

Versuch A3

Staubfiltration mit Tiefenfiltern

1. Einführung

Für die Abscheidung von Staubpartikeln aus Gasen besitzen mechanische Filter aufgrund ihrer breitgefächerten Anwendungsmöglichkeiten und guten Filtrationseigenschaften herausragende Bedeutung. Dabei sind zwei Grundtypen von Filtern zu unterscheiden: Tiefen- oder Speicherfilter und Oberflächenfilter.

Oberflächenfilter zeichnen sich dadurch aus, dass die Staubpartikel nahezu ausschließlich an der Oberfläche des Filters abgeschieden werden. Dort bilden sie eine Staubschicht, die die Filtrationsleistung weitestgehend bestimmt.

Im Gegensatz dazu lagert sich bei *Tiefenfiltern* der abgeschiedene Staub im Inneren der Filterstruktur ab. Die Filtrationseigenschaften werden in diesem Fall von der inneren Beschaffenheit der Filter bestimmt.

Die beiden Filtertypen bringen verschiedene Eigenschaften mit sich, die sie für unterschiedliche Anwendungen empfehlen. Die unten stehende Tabelle gibt einen groben Überblick über typische Materialeigenschaften, Betriebsbedingungen und Einsatzbereiche.

Filtertyp	Tiefenfilter	Oberflächenfilter
Porosität	90-99+ %	70-90 %
kontinuierlicher Betrieb / Abreinigung möglich?	Nein/nein	Ja/ja
Filtrationsgeschwindigkeit	1 cm/s bis 2 m/s (nach Verwendungszweck)	0,5 bis 5 cm/s
Staubgehalt im Rohgas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ bis wenige mg/m^3	bis über 100 g/m^3
Anwendungsfälle	Reinigung der Luft in Klima- und Belüftungsanlagen, Schwebstofffilter z. B. für Reinnräume, Schutz von elektrischen Anlagen	Gewinnung staubförmiger Produkte aus Trägergas, Emissionsminderung industrieller Anlagen (Kohlekraftwerke, Sprühtrockenanlagen, Zementwerke), Reinigung der Ansaugluft von Motoren bei hoher Staubbelastung (Straßenbau, Landwirtschaft)

2. Partikelabscheidung im Tiefenfilter

Tiefenfilter bestehen meist aus einem Gewirr synthetischer Fasern, Glasfasern oder auch Metallfasern. Die Durchmesser der Fasern betragen einige μm bis ca. 50 μm . Daneben finden Nanofasern mit Durchmessern von 0,05 μm bis 1 μm immer weitere Verbreitung. Sie werden stets im Verbund mit größeren Fasern, die für die Stabilität des Filters sorgen, eingesetzt.

Die Fasern nehmen nur wenige Prozent des Filtervolumens ein. Typische Abstände zwischen ihnen betragen 2 bis 10 Faserdurchmesser und sind in der Regel wesentlich größer als die abzuscheidenden Staubpartikel. Die Abscheidung von Partikeln in Tiefenfiltern erfolgt deshalb *nicht* durch den Siebeffekt. Maßgeblich für die Abscheidung sind stattdessen die Abscheidevorgänge an den einzelnen Fasern.

2.2 Gesamtabscheidegrad eines Tiefenfilters

Die wichtigste Größe zur Beschreibung der Abscheideleistung eines Filters ist der Gesamtabscheidegrad E . Man unterscheidet hierbei zwischen dem *anzahlbezogenen* Gesamtabscheidegrad E_0 und dem *massebezogenen* Gesamtabscheidegrad E_3 .

$$E_0 = \frac{\text{Anzahl aller abgeschiedener Partikel}}{\text{Anzahl aller aufgegebenener Partikel}}$$

$$E_3 = \frac{\text{Masse aller abgeschiedener Partikel}}{\text{Masse aller aufgegebenener Partikel}}$$

Diese zwei Größen können sich immens unterscheiden. Dies liegt an der Abhängigkeit der Masse von der 3. Potenz des Durchmessers ($M \sim x^3$). In der Praxis wird meist der massebezogene Gesamtabscheidegrad verwendet, da dieser durch Wägung (gravimetrisch) leicht zu bestimmen ist.

