Übersichtsbeitrag

Reduzierung des Energiebedarfs industrieller Entstaubungsanlagen

Gunnar-Marcel Klein, Theo Schrooten* und Tim Neuhaus

DOI: 10.1002/cite.201100251

Die Förderung gasförmiger Prozess- und Abluft-Ströme, und damit verbunden der Druckverlust der Entstaubungsanlage, verursacht einen Großteil des elektrischen Energieverbrauchs industrieller Anlagen. Die Reduzierung des Druckverlustes der Entstaubungsanlagen ist hierbei der Schlüssel zur Erhöhung der Energieeffizienz. Die vorgestellten experimentellen Ergebnisse ermöglichen den wissensbasierten Einsatz von Filterschläuchen bis zu 12 m Länge. Zusammen mit geeigneter Injektortechnik und neu entwickelten Filtermedien kann der Energiebedarf für die Entstaubung um über 40 % gesenkt werden. Das vorgestellte Filter-Expertensystem gestattet die schnelle Identifikation von Energie- und Betriebskostensenkungen für neue und bestehende Filteranlagen.

Schlagwörter: Abgasreinigung, Entstaubung, Filtration, Mikrofaser-Filtermedien, Schlauchfilter

Eingegangen: 13. Dezember 2011; *revidiert:* 12. April 2012; *akzeptiert:* 16. April 2012

Reduction of Energy Demand for Industrial Dedusting Plants

The conveying of gaseous process and exhaust air flows, and associated with it the pressure loss of the dedusting plant, causes a large part of the electric energy consumption of industrial installations. The reduction of the pressure loss of the dedusting plants is in this respect the key for the increase of energy efficiency. The introduced experimental results allow the knowledge-based application of filter bags up to 12 m length. Together with suitable injector technology and new developed filter media the power demand for the dust removal can be lowered about over 40 %. The introduced filter expert system permits the prompt identification of energy and operating expense lowering for new and existing filtering installations.

Keywords: Bag filter, Dedusting, Exhaust air cleaning, Filtration, Microfiber filter media

1 Stand der Technik und Problemstellung

Filternde Abscheider und insbesondere Schlauchfilter sind in zahlreichen industriellen Prozessen die wichtigste Filtergattung zur Abscheidung von Partikeln aus Gasströmen. Gegenüber anderen Verfahren der Staubabscheidung (elektrostatische Abscheider, Wäscher, Zyklone) bieten Schlauchfilter den Vorteil, auch bei höchsten Rohgasstaubbeladungen aktuelle und künftige Emissionsgrenzwerte in einem einstufigen Prozessschritt einzuhalten. Neben der zwingenden Notwendigkeit Schlauchfilter zur Einhaltung der gesetzlichen Umweltvorschriften einzusetzen, nimmt die Zahl der Installationen zur Produktrückgewinnung aus Abgas- und Abluftströmen stetig zu. Durch die Möglichkeit, das im Abluftstrom befindliche Wertprodukt nahezu vollständig zurück zu gewinnen, macht sich die Investition in einen modernen Jet-Pulse-Schlauchfilter bereits nach ein bis zwei Jahren bezahlt. Als Beispiel seien CIP-fähige Edelstahl-Rundfilter zur Abtrennung von Milchpulver und Proteinen hinter Sprühtrocknungsanlagen genannt (Abb. 1, [1]).

Moderne Schlauchfilter in Reihenfilterbauweise sind heute modular aufgebaut. Mittels eines Baukastensystems lässt sich aus einer relativ kleinen Anzahl an Einzelteilen eine hohe Varianz an Filteranlagen darstellen. Der typische, mit einem Filter zu entstaubende Gasvolumenstrombereich umfasst einen Bereich von unter 1000 m^3h^{-1} bis 2 000 000 m^3h^{-1} und darüber. Der modulare Aufbau eines größeren Prozessfilters ist in Abb. 2 dargestellt. Sowohl die Rohgas- als auch die Reingasleitung sind mittig zwischen den modularen Filterkammern angeordnet. Abb. 3 zeigt exemplarisch einen Schlauchfilter der Intensiv-Filter ProJet mega® Baureihe zur

Dr.-Ing. Gunnar-Marcel Klein, Theo Schrooten (theo.schrooten@intensiv-filter.com), Tim Neuhaus, Intensiv-Filter GmbH & Co. KG, Voßkuhlstraße 63, 42555 Velbert-Langenberg, Deutschland.

 © 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

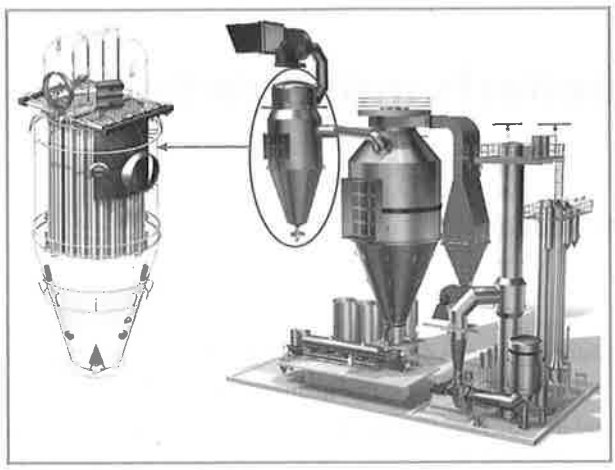

Abbildung 1. Links: Sprühtrockner mit CIP-fähigem Rundfilter zur Produktrückgewinnung (Milchpulver in Sprühtrocknungsanlage, Bild: Tetra-Pak); rechts: konstruktiver Aufbau des Filters.

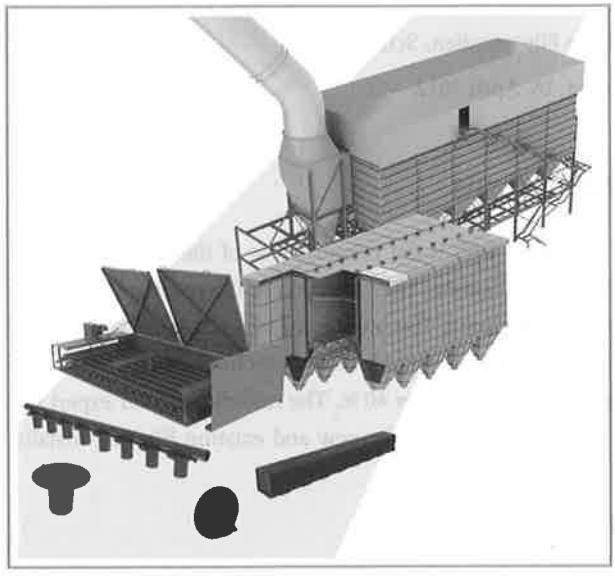

Abbildung 2. Schematischer Aufbau der modularen Intensiv-Filter Prozessfilterbaureihe ProJet mega®, Volumenstrombereich 20 000 m^3h^{-1} bis > 2 000 000 m^3h^{-1}.

