

MODERNE ENTSTAUBUNGSTECHNIK MIT OBERFLÄCHENFILTERN

Dieser Artikel wurde gemeinschaftlich von den Firmen MikroPul GmbH & Co. KG, einem der führenden Unternehmen im Bereich von Produkten für die Luftreinhaltung und Produktrückgewinnung, und W. L. Gore & Associates GmbH, renommierter Hersteller von Filterelementen und Anbieter von Systemlösungen, erstellt. Wir möchten damit Ihnen, unseren Kunden, einen informativen Service bieten und Sie bei der Wahl der richtigen Filteranlage unterstützen. Unsere Anwendungsspezialisten freuen sich, Ihnen bei Problemen oder Rückfragen persönlich zu helfen.

1 Einleitung

Die Staubabscheidung mit Gewebe- bzw. Schlauchfiltern hat seit mehreren Jahrzehnten ihren festen Platz in der industriellen Entstaubung. Diese Technik stellt nach den Zyklonen einen weiteren Entwicklungsschritt zur effizienteren Gasreinigung dar.

Die immer weiter steigenden Anforderungen an die Gasreinigung werden hauptsächlich ausgelöst durch:

1. Niedrigere Grenzwerte zur Reinhaltung der Luft (TA – Luft)
2. Klassierung der Emissionen nach bestimmten Partikelgrößen (PM10, PM5 usw.)
3. Feiner werdende Stäube, bedingt durch neue Produktionsprozesse.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über einige Grenzwerte für verschiedene Schadstoffe laut TA-Luft. Für diese Anforderungen stehen heute eine Vielzahl an Filtermedien aus polymeren, metallischen oder keramischen Werkstoffen zur Verfügung. Verarbeitet zu Fasern in Form von Gewebe, Nadelfilz oder Vlies können diese Materialien mit bestimmten Oberflächenbehandlungen ausgerüstet werden und damit nahezu jede Anwendung bedienen. Neben klassischen Anwendungsgebieten im Umweltschutz werden solche Filter auch in Produktionsprozessen zur Produktrückgewinnung eingesetzt. Ein besonders in den letzten Jahren fokussiertes Anwendungsgebiet ist die Heißgasfiltration mit Betriebstemperaturen oberhalb 270°C. Eine Anwendung für diese Technik ist z.B. die pyrogene Partikelproduktion.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Komponente	Einheit	Werte TA Luft 1986	Werte TA Luft 2000
Schwebstaub / PM 10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kalenderjahr)	150	40
Staubniederschlag	$\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ (Gramm pro m^2 und Tag)	0,35	0,35
Arsen	$\mu\text{g} (\text{m}^2\text{d})$		4
Blei	$\mu\text{g} (\text{m}^2\text{d})$	250	100
Blei	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kalenderjahr)	2	0,5
Cadmium	$\mu\text{g} (\text{m}^2\text{d})$	5	2
Quecksilber	$\mu\text{g} (\text{m}^2\text{d})$		1

Tab. 1 Grenzwerte nach TA Luft

Aber nicht nur eine hervorragende Abscheideleistung zeichnet einen guten Schlauchfilter aus, sondern auch der zuverlässige Betrieb bei gleichbleibendem Druckverlust unter Einhaltung der geforderten Reingaswerte. Damit spielt auch die Regenerierbarkeit der Filterelemente beim Bau des Filters und der Auswahl des Filtermediums eine ganz entscheidende Rolle. So ist z.B. das Filtermedium entsprechend der Adhäsionskräfte des Filterstaubes so zu wählen, dass einerseits der Filterkuchen gut von der Elementoberfläche abgelöst werden kann, andererseits aber die Bildung eines hinreichend dicken Filterkuchens erlaubt, wo dies erforderlich ist (Chemisorptionsfilter, Tiefenfiltermedien).

Der folgende Artikel soll einen Überblick über den derzeitigen Stand der Schlauchfiltertechnik geben in Bezug auf Anwendungsgebiete, verfügbare Filtermedien und damit verbundene Abscheideleistungen, sowie besondere Merkmale der Elementabreinigung.

2 Grundlagen der Staubfiltration

2.1 Filtrationsmechanismen

Die Filtrationsmechanismen hängen unter anderem von unterschiedlichen Zustandsgrößen der staubhaltigen Gase ab. In den meisten Anwendungsfällen sind diese Gase Luft. Als Maßstab für die Abscheidung in Bezug auf diese Mechanismen soll der Auftreffgrad eines Partikels auf der Faser- bzw. Kornoberfläche des Filtermediums gelten.

2.1.1 Dichte

Die Gasdichte beeinflusst den Differenzdruck, welcher bei höheren Reynolds-Zahlen bzw. höheren Durchströmungsgeschwindigkeiten $> 0,5$ m/s proportional zur Gasdichte ($\Delta p \sim \rho$) ist. Auftriebskräfte zwischen Feststoff und Gasphase spielen bei der Staubabscheidung keine Rolle. Die Gasdichte verhält sich proportional zum Druck und umgekehrt proportional zur Temperatur ($\rho \sim P/T$).

2.1.2 Dynamische Viskosität

Der Differenzdruck über das Filter unter dem Einfluss viskoser Kräfte ist im Bereich niedriger Re-Zahlen proportional zur dynamischen Viskosität ($\Delta p \sim \mu v$). Ebenso hat die dynamische Viskosität des Gases Einfluss auf den Partikeltransport durch die wirkenden Schleppkräfte. Dabei wird nicht nur der Staubtransport zum und vom Filtermedium beeinflusst, sondern auch der Filterkuchenaufbau bzw. dessen Porosität. Mit zunehmender Gastemperatur nimmt die dynamische Viskosität gemäss $\mu \sim T^{0,75}$ ebenfalls zu. Es besteht eine nur geringe Druckabhängigkeit, so dass diese bis zu einem Systemdruck von 20 bar vernachlässigt werden kann.

2.1.3 Freie Weglänge

Als freie Weglänge wird der Abstand zwischen den Molekülen des Trägergases bezeichnet. Diese nimmt mit der Temperatur zu und bei steigendem Druck ab. Ist die Partikelgröße in der gleichen Größenordnung wie die freie Weglänge, kann das Trägergas nicht länger als Kontinuum angesehen werden. Die Abnahme der Schleppkräfte auf das Partikel durch den fehlenden Kontakt der Partikeloberfläche zu den Gasmolekülen wird durch den Cunningham-Faktor beschrieben. Dies spielt besonders für den Transport und damit für die Abscheidung extrem feiner Partikel im Nanometerbereich eine Rolle.

2.1.4 Diffusion

Bei Partikelgrößen $< 0,5$ μm und geringen Filtrationsgeschwindigkeiten $< 0,1$ m/s dominiert der diffusive Partikeltransport. Es kann eine Auftreffwahrscheinlichkeit $P(\mathbf{x})$ eines Partikels auf einer Faser oder einem Korn des eingesetzten Filtermediums definiert werden. Ein solcher Auftreffgrad ist eine Funktion der Struktur des Filtermediums $g(\epsilon)$ mit der Porosität ϵ , der Filtrationsgeschwindigkeit v , der Partikelgröße x und dem Diffusionskoeffizienten D des Partikels. Je nach eingesetzter Struktur des Filtermaterials (Fasern oder Körner) mit der charakteristischen Größe d_k hängt dieser Auftreffgrad auch vom Verhältnis effektiver Filteroberfläche zu Faser- bzw. Kornoberfläche ab:

$$P(x) = \exp[-z(\varepsilon) \cdot g(\varepsilon) \cdot (D/vx)^{2/3}]$$

Mit $z \sim (1-\varepsilon)/\varepsilon$ und $D \sim T/\mu, d_k$

Damit wird deutlich, dass im Bereich des diffusiven Transportes mit zunehmender Temperatur der Auftreffgrad $P(x)$ abnimmt, jedoch größer wird bei zunehmender Partikelgröße und Filtrationsgeschwindigkeit. Je größer der Auftreffgrad, um so besser die Abscheidung.

2.1.5 Trägheitskräfte

Auf jedes im Gasstrom getragene Partikel wirkt eine Trägheitskraft bei der plötzlichen Ablenkung der Strömung. Dies geschieht z.B. bei der Umströmung einer Faser aus dem Filtermedium. Große Partikel mit einer relativ hohen Masse können der Umlenkung nicht so schnell folgen und treffen somit auf die Faseroberfläche. Kleine Partikel mit entsprechend geringerer Masse können der Strömung besser folgen und passieren die Faser. Es gibt keinen einfachen, formellen Zusammenhang zwischen der Abscheideleistung und der Trägheitskraft. Jedoch gilt, je höher die Filtrationsgeschwindigkeit und der Partikeldurchmesser, um so besser die Abscheidung an den Fasern. Im allgemeinen spielen Trägheitskräfte für die Partikelabscheidung nur bei Partikeln $> 1\mu\text{m}$ eine Rolle. Ein Effekt, welcher auf diesem Mechanismus beruht, ist der Sperreffekt: Partikelgrößen, die deutlich kleiner als der mittlere Faserabstand sind, werden dennoch vom Filtermedium aufgehalten, da sie auf Grund der Trägheit nicht allen Fasern ausweichen können.

2.1.6 Elektrostatische Kräfte

Elektrostatische Kräfte können bei der Staubabscheidung helfen, das Abscheideminimum zwischen diffusions- und trägheitskontrollierter Abscheidung zu kompensieren. (Partikelgröße zwischen 0,1 und 2 μm). Mitunter tragen elektrostatische Kräfte zur Verstärkung der Partikelkohäsion bei. Die Bildung von größeren Sekundäragglomeraten (sofern diese stabil sind) kann den Abscheidegrad erhöhen. Jedoch besteht auch die Gefahr, dass verstärkte Adhäsion die Abreinigung eines Filterelementes erschwert. Eine eindeutige Temperaturabhängigkeit elektrostatischer Kräfte kann nicht angegeben werden. Das Gleiche gilt auch für die Abhängigkeit vom Druck, welche im Bereich technischer Anwendungen vernachlässigbar ist.

Alle beschriebenen Mechanismen und Einflussgrößen wirken sich auf die Abscheideleistung eines Staubfilters aus und hängen mehr oder weniger stark von Betriebsparametern wie Temperatur und Druck ab. Ziel bei kontinuierlich arbeitenden Schlauchfiltern ist es, eine möglichst gute Oberflächenabscheidung zu erreichen, um den sich aufbauenden Filterkuchen leicht wieder abwerfen zu können. Daneben gibt es aber auch Speicherfilter, welche sich gezielt den Sperreffekt zu Nutze machen und selbst für Abscheidung von Partikelgrößen im nm-Bereich eingesetzt werden. Das Diagramm in *Abbildung 1* zeigt im Vergleich unterschiedliche Abscheiderkonzepte und die damit erreichbaren Abscheidegrade.

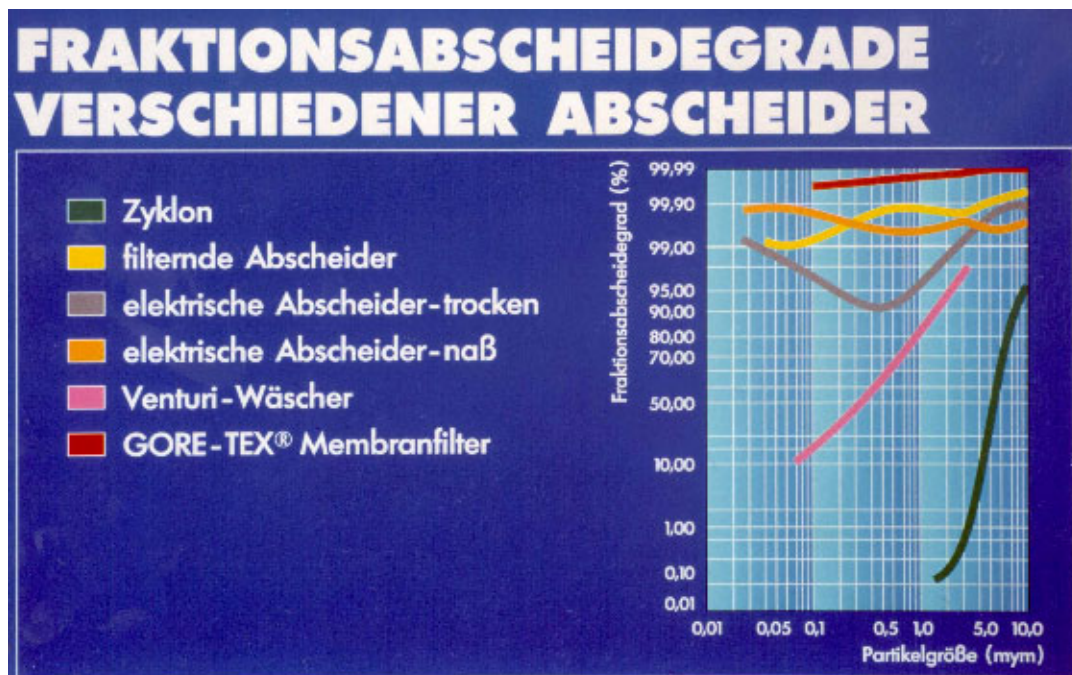


Abb. 1 Abscheidegrade unterschiedlicher Staubabscheider

2.1.7 Der Druckverlust

Der Druckverlust in einem Filter wird, neben den aerodynamischen Verlusten des Filterapparates selbst, hauptsächlich durch das Filtermedium und den während des Betriebes aufgebauten Staubkuchen erzeugt. Grundsätzlich kann der Druckverlust in porösen Strukturen in zwei Bereiche aufgeteilt werden:

$\Delta p \sim \mu v$ für kleine Re-Zahlen

$\Delta p \sim \rho v^2$ für große Re-Zahlen

In Schlauchfiltern erfolgt die Durchströmung hauptsächlich im Bereich kleiner Re-Zahlen. Der Druckverlust über das bestaubte Filtermedium setzt sich aus dem Druckverlust des Mediums Δp_F und dem Filterkuchen Δp_S zusammen:

$$\Delta p = \Delta p_F + \Delta p_S = H_F/B_F \cdot \mu v + H_S/B_S \cdot \mu v$$

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Dabei sind die Parameter B_F und B_S die jeweiligen Durchlässigkeiten von Filtermedium und Staubkuchen. Die Parameter H stehen für die entsprechenden Dicken des Filtermediums bzw. Staubkuchens. Die Dicke des Staubkuchens H_S hängt von der Flächenmasse W [g/m²], der Partikeldichte ρ_s und der Porosität ε des Filterkuchens ab. Die Faktoren H_F/B_F und H_S/B_S können auch als spezifische Filtrationswiderstände aufgefasst werden:

$$H_F/B_F = K_1$$

$$H_S/B_S = K_2 W$$

Beide Widerstände sind über die Betriebsdauer des Filters nicht konstant. K_1 hängt von der Struktur des Filtermediums und der Menge an Staub ab, welche sich während des Betriebs im Filtermedium ansammelt. Sehr feine Partikel und hohe Filtrationsgeschwindigkeiten können dazu beitragen, dass das Filtermedium verstopft wird.

