
Neue Schwebstofffilter sparen Energiekosten und erhöhen die Sicherheit im Krankenhaus

Dipl.-Ing. Thomas Schroth

Vortrag anlässlich

**14. Kongress International Federation of Hospital
Engineering (IFHE)**

Kopenhagen, 24. Juni 1996

Auszugsweise veröffentlicht in

KrankenhausTechnik, Oktober 1996, Seiten 30 + 32

Luftfilter mit besonders hohen Abscheideleistungen für submikrone Partikel werden als Schwebstofffilter bezeichnet. Sie werden üblicherweise in der mikroelektronischen und pharmazeutischen Industrie, in der Medizintechnik und in Krankenhäusern eingesetzt. Auch bei aseptischen Prozessen in der Lebensmittel- und Kosmetikindustrie finden zunehmend Schwebstofffilter Verwendung. In den genannten Anwendungsgebieten muß entweder die Kontamination eines besonders empfindlichen Produktes mit partikelförmigen Verunreinigungen verhindert oder der Mensch vor gefährlichen Mikroorganismen und Keimen geschützt werden, indem die gefilterte Luft einen gewissen Sterilitätsgrad erreicht.

In Krankenhäusern sind Schwebstofffilter in den Zuluftsystemen von OP-Sälen und Intensivstationen sowie in Reinen Werkbänken der Medizintechnik eingesetzt. Nur mit Schwebstofffilterung ist es möglich, sogenannte Reine Räume zu erzeugen, in denen die Luft hochgradig von gefährlichen Stäuben und Mikroorganismen befreit ist.

In der Herstellung von Schwebstofffiltern wurde eine neue Technologie bis hin zur Serienfertigung entwickelt, die dem Anwender Filter mit besonders niedriger Druckdifferenz und hoher Zuverlässigkeit bezüglich Betriebssicherheit, Abscheideleistung und Leckagefreiheit zur Verfügung stellt.

■ **Bewertung der Abscheideleistung von Schwebstofffiltern**

Der Begriff Schwebstofffilter wird in verschiedenen europäischen und amerikanischen Prüfnormen definiert. Die gebräuchlichsten Normen für die Typprüfung von Schwebstofffiltern sind der British Standard 3928, der US Military Standard 282 und die DIN 24184. Alle diese Normen gelten für Luftfilter mit Abscheideleistungen oberhalb der Filter für allgemeine Lüftungstechnische Anlagen, deren Typprüfung im ASHRAE-Standard 52.1-1992 und daraus abgeleiteten Normen beschrieben ist. Eine Vergleichbarkeit der Prüfnormen für Schwebstofffilter untereinander ist nur bedingt gegeben, was dem Anwender die Filterauswahl erheblich erschwert.

Weiterhin wurde mit modernen Fertigungsmethoden in der Medienproduktion und der Konfektionierung die Herstellung von Hochleistungs-Schwebstofffiltern möglich, die mit den vorhandenen Prüfmethode nicht mehr klassifizierbar sind, weil die in den Normen beschriebene Meßapparatur für die Bewertung dieser Filter aufgrund unzureichender Genauigkeit nicht geeignet ist.

Um dieser Problematik Abhilfe zu schaffen, wurde im deutschen Normenausschuß Maschinenbau (NAM) die neue DIN 24183 entwickelt. Es ist geplant, die DIN 24183 auf europäischer Ebene als Europa-Norm EN 1822 im Rahmen der Arbeit des EN TC 195 WG2 (CEN, Technical Committee 195 Working Group 2) einzuführen. Ein großer Vorteil der DIN 24183 liegt in der Einbeziehung modernster Meß- und Verfahrenstechnik, mit der sowohl eine meßtechnische Bewertung von Hochleistungs-Schwebstofffiltern bis zu Ab-

scheidegraden von 99,999995 % im Abscheidegradminimum möglich ist, als auch eine Methodik zur Qualitätssicherung beschrieben ist.

