

Filtermedien zur Kuchenfiltration – Schnittstelle zwischen Suspension und Apparat

Harald Anlauf

Die Kuchenfiltration stellt als Verfahren der Oberflächenfiltration eine besonders flexible Variante aus der weit gefächerten Matrix von physikalisch unterschiedlichen Möglichkeiten zur Abtrennung von Partikeln aus Flüssigkeiten dar. In Verbindung mit Methoden der Suspensionsvorbehandlung, wie etwa Aufkonzentrierung und/oder Agglomeration, wird eine Partikelgrößenspanne von mehreren Millimetern bis deutlich unterhalb von einem Mikrometer abgedeckt. Die vielfältigen Apparatkonstruktionen und Funktionsprinzipien kuchenbildender Filterapparate benötigen maßgeschneiderte und speziell angepasste Filtermedien, das den mechanischen Anforderungen des Apparates, und den chemisch/physikalischen Gegebenheiten der Suspension genügen muss.

Schlagerwörter: Filterieren, Suspension, Filtermedien, Gewebe

Eingegangen: 2. Juli 2007; *akzeptiert:* 7. August 2007

1 Einführung

Die Kuchenfiltration stellt als Verfahren der Oberflächenfiltration eine besonders flexible Variante aus der weitgefächerten Matrix von physikalisch unterschiedlichen Möglichkeiten zur Abtrennung von Partikeln aus Flüssigkeiten dar. In Verbindung mit Methoden der Suspensionsvorbehandlung, wie etwa Aufkonzentrierung und/oder Agglomeration, wird eine Partikelgrößenspanne von mehreren Millimetern bis deutlich unterhalb von einem Mikrometer abgedeckt. Es können Suspensionen stark unterschiedlicher Konzentration, Partikelform und Partikelkonsistenz verarbeitet werden. Die entstehenden Filterkuchen können von einer starren Gerüststruktur bis hin zu schwammartig kompressiblem Verhalten unterschiedlichste Konsistenzen aufweisen. Die zu trennenden Mengenströme variieren von vielen Kubikmetern bis zu wenigen Litern pro Stunde. Temperatur, Druck und pH-Wert variieren in weiten Grenzen. Vom mineralischen Rohstoff bis hin zu hochwirksamen Pharmazeutika werden extrem unterschiedliche Anforderungen an die Hygiene der Prozessbedingungen und an die Reinheit des Produktes gestellt.

Die Vielfalt der Ausgangsbedingungen und der Forderungen an das Trennergebnis haben allein auf dem Sektor der Kuchenfiltration zu

einer entsprechend großen Zahl unterschiedlicher Druck- und Pressfilter sowie Filterzentrifugen geführt. Entsprechend vielfältig muss das Angebot an Filtermedien sein, um den daraus resultierenden Anforderungen gerecht zu werden. Diese existieren in Form von robusten metallischen Spaltsieben, gesinterten porösen Schichten, Wirrfaservliesen, mikroporösen Membranstrukturen und unterschiedlichsten Gewebekonstruktionen [1, 2]. Sie werden aus diversen Materialien hergestellt und für den jeweiligen Anwendungsfall konfektioniert.

Entscheidend für den Erfolg eines Trennprozesses ist die perfekte Abstimmung des Zusammenspiels von Filtermedium, Suspension, Apparatkonstruktion und der Betriebsweise des Apparates. Neben der Erfüllung der Abscheidefunktion muss das Filtermedium sowohl den mechanischen Beanspruchungen durch den Filterapparat als auch den physikalisch/chemischen Umgebungsbedingungen ausreichend gewachsen sein, um eine genügend lange Standzeit zu gewährleisten. Eine an den Apparat präzise angepasste Konfektionierung und eine gute Regenerierbarkeit der sich mit der Zeit mit Partikeln zusetzenden Porenstruktur sind für die Einsatzdauer eines Filtermediums wesentliche Parameter.

Für die zur Auswahl eines geeigneten Filtermediums notwendige Bewertung der Trenneigenschaften und des Durchströmungswider-

Entscheidend für den Erfolg eines Trennprozesses ist die perfekte Abstimmung des Zusammenspiels von Filtermedium, Suspension, Apparatkonstruktion und der Betriebsweise des Apparates.

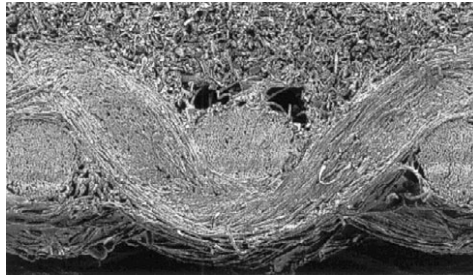


Abbildung 1. „Azurtext“-Membranfiltergewebe (Madison Filter).

standes sind verschiedene experimentelle Testmethoden etabliert [3 – 5] und erste strömungsmechanische Simulationsrechnungen [6] verfügbar. Der für die Filterkuchenbildung tatsächlich relevante Filtermediumwiderstand kann allerdings niemals aus der Struktur des Filtermediums allein abgeleitet werden, sondern muss im Zusammenspiel mit der abzutrennenden Suspension und den Filtrationsbedingungen bestimmt werden. Entscheidend für den letztlich resultierenden und für die Filterkuchenbildung maßgeblichen Durchströmungswiderstand des Filtermediums ist seine ursprüngliche Struktur in Verbindung mit in diese Struktur eingedrungenen Partikeln und der ersten, die Filtermediumporen überbrückenden Partikelschicht.

Die Entwicklung von neuen und immer besser an die gestellten Trennaufgaben angepassten Filtermedien ist noch lange nicht zum Stillstand gekommen. Der Trend geht hin zur Abscheidung immer kleinerer Partikel bei gleichzeitig höherer Filtratklarheit. Besonders interessant erscheinen in diesem Zusammenhang neue gewebeverstärkte Membranfiltermedien und Nanofasermaterialien [7], welche die Qualität kuchenbildender Abscheidungsverfahren in vielerlei Hinsicht verbessern könnten. Als Beispiel hierfür sei das auf der AICHEMA 2006 von der englischen Fa. Madison Filter (Clear Edge Gruppe) präsentierte und in Abb. 1 wiedergegebene neuartige Produkt Azurtext™ angeführt.

Hierbei handelt es sich um eine mikroporöse Polymermembran hoher Porosität, die in eine Gewebestruktur aus Polypropylen integriert ist. Auf diese Weise wird hohe Abscheideleistung mit hoher Permeabilität und mit so großer mechanischer Stabilität des Mediums verbunden, dass es auf allen gängigen Apparaten zur Kuchenfiltration, wie Vakuumdrehfiltern, Filterpressen oder Druckblattfiltern eingesetzt werden kann. Die mittlere Porengröße einer vergleichsweise engen Porengrößenverteilung wird mit 6 µm angegeben.

2 Generelle Anforderungen an ein Filtermedium zur Kuchenfiltration

Die Eigenschaften eines Filtermediums lassen sich in zwei wesentlichen Aspekten zusammenfassen. Dies sind einerseits die Filtrationseigenschaften, welche die Qualität der Trennung in Hinblick auf Trenngrad und Durchsatz bestimmen und andererseits die Standzeit, welche die Betriebskosten und damit die Wirtschaftlichkeit des Trennverfahrens beeinflusst. Ein maßgeblicher Faktor für jeden der genannten Aspekte ist die Struktur des Filtermediums.