2.3 Trenngradkurve

Für manche Fragestellungen ist es wichtig zu wissen, wie gut sich Partikel einer bestimmten Partikelgröße aus dem Gasstrom abtrennen lassen. Hierfür werden so genannte Trenngradkurven $T(x)$ bestimmt. Diese geben den prozentualen Anteil der Partikel *der Größe* x an, welche im Filter abgeschieden werden.

$$T(x) = \frac{N_{\text{Abgeschieden}}(x)}{N_{\text{Aufgegeben}}(x)} = \frac{M_{\text{Abgeschieden}}(x)}{M_{\text{Aufgegeben}}(x)}$$

Für die Festlegung der Trenngradkurve ist es egal, ob man Massenverhältnisse oder Anzahlverhältnisse bestimmt, da beides den gleichen Wert liefert. Die Trenngradkurve eines Apparates ist bei gleichen Betriebsrandbedingungen unabhängig vom aufgegebenen Staub. Kennt man sowohl die Trenngradkurve als auch die Partikelgrößenverteilung $q_r(x)$ des Aufgabegutes, kann man den zu erwartenden Gesamtabscheidegrad berechnen:

$$E_r = \int_{x_{\text{Min}}}^{x_{\text{Max}}} T(x) \cdot q_r(x) dx$$

Hier muss man aufpassen, in welcher Form die Partikelgrößenverteilung gegeben ist. Ist dies eine Anzahldichteverteilung (sog. q_0 -Verteilung, „Menge“ = Anzahl) so bestimmt man den prozentualen Anteil der abgeschiedenen *Partikelanzahl*, E_0 . Betrachtet man hingegen Massedichteverteilungen $q_3(x)$ („Menge“ = Masse), so bestimmt man mit E_3 den Anteil der abgetrennten Staubmasse.

2.3 Klassische Filtertheorie: das Einzelfasermode

Der Trenngrad und der Gesamtabscheidegrad beschreiben die Abscheideleistung eines Filters auf der Ebene des gesamten Mediums. Mit Hilfe der klassischen Filtertheorie versucht man, Ergebnisse für das Gesamtmedium auf Basis der Abscheidung von Partikeln an einzelnen Fasern zu erklären. Ziel ist es, die Trenngradkurve eines Mediums zu berechnen.

$$T(x) = 1 - \exp(-f' \cdot \varphi(x))$$

Hierin ist f' ein Parameter, der rein von geometrischen Größen des Filtermediums abhängt: der Porosität, dem Faserdurchmesser und der Dicke des Mediums. $\varphi(x)$ ist der so genannte Einzelfaserabscheidegrad. Dieser gibt an, welcher Anteil der unmittelbar auf die Faser zuströmenden Partikel (im Querschnitt y der Faser, siehe Abbildung 1) an deren Oberfläche abgeschieden wird.

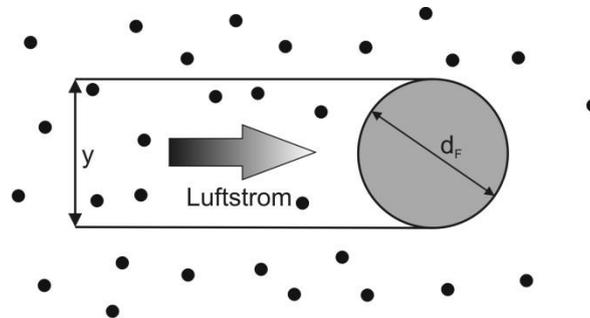


Abbildung 1: Anströmquerschnitt y einer Einzelfaser

Damit ein Partikel an einer Faser abgeschieden wird, muss es sowohl auf diese *aufreffen*, als auch an der Oberfläche der Faser *haften*. Deshalb kann der Einzelfaserabscheidegrad als Produkt der Auftreffwahrscheinlichkeit η und der Haftwahrscheinlichkeit h aufgefasst werden. So lassen sich die beiden weitestgehend unabhängigen Vorgänge Aufprallen und Haften getrennt voneinander betrachten.