Abbildung 1 zeigt eine Gegenüberstellung der alten europäischen und amerikanischen Normen sowie der neuen Normen DIN 24183 und EN 1822. Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, werden Schwebstofffilter in die Filterklassen EU 10 bis EU 17 bzw. H 10 bis H 14 und U 15 bis U 17 in fortlaufender Nummerierung eingeteilt. Für die Filterklassen EU 10 bis EU 13 spricht die DIN 24183 von Standard-Schwebstofffiltern, ab Filterklasse EU 14 und höher von Hochleistungs-Schwebstofffiltern. Die EN 1822 bezeichnet Filter der Klassen H 10 bis H 14 als HEPA (High Efficiency Particulate Air)-Filter und U 15 bis U 17 als ULPA (Ultra Low Penetration Air)-Filter.

Der wichtigste Parameter bei der Filterbewertung stellt der Abscheidegrad im Abscheidegradminimum dar. Die physikalische Grundlage bildet die zur Bewertung der Abscheidung charakteristische Minimumkurve, die das Abscheideverhalten von Faserfiltern und damit auch Schwebstofffiltern beschreibt (siehe Abb. 2).

Das Minimum liegt im Übergangsbereich zwischen stochastischer Bewegung (Diffusion) durch Brown'sche Molekularbewegung und Trägheitseffekt als bestimmende Abscheide-mechanismen.

Die Lage des Abscheidegradminimums eines Schwebstoff-filterns sowohl hinsichtlich des prozentualen Abscheidegrades als auch der Partikelgröße mit der höchsten Penetration ist abhängig von der Geschwindigkeit der Luftströmung durch das Filtermedium. Für ein gegebenes Filter verschiebt sich bei jeder Veränderung des durchgesetzten Luftvolumenstro-

Feinstaubfilter	EN 779 F 9						
Schwebstoff-filter		H 10	EU 10	Q	EU 10	95% 99,97% 99,99% 99,999%	
		H 11	EU 11	R	EU 11		
		H 12	EU 12	S	EU 12		
		H 13	EU 13		EU 13		
		H 14	EU 14		EU 14		
		U 15	EU 15		BS 3928 und BSI-Dok. 90 / 73 834		
		U 16	EU 16	Mil-STD 282			
		U 17	EU 17				
			EN 1822		DIN 24 183		DIN 24 184

Abb. 1 Vergleich internationaler Filterklassen in Anlehnung an DIN 24 183 T1-E, Anhang A

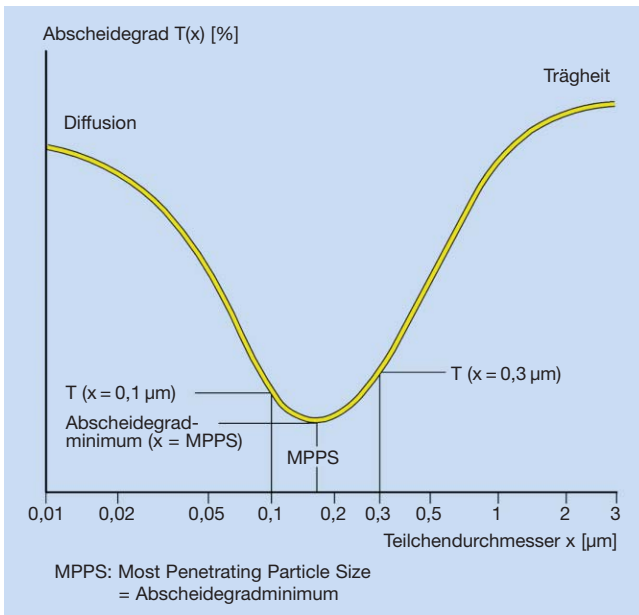


Abb. 2 Minimumkurve eines Schwebstofffiltermediums

mes die Lage des Abscheidegradminimums. Die Partikelgröße mit der höchsten Penetration bei gegebener Filtermediumdurchströmungsgeschwindigkeit wird Most Penetrating Particle Size (MPPS) genannt.

■ Schwebstofffilter im Krankenhaus

Im Krankenhaus werden Schwebstofffilter in mehreren Bereichen eingesetzt. Ein Schwerpunkt bildet der Operationssaal, dessen Zuluft aus bekannten Gründen weitgehend staub- und keimfrei sein sollte. Je nach Anforderungen an den Sterilitätsgrad der Luft sind unterschiedliche Konzepte der Luftführung anzuwenden. Bei mittleren Anforderungen an die Luftqualität im Raum (weniger als $150 - 200$ Keime/ m^3) genügt es im allgemeinen, eine sogenannte turbulente Mischlüftung vorzusehen. Die Frischluft wird bei diesem System meist über Deckenauslässe mit integriertem Schwebstofffilter (üblicherweise Klasse H 13 nach EN 1822) dem Raum zugeführt und mit der Raumluft vermischt (siehe Abb. 3).

