



**Abschlussbericht zum DBU-geförderten Projekt:**

# **Digitales Branddetektions- und Früherkennungssystem für Kulturgüter (DIBRAK)**

**DBU-Aktenzeichen: AZ 35580/01**

**Berichtszeitraum: 01.11.2020 - 31.03.2024**

**Ihre Ansprechpartner für diesen Bericht:**

Name	Telefon	E-Mail
Fan Guo, M.Sc.	05323 726194	fan.guo@cutec.de
Dr.-Ing. Andreas Sauter	05323 726270	andreas.sauter@cutec.de

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
1.1	Ausgangssituation.....	5
1.2	Aktueller Stand der Technik .....	6
1.3	Innovativer Lösungsansatz.....	8
1.4	Metalloxid-Sensoren .....	9
2.	Begehung der Kulturgüter.....	9
2.1	Begehung des Städtische Museums Halberstadt am 05.02.2021.....	10
2.2	Begehung des Kloster Michaelsteins in Blankenburg am 05.03.2021.....	11
2.3	Begehung des Schloss Merseburg in Merseburg am 16.07.2021.....	13
2.4	Begehung des Schloss Bad Pyrmont am 15.09.2023.....	14
2.5	Begehung des Großen Heiligen Kreuzes am 09.12.2022.....	15
2.6	Begehung der Staatlichen Kunstsammlung Dresden am 30.01.2023.....	17
2.7	Begehung des Sächsische Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden, Dresden am 30.01.2023 .....	19
2.8	Fazit der bisherigen Begehungen.....	19
3.	Experimentelle Arbeiten.....	20
3.1	Spektroskopische Untersuchung der Schwelgase mittels GC-MS.....	20
3.2	Konzeption und Konstruktion eines Prototyps .....	23
3.3	Ergebnisse der Laborversuche.....	26
3.4	Entwurf und Konstruktion eines Branddetektors für die realitätsnahe Detektion .....	32
3.5	Entwurf und Konstruktion einer realitätsnahen Versuchsumgebung .....	36
3.6	Versuche in der Testumgebung .....	38
3.6.1	Charakterisierung der Versuchsparameter.....	38
3.6.2	Versuchspräparation und -durchführung .....	40
3.7	Ergebnisse der Versuche in der Testumgebung.....	40
3.7.1	Ergebnis der Schwelversuche mit Gemälde als Probe .....	40
3.7.2	Ergebnis der Schwelversuche mit Holz als Probe .....	42
3.7.3	Ergebnis der Schwelversuche mit Lüsterklemme als Probe .....	43

3.7.4	Ergebnis der Schwelversuche mit Tierhaare als Probe .....	44
3.7.5	Ergebnis der Schwelversuche mit Hausstaub als Probe.....	45
3.7.6	Ergebnis der Schwelversuche mit Büropapier als Probe .....	45
4.	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....	46
5.	Resümee und Ausblick.....	47
6.	Literaturverzeichnis.....	49

Abbildung 1: Lagerraum ohne Abluft.....	11
Abbildung 2: Schächte mit Technik im Kloster Michaelstein unter einem Ausstellungsobjekt.....	12
Abbildung 3: Hängeregal mit Projektor .....	13
Abbildung 4: Keller im Schloss Merseburg.....	14
Abbildung 5: Links: Dachstuhl des Schlosses mit verstaubten Holzbauteile im Schloss Bad Pyrmont. Rechts: Stoffbezüge als Dekor. ....	15
Abbildung 6: Leichtentzündliche Dekoration .....	16
Abbildung 7: Dachstube des Großen Heiligen Kreuzes.....	17
Abbildung 8: Vitrine der Münzsammlung in der Staatlichen Kunstsammlung.....	18
Abbildung 9: Vakuumpumpebereich in einem abgeschotteten Fach.....	18
Abbildung 10: Unterirdisches Magazin.....	19
Abbildung 11: Schematischer Versuchsaufbau zur Schwelgasentnahme .....	21
Abbildung 12: Prototyp des Branddetektors für die Laborversuche .....	24
Abbildung 13: Schematischer Versuchsaufbau zur Prüfung des Detektionsmodulprototyps .....	25
Abbildung 14: Versuchsaufbau im Labor mit dem Detektionsprototyp .....	26
Abbildung 15: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Holz als Ausgangsmaterial.....	27
Abbildung 16 Ergebnis des Prototyps im Labor mit Lüsterklemme als Ausgangsmaterial.....	28
Abbildung 17: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Tierhaare als Ausgangsmaterial .....	29
Abbildung 18: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Büropapier als Ausgangsmaterial.....	30
Abbildung 19: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Hausstaub als Ausgangsmaterial .....	31
Abbildung 20: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Gemälde als Ausgangsmaterial.....	31
Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Prototyps für realitätsnahe Versuche .....	32
Abbildung 22: Prototyp eines Detektionsmoduls für realitätsnahe Untersuchungen.....	33
Abbildung 23: Eingebaute Teile im Prototyp .....	34
Abbildung 24: Arduino Uno und der Motorshield im Prototyp .....	34
Abbildung 25: Schematische Darstellung der optimierten Version des Detektionsmoduls.....	35
Abbildung 26: Weiter optimiertes Detektionsmodul für realitätsnahe Anwendungsversuche .....	35
Abbildung 27: Schematische Darstellung einer realitätsnahen Versuchsumgebung .....	37
Abbildung 28: In der Kammer verbaute Einheiten .....	37
Abbildung 29: Schwelkammer für die Versuche in der Demonstrationszelle .....	38
Abbildung 30: Hintergrundmessung in der Demonstrationszelle.....	39
Abbildung 31: Temperaturverluste entlang der Schwelkammer.....	39
Abbildung 32: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Gemälde als Ausgangsmaterial.....	40
Abbildung 33: Gemälde vor der Verschmelung .....	41
Abbildung 34: Gemälde nach der Verschmelung.....	41
Abbildung 35: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Holz als Ausgangsmaterial.....	42
Abbildung 36: Holz vor (links) und nach (rechts) der Verschmelung, rot dargestellt sind angeschwelte Bereiche .....	42
Abbildung 37: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Lüsterklemme als Ausgangsmaterial.....	43
Abbildung 38: Lüsterklemme vor (links) und nach (rechts) der Verschmelung .....	43
Abbildung 39: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Tierhaare als Ausgangsmaterial.....	44

<i>Abbildung 40: Tierhaare vor (rechts) und nach (links) der Verschwelung .....</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 41: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Hausstaub als Ausgangsmaterial .....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 42: Hausstaub vor (links) und nach (rechts) der Verschwelung.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 43: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Büropapier als Ausgangsmaterial.....</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 44: Büropapier nach der Verschwelung.....</i>	<i>46</i>

## **Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse der GC-MS-Analyse der verschwelten Materialien.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 2: Arten der MOX-Sensor und deren Detektionsbereiche .....</i>	<i>24</i>

# **1. Einleitung**

## **1.1 Ausgangssituation**

Kulturgüter sind ein essentieller Teil der Menschheit. Sie repräsentieren unsere Identität, unsere Geschichte und den Geist unserer Existenz. Diese Denkmäler vermitteln wertvolle

historische Daten und fördern die Entwicklung der Menschheit. Darüber hinaus beherbergen Kulturgüter einzigartige und unersetzliche Objekte sowie die Zeugnisse menschlicher Handwerkskunst. Außerdem sind Kulturgüter heute ein wesentlicher Bestandteil der lokalen Wirtschaft, da sie als Touristenattraktion gelten und Besucher aus allen Regionen anziehen. Diese für die Menschheit so wichtigen Gebäude sind allerdings einer Vielzahl unterschiedlicher Gefahren ausgesetzt. So ist das Feuer neben Naturgefahren wie Überschwemmungen, Erdbeben und Erosion die Hauptursache für Schäden an Kulturgütern. Durch aktuelle Brandereignisse ist der Schutz von Kulturstätten verstärkt in den Fokus des öffentlichen Interesses gerückt. Die Beispiele für derartige Schäden sind zahlreich. So brach z. B. im April letzten Jahres ein Großfeuer in der Kathedrale Notre-Dame de Paris aus, das zu Schäden in Höhe von mehr als 150 Millionen Euro führte [1]. Im September 2018 sorgte ein verheerender Brand im brasilianischen Nationalmuseum für Schlagzeilen, bei dem mehrere Millionen Exponate zerstört wurden [2]. Diese katastrophalen Ereignisse stehen für eine Vielzahl von Brandkatastrophen, wie sie in verschiedenen kulturell wichtigen Stätten ausgebrochen sind. Hierbei sind neben den oben genannten Beispielen oftmals auch Bibliotheken – wie 2004 die Anna-Amalia-Bibliothek in Weimar mit rd. 50.000 zerstörten Büchern –, Theater oder alte Fachwerkhauskonstruktionen betroffen [3] [4] [5]. Die besondere Gefährdung dieser Örtlichkeiten liegt häufig in den Baumaterialien der Gebäude begründet. In vielen Fällen ist eine exakte Aufklärung der Brandursachen schwerlich möglich. Anhand der aufgeklärten Fälle lässt sich jedoch schließen, dass den Schäden in erster Linie Fehler und Kurzschlüsse innerhalb der genutzten elektrischen Systeme zugrunde liegen. Hierbei entstehen Schwelbrände, die in der Folge oft zu einem Vollbrand führen. Die Früherkennung in der Schwelbrandphase stellt ein Problem für herkömmliche Branddetektionslösungen dar (langsamer Abbrand ohne Flamme). Damit geht in der Frühphase eines Brandereignisses wertvolle Zeit für die Intervention verloren. Rauchentwicklung und Löschwasser verursachen oftmals zusätzlich zum eigentlichen Brand hohe Schäden an den Gebäuden und den darin enthaltenen Kulturgütern.

Die Prävention solcher Brandereignisse ist daher von größter Bedeutung. Infolgedessen ist die Entwicklung eines präventiven Brandmeldesystems, das den Brand bereits vor Erreichen der Schwelbrandphase detektiert, ein adäquater und zukunftsgerichteter Lösungsansatz.

## 1.2 Aktueller Stand der Technik

Brandmeldetechnologien spielen bei der Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit und der Minimierung von Sachschäden durch Brände eine entscheidende Rolle. Dieser Abschnitt befasst sich mit den aktuellen Branderkennungsoptionen, deren zugrundeliegenden Prinzipien, Vorteilen und Nachteilen.

Rauchmelder gehören zu den am weitesten verbreiteten Methoden der Branderkennung. Sie werden entweder mit Ionisations- oder fotoelektrischen Sensoren betrieben. In Ionisationsmeldern sind radioaktive Stoffe (Americium-241) enthalten, die in einer entsprechenden Messzelle für eine Ionisierung der enthaltenen Luft sorgen. Durch die ionisierten Teilchen kann ein Stromfluss im Nanoamperebereich erzeugt werden. Dringt Rauch in den Melder ein, wird der Fluss dieser Teilchen gestört, was zu einem Absinken des Stromflusses führt. Dieses kann gemessen werden und führt zu einem Auslösen des Alarms [6]. Bei fotoelektrischen Meldern wird ein Lichtstrahl auf eine Fozelle projiziert. Durch die Lichtstreuung des eindringenden Rauchpartikels wird der Alarm ausgelöst [7]. Beide Melder sind je nach Art des Brandes unterschiedlich wirksam. Allerdings ist die Detektion eines Brandes hier auf Grund des Vorhandenseins von Rauchpartikeln frühestens möglich, wenn der Brand bereits in einem fortgeschrittenen Stadium ist. Im Allgemeinen sind sie jedoch ein wichtiger Bestandteil des Brandschutzsystems.

Ein Wärmemelder ist ein Gerät, das zur Erkennung hoher Temperaturen oder schneller Änderungen der Umgebungstemperatur und damit zur Detektion eines möglichen Brandes entwickelt wurde. Die Hauptkomponente eines Wärmemelders ist ein Temperatursensor, der die Umgebungstemperatur überwacht und bei Überschreiten der voreingestellten Grenzwerte einen Alarm auslöst [8](Thermodifferenzialauswertungsprinzip). Im Gegensatz zu Rauchmeldern erkennen Wärmemelder keine Partikel, die typischerweise bei einem Brand freigesetzt werden. Aus diesem Grund werden sie in Kombination mit Rauchmeldern eingesetzt. Wärmemelder sind ideal für Bereiche, in denen die Decken niedrig sind oder wenig Platz zur Verfügung steht. Sie sind weniger störanfällig als Rauchmelder und können auch in staubhaltiger Umgebung eingesetzt werden.

Flammenmelder detektieren sichtbare oder unsichtbare Flammen durch Analyse der elektromagnetischen Strahlung in ultravioletten (UV), infraroten (IR) oder kombinierten Spektralbereichen [9]. UV-Detektoren sind für die Erkennung aller Arten von Bränden geeignet, während IR-Detektoren besser für die Erkennung von Bränden mit CO<sub>2</sub>-Entwicklung geeignet sind. Kombinierte Detektoren vereinen die Vorteile beider Kategorien und bieten eine überlegene Detektionsfähigkeit auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen [10]. Flammenmelder eignen sich besonders für Bereiche, in denen leicht entflammbare Materialien gelagert oder verwendet werden, wie z. B. Werkstätten, Lagerräume oder Produktionsbereiche.

Videobildanalyseysteme (Video Image Analysis - VIA) bestehen aus Videoüberwachungskameras, die mit Softwareprogrammen verbunden sind, die das aufgenommene Videomaterial kontinuierlich auf Anzeichen eines Brandes hin untersuchen. Zur Identifizierung von Flammen und Rauch in Echtzeit verwendet das Videosystem

überwiegend künstliche Intelligenz (KI). Das System ist in der Lage, auch bei schlechter Sichtbedingung oder starker Rauchentwicklung zwischen verschiedenen Arten von Bränden zu unterscheiden. Gegenüber herkömmlichen Brandmeldesystemen bietet der Einsatz des videobasierten Systems daher zahlreiche Vorteile. Dazu gehören nicht nur eine höhere Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Detektion, sondern auch die Tatsache, dass das System intuitiv zu installieren und zu warten ist [11].

Der Nachteil von optischen Systemen besteht darin, dass sie bei vollständiger Raumabdeckung ihre Wirkung verlieren. Insofern ist der Einsatz solcher Systeme in Kultureinrichtungen mit viel Mobiliar nicht zu empfehlen.

Bei den Gasmeldern handelt es sich um Geräte, die zur Überwachung der Konzentration von Gasen in der Luft eingesetzt werden. Sie dienen dem Schutz von Menschen und Tier vor gefährlichen oder giftigen Gasen, indem bei Erreichen einer bestimmten Grenzkonzentration rechtzeitig Alarm gegeben wird. Die Funktion eines Gasmelders beruht in der Regel auf einer Messzelle, die mit einem Hochleistungssensor ausgestattet ist, um die Umgebungen zu überwachen. Er detektiert zuverlässig Methan, Butan und Propan. Ein wesentlicher Nachteil dieser Technologie ist der hohe Preis des Systems und die Tatsache, dass der Anschluss des Detektors an eine Steckdose mit mindestens 12V Wechselspannung erforderlich ist [12]. Solche Alarmsysteme führen zu einer dauerhaften Veränderung der Einrichtungsarchitektur und zudem sie sind ästhetisch unattraktiv. Außerdem sind die Sensoren nur für ein bestimmtes Einsatzgebiet optimiert. Eine modulare Anpassung an lokale Gegebenheiten ist derzeit nur in begrenztem Umfang möglich.

Es lässt sich festhalten, dass in deutschen Kulturgütern zum Teil vielfältige Brandschutzsysteme eingesetzt werden, die entsprechend dem Gefährdungspotenzial der Objekte ausgelegt sind. Dies mag daran liegen, dass der bürokratische Aufwand und die finanziellen Möglichkeiten den Ausbau solcher Maßnahmen hemmen. Das Ergebnis ist ein Flickenteppich aus unvollständigen und ineffizienten Lösungen. Dies hat zur Folge, dass die derzeit in Kulturgütern installierte Technik nur in der Lage ist, einen Brand erst dann zu erkennen, wenn sich bereits ein entsprechender Schwelbrand entwickelt hat, so dass die Zeit für das Eingreifen verloren geht.

### 1.3 Innovativer Lösungsansatz

Der im Zuge dieses Vorhabens verfolgte innovative Lösungsansatz beinhaltet die Entwicklung eines flexiblen, modular erweiterbaren Brandfrüherkennungssystems auf Basis chemischer Sensoren. Das Ziel ist es hierbei, eine Sensorik zu implementieren, die bereits in der Aufheizphase von Baustoffen, d. h. vor dem Eintreten eines Brandereignisses, austretende Substanzen detektiert. Hierdurch ist es möglich, einen potenziellen Schwelbrand bereits vor

seiner eigentlichen Entstehung zu erkennen und damit auch frühestmöglich durch Intervention zu verhindern. Im Verlauf einer ungewollten Erwärmung entweichen Gase aus den Materialien. Je nachdem, welches Ausgangsmaterial erhitzt wird, unterscheiden sich diese Gase. Diese sog. Schwelgase entstehen bereits in der frühen Phase einer langsamen Brandentwicklung (Schwelbrand). Sie sind nahezu undetektierbar für herkömmliche Rauchmelder, da es sich dabei nicht um Partikel handelt. Insofern soll das im Zuge dieses Projekts entwickelte System eine Warnung bereits vor herkömmlichen Rauchmeldern ermöglichen.

