

# Optimierung von Hochtemperatur-Abgassensoren bei der Holzfeuerung: Korrektur der Sensorantwort durch ein internes Heizleistungssignal

*Julia Herrmann, Thomas Wöhl, Ralf Moos, Gunter Hagen*  
 Lehrstuhl für Funktionsmaterialien, Zentrum für Energietechnik (ZET), Universität Bayreuth,  
 Universitätsstraße 30, 95440 Bayreuth, Germany  
 funktionsmaterialien@uni-bayreuth.de

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Herausforderung im Rahmen der Temperaturhomogenität von Hochtemperatur-Gassensoren am Beispiel eines thermoelektrischen Kohlenwasserstoffsensors im Rauchgas einer Holzfeuerung dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass einerseits hardwareseitige Optimierungen mittels Heizerauslegung, verbesserter Kontaktierung, zusätzlicher Low-Temperature-Transfer-Tape- (LTTT-) Schicht im Sensoraufbau und einem verdrehsicheren Einbau möglich sind und darüber hinaus weitere Einflüsse auf Hochtemperatur-Gassensoren mittels internen Sekundärdaten (hier der Heizleistung des Sensors) korrigiert werden können. Die Einflüsse werden im Labor nachgebildet und für diesen Sensor charakteristische Korrekturkurven bestimmt.

**Keywords:** Gassensorik, Hochtemperatur-Abgassensoren, Thermoelektrik, Holzfeuerung, Signalkorrektur

## Einleitung

Im täglichen Leben werden Gassensoren häufig für Luftqualitätsmessungen oder aus Sicherheitsgründen verwendet. Auch die medizinische Atemanalyse, die Überwachung und Regelung von Abgasnachbehandlungssystemen beispielsweise in der Fahrzeugtechnik und die Bewertung von Rauchgasen bei Biomasse-Verbrennungsprozessen stellen weitere Anwendungsgebiete dar. Bei jeder Anwendung sind stabile und zuverlässige Sensorsignale notwendig. Um diese zu erreichen, werden die meisten chemischen Sensoren bei definierten Temperaturen betrieben. Hierbei muss die Temperatur über dem gesamten Sensorbereich (d.h. dem Bereich des Sensorelements, in dem das Gas mit den verwendeten gasempfindlichen Funktionsmaterialien in Wechselwirkung tritt) homogen sein und darf nicht durch externe Parameter beeinflusst werden. Zusätzlich sind ein schnelles Ansprechverhalten und eine hohe Empfindlichkeit auf das zu messende Gas wichtig.

Beispielhaft werden diese Fragestellungen an einem thermoelektrischen Kohlenwasserstoffsensoren für die Überwachung von Rauchgasen bei Biomasse-Verbrennungsprozessen untersucht [1, 2, 3].

## Sensorsetup

Der thermoelektrische Kohlenwasserstoffsensoren (Abb. 1) wird in Dickschichttechnik auf

einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Substrat hergestellt. Auf der Vorderseite des Substrats befinden sich 15 in Reihe geschaltete Thermoelement-Paare aus Platin (Dupont, 9141R) und Gold (Dupont, 5744R).

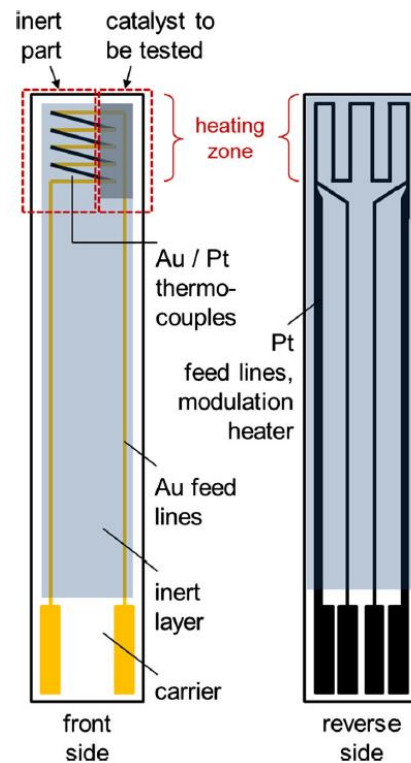


Abb. 1: Schematischer Sensoraufbau [4].