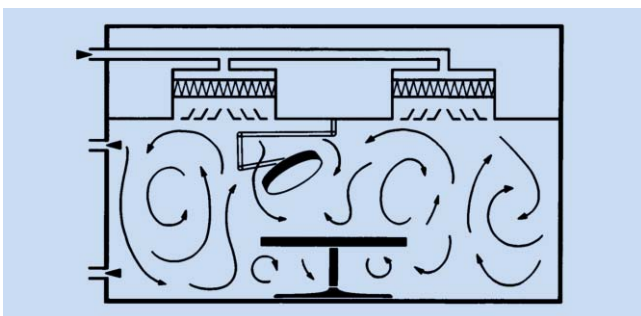


Abb. 3 Operationssaal mit turbulenter Mischlüftung

Der Staub- und Keimgehalt hängt bei dieser Luftführung unter anderem von der Anzahl der Luftwechsel pro Zeiteinheit und konstruktiven Maßnahmen zur Luftströmungslenkung ab.

Für die Erreichung von häufig direkt über Operationstischen geforderten Konzentrationen von weniger als 10 Keimen/ m^3 ist die Luftführung mit sogenannter turbulenzarmer Verdrängungsströmung empfehlenswert. Dabei wird der Operationstisch mit einem Schleier hochreiner Luft kontinuierlich bestrichen und gegen die Umgebung abgeschirmt.

Die Luftgeschwindigkeit beträgt üblicherweise $0,25$ m/s bis $0,45$ m/s und die Temperatur des Luftstroms liegt 2 bis 3°C unterhalb der Raumluft.

Zur Erreichung einer turbulenzarmen Verdrängungsströmung werden im Krankenhaus zwei Systeme eingesetzt. In einem System wird die Zuluft im Luftkanal kurz vor Erreichen der OP-Decke über Schwebstofffilter (Klasse H 13) geleitet und anschließend mithilfe eines Verteilersystems über dem Operationstisch verteilt. Das Verteilersystem besteht meist aus einem doppellagig aufgespannten feinmaschigen Kunststoffgewebe, das aufgrund eines gewissen Druckverlustes und seiner sehr gleichmäßigen Maschenstruktur für die gewünschte homogene Verteilung der Luft sorgt (siehe Abb. 4a).

Beim zweiten System ist die Deckenfläche über dem Operationstisch mit Schwebstofffiltern (Klasse H 13 oder H 14) belegt. Die Zuluft wird also direkt bei der Einströmung in den OP-Saal gefiltert und mithilfe der Filter selbst homogen verteilt (siehe Abb. 4b).

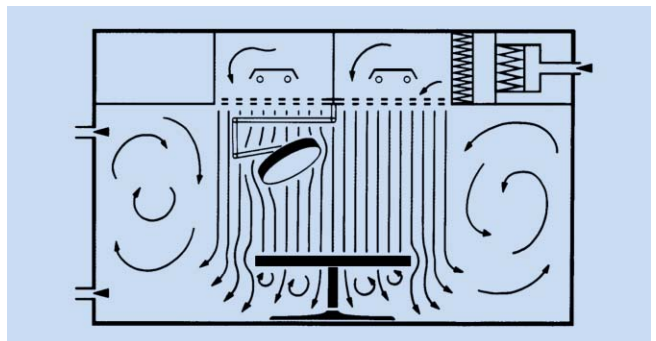


Abb. 4a Operationssaal mit turbulenzarmer Verdrängungsströmung über dem OP-Tisch, Schwebstofffilter im Luftkanal

