

Klärung sehr gering konzentrierter Suspensionen mit expandierbaren Papier-Spaltfilterkerzen

H. Anlauf, X. R. Fernández *

Kühlschmierstoffe aus der Metallverarbeitung werden gewöhnlich nach Gebrauch gereinigt und in den Prozess zurückgeführt. In der Regel werden hierzu Anschwemmfilter oder einfache Vakuum-Bandfilter mit nicht regenerierbaren Filtermedien eingesetzt. Dies führt zu permanent anfallenden zusätzlichen Betriebskosten durch den Verbrauch dieser Filtermaterialien und ein erhöhtes Abfallaufkommen. Das Konzept besonders effizient rückspülbarer Papier-Spaltfilterkerzen hat sich als erfolgreiche Alternative zu den genannten Prozessen erwiesen. Das Institut für MVM und die Fa. Transor Filter GmbH betreiben ein gemeinsames F+E-Projekt zur Analyse der hier sehr komplexen Abscheidemechanismen und zur weiteren Verbesserung dieses Filtersystems. Filterexperimente, CFD-Simulationen und theoretische Überlegungen sollen zu einer praxistauglichen Berechnungsgrundlage des Filtrationsprozesses führen.

1. Einführung

Kühlschmierstoffe, Schleiföle und andere Flüssigkeiten aus der Metallbearbeitung werden üblicherweise nach Gebrauch gereinigt und in den Prozess zurückgeführt. Sie enthalten sehr oft extrem geringe Mengen von Partikeln mit Durchmessern im Bereich weniger μm . Um derartige Flüssigkeiten zu klären, werden gewöhnlich Anschwemmfilter oder einfache Vakuum-Bandfilter mit nicht regenerierbaren Filtermedien (Papierbandfilter) eingesetzt. Dies verursacht permanent zusätzliche Betriebskosten infolge zu erneuernder Filtermittel und infolge erhöhten Abfallaufkommens. Wenn neben der gereinigten Flüssigkeit auch der abgetrennte Feststoff ein Wertprodukt darstellt, wie etwa beim Schleifen von Hartmetall, dann kann dieser in der beschriebenen Weise nicht in reiner Form abgetrennt werden, weil er entweder mit

dem Material für die Anschwemmung vermischt ist oder in die Poren des Faservliesbandes eingelagert ist.

Deshalb besteht alternativ zu diesen Techniken ein hohes Interesse an einem wirtschaftlich arbeitenden und voll regenerierbaren System für eine Direktfiltration. Hier hat sich in der industriellen Praxis ein Konzept von modular angeordneten und bei einer Rückspülung expandierenden Papier-Spaltfilterkerzen als sehr erfolgreich erwiesen. Das Prinzip dieses Filters basiert auf Filterkerzen, die aus jeweils einem Stapel aufeinander liegender und durch eine Feder zusammengehaltener Papierringe bestehen. Beim Rückspülvorgang öffnen sich die Spalte zwischen den Papierringen infolge des erhöhten Innendruckes in der Filterkerze gegen die Federkraft und erlauben eine nahezu perfekte Regenerierung des Filtermediums. Dies führt zu extrem hohen Filterstandzeiten in der Dimension von Jahren.

Demgegenüber sind die Abscheidemechanismen für die Partikeln und die Strömungsverhältnisse in einem derartigen Filterapparat ausgesprochen komplex und derzeit noch unzureichend bekannt. Verstopfungsfiltration, Tiefenfiltration und

Kuchenfiltration erfolgen gleichzeitig und überlagern sich gegenseitig. Darüber hinaus sind die Partikeln der Schwerkraft ausgesetzt und in Gefahr, entgegen der von unten zugeführten Suspension zu sedimentieren, was eine ungleichmäßige Belegung der Filterkerzen zur Folge hätte.

Das Institut für MVM des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) und die Fa. Transor Filter GmbH betreiben daher ein gemeinsames F+E-Projekt, um durch Filterversuche, CFD-Simulationen und theoretische Überlegungen ein praxistaugliches Modell zur quantitativen Beschreibung des Filterprozesses zu entwickeln und Wege zur weiteren Verbesserung dieses Filterprinzips aufzuzeigen. Ein hohes Potential für die Zukunft wird hierbei auch in der Übertragung des derzeit ausschließlich für Öle eingesetzten Filters in den Bereich wässriger Systeme gesehen.

2. Das Filtersystem

Wie aus Abb. 1 entnommen werden kann, besteht eine Einheit dieses vollautomatisch arbeitenden Filtersystems aus einer Anzahl von Filterkesseln, die jeweils 61 Filterkerzen enthalten. Diese modulare Bauweise erlaubt eine wirtschaftliche

* Dr.-Ing. Harald Anlauf
Dipl.-Ing. Xiana Romani Fernández
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
und Mechanik (MVM)
Am Forum 8, 76131 Karlsruhe
Tel: 0721/608-2401, Fax: -2403
E-Mail: harald.anlauf@kit.edu

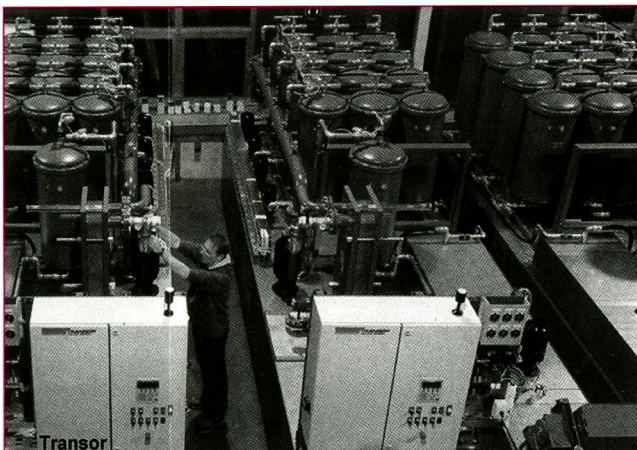


Abb. 1: Modular aufgebautes Filtersystem (Transor GmbH)