Der Widerstand des Staubkuchens hängt sehr stark von der Partikelgrößenverteilung des Staubes ab, aber auch von der sich bildenden Filterkuchenstruktur. Diese wiederum wird bestimmt durch die Betriebsbedingungen wie Temperatur und Filtrationsgeschwindigkeit.

Die Einzeldruckverluste für Filtermedium und Kuchen beinhalten die dynamische Viskosität und müssten daher mit steigender Temperatur gemäß $T^{-0,75}$ zunehmen. Versuche haben jedoch gezeigt, dass diese Abhängigkeit weitaus schwächer ist. Dies wird auf die sich stark ändernde Kuchenstruktur zurückgeführt. Bedingt durch stärkere Kohäsionskräfte bildet sich ein weitaus poröserer Filterkuchen.

Das Diagramm in *Abbildung 2* zeigt einen typischen Druckverlustverlauf eines Schlauchfilters. Dabei stellt Δp_{\max} die obere Druckgrenze dar, bei der das Filter abgereinigt wird. Der Druckverlust unmittelbar nach einer solchen Abreinigung Δp_R ist der Restdruckverlust. Das Filter sollte so betrieben werden, dass der Restdruckverlust über lange Zeit hin konstant bleibt.

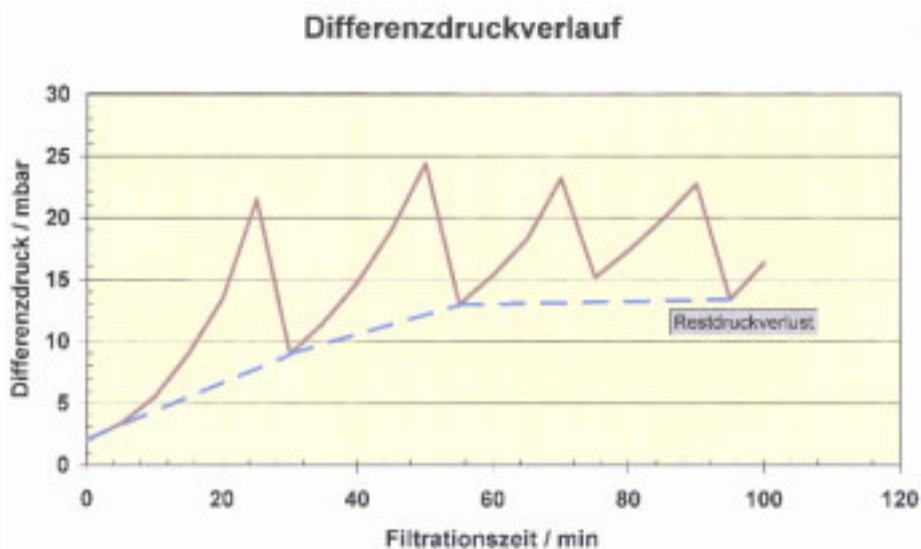


Abb. 2 Druckverlustverlauf eines Schlauchfilters

Das Diagramm in *Abbildung 3* zeigt die dazu passende Emissionskurve. Es wird deutlich, dass eine geringe Abreinigungshäufigkeit auch geringe Staubemissionen bedeutet. Über 80% der Emissionen eines modernen Schlauchfilters werden durch die Regeneration der Filterschläuche verursacht.

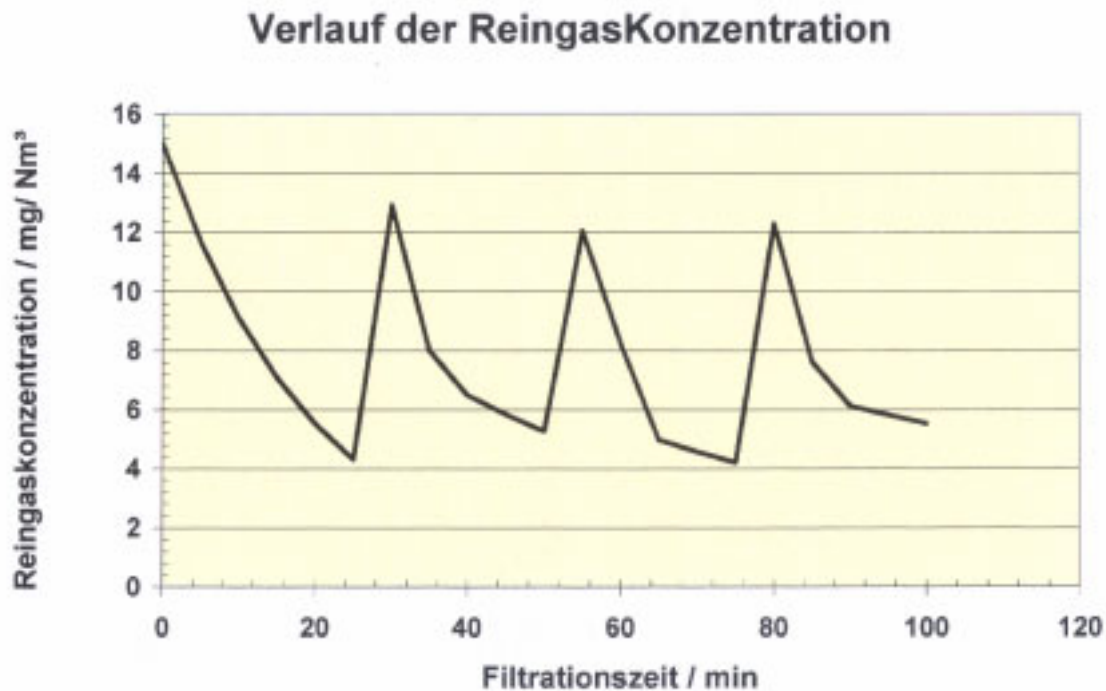


Abb. 3 Emissionskurve

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die physikalischen Eigenschaften und deren Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Abscheideverhalten eines Schlauchfilters hat. Hinzu kommen die Eigenschaften des Staubes, welcher durch die Kohäsion und Adhäsion ganz entscheidend das Betriebsverhalten bestimmt. Die aufgezählten Einflussfaktoren lassen sich zwar, isoliert betrachtet, in ihrer Auswirkung beschreiben, jedoch spielen diese im realen Filtrationsprozess alle gleichzeitig eine Rolle. Damit basiert die Auswahl der Filtermedien und relevanten Betriebsparameter wie Filtrationsgeschwindigkeit und Abreinigungsdruck auf einem entsprechend großen Erfahrungshorizont.

3 Bauarten von Gewebefiltern

Für die Staubabscheidung stehen unterschiedliche Verfahren und Apparate zur Verfügung. Jedes dieser Verfahren zeichnet sich durch seine spezifische Abscheideleistung aus und ist daher zur Abscheidung einer bestimmten Partikelgrößenverteilung geeignet. Das Diagramm in *Abbildung 1* stellt einige der gängigsten Abscheideverfahren bezüglich des erreichbaren Abscheidegrades einander gegenüber.

Im Weiteren soll an dieser Stelle die Technik filternder, regenerierbarer Staubabscheider erläutert werden.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Grundsätzlich teilt sich ein Filter in zwei Kammern auf: die Reingaskammer und die Rohgaskammer. Beide Kammern werden durch die Kopfplatte staubdicht getrennt, auf der die gesamte Filterfläche in Form von Filterschläuchen untergebracht ist. Unterhalb der Rohgaskammer ist der sogenannte Staubtrichter angebracht, in dem sich der von den Filterelementen abgeworfene Staub sammelt und von hier ausgetragen werden kann. *Abbildung 4* zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Filters.

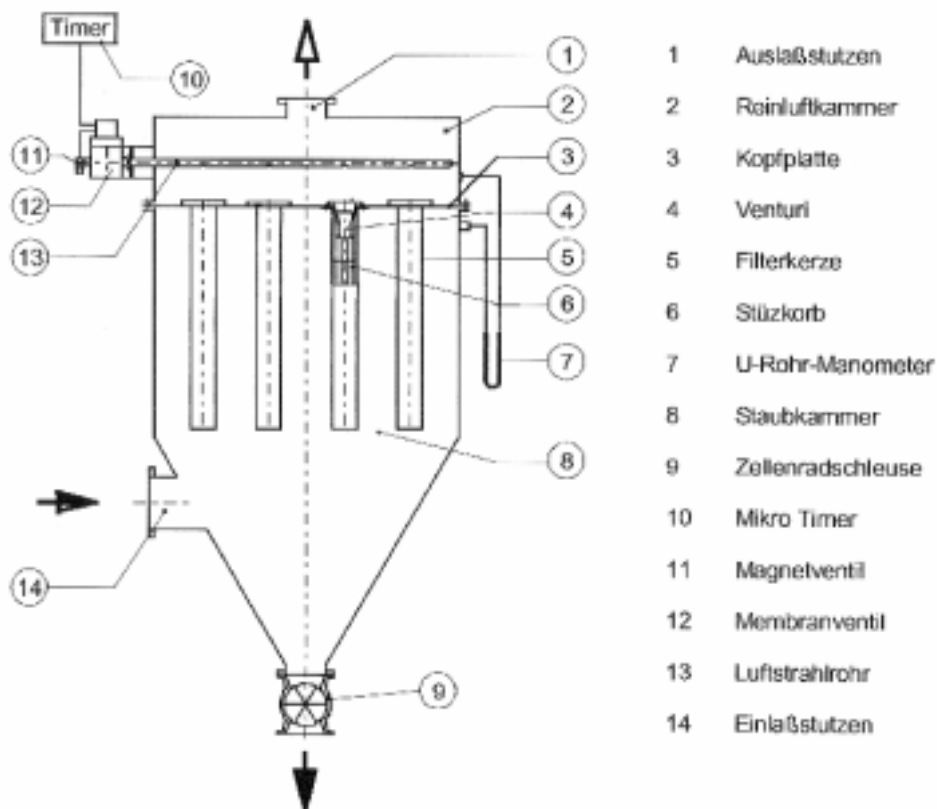


Abb. 4 Aufbau eines Schlauchfilters

3.1 Die Elementbefestigung

Die Filterelemente werden mit einer geeigneten Befestigungstechnik in der Kopfplatte verankert. Üblich ist dabei heutzutage eine Befestigung, die den Schlauch- bzw. Elementwechsel von der Reingasseite her erlaubt. Zwei Befestigungsarten haben sich bei Schlauchfiltern etabliert:

- ◆ Snapping-Technik
- ◆ Bajonettring-Verschluss (MikroPul-Technik)

Wichtig für alle Arten der Elementbefestigung ist, dass die Filterschläuche staubdicht gegen die Kopfplatte montiert werden.

3.2 Die Gasströmung

Das Gas tritt in die Rohgaskammer ein und durchströmt die meist zylindrischen Filterelemente von außen nach innen. Dabei sammelt sich der Staub auf der Außenseite der Filterelemente an. Damit diese Staubanlagerung möglichst gleichmäßig auf allen Elementen des Filters erfolgt, ist eine homogene Strömungsverteilung in der Rohgaskammer sehr wichtig. MikroPul hat zu diesem Zweck einige computergestützte Zweiphasen-Simulationen erstellt, auf Grund derer spezielle Einlassgeometrien und „Strömungsgleichrichter“ entwickelt wurden.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft einen solchen Gleichrichter, der auch nachträglich in Filter mit trichterseitigem Rohgaseintritt montiert werden kann. Der nach oben gerichtete Gasstrom wird dabei gleichmäßig auf die Trichter-Querschnittsfläche verteilt und verbessert damit deutlich die Belastung der Filterelemente und die Staubsedimentation. Die Strömungsverhältnisse in der Rohgaskammer sind so einzustellen, dass der abgereinigte Staub von den Filterelementen möglichst sicher in den Staubtrichter sedimentieren kann. Nur so wird gewährleistet, dass ein gleichbleibendes Differenzdruck-Niveau während des Betriebes erreicht wird.