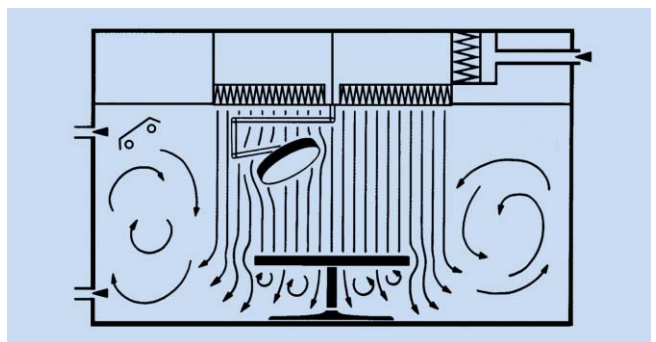


Abb. 4b Operationssaal mit turbulenzarmer Verdrängungsströmung über dem OP-Tisch, Schwebstofffilter in der Decke

Beim im Krankenhaus ebenfalls wichtigen Einsatzgebiet von Schwebstofffiltern, der Reinen Werkbank, spielt der Begriff turbulenzarme Verdrängungsströmung wiederum eine wichtige Rolle. In Reinen Werkbänken wird ein Arbeitstisch mit gereinigter Luft überstrichen, um beispielsweise die Kontamination eines sterilen Arzneimittels mit luftgetragenen Keimen zu vermeiden. Werden auf dem Arbeitstisch der Reinen Werkbank gefährliche Stoffe, wie z.B. Cytostatika, gehandhabt, muß die Abluft der Werkbank ebenfalls mit Schwebstofffiltern gereinigt werden. In Reinen Werkbänken werden üblicherweise Schwebstofffilter der Klasse H 13 bzw. H 14 eingesetzt. Wie auch beim Deckenfilter von OP-Sälen ist es wichtig, einen Schwebstofffilter mit exakter und gleichmäßiger Faltengeometrie einzusetzen, da der Laminaritätsgrad der abströmenden Luft wesentlich von der Faltengeometrie abhängt.

■ Ausführungsformen von Schwebstofffiltern

Sollen Partikel kleiner 1 μm zu hohen Prozentsätzen in einem Faserfilter abgeschieden werden, ist der Einsatz von naßgelegten Mikro-Glasfaserpapieren als Filtermedium notwendig. Nur diese Filtermedien erlauben eine ökonomische Herstellung von Filterelementen mit den benötigten Abscheideleistungen.

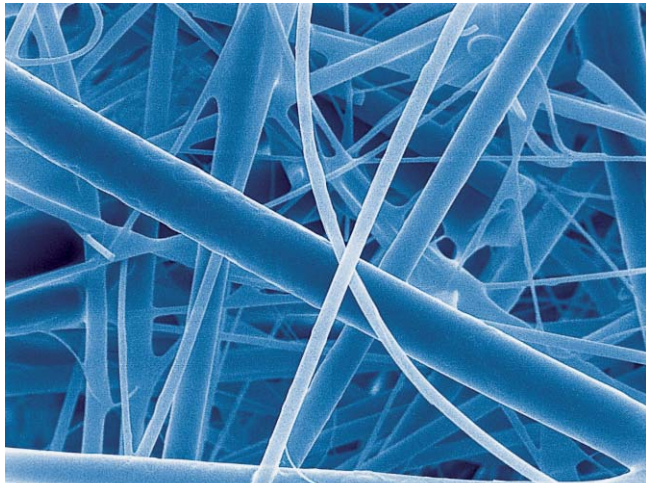


Abb. 5 Thermisch prägbares Mikro-Glasfaserpapier 5 μm

Abbildung 5 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme eines typischerweise in Schwebstofffiltern eingesetzten Glasfaserpapiers. Der für die Filtrationsleistung wichtige Faserdurchmesser liegt im Bereich 0,1 μm bis 0,3 μm . Die in der REM-Aufnahme ebenfalls zu sehenden Fasern größerer Durchmesser dienen der Erhöhung der mechanischen Stabilität des Filtermediums und sind nur in geringen Prozentsätzen im sogenannten Faserblend enthalten. Mikro-Glasfaserpapiere weisen eine relativ hohe Packungsdichte bei geringer Dicke auf, was in verhältnismäßig hohen Druckverlusten der Flächenware resultiert.

