

Hochsensitiver Strömungssensor in LTCC

C. Lohrberg¹, S. Ziesche¹, H. Neubert²

¹ Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden, Deutschland
carolin.lohrberg@ikts.fraunhofer.de

² Technische Universität Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design, Deutschland

Abstract:

Die Arbeit stellt einen thermischen Strömungssensor in LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) Technologie vor. Er ist mithilfe graphitbasierter Opferschichten als freitragende Dickschichtstruktur in einem integrierten Kanal realisiert. Durch die geringe Dicke von nur 50 μm werden hohe Sensitivität und geringe thermische Verluste erreicht. Dazu wurde eine LTCC-kompatible Opferschichttechnologie entwickelt und für die Fertigung riss- und verwölbungsfreier freitragender Strukturen optimiert. Eigens entwickelte strömungsmechanisch-thermische Modelle zur Berechnung des Temperaturfeldes im Kanal wurden zur Design- und Technologieoptimierung eingesetzt.

Key words: LTCC, Opferschicht, Strömungssensor, FEM

Einleitung

Die Mehrlagenkeramiktechnologie LTCC ist besonders gut für die Massenproduktion von hochintegrierten elektrischen Hybridschaltungen geeignet. Die dreidimensionale Strukturierbarkeit der LTCC und die damit verbundene Möglichkeit Kanäle, Kavitäten bzw. Membranen zu integrieren, hat den Anwendungsbereich in den letzten Jahren vergrößert und macht die Technologie vor allem für die Mikrofluidik interessant [1, 2]. Somit können zukünftig beides, die sensorbasierte Messung und die IC-basierte Auswertung von Strömungsgeschwindigkeiten auf einem Substrat erfolgen.

Der in dieser Arbeit beschriebene Strömungssensor basiert auf dem thermischen Anemometer-Prinzip [9]. In der Literatur [1, 3] beschriebene LTCC-basierte Strömungssensoren nach diesem Prinzip verwenden meist einen LTCC-Steg quer zum Kanal auf dem sich der Heizer befindet. Dadurch entsteht ein großer Leitungsquerschnitt (ca. 200 μm), wodurch hohe Verlustleistungen und geringe Sensitivitäten generiert werden.

Der hier vorgestellte Sensor hat dagegen einen freitragenden und mittig in einem Kanal angeordneten Heizer, wobei der Kanal in ein LTCC-Substrat integriert ist. Mithilfe der entwickelten Opferschichttechnologie konnte zum einen eine sehr geringe Heizerdicke (ca. 50 μm) erzielt werden und zum anderen der Heizer mittig im Kanal statt auf dem Kanalboden angebracht

werden. Dadurch besitzt er eine höhere Empfindlichkeit und eine geringere Verlustleistung gegenüber den bekannten Herstellungsverfahren.

Nachfolgend sind das Herstellungsverfahren, strömungsmechanisch-thermische FE-Modelle zur Simulation von Strömungs- und Temperaturfeld im Kanal sowie eine Auswertung der erzielten Messergebnisse beschrieben.

Physikalisches Prinzip

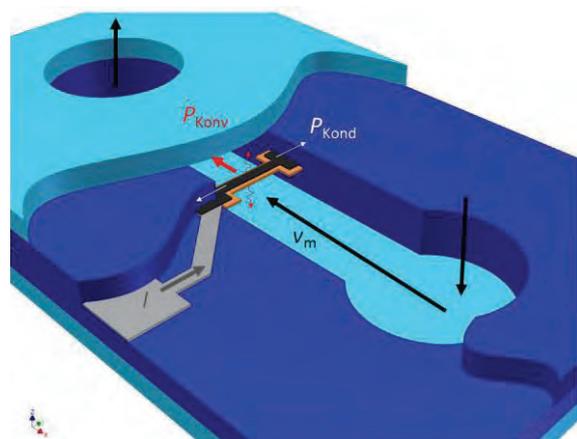


Abbildung 1: Funktionsweise des integrierten Strömungssensors, 3D Schnittbild des Strömungssensors

