

Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft

Air Quality Control

Herausgeber: BGIA – Institut für Arbeitsschutz und Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL

Energieeffiziente Jet-Pulse-Entstaubungsanlagen

G.-M. Klein, T. Schrooten, T. Neuhaus, R. Kräbs

Zusammenfassung Der spezifische Energiebedarf von Jet-Pulse-Schlauchfiltern zur industriellen Entstaubung kann durch eine Kombination konstruktiver und steuerungstechnischer Maßnahmen um 30 % gegenüber früheren Ausführungen gesenkt werden. Die größten Effekte werden durch den Offline-Betrieb der Filteranlage in Kombination mit einem Ringspalt-Coanda-Injektor erzielt. Durch vollständige Abreinigung und Sedimentation der an der Schlauchoberfläche abgeschiedenen Filterkuchen, wird die sogenannte innere Staubzirkulation unterbunden und die Staubfracht an den Filterschläuchen reduziert. Die weitere Senkung des Energiebedarfs, insbesondere die Reduzierung des Druckluftverbrauchs, wird mittels Niederdruckabreinigung und einer bedarfsgerechten Abreinigungssteuerung realisiert, bei der der Vordruck im Drucklufttank kontinuierlich nachgeregelt wird. Die Verbesserungen sind in einer neuen Filterbaureihe implementiert, die bei geringer innerer Varianz eine maximale äußere Varianz zur Erfüllung kundenspezifischer Anforderungen gestattet.

Jet-pulse baghouse filters with enhanced energy efficiency

Abstract By combining of innovative design solutions of jet-pulse baghouse filters with a new filter control system, a reduction of the specific dedusting energy consumption of 30% has been achieved. The offline operation mode in combination with the annular-gap-coanda injection system were the most important measures. With this, the complete removal and sedimentation of the filter cake can be secured. Therefore the so-called "inner dust circulation" will be eliminated with the consequence of a significant reduction of the average pressure drop of the filter cake. In parallel, the consumption of pressurized air will be reduced by low pressure cleaning and continuous adjustment of the air tank pressure controlled by the current requirements of the dedusting plant. The improvements were realized within a new modular filter line which offers a maximum variability according to the customer needs by having a limited inner design variance.

1 Einführung

Schlauchfilter sind in zahlreichen industriellen Prozessen die wichtigste Filtergattung zur Abscheidung von Partikeln

Dr.-Ing. Gunnar-Marcel Klein, Dipl.-Ing. Theo Schrooten,
Dipl.-Ing. (FH) Tim Neuhaus, Dipl.-Ing. Rainer Kräbs,
Intensiv-Filter GmbH & Co. KG, Velbert.

aus Gasströmen. Als grundsätzlicher Technologievorteil ist die problemlose Einhaltung aktueller Emissionsgrenzwerte in einem einstufigen Prozess – bei hohen Volumenströmen und Staubbelastungen – zu nennen. Diese Vorteile haben in den letzten Jahren zur Substitution von Zentrifugalabscheidern und elektrostatischen Abscheidern durch filternde Abscheider im Allgemeinen und Schlauchfilter im Besonderen geführt. Obwohl Schlauchfilter im Vergleich zu vielen optionalen Verfahren und Apparaten einen geringeren Energiebedarf aufweisen, wurde die Energieeffizienz dieses Filtertyps kontinuierlich gesteigert. Dieser Trend hat sich aktuell noch verstärkt.

Der Übergang von Verfahren der Spülluftabreinigung zur Jet-Pulse-Abreinigung hat durch die wirksame Entfernung der sich periodisch ablagernden Filterkuchen erheblich zur Steigerung der Energieeffizienz beigetragen [1 bis 4]. **Bild 1** zeigt den schematischen Aufbau eines Jet-Pulse-Filters.

Diese Bauart zeichnet sich hierbei durch eine Zuführung des Rohgases im Kreuzstrom aus. Das Rohgas wird über eine Verteilerplatte geführt, an der eine Vorabscheidung stattfindet und der Rohgasstrom im Filtergehäuse gleichmäßig und im Kreuzstrom an die Filterschläuche geführt wird. Die Abscheidung der Partikeln findet an der Oberfläche des Filtermediums bzw. an der Oberfläche des sich darauf abscheidenden Filterkuchens statt. Die entsprechenden Strömungswiderstände resultieren aus den Druckverlusten des Filterkuchens Δp_{FK} und des Filtermediums direkt nach der Jet-Pulse-Abreinigung (Restdruckverlust Δp_0). Das gereinigte Gas strömt nach oben aus dem Schlauch ab. Insbesondere bei langen Schläuchen, z. B. Schlauchlänge von 8 m bei einem Schlauchdurchmesser von 160 mm, und hohen Filterflächenbelastungen ($> 1,2 \text{ m}^3/\text{min}$) ist der Druckverlust der Schlauchinnenströmung Δp_{SI} ebenfalls von Bedeutung. Sämtliche weiteren Strömungswiderstände – Rohgaseintritt bis Filterkuchenoberfläche, Reingasströmung ab Schlauchaustritt bis Austritt Reingaskanal – werden im Gehäusedruckverlust Δp_G zusammengefasst. **Bild 1** zeigt das Energieflussbild eines Jet-Pulse-Filters bei Standardbedingungen.

