

## Problematik der Staubexplosionen und Maßnahmen gegen Explosionsgefahren in Großraumbunkern für Schüttgut

lumen mit Hilfe des kubischen Gesetzes ermittelt wurden; auf Verhältnisse von Großraumbehältern mit einem größeren Formfaktor  $L/D$  wurden jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht. Bereits bei einem Formfaktor von  $L/D=3$  und einem rechteckigen Querschnitt der Membranen verschiebt sich die experimentell ermittelte Abhängigkeit  $p_{red}=f(x)$  bei einem Großraumbehälter von  $500 \text{ m}^3$  mit einem Gemisch von Polypropylenstaub mit Luft gegenüber den umgerechneten Ergebnissen nach Beziehung (1) mit dem gleich explosiven Gemisch des ABS-Staubes in Behältern von  $1,5$  und  $10 \text{ m}^3$  zu höheren Werten, siehe Bild 16. Dadurch wurde die Voraussetzung im einführenden Teil bestätigt, nach der der Mechanismus des Entlastens und die Reaktionskinetik in unterschiedlicher Weise bei Großraumbehältern mit großer Höhe als bei Behältern mit kleinem Volumen verläuft.

Die Wichtigkeit dieser Feststellung ist deshalb so bedeutend, weil bei leichten Konstruktionen von Großraumbehältern, wo eine kleine Sicherheits-Druckreserve besteht, die Entlastungsflächen durch Um-

rechnung nach dem „kubischen Gesetz“ unterdimensioniert werden können, was bei Explosionen in überwiegendem Maß zu einem Zerreißen des Behälters und zu einer Gefährdung seiner Umgebung in größerem Maß führen kann, als es bei experimentellen Prüfungen bewiesen wurde. [ST 254]

### Schrifttum

- [1] Bekanntmachung der Tschechischen und Slowakischen Behörde für Arbeitssicherheit Nr. 23/1976, Gewährleistung der Arbeitssicherheit bei stabilen Schüttgutbunkern.
- [2] VDI 3673, Druckentlastung von Staubexplosionen, August 1977, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3] Staatliche Prüfstelle Nr. 214, Abschlußprotokoll P 01372, VVUU, Ostrava Radvanice, 1978.
- [4] Štroc, V.: Entwicklung einer Methode für die Messung der Geschwindigkeit des Brennens einer Staubwolke in kubischen Behältern, Abschlußbericht VVUU, Ostrava-Radvanice, 1975.
- [5] Staatliche Prüfstelle Nr. 214, Abschlußprotokoll P 01373, VVUU, Ostrava-Radvanice, 1978.
- [6] Staatliche Prüfstelle Nr. 214, Abschlußprotokoll P 01264, VVUU, Ostrava-Radvanice, 1977.
- [7] Heinrich, H. J.: Ergebnisse neuerer Untersuchungen zur Druckentlastung bei Staubexplosionen, VDI Berichte 165, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1971.

- [8] Donat, C.: Auswahl und Bemessung von Druckentlastungseinrichtungen für Staubexplosionen, VDI Berichte 165, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1971.
- [9] Bartknecht, W.: Untersuchungen über das Verhalten von Sicherheitsmembranen und Explosionsklappen bei Raumexplosionen, „Schlägel und Eisen“ 1964, H. 7, 8, 9, Sonderdruckausg.
- [10] Bartknecht, W.: Sicherheitsmaßnahmen gegen die ungehinderte Ausbreitung von Explosionen und gegen Explosionsauswirkungen in Rohrstrucken, Sonderdruck aus „Moderne Unfallverhütung“, H. 11, 1967.
- [11] Vodsedalek, J. u. O. Scholz: Sicherheitsexplosionsmembranen, 1954.
- [12] Štroc, V.: Forschung des Schutzes gegen Explosionen von brennbaren Industriestäuben, Abschlußbericht VVUU, Ostrava-Radvanice 160/6674, 1968.
- [13] Cernoch, S.: Maschinentechnisches Handbuch, 1947.
- [14] Metzner, H. u. K. Höppler: Explosionsversuche in einem  $300\text{-m}^3$ -Versuchsraum mit Braunkohlen- und Steinkohlenstaub, Bergbautechnik H. 10, 20. Jg., 1970.
- [15] Richtlinien der Staatlichen Prüfstelle 214, Nr. 13/78, Ostrava-Radvanice, 1978.
- [16] Štroc, V.: Forschung der Mittel für die Schaffung eines homogenen Gemisches von Kohlenstaub mit Luft in bezug auf die relative Sicherheit der Sprengstoffe, Abschlußbericht VVUU, 1978, Ostrava-Radvanice.
- [17] Kadár, A.: Messung der Energiegröße von Standard-Zündquellen, die bei Explosivitätsprüfungen von Industriestäuben angewendet werden, Diplomarbeit, Bergbauhochschule Ostrava, 1978.

## Schwankungen der Staub- und Fluoridkonzentrationen, Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten in einer Fabrikhalle\*)

Von R. D. Crommelin, P. Boekesteijn, J. Stellingwerf und F. C. van Beukering, Delft, Niederlande\*\*)

In der Brennerei und Sieberei der Pelletfabrik von Hoogovens IJmuiden B. V. sind während eines ganzen Arbeitstages die Staub- und Fluoridkonzentrationen ebenso wie die Luftgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen gemessen worden. Hierbei hat sich gezeigt, daß die Konzentrationsverteilungen ziemlich gut einer logarithmisch-normalen Verteilung entsprechen, während die Luftgeschwindigkeits- und Temperaturverteilungen sich durch eine Normalverteilung darstellen lassen. Anhand einigermaßen willkürlicher Anforderungen hinsichtlich der Standardabweichung kommt man pro Meßpunkt zu einer Mindestzahl an Messungen für Konzentrationen, Luftgeschwindigkeiten und Temperaturen. Mit diesen Ergebnissen läßt sich vielleicht ein möglichst gut verantwortbares Meßprogramm für eine Fabrikhalle aufstellen.

