

GESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN IN HEISSEN GASSTRÖMUNGEN MIT HILFE DER FASEROPTISCHEN ORTSFILTERTECHNIK

Dieter Petrak und G. Paczkowski*

Institut für Mechanik, Professur Strömungsmechanik, *Professur Verbundwerkstoffe
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str.70, 09126 Chemnitz
E-Mail: Dieter.Petrak@imech.tu-chemnitz.de

Zusammenfassung

Für lokale Geschwindigkeitsmessungen in heißen Gasströmungen wurde auf Basis der faseroptischen Ortsfiltertechnik eine Messsonde entwickelt, die für Dauermessungen bei 750°C und kurzzeitig bei 1000°C einsetzbar ist. Das faseroptische Ortsfilter ist aus zehn goldbeschichteten Quarzglasfasern vom Typ Stufenindex aufgebaut und befindet sich an der keilförmigen Spitze der Messsonde. Die Fixierung der Quarzglasfasern auf einer Trägerplatte erfolgte mit einem einkomponentigen raumtemperaturhärtenden keramischen Klebstoff. Die Trägerplatte wurde in einer keilförmigen Spitze aus einer maschinell bearbeitbaren Glaskeramik fixiert und in ein keramisches Sondenrohr eingeklebt. Die vollständig faseroptische Messsonde ist über zehn Koppellichtleitkabel mit der Elektronikeinheit verbunden, die das Geschwindigkeitsburstsinal für die Signalanalyse bereitstellt. In der Elektronikeinheit befinden sich zehn Photodioden, zehn Verstärker und ein Differenzverstärker. Die Messsonde arbeitet im Absorptionsbetrieb, wobei ein Laserstrahl mit linienförmigem Strahlquerschnitt in ein abgeschlossenes Glasrohr justierbar eingekoppelt wurde. Als Tracerpartikel fanden Tioxidpartikel und Hohlglasskugeln Verwendung, die mit einem Feststoffdispersierender der Gasströmung zugeführt wurden. Die Messungen erfolgten bei einer Gastemperatur von 600°C. Aufgrund des Absorptionsverfahrens ist die Messsonde auch geeignet, die Geschwindigkeit von Gasschlieren ohne Verwendung von Tracerpartikeln zu erfassen.

Einleitung

Das Ziel des Projektes bestand darin, in einem gasdurchströmten Modellofen die Geschwindigkeit der Schutzgasströmung (Stickstoff) lokal zu erfassen, um damit einen Vergleich mit numerisch berechneten Daten zu ermöglichen. Der zylinderförmige Modellofen mit einer Gesamtlänge von 1,5 m besitzt eine zylinderförmige keramische Auskleidung. Im Innern des Modellofens befindet sich eine Stahlmuffel mit dem Querschnitt 145 x 45 mm², die in ihrer Längsachse vom Schutzgas durchströmt wird. Der Modellofen wird elektrisch zonenförmig beheizt, wobei die Gastemperatur maximal ca. 600°C beträgt. Zugang zum Innenraum der durchströmten Stahlmuffel war nur über eine Reihe von Bohrungen von 11 mm Durchmesser gegeben, in denen sich am Aussenmantel Stopfbuchsen befanden. Die Ausgangssituation in einem Ofenquerschnitt ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

Aufgrund der gegebenen geometrischen Abmessungen würde sich im Fall der Laser-Doppler-Technik ein sehr kleiner halber Schnittwinkel unter 1° ergeben. Ein vorhandenes Laser-Doppler-System mit Rückwärtsstreuung hätte folgende Nachteile: Brennweite bzw. Messabstand ca. 3 m, vergrößerter Interferenzstreifenabstand, sehr kleine Signalamplitude. Der Vorschlag war, mit Hilfe der Erfahrungen auf dem Gebiet der Ortsfiltertechnik eine optische Geschwindigkeitsmeßsonde auf Basis der faseroptischen Ortsfiltertechnik einzusetzen, die speziell auf die Randbedingung „hohe Gastemperatur“ ausgelegt ist.

