

# Methoden und Geräte zum Bestimmen des Staubgehalts

Von Wilhelm Batel, Braunschweig-Völkenrode\*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 63.53.08:613.633:628.511

Im Rahmen der Entwicklung des Arbeits- und Umweltschutzes gewinnt das Messen des Staubgehalts auch in der landwirtschaftlichen Produktion an Bedeutung. In einer Übersicht werden die Methoden und Geräte dieser Meßtechnik behandelt.

Für Untersuchungen im Atembereich und Immissionen allgemein empfehlen sich Filtergeräte ggf. ergänzt durch Tyndallometer.

Für Messungen an geschlossenen Systemen eignen sich Filtergeräte mit Entnahmesonden. Zur Überwachung der Emission von Anlagen bieten sich Lichtabsorptionsverfahren an.

## Inhalt

1. Ziel des Berichts
2. Zum Begriff Staubgehalt
3. Methoden zum Bestimmen des Staubgehalts
  - 3.1 Probenahme
  - 3.2 Messen des Gasvolumens
  - 3.3 Messen der Staubmenge
4. Meßverfahren und Geräte
  - 4.1 Abscheiden der Teilchen und direktes Messen der Staubmenge
  - 4.2 Abscheiden der Teilchen und indirektes Messen der Staubmenge
  - 4.3 Direktes Messen der Teilchenanzahl ohne Teilchenabscheidung
  - 4.4 Indirektes Messen der Staubmasse ohne Teilchenabscheidung
5. Messen der lungengängigen Anteile des Staubes in Verbindung mit der Staubgehaltsmessung
  - 5.1 Begriffe
  - 5.2 Abtrennen des Grobstaubes bei den Abscheideverfahren
  - 5.3 Erfassen des Feinstaubes bei Zählgeräten
6. Eignung der Verfahren zum Messen des Staubgehaltes für den Arbeits- und Umweltschutz in der landwirtschaftlichen Produktion

## 1. Ziel des Berichts

Die Maßnahmen zum Umwelt- und Arbeitsschutz in der landwirtschaftlichen Produktion beinhalten auch das Messen von entsprechenden Belastungen wie z.B. der Staub-, Lärm-, Geruchs- oder Schwingungsbelastung.

Es ist vorgesehen, im Rahmen dieser Zeitschrift über das Messen solcher Belastungen zu berichten, soweit dies noch nicht geschehen ist. Der vorliegende Bericht befaßt sich mit dem Messen des Staubgehalts. In Form einer Übersicht werden die zur Verfügung stehenden Meßmethoden und Geräte behandelt. Das Schrifttum ist so ausgewählt, daß damit eine gezielte Vertiefung des Wissens insbesondere über die Durchführung der Messungen möglich ist.

## 2. Zum Begriff Staubgehalt

Unter Staubgehalt versteht man die Menge fester, teilchenförmiger Stoffe, die sich in einem bestimmten Gasvolumen in Schwebeform befinden (Feststoffgehalt einer Aerodispersion). Die Teilchen- oder Staubmenge läßt sich auf verschiedene Weise beschreiben, nämlich als Masse, Volumen oder Anzahl. Hieraus folgen die entsprechenden Einheiten für den Staubgehalt wie  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{cm}^3/\text{m}^3$  und  $\text{Anzahl}/\text{m}^3$ . Welcher Angabe der Vorzug zu geben ist, hängt von der jeweils gestellten Aufgabe ab. Da in einer Produktion Massenbilanzen den Vorrang besitzen, wird die Staubmenge dort über die Masse beschrieben. In Verbindung mit der Stoffdichte ist auch das Staubvolumen bekannt.

Für die technische Behandlung des Staubes, wie z.B. das Abscheiden, ist die Teilchengröße eine entscheidende Einflußgröße. Dann ist neben dem Staubgehalt noch die Teilchengrößenverteilung zu ermitteln.

Wenn man die gesundheitlichen Auswirkungen von Staub z.B. hinsichtlich Pneumokoniosen (Staubinhalationskrankheiten) beurteilen will, so ist zunächst die Teilchengröße des Staubes wichtigster Faktor, weil sie die eingeatmete Staubmenge (lungengängiger Anteil des Staubes) bestimmt. Für die Wirkung des inhalierten Staubes kann neben der stofflichen Zusammensetzung die Oberfläche der Teilchen oder wie bei Mikroorganismen auch ihre Anzahl entscheidend sein. Für die gesundheitliche Beurteilung von Staub ist daher auch die Teilchenanzahl in Verbindung mit den Teilchengrößen geeignet.

Sind die Staubmasse und die Teilchengrößenverteilung bekannt, so läßt sich daraus die Anzahl der Teilchen errechnen oder umgekehrt.

Unter Abwägung vorstehend angesprochener Gründe wird weltweit, auch in Richtlinien und Verordnungen, der Staubgehalt meist in der Einheit Masse pro Volumen ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) angegeben.

— Über die Größenordnung einiger Staubgehalte gibt Tafel I Auskunft.

\*) Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Batel ist Direktor des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

(Die angegebenen Bereiche können nur als Richtwerte angesehen werden. Die oberen Bereichswerte für Arbeitsplätze treten meist nur kurzfristig auf.)

<b>1. Freie Atmosphäre</b>	
unbewohnte Gebiete	0,01 . . . 0,1 mg/m <sup>3</sup>
Wohngebiete in Städten	0,1 . . . 0,5
Industriewerke	0,1 . . . 3
<b>2. Arbeitsplätze (ohne entstaubungs-technische Maßnahmen)</b>	
<b>Gewerbliche Wirtschaft</b>	
Steinbruch	0,5 . . . 200 mg/m <sup>3</sup>
Stahlwerk	1 . . . 200
Bergbau	1 . . . 300
Zementwerk	1 . . . 300
Maschinenfabrik	0,5 . . . 20
<b>Landwirtschaft</b>	
Tierhaltung Rind	0,5 . . . 10 mg/m <sup>3</sup>
Tierhaltung Geflügel	0,5 . . . 5
Tierhaltung Schwein	0,5 . . . 10
Mähdrescher	0,5 . . . 200
Schlepper	0,5 . . . 300
Trockner 2 m Abstand	0,5 . . . 50
Abladegebläse 4 m Abstand	0,5 . . . 40
Angestrebter Grenzwert für inerte Stäube an Arbeitsplätzen	8 mg/m <sup>3</sup>
<b>3. Industrielle Anlagen (Staubgehalt bei Anlagen vor Eintritt in den Entstauber)</b>	
Kupolofen	4 . . . 8 g/m <sup>3</sup>
Elektroofen	1 . . . 20
Hochofen	10 . . . 50
Kraftwerk (Rauchgas)	10 . . . 100
Stahlkonverter (Brauner Rauch)	1 . . . 100

Tafel 1. Einige Werte für Staubgehalte.

### 3. Methoden zum Bestimmen des Staubgehalts

Aus den Einheiten für den Staubgehalt folgt unmittelbar, daß seine Bestimmung zwei Bereiche umfaßt, nämlich das Messen des Gasvolumens und das der sich darin befindlichen Staubmenge. Diese Messungen werden an Proben durchgeführt, die man der zu beurteilenden Grundgesamtheit entnimmt.

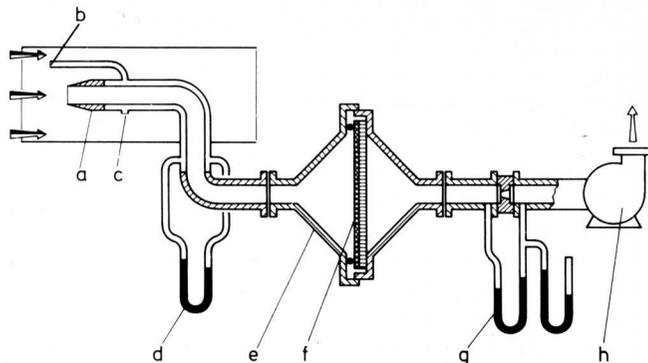
#### 3.1 Probenahme

Die Vorschrift für die Durchführung der Probenahme entspricht den Richtlinien zur Probenahme von Gasen mit einer zusätzlichen, gewichtigen Forderung. Diese beinhaltet, daß bei der Probenahme keine Entmischung von Gas und Staubteilchen stattfinden darf, d.h. die mengenmäßige räumliche Zuordnung von Staub und Gas muß erhalten bleiben.

Vom Bewegungszustand des Gases her gesehen sind zwei Bedingungen zu unterscheiden, nämlich die Probenahme bei strömenden und die bei ruhenden Gasen. Die Probenahme erfolgt in beiden Fällen derart, daß eine Probe aus der zu untersuchenden Grundgesamtheit ohne Entmischung abgesaugt wird.