Ein Strom I bringt den Heizer auf eine bestimmte Temperatur T . Ein mit der Geschwindigkeit v anströmendes Fluid, in diesem Fall ein Gas, transportiert Wärme vom Heizer ab. Dadurch sinken dessen Temperatur und Widerstand. Bei dem hier angewendeten Messprinzip „Constant Temperature Anemometry“ (CTA) wird der Strom so geregelt, dass die Heizertemperatur bei jeder Anströmgeschwindigkeit im Messbereich konstant ist. Für das Heizelement gilt eine Wärmebilanz aus elektrisch zugeführter Leistung P_{el} sowie den durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung abgegebenen Wärmeströmen P_{Kond} , P_{Konv} bzw. P_S :

$$P_{el} = P_{Kond} + P_{Konv} + P_S. \quad (1)$$

P_{Kond} wird durch Wärmeleitung in die Aufhängung des Heizers an den Kanalwänden verursacht (siehe Abbildung 1). Dieser von der Strömungsgeschwindigkeit unabhängige Offset ist bei der Messung zu beachten. Die Strahlungsverluste durch P_S sind demgegenüber klein und können vernachlässigt werden. Die konvektiv abgeführte Wärmeleistung P_{Konv} ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids. Hier handelt es sich um eine erzwungene Konvektion. Abgeleitet aus Gl. (1) beschreibt das Kingsche Gesetz die Beziehung zwischen Heizerstrom I und Geschwindigkeit v empirisch mit den Kingschen Konstanten A_K , B_K und n :

$$P_{el} = I^2 R = (A_K + B_K v^n) \Delta T \quad (2)$$

Diese werden meist experimentell bestimmt. Abbildung 2 zeigt den typischen Zusammenhang zwischen Strom I und der Geschwindigkeit v . Dabei zeigt sich, dass das Messprinzip besonders gegenüber geringen Geschwindigkeiten sensitiv ist.

Die in das Fluid eingetragene Wärme kann entweder anemometrisch durch Messung von Temperatur oder Heizleistung des Heizelements oder kalorimetrisch durch Messung der Temperatur des erwärmten Fluids nach Überströmung des Heizelements bestimmt werden.

Dabei ist das erste Prinzip vor allem für kleine und das zweite für hohe Geschwindigkeiten geeignet.

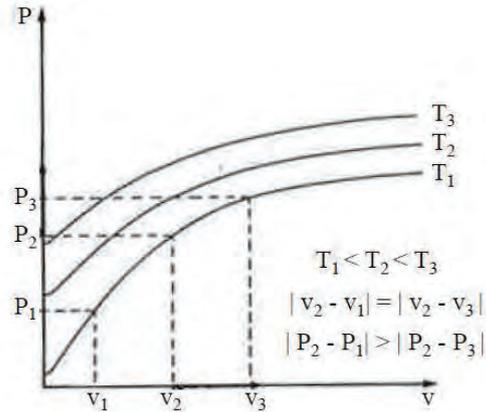


Abbildung 2: Leistung P in Abhängigkeit der Fluidgeschwindigkeit v bei verschiedenen Heizertemperaturen [9]

Modellierung

Zur Optimierung des Aufbaus zur thermischen Strömungsmessung wurden Temperatur- und Strömungsfeld im Kanal bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten mit FE-Modellen sowohl für anemometrische als auch kalorimetrische Messung untersucht. Damit können vor allem die optimalen Abstände zwischen Sensoren und Heizer ermittelt werden, sowie die beste Anordnung der Sensoren bezüglich der vorgestellten Fälle vorgenommen werden.

Temperaturfeld

Das FE-Modell wurde mit dem Autodesk Simulation Multiphysics 2012 als zweidimensionales Modell des Kanals mit dem Heizer erstellt (siehe Abbildung 3). Das Gas besitzt am Einlauf ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil v_x und der Heizer die Temperatur T_1 .