Die Thermopaare sind so angeordnet, dass sie eine Temperaturdifferenz zwischen der linken und der rechten Seite der Sensorspitze messen. Eine Seite der Sensorspitze ist mit einer katalytisch aktiven Schicht (1 wt-% Pt / 1 wt-% Pd auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bedeckt, während der Rest des Sensors durch eine inerte Schicht (DuPont, QM42) abgedeckt ist. An der katalytisch aktiven Schicht reagieren brennbare Gase, wie Kohlenstoffmonoxid (CO) oder Kohlenwasserstoffe (HC), exotherm, was zu einem Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten innerhalb der Sensorspitze führt. Die in Reihe geschalteten Thermopaare messen diesen Temperaturunterschied in Form einer Thermospannung im  $\mu\text{V}$ -Bereich. Damit diese exothermen Reaktionen stattfinden können, muss der Sensor auf eine Betriebstemperatur von  $600\text{ }^\circ\text{C}$  (Aktivierungsenergie der katalytischen Schicht) eingestellt werden. Hierfür befindet sich auf der Rückseite des Substrats eine siebgedruckte Dickschichtheizerstruktur (Pt, Heraeus, LPA-88), welche in Vierleitertechnik angeschlossen ist [1, 3, 4].

### Herausforderung bezüglich dieses Sensorsystems

Da das Sensorsignal ein Temperatursignal darstellt, ist eine stabile und homogene Temperaturverteilung innerhalb der Sensorspitze (Bereich der Thermoelemente und des Funktionsmaterials) von besonderer Bedeutung.

Allerdings gibt es einige Faktoren, welche die Temperaturverteilung beeinflussen. Hierzu zählen beispielsweise die Struktur des Dickschichtheizers, die Kontaktierung des Sensors und die Ausrichtung des Sensors beim Einbau in ein Messsystem. Diese Faktoren sollen durch hardwareseitige Optimierung minimiert werden. Im Sensorbetrieb kommen weitere Einflüsse hinzu:

- Die Temperatur des Messrohrs (bzw. -gehäuses) verändert sich während der Messung (Aufheizung des Abgasrohres) und beeinflusst die Temperatur des Sensorgehäuses und damit die Wärmeableitung der Sensorbeheizung.
- Die Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases ist hoch dynamisch und führt ebenfalls zu veränderlichen Umgebungstemperaturen bzw. Wärmeverlustmechanismen um die Sensorspitze.
- Die Temperatur des Rauchgases variiert ebenfalls stark während eines

Abbrandes und beeinflusst somit die Sensorspitze und auch die o.g. Faktoren.

- Eine Schutzkappe um den Sensor kann manche Einflüsse verringern, hat aber wiederum Einfluss auf Gaszutritt und Ansprechgeschwindigkeit des Sensors.

All diese Faktoren beeinflussen sich also auch gegenseitig, sodass eine homogene Temperaturregelung erschwert wird. Mittels sekundärer Messdaten sollen die Einflüsse dieser Faktoren korrigiert werden.

### Hardwareseitige Optimierung des Sensors

Eine erste Möglichkeit, die Temperaturhomogenität an der Spitze des Sensors zu verbessern, ist eine definierte Auslegung der Struktur des Dickschichtheizers. Hierbei muss auch der Wärmeverlust in Form von Wärmeleitung von Sensorspitze hin zu der Kontaktierung des Sensors in Form einer Gegenheizzone berücksichtigt werden.

Auch die Wärmeleitung von der Rückseite (Ort des Heizers) und der Vorderseite (Ort der Thermoelemente) spielt eine entscheidende Rolle, da die am Heizer eingestellte Temperatur auch auf der Vorderseite des Sensors vorliegen soll. Somit soll eine gute Wärmeleitung durch das Substrat gegeben sein. Da allerdings das Messsignal eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten der Sensorspitze darstellt und das Messsignal durch eine exotherme Reaktion, also Erwärmung der einen Seite hervorgerufen wird, soll die Wärmeleitung von der linken Seite zur rechten Seite des Sensors möglichst geringgehalten werden. Aus diesem Grund wird auf das Substrat (vor dem Aufbringen der Thermoelemente, der katalytisch aktiven Schicht und der inerten Abdeckschicht) eine dünne LTTT-Schicht (Ferro, 41020-T) laminiert. Dieses LTTT besitzt eine geringere Wärmeleitfähigkeit als  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sodass eine Erwärmung beider Sensorseiten aufgrund der exothermen Reaktion geringgehalten wird [5].