Abb. 2: Papier-Spaltfilterkerze (Transor GmbH)

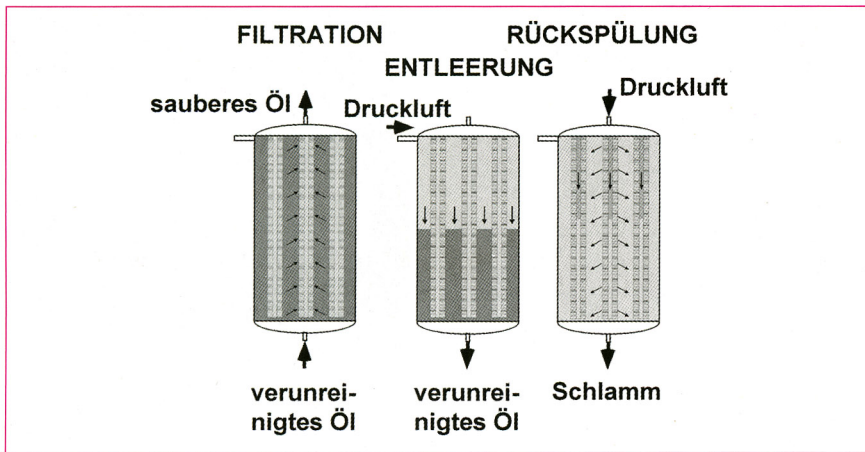


Abb. 3: Funktionsprinzip des Filtersystems

Fertigung der Filtersysteme und eine einfache Anpassung an die Kapazitätsanforderungen des Betreibers.

In Abb. 2 ist eine einzelne Filterkerze zu erkennen. Er wird aus ca. 9000 aufeinander liegenden Papierringen gebildet, welche durch eine intern angeordnete Feder zusammengehalten werden.

Das prinzipielle Funktionsprinzip des Filterapparates ist in Abb. 3 dargestellt. Zur Filtration wird das verunreinigte Öl mittels einer Zentrifugalpumpe in den Druckkessel gefördert. Die Filtration erfolgt bei näherungsweise konstantem Volumenstrom und einer Anfangsdruckdifferenz von ca. 100kPa.

Während die Partikel an der äußeren Mantelfläche der Filterkerze abgeschieden werden, steigt allmählich der Druckverlust hauptsächlich infolge von Verstopfung der Spalte zwischen den Papierringen. Wegen der gewöhnlich sehr geringen Feststoffkonzentration im Öl von einigen mg/l dauert eine Filtrationsperiode bis zur notwendigen Abreinigung der Filterkerzen bis zu ca. 8h. Nach dem Erreichen eines

kritischen Druckverlustes, der entsprechend der Pumpenkennlinie in der Regel mit einer Reduktion des Filtratvolumenstromes einhergeht, muss das Filter regeneriert werden. In einem ersten Schritt wird hierzu der Kessel mittels Druckgas entleert. Im anschließenden Rückspülschritt wird zunächst Öl und nachfolgend Druckluft bei einem Druck von ca. 300 kPa von innen durch die Papierringspalte der Filterkerzen nach außen gepresst. Infolge des nun im Innern der Filterkerzen herrschenden Überdruckes kann der Papierstapel entgegen der zusammenhaltenden Federkraft etwas expandieren. Dies führt zu einer sehr effizienten und nahezu perfekten Befreiung der Filterkerze von anhaftenden Partikeln und ist eine der Ursachen für die exorbitant hohen Standzeiten des Filterapparates.

3. Analyse der Filterkerze

In der Standardausführung bestehen die Papierringe aus normalem, nicht gestrichenem 80g Papier. Dies bedeutet eine poröse Zellulosestruktur von ca. 95µm Dicke, in die bereits Partikel aus Kalziumkarbonat als Füllstoff eingelagert sind. Die "Spalte" zwischen den Papierringen weisen eine Höhe von ca. 5µm auf. Abb. 4 zeigt hierzu einen mikroskopischen Blick auf einen kleinen Ausschnitt der Filterfläche.

Messungen und Berechnungen haben ergeben, dass ca. 95% der Filterfläche durch die Papieraußenkanten mit einem spez. Filtrationswiderstand der Papierstruktur von und 5% der Filterfläche durch die Spalte mit einem spez. Spaltwiderstand von repräsentiert werden. Bei Durchströmung mit partikelfreiem Öl fließen in diesem Fall ca. 90,5% des gesamten Filtrates durch die Spalte und nur 9,5% durch die Papiermatrix. Eine detaillierte Analyse des Filtratflusses durch die Filterkerze ergibt entscheidende Hinweise auf die Einflussparameter zur

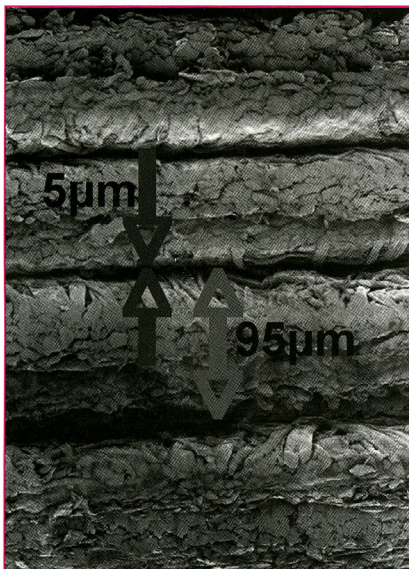
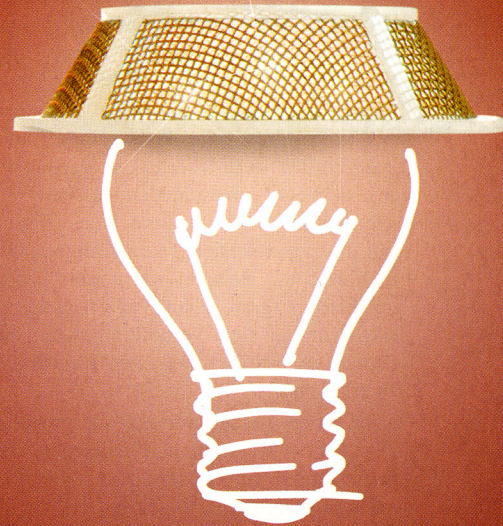


Abb. 4: Papierstapel

Ganz schön helle!