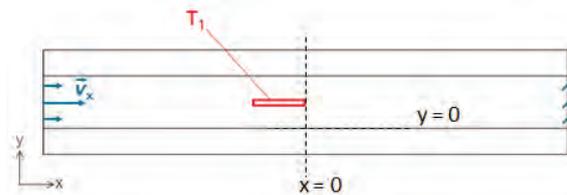


Abbildung 3: Simulationsmodell

Abbildung 4 zeigt simulierte Temperaturprofile in Kanalmitte hinter dem Heizer ($x \geq 0$) bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Der Verlauf fällt exponentiell. Mit steigender Geschwindigkeit verlagert sich das Temperaturprofil entsprechend Richtung 1. Bei höheren Geschwindigkeiten ändert es sich schließlich in Richtung 2. Zur kalorimetrischen Messung der Strömungsgeschwindigkeit kann die Temperaturdifferenz

$$\Delta T(x, v) = T(x, v) - T(x)|_{v=0} \quad (3)$$

zum Temperaturprofil bei $v = 0$ ausgenutzt werden. Die Maxima der Differenzprofile $\text{Max}(\Delta T(x, v))$ liegen dicht beieinander nahe am Heizer. Die maximale Temperaturdifferenz steigt jedoch nicht monoton mit v , sondern sinkt für große Geschwindigkeiten wieder, so dass ein hier angeordneter Temperatursensor keine eindeutige Bestimmung von v zulässt.

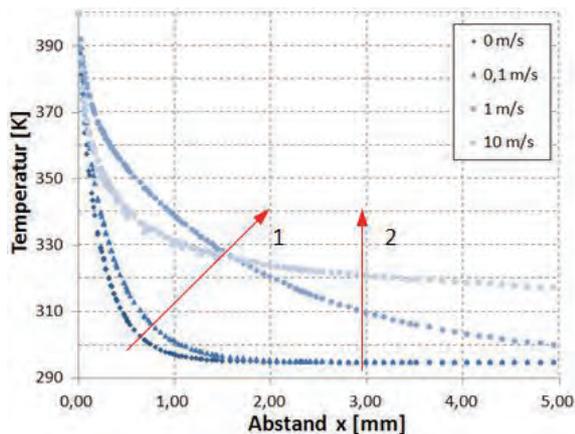


Abbildung 4: Temperaturprofile in Kanalmitte bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten

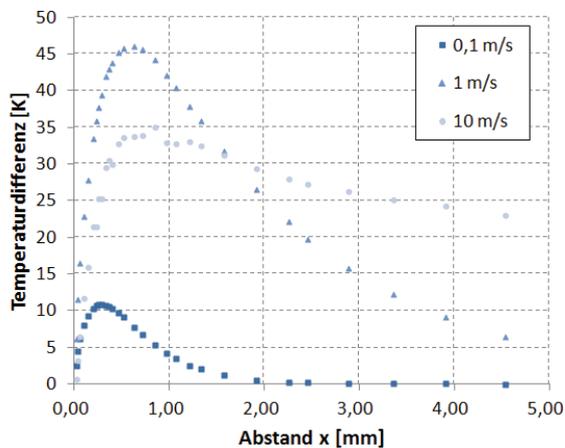


Abbildung 5: Temperaturdifferenz verschiedener mittlerer Geschwindigkeiten gegenüber dem Temperaturprofil bei der Geschwindigkeit $v = 0$ m/s

Geschwindigkeitsfeld

Entstehende Turbulenzen klingen jedoch ab, da die Reynoldszahl unterkritisch bleibt. Die kritische Reynoldszahl wird für die untersuchte rechteckige Kanalgeometrie auch bei einer Maximalgeschwindigkeit von 10 m/s theoretisch noch nicht erreicht.