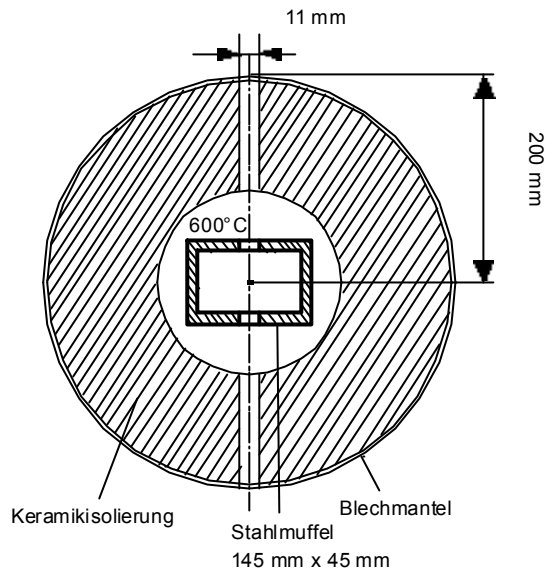


Bild 1. Schematische Darstellung eines Ofenquerschnitts

Aufbau des Messsystems

Vergleichsmessungen mit einem Laser-Doppler-System haben nach Petrak et al 1994 gezeigt, dass eine faseroptische Messsonde nach dem Absorptionsprinzip für die mittlere Geschwindigkeit einer Luftströmung bei Raumtemperatur eine Zunahme von 1,8 % aufweist. Diese Zunahme ist bedingt durch die Umströmung des Sondenmessrohres. Messungen mit einer faseroptischen Messsonde nach dem Reflexionsprinzip waren nicht erfolgreich. Für die Ausführung der Messsonde für Gastemperaturen bis 600°C wurde deshalb das Absorptionsprinzip herangezogen.

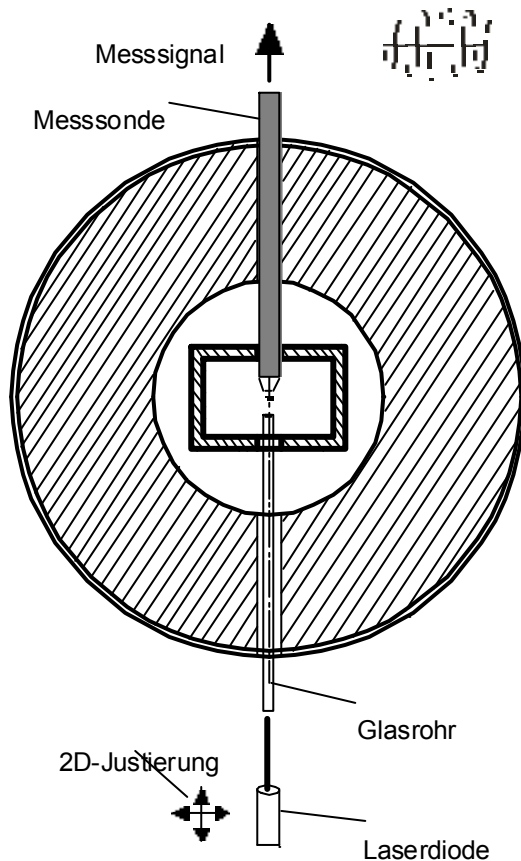


Bild 2. Messkonfiguration am Modellofen

Beim Absorptionsprinzip wird das Messvolumen mit parallelem Licht beleuchtet und der Schatten des sich bewegenden Tracerpartikels fällt auf ein faseroptisches Ortsfilter und erzeugt einen Geschwindigkeitsburst. Die Messsituation am Modellofen ist schematisch in Bild 2 angegeben.

Um die optisch-mechanische Stabilität der Lichtwellenleiter bei hohen Gastemperaturen zu gewährleisten, wurden goldbeschichtete Quarzglasfasern mit folgenden Eigenschaften für das Ortsfilter ausgewählt:

Kerndurchmesser 200 μm , Manteldurchmesser 220 μm , Goldmantel 255 μm , numerische Apertur 0,22, Dauereinsatztemperatur 750°C, Spitzentemperatur 1000°C. Das Ortsfilter selbst wurde mit Hilfe eines Wickelverfahrens hergestellt und ist wie folgt gekennzeichnet: Ortsfilter- oder Gitterkonstante 510 μm , Ortsfilterlänge 2,55 mm. Nach dem Wickelvorgang muß das Ortsfilter auf einer geeigneten Unterlage fixiert werden. Dafür ist ein Hochtemperaturklebstoff zu verwenden, der folgenden Anforderungen genügen sollte:

- Geringe Porosität mit Porengrößen kleiner als 10 μm
- Ausreichende Härte für Schleif- und Polierprozesse
- Geringe Viskosität

In umfangreichen Vorversuchen wurden verschiedene Hochtemperaturklebstoffe auf ihre Eignung getestet. Verwendet wurde schließlich ein keramischer Klebstoff vom Typ 989 der Fa. Cotronics Corp./USA. Es ist ein einkomponentiger raumtemperaturaushärtender keramischer Klebstoff auf Basis Aluminiumoxid und einsetzbar bis 1650°C. Der als Paste gelieferte Klebstoff lässt sich gut auftragen, so dass die Lichtleitfasern nach der Aushärtung gut eingebettet und auf der Unterlage fixiert sind. Nach dem Polieren erhält man eine glatte Fläche.

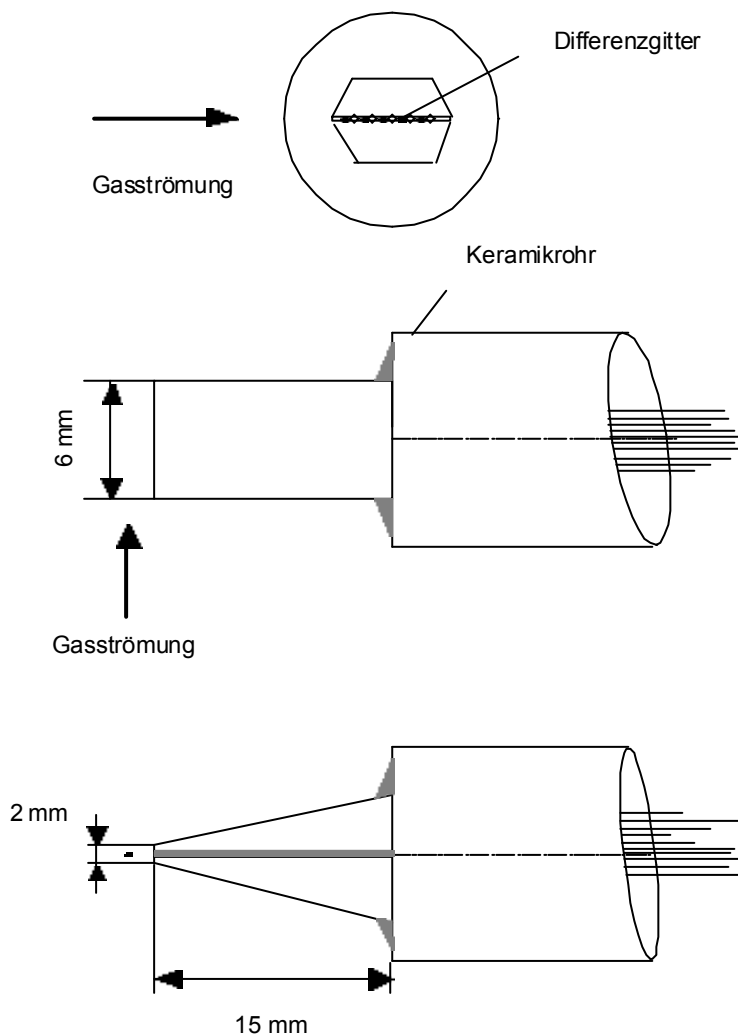


Bild 3. Gestaltung der Messsonden-Spitze aus VITRONIT-Bauteilen und Einfügung in das Messsondenschutzrohr

Weiterhin war ein geeignetes Material für die Herstellung der Faserunterlage und der Sondenspitze erforderlich. Als geeignet erwies sich die Glaskeramik VITRONIT, die die Eigenschaften von Keramik mit der mechanischen Bearbeitbarkeit verbindet. Die maximale Einsatztemperatur liegt bei 1000°C und die maximale Arbeitstemperatur bei 700°C. Aus VITRONIT wurden die Faserunterlage in Form eines 0,6 mm dicken Plättchens und zwei Formteile für die Sondenspitze gefertigt. Anschließend wurden die Faserunterlage und die beiden Sondenspitzen mit dem Hochtemperaturkleber verklebt und in ein keramisches Schutzrohr aus Al₂O₃-Keramik (Aussendurchmesser 10 mm, Länge 525 mm) eingepasst und verklebt. Die Geometrie der Messsondenspitze ist in Bild 3 dargestellt.