Um möglichst kleine Partikel sicher abscheiden zu können, sollten die absoluten Porendurchmesser möglichst klein und mit geringer Varianz um einen Mittelwert herum verteilt sein. Weil der Durchströmungswiderstand so klein wie möglich sein sollte, ist eine große Porosität bzw. eine große freie Durchströmungsfläche wünschenswert. Gewebestrukturen aus sich senkrecht nach einem vorgegebenen Muster kreuzenden Schuss- und Kettfäden ermöglichen eine vergleichsweise präzise definierte Porengeometrie und -größe. Die Porosität von Geweben liegt in der Regel deutlich unter 60 %. Die Porengröße ist infolge limitierter Fadedurchmesser auf Werte oberhalb von 1 µm begrenzt. Deutlich höhere Porositäten lassen sich mit Wirrfaservliesen erreichen, jedoch besitzen diese wegen ihrer spezifischen Herstellungsweise eine relativ breite Porengrößenverteilung. In der Zukunft könnten für die Abscheidung feinstpartikulärer Substanzen neuartige Filtermaterialien mit Nanofasern sehr interessant werden, weil sie extrem kleine Porendurchmesser bei gleichzeitig sehr hohen Porositäten zulassen. Bei diesen Betrachtungen ist aber immer zu beachten, dass die maximale Porengröße eines Filtermediums zwar den Durchmesser der größten Kugel definiert, welche gerade noch abgeschieden wird, doch nach der Bildung von Partikelbrücken über den Poren des Filtermediums auch deutlich kleinere Partikel sicher abgeschieden werden können.

Neben guten Filtrationseigenschaften soll ein Filtermedium eine möglichst hohe Standzeit aufweisen. Hier muss zunächst die Stabilität des Mediums gegenüber den mechanisch/physikalischen Beanspruchungen des Trennprozesses und gegenüber den chemischen Umgebungsbedingungen gewährleistet sein. Die Konstruktionsweise und der Werkstoff des Filtermediums sind hier ausschlaggebend. Beispielsweise wird der Filterkuchen in einer kontinuierlich arbeitenden Schubzentrifuge bei Anpressung durch die Zentrifugalkraft

Neben guten Filtrationseigenschaften soll ein Filtermedium eine möglichst hohe Standzeit aufweisen.

über das Filtermedium hinweggeschoben. Die Forderung nach Verschleißminimierung und geringst möglicher Reibung führt hier zum Einsatz von in Transportrichtung geschlitzten metallischen Spaltsieben. Bei kontinuierlich umlaufenden Vakuumbandfiltern oder Doppelbandpressfiltern hat das Filtergewebe neben der Abscheide- auch Transportfunktion und muss den entstehenden Zug- und Druckkräften widerstehen können. Die Abscheidung von Partikeln aus heißen und chemisch aggressiven Suspensionen erfordert eventuell den Einsatz von Filterkerzen aus keramischen Sintermaterialien für eine diskontinuierliche Druckfiltration. Bei der Trennung von lösungsmittelhaltigen Gemischen in diskontinuierlichen Schälzentrifugen müssen wegen der Explosionsgefahr elektrostatische Aufladungen vermieden werden und die Filtermedien eine gewisse elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Abhängig vom Trennverfahren und von der Trennaufgabe sind also so unterschiedliche mechanisch/physikalische Aspekte wie Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Grenzbiegespannung, Abriebfestigkeit, Feuchtigkeitsaufnahme, Kaltfluss, Temperaturbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit, elektrischer Widerstand, Lichtbeständigkeit, Gewicht u. a. zu berücksichtigen. Die chemische Beständigkeit muss je nach Anwendungsfall gegenüber Säuren, Laugen, organischen Lösungsmitteln oder diversen speziellen Chemikalien gewährleistet sein. Während z. B. PTFE, Polypropylen oder rostfreier Stahl weitgehend unempfindlich gegenüber dem pH-Wert sind, kann Polyamid nicht im sauren und Polyester nicht im stark alkalischen Bereich eingesetzt werden.

Die Standzeit eines Filtermediums wird weiterhin empfindlich dadurch beeinflusst, ob die Porenstruktur auf Dauer permeabel gehalten werden kann oder mit der Zeit durch eingedrungene Partikel, durch auskristallisierende Stoffe oder durch biologisches Fouling undurchlässig wird. Mittels Rückspülung, Bedüsung, Beaufschlagen mit Ultraschall, Auslaugen u. a. kann der Verstopfung eines Filtermediums entgegengewirkt werden. Je einfacher die Porenstruktur des Filtermediums aufgebaut ist, desto leichter lässt sich deren dauerhafte Verstopfung vermeiden. Ein Spaltsieb oder ein aus einzelnen Drähten gewebtes Monofilamentgewebe sind wesentlich einfacher zu reinigen, als Wirrfaservliese oder gesinterte Filterschichten, die eine gewisse Tiefenfilterwirkung besitzen. Eine Porenblockade im Filtermedium wird weiterhin durch das Verhältnis von Poren- und Partikelgrößenverteilung zueinander und durch die Suspensionskonzentration bestimmt. Je ähnlicher sich Porengrößen- und Partikelgrößen-

verteilung sind, desto eher können Partikel in das Filtermedium eindringen, die sich in einem Porenkanal verklemmen und diesen komplett verstopfen. Je geringer die Suspensionskonzentration wird, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass mehrere Partikel gleichzeitig versuchen, in eine Pore einzudringen, sich dabei gegenseitig behindern und eine Feststoffbrücke ausbilden. Bei Filtrationsanwendungen, die unter sterilen Bedingungen stattfinden müssen, reicht es nicht, das Filtermedium beispielsweise lediglich mit Dampf zu sterilisieren, weil die abgetöteten Keime dadurch noch nicht aus der Porenstruktur des Filtermediums entfernt sind.

Ein dritter Aspekt, welcher die Standzeit eines Filtermediums, aber unter Umständen auch seine Filtrationseigenschaften limitiert, ist die Konfektionierung. Das Filtertuch muss passgenau am Filterelement anliegen. Wenn z. B. der Beutel eines Filtersektors für Vakuumscheibenfilter zu groß ist, dann gerät er in Gefahr, beim Abblasen des Filterkuchens durch schleifende Berührung mit dem Kuchenabnahmeschaber schnell zu verschleifen. Nähte müssen sauber verarbeitet und mit genügend starken Fäden aus dem richtigen Material ausgeführt sein. Es darf keine sichtbaren Nadeldurchstiche geben und Verbindungstechniken, wie Reiß- oder Steckverschlüsse, dürfen keine größeren Poren besitzen als das Filtermedium selbst.

Schließlich muss der Filterkuchen am Ende des Filtrationsvorganges noch vom Filtermedium abgenommen werden und daher sollte die Oberfläche des Filtermediums so glatt wie möglich sein, um die Haftung zwischen Kuchen und Tuch zu minimieren. Neben der generellen Konstruktion des Filtermediums kann die Oberflächenqualität mit Nachbehandlungsverfahren, wie etwa Kalandrierung durch Pressen zwischen heißen Walzen, Absengen herausragender Faserenden oder Faserbeschichtungen verbessert werden.

Neben den Anforderungen, welche die technische Funktion des Filtermediums betreffen, müssen seit jüngerer Zeit etwa Filtermedien, die mit Nahrungsmitteln oder Pharmazeutika in Kontakt kommen, genau spezifizierten Regeln entsprechen. Gemäß FDA-Bestimmungen werden daher z. B. gewobene Filtermedien, die aus Polymeren hergestellt werden, als indirekte Lebensmittelzusätze eingestuft und die Polymere für das Garn müssen dem jeweiligen CFR Titel 21, Teil 177 oder ähnlichen Regeln entsprechen [8]. Probleme entstehen hierbei bezüglich der Rückverfolgbarkeit des Polymerwerkstoffes und durch den Einsatz von zusätzlichen chemischen Substanzen (spin-finish) zur Unterstützung des Web-



Abbildung 2. Endkontrolle eines pharmatauglichen Filterbeutels (SEFAR).

verfahrens, von denen Restmengen auf dem Garn zurückbleiben können. Neben der gleichbleibenden Filtertuchqualität muss also eine lückenlose Chargenrückverfolgbarkeit aller Lieferungen garantiert werden können. Speziell für den Einsatz in der Pharmaindustrie hat z. B. die schweizerische Fa. SEFAR einen Konfektionsprozess nach definierten GMP-Leitlinien für alle typischen Kuchenfilter der Pharmaindustrie, wie Schäl- und Stülpfilterschalen oder Nutschen-Filter/Trocknern eingeführt. Abb. 2 zeigt die Endkontrolle eines Filterbeutels.

