

# Sensor Netzwerk zur Brand-Früherkennung in der Schwerelosigkeit

L. Schynowski<sup>1,2</sup>, A. Kobald<sup>1,2</sup>, M. Schalk<sup>3,4</sup>, F. Meyer<sup>5</sup>, C. Eigenbrod<sup>5</sup>, L. Mädler<sup>3,4</sup>,  
U. Weimar<sup>1,2</sup>, N. Barsan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, Eberhard Karls Universität Tübingen,  
Tübingen, Deutschland*

<sup>2</sup>*Zentrum für Licht-Materie-Interaktion, Sensoren & Analytik, Eberhard Karls Universität Tübingen,  
Tübingen, Deutschland*

<sup>3</sup>*Mechanische Verfahrenstechnik, Universität Bremen, Bremen, Deutschland*

<sup>4</sup>*Leibnitz Institut für Werkstofforientierte Technologien, Bremen, Deutschland*

<sup>5</sup>*Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation, Universität Bremen,  
Bremen, Deutschland*

Kontakt: leah.schynowski@ipc.uni-tuebingen.de

## Einleitung

Die Gefahr für den Menschen bei Vorliegen eines Brandes geht neben den potentiellen Verletzungen vor allem von den toxischen Verbrennungsprodukten aus, die im Feuer entstehen [1]. Die Ergebnisse der Spacecraft Fire Safety Demonstration (Saffire) Experimentreihe zur Untersuchung verschiedener Materialbrände, deren Verbrennungsprodukte und der Flammenpropagation zeigen, dass die potentiellen Gefahren die von einem Feuer in Mikrogravitation ausgehen vergleichbar sind mit den Gefahren eines Brandes auf der Erde. Die Brand-Früherkennung ist damit also insbesondere in Umgebungen entscheidend, die nicht einfach evakuiert und dekontaminiert werden können. Solche Umgebungen stellen unter anderem bemannten (und unbemannte) Räume in der Luft- und Raumfahrt da.

Durch die Notwendigkeit eines ISS Nachfolgers, sowie den Plan zum Bau einer bewohnbaren Mondbasis bleibt das Thema des Brandschutzes aktuell und wurde als „Verbrennungsforschung (Feuersicherheit)“, 2023 in der Raumfahrtstrategie der Bundesregierung gelistet [2,3].

Es werden stetig neue Systeme zur Branderkennung in der Schwerelosigkeit getestet und evaluiert wobei Partikelemission und frühzeitige Erkennung durch Überhitzung von Materialien im Fokus stehen [4]. Da die Partikelgrößen im Rauch verbrennender Materialien mit der Strömungsgeschwindigkeit variieren ist die Einordnung in die korrekte Materialklasse und damit die Unterscheidung zwischen kondensierten Flüssigkeiten, Staub und Rauch mit den mit optischen Detektoren in der Schwerelosigkeit allein aufgrund der Partikelgrößen nicht gewährleistet [5,6].

Als zu untersuchende Materialien eignen sich Polymere im Allgemeinen, da diese in der Raumfahrt verschiedenste Anwendungen finden und damit bei einem Feuer auf beispielsweise der ISS involviert wären.

Chemoresistive Gassensoren auf Basis von halbleitenden Metalloxiden (SMOX) reagieren auf eine Vielzahl an Gasen. Mit Additiven können die Selektivität und Stabilität erhöht werden [7]. Durch die Kombination mehrerer Sensoren aus verschiedenen Materialien kann ein Sensor Array gebildet werden, welcher in derselben Zeit eine größere Informationsdichte erreicht. Durch die Kombination von Sensoren mit komplementären Eigenschaften kann so eine große

Bandbreite an zu detektierenden Spezies abgedeckt werden. Die Reaktivität von SMOX Sensoren auf flüchtige organische Stoffe und Emissionen von überhitzenden Polymeren macht sie zu einem geeigneten Kandidaten für die Entwicklung eines Brand-Früherkennung Systems [8].

## Methoden und Materialien

*Prinzip der Brand-Früherkennung mit SMOX Sensoren*

Je nach Temperatur gasen verschiedene Produkte aus einem sich erwärmenden Material aus. Diese Produkte sind also direkt an die Materialtemperatur gekoppelt.

