

Integrierter Strömungssensor zur Messung geringster Gasgeschwindigkeiten

C. Lohrberg, H. Funke, S. Reuber, S. Ziesche

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

Zusammenfassung:

Die Arbeit stellt einen Strömungssensor mit einem integrierten Kanal vor, in dem sich ein freitragender auf Dickschichttechnologie basierender Heizer befindet. Der Sensor wurde in der LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) Technologie entwickelt. Um die Sensitivität zu erhöhen und die thermischen Verluste zu verringern, wurden mithilfe von kohlenstoffbasierten Opferschichten Heizer realisiert, die eine minimale Dicke von unter 50 μm besitzen. Zudem wurde eine angepasste Regelungselektronik entwickelt, um den Sensor vermessen und kalibrieren zu können.

Schlagwörter: LTCC, Strömungssensor, Regelungselektronik, Konstant-Temperatur-Anemometer

Einleitung

Thermische Strömungssensoren sind bekannt für ihre hohe Sensitivität bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Umsetzung solcher Sensoren in LTCC-Technologie bietet weitere Vorteile: Robustheit gegenüber aggressiven Medien, hohes Aspektverhältnis des integrierten Kanals und die hohe Temperaturstabilität über 300 °C. Durch die dreidimensionalen Strukturierungsmöglichkeiten der LTCC sind vor allem sensorische Anwendungen interessant geworden. Das damit verbundene Potenzial Kanäle, Kavitäten und Membranen zu integrieren, erlaubt vor allem eine Anwendung im mikrofluidischen Bereich.

Ein innovativer Ansatz verfolgt die Verwendung von Opferschichten zur Erzeugung freistehender, integrierter, siebgedruckter Schichten. Dadurch lassen sich dünnste Strukturen unter 50 μm in LTCC integrieren [1]. Die erzeugten kohlenstoffbasierten Opferschichten werden im Siebdruckverfahren mit dielektrischen bzw. leitfähigen Schichten bedruckt und getrocknet. Beim Sintervorgang verbrennt die Kohlenstoffschicht zu Kohlenstoffdioxid und verflüchtigt sich durch die fluidischen Anschlüsse und die noch poröse LTCC in den Ofenraum. Zurück bleiben die gedruckten freistehenden Schichten.

Konventionelle thermische Strömungssensoren sind als Platinwicklungen freistehend ausgeführt, die einen Durchmesser von 10 μm besitzen. Bei in LTCC implementierten thermischen Strömungssensoren wird der Platinheizer auf eine LTCC-Lage gedruckt, die anschließend

stegförmig ausgelasert und in die Kanäle integriert wird [2]. Eine typische LTCC-Lage besitzt eine Dicke von ca. 250 μm , wodurch sich der Heizerquerschnitt gegenüber der konventionellen Technologie auf das 25 bis 50-fache erhöht. Mit der Technologie, dem Bedrucken von Opferschichten, können die Platinschichten ohne die tragende LTCC-Lage aufgebaut werden, wodurch sich der Heizerquerschnitt enorm reduziert. Der damit verbundene geringere Wärmeeintrag in das Substrat verringert die Verlustleistung, den Wärmeeintrag in das Substrat und erhöht die Sensitivität des Elementes.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit kann über verschiedene Messprinzipien ausgeführt werden [6]. Die zwei wichtigsten Messprinzipien sind das anemometrische und das kalorimetrische Messprinzip. Beim ersten Prinzip erfolgt die Messung der Stromänderung infolge der erzwungenen Konvektion. Das zweite Prinzip nutzt die Temperaturfeldverschiebung zwischen zwei den Heizer umgebenden Temperatursensoren, um die Strömungsgeschwindigkeit zu messen.

Die Sensorelemente sind so konzipiert, dass beide Messprinzipien eingesetzt werden können. Zur Analyse der Genauigkeit und Auflösung der Sensorelemente wurde eine Elektronik entwickelt, die vorab nur das anemometrische Messprinzip implementiert hat.

