

Erkennung von Glimmnestern  
in bewegten Staub/Luft-  
Gemischen mit Hilfe von  
Infrarot-Detektoren

F-05-9503

Projekt Nr. F-05-9503

Erkennung von Glimmnestern in bewegten  
Staub/Luft-Gemischen mit Hilfe von  
Infrarot-Detektoren

Dirk Lorenz  
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten  
Bereich Prävention, Zentrallabor

Dr. Michael Kraft  
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten  
Bereich Prävention, Zentrallabor

Mannheim, März 2001

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>1 Theoretische Untersuchungen</b>	<b>3</b>
1.1 Eingangsbetrachtung . . . . .	3
1.1.1 Strahlungsleistung ohne Relativbewegung und Absorption . . . . .	3
1.1.2 Strahlungsleistung mit Relativbewegung ohne Absorption . . . . .	4
1.1.3 Strahlungsleistung mit Relativbewegung und Absorption . . . . .	5
1.1.4 Messsignal . . . . .	5
1.2 Thermosäulen-Detektor . . . . .	6
1.3 Bleisulfid-Detektor . . . . .	8
1.3.1 PS3-0-51 . . . . .	8
1.3.2 PS3-0-52 . . . . .	8
<b>2 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>11</b>
2.1 Aufbau eines Detektionssystems . . . . .	11
2.1.1 Vorspannung (Bias) . . . . .	11
2.1.2 Verstärker mit Schmitt-Trigger . . . . .	12
2.1.3 Anzeigende Logik . . . . .	12
2.1.4 Versorgungsspannung . . . . .	13
2.1.5 Test des Prototypen . . . . .	13
2.1.5.1 Tests im Labor ohne Staub . . . . .	13
2.1.5.2 Praxisnahe Tests auf dem BGN-Versuchsgelände . . . . .	14
2.2 Experimentelle Bestimmung der Detektionsgrenzen . . . . .	15
2.2.1 Versuchsaufbau . . . . .	15
2.2.1.1 Ofen und Blende . . . . .	16
2.2.1.2 IR-Filter und Chopper . . . . .	16
2.2.1.3 Küvette . . . . .	16

2.2.1.4	IR-Sensor und Auswertung . . . . .	17
2.2.1.5	Messreihen . . . . .	18
2.2.1.5.1	Versuche mit Maisstärke . . . . .	18
2.2.1.5.2	Versuche mit Pfefferschrot . . . . .	18
2.2.2	Untersuchungen auf dem Versuchsfeld Kappelrodeck . . . . .	19
2.2.3	Interpretation der Messergebnisse . . . . .	22
2.3	Entwicklung von Glimmnestern für Versuchszwecke . . . . .	22
2.3.1	Glimmnester aus Sonnenblumenkernschrot . . . . .	23
2.3.2	Glimmnester aus Stahlwolle . . . . .	23
2.4	Versuche an einer pneumatischen Förderleitung . . . . .	26
2.4.1	Test des Prototypen . . . . .	26
2.4.1.1	Versuchsaufbau . . . . .	26
2.4.1.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse . . . . .	27
2.4.2	Test eines industriellen Systems (FireFly AB) . . . . .	28
2.4.2.1	Versuchsaufbau . . . . .	28
2.4.2.2	Versuchsdurchführung und Ergebnisse . . . . .	29
2.4.2.2.1	Versuche mit Maisstärke . . . . .	31
2.4.2.2.2	Versuche mit Weizenkörnern . . . . .	32
2.4.3	Interpretation der Ergebnisse . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Ausblick</b>	<b>34</b>
3.1	Erforschung alternativer Methoden . . . . .	34
3.2	Entwicklung eines IR-Detektionssystems . . . . .	34
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>35</b>

# Liste der Symbole

$A$	Fläche eines Sensors oder eines Rohrquerschnitts
$b$	Abstand, in dem ein Glimmnest einen Sensor beim Vorbeiflug passiert
$c$	Staubkonzentration
$c_1$	Staubkonzentration in einer Küvette
$c_2$	$c_1$ umgerechnet auf ein größeres Volumen
$D$	Kürzester Abstand zwischen dem Zentrum eines Glimmnestes und einem Sensor
$f$	Fläche
$G$	Länge
$I_0$	Lichtintensität bei Abwesenheit absorbierenden Materials
$l_1$	Abstand zwischen vorderer und hinterer Scheibe einer Küvette
$l_2$	Abstand zwischen einer Sensor- und Kupferblockstirnfläche
$P$	Spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers
$R$	Radius eines Glimmnestes oder eines Rohres
$S$	Abstand zwischen einem Glimmnest und einem Sensor
$S_T$	Triggerschwelle des Detektionssystem
$t$	Zeit
$t_D$	Zeitpunkt, an dem ein Glimmnest detektiert wird
$\Delta t$	Dauer von Aufgabe bis Erkennen eines Glimmnestes in einer Förderleitung
$T$	Temperatur
$T_I$	Temperatur im Zentrum eines Glimmnestes
$T_O$	Oberflächentemperatur eines Glimmnestes
$T_F$	Temperatur des Förderstromes oder Umgebungstemperatur
$T_{\max}$	Maximale Temperatur
$T_{\max}(i)$	Maximale Temperatur am Messort $i$
$U$	Spannung
$U_0$	Ausgangsspannung eines Sensors bei Abwesenheit absorbierenden Materials
$U_m$	Ausgangssignal eines Sensors bei variabler Einstrahlungsleistung
$U_{\text{end}}$	Maximale Ausgangsspannung eines Sensors bei fester Einstrahlungsleistung
$v$	Geschwindigkeit
$V$	Volumen
$V_Z$	Volumen der Zelle einer Zellenradschleuse
$x$	Kartesische Koordinate
$y$	Kartesische Koordinate
$\alpha$	Winkel
$\beta$	Winkel
$\gamma$	Winkel
$\varepsilon$	Empfindlichkeit eines Sensors

$\vartheta$	Deklinaler Winkel (Kugelkoordinaten)
$\kappa$	Absorptionskoeffizient
$\lambda$	Lichtwellenlänge
$\pi$	Die Zahl 3,141592654
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante, $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
$\tau$	Zeitkonstante eines Sensors
$\varphi$	Azimutaler Winkel (Kugelkoordinaten)
$\Phi$	Strahlungsleistung
$\Phi_0$	Strahlungsleistung bei Abwesenheit absorbierenden Materials
$\Omega$	Raumwinkel
$\varnothing$	Durchmesser

# Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Möglichkeit einer Detektion von Glimmnestern<sup>1</sup> in pneumatischen Förderleitungen der Nahrungsmittelindustrie mittels Infrarot-Sensoren untersucht. Durch diese Förderleitungen werden Staub oder körnige Produkte (Korndurchmesser  $\geq 2$  mm) in teilweise sehr hohen Konzentrationen transportiert.

Neben einer theoretischen Abschätzung und Laborversuchen, wurden die physikalischen Grenzen einer Infrarot-Detektion auch in praxisidentischen Versuchen ermittelt. Dabei kam neben einem eigenentwickelten Prototypen auch ein marktreifes System zum Einsatz, welches bereits in der Holzindustrie Einsatz findet.

Es wird gezeigt, dass Glimmnester, die in der Regel keine heiße Oberfläche besitzen<sup>2</sup>, 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 12 cm nicht überschreiten. Werden körnige Produkte mit oben genannten Korngrößeneigenschaften gefördert, so liegt diese Grenzkonzentration für den genannten Rohrdurchmesser bei rund  $6,5 \text{ kg/m}^3$ .

Damit bei den hier angegebenen Grenzwerten von Konzentration und Rohrdurchmesser noch zuverlässig detektiert werden kann, müssen mindestens zwei Detektoren eingesetzt werden, die sich in der Förderleitung gegenüber stehen.

---

<sup>1</sup>Das sind Verklumpungen brennbaren Staubes, die sich durch chemische Reaktionen in ihrem Inneren bis auf einige  $100^\circ\text{C}$  aufheizen können.

<sup>2</sup>Das oft glutheiße Innere eines Glimmnestes wird von einer kühlen Staubkruste umgeben mit  $T \leq 100^\circ\text{C}$ .

# Einleitung

In allen Bereichen, in denen Gemische aus Luft und brennbaren Stäuben vorkommen, können sich unter gewissen Umständen so genannte Glimmnester bilden. Das sind Verklumpungen des vorhandenen brennbaren Staubes, die sich durch chemische Reaktionen in ihrem Inneren bis auf einige  $100^{\circ}\text{C}$  aufheizen können. Bei Gegenwart von Glimmnestern, die laut Statistik die zweithäufigste Zündquelle bei Staubexplosionen darstellen, ist eine einwandfreie Erkennung innerhalb industrieller Fertigungs- oder Transportabläufe (z. B. pneumatische Förderung von staubförmigen Produkten), zur Zeit nur stark eingeschränkt realisierbar.

Gegenstand dieser Untersuchung ist der Test einiger hoch entwickelter Infrarot-Sensoren in Bezug auf ihre Eignung zur zuverlässigen Erkennung von Glimmnestern in pneumatischen Förderanlagen für organische Stäube.

Durch eine theoretische Abschätzung wird zunächst geklärt, ob eine Detektion von Glimmnestern durch Infrarot-Sensoren messtechnisch möglich ist. Dadurch qualifizieren sich gleichzeitig die leistungsfähigsten Sensortypen für spätere experimentelle Untersuchungen im Labor und auf dem Versuchsgelände der BGN in Kappelrodeck/Schwarzwald. Die Messungen im Labor dienen dabei zunächst dazu, die prinzipiellen Einsatzgrenzen der Infrarot-Detektion bei unterschiedlichen Bedingungen zu bestimmen. Die anschließenden Experimente auf dem Versuchsgelände an nahezu realen Förderanlagen haben den Sinn, die Zuverlässigkeit dieser Detektionsmethode nachzuweisen und gleichzeitig die zuvor ermittelten Einsatzgrenzen zu bestätigen. Während der letztgenannten Versuchsreihen kam neben einem eigenentwickelten Prototypen auch ein marktreifes, d. h. kommerzielles Glimmnestdetektionssystem auf IR-Basis zum Einsatz.

# Kapitel 1

## Theoretische Untersuchungen

### 1.1 Eingangsbetrachtung

#### 1.1.1 Strahlungsleistung ohne Relativbewegung und Absorption

Um den mathematischen Aufwand dieser Betrachtung in vertretbarem Rahmen zu halten, werden Glimmnester im folgenden als schwarze Körper mit Kugelform betrachtet. Ein schwarzer Körper mit der Temperatur  $T$  hat die spezifische Ausstrahlung<sup>1</sup>

$$P = \sigma T^4 = 5,6696 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 \quad (1.1)$$

wobei  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante ist. In Kugelkoordinaten wird ein infinitesimales Flächenelement einer Kugeloberfläche beschrieben durch

$$df = R^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi \quad (1.2)$$

mit  $R$  als Radius der Kugel und  $\vartheta$  als deklinalem bzw.  $\varphi$  als azimutalem Winkel. Ein Flächenelement  $df$  bestrahlt eine Absorberfläche der Fläche  $dA$  mit der Leistung

$$d\Phi = \sigma T^4 df \sin \beta d\Omega = \sigma T^4 df \sin \beta \frac{dA \cos \alpha}{S^2} \approx \sigma T^4 df \sin \beta \frac{A \cos \alpha}{S^2} \quad (1.3)$$

wie man Abbildung 1.1 entnimmt.  $d\Omega$  ist der Raumwinkel, den die Absorberfläche  $dA$  von  $df$  aus gesehen einnimmt. Weil die Absorberfläche ( $A \sim 10^{-6} \text{ m}^2$ ) der untersuchten Detektoren klein gegen die Ausdehnung der Kugeloberfläche ist, braucht nicht über alle  $dA$  der Absorberfläche integriert zu werden, sondern es kann näherungsweise  $dA$  mit  $A$  identifiziert werden. Mit

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos \left( \frac{D - R \sin \vartheta}{S} \right) = \arccos \left( \frac{D - R \sin \vartheta}{\sqrt{R^2 - 2RD \sin \vartheta + D^2}} \right) \\ \beta &= \arccos \left( \frac{R \cos \vartheta}{S} \right) = \arccos \left( \frac{R \cos \vartheta}{\sqrt{R^2 - 2RD \sin \vartheta + D^2}} \right) - \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta \right) \end{aligned} \quad (1.4)$$

ergibt sich die von der Absorberfläche der Detektoren empfangene Strahlungsleistung durch Integration über alle Flächenelemente  $df$  der der Absorberfläche zugewandten Kugeloseite zu

$$\Phi = 2\pi R^2 \sigma T^4 A \int_{\arcsin(\frac{R}{D})}^{\frac{\pi}{2}} \frac{(D - R \sin \vartheta) \sin \vartheta \sin \beta}{(R^2 - 2RD \sin \vartheta + D^2)^{\frac{3}{2}}} d\vartheta \quad (1.5)$$

---

<sup>1</sup>Das ist die von der Einheitsfläche des Körpers in den gesamten Halbraum abgestrahlte Leistung.

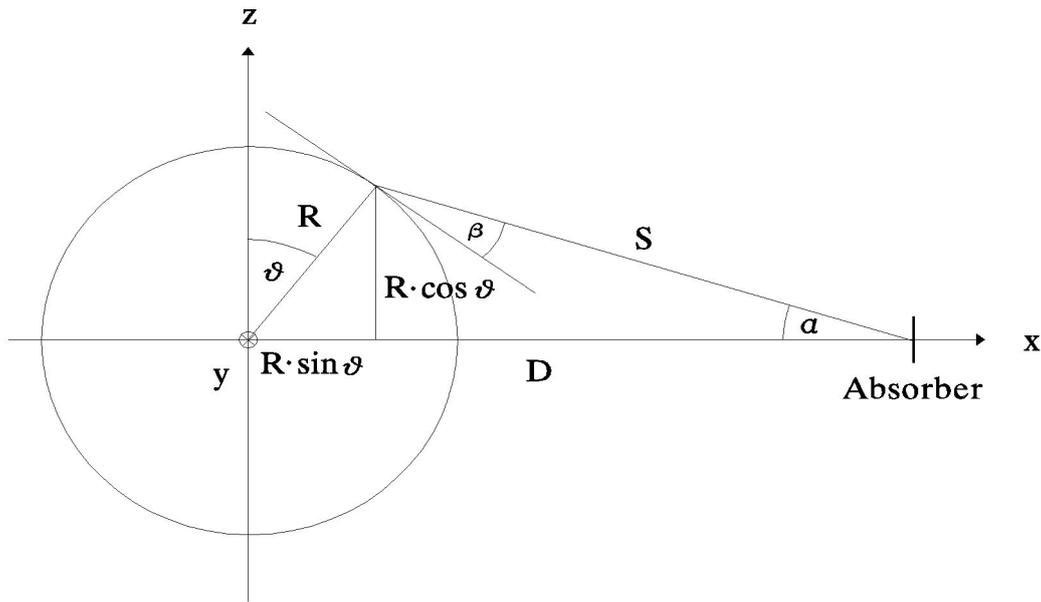


Abbildung 1.1: Zweidimensionale Skizze der geometrischen Verhältnisse zwischen einem kugelförmigen Glimmnest und der Absorberfläche eines Infrarot-Detektors.

### 1.1.2 Strahlungsleistung mit Relativbewegung ohne Absorption

Häufig wird Staub durch pneumatische Förderrohre von einem Ort zum anderen transportiert. Hier auftretende Glimmnester stehen infolgedessen nur vergleichsweise kurze Zeit in merklichem Strahlungskontakt mit einem potentiellen Detektorabsorber.