Aus dem Seitenverhältnis a , bestimmt durch Breite b und Höhe h des Kanals

$$a = \frac{b}{h} = \frac{5 \text{ mm}}{0,5 \text{ mm}} = 10 \quad (3)$$

ergibt sich eine kritische Reynoldszahl von [8]

$$\text{Re}_{\text{krit}} = 2800. \quad (3)$$

Die maximale untersuchte Maximalgeschwindigkeit v_m von 10 m/s überschreitet Re_{krit} nicht:

$$\text{Re} = \frac{v_m d_h}{\nu} = 593,4 \quad (4)$$

Dabei ist d_h der hydraulische Durchmesser, der für einen rechteckigen Kanalquerschnitt aus dessen Höhe h und Breite b berechnet wird [6].

Allerdings stört der Heizer mit seiner Höhe, die 10 % der Kanalhöhe einnimmt, erheblich die Strömung, was die Simulationen zeigen.

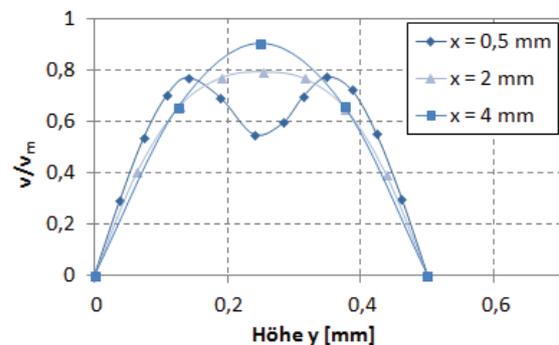


Abbildung 6: Normierte Geschwindigkeitsprofile an verschiedenen Stellen x mit $v_m = 0,1$ m/s

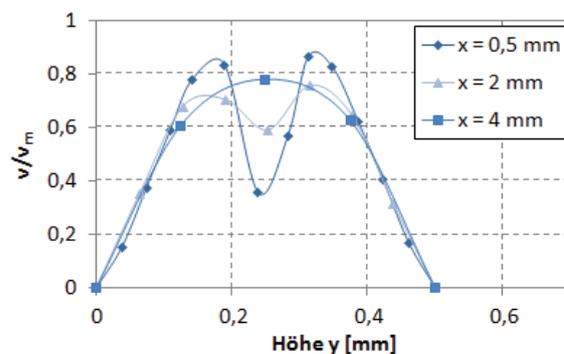


Abbildung 7: Normierte Geschwindigkeitsprofile an verschiedenen Stellen x mit $v_m = 10$ m/s

Die Geschwindigkeitsprofile in Abbildung 6 und Abbildung 7 wurden quer zum Kanal in verschiedenen Abständen x vom Heizer aufgenommen. Sie zeigen deutlich den Einfluss des Heizers. In Abbildung 6 ist der Einfluss gering, und das laminare Strömungsprofil hat sich bereits 2 mm hinter dem Heizer wieder eingestellt. Der Vergleich zu Abbildung 5 verdeutlicht, dass bei $x = 2$ mm und der Maximalgeschwindigkeit $v_m = 0,1$ m/s infolge der langen Verweilzeit des langsam strömenden Gases im Kanal die Temperaturerhöhung bereits wieder abgeklungen ist. Zudem zeigt sich, dass mit steigender Geschwindigkeit die Störungen im Geschwindigkeitsprofil durch den Heizer bis in den hinteren Kanalteil gelangen.

Technologie

LTCC ist eine Multilayertechnologie, bei der die einzelnen flexiblen Lagen, bestehend aus einem Glas-Keramik-Komposit und organischen Bestandteilen, über Stanzen oder Lasern strukturiert werden können. Mit Sieb- und Schablonendruck können die einzelnen Ebenen mit elektrischen Elementen, wie Leiterbahnen, Vias oder Widerstände ausgestattet werden. Während eines Laminierprozesses werden die einzelnen Ebenen über Druck und Temperatur gefügt. Der abschließende Sinterprozess verbrennt die organischen Bestandteile und verdichtet die Glas-Keramik zu einem starren Substrat.