Das typische und nach wie vor für die Kuchenfiltration am häufigsten eingesetzte Filtermedium ist das Gewebe.

3 Arten von Filtermedien für die Kuchenfiltration

Im Gegensatz zu Tiefenfiltermedien aus Partikel- oder Faserschichten, bei denen die abzutrennenden Partikel im Innern der Porenstruktur zurückgehalten werden, scheiden Filtermedien zur Kuchenfiltration den Feststoff an ihrer Oberfläche ab. Dies findet wiederum seine Grenze bei Membrantrennverfahren, wie

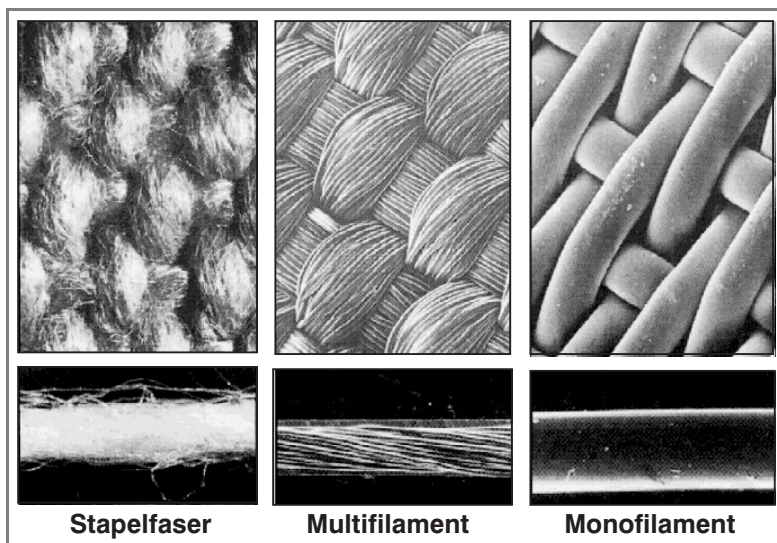


Abbildung 3. Stapel-, Multifilament- und Monofilamentfaser.

der Ultrafiltration, wo die Durchströmungswiderstände der mikroporösen Membranen so groß werden, dass ein Kuchenaufbau technisch und wirtschaftlich keinen Sinn mehr macht oder bei Siebfiltern, die hochpermeabel sein sollen und schon vor dem Kuchenaufbau im eigentlichen Sinne einen kritischen Druckverlust erreichen, sodass sie regeneriert werden müssen.

Das typische und nach wie vor für die Kuchenfiltration am häufigsten eingesetzte Filtermedium ist das Gewebe. Dieses kann als konstruiertes Flächengebilde aus sich nach einem bestimmten Muster senkrecht überkreuzenden Kett- und Schussfäden auf flexibelste Art an die zu lösende Trennaufgabe angepasst werden. Dennoch werden für spezielle Fälle auch anders aufgebaute Filtermedien für die Kuchenfiltration verwendet und zum Teil mit der Gewebetechnik kombiniert. Hierzu gehören die bereits erwähnten massiven metallischen Spaltsiebe, gesinterte Filtermedien aus pulver- oder faserförmigen Ausgangsstoffen, mehrschichtig und asymmetrisch aufgebaute Gewebeschichten, die webtechnisch verbunden oder versintert sind, Nadelfilze und in Ansätzen mikroporöse Membranen. Insbesondere die Filtermedien mit dreidimensionaler Porenstruktur sind besonders kritisch auf eine ausreichende Regenerierbarkeit hin zu prüfen, weil sie Partikel nach Art der Tiefenfiltration in ihre Struktur einlagern können.

Die ursprünglich auch im technischen Bereich zur Gewebeerstellung verwendeten Naturfasern sind heute weitestgehend durch synthetische Materialien, aber auch durch Metall, Glas oder Mineralstoffe verdrängt worden. Sowohl Struktur, Durchmesser und Material der Fäden für Kette und Schuss als auch das Muster, in dem sich die Fäden umschlingen, prägen die Eigenschaften des entstehenden Gewebes. Die in Abb. 3 wiedergegebenen Stapelfaser-, Multifilament- und Monofilamentgarne stellen die Basistypen der für die Gewebekonstruktion verwendeten Fäden dar.

Zur Erzeugung einer Stapelfaser werden Einzelfasern begrenzter Länge zunächst gesponnen und dann verzwirrt. Stapelfasern besitzen eine vergleichsweise raue Oberfläche und der Fadendurchmesser ist nicht konstant. Sie erschweren die Kuchenablösung durch erhöhte Verhaftung zwischen Gewebe und Kuchen. Der guten Partikelrückhaltung auch bei geringeren Suspensionskonzentrationen steht eine Neigung zur Verblockung durch in die Struktur eingedrungene Partikel gegenüber. Monofilamentgarne dagegen bestehen aus einzelnen Endlosdrähten konstanten Durchmessers. Dies ermöglicht die Herstellung von Geweben mit sehr präziser Poren-

größe. Monofilamentgewebe haben glatte Oberflächen und neigen nur gering zur Verstopfung. Ein Fadenbruch jedoch erzeugt sofort eine Fehlstelle, die zu unerwünschtem Partikeldurchtritt führen kann. Das Multifilamentgewebe schließlich wird aus verzwirnten Endlosdrähten erzeugt. Es besitzt bei vergleichsweise präziser Porengröße und glatter Oberfläche eine hohe Stabilität, weil ein Faserbruch hier noch nicht zur Bildung einer Fehlstelle im Gewebe führt. Hiermit stehen für die Gewebekonstruktion Fäden unterschiedlicher Materialien, verschiedener Garnart und variablem Fadendurchmesser zur Verfügung, die auch in unterschiedlicher Kombination miteinander verwebt werden können.

Neben der Art der verwendeten Fäden werden die Eigenschaften eines Gewebes wesentlich durch die Gewebekonstruktion bestimmt. Neben offenen Geweben mit senkrecht zur Gewebeebene verlaufenden durchgehenden Poren (z. B. Leinwandbindung) können auch blickdichte Strukturen mit durch das Gewebe hindurch gewundenen Porenkanälen (z. B. Tressenbindung) erzeugt werden. Bei der Leinenbindung gemäß Abb. 4 überkreuzen sich Kett- und Schussfäden jeweils im Wechsel und bilden Porenöffnungen quadratischen Querschnittes.

Bei einer Körperbindung hingegen bindet ein Schussfaden jeweils über zwei oder mehr Kettfäden. Typisches Kennzeichen von Tressengeweben ist die Verwendung von Kett- und Schussfäden unterschiedlicher Dicke.

Durch Kombination von Fäden und Gewebungsart lässt sich eine schier unerschöpfliche Vielfalt von Geweben unterschiedlicher Eigenschaften konstruieren und somit an die Erfordernisse des Trennprozesses anpassen. Darüber hinausgehend können verschiedene Gewebe miteinander verwebt oder versintert werden. Hiermit ist es möglich, ein mechanisch weniger stabiles Feinstgewebe geringer Dicke zur Optimierung der Anscheidung mit einem mechanisch robusten Trägergewebe zur Optimierung der Belastbarkeit miteinander zu kombinieren.