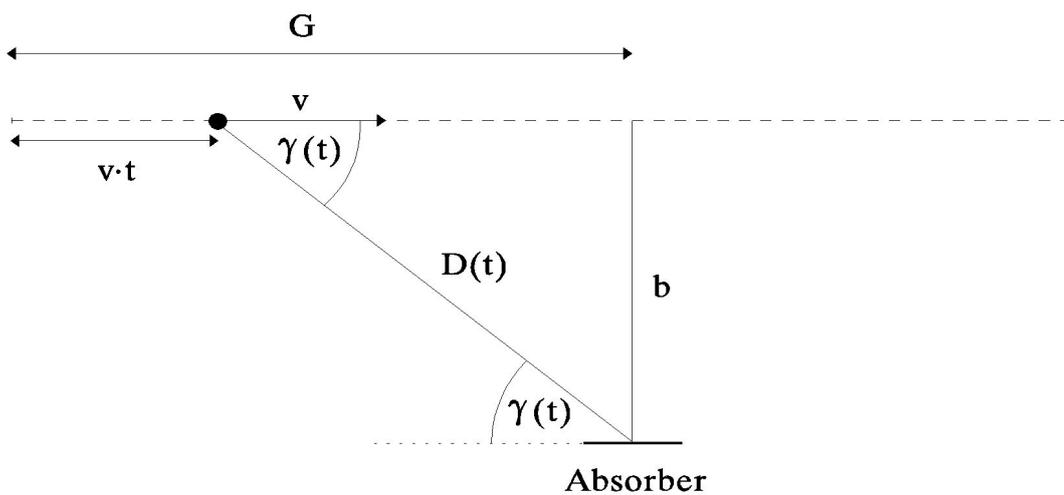


Abbildung 1.2: Geometrische Verhältnisse beim zentralen Vorbeiflug eines Glimmnestes an einer Absorberfläche mit der Geschwindigkeit  $v$  im minimalen Abstand  $b$ .

Nimmt man der Einfachheit halber an, dass ein Glimmnest in der Mitte eines Rohres mit kreisförmigen Querschnitts an einer in der Rohrwand integrierten Absorberfläche vorbeifliegt, so ergeben sich die in Abbildung 1.2 dargestellten Verhältnisse. Die empfangene Strahlungsleistung  $\Phi = \Phi(t)$  ist nun zeitabhängig, weil der Abstand  $D = D(t)$  zwischen Glimmnest und Absorberfläche zeitabhängig ist. Es gilt

$$D(t) = \sqrt{(G - vt)^2 + b^2} \quad (1.6)$$

Außerdem verändert sich die Orientierung der Absorberfläche in Bezug auf den Ort des Glimmnestes. Die wirksame Absorberfläche ist damit zeitabhängig gemäß

$$A(t) = A \sin(\gamma(t)) = A \sin\left(\arcsin\left(\frac{b}{D(t)}\right)\right) = \frac{Ab}{D(t)} \quad (1.7)$$

Mit diesen Überlegungen folgt aus (1.4) bis (1.7) für die zeitabhängige empfangene Strahlungsleistung

$$\Phi_0(t) = \frac{2\pi R^2 \sigma T^4 Ab}{D(t)} \int_{\arcsin\left(\frac{R}{D(t)}\right)}^{\frac{\pi}{2}} \frac{(D(t) - R \sin \vartheta) \sin \vartheta \sin(\beta(t))}{(R^2 - 2RD(t) \sin \vartheta + D^2(t))^{\frac{3}{2}}} d\vartheta \quad (1.8)$$

### 1.1.3 Strahlungsleistung mit Relativbewegung und Absorption

Die vom Glimmnest in Richtung Absorberfläche emittierte Strahlungsleistung wird nach dem Lambert-Beer-Gesetz

$$\Phi(t) = \Phi_0(t) e^{-\kappa c D(t)} \quad (1.9)$$

abgeschwächt.  $\kappa$  ist der Absorptionskoeffizient,  $c$  ist die Staubkonzentration und  $D(t)$  ist wieder der momentane Abstand zwischen Absorberfläche und Mittelpunkt des Glimmnestes. Für die Lichtwellenlänge  $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$  liegen uns zahlreiche Absorptionskoeffizienten verschiedener Stäube vor, die aus Eichmessungen des BGN-Staubkonzentrationsmessgerätes SKG5 gewonnen wurden. Bei Glimmnesttemperaturen von 700 K bis 1200 K liegt das Maximum der spektralen Energieverteilung der emittierten Strahlung im Infraroten zwischen  $2 \mu\text{m}$  und  $4 \mu\text{m}$ .  $\kappa$  ändert sich bei den hier betrachteten Stäuben im Spektralbereich von  $1 \mu\text{m}$  bis  $5 \mu\text{m}$  nicht gravierend, so dass ein Mittelwert  $\bar{\kappa} = 50 \text{ m}^2/\text{kg}$  der aus den SKG5-Eichmessungen bekannten Absorptionskoeffizienten hier verwendet werden kann.

### 1.1.4 Messsignal

Der zeitliche Verlauf der Ausgangsspannung eines Detektors nach Beginn der Bestrahlung folgt dem Exponentialgesetz

$$U(t) = U_{\text{end}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.10)$$

wobei  $\tau$  die Zeitkonstante des Detektors ist. Diese Funktion muss nun den  $\Phi(t)$ -Funktionen überlagert werden. Das Resultat aus diesen Faltungen multipliziert mit der Empfindlichkeit des Detektors  $\varepsilon$  sollte in erster Näherung das zu erwartende Spannungssignal liefern, das durch den Vorbeiflug eines Glimmnestes hervorgerufen wird.

## 1.2 Thermosäulen-Detektor

Zuerst soll der Einsatz einer Thermosäule mit den Eigenschaften aus Tabelle 1.1 für eine vorgegebene Situation theoretisch untersucht werden. Für Fördergeschwindigkeiten von  $v = 10, 20, 30$  m/s, einen Rohrradius von  $b = 0,25$  m, ein Glimmnestvolumen von  $10 \text{ cm}^3$  ( $\varnothing = 2,67$  cm) und eine Glimmnesttemperatur von  $T = 900$  K ergeben sich aus (1.8) die in Abbildung 1.3 gezeigten Verläufe der von der Absorberfläche der Thermosäule empfangenen Strahlungsleistung.

Absorberfläche [mm <sup>2</sup> ]	Empfindlichkeit $\varepsilon$ [V/W]	Zeitkonstante $\tau$ [ms]
0,36	210	26

Tabelle 1.1: Eigenschaften einer hinsichtlich Glimmnestdetektion untersuchten Thermosäule.

Nimmt man die Gegenwart eines Staub/Luft-Gemisches mit einer Konzentration von  $c = 1 \text{ kg/m}^3$  als strahlungsabsorbierendes Medium an, so schrumpfen die Leistungskurven aus Abbildung 1.3 zu denen aus Abbildung 1.4 zusammen. Diese korrigierten Kurven ergeben sich, wenn  $\Phi_0(t)$  aus (1.8) in (1.9) eingesetzt wird.

Aus dem zeitlichen Verlauf der empfangenen Strahlungsleistung folgt schließlich das zu erwartende Messsignal  $U_m$ , indem  $\Phi(t)$  mit der Empfindlichkeit  $\varepsilon$  der Thermosäule und mit dem Exponentialfaktor aus (1.10) multipliziert wird (Formel (1.11)).

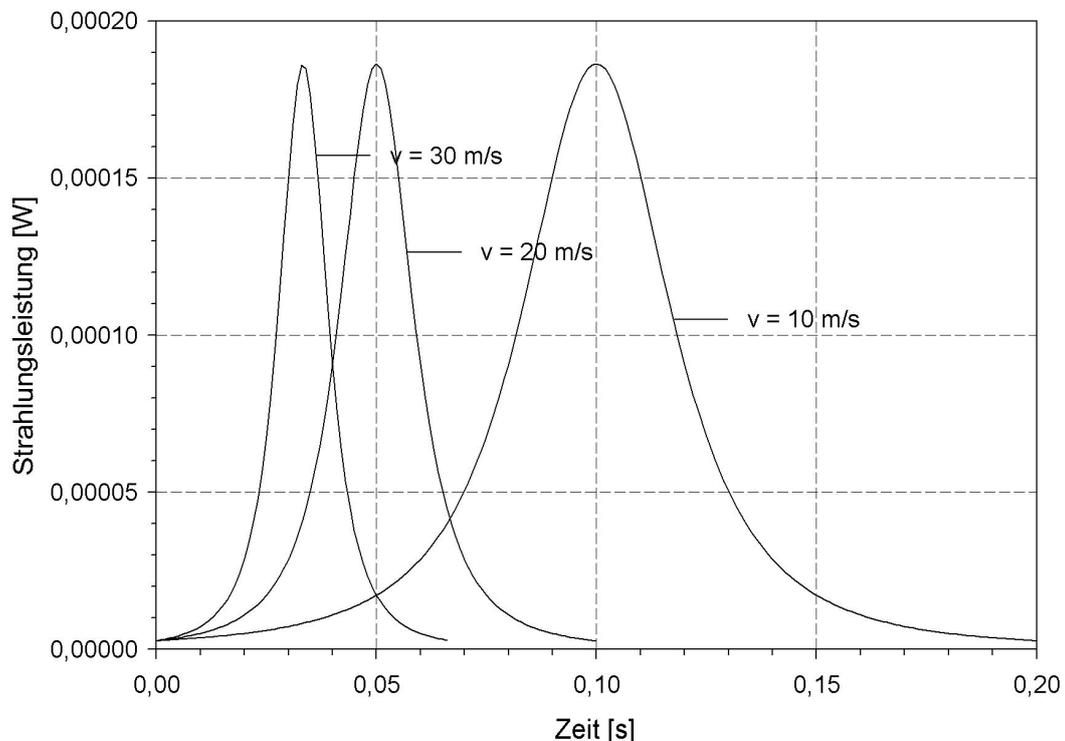


Abbildung 1.3: Von einer Absorberfläche  $A = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$  empfangene Strahlungsleistung als Funktion der Zeit bei folgenden Bedingungen: Fördergeschwindigkeit  $v = 10, 20, 30$  m/s, Rohrradius  $b = 0,25$  m, Glimmnestvolumen  $V = 10 \text{ cm}^3$ , Glimmnesttemperatur  $T = 900$  K.

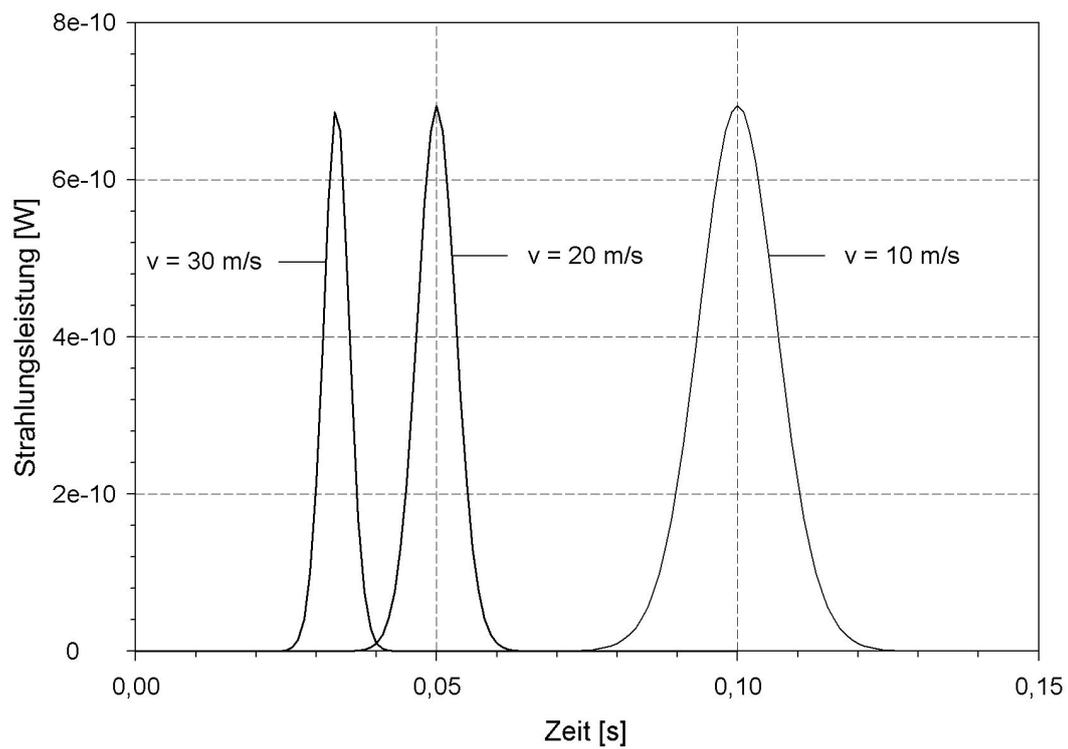


Abbildung 1.4: Von der Thermosäule empfangene Strahlungsleistung bei einer Staubkonzentration von  $c = 1 \text{ kg/m}^3$  und einem Absorptionskoeffizienten von  $\kappa = 50 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Die ursprüngliche Strahlungsleistung aus Abbildung 1.3 fällt etwa um den Faktor  $4 \cdot 10^{-6}$  ab!

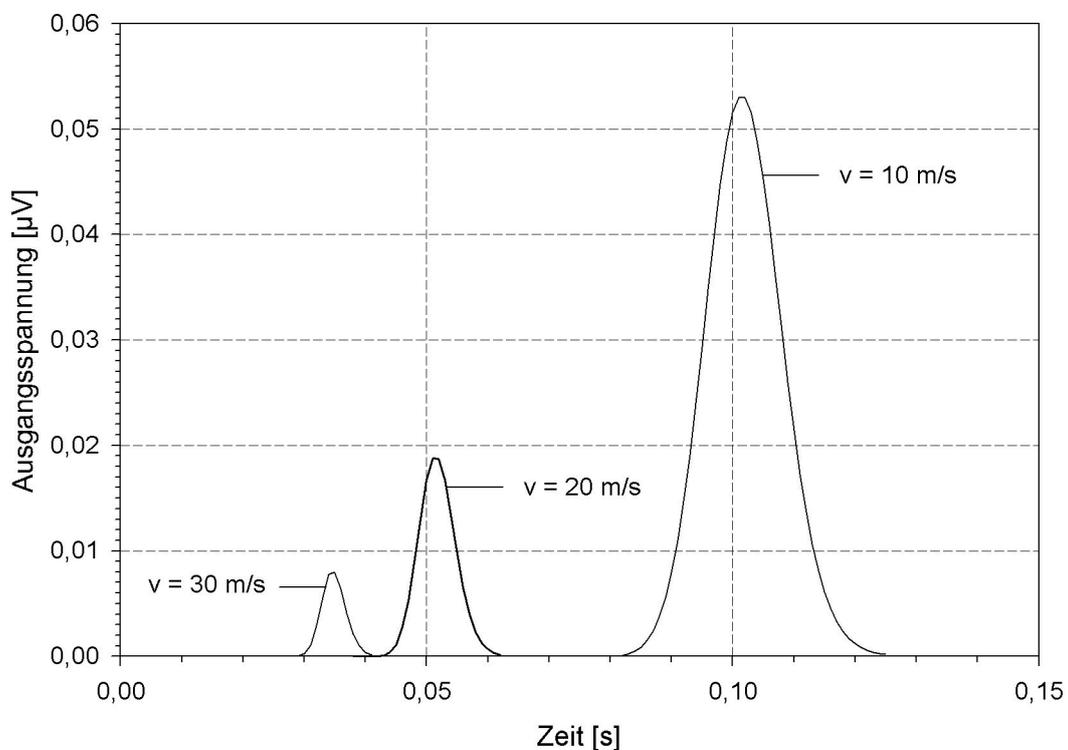


Abbildung 1.5: Zeitliche Entwicklung der Thermosäulen-Ausgangsspannung verursacht durch die Bestrahlungsleistungen aus Abbildung 1.4.

$$U_m(t) = \Phi(t) \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{\tau}{t}} \quad (1.11)$$

$\tau$  ist die schon erwähnte Zeitkonstante der Thermosäule. Die Abbildung 1.5 zeigt die Messsignale, welche die Strahlungsleistungen aus Abbildung 1.4 gemäß (1.11) hervorrufen würden. Die winzigen Spannungsspitzen in Abbildung 1.5 dürften - wenn überhaupt - nur mit erheblichem Aufwand messtechnisch zu erfassen sein. Folglich kommt die untersuchte Thermosäule für die Glimmnesterkennung in pneumatischen Förderrohren kaum in Frage.

## 1.3 Bleisulfid-Detektor

### 1.3.1 PS3-0-51

Bleisalz-Sensoren sind wesentlich besser für die Detektion von Glimmnestern geeignet als eine Thermosäule, wie man schon durch Vergleich der Tabelle 1.1 mit Tabelle 1.2 erkennt.