Täglich neue Geistesblitze für Ihre individuellen Anwendungen: Seit 50 Jahren ist Kufner der Spezialist für innovative Sieb- und Filtertechnik. Ob Serienteil oder Sonderentwicklung, ob im Fahrzeug- und Maschinenbau, ob für Haus-, Medizintechnik oder neue, außergewöhnliche Aufgaben – bei Kufner können Sie sich auf Ideen und geprüfte Qualität „made in Germany“ verlassen.

kufner
Siebe
Webeblätter

Mehr erfahren Sie unter www.kuefner.com

Tab. 1: Porengrößenmessung und Durchströmung eines Papierringstapels

Federkraft	Porengrößen		Durchflusswiderstand
	mittlere Porengröße	größte Pore	
F/F_{\max}	\bar{d}/\bar{d}_{\max}	$d_{BP}/d_{BP,\max}$	$r_p/r_{p,\max}$
0.40	1.00	1.00	0.80
0.60	0.87	0.50	0.80
0.80	0.77	0.45	0.83
1.00	0.58	0.37	1.00

Verbesserung der Filterkapazität in Hinblick auf eine Verringerung des Filtermediumwiderstandes und eine Vergrößerung der Filterfläche pro Kesselvolumen.

Durch die mit Kalksteinpartikeln „vorgefüllte“ Zellulosestruktur werden die aus dem Öl abzuschneidenden Partikeln daran gehindert, im Sinne einer Tiefenfiltration in das Papier einzudringen. Wie in Abb. 5 am Beispiel von bereits länger im Einsatz gewesenen Papierringen zu erkennen ist, sind Verunreinigungen des Papiers nur in den äußersten Randzonen zu erkennen.

Dies bedeutet auch eine Bestätigung der exzellenten Reinigbarkeit zwischen den Papierringen durch die Rückspülung bei expandiertem Papierstapel und erklärt die über so lange Zeit konstante und hohe Filterleistung.

Die Leistungsfähigkeit eines Filtersystems bemisst sich neben dem Durchsatz aus dem Partikelrückhalt, der wiederum wesentlich von der Spaltweite zwischen den Papierringen abhängt. Eine Verringerung der Spaltweite durch stärkeres Zusammenpressen des Papierstapels führt zu einer verbesserten Abscheidung, erhöht aber auch den Durchflusswiderstand der Kerze und vermindert den Durchsatz. Zur Ermittlung dieser Zusammenhänge wurde die

Porengrößenverteilung von Papierstapeln bei variiertem Vorspannung mittels Kapillarporometrie in radialer Richtung gemäß Abb. 6 gemessen und mit entsprechenden Durchströmungswerten korreliert.

Für diese Untersuchungen wurde ein spezielles Filtermodul (Abb. 6 rechts) gebaut, welches sowohl in das Porometer zur Porengrößenmessung als auch in die Filterapparatur zur Durchflussmessung eingebaut werden kann.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Aus den Zahlenwerten ist zu erkennen, wie sich durch erhöhte Federkraft F erwartungsgemäß die Porengröße d verringert und demgegenüber der Durchströmungswiderstand des Papierringstapels r_p zunimmt. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass die Porengrößen sich im untersuchten Bereich wesentlich stärker verringern, als der Widerstand des Papierstapels zunimmt. Der Durchmesser der größten Poren am „Bubble-Point“ (BP) nimmt mit wachsender Federkraft deutlich stärker ab, als die mittlere Porengröße. Eine mit Bedacht gewählte Erhöhung der Federkraft führt also zu einer Vergleichmäßigung der Porengrößenverteilung ohne erheblichen Anstieg des Durchströmungswiderstandes, weil im wesentlichen nur wenige sehr große Poren (Fehlstellen) beseitigt

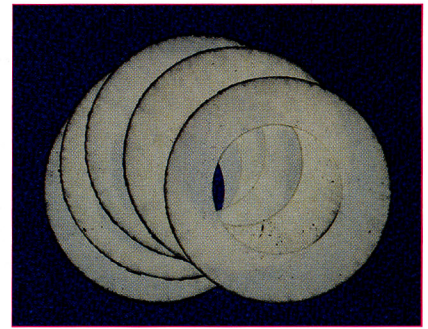


Abb. 5: Gebrauchte Papierfilterringe

werden. Dies führt insgesamt zu einer Optimierung des Verhältnisses von Abscheide- und Durchflussleistung einer Filterkerze.

4. Abscheidemechanismen

Die Entwicklung einer Dimensionierungsvorschrift für das Spaltfilter erfordert neben einer geeigneten Laborversuchseinrichtung ein für praktische Belange handhabbares Modell zur Beschreibung des Filtrationsvorganges in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflussparametern. Bei der Filtration extrem niedrig konzentrierter Suspensionen erfolgt eine komplexe Überlagerung verschiedener Mechanismen der Partikelabscheidung. Abb. 7 verdeutlicht die wesentlichen Mechanismen, die hier relevant sind.

Sieb-(Verstopfungs-)filtration, Tiefen-(Standard-)filtration und Kuchenfiltration treten im Filterbetrieb nebeneinander auf.