Bei ruhenden Gasen ist die Eintrittsgeschwindigkeit in den Probennehmer möglichst niedrig zu wählen. Sie kann aber bestimmte Werte wegen der sonst zu großen Baugröße nicht unterschreiten. Man arbeitet beispielsweise mit Einströmgeschwindigkeiten zwischen 0,5 und 1,2 m/s. Auch höhere Werte sind bei entsprechenden Voraussetzungen zulässig.

Bei strömenden Gasen erfolgt die Entnahme über sogenannte Entnahmesonden, **Bild 1**. Bei einem wie im Bild dargestellten keilförmigen Sondenwandquerschnitt tritt dann keine Entmischung auf, wenn die mittlere Geschwindigkeit des Teilgasstromes in der Sonde den gleichen Wert hat wie im Hauptgasstrom. Man spricht dann von einer geschwindigkeitsgleichen Absaugung.



**Bild 1.** Anordnung zur Probenahme aus strömenden, staubhaltigen Gasen, schematisch.

- a Sonde mit keilförmigem Wandquerschnitt am Eintritt
- b Meßstelle für Gesamtdruck
- c Bohrung für statischen Druck
- d Differenzdruckmesser
- e Staubabscheider, hier: Filter
- f Filter
- g Gasmengemesser für Teilgasstrom, hier: Blende
- h Gebläse (Durchsatz einstellbar)

In allen Bildern

➔ Rohgas

⊳ Reingas

Die Geschwindigkeiten werden durch Druckmessungen überwacht und bei einigen Geräten auch automatisch eingehalten. Liegen andere als keilförmige Sonden vor, so kann es auch erforderlich sein, die Geschwindigkeit in der Sonde größer einzustellen als im Hauptgasstrom. Weiter sollte die Richtung der Sonde möglichst der Strömungsrichtung des Hauptgasstromes entsprechen [1 bis 4].

Noch mehr als auf die strömungsgerechte, meist geschwindigkeitsgleiche Absaugung ist auf die Staubgehaltsverteilung im Strömungsquerschnitt des Hauptgasstromes zu achten. Sehr oft treten Staubstrahlen auf, die zu erheblichen Fehlern führen können. Lage und Anzahl der Entnahmepunkte sowie die Ausbildung der Kanäle vor und nach der Meßstrecke haben daher einen entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeit.

#### 3.2 Messen des Gasvolumens

Da die entnommene Probe das Staubgehaltsmeßgerät durchströmt, werden für diese Messung Gasmengemesser für strömende Gase benutzt. Solche sind Düsen, Blenden, Hitzdrahtanemometer, Gasuhren, Schwabekörper und vom Gasstrom angetriebene umlaufende Elemente. Die jeweilige Methode wird vornehmlich vom Gasdurchsatz, der Möglichkeit der Registrierung und der Empfindlichkeit gegen Verschmutzung bestimmt. In vielen Fällen wird auch mit einem fest eingestellten Gasstrom oder Gasvolumen gearbeitet. Da die Gasmengemessung als bekannt vorausgesetzt werden kann [5 bis 8], ist eine Behandlung an dieser Stelle nicht erforderlich.

Hinsichtlich des Gasvolumens noch eine Anmerkung: Obwohl die Volumeneinheit eindeutig ist, muß man bei vergleichenden Betrachtungen daran denken, daß das einer Gasmasse entsprechende Volumen druck- und temperaturabhängig ist. Wegen der fast immer geforderten Vergleichbarkeit ist neben dem Volumen auch der Gaszustand anzugeben. Um den Kennzeichnungsaufwand zu begrenzen, empfiehlt es sich, das Volumen auf den Normzustand (0 °C, 1,013 bar) (DIN 1343) zu beziehen und dies durch einen Index beim Staubgehalt anzuzeigen. — Die Voraussetzungen für eine solche Berechnung sind für den Gasmengemesser des jeweiligen Gerätes vor dem Einsatz oder der Beschaffung zu prüfen.

### 3.3 Messen der Staubmenge

Die Menge an Staub wird beschrieben durch die Staubmasse, weniger oft auch durch die Anzahl der Teilchen. Für das Messen der Menge gibt es folgende grundsätzliche Wege: Man scheidet die Staubteilchen beim Durchströmen des Staubmeßgerätes ab und führt die Mengenbestimmung am abgeschiedenen Staub durch oder man mißt ohne Abscheidung, also bei dispergierten Teilchen. Bei beiden Methoden wiederum läßt sich die Masse oder die Anzahl entweder direkt – durch Wiegen oder Zählen – oder auch indirekt über eine Hilfsgröße ermitteln. Diese erste Gliederung der Methoden ist in **Tafel 2** in den beiden linken Spalten dargestellt.

Für das Abscheiden der Teilchen eignen sich die Methoden, die auch in der Entstaubungstechnik Anwendung finden [9].

Bei der Filtration durchströmt das staubhaltige Gas ein poröses System, das so zu wählen ist, daß alle Teilchen bei der Durchströmung abgetrennt werden.

Trägheitskräfte nutzt man in Umlenkabscheidern. Diese Kräfte, verursacht durch Strömungsumlenkungen, transportieren die Teilchen zu einer Fangfläche, wo sie durch Haftkräfte festgehalten werden.

Durch Fliehkräfte in Umlaufströmungen (Zyklone) werden die Teilchen zur Wand und nach Überschreiten der Grenzbelastung in ein Auffanggefäß transportiert.

Elektrische Kräfte treiben in den Elektroabscheidern die Teilchen zur Fangfläche, und ebenso kann durch thermische Kräfte eine Abscheidung erfolgen.

Bei diesen Methoden mit Abscheidung befinden sich, außer beim Zyklon, die Staubteilchen nach der Abtrennung auf einem Filter oder einer Fangfläche, die sehr unterschiedlich aufgebaut sein kann. Die sich daran anschließende Mengenbestimmung ist unterschiedlich einfach. Zur Massenbestimmung wiegt man das Filter oder die Fangfläche vor und nach der Abscheidung. Aufwendiger ist das Zählen der Teilchen auf dem Filter, der Fangfläche oder einem Präparat beispielsweise mit Hilfe eines Mikroskopes.

Bei der Massenbestimmung durch Wiegen sind noch Vereinbarungen für die Fälle zu treffen, bei denen sich die Masse beispielsweise durch Feuchtigkeit verändern kann. In diesem Fall ist die Trockenmasse anzugeben, d.h. Staub und Fangfläche werden bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Soll eine Umrechnung auf andere Bedingungen erfolgen, so ist dies über den Feuchtgrad auf einfache Weise möglich.

Da das Trocknen und Wiegen der Fangfläche oder das Auszählen der Teilchen eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen, liegt das Meßergebnis immer erst eine längere Zeit, oft erst mehrere Stunden nach der Probenahme vor. Daher wendet man beispielsweise für die betriebliche Überwachung auch indirekte Methoden an (4.2). Sie beinhalten das Messen einer Hilfsgröße, die möglichst unmittelbar nach der Abscheidung zur Verfügung steht. Als Möglichkeiten bieten sich an, das Filter zu durchstrahlen oder den Druckabfall zu messen. Die durch den Staub bewirkte zusätzliche Strahlenabsorption oder Druckerhöhung ist ein Maß für die Staubmasse. Indirekte Methoden für die Bestimmung der Anzahl stehen derzeit nicht zur Verfügung.

Dispergierte Stäube ermöglichen keine direkten Massenbestimmungen (4.3 und 4.4). Dagegen läßt sich die Anzahl direkt ermitteln, beispielsweise dadurch, daß man die staubbeladene Gasprobe durch ein sehr kleines Meßvolumen leitet und dabei jedes Teilchen einzeln erfaßt, z.B. mit optischen Methoden. Entsprechende Geräte sind unter dem Namen Zählgeräte oder Teilchenzähler im Handel. Sie liefern direkt die Anzahl der Teilchen. Je nach Ausstattung der Geräte sind auch noch Aussagen über die Größe der Teilchen möglich.

Als Hilfsgröße für das Messen der Staubmasse bei dispergierten Teilchen eignet sich die Lichtstreuung, die Licht- und Ionenabsorption und die Ladungsmenge.

## 4. Meßverfahren und Geräte

### 4.1 Abscheiden der Teilchen und direktes Messen der Staubmenge

#### 4.1.1 Abscheiden durch Filtration [3, 10]

Für die Staubgehaltsbestimmung benutzt man als Filtermedien Gewebe oder Faserschichten. Die Faserschichten aus Glas-, Chemie- oder Zellstoffasern werden vor allem für kleinere und mittlere, die textilen Medien für größere Probenmengen eingesetzt. Eine besondere Ausführung der Faserschichten sind die Membranfilter. Einige Leistungsdaten von Meßfiltern und Namen von Herstellern sind in [3] aufgeführt.