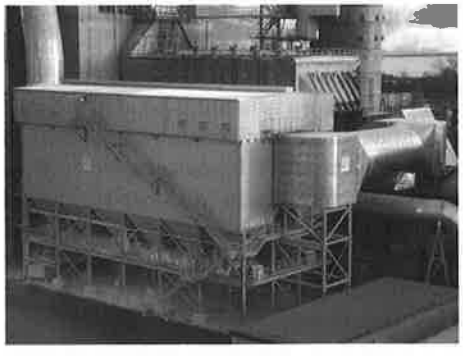

Abbildung 3. Prozessfilter PJM 136/36-8000 D zur kombinierten Entstaubung eines Drehrohrofens und Produktabscheidung der Rohmehlmühle in einem Zementwerk.

kombinierten Entstaubung des Drehrohrofens und der Rohmehlmühle in einem Zementwerk (PJM 136/36-8000 D, Schlauchlänge 8 m, 4896 Filterschläuche in Doppelfilteranordnung). Bei einem Gasvolumenstrom von 1 200 000 m^3h^{-1} werden bis zu 600 $t\,h^{-1}$ Staub abgeschieden. Die Reingaskonzentration beträgt weniger als 10 $mg\,m^{-3}$.

Der aktuelle Stand der Technik, im gezeigten Beispiel (Abb. 3) realisiert, und damit die Ausgangsbasis für diese Arbeit, wird durch folgende Merkmale moderner Jet-Pulse-Schlauchfilter definiert:

- Minimierung des für die Jet-Pulse-Abreinigung notwendigen Druckluftverbrauchs durch Betrieb im sogenannten Semi-offline-Betriebsmodus: Hierbei werden die in Abreinigung befindlichen Filterkammern durch Schließen von Reingasklappen am Filterkopf aus dem Gasstrom herausgenommen. Damit kann der Filterschlauch bereits bei relativ geringen statischen Innendrücken (ca. 300–400 Pa für Kalkstein, [2]) vollständig expandiert und damit abgereinigt werden. Der hierzu erforderliche Tankdruck der Druckluftabreinigung kann auf weniger als die Hälfte des notwendigen Tankdrucks bei Online-Betriebsmodus gesenkt werden (typische Werte 0,1–0,2 MPa statt 0,3–0,6 MPa bei Online-Abreinigung). Damit kann sowohl der Druckluftbedarf gesenkt werden als auch, über die Unterbindung des Wiederanfiltrierens bereits abgereingter Partikel, die mittlere auf den Filterschläuchen abgelagerte Deckschichtmasse (Filterkuchen) reduziert werden [3].
- Reduzierung der Druckverluste des Filtergehäuses durch CFD-gestützte konstruktive Optimierung: Insbesondere die Optimierung der Rohgaszuströmung und die Umstellung auf strömungsgünstige, wandbündige Filterklappen hat zur Reduzierung des Differenzdrucks des Filtergehäuses um 30 % beigetragen [4].
- Einsatz hocheffizienter und strömungsoptimierte Druckluftinjektoren zur Übertragung des statischen Tankdrucks in einen gerichteten Freistrahl, der die zur schlagartigen Expansion des Filterschlauchs notwendige statische Druckerhöhung induziert: Der in Abb. 4 rechts dargestellte, zweistufige Coanda-Injektor leitet die Druckluft durch einen Ringspalt und erreicht hohe Druckgradienten und Beschleunigungskräfte sowie einen hohen Anteil an sekundärer Luft. Daneben werden Injektoren mit einer idealen Düse (Abb. 4, Mitte) eingesetzt, die gegenüber einfachen Lochdüsen (Abb. 4, links) erheblich weniger Energie dissipieren [5].
- Differenzdrucksteuerung mit kontinuierlicher Nachregelung des Tankdrucks (sogenannte ECO-Option): Hierbei wird immer nur der Tankdruck im Druckluftspeicher der Jet-Pulse-Abreinigung vorgelegt, der zur Erreichung eines gewünschten Differenzdruckfensters erforderlich ist [6].

Die in diesem Beitrag aufgezeigten Entwicklungsfortschritte setzen auf dem oben beschriebenen Stand der Technik auf und konzentrieren sich auf die Reduzierung des durch den filternden Abscheider verursachten Druckverlusts. Dieser geht direkt in die Leistungsaufnahme des Hauptventi-

 © 2012 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

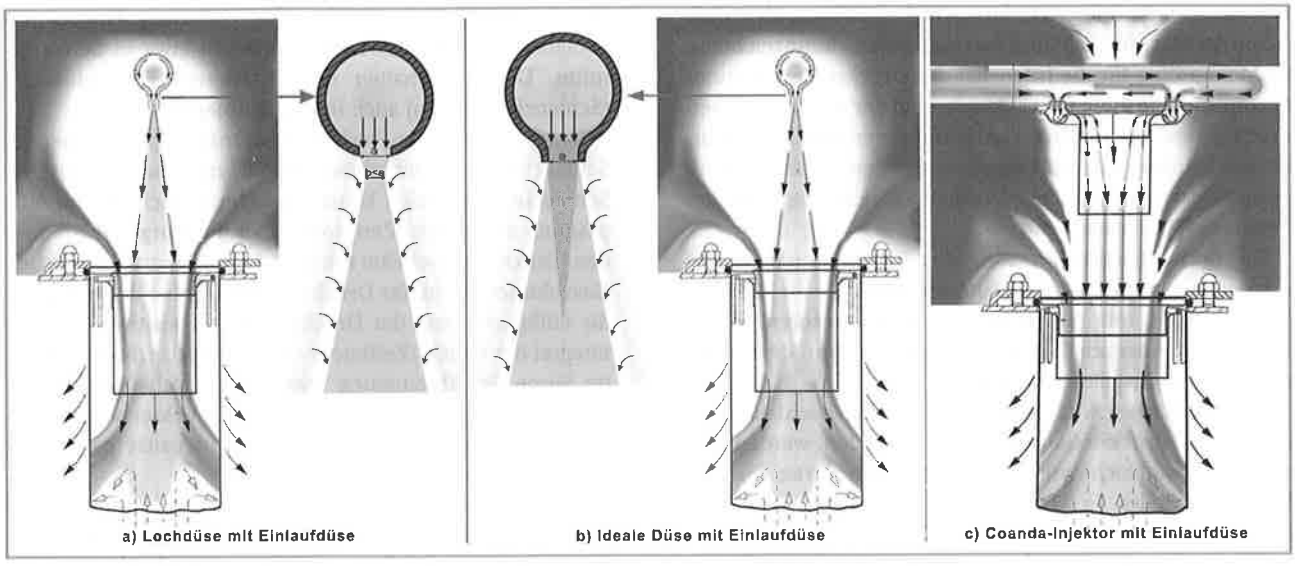

Abbildung 4. Konzeptvergleich verschiedener Druckluft-Injektorsysteme.

lators der Filteranlage ein. Für einen typischen Prozessfilter mit einem Gasvolumenstrom von 1 200 000 m^3h^{-1} im Betriebszustand bedeutet eine Reduzierung des mittleren Filterdifferenzdrucks um 1000 Pa eine Energieeinsparung von ca. 3,5 Mio. kWh a^{-1} und damit elektrischen Energiekosten von über 300 000 € a^{-1} (bei Ventilatorwirkungsgrad 75 %, 8000 Betriebsstunden und 0,09 € kWh^{-1} Stromkosten).

