

Erkennung von Glimmnestern in  
pneumatischen Förderleitungen  
mit Hilfe von Detektionssonden  
und Infrarot-Sensoren

F-05-0105

Erkennung von Glimmnestern in  
pneumatischen Förderleitungen mit Hilfe  
von Detektionssonden und Infrarot-Sensoren

## **Diplomarbeit**

von

René de Vries

Fachhochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin

Mannheim, April 2002

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Mannheim, 23. April 2002

-----  
(René de Vries)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Allgemeines . . . . .	3
1.2 Bisherige Erkenntnisse . . . . .	4
1.3 Zielsetzung . . . . .	5
<b>2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Infrarot-Strahlung . . . . .	7
2.2 Infrarot-Sensoren . . . . .	10
<b>3 Aufbau des Glimmnestdetektionssystems</b>	<b>11</b>
3.1 Auswahl der Infrarot-Sensoren . . . . .	11
3.1.1 Anforderungen an die Infrarot-Sensoren . . . . .	11
3.1.2 Eigenschaften der ausgewählten PbS/PbSe-Sensoren . . . . .	12
3.2 Auswahl der Glassorte . . . . .	15
3.2.1 Anforderungen an das Glas . . . . .	15
3.2.2 Versuch zur Auswahl der Glassorte . . . . .	15
3.2.2.1 Versuchsaufbau und -gang . . . . .	15
3.2.2.2 Versuchsergebnisse . . . . .	16
3.2.3 Eigenschaften des ausgewählten Glases . . . . .	17
3.3 Aufbau der mechanischen Komponenten . . . . .	18
3.3.1 Überlegungen zum prinzipiellen mechanischen Aufbau des Detektionssystems . . . . .	18
3.3.1.1 Ansatz „Strömungskörper mit Lichtleitern“ . . . . .	18
3.3.1.2 Ansatz „Gitter aus Detektionskörpern“ . . . . .	19
3.3.1.3 Ansatz „Axialer Detektionskörper“ . . . . .	19

3.3.1.4	Strömungsmechanische Vergleichsrechnung zu den Ansätzen . . . . .	20
3.3.1.4.1	Rechnung „Gitter aus Detektionskörpern“ . . . . .	21
3.3.1.4.2	Rechnung „Axialer Detektionskörper“ . . . . .	22
3.3.2	Realisierung der mechanischen Komponenten . . . . .	23
3.4	Aufbau der Elektronik . . . . .	26
3.4.1	Grundschtung . . . . .	26
3.4.2	Schtung im Detektionskörper . . . . .	26
3.4.3	Verstärkerschtung . . . . .	27
3.4.3.1	Allgemeines . . . . .	27
3.4.3.2	Versuch zur Optimierung der Verstärkerschtung . . . . .	28
3.4.3.2.1	Versuchsaufbau und -gang . . . . .	28
3.4.3.2.2	Versuchsergebnisse . . . . .	29
3.4.3.3	Verstärkeraufbau . . . . .	29
3.4.3.3.1	Vorverstärker . . . . .	30
3.4.3.3.2	Verstärker und Komparator . . . . .	31
3.4.4	Anzeigende Logik . . . . .	33
3.4.5	Versorgungsspannungen . . . . .	36
3.4.5.1	Versorgungsspannung für die Verstärker . . . . .	36
3.4.5.2	Versorgungsspannung für die anzeigende Logik . . . . .	36
3.4.5.3	Vorspannung für die Sensoren . . . . .	36
3.4.6	Realisierung der Elektronik . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Versuche mit dem Glimmnestdetektionssystem</b>	<b>38</b>
4.1	Funktionstest im Labor ohne Staub . . . . .	38
4.1.1	Funktionstest der Sensoren . . . . .	38
4.1.2	Funktionstest des gesamten Detektionssystems . . . . .	38
4.1.2.1	Versuchsaufbau und -gang . . . . .	38
4.1.2.2	Versuchsergebnisse . . . . .	40
4.2	Untersuchungen auf dem Versuchsfeld . . . . .	41
4.2.1	Glimmnest aus Stahlwolle . . . . .	41
4.2.2	Versuchsaufbau . . . . .	41
4.2.3	Versuchsgang . . . . .	43
4.2.3.1	Einbau des Detektionssystems . . . . .	43
4.2.3.2	Gebläseeinstellung . . . . .	43

4.2.3.3	Einstellung der Zellenradschleuse . . . . .	44
4.2.3.4	Einstellung der Elektronik . . . . .	44
4.2.3.5	Ablauf der Funktionstests . . . . .	45
4.2.4	Versuchsdurchführung und Ergebnisse . . . . .	46
4.2.4.1	PbSe-Sensoren und Weizen . . . . .	46
4.2.4.2	PbS-Sensoren und Weizen . . . . .	47
4.2.4.3	PbSe-Sensoren und Maisstärke . . . . .	48
4.2.4.4	PbS-Sensoren und Maisstärke . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>51</b>
5.1	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	51
5.2	Ausblick . . . . .	52
5.2.1	Verbesserungen . . . . .	52
5.2.2	Nächste Schritte . . . . .	53
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>54</b>
	<b>A Vergleich von Infrarot-Sensoren</b>	<b>55</b>
	<b>B Technische Zeichnung</b>	<b>57</b>

# Liste der Symbole

$a$	Verstärkungsfaktor
$A$	Fläche
$b$	Wien-Konstante = $2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$
$c$	Feststoffkonzentration in der Förderluft
$c_0$	Vakuumlichtgeschwindigkeit = $299.792.458 \text{ m/s}$
$c_W$	Widerstandsbeiwert
$D$	Durchmesser
$F_W$	Widerstandskraft in der Strömung
$h$	Planck'sches Wirkungsquantum = $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
$k$	Boltzmann-Konstante = $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
$k_G$	Wandrauhheit von Glas
$l$	Länge
$\dot{m}$	Massenstrom
$M_S$	spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers in den Halbraum
$M_{\lambda_S}$	spezifische spektrale Ausstrahlung eines schwarzen Körpers in den Halbraum
$p$	Druck
$R$	elektrischer Widerstand
$Re$	Reynolds-Zahl
$T$	Temperatur
$U$	Spannung
$V$	Volumen
$\dot{V}$	Volumenstrom
$\eta$	dynamische Viskosität
$\lambda$	Licht-Wellenlänge
$\nu$	kinematische Viskosität
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

# Vorwort

Zum Ende meines Studiums im Bereich Verfahrens- und Umwelttechnik an der Fachhochschule Mannheim bot sich mir die Möglichkeit, an einem für Verfahrens- und Umwelttechniker eher ungewöhnlichen, jedoch sehr interessanten Ort meine Diplomarbeit zu schreiben. Der Bereich Arbeitssicherheit und damit verbunden die Anlagen- und Apparatesicherheit ist ein attraktiver und umfangreicher Fachbereich. Die angebotene Diplomandenstelle bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V. (FSA) bzw. im Zentrallabor der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN) bot die großartige Gelegenheit, einer Tätigkeit in der Forschung für den Bereich Anlagen- und Apparatesicherheit. Das Studium im Bereich der Verfahrens- und Umwelttechnik vermittelt ein relativ breites Grundwissen, was mir meine Arbeit dort erleichterte.

An dieser Stelle möchte ich einigen Personen meinen Dank aussprechen:

Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie bedanken. Besonders bei meiner Mutter Ursula de Vries, die mir mein Studium überhaupt erst ermöglichte. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Wolfgang Schmitt, der mir dabei half diese Stelle zu bekommen und der meine Arbeit von Seiten der Fachhochschule Mannheim betreute. Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer meiner Arbeit bei der FSA, Herrn Dirk Lorenz, der mir bei Problemen immer behilflich war und ohne den die Arbeit in dieser Form wohl nicht zustande gekommen wäre. Außerdem möchte ich mich bei den Herren Helmut Ott, Michael Seithel, Sigurd Kleinhans, Dr. Albrecht Vogl für ihre Hilfe bedanken sowie bei allen anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der BGN bzw. FSA, die mich in irgendeiner Form bei dieser Diplomarbeit unterstützten.

# Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt den Aufbau eines Detektionssystems zur Erkennung von Glimmnestern in pneumatischen Förderleitungen der Nahrungsmittelindustrie. Glimmnester, die unter Umständen zu verheerenden Staubexplosionen in Silos führen können, sind Verklumpungen des brennbaren Förderproduktes. Diese Verklumpungen können sich in ihrem Innern auf mehrere 100 °C aufheizen, während die Temperatur der Oberfläche in der Regel weniger als 100 °C beträgt.

Das aufgebaute Detektionssystem nutzt die elektromagnetische Emission der Glimmnester zu deren Erkennung. Die elektromagnetische Strahlung wird mittels sechs Infrarot-Sensoren, die in einem Detektionskörper so angeordnet sind, dass sie den ganzen Querschnitt des Förderrohres überwachen, in ein elektrisches Signal umgewandelt. Durch Anordnung des Detektionskörpers in der Mitte des pneumatischen Förderrohres werden Staubablagerungen am Detektionskörper während der Förderung vermieden. Weiterhin wird durch diese Anordnung der maximal mögliche Abstand zwischen einem Sensor dem vorbeifliegenden Glimmnest so verringert, dass künstlich erzeugte Glimmnester aus Stahlwolle in einem Förderrohr mit 80 mm Durchmesser absolut zuverlässig erkannt werden. Dies gilt für Fördergeschwindigkeiten von 10 m/s bis 30 m/s und für Produktbeladungen von mindestens 35 kg/m<sup>3</sup> bei staubförmigen Produkten bzw. 40 kg/m<sup>3</sup> bei körnigen Produkten.

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Allgemeines

Die Handhabung von staubförmigen Stoffen in der Industrie birgt immer eine gewisse Gefahr in sich. Gerade in der Nahrungsmittelindustrie, wo viele Zwischen- und Endprodukte in trockener, staubiger Form vorliegen, kommt es immer wieder zu Staubexplosionen oder Silobränden. Damit es zu einer Staubexplosion kommen kann, müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

1. Es muss ein feiner, brennbarer Feststoff in einem bestimmten Mischungsverhältnis mit Luft, d. h. in aufgewirbelter Form vorliegen.
2. Für die Verbrennung muss ausreichend Sauerstoff vorhanden sein.
3. Eine wirksame Zündquelle muss vorhanden sein.

Diese drei Bedingungen bilden das sogenannte Gefahrendreieck [1]:

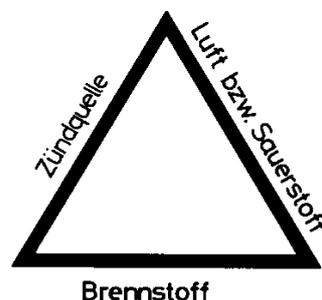


Abbildung 1.1: Gefahrendreieck

Seit vielen Jahren beschäftigen sich Menschen mit Explosionsschutzmaßnahmen, um industrielle Anlagen sicherer zu gestalten und zu betreiben. Bei den Schutzmaßnahmen wird zwischen den vorbeugenden und den konstruktiven Explosionsschutzmaßnahmen unterschieden. Konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen, wie Sicherheitsventile und

Entlastungsklappen, lassen eine Explosion im Innern einer Apparatur zu, beschränken aber deren Auswirkungen auf ein unbedenkliches Maß. Unter vorbeugenden Explosionschutzmaßnahmen versteht man alle Maßnahmen, die die Bildung einer gefährlichen, explosionsfähigen Atmosphäre verhindern oder einschränken (primäre Schutzmaßnahmen wie z. B. Inertisierung) und die Maßnahmen, die eine Entzündung gefährlicher, explosionsfähiger Atmosphäre vermeiden (Vermeiden von Zündquellen). Zu den bedeutsamen Zündquellen für Staub/Luft-Gemische zählen [2]:

- heiße Oberflächen
- Flammen und heiße Gase
- mechanisch erzeugte Funken
- nicht explosionsgeschützt ausgeführte elektrische Anlagen
- elektrostatische Entladungen
- stark exotherme Reaktionen
- Glimmnester

In allen Bereichen, in denen Gemische aus Luft und brennbaren Stäuben auftreten, können sich unter Umständen so genannte Glimmnester bilden. Darunter versteht man Verklumpungen brennbaren Staubes, die sich durch chemische Reaktionen in ihrem Innern auf mehrere 100 °C aufheizen können, während die äußere Staubkruste deutlich geringere Temperaturen zeigt.

In Staubschüttungen verborgene Glimmnester kommen statistischen Angaben zufolge für ca. 13 % aller in Deutschland registrierten Staubexplosionen als wahrscheinliche Zündquelle in Betracht. Darüber hinaus treten immer wieder Brandereignisse auf, die neben Personen- und Sachschäden auch beträchtliche Emissionen von Reaktionsprodukten verursachen [3]. Eine genaue Zahl von Brandereignissen oder Explosionen, deren Ursache der Eintrag eines Glimmnestes war, lässt sich nicht angeben, da Glimmnester im Gegensatz zu eingetragenen heißen Gegenständen, wie beispielsweise losgerissene Schrauben oder Muttern, nach einem Schadensereignis nicht mehr auffindbar sind.

## 1.2 Bisherige Erkenntnisse

Im Rahmen eines Vorgänger-Projektes wurden Untersuchungen zur Detektion von Glimmnestern in pneumatischen Förderleitungen der Nahrungsmittelindustrie mittels Infrarot-Sensoren durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse bildeten die Grundlage für diese Arbeit.

Bei diesen Untersuchungen wurde ein von der FSA entwickelter Prototyp sowie ein marktreifes (kommerzielles) System zur Erkennung heißer Gegenstände in pneumatischen Förderleitungen auf dem Versuchsfeld der FSA/BGN unter praxisidentischen

Bedingungen<sup>1</sup> getestet. Das marktreife System, welches hauptsächlich in der Holzindustrie Verbreitung gefunden hat, sowie die FSA-Eigenentwicklung (Prototyp) sind in ihren Grundzügen sehr ähnlich aufgebaut. Beide Systeme überwachen eine Stelle des Förderrohrinneren vollständig, indem zwei Detektoren sich gegenüberstehend in die Rohrwand integriert sind. Im Gehäuse der Detektoren befinden sich infrarotempfindliche Sensoren (siehe Abschnitt 2.2), die von der Außenwand des Rohres in den Förderstrom schauen.

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass Glimmnester in Gegenwart staubförmiger Produkte nur unterhalb einer Konzentration von etwa  $1 \text{ kg/m}^3$  detektiert werden können. Der Durchmesser der pneumatischen Förderleitung darf dabei den Wert von 120 mm nicht überschreiten. Werden körnige Produkte mit Korngröße über 2 mm gefördert, so liegt diese Grenzkonzentration für den genannten Rohrdurchmesser bei rund  $6,5 \text{ kg/m}^3$ . Diese Ergebnisse bestätigten die zuvor mittels Laborversuchen ermittelten prinzipiellen Grenzen, die bei der Detektion von Glimmnestern anhand ihrer Infrarot-Emission gegeben sind [4].

Sowohl der FSA-Prototyp als auch das marktreife System eignen sich damit nur sehr eingeschränkt für den Einsatz in der Nahrungsmittelindustrie.

### 1.3 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollte ein neuer, möglichst universell einsetzbarer Prototyp zur Erkennung von Glimmnestern in pneumatischen Förderleitungen der Nahrungsmittelindustrie entwickelt werden, der auch bei industrieüblichen Staubbeladungen zuverlässig arbeitet. Grundlage dafür war eine bereits vorhandene Idee, die weiter ausgearbeitet und ausprobiert werden sollte. Diese Idee bestand darin, den maximal möglichen Abstand zwischen Glimmnest und Glimmnestdetektor zu verringern.

Ursprünglich sollte ein Gitter von strömungsgünstig geformten Glaskörpern im Förderrohr so untergebracht werden, dass die von einem passierenden Glimmnest emittierte Infrarot-Strahlung in diese einkoppeln und mittels Lichtleiter an einen Sensor weitergeleitet werden sollte. Genauere Untersuchungen zeigten, dass dies zwar prinzipiell möglich ist, jedoch in diesem Fall mit einem unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden gewesen wäre.

Aus diesen Erkenntnissen entstand die Ideenvariante, die genannten Glaskörper durch Glasrohre zu ersetzen, wobei die infrarotempfindlichen Sensoren direkt in die Glasrohre eingebaut werden und in den Förderstrom hineinschauen. Auch diese Idee erwies sich nach genauerer Betrachtung als nicht praktikabel.

Die Idee, die sich letztlich durchsetzte, sah die Entwicklung eines axial in die Förderleitung eingebauten Strömungskörpers vor, in den mehrere Infrarot-Sensoren in der Art eingebaut sind, dass der Raum zwischen Detektionskörper<sup>2</sup> und Rohrwand an der Einbaustelle des Strömungskörpers vollständig überwacht wird. Neben Konstruktion und

---

<sup>1</sup>Fördergeschwindigkeit von 10 m/s bis 30 m/s bei Förderproduktkonzentrationen um  $20 \text{ kg/m}^3$ .

<sup>2</sup>Mit dem Begriff „Detektionskörper“ wird im weiteren der Strömungskörper bezeichnet wenn die zugehörigen Infrarot-Sensoren eingebaut sind.

Aufbau des Detektionskörpers bestand somit die Aufgabenstellung darin, eine Elektronik für den Detektionskörper zu entwickeln, so dass am Ende der Diplomarbeit ein, im Versuch erprobter bzw. funktionstüchtiger Prototyp existieren sollte.

# Kapitel 2

## Physikalische Grundlagen

### 2.1 Infrarot-Strahlung

In jedem Körper der Temperatur  $T > 0$  K schwingen die Atome des Körpers bzw. deren elektrisch geladene Bestandteile (Elektronen, Ionen) mit statistisch verteilten Amplituden, Phasen und Richtungen. Dies hat die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen zur Folge, die sogenannte Temperaturstrahlung. Bei höheren Temperaturen als ungefähr  $T_0 = 273$  K wird sie als Wärmestrahlung empfunden. Bei sehr hohen Temperaturen tritt dabei auch sichtbare Lichtstrahlung auf. Der Körper glüht [5]. Infrarot-Strahlung ist der Teil des elektromagnetischen Spektrums, der zwischen dem sichtbaren Licht und den Radiowellen liegt [6] (siehe Abbildung 2.1).

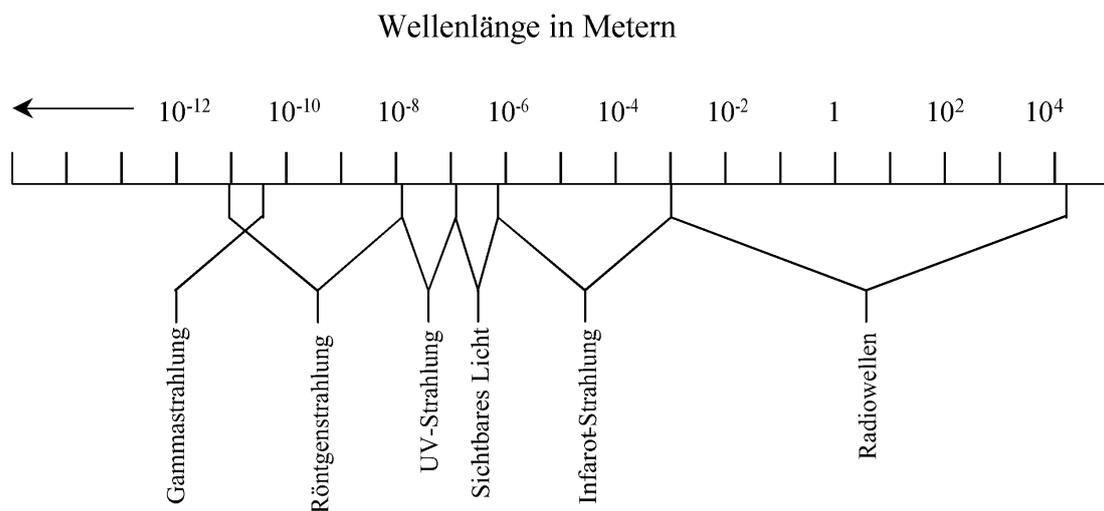


Abbildung 2.1: Elektromagnetisches Spektrum

Die Wellenlänge von IR-Strahlung reicht von  $0,7 \mu\text{m}$  bis  $1000 \mu\text{m}$ . In der Praxis eignen sich aus diesem Frequenzbereich jedoch nur die Wellenlängen von  $0,7 \mu\text{m}$  bis  $20 \mu\text{m}$  zur Temperaturmessung. Derzeit stehen keine Detektoren zur Verfügung, die empfindlich

genug sind, um die geringen Energiemengen zu messen, die oberhalb einer Wellenlänge von  $20 \mu\text{m}$  abgestrahlt werden [5].

In vielen Fällen verhält sich IR-Strahlung wie sichtbares Licht. IR-Strahlung breitet sich geradlinig von der Strahlungsquelle aus und kann durch Objekte im Strahlengang reflektiert oder absorbiert werden. Von den meisten Objekten, die für das menschliche Auge nicht durchsichtig sind, wird die IR-Strahlung zum Teil reflektiert und zum Teil vom Objekt absorbiert. Von der absorbierten Energie wird wiederum ein Teil intern reflektiert und ein Teil wieder abgestrahlt. Dies gilt auch für Objekte, die für das menschliche Auge durchsichtig sind, wie Glas, Gase und dünne, transparente Kunststoff-Folie, zusätzlich dringt jedoch auch ein Teil der Strahlung durch das Objekt hindurch [6].

Für sogenannte schwarze Körper<sup>1</sup> gilt das Planck'sche Strahlungsgesetz:

$$M_{\lambda_s} d\lambda = 2\pi \cdot \frac{hc_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc_0}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.1)$$

In Formel (2.1) ist

- $M_{\lambda_s}$  die spezifische spektrale Ausstrahlung eines schwarzen Körpers in den Halbraum  $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3}\right]$
- $c_0$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit =  $299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum =  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- $k$  die Boltzmann-Konstante =  $1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$
- $T$  die Temperatur [K]
- $\lambda$  die Wellenlänge [m]

Das Planck'sche Strahlungsgesetz liefert die von einem schwarzen Strahler in den Halbraum  $2\pi$  emittierte Energie in Abhängigkeit von der Temperatur und der Wellenlänge. Darunter versteht man die spezifische spektrale Ausstrahlung in den Halbraum.

In Abbildung 2.2 ist der Verlauf dieser Kurve für verschiedene Temperaturen dargestellt. Die Kurven zeigen, dass bei relativ kühlen Körpern wesentlich weniger Wärmestrahlung emittiert wird. Dazu kommt, dass sich bei kühler werdenden Strahlern das gesamte Spektrum der emittierten Strahlung weiter in den längerwelligen Bereich verschiebt. Während zum Beispiel bei einem schwarzen Strahler mit einer Temperatur von  $1.500 \text{ K}$  das Maximum der Energiestrahlung noch bei ca.  $2,2 \mu\text{m}$  liegt, befindet sich das Maximum bei einem solchen Strahler mit einer Temperatur von  $750 \text{ K}$  bei etwa  $4 \mu\text{m}$ . Dieses Phänomen wird durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschrieben:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b \quad (2.2)$$

---

<sup>1</sup>Ein schwarzer Körper absorbiert einfallende elektromagnetische Strahlung vollständig. Nicht-schwarze Körper reflektieren einen Teil der einfallenden Strahlung.

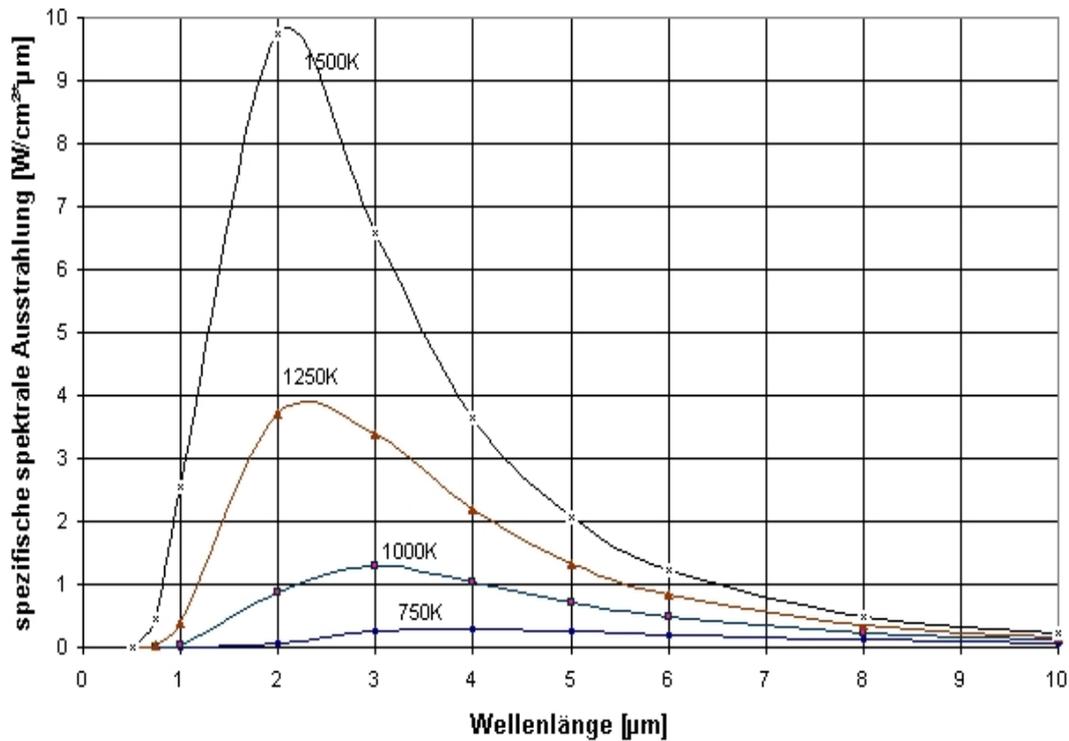


Abbildung 2.2: Spezifische spektrale Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit seiner Temperatur.

Dabei ist

- $\lambda_{\max}$  die Wellenlänge, bei der das Maximum der Energiestrahlung liegt [ $\mu\text{m}$ ]
- $T$  die Temperatur [K]
- $b$  die Wien-Konstante =  $2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Durch Integration des Planck'schen Strahlungsgesetzes über einen gewissen Wellenlängenbereich erhält man die spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers in den Halbraum innerhalb dieses Wellenlängenbereiches.

$$M_S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda_S} d\lambda \quad (2.3)$$

Integration über das gesamte Spektrum liefert das Stefan-Boltzmann-Gesetz, welches die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers in den Halbraum beschreibt:

$$M_S = \int_0^{\infty} M_{\lambda_S} dy = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

Dabei ist  $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$  die Stefan-Boltzmann-Konstante.

## 2.2 Infrarot-Sensoren

Empfänger oder Sensoren für elektromagnetische Strahlung wandeln auftreffende Strahlungsenergie in elektrische Signale um. Physikalisch gesehen kann Strahlung mit der Materie ganz unterschiedlich wechselwirken: durch Photon-Elektron-Wechselwirkung, durch thermische Effekte und durch andere Wechselwirkungseffekte. Dementsprechend gibt es drei Hauptgruppen von Strahlungssensoren: Photonen-, thermische und Strahlungsfeldsensoren [7].

Zur Detektion von IR-Strahlung eignen sich jedoch nur die beiden ersten Gruppen:

- **Photonen-Sensoren:** Direkte Wechselwirkungen zwischen Photonen und Elektronen im Material durch Strahlungsabsorption und Anregung von energetischen Übergängen. Photonen-Sensoren funktionieren nach dem Wirkprinzip des photoelektrischen Effekts. Legt man an einen geeigneten Festkörper eine elektrische Spannung, so fließt durch diesen ein elektrischer Strom. Wird nun der Festkörper gleichzeitig einer Bestrahlung durch Photonen ausgesetzt, erhöht sich seine elektrische Leitfähigkeit [8]. Typische Vertreter der Photonen-Sensoren sind Fotoleiter, Fotodioden und Fototransistoren.
- **Thermische Sensoren:** Strahlungsabsorption erhöht die Temperatur des Materials und damit bestimmte Materialeigenschaften. Thermische Sensoren arbeiten im Unterschied zu den Photonen-Sensoren wellenunabhängig. Das entstehende Fotosignal hängt nur von der Strahlungsleistung und nicht von der spektralen Zusammensetzung ab [7]. Typische Vertreter der thermischen Sensoren sind Bolometer, Thermosäulen und pyroelektrische Sensoren.

# Kapitel 3

## Aufbau des Glimmnestdetektionssystems

### 3.1 Auswahl der Infrarot-Sensoren

#### 3.1.1 Anforderungen an die Infrarot-Sensoren

Die äußeren Schichten von Glimmnestern zeigen Temperaturen, die selten über 100 °C liegen, während im Glimmnestinneren deutlich höhere Temperaturen herrschen können (siehe Abschnitt 1.2). Betrachtet man ein Glimmnest als schwarzen Körper, setzt eine Oberflächentemperatur von den genannten 100 °C an und berechnet damit die spezifische Ausstrahlung gemäß (2.1), so zeigt sich, dass die benötigten Sensoren idealerweise in einem Wellenlängenbereich von 2  $\mu\text{m}$  - 10  $\mu\text{m}$  empfindlich sein sollten. Zudem sollten sie schnell genug reagieren, um möglichst viel der eingestrahnten Energie eines passierenden Glimmnestes in ein Signal umzuwandeln. Abschätzungen ergaben, dass ein Glimmnest ( $D \geq 20 \text{ mm}$ ), welches mit 20  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  und einem Abstand von 1 cm an einem Sensor vorbei fliegt, etwa 2 ms lang in merklichem Strahlungskontakt mit dem Sensor steht. Die Zeitkonstante der Sensoren<sup>1</sup> sollte also deutlich kleiner als 2 ms sein. Kombiniert mit den Überlegungen zur Art des Einbaus der Sensoren (siehe Abschnitt 3.3) ergaben sich folgende Anforderungen für die zu beschaffenden Sensoren:

- möglichst hohe Empfindlichkeit
- möglichst kleine Abmessungen und einfache Montage
- empfindlich im Spektralbereich von 2  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$
- Zeitkonstante  $\leq 1 \text{ ms}$

Die Nachforschungen bei Herstellern von Infrarot-Sensoren ergaben, dass im wesentlichen drei verschiedene Sensoren für das Detektionssystem in Frage kommen:

---

<sup>1</sup>Zeit, in der die Sprungantwort 63,2 % ihres möglichen Endwertes erreicht

- Fotoleiter aus Bleisulfid (PbS)
- Fotoleiter aus Bleiselenid (PbSe)
- Pyroelektrische Einelement-Sensoren auf der Basis von Lithiumtantalat

Die Bleisulfid-Sensoren sind mit Abstand die empfindlichsten der genannten drei Sensorarten, weshalb zunächst einige dieser Sensoren beschafft wurden. Weiterhin wurden auch einige Bleiselenid-Sensoren erworben, da diese gegenüber den PbS-Sensoren in einem breiteren Spektralbereich empfindlich sind und darüber hinaus eine deutlich kleinere Zeitkonstante besitzen. Für den mechanischen Aufbau des Glimmnestdetektionssystems spielt es keine Rolle, welche der beiden Sensortypen verwendet werden, da beide im gleichen Gehäuse geliefert werden. Pyroelektrische Sensoren sind PbS- und PbSe-Sensoren weit überlegen was die Bandbreite der spektralen Empfindlichkeit betrifft. Jedoch ist ihnen eine erheblich kleinere Empfindlichkeit zu eigen, was den erst genannten Vorteil dieser Sensoren wieder zunichte macht. Zudem ist die Ansprechzeit wesentlich größer als die der anderen Sensoren. Diese Umstände und die sehr hohen Anschaffungskosten waren letztendlich ausschlaggebend dafür, diesen Sensortyp zu verwerfen.

Die wichtigsten Daten dieser Sensoren sind im Anhang A zusammengestellt.

### 3.1.2 Eigenschaften der ausgewählten PbS/PbSe-Sensoren

Für den Aufbau des Glimmnestdetektionssystems wurden Bleisulfid- und Bleiselenid-Sensoren der Firma Calsensors (USA) verwendet (siehe Anhang A). Es handelt sich hierbei um hochempfindliche Fotoleiter, deren Widerstand sich durch IR-Bestrahlung verkleinert. Die Widerstandsänderung wird im geschlossenen Stromkreis als eine Spannungsänderung registriert. Deshalb ist für den Betrieb der Sensoren eine Vorspannung (BIAS) erforderlich. Die Grundschialtung ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Beide Sensortypen besitzen eine aktive Fläche von  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ . Für die PbS-Sensoren beträgt die maximale Vorspannung  $50 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$  und für die PbSe-Sensoren  $35 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$ . Daraus

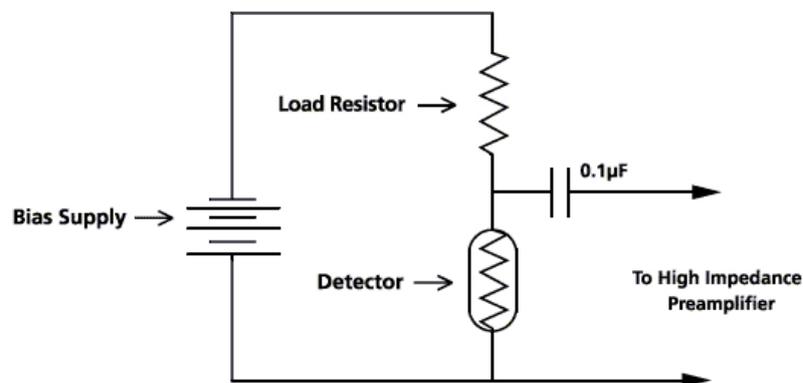


Abbildung 3.1: Grundschialtung für den Betrieb von PbS- und PbSe-Sensoren.

folgt als maximale Vorspannung ein Wert von 100 V für die verwendeten PbS-Sensoren und ein Wert von 70 V für die PbSe-Sensoren.

Im allgemeinen besteht zwischen Signal und Vorspannung eine lineare Beziehung (bis etwa zur maximalen Vorspannung). Bei geringer Vorspannung zeigt das PbS/PbSe-Sensorrauschen eine relativ kleine Abhängigkeit von dieser Spannung. Nachdem ein gegebener Spannungswert erreicht ist, verhält sich das Rauschen linear zur Spannung. Die typische Veränderung des Signals, des Rauschens und dem Verhältnis aus beiden von PbSe-Sensoren mit der Vorspannung ist in Abbildung 3.2 gezeigt [12].

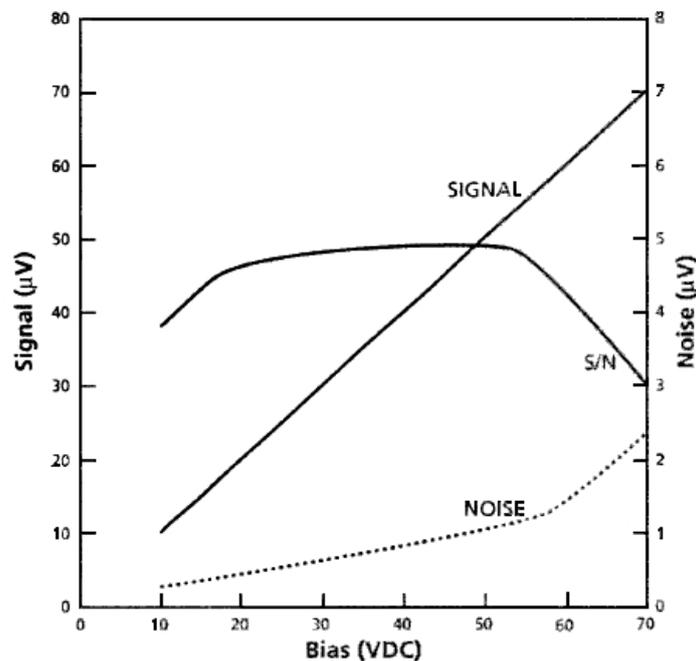


Abbildung 3.2: S/N-Verhältnis über der Vorspannung für einen PbSe-Sensor

Die Sensoren zeigen ein typisches  $1/f$ -Rauschen, d. h. je schneller die Änderung der Bestrahlung, desto größer der Ausschlag im Vergleich zum Rauschen. Weiterhin ist das Verhalten der Sensoren temperaturabhängig. Durch Kühlung verschiebt sich die spektrale Detektivität als auch die Bandkante der PbS- und PbSe-Sensoren zu größeren Wellenlängen. Eine Kühlung des Sensors erhöht auch die Detektivität. Dieses Verhalten ist in Abbildung 3.3 illustriert. Weil bei dem aufzubauenden Glimmnestdetektionssystem innerhalb des Förderrohres detektiert werden soll, ist die Kleinheit der Sensoren von großer Bedeutung, weshalb auf eine Kühlung verzichtet werden muss.

Die Sensoren befinden sich in einem TO-5-Gehäuse für ungekühlte Sensoren. Diese Gehäuse sind mit drei Kontakten versehen. Ein Kontakt dient der Erdung des Gehäuses selbst, die anderen beiden Kontakte stellen die Anschlüsse für den Sensor dar (siehe Abbildung 3.4). Als Gehäusefenster dient eine kleine Scheibe aus Saphir, welche bis zu einer Wellenlänge von  $5 \mu\text{m}$  durchlässig ist.

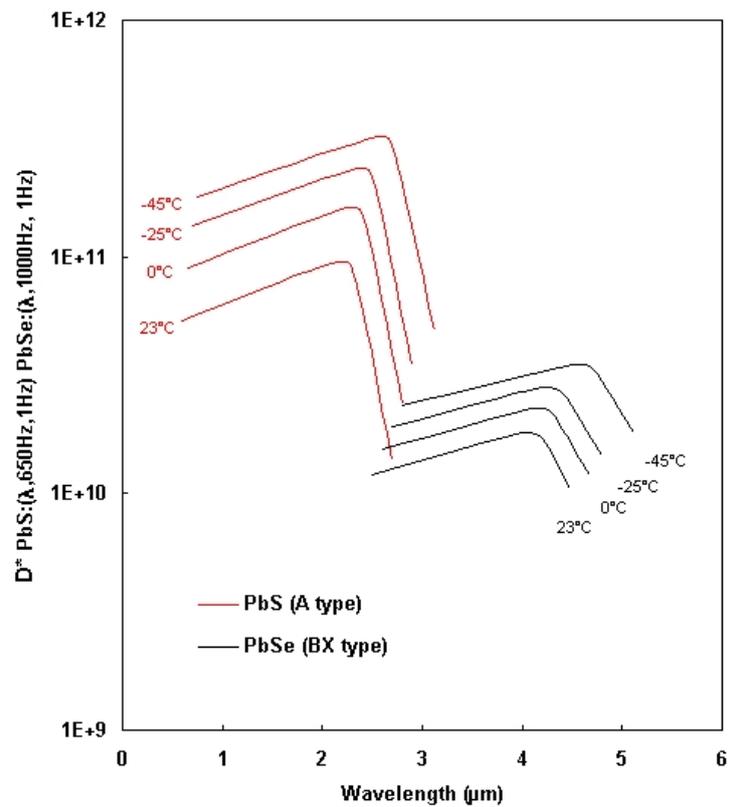
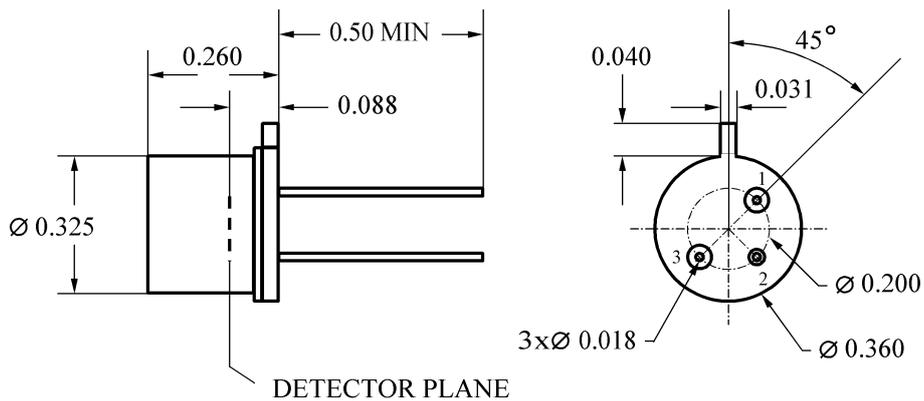


Abbildung 3.3: Detektivivtät von PbS- und PbSe-Sensoren über der Wellenlänge bei unterschiedlichen Temperaturen.



Dimensions are in inches

PIN FUNCTIONS		
PIN NO.	FUNCTION	COLOR
1	DETECTOR	BARE
2	CASE GND	BARE
3	DETECTOR	BARE

Abbildung 3.4: Vermaßte Skizze eines TO-5 Gehäuses für ungekühlte Sensoren.

## 3.2 Auswahl der Glassorte

### 3.2.1 Anforderungen an das Glas

Generell muss ein für das Glimmnestdetektionssystem geeignetes Glas drei Anforderungen erfüllen:

- Das Glas muss in dem Wellenlängenbereich durchlässig sein, in dem die ausgewählten Sensoren empfindlich sind.
- Das Glas muss stabil sein.
- Der Preis des Glases muss in einem akzeptablen Rahmen bleiben.

Die in Abschnitt 3.1 ausgewählten IR-Sensoren sind im langwelligen Bereich empfindlich bis  $5\ \mu\text{m}$  (PbSe-Sensoren). Die kurzwelligere elektromagnetische Strahlung (sichtbares Licht) spielt wegen der niedrigen Oberflächentemperaturen der Glimmnester nur eine untergeordnete Rolle, d. h. das wichtigste Auswahlkriterium für ein Glas ist die Lichtdurchlässigkeit bis möglichst  $5\ \mu\text{m}$ .

Einige Gläser konnten durch Sichtung ihrer Werkstoffdaten von vorn herein ausgeschlossen werden. Fensterglas z. B. lässt Licht in einem Spektralbereich von ca.  $0,35\ \mu\text{m}$  bis ca.  $2,8\ \mu\text{m}$  mit wenig Schwächung hindurch. Bei Verwendung von Fensterglas würde man folglich den detektierbaren längerwelligen Anteil der vom Glimmnest emittierten IR-Strahlung durch Absorption im Glas verlieren, was einen deutlichen Empfindlichkeitsverlust des Glimmnestdetektionssystems zur Folge hätte. Spezielle Gläser für die IR-Optik, wie etwa Kaliumbromid (KBr) oder Saphir, erfüllen die physikalischen Anforderungen zwar hervorragend, jedoch hätte deren Anschaffung den finanziellen Rahmen des Projektes gesprengt.

Letztendlich wurde eine Vorauswahl von drei relativ ähnlichen Gläsern getroffen. Um zu sehen, wie sich diese Gläser unter Detektionsbedingungen tatsächlich verhalten, wurden im Labor entsprechende Experimente durchgeführt.

### 3.2.2 Versuch zur Auswahl der Glassorte

#### 3.2.2.1 Versuchsaufbau und -gang

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Ein Infrarot-Sensor (PbS) befindet sich in einem Metallröhrchen. Er ist so montiert, dass er genau auf die Oberfläche eines geschwärzten Kupferblocks „blickt“. Der Kupferblock wird von einem stufenlos regelbaren Ofen beheizt. Die am Ofen eingestellte Temperatur wird an der zum Ofen gehörigen Ofensteuerung überwacht. Die tatsächliche Temperatur der Kupferblock-Oberfläche wird mit einem, in einer Seitenbohrung nahe der Oberfläche angebrachten, Temperaturfühler gemessen und extern angezeigt. Da der Sensor nur auf relativ schnelle Änderungen der Strahlungsintensität reagiert, befindet sich zwischen Sensor und Kupferblock ein Chopper im Strahlengang, der die von der heißen Kupferblock-Oberfläche emittierte IR-Strahlung periodisch abschirmt bzw. freigibt. Gemessen wird

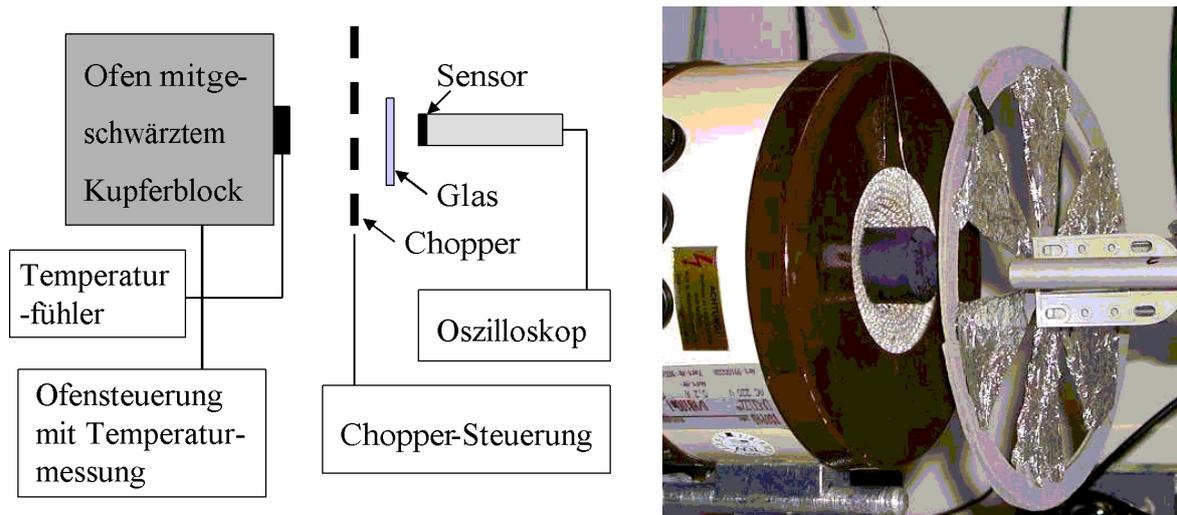


Abbildung 3.5: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Strahlungsdurchlässigkeit verschiedener Gläser.

die Widerstandsänderung des Sensors. Diese kann als Spannungsänderung am angeschlossenen Oszilloskop abgelesen werden. Damit wirklich nur die Wärmestrahlung des Kupferblocks gemessen wird, wurden die Versuche unter weitgehendem Ausschluss von anderen Strahlungsquellen durchgeführt (d. h. auch kein Licht während der Messung). Bei einer definierten Temperatur der Kupferblock-Oberfläche wird zunächst die Signalhöhe am Oszilloskop abgelesen, wobei sich kein Glas im Strahlengang zwischen Kupferblock und Sensor befindet. Anschließend werden die verschiedenen Gläser in den Strahlengang eingebracht und die jeweils dazu gehörigen Signalhöhen abgelesen.

### 3.2.2.2 Versuchsergebnisse

Bei den Experimenten wurden drei verschiedene Glassorten untersucht:

1. AR-Glas (Natriumkalk-Glas), Wandstärke: 1,7 mm
2. Duran-Glas (Borsilikat-Glas), Wandstärke: 1,7 mm
3. Infrasil (Quarz-Glas), Wandstärke: 2,1 mm

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Messungen zeigen, dass das Infrasil in unteren Temperaturbereichen (80 °C - 120 °C), d. h. im längerwelligen Bereich der Strahlung, deutlich durchlässiger ist als die beiden anderen Glassorten. Bei höheren Temperaturen ist das Infrasil den anderen Gläsern hinsichtlich Lichtdurchlässigkeit ebenfalls überlegen, jedoch ist der Unterschied nicht mehr so stark ausgeprägt.

$T_{\text{Cu-Block}} [^{\circ}\text{C}]$	$U_{\text{ohne}} [\text{mV}]$	$U_1 [\text{mV}]$	$U_2 [\text{mV}]$	$U_3 [\text{mV}]$
80	1100	500	500	1050
100	1500	1250	1200	1450
120	1700	1650	1550	1700
150	1900	1850	1800	1900
200	2250	2200	2000	2250

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Versuche zur IR-Durchlässigkeit verschiedener Glassorten.

### 3.2.3 Eigenschaften des ausgewählten Glases

Anhand der im vorigen Abschnitt beschriebenen Versuchsergebnisse wurde für das Detektionssystem ein Quarz-Glas ausgewählt. Quarz-Gläser dieser Art kommen häufig in Forschung und Technik zum Einsatz.

Quarz-Glas ist ein chemisch und physikalisch hochbelastbarer Werkstoff. Es weist, im Gegensatz zu Silikat-Gläsern, besonders gute Durchlässigkeit in einem relativ breiten Wellenlängenbereich auf. In Punkto Durchlässigkeit und spektraler Breite des Durchlassbereiches übertrifft Quarz-Glas herkömmliches Glas deutlich. In Abbildung 3.6 sind die typischen Durchlässigkeitskurven eines Quarz-Glases (Infrasil) in Abhängigkeit von der Glasdicke dargestellt.

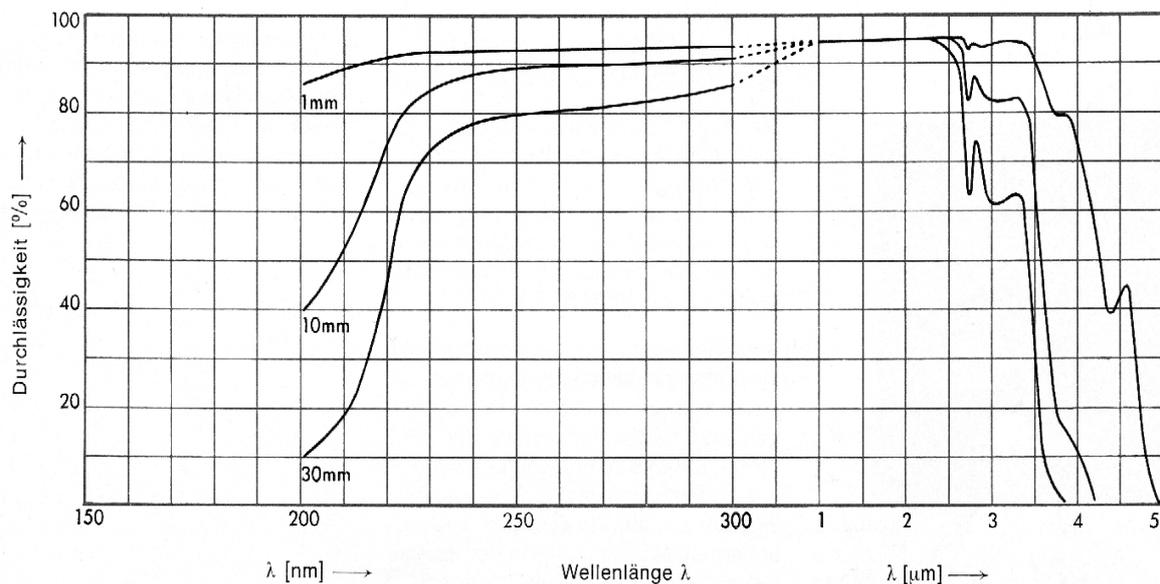


Abbildung 3.6: Lichtdurchlässigkeit von Infrasil in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Glasdicke.

### 3.3 Aufbau der mechanischen Komponenten

#### 3.3.1 Überlegungen zum prinzipiellen mechanischen Aufbau des Detektionssystems

Bisher existente Glimmnestdetektionssysteme, bei denen die infrarot-empfindlichen Sensoren mit Blickrichtung ins Rohrinne in die Rohrwand integriert sind, können Glimmester bei industrieeüblichen Produktbelastungen nicht zuverlässig erkennen. Dies hat zwei Gründe:

- Der Abstand zwischen Glimmnest und Sensor ist meistens so groß, dass die vom Glimmnest in Richtung Sensor emittierte Strahlung durch das Förderprodukt vollständig absorbiert wird.
- Die Fördergeschwindigkeit am Rohrrand ist so gering, dass es zur Erblindung der Sensoren durch Staubablagerungen auf dem Detektionssystem kommt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden verschiedene Ansätze versucht, um die beschriebenen Probleme zu lösen. Im folgenden werden diese Ansätze erläutert und der Prozess der endgültigen Lösungsfindung geschildert.

##### 3.3.1.1 Ansatz „Strömungskörper mit Lichtleitern“

Die erste Idee war, ein Gitter aus Glas- oder Plexiglaskörpern mit strömungsgünstigem Profil in die Rohrleitung einzubauen. Dabei sollten jeweils mindestens zwei solcher Plexiglas-Strömungskörper in hintereinander gestaffelten Ebenen senkrecht zur Strömungsrichtung angeordnet werden, wobei die Strömungskörper einer Ebene in Bezug auf die Körper der benachbarten Ebene um  $90^\circ$  verdreht angeordnet sein sollten (siehe Abbildung 3.7).

Passiert ein Glimmnest ein solches Gitter, so kann es entweder zerschlagen werden oder es fliegt in kleinem Abstand an den Körpern vorbei. Die Infrarot-Strahlung sollte in die

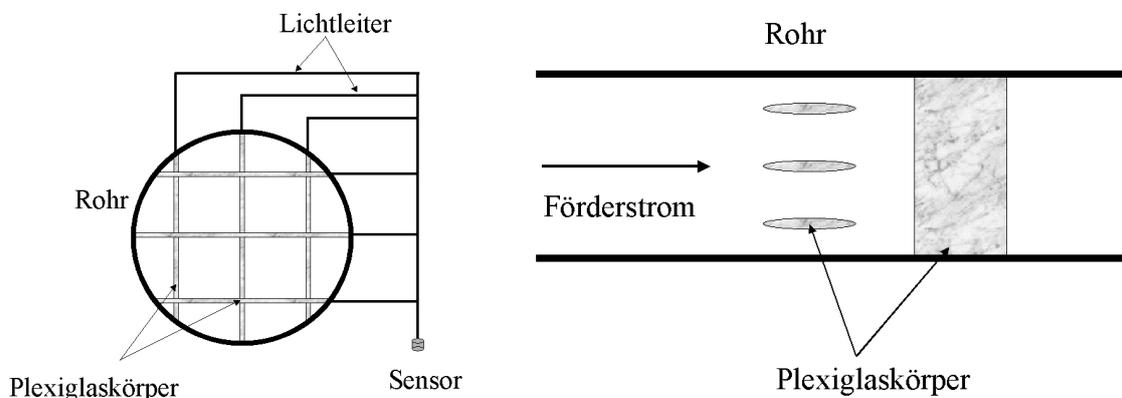


Abbildung 3.7: Prinzipische Skizze des Ansatzes „Strömungskörper mit Lichtleitern“.

Körper eindringen und an den Sensor weitergeleitet werden. Erste Versuche zeigten jedoch, dass diese Idee nicht praktikabel ist, weil die von warmen Körpern emittierte Strahlung im wesentlichen durch die Glaskörper hindurch tritt und nicht - wie erwartet - in diese einkoppelt und nach außen in Richtung der Lichtleiter weitergeleitet wird. Vorschläge, die Glaskörper halb zu verspiegeln oder mit Lichtleitern und optischen Elementen wie Linsen oder Prismen so zu bestücken, dass die Strahlung direkt durch die Lichtleiter aufgenommen wird, wurden wegen zu erwartender technischer Schwierigkeiten wieder verworfen.

### 3.3.1.2 Ansatz „Gitter aus Detektionskörpern“

Eine weitere Idee sah mehrere Infrarot-Sensoren vor, die so in Glasrohre mit strömungsgünstigem Querschnitt eingebaut werden sollten, dass sie in den Förderstrom „schauen“ (siehe Abbildung 3.8). Dabei sollten die Sensoren so angeordnet sein, dass ein passierendes Glimmnest einen Abstand von maximal 1 cm zum nächstliegenden Sensor haben kann. Für diese Anordnung benötigt man etwa 10 - 12 Sensoren wenn man ein Förderrohr mit einem Durchmesser von 80 mm zu Grunde legt. Das bedeutet einen relativ hohen Kostenaufwand auch bei Verwendung der preiswertesten IR-Sensoren. Neben diesem wirtschaftlichen Nachteil zeigte eine genauere Untersuchung weitere Schwächen dieser Idee auf: Die Abmessungen der Detektionskörper (bedingt durch die Abmessungen der Sensoren) wären größer geworden, als zunächst angenommen. Die Stelle der größten seitlichen Ausdehnung der Detektionskörper hätte mindestens 12 mm gemessen. Dies hätte einen relativ großen Strömungswiderstand in der Rohrleitung dargestellt. Ein weiteres Problem bei dieser Anordnung wäre die mangelnde Stabilität gewesen, denn die Detektionskörper hätten eine relativ große Angriffsfläche für das Förderprodukt und sämtliche darin befindlichen Teile geboten.

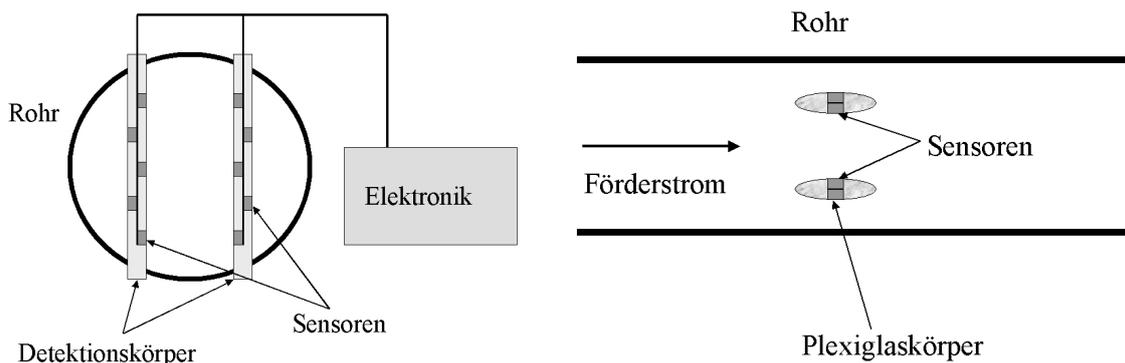


Abbildung 3.8: Prinzipskizze des Ansatzes „Gitter aus Detektionskörpern“.

### 3.3.1.3 Ansatz „Axialer Detektionskörper“

Aus den unter 3.3.1.1 und 3.3.1.2 beschriebenen Erfahrungen entstand die Idee eines einzigen Detektionskörpers, der axial im Förderrohr untergebracht wird. Die im De-

tektionskörper befindlichen Sensoren „schauen“ dabei in Richtung Rohrwand. Jeder Sensor ist zu seinem Nachbarn entsprechend dem Gesichtsfeld des Sensors versetzt, so dass eine vollständige Überwachung des Rohrrinnenraumes rund um den Detektionskörper gewährleistet ist (siehe Abbildung 3.9). Diese Anordnung bringt einige Vorteile: Die Strömungsrichtung steht nicht mehr senkrecht auf Glasoberflächen des Detektionskörpers, sondern ist parallel dazu orientiert. Direkte Schläge auf das Glas durch Fördergut oder in der Strömung mitgeführte Festkörper werden dadurch weitestgehend vermieden bzw. in ihrer Wirkung minimiert. Die Teile des Detektionskörpers, die der Strömung die größte Angriffsfläche bieten, bestehen aus Stahl und sind damit sehr robust. Weiterhin werden bei dieser Anordnung nur noch wenige Sensoren benötigt, um ein Rohr mit 80 mm Durchmesser komplett zu überwachen, was eine deutliche Kostenersparnis bedeutet. Der axial in der Rohrmitte angeordnete Detektionskörper besitzt einen, im Vergleich zu den Anordnungen der anderen Ansätze, relativ geringen Strömungswiderstand, was die nachfolgende Vergleichsrechnung zeigt. Dieser geringe Strömungswiderstand ist - besonders im Hinblick auf die Praxis - ein weiteres Vorteil dieses Ansatzes.

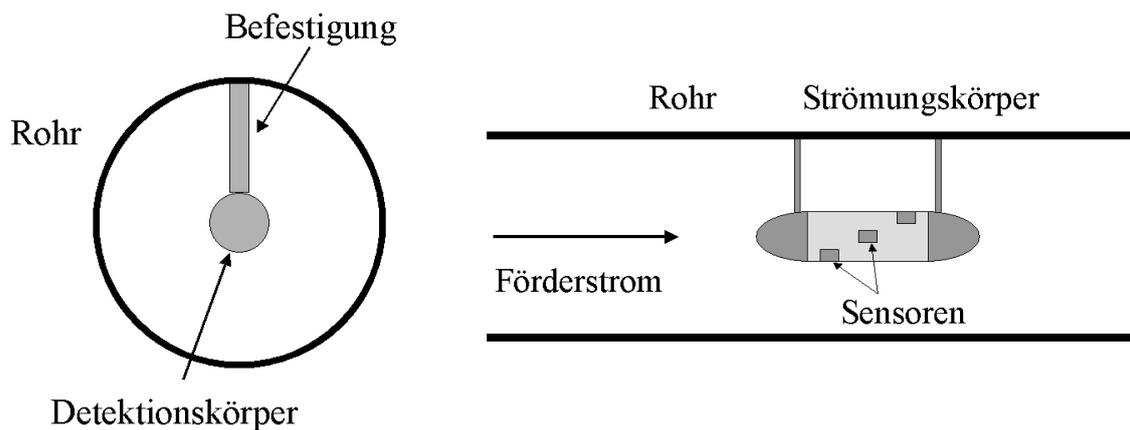


Abbildung 3.9: Prinzipskizze zum Ansatz „Axialer Detektionskörper“.

### 3.3.1.4 Strömungsmechanische Vergleichsrechnung zu den Ansätzen

Da die Beschreibung feststoffbeladener Strömungen<sup>2</sup> recht komplex ist und spezifische Werte des Feststoffes dafür erforderlich sind, soll im folgenden lediglich eine Luftströmung (ohne Feststoffbeladung) betrachtet werden. Man kann davon ausgehen, dass ein größerer Widerstandswert in Luft auch einen größeren Widerstandswert in der feststoffbeladenen Strömung bedeutet.

Die Ansätze „Strömungskörper mit Lichtleitern“ und „Gitter aus Detektionskörpern“ sind, vom strömungsmechanischen Gesichtspunkt aus betrachtet, nahezu identisch, so dass bei dieser Rechnung ein Vergleich der Ansätze „Gitter aus Detektionskörpern“ und „Axialer Detektionskörper“ ausreicht.

<sup>2</sup>Eine Beschreibung feststoffbeladener Strömungen sowie zum zusammengesetzten Druckverlust findet sich z. B. in [9] und [10].

Bedingungen:

Es herrsche der Umgebungsdruck von  $p = 1$  bar und die Lufttemperatur von  $T = 20$  °C. Die Luft umströmt die Strömungs- bzw. Detektionskörper mit einer Geschwindigkeit von  $v = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Dabei ergeben sich folgende Stoffwerte für Luft [5]:

- Luftdichte  $\rho = 1,188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- dynamische Viskosität  $\eta = 18,1 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$
- kinematische Viskosität  $\nu = 15,23 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Drei weitere Vereinfachungen sollen gelten:

- Die zwei Strömungskörper aus dem Ansatz „Gitter aus Detektionskörpern“ werden als zwei Kreiszyylinder mit einer Länge von  $l = 70$  mm und einem Durchmesser von  $D = 10$  mm angesehen. Weil die Strömungskörper bei diesem Ansatz breiter als 10 mm sind, ist diese Vereinfachung legitim.
- Der Strömungskörper aus Ansatz „Axialer Detektionskörper“ setzt sich zusammen aus einer umströmten Kugel ( $D = 20$  mm), einem überströmten Glaszylinder ( $l = 60$  mm,  $D = 20$  mm) und zwei umströmten Zylindern ( $l = 30$  mm,  $D = 8$  mm). Letztgenannte bilden die Aufhängung des Strömungskörpers.
- Die Strömungsgeschwindigkeit ändert sich am Ort der Strömungskörper nicht, d. h. das Rohr ist entsprechend aufgeweitet.

**3.3.1.4.1 Rechnung für den Ansatz „Gitter aus Detektionskörpern“**

Die Widerstandskraft  $F_W$ , die ein umströmter Körper der (schnellen) Strömung entgegengesetzt, kann nach Newton berechnet werden mit [11]:

$$F_W = \frac{1}{2} c_W \rho A v^2 \quad (3.1)$$

Um den  $c_W$ -Wert zu erhalten, wird die Reynolds-Zahl  $Re$  benötigt:

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,01 \text{ m}}{15,23 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1,31 \cdot 10^4 \quad (3.2)$$

In diesem Bereich der Reynolds-Zahl gilt für einen umströmten Zylinder  $c_W \approx 1,2$  [11]. Damit gilt für die zwei betrachteten Zylinder:

$$F_W = 1,2 \cdot 1,188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,07 \text{ m} \cdot 0,01 \text{ m}) \cdot 20^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 0,4 \text{ N} \quad (3.3)$$

Bei einer Fördergeschwindigkeit von  $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  beträgt der Strömungswiderstand der zwei Detektionskörper aus Ansatz „Gitter aus Detektionskörpern“ also circa 0,4 N.

### 3.3.1.4.2 Rechnung für den Ansatz „Axialer Detektionskörper“

Die Widerstandskraft, welche die umströmte Kugel und die beiden umströmten Zylinder der Strömung entgegensetzen, kann wie in Abschnitt 3.3.1.4.1 berechnet werden.

Widerstandskraft der Kugel:

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,02 \text{ m}}{15,23 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 2,62 \cdot 10^4 \quad (3.4)$$

In diesem Bereich der Reynolds-Zahl gilt für eine umströmte Kugel  $c_W \approx 0,45$  [11].

$$F_{W_K} = \frac{1}{2} \cdot 0,45 \cdot 1,188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (\pi \cdot 0,01^2 \text{ m}^2) \cdot 20^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 0,034 \text{ N} \quad (3.5)$$

Widerstandskraft der beiden Zylinder der Detektionskörperaufhängung:

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,008 \text{ m}}{15,23 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 1,05 \cdot 10^4 \quad (3.6)$$

Dieses Ergebnis liegt im gleichen Bereich wie bei (3.2), also gilt  $c_W = 1,2$ . Damit folgt für die zwei Zylinder der Aufhängung:

$$F_{W_A} = 1,2 \cdot 1,188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,008 \text{ m} \cdot 0,03 \text{ m}) \cdot 20^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 0,137 \text{ N} \quad (3.7)$$

Widerstandskraft des Glaszylinders:

Da die große Symmetrieachse des Glaszylinders parallel zur Strömungsrichtung angeordnet ist, kann er näherungsweise als tangential angeströmte Platte mit der Fläche  $l \cdot \pi D$  betrachtet werden. Für die Fläche dieser Platte  $A_P$  ergibt sich:

$$A_P = l \cdot \pi D = 0,06 \text{ m} \cdot \pi \cdot 0,02 \text{ m} = 0,00377 \text{ m}^2 \quad (3.8)$$

Als Reynolds-Zahl für eine Platte der Länge  $l$  und der Breite  $\pi D$  errechnet sich:

$$Re = \frac{v\pi D}{\nu} = \frac{20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,063 \text{ m}}{15,23 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 8,27 \cdot 10^4 \quad (3.9)$$

Die Wandrauheit von Glas liegt bei  $k_G = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$  [5]. Damit lässt sich der Quotient aus  $D$  und  $k_G$  bilden:

$$\frac{D}{k_G} = \frac{20 \text{ mm}}{0,005 \text{ mm}} = 4000 \quad (3.10)$$

Mit diesem Wert und der Reynolds-Zahl für die Platte kann man im Rohrreibungszahl-Reynolds-Zahl-Diagramm [11] erkennen, dass man sich im hydraulisch glatten Bereich befindet. In diesem Bereich gilt für Platten:

$$c_W = \frac{0,0745}{\sqrt[5]{Re}} = \frac{0,0745}{\sqrt[5]{82700}} = 0,0077 \quad (3.11)$$

Mit Gleichung (3.1) folgt daraus für  $F_{W_G}$ :

$$F_{W_G} = \frac{1}{2} \cdot 0,0077 \cdot 1,188 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,00377 \text{ m}^2 \cdot 20^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 0,007 \text{ N} \quad (3.12)$$

Dies ergibt eine Gesamtwiderstandskraft von:

$$F_W = F_{W_K} + F_{W_A} + F_{W_G} = (0,034 + 0,137 + 0,007) \text{ N} = 0,178 \text{ N} \quad (3.13)$$

Bei einer Fördergeschwindigkeit von  $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  beträgt der Strömungswiderstand des Detektionskörpers (mitsamt seiner Aufhängung) aus Ansatz „Axialer Detektionskörper“ etwa 0,178 N. Dieser ist damit nicht halb so groß wie der Strömungswiderstand des Ansatzes „Gitter aus Detektionskörpern“.

### 3.3.2 Realisierung der mechanischen Komponenten

Aufgrund der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Vorteile wurde der Ansatz „Axialer Detektionskörper“ für das aufzubauende Glimmnesterkennungssystem ausgewählt. Wie in Abbildung 3.9 angedeutet, befindet sich der Detektionskörper dabei in der Mitte der Förderleitung. Der Durchmesser des Detektionskörpers ist dem des Förderrohres so angepasst, dass der Abstand zwischen der Wandung des Förderrohres und dem äußeren Rand des Detektionskörpers etwa 30 mm beträgt. Dies hat zur Folge, dass ein vorbei fliegendes Glimmnest einen geringen Abstand zum nächstliegenden Sensor hat. Um einen Rückstau des Förderproduktes durch den Einbau des Detektionskörpers zu vermeiden, ist die Förderleitung an der Stelle des Detektionskörpers so aufgeweitet, dass die Querschnittsfläche des ursprünglichen Förderrohres erhalten bleibt (siehe Abbildungen 3.10 und 3.11).

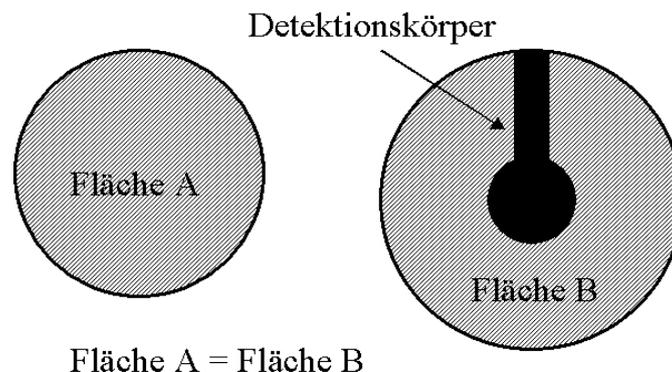


Abbildung 3.10: Freier Querschnitt durch das Förderrohr mit und ohne Detektionskörper.

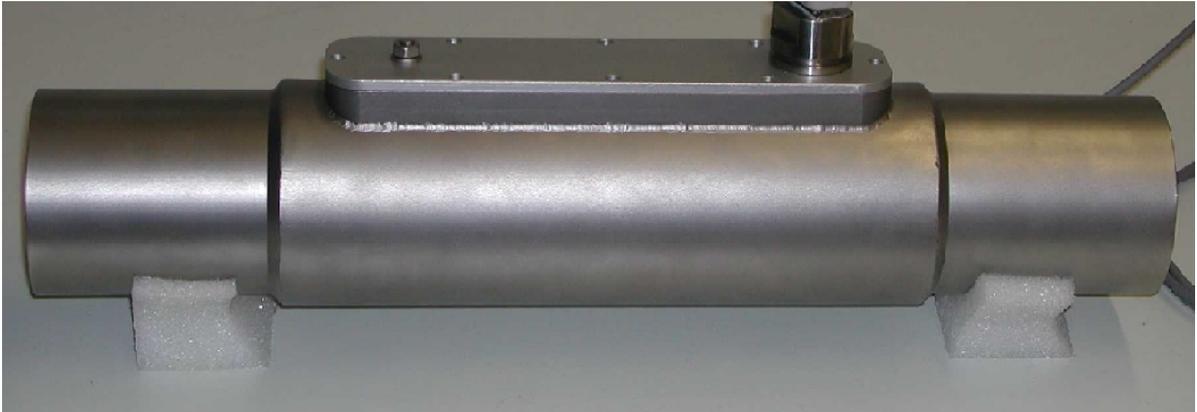


Abbildung 3.11: Erweitertes Rohrstück mit integriertem Detektionskörper.

Der Detektionskörper selbst ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Man erkennt, dass der Detektionskörper mittels zweier Befestigungen fest mit der Rohrwand verbunden ist. Beide Befestigungen dienen dazu, den Detektionskörper stabil in der Rohrmitte zu halten. Die hintere Befestigung (strömungsabgewandte Seite) ist hohl. In ihr befinden sich die elektrischen Leitungen für den Betrieb der Sensoren. Zwischen den beiden Befestigungen des Detektionskörpers ist ein Glaszylinder untergebracht. Werden die Verschraubungen der Befestigungen angezogen, so wird die feuerpolierte Stirnfläche des Glaszylinders über O-Ringe an die Befestigungen gedrückt. Auf diese Weise wird der Glaszylinder sicher fixiert und es kann kein Staub in das Innere des Detektionskörpers gelangen. Eine detaillierte Konstruktionszeichnung des Detektionskörpers befindet sich im Anhang B.



Abbildung 3.12: Fertig aufgebauter Detektionskörper montiert an seiner Aufhängung (Befestigung). Links in der Abbildung ist die vordere Befestigung des Detektionskörpers zu sehen, rechts die hintere Befestigung.

Im Innern des Detektionskörpers befinden sich sechs Sensoren. Die Sensoren sind so in eine Metallhülse ( $D = 20 \text{ mm}$ ) eingebaut, dass sie senkrecht nach außen zur Rohrwand „schauen“. Jeder Sensor ist zu seinem Nachbarn um  $60^\circ$  versetzt, so dass eine vollständige Überwachung des für den Produktstrom verbleibenden Raumes zwischen Detektionskörper und Rohrwand gewährleistet ist. Da sich ein Einbau der Sensoren in eine geschlossene Metallhülse als äußerst schwierig erwies, lässt sich die Hülse in zwei Teile zerlegen. Die beiden Teile sind aus montagetechnischen Gründen unsymmetrisch aufgebaut. Bei der Montage werden sie durch zwei passgenaue Metallringe zusammengehalten. Die komplette Metallhülse mit den Sensoren wird mittels Distanzscheiben zwischen den beiden Befestigungen des Detektionskörpers gelagert. Abbildung 3.13 zeigt eine geteilte und eine zusammengesetzte Metallhülse. Weiterhin ist ein Sensor, ein Glaszylinder sowie ein Zentimetermaßstab zum Größenvergleich zu sehen. Um die Anzahl der in den Detektionskörper herein zu führenden elektrischen Leitungen so gering wie möglich zu halten, befinden sich die benötigten Widerstände (siehe Abbildung 3.1) ebenfalls im Innern der Metallhülse (siehe Abbildung 3.14). Die in Abbildung 3.14 zu sehenden Kondensatoren dienen der Glättung der BIAS-Spannung, die für den Sensorbetrieb notwendig ist.



Abbildung 3.13: Die Metallhülse für die Sensoren (zerlegt und zusammengesetzt), einer der Sensoren und einer der verwendeten Glaszylinder.

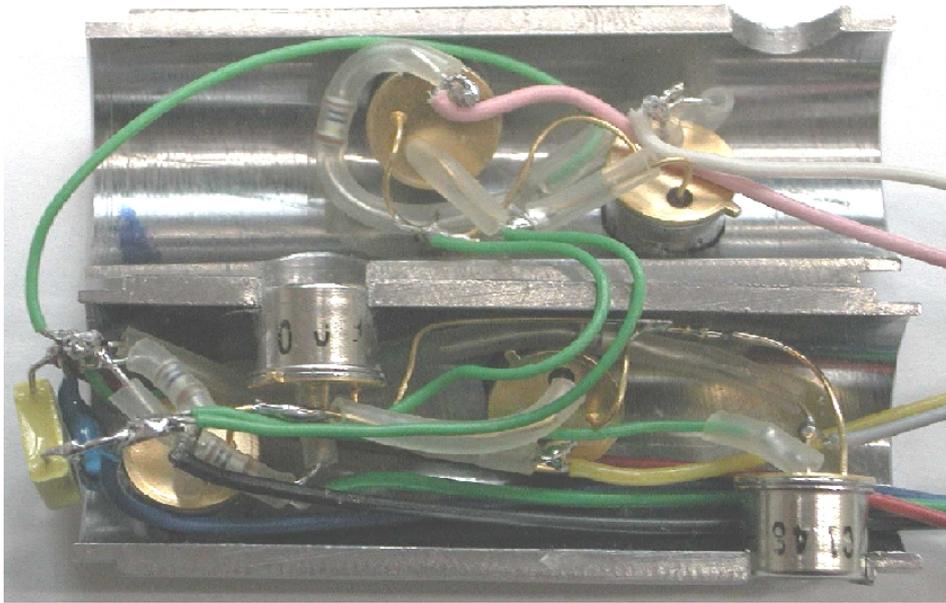


Abbildung 3.14: In die Metallhülse integrierte und verschaltete PbSe-Sensoren.

## 3.4 Aufbau der Elektronik

### 3.4.1 Grundschialtung

Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, werden die Sensoren mit einer konstanten Vorspannung (BIAS) betrieben. Die Spannungsänderung aufgrund der Widerstandsänderung beim Auftreffen von Strahlung wird verstärkt und gemessen. Abbildung 3.1 zeigt die Grundschialtung für einen der verwendeten Sensoren. Ein Sensor stellt einen sich ändernden ohmschen Widerstand dar. Der Sensor ist mit einem ohmschen Widerstand ( $1\text{ M}\Omega$ ) so in Reihe geschaltet, dass eine Widerstandsänderung des Sensors einen Spannungsabfall zwischen diesem Widerstand und dem Sensor hervorruft. Diese Spannungsänderung ist das Nutzsignal. Damit das vom Sensor kommende Spannungssignal verstärkt werden kann, muss das Signal von der BIAS-Spannung getrennt werden. Dies wird mit einem Kondensator am Verstärkereingang bewerkstelligt.

### 3.4.2 Schaltung im Detektionskörper

In Abschnitt 3.3.2 wurde bereits erwähnt, dass sich ein Teil der Schaltung im Innern der Metallhülse befindet. Dieser Schaltungsteil ist in Abbildung 3.15 dargestellt.

Jedem der sechs Sensoren (S 1 - 6) ist ein Widerstand von  $1\text{ M}\Omega$  vorgeschaltet. Die Gehäusemasse der Sensoren und der Minus-Pol sind miteinander verbunden ( $0\text{ V}$ ). Das Signal von jedem Sensor wird zwischen dem jeweiligen Sensor und dem dazugehörigen Widerstand abgegriffen und aus der Metallhülse zum jeweiligen Vorverstärker herausgeführt. Die beiden parallel geschalteten Kondensatoren ( $22\text{ nF}$ ,  $220\text{ pF}$ ) sollen eventuell auftretende Schwankungen in der Vorspannung ausgleichen.

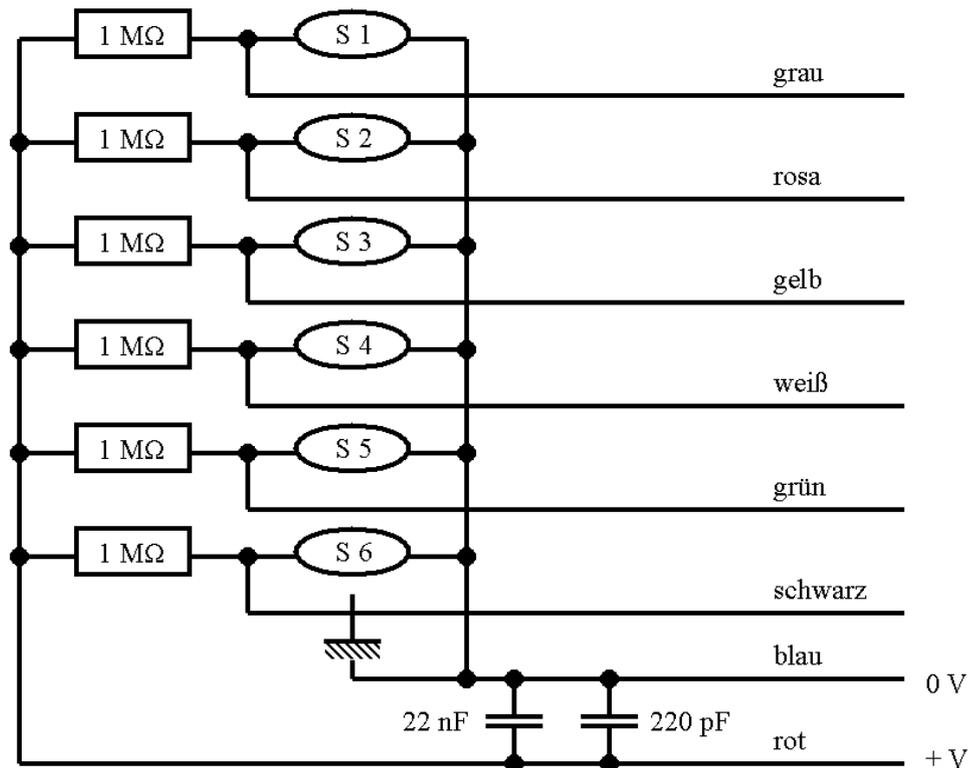


Abbildung 3.15: Sensorschaltung im Detektionskörper.

### 3.4.3 Verstärkerschaltung

#### 3.4.3.1 Allgemeines

Da die Signale der Sensoren sehr klein ( $< 1\text{ mV}$ ) sind, wird ein geeigneter Messverstärker benötigt. Die typischen Anforderungen für einen Messverstärker sind:

- geringe Rückwirkung auf die Messgröße (das Messsignal sollte durch die Messung nicht verändert werden)
- hohes Auflösungsvermögen (Signale nahe der theoretischen Nachweisgrenze sollten noch erkennbar sein)
- definiertes Übertragungsverhalten (eindeutige Abhängigkeit zwischen Eingangssignal und Ausgangssignal)
- gutes dynamisches Verhalten (schnelle Reaktion auf das Eingangssignal)
- eingprägtes Ausgangssignal (keine Veränderung des Ausgangssignals durch Belastung)

Als Vorlage für die Verstärkerschaltung wurde die Schaltung verwendet, die bereits im Prototypen aus dem Vorgänger-Projekt (siehe Kapitel 1.2) eingesetzt wurde.

### 3.4.3.2 Versuch zur Optimierung der Verstärkerschaltung

Um den zeitlichen und materiellen Aufwand für die Elektronik möglichst gering zu halten, sollte untersucht werden, ob die Sensorsignale parallel auf den Eingang eines einzigen Verstärkers geführt werden können, d. h. ob sich die Sensorsignale bei Parallelschaltung der Sensoren bei gewissen geometrischen Anordnungen der Sensoren gegenseitig negativ beeinflussen können. Hierzu wurde mit dem aus dem Vorgänger-Projekt vorhandenen Prototypen nachfolgend beschriebener Versuch durchgeführt.

#### 3.4.3.2.1 Versuchsaufbau und -gang

Zwei PbS-Sensoren, die sich in Metallröhrchen befinden, werden auf einer Achse so übereinander angeordnet, dass beide Sensoren auf die warme Oberfläche eines geschwärzten Kupferblocks ausgerichtet sind. Zwischen den Sensoren und dem Kupferblock befindet sich ein Chopper. Die Versuche werden bei einer konstanten Temperatur des Kupferblocks durchgeführt. Um Ergebnisverfälschungen ausschließen zu können, finden die Versuche unter Ausschluss störender Fremdstrahlungsquellen (z. B. Licht) statt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.16 schematisch dargestellt.

Zunächst werden die Verstärkersignale bei Einzelbetrieb der PbS-Sensoren am Oszilloskop abgelesen. Die Sensoren (bzw. der Verstärker) liefern wellenförmige Signale mit positiver und negativer Amplitude, weshalb die Differenz zwischen beiden Spitzenwerten ( $U_{SS}$ ) abgelesen wird. Anschließend werden beide PbS-Sensoren parallel an den Verstärker angeschlossen und das Verstärkersignal in gleicher Weise abgelesen. Danach werden die gemessenen Spannungsdifferenzen verglichen. Nach Veränderung des Abstands zwischen den beiden PbS-Sensoren wird die Messung wiederholt.

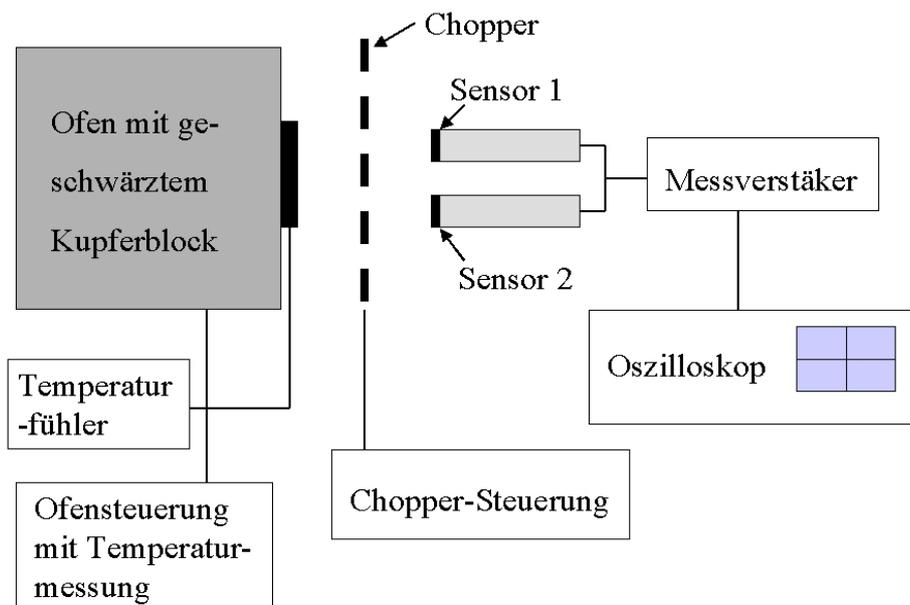


Abbildung 3.16: Versuchsaufbau zur Ermittlung eines Verstärkersignals, an dessen Eingang zwei PbS-Sensoren parallel geschaltet sind.

### 3.4.3.2 Versuchsergebnisse

Die Temperatur der Kupferblock-Oberfläche betrug  $T_{\text{Cu-Block}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die gemessene Amplituden-Spannungsdifferenz am Verstärkerausgang bei Einzelbetrieb der PbS-Sensoren ergab:  $U_{\text{SS}_1} = 5,6 \text{ mV}$ ,  $U_{\text{SS}_2} = 3,5 \text{ mV}$ . Der Höhenunterschied dieser Werte liegt in den unterschiedlich großen aktiven Flächen der Sensoren und der damit verbundenen unterschiedlichen Empfindlichkeit begründet.

In Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zusammengestellt, bei denen die beiden PbS-Sensoren parallel an den Verstärkereingang geschaltet waren.

Abstand [mm]	$U_{\text{SS}}$ [mV]
5	5,3
10	5
15	3,5

Tabelle 3.2: Am Verstärkerausgang gemessene Signalhöhen bei Parallelschaltung zweier PbS-Sensoren am Verstärkereingang. Der Abstand zwischen den Sensoren wurde variiert.

#### Fazit:

Aus den tabellierten Daten ersieht man, dass das kombinierte Signal zweier Sensoren, die einen gewissen räumlichen Abstand voneinander haben, kleiner ist, als das einzelne Signal des empfindlicheren Sensors. Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass sich unter Umständen die positive Amplitude des einen und die negative Amplitude des anderen Sensors gegenseitig teilweise eliminieren. Um diesen Effekt zu umgehen, müssten die Signale gleichgerichtet werden, bevor sie addiert werden. Die Gleichrichtung erfolgt üblicherweise über Dioden. Diese benötigen eine gewisse Schwellenspannung bevor der Durchlassstrom fließen kann. Da die Sensorsignale weit unter dieser benötigten Schwellenspannung liegen, können die unverstärkten Sensorsignale nicht gleichgerichtet werden. Dies bedeutet, dass jeder Sensor einen eigenen Messverstärker benötigt, was Vor- und Nachteile mit sich bringt: Der Nachteil hierbei ist der große elektronische Aufwand, der zu betreiben ist. Der Vorteil von sechs getrennten Verstärkern besteht darin, dass jedes Sensorsignal einzeln weiterverarbeitet werden kann. Die Signale können unter anderem einem Computer zugeführt werden. Dieser kann beispielsweise durch ein Vergleichsprogramm feststellen, ob es sich tatsächlich um ein Signal oder um eine Fehlauflösung handelt. Diese Optionen stehen bei zukünftigen Experimenten mit dem Glimmnestdetektionssystem zur Verfügung. Im Rahmen dieser Diplomarbeit beschränkte man sich darauf, die Verstärkersignale einer relativ einfachen Auswertelogik zuzuführen. Mit Hilfe dieser Logik kann man erkennen, welcher der sechs Sensoren angesprochen hat.

### 3.4.3.3 Verstärkeraufbau

Die aufgebaute Verstärkerschaltung besteht aus zwei Stufen, dem Vorverstärker und der eigentlichen Verstärkerschaltung mit veränderbarem Verstärkungsfaktor. Der ursprüngliche Entwurf sah vor, die komplette Elektronik, also auch beide Verstärker-

stufen, in einem geschirmten Metallgehäuse unterzubringen („Elektronikbox“). Erste Laborversuche mit der fertigen Elektronik zeigten jedoch, dass das mehradrige Kabel, welches die Sensorsignale zur Elektronikbox leiten sollte, trotz Abschirmung extrem empfindlich auf Berührungen reagierte. Diese Empfindlichkeit liegt in der Hochohmigkeit der Schaltung vor dem Vorverstärker begründet. Kleinste Abstandsänderungen der elektrischen Leitungen untereinander führen zu entsprechenden Kapazitätsänderungen, was sich wegen der Hochohmigkeit der Schaltung als Störsignal bemerkbar macht. Um dieses Problem zu lösen, müssen die elektrischen Leitungen zwischen Signalabgriff und Vorverstärkereingang möglichst kurz gehalten werden. Deshalb wurde die aus sechs einzelnen Verstärkern bestehende Vorverstärkerschaltung in einem kleinen Gehäuse direkt an der Aufhängung des Detektionskörpers untergebracht (siehe Abbildung 3.17). Die bereits fertig gestellten Vorverstärker innerhalb der Elektronikbox wurden überbrückt.

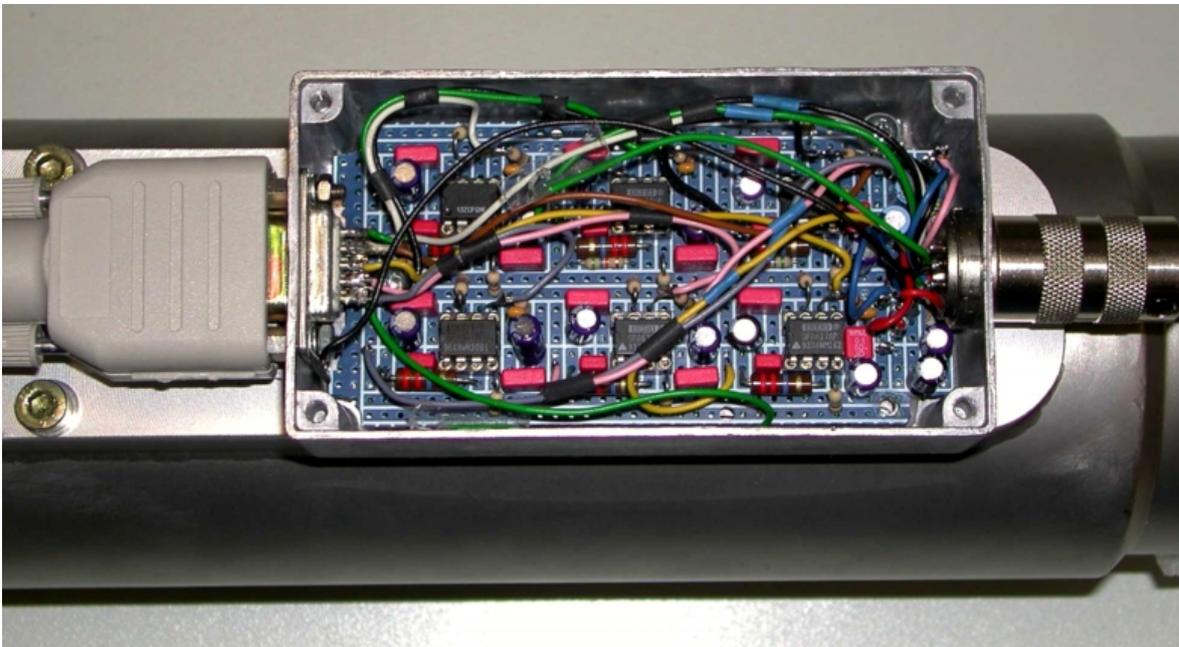


Abbildung 3.17: Vorverstärkerschaltung auf der Aufhängung des Detektionskörpers. Die Schaltung enthält sechs Einzelverstärker, jeweils einen pro Sensor.

#### 3.4.3.3.1 Vorverstärker

Der Vorverstärker besteht aus sechs einzelnen nicht-invertierenden Verstärkern (sechs Verstärkerkanäle). Der Schaltplan einer dieser Verstärker ist in Abbildung 3.18 zu sehen. Der Kondensator am Eingang des Verstärkers bewirkt, dass nur Spannungsänderungen verstärkt werden bzw. die BIAS-Spannung vom Sensorsignal getrennt wird (wie bereits in 3.3.1 beschrieben). Zur Verstärkung sehr kleiner Spannungen werden rauscharme Operationsverstärker benötigt, da die zweite Verstärkerstufe das Rauschen mit verstärkt. Der im Vorverstärker verwendete Operationsverstärker OPA 627 ist solch ein rauscharmer Operationsverstärker (Eingangsrauschspannung von lediglich  $0,1 \mu\text{V} - 0,3 \mu\text{V}$ ) [13]. Der Verstärkungsgrad des Vorverstärkers lässt sich, wie in Gleichung (3.14)

gezeigt, aus dem Verhältnis der Widerstände im Gegenkopplungszweig berechnen. Die verwendete Vorverstärkerschaltung verdreifacht die Eingangssignale.

$$a = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{(47 + 3,3) \text{ k}\Omega} = 3 \quad (3.14)$$

Die Versorgungsspannung des Operationsverstärkers ( $\pm 15 \text{ V}$ ) wird über einen Tiefpaß von hochfrequenten Störungen befreit.

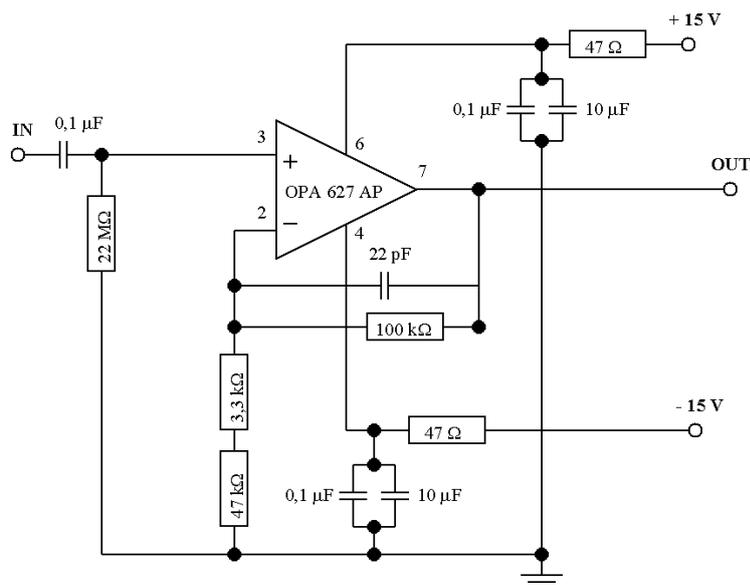


Abbildung 3.18: Schaltplan des verwendeten Vorverstärkers.

### 3.4.3.3.2 Verstärker und Komparator

Die sechs Ausgangssignale der Vorverstärkerschaltung werden auf die eigentliche Verstärkerschaltung gegeben. Diese Verstärkerschaltung setzt sich aus sechs invertierenden Verstärkern zusammen. Für die Verstärkerschaltung wurde der Präzisions-Operationsverstärker LT 1028 verwendet. Die Verstärkung kann an  $10 \text{ k}\Omega$ -Präzisions-Potentiometern verändert werden (siehe Abbildung 3.24 und Tabelle 3.3). Am Ausgang eines einzelnen Verstärkers durchläuft das Signal einen Hochpass und wird anschließend durch eine Diode von seinen negativen Anteilen befreit. Schließlich wird das Signal auf eine Komparatorschaltung gegeben. Diese Schaltung wurde mit dem präzisen, aber preiswerten Standard-Operationsverstärker OP 07E realisiert [13]. Die Ansprechschwelle des Komparators kann mit Hilfe des  $10 \text{ k}\Omega$ -Potentiometers von  $0 \text{ mV}$  -  $140 \text{ mV}$  variiert werden. Beim Überschreiten dieser Triggerschwellenspannung gibt der Komparator einen etwa  $14 \text{ V}$  hohen Rechteckimpuls ab, dessen Dauer mit der Dauer der Schwellenüberschreitung übereinstimmt. Die Ausgänge der sechs Verstärker/Komparator-Einheiten werden auf eine anzeigende Logik gegeben. Abbildung 3.19 zeigt den Schaltplan eines der sechs Verstärker und Komparatoren. Abbildung 3.20 zeigt die sechs Schaltungen, verteilt auf zwei Platinen.

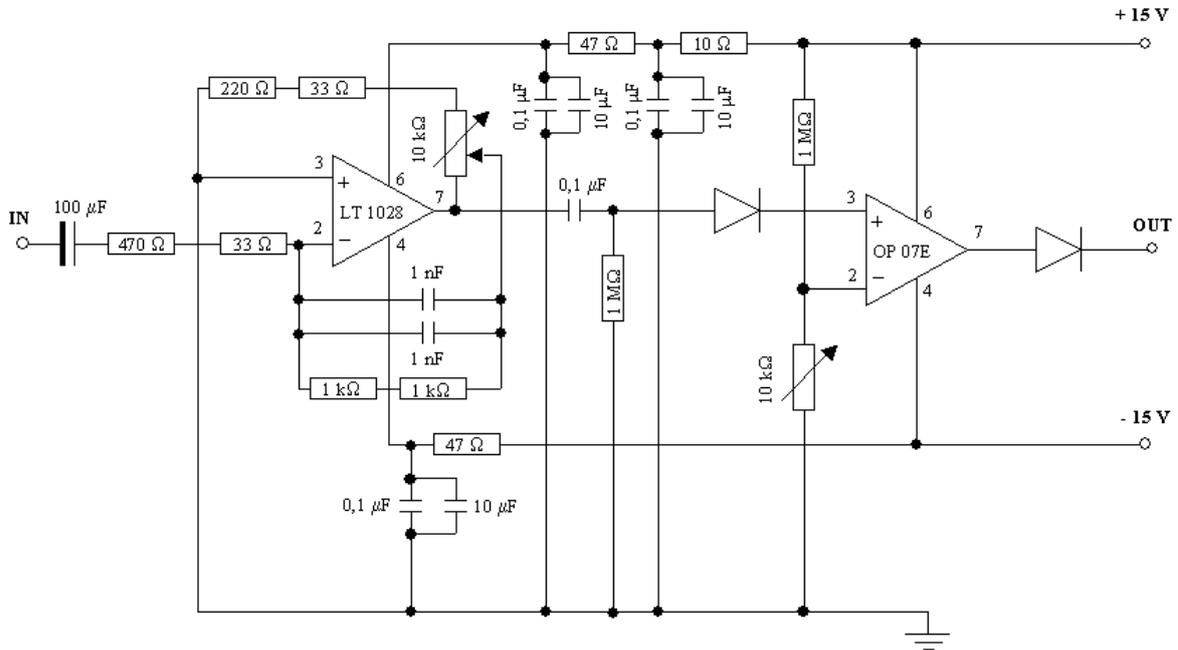


Abbildung 3.19: Schaltplan von Verstärker und Komparator

Da sich die Verstärkungen der einzelnen Verstärkerstufen nicht ohne weiteres berechnen lassen, wurden diese im Labor ermittelt. Das Signal eines Frequenzgenerators wurde sukzessiv auf den Eingang der Vorverstärker gegeben und das Ausgangssignal nach dem zugehörigen Hauptverstärker bei unterschiedlichen Stellungen des Präzisions-Potentiometers abgegriffen und auf dem Oszilloskop angezeigt. Die ermittelten Werte für die Gesamtverstärkung der einzelnen Verstärkerkanäle befinden sich in Tabelle 3.3. Unterschiede im Verstärkungsfaktor der sechs baugleichen Verstärkerkanäle konnten im Rahmen der Messgenauigkeit nicht nachgewiesen werden.

Anzeige am Präzisions-Potentiometer	Gesamtverstärkungsfaktor
10	ca. 600
9,8	ca. 350
9,5	ca. 240
9,0	ca. 160
8	ca. 110
7	ca. 80
6	ca. 65
5	ca. 50

Tabelle 3.3: Gesamtverstärkungsfaktor eines der sechs Verstärkerkanäle bei unterschiedlichen Stellungen des entsprechenden Präzisions-Potentiometers.

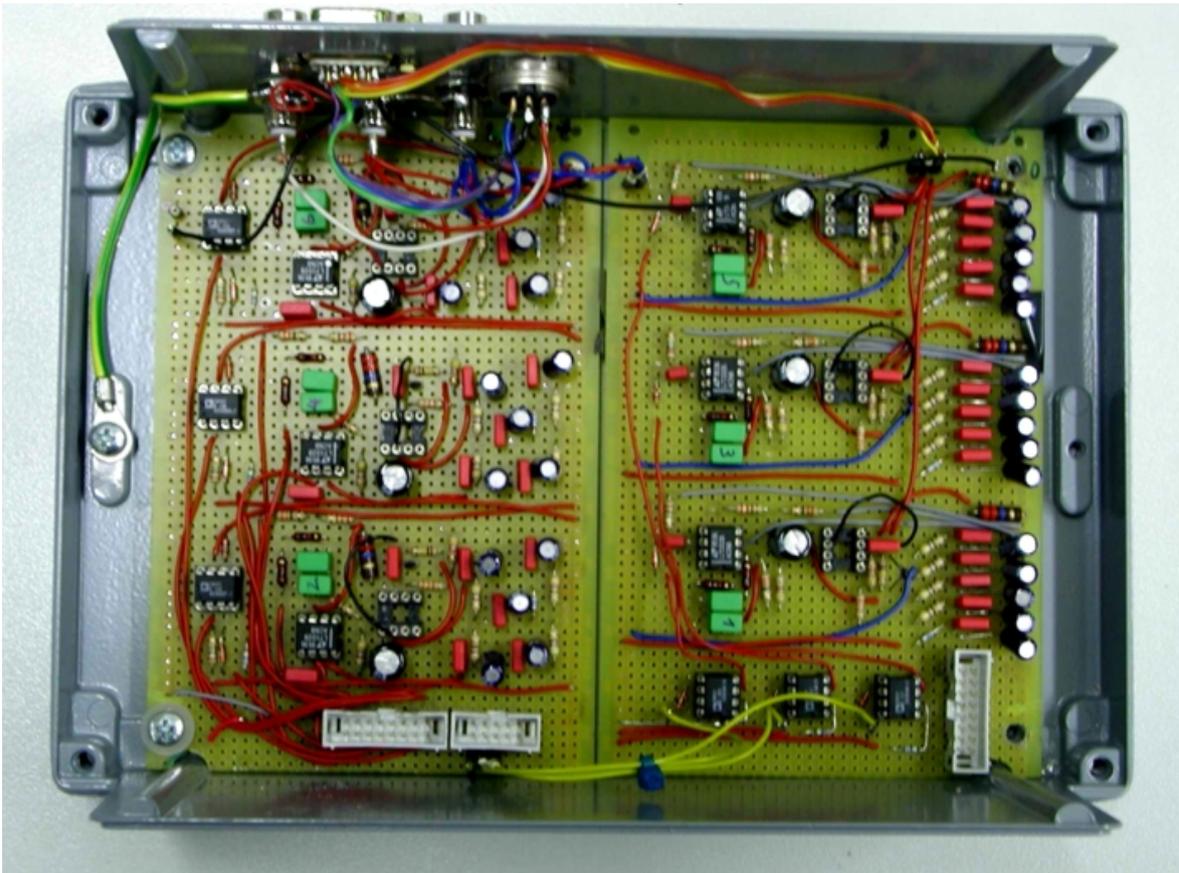


Abbildung 3.20: Platinen mit Verstärker- und Komparatorschaltung.

### 3.4.4 Anzeigende Logik

Die Ausgangssignale der sechs Komparatorschaltungen werden auf die sechs Eingänge einer Logikschaltung geführt, die sich im gleichen Metallgehäuse befindet. Auf der Oberseite des Elektronikgehäuses sind sieben Leuchtdioden (LEDs) integriert. Jedem Sensor ist eine rote LED zugeordnet. Diese sechs LEDs sind, entsprechend der räumlichen Orientierung der Sensoren im Rohr, kreisförmig angeordnet und durchnummeriert (vergleiche Abbildung 4.2). Weiterhin befindet sich in der Mitte der sechs roten LEDs eine gelbe LED (siehe auch Abbildung 3.24).

Liefert die Verstärker/Komparatorschaltung eines Sensors einen Rechteckimpuls, so leuchtet die gelbe LED in der Mitte auf. Die gelbe LED zeigt an, dass einer oder mehrere der Sensoren angesprochen haben bzw. die Triggerschwellen der zugehörigen Komparatoren überschritten wurden. Da das vom Komparator kommende Rechtecksignal sehr kurz sein kann, so dass das Aufleuchten der gelben LED nur schwer oder gar nicht beobachtet werden kann, befindet sich in der Schaltung ein  $1\text{ M}\Omega$  Widerstand parallel zu einem  $0,47\text{ }\mu\text{F}$  Kondensator (siehe Abbildung 3.22). Diese Schaltung bewirkt, dass die gelbe LED unabhängig von der Signaldauer für ca. 0,5 Sekunden aufleuchtet.

Die roten LEDs leuchten bei einem Komparator-Rechtecksignal des entsprechenden Sensors auf und erlöschen erst bei Betätigung der Reset-Taste. Anhand der roten LEDs kann man erkennen, wo im Rohr ein Objekt detektiert wurde. Der Schaltplan der anzeigenden Logik ist in Abbildung 3.22 auf der folgenden Seite dargestellt. Abbildung 3.21 zeigt das offene Metallgehäuse mit der kompletten Elektronik (Verstärker, Komparator, anzeigende Logik). Auf dem Bild ist links über der Verstärkerplatine eine blaue Platine zu sehen. Auf dieser befindet sich die Schaltung für die anzeigende Logik.



Abbildung 3.21: Offenes Metallgehäuse mit Verstärker- und Logikschaltung.

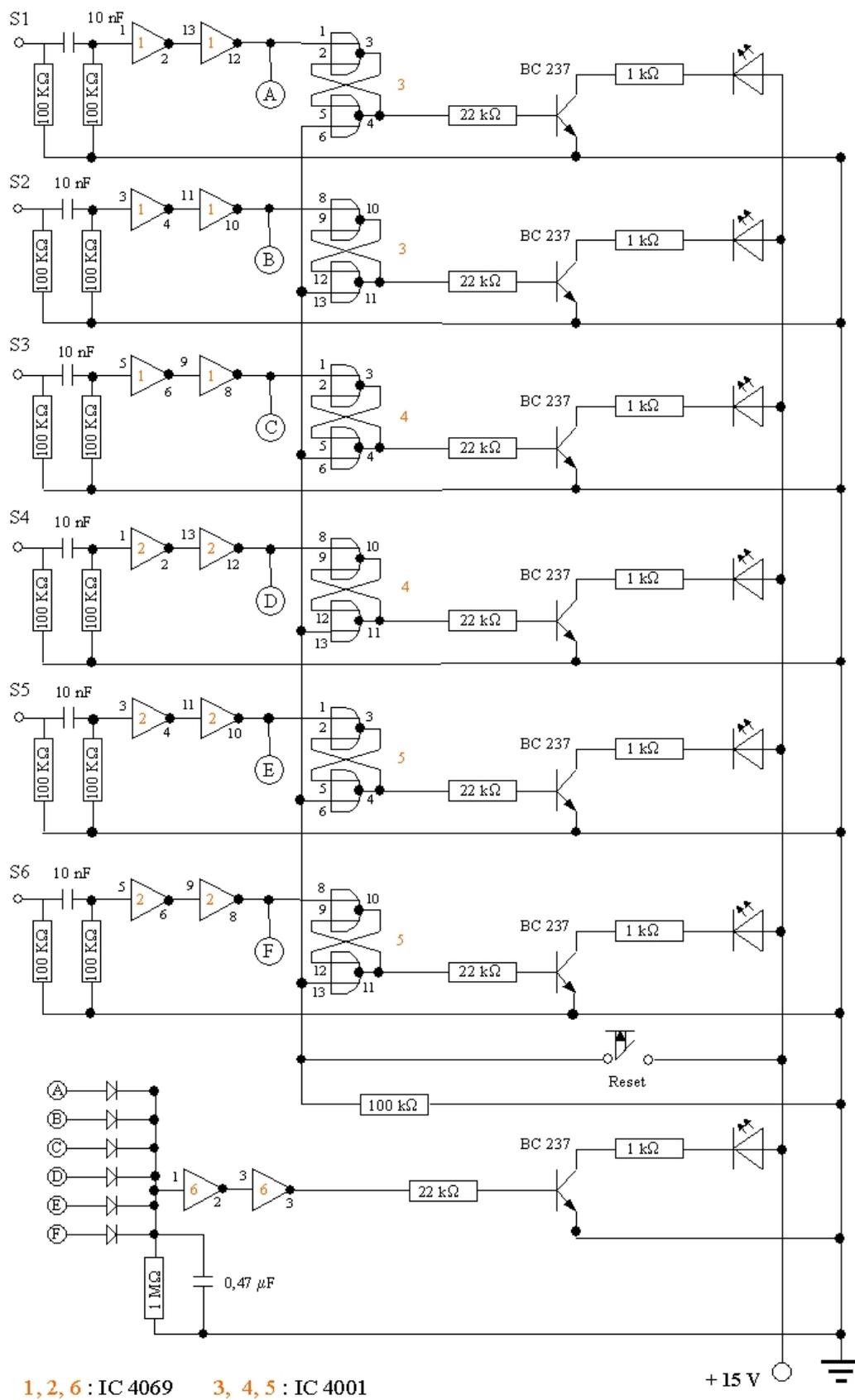


Abbildung 3.22: Schaltplan der anzeigenden Logik.

### 3.4.5 Versorgungsspannungen

#### 3.4.5.1 Versorgungsspannung für die Verstärker

Alle Operationsverstärker, die in der Schaltung eingesetzt werden, benötigen eine Betriebsspannung von  $\pm 15$  V. Um eine Verfälschung der Signale zu vermeiden, sollten diese Spannungen sehr „glatt“ sein. Die Spannungen werden durch die Versorgung aus Abbildung 3.23 bereitgestellt. Die Netzspannung wird auf 18 V transformiert, positiv und negativ gleichgerichtet sowie durch zwei Elektrolytkondensatoren geglättet. Die beiden Spannungsregler LM 317 und LM 337 dienen der Einstellung (regelbar an den 100  $\Omega$ -Potentiometern) und Stabilisierung der Ausgangsspannungen auf exakt  $\pm 15$  V. Abschließend werden die Gleichspannungen nochmals durch zwei Tiefpässe geglättet [4].

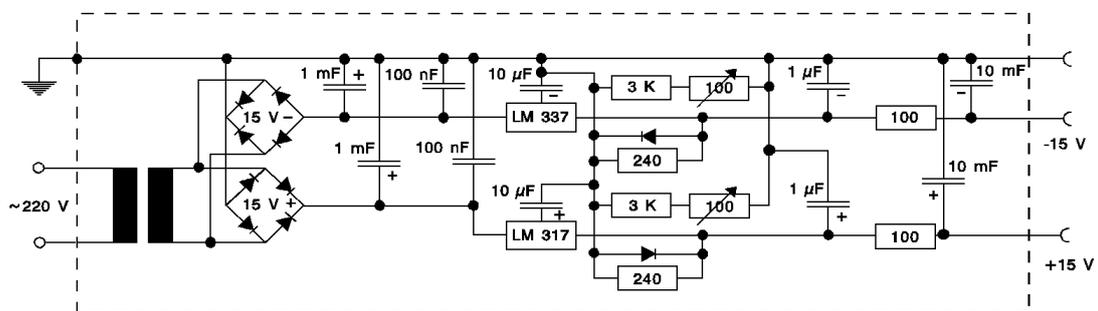


Abbildung 3.23: Schaltplan der Versorgungsspannung für die Verstärker- und Logikschaltung.

#### 3.4.5.2 Versorgungsspannung für die anzeigende Logik

Die Bausteine in der Schaltung der anzeigenden Logik benötigen eine Versorgungsspannung von +15 V. Zunächst sollten diese 15 V von der oben beschriebenen Spannungsquelle bereitgestellt werden. Versuche im Labor zeigten jedoch, dass das Aufleuchten mehrerer LEDs eine Schwankung in der Versorgungsspannung bewirken kann, was wiederum zu Fehlauflösungen des gesamten Systems führen kann. Um dies zu vermeiden, wird die Spannung für die anzeigende Logik von einem gewöhnlichen Labornetzgerät bereitgestellt.

#### 3.4.5.3 Vorspannung für die Sensoren

Die Vorspannung für die Sensoren sollte extrem glatt sein. Je nach benötigter Vorspannung für die beiden verschiedenen Sensortypen wird eine entsprechende Anzahl handelsüblicher 9 V-Blöcke in Reihe geschaltet und in einem Metallgehäuse mit BNC-Stecker untergebracht. Für die PbS-Sensoren werden neun ( $\approx 81$  V) und für die PbSe-Sensoren sieben ( $\approx 63$  V) solcher Blöcke benutzt. Um eventuellen Spannungsschwankungen entgegenzuwirken, befindet sich ein 100  $\mu$ F-Kondensator zwischen Plus- und Minuspol am Ende der Reihenschaltung.

### 3.4.6 Realisierung der Elektronik

Bis auf den Vorverstärker (Abschnitt 3.4.3.3.1) und die Spannungsversorgungen (Abschnitt 3.4.5) ist die gesamte Elektronik des Glimmnestdetektionssystems in einem einzigen Metallgehäuse untergebracht. Der Aufbau dieser „Elektronikbox“ wird hier kurz beschrieben.

Auf der Rückseite des Gehäuses befinden sich sechs Anschlüsse. Vier BNC-Buchsen dienen zum Anschluss der in Kapitel 3.4.5 beschriebenen Versorgungsspannungen. Ein D-Sub-Anschluss dient der Übertragung der Signale vom Vorverstärker zur Elektronikbox. Über einen runden, 5-poligen Anschluss werden die Versorgungsspannungen für die Operationsverstärker und die Sensoren an die Vorverstärkerbox geleitet.

Abbildung 3.24 zeigt die Oberseite der Elektronikbox. Rechts auf der Oberseite befinden sich die in Abschnitt 3.4.4 beschriebenen Leuchtdioden und der Reset-Knopf zum Zurücksetzen der Anzeige. Links sind die sechs Präzisions-Potentiometer zur Regelung des Verstärkungsfaktors sowie die sechs Trimm-Potentiometer zur Veränderung der Triggerschwelle zu sehen. In der Mitte der Gehäuseoberseite befinden sich zwei BNC-Buchsen. An der (in der Abbildung) oberen Buchse kann jeweils eines der sechs Verstärkersignale abgegriffen werden. Die untere Buchse dient dem Abgriff der Triggerschwellenspannung. Welcher der sechs Verstärkerausgänge gerade an der BNC-Buchse für den Abgriff des Verstärkersignals anliegt, hängt von der Stellung des oberen Dreh Schalters in Abbildung 3.24 ab. Analog dazu dient der untere Drehknopf in der Abbildung der Auswahl einer der sechs Triggerschwellenspannungen, die über die entsprechende BNC-Buchse gemessen werden soll.

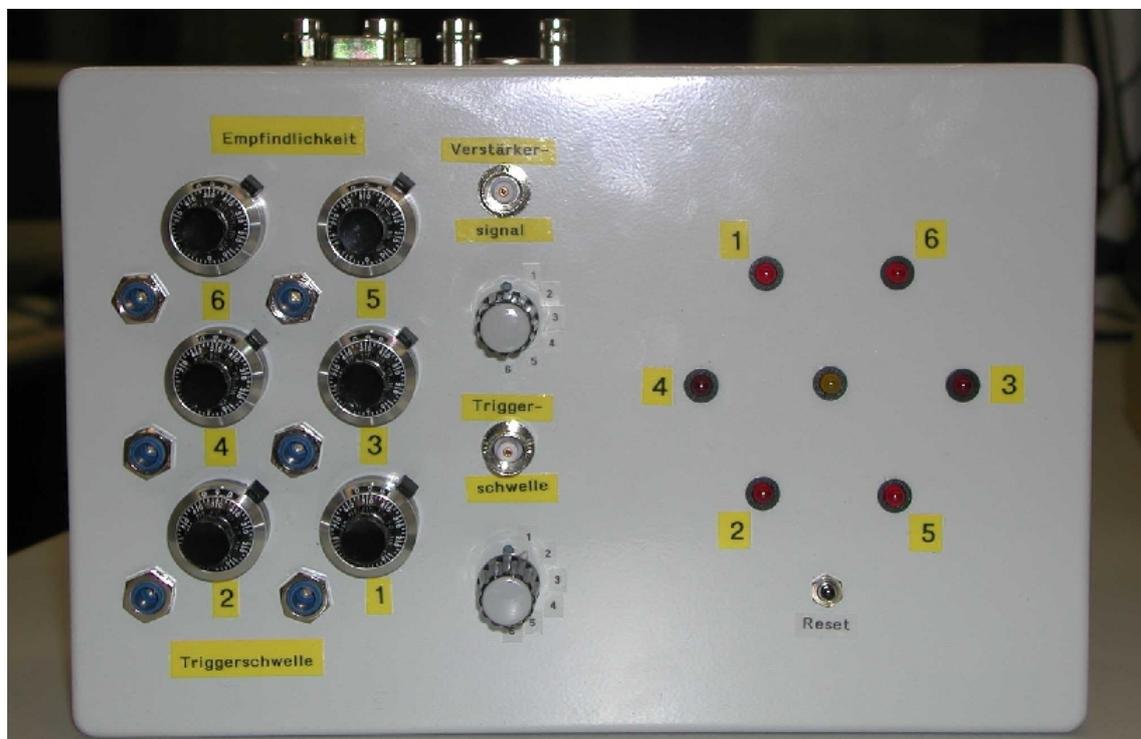


Abbildung 3.24: Draufsicht auf die Elektronikbox.

# Kapitel 4

## Versuche mit dem Glimmnestdetektionssystem

### 4.1 Funktionstest im Labor ohne Staub

#### 4.1.1 Funktionstest der Sensoren

Die Funktionsfähigkeit der einzelnen Sensoren und ihrer Anzeigen kann einfach überprüft werden, indem man den Detektionskörper aus dem Rohr heraus nimmt und bei mittlerem Verstärkungsfaktor den Finger vor jedem einzelnen Sensor bewegt (bei zu großer Verstärkung reagieren meist mehrere Sensoren auf die Bewegung). Die Funktionsfähigkeit eines Sensors kann entweder am Aufleuchten der entsprechenden Leuchtdiode erkannt werden, oder das Verstärkersignal des entsprechenden Sensors wird auf einem Oszilloskop beobachtet.

#### 4.1.2 Funktionstest des gesamten Detektionssystems

Um die Funktionsfähigkeit des Detektionssystems zu überprüfen, wurde eine Versuchsreihe im Labor durchgeführt, wobei einmal die PbSe-Sensoren und ein anderes mal die PbS-Sensoren in das Detektionssystem eingebaut waren.

##### 4.1.2.1 Versuchsaufbau und -gang

Das komplette System wird im Labor aufgebaut und verschaltet (Abb. 4.3). Zunächst wird das Rauschen der Sensoren bei einem bestimmten Verstärkungsfaktor bestimmt. Das Verstärkersignal des jeweiligen Sensors wird auf dem Oszilloskop abgelesen. Hierbei ist das, den Detektionskörper enthaltende Rohrstück auf beiden Seiten verschlossen, so dass kein Licht in das Rohr gelangen kann<sup>1</sup>. In Tabelle 4.1 ist das im Labor ermittelte Sensorrauschen bei 20 °C und bei unterschiedlichen Verstärkungen aufgelistet.

---

<sup>1</sup>Es hat sich bei mehreren Versuchen gezeigt, dass die Sensoren sehr empfindlich auf Tageslicht reagieren und erst nach einer gewissen Erholungszeit im Dunkeln wieder brauchbare Signale liefern.

Verstärkungsfaktor	80	110	160	240	350	600
Rauschen PbSe-Sensor [mV]	$\pm 10$	$\pm 12$	$\pm 18$	$\pm 25$	$\pm 40$	$\pm 60$
Rauschen PbS-Sensor [mV]	$\pm 12$	$\pm 15$	$\pm 22$	$\pm 35$	$\pm 50$	$\pm 70$

Tabelle 4.1: Rauschen der Sensoren bei Raumtemperatur.

Nachdem die Höhe des Rauschens bekannt ist, wird die Triggerschwelle so eingestellt, dass die Anzeige nicht durch das Rauschen ausgelöst wird (Triggerschwelle  $\approx$  größtes Rauschsignal + 10 mV). Das Rohr mit dem Detektionskörper wird senkrecht auf eine Unterlage gestellt, so dass die Spitze des Detektionskörpers nach oben zeigt. Um die Sensoren vor Licht zu schützen, wird die obere Öffnung des Rohres mit einem Stück Karton abgedeckt. Der Karton ist in der Mitte mit einem kleinen Loch versehen.

Die Funktionsfähigkeit des Detektionssystems wird nun geprüft, indem man kleine, warme Objekte (z. B. kleine Schrauben aus einem Wasserbad) durch das Loch im Karton fallen lässt. Durch Verschieben dieser Öffnung kann jeder einzelne Sektor des Rohres getestet werden. Abbildung 4.1 zeigt den eingebauten Detektionskörper im Förderrohr. In Abbildung 4.2 ist die Anordnung der Sensoren im Detektionskörper und die Aufteilung des Rohres in Sektoren schematisch dargestellt.



Abbildung 4.1: Detektionskörper im Förderrohr.

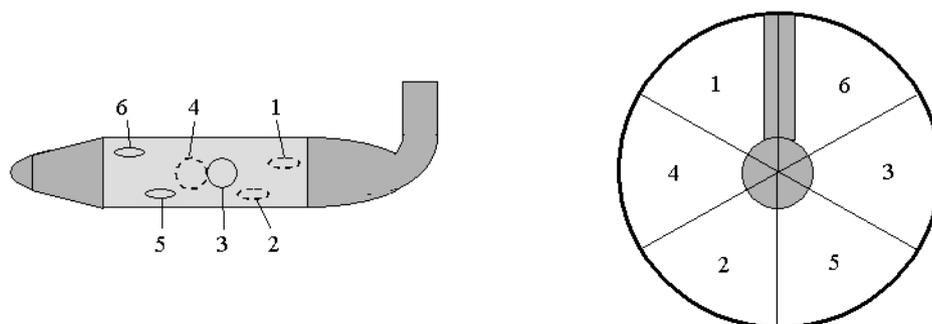


Abbildung 4.2: Nummerierung und Orientierung der Sensoren im Detektionskörper sowie Aufteilung des Rohres in Sektoren gemäß der Nummerierung der Sensoren.

#### 4.1.2.2 Versuchsergebnisse

Sowohl mit den PbSe-Sensoren als auch mit den PbS-Sensoren war eine erfolgreiche Detektion von kleinen Metallschrauben mit einer Temperatur von ca. 28 °C (Umgebungstemperatur ca. 20 °C) möglich. Die Schrauben fielen an der Rohrwand herunter und passierten dabei einen der Sektoren. Je nachdem wo genau eine dieser Schrauben den Detektionskörper passierte, konnte ein Ansprechen des Glimmnesterkennungssystems für den betreffenden Sektor beobachtet werden. Diese Tests wurden für alle Sektoren mehrfach mit Erfolg durchgeführt. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass typgleiche Sensoren unterschiedlich empfindlich sind. Dies war zu erwarten, da die Sensoren nach der Herstellung gewisse Mindestanforderungen erfüllen müssen, aber durchaus auch besser sein können.

Wenn die Verstärkung zu hoch bzw. die Triggerschwelle auf einen zu niedrigen Wert eingestellt ist, kann es zu Fehlanzeigen am Glimmnestdetektionssystem kommen. So kann z. B. das System einen warmen Gegenstand in drei benachbarten Sektoren anzeigen und gleichzeitig auch in einem der gegenüberliegenden Sektoren (Beispiel: Anzeige für Sektoren 6, 3, 5 und Sektor 4!).

#### Fazit:

Das Detektionssystem kann bei entsprechender Einstellung kleine, erwärmte Objekte zuverlässig detektieren und ist damit bereit für eine Funktionsprüfung unter Bedingungen, wie sie in der Nahrungsmittelindustrie üblich sind.

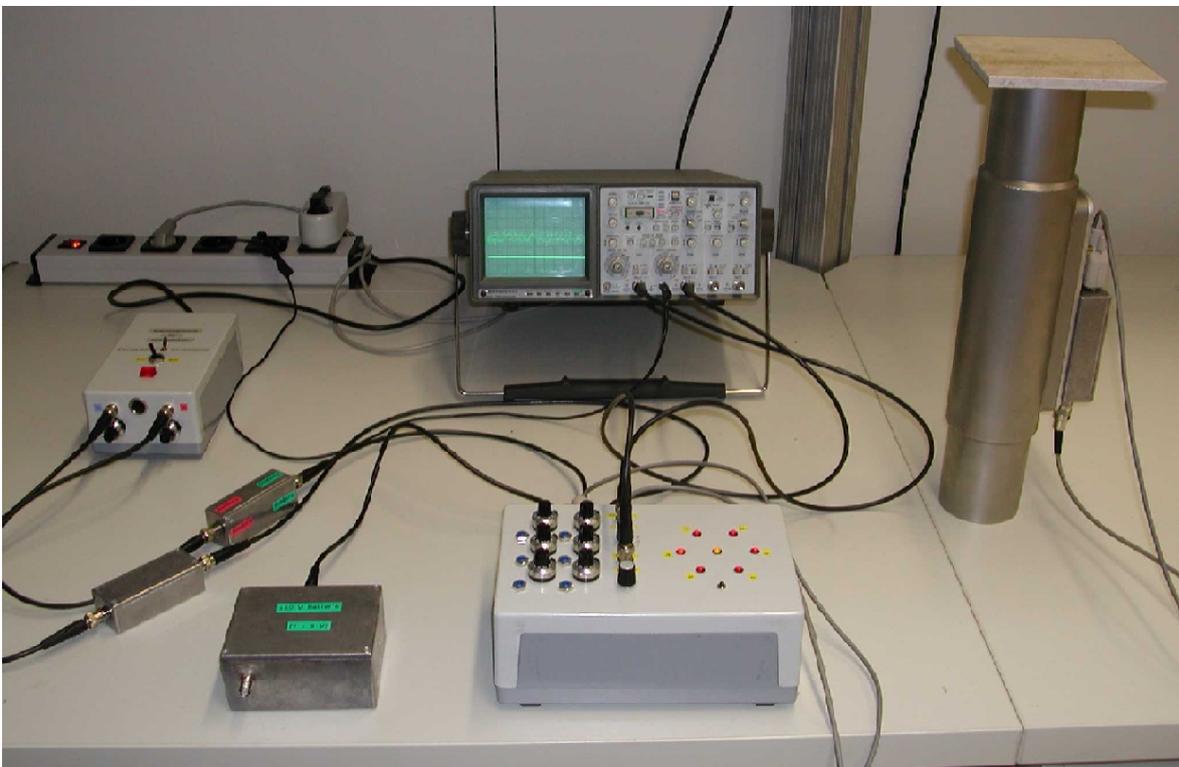


Abbildung 4.3: Aufbau des kompletten Glimmnestdetektionssystems im Labor.

## 4.2 Untersuchungen auf dem Versuchsfeld

Um die Funktionsfähigkeit des Detektionssystems unter Bedingungen, wie sie bei der pneumatischen Förderung üblich sind, zu testen, wurden von 4. bis 6. März 2002 Versuche mit dem Detektionssystem an einer pneumatischen Förderanlage durchgeführt. Bei den Versuchen wurden zwei verschiedene Förderprodukte eingesetzt. Als grobkörniges Förderprodukt wurde Weizen und als staubförmiges Förderprodukt wurde Maisstärke verwendet. Als Versuchs-Glimmnester dienten glühende Stahlwollekugeln.

### 4.2.1 Glimmnester aus Stahlwolle

Die Herstellung realer Glimmnester aus einem staubförmigen Produkt für Versuchszwecke hat einige Nachteile: Zum einen unterscheiden sich solche Glimmnester in ihren physikalischen Eigenschaften von Stück zu Stück. Unter dem Gesichtspunkt der Versuchsreproduzierbarkeit ist das zu vermeiden. Dazu kommt der Nachteil, dass die Herstellung solcher Glimmnester relativ aufwendig ist. Weiterhin sind diese Glimmnester meist sehr instabil, so dass sie in einer pneumatischen Förderanlage schnell zerfallen. Um die genannten Nachteile zu beseitigen, wurden im Rahmen eines Vorgängerprojektes Untersuchungen zur Herstellung künstlicher Glimmnester für Versuchszwecke durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass handgeformte Kugeln aus Stahlwolle ( $D \approx 25$  mm) einige Minuten nach dem Entzünden ähnliche Eigenschaften wie reale Glimmnester aufweisen. Wird eine solche Stahlwollekugel mit einer Flamme entzündet, so breitet sich der Glutbereich (Oxidationsbereich) zunächst an der Oberfläche der Stahlwollekugel aus und wandert anschließend in das Innere der Kugel. Dies hat zur Folge, dass die Oberflächentemperatur nach 3 - 4 Minuten unter  $100$  °C sinkt, während die Kugel im Innern noch immer glüht ( $T \approx 900$  °C).

### 4.2.2 Versuchsaufbau

Das speziell für den Detektionskörper angefertigte Rohrstück wird in die Leitung einer pneumatischen Förderanlage, bestehend aus Gebläse, Produktaufgabe, Förderleitung und Silo, eingeflanscht (vergleiche Abbildung 4.4 und 4.5). Das eingebaute Glimmnestdetektionssystem ist direkt hinter einem Krümmer eingebaut. Vor dem Krümmer befindet sich eine Zellenradschleuse, die der Produktaufgabe dient. Das Gebläse ist stufenlos regulierbar mit Fördergeschwindigkeiten von  $5$  m/s -  $35$  m/s. Die in die Leitung ( $D = 80$  mm) zugeführte Produktmasse wird anhand der Frequenz der Zellenradschleuse festgelegt. Die Förderung des Produktes erfolgt tangential in das Silo ( $V = 12$  m<sup>3</sup>). Das Längen zu Durchmesser Verhältnis beträgt etwa  $3,5$  im völlig entleerten Zustand. Auf dem Silo befinden sich verschiedene Öffnungen, die zur Druckentlastung dienen können. Um Schäden am Silo durch eventuell auftretende Explosionen (Glimmnesteintrag!) via Druckentlastung zu vermeiden, wurde eine ausreichend große Druckentlastungsfläche (gemäß VDI 3673 ermittelt) mit PE-Folie versehen. Die weiteren Öffnungen wurden mit Stahlplatten verschlossen. Die PE-Folien waren in ihrer Stärke so gewählt, dass sie im Explosionsfall bei einem Druck von  $0,1$  bar die Entlastungsöffnung freigeben [4].



Abbildung 4.4: Eingeflanshtes Rohrstück mit Detektionskörper hinter Zellenradschleuse und Krümmer.

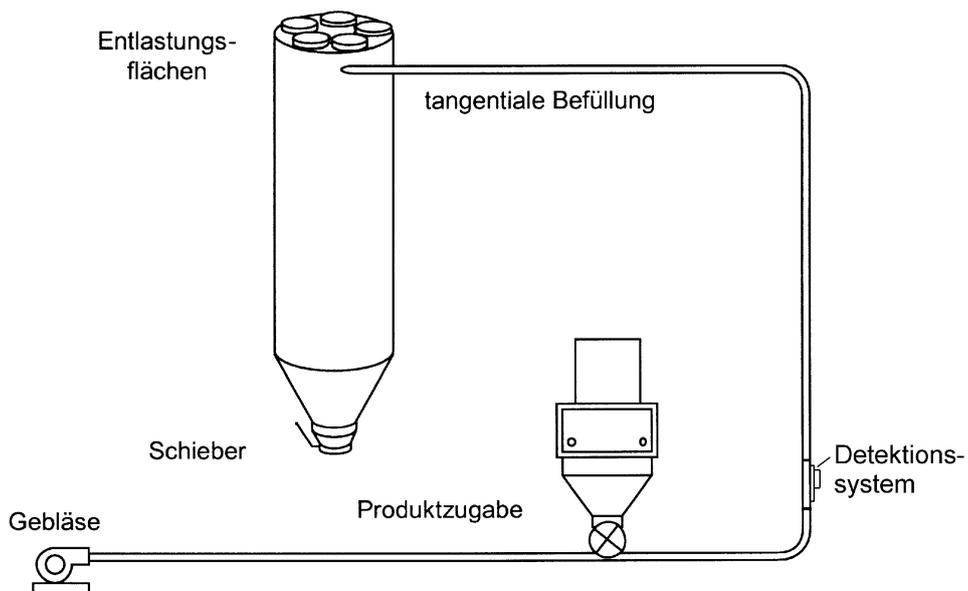


Abbildung 4.5: Schematisches Bild des experimentellen Aufbaus zum Test des Glimmnestdetektionssystems an einer pneumatischen Förderleitung.

### 4.2.3 Versuchsgang

#### 4.2.3.1 Einbau des Detektionssystems

Zunächst wird das Detektionssystem in die Rohrleitung eingebaut und gemäß dem Aufbau im Labor angeschlossen (siehe Abbildung 4.6). Wie bereits in Abschnitt 4.1.1 erwähnt, reagieren die Sensoren sehr empfindlich auf Tageslicht. Aus diesem Grund benötigen sie nach dem Einbau des Detektionssystems in das Förderrohr eine Erholungsphase von ca. 15 Minuten bis sie wieder verwertbare Signale liefern.



Abbildung 4.6: Detektionssystem in der Rohrleitung und dazugehörige Elektronik auf dem Versuchsgelände.

#### 4.2.3.2 Gebläseeinstellung

Das Gebläse leistet eine Druckerhöhung von 100 mbar. Die Transportgeschwindigkeit lässt sich von 5 m/s - 35 m/s stufenlos regulieren. Um eine bestimmte Fördergeschwindigkeit am Gebläse einzustellen, muss diese zunächst in einen Volumenstrom umgerechnet werden:

$$\dot{V} = v A \quad (4.1)$$

mit

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{(0,08 \text{ m})^2}{4} = 0,005 \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

Die für einen gewünschten Volumenstrom erforderliche Gebläsedrehzahl wird dem Leistungsdiagramm des Gebläses entnommen. Bei der Einstellung der Gebläsedrehzahl am Schaltschrank ist zu beachten, dass die Drehzahlanzeige mit 0,9 multipliziert werden muss, um die tatsächliche Drehzahl zu erhalten. In Tabelle 4.2 sind die wichtigsten Daten zusammengefasst.

$v$ [m/s]	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /min]	Gebläsedrehzahl [1/min]	Drehzahlanzeige [1/min]
10	3	1400	1556
20	6	2440	2711
30	9	3550	3944

Tabelle 4.2: Zusammenhang zwischen Drehzahlanzeige, Gebläsedrehzahl, Fördergeschwindigkeit und Volumenstrom.

#### 4.2.3.3 Einstellung der Zellenradschleuse

Die Steuerfrequenz der Zellenradschleuse kann ebenfalls stufenlos reguliert werden. Durch Ändern der Steuerfrequenz der Zellenradschleuse kann das Volumen des zugeführten Förderproduktes pro Zeiteinheit und somit die Konzentration des Feststoffes in der Förderluft geregelt werden.

Die Feststoffkonzentration in der Förderluft lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$c = \frac{\dot{m}_{\text{Staub}}}{\dot{V}_{\text{Luft}}} = \frac{\dot{V}_{\text{Staub}} \cdot \rho_{\text{Schütt}}}{\dot{V}_{\text{Luft}}} \quad (4.3)$$

Bei den Versuchen wurden zwei verschiedene Förderprodukte benutzt:

- Weizen (Körner): Schüttdichte  $\rho_{\text{Schütt}} = 770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Maisstärke (ungetrocknet): Schüttdichte  $\rho_{\text{Schütt}} = 575 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Aus Berechnungen und dem dazugehörigen Diagramm ergaben sich für die Steuerfrequenzen der Zellenradschleuse die in Tabelle 4.3 aufgelisteten Daten.

#### 4.2.3.4 Einstellung der Elektronik

Um Fehlauflösungen des Detektionssystems zu vermeiden, müssen die Einstellungen der Elektronik überprüft und gegebenenfalls den Versuchsbedingungen angepasst werden (Abschnitt 4.1). Dazu wird die Anlage im gewünschten Förderzustand mit Förderprodukt betrieben und das Verstärkersignal der Sensoren auf dem Oszilloskop beobachtet. Die Triggerschwellenspannung wird so gewählt, dass sie stets größer ist als die maximalen Rauschamplituden. Kommt es trotzdem zu Auslösungen der Anzeige eines oder mehrerer Sensoren durch das Förderprodukt, so wird entweder der Verstärkungsfaktor verringert oder die Triggerschwelle solange weiter erhöht, bis keine Fehlauflösungen mehr auftreten. Bei den durchgeführten Versuchen wurde für alle Sensoren die gleiche Triggerschwelle gewählt und der jeweilige Verstärkungsfaktor angepasst.

Produkt	Fördergeschwindigkeit [m/s]	Konzentration [kg/m <sup>3</sup> ]	Steuerfrequenz [Hz]
Weizen	10	20	13
Weizen	20	20	26
Weizen	20	30	38
Weizen	20	40	51
Weizen	30	20	38
Weizen	30	30	57
Maisstärke	10	20	17
Maisstärke	20	20	34
Maisstärke	20	25	45
Maisstärke	20	30	50
Maisstärke	30	20	50

Tabelle 4.3: Steuerfrequenz der Zellenradschleuse für unterschiedliche Förderzustände.

#### 4.2.3.5 Ablauf der Funktionstests

Nach dem Einstellen der Elektronik beginnen die eigentlichen Funktionsprüfungen. Die Zellenradschleuse wird mit ausreichend Produkt gefüllt. Eine Stahlwollekugel ( $D \approx 25$  mm) wird entzündet und nach ca. 2 Minuten zu dem Förderprodukt in der Zellenradschleuse gegeben und zugeschüttet (siehe Abbildung 4.7). Danach wird die Zellenradschleuse eingeschaltet, so dass die Stahlwollekugel den Detektionskörper ca. 3 Minuten nach dem Entzünden passiert. Während des Testlaufs wird die Reihenfolge der aufleuchtenden Leuchtdioden, sowie das Verstärkersignal eines beliebigen, zuvor ausgewählten Sensors auf dem Oszilloskop beobachtet.



Abbildung 4.7: Oxidierende (glühende) Stahlwollekugel in Weizenschüttung.

#### 4.2.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Nach anfänglichen technischen Problemen am 4.3.2002 bei der Inbetriebnahme der Förderanlage nach dem Winter, konnten am 5. und 6.3.2002 die Experimente auf der BGN/FSA-Versuchsanlage in Kappelrodeck durchgeführt werden.

##### 4.2.4.1 PbSe-Sensoren und Weizen

Bei den ersten Blind-Versuchen (ohne Glimmnest) mit trockenem Weizen als Förderprodukt wurden bei allen Sensoren sehr hohe Ausschläge auf dem Oszilloskop beobachtet, die zu Fehlauflösungen des Detektionssystems führten. Nachdem das (nun feuchte) Weizenkorn wieder aus dem Silo entnommen und weiteren Blind-Versuchen zugeführt wurde, waren diese Störsignale deutlich kleiner. Dieser Umstand lässt die Vermutung zu, dass sich das trockene Weizenkorn bei der pneumatischen Förderung elektrostatisch auf- und am Detektionskörper teilweise wieder entlädt. Diese Entladung erfolgt über kleine Funken, welche das Detektionssystem in erheblichem Maße stören. Diese Erklärung steht in Einklang mit der Tatsache, dass sich feuchtes Weizenkorn bei der Förderung kaum elektrostatisch auflädt. Die Komparatoren wurden so eingestellt, dass die Triggerschwellenspannung bei allen sechs Schaltungen 100 mV betrug. Der Verstärkungsfaktor der einzelnen Schaltungen lag zwischen 130 und 150.

Versuchsparameter:

Datum:	05.03.2002
Witterung:	heiter
Außentemperatur:	3 °C
Luftdruck:	952 mbar
Luftfeuchtigkeit:	49 %

Nr.	$D$ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	LED - Anzeige	Bemerkung
1	-	20	20	-	-
2	30	20	20	1 - 6	zeitlich versetzt
3	-	20	20	3	zweimal
4	-	20	20	-	-
5	30	20	20	1 - 6	gleichzeitig
6	30	20	20	1 - 6	gleichzeitig
7	25	20	30	1 - 6	gleichzeitig
8	-	20	30	3	-
9	-	20	40	-	-
10	25	20	40	1 - 6	gleichzeitig

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Detektionsversuche von Glimmnestern aus Stahlwollekugeln in Weizen mit PbSe-Sensoren.

Anmerkungen zu Tabelle 4.4:

Bei Versuch Nr. 2 leuchteten die LED's zeitlich versetzt auf. Zuerst schaltete LED 1, dann die LED's 2,3,5,6 gleichzeitig und zuletzt LED 4 ein. Dies bedeutet, es kam entweder zu Fehlauflösungen oder das Glimmnest wurde in der Zellenradschleuse zerschert. Die letztere Annahme wurde insofern bestätigt, als dass beim anschließenden Entleeren des Silos mehrere Teile des Glimmnestes gefunden wurden.

Bei den Versuchen 5, 6, 7 und 10 leuchteten alle LED's gleichzeitig auf. Dies lässt sich damit erklären, dass das Glimmnest am Detektionskörper zerschlagen wurde (Funken).

Bei den Versuchen 2 und 8 kam es zu Fehlauflösungen an LED 3. Das zugehörige Verstärkersignal neigte bereits in Vorversuchen zu einzelnen Ausreißern.

**4.2.4.2 PbS-Sensoren und Weizen**

Erste Blind-Versuche mit Förderprodukt und PbS-Sensoren zeigten bei unveränderter Verstärkung ein wesentlich größeres Untergrundsignal ( $> 100$  mV) als bei Verwendung der PbSe-Sensoren. Weil die Triggerschwelle bei 100 mV beibehalten werden sollte, mussten die Verstärkungsfaktoren der sechs Verstärker neu angepasst werden. Während der Versuche lag der Verstärkungsfaktor der einzelnen Schaltungen zwischen 40 und 65.

Versuchsparameter:

Datum:	05.03.2002
Witterung:	wolkig
Außentemperatur:	5 °C
Luftdruck:	951 mbar
Luftfeuchtigkeit:	46 %

Nr.	$D$ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	LED - Anzeige	Bemerkung
1	-	25	20	-	-
2	25	20	30	1 - 6	gleichzeitig
3	25	20	30	1 - 6	gleichzeitig
4	25	20	30	1 - 6	gleichzeitig
5	25	30	25	1 - 6	gleichzeitig
6	-	30	25	-	-
7	25	30	25	2, 3, 5, 6	gleichzeitig

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Detektionsversuche von Glimmnestern aus Stahlwollekugeln in Weizen mit PbS-Sensoren.

Anmerkungen zu Tabelle 4.5:

Bei Versuch Nr. 2 wurde das Verstärkerausgangssignal des Sensors 4 auf dem Oszilloskop beobachtet. Das Signal hob sich sehr deutlich vom Untergrundsignal ab.

In den meisten Fällen leuchteten alle LED's gleichzeitig auf, was wieder darauf hinweist, dass das Glimmnest mit dem Detektionskörper kollidierte.

In Versuch Nr. 7 schalteten die LED's 2, 3, 5 und 6 gleichzeitig ein. Die Sektoren der vier zugehörigen Sensoren liegen unmittelbar nebeneinander. Dies lässt darauf schließen, dass das Glimmnest den Detektionskörper auf dieser Seite des Rohres passierte.

#### 4.2.4.3 PbSe-Sensoren und Maisstärke

Die Triggerschwellenspannung betrug wieder bei allen sechs Schaltungen 100 mV. Bei Verwendung von Maisstärke als Förderprodukt war das Untergrundsignal größer als bei Weizen. Bei Erhöhung der Fördergeschwindigkeit oder der Feststoffkonzentration musste die Verstärkung bei gleicher Triggerschwelle verkleinert werden. Während der Versuche lag der Verstärkungsfaktor der einzelnen Schaltungen zwischen 40 und 65.

Versuchsparameter:

Datum: 06.03.2002  
 Witterung: klar  
 Außentemperatur: 5 °C  
 Luftdruck: 951 mbar  
 Luftfeuchtigkeit: 40 %

Nr.	$D$ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	LED - Anzeige	Bemerkung
1	-	20	20	-	-
2	25	20	20	1 - 5	gleichzeitig
3	-	20	20	-	-
4	25	20	20	1 - 5	zeitlich versetzt
5	-	20	20	-	-
6	25	20	20	1, 2, 4	gleichzeitig
7	-	20	25	-	-
8	25	20	25	2, 3, 4, 5	gleichzeitig
9	-	20	25	-	-
10	25	20	25	1 - 6	zeitlich versetzt
11	-	20	25	-	-
12	-	20	35	-	-
13	25	20	35	1 - 5	gleichzeitig
14	-	20	35	-	-
15	25	20	35	3, 5, 6	gleichzeitig
16	-	20	35	5	-
17	25	20	35	1 - 6	zeitlich versetzt

Nr.	$D$ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	LED - Anzeige	Bemerkung
18	-	20	35	-	-
19	-	10	25	-	-
20	25	10	25	1, 3, 5, 6	gleichzeitig
21	-	30	25	-	-
22	25	30	25	1 - 5	gleichzeitig
23	-	30	25	-	-

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Detektionsversuche von Glimmnestern aus Stahlwollekugeln in Maisstärke mit PbSe-Sensoren.

#### Anmerkungen zu Tabelle 4.6:

Während Versuch Nr. 4 wurde das Verstärkersignal von Sensor 4 beobachtet. Das durch das Glimmnest erzeugte Signal war erheblich größer (mehrere 100 mV) als das durch die Förderung erzeugte Untergrundsignal.

Bei Versuch Nr. 6 wurde das Glimmnest in der Zellenradschleuse sehr frühzeitig mit Förderprodukt zugeschüttet und es wurde etwas länger gewartet bis zum Einschalten der Zellenradschleuse. Ein Vergleichsglimmnest, das nicht in die Zellenradschleuse gegeben wurde, wurde gleichzeitig entzündet und ebenfalls mit Förderprodukt bedeckt. Das Vergleichsglimmnest konnte man zum Zeitpunkt des Detektionsereignisses bereits in die Hand nehmen.

Das Verstärkersignal von Sensor 5 wurde beim 8. Versuch beobachtet. Wie bei Versuch Nr. 4 war das durch die Stahlwollekugel hervorgerufene Signal mehrere 100 mV groß.

Während Versuch Nr. 15 wurde neben der LED - Anzeige das Verstärkersignal von Sensor 4 auf dem Oszilloskop beobachtet. Obwohl die LED von Sensor 4 beim Vorbeiflug der Stahlwollekugel nicht aufleuchtete, war auf dem Oszilloskop ein Peak zu sehen. Dieser war jedoch kleiner als die eingestellte 100 mV-Triggerschwelle.

Bei Versuch Nr. 17 schalteten zuerst die LEDs 3 und 5 ein. Vermutlich wurde das Glimmnest in der Zellenradschleuse zerteilt.

#### 4.2.4.4 PbS-Sensoren und Maisstärke

Die Triggerschwelle betrug bei allen Schaltungen 100 mV. Das Untergrundsignal bei der Verwendung von Maisstärke als Förderprodukt war so groß, dass die Verstärkung sehr weit herabgesetzt werden musste, um Fehlauflösungen zu vermeiden. Der Verstärkungsfaktor der einzelnen Schaltungen lag bei ca. 10.

#### Versuchsparameter:

Datum:	06.03.2002
Witterung:	klar
Außentemperatur:	6 °C
Luftdruck:	951 mbar
Luftfeuchtigkeit:	38 %

Nr.	∅ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	LED - Anzeige	Bemerkung
1	-	20	20	-	-
2	25	20	20	1, 4	gleichzeitig
3	-	20	20	-	-
4	25	20	20	1 - 6	gleichzeitig
5	-	20	20	-	-
6	25	20	20	1 - 6	gleichzeitig
7	-	20	20	-	-
8	25	20	25	2, 5	gleichzeitig

Tabelle 4.7: Ergebnisse der Detektionsversuche von Glimmnestern aus Stahlwollekugeln in Maisstärke mit PbS-Sensoren.

Anmerkungen zu Tabelle 4.7:

Da bei allen bisherigen Versuchen das Detektionssystem so in die Förderleitung eingebaut war, dass alle im Rohrbogen (siehe Abbildungen 4.4 und 4.5) nach außen getragenen Glimmnester mit der Aufhängung des Detektionskörpers kollidieren, wurde das Rohrstück mit dem Detektionssystem vor dem 5. Versuch um 180° gedreht. Es sollte untersucht werden, ob sich die Orientierung des Detektionssystems auf die Detektionsfähigkeit auswirkt. Bei Versuch Nr. 6 leuchteten dennoch alle LED's auf, was wiederum einen Aufprall des Glimmnestes auf dem Detektionskörper vermuten lässt. Während der Versuch Nr. 8 leuchteten die beiden LED's auf, die den beiden Sensoren bzw. Sektoren auf der äußeren Seite des Rohrbogens zugeordnet sind. Die Stahlwollekugel passierte also dort den Detektionskörper.

# Kapitel 5

## Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

### 5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die in den Tabellen des Abschnitts 4.2.4 enthaltenen Versuchsergebnisse belegen eindeutig, dass mit dem entwickelten Glimmnestdetektionssystem eine sichere Detektion von Glimmnestern in pneumatischen Förderleitungen möglich ist. In einer 80 mm durchmessenden Förderleitung konnten sowohl in grobkörnigem als auch in staubförmigem Förderprodukt Versuchsglimmnestern aus Stahlwolle erfolgreich detektiert werden, wobei Fördergeschwindigkeiten von 10 m/s bis 30 m/s eingestellt waren. Die maximalen Produktbeladungen betragen hierbei  $35 \text{ kg/m}^3$  bei staubförmigen und  $40 \text{ kg/m}^3$  bei körnigem Produkt. Größere Produktbeladungen lässt die verwendete pneumatische Förderanlage aus technischen Gründen nicht zu.

Die große Anzahl der Versuche, bei denen alle LED's gleichzeitig aufleuchteten, lassen darauf schließen, dass die Glimmnestern häufig auf den Detektionskörper prallen und an diesem zerschlagen werden. Das an der Aufhängung des Detektionskörpers hängende Fragment einer Stahlwollekugel, welches nach dem Ausbau des Detektionskörpers aus der Förderleitung gefunden wurde, ist ein weiteres Indiz für diese Vermutung (Abbildung 5.1).

Anfängliche Befürchtungen, der Detektionskörper könnte zu einem Verstopfen der Förderleitung führen, konnten nicht belegt werden. Selbst bei hohen Konzentrationen des Förderproduktes ( $35 \text{ kg/m}^3$  -  $40 \text{ kg/m}^3$ ) verstopfte die Förderleitung nicht.

Ein „Erblinden“ der Sensoren durch Staubablagerungen während der Versuche konnte nicht beobachtet werden. Dies stellt bei anderen Systemen, die in der Rohrwand angebracht sind, ein Problem dar. Die Anordnung des Detektionssystems in der Rohrmitte führt dazu, dass der Glaszylinder, hinter welchem sich die Sensoren befinden, nicht mit einer Produktschicht bedeckt wird. Die hohe Strömungsgeschwindigkeit sowie die turbulente Strömungsform in der Rohrmitte sorgen dafür, dass sich kein Material auf dem Glaszylinder ablagern kann. Abbildung 5.1 zeigt den Detektionskörper nach mehrstündigem Betrieb in Maisstärke.



Abbildung 5.1: Detektionskörper nach mehrstündigem Betrieb in Maisstärke. Links im Bild: Das Fragment einer Stahlwollekugel hat sich an der Aufhängung des Detektionskörpers verfangen.

## 5.2 Ausblick

### 5.2.1 Verbesserungen

Die Funktionsfähigkeit des Detektionssystems wurde in den Versuchen nachgewiesen. Allerdings zeigten die Versuche auch, dass in einigen Bereichen noch Verbesserungen des Systems erforderlich sind.

- **Elektronik:** Zunächst sollte versucht werden, das Verhältnis von Nutzsignal zu Untergrundsignal bei Betriebsbedingungen weiter zu verbessern. Weiterhin muss die Abhängigkeit der einzelnen Schaltungen untereinander beseitigt werden. Im Versuch zeigte sich, dass sehr hohe Signale in einer der Schaltungen ebenfalls ein Signal in einer nicht betroffenen Schaltung generieren können. Die Elektronik sollte mit einer automatischen Triggerschwelle ausgestattet werden. Dies kann man mit einem Speicherbaustein bewerkstelligen, der die größten Amplituden der Untergrundsignale des Förderstromes speichert und als Triggerschwelle zur Verfügung stellt.
- **Abdichtung:** Bei den Versuchen zeigte sich, dass sowohl die Sensoren als auch die Elektronik nicht hundertprozentig gegen das Eindringen von Staub gesichert sind. Dies ist jedoch für einen sicheren Betrieb des Detektionssystems unbedingt erforderlich.
- **Körperform:** Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, kann es zu kleinen Materialablagerungen vorn am Glaszylinder kommen. Um dies zu vermeiden, sollte die Metallkappe vor dem Glaszylinder so verändert werden, dass es zu keinem Strömungsabriss mehr kommt. Weiterhin sollte die Form der Aufhängung verändert werden, damit sich der Strömungswiderstand des Systems verringert.

### 5.2.2 Nächste Schritte

Auf dem Weg vom nun vorhandenen Prototypen zum marktreifen System sind zunächst noch einige Untersuchungen notwendig:

- Um die Detektionsfähigkeit eindeutig zu beweisen, sollten die Versuche auf dem Versuchsgelände mit realen Glimmnestern wiederholt werden.
- Eine bisher noch unbekannte Größe ist der tatsächliche Strömungswiderstand bzw. Druckverlust, den das Detektionssystem in der Förderleitung verursacht. Dieser sollte zunächst gemessen werden, da dies die wichtigste Größe für Einbauten in Rohrleitungen ist.
- Bei den Versuchen wurde die maximale Beladung der Förderluft mit Förderprodukt durch die Anlage vorgegeben. Die Grenzen des Detektionssystems konnten nicht genau bestimmt werden. Deshalb sollte der Prototyp auch in Förderleitungen mit einem größeren Durchmesser getestet werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] W. Bartknecht: *Stand der Erkenntnisse auf dem Gebiet der Staubexplosionen*, Symposium Heft 17.
- [2] Internet: <http://www.pellmont.ch>: *Erfahrungen im Explosionsschutz*
- [3] U. Krause, M. Schmidt, B. Grob: *Zündwirksamkeit von Glimmnestern und eingeschütteten heißen Gegenständen in Staubschüttungen*, Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 57, Springer-VDI-Verlag 1997.
- [4] D. Lorenz, M. Kraft: *Erkennung von Glimmnestern in bewegten Staub/Luft-Gemischen mit Hilfe von Infrarot-Detektoren*, FSA-Bericht 2001.
- [5] Hütte: *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*, Springer-Verlag, 31. Auflage 2001.
- [6] Internet: <http://www.omega.de>: *Technische Hintergrundinformationen: Infrarot Temperaturmessung*.
- [7] R. Paul: *Optoelektronische Halbleiterbauelemente*, Teubner-Studienskripten, 1985.
- [8] E. Schiessle: *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*, Vogel Fachbuch, 1992.
- [9] O. Molerus: *Fluid-Feststoffströmungen*, Springer-Verlag, 1982.
- [10] W. Siegel: *Pneumatische Förderung*, Vogel Fachbuch, 1991.
- [11] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer: *Physik für Ingenieure*, VDI-Verlag, 5. Auflage 1995.
- [12] Informationsmaterial:  
<http://www.calsensors.com> bzw <http://www.lasercomponents.de>
- [13] U. Tietze, Ch. Schenk: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer-Verlag, 10. Auflage 1993.

# Anhang A

## Vergleich von Infrarot-Sensoren

Sensortyp	Photonendetektor	Photonendetektor
Wirkungsweise	Fotoleiter	Fotoleiter
Material	PbS	PbS
Hersteller	Graseby Infared	Calsensors
Bezeichnung	PS3-0-52	AP-25
Elementgröße (mm × mm)	2 × 2	2 × 2
Detektorempfindlichkeit (V/W)	150000	400000
Bedingungen	( $\lambda_p$ )	( $\lambda_p$ , 650 Hz)
spez. Detektivität ( $\frac{\text{cm}\cdot\text{Hz}}{\text{W}}$ )	$7,7 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{11}$
Bedingungen	( $\lambda_p$ , 750 Hz, 1 Hz)	( $\lambda_p$ , 650 Hz, 1 Hz)
Wellenlänge maximaler Empfindlichkeit ( $\mu\text{m}$ )	2,5	2,4
Zeitkonstante ( $\mu\text{s}$ )	300	300
Spektralbereich ( $\mu\text{m}$ )	0,5 - 3,5 [7]	0,5 - 3,5 [7]
Max. Betriebstemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	80	65
Gehäuse	TO-5	TO-5
Preis (EUR/Stück)	ca. 125,-	ca. 100,-

Tabelle A.1: Vergleich der Sensordaten.

### Anmerkungen

Alle Werte bei Raumtemperatur.

( $\lambda_p$ , 750 Hz, 1 Hz):

Messung bei Wellenlänge maximaler Empfindlichkeit, Modulationsfrequenz = 750 Hz, Messbandbreite = 1 Hz.

Sensortyp	Photonendetektor	Thermischer Detektor
Wirkungsweise	Fotoleiter	pyroelektrisch
Material	PbSe	Lithiumtantalat
Hersteller	Calsensors	DIAS
Bezeichnung	BXP-25	LTS-I
Elementgröße (mm × mm)	2 × 2	1 × 1
Detektorempfindlichkeit (V/W)	30000	1500
Bedingungen	( $\lambda_p$ , 750 Hz)	(500 K, 10 Hz)
spez. Detektivität ( $\frac{\text{cm}\cdot\text{Hz}}{\text{W}}$ )	$1,8 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$
Bedingungen	( $\lambda_p$ , 1000 Hz, 1 Hz)	(500 K, 10 Hz)
Wellenlänge maximaler Empfindlichkeit ( $\mu\text{m}$ )	3,8 [7]	konstant [7]
Zeitkonstante ( $\mu\text{s}$ )	5	> 1 ms
Spektralbereich ( $\mu\text{m}$ )	0,5 - 5 [7]	0,8 - 25 [7]
Max. Betriebstemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	55	70
Gehäuse	TO-5	TO-39
Preis (EUR/Stück)	ca. 115,-	ca. 450,-

Tabelle A.2: Vergleich der Sensordaten.

**Anmerkungen**

Alle Werte bei Raumtemperatur.

( $\lambda_p$ , 750 Hz, 1 Hz):

Messung bei Wellenlänge maximaler Empfindlichkeit, Modulationsfrequenz = 750 Hz,  
Messbandbreite = 1 Hz.

# Anhang B

## Technische Zeichnung