Bild 4. Ansicht der geöffneten Koppereinheit (rechts Keramikschutzrohr, links Koppellichtleitkabel)

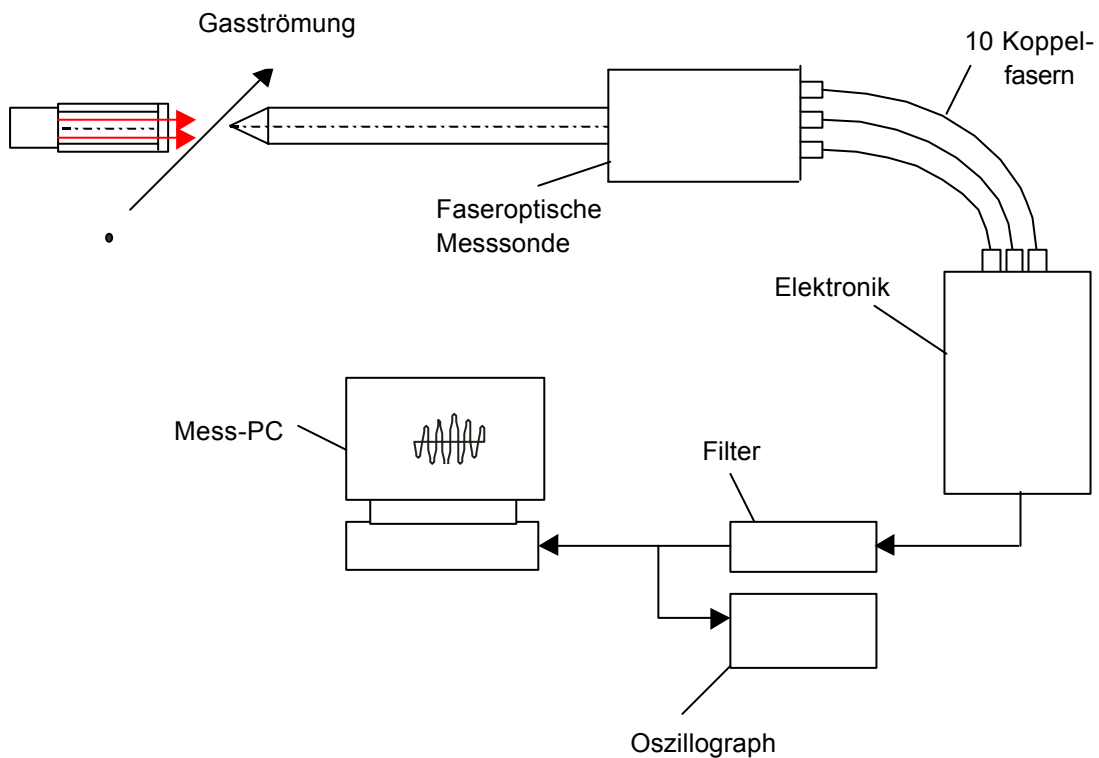


Bild 5. Faseroptische Messsonde mit Signalerzeugung und -auswertung sowie Beleuchtungssystem

Am „kalten“ Ende des keramischen Schutzrohres befindet sich eine Koppereinheit, die die optisch-mechanische Kopplung der goldbeschichteten Quarzglasfasern mit handelsüblichen Lichtleitfasern per SMA-Verbindungen ermöglicht. Bild 4 zeigt die Sicht in die geöffnete Koppereinheit. Zu sehen sind die zehn goldbeschichteten Lichtleitfasern, die in zehn SMA-Stecker-Kupplungen eingeklebt sind. Jede einzelne goldbeschichtete Quarzglasfaser wird mit einer Lichtleitfaser gekoppelt, die einen Faserkern mit gleichem oder grösserem Durchmesser besitzt sowie eine grosse numerische Apertur aufweist.