Da es sich bei einem Gewebe um ein konstruiertes Gebilde mit definierter Geometrie handelt, können entscheidende Gewebeparameter, wie Porenquerschnitt, Porosität, Gewebedicke u. a. nach entsprechenden Wünschen vorherberechnet werden. Hierzu stehen seit langem Berechnungsvorschriften zur Verfügung [9, 10]. Eine Qualitätsprüfung durch verschiedene praktische Testmethoden ersetzt dies natürlich noch nicht. Die exakte Beschreibung der Gewebegeometrie ermöglicht es aber, sich mit Hilfe moderner CFD-Methoden (Computational Fluid Dynamics) Informatio-

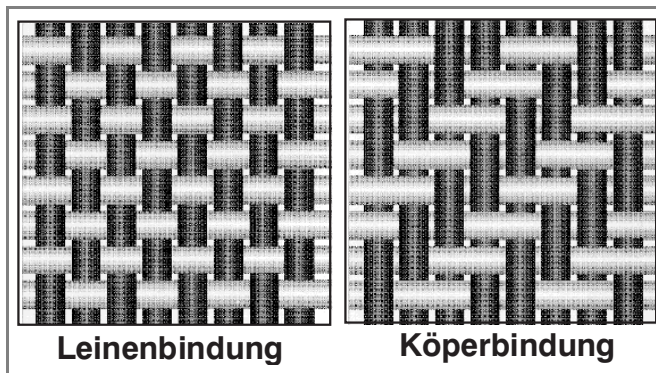


Abbildung 4. Leinenbindung und Körperbindung.

nen über Druckverluste, Durchsatz u. a. zu verschaffen [6]. Wie weiter unten noch gezeigt werden wird, ist der Druckverlust eines Filtermediums bei der Durchströmung mit einem partikelfreien Fluid noch nicht ausreichend, um dessen Eignung für einen spezifischen Einsatzfall beurteilen zu können. Hierzu ist nach wie vor noch das Filterexperiment mit Originalsuspension erforderlich, weil die entsprechende theoretische Simulation des beginnenden Abscheidvorganges, der den letztlich relevanten Durchflusswiderstand des Filtermediums festlegt, infolge seiner Komplexität noch in den Kinderschuhen steckt. Sehr interessante und viel versprechende Ansätze für die CFD-Simulation von Verstopfungseffekten durch Partikelanlagerung an der Filtermediumoberfläche sind allerdings auch auf diesem Gebiet bereits verfügbar [11].

4 Nachbehandlung und Konfektionierung

Die Eigenschaften der zuvor beschriebenen Gewebekonstruktionen können durch verschiedene Gewebenachbehandlungsmethoden modifiziert und noch besser an den jeweiligen Trennprozess angepasst werden. Die Glättung der Gewebeoberflächen zur Verbesserung des Filterkuchenabwurfes spielt hierbei eine wichtige Rolle. Die Oberfläche von Stapelfasergeweben kann durch Absengen der heraus-

Neben der Art der verwendeten Fäden werden die Eigenschaften eines Gewebes wesentlich durch die Gewebekonstruktion bestimmt.

Die Eigenschaften der zuvor beschriebenen Gewebekonstruktionen können durch verschiedene Gewebenachbehandlungsmethoden modifiziert und noch besser an den jeweiligen Trennprozess angepasst werden.

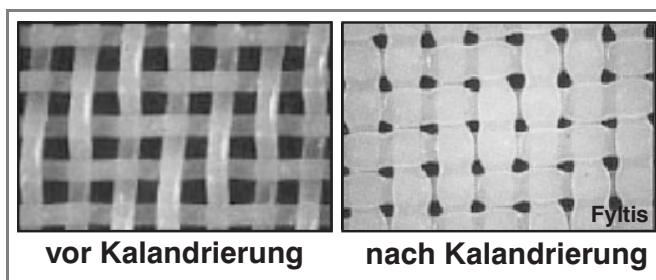


Abbildung 5. Gewebeoberfläche vor und nach der Kalandrierung (Fyltis).

ragenden Faserenden und thermoplastische Materialien können gemäß Abb. 5 durch Heißkalandrierung mittels Presswalzen geglättet werden. Zu beachten ist hierbei natürlich die Verringerung des freien Durchströmungsquerschnittes und die Verkleinerung der Maschenweite.

Die Oberflächeneigenschaften von Geweben können hinsichtlich ihrer Benetzungseigenschaften oder ihrer elektrischen Leitfähigkeit auch mit Appreturen versehen werden, wobei diese Beschichtungen nur eine begrenzte Dauerfestigkeit besitzen. Neben der Oberflächenbehandlung werden Gewebe bei Bedarf durch Thermofixierung spannungsfrei gemacht oder in heißer Flüssigkeit einer Schrumpfung unterworfen, um das Gewebe zu stabilisieren und für die nachfolgende Konfektionierung optimal vorzubereiten.

Für die Konfektionierung gilt ganz allgemein, dass Gewebe passgenau am Filtergrundkörper anliegen sollen. Es dürfen keine Nadeldurchstiche vorhanden sein, welche die Gewebeporengröße überschreiten. Nähte müssen exakt geführt und mit genügend starken Fäden aus geeignetem Material ausgeführt sein. Häufig müssen Gewebekanten miteinander verbunden werden. Die Verbindungsstellen müssen dicht sein und sollen möglichst in der Höhe nicht aufragen. Nahtlose Handverwebung, Schweißnähte, Steckverbindungen oder Reißverschlüsse sind hier üblicherweise in Gebrauch. Abb. 6 zeigt ein modernes Tuchverschlussystem, das Filterbänder endlos miteinander verbindet und für einen glatten,

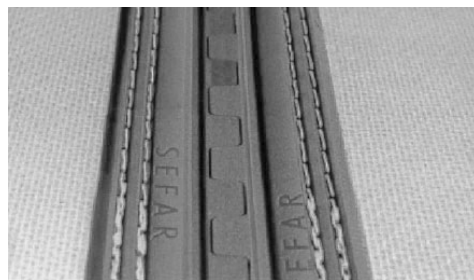


Abbildung 6. Verbindungselement für Endlosfilterbänder (SEFFAR).

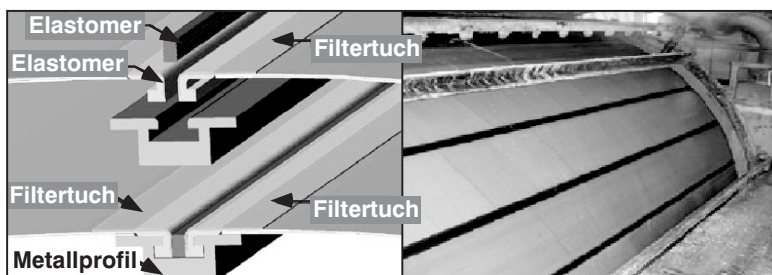


Abbildung 7. Filtertuchbefestigungssystem Frame Trak® (Clear Edge/BOKELA).

stabilen und vor allem auch partikeldichten Übergang an der Stoßstelle sorgt.

Auf kontinuierlich arbeitenden Trommel-, Scheiben- und Planfiltern muss das Filtermedium auf einem Filterzellengrundkörper fixiert werden. Dies wird konventionell mit relativ viel Aufwand durch Einschlagen der Tücher mit Gummischnüren in Nuten bewerkstelligt. Auf der ACHEMA 2006 wurde hierzu ein völlig neu entwickeltes System vorgestellt, das den Filtertuchwechsel wesentlich beschleunigt und erleichtert. Es besteht im Wesentlichen aus einem speziell gestalteten Stahlprofil, einem Elastomerprofil zur Aufnahme der Filtertuchenden und einem Elastomerstreifen zur Fixierung. Die Fixierung des Tuches erfolgt von Hand mit einem Spezialwerkzeug. Das Filtertuch kann somit segmentweise schnell und unkompliziert ausgetauscht werden. Abb. 7 zeigt einen Trommelfilter als Ausführungsbeispiel.