$$\varphi(x) = \eta(x) \cdot h(x)$$

2.4 Auftreffmechanismen und Haftwahrscheinlichkeit

Es gibt drei Hauptmechanismen die zum Kontakt zwischen Partikel und Faser führen:

- die *Trägheitsabscheidung*, - die *Diffusionsabscheidung* - der *Sperreffekt*

In Spezialfällen von Bedeutung sind zudem:

- die *Elektrostatistische Abscheidung*
- die *Schwerkraftabscheidung* (nur bei sehr großen Partikeln)

Durch den hohen Faserabstand kann man sich ein Tiefenfilter modellhaft als eine Ansammlung voneinander unabhängiger (zylindrischer) Fasern vorstellen. Diese werden vom Gas und den darin enthaltenen Partikeln näherungsweise senkrecht zur Faserachse angeströmt. Dabei umfließt das Gas die Faser in den meisten praxisrelevanten Fällen laminar, das heißt schichtenartig (Abbildung 2). Die Stromlinien der Strömung verlaufen dabei nahezu tangential an der Oberfläche der Fasern entlang.

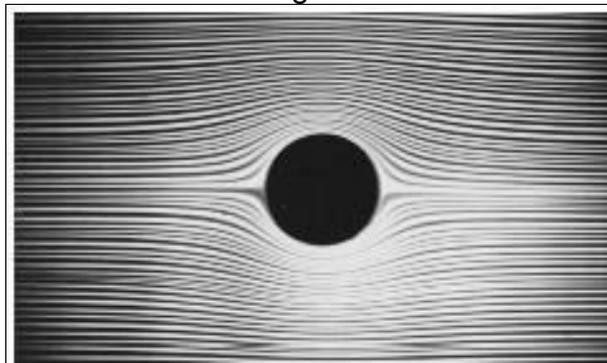


Abbildung 2: Stromlinien einer schleichenden Umströmung eines Zylinders

Damit ein Partikel abgeschieden werden kann, muss es zunächst mit der Oberfläche der Faser in Berührung kommen. Die nachfolgend aufgezählten Mechanismen sind dafür verantwortlich.

Trägheitsabscheidung

Aufgrund der Massenträgheit eines Partikels ist dieses bestrebt, seine Flugbahn beizubehalten statt der Stromlinie um die Faser herum zu folgen. Die Partikelrelaxationszeit τ ist ein Maß dafür, wie schnell ein Partikel auf eine Änderung im Strömungsfeld reagieren kann. Je kleiner sie ist, desto schneller verringert sich die Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Partikel und desto näher bleibt die Flugbahn des Partikels an der Stromlinie.

$$\tau = \frac{\rho_p \cdot x^2}{18\mu}$$

ρ_p : Partikeldichte

x : Partikeldurchmesser

μ : Dynamische Gasviskosität

Man erhält die für Trägheitsabscheidung entscheidende dimensionslose Kennzahl, die Stokeszahl St , durch Bezug der Partikelrelaxationszeit auf eine charakteristische Flugzeit $t_C = d_F/v_\infty$:

$$St = \frac{\tau}{t_C} = \frac{\rho_p \cdot x^2 \cdot v_\infty}{18 \cdot \mu \cdot d_F}$$

d_F : Faserdurchmesser

v_∞ : Anströmgeschwindigkeit

Die Auftreffwahrscheinlichkeit (fachsprachlich „Auftreffgrad“ genannt) steigt mit ansteigender Stokeszahl, weil die Partikeltrajektorien zunehmend von den Stromlinien abweichen.

Sperreffekt

Auch wenn Partikel den Stromlinien nahezu ideal folgen, also bei $\tau \rightarrow 0$, können sie in Kontakt mit der Faser kommen. Bedingung dafür ist, dass die das Partikel transportierende Stromlinie so nahe an der Faser verläuft, dass das Partikel die Faser berührt (Abstand der Stromlinie zur Faseroberfläche < Partikelradius). Entscheidend für die Sperreffekt-abscheidung ist damit zum einen, wie groß das Partikel ist. Die dimensionslose Kennzahl hierfür ist der so genannte Sperreffektparameter $R = x/d_F$. Zum anderen spielt eine Rolle, wie nahe die Stromlinien der Faseroberfläche kommen. Dies ist eine rein strömungstechnische Fragestellung, die sich durch Betrachtung der Reynoldszahl Re beurteilen lässt. Diese gibt das Verhältnis zwischen Trägheitskräften und Reibungskräften im Gas an.

$$Re = \frac{\rho_G d_F v_\infty}{\mu}$$

ρ_G : Gasdichte

Je höher die Reynoldszahl, desto geringer ist der Abstand der Stromlinie von der Faser und desto höher die Sperreffektabscheidung.

Diffusionsabscheidung

Kleine Partikel folgen aufgrund ihrer niedrigen Partikelrelaxationszeit annähernd trägheitslos den Stromlinien. Dieser gleichmäßigen, konvektionsgetriebenen Bewegung wird eine zufällige „Zitterbewegung“ überlagert (Partikeldiffusion, siehe Abbildung 3).

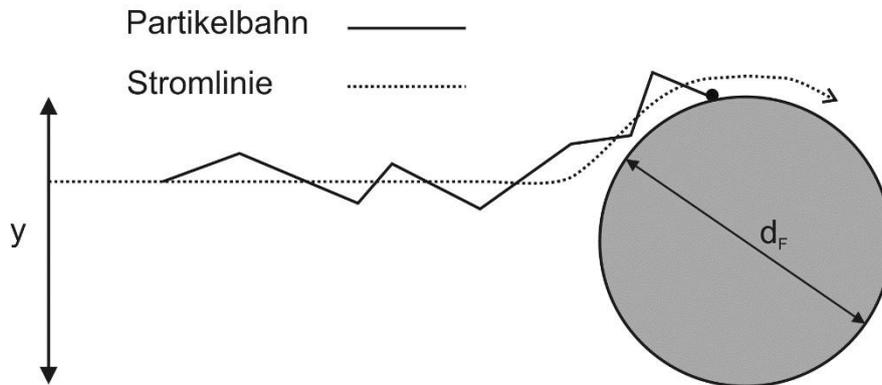


Abbildung 3: Zum Prinzip der Diffusionsabscheidung

Diese wird verursacht durch Stöße zwischen Partikeln und Gasmolekülen. Die Diffusionsbewegung sorgt dafür, dass Partikel mit der Faseroberfläche in Kontakt kommen können, obwohl die Stromlinie fernab der Faser verläuft. Eine merkliche Abweichung von der ursprünglichen Partikelbahn erfolgt nur dann, wenn die Masse des Partikels sehr klein ist. Für Partikel $x > 1 \mu\text{m}$ spielt die Diffusionsabscheidung deshalb keine Rolle.

Die charakteristische dimensionslose Kennzahl für die Diffusionsabscheidung ist die Pécletzahl

$$Pe = x \cdot v_{\infty} / D$$

D : Partikeldiffusionskoeffizient

Sie beschreibt das Verhältnis aus strömungsinduziertem Transport (konvektiv) und diffusionsinduziertem Transport. Je kleiner die Pécletzahl, desto höher ist der durch Diffusion verursachte Auftreffgrad.

Schwerkraftabscheidung

Die Schwerkraftabscheidung kann bei sehr großen Partikeln ($x \gg 10 \mu\text{m}$) und von oben nach unten durchströmten Filtern bedeutsam sein. Sie wird hier nicht weiter behandelt.

Elektrische Abscheidung

Falls die Fasern und/oder die Partikeln elektrische Ladungen tragen, können elektrische Feldkräfte die Abscheidung erheblich begünstigen. Geladene Filtermedien entladen sich jedoch mit zunehmender Partikelbeladung und in Kontakt mit Feuchtigkeit oder bei hohen Temperaturen. Ihre Filtrationsleistung kann daher mit der Zeit abnehmen.

Überlagerung aller Aufprallmechanismen

Alle oben aufgelisteten Auftreffmechanismen treten parallel auf. Ihr jeweiliger Einfluss ist unterschiedlich stark, je nachdem, wie groß die Partikel sind. Deshalb ist der Einzelfaserauftreffgrad für eine bestimmte Partikelgröße eine Funktion aller relevanten dimensionslosen Kennzahlen:

$$\eta(x) = f(St, Re, R, Pe)$$

Haftanteil

Wenn ein Partikel an die Faseroberfläche transportiert wurde, muss es dort haften bleiben um tatsächlich aus dem Gasstrom abgeschieden zu werden. Der Haftanteil ist hauptsächlich abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit der Partikel auf die Faser. Ist die kinetische Energie der Partikel beim Aufprall zu hoch, reichen die Haftenergie (Van-der-Waals-Kraft) und dispersive Energieverlust nicht aus, um das Partikel an der Oberfläche zum Stillstand zu bringen. Es prallt dann mit reduzierter Geschwindigkeit von der Faser ab und wird vom Gas weitertransportiert. Da die Aufprallgeschwindigkeit mit zunehmender Stokeszahl St ansteigt, sinkt die Haftwahrscheinlichkeit bei steigender Geschwindigkeit oder bei zunehmendem Partikeldurchmesser. Für $St \ll 0,5$ ist die Aufprallgeschwindigkeit näherungsweise 0. Dann beträgt die Haftwahrscheinlichkeit 100%.

Betrachtet man nun alle Auftreff- und Haftmechanismen gleichzeitig, so ergibt sich ein charakteristischer Verlauf für den Einzelfaserabscheidegrad (Abbildung 4). Sehr kleine Partikel unterliegen starker Diffusionsabscheidung. Je größer die Partikel werden, desto weniger Einfluss hat die Diffusion auf ihre Bewegung, sodass der Auftreffgrad sinkt. Im Minimum, das üblicherweise zwischen $0,2 \mu\text{m}$ und $0,6 \mu\text{m}$ liegt, werden Partikel nur durch den Sperreffekt abgeschieden. Durch einsetzende Trägheitsabscheidung steigt der Auftreffgrad wieder an. Allerdings setzt parallel zur Trägheitsabscheidung auch das Partikelabprallen ein, sodass sich zwar der Auftreffgrad η stark erhöht, der Einzelfaserabscheidegrad φ aber trotzdem sinkt ($h(x) \rightarrow 0$).

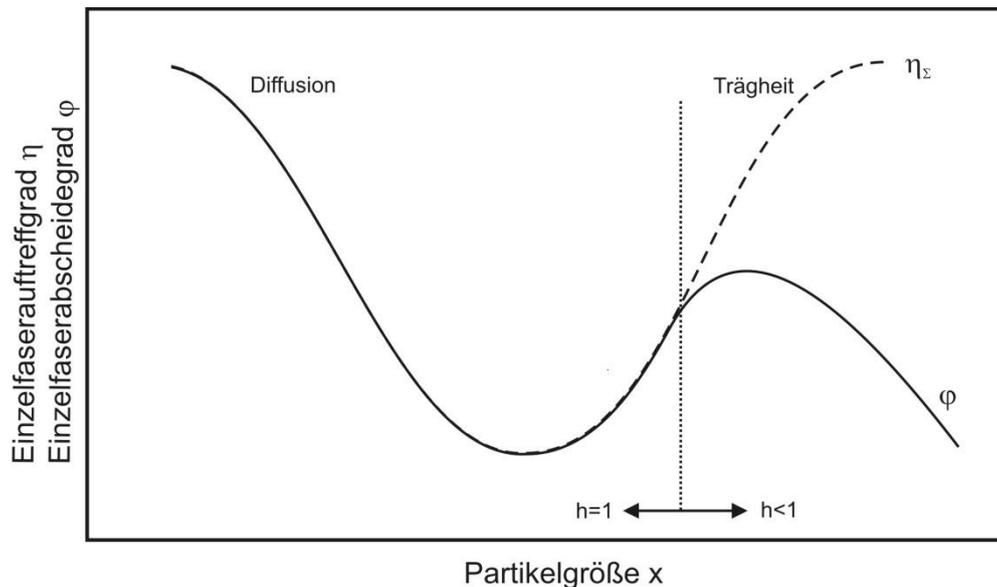


Abbildung 4: Einzelsfaser-Auftreffgrad und -Abscheidegrad in Abhängigkeit von der Partikelgröße