Die relativ hohe Druckdifferenz des Filtermediums erfordert es, möglichst viel Filtermedium auf begrenztem Bauraum unterzubringen, damit ausreichend große Luftmengen durch ein Schwebstofffilter hindurchgesetzt werden können. Dabei nimmt die Abstandhaltertechnik entscheidenden Einfluß auf die das Betriebsverhalten bestimmenden Parameter wie z.B. Abscheidegrad, Druckverlust, Staubspeichervermögen und Standzeit, mechanische Stabilität oder Turbulenzgrad der abströmenden Reinluft.

Die älteste Abstandhaltertechnik wird bei den sogenannten Separatorfiltern angewandt (siehe Abb. 6).

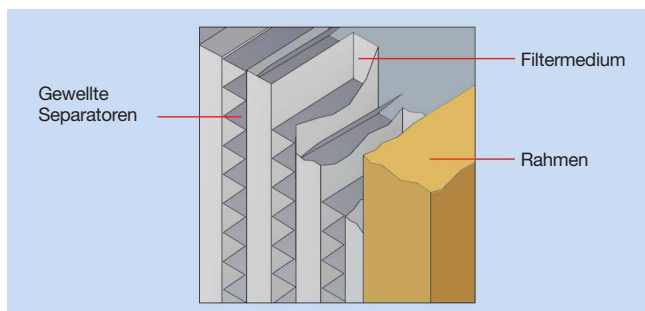


Abb. 6 Separatortechnik

Meist wird eine gewellte Aluminiumfolie zwischen die Lagen des Filtermediums gebracht, um den Kontakt der Medium-

lagen untereinander und die damit verbundene Inaktivierung von Filterflächen zu vermeiden. Eine häufige Falttiefe von Separatorfiltern ist ca. 270 mm bis 280 mm. Allerdings gehen bei der Separatortechnik ca. 20% der Bruttofilterfläche an den Knickkanten der Separatoren verloren, da zwischen zwei sich berührenden Knickkanten keine Luft durchtreten kann.

In der Praxis zeigen sich häufig negative Auswirkungen der scharfkantigen Aluminiumseparatoren auf das empfindliche Mikro-Glasfaserpapier, das leicht durchstoßen oder verletzt werden kann. Diese Löcher im Filterpapier können nicht nur während des Herstellungsprozesses sondern insbesondere auch bei Transport und Einbau der Filterelemente entstehen. Nach Benutzung der Schwebstofffilter müssen für eine sachgerechte Entsorgung oftmals Aluminium und Glasfaserpapier zeitaufwendig und kostenintensiv voneinander getrennt werden.

Insbesondere der Einsatz von Separatorfiltern in der Halbleiterfertigung der mikroelektronischen Industrie mit den derzeit höchsten Anforderungen an die Partikelfreiheit der gefilterten Luft erwies sich als problematisch. Die Aluminiumseparatoren begannen im Laufe der Zeit zu oxidieren und gaben Partikel in die Reinluft ab. Infolge von Vibrationen bildeten sich feine Risse durch scheuernde Metallseparatoren.

Die Konsequenz aus dieser Problematik war die Entwicklung der sogenannten Minipleat-Fadentechnik. Bei der Minipleat-Technik wird ein mit einem Klebstoff überzogener Faden aus Glasfaser oder Baumwolle als Abstandhalter benutzt (siehe Abb. 7).

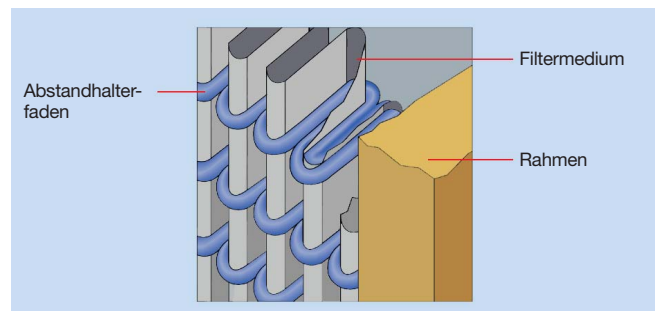


Abb. 7 Minipleat Fadentechnik

Eine Weiterentwicklung der Minipleat-Technik macht zwischenzeitlich die Verwendung einer reinen Klebstoffraupe als Abstandhalterfaden möglich.