Material & Methoden

Strömungssensoren in LTCC

Opferschichten werden in der LTCC-Technologie hauptsächlich zur Stabilisierung von integrierten Kanälen und Kavitäten verwendet. Während des Laminierprozesses werden die einzelnen Ebenen über Druck und Temperatur miteinander verbunden. Um nun integrierte Freischnitte während dieses Prozesses zu erhalten, müssen Inlays in Form von entfernbaren Materialien eingebracht werden. Zumeist werden diese während des Sinterprozesses entfernt.

Um nun die Heizer ohne eine LTCC-Trägerlage aufzubauen, werden Opferschichten verwendet und im Siebdruckverfahren mit dem Heizer bedruckt. Hierbei handelt es sich um kohlenstoffbasierte Opferschichten, die während des Sinterprozesses unter Luft bei ca. 700 °C zu Kohlenstoffdioxid reagieren und durch die noch poröse LTCC evaporieren [5].

Dazu werden in die mittleren LTCC-Lagen des Gesamtaufbaus Kanäle gelasert. Der untere Kanalteil und die Basis werden vorlaminiert und bilden den Grundkörper. Die so nach unten hin verschlossenen Kanäle werden über Schablondruck mit einer kohlenstoffbasierten Opferdickschichtpaste aufgefüllt und getrocknet. Auf die Opferschicht werden zuerst eine Glasschicht und anschließend eine Platinschicht im Siebdruckverfahren aufgebracht. Der obere Kanalteil wird auflaminiert, erneut mit der Opferdickschichtpaste gefüllt und das gesamte Substrat mit der oberen Lage, der Kanalabdeckung, laminiert. Anschließend erfolgt die thermische Behandlung, in dem die Opferschicht noch vor dem Sintern verbrennt.

Als LTCC-Material wurde GT951 von DuPont verwendet, die Pasten zum Bedrucken der Opferschicht und die Opferschichten wurden speziell am Fraunhofer IKTS entwickelt.

Sintern

Das optimale Ausbrennverhalten der Opferschicht wurde in zwei verschiedenen Sinterprofilen untersucht. Zum einen kann die Opferschicht vor der Sinterphase bei 850 °C ausgebrannt werden, zum anderen kann das Sintern unter inerte Atmosphäre vollzogen werden und der Ausbrand der Opferschicht erfolgt erst im Anschluss unter Luft. Beim zweiten Ansatz (s. Abbildung 1b) gilt zu beachten, dass die Opferschicht nicht wie das LTCC Material in x- und y-Richtung schwindet, sodass die Schwindung des LTCCs unterdrückt werden muss. Mit dem Einbau von Null-Schwindungstapes kann die Schwindung unter 1 % reduziert werden.

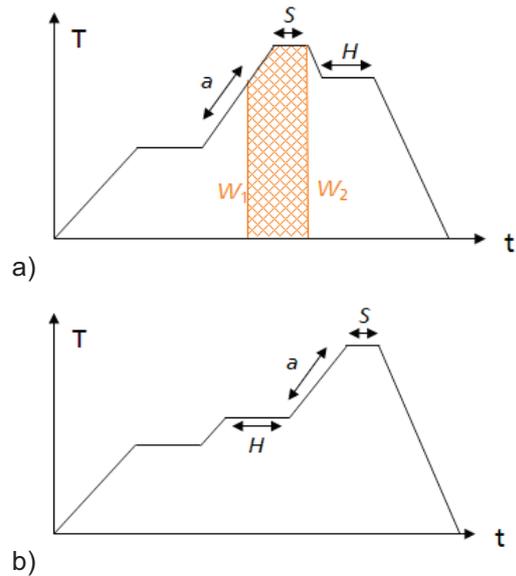


Abbildung 1: Sinterprofil mit den abhängigen Parametern a) Ausbrennen der Opferschicht nach dem Sintern mit Atmosphärenwechsel W_1 und W_2 (schwindungsfreies LTCC-System), b) Ausbrennen der Opferschicht vor dem Sintern (schwindungsbehaftetes LTCC-System)

Vorangegangene Untersuchungen haben sich mit dieser Thematik beschäftigt [1, 3] und die Parameter Aufheizrate a , Sinterzeit S , Haltezeit H und vor allem die Atmosphärenwechsel W untersucht. Der gedruckte Steg ist mittig im Kanal und weist vernachlässigbare Verwölbungen auf. Der Widerstand des gedruckten Steges schwankt stark um bis zu 30 %. Die Ursache dafür sind Spannungsrisse an der Übergangsstelle von Substrat zu Heizer. Spannungen können zum einen durch unterschiedliche Schwindungseigenschaften von LTCC-System und gedrucktem Heizer entstehen, zum anderen durch Materialwechselwirkungen während der inertten Umgebung im Sinterprozess. Durch die inerte Atmosphäre entstehen reduzierende Bedingungen und die Heizerkomponenten reagieren miteinander (s. Abbildung 2).