Als Koppelfasern werden Glasfaserkabel mit einem Quarzglaskern von 200 µm, einem Polymermantel von 230 µm, einem Buffer von 500 µm, einem PVC Schutzmantel von 2,5 mm und einer numerischen Apertur von 0,37 verwendet. Die obere Temperatureinsatzgrenze liegt bei +85°C.

Jedes Glasfaserkabel wird per SMA-Stecker mit einer Photodiode verbunden, die sich in einer Reihe angeordnet auf der Frontseite der Elektronikeinheit befinden. Nach Verstärkung jedes Einzelsignals werden jeweils fünf Kanäle dem Eingang eines Differenzverstärkers zugeführt, um ein pedestalfreies Burstsignal zu erzeugen. Das Burstsignal wird anschließend einer Bandpassfilterung unterworfen und danach einer Messkarte TSR 3240 zugeführt. Die Frequenzanalyse erfolgt im PC mittels FFT.

Um das Messvolumen beim Absorptionsverfahren beleuchtungsseitig einzugrenzen, wurde ein paralleler Lichtstrahl in ein dünnes Glasrohr mit 6 mm Aussendurchmesser eingekoppelt. Das Glasrohr war zum Messvolumen hin mit einer plan angeschmolzenen Glasscheibe abgeschlossen. Der parallele Lichtstrahl wurde von einem Laserdiodenmodul mit 5 mW Ausgangsleistung und einem linienförmigen Austrittsquerschnitt erzeugt. Das Laserdiodenmodul konnte mit einer 2D-Feinjustierung in seiner Position zum Glasrohr und zur Messsonde eingestellt werden. Da im eingebauten Zustand der Messsonde die optimale Position nicht mehr sichtbar war, wurde an die Koppelglasfaserkabel ein Leistungspegelmessgerät angeschlossen. Das Messsystem ist schematisch in Bild 5 dargestellt.

Ergebnisse

Die Funktionsfähigkeit des Meßsystems wurde zunächst im kalten Labortest nachgewiesen. Bild 6 zeigt hierzu das Geschwindigkeitssignal eines feinen Drahtes, der am Umfang einer rotierenden Scheibe befestigt war.

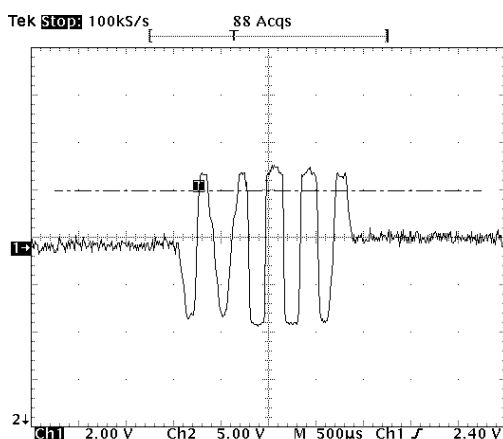


Bild 6. Geschwindigkeitssignal eines Drahtes bei Befestigung an einer rotierenden Scheibe