In the roasting and sieving works of the pellet factory of Hoogovens IJmuiden B. V. the dust and fluoride concentrations as well as the air velocities and air temperatures have been measured during a whole work day. It appears that the concentration distributions rather well correspond to a logarithmic normal distribution, whereas the air velocity and temperature distributions correspond to a normal distribution. From rather arbitrary demands on the standard deviations, a minimum number of measurements per measuring point is found for concentrations, air velocities and air temperatures. With these results it may be possible to draw up a justifiable programme for a factory hall.

Dans la halle de fonderie et de tamisage de l'usine de pellets de Hoogovens IJmuiden B. V. les concentrations en poussières et fluorides et les vitesses et températures d'air ont été mesurées pendant un jour ouvré. Il s'est montré que les distributions de concentration correspondent assez bien à une distribution logarithmique normale, tandis que les distributions des vitesses et températures d'air correspondent à une distribution normale. Par des exigences assez arbitraires quant à la déviation-étalon, on trouve un minimum nombre de mesurages par point de mesure pour les concentrations, vitesses et températures d'air. Avec ces résultats, un programme de mesure aussi justifiable que possible est probablement faisable pour une halle industrielle.

Schlagwörter: Analyse; Meßtechnik / Fabrikhalle / Innenraumverunreinigung / Fluor / Staub-, Luftverunreinigung

ING-TNO

INSTITUUT VOOR MILIEUHYGIENE EN GEZONDHEIDSTECHNIEK TNO

Publikatie no. 601

Postbus 214

2600 AP DELFT

Staub - Reinhalt. Luft 40 (1980) Nr. 12 Dezember

## 1 Einleitung

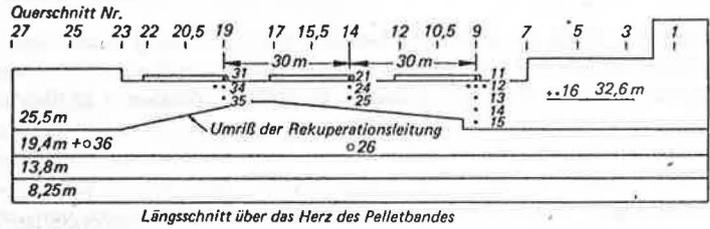
In vielen Fabrikhallen entstehen Luftverunreinigungen, wenn infolge des Fabrikationsprozesses Staub und Gase – und oft auch Wärme – frei werden. Da durch die Verbreitung von Luftverunreinigungen und Wärme in Fabrikhallen die Arbeitsumstände für das Personal manchmal zu wünschen übriglassen, hat die *Kommission der Europäischen Gemeinschaften dem Forschungsinstitut für Umwelthygiene TNO (IG-TNO)* für eine Untersuchung auf diesem Gebiet eine Subvention gewährt. Besonders in der Stahlindustrie sind Luftverunreinigungen und Wärme in Fabrikhallen ein Problem. Darum wurde im Einvernehmen mit *Hoogovens IJmuiden B. V.* die Ausbreitung von Luftverunreinigungen in zwei ihrer Fabrikhallen untersucht. Bei der ersten Halle handelte es sich um die sogenannte S-Halle der elektrolytischen Verzinnerie [1; 2]. Als zweite Halle für eine derartige Untersuchung wurde die Brennerei und Sieberei der Pelletfabrik gewählt [3; 4]. Das Auftreten von Luftverunreinigungen kann am besten durch Abschirmung oder Absaugung an der Quelle bekämpft werden. Ist dies in manchen Fällen nicht möglich oder werden die Maßnahmen als nicht notwendig erachtet, so werden sich die frei werdenden Luftverunreinigungen unter dem Einfluß der dort herrschenden Luftbewegungen in der Halle ausbreiten.

Bei einer Untersuchung wie dieser ist es notwendig, an einer gleichmäßig in der Fabrikhalle verteilten großen Zahl von Punkten die Konzentrationen, Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten zu messen. Durch das Sammeln dieser Daten aus einer Vielzahl von Punkten erhält man einen Eindruck von der Konzentrations-, Lufttemperatur- und Luftgeschwindigkeitsverteilung in der Fabrikhalle und kann dann nach einem möglichen Zusammenhang zwischen den Verteilungen dieser verschiedenen Größen suchen.

Messen an einer Vielzahl von Punkten bedeutet eine kurze Meßzeit je Meßpunkt, da eine totale Serie von Messungen sonst unannehmbar lange dauern würde. In der Praxis scheinen jedoch zu messende Größen immer mit Schwankungen aufzutreten. Würde man eine bestimmte Größe, wie etwa eine Konzentration oder eine Lufttemperatur, nur einmal an einem Meßpunkt messen, bestünde die Gefahr, daß der gemessene Wert stark vom wirklich auftretenden

\*) Eine Forschungsarbeit mit einer Subvention der Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Veröffentlichung Nr. 681 des Forschungsinstituts für Umwelthygiene TNO, Delft, Niederlande.

\*\*\*) Anschrift der Verfasser: s. Autorenverzeichnis



Längsschnitt über das Herz des Pelletbandes

### Meßstellen

- Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit (14 x)
- Staubkonzentration (4 x)
- Säurekonzentration (F)(1 x)

ST659.1

Bild 1: Meßpunkte in der Pelletfabrik

den Mittelwert während der Meßperiode abweicht. Man muß also mehr als einmal messen, wird aber nach Möglichkeit die Anzahl der Messungen auf ein Mindestmaß beschränken. Eine verantwortbare Anzahl von Messungen je Meßpunkt kann aber nur dann festgelegt werden, wenn man Einsicht in die Verteilung der betreffenden Größe mit der Zeit gewonnen hat. Deshalb wurde vor Beginn der eigentlichen Untersuchung in der Pelletfabrik eine orientierende Studie durchgeführt, bei der – zwar an einer beschränkten Anzahl von Meßpunkten – Konzentrationen, Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten in kurzen Abständen und häufig hintereinander und unter konstanten Betriebsbedingungen gemessen wurden.