Mithilfe der Opferschichttechnologie können freitragende Strukturen mit Abmessungen im μm -Bereich realisiert werden. Diese Technologie lässt sich somit für Strömungssensoren mit geringeren Verlustleistungen und höheren Sensitivitäten einsetzen.

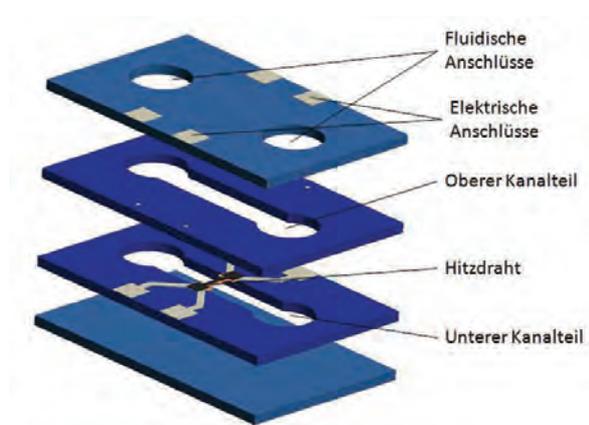


Abbildung 8: Explosionsdarstellung des Strömungssensors in LTCC

Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau des entwickelten Strömungssensors. Bei der Herstellung wird die Basis aus der ersten Lage und dem unteren Kanalteil vorlaminiert. Der Kanal wird anschließend mit einer graphitbasierten Opferschicht über das Schablonendruckverfahren aufgefüllt. Nach dem Trocknen wird der Heizer direkt auf die Opferschicht siebgedruckt. Anschließend erfolgen das Auffüllen des oberen Kanalteils mit Opferschicht und das anschließende Laminieren des gesamten Substrates. Zuletzt wird das Substrat in einem Sintervorgang eingebrannt, wobei die organischen Bestandteile und die Opferschicht verbrennen und das Substrat bei ca. 850 °C verdichtet wird. Da die Opferschicht ein anderes Schwindungsverhalten als die konventionelle LTCC hat, wurden Zero-Shrinkage-Materialien integriert, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Ein kompletter Aufbau mit der Zero-Shrinkage-Technologie ist jedoch mit dem verwendeten Opferschichtsystem nicht kompatibel, weshalb hier ein System aus Zero-Shrinkage Tapes und konventionellen LTCC-Tapes entwickelt wurde.

Ergebnisse und Diskussion

Es wurde ein anemometrischer Strömungssensor in LTCC mit den Gesamtabmessungen (38 x 15 x 8) mm aufgebaut. Er besitzt einen integrierten Kanal in dem sich ein freistehender sehr dünner Heizer befindet, mit dem über das CTA-Verfahren die Strömungsgeschwindigkeit eines eingeleiteten Fluids messen kann. Die Abmessungen des Kanals betragen (13 x 4 x 0.2) mm und die des Heizers entsprechen (4 x 0,6 x 0,05) mm. Die LTCC-Technologie wurde dabei soweit optimiert, dass die Herstellung mit kohlenstoffbasierten Opferschichten standardisiert möglich ist. Die Durchbiegungen des Heizers beziehungsweise die Verwölbungen des Kanals sind minimal. Materialuntersuchungen hinsichtlich Kompatibilität, Stabilität und Sinterverhalten wurden vorgenommen und in [5] beschrieben.

Die Messungen sind vergleichbar mit den Simulationsergebnissen, zeigen jedoch keine gute Übereinstimmung (Abbildung 9). Gründe für Abweichungen zwischen Modell und Messung sind Vereinfachungen bei der Geometrie- und Materialmodellierung sowie systematische Fehler durch die Verwendung planarer Modelle. Dennoch zeigen die Messungen den charakteristischen Verlauf.