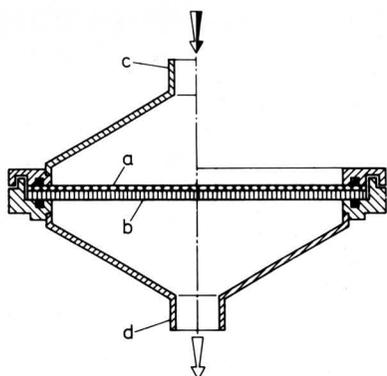
Den Aufbau eines Filtrationsabscheiders zeigt **Bild 2**. Wird aus strömenden Gasen abgesaugt, so ist eine Entnahmesonde nach **Bild 1** vorgeschaltet. Bei einer Probeentnahme aus ruhender Luft bildet das Filter direkt die Eintrittsöffnung. Beide Anordnungen unterscheiden sich nur durch den Blechkegel. Weitere Anordnungen zeigen **Bild 3** und **4**.

		Abscheiden des Staubes durch:	Bestimmen der Masse des Staubes durch:	Bestimmen der Anzahl der Staubteilchen durch:
Methoden mit Teilchenabscheidung	4.1 * Direktes Messen am abgeschiedenen Staub	4.1.1 Filtern 4.1.2 Trägheits- u. Haftkräfte 4.1.3 Fliehkräfte 4.1.4 Elektrische u. Haftkräfte 4.1.5 Thermische u. Haftkräfte	Wiegen	Zählen auf einem Filter, einer Fangfläche, einer Abbildung
	4.2 Indirektes Messen am abgeschiedenen Staub	Filtern	4.2.1 Messen der Strahlenabsorption 4.2.2 Messen des Druckabfalles durch die Staubschicht	
Methoden ohne Teilchenabscheidung	4.3 Direktes Messen bei dispergiertem Staub			Zählen mit Hilfe opt.-elektr. Mittel
	4.4 Indirektes Messen bei dispergiertem Staub		4.4.1 Messen der Lichtstreuung 4.4.2 Messen der Lichtabsorption 4.4.3 Messen der Ionenabsorption 4.4.4 Messen einer Ladungsmenge	

\* Die Zahlen weisen auf die Abschnitte hin, in denen die zugehörigen Verfahren besprochen werden

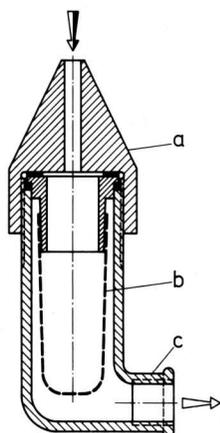
Tafel 2. Methoden zum Messen der Staubmenge.

Die Filtermedien sind so auszuwählen, daß alle vorkommenden Staubteilchen abgetrennt werden. Sie sind dem zu untersuchenden Stoff anzupassen. Aus diesem Grund bieten die Hersteller Filter mit unterschiedlichen Porenweiten an.



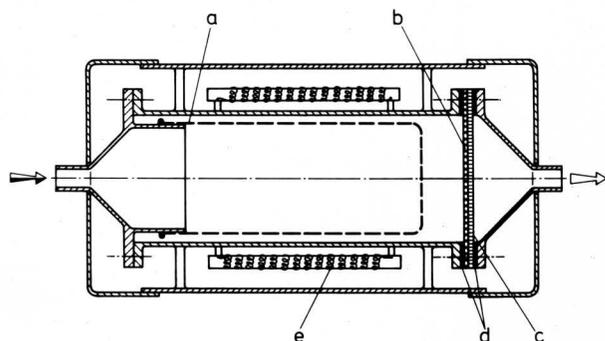
**Bild 2.** Filtrationsabscheider; links: bei Sondenentnahme, rechts: bei Entnahme aus ruhender Luft.

- a Filter
- b grobmaschiges Sieb (Stützgerüst)
- c Anschluß Sonde
- d Anschluß Gebläse



**Bild 3.** Sonde mit eingebautem Filter.

- a Sondenkopf
- b Filter, hier ohne Stützgerüst gezeichnet
- c Anschluß Gebläse



**Bild 4.** Filtrationsabscheider Bauart Ströhlein, wahlweise mit Filterschlauch a oder Flächenfilter b zu bestücken.

- a Filterschlauch (textiles Medium) bei größeren Mengen
- b ebener Filter (Faserschichten) bei kleineren Mengen
- c Stützgerüst
- d Dichtung
- e Heizwendel

#### 4.1.1.1 Ermitteln der Staubmasse

Die Masse des abgeschiedenen Staubes wird bestimmt durch Wiegen der Filter vor und nach der Probenahme. Dazu muß das Filtermedium gewichtskonstant sein. Dies wird erreicht durch Trocknen des Filters vor dem Wiegen. Die Trocknungsbedingungen müssen auch dem Staub angepaßt sein, wenn dieser Feuchtigkeit aufnehmen kann. Da als Staubmasse die Trockenmasse anzugeben ist, muß man darauf achten, daß dieser Zustand erreicht wird.

Für Glasfaserfilter, und solche werden bevorzugt für die Massenbestimmung eingesetzt, wird sowohl mit wie ohne Staub eine Trocknung z.B. bei 105 °C und etwa 60 min. durchgeführt. Bei temperaturempfindlichem Staub können auch andere Bedingungen erforderlich sein, die in Vorversuchen zu ermitteln sind. Das Abkühlen der Filter nach dem Wiegen erfolgt im Exsikkator.

Zum Wiegen sind Mindeststaubmengen erforderlich, beispielsweise 5 mg, damit der Fehler bei diesem Schritt klein bleibt. Allgemein ist zu bedenken, daß die Genauigkeit mit der Staubmasse ansteigt. Aus der nach diesen Gesichtspunkten zu wählenden Staubmasse ergibt sich die notwendige Dauer der Probenahme bzw. die durchzusetzende Gasmenge.

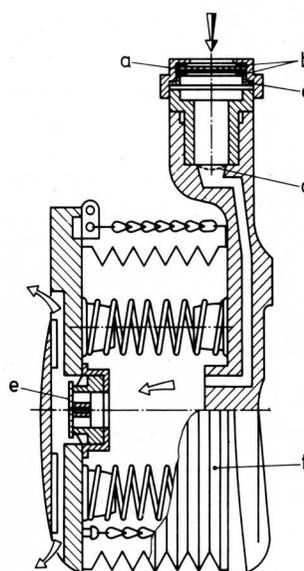
Die Filtration mit Wiegen ist ein sehr einfaches, genaues und für alle vorkommenden Stäube und Staubgehalte einsetzbares Verfahren zum Bestimmen der Staubmasse. Daher ist sie als Standardverfahren anzusehen. Auch das Eichen anderer Verfahren erfolgt meist hiermit.

Als Fehlerquellen sind zu nennen: Die Abscheidegüte des Filters, die Art der Trocknung, die Wiegegenauigkeit, die Dichtheit der Anlage gegenüber Falschluf und damit die Gasvolumenmessung.

Der Nachteil besteht darin, daß das Ergebnis nicht unmittelbar nach der Probenahme zur Verfügung steht. Auch liefert dieses Verfahren nur einen Mittelwert für die gewählte Meßdauer, die abhängig vom Staubgehalt mindestens einige Minuten beträgt.

#### 4.1.1.2 Ermitteln der Teilchenanzahl

Will man nicht die Masse, sondern die Anzahl der Teilchen ermitteln, so sind Filtermedien notwendig, bei denen die Teilchen auf der Filteroberfläche abgeschieden werden. Diese Forderung erfüllen verschiedene Membranfilter.



**Bild 5.** Schema einer Balgpumpe (Bauart Dräger).

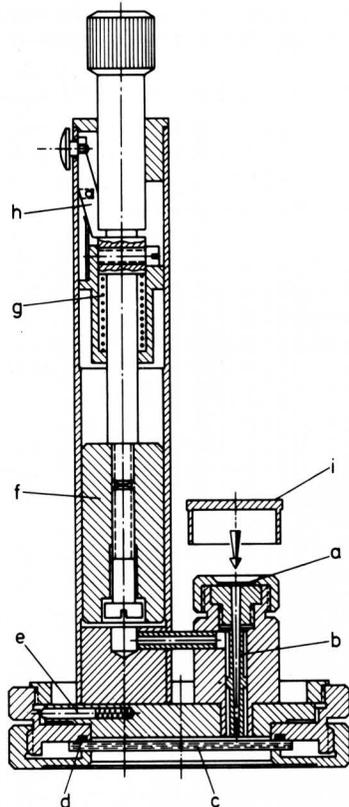
- a Filter, darunter Stützgerüst
- b Dichtung
- c Klemmring
- d Sieb
- e Auslaßventil
- f Balg

Die Dauer der Probenahme ist so zu wählen, daß sich die Teilchen nicht überdecken. Das Auszählen der abgeschiedenen Teilchen erfolgt über das Mikroskop. Für diese Aufgabe stehen auch halb- und vollautomatische Zählleinrichtungen zur Verfügung. Dadurch läßt sich die Zeit zwischen Probenahme und Ergebnis bis auf Minuten verkürzen.