Polymere werden durch Kombination verschiedener Monomere, ihrer Kettenlänge und Vernetzung sowie durch den Zusatz von Additiven für verschiedenste Anwendungsbereiche optimiert. Die genaue Zusammensetzung der Materialien und die freiwerdenden Stoffe bei Zersetzung werden von den Herstellern im Allgemeinen nicht beschrieben.

Für die Detektion sollen ausgewählte Materialien erhitzt und die unbekanntesten austretenden Spezies gemessen werden. Durch den Vergleich der Sensorantworten bzw. Sensorsignale bei den verschiedenen Temperaturen der Materialien kann die Eignung eines Sensors für die Entsprechenden Materialien diskutiert werden.

Vier in der Raumfahrt verwendete Materialien wurden aus-  
gesucht:

**PMMA** (Vink König Deutschland GmbH, Deutschland)

**PDMS** (Limitless Shielding Ltd, England)

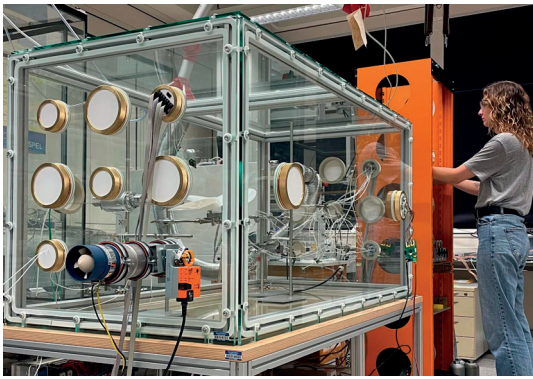
**Kapton™** (DuPont, USA)

**Nomex™ IIIA** (DuPont, USA)

Während PMMA eine Abkürzung für Polymethylmethacrylat ist und PDMS für Polydimethylsiloxan steht, sind Kapton und Nomex geschützte Bezeichnungen der Firma DuPont.

*Aufbau und Versuchsdurchführung*

Die Messungen wurden in einem 1m<sup>3</sup> großen Messaufbau durchgeführt (**Abbildung 1**). Dieser besteht aus möglichst unreaktiven und wenig ausgasenden Materialien wie PTFE, PEEK, Glas, FKM, Aluminium und Messing. Der Versuchsaufbau verfügt über mehrere Durchführungen und eine automatisierte Lüftung. Im inneren der Messkammer rotiert ein Ventilator mit 22 rpm und sorgt für eine homogene



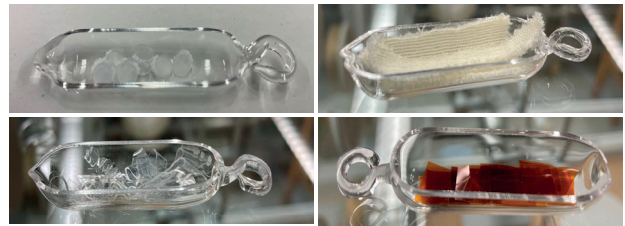
**Abbildung 1:** Versuchsaufbau zur Messung ausgasender Spezies verschiedener Materialien. Das Gerüst besteht aus Aluminiumprofilen verschraubten und mit ePTFE abgedichteten Glasplatten. Das Volumen der Messkammer beträgt  $1\text{m}^3$ . Es ist unter anderem ausgestattet mit einer automatisierten Lüftung, einem Rohrofen und mehreren Sensoren, die über Durchführungen aus PEEK, PTFE und Messing kontaktiert sind.

Atmosphäre. Als Heizquelle dient der für diese Experimente hergestellte Rohrofen aus Glas, der mit dem Reflow Master Pro (Unexpected Maker Shop, Australien) gesteuert wird. In etwa einem Meter Abstand befindet sich der Sensor Sensirion Gas Plattform 40 (SGP40, Sensirion, Schweiz). Er wurde als Luftqualitätssensor entwickelt und reagiert auf kleinste Veränderungen in der Raumluft. Der digitale Sensor kombiniert vier heizbare Sensorelemente (Pixel) und bildet so einen 4-Pixel-Sensorarray [9].