Die Fäden werden auf beide Seiten des Glasfaserpapiers in ca. 25 mm Entfernung voneinander aufgebracht und berühren sich nach der Plissierung im fertigen Faltenpaket. Vorteile der Minipleat-Technik sind der Verzicht auf scharfkantige Metallseparatoren und die Möglichkeit, im Vergleich zur Separatortechnik enger zu falten und somit mehr Filterfläche auf einem bestimmten Bauraum unterzubringen. Als nachteilig erweist sich die relative Instabilität des Faltenpaketes, die durch die geringe Steifigkeit des Filtermediums und die gewählte Konfektionierungstechnik bedingt ist. Mit der Minipleat-Technik können daher nur Faltenpakete von maximal 180 mm Falttiefe erzeugt werden, wodurch die auf die Anströmfläche bezogene Filtermediumfläche wiederum begrenzt wird.

Die Limitierung der erzielbaren Falttiefe führte zur Entwicklung der Minipleat V-Filter, bei denen Faltenpakete kleiner Falttiefen in V-Form angeordnet werden, um genügend viel Filterfläche auf eine übliche Bautiefe von 300 mm unterzubringen (siehe Abb. 8).

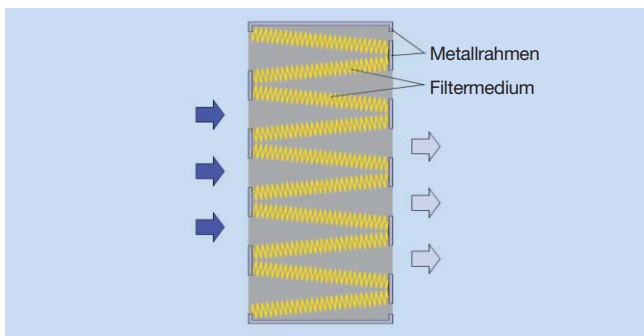


Abb. 8 Minipleat V-Filter

Ein Minipleat V-Filter ist konstruktionsbedingt nur in Anwendungen einsetzbar, in denen der Turbulenzgrad der abströmenden Luft von untergeordneter Bedeutung ist, da die Luftumlenkungen bei der Filterdurchströmung und die Verspernung von Anström- und Austrittsfläche des Filterelementes zu starken Luftverwirbelungen führen. In Anlagen mit turbulenzarmer Verdrängungsströmung müssen Minipleat-Faltenpacks senkrecht angeströmt werden, woraus wiederum der Einsatz von Minipleat-Filtern mit maximal 180 mm Faltentiefe und damit verbundene Druckverlustuntergrenzen resultieren. Aus Gründen der Abdichtung zwischen den bis zu zehn Filtermediumpaketen und dem Filterrahmen ist bei Minipleat V-Filtern in der Regel der Einsatz von Metall als Rahmenmaterial unverzichtbar, d.h. leichter entsorgbare Werkstoffe wie z.B. Holz können nicht verwendet werden. Die Abdichtungsproblematik zwischen äußerem Filterrahmen, vertikalen Halterungsschienen und einzelnen Faltenpaketen erfordert auch die Verwendung großer Mengen an Vergußmasse, was die Filterelemente schwer und unhandlich macht.

Eine Neuentwicklung auf dem Gebiet der Herstellung von Schwebstofffiltern stellt die thermische Prägetechnik dar. Sie erlaubt die Erzeugung von bis zu 280 mm tiefen Faltenpaketen ohne Einsatz jeglicher Fremdmaterialien als Abstandhalter.

Ein komplementäres Prägewalzenpaar prägt in ein erhitztes Mikroglassfaserpapier konische Ausprägungen und die späteren Faltenrücken ein (siehe Abb. 9).