Da für das Auszählen wesentlich kleinere Staubmengen erforderlich sind als für das Bestimmen der Staubmasse, läßt sich die Anordnung bei Entnahme aus ruhender Luft, Bild 1 ohne Sonde, vereinfachen, beispielsweise dadurch, daß eine konstante Luftmenge durchgesaugt wird. Ein entsprechendes Gerät zeigt Bild 5. Die durchgesaugte Gasmenge wird durch die Anzahl der Hübe bestimmt. Weitere Hinweise zur Messung der Teilchenanzahl über die Abscheidung mit Membranfiltern findet man in VDI-Richtlinien [11, 12].

#### 4.1.2 Abscheiden durch Trägheits- und Haftkräfte

Trifft ein Luftstrahl beispielsweise senkrecht auf eine Fläche, so erfolgt in der Staupunktströmung ein Umlenken der Stromlinien. Befinden sich Teilchen in dieser Strömung, so werden sie durch Trägheitskräfte zur angeströmten Wand transportiert. Durch Haftkräfte werden die Teilchen an dieser Fangfläche festgehalten. Der Trennvorgang wird quantitativ bestimmt durch den Staubanteil, der durch die Trägheitskräfte zur Wand gelangt und dort haften bleibt. Bei dieser Abscheidemethode lassen sich, unabhängig von der Bauart, nur Teilchen beispielsweise zwischen etwa 0,7 und 10  $\mu\text{m}$  hinreichend abscheiden.



**Bild 6.** Konimeter (Bauart Fa. Sartorius, Göttingen).

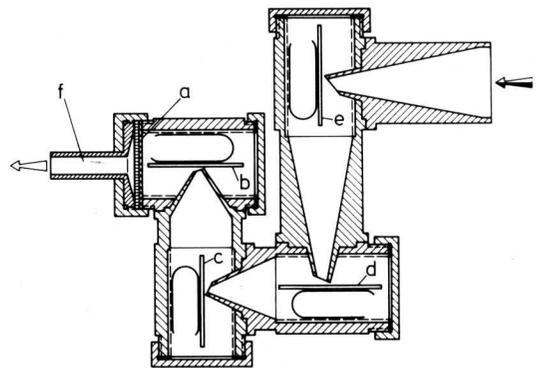
Nach Betätigen des Auslösers saugt der Kolben, angetrieben durch die Feder, eine feste Luftmenge durch die Düse.

- |   |               |
|---|---------------|
| a Sieb                                      | e Raststift   |
| b Düse                                      | f Kolben      |
| c Objektscheibe (Fangplatte),<br>meist Glas | g Feder       |
| d Dichtung                                  | h Auslöser    |
|   | i Schutzkappe |

Als Fangflächen benutzt man Glasplatten, Metallplatten oder auch Filterpapiere. Den prinzipiellen Aufbau solcher Geräte, die man allgemein als Konimeter oder Impaktoren bezeichnet, zeigt Bild 6. Das Auszählen der Teilchen erfolgt mit dem Mikroskop. Diese Messung ist in einer VDI-Richtlinie [13] beschrieben.

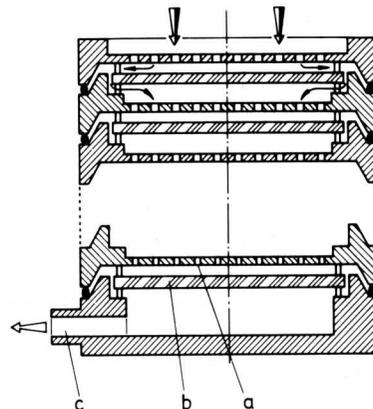
Will man die Masse des Staubes durch Wiegen bestimmen, so ist wie beim Filter zu trocknen. Die Dauer der Probenahme ist so zu wählen, daß genügend Staub auf den Fangplatten vorhanden ist. Das mit Bild 6 gezeigte Gerät ist für diesen Zweck nicht geeignet, weil die Gasmenge vorgegeben und für diesen Zweck zu gering ist. Man wählt dann Konimeter mit einem Gebläse.

In einigen Fällen werden auch mehrstufige Konimeter oder Impaktoren [14] eingesetzt. Diese Geräte sind so aufgebaut, Bild 7 und 8, daß die Geschwindigkeit in der Staupunktströmung mit den Stufen zunimmt, d.h. die Größe der abgeschiedenen Teilchen nimmt ab. Man erhält so eine Anzahl von Fraktionen, so daß neben dem Staubgehalt auch Werte über die Größenverteilung vorliegen.



**Bild 7.** Schema eines 4stufigen Impaktors (Bauart Casella, London).

- |       |                  |
|-------|------------------|
| a     | Filter           |
| b - e | Fangflächen      |
| f     | Anschluß Gebläse |



**Bild 8.** 7stufiger Andersen-Impaktor.

- |   |                         |
|---|-------------------------|
| a | Lochscheibe der Stufe 7 |
| b | Fangfläche der Stufe 7  |
| c | Anschluß Gebläse        |

#### 4.1.3 Abscheiden durch Fliehkräfte

Das Abscheiden der Staubeilchen im Zyklon erfolgt primär durch Fliehkräfte. Die untere Grenze dieser Abscheider liegt bei Teilchengrößen von etwa 1 bis 5  $\mu\text{m}$ . Dieses Staubmeßgerät ist nur für grobe Stäube geeignet.

#### 4.1.4 Abscheiden durch elektrische Kräfte und Haftkräfte

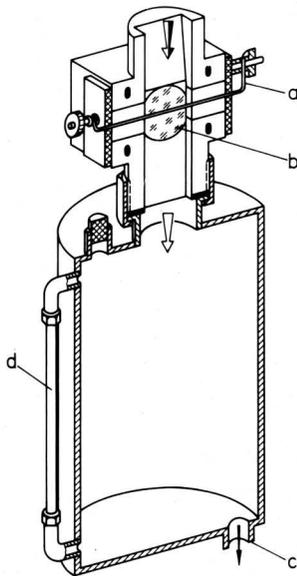
Das Abscheiden durch elektrische Kräfte hat den Vorteil, daß sich auf diese Weise alle Teilchengrößen vollständig abscheiden lassen, wenn nicht bestimmte elektrische Stoffeigenschaften den Abscheidemechanismus stören. Hierin liegt eine gewisse Unsicherheit der Methode. Die Mengenbestimmung auf der Fangfläche erfolgt im Prinzip wie beim Konimeter, also durch Wiegen oder durch Zählen.

#### 4.1.5 Abscheiden durch thermische Kräfte und Haftkräfte

Befinden sich Staubteilchen in einem Gas, in dem ein Temperaturgefälle herrscht, so wandern die Staubteilchen infolge des Thermomolekulardruckes in Richtung des Temperaturgefälles. Auf diese Weise lassen sich Staubteilchen an Fangflächen niederschlagen.

Eine entsprechende Apparatur ist in **Bild 9** dargestellt. Diese Thermalpräzipitator eignen sich besonders für sehr feine Stäube, beispielsweise kleiner als  $5 \mu\text{m}$ .

Das Bestimmen der Staubmenge auf den Fangplatten erfolgt wie bei den oben erwähnten Methoden. Zum Einsatz von Thermalpräzipitator steht eine VDI-Richtlinie zur Verfügung [15].



**Bild 9.** Schema eines Thermalpräzipitators. Durch Betätigen des Wasserablaufs d wird eine bestimmte Gasmenge durchgesaugt.