Abb. 5 Strömungsgleichrichter

3.3 Die Reingaskammer

Über die Reingaskammer des Filters verlässt das entstaubte Gas das Schlauchfilter. Die Reingaskammer kann je nach Anforderung in niedriger Bauform mit entsprechenden Dachtüren oder in hoher Bauform mit seitlichen Zugangstüren ausgeführt werden. Das Öffnen der Reingaskammer ermöglicht den Zugang zu den Filterelementen und dem inneren Abreinigungssystem (Blasrohre). Diese Blasrohre decken mehrere Filterelemente in einer Reihe ab und versorgen diese mit Druckluft für die Abreinigung. Der Aufbau eines solchen Abreinigungssystems wird im weiteren Verlauf noch ausführlicher dargestellt.

3.4 Abreinigung

Gewebefilteranlagen werden üblicherweise nach der Art ihrer Abreinigung klassifiziert. Als Abreinigungsmechanismen kommen grundsätzlich Umkehrung der Gasströmung, mechanische Bewegung des Filtermediums, Impulsübertragung auf den Filterkuchen und Kombinationen aus diesen Mechanismen in Frage. Daraus haben sich, etwa in dieser historischen Reihenfolge, folgende Gewebefiltertypen entwickelt.

Klopf- oder Rüttelfilter: Die Filterschläuche werden im Filtrationsbetrieb von innen nach außen durchströmt. Zur Abreinigung werden sie z.B. durch Excenter-Rüttelwerke in Schwingung versetzt, wobei sich der Filterkuchen vom Filtergewebe löst und nach unten fällt. Die Filterschläuche werden hierbei stark mechanisch beansprucht und erreichen meist Standzeiten von nur bis zu 5, selten auch bis zu 7 Jahren. Die eingetragene Abreinigungsenergie ist relativ gering und die Abreinigung nur im abgeschalteten Filtrationsbetrieb möglich ("off-line-Abreinigung"). Als Filtermedien werden leichte, offenporige Filtergewebe verwendet. Die Abreinigung wird in der Regel durch einen leichten Spülluft-Gasstrom unterstützt. Diese Technologie wird kaum noch angewandt; allerdings finden sich noch zahlreiche Altanlagen in Betrieb, die durch Optimierung ihrer Betriebsweise (z.B. Abschalten des Klopfwerkes bei Verwendung moderner Membranfiltermedien) durchaus ihre Berechtigung haben. Das Prinzip eines Rüttelfilters im Filtrations- und im Abreinigungsbetrieb ist in *Abbildung 6* dargestellt.

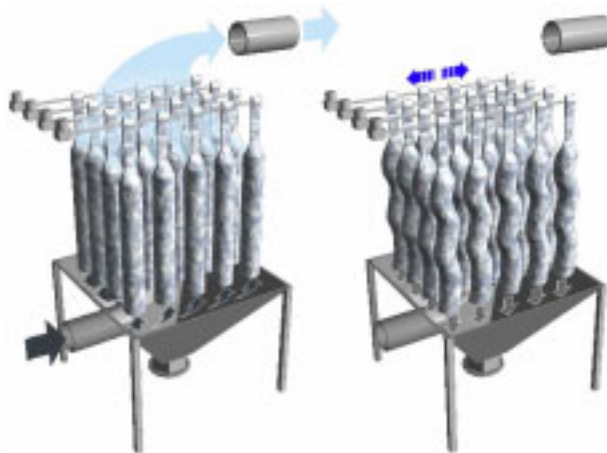


Abb. 6 Prinzipskizze eines Rüttelfilters

Rückspülfilter: In diesen klassischen Schlauchhäusern, wie sie in metallurgischen Industrien weit verbreitet sind, wird das Rohgas ebenfalls von innen nach außen durch Gewebefilterschläuche filtriert. Als Filtergewebe werden ebenfalls leichte und flexible Gewebe, oft auf der Basis spezieller Glasfaserarten, eingesetzt. Die Abreinigung erfolgt durch eine Strömungsumkehr, wobei sich das Filtermaterial nach innen wölbt (begrenzt durch die in die Schläuche eingenähten Strahlringe) und der Staubkuchen abgelöst und nach unten transportiert wird. Auch hier kann die Abreinigung nur off-line erfolgen. Üblicherweise wird die Filteranlage in mehreren Kammern ausgeführt und kammerweise abgereinigt. Die Spülluft wird zurückgeführt. Die Filterschläuche erlangen wegen ihrer geringen mechanischen Beanspruchung meist Standzeiten von vielen (bis zu 10, teilweise noch darüber) Jahren. Das Prinzip eines Rückspülfilters im Filtrations- und im Abreinigungsbetrieb ist in *Abbildung 7* dargestellt.

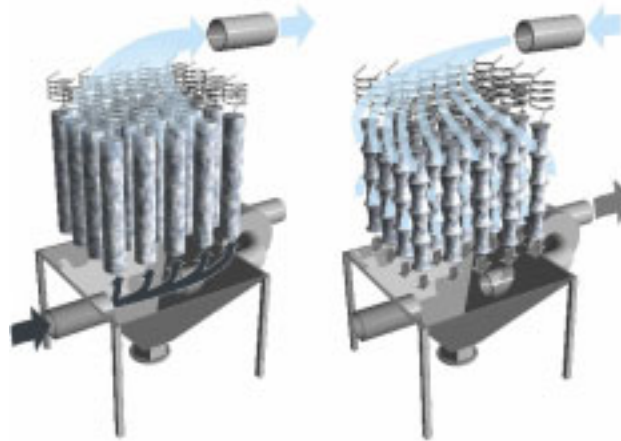


Abb. 7 Prinzipskizze eines Rückspülfilters

Pulse-Jet-Filter: Die modernste Form der Abreinigung ist das von MikroPul entwickelte Pulse-Jet-Verfahren, das sich inzwischen weitgehend als Standard durchgesetzt hat. Die Filterschläuche werden hierbei von außen nach innen durchströmt; ein Stützkorb gibt dem Schlauch die entsprechende Stabilität. Als Filtermedien werden üblicherweise unterstützte Nadelfilze eingesetzt, meist mit einer Oberflächenvergütung oder -beschichtung. Durch Einsatz von zweilagigen Laminaten mit einer Filtermembran an der Anströmseite ("GORE-TEX® Filter") wird eine Oberflächenfiltration ermöglicht (siehe Kap. 5). Die Abreinigung erfolgt bei Pulse-Jet-Anlagen durch einen intensiven Druckluft- (oder -gas)-Stoß, der die Filterschläuche kurz aufbläht, den Filterkuchen durch Impulsübertragung ablöst und kurzzeitig die Strömungsrichtung umkehrt. Die Abreinigungsenergie ist relativ groß, so dass große Sorgfalt auf maßgenaue Konfektionierung der Filterschläuche sowie eine gute Unterstützung durch hochwertige Stützkörbe gelegt werden muss, um lange Standzeiten (bis zu 10 Jahre) der Filterschläuche zu erreichen. Die Abreinigung kann in den meisten Fällen auch on-line, also bei weiterlaufendem Filtrationsbetrieb, durchgeführt werden. Deswegen und weil die zulässige Filterflächenbelastung (siehe Kap. 3.6) bei Pulse-Jet-Filteranlagen wesentlich größer ist als bei Rüttel- oder Rückspülfiltern, bauen Pulse-Jet-Filteranlagen relativ kompakt und erfordern geringere Investitionen. Das Prinzip eines Pulse-Jet-Filters im Filtrations- und im Abreinigungsbetrieb ist in *Abbildung 8* dargestellt.

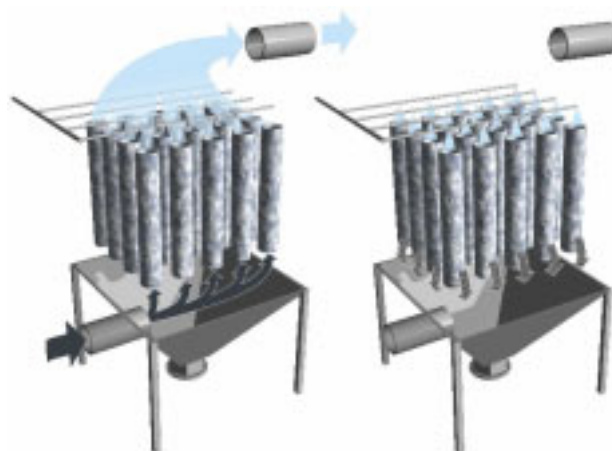


Abb. 8 Prinzipskizze eines Pulse-Jet-Filters

In den folgenden Kapiteln werden noch einige weitere Auslegungsparameter erläutert, bevor dann die beschriebenen Anlagentypen auf der Basis dieser Kenndaten verglichen werden.

3.5 Kenndaten

Die wesentliche Kenngröße einer Staubfilteranlage ist die sogenannte Filterflächenbelastung. Sie gibt an, welche Filterfläche zur Verfügung steht, um einen bestimmten Gasvolumenstrom zu filtrieren und bestimmt letztlich die Größe und Kosten der Anlage. Sie wird angegeben in $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ oder $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$. Der Volumenstrom ist dabei immer im aktuellen Betriebszustand zu verstehen, also Betriebskubikmeter. Normkubikmeter müssen zur Berechnung der Filterflächenbelastung umgerechnet werden auf den im Gewebefilter vorhandenen Druck und die Temperatur. Die Filterflächenbelastung gibt außerdem direkt die Strömungsgeschwindigkeit des Gases durch das Filtermedium (in m/h bzw. m/min) an.

Die zweite wesentliche Kenngröße einer Filteranlage ist die Abscheideeffektivität. Sie wird angegeben als prozentuale Partikelrückhaltung, meist in Abhängigkeit der Partikelgröße. Eine Abscheideeffektivität von 99,9 % bedeutet z.B., dass aus einem Rohgas mit $10 \text{ g}/\text{m}^3$ Staubgehalt 99,9 % der Partikel entfernt werden und die Staubkonzentration im Reingas nur noch $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ beträgt. In der Praxis hat es sich bewährt, direkt die Reingasstaubkonzentration als Auslegungsparameter zu verwenden. Sie ist oft gesetzlich begrenzt (z.B. bei Verbrennungsanlagen auf $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, i.N.tr. bei 11 Vol.-% O_2). Manchmal ist aber auch aus betrieblichen Gründen ein möglichst niedriger Reingasstaubgehalt wünschenswert, z.B. bei besonders wertvollen staubförmigen Produkten. Eine Gewebefilteranlage erreicht heute problemlos Reingasstaubwerte von weniger als $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, bei Einsatz von Membranfilterschläuchen auch weniger als $1 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Die dritte entscheidende Kenngröße einer Filteranlage ist der Filterwiderstand. In der Praxis werden oft Differenzdrücke über die Anlage (oder über die Kopfplatte) angegeben. Dies ist jedoch nur wenig aussagekräftig, da der Differenzdruck maßgeblich von der Filterflächenbelastung, also der Strömungsgeschwindigkeit durch das Filtermedium beeinflusst wird. In den üblichen Betriebsbereichen ist der Zusammenhang zwischen Differenzdruck und Filterflächenbelastung linear. Der Proportionalitätsfaktor ist der sogenannte Filterwiderstand (= Quotient aus Differenzdruck und Filterflächenbelastung) oder Filterdrag. Dies ist die eigentlich charakteristische Größe, in der sich strömungstechnisch gut designte Filteranlagen, eine optimale Abreinigung, geeignete Filtermedien und eine gute Betriebsweise widerspiegeln. Naturgemäß haben auch die Eigenschaften des Staubes ganz wesentlichen Einfluss auf den Filterwiderstand. Er wird in der Praxis in $\text{mmWS}/(\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h})$ angegeben. Typische Werte liegen zwischen 1 und 3 $\text{mmWS}/(\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h})$. D.h., dass eine standardmäßig ausgelegte Anlage (Filterflächenbelastung $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$) üblicherweise mit einem Differenzdruck zwischen 6 und 18 hPa gefahren wird. Ein Ansteigen des Filterwiderstandes über 3 $\text{mmWS}/(\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h})$ hinaus lässt auf einen nicht optimalen Zustand der Anlage schließen, z.B. langsames Zusetzen des Filtermaterials mit Staub, schlechte Abreinigung, Taupunktunterschreitungen oder ähnliches.