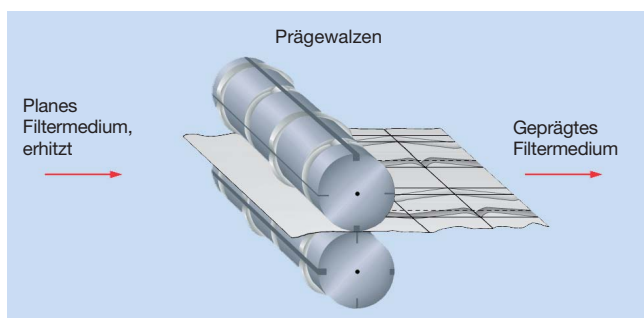


Abb. 9 Thermisches Prägeverfahren

Das Glasfaserpapier ist mit einem speziellen, thermoplastischen Bindemittel ausgerüstet, das in einem bestimmten Temperaturbereich weich und fluid wird, daher eine Prägung erlaubt und nach anschließender Abkühlung aushärtet und die Einprägungen fixiert. Die Form der Auswölbungen auf den Prägewalzen erzielt strömungsgünstige, V-förmige Faltengeometrien. Wie Abbildung 9 zeigt, ragen die Ausprägungen immer abwechselnd aus der Papierebene heraus bzw. in die Papierebene hinein. Nach der anschließenden Faltung berühren sich die Ausprägungen und halten das Filtermedium zur Roh- und zur Reinfluftseite hin auf Abstand (siehe Abb. 10).

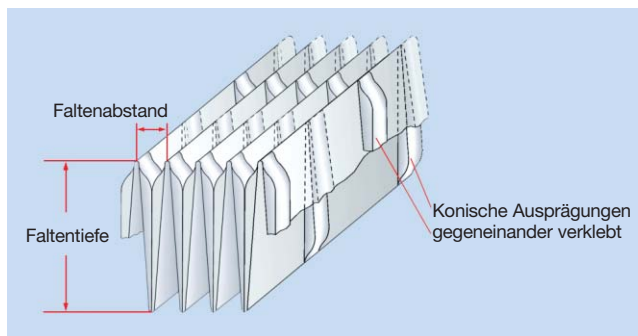


Abb. 10 Thermische Prägetechnik: keine zusätzlichen Abstandhalter

Vor der Faltung werden die Ausprägungen mit einem feinen Sprühkleberauftrag versehen, wodurch das Faltenpaket erheblich in seiner Form fixiert wird. Am Ende des Herstellungsprozesses wird senkrecht zu den Faltenrücken ein Klebstoffaden aufgebracht, der zur zusätzlichen Stabilisierung des Faltenpaketes in Maschinenrichtung dient. Ein mit dem thermischen Prägeverfahren hergestelltes Filterelement ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt.

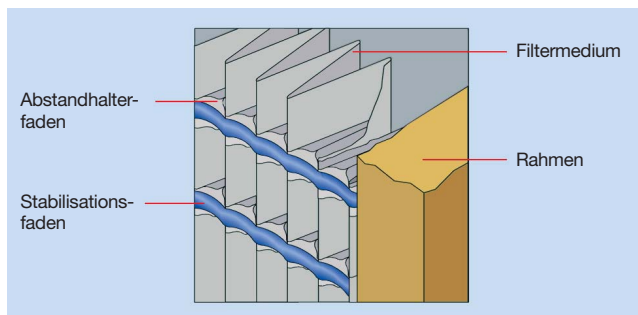


Abb. 11 Thermische Prägetechnik

Mit dem thermischen Prägeverfahren können Faltenpakete mit Faltentiefen bis zu 280 mm und Breiten bis zu 1220 mm in einem Stück hergestellt werden. Die verfahrensbedingte, V-förmige Faltengeometrie bildet die Grundlage für eine äußerst homogene Durchströmung des Filterelementes, da der Luft eine größtmögliche Querschnittsfläche am Eintritt in die Falte und beim darauffolgenden Austritt aus der reinfluftseitigen Falte angeboten wird (siehe Abb. 12).

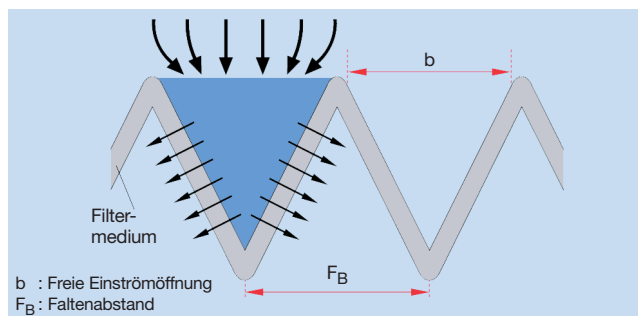


Abb. 12 V-förmige Faltengeometrie (Thermische Prägetechnik)

Innerhalb einer Falte bleibt die Strömungsgeschwindigkeit praktisch konstant, da Luftmassenstrom und Querschnittsfläche auf der Anströmseite gleichzeitig kleiner bzw. auf der Abströmseite größer werden.