Je 0,2 g der Probe wurden abgewogen und in einem Quarzglas-Boot (**Abbildung 2**) mindestens 12 h vor Start der Messung in den Rohrofen gegeben. Für jedes Material wurde ein individuelles Ofen Programm bestimmt, welches Temperaturen oberhalb und unterhalb der vom Hersteller empfohlenen maximalen Betriebstemperatur enthält. In **Error! Reference source not found.** sind die Materialien und deren entsprechend gewählten Ofentemperaturen gelistet. Jede Temperatur wurde für 50 Minuten gehalten, dann auf die nächste erhöht. Nach dem Durchlauf aller acht Temperaturen wurde die Messkammer belüftet. Zusätzlich zu den Messungen der Polymerproben wurde jedes Boot (ein Boot pro Material) bei den entsprechenden Temperaturen leer vermessen um auszuschließen, dass aus den sich erwärmenden Materialien des Ofens oder Messkammermaterialien ausgasenden Produkte generiert werden.

**Tabelle 1:** Polymere und Temperaturen des jeweiligen Heizprogrammes.

Material	Temperaturen in °C
PMMA	30, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200
PDMS	50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250
Nomex	50, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300
Kapton	50, 100, 150, 200, 250, 350, 400, 450



**Abbildung 2:** Polymere in Quarzglas-Booten. Von links oben nach rechts unten: PMMA, Nomex IIIA™, PDMS, Kapton™.

## Ergebnisse

### Sensorsignale

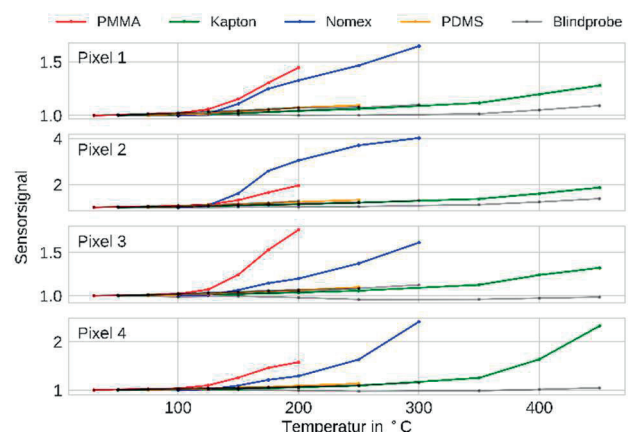
Die Gegenüberstellung der Sensorsignale erlaubt den qualitativen und quantitativen Vergleich der Messungen. Hierzu wurden die Mittelwerte der Sensorantworten der Letzen drei Minuten pro Temperatur des Heizprogrammes durch den Mittelwert der Sensorantworten der Letzen drei Minuten bei  $30\text{ }^\circ\text{C}$  (für PMMA) bzw.  $50\text{ }^\circ\text{C}$  (für PDMS, Kapton und Nomex) dividiert.

**Abbildung 3** zeigt die errechneten Sensorsignale der vier Materialien für die vier Pixel des SGP40 Sensors. In grau sind die Messungen der leeren Boote dargestellt.

Die vier Pixel unterscheiden sich deutlich: Pixel 2 zeigt bei  $200\text{ }^\circ\text{C}$  für Nomex das höchste Sensorsignal im Vergleich mit den anderen Materialien bei derselben Temperatur, während alle anderen Pixel bei dieser Temperatur die höchsten Signale für PMMA aufzeichnen.

Mit allen Pixeln lassen sich PMMA, und Nomex von den Blindproben und auch voneinander unterscheiden.

Kapton kann mit Pixel 4 am besten detektiert werden. PDMS ist mit jedem der vier Pixel nur geringfügig von der Blindprobe unterscheidbar.



**Abbildung 3:** Sensorsignale der vier Pixel des SGP40 gegen die Temperatur der Materialien PMMA, Kapton, Nomex und PDMS.