Die Tiefen- bzw. Standardfiltration ist nur relevant für Partikeln, die kleiner als die Spaltweite zwischen den Papierringen sind und für Orte, die noch nicht durch größere Partikeln verblockt sind. Die für die Tiefenfiltration verfügbare Filterfläche nimmt daher mit fortschreitender Filtrationszeit ab und wird nach vollständiger Spaltverblockung zu Null. Tiefenfiltration in die äußere Randzone der Papierstruktur wird nach wenigen Filtrationszyklen wahrscheinlich vernachlässigbar klein werden. Infolge des geringen radialen Flusses durch die ohnehin schon mit Füllstoffen blockierte Zellulosestruktur des Papiers wird die Rückspülung hier weitgehend wirkungslos bleiben (vgl. Abb. 5). Wahrscheinlich wird sehr schnell eine Art von Verblockungsgleichgewicht erreicht und weitere Partikeln werden am Eindringen in die Randzone des Papiers gehindert.

Sieb- bzw. Verblockungsfiltration ist prinzipiell relevant für alle Partikeln, die größer als die Spaltweite sind. Die zur Verfügung stehende Spaltfilterfläche nimmt mit fortschreitender Zeit ab und es verbleibt am Ende selbst bei vollständiger Belegung der Spalte mit Partikeln eine gewisse Flächenporosität und damit eine Restdurchlässigkeit der Spalte für Flüssig-

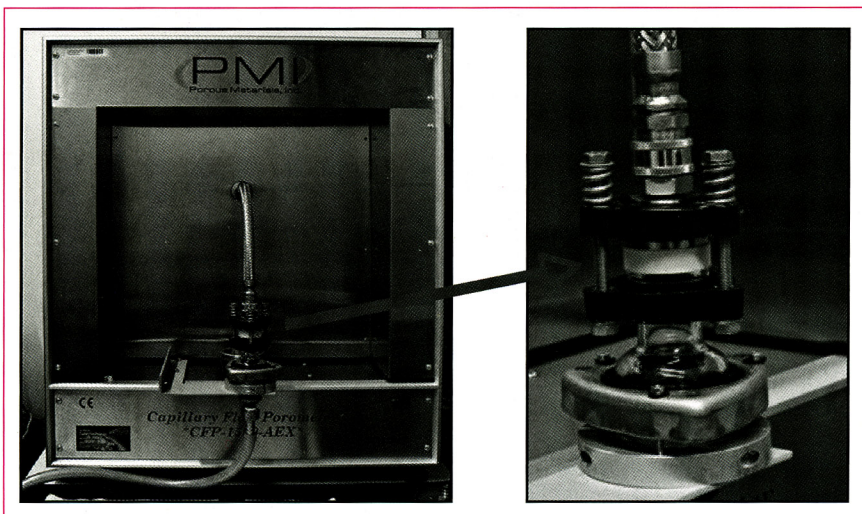


Abb. 6: Radiale Porengrößenmessung am Papierstapel mittels PMI-Porometer

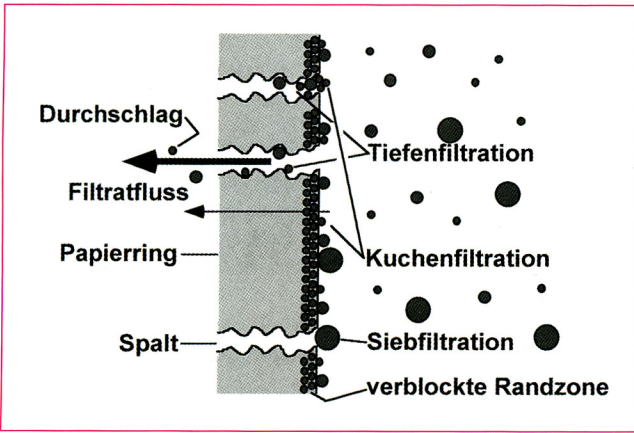


Abb. 7: Filtrationsmechanismen bei der Spaltfiltration

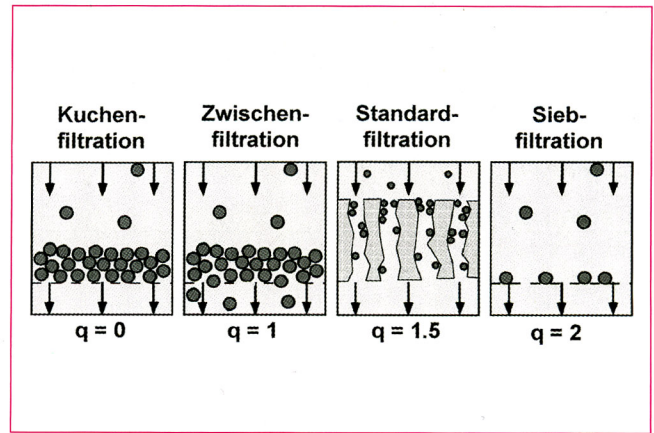


Abb. 8: Filtrationsmechanismen

keit. Der relevante Widerstand des Filtermediums r_s resultiert hier aus der Struktur der Spalte zwischen den Papierringen und dem Strömungsweg. Infolge der rauhen Oberfläche der Papierringe und demzufolge durch viele Kontaktstellen zwischen den Papierringen bilden sich keine glatten Strömungskanäle aus, sondern ein relativ offenes Porensystem, das der Zellulosestruktur des Papiers ohne eingelagerte Füllstoffe ähneln könnte.

Kuchenfiltration ist für alle beteiligten Partikeln relevant und findet sowohl auf den porösen Papieraußenkanten als auch auf den bereits durch Partikeln abgedeckten Spalten zwischen den Papierringen statt. Die Papierkantenfläche bleibt konstant und die zur Verfügung stehende bereits bedeckte Spaltfläche wächst mit der Zeit von Null bis zum Ende der Spaltbelegung an.