Der Druckverlust korreliert zunächst mit der Filterflächenbelastung. Die kostengünstigste Methode zur Erhöhung der Filterfläche und damit zur Reduzierung der Filterflächenbelastung besteht in der Verwendung längerer Filterschläuche (identische Filtergrundfläche und keine Erhöhung der Zahl der Einbauteile wie z. B. Injektoren). In Abschn. 2 werden daher systematische Untersuchungen zu erzielbaren Schlauchinnendrücken und ein Kennfeld zur Ermittlung der maximal möglichen Schlauchlänge unter verschiedenen Randbedingungen vorgestellt. Abschn. 3 zeigt das Potenzial spezieller Mikrofaser-Filtermedien in der Reduzierung des Differenzdruckniveaus auf. Im letzten Teil der Arbeit wird ein Optimierungsprogramm vorgestellt, dass die Auffindung des Betriebspunktes einer Schlauchfilteranlage mit dem minimalen Energiebedarf ermöglicht.

2 Einfluss der Schlauchlänge und des Tankdrucks auf die Effektivität der Jet-Pulse-Abreinigung

2.1 Definition der Messgrößen, Versuchsaufbau und Auswahl eines repräsentativen Filtermediums

Die Ablösung des an der Außenseite des Filterschlauchs abgeschiedenen Filterkuchens während der Druckstoßabreinigung wird durch folgende Mechanismen erzielt:

1) Geometrische Expansion: Der elastische Filterschlauch wird durch den Druckstoß bis zum Umkehrpunkt gedehnt. Der Filterkuchen wird durch die Geometrieänderung aufgebrochen, löst sich von der Oberfläche und fällt nach unten ab.
2) Trägheitskräfte: Der Umkehrung der Beschleunigung des Filterschlauchs während der Rückschlagphase (nach der Ausdehnung) kann der Filterkuchen nicht folgen. Der Filterkuchen löst im Umkehrpunkt des Filterschlauchs von der Oberfläche ab und bewegt sich zunächst radial nach außen um dann entsprechend der Schwerkraft zu sedimentieren.
3) Strömungskräfte: Die im Umkehrpunkt des Filterschlauchs noch aufgrund des Überdrucks im Filterschlauch vorhandene Durchströmung von der Reingas- zur Rohgasseite transportiert abgelagerte Partikel und Agglomerate nach außen.

Alle drei Mechanismen sind für die Entfernung des Filterkuchens verantwortlich. In [2] wurde durch Messung der Beschleunigung an verschiedenen Längenpositionen des Filterschlauchs gezeigt, dass die Beschleunigungskräfte mit zunehmender Schlauchlänge stark abnehmen (Messungen an einem Schlauch mit 2 m Länge). Die Praxiserfahrung mit zahlreichen Großfiltern mit Schlauchlängen oberhalb 6 m, zeigen, dass die Abreinigung keine Funktion der Filterschlauchlänge ist. Die Strömungskräfte sind ebenfalls nicht dominierend. Im Unterschied zu sogenannten Spülluftfiltern, bei denen die Strömungsrichtung periodisch durch Hinzuschaltung eines separaten Ventilators umgekehrt wird, sind bei der Druckstoßabreinigung deutlich geringe Spülluftmengen vorhanden. Als wohl bedeutendster Abreinigungsmechanismus verbleibt somit die durch Expansion des Filterschlauchs verbundene Krafteinwirkung auf die Deckschicht. Die Expansion des Filterschlauchs wird durch den Druckstoß, d. h. die durch Einleitung eines Injektor-

© 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

volumenstroms induzierte kurzzeitige Erhöhung des statischen Drucks, im Schlauch hervorgerufen. Kennzeichnende Messgrößen für die Intensität des Druckstoßes, an einer bestimmten Position im Schlauch, sind der maximale Überdruck $p_{ü}$ und die positive Fläche unter der Druck-/Zeitkurve, der Druckimpuls p_D. Diese Kenngrößen für die Abreinigungseffektivität bei der Druckstoßabreinigung wurden bereits in [7] beschrieben.

Die hochaufgelöste Messung des Druckverlaufs an verschiedenen Positionen in Filterschläuchen von 4–12 m Länge erfolgt mit piezoresistiven Drucksensoren, deren Signale mit einer am ILK Dresden entwickelten Messdatenerfassung [8] ausgelesen wurden.

Um die Permeabilität eines beladenen Filterschlauchs zu Beginn der Druckstoßabreinigung abzubilden, werden spezielle Filterschläuche mit entsprechend reduzierter Permeabilität verwendet. In Vorversuchen [9] wurde der Einfluss der Permeabilität auf den Druckaufbau im Filterschlauch während der Druckstoßabreinigung experimentell bestimmt. Mit steigender Permeabilität sinkt der mit an einer bestimmten Schlauchlängenposition erzielbare statische Druck. Als repräsentativer bzw. Worst-case-Wert werden Prüfschläuche mit einer Luftdurchlässigkeit [10] von 5 L $dm^{-2}min^{-1}$ bei 200 Pa gewählt, entsprechend einer relativ geringen Druckdifferenz zwischen Roh- und Reingasseite des kuchenbelegten Filterschlauchs direkt vor der Abreinigung von 400 Pa, bei einer Filterflächenbelastung von 1,0 $m^3m^{-2}min^{-1}$.

2.2 Einfluss des Tankdrucks und der Filterschlauchlänge auf den maximalen Schlauchinnendruck und Druckimpuls

Abb. 5 zeigt den maximalen statischen Druck während der Druckstoßabreinigung für Filterschläuche von 4, 6, 8, 10 und 12 m Länge an bis zu fünf verschiedenen Längenpositionen und bei Variation des Tankdrucks von 0,1–0,5 MPa. In Abb. 6 sind die entsprechenden Druckimpulse dargestellt. Während der maximale statische Druck mit zunehmender Schlauchlänge tendenziell abnimmt, zeigt der Druckimpuls ein relativ konstantes Niveau. Die Schlauchlänge 4 m zeigt, aufgrund des Staudrucks am Schlauchboden, einen geringfügigen Anstieg des statischen Drucks am Schlauchende und ein Druckminimum etwa in Schlauchmitte. Dieses Verhalten ist für kürzere Filterschläuche (Schlauchlänge 2 m) auch in [2] dokumentiert.

Die gleichförmigen Verläufe des Druckimpulses über die Schlauchlänge, trotz abnehmender maximaler statischer Schlauchinnendrücke, können durch unterschiedliche Ausprägung des Druck-/Zeitprofils über die Länge erklärt werden. Durch Mischeffekte mit dem im Schlauch befindlichen Gasvolumen flacht das Druck-/Zeitprofil über der Länge ab, die Fülligkeit – bzw. der Druckimpuls als positives Flächenintegral der Druck-/Zeitkurve – bleibt jedoch erhalten. Diese im Sinne der Abreinigung positive Eigenschaft ergibt sich jedoch nur bei Verwendung effektiver Injektorsysteme, die einen Freistrahl mit ausreichender Intensität generieren (vgl. Abb. 4b und 4c).