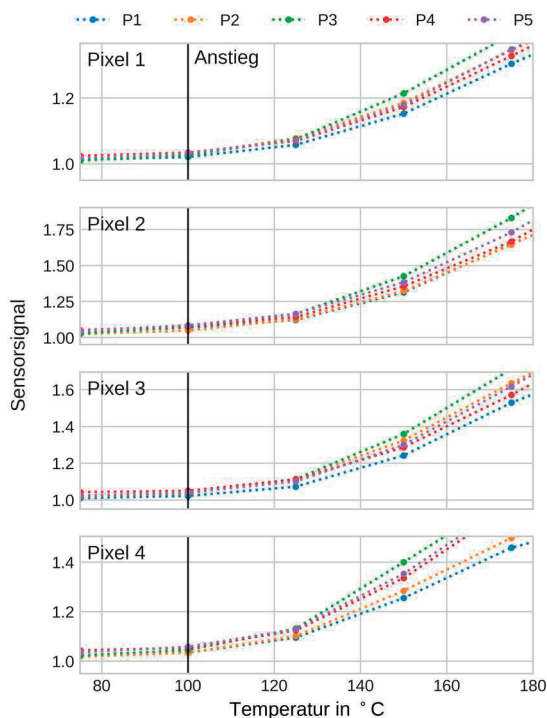
Aus den Sensorsignalen der Materialien lassen sich bereits geeignete Schwellwerte für eine binäre Detektion abschätzen. Für PMMA scheint bei etwa 100 °C ein detektierbares Ausgasen zu beginnen. Ab dieser Temperatur ist demnach möglicherweise eine Unterscheidbarkeit zwischen kaltem und sich erhaltenden PMMA, also ungefährlichem und gefährlichem Szenario möglich. Im Falle von Kapton ist der Anstieg der Sensorsignale eher flach und erst ab etwa 350 °C mit Pixel 3 und 4 signifikant. Nomex wird von Pixel 1 und 2 bei über 125 °C und von Pixel 3 und 4 bei über 150 °C detektiert. PDMS bleibt für alle vier Pixel kaum von der Blindprobe zu unterscheiden.

#### Lineare Diskriminanzanalyse

Eine binäre Detektion kann mit verschiedenen Modellen trainiert und getestet werden. Neben dem verwendeten Algorithmus spielen die aufgenommenen Daten und deren Aufbereitung eine entscheidende Rolle.

Um beispielhaft eine binäre Detektion zu simulieren und den SGP40 als geeigneten Sensor zu identifizieren wurde eine lineare Diskriminanzanalyse (LDA) mit einem kleinen Datensatz aus logarithmierten Daten fünf konsekutiver PMMA Messungen durchgeführt.

Die Werte der letzten drei Minuten pro Temperaturschritt wurden als Datenpunkte gewählt. Einer der fünf Messungen (ein Tag) wurde als Testdatensatz gewählt, mit den übrigen vier wurde trainiert. Nach Evaluation der Metriken der Empfindlichkeit (auch Trefferquote, Sensitivität oder



**Abbildung 4:** Sensorsignale der vier sensitiven Schichten (Pixel) des SGP40 gegen die Temperatur geheizter PMMA Proben (P1-P5). Ein Anstieg der Sensorsignale ist ab 100 °C erkennbar. Somit könnte ab dieser Temperatur ein Schwellwert zur Detektion des sich aufheizenden und damit gefährlich werden Materials PMMA gesetzt werden.

Richtig-positiv-Rate) und der Genauigkeit (auch positiver Vorhersagewert, Wirksamkeit oder Relevanz) für jede der gemessenen Temperaturen, wurde ein neues Modell trainiert, wobei dieses Mal ein anderer Testdatensatz gewählt wurde und mit den übrigen vier Datensätzen trainiert, so dass jede Messung einmal als Testdatensatz diente. In **Abbildung 4** sind die Sensorsignale der fünf PMMA Messungen dargestellt. Bei über 100 °C steigen die Sensorsignale merklich.

Die Ergebnisse der binären Detektion für jede der gemessenen Temperaturen über 30 °C wurden aus den Wahrheitsmatrizen der fünf trainierten LDA Modelle berechnet. Die Mittelwerte dieser Ergebnisse sind in **Tabelle 2** gelistet. Die wichtigere der beiden Metriken ist die Empfindlichkeit, da dies mit 1-Empfindlichkeit den Anteil der nicht erfolgten Alarme bei Erhitzen auf bzw. über die Schwellwerttemperatur beschreibt. Die Genauigkeit hingegen beschreibt die Zahl der Fehlalarme.