5 Verfahrenstechnische Einflüsse

5.1 Feststoffdurchschlag

Filtermedien für die Kuchenfiltration werden aus Gründen der Durchlässigkeit und der Vermeidung von Porenverstopfungen in der Regel so ausgewählt, dass im ersten Moment der Kuchenbildung noch Partikel durch die Poren des Filtermediums in Form eines „Trübstoßes“ oder „Feststoffdurchschlages“ hindurchtreten können. Erst die Ausbildung von Partikelbrücken über diesen Poren ermöglicht dann die Gewinnung eines partikelfreien Filtrates. Die Partikelbrücken gehören also verfahrenstechnisch sowohl aus Gründen der Abscheidewirkung als auch in Hinblick auf den relevanten Durchströmungswiderstand zum Filtermedium. Der Filtratanfall während der Brückenbildung entscheidet über die ins Filtrat gelangende Feststoffmenge. Untersuchungen zu den hier wirkenden Einflussparametern sind zahlreich in der Literatur dokumentiert [12 – 15]. Bei gegebener Kombination aus Filtermedium und Partikelgrößenverteilung ist die Suspensionskonzentration der wesentliche Einflussparameter. Je höher die Feststoffkonzentration ist, desto schneller erfolgt die Brückenbildung und desto geringer ist die ins Filtrat gelangende Partikelmenge. Abb. 8 verdeutlicht dies am Beispiel eines kontinuierlich arbeitenden Trommelfilters, mit dem ein konstanter Feststoffmassenstrom abgeschieden werden soll.

Die Erhöhung der Feststoffkonzentration in der zulaufenden Suspension wirkt sich hier dreifach senkend auf den Feststoffgehalt im

Filterat aus. Erstens bilden sich die Feststoffbrücken schneller über den Maschen des Filtertuches. Zweitens bildet sich auf der Flächeneinheit ein Filterkuchen größerer Dicke h_k , und ein größerer Mengenanteil des Feststoffes wird ohne Verluste auf der Brückenschicht abgeschieden. Infolge des dickeren Filterkuchens kann schließlich und drittens die freie Filterfläche A reduziert werden, um den geforderten konstanten Feststoffdurchsatz zu gewährleisten. Vergleicht man Filtergewebe gleicher Webart und unterschiedlicher Maschenweite miteinander, so steigt bei Filtration unter ansonsten vergleichbaren Bedingungen der Feststoffdurchschlag zu größeren Gewebeporen hin erwartungsgemäß an. Abb. 9 veranschaulicht diesen Zusammenhang am Beispiel von Geweben in Leinenbindung und der Filtration einer Kohlesuspension mit einem diskontinuierlichen Druckfilter. Die durch das Filtermedium bei einem Filterzyklus hindurchgetretene Feststoffmenge wird hier auf 1 m² Filterfläche normiert. Wie die beiden Kurven für unterschiedliche Suspensionskonzentration erneut zeigen, kann der Feststoffdurchschlag durch Voreindickung deutlich reduziert werden.

Bezüglich des Einflusses der Gewebe- bzw. Porenstruktur ist evident, dass die Rückhaltefähigkeit eines Filtermediums um so besser wird, desto labyrinthartiger die Porenkanäle sind. Wegen dieser Tiefenfilterkomponente haben Wirrfaservliese auch bei ansonsten ungünstigen Abscheidebedingungen eine vergleichsweise sehr gute Partikelrückhaltung. Problem sind hier die Verstopfungsneigung und die zum Teil schlechte oder unmögliche Regenerierbarkeit, die den praktischen Einsatz derartiger Filtermedien dann letztendlich stark einschränkt.

5.2 Filtermediumwiderstand

Wie schon weiter oben beschrieben, muss der für die praktische Filtration relevante Filtermediumwiderstand immer in Verbindung mit dem abzutrennenden Partikelsystem bestimmt werden. Wie Abb. 10 zeigt, stellt das eigentliche Filtermedium nur eine Komponente bezüglich des sich ausbildenden Gesamtfilmwiderstandes dar.

Im Wesentlichen wird der Filterwiderstand normalerweise durch die Struktur des Filtermediums selbst, durch darin eingelagerte Partikel und durch die über den Poren gebildeten Partikelbrücken bestimmt. Unter Umständen muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass es auch noch unter dem Filtermedium zu einem merklichen Druckverlust kommen

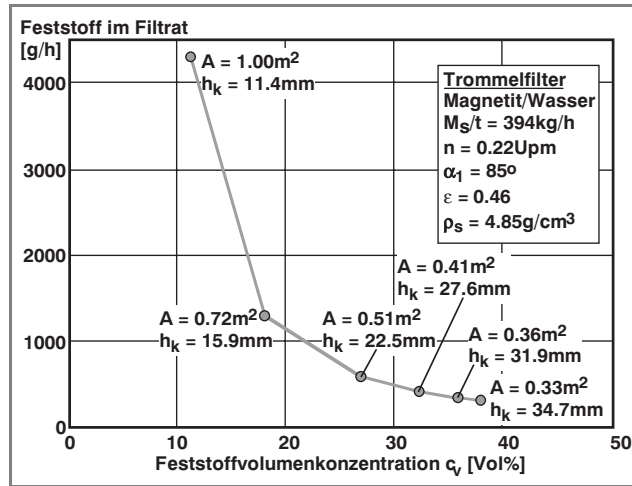


Abbildung 8. Einfluss der Suspensionskonzentration auf die Feststoffmenge im Filtrat eines Trommelfilters (MVM).

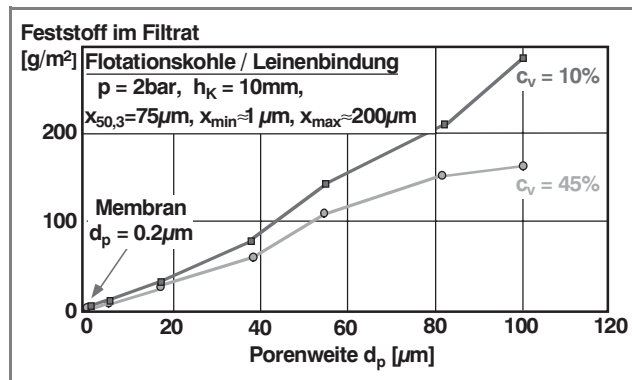


Abbildung 9. Einfluss von Gewebeporenweite d_p und Suspensionskonzentration c_v auf die Feststoffmenge im Filtrat (MVM).

kann. Bei Filterzentrifugen kann der Rotor aus Festigkeitsgründen nur in begrenztem Maße mit Drainagebohrungen versehen werden. Um die Querströmung des Filtrates zu diesen Bohrungen hin zu erleichtern, fügt man zwischen Trommelwand und Filtermedium dann noch ein Drainagemedium ein.

Die Bestimmung des Filtermediumwiderstandes R_m erfolgt mittels Filterexperimenten mit Originalfiltermedium und -suspension. Die Experimentiertechnik ist zwar vom Prinzip her unkompliziert, erfordert aber größte Sorgfalt und Umsicht bei der Ausführung, weil sie eine ganze Reihe von Fehlermöglichkeiten beinhaltet [16, 3 – 5]. In einer Labordruckfilterzelle wird ein Kuchenbildungsexperiment bei konstantem Filtrationsdruck Δp , Suspensions-

Im Wesentlichen wird der Filterwiderstand normalerweise durch die Struktur des Filtermediums selbst, durch darin eingelagerte Partikel und durch die über den Poren gebildeten Partikelbrücken bestimmt.