Zur Beschreibung dieses komplexen Filtrationsprozesses kann auf die generalisierte Formulierung der Filtration durch Hermans and Bredée /1/ zurückgegriffen werden. Eine zusammenfassende Beschreibung der daraus ableitbaren Filtrationsmodelle wurde von Gösele /2/ gegeben. Interessante Parallelen zur Spaltkerzenfiltration und der Überlagerung verschiedener Filtrationsmechanismen finden sich in aktuellen Forschungsarbeiten aus dem Sektor der Mikrofiltration mit Membranen bei Jung /3/. Das Modell von Hermans und Bredée erlaubt die Unterscheidung in mehrere grundlegend unterschiedliche Typen der Partikelabscheidung durch Filtration. Jeder Filtrationstyp weist einen charakteristischen Anstieg des Filtermediumwiderstandes R mit dem durchgesetzten Filtratvolumen V auf.

Für konstante Filtrationsdruckdifferenz Δp resultiert in allgemeiner Form Gl. 1:

$$\frac{dR}{dV} = \frac{d^2t}{dV^2} = K \cdot \left(\frac{dt}{dV}\right)^q$$

Gl. 1

Wenn demgegenüber der Filtratvolumenstrom dV/dt konstant gehalten wird, lässt sich Gl. 2 formulieren:

$$\frac{d(\Delta p)}{dV} = K \cdot (\Delta p)^q \quad \text{Gl. 2}$$

K stellt hier eine Konstante dar, t die Filtrationszeit und der Exponent q charakterisiert den Anstieg des Filtermediumwiderstandes bzw. den Typ der Filtration. Wie aus Abb. 8 zu erkennen ist, können für vier charakteristische Werte von q unterschiedliche Filtrationsmechanismen unterschieden werden.

Jeder dieser Filtrationstypen lässt sich durch einen linearen Zusammenhang darstellen. Wenn dann experimentell gewonnene Daten entsprechend dargestellt und analysiert werden, besitzt man ein Kriterium zur Bestimmung des jeweils vorliegenden Filtrationstyps. Es ist also für entsprechende Filtrationsdaten zu prüfen, welche der unterschiedlichen Darstellungen zu einem linearen Funktionsverlauf führen, um daraus dann auf den vorherrschenden Filtrationstyp schließen zu können. Abb. 9 zeigt hierzu exemplarisch entsprechende Diagramme für

den Fall konstanter Filtrationsdruckdifferenz.

Die lineare Funktion für die Kuchenfiltration ($\Delta p = \text{konst.}$) kann durch Gl. 3 beschrieben werden:

$$\frac{t}{V} = K_1 \cdot V + K_2 \quad \text{Gl. 3}$$

Die lineare Funktion für die Zwischenfiltration ($\Delta p = \text{konst.}$) entspricht Gl. 4:

$$\lg \dot{V} = K_1 - K_2 \cdot V \quad \text{Gl. 4}$$

Die Standardfiltration ($\Delta p = \text{konst.}$) wird linear durch Gl. 5 wiedergegeben:

$$\frac{t}{V} = K_1 \cdot t + K_2 \quad \text{Gl. 5}$$

Und schließlich kann für die Siebfiltration ($\Delta p = \text{konst.}$) Gl. 6 formuliert werden:

$$\lg \dot{V} = K_1 - K_2 \cdot t \quad \text{Gl. 6}$$

Die wesentlichen Filtrationstypen auf der Oberfläche der Filterkerzen scheinen die Sieb- und die Kuchenfiltration zu sein. Die Korrelation zwischen Filtratvolumen V und Filtrationszeit t bei konstantem Filtrationsdruck Δp ist durch die klassische Kuchenbildungsgleichung gegeben:

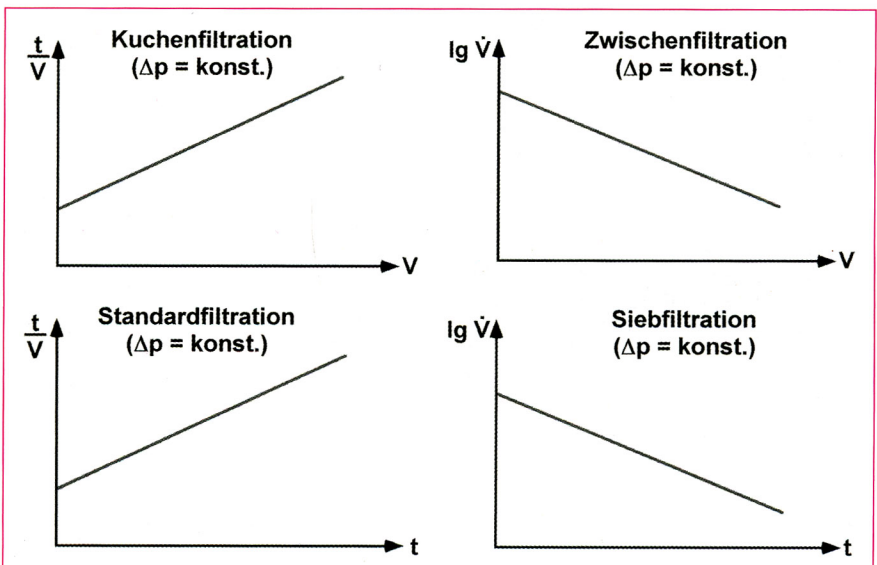


Abb. 9: Lineare Darstellung verschiedener Filtrationstypen

Tab.2: Filtration ohne und mit Partikeln

	reine Flüssigkeit	Suspension
Gesamtmenge	100%	56.1%
Spalte	90.2%	46.3%
Papierkanten	9.8%	9.8%

$$V = \frac{A}{\kappa} \cdot \left[\sqrt{\frac{R^2}{r_c^2} + \frac{2 \cdot \kappa \cdot \Delta p \cdot t}{\eta_L \cdot r_c}} - \frac{R}{r_c} \right] \quad \text{Gl. 7}$$

A repräsentiert die Filterfläche, κ den Konzentrationsparameter der Suspension, R den Filtermediumwiderstand, r_c den spez. Kuchenwiderstand und η_L die dynamische Viskosität der Flüssigkeit.