Absorberfläche [mm <sup>2</sup> ]	Empfindlichkeit $\varepsilon$ [V/W]	Zeitkonstante $\tau$ [ms]
1	$3 \cdot 10^5$	0,3

Tabelle 1.2: Eigenschaften eines PbS-Infrarot-Sensors der Firma Craseby-Infrared vom Typ PS3-0-51.

Da die Sensorfläche des PS3-0-51 etwa 2,778 mal größer ist als diejenige der zuvor untersuchten Thermosäule, wird gegenüber der Thermosäule auch eine 2,778 mal höhere Strahlungsleistung empfangen, wenn die äußeren Bedingungen für beide Detektoren gleich sind. Für die in Abschnitt 1.2 dargestellte Messsituation ergeben sich folglich die Kurven aus Abbildung 1.6 für die zeitliche Entwicklung der von der Absorberfläche empfangenen Strahlungsleistung wenn keine Absorption vorliegt. In Anwesenheit eines absorbierenden Staub/Luft-Gemisches ergeben sich die Kurven aus Abbildung 1.7.

Die enorme Empfindlichkeit des PS3-0-51 ermöglicht es, dass die Bestrahlungsleistungen aus Abbildung 1.7 ein Messsignal hervorrufen, dessen Amplitude beinahe 0,6 mV erreicht. Die sehr kurze Zeitkonstante des Detektors bewirkt, dass die Geschwindigkeit eines an der Absorberfläche des Detektors vorbeifliegenden Glimmnestes keinen Einfluss auf die Amplitude des Messsignals hat. Die Detektionsleistung wird dadurch gegenüber der Thermosäule nochmals gesteigert.

Die Spannungsverläufe aus Abbildung 1.8 sollten groß genug dafür sein, um durch eine angeschlossene Elektronik zu einem allgemein nutzbaren Signal weiter verarbeitet werden zu können.

### 1.3.2 PS3-0-52

Der Einsatz des PS3-0-52 bringt gegenüber dem PS3-0-51 keinen Vorteil, da der Gewinn durch eine doppelt so große Absorberfläche durch eine halbierte Empfindlichkeit wieder kompensiert wird. In Tabelle 1.3 sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften des PS3-0-52 zusammengestellt.

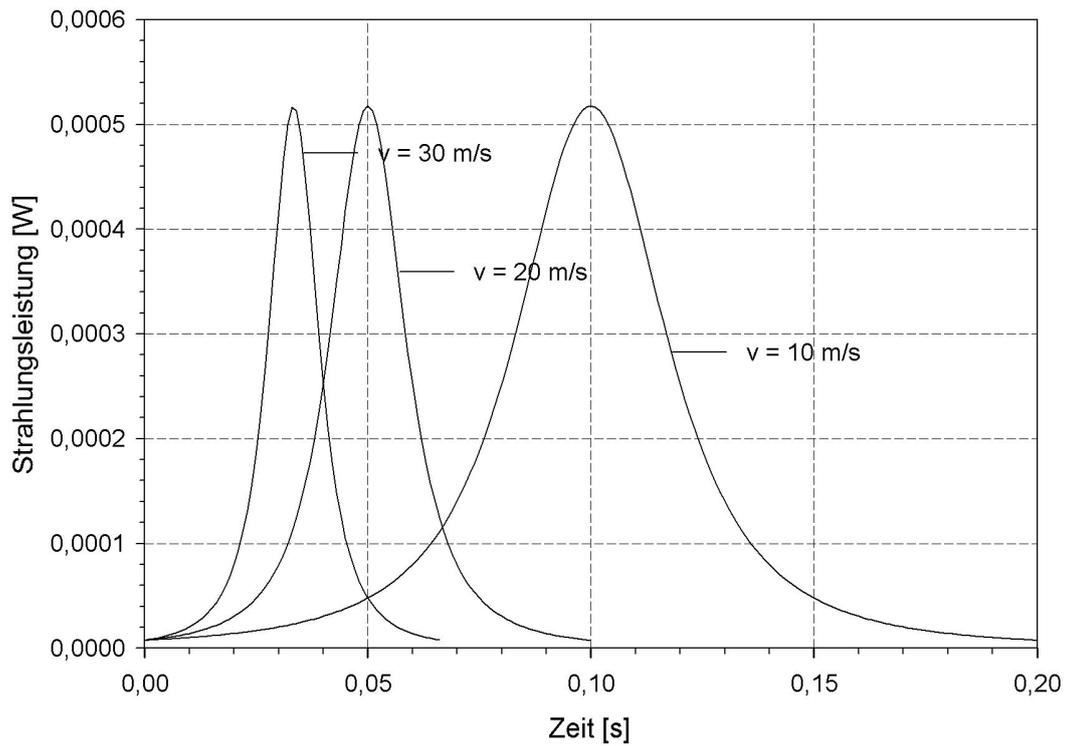


Abbildung 1.6: Von einer Absorberfläche  $A = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  empfangene Strahlungsleistung als Funktion der Zeit bei folgenden Bedingungen: Fördergeschwindigkeit  $v = 10, 20, 30$  m/s, Rohrradius  $b = 0,25$  m, Glimmestvolumen  $V = 10 \text{ cm}^3$ , Glimmestemperatur  $T = 900$  K.

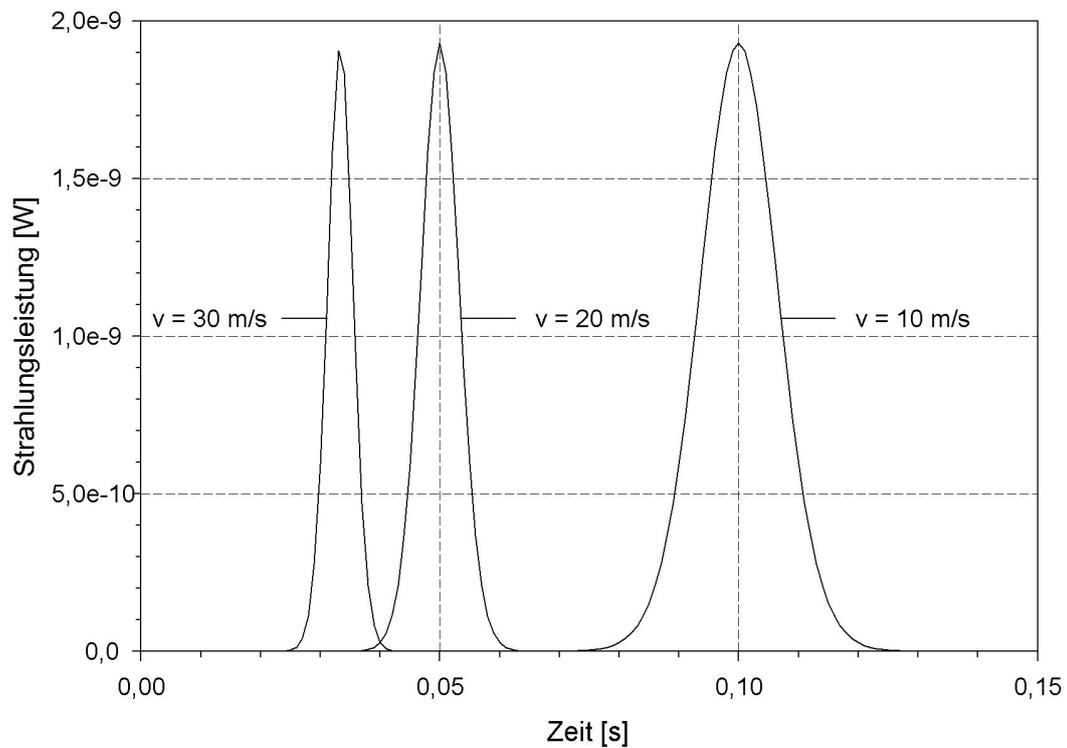


Abbildung 1.7: Von einem PbS-Detektor empfangene Strahlungsleistung bei einer Staubkonzentration von  $c = 1 \text{ kg/m}^3$  und einem Absorptionskoeffizienten von  $\kappa = 50 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

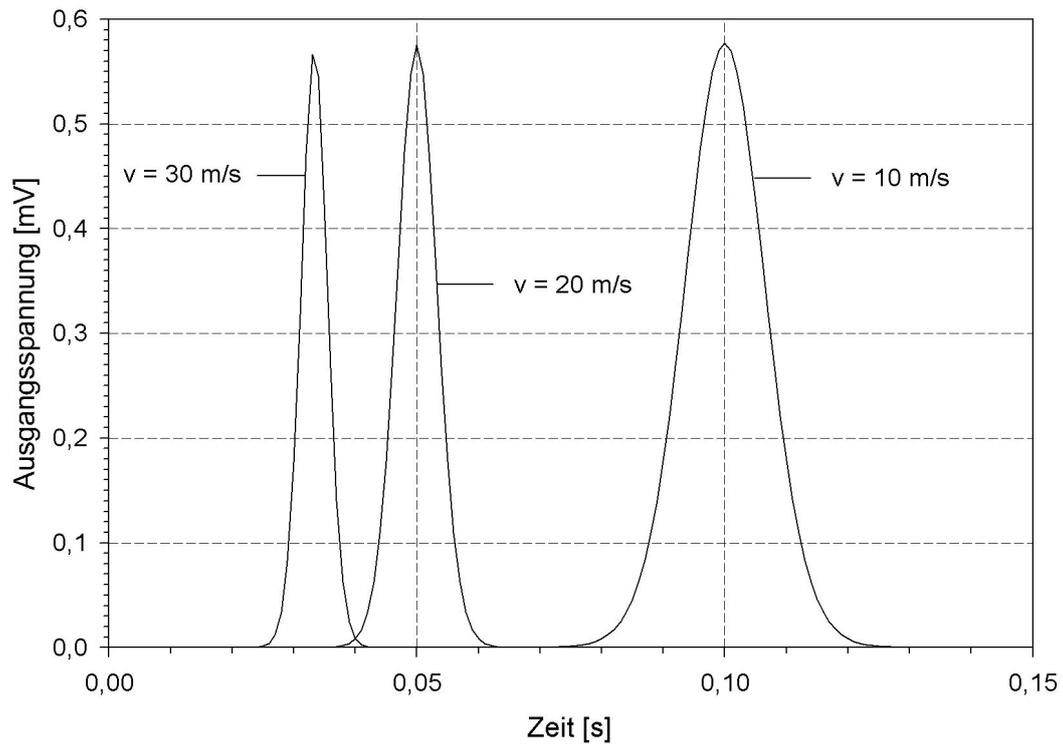


Abbildung 1.8: Zeitliche Entwicklung der PbS-Detektor-Ausgangsspannung verursacht durch die Bestrahlungsleistungen aus Abbildung 1.7.

Absorberfläche [mm <sup>2</sup> ]	Empfindlichkeit $\varepsilon$ $\left[\frac{\text{V}}{\text{W}}\right]$	Zeitkonstante $\tau$ [ms]
2	$1,5 \cdot 10^5$	0,3

Tabelle 1.3: Eigenschaften eines PbS-Infrarot-Sensors der Firma Craseby-Infrared vom Typ PS3-0-52.

# Kapitel 2

## Experimentelle Untersuchungen

### 2.1 Aufbau eines Detektionssystems

Der hier entwickelte Prototyp eines Glimmnestdetektionssystems besteht im wesentlichen aus vier Einheiten. Zwei Sensoren überwachen gleichzeitig den dafür vorgesehenen Ort im Rohr, wobei sich beide Sensoren mit ihren Detektionsflächen gegenüberstehen. Zunächst benötigen beide verwendeten Sensoren eine Vorspannung von +60 V, welche an die PbS-Detektoren angelegt wird. Bei Bestrahlung der Detektionsflächen mit Infrarot-Licht verändern die Sensoren ihren Widerstand. Weil zwischen Sensor und Spannungsquelle ein Festwiderstand von 1 M geschaltet ist, fällt bei einer Widerstandsverringerung des Sensors die Vorspannung am 1 M-Widerstand entsprechend ab. Diese Spannungsschwankung im mV-Bereich wird im zweiten Teil des Systems verstärkt. Im dritten Teil des Systems wird durch eine Logik immer dann ein heißes Objekt angezeigt, wenn - je nach Betriebszustand - das Signal eines Verstärkerausganges oder die Signale beider Verstärkerausgänge simultan einen bestimmten Schwellenspannungswert überschreitet bzw. überschreiten. Schließlich werden im vierten Teil der Anlage die Versorgungsspannungen von  $\pm 15$  V bereitgestellt.

#### 2.1.1 Vorspannung (Bias)

Zur Bereitstellung der benötigten Vorspannung von +60 V wird die Netzspannung transformiert, gleichgerichtet und durch einen Elektrolyt-Kondensator geglättet (Abbildung 2.1). Um das Netzbrummen weitestgehend zu unterdrücken, wurde ein stark abschirmendes Gehäuse verwendet sowie dem Gleichrichter ein Tiefpass nachgeschaltet. Die vom Bias/Sensoren-System abgegebenen Signale werden auf zwei Verstärkereinheiten weitergegeben.

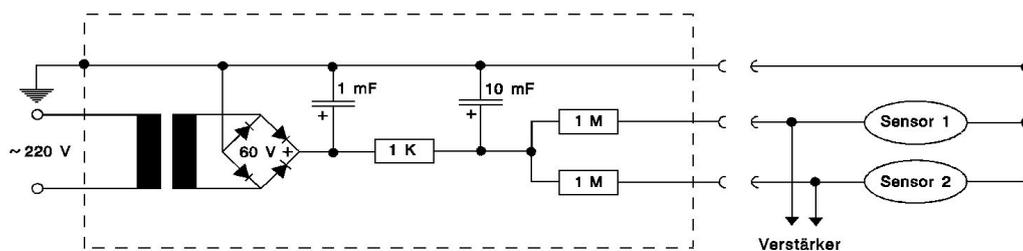


Abbildung 2.1: Schaltplan für die Detektor-Vorspannung und die Sensoranschlüsse.

### 2.1.2 Verstärker mit Schmitt-Trigger

Das Glimmnestdetektionssystem wird mit insgesamt zwei Verstärkern (einen pro Sensor) vom Typ aus Abbildung 2.2 betrieben, dessen Funktionsweise im folgenden beschrieben wird. Nach einem Eingangshochpass wird das vom System Vorspannung/PbS-Sensor erzeugte Signal invertiert und zweifach verstärkt (erster Operationsverstärker, OP07EP). Anschließend wird es auf einen nichtinvertierenden Verstärker gegeben, wobei hier die Verstärkung am 5 K-Potentiometer variiert werden kann (zweiter Operationsverstärker,  $\mu A741$ ). An dessen Ausgang durchläuft das Signal nochmals einen Hochpass und wird anschließend von seinen negativen Anteilen durch eine Diode befreit. Schließlich wird dieses Signal auf eine Komparator-Schaltung bzw. einen Schmitt-Trigger gegeben (dritter Operationsverstärker, OP07EP), dessen Ansprechschwelle mit Hilfe eines Spannungsteilers auf 1 mV eingestellt ist. Dieser Schwellenspannung wird das Komparator-Eingangssignal stark tiefpassgefiltert und abgeschwächt überlagert, damit die Ansprechschwelle dieses Schmitt-Triggers auf Netzschwankungen reagieren kann. So können Fehlauflösungen des Systems unterdrückt werden. Beim Überschreiten der 1 mV-Schwelle am Komparator-Eingang gibt der Schmitt-Trigger einen etwa 14 V hohen Rechteckimpuls ab, dessen Dauer mit der Dauer der Schwellenüberschreitung übereinstimmt. Die Ausgänge der Schmitt-Trigger beider Verstärkereinheiten werden auf die anzeigende Logik gegeben.