Mit den gezeigten Ergebnissen (Abb. 5) lassen sich die maximal möglichen Schlauchlängen bei unterschiedlichen Betriebsweisen und die notwendigen Tankdrücke wissens-

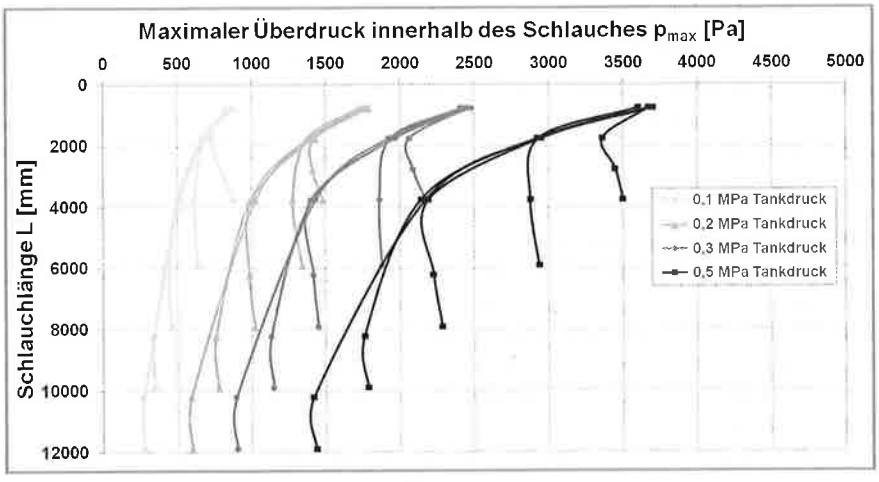

Abbildung 5. Schlauchfilter-Auslegungsmatrix: Maximaler statischer Schlauchinnendruck als Funktion der Schlauchlänge und des Tankdrucks.

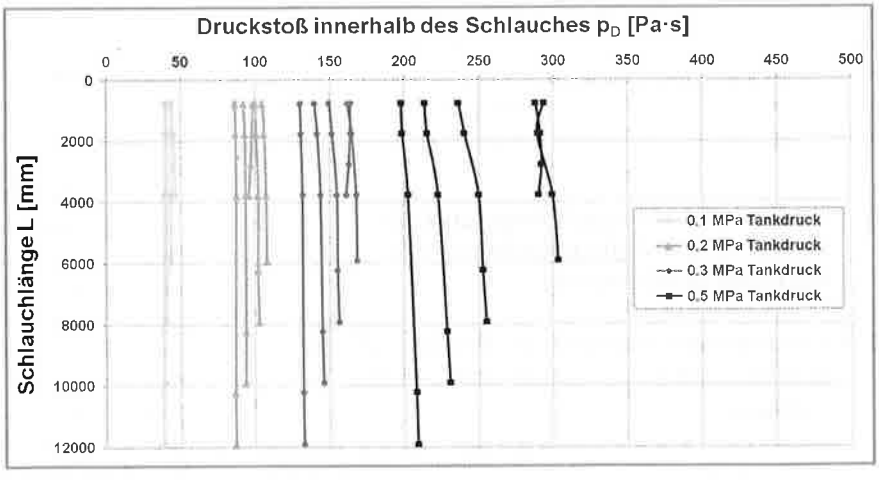

Abbildung 6. Schlauchfilter-Auslegungsmatrix: Druckimpuls als Funktion der Schlauchlänge und des Tankdrucks.

 © 2012 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

basiert ermitteln. Abb. 5 stellt eine Auslegungsmatrix für Schlauchfilteranlagen dar, die mit der Intensiv-Filter Abreinigungstechnologie bestückt sind. Wie bereits in Abschn. 1 ausgeführt, wurde für eine typische Steine-/Erden-Anwendung experimentell nachgewiesen, dass bei einem Schlauchüberdruck > 300 – 400 Pa sowie einem Druckstoß > 50 Pa s der Filterkuchen nahezu vollständig abgereinigt wird [2]. Ein Prozessfilter zur Entstaubung einer Rohmehlmühle (Kalkstein) in der Zementherstellung könnte somit bei Semi-offline-Betrieb mit 10 m Schlauchlänge (Tankdruck etwa 2 bar) betrieben werden. Eine Steigerung auf 12 m wäre ohne Verschlechterung der Abreinigungseffektivität möglich, wenn der Tankdruck auf 3 bar angehoben würde. Im Online-Betrieb müssen während der Druckstoßabreinigung hingegen nicht nur die genannten 400 Pa Mindestdruck erreicht werden, sondern zusätzlich die durch die Hauptströmung hervorgerufene Druckdifferenz. Bei einem angenommenen Differenzdruck von Filterkuchen und Filtermedium von 1000 Pa und einem Sicherheitszuschlag von 300 Pa für Prozessschwankungen, würde ein 10 m Schlauch bei 5 bar Tankdruck gerade noch die notwendigen 1700 Pa Schlauchinnendrücke aufweisen, ein 12 m Schlauch hingegen nicht mehr. Der Vorstoß zu sehr großen Schlauchlängen bleibt somit Filtern in Offline- oder Semi-offline-Betriebsweise vorbehalten. Auf der anderen Seite können mit der Auslegungsmatrix (Abb. 5) die maximalen Einsatzgrenzen für Online-Filter genauso ermittelt werden, wie die Möglichkeiten der Tankdruckabsenkung und damit der Drucklufteinsparung für Filteranlagen in Anhängigkeit von der Schlauchlänge und der Betriebsweise.

3 Steigerung der Energieeffizienz von Schlauchfiltern

3.1 Merkmale einer neuen mikrofaserbasierten Filtermediengeneration und Versuchsaufbauten zur experimentellen Validierung

Der größte Anteil des Druckverlustes eines Schlauchfilters wird durch den Filterkuchen und die irreversible Partikeleinlagerung in das Filtermedium verursacht. [3]. Konventionelle Nadelvliese, wie sie seit vielen Jahren in Schlauchfiltern eingesetzt werden, lagern insbesondere in der Anfangsphase der Filtration hohe Staubmengen in die Tiefe des Mediums ein und erfüllen erst nach Aufbau des Filterkuchens ihre eigentliche Filtrationsleistung. Dies hat zur Folge, dass der anfängliche, sehr niedrige Restdruckverlust mit zunehmender Betriebsdauer stark ansteigt [11, 12]. In Schlauchfiltern ebenfalls verwendete Filtermedien mit anströmseitig angeordneter ePTFE-Membran (expandiertes PTFE) zeigen zwar einen geringen Druckgradienten im Druckverlustverlauf, beginnen jedoch mit einem sehr hohen Restdruckverlust, der auf die sehr geringe Porenweite der Membran und irreversible Staubeinlagerungen in den Membranporen zurückzuführen ist.