Vergleicht man Gl. 7 mit Gl. 3, so können die Steigung der Geraden K_1 und ihr Schnittpunkt mit der Ordinate K_2 durch die den Filtrationsvorgang beeinflussenden Parameter ausgedrückt werden. Damit können die Durchströmungswiderstände von Filterkuchen r_c und -medium R berechnet werden:

$$K_1 = \frac{r_c \cdot \kappa \cdot \eta_L}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta p} \quad \text{Gl. 8}$$

$$K_2 = \frac{R \cdot \eta_L}{A \cdot \Delta p} \quad \text{Gl. 9}$$

Für den Fall eines bei der Kuchenfiltration konstant gehaltenen Volumensstromes Q resultiert Gl. 10 für den Zusam-

menhang zwischen Filtrationsdruck Δp und Zeit t:

$$\Delta p = \frac{Q^2 \cdot \eta_L \cdot \kappa \cdot r_k \cdot t}{A^2} + \frac{Q \cdot \eta_L \cdot R}{A} \quad \text{Gl. 10}$$

Zur Beschreibung der Siebfiltration auf Spaltfilterkerzen wird ein modifizierter Ansatz vorgeschlagen. Danach ergibt sich für konstanten Filtrationsdruck Δp der folgende Zusammenhang zwischen Filtratvolumen V und Filtrationszeit t:

$$V = \frac{A_{S, \text{tot}, 0}}{c_N \cdot A_{P, m}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\Delta p \cdot c_N \cdot A_{P, m} \cdot t}{\eta_L \cdot R}} \right] \quad \text{Gl. 11}$$

$A_{S, \text{tot}, 0}$ bedeutet hier die zur Zeit $t = 0$ vorhandene Gesamtspaltpflähe zwischen den Papierringen auf der Filterkerze. $A_{P, m}$ beschreibt die mittlere Projektionsfläche der Partikeln, die aus der Partikelgrößenanalyse des zu filtrierenden Feststoffes gewonnen wird. Weil die Spaltabdeckung durch einzelne Partikeln erfolgt, wird der Feststoffgehalt der Flüssigkeit als Partikelanzahlkonzentration c_N angegeben. Die

Grundidee für den in Gl. 11 formulierten Zusammenhang besteht in der fortlaufenden Reduzierung der freien Spaltfilterfläche durch deren Abdeckung mit einzelnen Partikeln. Die Siebfiltration startet zur Zeit $t = 0$ und endet zur Zeit $t = t_E$, wenn alle Spalte mit Partikeln abgedeckt sind. Entsprechend Abb. 10 können die Spalte jedoch nicht komplett durch die Partikeln verschlossen werden und es verbleibt eine gewisse Restpermeabilität.

Für konstanten Volumenstrom Q ergibt sich für dieses Modell Gl. 12:

$$\Delta p = \frac{Q \cdot \eta_L \cdot R}{A_{S, \text{ges}, 0} - c_N \cdot A_{P, m} \cdot Q \cdot t} \quad \text{Gl. 12}$$

Eine erste Prüfung des Modelles auf Plausibilität ergab im qualitativen Vergleich mit experimentellen Daten sinnvolle Werte, doch muss der Ansatz in Hinblick auf die praktische quantitative Anwendbarkeit noch im Detail untersucht werden.

Unter der Voraussetzung, dass die Spaltbedeckung durch Siebfiltration, die Bedeckung der Papierkanten durch Kuchenfiltration erfolgen soll, ergibt eine theoretische Modellrechnung einer Filtration bei konstantem Druck die in Tab. 2 zusammengefassten Resultate.

Die Filtration wurde rechnerisch zu dem Zeitpunkt abgebrochen, an dem alle Spalte mit Partikeln komplett bedeckt waren. Die gleiche Zeit wurde die Kerze