Der Filterwiderstand setzt sich zusammen aus einer Reihe von Einzelwiderständen: Die aerodynamischen Widerstände der Filteranlage selbst (im wesentlichen Eintrittsrohrleitung, Einbauten im Rohgasraum, Umlenkungen, Stützkörbe, Venturidüsen, Umlenkungen und Einbauten im Reingasraum, Reingasrohrleitung), der Widerstand des Filtermediums, des Staubkuchens auf dem Filterschlauch und, nicht zu vernachlässigen, Staubeinlagerungen in der Tiefe des Filtermediums. Die typische Zusammensetzung des Filterwiderstandes einer Anlage ist in *Abbildung 9* schematisch dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass die Angabe der Luftdurchlässigkeit von fabrikneuem Filtermaterial ("Literleistung") keine Aussage über den betrieblich zu erwartenden Filterwiderstand oder Differenzdruck zulässt und oft irreführend als wesentliche Produkteigenschaft herausgestellt wird.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

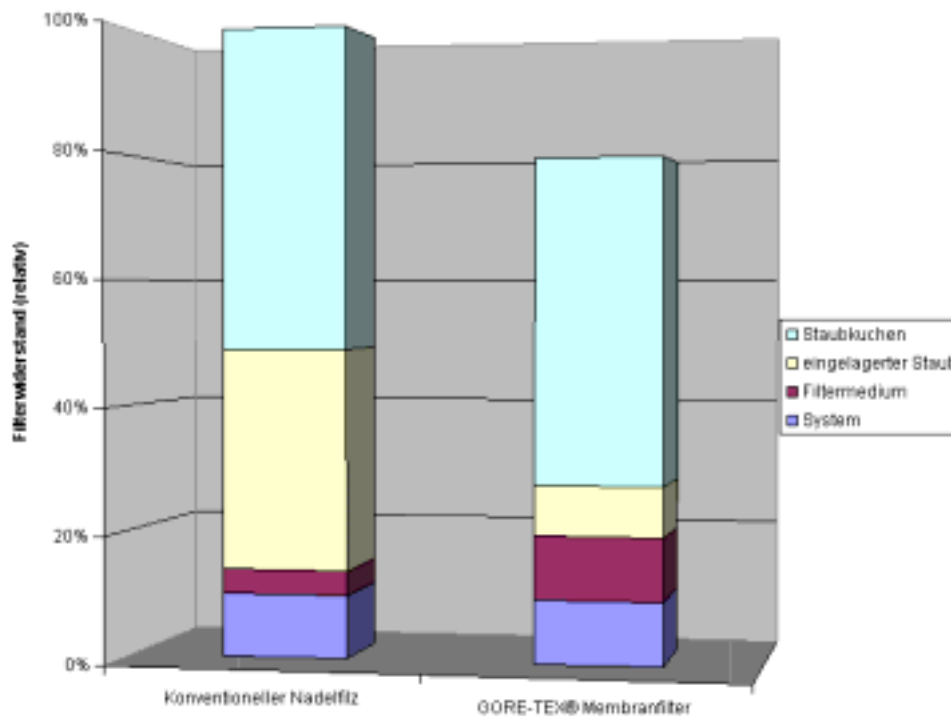


Abb. 9 Zusammensetzung des Filterwiderstandes

3.6 Anlagenauslegung

Die Auslegung für die Filterflächenbelastung hängt ab von der Art und Menge des Staubes (Größenverteilung, Agglomerationsverhalten, Staubbeladung des Gases), dem Typ der Filteranlage (Rückspül- oder Pulse-Jet-Anlage), dem Filtermedium (Tiefen- oder Oberflächenfilter, siehe Kap. 5), den Eigenschaften und der Zusammensetzung des Gases und noch weiteren Faktoren (on-line oder off-line Abreinigung, angestrebter Differenzdruck und Staubemissionen in das Reingas, zur Verfügung stehender Platz etc.). Typische Werte für Filterflächenbelastungen liegen zwischen 0,3 und 3 m³/m²,min. Bei geringer Staubbeladung und kräftigen Gasförderaggregaten (z.B. pneumatische Granulatförderung) können auch noch größere Filterflächenbelastungen ausgelegt werden. Eine Faustregel lautet: 1 m³/m²,min ist eine übliche Filterflächenbelastung; eine Übersicht über die Einflussfaktoren auf die Filterflächenbelastung gibt *Tabelle 2*. Letztlich kann nur die Erfahrung der beteiligten Ingenieure bzw. entsprechende Vorversuche die optimale Filterflächenbelastung ermitteln helfen. Im Zweifel legt man die Anlage eher etwas größer aus (wählt also eine geringere Filterflächenbelastung) und akzeptiert die damit verbundenen höheren Investitionskosten, als ein Nichtfunktionieren zu riskieren.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

<i>Parameter</i>	<i>Größe</i>	<i>Filterflächenbelastung</i>
Staubbelastung im Rohgas	Hoch (> 50 g/m ³)	↓
Partikelgröße	Fein (< 1µm)	↓
Agglomeratbildung	gut	↑
Reingasstaubgehalt	Niedrig (< 5 mg/m ³)	↓
Angestrebter Differenzdruck	Hoch (> 1 kPa)	↑
Abreinigungsenergie	Hoch (Pulse Jet)	↑
Filtermedium	Hochwertig (Membran)	↑

Tab. 2 Einflussfaktoren auf die Filterflächenbelastung

Von besonderer Wichtigkeit ist auch die Auswahl und korrekte Verarbeitung der richtigen Werkstoffe. Speziell in der Chemischen Industrie dienen Filteranlagen oft nicht "nur" dem Umweltschutz sondern dienen als Abscheider zur Gewinnung von verkaufsfähigem Produkt. Dabei ist absolute Beständigkeit aller produktberührenden Anlagenteile essentiell, um Produktkontaminationen durch Korrosionsprodukte sicher zu vermeiden. In der Pharma- und Lebensmittelindustrie müssen nach GMP-Richtlinien ohnehin alle Teile lebensmittelgeeignet sein. Dies betrifft insbesondere die Filterschläuche, die optimalerweise so gestaltet sind, dass das abgeschiedene Produkt nur mit einer PTFE-Membran in Berührung kommt (PTFE ist als Werkstoff FDA-zugelassen).

Weitere wesentliche Auslegungsparameter einer Filteranlage sind das Design des Gehäuses, die Anordnung der Filterschläuche, die Art der Abdichtung zur Kopfplatte, Werkstoffauswahl, Isolierung und Beheizung der Anlage und viele weitere wichtige Details, deren Erläuterung diesen Rahmen sprengen würde. Es kann nur empfohlen werden, auf die Erfahrung und das Know-How qualifizierter Lieferanten von Filteranlagen und Filtermedien zu vertrauen.

Erwähnenswerte Besonderheiten stellen noch CIP-fähige und druckstoßfeste Filteranlagen dar.

Wenn die Filteranlage als Produktabscheider eingesetzt wird, kann es sinnvoll sein, die Anlage von Zeit zu Zeit (z.B. bei Produktwechsel oder längeren Stillständen) vollständig zu reinigen, um eine Kreuzkontamination der Produkte bzw. mikrobiologischen Angriff auf abgelagerte Produktreste zu vermeiden. Das manuelle Reinigen der Anlage ist oft nicht möglich (z.B. wegen toxischer Produkte), auf jeden Fall aber sehr aufwändig und zeit-/kostenintensiv. Eine gute Alternative dazu stellen Anlagen dar, die im Betrieb gespült ("Clean-In-Place, CIP") werden können, wobei die Waschlösung durch geschickt angebrachte Düsen das Filtergehäuse und die eingebauten Filterschläuche praktisch vollständig von Anhaftungen reinigen. Hydrophobe und antiadhäsive Filteroberflächen (z.B. GORE-TEX[®] Membranfilterschläuche) haben sich hierbei besonders bewährt. Bei der Anordnung und dem Design der Waschdüsen und natürlich auch bei der Betriebsweise ist viel Erfahrung erforderlich, um einerseits eine ausreichende Reinigung zu erzielen, andererseits aber Verschleiß an den Filterschläuchen und hohen Waschflüssigkeitsverbrauch bzw. -entsorgungsbedarf zu vermeiden.

Bei Filteranlagen im explosionsgefährdeten Bereich kann eine druckstoßfeste Ausführung sinnvoll sein. Trotz der Vermeidung von Zündrisiken (Vermeidung von zündfähigen Gemischen und von Zündquellen, elektrostatische Ableitfähigkeit aller Komponenten etc., evtl. sogar Inertisierung der ganzen Anlage) kann es notwendig sein, die Anlage druckstoßfest auszuführen. Von MikroPul wurden schon Anlagen mit einer Druckstoßfestigkeit bis zu 80 bar gebaut.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

In *Tabelle 3* sind einige Auslegungsparameter für typische Gewebefilteranlagen der drei oben beschriebenen Bauarten zusammengestellt.

	<i>Rüttel-/Klopffilter</i>	<i>Rückspülfilter</i>	<i>Pulse Jet Filter</i>
<i>Gasvolumenstrom</i>	Bis 2.000.000 m ³ /h	Bis 2.000.000 m ³ /h	1.000 - 1.000.000 m ³ /h
<i>Betriebsdruck</i>	atmosphärisch	atmosphärisch	Bis 80 bar
<i>Filterfläche</i>			10 - 20.000 m ²
<i>Filterflächenbelastung</i>	1-1,5 m ³ /m ² ,min	1-1,5 m ³ /m ² ,min	0,3 - 5 m ³ /m ² ,min
<i>Staubbelastung</i>	hoch	gering	Sehr hoch
<i>Filterwiderstand</i>			
<i>Abreinigung</i>	Rütteln/Klopfen, Spül- luft, geringe Energie, nur off-line	Umkehrung Gastrom, geringe Energie, nur offline	Druckgasstoß, hohe Energie, off-line oder on-line
<i>CIP-fähig</i>	nein	nein	Ja
<i>Filtermaterialien</i>	Gewebe	Gewebe	Filz
<i>Filterschlauchdurch- messer</i>	150-300 mm	150 - 300 mm	100-200 mm
<i>Filterschlauchlänge</i>	Bis 10 m	Bis 10 m	1 - 6 m
<i>Lebensdauer Filter- schläuche</i>	4-7 Jahre	Max. 10 Jahre	1-10 Jahre
<i>Stützkörbe</i>	nein	Nein	ja
<i>Typische Einsatzgebie- te</i>	Mühlen	Metallurgie (z.B. Stahl, Ferrosilizium)	Chemische Prozesse, Trockner, Mühlen, Öfen, Fördersysteme, Bun- keraufsatz
<i>GORE-TEX® Filter ein- setzbar</i>	ja	ja	ja

Tab. 3 Auslegungsparameter für Gewebefilteranlagen

4 Moderne Pulse-Jet-Abreinigung

Die Abreinigung von Schlauch- oder Kerzenfiltern wird bei den meisten industriellen Anwendungen mit dem sogenannten „Pulse-Jet“-System realisiert, welches ursprünglich von MikroPul entwickelt und patentiert wurde.

4.1 Der Aufbau

Grundsätzlich sind für den Abwurf des Filterkuchens von der Filteroberfläche drei Mechanismen verantwortlich:

- ◆ Impulsartige Druckerhöhung im Filterelement
- ◆ Rückspülen und damit Fernhalten des abgelösten Filterkuchens von der Elementoberfläche
- ◆ Abwurf durch die Bewegung des Filtermediums während des Abreinigungsimpulses.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Das vorgespannte Regenerationsgas wird über entsprechende schnell schaltende Ventile aus einem Vorratstank über sogenannte Blasrohre auf die reingasseitige Öffnung der Filterelemente geleitet. Das Druckverhältnis zwischen Speicher und Betriebsdruck des Filters sollte zwischen 2 und 3 liegen. Dadurch wird sichergestellt, dass am Austritt des Blasloches über dem Filterelement Schallgeschwindigkeit herrscht. Dies ist für die Funktion des „Pulse-Jet“-Systems unerlässlich. Die *Abbildung 10* zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines „Pulse-Jet“-Systems.