Druckverlust eines Filters

Bei der Durchströmung eines Filtermediums treten Reibungskräfte auf, die der Bewegung des Gases einen Widerstand entgegensetzen. Dies sind zum einen Reibungskräfte innerhalb des Gases, zum anderen wird das Gas an der Oberfläche von Fasern und abgeschiedenen Partikeln abgebremst. Den Energieverlust pro Volumeneinheit des transportierten Gases bezeichnet man als Druckverlust Δp . Es muss Pumpleistung aufgebracht werden, um Gas durch das Filter zu befördern. Die nötige Förderleistung beträgt dabei

$$P = \dot{V} \cdot \Delta p$$

\dot{V} : *Gasvolumenstrom*

Der Druckverlust ist meist proportional zur Anströmgeschwindigkeit und zum Durchströmungswiderstand. Werden Partikel in das Filter eingelagert, so erhöht sich der Widerstand. Das liegt an der Erhöhung der Reibungskräfte durch den Anstieg der überströmten Gesamtoberfläche im Medium. Bei sehr hoher Beladung kommt ein weiterer Effekt hinzu. Partikel verschließen die Porenräume des Mediums und verursachen dadurch einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit. Dies erhöht die Energieverluste zusätzlich.

Der Druckverlust steigt also bei zunehmender Staubbiladung. Um den Volumenstrom aufrecht zu erhalten, wird immer mehr Pumpleistung benötigt. In der Praxis sind die Energiekosten der entscheidende Faktor beim Betrieb von Filteranlagen. Deshalb werden Filter ausgetauscht, wenn ihr Druckverlust einen Grenzwert überschreitet, der an der Wirtschaftlichkeit des Betriebes orientiert ist.

3. Aufgabenstellung

Bestimmen Sie für den vorliegenden Staub bei 3 verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten:

1. den Gesamtabseidegrad durch Wägung
2. den Verlauf des Druckverlusts über der Zeit und der Beladung

Genauere Angaben zu den Staubeigenschaften und zur Einstellung der Anlage erhalten Sie vor Ort von ihrem Betreuer.

Versuchsaufbau

In Abbildung 5 ist die Versuchsanlage dargestellt. Sie besteht aus folgenden Komponenten:

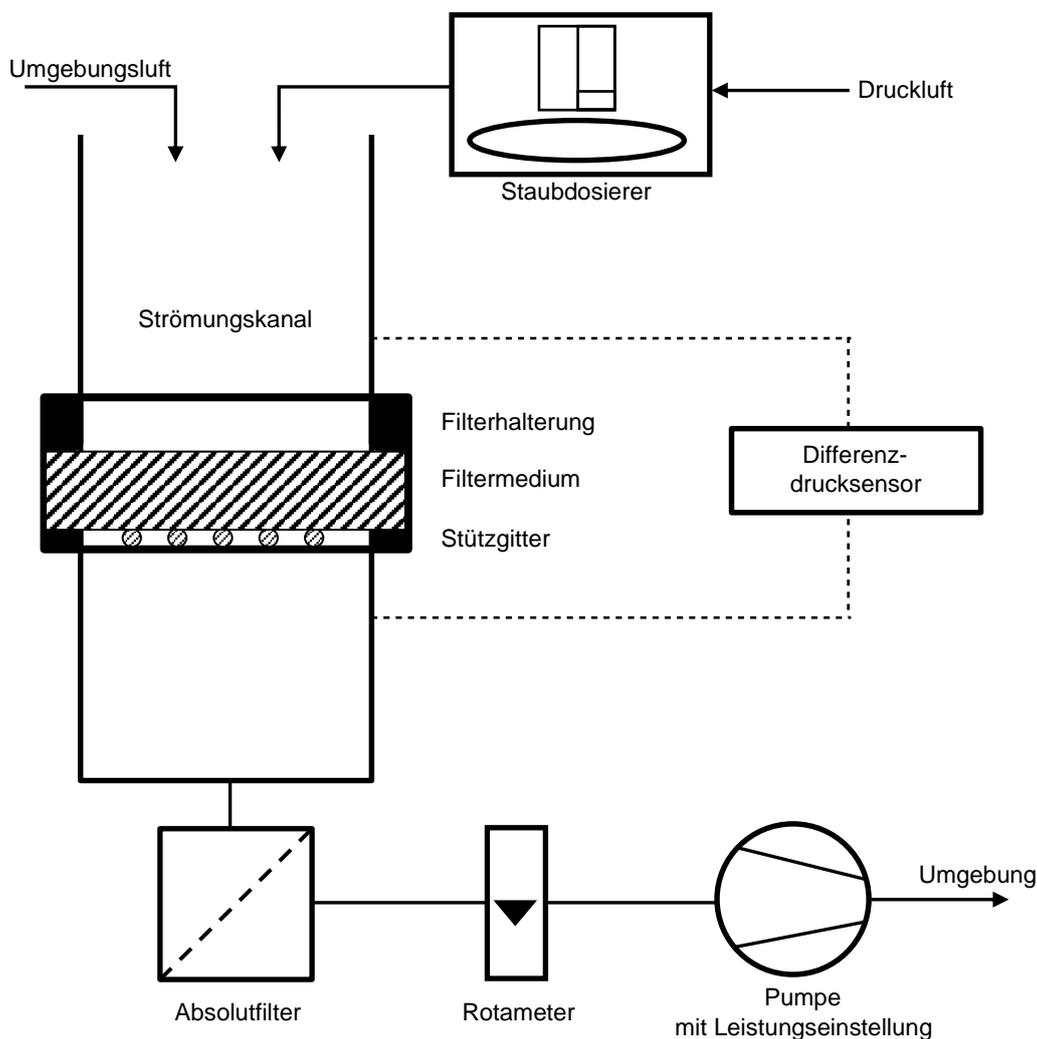


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Versuchsanlage

Staubdosierung

Zur Dispergierung des Staubes wird ein Ringdosierer eingesetzt. Dieser hat einen Vorratsbehälter, in den für den Versuch eine ausreichende Menge Staub eingefüllt wird. Aus dem Vorratsbehälter wird eine kleine Menge des Staubes mit einer Förderschnecke auf einen rotierenden Ring befördert. Über diesem ist eine Dispergierdüse angebracht, die die Partikel vom Ring absaugt. Der angesaugte Staub verteilt sich dabei

gleichmäßig im Dispergierluftstrom, welcher über einen Vordruck fest eingestellt wird. Der staubbeladene Luftstrom wird abschließend mit Umgebungsluft vermischt und durch den Strömungskanal zum Filter geleitet.

Filterhalterung mit Filter

Im Strömungskanal ist ein zylindrischer Filterhalter eingebaut, der ein Filtermedium in Form einer ebenen Ronde aufnimmt. Ein Stützgitter hinter dem Filtermedium fängt dabei die durch den Druckverlust des Filters entstehende Kraft auf. Der freie Anströmquerschnitt, der mit Staub beladen wird, hat einen Durchmesser von 50 mm.

Druckaufnehmer

Am Strömungsrohr befinden sich vor und hinter dem Filterhalter Messstellen, über welche die Differenz des statischen Druckes aufgenommen wird. Ein Messgerät zeigt die Druckdifferenz digital in der Einheit Pascal an.

Volumenstrommessung/Rotameter

An einem großen Rotameter kann der Gesamtvolumenstrom durch das Strömungsrohr abgelesen werden. Die Filtrationsgeschwindigkeit, mit der das Filter angeströmt wird, ergibt sich aus dem Volumenstrom und dem freien Anströmquerschnitt des Filters.

Pumpe

Die Saugpumpe sorgt für den Luftstrom durch die Messapparatur. Ihre Leistung lässt sich über ein Potentiometer einstellen. Um die Pumpe und das Rotameter zu schützen und die nicht abgeschiedene Partikelmenge zu erfassen, wird der Luftstrom, bevor er eingesaugt wird, noch durch ein Absolutfilter geleitet. So werden Partikeln, die im Testfilter nicht abgeschieden werden, zurückgehalten.

Durchführung

- Staub in den Staubdosierer einfüllen bzw. den Staubfüllstand kontrollieren (wird vom Versuchsbetreuer durchgeführt)
- unbestaubtes Filtermedium auswiegen (samt Aluschale mit Filterhalterung)
- Absolutfilter (schwarz) auswiegen
- Anlage grob mit Pinsel reinigen
- Filtermedium in die Anlage einbauen
- Differenzdrucksensor anschließen
- benötigten Volumenstrom einstellen
- Anfangsdruckverlust protokollieren
- Staubzugabe aktivieren
- Zeitnahme starten
- Druckverlust über das Filtermedium protokollieren (pro Minute)
- **Wichtig:** Volumenstrom durch Strömungskanal nachregeln (konstant halten, siehe Rotameter)
- Versuch nach 10 Minuten beenden (**Wichtig:** bitte Abschaltreihenfolge beachten: erst Ringdosierer, dann Kanalluft/Pumpe)
- Testfilter ausbauen und auswiegen (Aluschale mit Filterhalterung)
- Absolutfilter ausbauen und auswiegen

- Wiederholen Sie den Versuch für jede Anströmgeschwindigkeit zweimal. Bilden Sie aus den beiden Versuchen für die weitere Auswertung Mittelwerte

Tipp: Der beladene Filter sollte bei der Entnahme sehr vorsichtig gehandhabt werden, damit kein Staub verloren geht. Zur Sicherheit ist die Aluschale, in der es gewogen wird, bei der Entnahme unter die Halterung zu bringen, um herabrieselnden Staub aufzufangen. (Wichtig: Tara-Wiegung vor Versuch machen) Vor und nach dem Einlegen einer neuen Filterprobe sollten der Filterhalter und das Strömungsrohr bei laufender Pumpe ober- und unterhalb mit einem Pinsel von Reststaub befreit werden.

Auswertung

Die Versuchsergebnisse sind sowohl als Tabelle als auch in ordentlicher Diagrammform anzugeben. Zeichnen Sie jeweils ein Diagramm für den **Druckverlust** als Funktion der **Bestaubungszeit** und ein Diagramm für den **Druckverlust** über der **Massenbeladung** des Filtermediums. Tragen Sie in die Diagramme die Ergebnisse aller untersuchten Geschwindigkeiten ein. Zur Berechnung der abgeschiedenen Masse zu jedem Zeitpunkt interpolieren Sie linear zwischen Anfangsbeladung ($m = m(t_0) = 0$) und Endbeladung ($m = m(t_{\text{End}})$). Was hat diese Interpolation für einen Hintergrund und wie entwickelt sich die abgeschiedene Masse über die Gesamtversuchsdauer? (bspw. Unterschied zwischen Δm zw. $t=3 \text{ min}$ u. 4 min zu Δm zw. $t=9 \text{ min}$ und $t=10 \text{ min}$)

Begründen Sie den Verlauf des Druckverlusts über der Beladung und die verschiedenen erhaltenen Gesamtabscheidegrade auf Basis Ihrer Kenntnisse über die Abscheidemechanismen, die Betriebsbedingungen und die Staubeigenschaften. Welche Mechanismen spielen eine Rolle in ihren Versuchen? Wo liegen mögliche Fehlerquellen bei der Messung und Auswertung?

Einstellungen Versuchsparameter:

Einstellung der Strömungsgeschwindigkeit:

Anströmgeschwindigkeit bei ggb. Innenquerschnitt	0,4 m/s	0,8 m/s	1,2 m/s
Volumenstrom in m^3/h			
Rotameteereinstellung (Volumenstrommesser)			
Höhe Schwebekörper in mm			

Innenquerschnitt Filterrohr: 50 mm

Wichtig: Berechnen Sie zunächst den einzustellenden Volumenstrom (Höhe des Schwebekörpers) für die drei Anströmgeschwindigkeiten.