 in Verbindung mit Diskretisierungsschemata zweiter Ordnung werden damit komplexere Fluidbewegungen, wie etwaige Wirbelbildungen hinter scharfen Kanten (geometrie-induzierte Ablösungen), deutlich akkurater abgebildet.

Bild 6 zeigt das sich einstellende Temperatur- und Strömungsfeld im Mittelschnitt der Anlage. Die statische Temperatur ist hierbei jeweils farblich kodiert. Auf der linken Bildseite zeigt sich wie schon für das einzelne Heizelement ein starkes Aufheizen der beabsichtigten Fläche des Heizers. Zum Rand der Anlage hin nimmt die Temperatur unterschiedlich stark ab und erreicht am Edelstahlkessel die durch die Wasserkühlung gewährleisteten 303 K

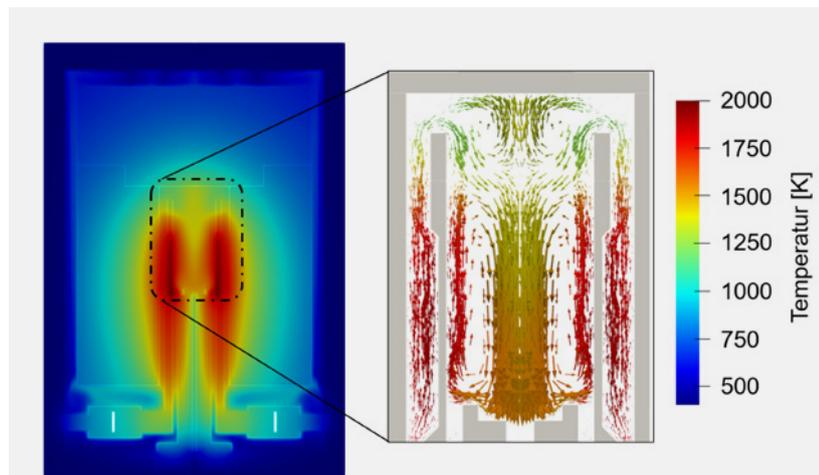


Bild 6: Temperatur- und Strömungsfeld

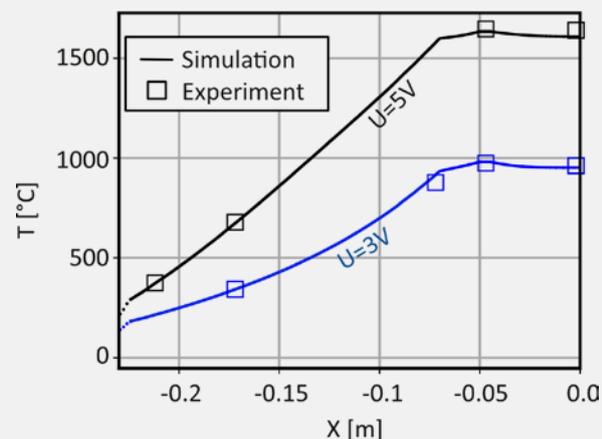


Bild 7: Vergleich gemessene und simulierte Temperaturverläufe

beziehungsweise 30 °C. Das vorliegende dreidimensionale Temperaturfeld ermöglicht es nun, eventuell auftretende kritische Bauteiltemperaturen zu identifizieren und gegebenenfalls angemessen zu reagieren. Zudem kann abgeschätzt werden, ob das Temperaturlevel sowie die Homogenität im Bereich des zu bearbeitenden Werkstücks ausreichend sind.

Die dazugehörige Fluidbewegung dieses Bereichs ist im rechten Teil von Bild 6 gezeigt. Dargestellt sind die Vektoren der Strömungsgeschwindigkeit, welche jeweils mit der Temperatur farblich kodiert wurden. Dabei wird das Gas hauptsächlich durch die Temperatur- und die daraus resultierenden Dichteunterschiede bewegt. In heißen Bereichen steigt die Luft auf und senkt sich wieder in Gebieten mit geringeren Temperaturen.

Inwiefern sich dieses Strömungsbild auf das Endresultat des thermischen Prozesses auswirkt, hängt natürlich stark von der zu bearbeitenden Probe ab.

Ein abschließender Vergleich der Ergebnisse von Messung und Simulation ist in **Bild 7** dargestellt. Hier zeigen die diskreten Temperaturmessungen für unterschiedliche

Abstände X zum Anlagenzentrum ($X = 0$ m) sowie der Temperaturverlauf aus der Simulation eine sehr gute Übereinstimmung. Zusätzlich dazu konnte auch die gemessene elektrische Leistungsaufnahme des Ofens in den Simulationen abgebildet werden.

Fazit

Es konnte ein computergestütztes Modell entwickelt werden, das mit guter Genauigkeit Aussagen zum Temperatur- und Strömungsfeld von Höchsttemperatur-Ofenanlagen liefern kann. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten zur Auslegung solcher Systeme, die in besonderer Weise zeit- und kosteneffizient sind. Die detaillierten Kenntnisse über die Vorgänge im Inneren der Anlage helfen zudem, etwaige Schäden durch Übertemperaturen an kritischen Bauteilen zu vermeiden und eine optimale thermische Bearbeitungsqualität zu gewährleisten.

Danksagung

Der finanziellen Unterstützung durch die Europäische Union im Rahmen des Fortissimo 2 Projekts 801 sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

AUTOREN



Dr.-Ing. Uwe Lohse
Xerion Berlin Laboratories GmbH
Berlin
030 / 200-970-20
u.lohse@xerion.de



Dr.-Ing. Jakob Lohse
Navasto GmbH
Berlin
030 / 6108189-24
jakob.lohse@navasto.de