Eine weitere Möglichkeit der Verbesserung der Temperaturhomogenität stellt die Optimierung der Sensorkontaktierung dar. Es ist darauf zu achten, dass die Wärmekopplung zwischen Sensor und Kontaktierung und somit dem Messaufbau bzw. -gehäuse minimiert wird. Dies wird dadurch erreicht, dass der Sensor nur in einem kleinen Bereich am Ende des Sensors in direktem Kontakt mit der Sensorhalterung steht [3].

Um den Einfluss der Ausrichtung des Sensors entgegenzuwirken, wird eine definierte,

verdrehsichere Einbauposition des Sensors vorgenommen. Der Sensor wird waagrecht in einen senkrechten Verlauf des Rauchgases (senkrecht Kaminstück) eingebaut, wobei die Sensorvorderseite mit den Thermoelementen und der Funktionsschicht nach oben ausgerichtet ist [3].

### Messung und Korrektur des Sensorsignals

Weitere Einflussfaktoren auf das Messsignal im Sensorbetrieb sollen anhand von Messdaten und deren Korrektur beispielhaft dargestellt werden. Der Sensor wurde gemäß den hardwareseitigen Optimierungen hergestellt und in das Rauchgas eines Holzofens eingebaut.

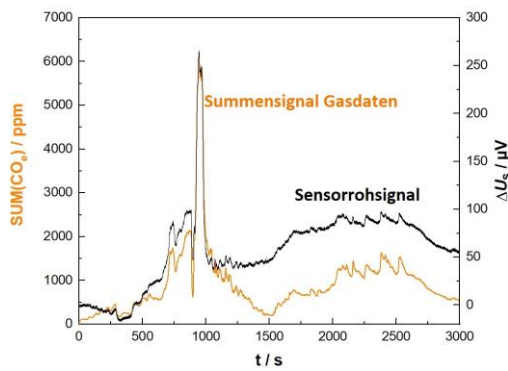
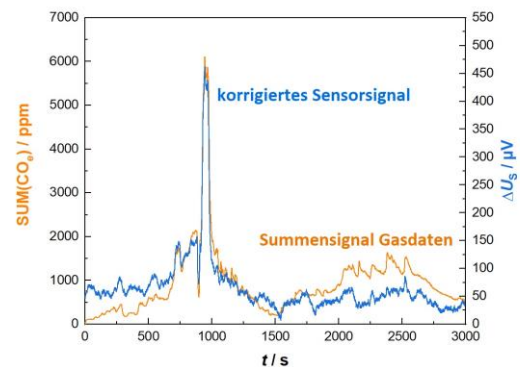


Abb. 2: Messung im Rauchgas eines Holzofens. Zeitlicher Verlauf eines summierten Gassignals (orange) und des Rohsignals eines thermoelektrischen Kohlenwasserstoffsensors (schwarz).

Die Messung (Sensorrohsignal) ist in Abb. 2 zu sehen (schwarze Linie). Als Vergleich werden Daten einer FTIR-Gasanalytik (MKS) verwendet (orange). Hier ist ein Summensignal brennbarer Gase (CO, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CH<sub>4</sub>) dargestellt, welches nach [3] unter Verwendung von Sensitivitätsfaktoren gebildet wurde, um eine Vergleichbarkeit mit der Sensorantwort zu ermöglichen. Die Sensitivitätsfaktoren werden mit dem hier verwendeten Sensor im Vorfeld im Labor ermittelt und sind von der Sensitivität des Sensors auf die einzelnen Gase abhängig. Zusätzlich wird das summierte Signal mit einem sauerstoffabhängigen Gewichtungsfaktor multipliziert, da ausreichend Sauerstoff für die exothermen Reaktionen an der katalytischen Schicht notwendig ist [3]. Ist der vorhandene Sauerstoff (gemessen mit einer Breitbandlambdasonde) im Rauchgas zu gering, sinkt die Sensitivität des Sensors. Dies wird mittels der Gewichtung berücksichtigt.

Der prinzipiell ähnliche Verlauf beider Kurven in Abb. 2 ist ein Ergebnis hardwareseitiger Optimierung (Heizleiterstruktur, Kontaktierung, verdrehsicherer Einbau, zusätzliche LTTT-Schicht). Dennoch sind deutliche Abweichungen (ab ca.  $t = 1000$  s) zu erkennen. Diese Abweichungen entstehen durch den Einfluss der Abgastemperatur, welche wiederum die Gehäusetemperatur beeinflusst. Auch die Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases, sowie die Strömungsführung entlang des Sensors aufgrund der verwendeten Schutzkappe spielen eine entscheidende Rolle.

Es besteht nun die Möglichkeit, sekundäre Messdaten des Sensors zu betrachten. Da die Sensorheizung mittels Vierleitertechnik betrieben wird, kann die Heizleistung als sekundäres Signal mitgeschrieben werden. Die Heizleistung korreliert mit den o.g. Faktoren. Ein Aufheizen des Abgasrohres mit dem Sensorgehäuse führt zu einem geringeren Heizleistungsbedarf des Sensors. Im geregelten Betrieb (konstanter Heizleiterwiderstand, der einer Temperatur von 600 °C entspricht) sinkt also die Heizleistung. Um die Korrekturfunktion des Signals für diesen speziellen Sensor zu bestimmen, werden die Einflüsse schematisch im Labor nachgebildet. Hierfür wird der Sensor in eine beheizte Messkammer eingebaut, welche die Änderungen der Gehäusetemperatur nachstellt. Zusätzlich kann durch diese Messkammer Gas (hier: Druckluft) mit Strömungsgeschwindigkeiten der gleichen Größenordnung einer Holzfeuerung geleitet werden, um so den Strömungseinfluss zu simulieren. Diese Einflüsse führen zu einer Temperaturdifferenz an der Sensorspitze und somit einem Sensorsignal (Offset). Gleichzeitig rufen die Einflüsse eine Änderung in der Heizleistung hervor. Der Signaloffset und die Änderung der Heizleistung stehen in einem linearen Zusammenhang. Daraus resultiert eine für diesen Sensor lineare charakteristische Korrekturkennlinie.



*Abb. 3: Messung im Rauchgas eines Holzofens. Zeitlicher Verlauf eines summierten Gassignals (orange) und des korrigierten Signals (externe Einflüsse auf das Signal sind minimiert) eines thermoelektrischen Kohlenwasserstoffsensors (blau).*

Das Ergebnis einer solchen Korrektur ist in Abb. 3 dargestellt. Auch hier zeigt die orangefarbene Kurve wieder das summierte Gassignal (mit Sensitivitätsfaktoren und O<sub>2</sub>-Gewichtung) aus den FTIR-Daten. Die blaue Kurve dagegen zeigt nun das korrigierte Messsignal (Korrektur der schwarzen Kurve aus Abb. 2 mittels der Heizleistung). Es ist ersichtlich, dass nun das summierte Gassignal und das Sensorsignal gut übereinstimmen. Die Korrektur mittels sekundärer Daten bzgl. der Heizleistung kann im Betrieb direkt erfolgen.

### Schlussfolgerung

Es wurden verschiedene Einflussfaktoren auf Hochtemperatur-Gassensoren am Beispiel eines thermoelektrischen Kohlenwasserstoffsensors erläutert. Es konnte gezeigt werden, dass eine hardwareseitige Optimierung mittels Heizleiterauslegung, verbesserter Kontaktierung, zusätzlicher LTTT-Schicht im Sensoraufbau und einem verdrehsicheren Einbau möglich ist. Zusätzlich konnte das Messsignal mittels interner Sekundärdaten (hier die Heizleistung) des Sensors korrigiert werden, sodass der Verlauf der Emissionen im Rauchgas dargestellt werden können. Des Weiteren ist es möglich, die Einflüsse im Labor nachzubilden und so charakteristische Korrekturkurven zu bestimmen.

### Literaturnachweis

- [1] S. Wiegärtner, G. Hagen, J. Kita, W. Reitmeier, M. Hien, P. Grass, R. Moos, *Sens. Act. B* 214, 234–240 (2015). doi: 10.1016/j.snb.2015.02.083.
- [2] B. Ojha, G. Hagen, H. Kohler, R. Moos, *Proceedings* 1, 457 (2017). doi: 10.3390/proceedings1040457.
- [3] G. Hagen, J. Herrmann, X. Zhang, H. Kohler, I. Hartmann, R. Moos, *Sensors* 23, 2930 (2023). doi: 10.3390/s23062930.
- [4] G. Hagen, N. Leupold, S. Wiegärtner, R. Moos, *Topics in Catalysis* 60, 312–317 (2017), doi: 10.1007/s11244-016-0617-8.
- [5] J. Kita, G. Hagen, C. Schmitt, R. Moos, *Proceedings* 1, 403 (2017), doi: 10.3390/proceedings1040403.