- |  |
|--|
| a heißer Draht   |
| b Fangfläche, hier Glasplatte (beidseitig des Drahtes) |
| c Wasserablauf   |
| d Wasserstandsglas                                     |

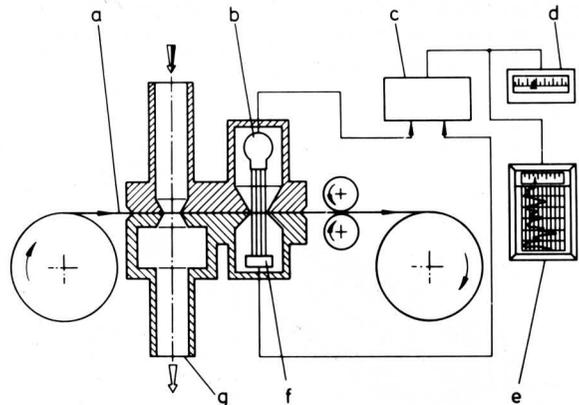
#### 4.2 Indirektes Messen der Staubmasse nach Abscheiden der Teilchen

Der Umstand, daß das Meßergebnis der in Abschnitt 4.1 behandelten Verfahren oft erst mehrere Stunden nach der Probenahme zur Verfügung steht, ist für die betriebliche Überwachung von staubemittierenden Produktionsprozessen nachteilig. Wünschenswert sind Geräte mit unmittelbarer Anzeige. Zwei Möglichkeiten zeigen die Anordnungen in **Bild 10** und **11** [16].

Der Staub wird auf ein langsam durchlaufendes Filterband abgeschieden. Wird dieses Band von Licht- oder  $\beta$ -Strahlen [17] durchstrahlt, so verursacht der Staubbelag eine zusätzliche Strahlenabsorption. Diese ist ein Maß für die Staubmenge. Bei  $\beta$ -Strahlen hat die stoffliche Zusammensetzung keinen Einfluß auf die Strahlenabsorption (Gerät Bauart Frieseke und Höpfner, Erlangen). Der

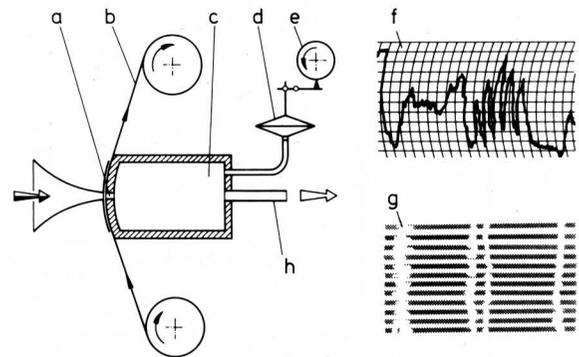
Zusammenhang zwischen Masse und Absorption ist durch Kalibrieren zu ermitteln, beispielsweise durch gravimetrische Verfahren (4.11). — Eine andere Hilfsgröße ist der zusätzliche Druckabfall durch den abgeschiedenen Staub, **Bild 11**.

Die Fehlermöglichkeiten bei den indirekten Verfahren sind abhängig von den Geräten unterschiedlich hoch.



**Bild 10.** Schema einer Anordnung zur indirekten Massenbestimmung mit dem Filtrationsabscheider (Bauart Fa. Gelman Instruments USA).

- |  |                    |
|--|--------------------|
| a kontinuierlich durchlaufendes Filterband | d Anzeige          |
| b Lampe                                    | e Schreiber        |
| c Meßverstärker                            | f Fotozelle        |
|  | g Anschluß Gebläse |



**Bild 11.** Messen des Staubgehalts über den Druckabfall am abgeschiedenen Staub (Bauart Fa. Jouan, Paris).

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| a 12 Saugschlitze                          | e Schreiber                   |
| b kontinuierlich durchlaufendes Filterband | f Meßschrieb (Muster)         |
| c Unterdruckkammer                         | g Ansicht Filterband (Muster) |
| d Druckmeßdose                             | h Anschluß Membranpumpe       |

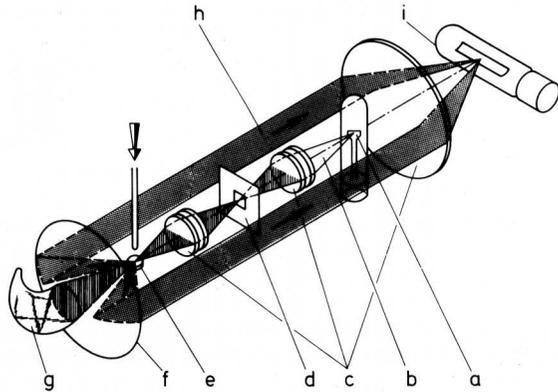
#### 4.3 Direktes Messen der Teilchenanzahl ohne Teilchenabscheidung

Für diese Messung stehen Teilchenzähler zur Verfügung. Diesen Geräten gemeinsam sind zwei Merkmale: Das Probenvolumen mit den luftgetragenen Staubteilchen wird durch Querschnittsverengung so geführt, daß die Teilchen ein Meßvolumen einzeln und nacheinander durchströmen. Das Registrieren der Teilchen in dem Meßvolumen erfolgt meist auf optischem Wege, nämlich durch Auffangen einer Streulichtmenge [18 bis 21].

Die von einem Staubteilchen gestreute Lichtmenge ist von sehr vielen Faktoren abhängig, so vom Stoff, von der Teilchengröße, der Teilchenform, der Wellenlänge des Lichtes und dem Beobachtungswinkel zur Richtung des einfallenden Lichtes. Unter Kenntnis der Abhängigkeiten ist die Impulsrate ein Maß für die Teilchenanzahl und die Impulshöhe (aus Lichtmenge) ein solches für die Teilchengröße.

Je nach Ausstattung der Geräte, Bild 12, werden die Teilchen in einer unterschiedlichen Anzahl von Größenklassen gezählt. Die Geräte werden im Handel als Streulicht-Teilchengrößenspektrometer, -Partikel- oder -Teilchenzähler geführt.

Für eine Konzentrationsmessung müssen alle Teilchen des Teilgasstromes erfaßt werden. Da beim Zählen jeweils nur ein Teilchen im Meßvolumen vorhanden sein darf, ist die Anzahl im Teilgasstrom mit  $10^2$  bis  $10^6$  Teilchen/cm<sup>3</sup> und damit auch das Volumen dieses Stromes begrenzt. Diese Geräte sind daher nur für niedrige Staubgehalte geeignet.



**Bild 12.** Schema eines Streulichtteilchenzählers (Bauart Fa. Bausch & Lomb)

- |                |                  |
|----------------|------------------|
| a Lichtquelle  | f Parabolspiegel |
| b Primärstrahl | g Lichtfalle     |
| c Linsensystem | h Streulicht     |
| d Spalt        | i Fotomultiplier |
| e Meßvolumen   |                  |

#### 4.4 Indirektes Messen der Staubmasse ohne Teilchenabscheidung

##### 4.4.1 Indirektes Messen der Staubmasse mit Hilfe der Lichtstreuung [18, 19, 22 bis 24]

Mißt man das gestreute Licht nicht von einzelnen, sondern gleichzeitig von mehreren Teilchen, also eines Teilchenkollektivs, dann nennt man die Geräte Tyndallometer, Staubfotometer oder Aercsolphotometer. Der wesentliche Unterschied zu den Teilchenzählern besteht in der Größe des Meßvolumens und darin, daß nicht eine Impulsrate, sondern die Summe von Impulshöhen erfaßt wird. Diese Streulichtmenge ist als Hilfsgröße für die Staubmasse geeignet.

Das Ergebnis ist außer von Geräteparametern von Anzahl, Größe, Form und stofflicher Zusammensetzung der Teilchen abhängig. Hierdurch ist auch der Gültigkeitsbereich der jeweiligen Kalibrierung umrissen. Der Vorteil dieses Meßverfahrens liegt in der unmittelbaren Anzeige. Der Arbeitsbereich ist hinsichtlich der Konzentration größer als bei den Zählgeräten. Die obere Grenze liegt, abhängig von der Feinheit des Staubes und der Bauart, zwischen 10 und 50 mg/m<sup>3</sup>.