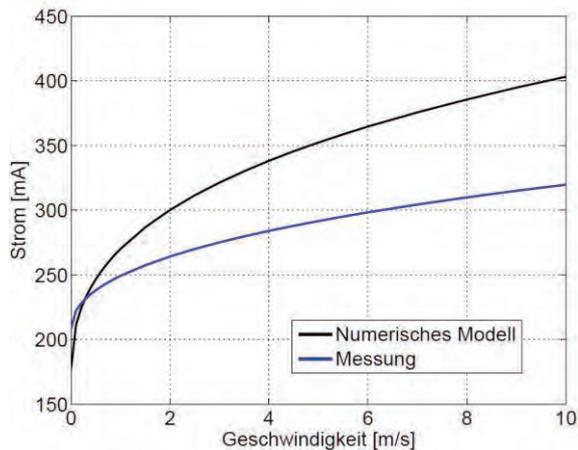


Abbildung 9: Vergleich Modellergebnisse mit Messergebnissen

Weiterhin zeigt Abbildung 9, dass große Geschwindigkeiten mit dem anemometrischen Prinzip nur unzureichend in kleinen Kanälen messbar sind. Die Kurve geht einem Sättigungsstrom entgegen. Um große Geschwindigkeiten messen zu können, sind somit Temperatursensoren in dem Kanal hinter dem Heizer notwendig bzw. die Kanalgeometrien zu verändern, z.B. durch Vergrößerung der Kanalhöhe. Das Temperaturfeld aus Abbildung 4 zeigt, dass erst bei hohen Geschwindigkeiten die Wärme von dem Fluid weiter in den Kanal getragen wird. Mithilfe der Simulationsergebnisse lassen sich die optimalen Positionen für diese Temperatursensoren bestimmen. Nachfolgende Arbeiten werden sich mit dieser Fragestellung beschäftigen, einschließlich der technologischen Umsetzung. Zudem ist eine Steuerelektronik geplant, um die Strömungssensoren bezüglich Messgenauigkeit, Hysterese, Ansprechzeit und Auflösung zu untersuchen.

References

- [1] Jurków, D.; Malecha, K.; Golonka, L.: "Three Element Gas Flow Sensor Integrated with Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) Module" 16th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems", MIXDES, Łódź, Poland, 2009. 86, 148
- [2] Partsch, U.; Lenz, C.; Ziesche, S.; Lohrberg, C.; Neubert, H.; Maeder, T.: *LTCC-Based Sensors for Mechanical Quantities*, Proc. 48th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials – MIDEM, Otočec 2012.
- [3] Fournier, Y.; Rouelle, G. B.; Craquelin, N.; Maeder, T.; Ryser, P.: "SMD pressure and flow sensor for compressed air in LTCC technology with integrated electronics",

Eurosensors XXIII, p. 1471–1474, Lausanne, Switzerland, 2009.

- [4] Birol, H.; Maeder, T.; Ryser, P.: "Application of a graphite-based sacrificial layers for fabrication of LTCC (low temperature cofired ceramic) membranes and microchannels", *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17, p. 50–60, 2007
- [5] Lohrberg, C.; Ziesche, S.; Neubert, H.: "Highly-sensitive flow sensor in LTCC", 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, Alba Iulia, Rumänien, 2013.
- [6] Bohl, W.: "Technische Strömungslehre" Vogel Buchverlag, Würzburg, 2002.
- [7] Yoshimura, T.; Tatsumi, T.: "Stability of the laminar flow in a rectangular duct", *Journal of Fluid Mechanics* 212, p. 437-449, 1990.
- [8] Hanks, R. W.; Ruo, H. C.: "Laminar-turbulent transition in ducts of rectangular cross section", *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 5, p. 558-561, 1966.
- [9] Eckelmann, H.: "Einführung in die Strömungsmeßtechnik". Band 74. Stuttgart: B.G. Teubner, 1997