**Tabelle 2:** Genauigkeit und Empfindlichkeit errechnet aus den Mittelwerten fünf Wahrheitsmatrizen.

Schwellwerttemperatur in °C	Empfindlichkeit	Genauigkeit
50	0,93	0,93
75	0,96	0,92
100	0,95	0,88
125	0,97	0,93
150	1,00	1,00
175	1,00	1,00
200	1,00	1,00

Genauigkeit und Empfindlichkeit sind für alle Temperaturen bei über 0,8. Ab einem Schwellwert von 150 °C ist die Vorhersage des Modelles fehlerfrei und keine der Wahrheitsmatrizen zeigt Abweichungen. Die höchste Genauigkeit unterhalb der gewählten Temperatur wurde bei 150 °C und 50 °C erreicht, die höchste Empfindlichkeit bei 125 °C.

## Diskussion

Der hier gezeigte Datensatz ist zu klein um eine fundierte Aussage über eine realistisch geeignete Schwellwerttemperatur von PMMA zu machen. Das vorgestellte Prinzip und die Eignung des SGP40 für die Brand-Früherkennung durch Detektion der ausgasenden Spezies aus sich erwärmenden Polymeren konnte jedoch anhand der PMMA Messungen gezeigt werden.

Durch die gemessenen Sensorsignale von Nomex und Kapton lässt sich auch hier die Eignung des SGP40 für eine binäre Klassifizierung erwarten. Für PDMS muss geprüft werden ob der Sensor mit geeigneten Algorithmen unterscheiden kann in welcher Temperatur das Material vorliegt. Der Ofen und die Messkammer, deren Aufbau einen Großteil des Projektes in Anspruch nahmen, werden zukünftig mit einem Gasmischsystem ausgestattet um in späteren Phasen verschiedenste Hintergründe zu simulieren.

Um das Prinzip der hier gezeigten Brand-Früherkennung weiter zu stützen sind mit Massenspektroskopie gekoppelte thermogravimetrische Analysen (TG-MS) mit 5 °C Auflösung geplant. So kann möglicherweise der Zusammenhang des Anstiegens der Sensorsignale eines Materials mit austretenden Spezies korreliert werden. Zudem werden die Materialien in denselben 5 °C Schritten mit dem SGP40 gemessen um eine höhere Temperaturauflösung zu erreichen. Die Anzahl an Messungen wird deutlich erhöht werden. Weiterhin sind Messungen mit mehreren Sensoren in verschiedenen Positionen in der Messkammer vorgesehen um gegebenenfalls eine Lokalisation der Quelle zu ermöglichen.

## Literatur

- [1] STEFANIDOU, M.; ATHANASELIS, S.; SPILIOPOULOU, C.: Health Impacts of Fire Smoke Inhalation. *Inhalation Toxicology*, (2008). 20(8), 761–766.
- [2] MUELLER, R. P.: Lunar Base Construction Planning, *ASCE Earth and Space Conference, 2022*
- [3] Raumfahrtstrategie der Bundesregierung (2023), *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)*
- [4] MEYER, M.E.; ULRICH B.L.: Trade Study Considerations for Fire Detection, Suppression and Remediation Systems for Commercial Space Missions, *52nd ICES, ICES-2023-434* (2023)
- [5] MEYER, M. E.; URBAN, D. L.; MULHOLLAND, G. W.; BRYG V.; YUAN Z.; RUFF, G. A.; CLEARY, T.; YANG, J.: Evaluation of spacecraft smoke detector performance in the low-gravity environment, *Fire Safety Journal*, Volume 98, 2018, S. 74-81
- [6] SCHULTZE, T.; SICHMA, L.; MEYER, M. E.: A Smoke Detector to Prevent False Alarms in Lunar Missions by Smoke-Dust Discrimination, *ICES-2020-125* (2020)
- [7] DEGLER, D.; WEIMAR, U.; BARSAN, N.: Current Understanding of the Fundamental Mechanisms of Doped and Loaded Semiconducting Metal-Oxide-Based Gas-Sensing. In: *ACS Sens.* 2019, 4, 2228–2249.
- [8] LIU, Y.; GEYIK, U.; KOBALD, A.; YANG A.; WANG, X.; WEIMAR, U.; RONG, M.; BARSAN, N.: Overheat diagnosis of power cable based on gas sensors: Device/material exploration. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2022, 350.
- [9] Sensirion AG, Datasheet SGP40, Indoor Air Quality Sensor for VOC Measurements, 2022

## Danksagung

Diese Arbeit wurde finanziert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen der INNOspace-Initiative (50RP2320).