## 1.4 Metalloxid-Sensoren

Für den vorgeschlagenen Lösungsansatz kommen kostengünstige MOX-Sensoren zur Anwendung, die eine hohe Empfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Gasen aufweisen, die vor und während eines Schwelbrandes auftreten. Diese Art der frühzeitigen Gasdetektion kann dabei helfen Schwelbrände frühzeitig zu erkennen und Folgeschäden zu vermeiden. Der speziell für die Detektion vorgesehene MOX-Sensor gehört zur Klasse der Taguchi-Sensoren [13]. Diese Sensoren basieren auf dem chemoresistiven Prinzip, bei dem die elektrischen Widerstandswerte des Sensors in Gegenwart von Schwelgasen variieren. Der MOX-Sensor ist mit einer dünnen Schicht aus Zinnoxid oder Indiumoxid als sensibles Material versehen. Wenn Schwelgase auf das heiße sensitive Material treffen, werden katalytische Reaktionen ausgelöst. Abhängig davon, welches Molekül an die Metalloberfläche ankommt, wird das sensitive Material entweder oxidiert oder reduziert, um den Widerstand zu erhöhen bzw. zu verringern. In einem Schwelzenario entstehen hauptsächlich Reduktionsgase, die den Widerstand des Sensors steigern [14]. Anhand der Änderung der Widerstandswerte kann ein Rückschluss auf die Konzentration der entsprechenden Substanzen in der Umgebungsluft gezogen werden.

## 2. Begehung der Kulturgüter

Um herauszufinden, welche Gase bei einem Schwelbrand freigesetzt werden können, ist es wichtig, die strukturellen Gegebenheiten in den Kulturstätten zu analysieren, um somit potenzielle Risiken für Schwelbrände abschätzen und die während des Schwelbrandes involvierten Materialien identifizieren zu können. Alle geplanten Besichtigungen der Kulturgüter wurden unter teilweise schwierigen Bedingungen während der COVID-19 Pandemie durchgeführt. Dabei wurden die einzelnen Einrichtungen mit der Unterstützung des Experten der Freiwilligen Feuerwehr Goslar inspiziert, um so eine realitätsnahe Einschätzung zu haben. Die folgenden kulturellen Stätten wurden während der Laufzeit des Projekts besucht:

- Städtisches Museum Halberstadt

- Kloster Michaelstein
- Schloss Merseburg
- Schloss Bad Pyrmont
- Großes Heiliges Kreuz
- Staatliche Kunstsammlung Dresden
- Sächsische Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden

Die Ergebnisse der Begehungen sind dabei Schilderungen möglicher Brandentstehungsvorgänge, die durch die strukturellen Gegebenheiten innerhalb der Räumlichkeiten auf Basis der Erfahrung des beteiligten Experten der Feuerwehr denkbar wären. Diese sind nicht als direkter Mangel zu verstehen sondern lediglich als eine Einschätzung möglicher Abläufe im Sinne eines Worst-Case-Szenarios.

## 2.1 Begehung des Städtische Museums Halberstadt am 05.02.2021

Aufgrund der jüngsten Brandereignisse im benachbarten Schachmuseum Ströbeck im Jahr 2019 ist die Sensibilität der Betreiber für das Thema Brandschutz stark gestiegen. Am 14. November 2019 mussten die örtlichen Ortsfeuerwehren hier zu einem Großbrand anrücken. Es wurden zahlreiche Schäden an Vitrinen und anderen Gegenständen durch das Feuer gemeldet. Bei den Löscharbeiten kam es zu weiteren Schäden durch Löschwasser und Ruß [15]. Dadurch sind das Interesse und die Nachfrage nach zuverlässigen und wirtschaftlichen Lösungen im Bereich der Brandschutztechnik deutlich gestiegen. Im Museum wurden anhand der besichtigten Räume potenzielle Brandursachen identifiziert und die umgebenden Materialien untersucht. Hierzu gehören besonders Stellen, an denen sich viele Geräte und Verkabelungen wie in der Abbildung 1 befinden. Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass Lagerräume und -schächte wie in der Abbildung 1 die Entstehung von Schwelbränden begünstigen, da sie in der Regel nicht belüftet sind und somit keine Wärmeabfuhr möglich ist.

Weiterhin wurden ebenfalls unterschiedliche elektrische Komponenten in den Ausstellungsräumen als mögliche Auslöser für Schwelbrände identifiziert (Lüsterklemmen, Beleuchtung, etc.).



*Abbildung 1: Lageraum ohne Abluft*

Materialseitig sind auf Basis dieser Begehung für die folgenden experimentellen Untersuchungen speziell elektrische Komponenten in den Fokus gerückt, da diese auch literaturseitig für eine Vielzahl der entstehenden Brände verantwortlich sind.

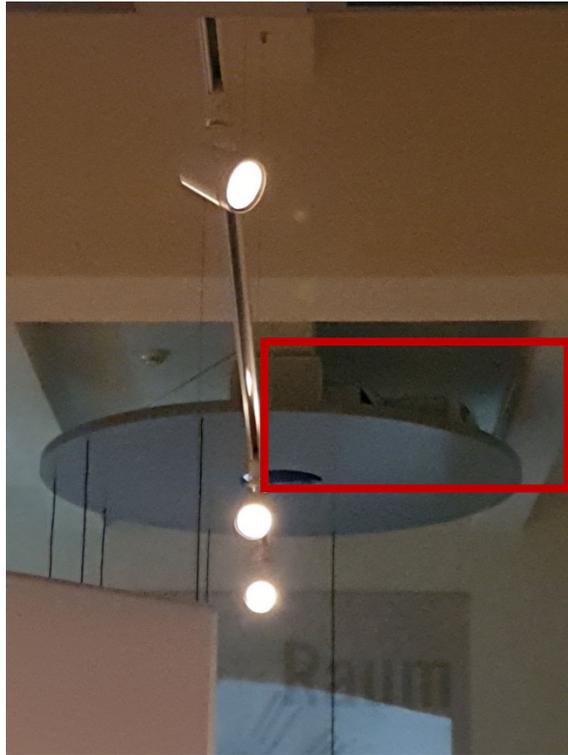
## 2.2 Begehung des Kloster Michaelsteins in Blankenburg am 05.03.2021

Im Gegensatz zum Städtischen Museum Halberstadt ist das Kloster Michaelstein in Blankenburg mehr auf elektrisch gestützte optische und akustische Veranstaltungen ausgerichtet (Präsentationen mittels Beamer, Soundproben, etc.). Folglich befinden sich in der Gebäudestruktur zahlreiche Projektions- und Soundanlagen sowie Geräte, die diese Anlagen überwachen. Viele der entsprechenden Geräte sind dabei in abgeschlossenen Bereichen wie in Abbildung 2 dargestellt verbaut.



*Abbildung 2: Schächte mit Technik im Kloster Michaelstein unter einem Ausstellungsobjekt*

Oftmals sind diese Geräte somit in engen Schächten aufgestellt, in denen sich Wärme ansammeln und dadurch einen Schwelbrand begünstigt werden kann. Um die Geräte herum kann sich Staub ansammeln, der sich unter Wärmeeinwirkung entzünden kann. Außerdem wurde an der Decke eines Präsentationsraumes ein Hängeregal angebracht, um einen großen Projektor betreiben zu können (s. Abbildung 3)



*Abbildung 3: Hängeregal mit Projektor*

Auf dem Hängeregal kann sich Staub ansammeln, der sich bei Überhitzung des leistungsstarken Projektors (roter Kasten) entzünden kann. Im Gefahrenfall stellen solche Stellen aufgrund der schlechten Erreichbarkeit ein größeres Risiko dar. Auch aus der Begehung dieses Kulturguts ergibt sich materialseitig eine neue Komponente, die untersucht werden soll. Für die Experimente wurde herkömmlicher Hausstaub mit in die Liste zu untersuchender Materialien mit aufgenommen.

### 2.3 Begehung des Schloss Merseburg in Merseburg am 16.07.2021

Eine strukturelle Besonderheit des Schlosses Merseburg liegt darin, dass es sowohl als Museum genutzt wird als auch die Stadtverwaltung der Stadt Merseburg beherbergt. Folglich würde eine Brandkatastrophe besonders verheerend sein, da neben der Zerstörung der Exponate auch eine Gefährdung der Daten und der Funktionsfähigkeit der Stadtverwaltung vorläge. Im Schloss Merseburg existieren neben den kulturellen Exponaten zahlreiche Räumlichkeiten, die auch als städtische Archive dienen. Es gibt in diesen Räumen leicht entflammable Gegenstände, wie zum Beispiel Bilder, Dokumente und Holz.



*Abbildung 4: Keller im Schloss Merseburg*

Abbildung 4 zeigt einen Keller, der als Zwischenlager z. B. für Handwerker bzw. die Haustechnik dient. Materialeitig liegt hier primär Holz als Werkstoff vor. Dieses stellt eine Brandlast dar und wird in den durchgeführten Experimenten ebenfalls mit berücksichtigt.

## 2.4 Begehung des Schloss Bad Pyrmont am 15.09.2023

Das Schloss Bad Pyrmont zeichnet sich durch seine Stoffbezüge an den Wänden aus, die eine besondere Attraktion dieser Kulturstätte darstellen. Diese Bezüge bieten für den Betreiber den Vorteil, gleichzeitig die unattraktive Technik damit verdecken zu können. Oft werden Kabel und andere elektrische Systeme dahinter verlegt, so dass im Falle eines Schwelbrandes die Gefahrenstellen nicht sofort zu erkennen sind. In dieser Situation kann die Rauchentwicklung über einen längeren Zeitraum nahezu unbemerkt verlaufen bis die Stoffbahnen schließlich selbst Feuer fangen.



*Abbildung 5: Links: Dachstuhl des Schlosses mit verstaubten Holzbauteile im Schloss Bad Pyrmont. Rechts: Stoffbezüge als Dekor.*

Zusätzlich befinden sich in der Dachstube des Schlosses alte und teilweise staubige Holzbauteile (Abbildung 5 links). Solche Dachräume können sich speziell im Sommer schnell aufheizen, was eine Brandentstehung begünstigen kann.

## 2.5 Begehung des Großen Heiligen Kreuzes am 09.12.2022

Das große heilige Kreuz wurde im Jahr 1254 als Hospiz gebaut und dient heute sowohl als Wohnraum als auch als Produktions- und Verkaufsraum für zahlreiche Kunsthandwerker:innen [16]. In den Wohneinheiten leben viele Menschen im Rentenalter. Aus diesem Grund wurde in den Fluren zwischen den Wohnbereichen Sisal-Boden verlegt, um ein Ausrutschen zu vermeiden. Bei der Besichtigung wurden zahlreiche leicht entflammbare Dekorationsobjekte entdeckt, die bei Fahrlässigkeit zu einem Brand führen können. In der Abbildung 6 ist eine solche Dekoration dargestellt.



*Abbildung 6: Leichtentzündliche Dekoration*

Da das große heilige Kreuz über keine Kellerräume verfügt, wird eine Vielzahl leicht entzündbarer Materialien in der Dachstube aufbewahrt. Aus der Abbildung 7 ist ersichtlich, dass es sich bei den im Dachraum befindlichen Materialien überwiegend um leicht entflammbare Pappe und Karton handelt.



*Abbildung 7: Dachstube des Großen Heiligen Kreuzes*

Daher wurde auch Papier mit in die Liste der zu untersuchenden Materialien aufgenommen.

## 2.6 Begehung der Staatlichen Kunstsammlung Dresden am 30.01.2023

Die staatliche Kunstsammlung Dresden (**SKD**) beherbergt in zahlreichen Gewölben und Museen eine Vielzahl an wertvollen Exponaten aus aller Welt [17]. Neben dem öffentlich zugänglichen Teil des Museumskomplexes gibt es zahlreiche Workshopräume, in denen Restaurierungen und Reparaturen durchgeführt werden. Eine Besonderheit des Museums ist die Präsentation der Münzsammlung in unterschiedlichen Vitrinen.



Abbildung 8: Vitrine der Münzsammlung in der Staatlichen Kunstsammlung

Um Korrosion an den wertvollen Münzen zu verhindern, werden Vakua in den Vitrinen erzeugt. Die dafür erforderlichen Vakuumpumpen sind in der Regel in einem abgeschotteten Bereich in der Nähe der Vitrinen installiert und erzeugen Wärme.

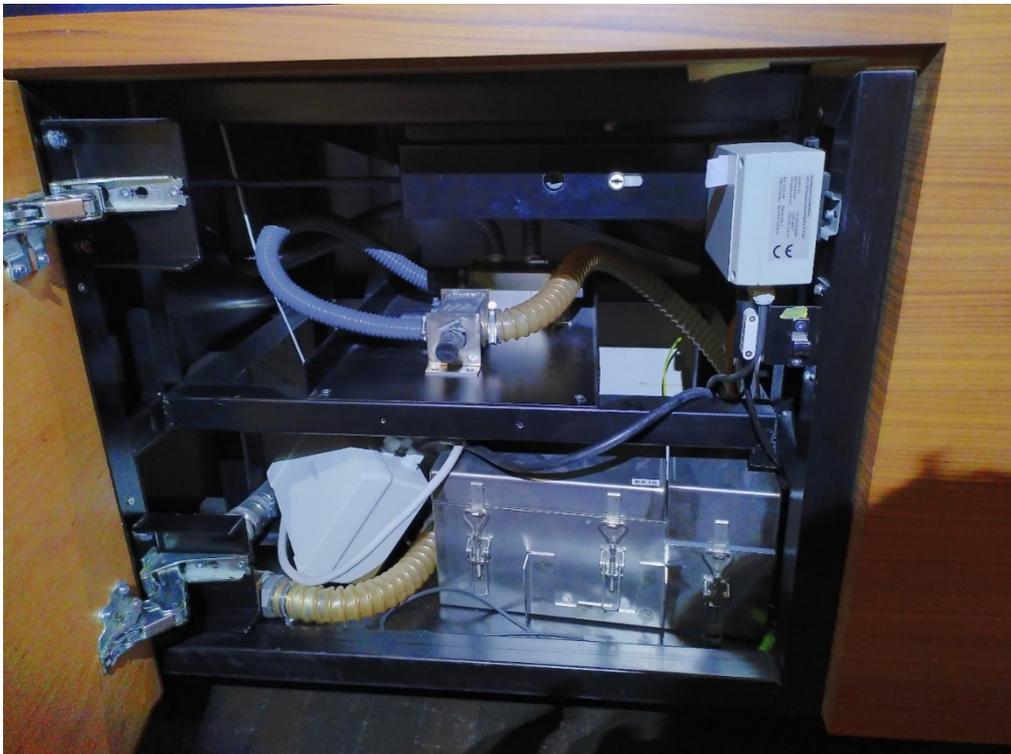


Abbildung 9: Vakuumpumpenbereich in einem abgeschotteten Fach

Die Gefahr der Überhitzung ist somit definitiv gegeben. Die Münzen werden zusätzlich mit hellem Licht, das ebenfalls Wärme erzeugt, bestrahlt.

## 2.7 Begehung des Sächsische Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden, Dresden am 30.01.2023

Die Sächsische Landesbibliothek - Staats- und Universitätsbibliothek Dresden (**SLUB**) ist für zwei Aufgaben zuständig. Als Landesbibliothek unterhält sie ein großes unterirdisches Magazin, in dem alte Schriften aufbewahrt werden.



Abbildung 10: Unterirdisches Magazin

Beim Betreten des Tiefmagazins wurden die typischen Gerüche eines mit Büchern beladenen Raumes stark wahrgenommen. Im Falle eines Brandes besteht die Gefahr der Brandbeschleunigung durch die Bücher. In den oberirdischen Stockwerken stehen Lehrbücher, die Studierenden zugänglich sind.

Wie die Staatliche Kunstsammlung Dresden verfügt auch die Bibliothek über Workshopräume, in denen Restaurierungen durchgeführt werden. Sie besitzt sogar ein eigenes Chemielabor mit unterschiedlichen Chemikalien.

## 2.8 Fazit der bisherigen Begehungen

Die durchgeführten Begehungen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse bestätigen den Bedarf an einem neuartigen, innovativen Brandfrüherkennungssystem. Jede der besichtigten

Institution weist eine oder mehrere Stellen auf, an denen durch ein sensorbasiertes System eine Optimierung der Brandfrüherkennung möglich wäre.

Im Städtischen Museum Halberstadt könnten Lüsterklemmen überhitzen und zu einem Brandereignis führen. Im Kloster Michaelstein und in der Staatlichen Kunstsammlung Dresden könnten elektronische Gerätschaften aufgrund von unzureichender Wärmeabführung in Brand geraten.

Im Schloss Merseburg und im Schloss Pyrmont stellen Materialien aus Holz und Stoffen potenzielle Gefährdungen dar. Bei der Sächsischen Landesbibliothek und dem Großen Heiligen Kreuz ist der Faktor menschliches Fehlverhalten aufgrund des hohen Personenverkehrs von allen Kulturgütern am höchsten ausgeprägt. Insgesamt konnten folgende Materialien identifiziert werden, die bei einem Brandereignis thermisch bereits sehr frühzeitig betroffen wären und sich somit für eine weiterführende Untersuchung eignen:

- Holz
- Lüsterklemme (Kunststoff)
- Staub
- Gemälde
- Fotopapier
- Stoff
- Tierhaare

Diese Ausgangsstoffe werden im anschließenden experimentellen Teil des Vorhabens eingehend untersucht.

## 3. Experimentelle Arbeiten

### 3.1 Spektroskopische Untersuchung der Schwelgase mittels GC-MS

Zunächst müssen die Schwelgase der einzelnen Materialien auf ihre chemische Zusammensetzung hin untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Bestimmung dienen als Auswahlkriterium für die im Projekt einzusetzenden Sensoren. Dazu werden die einzelnen Materialien unter Laborbedingungen erhitzt und die entstandenen Schwelgase chemisch aufgefangen. Anschließend werden die Schwelgase mittels Gaschromatografie und Massenspektrometrie (**GC-MS**) auf ihre chemischen Bestandteile hin überprüft. Für die Realisierung des Vorhabens wurde der nachfolgend dargestellte Prüfaufbau konzipiert und verwendet.

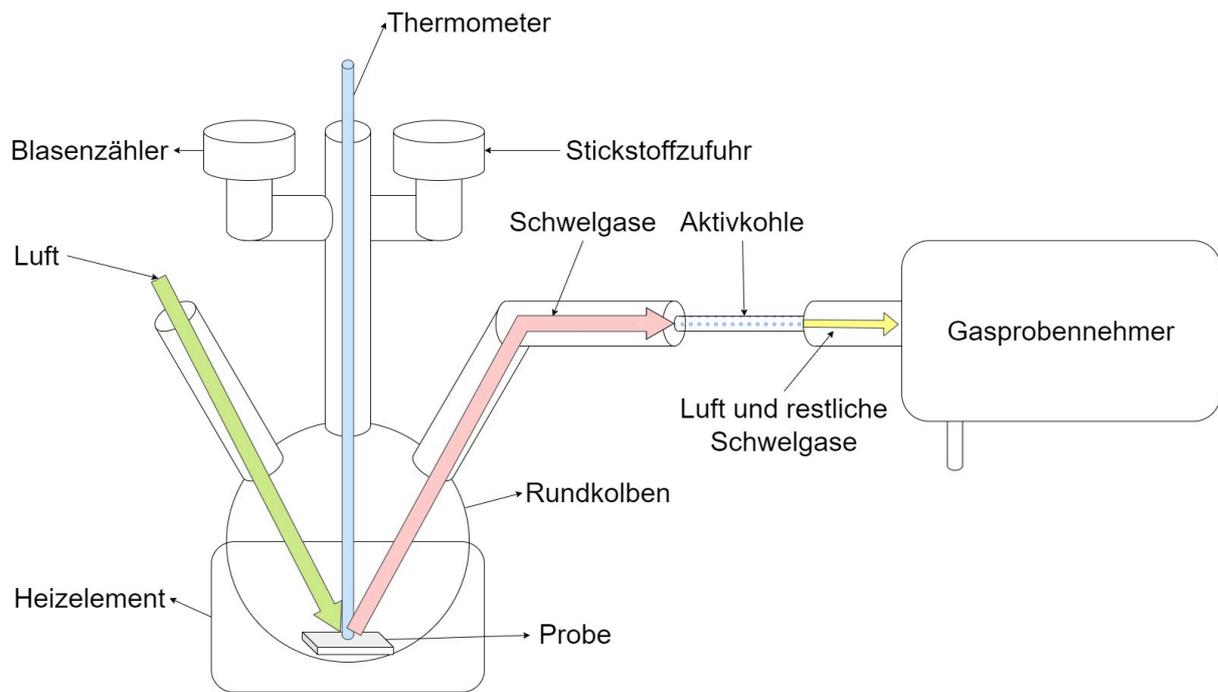


Abbildung 11: Schematischer Versuchsaufbau zur Schwelligasentnahme

Das zu untersuchende Material (Probe) wird in einen Rundkolben platziert, der mit einer Heizvorrichtung erhitzt wird. Auf der Probe befindet sich ein Thermometer, das die Temperaturänderung der Probe überwacht. Ein Blasenzähler verhindert einen möglichen Überdruck des Glaskolbens. Die Stickstoffzufuhr ist erforderlich, um ein potenzielles Feuer schnell löschen zu können. Für den normalen Versuchsbetrieb ist diese allerdings geschlossen und wird nur im Notfall geöffnet. Der Gasprobennehmer erzeugt einen Unterdruck, der die Schwelligase, die während des Erhitzens entstehen, in Richtung des Aktivkohleröhrchens befördert. Ein Teil der Schwelligase wird auf der Oberfläche der Aktivkohle adsorbiert. Schwelligase, die nicht mit der Aktivkohle interagieren können, werden durch den Gasprobennehmer abgeleitet. Die Probe wird auf bis zu 160 °C erhitzt, insgesamt werden zwei Aktivkohleproben in den Temperaturbereichen von 80 - 120 °C und 120 - 160 °C gesammelt. Anschließend werden die Schwelligase aus den Aktivkohleröhrchen extrahiert und mittels GC-MS qualitativ untersucht. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse der GC-MS-Analyse der verschmelzen Materialien

<b>Probe</b>	<b>Schmelgas</b>	<b>Übereinstimmung mit der Literatur [%]</b>
<b>Pressholz</b>	Benzol	86
	Toluol	91
	Alpha-Pinen	94
	Eicosan	98
	Heneicosan	98
	Docosan	99
	Hexanal	86
<b>Spanplatte</b>	Benzol	86
	Toluol	80
	Alpha-Pinen	90
	Docosan	93
	Eicosan	91
<b>Lüsterklemme</b>	Fumaronitril	80
	Benzol	80
	2,4-Dimethylheptan	78
<b>Tierhaare</b>	Benzol	87
	Borsäuretriisopropylester	72
	Toluol	72
<b>Hausstaub</b>	Benzol	80
<b>Büropapier</b>	Benzol	90
	Toluol	80
	Fumaronitril	86
<b>Gemälde</b>	Fumaronitril	80
	Hexanal	86
	Heptanal	90
	2-Pentylfuran	87

Die linke Spalte der Tabelle listet die verschwelten Materialien auf, während in der mittleren Spalte die dabei entstehenden Schwelgase dargestellt sind. Auf der rechten Seite der Tabelle sind die prozentualen Übereinstimmungen des Schwelgasspektrums mit dem Literaturspektrum abgebildet. Bei einer GC-MS-Messung werden die Schwelgase chromatografisch getrennt und anschließend ein Spektrum für jedes entdeckte Molekül erzeugt. Die Spektren werden dann mit Literaturspektren in einer Datenbank verglichen und die Moleküle mit höchster Übereinstimmung werden vorgeschlagen. Je höher die Spektrenübereinstimmung ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass es sich dabei um das Molekül in der Datenbank handelt. Die Gase, die nicht durch Aktivkohle gebunden werden können, sind unter anderem CO, CO<sub>2</sub>, Wasser und Wasserstoff. Der Nachweis dieser Gase erfordert einen komplexeren Versuchsaufbau und -aufwand und ist nicht Gegenstand des Projektziels. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen ist ersichtlich, dass es sich bei den detektierten Stoffen primär organisch-chemische Abbauprodukte handelt. Diese können als Summenparameter z.B. mit Hilfe eines VOC-Sensors detektiert werden.

### 3.2 Konzeption und Konstruktion eines Prototyps

Nachdem die Gase identifiziert wurden, können geeignete Sensoren zur Detektion dieser Gase ausgewählt werden. Wie bereits oben geschildert wird für die Detektion der organischen Moleküle ein VOC-Sensor verwendet. Zusätzlich wurden Sensoren für Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid mit in die Apparatur aufgenommen, um zu prüfen, ob über diese Werte ebenfalls eine Detektion möglich ist. Nach der Auswahl geeigneter Sensoren wurde ein Gasdetektor-Prototyp entwickelt, der die Leistungsfähigkeit der einzelnen Sensoren überprüfen soll.

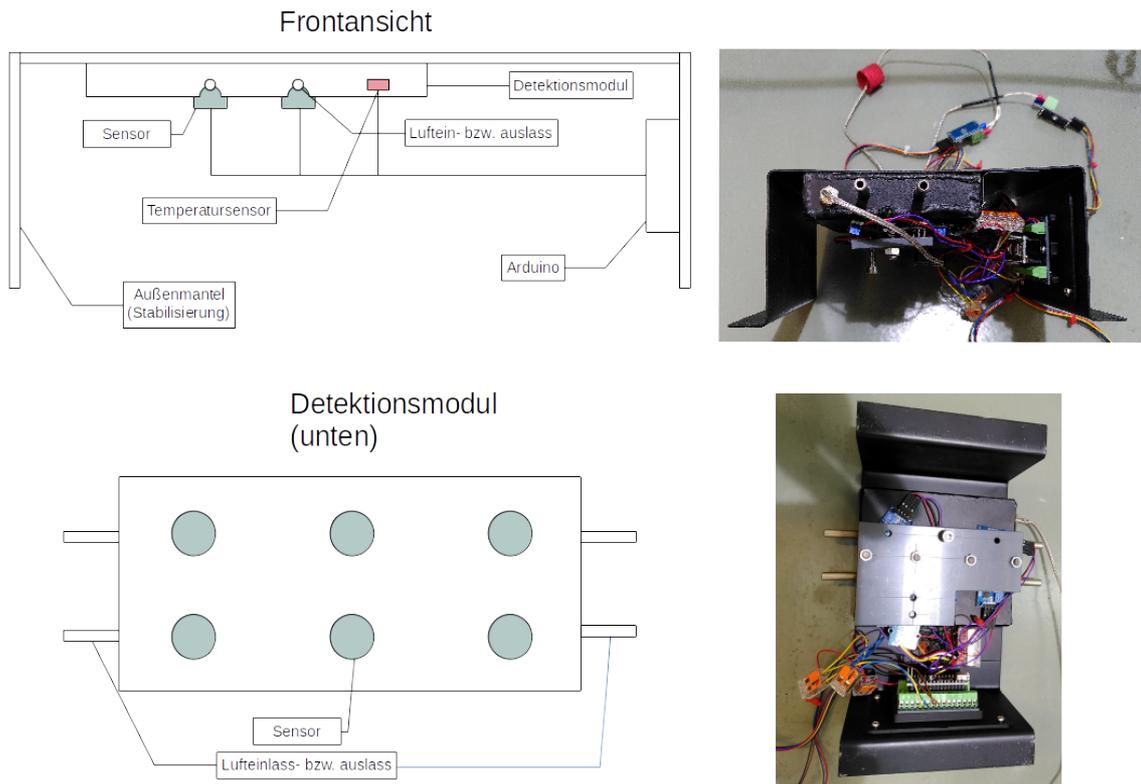


Abbildung 12: Prototyp des Branddetektors für die Laborversuche

Das Detektionsmodul besteht aus zwei Teilen, nämlich der Detektionskammer und dem Außenmantel. Der Außenmantel dient als Befestigungsgrund sowohl für die Kammer als auch für den Mikrocontroller der Marke Arduino. Der Arduino Nano wurde aufgrund seiner geringen Kosten, seiner geringen Größe und seines geringen Stromverbrauchs für diesen Prototyp verwendet. An der Kammer befinden sich sechs Löcher, an denen sechs Sensoren befestigt werden können. Die Durchmesser der Löcher wurden an die Größe der Sensoren angepasst, um Luftdichtigkeit zu gewährleisten. In der Tabelle 2 sind die verwendeten Sensoren aufgelistet.

Tabelle 2: Arten der MOX-Sensor und deren Detektionsbereiche

Sensor	Gas
MQ-2	Wasserstoff, LPG, Alkohol
MQ-5	Erdgas, LPG, Wasserstoff
MQ-7	Kohlenstoffmonoxid
MQ-8	Wasserstoff
MQ-9	Kohlenstoffmonoxid, Brennbare Gase
MQ-135	VOC

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Angabe über Gase, die ein Sensor detektieren kann, eine qualitative Information ist. Je nach Sensorhersteller bestehen Unterschiede zwischen den MQ-Sensoren gleicher Serie, da sie geringfügige Variationen in Design, Materialauswahl und Fertigungsverfahren aufweisen. Somit können die Empfindlichkeiten der Sensoren gegenüber bestimmten Gasen je nach Hersteller ebenfalls variieren.

Zwei Gaseinlässe sind an der Außenseite der Kammer angebracht, um den Kontakt zwischen Schwelgasen und Sensoren zu gewährleisten. Auf der anderen Seite wurden zwei Gasauslässe konstruiert, um Schwelgase wieder abzuführen. Anschließend wird der Prototyp in die Versuchsanordnung integriert.

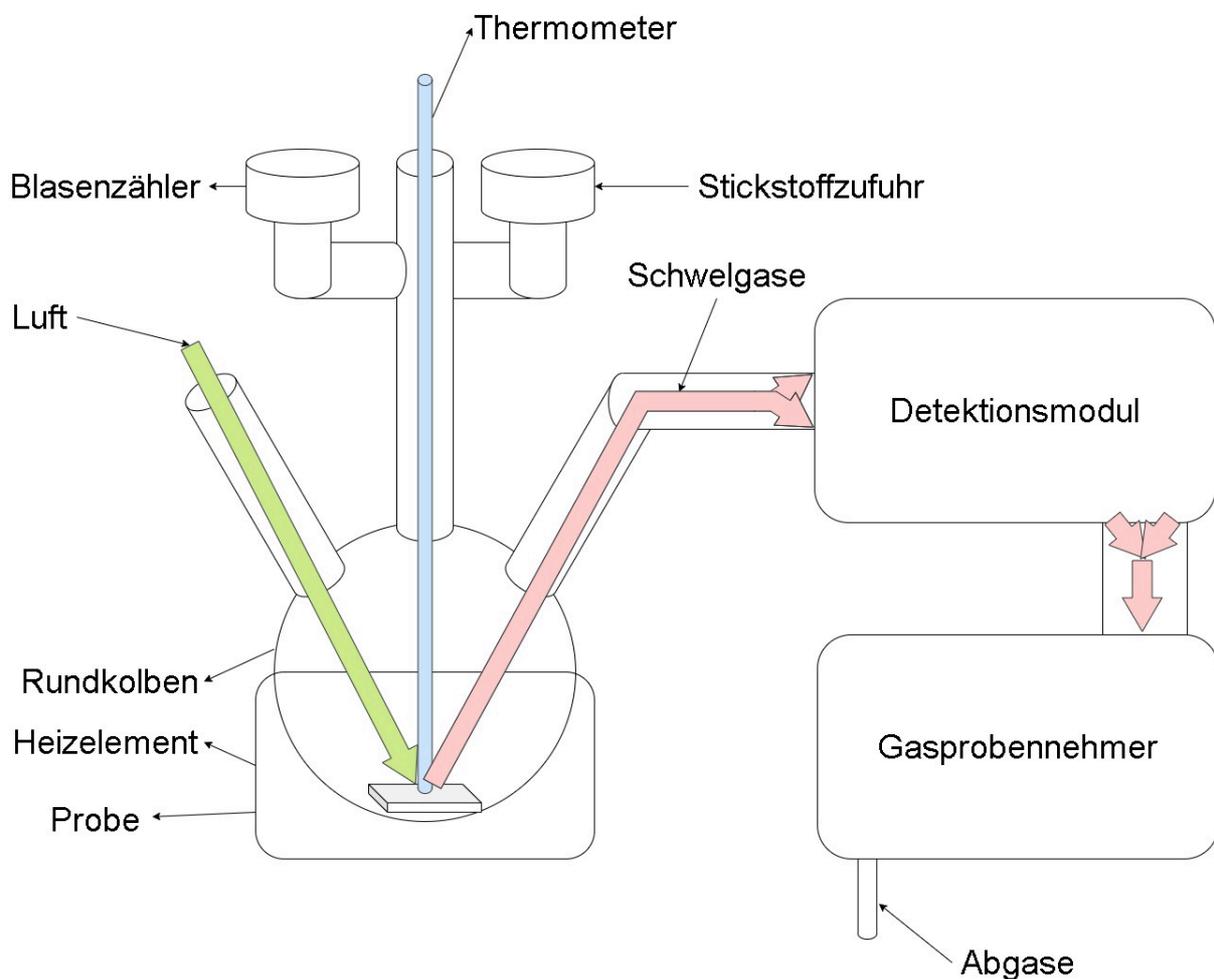


Abbildung 13: Schematischer Versuchsaufbau zur Prüfung des Detektionsmodulprototyps

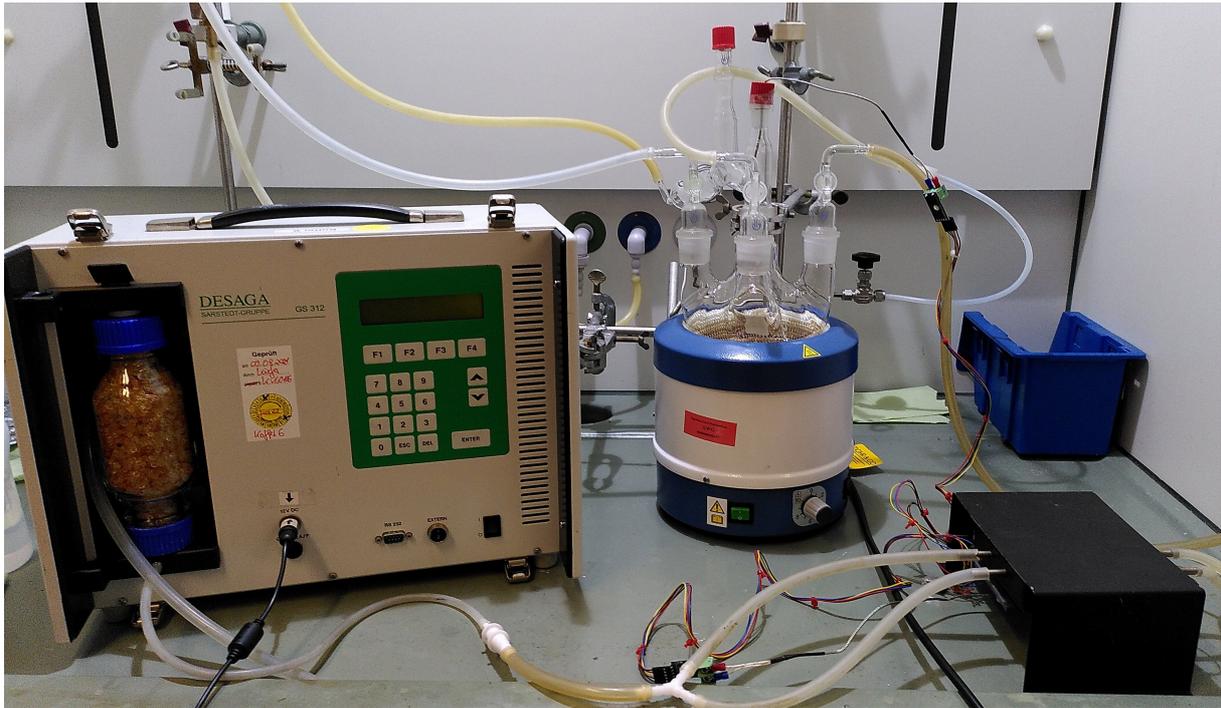


Abbildung 14: Versuchsaufbau im Labor mit dem Detektionsprototyp

Der Versuchsaufbau ist ähnlich wie bei der Gasanalyse aus Kapitel 3.1. Es werden ebenfalls mithilfe einer Heizvorrichtung Schwelgase erzeugt, die dann aufgrund des Unterdrucks am Gasprobennehmer durch das Detektionsmodul geführt werden. Der Unterschied besteht darin, dass die Gase nicht durch die Aktivkohle geleitet werden, sondern an den Prototypen zur Analyse. Ein Computer sammelt und speichert den Signalverlauf der Sensoren und die Temperaturänderung im Kolben.

### 3.3 Ergebnisse der Laborversuche

In diesem Abschnitt werden die aufgezeichneten Sensordaten visualisiert. Auf der Abszisse ist die Zeit in Sekunden dargestellt und sie repräsentiert die Dauer desentsprechenden Versuchs. Die Ordinate hingegen gibt die Konzentration der detektierten Gase in ppm bzw. die Änderung des gemessenen Sensorsignals in mV und die Temperatur in °C an. Die Einheit ppm steht für **parts per million** (Teile pro Million) und mV für Millivolt. Parts per million gibt an, wie viele Teile eines Gases in einer Million Teile Luft enthalten sind [18] und mV gibt die Änderung der Sensorspannung an. Besonders relevant bei der Betrachtung der gemessenen Signale ist der Zeitpunkt und die Temperatur bei der eine Änderung der gemessenen Signale auftritt. Zunächst wurden die Untersuchungen mit Holz als Ausgangsstoff durchgeführt.

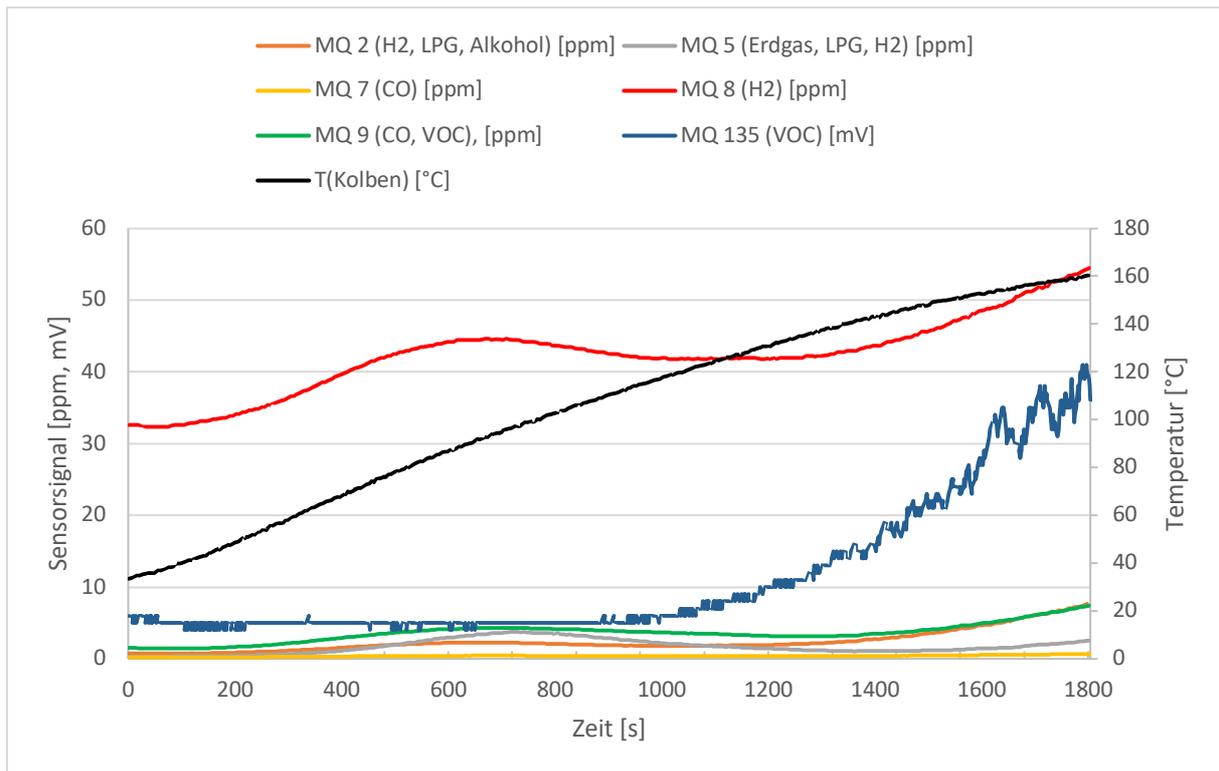


Abbildung 15: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Holz als Ausgangsmaterial

Die Abbildung 15 zeigt, dass alle Sensoren auf die durch das Experiment mit Holz verursachte Veränderung der Umgebung reagieren. Bei MQ-5, MQ-8 und MQ-9 wurde ca. 1296 Sekunden nach Versuchsbeginn ein kontinuierlicher Anstieg der Kurven festgestellt. Zu diesem Zeitpunkt lag im Kolbeninneren eine Temperatur von etwa 130 °C vor. Bereits bei ca. 918 Sekunden beginnt die Kurve des Sensors MQ-135, hier als AirQ-Sensor dargestellt anzusteigen. Zur Betrachtung elektrischer Bauteile wurden die Untersuchungen mit handelsüblichen Lüsterklemmen als Beispielbauteil durchgeführt.

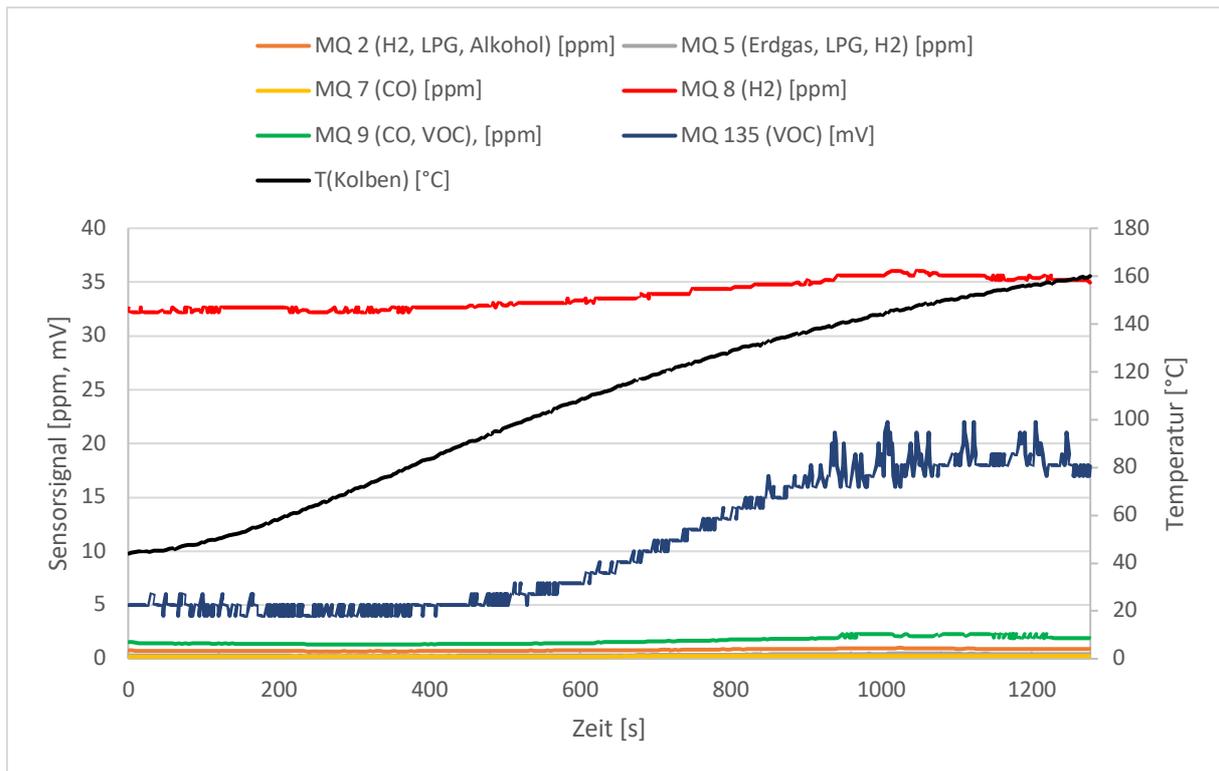


Abbildung 16 Ergebnis des Prototyps im Labor mit Lüsterklemme als Ausgangsmaterial

Bei gleichen Versuchsbedingungen sind die Kurvenverläufe mit Lüsterklemme als Versuchsmaterial unterschiedlich. In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass nur der MQ-135 einen leichten Kurvenanstieg aufweist. Dies bedeutet, dass nur die MQ-135 eine Veränderung der Umgebung registrieren konnte. Die Experimente wurden auch mit Tierhaaren durchgeführt.

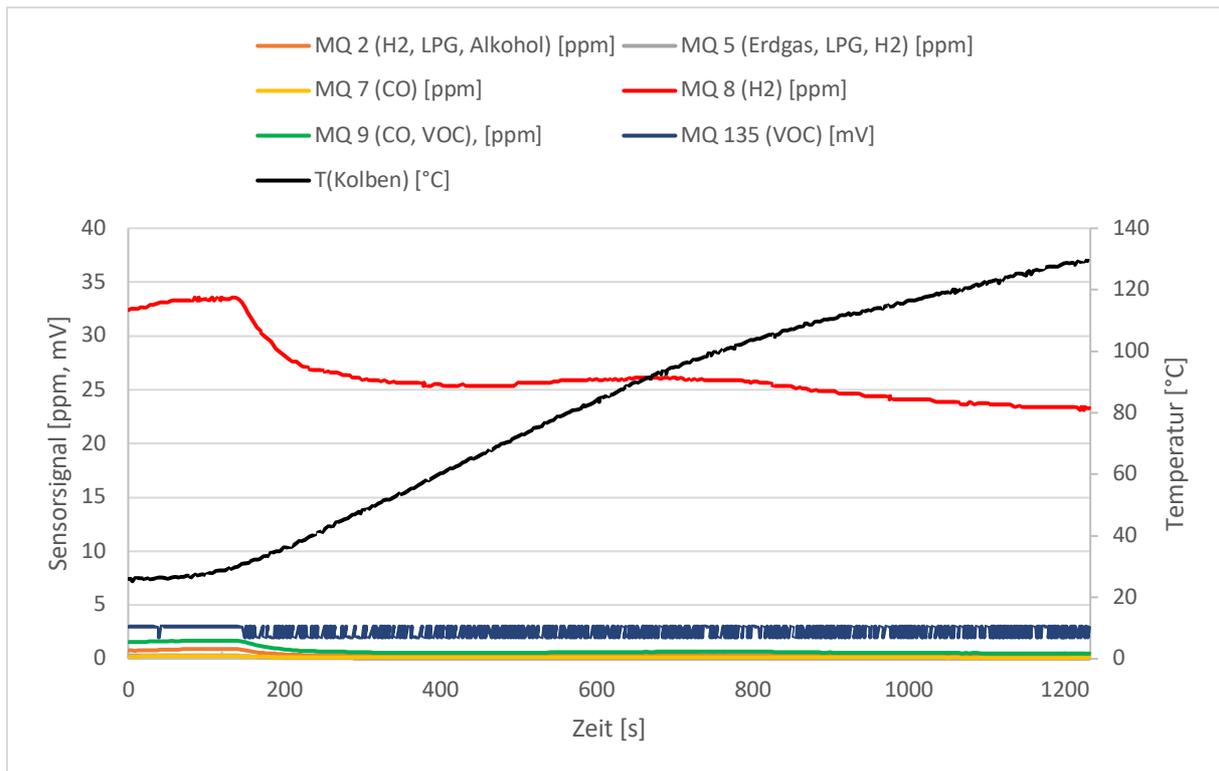


Abbildung 17: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Tierhaare als Ausgangsmaterial

Auffallend in Abbildung 17 ist, dass es keine sichtbare Veränderung der Kurve gibt. Dies lässt vermuten, dass bei der Verschwelung der Tierhaare keine Gase freigesetzt werden, die mit den MQ-Sensoren detektiert werden können.

Analog zur Liste aus Kapitel 2.8 wurden die Experimente auch mit Papier durchgeführt.

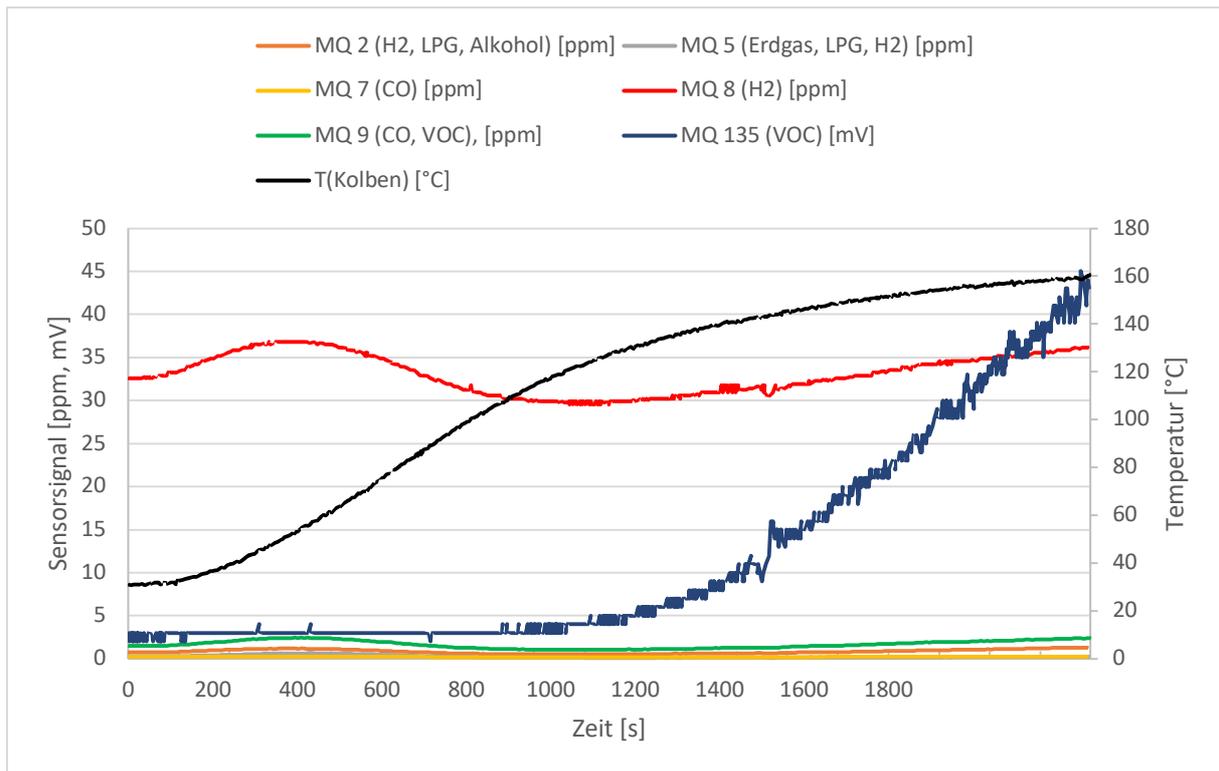


Abbildung 18: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Büropapier als Ausgangsmaterial

Aufgrund der ähnlichen Struktur von Papier und Holz konnte für MQ-135 zumindest ein ähnlicher Kurvenverlauf wie beim Holz festgestellt werden. Die Steigung beginnt hier bei 700 Sekunden (ca. 130 °C) und sie nimmt dann kontinuierlich zu. Damit ist die Einsatzfähigkeit des Sensors MQ-135 nachgewiesen.

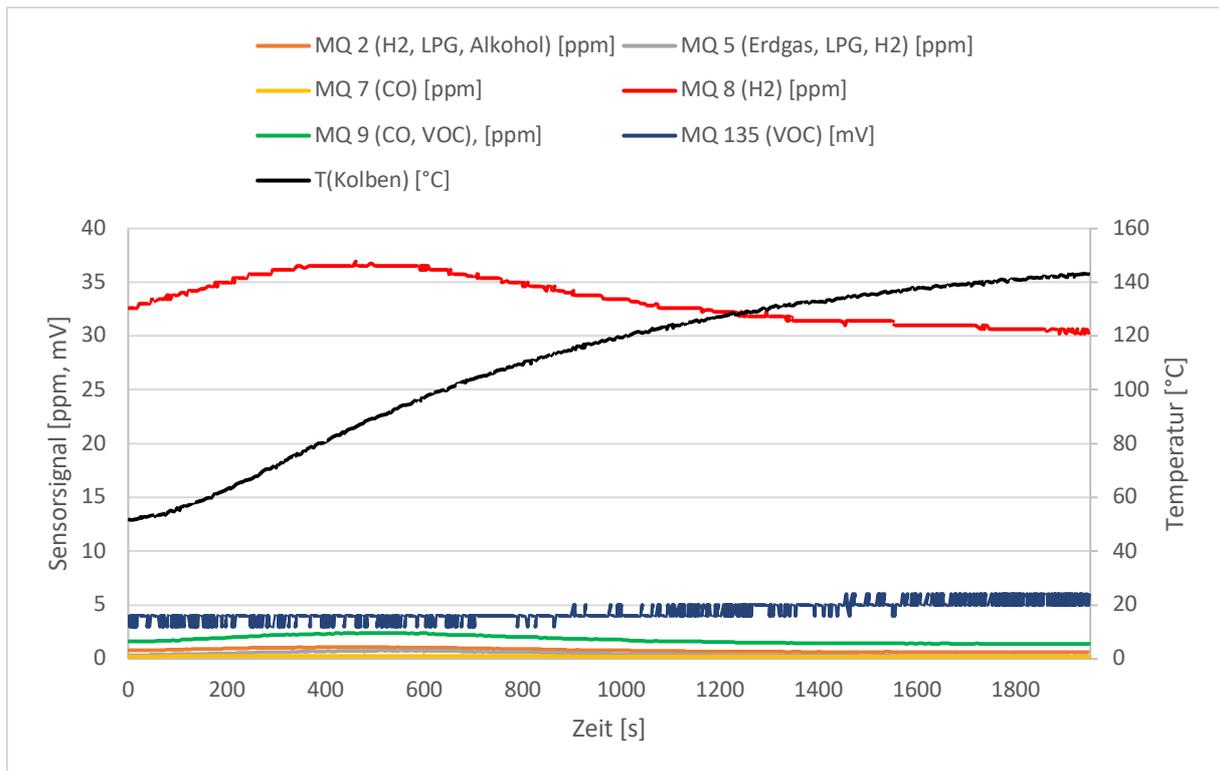


Abbildung 19: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Hausstaub als Ausgangsmaterial

Bei der Untersuchung von Hausstaub konnte keine sichtbare Veränderung der Messsignale festgestellt werden. Lediglich eine marginale Erhöhung ist in der Kurve des Sensors MQ-135 zu erkennen.

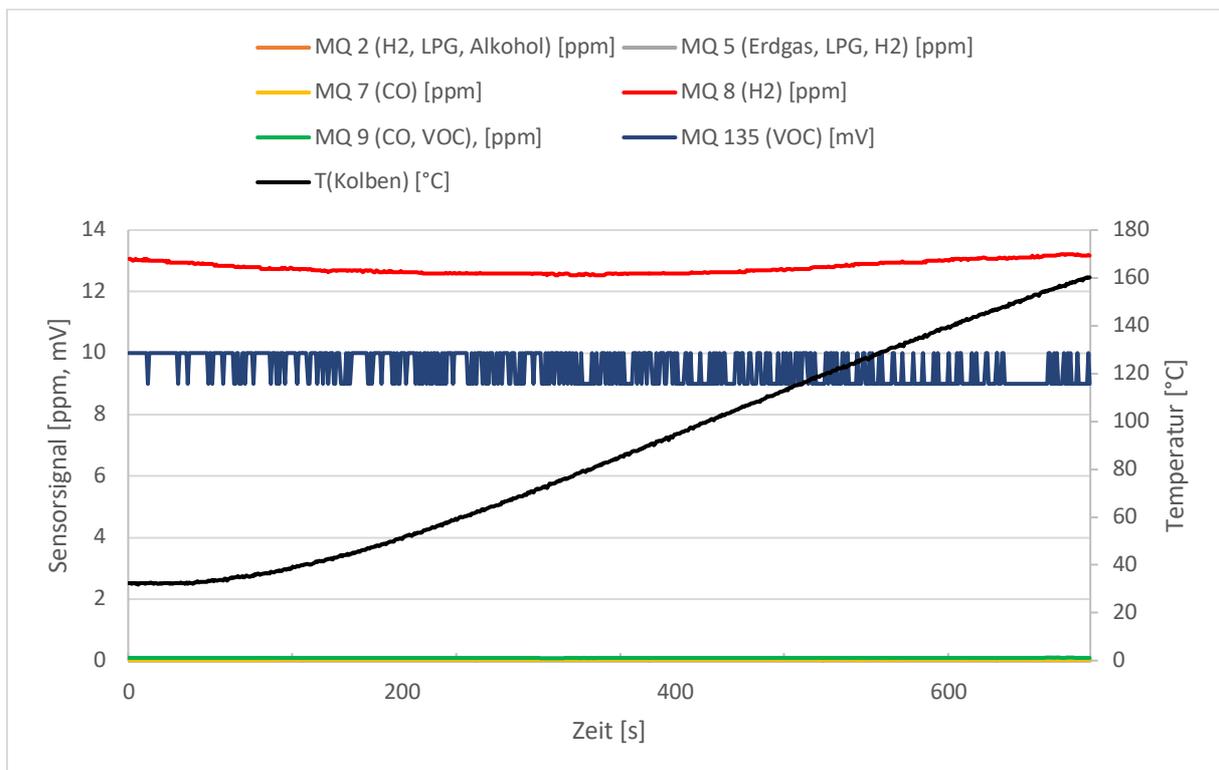


Abbildung 20: Ergebnis des Prototyps im Labor mit Gemälde als Ausgangsmaterial

Bei der Untersuchung eines Gemäldes wurden, ähnlich wie bei Abbildung 20, keine Gase registriert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Sensoren unter Laborbedingungen für bestimmte Materialien in der Lage sind, die entstehenden Schwelgase zu detektieren. Bei den Materialien Holz, Papier und Lüsterklemme ist zu erkennen, dass die Signale einiger Sensoren ab einer bestimmten Temperatur ansteigen. Der Anstieg des Luftqualitätssensors (MQ-135 oder AirQ) ist besonders stark, weshalb dieser Sensor eine besondere Rolle bei der Detektion spielen wird.

### 3.4 Entwurf und Konstruktion eines Branddetektors für die realitätsnahe Detektion

Nachdem sich gezeigt hat, dass die Sensoren unter Laborbedingungen Schwelgase zuverlässig detektieren können, soll im nächsten Schritt ein Detektionsmodul entwickelt werden, das Schwelgase unter realitätsnahen Bedingungen detektieren kann. Das Detektionsmodul muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Guter Luftstrom zu den Sensoren, damit die Gase zuverlässig analysiert werden können.
- Niedriger Energieverbrauch, so dass ein mobiler Betrieb mittels Batterie möglich ist.
- Möglichst unauffällig, um in Kultureinrichtungen den Maßgaben des Denkmalschutzes gerecht werden zu können.
- Möglichkeit zur lokalen Datensammlung.

Der erste Entwurf und die erste Konstruktion des Detektionsmoduls sind in der folgenden Abbildung 18 dargestellt.

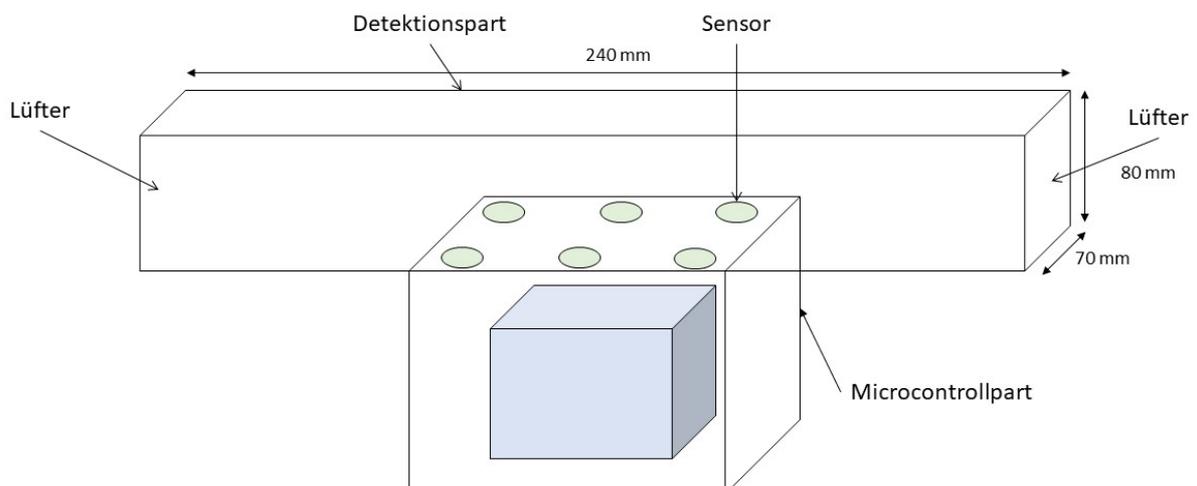
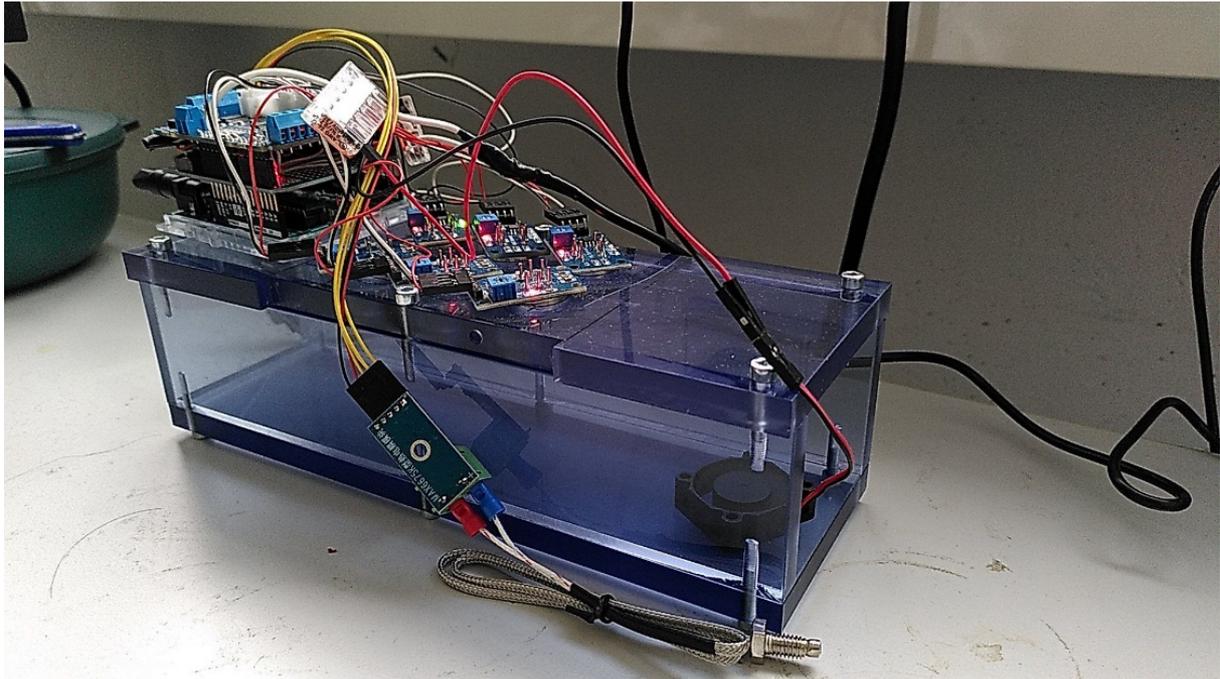


Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Prototyps für realitätsnahe Versuche

Das Detektionsmodul besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, dem Detektionsteil, der für eine kontinuierliche Belüftung der Sensoren mit frischer Raumluft sorgt, und dem Mikrocontrollerteil, der den Mikrocontroller und die Sensoren enthält. Zum Erreichen eines kontinuierlichen Luftstroms wurden an beiden Enden des Detektionsparts Ventilatoren angebracht. Unter der Detektionseinheit befindet sich die Mikrocontrollereinheit. Die Sensoren werden in die dafür vorgesehenen Löcher eingebaut. Nachfolgende Abbildung 19 zeigt den realisierten Prototypen eines Detektionsmoduls.



*Abbildung 22: Prototyp eines Detektionsmoduls für realitätsnahe Untersuchungen*

Sensoren

Arduino-Einheit

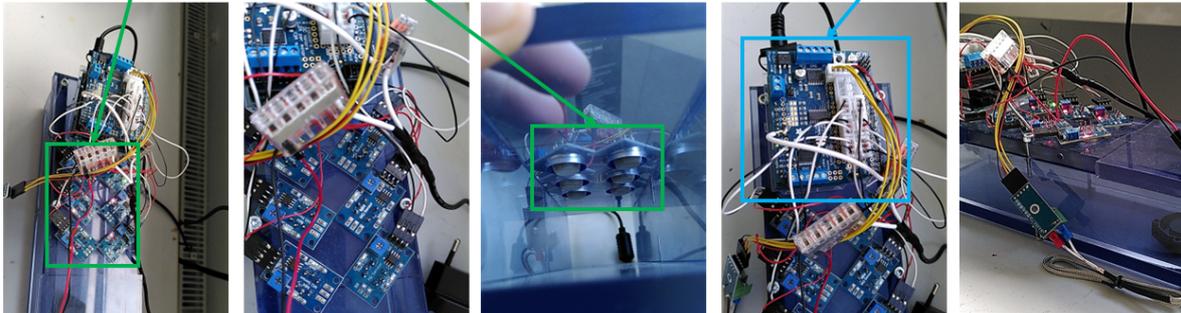


Abbildung 23: Eingebaute Teile im Prototyp

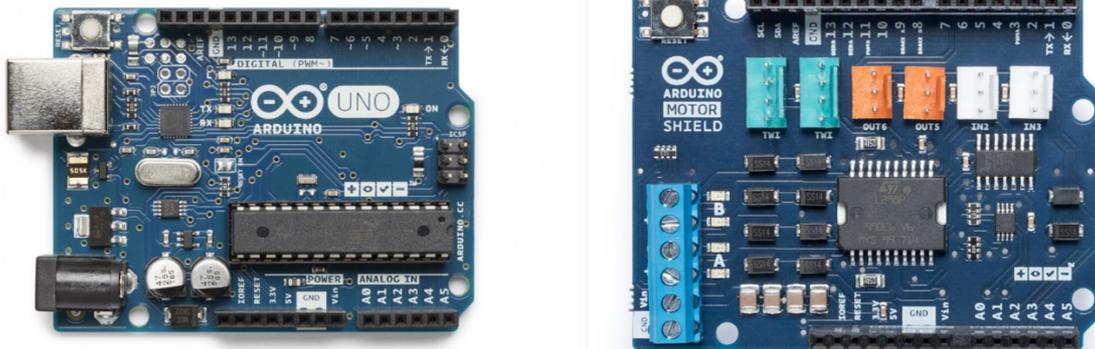


Abbildung 24: Arduino Uno und der Motorshield im Prototyp

Beim Betrieb dieser Einheit konnten einige Verbesserungsmöglichkeiten ausgemacht werden. Durch die Länge von 24 cm ist der Detektor sehr groß. Außerdem erhöht sich durch die beiden Lüfter der Stromverbrauch, so dass das Arduino Nano nicht mehr in der Lage ist, den benötigten Strom zu liefern. Aus diesem Grund wurde für diese Konstruktion der größeren und leistungsfähigeren Arduino Uno in Kombination mit einem Motorshield verwendet, um den Strombedarf zu decken. Das Motorshield dient zur Erhöhung der Leistungsaufnahme und -abgabe eines Mikrocontrollers und ist nur für den größeren Arduino Uno erhältlich. Ein Batteriebetrieb ist dadurch nicht mehr möglich, da die Konstruktion nun mit 12V anstatt mit 5V betrieben wird. Eine Verbesserung der Konstruktion war deshalb erforderlich.

Die verbesserte Version ist in den folgenden Abbildung [25](#) und [26](#) zu sehen.

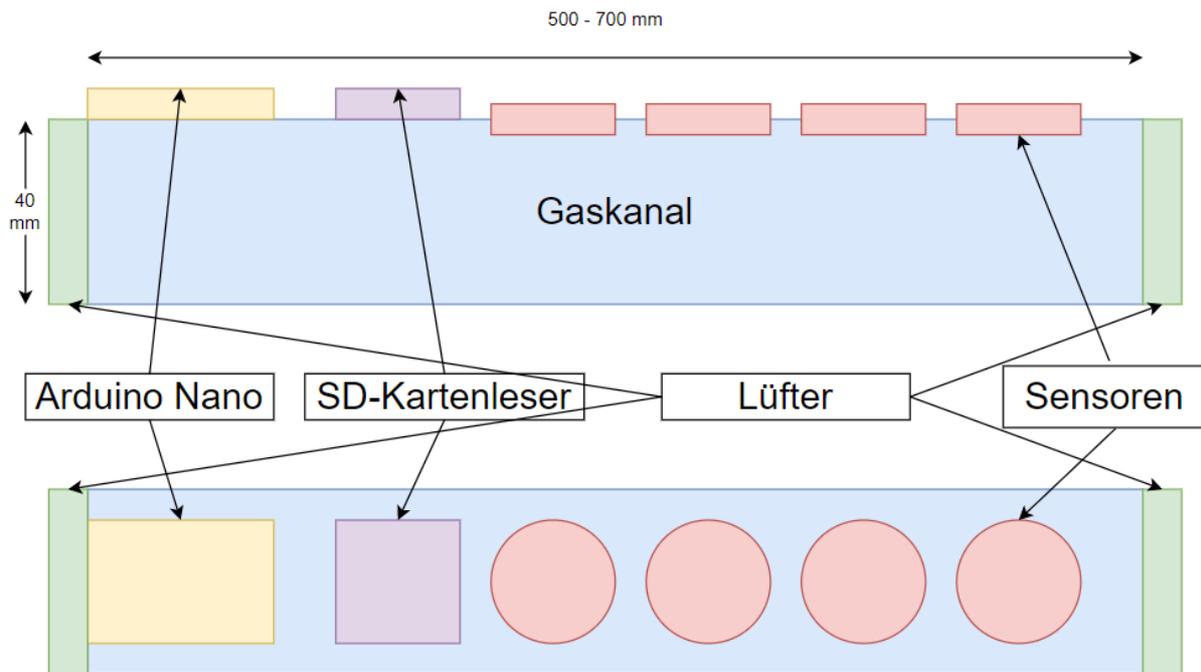


Abbildung 25: Schematische Darstellung der optimierten Version des Detektionsmoduls

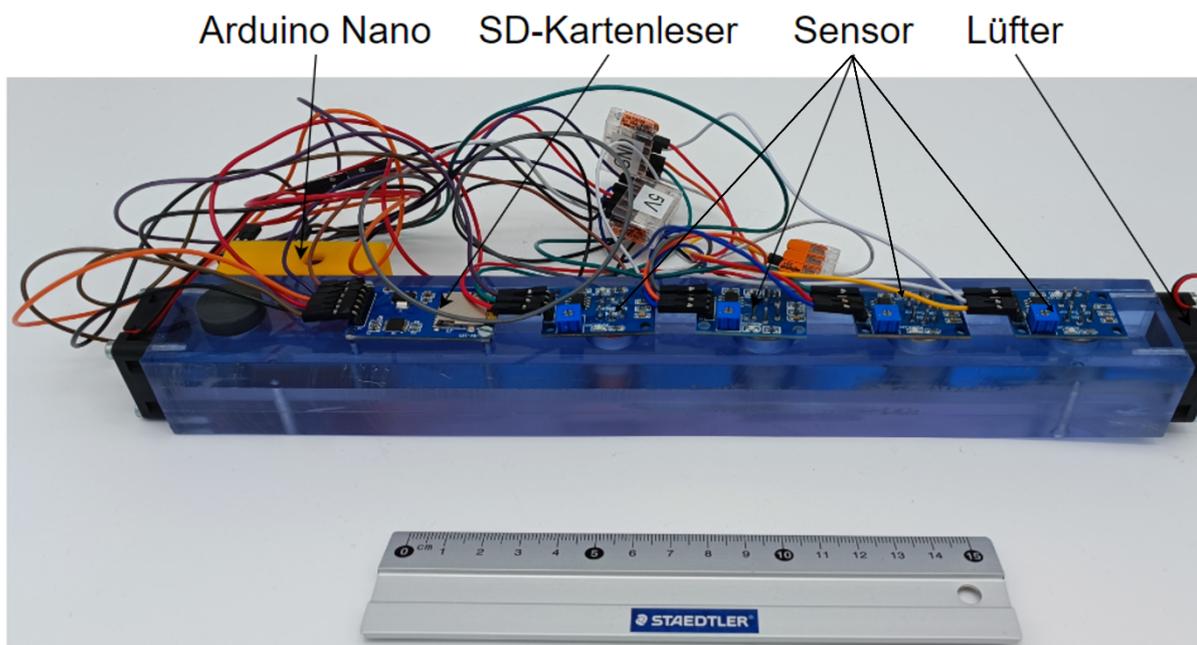


Abbildung 26: Weiter optimiertes Detektionsmodul für realitätsnahe Anwendungsversuche

Es wurde im Wesentlichen ein Herunterskalieren vorgenommen, bei dem die Anzahl der Sensoren von sechs auf vier reduziert wurde, um auf der einen Seite Platz zu sparen und auf der anderen Seite den Strombedarf zu minimieren. Die einzelnen Komponenten befinden sich nun direkt auf der Detektionskammer, wodurch die Geometrie des Moduls optimiert werden konnte. Eine Umstellung auf den Arduino-Uno in Kombination mit einem Motorshield ist daher nicht erforderlich. Folgende Sensoren sind nun in das Detektionsmodul integriert:

- MQ-2 (Wasserstoff, LPG, Alkohol)
- MQ-5 (Erdgas, LPG, Wasserstoff)
- MQ-7 (Kohlenstoffmonoxid)
- MQ-135 (VOC)

Direkt hinter der Sensoranordnung befindet sich der SD-Kartenleser für eine mögliche Datenerfassung. Hinter dem SD-Kartenleser befindet sich ein konstruiertes Gehäuse zur Befestigung des Arduino Nano. Wie bei der Vorgängerversion sind auch hier zwei Lüfter verbaut.

### 3.5 Entwurf und Konstruktion einer realitätsnahen Versuchsumgebung

Nach dem Bau der Detektionseinheit muss diese daraufhin überprüft werden, ob sie in der Lage ist, Schwelgase auch in einer realitätsnahen Umgebung zu detektieren. Zu diesem Zweck war die Einrichtung einer Testumgebung unter Einhaltung folgender Kriterien erforderlich:

- Die Prüfumgebung muss gegen Brandausbruch geschützt sein.
- Die Versuchsumgebung stellt gleichbleibende Hintergrundparameter zur Verfügung.
- Die Versuchsumgebung muss einen Entstehungsbrand so realistisch wie möglich simulieren.

Das Konzept zur Realisierung des Vorhabens ist in der folgenden Abbildung 27 dargestellt.

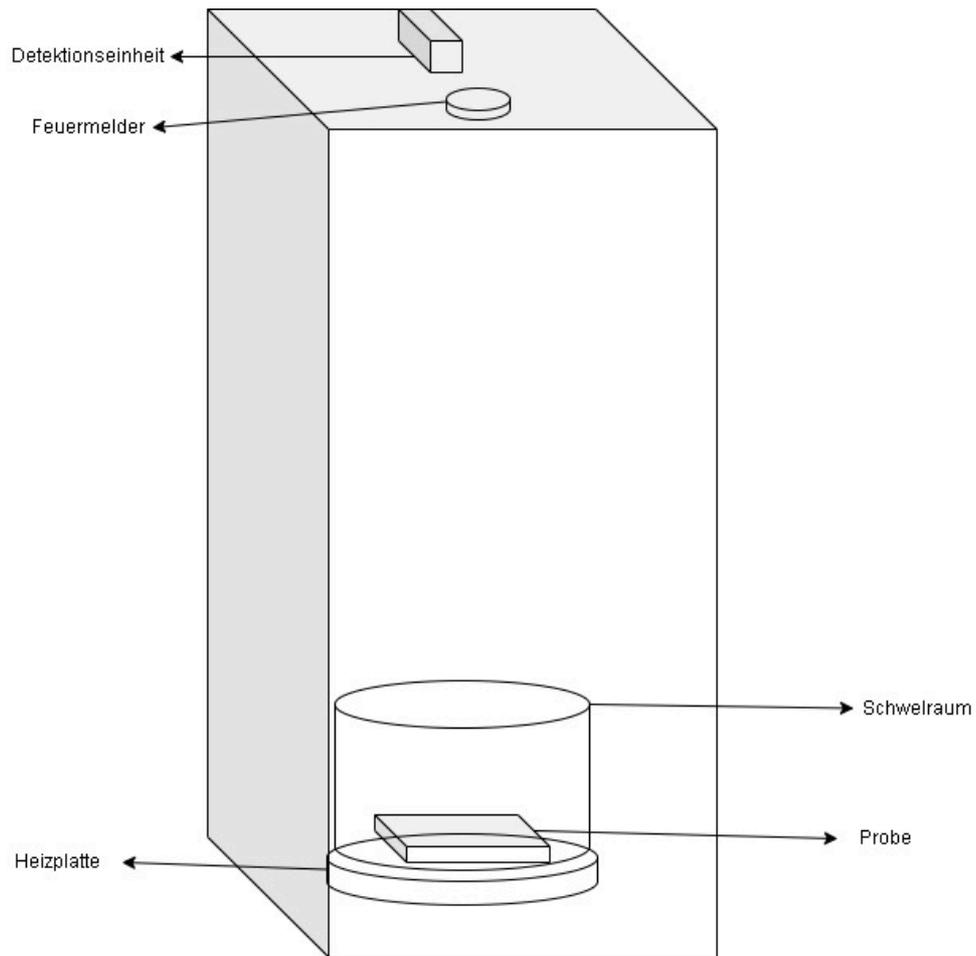


Abbildung 27: Schematische Darstellung einer realitätsnahen Versuchsumgebung

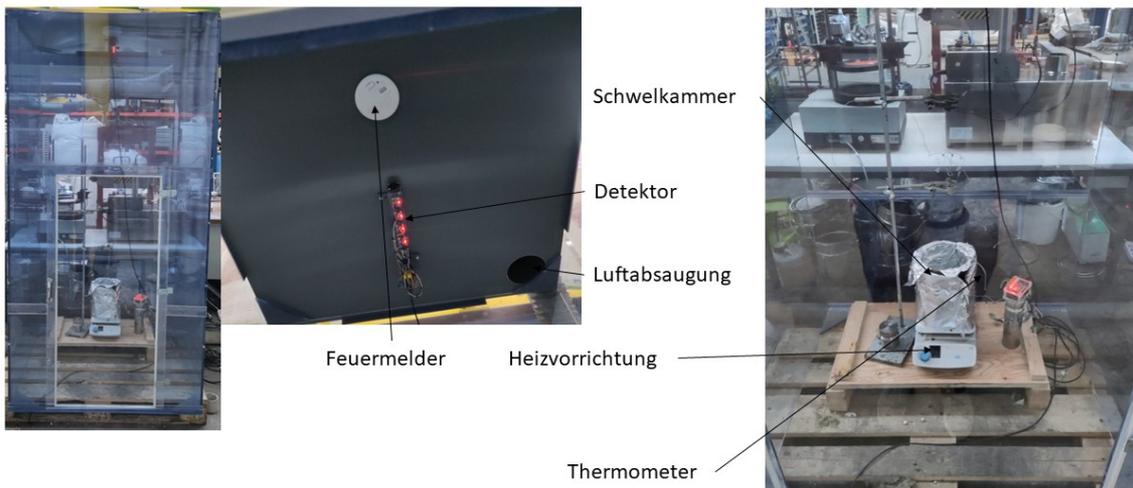


Abbildung 28: In der Kammer verbaute Einheiten

Zur Realisierung der Testumgebung wurde eine kleine Testzelle (1m x 1m x 2m) aus Kunststoffplatten konstruiert. Die Prüfwelle ist nach unten hin geöffnet und befindet sich auf einer Europalette, um eine gute Belüftung von unten gewährleisten zu können. Im oberen Teil der Zelle ist eine Decke angebracht, an der die Detektionseinheit befestigt ist. Neben der Detektionseinheit befindet sich zum Vergleich auch ein handelsüblicher Rauchmelder. In einer Ecke der Decke wurde ein Zugang für die Luftabsaugung angebracht. Die Heizplatte, auf der sich die Schwelkammer befindet, steht in der Mitte des Bodens. In der Schwelkammer wird die zu untersuchende Probe erhitzt. Das Schwelgefäß besteht aus Metall und setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, dem Schwelkörper und dem Schwelgefäßdeckel.



*Abbildung 29: Schwelkammer für die Versuche in der Demonstrationszelle*

## 3.6 Versuche in der Testumgebung

### 3.6.1 Charakterisierung der Versuchsparameter

Der erste Schritt ist die Durchführung einer Hintergrundmessung zur Erkennung von Anomalien in der Prüfumgebung und, falls erforderlich, deren Beseitigung. Zu diesem Zweck wurde die Detektionseinheit für einen Tag in Betrieb genommen, ohne dass eine Verschwelung stattfindet. Das Ergebnis wird in der folgenden Abbildung 30 dargestellt:

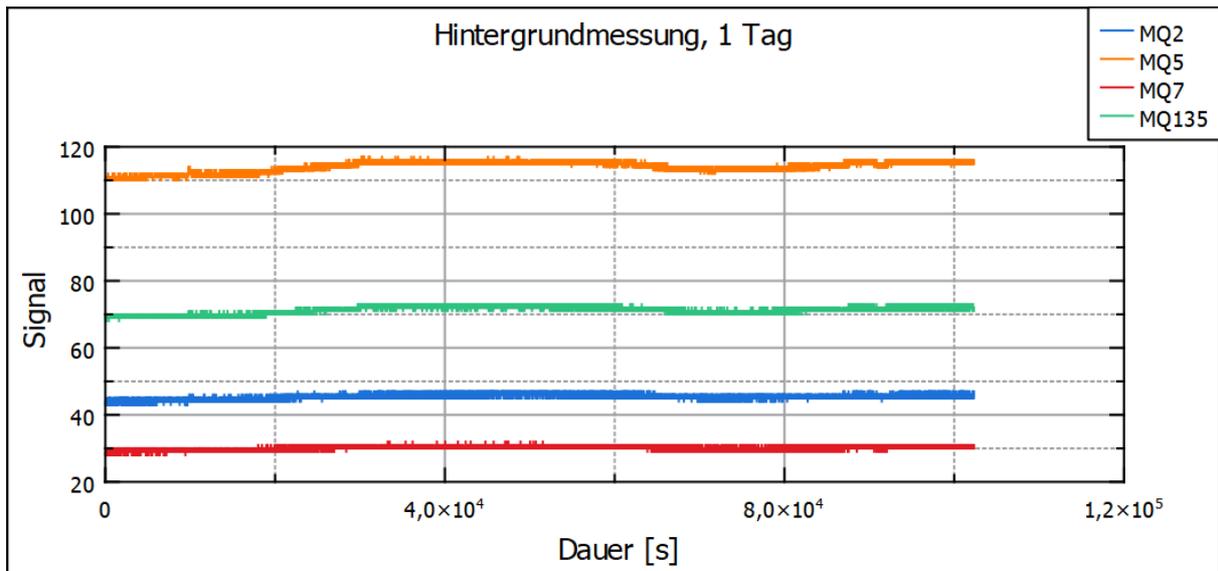


Abbildung 30: Hintergrundmessung in der Demonstrationszelle

Anhand des Ergebnisses ist zu erkennen, dass es bei den Sensoren nicht zu einem starken Anstieg des Signals kommt. Allerdings sind leichte Anstiege über einen längeren Zeitraum zu erkennen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht die Luftatmosphäre so weit beeinflussen, dass die Signale minimal verändert werden. Um eine exaktere Temperaturführung während der Versuche gewährleisten zu können, wurden im nächsten Schritt thermische Untersuchungen mit dem Versuchsgefäß durchgeführt. Dabei wurde speziell die Temperatur beim Erhitzen in unterschiedlichen Höhen über der Heizplatte gemessen.

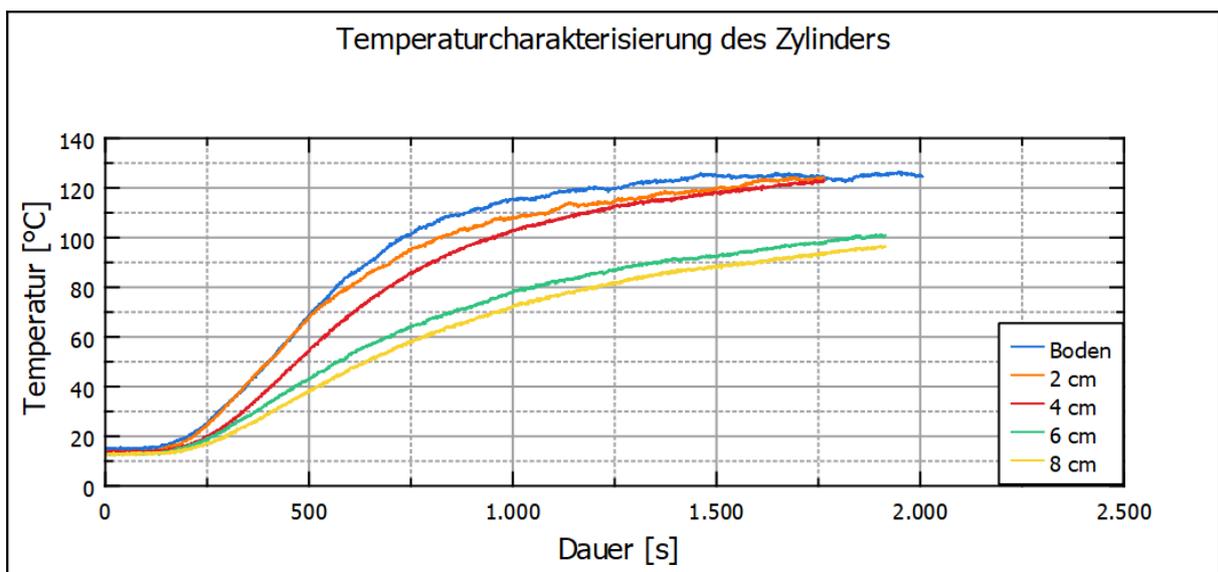


Abbildung 31: Temperaturverluste entlang der Schwelkammer

Zunächst wird der Temperaturanstieg am Boden der Kammer bei nahezu konstanter Heizrate gemessen und die Kurve aufgetragen. Danach wird der Temperaturanstieg 2 cm über dem

Boden gemessen und die Kurve aufgetragen. Das Experiment wird in einem Abstand von 2 cm bis 8 cm über dem Boden fortgesetzt. Aus den Kurven ist ersichtlich, dass der Temperaturabfall entlang der Schwelkammer bis 4 cm nicht sehr ausgeprägt ist. Das hat zur Folge, dass die Proben nicht größer als 4 cm sein dürfen, damit die Verteilung der Wärme über die Proben gleichmäßig ist.

### 3.6.2 Versuchspräparation und -durchführung

Die Proben werden für die Verschwelung zerkleinert, in ein Aluminiumschiffchen gefüllt und auf den Boden der Kammer gelegt. Beim Einschalten der Heizplatte wird die Probe je Schwelversuch auf maximal 160°C oder bis zum Alarm des Rauchmelders erhitzt. Es wird darauf geachtet, dass die Aufheizrate über die Zeit konstant bleibt. Eine manuelle Nachjustierung erfolgt bei Bedarf. Mit dem Einschalten der Heizplatte beginnt gleichzeitig die Messung.

### 3.7 Ergebnisse der Versuche in der Testumgebung

Auf der Abszisse ist weiterhin die Zeit in Sekunden dargestellt und sie repräsentiert die Dauer des Schwelvorgangs. Die Ordinate gibt die Messwerte der Sensoren dimensionslos und die Temperatur in °C an.

#### 3.7.1 Ergebnis der Schwelversuche mit Gemälde als Probe

Auf der Abbildung 33 ist ein Gemälde vor einem Versuch zu sehen. Für den Anstrich wurden nur die Farben Blau und Gelb verwendet. So sind auf der Leinwand nur die Farben Blau, Gelb und die Mischfarbe Grün zu sehen. Die Farbveränderung des Ölgemäldes unter Wärmeeinwirkung ist in Abbildung 34 dargestellt. Dies ist ein Hinweis auf chemische Prozesse und das Entweichen von Schwelgasen.

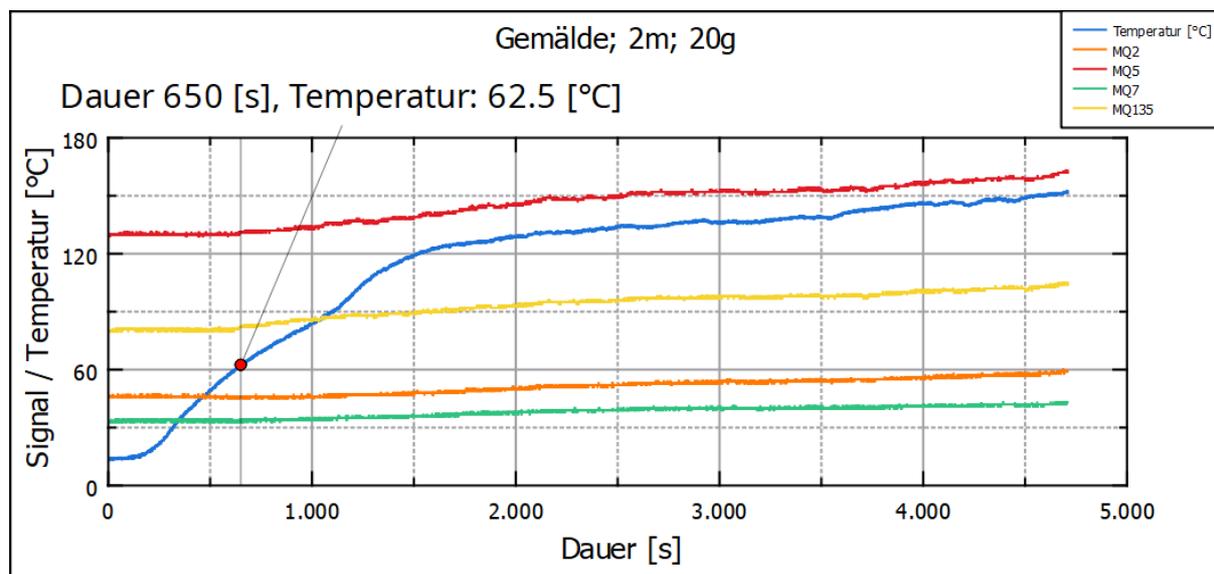


Abbildung 32: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Gemälde als Ausgangsmaterial



Abbildung 33: Gemälde vor der Verschmelzung

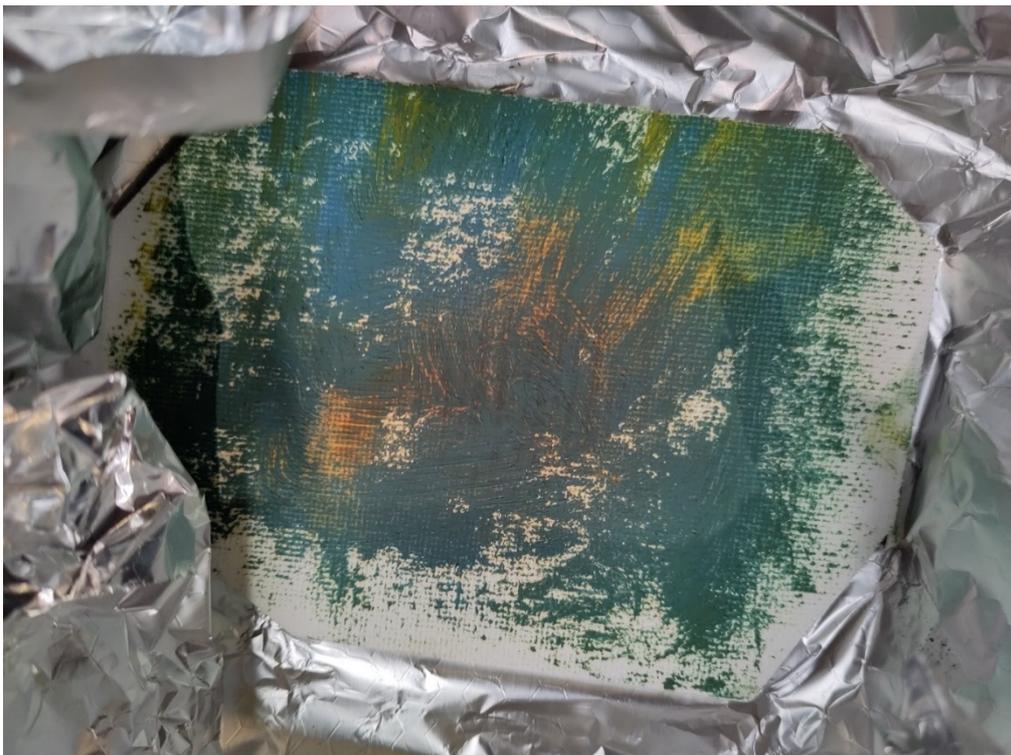


Abbildung 34: Gemälde nach der Verschmelzung

Die Kurven zeigen, dass eine Veränderung der Gaszusammensetzung ab einer Temperatur von  $62,5^{\circ}\text{C}$  stattgefunden hat und dies auch von den Sensoren registriert werden konnte. Die Temperatur wurde anschließend über einen Zeitraum von ca. 60 min auf etwa  $150^{\circ}\text{C}$  erhöht. Innerhalb dieses Zeitraums haben die austretenden Gase nicht zu einer Aktivierung des Rauchmelders geführt. Unter diesen weitestgehend idealen Bedingungen wäre somit mit der

gegeben Heizrate ein erheblicher Zeitgewinn gegenüber herkömmlichen Brandmeldesystemen realisierbar.

### 3.7.2 Ergebnis der Schwelversuche mit Holz als Probe

Zur Untersuchung der Holzprobe wurde das Holz in kleine Würfel geschnitten und anschließend verschwelt. Das Foto nach dem Versuch zeigt, dass viele Oberflächen (in roten Kästchen dargestellt) der Holzwürfel verfärbt sind (s. Abbildung 36). Dabei wurden zwei Anstiege des Sensorsignals in der Kurve beobachtet. Der erste Anstieg liegt bei 68,25°C, während der zweite, stärkere Anstieg bei 129°C zu sehen ist. Auch hier wurde innerhalb des Aufheizzeitraums kein Alarm durch den Rauchmelder ausgelöst. Insofern ist auch hier ein Zeitgewinn durch den Einsatz der chemischen Sensortechnik möglich.

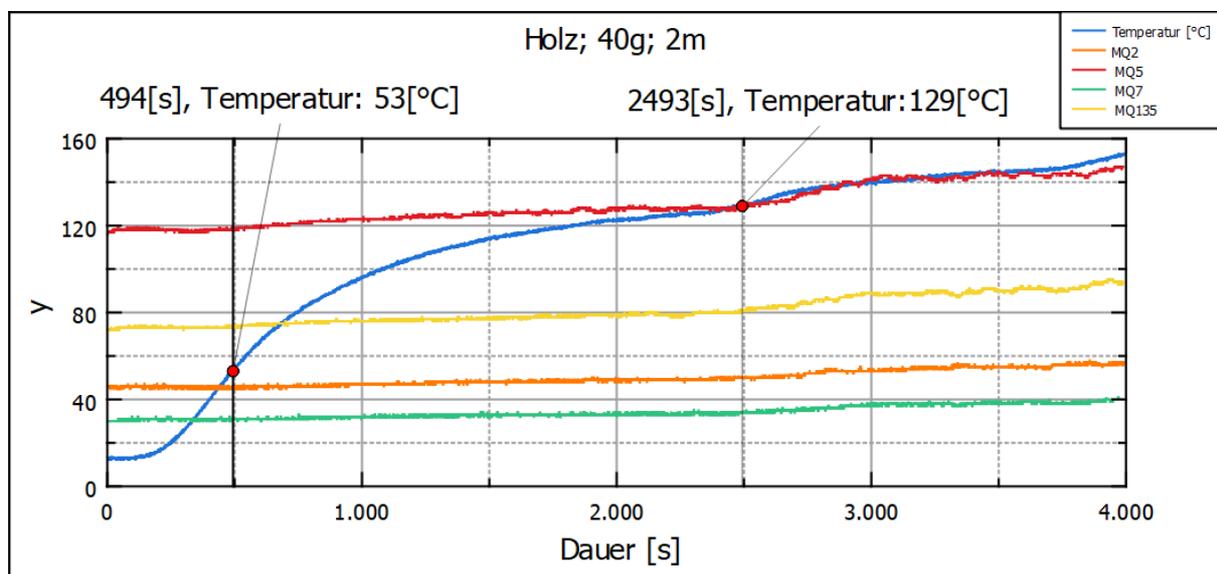


Abbildung 35: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Holz als Ausgangsmaterial



Abbildung 36: Holz vor (links) und nach (rechts) der Verschmelzung, rot dargestellt sind angeschwelte Bereiche

### 3.7.3 Ergebnis der Schwelversuche mit Lüsterklemme als Probe

Auf den Fotos ist zu erkennen, dass der Kunststoff durch die Hitzeeinwirkung stark geschmolzen ist. Es ist daher zu erwarten, dass die Sensorsignale stark ansteigen. Die Kurven zeigen jedoch einen anderen Verlauf, nämlich einen sehr flachen Anstieg ab einer Temperatur von 42,75°C. Es wird vermutet, dass die austretenden Schwelgase chemisch inert sind und keine Wechselwirkung mit dem Sensor eingehen. Zwar wurde auch im Zuge dieses Versuchs der Rauchmelder nicht ausgelöst. Allerdings zeigt das ausbleibende Sensorsignal, dass eine frühzeitige Warnung mittels chemischer Sensorik im betrachteten Bereich nicht erfolgen kann. Möglicherweise würde sich das Spektrum an ausgasenden chemischen Substanzen in höheren Temperaturbereichen noch dahingehend ändern, dass eine Warnung erfolgen kann. Zur Untersuchung dieses Temperaturbereichs war der gewählte Messaufbau allerdings nicht geeignet.

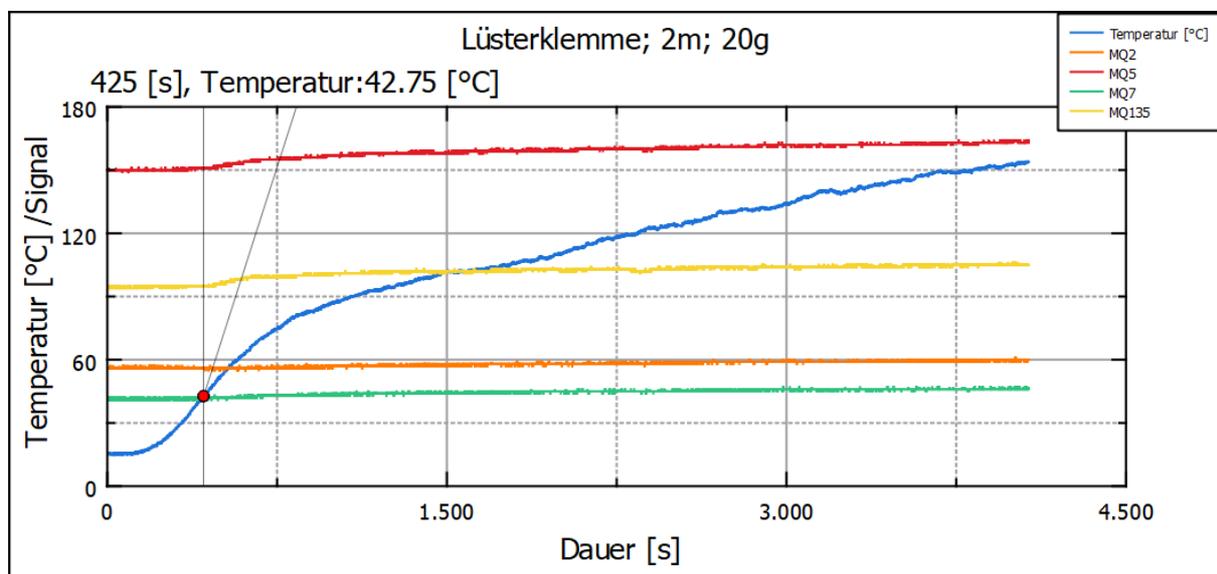


Abbildung 37: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Lüsterklemme als Ausgangsmaterial



Abbildung 38: Lüsterklemme vor (links) und nach (rechts) der Verschmelzung

### 3.7.4 Ergebnis der Schwelversuche mit Tierhaare als Probe

Beim Tierhaarversuch tritt ab 68,25°C eine starke Geruchsentwicklung auf, die in der Signalkurve deutlich zu erkennen ist. Die Kurve steigt jedoch nach dem steilen Anstieg nur flach an und die Geruchsentwicklung bleibt bestehen. Die Fotoaufnahme nach dem Versuch zeigt, dass ein Großteil der Haare stark verkohlt ist, was darauf schließen lässt, dass die Tierhaare besonders hitzeempfindlich sind. Auch hier wurde im Zuge des Versuchs kein Alarm durch den Rauchmelder ausgelöst. Insofern wäre hier zumindest in der Frühphase der Brandentstehung eine Meldung denkbar.

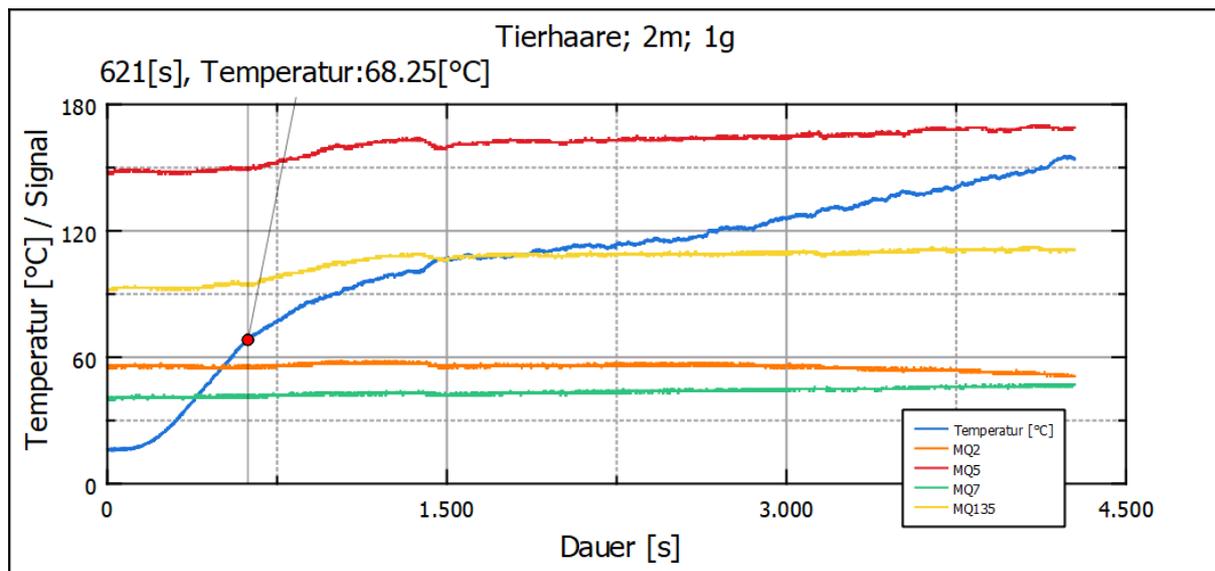


Abbildung 39: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Tierhaare als Ausgangsmaterial



Abbildung 40: Tierhaare vor (rechts) und nach (links) der Verschmelzung

### 3.7.5 Ergebnis der Schwelversuche mit Hausstaub als Probe

Beim Hausstaub registrieren die Sensoren bei 74,5°C eine Atmosphärenänderung und einen kontinuierlichen Anstieg der VOC-Konzentration auf, der mit einer Geruchsentwicklung verbunden ist. Da auch hier keine Meldung durch den Rauchmelder erfolgt ist, wäre auch bei diesem Material ein Zeitgewinn bei der Meldung möglich.

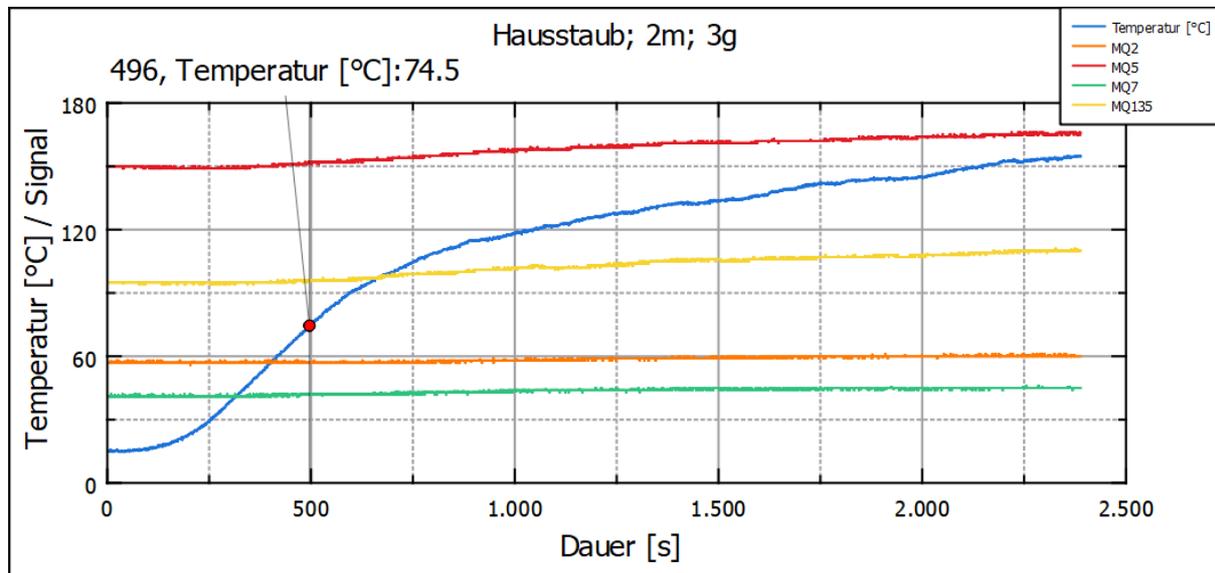


Abbildung 41: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Hausstaub als Ausgangsmaterial



Abbildung 42: Hausstaub vor (links) und nach (rechts) der Verschwelung

### 3.7.6 Ergebnis der Schwelversuche mit Büropapier als Probe

Beim Büropapier sind die Anstiege der Kurven ab einer Temperatur von 79,75°C zu beobachten. Die Sensoren MQ-5 und MQ-135 konnten viele Signale erfassen. Durch den hier ebenfalls ausbleibenden Alarm des Rauchmelders kann auch hier davon ausgegangen

werden, dass durch chemische Sensoren ein Zeitgewinn bei der Detektion einer Brandentstehung realisiert werden kann. Anhand der Abbildung 44 ist zu erkennen, dass vereinzelte Stellen der Papiere durch die Hitze beeinflusst wurden.

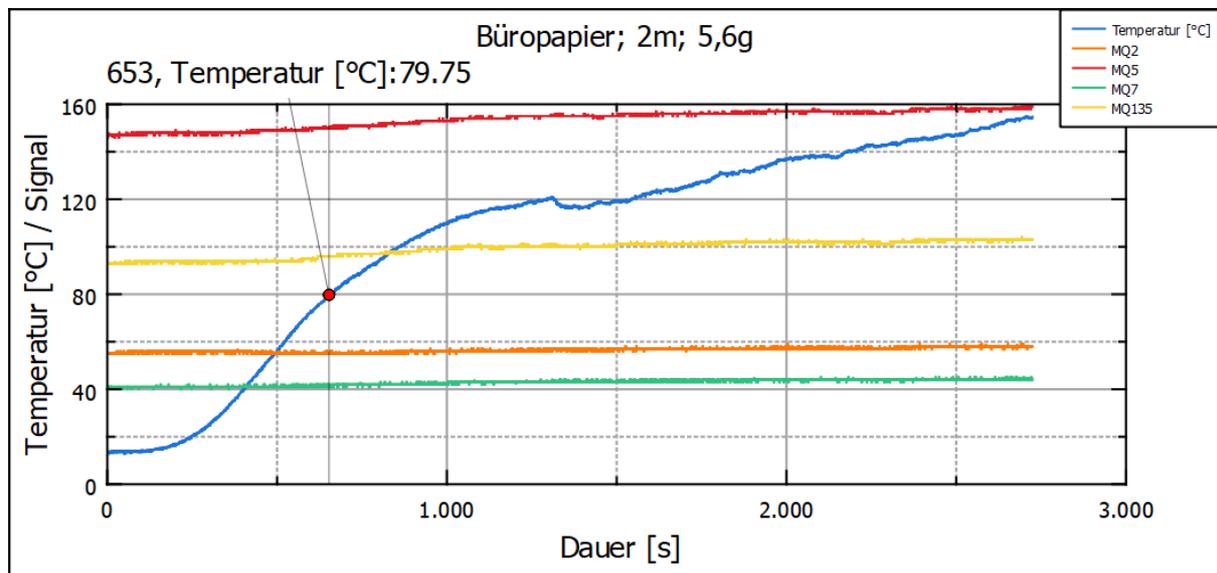


Abbildung 43: Ergebnis des realitätsnahen Versuchs mit Büropapier als Ausgangsmaterial

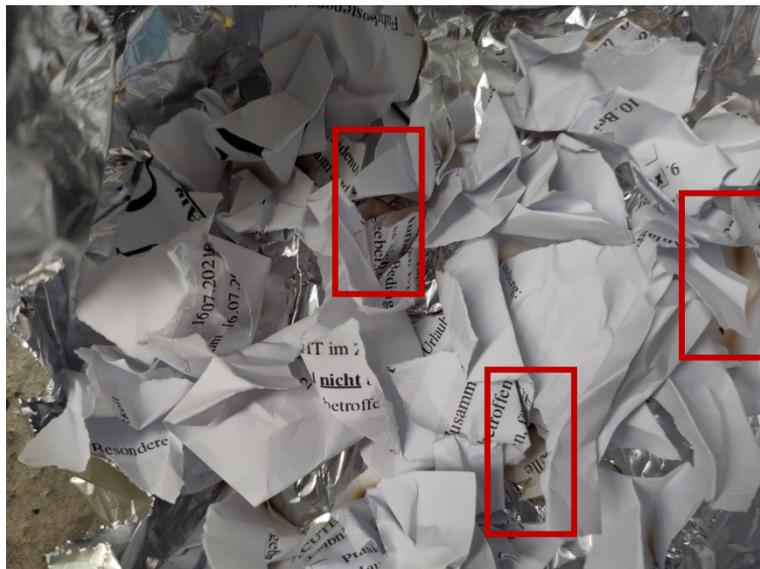


Abbildung 44: Büropapier nach der Verschmelzung

## 4. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Messergebnisse belegen eindeutig, dass die Sensoren in der Lage sind, Schwelgase aus unterschiedlichen Materialien zu detektieren. Allerdings sind die Signale von Werkstoff zu Werkstoff unterschiedlich. Dies zeigt sich insbesondere in den unterschiedlichen Zeitpunkten des Anstiegs der Kurven der einzelnen Sensorsignale. Beim Holz und bei der Materialmischung eines Ölgemäldes steigen die Kurven deutlich und klar an, während bei den

anderen Materialien eher flache Signalverläufe zu erkennen sind. Jedes Material zeigt einen anderen Kurvenverlauf, der für das jeweilige Material charakteristisch ist. Dies hat den Vorteil, dass man anhand der eindeutigen Kurvenverläufe unter Umständen schon im Vorfeld erkennen kann, welches Material in Gefahr ist. Diese Kenntnis hat je nach Situation eine Verkürzung der Lokalisierungszeit und damit eine Minimierung des Risikos einer Brandentstehung zur Folge. Aus allen Kurven ist ersichtlich, dass vom Beginn des Brandes bis zum Erreichen einer Temperatur von 160°C etwa eine Stunde ohne Alarmauslösung durch den optischen Rauchmelder vergeht. Im Falle höherer Aufheizraten wäre diese Zeitspanne entsprechend kürzer. Diese wertvolle Zeit kann also durch den Einsatz dieser Technologie zur Vermeidung der verheerenden Folgen eines Brandes gewonnen werden.

Alle Sensoren und das dazugehörige Modul funktionieren zuverlässig und sind einfach zu bedienen. Ein Dauerbetrieb des Sensormoduls ist ebenfalls unproblematisch. Es ist jedoch zu beachten, dass die Querempfindlichkeiten der Sensoren sehr ausgeprägt sind, so dass jede bekannte Änderung der Luftatmosphäre unter Umständen eine Neuausrichtung bzw. eine Änderung des Offsets zur Folge haben kann. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Brandfrüherkennung auf Basis chemischer Sensoren eine bessere Technologie als optische Rauchmelder darstellt, da Schwelgase frühzeitig und zuverlässig detektiert werden.

## 5. Resümee und Ausblick

Das Ziel der Erstellung eines digitalen Moduls zur Brandfrüherkennung wurde innerhalb der Projektlaufzeit erreicht. Das Modul hat die Eigenschaften einer frühzeitigen und zuverlässigen Detektion von Schwelgasen. Gegenüber optischen Rauchmeldern ergibt sich ein Zeitvorteil von mehr als einer Stunde. Darüber hinaus wurde die Detektionseinheit konstruktiv an die Anforderungen von Kulturgütern angepasst, so dass das Modul bezahlbar bleibt und wenig Strom verbraucht. Damit eröffnet das Modul einen neuen Weg, um einen Beitrag zur Prävention von Bränden zu leisten. Für die Weiterentwicklung des neuen Ansatzes sind noch weitere Arbeiten erforderlich. Beispielsweise muss ein Alarmierungskonzept entwickelt werden, da das System aufgrund der Querempfindlichkeit der Sensoren anfällig für Fehlalarme ist. Hier könnte KI zum Einsatz kommen, die mit Hilfe der Daten Algorithmen entwickelt, die in der Lage sind, Störfaktoren von einer tatsächlichen Gefahr zu unterscheiden. Ein weiterer Entwicklungsbedarf besteht darin, dass die Detektionseinheit in einer realitätsnahen Umgebung und nicht in einer echten Kultureinrichtung getestet wurde. In einer realen Umgebung gibt es eine Reihe von Faktoren, die den Brandverlauf beeinflussen. Die Räume, die geschützt werden müssen, sind wesentlich größer als im Demonstrationszelle und die Atmosphäre darin ist anders. Eine weitere Miniaturisierung der Detektionseinheit durch Reduzierung der Anzahl der Sensoren kann ebenfalls ein Thema sein.

Es ist auch denkbar, dass das Sensormodul kommerziell vermarktet wird. Hier haben erste Marktanalysen allerdings ergeben, dass Kulturgüter als alleiniger Abnehmer nicht ausreichen, um eine marktwirtschaftlich tragfähige Lösung anzubieten. Allerdings wäre eine Aufweitung der Use Cases auf andere Bereiche möglich. So könnte ein weiterführend optimiertes Produkt z.B. im Bereich von Hochregallagern oder auch in großen Wohnanlagen genutzt werden. Zusätzlich ergeben sich mögliche Anwendungsgebiete bei der Überwachung großer von Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Durch eine zusätzliche Anpassung der Sensoreinheit auch an diese Use Cases könnte eine Markteinführung nachhaltig gefördert und somit eine Verbreitung dieser innovativen Technologie vorangebracht werden.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Kirche+Leben, „Brand von Notre-Dame in Paris verursacht Milliarden Schaden,“ 16 April 2019. [Online]. Available: <https://www.kirche-und-leben.de/artikel/brand-von-notre-dame-in-paris-verursacht-milliardenschaden>. [Zugriff am 14 März 2024].
- [2] P. Lichtenbeck, „Brand im brasilianischen Nationalmuseum - 200 Jahre,“ 03 09 2018. [Online]. Available: <https://www.tagesspiegel.de/gesellschaft/panorama/brand-im-brasilianischen-nationalmuseum-200-jahre-geschichte-gehen-in-flammen-auf/22990280.html>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [3] M. Knoche, Die Bibliothek brennt, Wallstein, Weimar, Wallstein Verlag, 2013.
- [4] M. Knoche, Auf dem Weg zur Forschungsbibliothek, ZfBB Sonderband, 2016.
- [5] „Im Brandherd stand Jean Paul,“ Süddeutsche Zeitung, 15 10 2004. [Online]. Available: <https://www.knoche-weimar.de/workspace/dokumente/im-brandherd-stand-jean-paul-2004.pdf>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [6] „Ionisationsrauchmelder,“ 02 06 2020. [Online]. Available: <https://www.haustec.de/fachbegriffe/ionisationsrauchmelder>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [7] „Wie funktioniert eigentlich ein Rauchmelder?,“ 01 10 2022. [Online]. Available: <https://www.rauchmelder-lebensretter.de/wie-funktioniert-eigentlich-ein-rauchmelder/>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [8] „Wie funktioniert ein Wärmemelder?,“ 30 05 2014. [Online]. Available: <https://www.rauchmeldershop-online.de/blog/faq/wie-funktioniert-ein-waermemelder/>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [9] „Einsatzbereiche, Möglichkeiten und Einschränkungen von Flammenmeldern,“ [Online]. Available: <https://www.rauchmeldertest.net/flammenmelder/>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [10] „Was ist ein Flammendetektor und wie funktioniert er?,“ 10 01 2022. [Online]. Available: <https://www.crowcon.com/de/blog/what-is-a-flame-detector-and-how-does-it-work/>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [11] „Videobasiertes System zum Identifizieren von Flammen und Rauch,“ Bosch Building Technologies, [Online]. Available: <https://www.bsbrandschutz.de/artikel/videobasiertes->

system-zum-identifizieren-von-flammen-und-rauch-3954972.html. [Zugriff am 14 03 2024].

- [12] „KOHLENMONOXID- und GASMELDER,“ [Online]. Available: <https://www.alarmbund.de/gas-kohlenmonoxidmelder>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [13] M. Fleischer, „Wie Mikrochips riechen lernen,“ *Physik Journal 5 (2006) Nr. 7*, p. 27, 2006.
- [14] „Funktionsprinzip von Metalloxid(MOX)-Gassensorelementen,“ [Online]. Available: <https://www.umweltsensortechnik.de/gassensoren/mox-gassensor-funktionsprinzip.html>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [15] „Feuer wütet im Schachmuseum,“ *Volksstimme*, 15 11 2019. [Online]. Available: <https://www.volksstimme.de/lokal/halberstadt/feuer-wuetet-im-schachmuseum-1996106>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [16] „ Großes Heiliges Kreuz,“ [Online]. Available: <https://www.meingoslar.de/erleben-und-geniessen/shopping/grosses-heiliges-kreuz>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [17] „Dauer- und Sonderausstellungen,“ [Online]. Available: <https://www.skd.museum/ausstellungen/>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [18] „Parts per million,“ [Online]. Available: <https://sedl.at/ppm>. [Zugriff am 14 03 2024].
- [19] M. A. C. Urquiza. [Online]. Available: <https://github.com/miguel5612/MQSSensorsLib?tab=readme-ov-file>. [Zugriff am 14 03 2024].