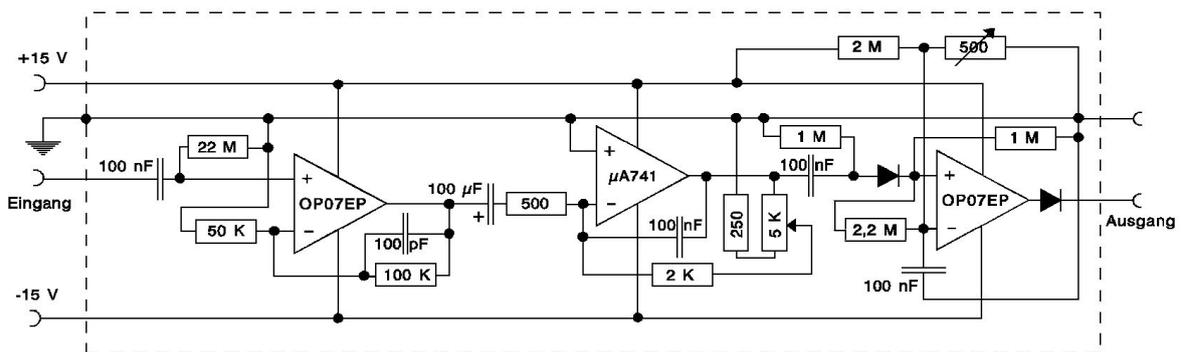


Abbildung 2.2: Schaltplan für einen Verstärker mit ausgangsseitigem Schmitt-Trigger.

### 2.1.3 Anzeigende Logik

Die von den Verstärkereinheiten kommenden Rechteckimpulse werden auf die Eingänge eines NAND-Gatters gegeben, von denen der in Abbildung 2.3 eingezeichnete Baustein HCF 4011BE vier Stück enthält. Kommen zwei Rechteckimpulse auf beiden Eingängen simultan an, so wird für die Dauer der Übereinstimmung ein negativer Rechteckimpuls vom NAND-Gatter abgegeben. Bei geöffnetem Schalter S (Abbildung 2.3) ist das der Fall, wenn beide Sensoren gleichzeitig ein Objekt detektieren. Ist Schalter S geschlossen, wird der negative Rechteckimpuls abgegeben, wenn einer der beiden Sensoren anspricht. Über ein zweites NAND-Gatter wird dieser Impuls umgekehrt und auf einen Transistor gegeben, der für die Dauer des anliegenden positiven Rechteckimpulses den Stromkreis für eine Leuchtdiode schließt und diese für die Dauer des Ereignisses zum Leuchten bringt. Diese Diode ist außerdem aktiv und zeigt damit einen Fehler im System an, wenn die Sensoren nicht angeschlossen sind. Die verbleibenden beiden NAND-Gatter sind zu einem Flip-Flop geschaltet, der bei

einer Auslösung des Eingangs-NAND-Gatters positiv gesetzt wird und ebenfalls einen Transistor durchschaltet. Dadurch wird eine zweite Leuchtdiode dauerhaft aktiviert, welche dann die Detektion eines Glimmnestes anzeigt. Durch Schalterbetätigung wird die Logik zurückgesetzt.

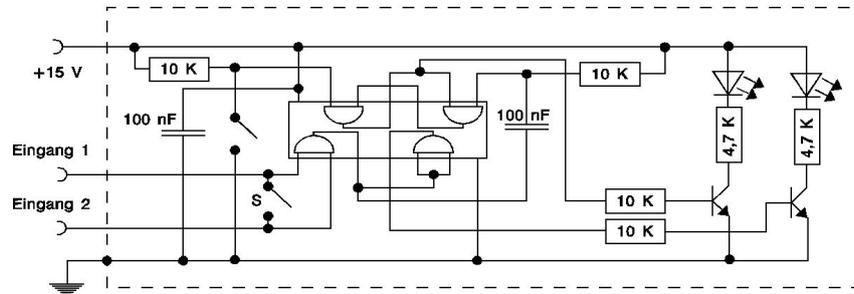


Abbildung 2.3: Schaltplan der Signalauswertelogik mit anzeigenden Leuchtdioden.

### 2.1.4 Versorgungsspannung

Sowohl die Verstärkereinheiten als auch die anzeigende Logik benötigen eine Betriebsspannung von  $\pm 15$  V bzw.  $+15$  V. Diese Spannungen werden durch die Versorgung aus Abbildung 2.4 bereitgestellt. Die Netzspannung wird auf 18 V transformiert, positiv und negativ gleichgerichtet sowie durch zwei Elektrolytkondensatoren geglättet. Die beiden Spannungsregler LM317 und LM337 dienen der Einstellung (regalbar an den  $100 \Omega$ -Potentiometern) und Stabilisierung der Ausgangsspannungen auf exakt  $\pm 15$  V. Abschließend werden die Gleichspannungen nochmals durch zwei Tiefpässe geglättet.

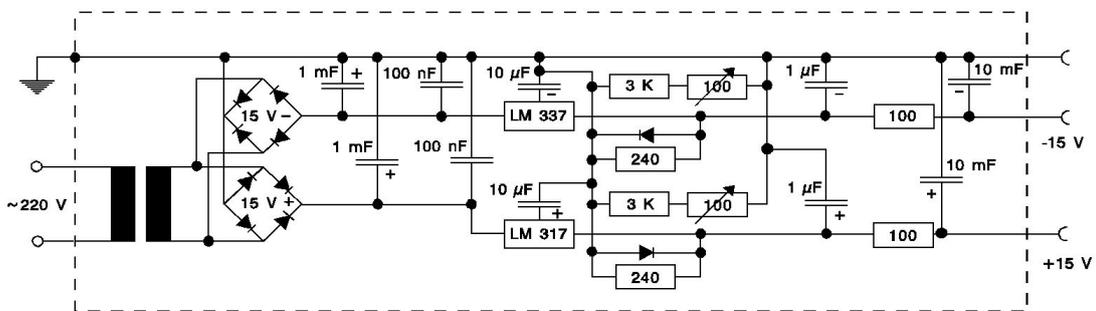


Abbildung 2.4: Schaltplan für die Versorgungsspannung von Verstärker und Logik.

### 2.1.5 Test des Prototypen

#### 2.1.5.1 Tests im Labor ohne Staub

Das unter Abschnitt 2.1 beschriebene System wurde zunächst im Labor einigen Tests unterzogen. Die in einem Kunststoffrohr eingebauten Sensoren sollten dabei handwarme Aluminium-Deckel (Durchmesser rund 3 cm) aufspüren, die mit Hilfe der Laborpressluft durch das Rohr befördert wurden (Abbildung 2.5). Um den Aufwand dieser Experimente in Grenzen zu halten, wurde keine Staub mit den Aluminium-Deckeln gefördert. Die Detektion der Deckel gelang bei jedem Versuch, war also absolut zuverlässig.



Abbildung 2.5: Test des Prototypen im Labor.

#### 2.1.5.2 Praxisnahe Tests auf dem BGN-Versuchsgelände

Um zu sehen, ob der aufgebaute Prototyp dazu in der Lage ist, warme Aluminium-Töpfchen unter weitgehend praxisnahen Bedingungen zu detektieren, wurden die beiden IR-Sensoren in ein pneumatisches Fördersystem integriert, welches sich auf dem BGN-Versuchsgelände befindet. Bei der Förderanlage handelt es sich um ein langgestrecktes U-förmiges Rohr von 200 mm Durchmesser, an dessen einen Ende eine Saugpumpe installiert ist. Am anderen, offenen Ende der Rohrleitung kann über eine Förderschnecke das Fördergut aufgegeben werden sowie auch die Aluminium-Töpfchen.

Randbedingungen der Experimente:

- Temperatur: 2 °C, Luftdruck 955 mbar, rel. Feuchte 93 %
- Rohrdurchmesser: 200 mm
- Abstand der Sensorstirnflächen: 210 mm
- Abstand Fördergutaufgabe – Sensoren: 3,65 m
- Temperatur der Alutöpfchen: 75 ± 15 °C
- Schalter S geöffnet

Aus Tabelle 2.1 sind die Ergebnisse dieser Tests zu entnehmen. Wie auch im Labor wurden alle Aluminium-Töpfchen detektiert bei Abwesenheit von gefördertem Staub (Tests Nr. 1 bis Nr. 3). Bei den Tests Nr. 4 bis Nr. 15 wurde Staub mit einer mittleren Konzentration von 100 g/m<sup>3</sup> bei unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten gefördert. Hier war eine

zuverlässige Detektion der warmen Aluminium-Töpfchen nicht möglich. Bei niedriger Triggerschwelle und hoher Signalverstärkung kam es zu Fehlauflösungen am Prototypen, hervorgerufen durch Staubinhomogenitäten im Förderstrom (Versuch Nr. 12). Bei heraufgesetzter Triggerschwelle bzw. herabgesetzter Signalverstärkung war eine Detektion nur im Einzelfall erfolgreich. Dieses Ergebnis liegt in der niedrigen Temperatur der Aluminium-Töpfchen und der damit verbundenen geringen Strahlungsemission begründet. Die von den Töpfchen emittierte IR-Strahlung reicht nicht aus, um die in der Förderleitung vorhandene Staubbiladung in der Art zu durchdringen, dass gleichzeitig (Schalter S geöffnet) ein ausreichend hohes Signal an beiden IR-Sensoren generiert wird.

Nummer	$v$ [m/s]	$c$ [g/m <sup>3</sup> ]	$S_T$ [mV]	$\Delta t$	Glimmnest	Detektion
1	20	0	1	-	Alutöpfchen, schwarz	positiv
2	20	0	1	1,66	Alublech	positiv
3	30	0	1	1,43	Alublech	positiv
4	20	100	1	-	Alutöpfchen, schwarz	positiv
5	20	100	10	-	-	negativ
6	20	100	10	-	Alutöpfchen, schwarz	negativ
7	20	100	5	-	-	negativ
8	20	100	5	-	Alutöpfchen, schwarz	negativ
9	20	100	3	-	-	negativ
10	20	100	3	-	Alutöpfchen	negativ
11	20	100	2	-	-	negativ
12	20	100	2	-	-	positiv
13	20	100	2	-	-	negativ
14	20	100	2	-	Alutöpfchen	negativ
15	20	100	2	-	Alutöpfchen, schwarz	positiv

Tabelle 2.1: Tabellarisch dargestellte Ergebnisse der Glimmnestdetektionsversuche. Es bedeuten  $v$  die Fördergeschwindigkeit,  $c$  die Staubkonzentration,  $S_T$  die Triggerschwelle des Detektionssystems und  $\Delta t$  die Zeitspanne zwischen Herausnahme der Aluminium-Töpfchen aus dem siedenden Wasser bis zum Ansprechen der Detektionsanlage. Die Versuche ohne Glimmnest (Aluminium-Töpfchen) dienten der Überprüfung, ob die Detektionsanlage nur durch den transportierten Staub ausgelöst wird.

## 2.2 Experimentelle Bestimmung der Detektionsgrenzen

### 2.2.1 Versuchsaufbau

Die Ergebnisse der Testreihe auf dem BGN-Versuchsgelände (Abschnitt 2.1.5.2) legten nahe, zunächst die prinzipiellen Messgrenzen eines IR-Detektionssystems auszuloten, bevor an einer Weiterentwicklung des Prototypen gearbeitet wird. Deshalb wurde mit Hilfe eines experimentellen Aufbaus (siehe Abbildung 2.6) die Abhängigkeit des Sensorsignals von Glimmnesttemperatur und Staubbiladung untersucht.

### 2.2.1.1 Ofen und Blende

Das Glimmnest wird von der planen, runden Fläche ( $\varnothing = 3 \text{ cm}$ ,  $A = 7 \text{ cm}^2$ ) eines geschwärzten Kupferblocks simuliert, der von einem stufenlos regelbaren Ofen beheizt wird. Die von dieser Fläche ausgehende Wärmestrahlung ist annähernd der eines Glimmnestes gleichzusetzen. Die am Ofen eingestellte Temperatur (max.  $450 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wird am Ofennetzteil überwacht. Die hier interessierende Temperatur des Kupferblocks (max.  $413 \text{ }^\circ\text{C}$ ) wird mit einem, in einer Seitenbohrung nahe der Oberfläche angebrachtem, Temperaturfühler gemessen und extern angezeigt. Zur räumlichen Begrenzung der von der Kupferblockfläche emittierten IR-Strahlung befindet sich eine Lochblende (Fläche etwa  $1 \text{ cm}^2$ ) im Strahlengang.

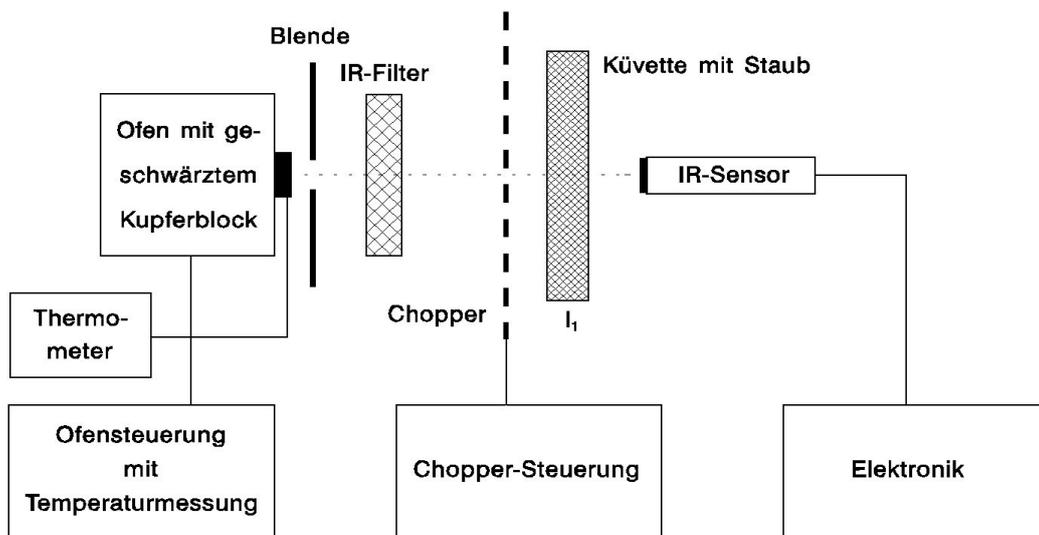


Abbildung 2.6: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Abhängigkeit des Sensorsignals von Glimmnesttemperatur und Staubkonzentration. Ein beheizter und geschwärzter Kupferblock repräsentiert das Glimmnest. Die Staubkonzentration wird durch eine dünne Staubschicht innerhalb der Küvette simuliert.

### 2.2.1.2 IR-Filter und Chopper

Im Strahlengang befindet sich zur Ausblendung von Fremdlicht ein Infrarot-Filter (RG 850). Um auch den letzten Einfluss von unerwünschtem Streulicht auszuschalten, wurden die Versuche im Dunkeln durchgeführt. Nach dem IR-Filter ist ein Chopper im Strahlengang positioniert, der die von der heißen Kupferblockoberfläche emittierte IR-Strahlung periodisch abschirmt bzw. freigibt. Dies ist notwendig, da die Sensoren nur zeitlich veränderliche Signale registrieren können.

### 2.2.1.3 Küvette

Die Küvette (IR-durchlässige Infrasil-Fenster) dient der Aufnahme und Herstellung der Staubsuspension, durch die es die heiße Kupferfläche zu detektieren gilt. Bei den Versuchen, ein geeignetes Lösungsmittel für eine Suspension zu finden, ist leider kein positives Ergebnis erzielt worden. Die Idee war, in einer Küvette aus Infrasil-Scheiben eine Suspension

mit definierten, homogenen aber veränderlichen Staubkonzentrationen zu erzeugen und dann die Lichtschwächung in Abhängigkeit der Konzentration zu messen.

Lösungsmittel	$U/U_0$
H <sub>2</sub> O (Wasser)	0,002
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (Ethanol)	0,010
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O (Aceton)	0,017
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (n-Hexan)	0,009
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> (Cyclo-Hexan)	0,008

Tabelle 2.2: Abschwächung von IR-Licht beim Durchgang durch verschiedene Lösungsmittel.  $U_0$  bzw.  $U$  ist die Signalhöhe am IR-Sensor ohne bzw. mit Lösungsmittel.

Bei der Untersuchung der Lösungsmittel auf IR-Transmission wurde der Kupferblock auf 400 °C erhitzt und anschließend das Spannungssignal des Sensor/Verstärker-Systems mit leerer bzw. gefüllter Küvette gemessen und miteinander verglichen. Die Ergebnisse in Tabelle 2.2 zeigen, dass der Intensitätsverlust des IR-Lichtes beim Durchgang durch die gefüllte Küvette zu groß ist, um eine verlässliche Messung zu gewährleisten.