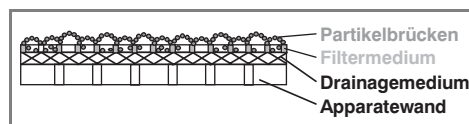


Abbildung 10. Für den Gesamtfilmwiderstand verantwortliche Struktur.

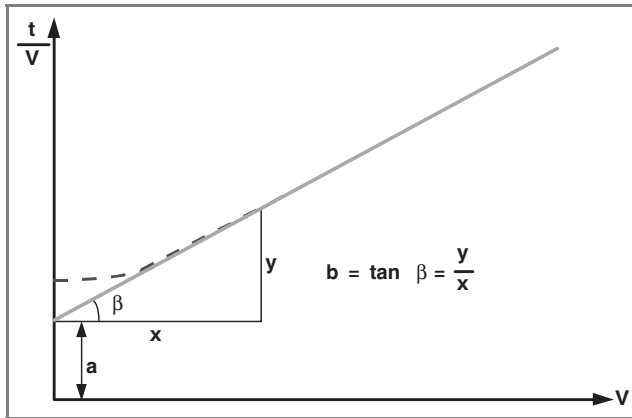


Abbildung 11. Darstellung der Messwerte aus dem Filterexperiment.

konzentration κ und Viskosität η auf der Filterfläche A ausgeführt. Das anfallende Filtrat wird zunächst sowohl über der Zeit t als auch vom Volumen V her registriert. Wenn diese Messwerte dann entsprechend den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Kuchenfiltration gemäß Abb. 11 in Form der Funktion $t/V = f(V)$ ausgewertet werden, kann der Gesamtfilmmediumwiderstand R_m und der spez. Kuchenwiderstand r_c aus folgender Geradengleichung bestimmt werden:

$$\frac{t}{V} = \frac{r_c \kappa \eta}{2A^2 \Delta p} V + \frac{R_m \eta}{A \Delta p} = bV + a \quad (1)$$

Aus der Steigung b der Geraden kann der spez. Filterkuchenwiderstand r_c und aus dem Achsenabschnitt a der Filmmediumwider-

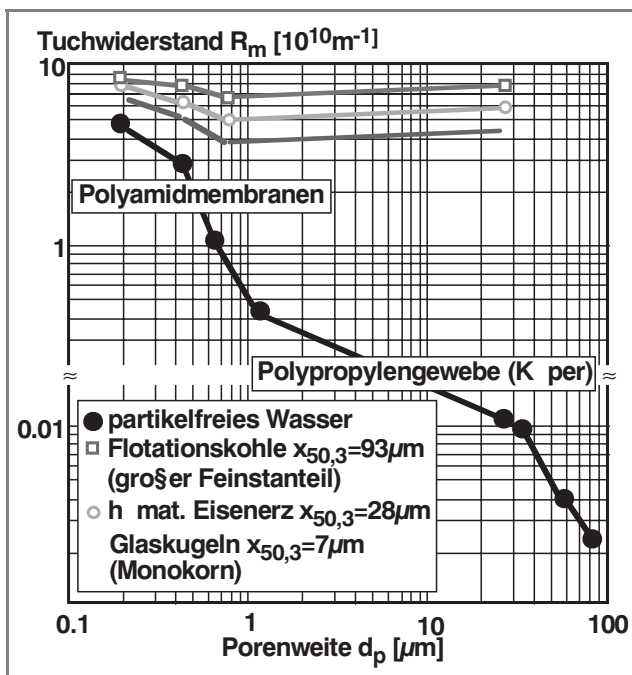


Abbildung 12. Widerstand des Filtermediums mit Klarflüssigkeit und Suspension (MVM).

stand R_m berechnet werden. Für die Erzeugung präziser Messwerte ist es entscheidend, dass

- die Verzögerung zwischen Startzeit und erster Filtratregistrierung gegen Null strebt,
- sich keine Partikel vor Filtrationsbeginn auf dem Filtermedium absetzen und damit unberechtigtweise zum Filtermediumwiderstand gezählt werden,
- der Aufbau des vollen Filtrationsdruckes praktisch schlagartig erfolgt und
- bereits nach vernachlässigbar kurzer Zeit Partikelbrücken konstanter Struktur ausgebildet sind.

Insbesondere von der letztgenannten Bedingung kann es nicht vernachlässigbare Abweichungen geben, wenn der Filterkuchen sehr starke Kompressibilität aufweist oder bei sehr geringen Suspensionskonzentrationen zunächst Tiefen- oder Verstopfungsfiltration stattfindet, bevor sich die Partikelbrücken aufbauen können und reine Kuchenfiltration erfolgt. In diesen Fällen bildet sich bei der Auftragung von $t/V = f(V)$ nicht sofort eine Gerade aus, wie in Abb. 11 durch die gestrichelte Linie angedeutet wird. Die Rückextrapolation des später in fast jedem Fall linearen Funktionsverlaufes in die Ordinate führt in solchen Fällen zur Berechnung von zu geringen Filtermediumwiderständen.

Zur Bestätigung der beschriebenen Zusammenhänge zeigt Abb. 12 Filtermedienwiderstände für Filtrationen mit partikelfreiem Wasser und mit verschiedenen Suspensionen.

Es wurden Polypropylengewebe verschiedener Maschenweite in Köperbindung und vier Polyamidmembranen vermessen. Für die Durchströmungsversuche mit partikelfreiem Wasser ergibt sich die erwartete starke Abhängigkeit des Filtermediumwiderstandes von der Poren- bzw. Maschenweite. Filtriert man jedoch mit einer Suspension, wie hier mit Kohle, Eisenoxid und Glas, so steigen die Widerstandswerte für Porengrößen $d_p > \text{ca. } 0,8 \mu\text{m}$ auf ein nahezu konstantes Niveau an, das nicht mehr durch die Struktur des Filtermediums, sondern durch die Struktur der Partikelbrücken bestimmt wird. Zu kleineren Poren des Filtermediums hin wird der Widerstand der Filtermediumstruktur umso stärker bemerkbar, desto permeabler die Brückenschicht aufgebaut ist. Die monodispersen Glaskugeln mit einer Partikelgröße von $7 \mu\text{m}$ bauen durchlässigere Brücken auf als die Kohle mit sehr breiter Partikelverteilung, die auch Partikel von $x < 1 \mu\text{m}$ beinhaltet. Aus diesen Ergebnissen kann also der Schluss gezogen werden, dass dem abfiltrierten Partikelsystem entscheidende Bedeutung in Bezug auf den Durchströmungswiderstand des Filtermediums zu-

kommt und dessen Porengröße in vielen Fällen zweitrangig wird.

Diese Ergebnisse findet man in Abb. 13 bestätigt, wenn man sich die in Abb. 9 gezeigten Daten für den Feststoffdurchschlag in Hinblick auf den Filtermediumwiderstand betrachtet.

Bei hoher Suspensionskonzentration wird die ganze Partikelgrößenverteilung bis hin zu den kleinsten Partikeln in die Brücken eingebaut. Der Filtermediumwiderstand variiert mit der Porengröße im Filtermedium praktisch nicht. Bei geringer Suspensionskonzentration verändert sich die Situation grundlegend, weil infolge von immer vorhandener Partikelsedimentation Entmischung nach der Partikelgröße auftritt. Da nun keine Schwarm-sedimentation mehr vorherrscht, sinken die größten Partikel am schnellsten und es bilden sich hochpermeable Brücken am Filtermedium und der gesamte Filtermediumwiderstand wird deutlich abgesenkt. Sobald die Poren des Filtermediums $d_p < \text{ca. } 50 \mu\text{m}$ werden, bestimmt wieder dessen Struktur den gesamten Filtermediumwiderstand und dieser steigt mit kleiner werdenden Filtermediumporen an. Abb. 14 zeigt für Monofilamentgewebe unterschiedlicher Bindungsart, wie sich der Filtermediumwiderstand mit variiertem Konzentration einer relativ engen Fraktion von Kohlepartikeln verändert [17].