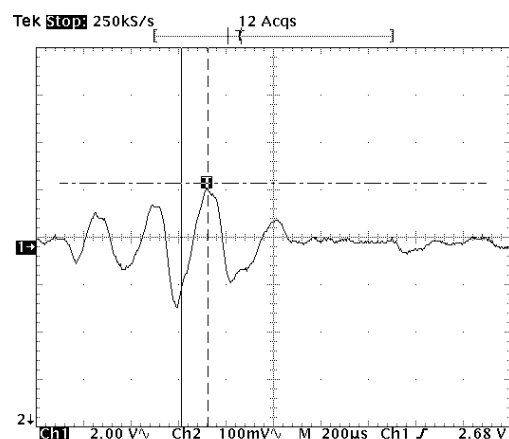


Bild 7. Geschwindigkeitssignal eines TiO₂-Tracerpartikels

Eine weitere Kalterprobung fand bei Raumtemperatur an einem Luftfreistrahlfeld statt, dem mittels eines Bürstendosierers Tracerpartikel zugeführt wurden. Als Tracerpartikel wurden Titandioxidpartikel (Partikelgröße $x \leq 1,2 \mu\text{m}$, Partikeldichte $\rho_p = 4300 \text{ kg/m}^3$) und Hohlglaskugeln ($x \leq 10 \mu\text{m}$, Partikeldichte $\rho_p \approx 1000 \text{ kg/m}^3$) verwendet. Für stationäre Strömungsverhältnisse kann der Messfehler aus der Berechnung der Sinkgeschwindigkeit der Tracerpartikel abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung der Gastemperatur sind die Sinkgeschwindigkeiten für die Titandioxidpartikel $\leq 0,13 \text{ mm/s}$ und für die Hohlglaskugeln $\leq 2 \text{ mm/s}$. Bild 7 zeigt das Oszillogramm des Geschwindigkeitssignals eines Titandioxidpartikels. Danach erfolgten die Messungen im auf 100°C und 600°C aufgeheizten Modellofen bei unterschiedlichen Durchströmungsbedingungen. Nach einem Messbetrieb von ca. einer Woche bei 600°C war keine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Meßsystems festzustellen. Zusätzlich ergab sich die Möglichkeit einer Messung ohne Tracerpartikel. Bei der Einleitung des auf Raumtemperatur befindlichen Stickstoffs in die aufgeheizte Ofenmuffel bilden sich in der Muffelströmung Schlieren, die als Tracerpartikel wirken. Die Messergebnisse dienten letztendlich zur Validierung von CFD-Ergebnissen der Muffeldurchströmung. Bild 8 zeigt abschließend den Einsatz des Meßsystems am Modellofen.

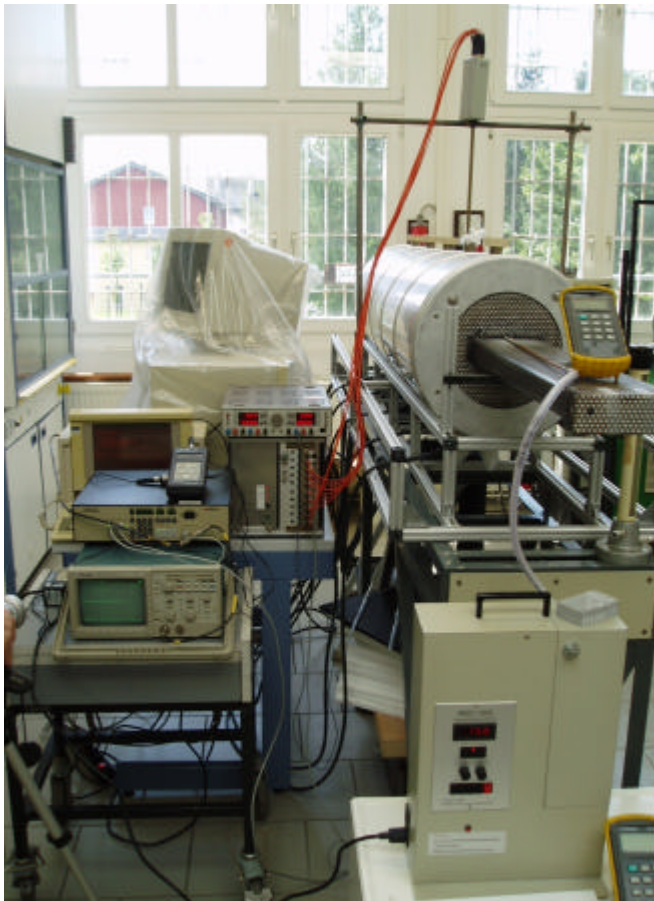


Bild 8. Einsatz des Messsystems am Modellofen: im Vordergrund Bürstendosierer, links Signalverarbeitung

Literatur

Petrak, D., Rosenfeld, K., Przybilla, E., 1994: "Anwendung der faseroptischen Ortsfilter-Anemometrie (FOA) auf Gasströmungen", Proc. Deutscher Luft- und Raumfahrt-Kongress, Erlangen, Vol.II, pp. 1129-1134.