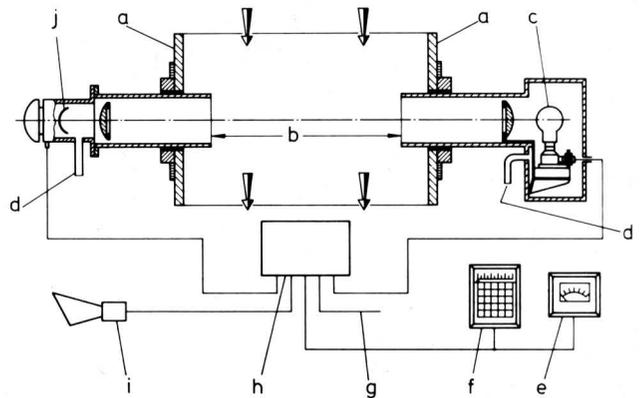
##### 4.4.2 Indirektes Messen der Staubmasse mit Hilfe der Lichtschwächung [25 bis 27]

Der Energieverlust eines Lichtes bei Durchgang durch ein staubbeladenes Gas wird vom *Lambert-Beerschen Gesetz*  $E/E_0 = e^{-c \cdot x \cdot s}$  beschrieben [18]. Dabei ist  $E_0$  das ausgesendete Licht,  $E$  das empfangene, geschwächte Licht,  $c$  der Extinktionskoeffizient,  $x$  die Länge der optischen Meßstrecke und  $s$  der auf die Länge bezogene Staubgehalt. Zum Messen des Transmissionsgrades  $E/E_0$  ist beispielsweise das in Bild 13 dargestellte Meßsystem geeignet. Die Anlage besteht aus einem Lichtsender, optischen Bauelementen,

einem Reflektor und einem Fotomultiplier. Da der Staubgehalt eines Gases der Extinktion ( $\ln E_0/E$ ) proportional ist, sind die Geräte meistens mit einer Analogrechnerstufe ausgerüstet, die die Umrechnung vom gemessenen Transmissionsgrad in die Extinktion besorgt. Die Gleichung zeigt nur die grundsätzlichen Abhängigkeiten, die Zusammensetzung des Staubes wird über Koeffizient  $c$  erfaßt.

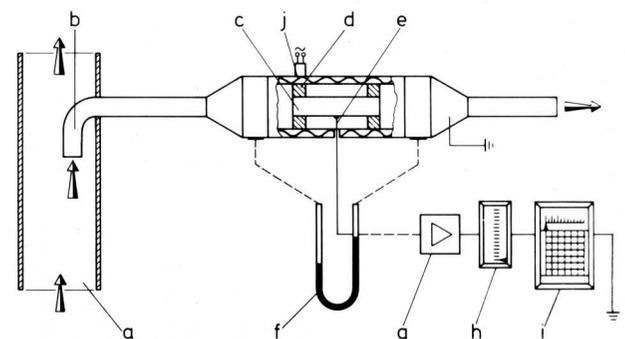
Insbesondere hängt das Ergebnis von der Größe und Größenverteilung des Staubes ab. Diese Meßverfahren zum Bestimmen des Staubgehaltes sind nur dann anwendbar, wenn die Teilchengrößenverteilung des Staubes bekannt ist oder sich nicht ändert. Der Gültigkeitsbereich der Kalibrierung [27] ist daher sehr eng. Weiter ist zu erwähnen, daß dieses Meßverfahren bei geringer Staubkonzentration und damit nur sehr geringer Schwächung des Lichtstromes recht ungenau ist. Je nach verwendetem System lassen sich Konzentrationen unterhalb von etwa 50 mg/m<sup>3</sup> nicht oder nur ungenau erfassen und dies bei einer verhältnismäßig langen Meßstrecke, z.B. 1 m und mehr. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt wie beim Tyndallometer darin, daß man unmittelbar einen Wert als Maß für die Staubkonzentration gewinnt.

Im Gegensatz zum Tyndallometer ist diese Methode nur für hohe Staubgehalte geeignet. Das Gerät wird daher im industriellen Bereich für das Messen hoher Staubkonzentrationen, beispielsweise von Kaminabgasen, in großem Umfang eingesetzt [16].



**Bild 13.** Schema eines Gerätes zum Messen der Lichttransmission.

- |                            |                  |
|----------------------------|------------------|
| a Wand des Strömungskanals | f Schreiber      |
| b Meßstrecke               | g Netzanschluß   |
| c Lichtsender              | h Schaltgerät    |
| d Spülluft                 | i Signalhupe     |
| e Schalttafelinstrument    | j Lichtempfänger |



**Bild 14.** Schema einer Anordnung zur indirekten Messung der Staubmasse über eine Aufladung, Gerät Konitest (Bauart Feifel und Prochazka).

- |                    |                         |
|--------------------|-------------------------|
| a Strömungskanal   | f Differenzdruckmessung |
| b Entnahmesonde    | g Verstärker            |
| c Erregerrohr      | h Anzeiger              |
| d Isolation        | i Linienschreiber       |
| e Stromableitkabel | j elektrische Beheizung |

#### 4.4.3 Messen der Ionenabsorption durch Staubteilchen

Aus der Schwächung eines Ionenstromes läßt sich ebenfalls auf die Staubkonzentration schließen. Eine solche Anordnung ist von *Hasenclever* und *Siegmann* vorgeschlagen worden [16, 28].

#### 4.4.4 Messen der Teilchenladung

Staubteilchen in einer Aerodispersion lassen sich durch Reibung aufladen. Ladungsmenge und Staubkonzentration stehen in einem bestimmten Zusammenhang. Bringt man den Staub in Kontakt mit einer geerdeten Wand, so läßt sich ein Ladungsstrom messen. Ein im Handel befindliches Gerät [16], das nach diesem Prinzip arbeitet, zeigt **Bild 14**.

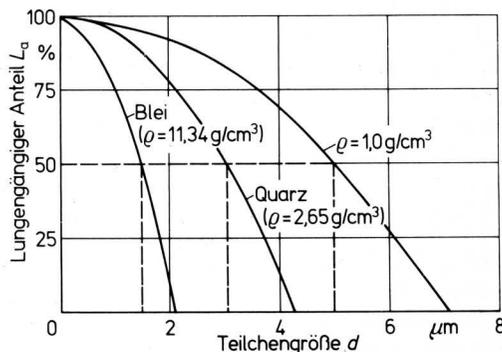
### 5. Messen der lungengängigen Anteile des Staubes in Verbindung mit der Staubgehaltsmessung

#### 5.1 Begriffe

Gesundheitliche Auswirkungen sind vor allem von dem Staub zu erwarten, der beim Einatmen in die Lunge gelangt. Man bezeichnet diesen Anteil als lungengängigen Staub. Aufgrund zahlreicher Messungen hat man sich anlässlich einer internationalen Konferenz in Johannesburg im Jahre 1959 auf einheitliche Werte für Teilchengrößen und ihre Anteile geeinigt, die als lungengängig anzusehen sind [29]. Diese Werte sind als Kurve in **Bild 15** dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, daß 50 % eines Staubes der Dichte 1 und der Größe  $5 \mu\text{m}$  lungengängig sind bzw. 0 % bei  $7,1 \mu\text{m}$  und 95 % bei  $1,5 \mu\text{m}$ .

Der gesamte lungengängige Anteil wird auch als Feinstaub, der andere als Grobstaub bezeichnet [30].

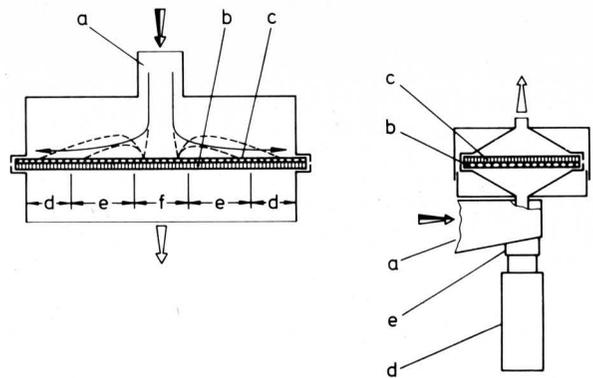
Eine Teilchengrößenanalyse erübrigt sich oft, wenn man den Staub bei der Staubgehaltsmessung in Grob- und Feinstaub aufteilt. Dies ist bei den Methoden mit Teilchenabscheidung dadurch möglich, daß man einen zusätzlichen Abscheider vorschaltet, der den Staub entsprechend der Johannesburg Kurve trennt. Bei den Zählgeräten und bis zu einem gewissen Grad bei den Fotometern besteht die Möglichkeit, nur das Streulicht der lungengängigen Teilchen zu messen.



**Bild 15.** Lungengängiger Anteil (Durchlaßgrad) als Funktion der Teilchengröße bei unterschiedlicher Dichte, gemäß der Johannesburg Konvention.

#### 5.2 Abtrennen des Grobstaubes bei den Abscheideverfahren

Als Vorabscheider bei den Abscheideverfahren mit einem Trennergebnis gemäß der Johannesburg Kurve eignen sich Schwerkraft-, Umlenk- und Fliehkraftabscheider [30 bis 35]. Zwei Geräte sind im Schema in **Bild 16** dargestellt. Es handelt sich beim Gravikon VC 25 [30, 32, 33] um eine Kombination von Umlenk- und Filtrationsabscheider, beim Simquads [31, 34] um eine Kombination von Zyklon und Filter.



**Bild 16.** Staubprobennehmer mit Auftrennung in Grob- und Feinstaub.

links:  
Gravikon VC 25, System  
Staubforschungsinstitut Bonn  
Hersteller: Fa. Sartorius,  
Göttingen

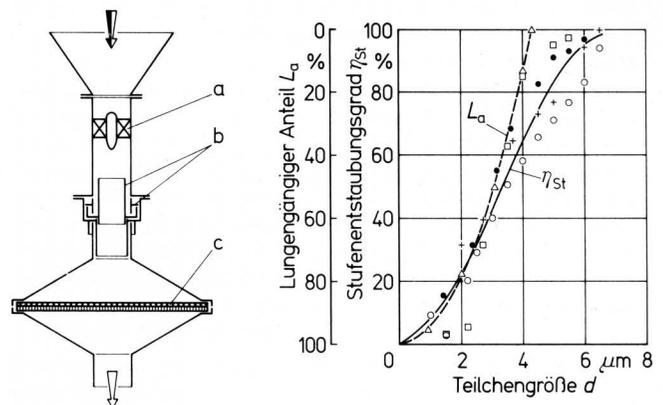
- a Lufteintritt,  $22,5 \text{ m}^3/\text{h}$
- b Filterstütze
- c Filter, wirksamer  $\phi = 142 \text{ mm}$
- d Grobstaubbereich
- e Feinstaubbereich
- f Auftreffbereich

rechts:  
Simquads Bauart Fa.  
Casella, London

- a Lufteintritt,  $1,9 \text{ l}/\text{min}$
- b Filter  $35 \text{ mm } \phi$  für Feinstaub
- c Filterstütze
- d Grobstaub-Sammelgefäß
- e Zyklon

Im hiesigen Institut wurde ein Axialzyklon als Vorabscheider entwickelt, der sich einem handelsüblichen Filter vorschalten läßt. Die Probe kann man ruhendem oder strömendem Gas entnehmen. Wegen des hohen Durchsatzes von  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  ergeben sich kurze Zeiten für die Probenahme. Das Schema dieses Abscheiders und die Trennungsgradkurve zeigt **Bild 17**.

Diese Anordnung hat auch Vorteile hinsichtlich anderer Untersuchungen. Der bei Feldversuchen immer vorhandene grobe Staub haftet schlecht auf dem Filter, so daß die Handhabung erschwert ist. Dieses Problem entfällt, weil sich der Grobstaub im herausnehmbaren Sammelgefäß des Zyklons befindet. Die Aufteilung des Staubes und die leichte Zugänglichkeit der Proben erleichtern weiter eine Teilchengrößenanalyse und andere Untersuchungen.



**Bild 17.** Abscheiden des Grobstaubes durch einen Axialzyklon. links: Aufbau des Abscheiders, schematisch

- a Leitkörper des Axialzyklons
- b Sammelgefäß für Grobstaub
- c Filter für Feinstaub

rechts: Lungengängiger Anteil  $L_a$  nach der Johannesburg Konvention und Stufenentstaubungsgrad  $\eta_{St}$  des verwendeten Axialzyklons in Abhängigkeit von der Teilchengröße bei einem Gasdurchsatz von  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ , Quarz  $\rho = 2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$ .

- $\Delta$  für  $L_a$  festgelegte Werte
- $\square$  + Stufenentstaubungsgrade für verschiedene Rohgasproben

### 5.3 Erfassen des Feinstaubes bei Zählgeräten und Fotometern [36, 37]

Die Abhängigkeit des Streulichtes insbesondere von der Teilchengröße läßt sich für eine Trennung in Grob- und Feinstaub ausnutzen. Bei den Zählgeräten befindet sich jeweils nur ein Teilchen im Meßvolumen. Dies ermöglicht eine Teilchengrößenanalyse. Bei Fotometern läßt sich eine Trennung in Grob- und Feinstaub nur im Rahmen von Annahmen über die Größenverteilung der Teilchen machen [36, 37].

### 6. Eignung der Verfahren zum Messen des Staubgehalts für den Arbeits- und Umweltschutz in der landwirtschaftlichen Produktion

Die Bedingungen der Staubgehaltmessung in der landwirtschaftlichen Produktion unterscheiden sich im Prinzip nicht von denen in der Industrie. Grundsätzlich sind daher auch alle vorgestellten Geräte im Rahmen ihrer Eigenschaften geeignet. Es bleibt zu diskutieren, welche Geräte sich für jeweils vorliegende Bedingungen besonders empfehlen. Als Kriterien kommen in Betracht: Anwendbarkeit hinsichtlich Teilchengröße und Staubmenge, Genauigkeit, Betriebssicherheit, Preis und Netzabhängigkeit.

Als Grundausrüstung für Untersuchungen am Arbeitsplatz sind nur Filtergeräte zu empfehlen. Der Preis für batteriebetriebene Geräte (z.B. Fa. Sartorius Göttingen, Casella London) liegt bei etwa 5 000 DM. Soll auch in Produktionsanlagen gemessen werden, so sind netzbetriebene Filtergeräte mit einer höheren, einstellbaren Gebläseleistung und Entnahmesonden notwendig (etwa 12 000 DM). Filtergeräte sind zur Kalibrierung anderer Verfahren geeignet.

Für Untersuchungen im Atembereich (Arbeitsschutz) können Fotometer (z.B. Fa. Leitz, Fa. Sartorius, netzabhängig) als Ergänzung von Nutzen sein. Sie benötigen nur eine geringe Gasmenge, geben die Meßwerte unmittelbar an und sind sehr empfindlich. Das Problem liegt in der Gültigkeit der Kalibrierung. Hohe Konzentrationen lassen sich nicht erfassen.

Ist die Emission von Anlagen zu überwachen, so ist eine Rücksprache mit dem TÜV angebracht. Geräte mit Messung der Lichtabsorption (3 000 - 10 000 DM) und Geräte mit Filterband werden für diese Aufgabe oft herangezogen.

Für alle Verfahren ist zu prüfen, daß sie die Trockenmasse und ein auf den Normzustand beziehbares Gasvolumen anzeigen oder liefern.

Für Untersuchungen im Hinblick auf den Arbeits- und Umweltschutz werden Filtergeräte mit Vorabscheider zur Trennung in Grob- und Feinstaub künftig an Bedeutung gewinnen. Hierdurch erübrigt sich in vielen Fällen der Aufwand für eine Teilchengrößenanalyse [38 bis 40].

#### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] *Bohnet, M.:* Staubgehaltsbestimmung in strömenden Gasen. Chemie-Ing.-Techn. Bd. 45 (1973) Nr. 1, S. 18/24.
- [ 2 ] *Rüping, G.:* Die Bedeutung der geschwindigkeitsgleichen Absaugung bei der Staubstrommessung mittels Entnahmesonden. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 28 (1968) Nr. 4, S. 137/44.
- [ 3 ] VDI-Richtlinie 2066: Messen von Partikeln. Staubmessungen in strömenden Gasen. Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung.
- [ 4 ] VDI-Richtlinie 2465 Bl. 1: Auswerten von Staubkonzentrationsmessungen in strömenden Gasen. Kontinuierliche Prozesse.
- [ 5 ] ● *Over, E. u. R.C. Pankhurst:* The measurement of air flow. IV. Auflage. Oxford/London/Edinburgh/New York/Toronto/Braunschweig: Pergamon Press 1969.
- [ 6 ] ● *Hermig, F.:* Grundlagen und Praxis der Durchflußmessung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1967.
- [ 7 ] VDE/VDI-Richtlinie 2040: Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Drosselgeräten. Gebrauchsformeln und spezielle Formeln für Gase.
- [ 8 ] VDE/VDI-Richtlinie 3513: Schwebekörper-Durchflußmesser. Berechnungsverfahren.
- [ 9 ] ● *Batel, W.:* Entstaubungstechnik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1972.
- [ 10 ] VDI-Richtlinie 2463 Bl. 1 u. 2: Messen von Partikeln in der Außenluft.
- [ 11 ] VDI-Richtlinie 2266 Bl. 3: Messung der Staubkonzentration am Arbeitsplatz. Messung der Teilchenzahl. Messen unter Benutzung von Membranfiltern.
- [ 12 ] VDI-Richtlinie 2269 Bl. 1 bis 4: Mikroskopische Untersuchungsverfahren feiner Teilchen.
- [ 13 ] VDI-Richtlinie 2266 Bl. 2: Messung der Staubkonzentration am Arbeitsplatz. Messung der Teilchenzahl. Messen mit dem Konimeter.
- [ 14 ] *Riediger, G.:* Über den Einsatz des Andersen-Kaskadenimpaktors in der gewerblichen Prüftechnik, speziell zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 34 (1974) Nr. 8, S. 287/91.
- [ 15 ] VDI-Richtlinie 2266 Bl. 1: Messung der Staubkonzentration am Arbeitsplatz. Messung der Teilchenzahl. Messen mit dem Thermal-Präzipitator.
- [ 16 ] *Düwel, L.:* Neuester Stand der Entwicklung von Kontrollmeßgeräten zur Dauerüberwachung von Staubemissionen. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 28 (1968) Nr. 3, S. 119/27.
- [ 17 ] *Dresia, H. u. F. Spohr:* Erfahrungen mit dem radiometrischen Staubmeßgerät "Beta-Staubmeter". Staub-Reinhalt. Luft Bd. 31 (1971) Nr. 6, S. 243/49.
- [ 18 ] ● *Hulst van de, H.C.:* Light scattering by small particles. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1957.
- [ 19 ] *Hodkinson, J.R. u. I.R. Greenfield:* Response calculations for light-scattering aerosol counters and photometers. Appl. Optics 4 (1965) S. 1463/74.
- [ 20 ] *Bol, J., J. Gebhart, W. Heinze, W.-D. Petersen u. G. Wurzbacher:* Ein Streulicht-Teilchengrößenspektrometer für submikroskopische Aerosole hoher Konzentration. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 30 (1970) Nr. 11, S. 475/79.
- [ 21 ] *Rath, R. u. D. Pohl:* Teilchengrößenbestimmung mit dem Partikel-Zähler. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 34 (1974) Nr. 4, S. 130/34.
- [ 22 ] *Robock, K.:* Grundlagen der optischen Staubmessung. Staub Bd. 22 (1962) Nr. 3, S. 80/84.
- [ 23 ] *Breuer, H., J. Gebhart u. K. Robock:* Zur Bestimmung von Staubkonzentrationen im Steinkohlenbergbau auf der Basis der Lichtstreuung. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 30 (1970) Nr. 10, S. 426/31.
- [ 24 ] *Köhler, A. u. M. Birkle:* Streulichtphotometrische und gravimetrische Vergleichsmessungen des atmosphärischen Staubgehalts. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 35 (1975) Nr. 1, S. 1/4.
- [ 25 ] *Hermann, J. u. H.J. Eiberweiser:* Korngrößeneinfluß bei Extinktionsmessungen. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 34 (1974) Nr. 5, S. 159/64.
- [ 26 ] *Günther, R.:* Ein optischer Rauchdichtemesser zur direkten Anzeige der Feststoffmenge pro m<sup>3</sup> Rauchgas. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 33 (1973) Nr. 9, S. 352/58.
- [ 27 ] VDI-Richtlinie 3672: Staubmessungen in strömenden Gasen. Registrierende Meßeinrichtungen; Photoelektrische Meßgeräte; Kalibrierung.
- [ 28 ] *Coenen, W.:* Registrierende Staubmessung nach der Methode der Kleinionen-anlagerung. Staub Bd. 24 (1964) Nr. 9, S. 350/53.

- [ 29 ] ● *Drenstein, A.J.*: Proceedings of pneumoconiosis. Conference Johannesburg (1959), London: Churchill 1960.
- [ 30 ] *Schütz, A. u. W. Coenen*: Feinstaub: Definition – Meßverfahren. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 34 (1974) Nr. 9, S. 323/26.
- [ 31 ] *Seany, R.J., R.K. Halpin u. B.A. Maguire*: A portable recording instrument (SIMSLIN) for monitoring respirable airborne dust. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 33 (1973) Nr. 5, S. 213/16.
- [ 32 ] *Bauer, H.-D. u. E. Bruckmann*: Ergebnisse von Vergleichsmessungen zwischen verschiedenen Staubmeßgeräten und Beurteilung ihrer Eignung für die betriebliche Praxis. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 35 (1975) Nr. 12, S. 465/70.
- [ 33 ] *Coenen, W.*: Feinstaubmessung mit dem VC 25. Neuere Untersuchungen und praktische Erfahrungen. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 35 (1975) Nr. 12, S. 452/58.
- [ 34 ] *Maguire, B., E. Saunders u. G.W. Harris*: Respirable-dust sampling in british quarries. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 35 (1975) Nr. 12, S. 397/400.
- [ 35 ] *Lilienfeld, P.*: Design and Operation of Dust Measuring Instrumentation Based on the Beta-Radiation Method. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 35 (1975) Nr. 12, S. 458/64.
- [ 36 ] *Breuer, H., J. Gebhart, K. Robock u. U. Teichert*: Fotoelektrisches Meßgerät zur Bestimmung der Feinstaubkonzentration. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 33 (1973) Nr. 4, S. 182/85.
- [ 37 ] *Breuer, H.*: Das Feinstaub-Streulichtphotometer TMdigital. Staub-Reinhalt. Luft Bd. 36 (1976) Nr. 1, S. 6/10.
- [ 38 ] ● *Allen, T.*: Particle size measurement. London: Chapman and Hall 1974.
- [ 39 ] ● *Batel, W.*: Einführung in die Korngrößenmeßtechnik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1971.
- [ 40 ] VDI-Richtlinie 2031: Feinheitsbestimmungen an technischen Stäuben.

Die VDI-Richtlinien sind erhältlich beim Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin.

## Versuche an einfachen Bodenwerkzeugen, insbesondere von grabenlos arbeitenden Dränmaschinen

Von T.F. Demian, Khartum\*)

DK 631.311.5:631.626.2

Die Dränung bezweckt die grundlegende Verbesserung der landwirtschaftlich genutzten Kulturböden durch Regelung der Bodenwasserverhältnisse. Dabei ist die technische Aufgabe die Herstellung eines unterirdischen Systems wasserabführender Kanäle, durch die stauende Nässe der Kulturfächen beseitigt werden soll. Seit etwa 25 Jahren werden zum Bau solcher Systeme Dränmaschinen eingesetzt, die die Kanäle ziehen und sie durch gleichzeitiges Einlegen von Ton- oder Plastikrohren für Jahrzehnte haltbar machen. Nach den hierfür meist eingesetzten Grabenfräsmaschinen werden mehr und mehr grabenlos arbeitende Dränmaschinen angewendet, letztere lassen eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit zu, besitzen eine bessere Manövrierfähigkeit und weisen einen geringeren Verschleiß der Arbeitswerkzeuge auf. Indes benötigen sie höhere Zugleistungen. Den äußerst hohen Leistungsbedarf herabzusetzen ist vorrangiges Ziel der gegenwärtigen technischen Entwicklung.

Die Arbeit entstand am Landmaschinen-Institut der Universität Göttingen, (Direktor: Professor Dr.-Ing. F. Wienecke). Sie wurde von Professor Dr.-Ing. K. Gallwitz angeregt und mitbetreut.

\*) Dr. T.F. Demian ist akademischer Assistent an der Landwirtschaftlichen Fakultät, Abt. Landtechnik, der Universität Khartum.

### Einleitung

Die grabenlos arbeitenden Dränmaschinen, **Bild 1**, weisen noch sehr unterschiedliche Formen ihrer Arbeitswerkzeuge auf. Es sind solche mit flacher oder winkliger Stirn und mit verschiedenen Anstellwinkeln anzutreffen. Es besteht bisher wenig Klarheit, durch welche Werkzeuggestaltung und -einstellung eine gute Auflockerung des Bodens über dem Dränrohr bei Einsatz grabenlos arbeitender Dränmaschinen erreicht werden kann. Aufgabe einer umfangreichen Arbeit [1] war es, verschiedene Bodenwerkzeuge hinsichtlich der auftretenden Zugkräfte und des Bodenaufbruchs zu untersuchen und dabei den Einfluß des Anstellwinkels, der Werkzeugbreite, der Arbeitstiefe und der Fahrgeschwindigkeit zu ermitteln. Unter Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik könnten dann die gewonnenen Ergebnisse auf Großausführungen und auf verschiedene Böden übertragen werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind auch für die einfachen Werkzeuge der Bodenbearbeitung, so für die Meißelgestaltung von Tiefgrubbern von Interesse.

### 1. Forderungen an die Funktion und das Zusammenwirken von Bodenwerkzeug und Dränmaschine

Neben einem geringeren Zugleistungsbedarf sollte die vertikale Kraftkomponente des Werkzeugs möglichst groß sein, um eine zusätzliche Belastung auf die Raupen der Dränmaschine übertragen zu können und dadurch ihr Zugvermögen zu erhöhen. Der am Werkzeug auftretende Bodenwiderstand sollte möglichst gleichmäßig wirken, um Stöße auf die Maschine gering zu halten. Ein kompakter Anbau des Werkzeugs an die Zugmaschine trägt zu