2 Steigerung der Energieeffizienz durch konstruktive Optimierung des Filtergehäuses und der Zuleitungen

Mit 59 % des Gesamtenergiebedarfs verursacht der Druckverlust des sich reversibel aufbauenden Filterkuchens den

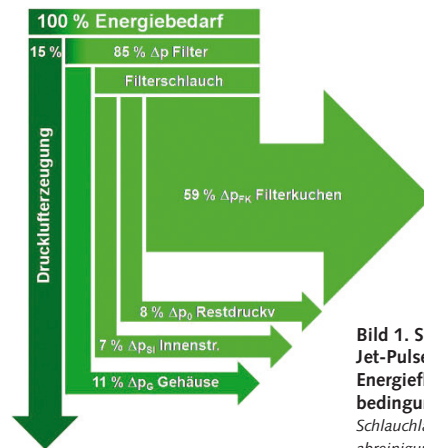
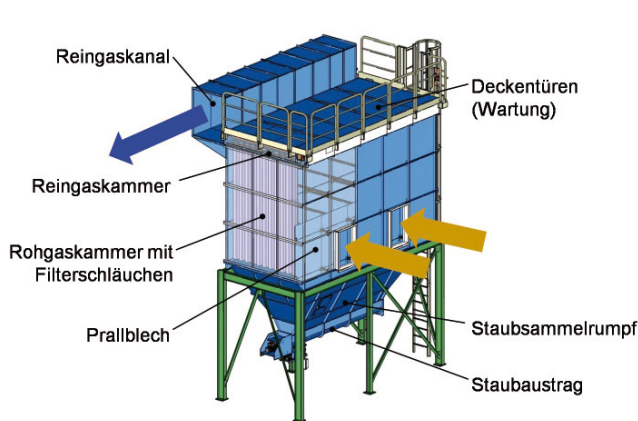


Bild 1. Schematische Darstellung eines Jet-Pulse-Filters im Online-Betrieb und Energieflussbild bei Standardbedingungen. Filterflächenbelastung: 1 m/min, Schlauchlänge: 6 m, Tankdruck der Druckluft-abreinigung: 0,6 MPa.

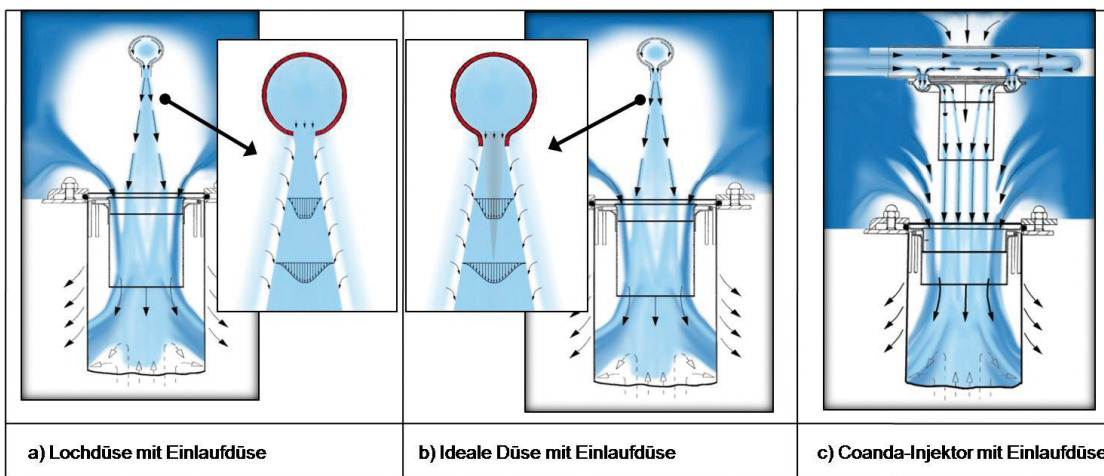


Bild 2. Vergleich verschiedener Injektorsysteme.

weitaus größten Anteil. Im Online-Betrieb werden in der Rohgaskammer befindliche Partikeln ständig anfiltriert. Direkt nach der Jet-Pulse-Abreinigung ist die Partikelkonzentration extrem hoch. In diesem Zustand kommt es, insbesondere bei feindispersen Stäuben mit geringer Agglomerationsneigung, zum Wiederanfiltrieren abgereinigter Partikeln. Diese „innere“ Staubzirkulation kann einen erheblichen Anteil an der Filterkuchenmasse verursachen und trägt damit zum Druckverlust Δp_{FK} bei. Als wesentliche apparative Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz werden Filtermodule der Filteranlage durch roh- und/oder reingasseitige Absperrorgane – Klappen, Schieber, Ventile – im sog. Offline- oder Semi-offline (nur reingasseitige Abtrennung)-Betrieb während der Abreinigung in einen strömungslosen Zustand versetzt. Hierdurch wird die mögliche Wiederanlagerung von Staubschichten wirksam unterbunden. Parallel kann im Offline-Betrieb die Abreinigung mit einem Impuls geringerer Intensität erfolgen (Speicherdruck im Druckluftbehälter: 1 bis 4 bar) [5]. Neben einer signifikanten Reduzierung des Druckverlusts des Filterkuchens als Haupteffekt werden damit auch die Druckluftverbräuche deutlich gesenkt. Filter im Offline-Betrieb und mit Niederdruckabreinigung können mit einem Druckluftverbrauch $< 10 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$ betrieben werden. Dies entspricht einer Reduzierung gegenüber konventionellem Betrieb um bis zu 90 %. Im Mittel wird in der betrieblichen Praxis eine Reduzierung um 70 % erreicht.