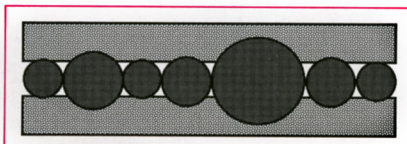


Abb. 10: Abdeckung eines Spaltes durch Partikeln

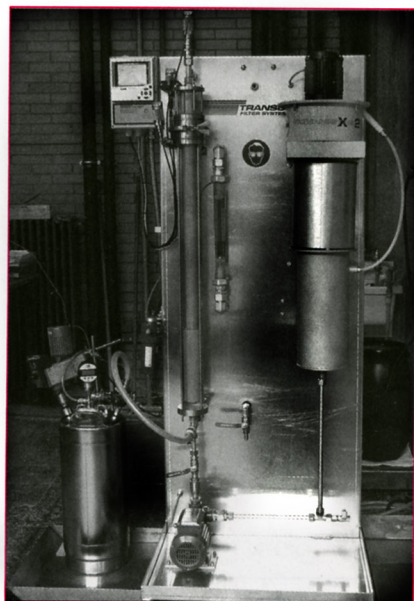


Abb. 11: Pilot-Spaltkerzenfilter

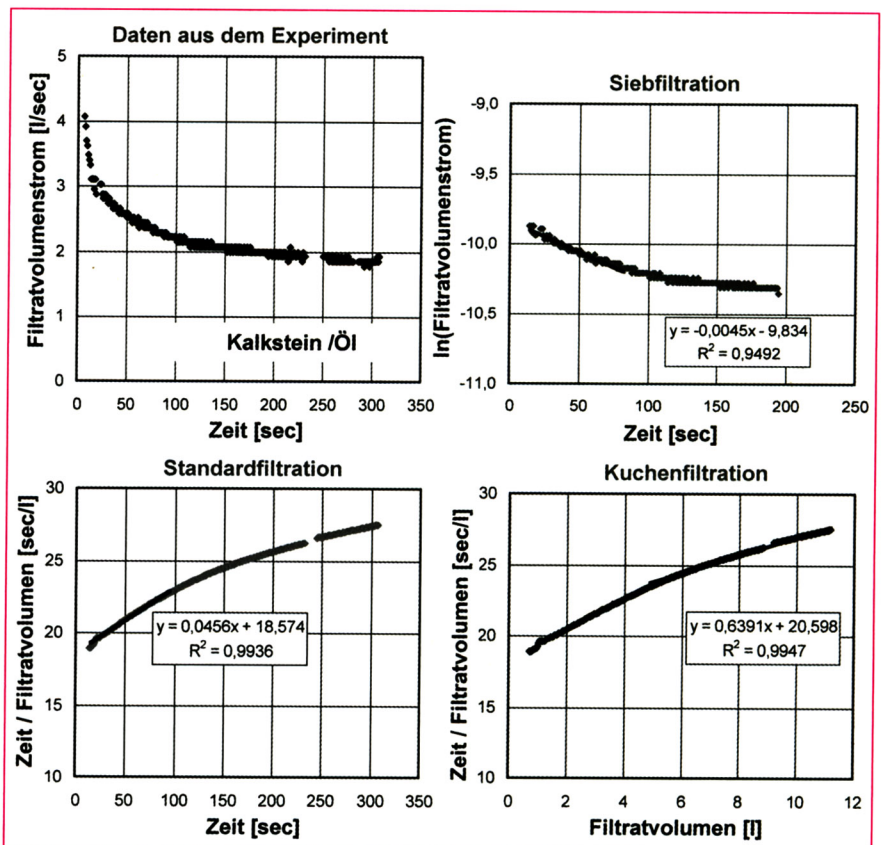


Abb. 12: Experimentelle Filtrationsergebnisse

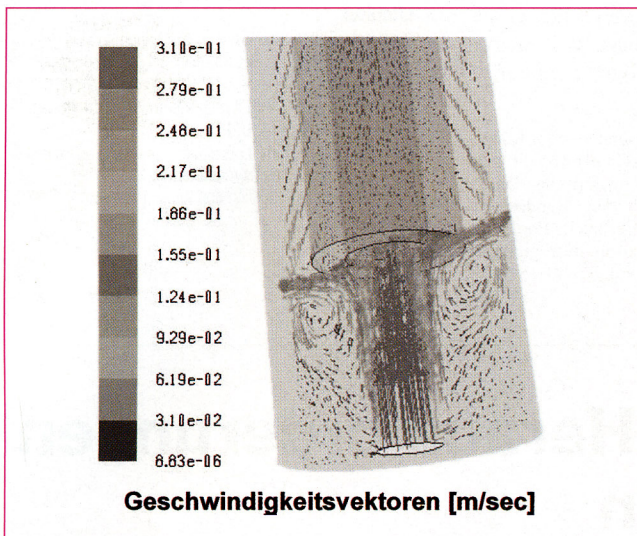


Abb. 13: CFD-Simulation des Strömungsfeldes am Kerzeneinlauf

rechnerisch mit partikelfreier Flüssigkeit durchströmt und das dabei angefallene Gesamtfiltratvolumen zu 100% gesetzt. 90.2% strömen durch die Spalte und 9.8% radial durch die Papierstruktur. Filtriert man mit Suspension, so erhält man für die hier gewählten Modellparameter im Vergleich nur 56.1% des Filtratvolumens. Infolge sukzessiver Partikelablagerung reduziert sich das bis t_F durch die Spalte fließende Filtratvolumen auf 46.3% und das durch das Papier strömende Filtratvolumen bleibt unverändert bei 9.8%. Infolge des im Vergleich zu den Spalten hohen Durchströmungswiderstandes des Papiers kann sich in der zur Verfügung stehenden Zeit praktisch kein Kuchen aufbauen und der Filtratschutz bleibt praktisch unverändert.

5. Versuchsaufbau und Filtrationsergebnisse

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine kleine Pilotfilteranlage mit einer Einzelkerze in einem Plexiglasgehäuse gebaut. Abb. 11 gibt einen Eindruck vom Anlagenaufbau. Dieses Pilotfilter kann wie ein industrielles Filter betrieben werden und arbeitet inklusive Filterregeneration durch Rückspülung. Die Suspension kann sowohl mit konstantem Druck als auch mit konstantem Volumenstrom zugeführt werden. Die relevanten Drücke, der Volumenstrom und die Flüssigkeitstemperatur werden während der Filtration gemessen und aufgezeichnet. Das Filter wird am unteren Ende befüllt. Um eine gleichmäßige Belegung der Kerzenoberfläche mit Partikeln zu gewährleisten und ein Rücksedimentieren der Partikeln zu verhindern, muss die Aufstromgeschwindigkeit größer als die Sinkgeschwindigkeit eingestellt werden. Der Abscheidegrad des Filters und die Trennkorngröße werden durch die Analyse von mehreren über die Filtrationszeit verteilt gezogenen Filtratproben bestimmt.

Der Filtrationswiderstand der Kerze selbst kann mittels Durchströmung mit partikelfreiem Öl ermittelt werden. Bisher wurden u.a. Experimente unter den folgenden Bedingungen ausgeführt:

- Druckdifferenz $\Delta p = 100 \text{ kPa}$
- Viskosität des verwendeten Mineralöls $\eta_L = 0.01$
- Mittlere Partikelgröße des verwendeten Kalksteines $x_{3,50} = 5.5 \mu\text{m}$
- Suspensionskonzentration $c = 2400 \text{ mg/l}$ (≈ 10 mal höher als real)

Abb. 12 zeigt an einem Beispiel die Rohdaten eines Filtrations-experiments und die Datenauswertung zur linearen Darstellung entsprechend Abb. 9.