## 2 Die Pelletfabrik

Die Untersuchung sollte in einem Raum durchgeführt werden, in den das Luftströmungsmuster in erheblichem Maße durch die Wärmeentwicklung bestimmt wurde, weil dies besonders in Stahlfabriken häufig der Fall ist. Außerdem mußten die Konzentrationen der auftretenden Luftverunreinigungen so hoch sein, daß sie gut gemessen werden konnten. Deshalb wurden im Einvernehmen mit *Hoogovens* die Brennerei und die Sieberei der Pelletfabrik für die Untersuchungen ausgesucht.

### Formelzeichen

- $C$  Konzentration
- $c$  Konstante aus  $N(0,1)$ -Verteilung
- $m$  Anzahl der Messungen bei einer Stichprobe
- $T$  Temperatur
- $\Delta T$  Temperaturunterschied
- $V$  Geschwindigkeit
- $\bar{x}$  Mittelwert einer Stichprobe
- $\mu$  wahrer Mittelwert einer Sammlung
- $\sigma$  wahre Standardabweichung
- $\sigma_m$  Standardabweichung der Mittelwerte von Stichproben von jeder der  $m$  Beobachtungen

$$\left(\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}\right)$$

— Mittelwert einer Größe

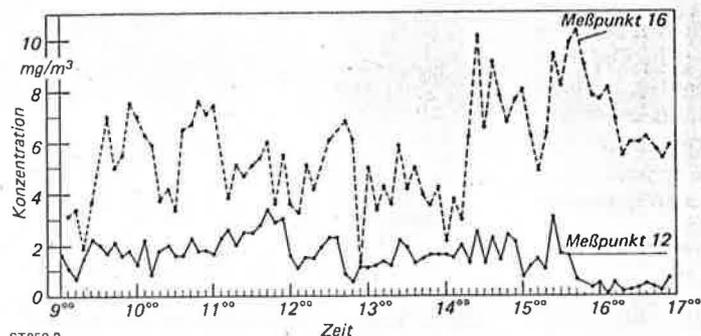
In einer Pelletfabrik wird das Eisenerz zuerst gemahlen, befeuchtet und dann zu Kügelchen mit einem Durchmesser von etwa 12 mm (sogenannte Pellets) geformt. Dieser Vorgang findet in der Formerei statt. Danach werden diese Pellets auf einem Förderband einer Brennmaschine zugeführt. In der Brennmaschine werden die nassen Pellets auf einem Rostband hintereinander auf- und abwärts getrocknet, vorgeheizt, verbrannt und anschließend mit Luft gekühlt. Die Pellets werden auf Rostwagen durch die Brennmaschine transportiert. Am Ende der Brennmaschine werden die hart gebackenen Pellets vom Rostband abgeworfen und mit einem anderen Förderband zur Sieberei gebracht.

Die wichtigsten Wärmequellen in der Brennerei und in der Sieberei sind die Vorheiz- und die Brennzone sowie die Rekupeationsleitung der Brennmaschine. Die in der Halle auftretenden Luftverunreinigungen bestehen hauptsächlich aus Staubteilchen und Fluoriden. Örtliche Erzstaubquellen befinden sich an der Aufwurf- und Abwurfseite des Pelletbandes und in der Sieberei. Fluoride dagegen werden hauptsächlich in der Trocken-, Vorheiz- und Brennzone der Brennmaschine frei.

Die Fabrikhalle der Brennerei und Sieberei wird ausschließlich durch natürliche Ventilation belüftet. Dazu sind in den beiden Seitenwänden fast über die ganze Länge der Halle Jalousien angebracht, die bei Bedarf geöffnet oder geschlossen werden können. Hierdurch ist eine Variation des Luftstromes möglich. Im Dach über der Brennmaschine befinden sich mehrere Jalousien, durch die die warme, emporsteigende Luft die Fabrikhalle ungehindert verlassen kann. Das gesamte Luftströmungsbild in der Halle wird also durch die freie Konvektion infolge der starken Wärmeentwicklung in der Brennmaschine beherrscht.

Bild 1 zeigt einen Längsschnitt der Halle und eine Übersicht der Punkte, an denen gemessen worden ist [5]. Nach einem festen Zeitschema wurden während einer Zeitdauer von acht Stunden die folgenden Größen gemessen:

# Schwankungen der Staub- und Fluoridkonzentrationen, Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten in einer Fabrikhalle



ST859.2  
Bild 2: Staubkonzentration an den Meßpunkten 12 und 16

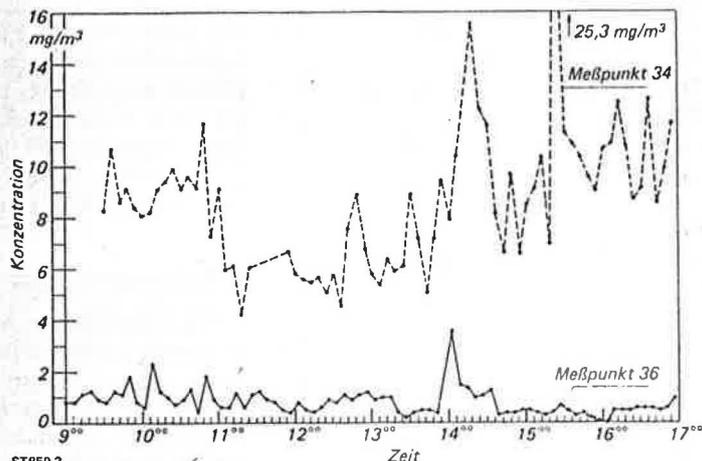


Bild 3: Staubkonzentration an den Meßpunkten 34 und 36

- Lufttemperatur,
- Luftgeschwindigkeit,
- Staubkonzentration,
- Fluoridkonzentration.