Durch die im Offline-Betrieb notwendige Unterteilung des Filters in abschaltbare Kammern steigt der konstruktive Aufwand, z. B. durch zusätzliche pneumatisch betätigte Klap-

pen. Die in Abreinigung befindliche Sektion reduziert zudem die im Filtrationsbetrieb befindliche Filterfläche und erhöht damit die Druckverluste Δp_G , Δp_{SI} , Δp_0 und Δp_{FK} . Die o. g. Vorteile überwiegen jedoch bei Weitem, sodass sich die Offline-Bauart bei größeren Filteranlagen durchgesetzt hat. Weitere Vorteile sind in der durch die Niederdruckabreinigung geringeren mechanischen Belastung und damit höheren Standzeit der Filterschläuche sowie in der geringeren Geräuschemission zu sehen.

Der Druckverlustanteil Δp_G kann durch den Einsatz leistungsfähiger CFD¹⁾-Programme reduziert werden. Allein die sinnvolle Positionierung von Leitblechen kann die Druckverluste z. B. im Rohgaskanal um über 20 % senken [6].

3 Evolution der Injektortechnologien

Für einen energieeffizienten Betrieb einer Jet-Pulse-Filteranlage ist das Injektorsystem von entscheidender Bedeutung. Die Abreinigung hat so zu erfolgen, dass sich der Filterkuchen über die gesamte Schlauchlänge vollständig ablöst. Parallel ist das Zurückschlagen des Mediums auf den Stützkorb (Teppichklopfeffekt) durch entsprechende Modulation des Druckverlaufs zu minimieren. Konventionelle Injektorsysteme bestehen aus einem Blasrohr mit einfachen Bohrungen als Lochdüsen (sog. Nozzle Injektor, Bild 2 a). Eine deutliche Verbesserung bei der Umwandlung der statischen Druckenergie im Blasrohr in einen gerichteten

¹⁾ CFD: computational fluid dynamics

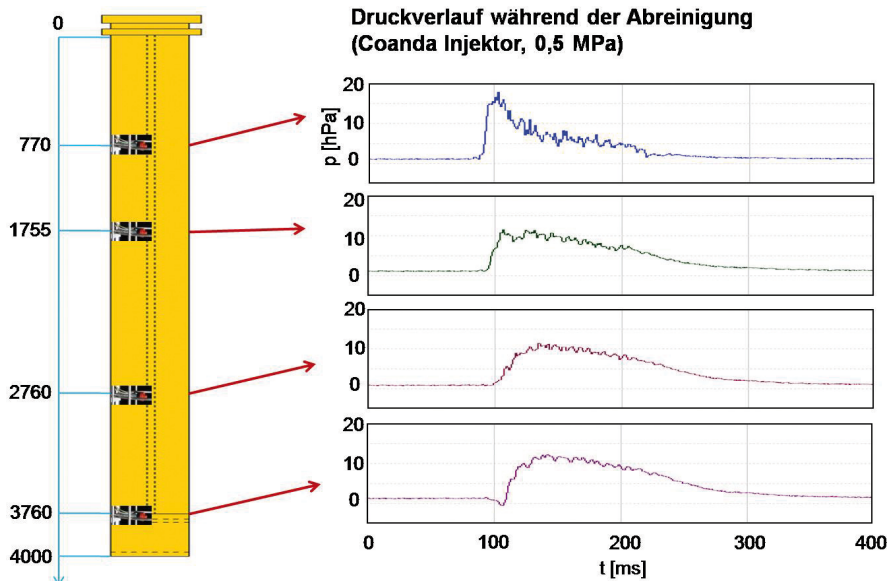


Bild 3. Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der lokalen Druckverläufe in einem Filterschlauch mit piezoresistiven Drucksensoren.

Druckluftstrahl wird durch Aushalsung der Düsen zu einer idealen Düse erreicht (Bild 2 b). Das unter dem Namen Coanda-Injektor entwickelte Abreinigungssystem nutzt den sog. Coanda-Effekt aus, bei dem die Druckluft aus einem Ringspalt austritt und über eine gewölbte Oberfläche geführt wird. Die Primärluft folgt dabei der Grenzschicht, die durch die Geometrie des Coanda-Injektors nicht abschließt. Dabei entsteht innerhalb der ersten Injektorstufe ein extrem hoher Unterdruck, der weitere Sekundärluft ansaugt und einen Treibstrahl ausbildet, der gegenüber den zuvor beschriebenen Varianten eine deutlich erhöhte Luftmenge aufweist (Bild 2 c). Dieser Treibstrahl tritt in die Einlaufdüse als zweite Injektorstufe, in der weitere Sekundärluft angesaugt wird. Als positiver Nebeneffekt wird der Druckverlust der Schlauchinnenströmung Δp_{SI} reduziert, da die zweite Injektorstufe, im Vergleich zu den bei gängigen Nozzle-Injektoren verwendeten Einlauf- oder Venturidüsen, mit größerem Durchmesser ausgeführt werden kann.

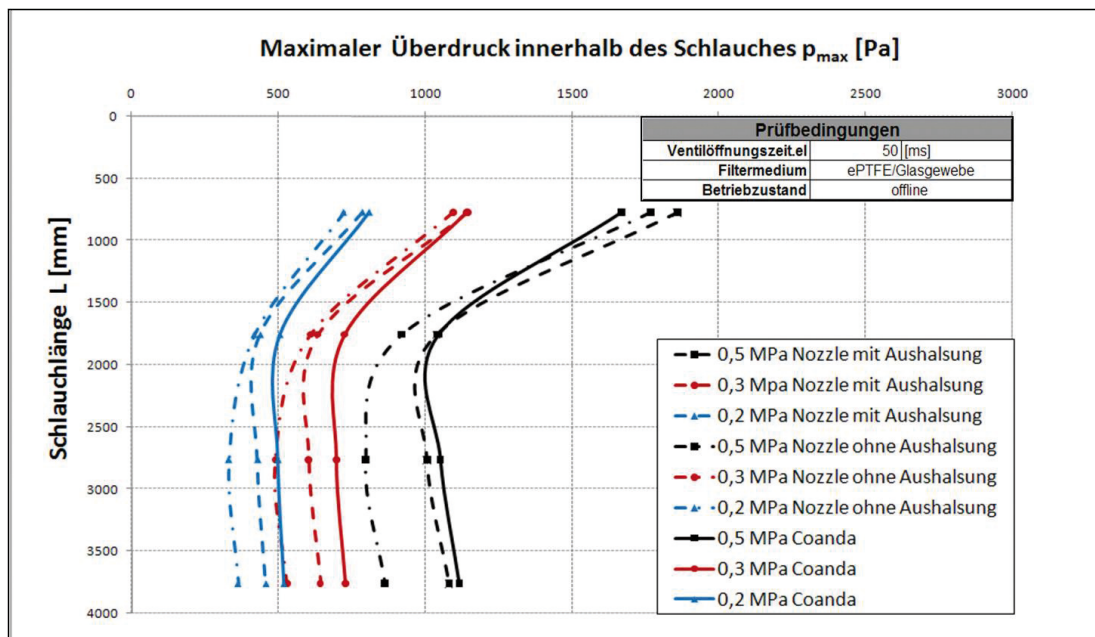


Bild 4. Lokaler Verlauf des Überdrucks im Filterschlauch bei Variation des Tankdrucks und Verwendung unterschiedlicher Injektorsysteme.

Zur Beschreibung der Effektivität von Abreinigungssystemen hat sich der maximale Überdruck und der Druckstoß, d. h. das Flächenintegral unterhalb des positiven Teils des Druckverlaufs, als geeignet erwiesen [7]. Zum Vergleich der Effektivität der vorgestellten Abreinigungssysteme wurden im Versuchstechnikum Untersuchungen mit einem für diese Aufgabe entwickelten Versuchsaufbau durchgeführt. Die eingesetzten piezoresistiven Drucksensoren weisen einen Messbereich von - 50 bis 50 hPa auf und werden über eine Messwerterfassung mit sehr hoher Abtastfrequenz angesteuert. Die Messungen erfolgten im strömungslosen Zustand (Offline-Betrieb) bei Verwendung eines Membran-Composite-Filtermediums (ePTFE/Glas) und einer Schlauchlänge von 4 m. Die Aufnahme des lokalen und zeitlichen Druckverlaufs erfolgte für alle Injektorsysteme bei Variation des Vor- drucks (Tankdrucks) von 0,2 bis 0,5 MPa.

Bild 5 zeigt schematisch die Anordnung der piezoresistiven Drucksensoren im Schlauch und die Ausprägung der Druckverläufe innerhalb des Schlauchs. Deutlich wird, dass der am Schlauchkopf noch sehr steile Anstieg des Druckimpulses zur Schlauchmitte hin abflacht und am Schlauchende wieder zunimmt.

Die Gegenüberstellung des maximalen Überdrucks in Bild 4 zeigt, dass dieser am Schlauchkopf die höchsten Werte annimmt und zur Schlauchmitte stark abfällt. Zum Schlauchende wird ein leichter Anstieg erkennbar, der auf die Reflexion der Druckwelle am Schlauchboden zurückzuführen ist. Dieser charakteristische Druckverlauf über die Schlauchlänge wurde bereits von Sievert [7] in Messungen mit einem Filterschlauch der Länge 2,4 m gefunden.

Der in Bild 5 dargestellte Druckstoß zeigt bei hohen Abreinigungsdrücken einen gleichmäßigeren Verlauf mit kontinuierlichem Anstieg zum Schlauchboden hin. Im direkten Vergleich der Injektorsysteme zeigt sich, dass unabhängig

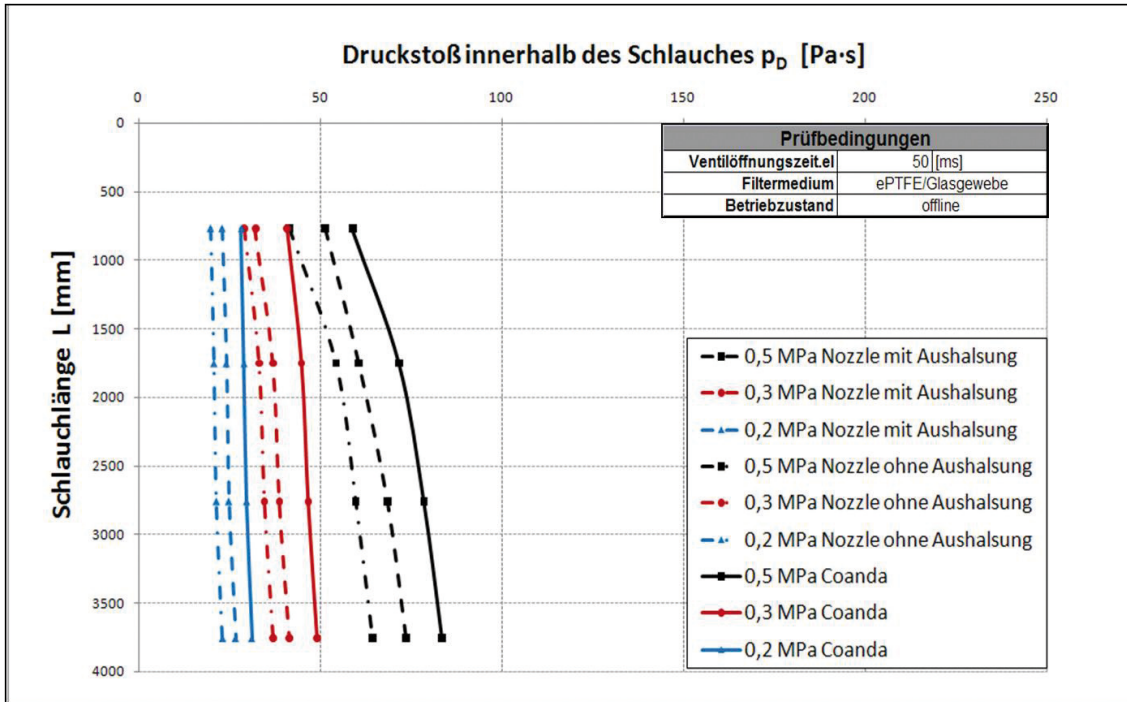


Bild 5. Lokaler Verlauf des Druckstoßes im Filterschlauch bei Variation des Tankdrucks und Verwendung unterschiedlicher Injektorsysteme.

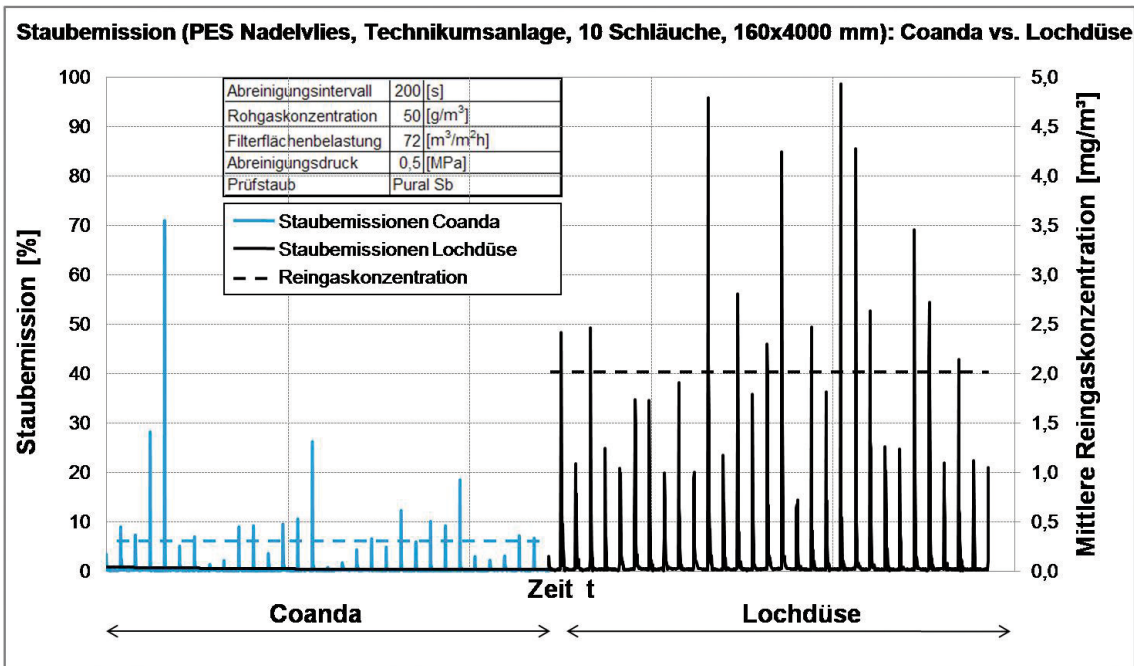


Bild 6. Einfluss des Injektorsystems auf die Reingaskonzentration. Filterflächenbelastung: 1,2 m³/min, Teststaub: Pural Sb

vom Tankdruck der Druckstoß und damit die Abreinigungsintensität in der Reihenfolge Lochdüse, ideale Düse und Coanda-Injektor zunimmt. Der für eine Entfernung des Filterkuchens an jeder Stelle des Filterschlauchs erforderliche Mindestwert des Überdrucks und Druckstoßes wird vom Coanda-Injektor und der idealen Düse im Vergleich zu konventionellen Injektorsystemen bereits bei erheblich geringeren Tankdrücken erreicht. Verbesserte Injektorsysteme erzielen damit eine Reduzierung des Druckluftverbrauchs bzw. bei gegebenem Druckluftverbrauch erheblich höhere Abreinigungsintensitäten.

Zur Beurteilung des Einflusses des Injektorsystems auf das Emissionsverhalten wurden Messungen des zeitlichen Verlaufs der Reingaskonzentration mit einem triboelektrischen Sensor vorgenommen und die mittlere Reingaskonzentration in Anlehnung an VDI 2066 ermittelt (Bild 6). Der Coanda-Injektor zeigt hierbei im Vergleich zu einem Nozzle-In-

jektor (ideale Düse) um 80 % geringere Reingaskonzentrationen. Dieses positive Verhalten deutet auf eine extrem schonende Abreinigung des Coanda-Injektors trotz höheren Druckstoßes hin. Diese Charakteristik kann zumindest qualitativ über die höhere Spülluftmenge des Coanda-Injektors im Vergleich zu Nozzle-Injektoren erklärt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Energieeffizienz von Filteranlagen mit verbesserten Injektorsystemen gesteigert werden kann. Der Coanda-Injektor weist hierbei im Vergleich von drei untersuchten Injektorsystemen den mit Abstand höchsten Druckstoß auf. Damit können auch problematische Ablagerungen sicher entfernt werden, was zu einer Reduzierung der mittleren Deckschichtmasse gegenüber Systemen mit unvollständiger Abreinigung führt. Daraus resultiert eine Reduzierung des Druckverlusts Δp_{FK} und die Steigerung der Energieeffizienz der Filteranlage.

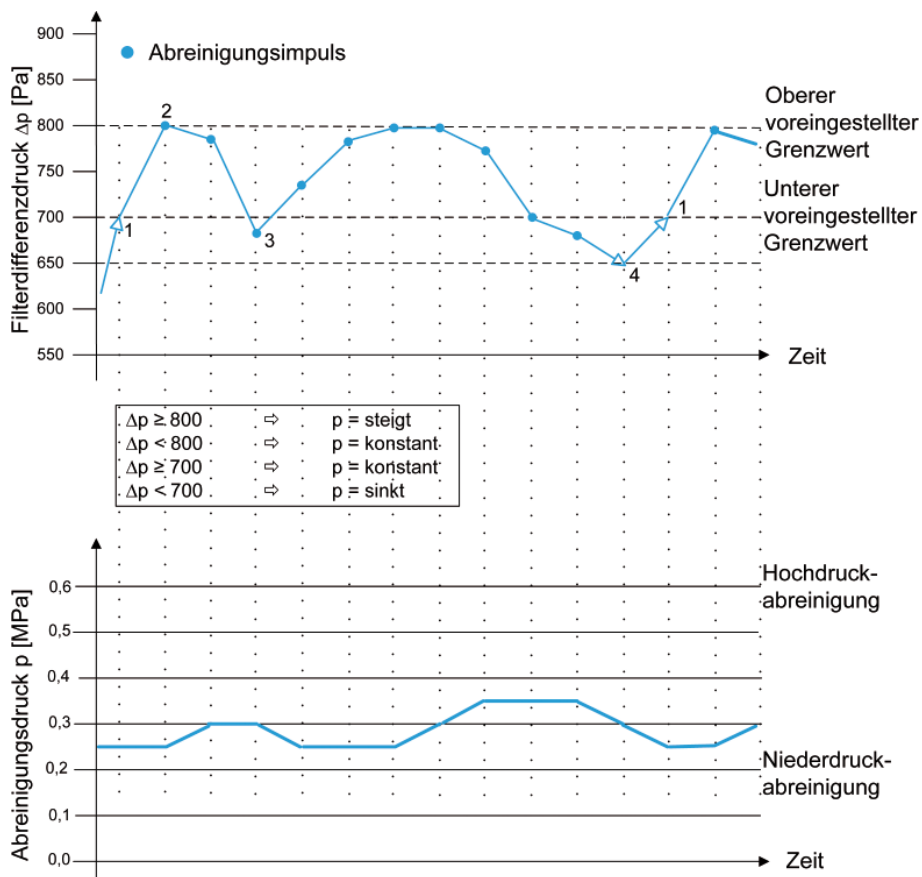


Bild 7. Abreinigungsschema JetBus Controller® mit Vordruckregelung.

4 Optimierung der Abreinigungssteuerung

Die Abreinigungssteuerung erfolgt heutzutage über Mikroprozessortechnik und Feldbussysteme. Die Filtersteuerung JetBus Controller® ist ein dezentrales modular aufgebautes Steuerungssystem. Neben der Steuerung der Membranventile werden die pneumatisch oder elektrisch betätigten Roh- und Reingasklappen angesteuert und Signale von Feldsensoren, z. B. „Broken-bag-Wächtern“, verarbeitet. Bei Taktung der Druckstöße wird zwischen einer festen Zeitsteuerung und der Differenzdrucksteuerung mit variablen Zykluszeiten unterschieden. Der JetBus Controller® bietet einen zusätzlichen Steuerungsparameter, mit dem eine bedarfsgerechte Abreinigung vorgenommen werden kann. Über die kontinuierliche Anpassung des Tankdrucks wird der Druckluftbedarf den jeweils vorherrschenden Betriebsbedingungen angepasst. Als Regelgröße dient hierbei der Filterdifferenzdruck.

Bild 7 zeigt die Regelcharakteristik der Vordruckregelung. Im oberen Diagramm ist der Filterdifferenzdruck, im unteren der Tankdruck dargestellt. Auf Position 1 wird die Abreinigung eingeschaltet. Der Abreinigungsdruck bleibt solange unverändert, bis der obere maximal zugelassene Grenzwert (800 Pa) des Differenzdrucks erreicht wird (Pos. 2). Danach wird der Abreinigungsdruck erhöht. Bei Unterschreitung des unteren Grenzwerts (Pos. 3) wird der Abreinigungsdruck verringert. Innerhalb einer vorgegebenen Messzeit prüft das Abreinigungssystem die Anlagenparameter und stellt sich auf die veränderten Daten ein. Unterschreitet der Filterdifferenzdruck den unteren maximal zugelassenen Grenzwert (700 Pa) und fällt weiter ab (Pos. 4), schaltet das System die Abreinigung aus. Erst bei erneutem Erreichen des unteren maximal zugelassenen Grenzwerts schaltet sich die Abreinigung wieder ein. Bleibt die Abreinigung aufgrund des niedrigen Filterdifferenzdrucks über einem vorzuge-

benden Zeitintervall ausgeschaltet, erfolgt eine Zwangsabreinigung, um ggf. einen zu großen Staubanfall zu vermeiden.

Die Vordruckregelung gestattet die Einhaltung des gewünschten Anlagenbetriebspunkts bei minimalem Druckluftverbrauch. Die bedarfsgerechte Abreinigung sorgt weiterhin für eine Vergleichmäßigung des Staubanfalls und damit eine bessere Ausnutzung der Kapazität der Staubaustragsorgane. Parallel werden die mechanische Belastung des Filterschlauchs minimiert und damit die Serviceintervalle der Filteranlage erhöht.

5 Filteranlagen mit gesteigerter Energieeffizienz

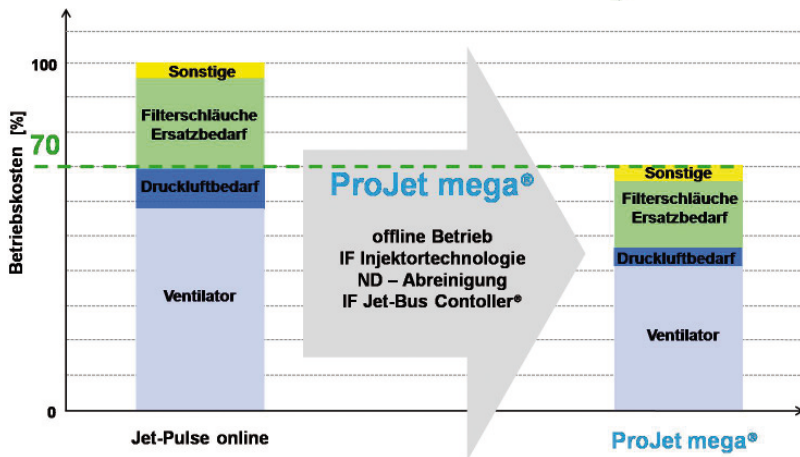
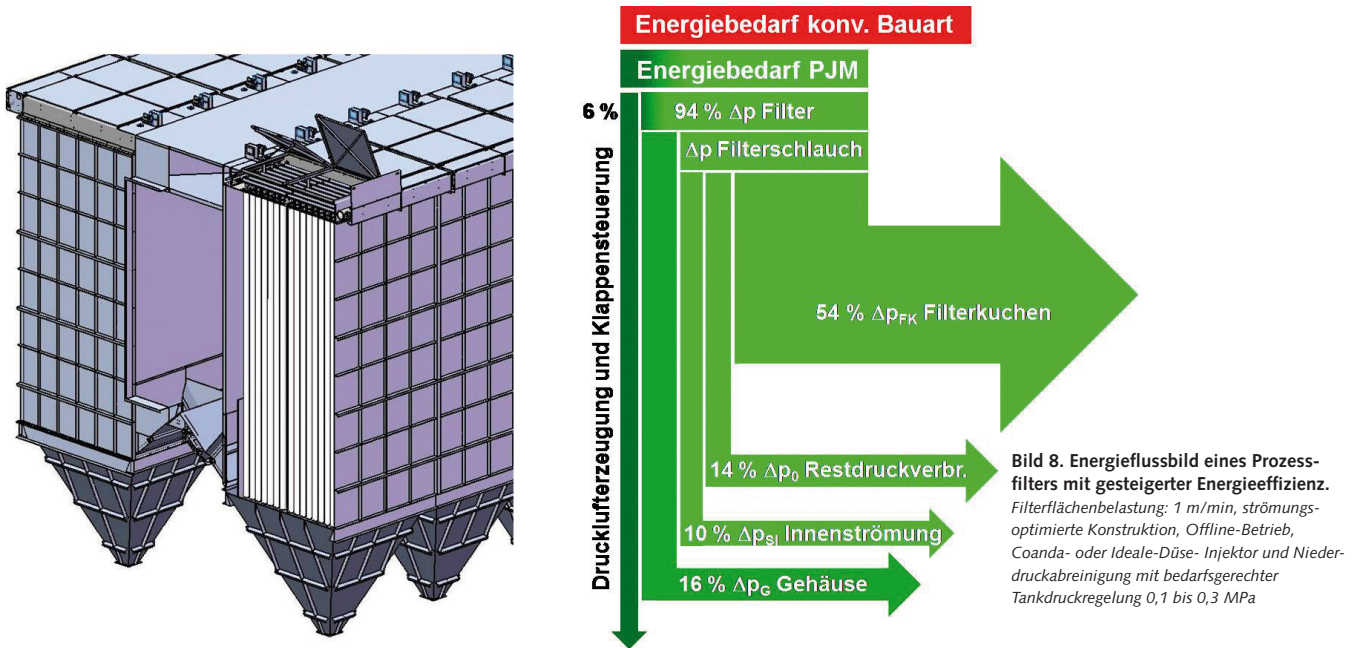
Die neu entwickelte Baureihe ProJet mega® beinhaltet sämtliche, in den Abschn. 2 bis 4 beschriebenen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Konstruktiv zeichnet sich die Baureihe durch die in Abschn. 2 gezeigte strömungsseitige