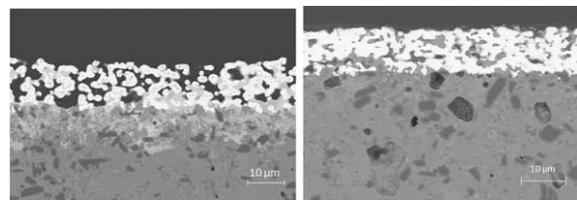


Abbildung 2: FESEM-Aufnahmen von Platin-Glasschichten, gesintert unter inerte Atmosphäre (links) und unter Luft (rechts)

Beim Ansatz mit schwindungsbehafteten LTCC-Systemen muss die Opferschicht vor dem eigentlichen Sinterprozess ausgebrannt werden. Abbildung 1a zeigt das Sinterprofil mit den variierenden Parametern.

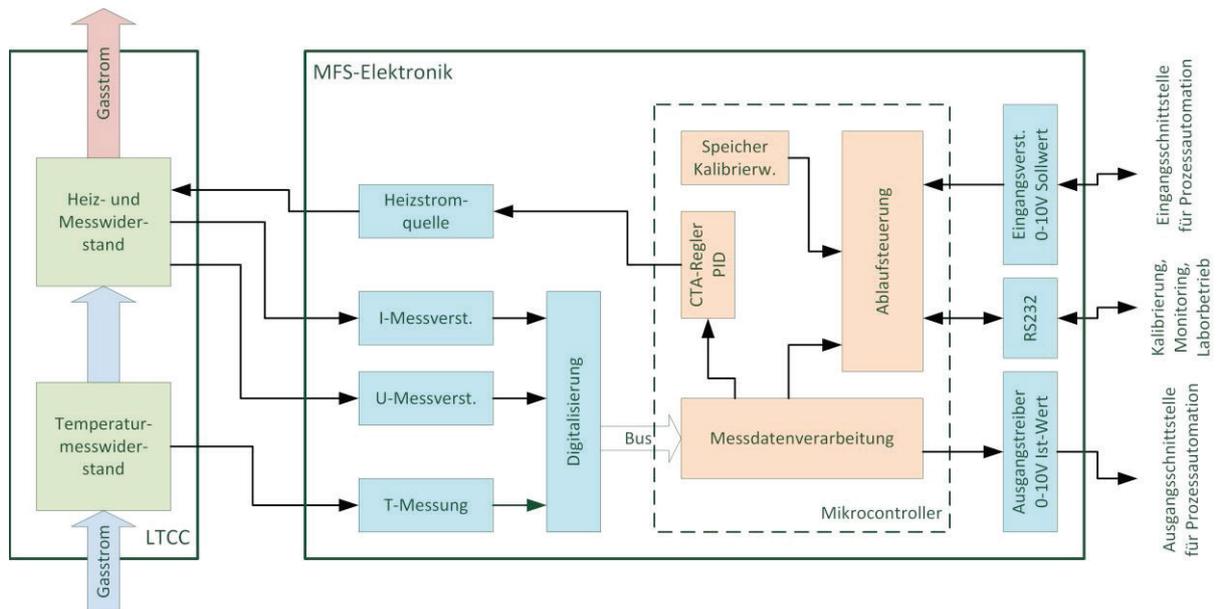


Abbildung 3: Blockschaltbild der Elektronik

Das Sinterprofil wurde anhand der Parameter Aufheizrate a , Haltezeit H und Sinterzeit S untersucht. Die Haltezeit wird benötigt, um die Opferschicht vollständig auszubrennen. Die Aufheizrate beeinflusst wie schnell der anschließende Übergang zum Sintern erfolgt. Die Sinterzeit hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Absinken der gedruckten Schichten.