Die Reduzierung der Druckverlustanteile gelingt durch den Einsatz von Mikrofasern auf der Anströmseite zwischen Rohgasseite und Stützgewebe mit einem Titer ≤ 1,5 dtex. Sie sind so angeordnet, dass sich in der ersten Filtrationsphase nach der Druckstoßabreinigung ein deutlich geringerer Druckgradient der Druckverlustkurve einstellt als bei konventionellen Nadelvliesen [13, 14].

Die Validierung der Leistungsdaten der neuen mikrofaserbasierten Filtermediengeneration sowie die Ausweitung auf weitere Fasertypen für die unterschiedlichen Anforderungen in der industriellen Entstaubung erfolgt sowohl in Flachrondenversuchen in Anlehnung an VDI 3926 bzw. der ISO 11057 (Versuchsstand Typ 1) als auch im technischen Maßstab (10 Schläuche × 4 m Länge). Abb. 7 zeigt schematisch die verwendeten Versuchsaufbauten. Einzelheiten zu Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung sowie der verwendeten Partikelsysteme können [14, 15] entnommen werden.

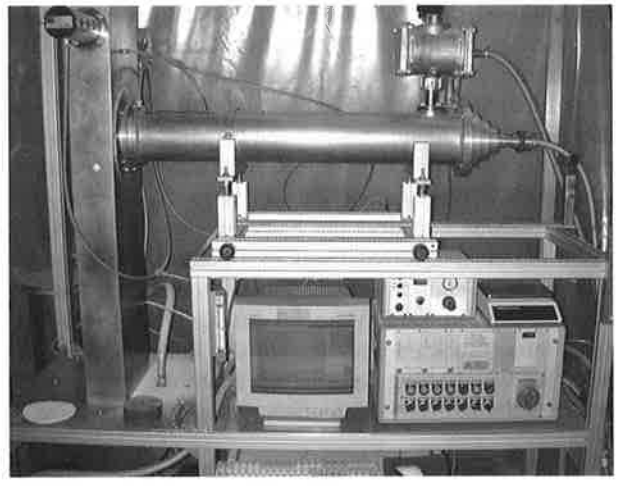

Abbildung 7. Versuchsaufbauten (Flachrondenprüfstand VDI 3926, Typ 1 und Technikumsanlage) zur Entwicklung und Validierung mikrofaserbasierter Filtermedien mit reduzierten Restdruckverlusten und Filterkuchenwiderständen.

3.2 Versuchsergebnisse Flachrondenversuche VDI 3926

Der experimentelle Vergleich des Druckverlaufs im Einzelzyklus von konditionierten (definierte Alterungsprozedur mit 10 000 Zyklen) Filtermedien, wurde mit verschiedenen praxisrelevanten, stärker und schwächer agglomerierenden mineralischen Prüfstäuben (Pural Sb, Kalkstein, gemahlener Zement) durchgeführt. Nach Abschluss der Messreihen für Filtermedien der Niedertemperatur-Klasse (Polyesterfasern, max. Einsatztemperatur 140 °C) [14], wurde die Filtermedienentwicklung systematisch auf Hochtemperaturanwendungen ausgedehnt [15]. Die unter dem Markennamen ProTex® eingeführte neue Filtermediengeneration zeichnen sich durch geringe Restdruckverluste direkt nach der Abreinigung sowie durch eine Reduzierung des über-

 © 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

proportionalen Differenzdruckanstiegs in der ersten Phase der Filtration aus [14, 15]. Exemplarisch sind in Abb. 8 die Messergebnisse für *m*-Aramid-Nadelvliese dargestellt. Das mikrofaserbasierte Filtermedium ProTex® m-Ar (meta-Aramid) weist keinen überproportionalen Differenzdruckanstieg auf. Damit werden gegenüber allen anderen Probanden der gleichen Faserart die längsten Zykluszeiten und somit die im Mittel geringsten Differenzdrücke erzielt. Gegenüber Filtermedien mit anströmseitig angeordneter ePTFE-Membran können die Zykluszeiten nahezu verdoppelt werden. Die beschriebene Filtermedienentwicklung wurde bis dato auf folgende Mikrofaser-Nadelvliesqualitäten ausgedehnt: PES, m-Ar, PI, Mischfasern PA/PES und PPS/PI.

3.3 Versuchsergebnisse Technikumsanlage

Abb. 9 (oben) zeigt Ergebnisse einer Testreihe mit einem konventionellen PES-Nadelvlies (PES: Polyester), einem kommerziell erhältlichen PES-Mikronadelvlies und dem Filtermedium ProTex® PES. Die Alterung der Schläuche erfolgt durch 36 000 Abreinigungen mit einer Zykluszeit von 25 s, einem Abreinigungsdruck von 0,5 MPa, einer Filterflächenbelastung von 120 m h^{-1} und einer Staubkonzentration von 10 g m^{-3} (Prüfstaub Pural Sb). Damit geht die Alterungsprozedur weit über die Bedingungen der ISO-Norm (2500 mit einer Zykluszeit von 20 s) hinaus. Die Versuche werden bei identischen Bedingungen und zeitgesteuerter Abreinigung mit 300 s Zykluszeit durchgeführt. Der mittlere Differenzdruck (Messstellen auf der Roh- und Reingasseite) bei Verwendung des ProTex® Filtermediums ist auch in der Technikumsanlage deutlich geringer als bei Verwendung des konventionellen Mikrofasermediums. Das Nadelvlies ohne Mikrofaser liegt im Differenzdruckniveau nochmals darüber. Allein durch Verwendung eines bzgl. des Differenzdrucks optimierten Mikrofasermediums kann somit das Differenzdruckniveau bei Entstaubung feindisperser und schlecht agglomerierender Stäube um mehr als einen Faktor zwei gesenkt werden.

Ein weiterer Vorteil der beschriebenen Technologie ist die Erhöhung des Abscheidegrades durch die Verwendung feinerer Fasern. In der gezeigten Messreihe weisen die mikrofaserbasierten Filtermedien Gesamtstaubkonzentrationen auf der Reingasseite in der Bandbreite von 0,5 – 2 mg m^{-3} auf. Das konventionelle Nadelvlies liegt um eine Größenordnung darüber. Dieser positive Nebeneffekt ermöglicht eine weitere Reduzierung des Differenzdrucks durch kürzere Zyklen der Druckstoßabreinigung. Die hierbei ggf. zunehmenden Reingasstaubkonzentrationen bei Verwendung der ProTex® Filtermedien sind unkritisch [13 – 15].