Für das Tressengewebe ist zusätzlich der Einfluss des Filtrationsdruckes wiedergegeben. Infolge der relativ engen Partikelgrößenverteilung und damit ähnlichen Partikelsinkgeschwindigkeiten ist hier gegenüber der breiten Partikelverteilung der Flotationskohle in Abb. 13 kein signifikanter Einfluss der Suspensionskonzentration zu bemerken. Die Gewebeführung spielt hier bei vergleichsweise kleinen Maschenweiten von $d_p \approx 15 \mu\text{m}$ gegenüber der mittleren Partikelgröße von $x_{50,3} = 67 \mu\text{m}$ bereits eine merkliche Rolle. Die relativ offenen Strukturen der Leinen- und Leinentresse führen zu deutlich niedrigeren Gesamtfitermediumwiderständen als die dichter gewebte Körperbindung. Am Beispiel der Tressenbindung wird in Abb. 14 weiterhin deutlich, dass die Partikelbrücken über den Maschenöffnungen des Filtertuches bei steigendem Filtrationsdruck signifikant enger gepackt und damit undurchlässiger werden.

In Abb. 15 wird schließlich gezeigt, welcher Filtermediumwiderstand sich für ein Gewebe ergibt, wenn mit unterschiedlichen Suspensionen filtriert wird.

Das Magnetit lag in geflocktem Zustand in der Suspension vor. Deshalb ist keine Abhängigkeit des Filtermediumwiderstandes von der Suspensionskonzentration zu beobachten.

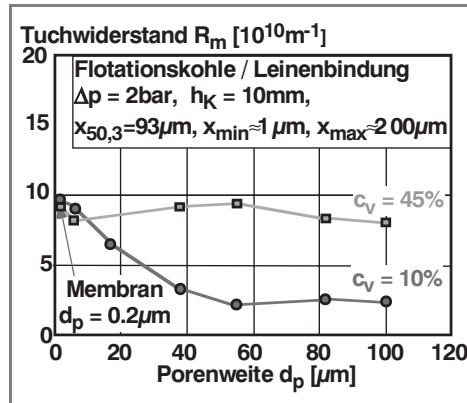


Abbildung 13. Filtermediumwiderstand bei variiertem Porengröße und Konzentration (MVM).

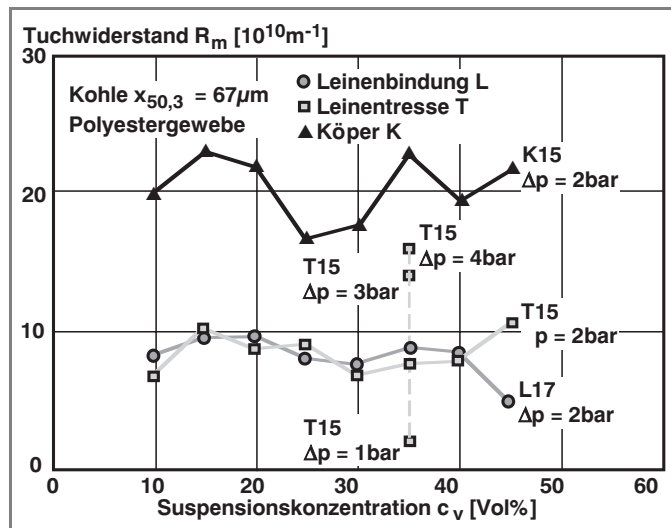


Abbildung 14. Filtermediumwiderstand für Gewebe unterschiedlicher Bindungsart (MVM).

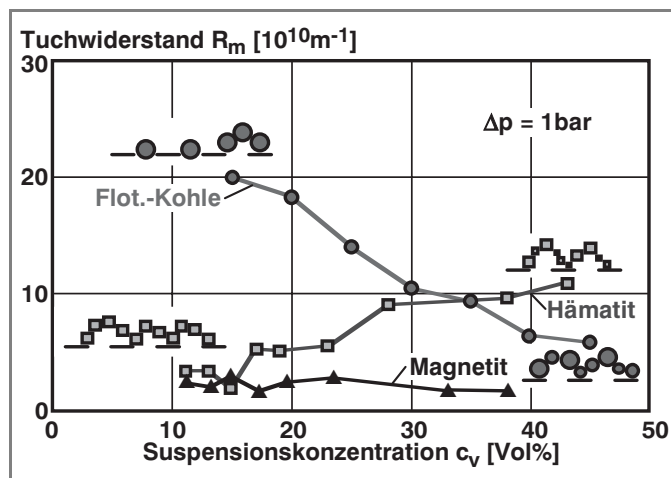


Abbildung 15. Filtermediumwiderstand eines Gewebes für variierte Suspension (MVM).

Eine Klassierung findet nicht statt und infolge der Agglomerate bildet sich eine relativ durchlässige Brückenschicht aus. Das hämatitische Eisenoxid bildet erwartungsgemäß mit fallender Suspensionskonzentration sinkende Tuchwiderstände aus, weil durch verstärkte Klassierung immer durchlässigere Grobkornbrücken entstehen. Die Flotationskohle mit entsprechend breiter Partikelgrößenverteilung zeigt gerade die umgekehrte Tendenz. Dies ist dadurch zu erklären, dass im hier vorliegenden Fall die Gewebeporen in der Größenordnung der Grobkornfraktion liegen und bei verstärkter Einzelkornsedimentation Poren des Filtermediums verstopft werden. Zu größeren Suspensionskonzentrationen hin wird zwar auch Feinkorn in die Brücken eingebaut, doch wird eine Porenverstopfung vermieden.

5.3 Kuchenablösung und Regenerierung

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, kann die Ablösung des Filterkuchens vom Tuch durch eine möglichst glatte Oberfläche des Filtermediums gefördert werden. Das Beispiel des Vakuumscheibenfilters zeigt besonders deutlich, wie nur das aufeinander abgestimmte Zusammenwirken von Filtermedium, Apparatekonstruktion und Betriebsbedingungen zu einem optimalen Ergebnis führen. Beim Scheibenfilter wird der Filterkuchen nach der Entfeuchtung gemäß Abb. 16 mit Hilfe eines Druckluft-rückstoßes von der Filterzelle abgesprengt.

Der Filterkuchen muss schlagartig beschleunigt werden und löst sich dann vom an der Zelle fixierten Filtertuch. Hierzu muss der mit Druckluft zu füllende Raum möglichst klein sein. Das Zellenvolumen selbst muss minimal sein, der Druckluftstoß muss schlagartig auf- und wieder abgesteuert werden und das Filter-

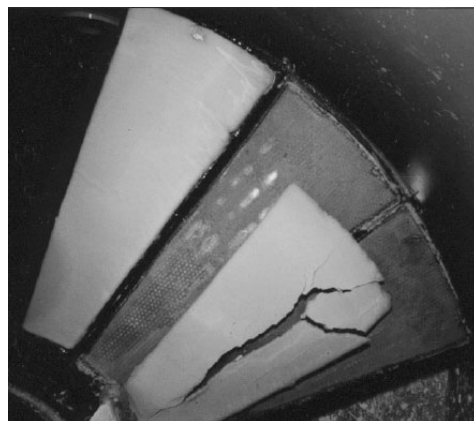


Abbildung 16. Abwurf des Filterkuchens von einer Scheibenfilterzelle.

tuch muss maßgeschneidert auf die Zelle konfektioniert sein. Es muss hochelastisch sein und darf nicht mit der Zeit ausleiern. Hierzu sind spezielle Monofilamentgewebe konstruiert worden, die eine besondere Elastizität in Umfangsrichtung besitzen [18]. Das Monofilament mit zusätzlicher Kalandrierung führt zu einer sehr glatten Filtertuchoberfläche. Der Filterkuchen haftet aber nicht nur durch „Verzahnung“ an der Gewebeoberfläche, sondern wird auch durch Kapillarkräfte infolge der im Kuchen verbliebenen Restflüssigkeit festgehalten. Das Haftkraftmaximum liegt bei einer Porensättigung von ca. 80 %. Je besser der Filterkuchen also entfeuchtet werden kann, desto leichter lässt er sich vom Filtertuch ablösen.