Tabelle 1: Parameter für die thermische Behandlung - Standardeinstellungen für LTCC, optimierte Einstellungen für LTCC mit integrierten bedruckten Opferschichten

	Standard-einstellungen	Optimierte Einstellungen
Haltezeit	0 min	0 min
Aufheizrate	15 K^{-1}	10 K^{-1}
Sinterzeit	60 min	15 min

Messelektronik

Für den Sensor wurde eine mikrocontrollergesteuerte Elektronik entwickelt, die sowohl dessen Charakterisierung im Labor, als auch den Betrieb als autarkes Messgerät für den Masendurchfluss ermöglicht. Die in der beschriebenen LTCC-Technologie produzierten Sensoren verfügen über Heizerwiderstände von ca. 2Ω bis 4Ω . Diese im Vergleich zu konventionellen Sensoren geringen Widerstände erfordern sowohl bei der Ansteuerung, als auch beim Auslesen und Auswerten innovative Schaltungskonzepte, die eine platz- und energiesparende Implementation bei hoher Genauigkeit und Auflösung ermöglichen.

In den anemometrischen Verfahren wird die Änderung eines Widerstandes durch die erzwungene Konvektion im Strömungskanal gemessen, der temperaturabhängige Widerstand dient als Heizer und Temperatursensor gleichermaßen. Man unterscheidet weiter in Konstant-Strom-Verfahren (CCA) und Konstant-Temperatur-Verfahren (CTA), wobei letzteres bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten empfindlicher ist und hier bevorzugt zur Anwendung kommt. Dabei wird der Heizstrom von einem Regler so eingestellt, dass der Widerstand des Heizers und damit seine Temperatur konstant bleiben. Anhand der dazu notwendigen Leistung kann somit auf die abgegebene Wärme und die damit proportional zusammenhängende Strömungsgeschwindigkeit im Kanal geschlossen werden.

Je nach Messbereich und Solltemperatur sind für den entwickelten LTCC-Sensor im CTA-Verfahren bis zu 800 mW Heizleistung notwendig. Mit den erreichten Heizerwiderständen ergeben sich Heizströme bis zu 500 mA. Diese lassen sich aufgrund der Verlustleistung nicht mehr linear (vgl. konventionelle Sensoren) aus einer Betriebsspannung erzeugen, hierfür wurde eine getaktete Stromquelle entwickelt. Als Basis dient ein vollsynchroner Step-Down-Wandler mit internen Transistoren, dessen hohe Schaltfrequenz von bis zu 4 MHz eine geringe Spuleninduktivität und -größe zulässt. Der geglättete Strom durchfließt den Heizer und einen $100 \text{ m}\Omega$ -Shunt, dessen verstärktes und tiefpassgefiltertes Signal den Ist-Wert des Heizstroms darstellt. Dieses wird am Fehlerverstärker des Step-Down-Wandlers mit dem Sollwert des Mikrocontrollers verglichen.