## 3 Staubkonzentrationen

Die Staubkonzentrationen wurden mit einem Membranfilter gemessen, durch das sechs Minuten lang eine Luftmenge von 114 Litern hindurchgesaugt wurde. Durch Wiegen des Filters vor und nach dem Ansaugen kann die angesaugte Staubmenge und damit die Massenkonzentration bestimmt werden.

In den Bildern 2 und 3 sind die während eines Arbeitstages an vier Meßpunkten festgestellten Staubkonzentrationen dargestellt.

Im Meßpunkt 12 wird der Mittelwert der Konzentration nach 15.30 Uhr deutlich niedriger. Im Meßpunkt 34 treten zwischen 14.00 und 16.00 Uhr zwei hohe Konzentrationsspitzen auf; Meßpunkt 36 zeigt um

14.00 Uhr einen Höchstwert. Für ihn sind keine deutlichen Ursachen zu erkennen. Die Art der Verteilung der Konzentrationen entspricht am besten einer logarithmisch-normalen Verteilung. Eine normale Verteilung läßt auch negative Konzentrationen zu, was physikalisch unmöglich ist; eine logarithmisch-normale Verteilung dagegen schließt negative Konzentrationen aus.

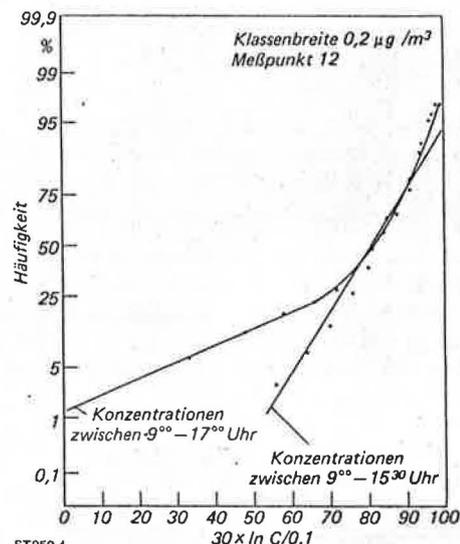
In den Bildern 4 bis 7 sind die kumulativen Häufigkeitsverteilungen (Frequenzverteilungen) der Staubkonzentrationen nach einer logarithmisch-normalen Verteilung dargestellt. Hierbei sind die Klassenbreite und die Konstanten in der logarithmischen Funktion für jeden Meßpunkt gut gewählt worden.

Besonders interessant ist die Konzentrationsverteilung im Meßpunkt 12 (Bild 4). Die Konzentrationsverteilung über die vollständige Meßperiode von 09.00 bis 17.00 Uhr entspricht nicht einer logarithmisch-normalen Verteilung, wohl aber die über

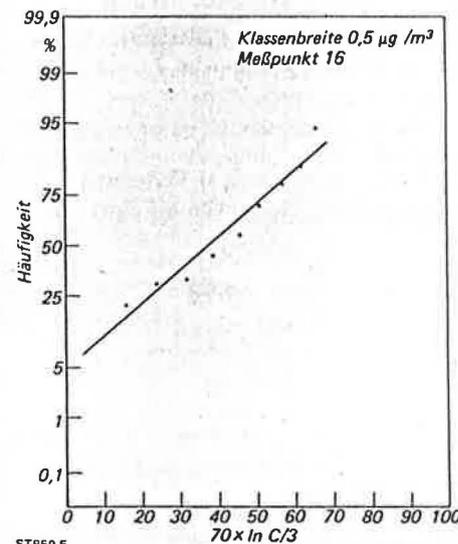
die Periode von 09.00 bis 15.30 Uhr. Dies illustriert noch einmal deutlich, daß in diesem Meßpunkt nach 15.30 Uhr die Staubkonzentrationen systematisch abgesenkt sind, woraus eine Überbesetzung der niedrigen Konzentrationen in der vollständigen Meßperiode hervorgeht. In den übrigen Meßpunkten tritt diese systematische Absenkung nicht auf, so daß die Konzentrationsverteilungen über die ganze Meßperiode einer logarithmisch-normalen Verteilung entsprechen.

## 4 Fluoridkonzentrationen

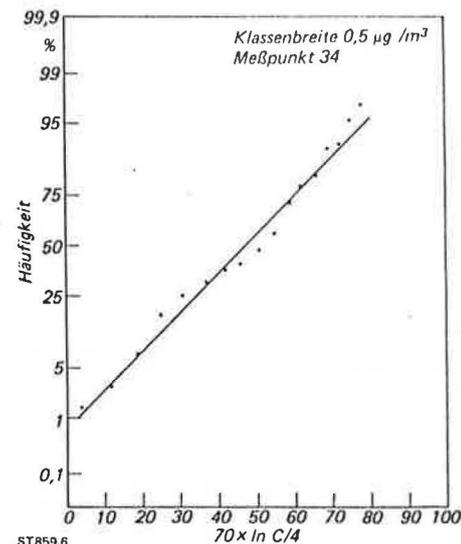
Die Fluoridkonzentrationen werden mit einem Filter gemessen, das mit einer NaOH-Lösung durchtränkt ist. Während einer Periode von jeweils 12 Minuten wurden 36mal etwa 88 Liter Luft durch das Filter gesaugt. Die durch das NaOH im Filter eingefangene Fluoridmenge wurde danach mit einer speziellen, empfindlichen Elektrode bestimmt. Bild 8 stellt den Verlauf der



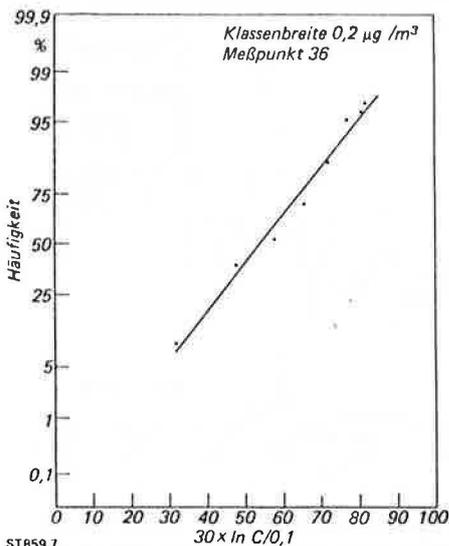
ST859.4  
Bild 4: Logarithmische Verteilung der Staubkonzentration am Meßpunkt 12