Abb. 9 unten zeigt die durch Reduzierung der Zykluszeit auf 200 s und 100 s nochmals mögliche Absenkung des Filter-Differenzdrucks. Insgesamt kann gegenüber konventionellem Betrieb (Standard PES Nadelvlies, 300 s Zykluszeit) der Differenzdruck um den Faktor 4 gesenkt werden. Dieser Wert kann als maximal erreichbares Potenzial angesehen werden. Die in der Praxis erzielbaren Einsparungen hängen von den Partikeleigenschaften ab. Für typische Steine-/Erden-Anwendungen (Kalkstein, Quarzsand, Zement), kann über eine LCC-Bilanz (LCC: life cycle costs) gezeigt werden, dass die Lebenszykluskosten der Filteranlage durch Einsatz der ProTex®-Filtermedien und optimierter Abreinigungssteuerung um 40 % gesenkt werden können [16]. Zur anwendungsbezogenen Vorausberechnung der Energiebedarfe für die Filterdurchströmung und für die

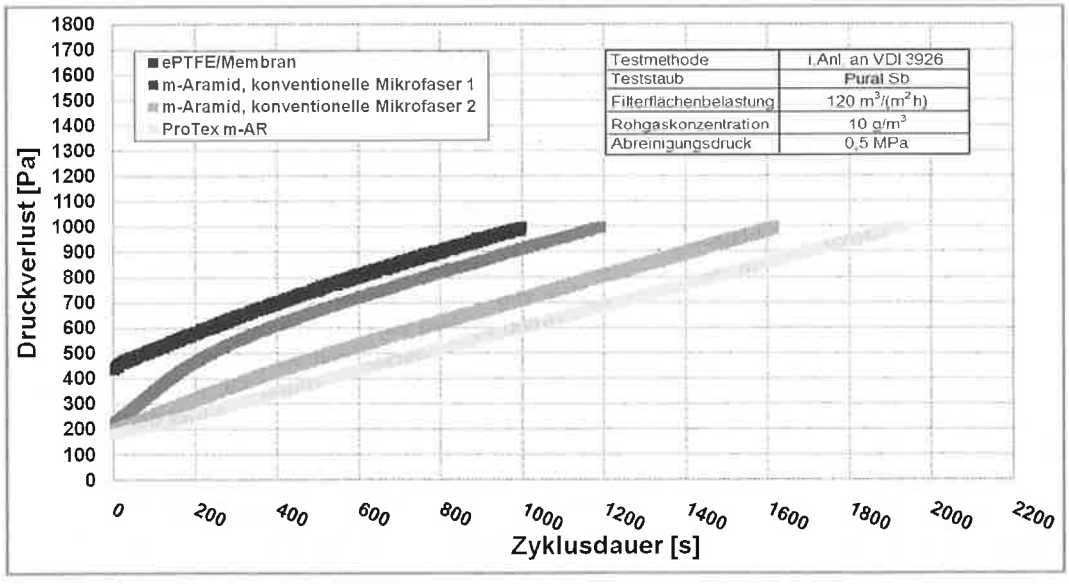

Abbildung 8. Differenzdruckverlauf Einzelzyklus im quasistationären Zustand (Flachronden-Versuche mit Prüfstand VDI 3926, Typ 1) für unterschiedliche Filtermedien (ePTFE-Membran, Mikrofasernadelvliese *m*-Aramid, ProTex® *m*-Aramid).

 © 2012 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

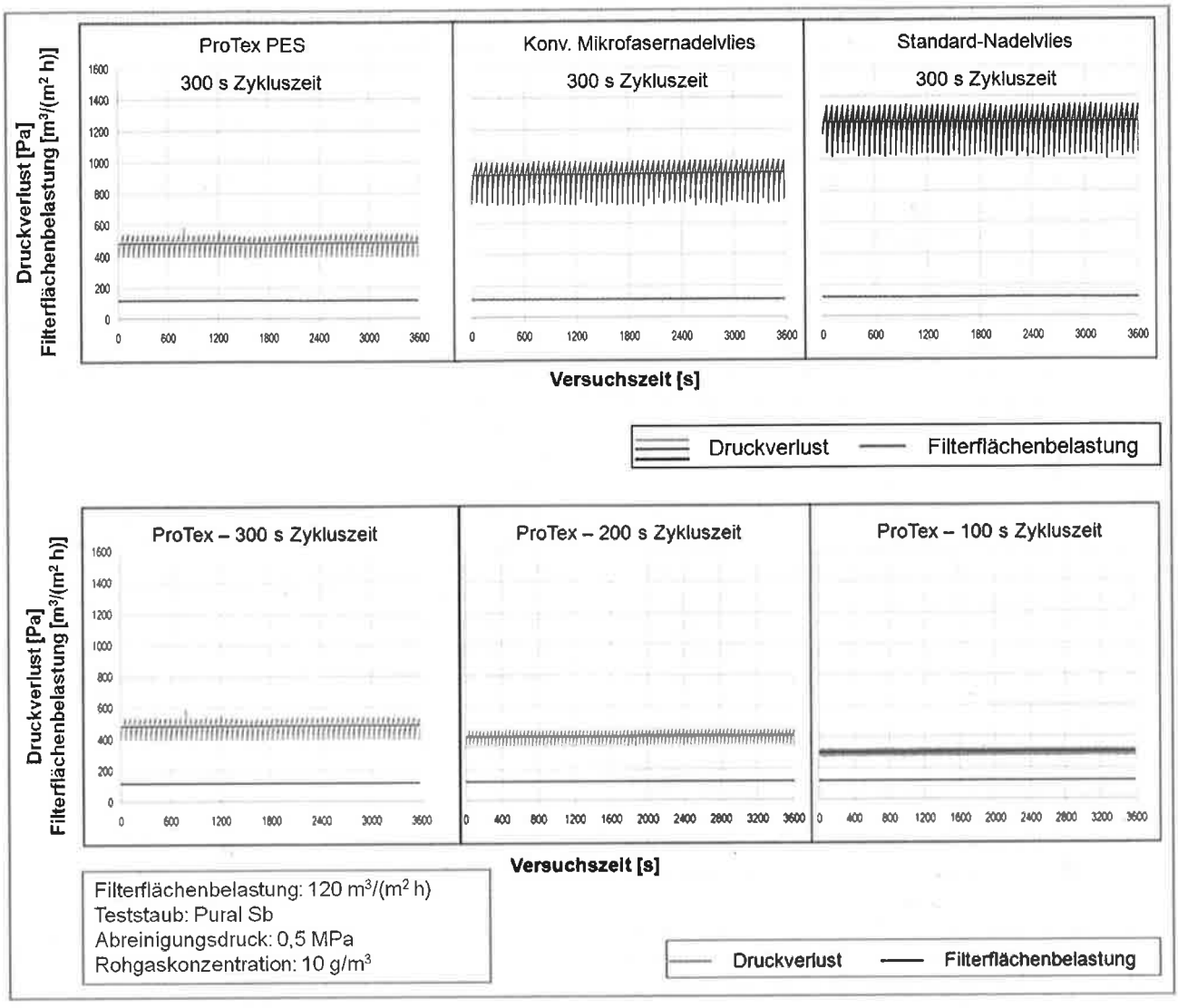

Abbildung 9. Differenzdruckverlauf Mehrschlauchfilter im quasistationären Zustand (Technikumsanlage, 4 m Schlauchlänge, 10 Schläuche) für unterschiedliche Filtermedien. Oben: Nadelvlies PES, Mikronadelvlies PES, ProTex® PES; unten: ProTex® PES bei Variation der Zykluszeit.

Drucklufterzeugung der periodischen Druckstoßabreinigung bei Verwendung unterschiedlicher Filtermedien und für unterschiedliche Partikelsysteme wurde ein Filter-Expertensystem aufgebaut (s. Abschn. 4).