Das thermische Prägeverfahren ermöglicht die Herstellung von Schwebstofffiltern mit einerseits hohen Luftvolumenströmen bei gegebener Druckdifferenz oder andererseits besonders niedrigen Druckdifferenzen bei konstanter Anströmgeschwindigkeit.

Ersteres ist dann von Bedeutung, wenn bei gegebenem Luftvolumenstrom eine Lüftungsanlage dimensioniert werden soll. Gegenüber marktüblichen Separatorfiltern lassen sich mit den neuentwickelten Schwebstofffiltern bei gleicher Baugröße der Filterelemente ca. 40 bis 50% höhere Luftvolumenströme bei gleicher Druckdifferenz bewältigen, wodurch kompaktere Anlagen gebaut werden können.

Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Minipleat V-Filtern ergeben sich Möglichkeiten einer wesentlich einfacheren und funktionelleren Konfektionierung. Ein mit dem thermischen Prägeverfahren gefertigtes Filterelement besteht aus nur einem Filtermediumpaket und den vier Rahmenteilen. Die Abdichtung zwischen Filtermedium und Rahmen wird dadurch erheblich vereinfacht, auch wenn Filterrahmen aus Holz verwendet werden. Dies reduziert die benötigte Vergußmasse auf ein Minimum, wodurch das Filtergewicht verringert und die Entsorgung erleichtert wird.

Die thermische Prägetechnik vereint die nachfolgend zusammengefaßten Eigenschaften:

- ▶ turbulenzarme Durch- und Abströmung durch aerodynamisch optimale V-Form der Falten und äquidistante, exakte Faltengeometrie
- ▶ niedrige Druckverluste bzw. hohe Volumenströme durch Faltentiefen bis 280 mm
- ▶ sehr gute Nutzung der installierten Filterfläche durch hohes Verhältnis von aktiver Filterfläche zu Bruttofilterfläche
- ▶ schonende Faltung des Filtermediums in warmem Zustand und dadurch Vermeidung von Mikrorissen auf den Faltenrücken
- ▶ keine Fremdmaterialien als Abstandhalter
- ▶ Herstellung von bis zu 1220 mm breiten und 1830 mm langen Faltenpaketen in einem Stück.

Dem Betreiber von Reinräumen und Lüftungsanlagen mit Schwebstofffiltern bieten sich daraus zahlreiche Vorteile:

- ▶ niedrige Energiekosten beim Betreiben der Anlagen aufgrund niedriger Druckverluste
- ▶ hoher Laminaritätsgrad der abströmenden Luft
- ▶ deutlich reduzierte Gefahr von Beschädigungen des Filtermediums während Transport und Einbau
- ▶ Vermeidung von Korrosionsproblemen beim Einsatz von metallfreien Filtern bzw. Filtern mit korrosionsfreien Rahmen (z.B. Aluminium)
- ▶ geringe Entsorgungskosten bei metallfreien Filtern.

■ Zusammenfassung

Die neuentwickelte thermische Prägetechnik vereint die vorteilhaften Eigenschaften von Separator- und Minipleat-Fadentechnik. Ohne Einsatz von Fremdmaterialien als Abstandhalter kann bis zu 280 mm tief gefaltet werden. Dies ermöglicht die Herstellung entsorgungsfreundlicher Filter mit niedrigen Druckverlusten. Durch die verfahrensbedingten V-förmigen Faltengeometrien wird eine homogene Durchströmung des Filtermediums und turbulenzarme Abströmung erreicht. Die außergewöhnliche Stabilität des Filtermediumpaketes erlaubt die Herstellung von Filtern in bis zu 1220 mm Breite und 1830 mm Länge in einem Stück ohne verbindende Zwischenstege. Damit wird ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit vor gefährlichen Keimen im Krankenhaus bei gleichzeitig reduzierten Energiekosten geleistet.

Freudenberg Filtration Technologies KG
69465 Weinheim / Germany
Tel. (06201) 80-6264 | Fax (06201) 88-6299
viledon@freudenberg-filter.com | www.viledon-filter.de