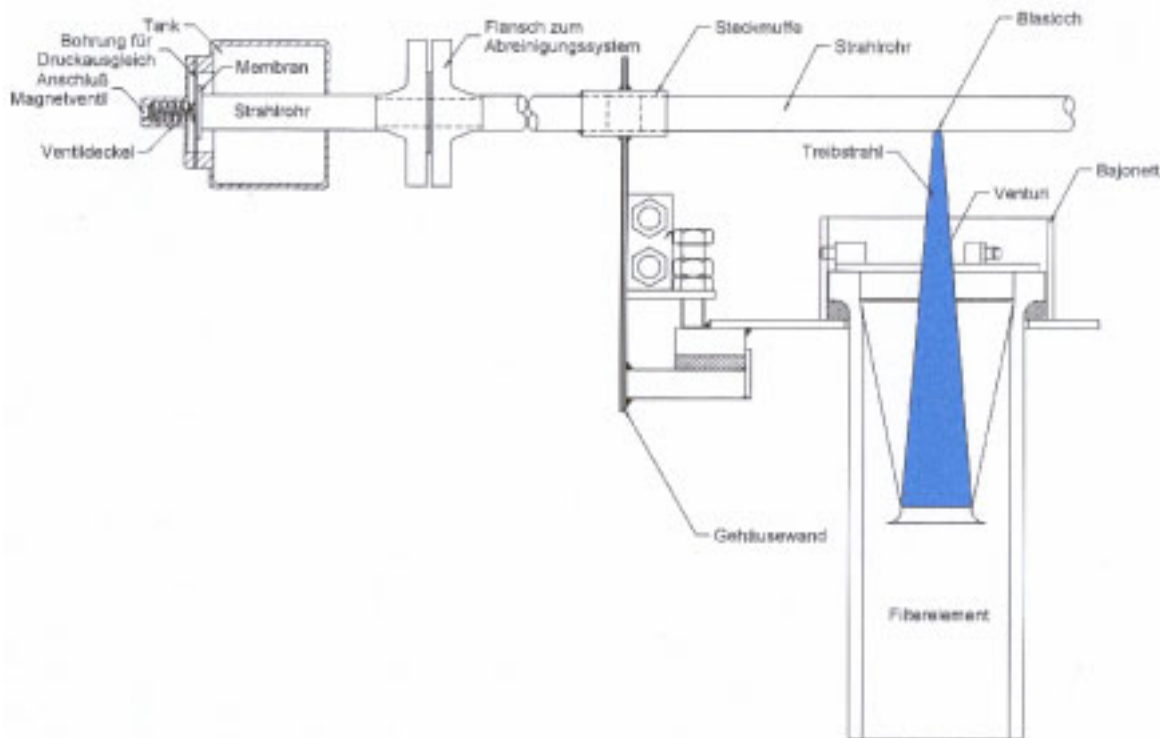


Abb. 10 Aufbau Pulse-Jet-System

4.2 Die Mechanismen

Während des Druckimpulses baut sich eine sehr schnell ansteigende Druckspitze im Filterelement auf. Dieser Verdichtungsstoß wirkt über das poröse Filtermedium auf die Trennfläche zwischen Filteroberfläche und Staubkuchen. Ist diese Druckspitze hinreichend schnell und hoch, so können die Adhäsionskräfte überwunden und der Filterkuchen abgelöst werden. Dieser Vorgang spielt sich innerhalb weniger Millisekunden ab. Im Anschluss an diese Initialphase strömt das Regenerationsgas (meistens Luft) in das Filterelement und hält somit den Überdruck aufrecht. Dadurch wird die Durchströmung des Filtermediums von der Rohgasseite her für einige 100 ms unterbrochen und der abgelöste Filterkuchen kann in den Filtertrichter sedimentieren. Diese „Haltephase“ muss ausreichend lang sein, damit nicht der gerade abgelöste Staub wenige Millisekunden nach dem Zusammenbruch des Überdrucks wieder auf der Filteroberfläche landet. Besonders wichtig ist dies für lange Filterelemente.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Grundsätzlich kann die Abreinigung auf zwei Mechanismen reduziert werden:

- ◆ Aufbau eines schnellen und intensiven Druckimpulses zur Trennung des Filterkuchens vom Filtermedium
- ◆ Rückspülperiode zur Aufrechterhaltung des Überdrucks im Filterelement für die Sedimentation des Filterkuchens

Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Druckimpulsverteilung in einem starren Filterelement. Als charakteristische Größe kann der initiale Druckimpuls herangezogen werden. Entlang des Filterelementes zeigen sich unterschiedliche Ausprägungen dieses Impulses. Am Elementeintritt schwankt der Druck sehr stark, bedingt durch die intensiven Einströmturbulenzen. In der Mitte des Elementes schwächt sich der Impulsanstieg sowie dessen absolute Höhe ab. Im Bodenbereich zeigt sich die höchste Impulsintensität auf Grund von Reflexions- und Überlagerungseffekten.

Beschleunigungskräfte, welche bei flexiblen Filtermedien (Filterschläuchen) auf den Staubkuchen wirken, spielen eine nur untergeordnete Rolle. Bei Stäuben mit starken Adhäsionskräften kann diese Bewegung während der Schlauchexpansion zu Rissen im Staubkuchen führen. Der Überdruck im Schlauch gleicht sich dann sehr schnell über die entstandenen Risse aus, und die Abreinigung erfolgt nur sehr mangelhaft.

Ebenso verursacht die Bewegung des Filterschlauches eine Schwächung der Intensität des Druckimpulses auf den Staubkuchen. Daher ist es sinnvoll, Filterschläuche mit möglichst geringem Schlauchspiel einzusetzen. Zudem wird dadurch auch die mechanische Belastung des Filtermediums minimiert, was der Lebensdauer zu Gute kommt.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

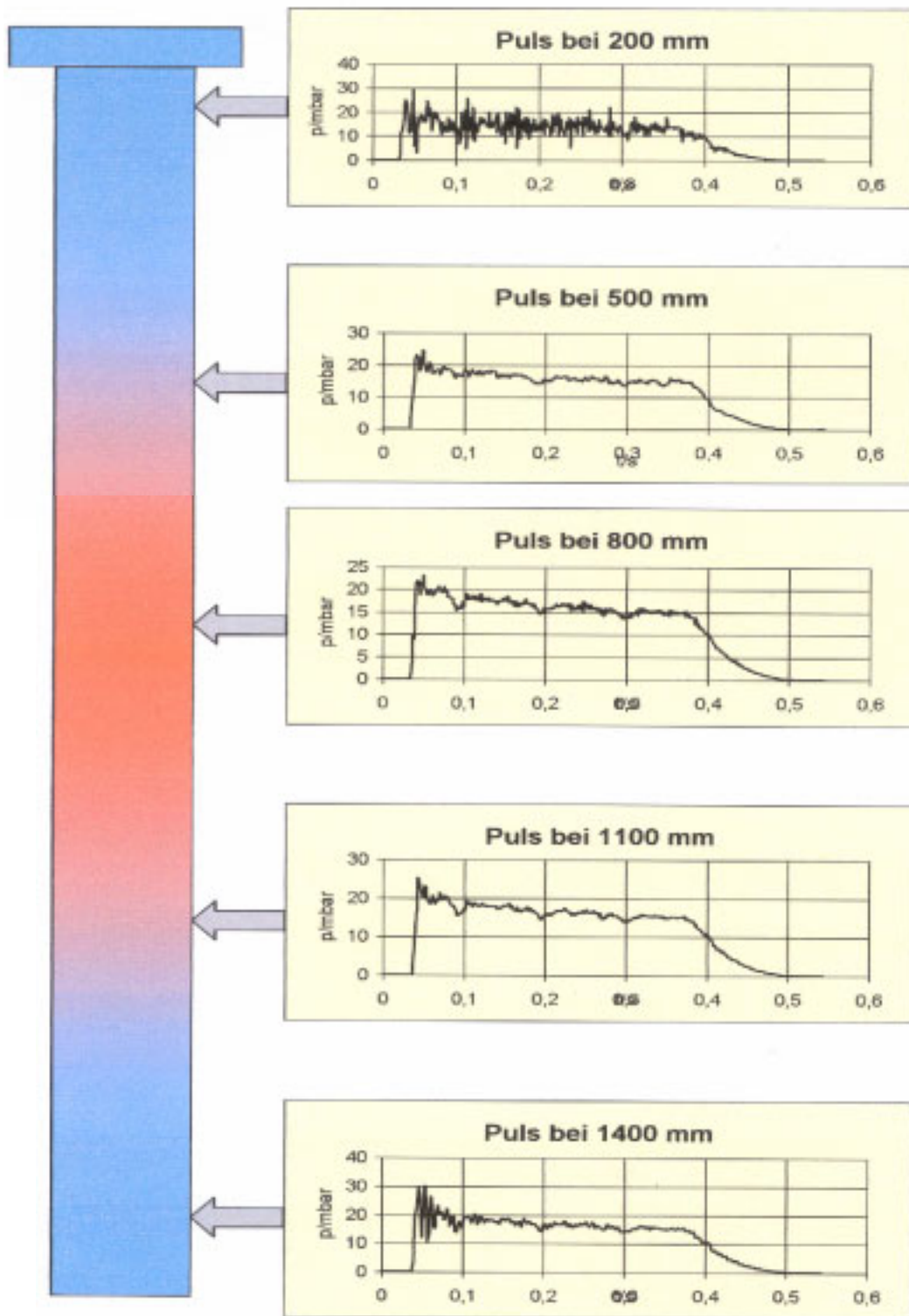


Abb. 11 Druckimpulsverteilung in einem starren Filterelement

4.3 Parameter

Eine optimale Abreinigung hängt von mehreren geometrischen wie auch physikalischen Parametern des Abreinigungssystems ab. Optimal bedeutet, mit möglichst geringem Druckluftverbrauch eine ausreichende Abreinigung der Filterelemente zu erreichen. Das Diagramm in *Abbildung 12* stellt diese Parameter in Bezug.

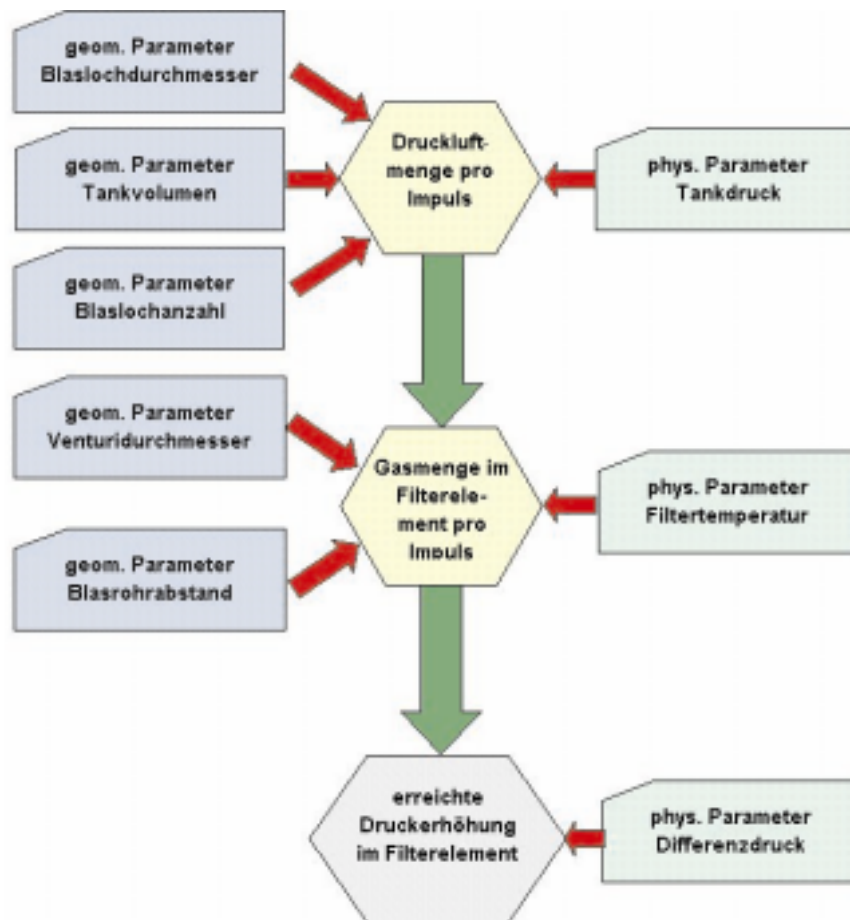


Abb. 12 Druckluftverbrauch und Abreinigung

In technischen Anwendungen werden die Schläuche in einem Filter reihenweise abgereinigt, d.h. zum Zeitpunkt der Regeneration sind mehrere Filterelemente gleichzeitig zu versorgen. Das System ist so zu dimensionieren, dass in allen Elementen der Impulsdruck entsprechend schnell ansteigt, aber auch die Versorgung der Schläuche mit ausreichend Druckluft gewährleistet ist. Schließlich entscheidet die Rückspülzeit über die Sedimentationsrate des Staubes. In Diagramm (*Abbildung 13*) ist der Druckverlauf am Blasrohr während der Abreinigung dargestellt bei unterschiedlichen Speicherdrücken und Blaslochdurchmessern. Es ist zu erkennen, dass bei großen Abflussraten, sei es durch viele Filterelemente oder große Blaslöcher, die Rückspülzeit stark zurück geht. Fällt das Druckniveau unter das kritische Druckverhältnis, so erfolgt das Ausströmen im Unterschallbereich, und die Impulswirkung geht verloren.