Da nach diesem Ergebnis in Suspension nicht gemessen werden konnte und besser geeignete, aber hoch giftige Lösungsmittel nicht eingesetzt werden sollten, wurde eine Küvette mit veränderlichem Volumen für Feststoffe eingesetzt. Dabei kann der Abstand  $l_1$  der Infrasil-Fenster stufenlos verändert (von 0 cm bis 4 cm) und somit auch das Volumen entsprechend variiert werden. Das befüllbare Volumen der Küvette beträgt 3 cm × 8 cm ×  $l_1$  cm; für  $l_1 = 0,1$  cm ergibt sich also beispielsweise ein Volumen von 2,4 cm<sup>3</sup>. Wird die Küvette mit einer bekannten Masse an Absorbermaterial vollständig gefüllt, so ist damit die Dichte der Staubschicht bekannt. Da es für den Grad der Lichtabsorption auf dem Weg zwischen Sender und Empfänger - wenigstens näherungsweise - unerheblich ist, ob das Absorbermaterial in einer dünnen Schicht oder entlang der optischen Achse homogen dispergiert ist, kann mit einer dünnen Schicht zwischen Sender und Detektor die Staubkonzentration in einer pneumatischen Förderleitung simuliert werden.

Beispiel: Maisstärke in der Küvette mit  $l_1 = 0,1$  cm. Die Küvette mit 2,4 cm<sup>3</sup> Volumen fasst 1,38 g der Maisstärke, d. h. die Konzentration beträgt  $c_1 = 0,575$  g/cm<sup>3</sup>. Mit dem bekannten Abstand zwischen Glimmnest und Detektor von  $l_2 = 13$  cm kann die simulierte Konzentration  $c_2$  aus (2.1) berechnet werden, da die Absorption durch die Küvette bzw. den angenommenen dispergierten Staub gleich sein soll:

$$I_0 \cdot e^{-\kappa c_1 l_1} \doteq I_0 \cdot e^{-\kappa c_2 l_2} \quad \Longrightarrow \quad c_2 = \frac{c_1 l_1}{l_2} = \frac{575 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,001 \text{ m}}{0,13 \text{ m}} = 4,423 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (2.1)$$

#### 2.2.1.4 IR-Sensor und Auswertung

Zur Detektion der IR-Strahlung der heißen Kupferblockfläche wurde ein Sensor verwendet, wie er unter Abschnitt 1.3.1 beschrieben ist. Ein nachgeschalteter Verstärker ermöglicht die Darstellung des Sensorsignals auf dem Bildschirm eines Oszilloskops, wo die Signalhöhe ausgemessen wird.

### 2.2.1.5 Messreihen

#### 2.2.1.5.1 Versuche mit Maisstärke

In Tabelle 2.3 sind die am Oszilloskop abgelesenen Signalhöhen in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Schichtdicken getrockneter Maisstärke gezeigt. Bei Durchstrahlung der leeren Küvette wird am Oszilloskop eine Spannungsamplitude von 9 V gemessen.

T [°C]	270	290	310	340	360	380	410	$l_1$ [mm]	$c_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Signalthöhe [mV]	1,1	2,0	5,2	9,0	13,5	17,2	21,0	0,8	3,54
Signalthöhe [mV]	-	1,0	1,2	3,2	4,4	6,5	10,0	1,0	4,42
Signalthöhe [mV]	-	-	-	-	-	-	1,4	1,5	6,63

Tabelle 2.3: Höhe des Sensorsignals in Abhängigkeit der Temperatur  $T$  des Kupferblocks und der Dicke  $l_1$  der absorbierenden Staubschicht aus Maisstärke. „-“ bedeutet, dass kein Signal mehr gemessen werden konnte. Die Raumtemperatur beträgt  $T_F = 20^\circ\text{C}$ .

Das Rauschband hat eine Signalthöhe von 1 mV, so dass ein Signal in gleicher Stärke anhand der von der Chopperfrequenz auferlegten Signalmodulation erkannt werden kann. Für ein Glimmnestdetektionssystem wird aus Gründen der Zuverlässigkeit des Systems gefordert, dass die Signalthöhe deutlich (Faktor 1,5 bis 2) über dem Rauschband liegt. Um abzuschätzen, bis zu welcher Staubkonzentration potentielle Glimmnester noch erkannt werden können, wurden die Wertepaare ( $T$ ,  $c_2$ ) der niedrigsten Signalhöhen ( $> 1$  mV) aus Tabelle 2.3 gegeneinander aufgetragen. Wird ein einfaches Potenzgesetz durch Messpunkte und Koordinatenursprung angepasst, so ergibt sich die untere Kurve aus Abbildung 2.7. Wenn man annimmt, dass in der Realität vorkommende Glimmnester Oberflächentemperaturen bis höchstens  $100^\circ\text{C}$  zeigen, dann ergibt sich aus dem Graphen eine Staubkonzentration von rund  $c_2 = 1$  kg/m<sup>3</sup>, bei der die Erkennung eines Glimmnestes gerade noch möglich sein sollte.

#### 2.2.1.5.2 Versuche mit Pfefferschrot

Zur Messung der Absorption durch grobkörniges Material wird Pfefferschrot (Korndurchmesser: 1 mm bis 2 mm) in die volumenveränderbare IR-Küvette gegeben. Für die Schichtdicke  $l_1 = 7$  mm, d. h. das Volumen von  $16,8$  cm<sup>3</sup>, ergibt sich als Füllmasse des Schrotes 7 g und damit  $c_1 = 0,417$  g/cm<sup>3</sup>. Eingesetzt in Formel (2.1) folgt als äquivalente Schrotkonzentration  $c_2 = 22,4$  kg/m<sup>3</sup>. Wie schon unter Abschnitt 2.2.1.5.1 wurden die Wertepaare ( $T$ ,  $c_2$ ) der niedrigsten Signalhöhen ( $> 1$  mV) aus Tabelle 2.4 gegeneinander aufgetragen. Anpassen eines Potenzgesetz durch Messpunkte und Koordinatenursprung ergibt die obere Kurve aus Abbildung 2.7. Im Falle grobkörnigen Materials (Pfefferschrot)

T [°C]	280	320	360	380	390	400	411	$l_1$ [mm]	$c_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Signalthöhe [mV]	2,0	7,0	16,0	22,0	-	35,0	42,0	5,0	16,04
Signalthöhe [mV]	-	-	-	-	2,0	-	5,0	7,0	22,45

Tabelle 2.4: Höhe des Sensorsignals in Abhängigkeit der Temperatur  $T$  des Kupferblocks und der Dicke  $l_1$  der absorbierenden Schicht aus Pfefferschrot. „-“ bedeutet, dass kein Signal mehr gemessen werden konnte oder kein Messwert vorliegt ( $T_F = 20^\circ\text{C}$ ).

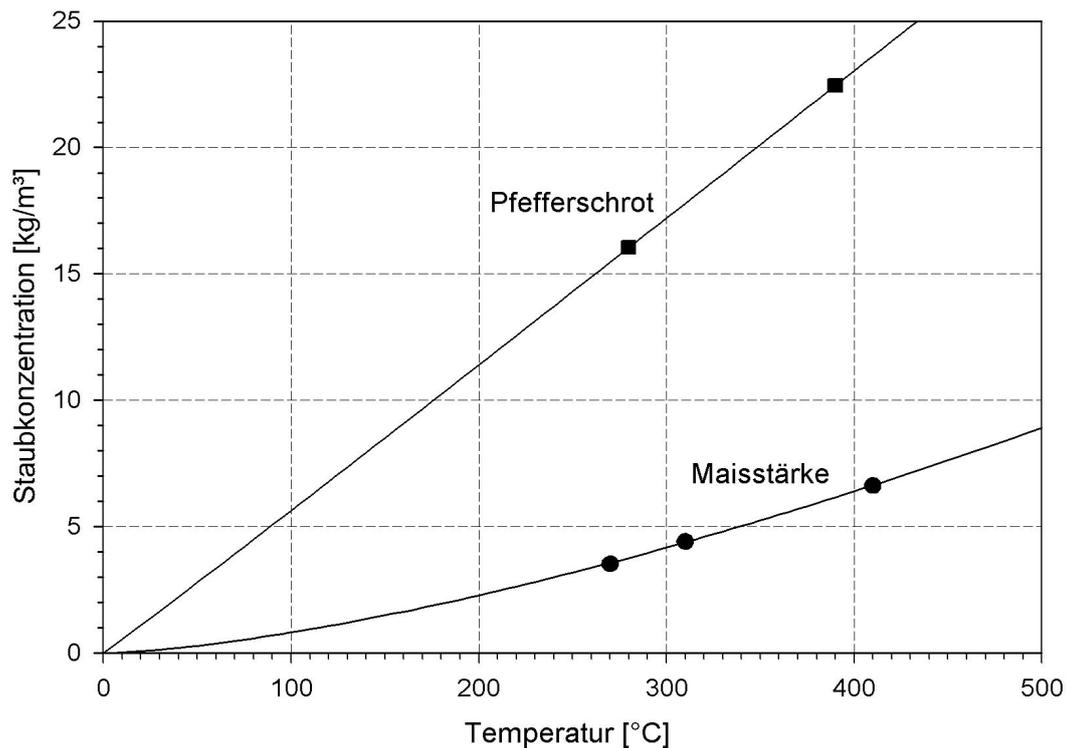


Abbildung 2.7: Obere Konzentrationsgrenze von Maisstärke bzw. Pfefferschrot hinsichtlich der Detektierbarkeit von Glimmnestern in Abhängigkeit von ihrer Oberflächentemperatur.

lässt sich eine Konzentration von etwa  $6 \text{ kg/m}^3$  ableiten, bis zu der die Detektion von Glimmnestern mit einer Oberflächentemperatur von etwa  $100 \text{ °C}$  durchführbar erscheint.

### 2.2.2 Untersuchungen auf dem Versuchsfeld Kappelrodeck

Um zu sehen, ob sich die im Labor erhaltenen Resultate auch an einer realen pneumatischen Förderleitung auf dem Versuchsfeld Kappelrodeck reproduzieren lassen, wurde ein entsprechender Versuchsaufbau verwirklicht. Der experimentelle Aufbau wurde den Verhältnissen an der Förderleitung angepasst, d. h. gegenüberstehend ein IR-Fenster und der IR-Sensor in die Wand des Förderrohres (Innendurchmesser  $8 \text{ cm}$ ) integriert. Fenster und Sensorhalterung sind so konstruiert, dass sie dem Luftdruck in der Leitung standhalten (Abbildungen 2.8 und 2.9). Wie schon bei den Versuchen im Labor, wird auch hier die Signalhöhe mit Hilfe eines Oszilloskops gemessen.

Die geförderte Staubmasse (Maisstärke) wird mittels Luftstrom und Zellenradschleuse kontrolliert. Der Luftdurchsatz war dabei auf  $8,2 \text{ m}^3$  pro Minute eingestellt, was einer Fördergeschwindigkeit von etwa  $27 \text{ m/s}$  entspricht. Die Einstellungen an der Steuereinheit der Zellenradschleuse waren: Vordruck =  $100 \text{ mbar}$ ; Anzeige Motor =  $3556$ , Gebläse =  $3200 \text{ U/min}$ , womit sich die Werte aus Tabelle 2.5 ergeben. Die Temperatur der Kupferfläche betrug  $322 \text{ °C}$  (Umgebungstemperatur:  $15 \text{ °C}$ ), der Abstand zwischen Sensor und Kupferfläche war - wie bei den Laborversuchen - auf  $13 \text{ cm}$  eingestellt. Das Nullsignal (Grundrauschen) ist um den Faktor 2 größer als bei den Laborversuchen (Netzstörungen auf dem Versuchsfeld) und in unregelmäßigen Abständen treten kurzzeitige Störungen (Spitzen) auf, die etwa um einen Faktor 5 größer sind. Eine Messung am reinen Luftstrom ergab einen Wert von  $8,2 \text{ V}$ .

Frequenz [Hz]	Beladung [kg/min]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
10	40	4,9
13	53	6,5
25	95	11,6

Tabelle 2.5: Zusammenhang zwischen Frequenz der Zellenradschleuse und der Beladung der pneumatischen Förderleitung. In der dritten Spalte ist die sich daraus ergebende mittlere Staubkonzentration  $c$  in der Förderleitung aufgelistet.

$T$ [°C]	322	322	322	322
$v$ [m/s]	27	27	27	27
Signal [mV]	28	33*	17†	3
$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	4,9	4,9	4,9	6,5

Tabelle 2.6: Ergebnisse der Detektionsversuche an der pneumatischen Förderleitung.  $T$  ist die Temperatur des Kupferblocks,  $v$  und  $c$  sind die Strömungsgeschwindigkeit und die mittlere Staubkonzentration im Rohr. \* Sensor um seine Längsachse gedreht. † Sensor um 2 cm zurückgesetzt.

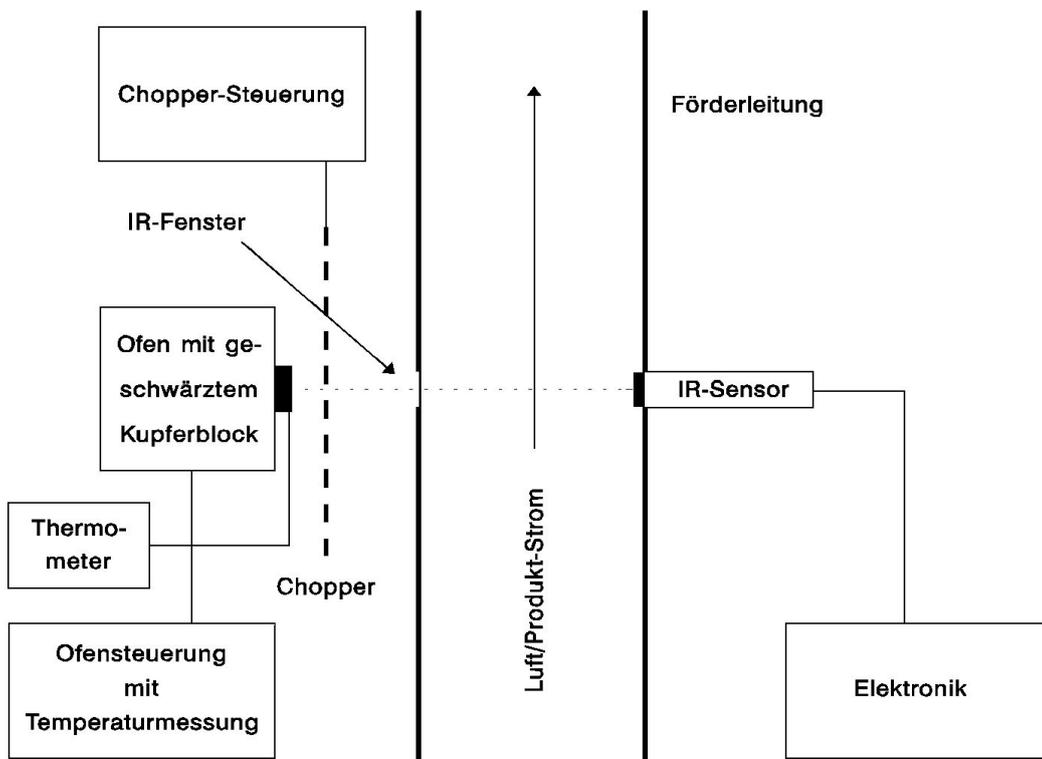


Abbildung 2.8: Skizze des experimentellen Aufbaus zur Untersuchung der Abhängigkeit des Sensorsignals von Glimmnesttemperatur und Staubkonzentration an einer pneumatischen Förderleitung. Das Glimmnest wird durch den im Labor verwendeten Kupferblock simuliert.

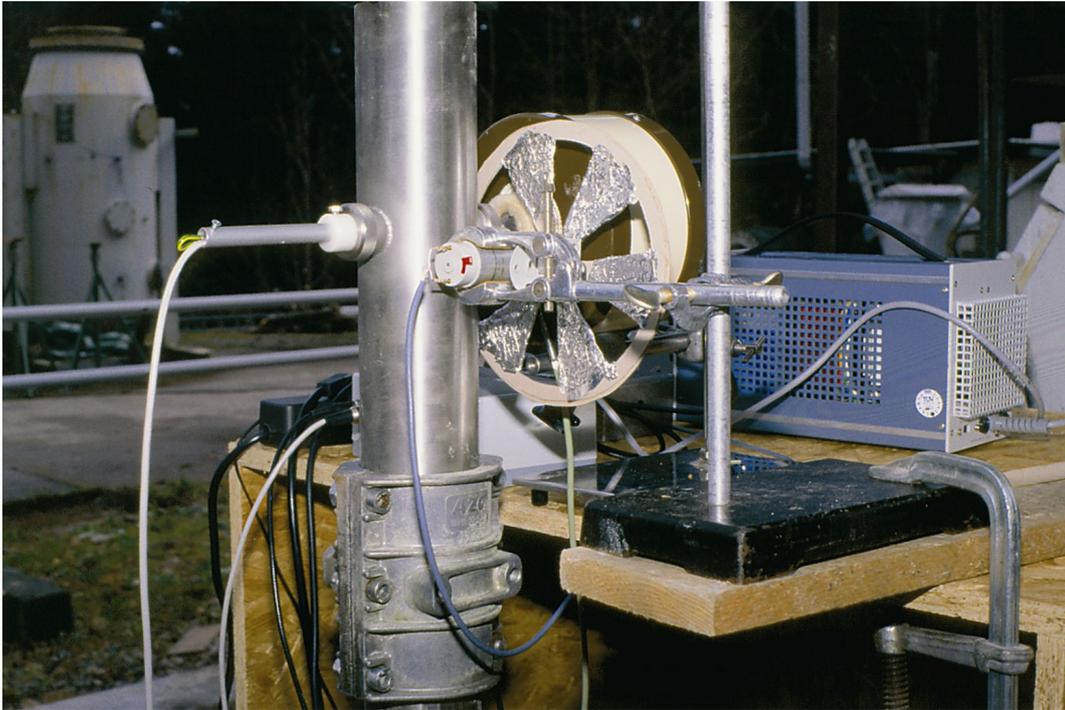


Abbildung 2.9: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Abhängigkeit des Sensorsignals von Glimmnesttemperatur und Staubkonzentration an einer pneumatischen Förderleitung. Oben: Senkrecht verläuft die Förderleitung. Im Vordergrund ist der Sensor zu sehen, im Hintergrund erkennt man den Chopper sowie den Ofen zur Beheizung des Kupferblocks. Unten: Links neben Förderleitung, Sensor und Ofen befindet sich die Zellenradschleuse, mit deren Hilfe das Förderprodukt in den Luftstrom gegeben wird.

Während der Messung war das eigentliche Signal immer nur für kurze Dauer zu sehen, da nach circa 10 Sekunden Fenster wie auch Detektor von einer dicken Staubschicht überzogen waren. Vor dem Fenster und am Detektor waren zwar Ableitbleche angebracht und es wurde auch mit verschiedenen Detektorstellungen experimentiert, jedoch war dadurch die Messzeit nur um jeweils einige Sekunden zu verlängern.

In Tabelle 2.6 sind die Ergebnisse der Versuche mit Maisstärke als Förderprodukt zusammengefasst. Bei der eingestellten Temperatur von  $T = 322\text{ °C}$  ist eine zuverlässige Detektion bis zu der Konzentration  $c = 6,5\text{ kg/m}^3$  möglich (Signalhöhe = 3 mV). Über diesen Wert hinaus ist wegen des starken Sensorrauschens und wegen der Störsignale eine sichere Glimmnesterkennung nicht mehr gewährleistet. Um dieses Ergebnis mit den Resultaten der entsprechenden Laborversuche vergleichen zu können, muss der hier ermittelte Grenzwert für die Staubkonzentration zunächst auf die Verhältnisse im Labor umgerechnet werden. Im Labor wurde eine staubbeladene Säule von 13 cm Höhe (simuliert) durchstrahlt; bei den hier beschriebenen Feldversuchen betrug die Höhe dieser Säule 8 cm (Rohrdurchmesser). Setzt man diese beiden Längenwerte und die dem 3 mV-Signal entsprechende Konzentration von  $6,5\text{ kg/m}^3$  in Formel (2.1) ein, so ergibt sich eine äquivalente Konzentration von  $4\text{ kg/m}^3$ . Betrachtet man die Ergebnisse der Laborversuche (Tabelle 2.3), so schätzt man ab, dass einer Signalhöhe von 3 mV bei einer Kupferblocktemperatur von  $322\text{ °C}$  eine Staubkonzentration von etwas mehr als  $4\text{ kg/m}^3$  entspricht. Unter Berücksichtigung der Unterschiede in den äußeren Bedingungen (z. B. Umgebungs- und Förderstromtemperatur) sowie der Messfehler, stimmen die Ergebnisse der Feld- und Laborversuche überein. Aus diesem Grund wurde auf Versuche mit grobkörnigen Material verzichtet.

### 2.2.3 Interpretation der Messergebnisse

Die Ergebnisse der Labor- und Feldversuche zeigen: Ein potentiell Glimmnest mit einer angenommenen Oberflächentemperatur von  $T_O = 100\text{ °C}$  kann bei einer Umgebungs- bzw. Förderstromtemperatur  $T_F \leq 20\text{ °C}$  auf Grund seiner IR-Emission noch zuverlässig detektiert werden, wenn die Konzentration von Maisstärke oder ähnlichen Stäuben einen Wert von  $c \approx 1\text{ kg/m}^3$  nicht überschreitet. Dies gilt für kleine Rohrdurchmesser bis 13 cm. Bei größerem Rohrdurchmesser, niedrigerer Glimmnestoberflächentemperatur oder höherer Umgebungs- bzw. Förderstromtemperatur verringert sich diese Grenzkonzentration und umgekehrt. Beispiel:  $c \approx 6\text{ kg/m}^3$  für  $T_O \approx 400\text{ °C}$  und  $T_F \leq 20\text{ °C}$ .

Werden körnige Produkte gefördert mit ähnlichen Eigenschaften wie das hier verwendete Pfefferschrot (Korndurchmesser 1 mm bis 2 mm), so ist eine Glimmnesterkennung bis zu einer Produktkonzentration von  $c \approx 6\text{ kg/m}^3$  möglich, wenn ansonsten obige Bedingungen gelten.

## 2.3 Entwicklung von Glimmnestern für Versuchszwecke

Um die Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt 2.2 mit möglichst realen Glimmnestern zu überprüfen, wurde verschiedene Möglichkeiten ausgelotet, solche Glimmnestern künstlich zu erzeugen. Diese Glimmnestern sollten dann in den Produktstrom einer pneumatischen Förderleitung eingebracht und mit dem Prototypen nach Möglichkeit detektiert werden. In Laborversuchen wurden Glimmnestern aus verschiedenen Produkten hergestellt und die Temperaturverteilung innerhalb und in der Nähe des Glimmnestes aufgezeichnet.

### 2.3.1 Glimmnester aus Sonnenblumenkernschrot

In einer Versuchsreihe im Labor wurden Glimmnester aus Sonnenblumenkernschrot hergestellt. Mit insgesamt 6 Temperatursonden ist die Temperatur innerhalb sowie auch an verschiedenen Punkten außerhalb des Glimmnestes in Abhängigkeit der Zeit gemessen worden. Die Glimmnester wurden in einem Drahtkorb ( $D = 60 \text{ mm}$ ) erzeugt. Die Sensoren befanden sich 20 mm über dem Korb (Sensor 3), 1 mm, 5 mm und 20 mm (Sensoren 4, 5, und 6) mittig seitlich daneben sowie innen mittig in der Hälfte und 5 mm vom Rand  $2/3$  tief (Sensoren 1 und 2). In Abbildung 2.10 ist dieser Aufbau schematisch dargestellt.

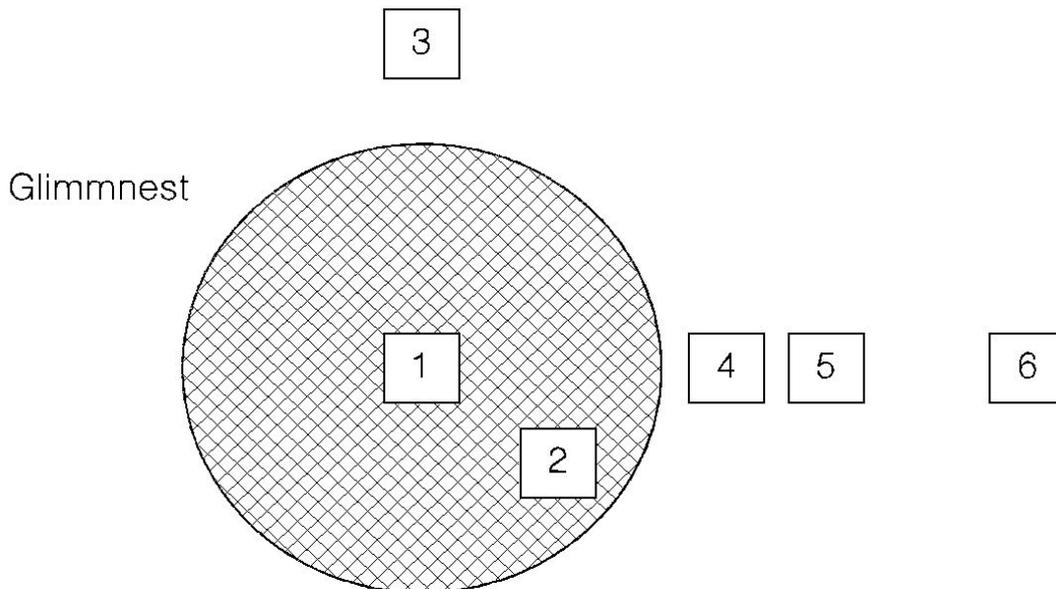


Abbildung 2.10: Verteilung der Temperatursonden Nummer 1 bis 6 am künstlich erzeugten Glimmnest im Labor.

Für die Versuche mit Sonnenblumenkernschrot wurden auf verschiedene Art und Weise solche Glimmnester hergestellt und mit den Temperatursonden präpariert. Die Temperatureaufzeichnung wurde dann jeweils nach der Entzündung gestartet. Tabelle 2.7 zeigt die gemessenen maximalen Temperaturen der einzelnen Temperatursonden für jedes der Glimmnester. Die gemessenen Temperaturen zeigen, dass Glimmnester aus Sonnenblumenkernschrot bezogen auf ihren Energieinhalt durchaus für Detektionsexperimente geeignet sind. Jedoch ist zu beachten, dass mit Handdruck geformte Kugeln sehr instabil sind und in einer pneumatischen Förderanlage sehr schnell zerfallen. Aus diesem Grund sind Glimmnester aus diesem Material nur bedingt für Versuche dieser Art geeignet.

### 2.3.2 Glimmnester aus Stahlwolle

Um die Stabilitätsprobleme der Glimmnester aus Sonnenblumenkernschrot zu umgehen, wurde mit handgeformten Kugeln aus Stahlwolle experimentiert. Im Versuch wurden diese Kugeln (Durchmesser etwa 2 cm) mit einem Gasbrenner einseitig entzündet und die Temperaturentwicklung an den Messpositionen aus Abbildung 2.10 mit einem Schreiber verfolgt (Abbildung 2.11). Die maximal erreichten Temperaturen an diesen Messorten sind in Tabelle 2.8 aufgelistet. An der zentralen Messposition im Glimmnest (Sensor 1) ist die zeitliche Entwicklung

Sonnenblumenkernschrot	geschütet <sup>‡</sup>	fest angedrückt <sup>‡</sup>	hammerverdichtet <sup>‡</sup>	handdruckgeformte Kugel	glühende Mutter im Produkt
$T_{\max}(1)$ [°C]	580	710	90*	480	85*
$T_{\max}(2)$ [°C]	650	630	90*	400	40*
$T_{\max}(3)$ [°C]	50	80	25*	170	24*
$T_{\max}(4)$ [°C]	130	120	25*	-	30*
$T_{\max}(5)$ [°C]	75	65	25*	-	24*
$T_{\max}(6)$ [°C]	55	50	25*	-	24*

Tabelle 2.7: Gemessene maximale Temperatur  $T_{\max}$  an den Temperatursonden Nummer 1 bis 6 bei der Untersuchung verschiedener Glimmnester aus Sonnenblumenkernschrot. Mit <sup>‡</sup> markierte Glimmnester wurden mit dem Brenner seitlich entzündet. Das Zeichen \* kennzeichnet die Versuche, bei denen kein Durchglühen des Glimmnestes beobachtet wurde.

der Temperatur dieser Stahlwolle-Glimmnester genauer bestimmt worden. Die Abbildung 2.12 zeigt zwei Auszüge aus den Messfahnen, die die Temperatur in der Kugelmitte als Funktion der Zeit wiedergeben. In den Auszügen ist der Zeitpunkt der Entzündung der Stahlwolle-Kugeln jeweils rechts unten lokalisiert. Aus dem zeitlichen Verlauf der Kurven ( $t$  läuft von rechts nach links) liest man ab, dass zunächst eine Phase des Temperaturanstieg von etwa 4-5 Minuten Dauer auftritt und schließlich eine Temperatur von circa 1030 °C erreicht wird. Nach dieser Anstiegsphase steigt die Temperatur nur noch unwesentlich. Diese



Abbildung 2.11: Temperaturmessung an einem Glimmnest aus kugelförmig geformter Stahlwolle nach seitlicher Entzündung mit einem Brenner. Gut zu sehen sind die Temperatursonden Nummer 1-3, 5 und 6.

Stahlwolle	handdruckgeformte Kugel
$T_{\max}(1)$ [°C]	1050
$T_{\max}(2)$ [°C]	1050
$T_{\max}(3)$ [°C]	90
$T_{\max}(4)$ [°C]	210
$T_{\max}(5)$ [°C]	60
$T_{\max}(6)$ [°C]	50

Tabelle 2.8: Gemessene maximale Temperatur  $T_{\max}$  an den Temperatursonden Nummer 1 bis 6 bei der Untersuchung von Glimmnestern aus Stahlwolle.

Periode mit nahezu konstanter Temperatur ( $1030^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1070^{\circ}\text{C}$ ) dauert weitere 4-5 Minuten. Danach (am Ende der Oxidation) kommt es zu einer schnellen Abkühlung auf den Ausgangswert (Abbildung 2.12, links). Im Gegensatz zu dieser Entwicklung wird an der Oberfläche der Stahlwolle-Kugel nach der Entzündung schnell eine Temperatur von etwa  $200^{\circ}\text{C}$  bis  $250^{\circ}\text{C}$  erreicht, die aber nach den anfänglichen 4-5 Minuten des Glimmens auf rund  $100^{\circ}\text{C}$  abfällt und danach weiterhin schnell sinkt (gemessen am Sensor Nummer 4, siehe Abbildung 2.10). Im rechten Bild der Abbildung 2.12 ist der Temperaturgang im Inneren einer Stahlwolle-Kugel gezeigt, die nach Erreichen einer Innentemperatur von  $1000^{\circ}\text{C}$  mit Maisstärke zugeschüttet wurde. Es ist deutlich zu sehen, dass sofort nach Zuschüttung die Abkühlung beginnt (Unterbindung der Sauerstoffzufuhr). Diese Abkühlung geht jedoch so

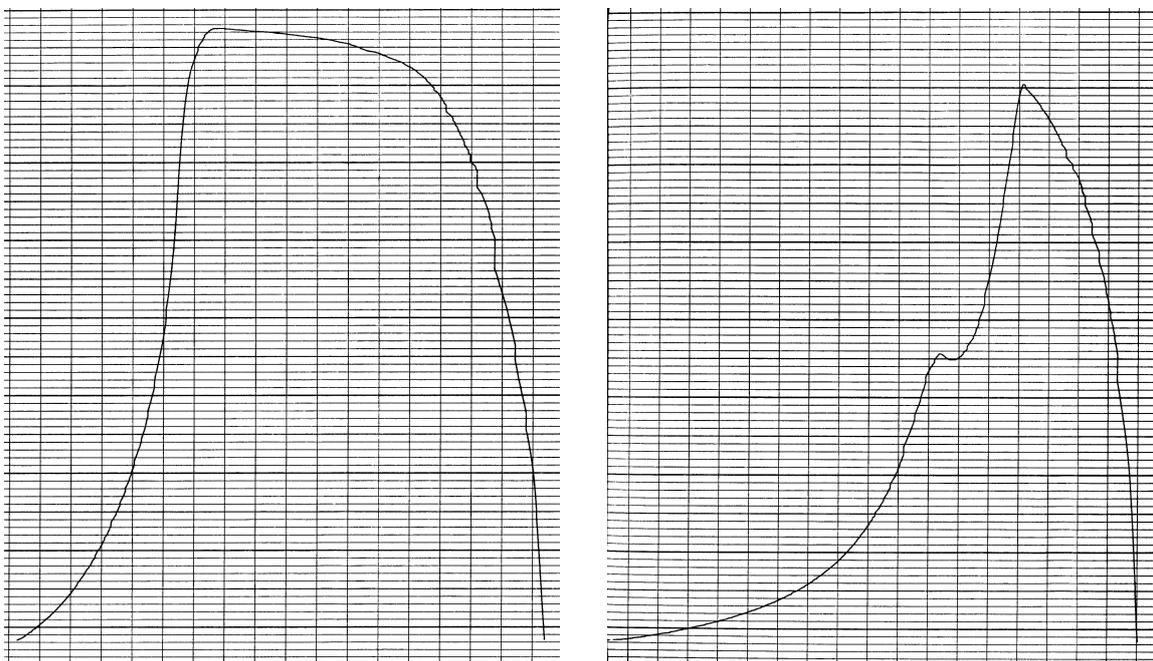


Abbildung 2.12: Temperaturgang im Zentrum einer glimmenden Kugel aus Stahlwolle. Links: ungehinderte Luftzufuhr. Rechts: Zuschüttung mit Maisstärke nach einer gewissen Zeit des Glimmens mit ungehinderter Luftzufuhr. Die x-Achse zeigt jeweils die Zeit, wobei eine Einheit einer Minute entspricht ( $t$  läuft von rechts nach links). Die y-Achse zeigt die Temperatur in einem Bereich von  $20^{\circ}\text{C}$  (unten) bis  $1100^{\circ}\text{C}$  (oben) bei  $60^{\circ}\text{C}$  pro Einheit.

langsam vonstatten, dass eine Minute nach Zuschüttung im Inneren der Stahlwolle-Kugel noch eine Temperatur von rund 700 °C herrscht. Diese Dauer ist bei weitem ausreichend, um in späteren Experimenten auf dem Versuchsfeld ein Stahlwolle-Glimmnest durch die Zellenradschleuse bis zum Detektionssystem zu befördern. Weiterhin zeichnen sich die Stahlwolle-Kugeln durch eine relativ hohe Stabilität aus, d. h. sie zerspringen nicht beim Aufprall auf Rohrwände oder Hindernisse. Diese Eigenschaften machen sie für die vorliegende Aufgabenstellung zu geeigneten Versuchsobjekten.