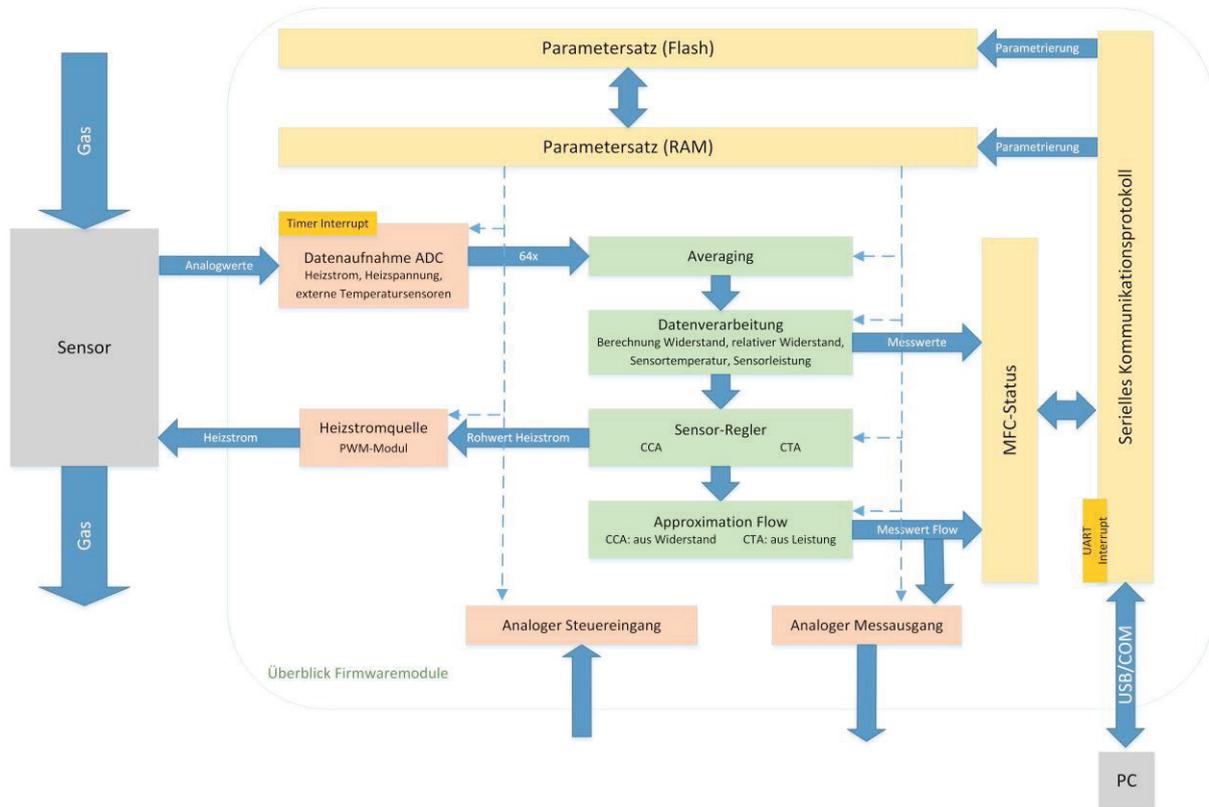


Abbildung 4: Blockschaftbild Regelkonzept

Ein SAR-AD-Wandler mit 16 Bit und Eingangsmultiplexer digitalisiert den Heizstrom, die Spannung am Heizer in Vierleitertechnik sowie die Spannungen von vier möglichen externen PT100-Sensoren. Die Digitalisierung von Strom und Spannung erfolgt mit 6400 Samples/s je Messeingang. Durch die Mittelung von 64 Werten ergibt sich eine Taktzeit von 10 ms für die nachfolgende Messdatenverarbeitung. Anhand der Messwerte werden Controller-intern weitere Parameter mit dem in Tabelle 2 dargestellten Auflösungsvermögen errechnet. Die Parameter speisen die implementierten digitalen PID-Regler für die anemometrischen Verfahren. Aus der Heizerleistung wird im eingeregelter Zustand anhand von Kalibrierkurven ein Massendurchfluss ermittelt und ausgegeben.

Tabelle 2: Auflösungsvermögen einzelner Parameter

Heizstrom	15 μ A
Heizspannung	61 μ V
Heizleistung	61 μ W
Heizerwiderstand	0,25 m Ω
Heizertemperatur	6,25 mK

Über eine Kommunikationsschnittstelle können die Messwerte ausgelesen und das System konfiguriert werden.

Ergebnisse

Strömungssensoren

Die Parameter Haltezeit, Aufheizrate und Sinterzeit und deren Einfluss auf die Widerstandswerte des Heizers, die Verwölbung des Heizers und des Gesamtsubstrates wurden untersucht. Eine lange Sinterzeit beeinflusst maßgeblich das Absinken des Heizers. Mit der Verringerung der Sinterzeit auf 15 Minuten und einer optimierten Aufheizrate konnte das Absinken der Heizer stark minimiert werden. Da die Haltezeit das Absinken des Heizers stark beeinflusst und keinen nachweisbaren Einfluss auf das Ausbrennverhalten der Opferschicht zeigte, wurde diese vernachlässigt. Um die Verwölbung der Heizer im inneren der Kanäle zerstörungsfrei untersuchen zu können, wurden CT-Aufnahmen gemacht. Abbildung 5 zeigt die diese Aufnahmen von Substraten mit integrierten Heizern in der Seitenansicht, gesintert mit den unterschiedlichen Heizraten. Vor allem die Verwölbung des Gesamtsensors und die Verwölbung des Heizers lassen sich nur schwer kontrollieren. Während der Heizer eine minimale Verwölbung aufweist (mittleres Bild), ist das

Gesamtsubstrat mit einer Verwölbung direkt über dem Kanal von ca. 60 μm behaftet.