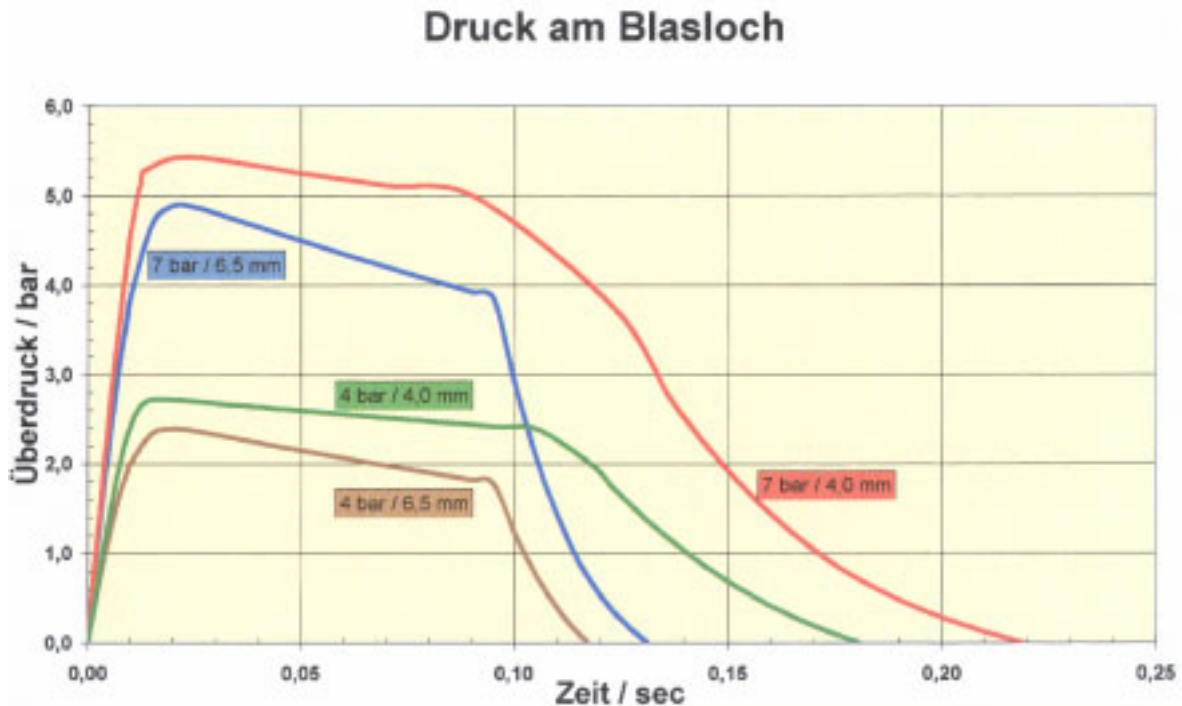


Abb. 13 Druckverlauf am Blasrohr

Ein hilfreiches Instrument ist der Venturi am Reingasaustritt des Filterelementes. An dieser Stelle wird der Treibstrahl aus dem Abreinigungssystem in das Element eingeleitet. Durch die entstehenden Druckverhältnisse im und nach dem Venturi wird zusätzlich zur primären Regenerationsluft aus dem Blasrohr Reingas oberhalb des Venturis angesaugt und erhöht somit den gesamten Massenstrom an Abreinigungsluft. Dieser „Injektionseffekt“ hängt selbstverständlich vom Vordruck der Primärluft und von der Betriebstemperatur des Filters ab. Im Diagramm (*Abbildung 14*) ist das Injektionsverhältnis eines „Pulse-Jet“-Systems bei zwei verschiedenen Betriebstemperaturen dargestellt. Dabei bezeichnet M_0 den Primärmassenstrom aus dem Blasloch und M den gesamten Massenstrom, welcher zur Abreinigung in das Filterelement gelangt.

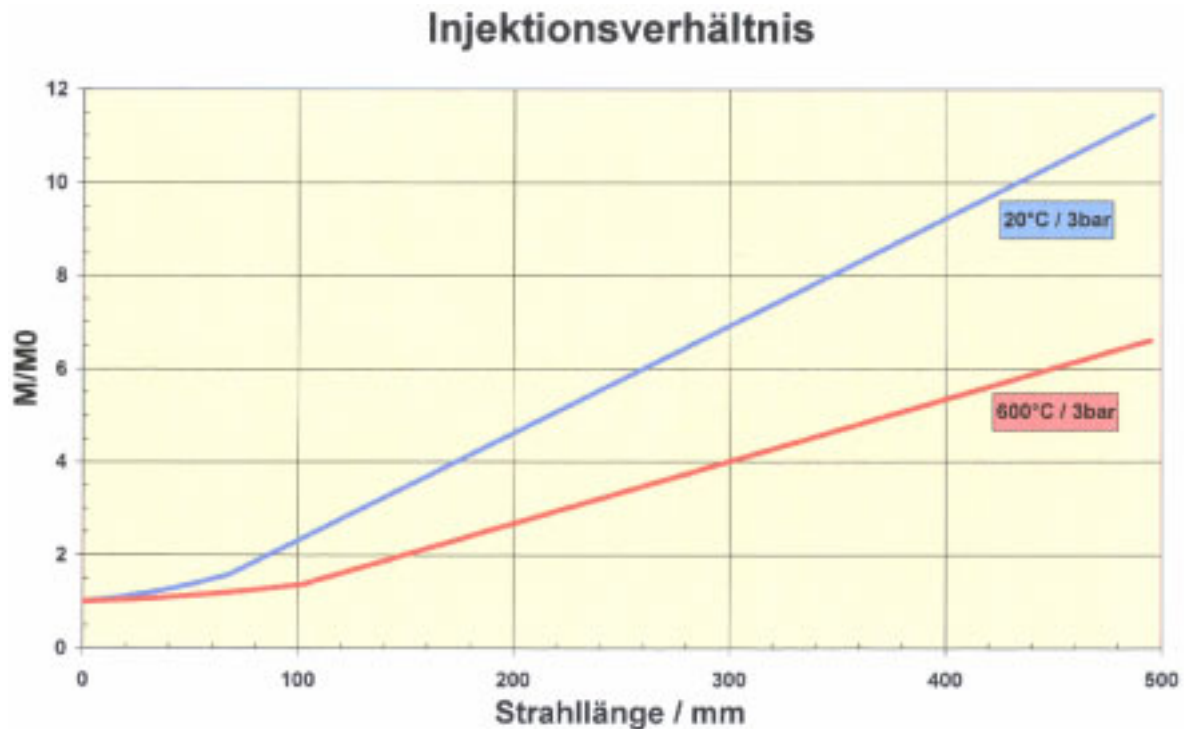


Abb. 14 Injektionsverhältnis eines Pulse-Jet-Systems

4.4 Zusammenfassung

Die dargestellten Mechanismen machen deutlich, dass ein Abreinigungssystem für Schlauch- bzw. Elementfilter folgende Anforderungen zu erfüllen hat:

- ◆ Schneller und intensiver Druckanstieg im Filterelement
- ◆ Ausreichende Haltezeit des Überdrucks im Filterelement
- ◆ Ventilcharakteristik und Anzahl der Blaslöcher pro Ventil muss für die gesamte Blaszeit mindestens das kritische Druckverhältnis gewährleisten

Ebenso hat sich herausgestellt, dass der initiale Druckimpuls bei der Abreinigung eine entscheidende Rolle spielt. Bei starren Filterelementen fällt diese Impulsentwicklung stärker aus als bei flexiblen Medien. Jedoch wird ein Teil der Impulswirkung durch die größeren Wandstärken starrer Elemente kompensiert. Daher ist bei der Medienwahl, besonders bei Heißgas-Filterelementen, auf eine hohe Porosität zu achten. Grundsätzlich ist die mechanische Belastung von starren Filterelementen während der Pulse-Abreinigung wesentlich geringer, was besonders beim Einsatz der Filtermedien bei hohen Temperaturen wichtig ist.

5 Filtermedien

Für das Herzstück einer Filteranlage, das eigentliche Filtermedium, gibt es zahlreiche Alternativen. Zunächst bestimmt die Auslegung der Filteranlage die geometrische Anordnung der Filterelemente. Grundsätzlich unterscheidet man zylindrische Filterschläuche, die üblicherweise senkrecht hängend in die Anlage eingebaut werden, und Filtertaschen, die meistens hochkant waagrecht installiert werden.

Außerdem werden zur Erhöhung der Filterfläche Filterelemente aus gefaltetem, plissierten Filtermaterial angeboten. Insbesondere bei vorhandenen Anlagen, deren Filterfläche z.B. aus Gründen der Kapazitätserweiterung erhöht werden soll, ist der Ersatz der Filterschläuche durch Filterpatronen ein einfacher Weg, den Durchsatz zu erhöhen. Allerdings muss hierbei besonderes Augenmerk auf die sonstigen aerodynamischen Verhältnisse (z.B. die Gaseintrittsgeschwindigkeit) gelegt werden.

Als Filtermedien wurden früher einfache Gewebe und Nadelfilze zu Filterelementen konfektioniert. Je dichter und schwerer die Filtermedien sind, desto besser ist üblicherweise ihre Abscheideleistung und desto höher aber auch der Filterwiderstand. Ein weiterer wichtiger Einflussparameter ist die Faserstärke der verwendeten Materialien. In Kap. 2.1 wurde bereits beschrieben, dass die wesentlichen Mechanismen zur Partikelabscheidung an Filterfasern abhängig sind vom Faserdurchmesser. Bei konventionellen Filtermedien wird daher versucht, durch immer feinere Fasern, hauptsächlich auf der Anströmseite, und möglichst gleichmäßig dichte Filze die Effizienz an die immer höheren Anforderungen anzupassen, ohne den Druckverlust allzu sehr zu erhöhen.

Ein weiterer Effekt bei der Staubfiltration mit Filterfilzen ist die Abscheidung und Ablagerung von Partikeln in der Tiefe des Materials. Dieser innere, sogenannte primäre Filterkuchen trägt wesentlich zur Erhöhung der Effizienz bei (große Poren werden verschlossen, Strömungsturbulenz in den Medien wird erhöht); allerdings führt dies zu einer ständigen Erhöhung des Druckverlustes im Betrieb. Außerdem bildet sich dieser primäre Filterkuchen erst im Laufe der Zeit, so dass es anfänglich zu erhöhten Emissionen kommt. Auch wird der Staub bei der Abreinigung teilweise aus dem Filtermedium herausgeschleudert ("Teppichklopfen"), wobei es nicht nur zu Emissionen, sondern auch zu innerem abrasivem Verschleiß des Filtermaterials kommt.

Wünschenswert ist daher die Bildung eines dichten Staubbilages auf der Oberfläche des Filtermediums. Dies wird versucht zu erreichen, indem die Oberflächen von Filterfilzen heutzutage praktisch immer geglättet und speziell "ausgerüstet" wird. Glätten erfolgt meist durch Kalandrieren, also ein dem Bügeln vergleichbarer Prozess. Oberflächenausrüstungen sind meist Beschichtungen mit Emulsionen, Aufbringen von dünnen Schäumen oder ähnliches, unter Verwendung antiadhäsiver Substanzen, meistens PTFE. Moderne konventionelle Filtermedien, die eine oberflächenorientierte Staubabscheidung ermöglichen sollen, sind also kalandrierte, beschichtete oder besonders feinfaserige Filze.

Die ideale Realisierung des Prinzips der Oberflächenfiltration stellen Membranfiltermedien dar. Von W.L. GORE & Associates in den 70er Jahren entwickelt und seitdem mehrfach verbessert, mit immer neuen Membranen optimiert und auf die heutigen Anforderungen angepasst, sind Membranfiltermedien inzwischen weit verbreitet und wachsen in einem ansonsten stagnierenden Markt weiter stark in ihrer Bedeutung.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

GORE-TEX® Membranfilter sind zweilagig aufgebaut. Die Anströmseite besteht aus der mikroporösen ePTFE-Membran. Die zweite Lage, ein typischer Nadelfilz oder, z.B. für Rückspülfilteranlagen, ein Gewebe, dient der mechanischen Stabilisierung des Filtermaterials. In *Abbildung 15* ist eine elektronenmikroskopische Aufnahme des Schnittes durch ein solches Membranmaterial dargestellt.

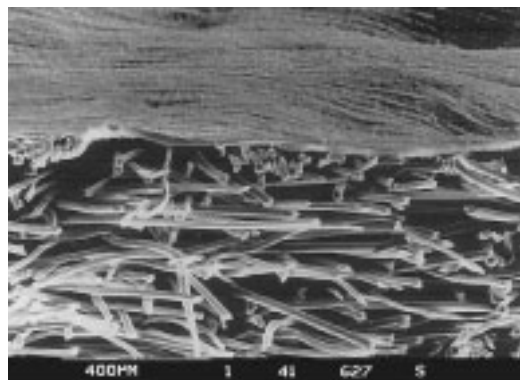


Abb. 15 Schnitt durch ein GORE-TEX® Membranmaterial

Bei Membranfiltern wird die Aufgabe der Filtration praktisch alleine der Membran übertragen. Sie ist optimiert auf möglichst hohe Effizienz und Luftdurchlässigkeit. Die mechanische Integrität wird durch ein stabiles Stützmaterial gewährleistet, das selbst keine Filtrationsaufgabe hat. Durch diese Trennung der Aufgaben können beide Bestandteile eines GORE-TEX® Laminates unabhängig voneinander auf ihre jeweilige Aufgabe hin optimiert werden. Insofern besteht hier ein wesentlicher Unterschied zu einfachen Beschichtungen.

Bei Membranfiltern wird der Staub vollständig auf der Oberfläche der Membran zurückgehalten. Es kommt nicht zu dem oben beschriebenen kontinuierlichen Druckverlustanstieg durch Einlagerungen von Staub in den Filz. Auch lässt sich ein Staubkuchen wesentlich einfacher und vollständig abreinigen, wenn er sich auf der antiadhäsiven PTFE-Oberfläche gebildet hat, ohne dass es zu innerer Abrasion des Trägermaterials kommt, was letztlich die Lebensdauer der Filterschläuche erhöht. Auch feuchte und klebrige Stäube werden gut abgereinigt.

Abbildung 16 zeigt das typische Differenzdruckverhalten der beiden dargestellten Alternativen (moderner Filterfilz und GORE-TEX® Filter) im Vergleich.