4 Filter-Expertensystem ProExpertise

4.1 Berechnungsgrundlagen und Versuchsaufbau zur empirischen Ermittlung der Modellparameter

Das energetische Optimum bei Betrieb eines abreinigbaren Oberflächenfilters ergibt sich aus dem Minimum der Summe der Strömungverlustleistung (Bilanzgrenze Rohgasflansch/Reingasflansch) sowie des zur Druckstoßabreinigung erforderlichen Leistungsbedarfs des Kompressors. Gl. (1) beschreibt die Leistungsaufnahme bei kuchenbildender Filtration mit Druckstoßabreinigung. Die optimale Zykluszeit ist durch den unteren Wendepunkt von Gl. (1) bei Auftragung P_{Filter} über t_{Z} definiert. Je kürzer die Zykluszeit, desto geringer das Differenzdruckniveau und desto höher der zur Drucklufterzeugung notwendige elektrische Leistungsbedarf. Bei zu hohen Zykluszeiten dominieren hingegen die Strömungsverlustleistung und damit der elektrische Leistungsbedarf des Hauptventilators.

$$P_{\mathrm{Filter}} = \frac{1}{\eta_{\mathrm{V}}}\,\dot{V}\left(a_{\mathrm{FG}}\,v^2 + a_{\mathrm{FK}}\,c_{\mathrm{RG}}\,t_{\mathrm{Z}}\,v^2 + a_{\mathrm{FM}}\,v\right) + a_{\mathrm{K}}\,\frac{1}{t_{\mathrm{Z}}} \qquad (1)$$

Die Vorausberechnung des optimalen Betriebspunktes bzgl. Energiebedarf der Filteranlage, erfordert die Kenntnis des Druckverlustkoeffizienten des Filtergehäuses a_{FG}

© 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

(Flansch zu Flansch ohne Strömungswiderstände des Filterschlauchs und Filterkuchens), des spezifischen Filterkuchenwiderstandes a_{FK} sowie des spezifischen Filtermedienwiderstandes a_{FM} im Zustand direkt nach der Druckstoßabreinigung (Restdruckverlust). Der spezifische Leistungsbedarf des Kompressors a_K ergibt sich aus dem Wirkungsgrad des Kompressors und weiterer Parameter der Filteranlage sowie der Art des Abreinigungssystems inkl. Tankgröße, verwendetem Membranventil, Art und Zahl der Druckluftinjektoren je Injektorrohr. Der Koeffizient a_K wird empirisch für die modular aufgebauten Filteranlagen bestimmt (zwei verschiedene Injektorsysteme, zwei Tankgrößen, 6–17 Injektoren je Injektorreihe) und im Filter-Expertensystem hinterlegt. Der Druckverlust des Filtergehäuses kann entweder direkt eingegeben werden oder durch empirische Ermittlung des Koeffizienten a_{FG} der ausgeführten Filteranlage.

Die spezifischen Filterkuchenwiderstände a_{FK} folgender Prüfstäube, bzw. technischer Stäube (großindustrielle Mahlprodukte), wurden in Bestaubungsversuchen mit dem Flachrondenprüfstand (s. Abb. 7 links) experimentell bestimmt:

- Pural Sb (Al_2O_3) repräsentiert einen schlecht agglomerierenden, feindispersen Staub mit hoher Neigung zur Penetration in und zur Verblockung von Filtermedien. Pural Sb ist gleichzeitig ein definierter Prüfstaub für Filterprüfungen.
- Gemahlener Kalkstein, entnommen aus dem Austrag eines Schlauchfilters hinter der Rohmehlmühle in der Zementproduktion repräsentiert eine typische industrielle Aufgabenstellung (kombinierte Entstaubung Drehrohrofenabgas und Abscheidung des Feinguts der Rohmehlmühle) sowie einen mineralischen Staub mit hoher Agglomerationsneigung.
- Gemahlener Zement, 5900 Blaine repräsentiert eine typische industrielle Aufgabenstellung (Entstaubung der Zementmühle) sowie einen feindispersen mineralischen Staub mit sehr hoher Agglomerationsneigung.

Zur experimentellen Ermittlung der Filtermedienwiderstände werden mit allen genannten Prüfstäuben Filtrationsversuche in der Technikumsanlage durchgeführt. (Abb. 7 rechts). Nach Absolvierung von 10 000 Abreinigungszyklen werden die Restdruckverluste bestimmt. Zusätzlich wird jede Messreihe für sechs unterschiedliche Tankdrücke im relevanten Bereich von 0,2–0,6 MPa aufgenommen. Hierdurch wird der Effekt der bei höheren Tankdrücken steigenden Abreinigungseffektivität der Filtermedien berücksichtigt. Die Messreihen zur Bestimmung der Restdruckverluste werden für folgende repräsentative Filtermedien durchgeführt (die Stoffdaten der Filtermedien sind in [15] verzeichnet):

- Standard Polyester (PES) Nadelvlies
- ePTFE Membran auf Glasgewebe laminiert
- ProTex® PES (s. Abschn. 3)
- ProTex® m-Ar (s. Abschn. 3)
- ProTex® PI (s. Abschn. 3)

4.2 Bestimmung des optimalen Betriebspunktes mittels ProExpertise

Die experimentell ermittelten Koeffizienten sowie die Geometrie und Betriebsdaten der Filteranlagen sind in einem Filter-Expertensystem über Gl. (1) verknüpft. Das Berechnungsprogramm ProExpertise gestattet die Vorausberechnung des Filterdifferenzdrucks und des Druckluftbedarfs der Druckstoßabreinigung für alle Filteranlagen des Intensiv-Filter Produktprogramms. Darüberhinaus lassen sich auch Filteranlagen anderer Hersteller berechnen, da wichtige Geometrieparameter, wie der Schlauchdurchmesser oder die Zahl der Filterschläuche je Kopfmodul in der Eingabemaske des Programms variabel sind. Tab. 1 zeigt die Eingabemaske, bereits ausgefüllt mit den Geometrie- und Betriebsdaten eines typischen Prozessfilters für die Ofen- und Rohmehlmühlenentstaubung eines Zementwerks.

Die Variabilität des Programms kann der Tabelle entnommen werden, nicht-kursiv markierte Felder sind frei definierbar. Neben den Geometriedaten (Zahl, Länge und Durchmesser der Filterschläuche) und dem verwendeten Filtermedium, kann auch die Art des Injektors (Coanda oder ideale Düse) sowie die Betriebsweise (online, offline) spezifiziert werden. Im Ergebnisteil der Berechnung werden für alle verfügbaren Tankdrücke die Differenzdrücke

Tabelle 1. Geometrie- und Betriebsdaten.