Bei weiteren Versuchen hinsichtlich der Krustenbildung um die heißen Stahlwolle-Kugeln wurden diese in Maisstärke-Schüttungen fallen gelassen. Bis auf die Bildung einer etwa 2 mm starken Kruste konnten keine weiteren Reaktionen festgestellt werden. Dagegen war nach dem Einwerfen in eine Kakao-Schüttung ein Durchglimmen der ganzen Schüttung zu beobachten.

Im Hartmannrohr wurden darüber hinaus Glimmester aus Stahlwolle auf ihre Zündfähigkeit hin untersucht. Dabei wurden Maisstärke, Gummi-Myrrhe und Lycopodium in entsprechenden Konzentrationen von 500 g/m<sup>3</sup> bis 1000 g/m<sup>3</sup> verwendet. Bei keinem der mehrmals wiederholten Versuche kam es dabei zu einer Zündung des aufgewirbelten Staub/Luft-Gemisches. Es sollte also bei den angestrebten Versuchen auf dem Versuchsgelände zu keiner Explosion in der pneumatischen Förderleitung kommen.

## 2.4 Versuche an einer pneumatischen Förderleitung

### 2.4.1 Test des Prototypen

Die unter Abschnitt 2.1.5.2 beschriebenen Tests des Prototypen auf dem Versuchsgelände hatten den großen Nachteil, dass keine geeigneten Glimmester zur Verfügung standen. Aus diesem Grund und um die in den zuvor durchgeführten Versuchen ermittelten Einsatzgrenzen des Systems zu bestätigen, wurden erneut Experimente mit dem Prototypen an einer pneumatischen Förderleitung durchgeführt. Als Glimmester wurden diesmal glühende Kugeln aus Stahlwolle benutzt (siehe vorherigen Abschnitt).

#### 2.4.1.1 Versuchsaufbau

Die beiden Sensoren des in Abschnitt 2.1 beschriebenen Prototyps wurden in eine pneumatischen Förderanlage, bestehend aus Gebläse, Produktaufgabe, Förderleitung und Silo (vergleiche Abbildung 2.13), integriert. Das Gebläse ist stufenlos regulierbar mit Transportgeschwindigkeiten von 5 m/s bis 35 m/s. Die Zugabe von Produkt erfolgte manuell mit Sackware in den Vorratsbehälter der Zellenradschleuse. Die Glimmester wurden ebenfalls an der Zellenradschleuse in die Produktschüttung mit eingegeben und kurz vor dem Transport mit Produkt zugeschüttet. Die in die Leitung ( $\varnothing = 80$  mm) zugeführte Produktmasse wird anhand der Frequenz der Zellenradschleuse festgelegt. Das Volumen eines Zellenraumes ( $V_Z = 0,00156$  m<sup>3</sup>) begrenzt dabei die minimale Fördermasse.

Die beiden Detektoren wurden, sich in einer Achse gegenüber stehend, direkt hinter dem ersten Bogen der Förderleitung angebracht. Die Detektoren sind mit der Steuerelektronik (vergleiche Abschnitt 2.1) verbunden, an der mittels LED die Detektionsereignisse angezeigt werden. Der Schalter S war geöffnet, d. h. beide Sensoren mussten gleichzeitig eine heiße Stahlwolle-Kugel erkennen, um ein Detektionsereignis anzuzeigen.

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 frei geben.

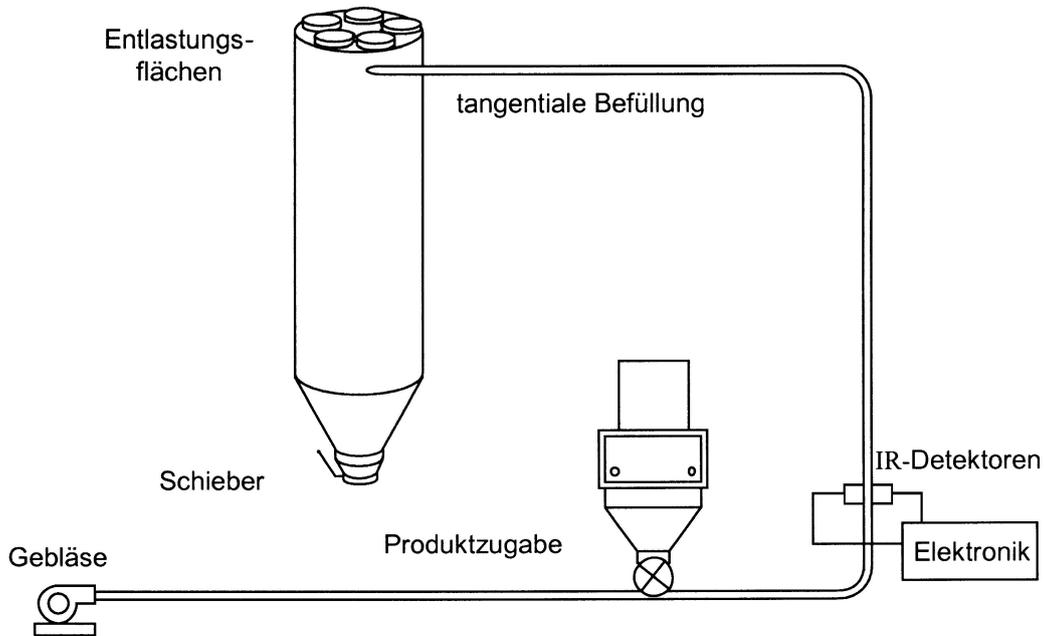


Abbildung 2.13: Schematisches Bild des experimentellen Aufbaus zum Test des Prototypen an einer pneumatischen Förderleitung.

#### 2.4.1.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Versuche mit dem Prototypen wurden am 9. und 10. 10. 2000 auf der BGN Versuchsanlage in Kappelrodeck durchgeführt. Die Versuchsparameter waren:

Außentemperatur:	7 °C
Luftfeuchtigkeit:	66 %
Förderprodukt:	Maisstärke
Produktfeuchte:	16 %
Glimmnester:	Stahlwolle-Kugeln, Durchmesser 2 cm bis 3 cm
	$T_I(t_D): \approx 900 \text{ °C}$
	$T_O(t_D): \approx 100 \text{ °C}$

$T_I(t_D)$  ist die Innentemperatur einer oxidierenden Stahlwolle-Kugel zum Detektionszeitpunkt  $t_D$ . Entsprechend ist  $T_O(t_D)$  die Oberflächentemperatur eines solchen Glimmnestes zu diesem Zeitpunkt.

Zunächst wurden zwei Versuche ohne Produktaufgabe durchgeführt, um das prinzipielle Funktionieren des System sicherzustellen. Anschließend wurden verschiedene Produktmassen

inklusive Glimmnest aufgegeben. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 2.9 zusammenfassend dargestellt. Wie man der Tabelle entnimmt, waren lediglich die Detektionsversuche ohne Förderprodukt erfolgreich. Die Nichtdetektion der heißen Stahlwolle-Kugeln hat folgende wesentliche Gründe:

1. Aus den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Versuchen war bekannt, dass sich die Detektionsflächen der Sensoren nach etwa 10 s mit Staub zusetzen und blind werden. Nach unserer Einschätzung dauerte es aber durchschnittlich 15 s, bis ein Glimmnest durch die Zellenradschleuse geschleust wurde und zum Detektionsort gelangte.
2. Die Konzentration  $c$  war zu hoch, da lediglich mit einer Glimmnestoberflächentemperatur von  $100^\circ\text{C}$  zu rechnen war (Krustenbildung). Gemäß Abschnitt 2.2.3 können bei dieser Oberflächentemperatur nur dann Objekte erkannt werden, wenn die Konzentration  $c$  einen Wert von  $1\text{ kg/m}^3$  nicht überschreitet. Aus technischen Gründen konnte die Fördermasse aber nicht weiter gedrosselt werden.

Aufgrund der Mehrfachanzeigen während der letzten beiden Versuche wurde die Versuchsreihe an dieser Stelle abgebrochen. Wie sich später bei der Analyse des Systems im Labor zeigte, waren die mehrfachen Detektionsanzeigen auf einen defekten Sensor zurückzuführen.

Nr.	∅ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Systemanzeige
1	20	30	-	positiv
2	30	30	-	positiv
3	20	30	20	negativ
4	30	30	20	negativ
5	20	30	10	negativ
6	30	30	10	negativ
7	20	30	6	mehrfach
8	30	30	6	mehrfach

Tabelle 2.9: Ergebnisse der Detektionsversuche von Glimmnestern aus Stahlwolle-Kugeln an einer pneumatischen Förderleitung mit Hilfe des Prototypen.

## 2.4.2 Test eines industriellen Systems (FireFly AB)

Bevor eine Anpassung der Parameter für Erfolg versprechendere Versuche mit dem Prototypen (siehe vorheriger Abschnitt) durchgeführt werden konnte, ergab sich die Gelegenheit, ein marktreifes Glimmnesterkennungssystem auf der Versuchsanlage zu testen. Die Firma FireFly AB war stark daran interessiert, ihr System unter Bedingungen zu testen, die in der Nahrungsmittelindustrie üblich sind. Die Intention dabei war, bei erfolgreicher Detektion neue Märkte zu erschließen. Der Nutzen dieser Experimente für dieses Projekt lag darin, die weitere Entwicklungsarbeit aufgrund der zu erwartenden neuen Erkenntnisse zu verkürzen.

### 2.4.2.1 Versuchsaufbau

Das FireFly-System ist in seinen Grundzügen genauso aufgebaut wie der FSA-Prototyp. Im Gehäuse eines Detektors sitzen zwei PbS-Sensoren mit verschiedenen Blickrichtungen, die

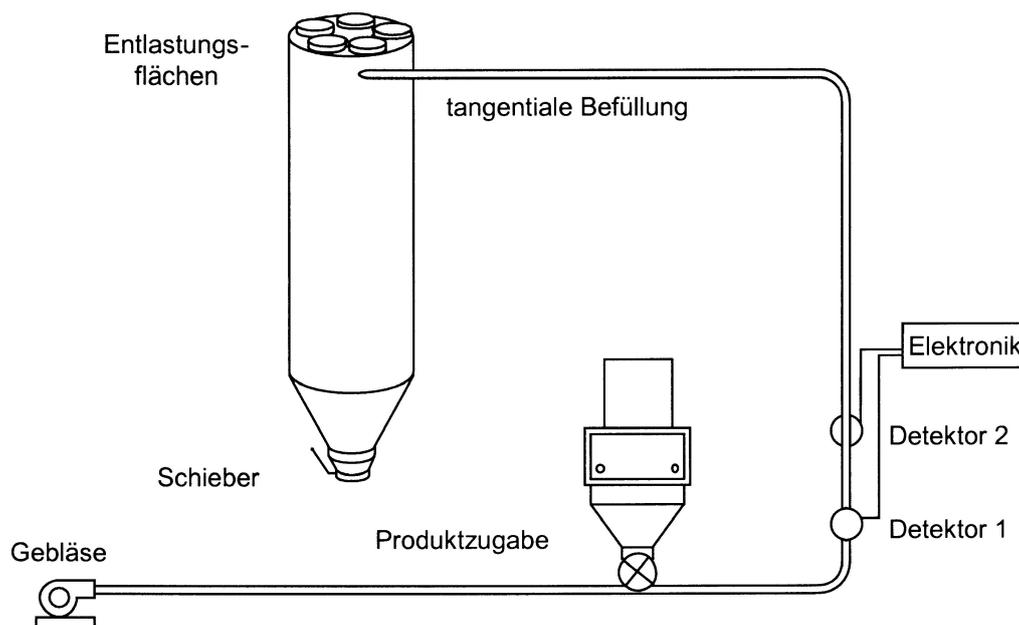


Abbildung 2.14: Schematisches Bild des experimentellen Aufbaus zur Untersuchung des Glimmnesterkennungssystems der Firma FireFly AB an einer pneumatischen Förderleitung.

dazu gehörigen Verstärker und eine Feuchte- und Temperaturüberwachung. Bei Temperaturänderungen kann der dadurch veränderten Detektionsfähigkeit durch Wechsel der Verstärkungsstufe (fünf sind vorhanden) entgegengewirkt werden. Jeder Detektor kennt 8 Level (1 = niedrige Strahlungleistung, 8 = hohe Strahlungleistung) der detektierten Energieeinstrahlung zur Einschätzung der Gefährlichkeit des strahlenden Objektes. In einer anzeigenden und verarbeitenden zentralen Einheit laufen alle Daten der einzelnen Detektoren zusammen.

Verschiedene Detektortypen (siehe Tabelle 2.10) wurden in die pneumatische Förderleitung auf dem Versuchsfeld eingebaut, wobei jeweils 2 Detektoren gleichzeitig zum Einsatz kamen. Die Detektoren waren direkt hinter dem ersten Bogen am aufsteigenden Rohr ( $\varnothing = 80 \text{ mm}$ ) in einem Abstand von 56 cm, um  $180^\circ$  versetzt angebracht. Die Abbildungen 2.14 und 2.15 zeigen schematisch den experimentellen Aufbau bzw. die in die Förderleitung eingebauten Detektoren. Der weitere Aufbau der experimentellen Förderanlage ist identisch mit derjenigen, die in Abschnitt 2.4.1.1 beschrieben ist.

Detektortyp	GD	TD	LD
Detektionsgrenze [ $^\circ\text{C}$ ]	$\geq 400$	$\geq 250$	$\geq 130$
Einsatz	Holzindustrie	Holzindustrie	-

Tabelle 2.10: Detektortypen des Glimmnesterkennungssystems der Firma FireFly AB.