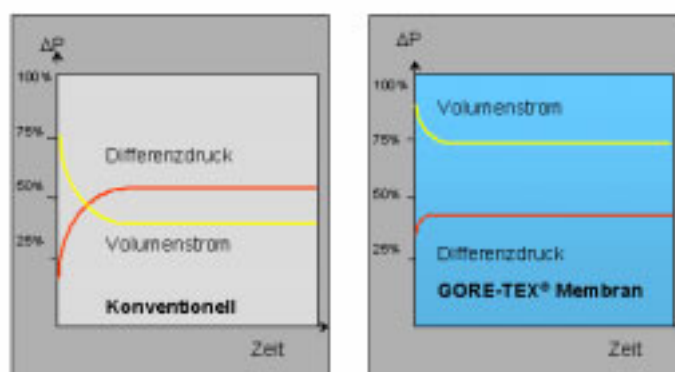


Abb. 16 Differenzdruckverhalten Filterfilz und GORE-TEX® Membrane

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Filteranlagen, die mit Membranfiltern ausgestattet sind, zeichnen sich daher aus durch:

- ◆ Extrem geringe Staubemissionen von Anfang an, auch während der Abreinigungsimpulse
- ◆ Dauerhaft konstanten, niedrigen Druckverlust
- ◆ Lange Lebensdauer der Filterschläuche durch verschleißarmen Betrieb

Die Betriebsbedingungen hinsichtlich Temperatur, chemischer Umgebung und Betriebsweise bestimmen die Auswahl des Trägermaterials. Beispielsweise wird für die Filtration von trockener Abluft, z.B. aus pneumatischer Förderung, oft Polyester-Nadelfilz als Trägermaterial für die Membran eingesetzt. Das andere Extrem, die Filtration eines chlorhaltigen Prozessgases bei 260 °C, erfordert 100 % PTFE, auch beim Trägermaterial - hier wird die Membran auf einen ePTFE-Filz laminiert, das hochwertigste Laminat. Ein Leitfaden für die Auswahl des Trägermediums bildet die *Tabelle 4*, in der auf die wesentlichen Betriebsparameter eingegangen wird.

Trägermaterial	Max. Temp. (Dauer)	Max. Temp. (kurz)	Mineralsäuren	organische Säuren	Alkalien	Salze	oxidierende Substanzen	Lösemittel	Wasserdampf
Polyester	135 °C	150 °C	+	++	-	++	+	++	--
Polypropylen	70 °C	93 °C	++	++	++	++	--	-	++
Aramid	204 °C	220 °C	-	-	+	-	-	+	-
Polyacrylnitril	125 °C	140 °C	+	++	-	+	+	++	+
Glasfaser	260 °C	280 °C	+	++	-	-	++	++	++
PTFE	260 °C	260 °C	++	++	++	++	++	++	++
PPS (Ryton®)	180 °C	190 °C	++	++	+	+	--	+	++

++ = sehr gut beständig + = gut beständig - = bedingt beständig -- = nicht beständig

Tab. 4 Einsetzbarkeit von Trägermaterialien bei GORE-TEX® Filtern

Neben textilen Membranfiltermedien gibt es auch Starrkörperfilter, die in Kompaktfilteranlagen eingesetzt werden. Diese sog. SINBRAN® Starrkörperfilter verwenden als Filtermedium ebenfalls eine GORE-TEX® Membran; diese ist allerdings auf einen Sinterkörper aus Polyethylen laminiert. Starrkörper-Filterelemente werden immer dann eingesetzt, wenn der zur Verfügung stehende Platz stark limitiert ist, extrem hohe Anforderungen an die Reingasqualität (z.B. < 1/10 MAK) gestellt werden und evtl. manuelle Reinigungsvorgänge ein besonders robustes Filtermedium erfordern. Anwendungsbeispiele sind Schweißrauchabscheidung, Laserschneiden, Pigmentproduktion, Siloaufsatzfilter für Feinststäube u.ä.. *Abbildung 17* zeigt ein Foto eines SINBRAN® Starrkörperfilters.

**Abb. 17 SINBRAN® Filterelement**

Als Besonderheit sollen an dieser Stelle auch katalytische Filter erwähnt werden. Sie enthalten im Stützmaterial einen speziellen Katalysator, der in der Filteranlage simultane Staubabscheidung und katalytische Zerstörung von gasförmigen Dioxinen gewährleistet. Diese haben sich besonders in verschiedensten Abfallverbrennungsanlagen (Hausmüll, Sondermüll, Klinikmüll), metallurgischen Anlagen (Sekundärkupfer, Sekundäraluminium) aber auch in Krematorien und Holzfeuerungsanlagen bewährt.

6 Heißgasfiltration

Die Heißgasfiltration stellt ein besonderes Anwendungsgebiet der Entstaubungstechnik dar. Dabei handelt es sich um Filtrationsprozesse mit Betriebstemperaturen oberhalb 250°C, also jene Anwendungen, welche nicht mehr mit polymeren Filtermedien bedient werden können.

Am bekanntesten sind Anwendungen aus thermischen Prozessen, bei denen die heißen Abgase vor der Wärmenutzung in Wärmetauschern gereinigt werden, um Verschleiß und thermische Verluste zu minimieren. Aber auch Anwendungen in der Produktion wie die Erdölchemie, die Herstellung von Metalloxiden oder der Rückgewinnung von Wertstoffen aus thermischen Zersetzungsprozessen bilden in den letzten Jahren ein größer werdendes Anwendungsgebiet.

In den vergangenen Jahren ist in dieser Sparte einiges an Entwicklungsarbeit für geeignete Filtermedien und Elemente geleistet worden. Die heute zur Verfügung stehenden Filterelemente sind bei Betriebstemperaturen von bis zu 800°C einsetzbar und zeichnen sich durchweg durch hervorragende Abscheideleistungen aus. Das Problem bei der Heißgasfiltration liegt vielmehr auf der Seite des kontinuierlichen Betriebes, welcher hauptsächlich durch folgende Einflussgrößen bestimmt wird:

- ◆ Mechanische Stabilität der Filterelemente
- ◆ Regenerierbarkeit der Filterelemente und damit Betrieb bei konstantem Druckverlust
- ◆ Auswahl der geeigneten metallischen Werkstoffe in Bezug auf Korrosionsbeständigkeit und thermische Festigkeit

Dieser Abschnitt soll kurz beleuchten, welche Besonderheiten bei der Auswahl eines Heißgasfilters zu beachten sind und welche konstruktiven Merkmale Auskunft über die Funktionstüchtigkeit eines Heißgasfilters geben können.

6.1 Das Filtergehäuse

Wie für normale Schlauchfilter gilt auch für Heißgasfilter: Filterelemente müssen auswechselbar sein. Eine gute Zugänglichkeit von der Reingaskammer her ist immer anzustreben. Damit wird es notwendig, die gesamte erforderliche Filterfläche auf einer Ebene anzuordnen, d.h. auf der Kopfplatte. Die Elementbefestigung muss damit ebenfalls von der Reingasseite zugänglich sein und sollte keine Schraubverbindungen tragen. Dies lassen sich nach einem Temperatureinsatz nur schwer oder gar nicht wieder lösen.

Die Kopfplatte ist das thermisch am stärksten belastete Bauteil des Filters. Sie hat die Aufgabe, Rein- und Rohgaskammer staubdicht gegeneinander abzuschließen und gleichzeitig ihr eigenes Gewicht und das der Filterelemente zu tragen. Unter dem Einfluss hoher Temperaturen und damit verbundener Wärmedehnungen müssen schon besondere konstruktive Maßnahmen ergriffen werden, damit es nicht zu Undichtigkeiten oder gar Elementbrüchen kommt. Eines dieser Merkmale ist die entsprechende Versteifung oder die schwimmende Lagerung der Kopfplatte.

6.2 Filterelemente

Heißgasfilterelemente bestehen meist aus metallischen oder keramischen Werkstoffen. Diese werden zu meist starren, zylindrischen Elementen verarbeitet in selbsttragender Bauweise. Besonders bei den keramischen Filtermedien geht dies mit Mediendicken zwischen 10 und 20 mm einher. Es ist daher verständlich, dass der Porosität des Filtermediums hier eine besondere Bedeutung zukommt. Dem Bestreben, einen akzeptablen und technisch vertretbaren Druckverlust zu erhalten, wirken die hohe dynamische Viskosität des Gases (vgl. Kapitel 2.1.2) und die mitunter ungünstige Struktur des Filtermediums entgegen. Es werden Filtermedien mit granularer (gesinterter) Struktur, als Vlies, als Gewebe (meist flexibel) oder als Nadelfilz (aus Glasfaser) hergestellt. Grundsätzlich haben hohe Temperaturen eine verspröde Wirkung auf die Medienwerkstoffe. Bei der Abreinigung der Elemente - gleich ob durch das „Pulse-Jet“- Verfahren oder durch einfaches Rückspülen - wird ein flexibles Filtermedium einer Walkarbeit ausgesetzt. Diese führt zum verfrühten Versagen der Filterelemente. Daher ist für Temperaturen oberhalb 350°C immer ein starres Medium zu bevorzugen.

Keramische sowie metallische Vliesmedien zeichnen sich durch hohe Porositäten aus. Die feine Struktur der Vliese (Durchmesser der Einzelfasern ca. 3-5 µm) gewährleisten neben einer hervorragenden Abscheidung auch eine gute Oberflächenfiltration.

Problematisch bei allen Filtermedien sind die chemischen Beständigkeiten. Da es sich meist um sehr feine Strukturen handelt, können auch schon oberflächliche Angriffe über die Hälfte der Faserstärke zerstören und damit das gesamte Filterelement.

6.3 Die Regeneration

Die meisten für die Heißgasfiltration eingesetzten Filterelemente sind starr, was zu einem relativ hohen Druckimpuls im Inneren der Kerze während der Abreinigung führt. Die Kraftwirkung des Druckimpulses auf den außenliegenden Filterkuchen wird jedoch durch die relativ großen Wandstärken der Filtermedien reduziert. Hinzu kommt, dass bei hohen Temperaturen die Staubkuchenstruktur poröser wird und somit dem Druckimpuls einen geringeren Widerstand entgegensetzt. Als Folge davon wird ein deutlich geringerer Staubkuchenanteil bei der Abreinigung abgeworfen, als dies bei normalen Temperaturen der Fall wäre. Der poröse Filterkuchen mit seinem geringeren Druckverlust führt zu einer geringen Pulse-Häufigkeit, und der verbleibende Reststaub auf dem Filterelement schützt dieses vor dem Ein- bzw. Durchdringen von Feinststäuben. Das Diagramm in *Abbildung 18* zeigt eine Anzahlkonzentration im Reingas hinter einem Heißgasfilter, über die Temperatur aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass diese mit zunehmender Temperatur wie zu erwarten abnimmt.

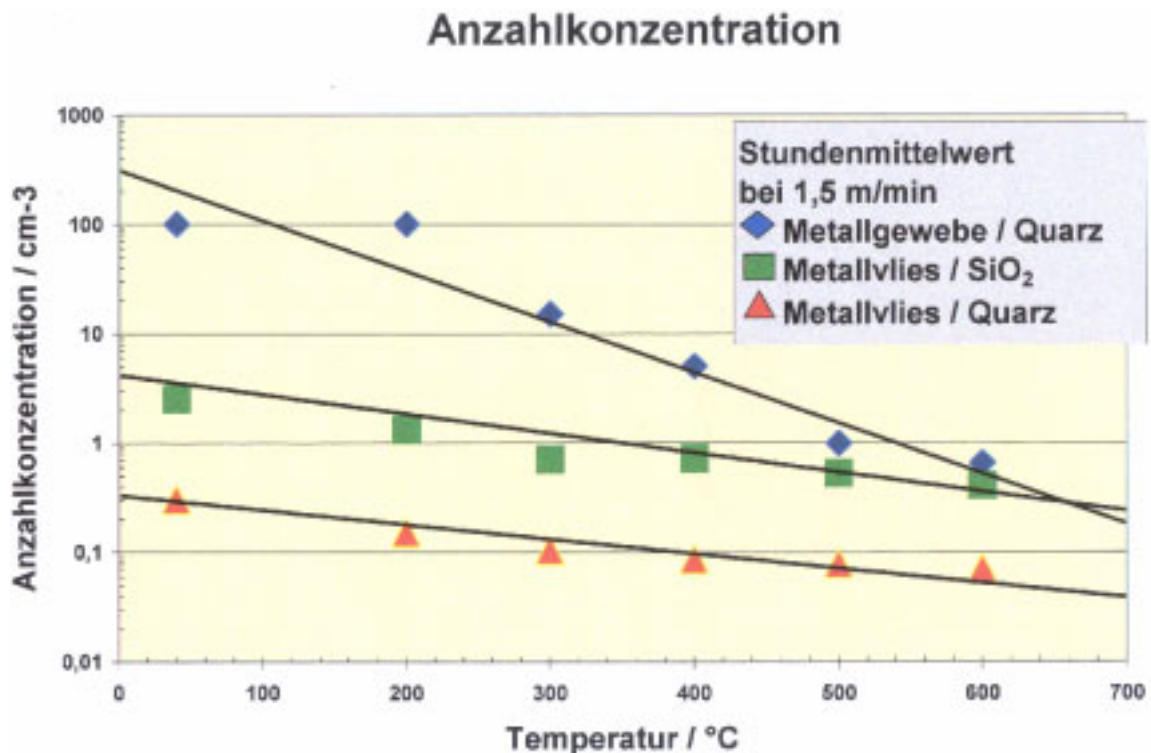


Abb. 18 Reingas hinter einem Heißgasfilter über der Temperatur

6.4 Zusammenfassung

Allgemein sind einige Besonderheiten bei der Projektierung von Heißgasfiltern zu beachten. Dazu gehören auch die Wahl des richtigen Rohgaseintrittes in das Filtergehäuse, um die Abreinigung und Sedimentation des Staubes nicht durch ungünstige Strömungsverhältnisse zu behindern. Aber ebenso wichtig kann die Aufwärmung der Regenerationsgases sein, um Taupunktunterschreitungen am Blasrohr oder Filterelementkopf zu vermeiden. Trotz mancher verfahrenstechnischer Vorteile ist die Staubabscheidung bei hohen Temperaturen kein leicht beherrschbarer Prozessschritt und nicht vergleichbar mit Schlauchfiltern bei normalen Temperaturen zwischen 20 und 180°C.