Optimierung und durch vergrößerte Basiseinheiten (Filtermodule) aus. Die Zahl der Filtermodule wurde von fünf auf acht Injektorrohre je Modul erhöht. Durch Standardisierung auf der Basis der Einzelteile konnte, bei geringer innerer Varianz, eine Plattform mit maximaler äußerer Varianz realisiert werden.

Bei Umsetzung der genannten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sinkt der zur Entstaubung eines gegebenen Gasvolumens benötigte Energieaufwand um 30 % (**Bild 8**). Hierzu trägt die Reduzierung des Druckluftverbrauchs von 15 auf 6 %, bezogen auf den gesamten Energiebedarf, überproportional bei. Der Haupteffekt wird jedoch durch die gekammerte Ausführung des Filters und Abschaltung von Modulen während der Abreinigung erzielt. Durch diese Maßnahme sinkt die Netto-Staubbelastung und damit der Filterkuchenwiderstand Δp_{FK} .

Die Netto-Staubbelastung kann prinzipiell auch durch vorgeschaltete Zyklone reduziert werden. Diese trennen jedoch bevorzugt die Grobfraction des Staubs ab, was trotz geringerer Staubbelastungen im Schlauchfilter zu höheren Filterwiderständen führen kann. Auch im Online-Betrieb kann durch das Wiederanfiltrieren des abgesprengten Filterkuchens ein Klassiereffekt auftreten, indem bevorzugt die langsam sedimentierende Feinfraktion im Filterkuchen angereichert wird.

Betriebserfahrungen mit Filteranlagen in energieeffizienter Ausführung [8] und erste Betriebserfahrungen mit Filteranlagen der Baureihe ProJet mega® zeigen eine Reduzierung der Betriebskosten gegenüber Jet-Pulse-Schlauchfiltern konventioneller Bauart um 30 % (**Bild 9**). Damit stehen leistungsfähige Filteranlagen mit gesteigerter Energieeffizienz zur Verfügung, deren Betriebskosten, bei geringeren Investitionskosten und deutlich höheren Abscheidegraden, das Niveau von Elektrofiltern erreicht haben. Weitere Verbesserungspotenziale bestehen in der Reduzierung der irre-



versiblen und reversiblen, durch die Staubabscheidung bedingten Druckverlustanteile (Δp_0 , Δp_{FK}). Hierbei sind insbesondere die Parameter des Filtermediums, auf die in die-

ser Arbeit nicht eingegangen wurde, von Bedeutung. Die Reduzierung dieser Druckverlustanteile ist Gegenstand laufender Entwicklungsarbeiten.

Literatur

- [1] Meyer zu Riemsloh, H.: Abreinigung von Faserstofffiltern unter Druckluft. Zement-Kalk-Gips 31 (1978) Nr. 7, S. 355-359.
- [2] Löffler, F.: Staubabscheiden. Stuttgart: Georg Thieme 1988.
- [3] Entstaubungstechnik, Filtermedien. Intensiv-Filter Taschenbuch. Hrsg.: Intensiv-Filter. 3. Aufl. Velbert 1989.
- [4] Schrooten, T.: Praxisberichte zum Einsatz von Oberflächenfiltern. In: Handbuch zum Seminar „Feinstaub – Charakterisierung, Minderung und Abscheidung“ in Ratingen vom 23. bis 24. September 2008. Düsseldorf: VDI-Wissensforum 2008.
- [5] Meyer zu Riemsloh, H.; Kordas, F.: Entstaubung großer Abgasvolumenströme mit filternden Abscheidern. Aufbereitungstech. 33 (1992) Nr. 12, S. 673-683.
- [6] Klein, G.-M.; Schrooten, T.; Neuhaus, T.; Lange, J.; Esser, R.; Ott, F.; Brasch, P.; Daniel, T.: Energieeffiziente Schlauchfilteranlagen. Vortrag ProcessNet-Fachausschuss Gasreinigung am 30./31. März 2009, Frankfurt.
- [7] Sievert, J.: Physikalische Vorgänge bei der Regenerierung des Filtermediums in Schlauchfiltern mit Druckstoßabreinigung. VDI-Fortschrittsberichte Nr. 161. Düsseldorf: VDI 1988.
- [8] Esser, R.: Kiln bag filter conversion at Dyckerhoff Zement's Geseke plant. Global Cement Magazine (2008) Juli/August, S. 7-9.