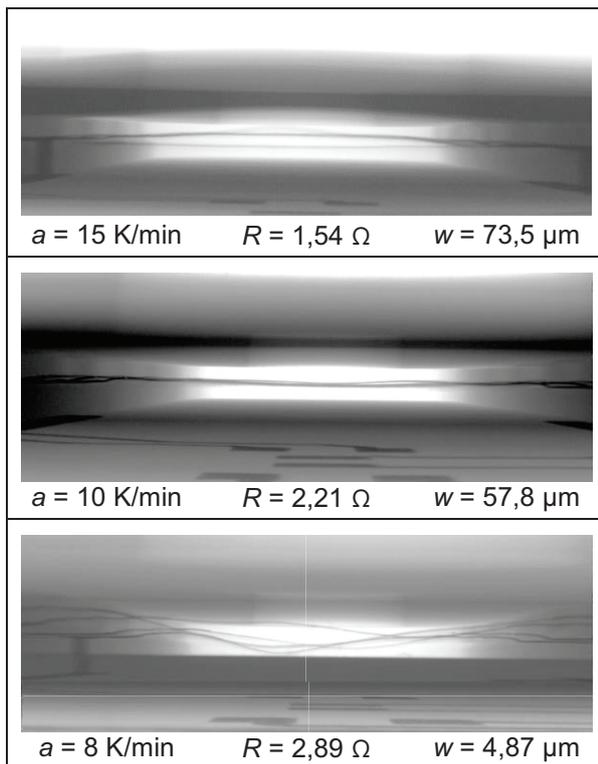


Abbildung 5: CT-Aufnahmen von im Kanal freistehenden Heizern mit unterschiedlicher Aufheizrate a (R - Widerstand Heizer, w - Verwölbung der Substratoberfläche)

Unter Verwendung der langsamen Aufheizrate (s. unteres Bild) ist die Gesamtverwölbung im Zielbereich unter 5 μm , allerdings sinken die

Heizer auf den Kanalboden ab. Ebenso steigt der Widerstand des Heizers mit der Dauer der thermischen Behandlung. Abgesunkene Heizer weisen an der Übergangsstelle von Kanal zu Substrat Risse auf. Mithilfe einer optimierten thermischen Behandlung kann die Verwölbung der Heizer nahezu unterdrückt werden.

Messergebnisse

Die mit optimierten Parametern gesinterten LTCC-Strömungssensoren wurden auf die Messplatine integriert und vermessen. Abbildung 6 zeigt die normierte Heizleistung in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit bei einer Temperatur des Heizers von 100 $^{\circ}\text{C}$. Die Fehlerbalken zeigen den Hysterese-Effekt an, der durch den Unterschied bei einem Messverlauf von zunehmenden und abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten auftritt. Die Ursache kann zum einen an der Testumgebung liegen, die bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten einen Drift aufweist. Eine andere mögliche Ursache kann der steigende Leistungseintrag mit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit sein, der zu einem höheren Wärmeeintrag in das Substrat führt. Dadurch kann es bei der Messung mit abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten zu anderen Messwerten kommen, die sich im Hystereseverlauf widerspiegeln.

Die Standardabweichungen liegen für die eingestellten Strömungsgeschwindigkeiten sowie für die gemessenen Leistungen immer unter 0,5 %. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit sinkt die Standardabweichung in beiden Fällen ab.

