

# DIE PROBESTROMENTNAHME ZUR BESTIMMUNG DER DISPENSEN PHASE EINER ZWEIFHASENSTRÖMUNG

Robert Eschrich

VDI

## 1. Einleitung

Bei der Entnahme einer repräsentativen Probe aus einer Zweiphasenströmung, die aus einem Trägergas und einer dispersen Phase von Feststoff- oder Flüssigkeitspartikeln besteht, ist die isokinetische oder geschwindigkeitsgleiche Absaugung erforderlich; denn in einer beschleunigten oder verzögerten Zulaufströmung kommt es durch die Trägheit der Partikel zu Schlupf, zu Entmischungen und folglich zu Messfehlern bei nachfolgenden Untersuchungen der Probe.

## 2. Absaugverhältnisse

Bild 1 zeigt die Zulaufströmung am achsparallel angeströmten, dünnwandigen Entnahmerohr im Parallelstrom bei unterschiedlichen Absaugverhältnissen a) b) c).

Der Fall a) ist die isokinetische Probenahme. Absauggeschwindigkeit  $w_s$  und Strömungsgeschwindigkeit  $w_o$  stimmen überein. Das Entnahmerohr schneidet den Probestrom einer zylindrischen Stromröhre mit  $D_o = D_s$  aus dem Hauptstrom heraus. Alle Partikel dieses Probestromes – und nur diese – gelangen in das Entnahmerohr. Die Probe ist repräsentativ.

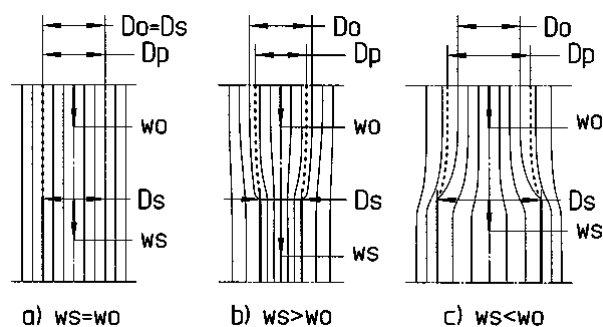


Bild 1 Zulaufströmung

Im Fall b) ist die Absauggeschwindigkeit  $w_s > w_o$ . Die Stromröhre der Zulaufströmung verengt sich von  $D_o$  auf  $D_s$ . Infolge der Trägheit der Partikel weichen die Partikelbahnen von den gekrümmten Strombahnen ab. Mit Sicherheit gelangen nur alle Partikel innerhalb  $D_s$  in das Entnahmerohr. Für die Partikel zwischen  $D_s$  und  $D_o$  gibt es Grenzbahnen, die entscheiden, welche Partikel in das Entnahmerohr gelangen und welche die Einlaufströmung verlassen und am Entnahmerohr vorbeifliegen. Folglich werden im Probestrom Partikel fehlen. Diese Probe ist nicht repräsentativ.

Im Fall c) ist  $w_s < w_o$ . Die Stromröhre der Zulaufströmung erweitert sich von  $D_o$  auf  $D_s$ . Hier gelangen mit Sicherheit alle Partikel innerhalb  $D_o$  in das Entnahmerohr. Die Grenzbahnen zwischen  $D_s$  und  $D_o$  entscheiden, welche Partikel zusätzlich in die Zulaufströmung und in das Entnahmerohr gelangen und welche am Entnahmerohr vorbeifliegen. Ein Überschuss an Partikeln gelangt in den Probestrom. Auch diese Probe ist nicht repräsentativ.

### 3. Isokinetische Probenahme bei Staubgehaltmessungen

Für rechtsverbindliche Messungen z.B. um Nachweis der Einhaltung von Staubemissionsgrenzwerten gibt es die VDI-Richtlinie 2066 Bl.1 für die gravimetrische Bestimmung des Staubgehaltes. Hier wird geschwindigkeitsgleiche Absaugung vorgeschrieben. Sie wird wie folgt definiert: „insbesondere soll durch die Ausführung der Sonde sichergestellt werden, dass die Trennlinien zwischen den Haupt- und Teilströmen von Partikeln und Gas zusammenfallen“

Die Filterkopfsonde Bild 2 [1] [8] mit einem einfachen Entnahmerohr, mit einem Staugerät (Dreilochsonde) für die Strömungsgeschwindigkeit im Hauptstrom und mit einer Messblende für den Probestrom ist ein praktisches Beispiel für die isokinetische Probenahme. Eine Automatik mit computer-gestützter Messwerterfassung gleicht stetig die Absaug-geschwindigkeit  $w_s$  an die Strömungsgeschwindigkeit  $w_o$  durch Regelung des Probestromes an. Bei manueller Messwerterfassung ist die Regelung der Isokinetik mit einer solchen Sonde allerdings zu kompliziert und kaum durchführbar.



Bild 2 Filterkopfsonde

Die Nulldrucksonde Bild 3 ist eine rationelle Lösung für die isokinetische Probenahme bei rein manuellen Messungen, weil die Anpassung der Absaug-geschwindigkeit an die Strömungsgeschwindigkeit ohne die Bestimmung dieser komplexen Messgrößen möglich ist. Lediglich ein Handstellventil für den Probestrom und ein U-Rohr sind für die Isokinetikregelung an Stelle der Automatik erforderlich. Die Nulldrucksonde hat Druckmessbohrungen an der Außenkontur und eine Druckmessstelle im Entnahmerohr. Die Druckmessstellen sind so am Sondenprofil angeordnet, dass bei gleichen Drücken innen und außen (Nullabgleich am U-Rohr) die Zulaufströmung den isokinetischen Bedingungen entspricht.

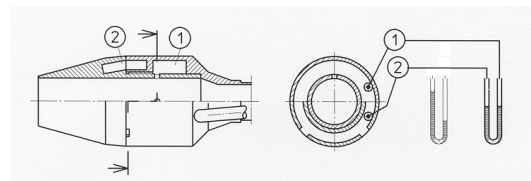


Bild 3 Nulldrucksonde [2]

Gegenüber dem einfachen Entnahmerohr ist die Nulldrucksonde wegen Anordnung der Druckmessstellen relativ dickwandig. Das führt zu einer beschleunigten Umströmung der Sonde mit erhöhtem Strömungswiderstand.

Aber vorteilhaft ist die beschleunigten Strömung für die Anordnung der Druckmessstellen und die Gestaltung der Sonde; denn

- beschleunigte Strömungen sind stabil und liefern zuverlässige Druckwerte
- die beschleunigte Einlaufströmung erleichtert die Gestaltung der Innenkontur
- der zusätzliche Unterdruck verstärkt den Messeffekt
- kurze Baulängen des Sondenkopfes sind möglich

Allerdings werden diese Vorteile bei traditionellen Ausführungen - Bild 4 - kaum genutzt; denn immer noch wird von Fachleuten der Staubmesstechnik die Ansicht vertreten, dass der äußere Druckmesswert dem statischen Druck im ungestörten Hauptstrom entsprechen müsse [3].

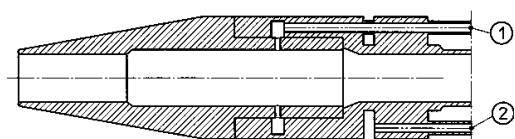


Bild 4 Nulldrucksonde [3]

Das Ergebnis sind lange Sondenköpfe mit langen Laufstrecken bis zu den Druckmessstellen, um die anfangs beschleunigte Umströmung wieder zu verzögern. Dicker werdende Wandgrenzschichten und Instabilitäten der verzögerten Strömung sind die Folge und offensichtlich die Ursachen für zweifelhafte Messergebnisse, die die Nulldrucksonde unnötigerweise in Verruf gebracht haben.

#### 4. Probenahmefehler bei nicht-isokinetischer Absaugung

Bei Konzentrationsmeseinrichtungen, die im kontinuierlichen Dauerbetrieb zuverlässig arbeiten müssen, wird meist auf die Automatik für eine isokinetische Probenahme verzichtet, zumal die betreffenden Messverfahren durchflussabhängig sind und folglich die ständige Anpassung des Probestromes neue Messfehler zur Folge hätte. Die Einrichtungen arbeiten bei diesen Anwendungen mit konstantem Probestrom und werden in der Regel für den Normalfall "Nennlast der Anlage" isokinetisch ausgelegt. Bei Teillast der Anlage sind infolge nicht-isokinetischer Absaugung Probenahmefehler zu erwarten, die entweder nach einer sicheren Abschätzung wegen Geringfügigkeit in Kauf genommen werden oder andernfalls eine systematische Korrektur erfordern.

Zur Frage nach dem Probenahmefehler und dessen Korrektur gibt es eine Reihe von Arbeiten. Im Folgenden werden Ergebnisse aus [4] [5] [6] [7] verwendet.

Die Gleichung 
$$M_P/M_{P^{\circ}} = 1 + K_0 * [(w_S / w_0) - 1] \quad (1)$$

hat sich bei Untersuchungen von Badzioch [4] und Zenker [5] als sehr nützlich erwiesen.

Darin ist:

$w_0$  die Strömungsgeschwindigkeit des Hauptstromes

$w_S$  die Absauggeschwindigkeit im Eintritt des Entnahmerohres

$M_{P^{\circ}}$  die aufgefangene Partikelmenge bei isokinetischer Absaugung  $w_S = w_0$ , dementsprechend  $D_0 = D_S$

$M_P$  die aufgefangene Partikelmenge bei nicht-isokinetischer Absaugung,

$K_0$  der Korrekturbeiwert, der von den Parametern der Strömung, des Gases und insbesondere vom Partikeldurchmesser  $d_P$  abhängt.

Badzioch [4] benutzt die Grenzfälle  $K_0 = 0$  und  $K_0 = 1$  um die Fehlergrenzen nicht-isokinetischer Probenahme abzuschätzen und geht bei weiteren Betrachtungen von einer linearen Abhängigkeit in (1) für den Bereich

$$(w_S / w_0) = 0,5 \dots 4 \text{ aus.}$$

Den empirischen Nachweis der linearen Abhängigkeit (1) erbringt Zenker [5] mit zahlreichen Versuchsergebnissen für den Bereich  $(w_S / w_0) = 0,4 \dots 2,5$ .

Für eine bestimmte Partikelgröße gibt es in einer Zulaufströmung - Bild 1 - eine Grenzbahn, die für die Stromröhre der Partikelfraktion den Anfangsdurchmesser  $D_P$  liefert.

Damit gilt für diese Partikelfraktion 
$$M_P/M_{P^{\circ}} = D_P^2/D_S^2 \quad (2)$$

Die Gleichungen (1) (2) liefern mit dem Absaugverhältnis  $w_S/w_0 = D_0^2/D_S^2$

$$K_0 = (D_P^2 - D_S^2) / (D_0^2 - D_S^2) \quad (3)$$

eine Beziehung, mit der die Bestimmung des Korrekturbeiwertes auf die Berechnung der Partikel-Grenzbahn zurückgeführt wird.

Der so berechnete Korrekturbeiwert gilt für **eine** Partikelgröße. Für Stäube mit bekannter Größenverteilung kann auf Grund der Linearität von (1) aus den Korrekturbeiwerten der Partikelgrößen bei Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung ein mittlerer Korrekturbeiwert bestimmt werden, so dass Gleichung (1) quasi für eine mittlere Partikelgröße gilt.

Die Extremfälle für  $K_0$  sind (siehe auch Bild 6) :

$K_0 \Rightarrow 0$  Dieser Fall betrifft sehr grobe Partikel, deren Flugbahnen durch  $w_S > w_0$  oder  $w_S < w_0$  nicht beeinflusst werden. Die aufgefangene Partikelmenge ist unabhängig vom abgesaugten Gasstrom.

Es gilt  $M_P/M_{P^0} \Rightarrow 1$  nach (1) und  $D_P \Rightarrow D_S$  nach (3).

$K_0 \Rightarrow 1$  Dieser Fall betrifft sehr feine Partikel, die stets den Stromlinien folgen. Die aufgefangene Partikelmenge ist proportional dem abgesaugten Gasstrom. Die Partikelkonzentration in der Probe ist gleich der im Gasstrom an der Entnahmestelle.

Es gilt  $M_P/M_{P^0} \Rightarrow w_S/w_0$  nach (1) und  $D_P \Rightarrow D_0$  nach (3).

Ein Verfahren zur Berechnung des Korrekturbeiwertes ist in [4] angegeben. Dem Verfahren liegt ein vereinfachtes, dort nicht dargestelltes Strombild der Zulaufströmung zu Grunde.

In [6] stützt sich die theoretische Bestimmung des Probenahmefehlers bzw des Korrekturbeiwertes auf die Berechnung der Partikel-Grenzbahnen in der Zulaufströmung, die durch iterative numerische Auswertung der Differentialgleichung der achssymmetrischen Stromfunktion bestimmt wird.

Bild 5 zeigt als Beispiel das Strombild einer der Zulaufströmungen, deren Stromfunktionen

$$\Psi = \Psi_{i0} + \Psi_{i1} + \Psi_{i2} \cdot [(w_S / w_0) - 1] \quad (4)$$

für unterschiedliche Absaugverhältnisse  $w_S/w_0$  aus den elementaren Funktionen Parallelstrom  $\Psi_{i0}$ , Störung-Sondenkontur  $\Psi_{i1}$  und Einlaufströmung  $\Psi_{i2}$  zusammengesetzt sind.

Für eine Reihe praktischer Beispiele sind Berechnungen durchgeführt worden. Zur allgemeinen praktischen Anwendung sind in [6] die Ergebnisse in normierten Diagrammen unter Verwendung zutreffender Ähnlichkeitszahlen der Strömungstechnik angegeben.

Zum Vergleich von Theorie und Praxis sind im Anschluss an die Untersuchungen [8]

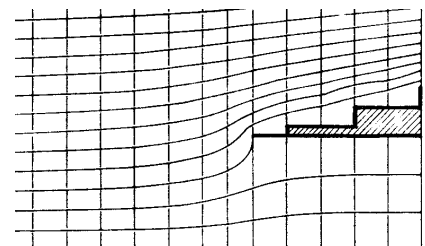


Bild 5 Zulaufströmung mit  $w_S/w_0=0,5$

unter den dort gegebenen bestmöglichen Versuchsbedingungen Staubmessungen mit isokinetischer und mit nicht-isokinetischer Probenahme durchgeführt worden.

Für den Vergleich zeigt Bild 6 zunächst die Partikelmenge für verschiedene Partikeldurchmesser – berechnet nach der Methode [6] mit den Versuchsparametern von [7]. Bild 7 zeigt die zugehörige normierte Partikelkonzentration gemäß

$$C/C^\circ = (M_P/M_{P^\circ}) / (w_S / w_0) \quad (5)$$

In Bild 7 sind Versuchswerte  $C/C^\circ$  eingetragen. Die Werte sind in [7] durch parallele Messungen mit zwei gleichen Filterkopfgeräten ermittelt worden.

Eine nicht-isokinetische Messung und eine gleichzeitige, isokinetische Messung liefern jeweils die Konzentrationen  $C$  und  $C^\circ$  und damit den normierten Wert  $C/C^\circ$ .

Die Versuchswerte bilden eine denkbare Kurve, deren Verlauf mit relativ geringer Streuung gut zu den berechneten Kennlinien passt und etwa mit der berechneten 2mü-Linie übereinstimmt. Diese Übereinstimmung wird bestätigt durch die Häufigkeitsverteilung des verwendeten Versuchsstaubes - Bild 8 aus [8].

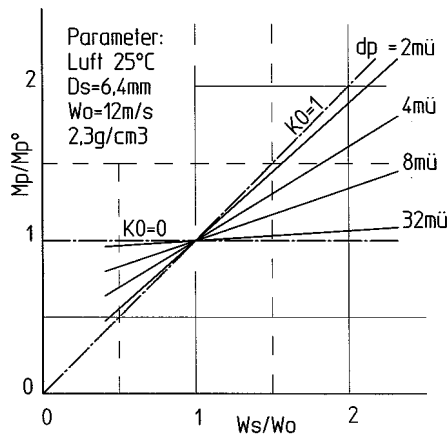


Bild 6 Partikelmenge in [g/g]

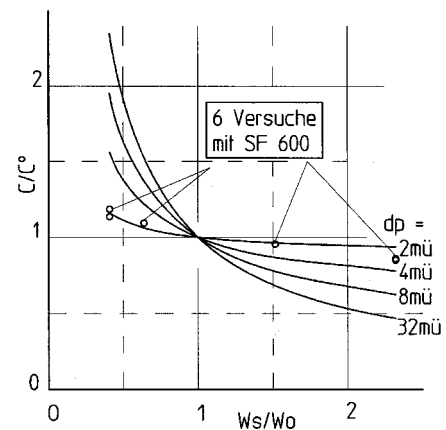


Bild 7 Partikelkonzentration in [(g/m³)/(g/m³)]

Die gute Übereinstimmung ist eine Empfehlung für die praktische Anwendung der Berechnungsmethode [6] - beispielsweise für die Fehlerbewertung von Messergebnissen oder für sinnvolle Anforderungen an Entnahme- und Messeinrichtungen.

Zu bemerken wäre, dass die Handhabung der normierten Diagramme in [6] im Hinblick auf heutige Rechentechnik recht aufwendig ist. Rationeller wäre ein neues Rechenprogramm, das für jede praktische Anwendung die Ergebnisse direkt, damit genauer und schneller liefert.

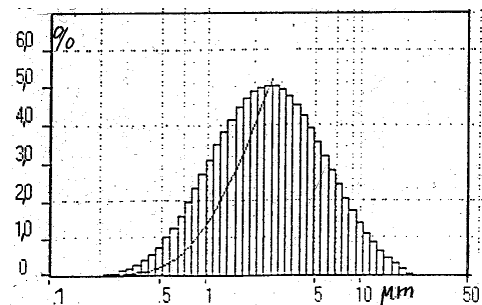


Bild 8 Häufigkeitsverteilung Versuchsstaub SF 600

## 5. Dampffuchtemessung mit automatischer Probenahmekorrektur

Bei einer Dampffuchtemesseinrichtung [9] zur Kontrolle der Frischdampfqualität von Sattdampfturbinen (Atomkraftwerke) ist auf die isokinetische Probenahme verzichtet worden, denn an den Schwierigkeiten der geräte-technischen Ausführung wäre die Geräteentwicklung gescheitert. Da auch die mittlere Tröpfchengröße oder die Häufigkeitsverteilung nicht bekannt sind, ist eine Korrektur nach [6] nicht möglich.

Statt dessen wird als weit weniger aufwendige Lösung die doppelte Absaugung [10] mit stark unterschiedlichem, aber definierten Absaugverhältnissen angewandt. Die beiden Entnahmestellen liegen dicht beieinander im Nassdampfstrom, so dass für beide derselbe wahre Feuchtwert vorausgesetzt werden kann.



Bild 9 Dampf-  
feuchtesonde

Aus zwei nicht-isokinetischen, quasi fehlerhaften Feuchtwerten mit den zugehörigen Absaugverhältnissen wird bei der automatischen Messwertverarbeitung der isokinetische Feuchtwert als der wahre Feuchtwert ermittelt und dazu der Korrekturbeiwert, für den nach [6] mit den Parametern der Sattdampfströmung eine mittlere Partikel- oder Tropfengröße bestimmt werden kann.

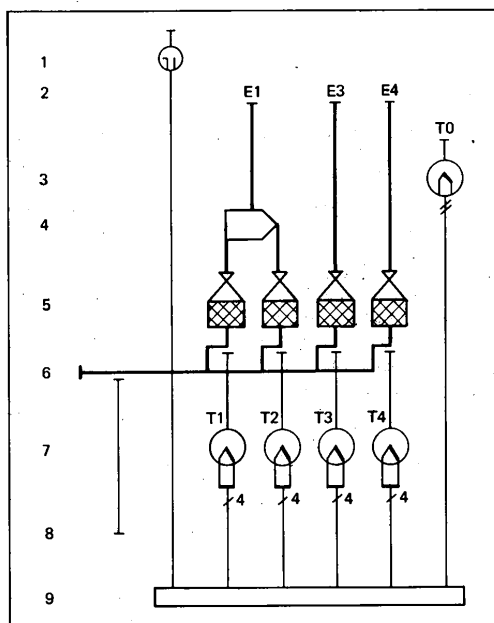


Bild 10 Funktionen der Sonde:

- 1 Staudruck
- 2 Probeentnahme
- 3 Dampftemperatur
- 4 Abscheider: Nassdampf>Sattdampf
- 5 Schalldüse + Füllkörperschicht
- 6 Abdampfstopfen
- 7 Entspannungstemperatur
- 8 Gegendruck
- 9 Messwertverarbeitung

## Literatur

- [1] Eschrich Filterkopfsonde zur gravimetrischen Bestimmung des Staubgehaltes in strömenden Gasen  
DE 4129697 C2 erteilt am 17.2.94
- [2] Eschrich Neue gravimetrische Staubmessgeräte mit Nulldrucksonden  
Energietechnik – 26.Jg. – Heft 4 – April 1976
- [3] Schneyer Labor- und Feldmessungen mit zwei Nulldrucksonden zur Staubemissionsmessung  
Sonderdruck aus Mitteilungen für die Mitglieder des Technischen Überwachungs-Vereins Bayern e.V., Heft 5/79
- [4] Badzioch Correction for Anisocinetik Sampling of Gas-borne Dust Particles  
Journal of the Institute of fuel, March 1960
- [5] Zenker Staubgehaltsbestimmung in strömenden Gasen mit Absaugsonden  
Staub-Reinh. Luft 31 (1971) Nr. 6
- [6] Eschrich Die Probenahme bei Nassdampf- oder Staubmessungen  
Interner Bericht aus dem Kraftwerksanlagenbau 1973
- [7] Eschrich Versuche zur nicht-isokinetischen Probenahme -  
1996 im Hessischen Landesumweltamt Kassel durchgeführt
- [8] Kaletta Ermittlung von Verfahrenskenngrößen eines Messverfahrens zur Messung partikelförmiger Schadstoffe in Abgasen mit Hilfe eines neu entwickelten Staub-Meßsystems  
Eickhoff  
Hessische Landesanstalt für Umwelt, Außenstelle Kassel  
September 1996
- [9] Eschrich Dampfeuchtemesseinrichtung  
Mitteil. aus dem Kraftwerksanlagenbau der DDR 2/85
- [10] Eschrich Mess- und Probenahmeinrichtung  
Patent DD110351 erteilt am 29.04.81