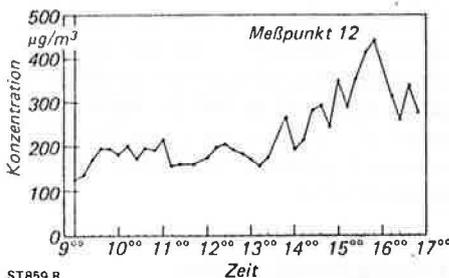
ST859.5  
Bild 5: Logarithmische Verteilung der Staubkonzentration am Meßpunkt 16



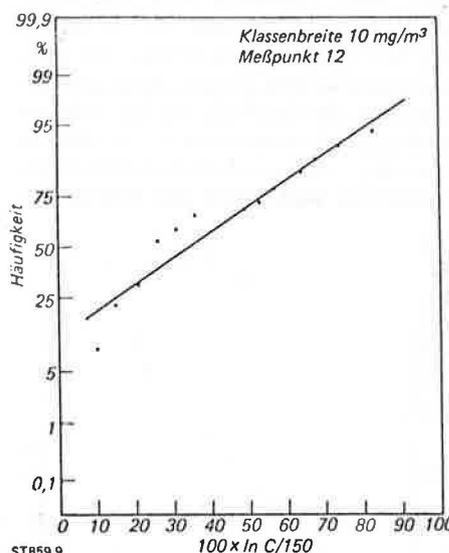
ST859.6  
Bild 6: Logarithmische Verteilung der Staubkonzentration am Meßpunkt 34



ST859.7  
Bild 7: Logarithmische Verteilung der Staubkonzentration am Meßpunkt 36



ST859.8  
Bild 8: Fluoridkonzentration an Meßpunkt 12



ST859.9  
Bild 9: Logarithmische Verteilung der Fluoridkonzentration in Meßpunkt 12

auf diese Weise bestimmten Fluoridkonzentration während der Meßperiode von 09.00 bis 17.00 Uhr dar. Es ist zu sehen, daß die Konzentration nach 14.00 Uhr im Durchschnitt etwas zunimmt.

In Bild 9 ist die kumulative Häufigkeits-(Frequenz-)Verteilung gegenüber einer logarithmischen Skala dargestellt. Die Konzentrationsverteilung entspricht ziemlich gut einer logarithmisch-normalen Verteilung, obwohl die drei Punkte über der geraden Linie doch auf einige Überbesetzung in den niedrigen Konzentrationen hinweisen.

### 5 Lufttemperaturen

Die Temperaturen wurden mit Thermoelementen gemessen. An 14 Punkten in der Halle wurden während eines ganzen Arbeitstages Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten gemessen. Bild 10 zeigt die an den Meßpunkten 12 und 25 gemessene Lufttemperatur-Differenz zwischen Außen- und Innentemperatur.

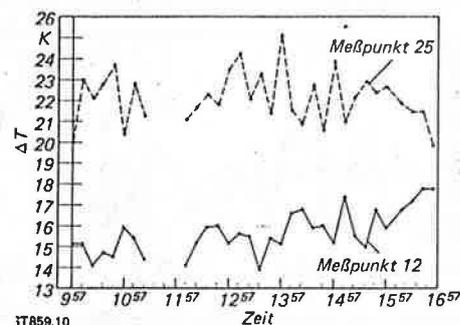
Es kann erwartet werden, daß die Lufttemperatur- und Luftgeschwindigkeitsverteilung einer normalen Verteilung entsprechen wird. Die Einwände gegen eine Normalverteilung für die Konzentrationen gelten ja nicht für die Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten.

In Bild 11 sind die kumulativen Häufigkeits-(Frequenz-)Verteilungen der Lufttemperaturen gegenüber einer linearen Temperaturskala dargestellt. Die Temperaturverteilung entspricht tatsächlich einer Normalverteilung. Auch in den übrigen Meßpunkten entspricht die Temperaturverteilung hinreichend einer Normalverteilung. Dies gilt nicht für die Meßpunkte 31, 34 und 35, an denen systematische Abweichungen von der Normalverteilung auftreten. Hierfür ist keine deutliche Ursache zu finden.

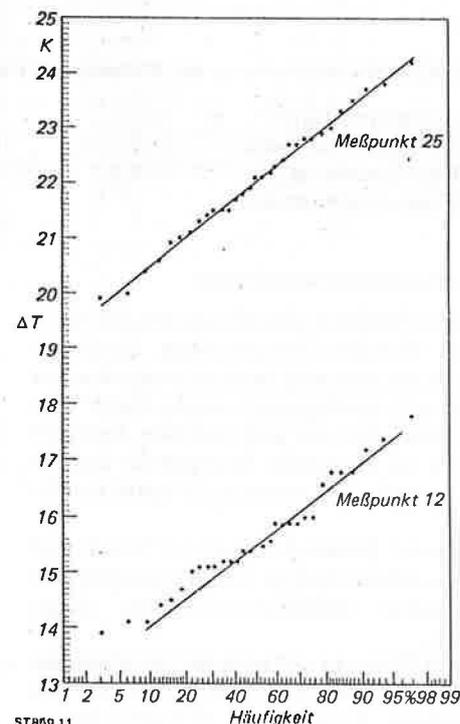
### 6 Luftgeschwindigkeiten

Die Luftgeschwindigkeiten wurden mit den von unserem Institut entwickelten richtungsempfindlichen Anemometern [6] gemessen. In Bild 12 ist der Geschwindigkeitsverlauf in den Meßpunkten 12 und 25 dargestellt. Im Meßpunkt 12 ist eine deutliche Zunahme der Luftgeschwindigkeit am Ende der Meßperiode festzustellen, im Meßpunkt 25 ist dies nicht der Fall.

Bild 12: Die Luftgeschwindigkeit in den Meßpunkten 12 und 25

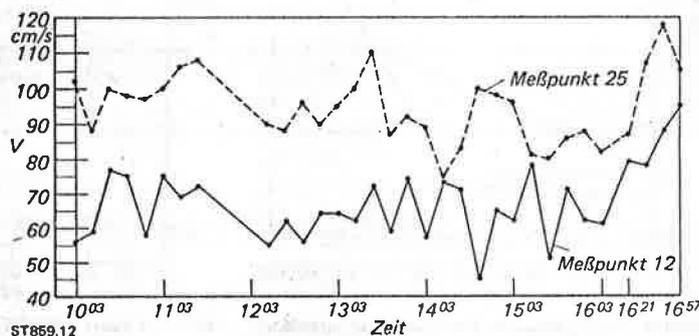


ST859.10  
Bild 10: Temperaturunterschied zur Außenluft an den Meßpunkten 12 und 25



ST859.11  
Bild 11: Verteilung der Temperaturunterschiede zur Außenluft an den Meßpunkten 12 und 25

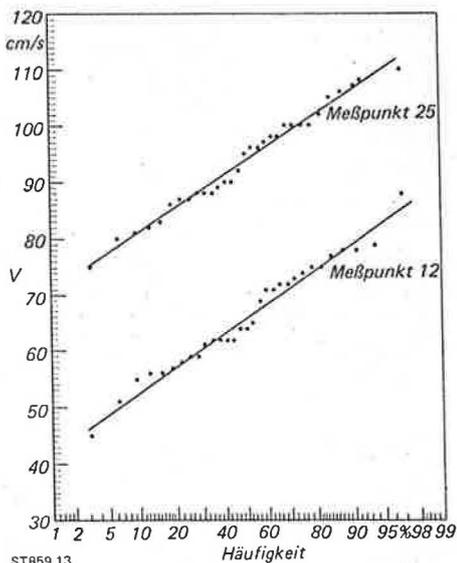
Bild 13 zeigt schließlich die kumulativen Häufigkeits-(Frequenz-)Verteilungen der Luftgeschwindigkeiten. Hieraus ist zu ersehen, daß auch die Luftgeschwindigkeitsverteilung in den Meßpunkten 12 und 25 einer Normalverteilung entspricht. In den übrigen Meßpunkten ist dies auch der Fall.



ST859.12

# Schwankungen der Staub- und Fluoridkonzentrationen, Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten in einer Fabrikhalle

*muß sein:  $\frac{c \cdot \sigma}{\sqrt{m-1}}$*



ST859.13

Bild 13: Verteilung der Luftgeschwindigkeit in den Meßpunkten 12 und 25

## 7 Erforderliche Anzahl der Messungen je Meßpunkt

### 7.1 Staubkonzentrationen

Wie in Abschnitt 3 bereits erwähnt, wird die Verteilung der Staubkonzentrationen am besten durch eine logarithmisch-normale

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen von  $\ln C$

Meßpunkte	Anzahl der Messungen	$\overline{\ln C}$	$\sigma(\ln C)$
12	76	0,286	0,630
16	75	1,679	0,383
34	76	2,116	0,305
36	78	0,363	0,579

le Verteilung beschrieben. Das heißt also, daß die Logarithmen einer Gauß-Verteilung entsprechen. Tabelle 1 gibt einen Überblick der Mittelwerte und Standardabweichungen der Logarithmen der gemessenen Staubkonzentrationen.

Wird an einem Meßtag in einem Meßpunkt gemessen, dann wird angenommen, daß die Meßwerte – oder bei den Konzentrationen deren Logarithmen – eine Normalverteilung besitzen. Es wird dann von einer  $N(\mu, \sigma)$ -Verteilung gesprochen, worin  $\mu$  den wirklichen Mittelwert und  $\sigma$  die wirkliche Standardabweichung darstellt. Zweck dieses Meßtages war das Bestimmen des  $\sigma$ -Wertes, der übrigens an den vier Meßpunkten nicht derselbe ist (siehe Tabelle 1). Es muß jetzt ein Test für das Zuverlässigkeitsintervall von  $\mu$  vorgenommen werden, wobei  $\mu$  bei bekanntem  $\sigma$  durch eine Stichprobe von  $m$  Beobachtungen geschätzt werden muß.

Bei  $m$  Beobachtungen gilt für das Zuverlässigkeitsintervall von  $\mu$ :

$$\bar{x} - \frac{c \cdot \sigma}{\sqrt{m}} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{c \cdot \sigma}{\sqrt{m}} \quad (1)$$

worin  $\bar{x}$  der Mittelwert der Stichprobe ist.

Die Werte von  $c$  werden aus der  $N(0, 1)$ -Verteilung gefunden. Diese ergibt dann:

95% Zuverlässigkeit:  $c = 1,96$

90% Zuverlässigkeit:  $c = 1,64$

68% Zuverlässigkeit:  $c = 1,00$

Als Zuverlässigkeitskriterium werden wir den Satz von 68% wählen, anders ausgedrückt:  $c = 1,00$ . Für  $\frac{\sigma}{\sqrt{m}}$  werden wir kurz

$\sigma_m$  schreiben. Dann können als Masse für einen Mittelwert sowie für eine Ober- und eine Untergrenze die folgenden Definitionen eingeführt werden:

= geometrisch gemiddelde

„Mittelwert“:  $\text{Exp}(\overline{\ln C})$  (das ist also nicht der wirkliche Mittelwert der Konzentrationen)

„Obergrenze“:  $\text{Exp}(\overline{\ln C} + \sigma_m)$

„Untergrenze“:  $\text{Exp}(\overline{\ln C} - \sigma_m)$

Als Unterschied zwischen dem Mittel- und den Grenzwerten scheint ein Satz von 15% durchaus annehmbar.

In Tabelle 2 wird hiervon für die vier Meßpunkte eine Übersicht gegeben.

Aus Tabelle 2 wird ersichtlich, daß an den Meßpunkten 16 und 34 fünf Messungen genügen, um eine Abweichung von 15% zwischen den Grenzen und den als Mittelwert angenommenen Werten zu erreichen. Es zeigt sich aber, daß an den Meßpunkten 12 und 36 fünf Messungen für eine Abwei-

chung von 15% nicht genügen. Dazu werden etwa 20 Messungen benötigt. Es würde in der Praxis aber zuviel Zeit erfordern, wenn an einer Vielzahl von Punkten die jeweiligen Konzentrationen gemessen werden müssen. Deshalb wurde in jedem Meßpunkt stets fünfmal gemessen [4], so daß die Abweichung zwischen den Ober- und Untergrenzen sowie dem „Mittel“ an einigen Meßpunkten größer als 15% sein wird, u. a. in den Punkten 12 und 36.

In Abschnitt 3 wurde erwähnt, daß die Konzentrationsverteilung im Meßpunkt 12 nicht einer logarithmisch-normalen Verteilung entspricht, wenn die gesamte Meßperiode betrachtet wird (siehe Bild 4). Wenn aber nur die Meßperiode bis 15.30 Uhr betrachtet wird, dann entspricht die Konzentrationsverteilung wohl einer logarithmisch-normalen Verteilung. Vom physikalischen Standpunkt aus ist es also sinnvoller, die Meßperiode bis 15.30 Uhr zu betrachten. Dann ergeben sich die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} \overline{\ln C} &= 0,495 \\ \sigma(\ln C) &= 0,354 \\ \text{Exp}(\overline{\ln C}) &= 1,641 \\ \text{Exp}(\overline{\ln C} + \sigma_s) &= 1,915 \\ \text{Exp}(\overline{\ln C} - \sigma_s) &= 1,406 \\ \frac{\text{Exp}(\overline{\ln C} + \sigma_s)}{\text{Exp}(\overline{\ln C})} - 1 &= 0,167 \\ 1 - \frac{\text{Exp}(\overline{\ln C} - \sigma_s)}{\text{Exp}(\overline{\ln C})} &= 0,143 \end{aligned}$$

Hieraus wird ersichtlich, daß für die Meßperiode bis 15.30 Uhr, bei der es sich um eine logarithmisch-normale Verteilung handelt, etwa fünf Messungen genügen, um eine relative Abweichung von 15% zwischen den Ober- und Untergrenzen sowie dem als Mittel angenommenen Wert zu erreichen. Der Umstand, daß für die gesamte Meßperiode 20 Messungen erforderlich sind, erklärt sich aus der systematischen Absenkung der Konzentration nach 15.30 Uhr.

Tabelle 2: „Mittelwert“ sowie Ober- und Untergrenzen der Konzentrationen bei fünf und bei 20 Messungen

Größe	Formel	Meßpunkt Nr.			
		12	16	34	36
„Mittelwert“	$\text{exp}(\overline{\ln C})$	1,331	5,359	8,295	0,696
Obergrenze (5 Messungen)	$\text{exp}(\overline{\ln C} + \sigma_s)$	1,764	6,359	9,509	0,901
Untergrenze (5 Messungen)	$\text{exp}(\overline{\ln C} - \sigma_s)$	1,004	4,516	7,237	0,537
Abweichung Obergrenze - Mittel	$\frac{\text{exp}(\overline{\ln C} + \sigma_s)}{\text{exp}(\overline{\ln C})} - 1$	0,325	0,187	0,146	0,295
Abweichung Untergrenze - Mittel	$1 - \frac{\text{exp}(\overline{\ln C} - \sigma_s)}{\text{exp}(\overline{\ln C})}$	0,245	0,157	0,128	0,228
Obergrenze (20 Messungen)	$\text{exp}(\overline{\ln C} + \sigma_{20})$	1,532	—	—	0,792
Untergrenze (20 Messungen)	$\text{exp}(\overline{\ln C} - \sigma_{20})$	1,156	—	—	0,611
Abweichung Obergrenze - Mittel	$\frac{\text{exp}(\overline{\ln C} + \sigma_{20})}{\text{exp}(\overline{\ln C})} - 1$	0,151	—	—	0,138
Abweichung Untergrenze - Mittel	$1 - \frac{\text{exp}(\overline{\ln C} - \sigma_{20})}{\text{exp}(\overline{\ln C})}$	0,131	—	—	0,121

## 7.2 Fluoridkonzentrationen

Bei der Analyse der Fluoridkonzentrationsmessungen in Meßpunkt 12 wurde dieselbe Methode wie bei den Staubkonzentrationen angewandt. Daraus ergeben sich die folgenden Werte:

$$\begin{aligned}\ln C &= 5,398 \\ \sigma(\ln C) &= 0,304 \\ \text{Exp}(\ln C) &= 221,0 \\ \text{Exp}(\ln C + \sigma_5) &= 253,2 \\ \text{Exp}(\ln C - \sigma_5) &= 192,8 \\ \frac{\text{Exp}(\ln C) - 1}{\text{Exp}(\ln C)} &= 0,146 \\ 1 - \frac{\text{Exp}(\ln C - \sigma_5)}{\text{Exp}(\ln C)} &= 0,127\end{aligned}$$

Also genügen auch bei den Fluoridmessungen fünf Messungen, um eine Abweichung von nicht mehr als 15% zwischen den Grenzwerten und dem „Mittelwert“ zu erreichen.

## 7.3 Lufttemperaturen

Bei den Lufttemperaturen kann, wie bereits in Abschnitt 5 erwähnt, von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Aus den Temperaturmessungen geht hervor, daß die Standardabweichung  $\sigma$  in den meisten Meßpunkten etwa 1,4 K beträgt. Wird

eine Standardabweichung von 1 K bei der Temperaturmessung angenommen, dann ergibt sich für  $m$ :  $\left(\frac{1,4}{1}\right)^2 \approx 2$ .

An einem Meßpunkt müssen die Temperaturen also zweimal gemessen werden.

## 7.4 Luftgeschwindigkeiten

Auch bei den Luftgeschwindigkeiten kann von einer Normalverteilung ausgegangen und die Gleichung (1) verwendet werden. Die Standardabweichung liegt bei den meisten Meßpunkten etwa bei 0,25 m/s. Eine Standardabweichung von 0,10 m/s erscheint als ziemlich gut, so daß sich ergibt:  $m = \left(\frac{0,25}{0,10}\right)^2 \approx 7$ .

Die für jeden Meßpunkt benötigte Anzahl von Messungen ist also Sieben.

## 8 Danksagung

Der Kommission der Europäischen Gemeinschaften danken wir für die Unterstützung, welche diese Untersuchung erst ermöglicht hat.

Hoogovens IJmuiden B. V. danken wir für das Interesse und die wertvolle Hilfe bei der Untersuchung. [ST 859]

## 9 Schrifttum

- [1] *Beukering, F. C. van, P. Boekesteijn und R. D. Crommelin*: Die Ausbreitung von Luftverunreinigungen in einer Werkhalle durch Konvektionsströmungen. Staub-Reinhalt. Luft 33 (1973) Nr. 4, S. 192/196.
- [2] *Beukering, F. C. van, P. Boekesteijn, R. D. Crommelin und R. Ebens*: De verspreiding van luchtverontreinigingen in fabrieksräumen onder invloed van warmte, wind en ventilatoren. (Die Ausbreitung von Luftverunreinigungen in Fabrikräumen unter dem Einfluß von Luftströmungen durch Wärme, Wind und Ventilatoren). IG-TNO, Rapport C 312, Januar 1973.
- [3] *Crommelin, R. D., F. C. van Beukering, P. Boekesteijn und W. F. de Gids*: Ausbreitung von staub- und gasförmigen Luftverunreinigungen in einer Pelletfabrik. Staub-Reinhalt. Luft 38 (1978) Nr. 10, S. 413/417.
- [4] *Crommelin, R. D., F. C. van Beukering, P. Boekesteijn und W. F. de Gids*: Onderzoek naar de relatie tussen de verspreiding van luchtverontreinigingen in fabrieksräumen en de luchtstromingen t.g.v. warmte, wind en ventilatoren. Metingen in de branderij en zeverij van de pelletfabrik van Hoogovens IJmuiden B. V. (Untersuchung nach dem Verband zwischen der Ausbreitung von Luftverunreinigungen in Werkhallen und Luftströmungen infolge Wärme, Wind und Ventilatoren. Messungen in der Brennerie und Sieberei der Pelletfabrik von Hoogovens IJmuiden B. V.) IG-TNO, Rapport C 384, Dezember 1977.
- [5] *Beukering, F. C. van, P. Boekesteijn und W. F. de Gids*: Metingen in de branderij en zeverij van de Pelletfabrik van Hoogovens IJmuiden B. V. inzake fluctuaties in luchtsnelheden, temperaturen en concentraties (Messungen in der Pelletfabrik von Hoogovens IJmuiden B. V. von Schwankungen in Luftgeschwindigkeiten, Temperaturen und Konzentrationen). IG-TNO, Rapport C 356, Oktober 1975.
- [6] *Crommelin, R. D. und M. Dubbeld*: Modified anemometers for indoor climate research. J. Phys. E.: Scientific Instruments 1976, Vol. 9, p. 1005/1009.

# Ceramic filter tests at the EPA/Exxon PFBC miniplant\*

By Michael Ernst, Michael A. Shackleton and Dennis C. Drehmel, USA\*\*)

The performance of the *Acurex* ceramic bag filter operating at temperatures up to 880 °C and pressures up to 930 kPa on particulate-laden flue gas from a pressurized fluidized bed coal combustion (PFBC) unit was shown on a slipstream of gas taken after the second stage cyclone. The particle concentrations before and behind the filter, filter face velocities during the tests the pressure drop across the filter before the start of a cleaning cycle and immediately after a cleaning cycle were described. Three western and mid-western coals were used. Test periods ranged from 4.5 to 17 hours. In general, these tests showed that the filter could achieve high efficiency collection and was able to stabilize pressure drop with the cleaning cycle. This

In der Arbeit wird über die Eignung des *Acurex*-Keramik-Schlauchfilters im schwebstoffbeladenen Gasstrom bei Temperaturen bis zu 880 °C und Drucken bis zu 930 kPa berichtet. Das Gas kam aus einem Preßluftfließbett der Kohleverbrennung (PFBC). Die Untersuchung wurde im Abgasstrom nach dem zweiten Stufenzyklon durchgeführt. Die Teilchenkonzentrationen vor und hinter dem Filter, die Filteranströmgeschwindigkeiten während des Tests, der Druckabfall am Filter vor und direkt nach einem Reinigungszyklus wurden beschrieben. Drei westliche und mittelwestliche Kohlen wurden zum Test benutzt. Die Testperioden lagen zwischen 4,5 und 17 Stunden. Im allgemeinen zeigten die Versuche, daß die Filter hohe Sammelleistungen

Ce travail est un rapport sur l'appétitude du filtre à tuyau en céramique *Acurex* dans le flux de gaz chargé de tissus volants à une température de 880 °C et à des pressions jusqu'à 930 kPa. Le gaz sort d'un lit de flux à air comprimé d'une combustion à charbon (PFBC). L'analyse à été (réalisée) dans le réalisé flux de gaz d'échappement après le deuxième cyclone à niveau. On décrit la concentration des particules avant et après le filtre, la vitesse de flux dans le filtre pendant le test, la chute de pression au filtre, avant et directement après un cycle de nettoyage. On a utilisé pour le test trois charbons de l'ouest et du moyen ouest. Les périodes de test se situaient entre 3, 5 et 17 heures. En général les essais ont montré que les filtres ont