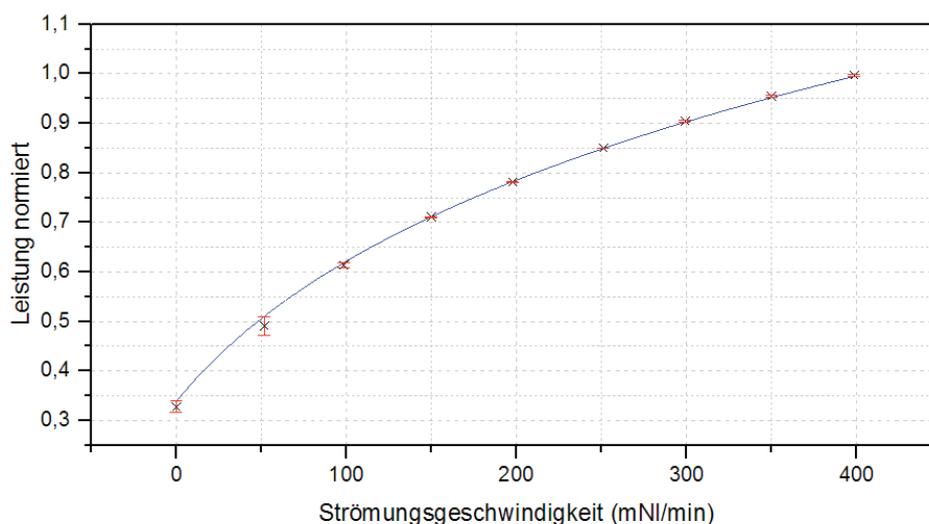


Abbildung 6: Abhängigkeit der Heizleistung von der Strömungsgeschwindigkeit mit Hysteresefehler (Die blaue Kurve dient der Veranschaulichung des Verlaufs)

Diskussion

Die Entwicklung und Herstellung eines Strömungssensors in LTCC mit integrierten freistehenden Heizern und einer entsprechend angepassten Regelungselektronik wurde vorgestellt. Die Höhe der siebgedruckten Heizer liegt unter 50 µm. Die Verwölbungsanfälligkeit der integrierten Schichten und die damit verbundenen Risse an den Anschlussstellen kann zum Teil durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Platinheizer verursacht werden, der größer ist als der des LTCC-Systems. Es wurde untersucht, inwiefern mit einem optimierten Sinterprozess diese Verwölbungen minimiert werden können. Dieses Ziel wurde erreicht, allerdings mit der Einschränkung, dass die Substratoberfläche im Kanalbereich Verwölbungen aufweist. Dies wird durch den schnelleren Sinterprozess hervorgerufen. Dadurch ist die Übergangszeit von Entbinderung zur Glasübergangsphase, in der die LTCC porös ist und die Opferschicht ausbrennen kann, geringer. Das entstehende Kohlenstoffdioxid kann nicht mehr entweichen, wodurch ein Gasdruck im inneren der LTCC entsteht, der die LTCC verformt.

Die Ergebnisse der Charakterisierung des Sensors zeigen den typischen Verlauf eines Hitzdrahtanemometers sowie eine hohe Empfindlichkeit des Sensors gegenüber Strömungsänderungen. Der auftretende Hystereseffekt der Heizleistung bei abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten kann durch die vorab höher anliegende Leistung bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten verursacht werden. Der damit verbundene höhere Wärmeeintrag in das Substrat kann zu Abweichungen im Messsignal führen. Nachfolgende Zielstellungen werden sich mit der Messung und der Kompensation dieses Wärmeeintrags in das Substrat beschäftigen.

Ziel weiterer Arbeiten ist es zudem, die verwendeten Materialien so anzupassen, dass es zu keiner Verwölbung im Gesamtsubstrat kommt (vollständiges Ausbrennen der Opferschicht bei niedrigeren Temperaturen). Ein Ansatz ist zum Beispiel die Verwendung von Opferschichten, die bei niedrigeren Temperaturen und in kürzerer Zeit ausbrennen. Dies kann durch die Verwendung kleinerer Partikel bzw. alternativer Opferschichtmaterialien realisiert werden.

Literatur

- [1] Lohrberg, C.; Ziesche, S.; Neubert, H.: „Highly-sensitive flow sensor in LTCC“, 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, Alba Iulia, Rumänien, 2013.

- [2] 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
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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
- [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