5.4 Erzeugung besonderer physikalischer Effekte durch das Filtermedium

Abhängig von der Benetzbarkeit des Filtermediums kann dessen Rückhaltefähigkeit bezüglich Partikel auch auf nicht-benetzende Fluide erweitert werden. Trennt man beispielsweise bei der Vakuumfiltration eine wässrige Suspension mit einem hydrophilen Filtermedium, so kann das Wasser als benetzende Phase das Filtermedium passieren. Wenn der Kapillardruck in den Poren von Filterkuchen und Filtermedium kleiner als die wirksame Gasdruckdifferenz ist, kann der Filterkuchen entfeuchtet werden und das Gas strömt durch die entleerten Poren. Dieser Gasdurchsatz trägt nicht zur mechanischen Entfeuchtung bei und belastet den Gasverdichter, der die Druckdifferenz aufrechterhalten soll. Wenn nun bei entsprechend kleinen Poren der Kapillardruck im Filtermedium größer wird als im Filterkuchen selbst, dann kann ein Gasdifferenzdruck eingestellt werden, der für die Kuchenentfeuchtung ausreicht, eine Gasdurchströmung des Filtermediums jedoch nicht zulässt. Diese „gasdurchsatzlose Kuchenfiltration“ ermöglicht einen extrem wirtschaftlichen Filterbetrieb, ist aber an ein entsprechend geeignetes mikroporöses Filtermedium gebunden [19]. In der technischen Praxis werden bereits Vakuumscheibenfilter mit mikroporösen keramischen Filtermedien angeboten, die dieses Prinzip nutzen. Sie haben Porengrößen von $d_p \approx 1 \mu\text{m}$, weisen aber infolge ihrer Struktur vergleichsweise hohe Durchströmungswiderstände auf. Noch eine Vision ist es, in größerem Umfang flexible und hochpermeable Membranfiltermedien auf Polymerbasis flexibel auf unterschiedlichsten Filterapparaten einsetzen zu können. Die in Abb. 1 gezeigten Filtermedien oder mit Gewebestrukturen verknüpfte

Nanofasermaterialien bieten hierfür aber vielversprechende Ansatzpunkte.

6 Zusammenfassung

Die vielfältigen Apparatekonstruktionen und Funktionsprinzipien kuchenbildender Filterapparate benötigen maßgeschneiderte und speziell angepasste Filtermedien. Das Filtermedium muss den mechanischen Anforderungen des Apparates, und den chemisch/physikalischen Gegebenheiten der Suspension genügen. Hierzu stehen die unterschiedlichsten Filtermaterialien zur Verfügung. Besonders variabel kann die Struktur des Porensystems bei Gewebekonstruktionen gestaltet werden. Fadenstruktur und -material, Webart, Gewebenachbehandlung und Konfektionierung erlauben eine individuelle Anpassung an das jeweilige Trennproblem. Die Auswahl des für einen Trennprozess am besten geeigneten Filtermediums muss immer in Verbindung mit dem Filterapparat und der zu trennenden Suspension erfolgen. Das Filtermedium darf nicht irreversibel durch eindringende Partikel verstopfen und der sich in Verbindung mit dem abzuschheidenden Partikelsystem ausbildende und für den Filterprozess relevante Gesamtwideerstand des Filtermediums muss experimentell ermittelt und minimiert werden. Die Verstopfungs- und Blockagegefahr für ein Filtermedium ist besonders hoch, wenn bei geringer Suspensionskonzentration Partikel in der Größe der Porenabmessungen einzeln in die Poren eindringen können und diese verstopfen. Über die Funktion des Filtermediums zur Trennung von fester und flüssiger Phase hinaus, können z. B. durch Nutzung von Grenzflächeneffekten auch semipermeable Filtermedien erzeugt werden, mit denen sich molekular nicht mischbare Fluide trennen lassen. Auf diese Weise kann z. B. der unerwünschte Gasdurchsatz bei der Filterkuchenentfeuchtung unterdrückt werden.

Dr.-Ing. Harald Anlauf

(harald.anlauf@mvm.uni-karlsruhe.de),
Universität Karlsruhe (TH), Institut für
Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik,
D-76128 Karlsruhe, Germany.

Harald Anlauf, geb. 1954 in Berlin, studierte Chemieingenieurwesen an der Universität Karlsruhe (TH) von 1974 bis 1980. 1985 promovierte er an der Fakultät für CIW der Universität Karlsruhe (TH) bei Prof. Dr.-Ing. W. Stahl zum Thema: „Entfeuchtung von Filterkuchen mit Vakuum-, Druck- und Druck/Vakuumfiltration“. Anlauf ist Akademischer Oberrat am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM), Universität Karlsruhe. 1999–2006 war er Vorsitzender des VDI-GVC-Fachausschusses „Mechanische Flüssigkeitsabtrennung“ und Mitglied des GVC-Beirates, seit 2000 ist er Chairman des Scientific Committee der FILTECH – International Conference & Exhibition for Filtration and Separation Technology und Chairman der INDEFI-International Delegate for Filtration and Separation und Chairman des 10th World Filtration Congress.



7. Literatur

- [1] K. Sutherland, *Filtration* **2005**, 5 (3), 187.
- [2] D. Purchas, *Handbook of Filtermedia*, Elsevier Advanced Technology, Oxford **1996**.
- [3] H. Anlauf, *F&S Filtr. Sep.* **1994**, 8 (2), 63.
- [4] H. Anlauf, *F&S Filtr. Sep.* **1994**, 8 (3), 116.
- [5] *VDI-Richtlinie 2762*, Beuth Verlag, Berlin **1997**.
- [6] K. C. Ting, R. J. Wakeman, V. Nassehi, *Filtration* **2006**, 6 (2), 150.
- [7] M. Rowlands et al., *Filtration* **2003**, 3 (4), 191.
- [8] S. Goldoni, *F&S Filtr. Sep.* **2007**, 21 (2), 78.
- [9] R. Tittel, R. Berndt, *Faserforsch. Textiltech.* **1972**, 24 (12), 505.
- [10] E. Heidenreich, R. Tittel, R. Berndt, *Aufbereit. Tech.* **1977**, 18 (7), 353.
- [11] K.-L. Tung, *Filtration* **2007**, 7 (2), 109.
- [12] A. Rushton, P. Griffiths, *Filtr. Sep.* **1972**, (1/2), 81.
- [13] A. Rushton, *Filtr. Sep.* **1972**, (5/6), 274.
- [14] H. Anlauf, *Chem. Ing. Tech.* **1989**, 61 (9), 686. DOI: 10.1002/cite.330610904
- [15] T. Weigert, S. Ripperger, *F&S Filtr. Sep.* **1997**, 11 (1), 11.
- [16] H. Anlauf, *F&S Filtr. Sep.* **1988**, 2 (1), 5.
- [17] H. Anlauf, *Aufbereit. Tech.* **1990**, 31 (6), 293.
- [18] C. Maurer, *Proc. FILTECH EUROPA 2003*, Düsseldorf **2003**, 1-300.
- [19] H. Anlauf, *Aufbereit. Tech.* **1987**, 28 (12), 711.