7 Kosten der Entstaubung

7.1 Investitionskosten

Es ist nahezu unmöglich, eine allgemeingültige Aussage über die spezifischen Anlagenkosten einer Gewebefilteranlage zu machen. Faustregeln wie z.B. "5 Euro pro Kubikmeter/Stunde" sind zwar eingängig, können aber im Einzelfall um Faktor 5 zu hoch oder um Faktor 2 zu niedrig sein. Wie bereits erläutert, wird eine Filteranlage zunächst von ihrer Größe her ausgelegt, wobei die richtige Filterflächenbelastung für die jeweilige Anwendung das ausschlaggebende Kriterium ist. Weitere wesentliche Einflussparameter sind Betriebstemperatur und Druck sowie chemische Gaszusammensetzung (Korrosionsschutz) und natürlich die Qualität des einzusetzenden Filtermediums. Letztlich spielt natürlich auch die absolute Größe der Anlage eine Rolle, da ein gewisser Fixkostenanteil, z.B. für die Regaleinheit, bei Großanlagen anteilig weniger ins Gewicht fällt.

In *Abbildung 19* wird trotzdem der Versuch unternommen, eine Richtschnur für die zu erwartenden Investitionskosten für Filteranlagen in einem gewissen Bereich abzuschätzen.

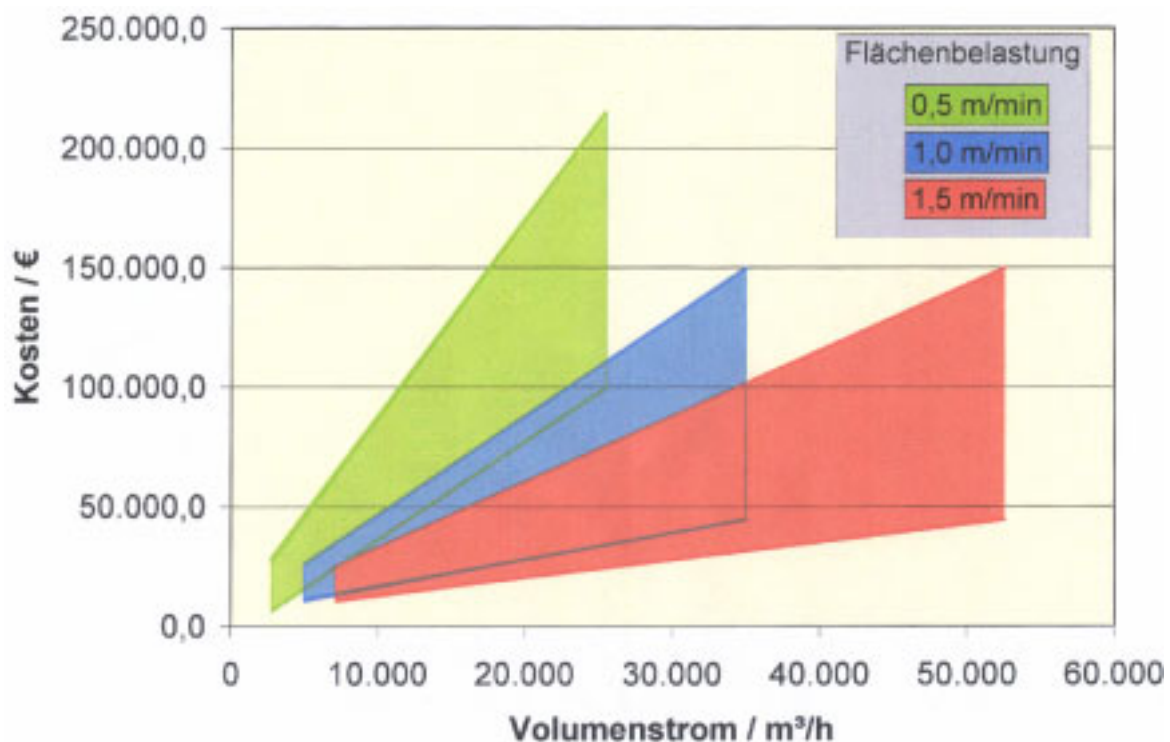


Abb. 19 Investitionskosten Filteranlage

7.2 Betriebskosten

Neben den Investitionskosten spielen die Betriebskosten einer Filteranlage eine wesentliche Rolle bei der Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Insbesondere, wenn eine Entscheidung z.B. für einen bestimmten Filteranlagentyp oder ein Filtermaterial ansteht, und die technische Evaluierung mehrere Möglichkeiten offen lässt, sollten die zu erwartenden Betriebskosten einer genauen Analyse unterzogen werden.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Folgende variable Betriebskosten sind von Bedeutung:

Abreinigung	Druckluftverbrauch (Mengenbedarf kurzfristig und pro Jahr, Druckniveau)
Filterwiderstand	Energieverbrauch des Ventilators
Wartung/Instandhaltung	Inspektionsbedarf, Stillstandszeiten, Wechselkosten für Ersatzteile
Ersatzteile	Filterschläuche, Stützkörbe, Ventile
Stillstandszeiten	geplante und ungeplante Stillstände, Produktionsausfall

Es ist offensichtlich, dass die Investition in hochwertige Anlagen und Komponenten sich schnell über verminderte Betriebskosten rechnen kann. Beispielsweise können die Kosten für einen einzigen ungeplanten eintätigen Stillstand (Produktionsausfall) zum Filterschlauchwechsel die Kosten für die Filterschläuche bei weitem übersteigen. In *Abbildung 20* sind die Verhältnisse für eine größere Anlage, die auf SUPERFLEX™ Filterschläuche umgerüstet wurde, dargestellt.

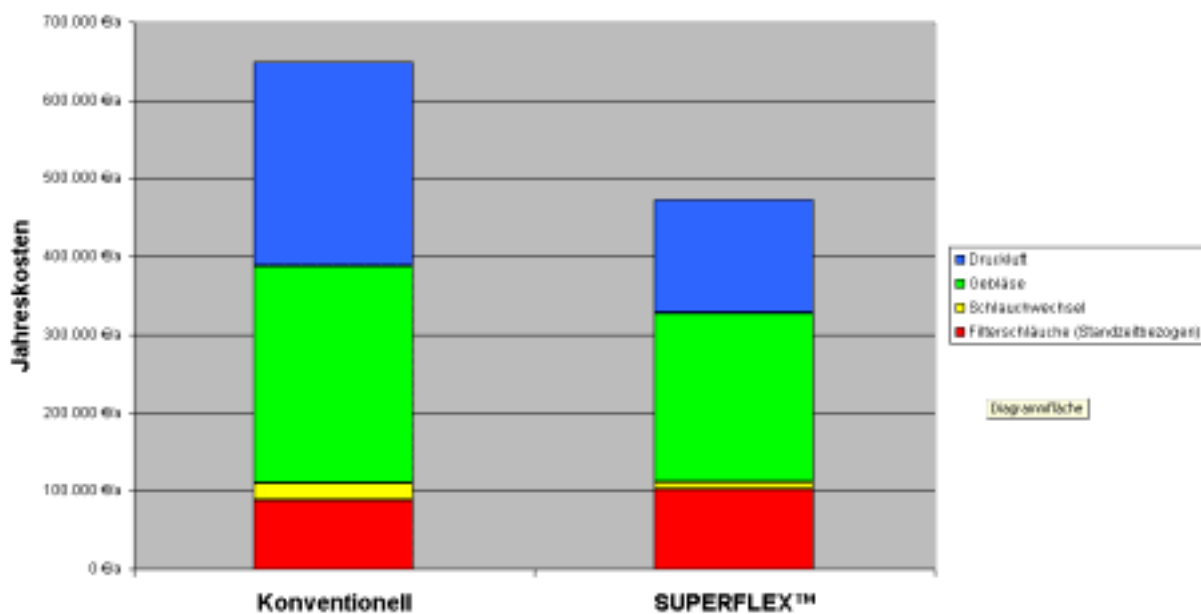


Abb. 20 Betriebskosten Filteranlage

8 Praxisbeispiele

In den vorangegangenen Abschnitten wurde aufgezeigt, welche Parameter einen Einfluss auf das Design, die Ausführung und die Betriebsweise von Staubfilteranlagen haben und wie ein optimales Filtermedium ausgewählt wird. Es ist nicht verwunderlich, dass sich in der industriellen Praxis bei prozess-wichtigen Filtern kaum Standardanlagen durchsetzen konnten. Fast jede Anlage wird speziell auf die Erfordernisse und Bedürfnisse der vor- und nachgeschalteten Prozesse abgestimmt und für den jeweils abzuscheidenden Staub optimiert. Die nachfolgende Galerie zeigt einige ausgeführte Anlagen mit einigen wichtigen Betriebsparametern.

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH



Abb. 21

***Titandioxid-Pigment Dampfstrahlmühle, 43.000 Bm³/h, Filterfläche 1100 m²
Filtermaterial PPS-Nadelfilz oder GORE-TEX[®] Membran auf GORE-TEX[®] Filz***



Abb. 22

***Waschmittelherstellung, Trockner/Kühler-Filter / 70.000 bzw. 30.000 Bm³/h /
Filterfläche 420 m² bzw. 180 m², Filtermedium : Polyester-Nadelfilz***

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH



Abb. 23

Kieselsäure-Trocknung, 102.000 bzw. 19.000 Bm³/h, Filterfläche 1500 m² bzw. 260 m²



Abbildung 24

**Abscheidung diverser Metallstäube, über 1 Mio. Bm³/h, Filterfläche ca. 6000 m²,
Filtermaterial: GORE-TEX[®] Filterschläuche**

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH



Abb. 25

Katalysatorherstellung auf Zeolith-Basis, Kopfplatte reingasseitig nach über einem Jahr Betrieb mit GORE-TEX® Amazon™ Filterschläuchen



Abb. 26

Pharmaproduktion / Wirbelschichtgranulator, Multifilter aus GORE-TEX® High Durability Polyesterfilz mit GORE-NO STAT® Fasern

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH



Abb. 27

Rauchgasreinigung Hausmüllverbrennung, Katalytisches REMEDIA Filtersystem

W. L. Gore & Associates GmbH

Ansprechpartner: Dr. Ole Petzoldt
Wernher-von-Braun-Str. 18
85640 Putzbrunn
Tel.: 0800 865 12 90
Fax: 089 46 12 23 08
Email: opetzold@wlgore.com
www.gore.com/filtration

MikroPul GmbH & Co. KG

Ansprechpartner: Stefan Hajek
Welserstrasse 9-11
51149 Köln
Tel.: 02203 93 91 0
Fax: 02203 93 91 293
Email: s.hajek@mikropul.de
www.mikropul.de

"Moderne Entstaubungstechnik mit Oberflächenfiltern"

Eine gemeinschaftliche Information der Firmen MikroPul GmbH & Co. KG und W.L. Gore & Associates GmbH

Abbildungsverzeichnis

Abbildung Nr.	Inhalt
1	Abscheidegrade unterschiedlicher Staubabscheider
2	Druckverlustverlauf eines Schlauchfilters
3	Emissionskurve
4	Aufbau eines Schlauchfilters
5	Strömungsgleichrichter
6	Prinzipskizze eines Rüttelfilters
7	Prinzipskizze eines Rückspülfilters
8	Prinzipskizze eines Pulse-Jet-Filters
9	Zusammensetzung des Filterwiderstandes
10	Aufbau Pulse-Jet-System
11	Druckimpulsverteilung in einem starren Filterelement
12	Druckluftverbrauch und Abreinigung
13	Druckverlauf am Blasrohr
14	Injektionsverhältnis eines Pulse-Jet-Systems
15	Schnitt durch ein GORE-TEX® Membranmaterial
16	Differenzdruckverhalten Filterfilz und GORE-TEX®
17	SINBRAN® Filterelement
18	Reingas hinter einem Heißgasfilter über der Temperatur
19	Investitionskosten Filteranlage
20	Betriebskosten einer Filteranlage
21	Titandioxid-Pigment Dampfstrahlmühle
22	Waschmittelherstellung, Trockner/Kühler-Filter
23	Kieselsäure-Trocknung
24	Abscheidung diverser Metallstäube
25	Katalysatorherstellung
26	Pharmaproduktion / Wirbelschichtgranulator
27	Rauchgasreinigung Hausmüllverbrennung

Tabellenverzeichnis

Tabelle Nr.	Inhalt
1	Grenzwerte nach TA Luft
2	Einflussfaktoren auf die Filterflächenbelastung
3	Auslegungsparameter für Gewebefilteranlagen
4	Auswahl des Trägermediums