Die erste Phase der Filtration könnte durch Sieb- oder Standardfiltration beschrieben werden und bei größeren Zeiten kann eine Kuchenfiltration angesetzt werden. Die Aussagen sind

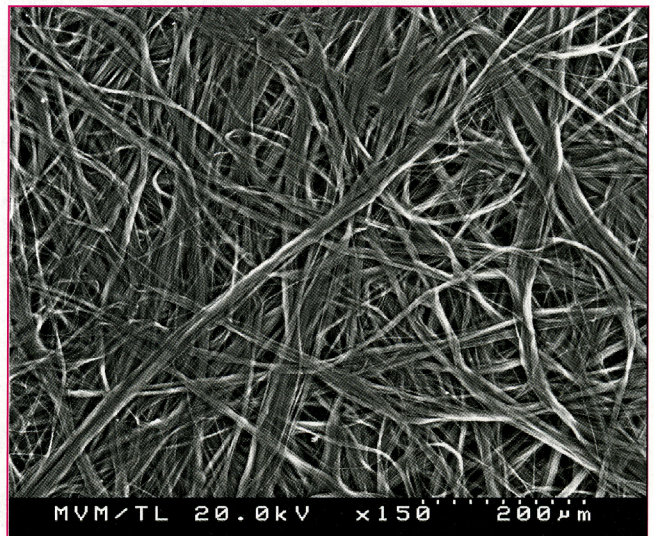


Abb. 14: Polymer-,Papier“

aber leider nicht eindeutig und auch nicht klar voneinander abzugrenzen. Ein Grund hierfür besteht sicherlich in der schon beschriebenen Überlagerung mehrerer Abscheidemechanismen.

Weitere Experimente sollen unter variierten Filtrationsbedingungen ausgeführt und mit dem aus der theoretischen Analyse des Filtrationsvorganges abgeleiteten Modell verglichen werden. Im Ergebnis soll es möglich werden, aus wenigen und gezielt angesetzten Laborexperimenten mit einer vergleichsweise geringen Suspensionsmenge zuverlässige Vorhersagen über das Filtrationsergebnis einer industriellen Filtrationsanlage machen zu können.

6. CFD Simulation des gesamten Filtrationssystems

Um optimale Filtrationsbedingungen zu gewährleisten, muss ein möglichst gleichmäßig verteilter Suspensionsfluss ausreichender Geschwindigkeit durch den Filterkessel hindurch realisiert werden. Dies ist die Voraussetzung für eine gleichmäßige Versorgung aller Filterkerzen und der gesamten Filterfläche mit Partikeln. Hier bietet sich die numerische Strömungssimulation als hervorragend geeignetes Werkzeug zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse in einem Filterkessel mit Originalgeometrie an. Erste CFD-Simulationen auf der Basis des Programmes FLUENT haben für die derzeit vorhandene Geometrie bis auf die unmittelbare Einlaufzone eine konstante Strömungsgeschwindigkeit entlang der Kerzen bestätigt. Auch der Druckverlust ist gleichmäßig über alle 61 Kerzen verteilt. Abb. 13 zeigt exemplarisch die Strömungsgeschwindigkeit in der Umgebung der Einlaufzone einer Filterkerze.

Weitere Untersuchungen sollen Partikeln in die Simulation mit einschließen, um ein möglichst realistisches Bild der Partikelablagerung unter variierten Filtrationsbedingungen zu erhalten.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Auf der Grundlage der bisherigen Untersuchungen kann der Filtrationsprozess für die Spaltfilterkerzen als Überlagerung unterschiedlicher Abscheidemechanismen beschrieben werden. Diese können jeweils theoretisch modelliert werden. Ziel der laufenden Untersuchungen ist die Erarbeitung eines integrierten Modelles, welches es mit minimalem experimentellem Aufwand erlauben soll, zuverlässige Vorhersagen über Filtrationsergebnisse bei variierten Prozessbedingungen zu liefern. In Kombination mit einer optimierten Testfilterapparatur soll die Dimensionierung industriell einzusetzender Filteranlagen einfacher und präziser erfolgen können, als derzeit möglich. Darüber hinaus und in Kombination mit CFD-Simulationen soll das vertiefte Verständnis

für die Details des Filterprozesses zu substantziellen Verbesserungen der Filtrationsanlagen führen.

Das Filtrationsprinzip ist derzeit durch die Natur des Filtermediums noch auf Anwendungen im Ölbereich beschränkt, doch so leistungsfähig, dass eine Übertragung auf wässrige Suspensionen außerordentlich wünschenswert wäre. Dies erfordert spezielle wasserresistente

Filtermedien. Abb. 14 zeigt hierzu als Beispiel die Struktur eines wasserfesten „Papieres“ aus einem Polymerfaserstoff.

Danksagung

Die Autoren danken insbesondere dem Kooperationspartner Transor Filter GmbH für die sehr gute Zusammenarbeit und technische Unterstützung sowie der AIF und dem Bundesministerium für Wirtschaft für die finanzielle Förderung im Rahmen des zentralen Innovationsprogrammes Mittelstand (ZIM).

Literatur

- /1/ Hermans, P.H.; Bredée, H.L., Zur Kenntnis der Filtrationsgesetze; Rec.trav.chim.54 (1935); 217-225
- /2/ Gösele, W. et. al. in Luckert, K.; Handbuch der mechanischen Fest-Flüssig-Trennung, Vulkan-Verlag; Essen (2004); 144-164
- /3/ Jung, C.W.; Son, H.J.; Evaluation of membrane fouling mechanism in various membrane pretreatment processes; Desalination and Water Treatment 2 (2009); 195-202