#### 2.4.2.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Versuche mit dem FireFly-System wurden am 25. und 26.10.2000 auf der BGN Versuchsanlage in Kappelrodeck durchgeführt. Die Versuchsparameter waren:

25. 10. 2000:	Witterung:	Wechselnd bewölkt, sonnige Abschnitte, trocken
	Temperatur:	12 °C
	Luftdruck:	959 mbar
	Luftfeuchte:	75 %
26. 10. 2000:	Witterung:	Vormittags Regen, danach bewölkt
	Temperatur:	9 °C
	Luftdruck:	957 mbar
	Luftfeuchte:	79 %
Glimmnester:	Stahlwolle-Kugeln	Durchmesser 2 cm bis 4 cm,
	$T_I(t_D)$ :	$\approx 900\text{ °C}$
	$T_O(t_D)$ :	$\approx 100\text{ °C}$

$T_I(t_D)$  und  $T_O(t_D)$  haben die gleiche Bedeutung wie unter Abschnitt 2.4.1.2 beschrieben.

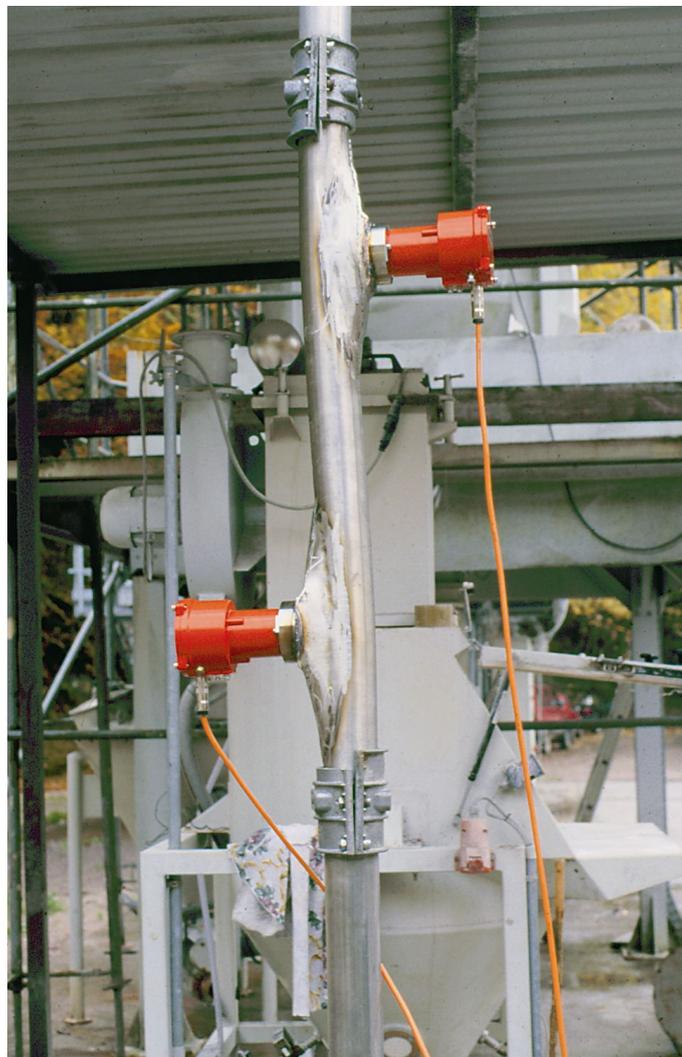


Abbildung 2.15: Zwei Detektoren des Glimmnestererkennungssystems der Firma FireFly AB eingebaut in die pneumatische Förderleitung auf dem Versuchsfeld der BGN in Kappelrodeck.

### 2.4.2.2.1 Versuche mit Maisstärke

Am ersten Versuchstag wurde ausschließlich Maisstärke mit einer Produktfeuchte von rund 13% zur Förderung durch die pneumatische Leitung benutzt. Zu Beginn eines Versuches wurden circa 15 Liter Produkt in den Vorratsbehälter der Zellenradschleuse gegeben (ausgenommen die Versuche ohne Produkt) und das Glimmnest außerhalb dieses Behälters mit einem Gasbrenner entzündet. Nach einer Wartezeit von jeweils 4 Minuten (ergibt sich aus Abbildung 2.12) wurden Gebläse und Zellenradschleuse gestartet, das Glimmnest auf die Schüttung gelegt und mit nochmals 10 Litern Produkt zugedeckt.

Nr.	∅ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Systemanzeige		Sonstiges
1	30	30	-	GD1: 3	GD2: 7	-
2	30	30	-	GD1: 2	GD2: 5	-
3	30	30	25	GD1: -	GD2: -	-
4	30	30	20	GD1: -	GD2: -	-
5	30	30	10	GD1: -	GD2: -	-
6	30	30	5	GD1: -	GD2: -	-
7	30	30	-	TD1: 6	LD2: 8	-
8	30	30	5	TD1: -	LD2: -	-
9	40	30	5	TD1: 2	LD2: -	-
10	40	30	5	TD1: 7	LD2: 1	Explosion im Silo
11	20	30	5	TD1: 1	LD2: -	-
12	30	30	5	TD1: -	LD2: -	-
13	40	30	5	TD1: -	LD2: -	Explosion im Silo
14	20	30	5	TD1: -	LD2: -	-
15	20	20	8	TD1: -	LD2: -	-
16	20	20	8	TD1: -	TD2: -	-
17	20	20	8	TD1: -	TD2: -	-

Tabelle 2.11: Ergebnisse der Versuche, heiße Drahtwolle-Kugeln in einer pneumatischen Förderleitung mit Hilfe des FireFly-Systems zu detektieren, wobei Maisstärke gefördert wurde. Die Versuche Nr. 1 - 13 wurden am 25.10.2000 durchgeführt, die Versuche Nr. 13 - 17 am 26.10.2000.

Die Resultate der Versuchsreihe sind in Tabelle 2.11 zusammengefasst. Die Versuche Nr. 1 und 2 dienten dem Test der Anlage und dem FireFly-System; Anlage und System funktionierten einwandfrei. Während der Versuche Nr. 3 bis 6 wurde versucht, die genannten Stahlwolle-Kugeln bei verschiedenen Maisstärke-Konzentrationen zu detektieren, was in keinem der Fälle möglich war, wobei bei den Versuchen Nr. 4 bis 6 der Detektor GD1 mit maximaler Verstärkung arbeitete. Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Detektionssystems nach einem Wechsel hin zu empfindlicheren Detektoren, wurde ein weiterer Versuch ohne Staubbeladung mit positiven Ergebnis durchgeführt (Versuch Nr. 7). Der anschließende Versuch Nr. 8 endete erneut mit einem Misserfolg. Daraus konnte geschlossen werden, dass bei Konzentrationen über 5 kg/m<sup>3</sup> unter den gegebenen Bedingungen keine Detektion der

heißen Stahlwolle-Kugeln möglich ist. Weil beim FireFly-System die selben Infrarot-Sensoren wie dem FSA-Prototypen Verwendung finden, war dieses Resultat von uns erwartet worden. Da die Staubkonzentration in der Förderleitung aus technischen Gründen nicht weiter gedrosselt werden konnte, wurden bei den folgenden Versuchen größere Stahlwolle-Kugeln ( $\varnothing = 4$  cm) verwendet, was bedeutet, dass der maximal mögliche Abstand zwischen IR-Sensor und Glimmnest 2 cm beträgt (Rohrdurchmesser: 8 cm). Diese größeren Stahlwolle-Kugeln wurden auch tatsächlich detektiert (Versuche Nr. 9 und 10), wobei es während des Versuchs Nr. 10 zu einer Staubexplosion im angeschlossenen Silo kam (die Druckentlastungsfläche wurde freigegeben). Die Explosion im Silo ist als Beweis dafür anzusehen, dass die Stahlwolle-Kugeln während ihres Transports durch die Förderleitung zündfähige Temperaturen in ihrem Inneren halten. Die Explosion trat erst im Silo auf (und nicht in der Leitung), da hier durch die weiträumige Verteilung des eingetragenen Staubes die obere Explosionsgrenze unterschritten wurde. Um zu sehen, ob der Detektionserfolg auf die größeren Glimmnesten oder auf den Einsatz der empfindlicheren Detektoren zurückzuführen ist, wurde Versuch Nr. 11 wieder mit einer kleineren Stahlwolle-Kugel ( $\varnothing = 3$  cm) durchgeführt, wobei Detektor LD2 auf maximale Verstärkung geschaltet wurde. Bei diesem und den folgenden zwei Versuchen war eine Detektion nicht möglich und das, obwohl bei Versuch Nr. 13 ein größeres Glimmnest zum Einsatz kam und erneut eine Explosion im Silo auftrat.

Bei den beiden Folgeversuchen Nr. 14 und 15 wurde durch eine Drehung der Detektoren um  $90^\circ$  in der Vertikalen versucht, den erhofften Detektionserfolg zu erzielen, wobei bei letztgenanntem Versuch die Fördergeschwindigkeit gesenkt wurde. Beide Versuche endeten mit negativen Ergebnis. Auch die Variante im Versuchsablauf, die glühenden Stahlwolle-Kugeln unmittelbar nach dem Gebläse in die Förderleitung einzubringen (und nicht durch die Zellenradschleuse), brachten keinen Erfolg (Versuche Nr. 16 und 17).

#### 2.4.2.2.2 Versuche mit Weizenkörnern

Um die Detektionsgrenzen des FireFly-Systems für grobkörniges Fördermaterial auszuloten, wurden Versuche mit Weizenkörnern durchgeführt. Die Versuchsparameter und die -durchführung wurden gegenüber den Experimenten mit Maisstärke nicht verändert (siehe vorheriger Abschnitt). Die Resultate dieser Tests finden sich in nachfolgender Tabelle 2.12. Da Weizenkorn gegenüber Maisstärke eine höhere Dichte besitzt, war die Weizenkonzentration in der Förderleitung höher als bei der Förderung von Maisstärke bei

Nr.	$\varnothing$ Glimmnest [mm]	$v$ [m/s]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Systemanzeige		Sonstiges
1	20	20	12	TD1: -	TD2: -	-
2	30	30	7,5	TD1: -	TD2: -	-
3	30	30	-	TD1: 8	TD2: 8	-
4	40	30	7,5	TD1: 6	TD2: 8	Brand im Silo
5	40	30	7,5	TD1: 6	TD2: 3	Explosion im Silo
6	20	30	7,5	TD1: 7	TD2: -	-
7	20	30	7,5	TD1: 4	TD2: -	-

Tabelle 2.12: Ergebnisse der Versuche, heiße Drahtwolle-Kugeln in einer pneumatischen Förderleitung mit Hilfe des FireFly-Systems zu detektieren, wobei Weizenkörner gefördert wurden. Die Versuche wurden am 26.10.2000 durchgeführt.

gleicher Fördergeschwindigkeit (z. B.  $7,5 \text{ kg/m}^3$  gegenüber  $5 \text{ kg/m}^3$  bei  $v = 30 \text{ m/s}$ ). Mit  $2 \text{ cm}$  durchmessenden Stahlwolle-Kugeln konnte keine Detektion erzielt werden (Versuche Nr. 1 und 2). Der Versuch Nr. 3 zur Überprüfung des FireFly-Systems ergab Vollausschlag beider Detektoren bei Abwesenheit von Fördergut.

In den beiden Folgeversuchen Nr. 4 und 5 wurde deshalb wieder mit größeren Stahlwolle-Kugeln ( $\varnothing = 4 \text{ cm}$ ) experimentiert. In beiden Fällen konnte das Glimmnest erkannt werden und es kam wieder zu Reaktionen im angeschlossenen Silo (Brand, Explosion), wobei davon auszugehen ist, dass die in der Anlage noch vorhandenen Maisstärkereste reagierten.

Durch diesen Erfolg ermutigt, wurden noch zwei weitere Versuche durchgeführt, wobei die Parameter aus Experiment Nr. 2 eingestellt wurden. Man hoffte, dass die Rohrleitung jetzt weitgehend frei von Maisstärke war und deshalb eine Detektion erfolgen würde. Diese Hoffnung wurde nicht enttäuscht, da Detektor TD1 bei beiden Versuchen das Glimmnest erkannte. Der Detektor TD2 sah allerdings nichts, weshalb davon auszugehen ist, dass das Glimmnest den Detektor TD1 in geringerem Abstand passierte als den Detektor TD2.

### 2.4.3 Interpretation der Ergebnisse

Die Versuche zeigen, dass eine *zuverlässige* Erkennung von Glimmnestern innerhalb eines Stromes von staubförmigem Produkt bei den gegebenen Konzentrationen auf der Basis von IR-Detektion nicht möglich ist. Gleichzeitig bestätigen die Versuche eindeutig die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten prinzipiellen Grenzen, die bei der Detektion von Glimmnestern anhand ihrer Infrarot-Emission gegeben sind: Erkennung von Glimmnestern ist bis zu einer Staubkonzentration von  $1 \text{ kg/m}^3$  möglich, wenn ein Rohrdurchmesser von  $13 \text{ cm}$  nicht überschritten wird.

Entsprechend sind die Ergebnisse mit körnigem Produkt zu deuten. Im Labor wurde ermittelt, dass Glimmnestern in körnigem Produktstrom bis zu einer Konzentration von  $6 \text{ kg/m}^3$  erkannt werden sollten bei oben genanntem Rohrdurchmesser.

Da die Förderleitung auf dem Versuchsfeld nur  $8 \text{ cm}$  durchmisst und von beiden Seiten der Rohrleitung gleichzeitig detektiert wurde, konnten die heißen Stahlwolle-Kugeln gelegentlich auch bei Konzentrationen erfasst werden, die die oben angegebenen Werte deutlich übersteigen.

# Kapitel 3

## Ausblick

Die Erkenntnisse, die diese Untersuchung liefert, zeigen zwei Richtungen für mögliche bzw. zukünftige Folgeprojekte auf.

### 3.1 Erforschung alternativer Methoden

Alternativ zum Nachweis von Glimmnestern über deren Infrarot-Emission müssten andere physikalische oder chemische Eigenschaften der Glimmnester, die diese vom Förderstaub unterscheiden, zu deren Erkennung herangezogen werden. In Frage kämen zum Beispiel eventuell vorhandene Dichteunterschiede zwischen Glimmnestern und Förderstaub. Diese könnten dann mit Hilfe von Mikrowellen oder Ultraschall detektiert werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt wäre die Untersuchung des Emissionsspektrums eines Glimmnestes in Abhängigkeit des Produkts. Sollten sich dabei bestimmte eindeutige Charakteristika zeigen, so wäre eine spektroskopische Erkennung dieser Objekte möglich.

Ähnlich ist die Analyse der Verbrennungsgase in Abhängigkeit des Produktes zu sehen. Auch hier könnte gegebenenfalls eine Detektion über eine charakteristische Zusammensetzung der Verbrennungsgase erfolgen. Nachteil der beiden letztgenannten Verfahren ist jedoch, dass sie beim momentanen Stand der Technik im Vergleich zur Fördergeschwindigkeit langsam sind.

### 3.2 Entwicklung eines IR-Detektionssystems

Die Ergebnisse dieser Untersuchung könnten dafür genutzt werden, ein Glimmnestererkennungssystem auf IR-Basis für geringe Staubkonzentrationen in dünnen pneumatischen Förderleitungen zu entwickeln. Solch ein System sollte mit (mindestens) zwei, sich gegenüber stehenden Detektoren arbeiten, deren Sensoren durch große Glaskalotten abgeschirmt sind. Mit Hilfe dieser Kalotten kann das Zusetzen der Detektionsflächen mit Staub verhindert werden. Weiterhin sollte auf eine Temperaturüberwachung im Detektor nicht verzichtet werden, damit eine Temperaturerhöhung im Fördermedium oder in der Umgebung durch eine Steigerung der Signalverstärkung ausgeglichen werden kann.

# Literaturverzeichnis

- [1] A. UNSÖLD, B. BASCHEK: *Der neue Kosmos*, Springer Verlag, Dritte Auflage, 1980.
- [2] C. GERTHSEN, H. O. KNESER, H. VOGEL: *Physik*, Springer Verlag, Vierzehnte Auflage, 1982.
- [3] T. G. KYLE: *Atmospheric Transmission, Emission & Scattering*, Pergamin Press, 1991.
- [4] H. SCHEFFLER, H. ELSÄSSER: *Bau und Physik der Galaxis*, Wissenschaftsverlag, 1982.
- [5] VDI BERICHTE 701: *Sichere Handhabung brennbarer Stäube*, VDI Verlag, 1988.
- [6] U. TIETZE, C. SCHENK: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer Verlag, Zehnte Auflage, 1993.