Staub	*Rohmehl/Ofenstaub*
Staubkonzentration [$g\,m^{-3}$]	535
Betriebstemperatur [°C]	125
Volumenstrom [m^3h^{-1}]	830,557
Filterflächenbelastung [$m^3m^{-2}min^{-1}$]	*0,7*
Energiebedarf für 1 m^3 Druckluft [$kWh\,m^{-3}$]	0,1
Wirkungsgrad Ventilator	0,8
Jährliche Betriebsstunden [$h\,a^{-1}$]	8000
Strompreis [$€\,kWh^{-1}$]	0,05
Filter-Typ	PJM
Schläuche pro Kammer	136
Anzahl Filterkammern	36
Anzahl Filterkammern im Reinigungsmodus (offline)	2
Injektor-Typ	N
Filtermedium	Membran
Betriebsmodus	offline
Schlauchdurchmesser [m]	DIN 160
Schlauchlänge [m]	8
Filterfläche (brutto) [m^2]	*20303*
Filterfläche (netto) [m^2]	*19175*

 © 2012 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

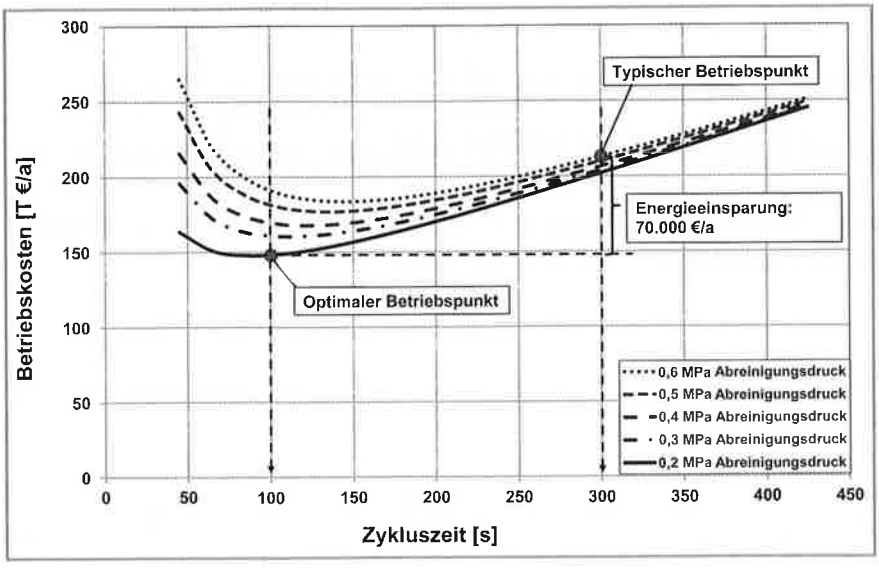

Abbildung 10. Betriebskosten eines Prozessfilters in Abhängigkeit von Zykuszeit und Abreinigungsdruck zur Bestimmung des optimalen Betriebspunktes.

und Druckluftverbräuche sowie die Gesamtleistungsaufnahme über der Zykluszeit in Kurvenform (Abb. 10) angegeben.

Das vorgestellte, aus der Praxis entnommene Beispiel, zeigt die Betriebskosten (elektrische Energiekosten) des in Tab. 1 spezifizierten Prozessfilters als Funktion über der Zykluszeit. Deutlich ist zu sehen, dass die Zykluszeit des Filters weit oberhalb des energetischen Optimums eingestellt ist. Eine Reduzierung der Zykluszeit in Richtung des optimalen Betriebspunktes würde eine jährliche Energiekosteneinsparung von 70 000 € mit sich bringen und sollte angestrebt werden. Dennoch sind viele in Betrieb befindliche Anlagen weitab des Optimum eingestellt. Dies ist meist begründet durch Senkung des Druckluftbedarfs, obwohl die Drucklufterzeugung nur einen kleinen Teil der Energiekosten ausmacht. Der weitaus größere Anteil an elektrischen Energiekosten wird durch den Hauptventilator verursacht. Reduziert man den Gesamtdruckverlust über die Filteranlage, werden auch überproportional die Energiekosten der Gesamtanlage reduziert.

ProExpertise ist damit ein Werkzeug für den Ingenieur, das durch Festlegung und Vergleich von Parametern Reduktionspotenziale beim Energieverbrauch von bestehenden und neuen Schlauchfilteranlagen in Bezug auf die elektrische Leistung aufzeigt. Es können Filteranlagen unterschiedlicher Größe miteinander verglichen werden, wie z. B. Filter mit unterschiedlich langen Schläuchen und mit unterschiedlicher Schlauchanzahl. Des Weiteren kann man den Einsatz verschiedener Filtermedien als optionale Variante miteinander vergleichen. Die nächste Ausbaustufe wird durch Ergebnisse von Untersuchungen weiterer Entstaubungsapplikationen ergänzt. Weiter werden auch die Kosten für die Abschreibung, den Service und Ersatzteilbedarf, wie Schläuche und Einbauteile, enthalten sein.

Literatur

[1] T. Schrooten, A. Kögel, *LVT Lebensm. Ind.* **2009**, *54 (7–8)*, 14.

[2] J. Sievert, *Physikalische Vorgänge bei der Regenerierung des Filtermediums in Schlauchfiltern mit Druckstoßabreinigung*, Fortschr.-Ber. VDI, Vol. 161, VDI-Verlag, Düsseldorf **1988**.

[3] G.-M. Klein, T. Schrooten, T. Neuhaus, R. Kräbs, *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* **2009**, *69 (5)*, 199.

[4] T. Schrooten, R. Esser, K. Knop, G.-M. Klein, *ZKG Int.* **2009**, *62 (6/7)*, 48.

[5] G.-M. Klein et al., in *Proc. FILTECH 2009*, Vol. 2, Filtech, Wiesbaden **2009**, 144.

[6] T. Schrooten, A. Kögel, T. Daniel, G.-M. Klein, in *Global Guide of the Filtration and Separation Industry* (Ed: E. von der Lühe), VDL-Verlag, Rödermark **2010**.

[7] K. Reinhard, *Untersuchung der Partikelabscheidung aus Gasen an einem Schlauchfilter mit Druckstoßabreinigung*, Fortschr.-Ber. VDI, Vol. 76, VDI-Verlag, Düsseldorf **1983**.

[8] *Messdatenerfassung mit hochfrequent getakteten Drucksensoren*, Technische Dokumentation ILK Dresden, **2008**.

[9] P. Bai, T. Neuhaus, T. Schrooten, G.-M. Klein, in *Proc. FILTECH 2011* (Eds: H. Anlauf, E. Schmidt), Vol. 2, Filtech, Wiesbaden **2011**, 429.

[10] DIN EN ISO 9237, *Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von textilen Flächengebilden*, Beuth Verlag, Berlin **1995**.

[11] VDI 3677, *Filternde Abscheider-Oberflächenfilter*, Blatt 1, Beuth Verlag, Berlin **2009**.

[12] P. Gäng, *F&S, Filtr. Sep.* **2008**, *22 (2)*, 302.

[13] Intensiv-Filter GmbH & Co. KG, Patentanmeldung DE 102009016145 A1, **2009**.

[14] G.-M. Klein, T. Neuhaus, P. Bai, T. Schrooten, T. Daniel, *F&S, Filtr. Sep.* **2009**, *23 (3)*, 134.

[15] T. Neuhaus, P. Bai, T. Schrooten, G.-M. Klein, *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* **2010**, *70 (6)*, 231.

[16] G.-M. Klein, M. Blech, F. Ott, T. Neuhaus, T. Schrooten, *ZKG Int.* **2010**, *63 (9)*, 38.

© 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim