

Cleartec Water Management GmbH
(Bewilligungsempfänger)

**Entwicklung einer Demonstrationsanlage mit einem
Schlauchfiltersystem für eine energiearme Mikro-/ Ultrafiltration**

Schlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 24159/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Jamal Sarsour, Dr. Michael Linke, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf

Dr. Jörg Kegebein, Cleartec Water Management GmbH, Marktrodach

Gunther Wölfel, Langendorf Textil GmbH & Co. KG, Marktrodach

Erwin Böhnke, Ingenieurbüro Böhnke, Mistelbach

Dr. Dieter Bergemann, Ingenieurbüro Dr. Bergemann - Innovationen, Rosengarten

Mai 2011

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	4
2	ZIEL- UND AUFGABENSTELLUNG	4
3	LÖSUNGSWEG	5
3.1	OPTIMIERUNG UND ENTW. NEUER SCHLAUCHFILTERGEFLECHTE ZUR MIKROFILTRATION	5
3.2	KONZEPTION UND BAU EINER INDUSTRIELL VERWENDBAREN DEMONSTRATIONSANLAGE	6
3.3	TECHNISCHE ERPROBUNG DES VERFAHRENS IN VERSCHIEDENEN EINSATZGEBIETEN.....	6
4	BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGEN UND MESSGERÄTE	7
4.1	VERSUCHSANLAGEN	7
4.1.1	FILTRATIONSPRÜFSTAND	7
4.2	VERWENDETE MESSGERÄTE.....	8
4.2.1	PARTIKELMESSGERÄT.....	8
4.2.2	FLÄCHENKAMERA ZUR AUFNAHME DER MIKROSKOPBILDER.....	9
4.2.3	ZUGPRÜFMASCHINE VON ZWICK.....	10
4.3	FILTRATIONSMESSGRÖßEN	10
4.3.1	PARTIKELBESCHAFFENHEIT UND SUSPENSIONSEIGENSCHAFTEN.....	10
4.3.2	BESTIMMUNG DES TRENNGRADES UND DER TRENNGRENZE.....	10
4.3.3	TRENNGRENZE.....	11
5	ANFORDERUNGEN AN DIE SCHLAUCHFILTER	12
6	ENTWICKLUNG UND OPTIMIERUNG DER SCHLAUCHFILTER	13
7	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE MIT DER LABORANLAGE	16
7.1	UNTERSUCHUNGEN ZUR AUSWAHL DER FILTERSCHLÄUCHE FÜR PRAXISVERSUCHE	16
8	KONZEPTION, BAU UND INBETRIEBNAHME EINER MF-DEMONSTRATIONSANLAGE	24
9	ERGEBNISSE DER PRAXISVERSUCHE MIT ABWASSER	27
10	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	28
11	ABBRUCHENTSCHEIDUNG	29
12	LITERATURVERZEICHNIS	30

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schlauchfiltergeflecht zur Mikrofiltration mit textilem Stützkern.....	5
Abb. 2: Konzept zur Abwasserteilstrombehandlung Fa. Kaliko	6
Abb. 3: Laborfilterprüfstand Abb. 4: Fluss-Kreislauf des Filterprüfstandes	7
Abb. 5: HORIBA LA-300 [8].....	8
Abb. 6: Ergebnisfenster des HORIBA-Messgerätes	8
Abb. 7: Verteilungskurven	9
Abb. 8: Basler Flächenkamera A101f [9]	9
Abb. 9: Zugprüfmaschine von Zwick [10].....	10
Abb. 10: Sartorius Vakuum-Filterflasche [11].....	11
Abb. 11: Überschneidungstrenngrenze [13].....	12
Abb. 12: Geflechtkonstruktion.....	13
Abb. 13: Flechtprozess mit Stützkern Abb. 14: Flechtmaschine ITV Denkendorf	14
Abb. 15: Erste Muster der Filterschläuche	15
Tab. 1: Volumenstrom und Überströmungsgeschwindigkeit	16
Abb. 16: Partikelsummen- und -dichteverteilung der Suspension	16
Abb. 17: Partikelgrößenverteilung mit Filterschlauch Typ 1 nach 1 h.....	17
Abb. 18: Partikelverteilung mit Filterschlauch Typ 1 nach 3 h.....	17
Abb. 19: Mikroskopaufnahmen des Filterschlauchs Typ 1 unter Vorspannung von 10 N.....	18
Abb. 20: Partikelverteilung mit Filterschlauch Typ 1 unter 20 N Vorspannung	18
Abb. 21: Mikroskopaufnahme des Filterschlauchs Typ 1 unter Vorspannung von 20 N.....	18
Abb. 22: Partikelverteilung des Filterschlauchs Typ 2 unter 10 N Vorspannung	19
Abb. 23: Mikroskopaufnahmen des Filterschlauchs Typ 2 unter 10 N Vorspannung.....	19
Abb. 24: Partikelverteilung mit Filterschlauch Typ 2 unter 20 N Vorspannung	19
Abb. 25: Partikelverteilung mit Glasfilter	20
Abb. 26: Unterer Einspannbereich des Filterschlauches	20
Abb. 27: Partikelverteilung Filterschlauch I.....	21
Abb. 28: Partikelverteilung der Filterschlauch II	22
Abb. 29: Partikelverteilung Filterschlauch III.....	22
Abb. 30: Schematischer Aufbau des Filtermoduls mit den Filterschläuchen	24
Abb. 31: Schematische Darstellung der Pilotanlage	25
Abb. 32: MF-Demoanlage	25
Abb. 33: Partikelverteilung bei Einsatz des Filterschlauches I in der Demoanlage	26
Abb. 34: Partikelgrößenverteilung des Abwassers (Vorlage)	27
Abb. 35: Partikelgrößenverteilung des Permeats nach dem Filtrationsprozess.....	27
Abb. 36: Zeitlicher Verlauf des Permeatflusses der MF-Demoanlage	28
Abb. 37: Zeitlicher Verlauf der CSB-Konzentration im Permeatfluss.....	28
Tab. 1: Volumenstrom und Überströmungsgeschwindigkeit	16
Tab. 2: Vergleich der MF-Demoanlage zum Stand der Technik.....	29

1 Zusammenfassung

Die Membranfiltration wurde in den letzten Jahrzehnten zu dem Verfahren für die Schließung von produktionsintegrierten Kreisläufen. Beispiele für produktionsintegrierte Maßnahmen zur Wiedergewinnung und Rückführung von Prozesswässern finden sich in fast allen Industriebranchen, beispielsweise in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, Biotechnologie oder aber auch in der pharmazeutischen Produktion [1][2][3].

Trotz großer Anstrengungen in den letzten Jahren konnte eine kontinuierliche Leistungsverminderung von Filteranlagen bedingt durch eine Deckschichtbildung auf der Filteroberflächen (Membranen) nicht verhindert werden. Diese Tatsache war die Ausgangsbasis eines im Mai 2007 erfolgreich abgeschlossenen Vorprojektes, gefördert von der DBU (Az. 24159 [4]). Hierbei wurden die ersten erfolgreichen Schritte für die Entwicklung eines neuartigen filamentverstärkten geflochtenen Filterschlauches für eine Filtration im Bereich der Mikrofiltration durchgeführt, welche eine einfache, kostengünstige und effektive Entfernung der Filterdeckschicht ermöglicht.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Filterschläuche weiter entwickelt und sollten in einer halbtechnischen Demonstrationsanlage für Langzeitversuche zur Schließung von Wasserkreisläufen bei einem Glasfaserverarbeiter eingesetzt werden.

Der Vorteil der entwickelten Schlauchfilter gegenüber herkömmlichen MF-Membranen liegt in der geringeren Verstopfungsneigung des Filters durch das regelmäßige mechanische Abreinigen während des Filtrationsprozesses. Dies ermöglicht eine energiearme Mikrofiltration, da die Druckdifferenz durch eine konstant geringere Deckschichtbildung niedriger ist als bei den klassischen Mikrofiltrationsmembranen. Aufgrund von regelmäßigen dynamischen Zugbewegungen des Schlauchfilters kann die Anzahl der zeitlich aufwendigen chemischen Reinigungen reduziert werden.

2 Ziel- und Aufgabenstellung

Ausgehend von den Defiziten der derzeit eingesetzten Filterelemente sollten im Rahmen des beantragten Verbundvorhabens textilbasierte Filterelemente entwickelt werden, welche sich durch folgende Eigenschaften auszeichnen:

- Hohe Standzeiten und damit geringe Anzahl der zeitlich aufwendigen chemischen Reinigungen,
- Geringer permeatspezifischer Energiebedarf,
- Hohe Wiederverwendungsquote und damit
- Geringere Umweltbelastung.

Um die Ziele zu erreichen, wurden unabhängig voneinander und/oder in Kombination miteinander neuartige Filtermedien entwickelt und eingesetzt:

- Schlauchfiltergeflechte mit textilem Kern für den Bereich Mikrofiltration.

Die entwickelten Filterelemente werden getrennt voneinander zunächst in Technikumversuchen getestet und optimiert, um anschließend in Praxisversuchen exemplarisch in der Abwasserbehandlung der Glasfaserverarbeitung ihre Praxistauglichkeit unter Beweis zu stellen.

Hierfür wurde im Rahmen des Vorhabens eine Demonstrationsanlage konzipiert und gebaut, in welcher die kombinierten Filtersysteme eingesetzt wurden.

3 Lösungsweg

Im geplanten Vorhaben sollte eine Verbesserung der Filtrationsleistung in der Mikrofiltration durch spezielle neue schlauchförmige geflochtene Filter erreicht werden. Zur Erreichung der Projektziele wurden folgende Arbeitspakete durchgeführt:

3.1 Optimierung und Entwicklung neuer Schlauchfiltergeflechte zur Mikrofiltration

Aufbauend auf den Ergebnissen des erfolgreich abgeschlossenen DBU-Projektes [4] wurden die darin entwickelten Mikro-Filterelemente bestehend aus einem Schlauchgeflecht aus Multifilamenten (\varnothing 5-10 mm) mit veränderbarer Porengröße als Low-Cost-Variante für die Mikrofiltration weiter optimiert.

Die Optimierung umfasst:

- Den Einbau eines textilen Kernes als Wendel aus einem oder mehreren miteinander verzwirnten groben Monofilamenten bzw. einem gewendelten groben Monofilament (ohne weitere Filtrationselemente) in das Filtergeflecht. Die folgende Abbildung 1 verdeutlicht die Stützung des Mikrofiltrationsschlauchfilters.
- Die Reduzierung der Filtrationstrenngrenze auf 0,1 bis 0,5 μm .
- Den Bau eines Filtrationsmoduls mit 9 gestützten Schlauchfiltern. Das gefertigte Rohrmodul mit einer Ausgangslänge von 50 cm wird in eine Technikumanlage eingebaut und getestet. Beim Bau des Moduls und der Anlage muss die Möglichkeit der Veränderbarkeit der Porengröße zur Abreinigung sichergestellt sein. Auf den Bau der Technikumanlage wird in Kapitel 7 detailliert eingegangen.

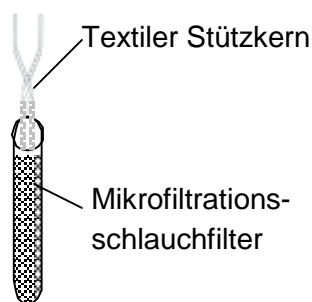


Abb. 1: Schlauchfiltergeflecht zur Mikrofiltration mit textilem Stützkern

Durch die Verwendung der biegesteifen, gewendelten Monofilamente wird der Schlauchfilter wesentlich stabiler gegenüber Druckbelastung von außen. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn die Filtration von außen nach innen erfolgt, d.h. wenn die Umgebung des Geflechtschlauches unter Überdruck gesetzt wird. Die Filtration kann damit unter wesentlich höheren Druckdifferenzen (bis 7 bar) verglichen mit konventionellen kapillaren Filtern (1-3 bar [5]) erfolgen.

Die Tests des Filtrationssystems erfolgten mit inerten Polymerpartikeln (Korngröße 0,7 bis 600 μm). Die Beurteilung der Filtration erfolgte schwerpunktmäßig anhand der Druckstabilität, Porengröße, Porenhomogenität und Reinigungsleistung sowie des Druckverlustes.

Die Charakterisierung der eingesetzten Partikel erfolgte am ITV Denkendorf durch das Laser-Streulichtspektrometer Horiba LA-300 (Messbereich 0,1 bis 600 μm).

3.2 Konzeption und Bau einer industriell verwendbaren Demonstrationsanlage

Die entwickelten Filterelemente/-systeme wurden in einer halbtechnischen Demonstrationsanlage zunächst für Versuche am ITV Denkendorf eingesetzt und verfahrenstechnisch optimiert. Im Anschluss daran erfolgten Praxisversuche mit Abwässern aus einem ausgewählten Industriebetrieb. Die Beurteilung der Filter erfolgte durch Ermittlung der Filtrationskenndaten (Trennleistung, Standzeiten, Rückspülzyklen, Druckverlust).

Die Pilotanlage war so ausgelegt, dass die gefertigten Rohrmodule mit einer Ausgangslänge von 50 cm ein- und ausgebaut werden konnten und eine Streckung der Geflechschlauchfilter von maximal 15 % möglich war. Hierbei sollten die Schläuche in gestrecktem Zustand eine Länge von einem Meter nicht überschreiten. Für die Konzeption und Definition der erforderlichen Parameter für die Integration dieses Bauteiles in die Pilotanlage war das Ing.-Büro Dr. Bergemann verantwortlich. Der Einbau der gesamten Anlage erfolgte durch das Ing.-Büro Böhnke.

3.3 Technische Erprobung des Verfahrens in verschiedenen Einsatzgebieten

Die entwickelte Pilotanlage wird im Anschluss an die Tests im Denkendorfer Technikum exemplarisch für die Behandlung von Prozesswässern aus der Textilglasgewebeindustrie eingesetzt. Die folgende Abbildung 2 zeigt das geplante Verfahrensschema der Abwasserteilstrombehandlung vor Ort bei der Fa. Kaliko.

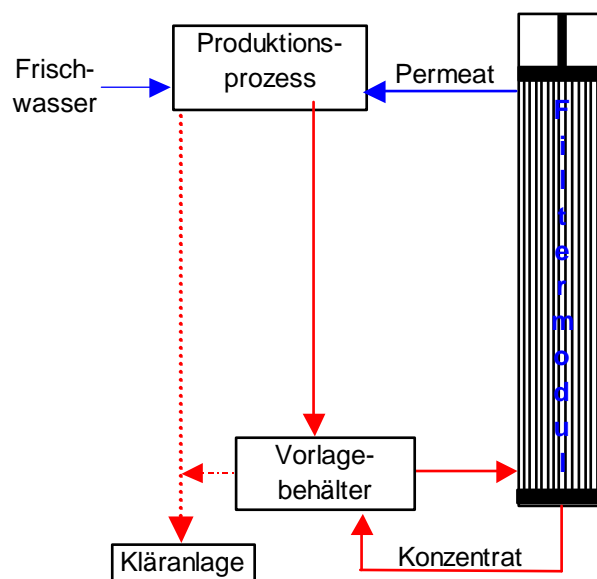


Abb. 2: Konzept zur Abwasserteilstrombehandlung Fa. Kaliko

Um einen Langzeitbetrieb unter realen Bedingungen gewährleisten zu können, werden die jeweiligen Abwasserteilströme vor Ort von den aktuellen Ablassrohren über einen Bypass abgezweigt und so der Anlage zugeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Teilstromtemperatur maximal etwa 50°C beträgt, um eine Schädigung der Filtermaterialien oder anderer Werkstoffe/Materialien zu vermeiden. Die hochbelasteten Abwasserteilströme werden zunächst durch einen Vorfilter (Maschenweite 100 µm) von Grobpartikeln bzw. Flusen befreit, um Verstopfungen und/oder Beschädigungen in den nachgeschalteten Filtern zu vermeiden [6].

Während der Praxisversuche werden die Konzentrationen an partikulären sowie organischen Verunreinigungen im Zulauf sowie das Permeat und das Filtrat der Mikrofiltration gemessen. Darüber hinaus wird im Rahmen der Wartungsarbeiten die Anlagenkonstruktion auf etwaige Schäden überprüft. Somit wird die Effektivität der einzelnen Filtrationseinheiten und die Langzeitbeständigkeit gewährleistet.

4 Beschreibung der Versuchsanlagen und Messgeräte

4.1 Versuchsanlagen

Zur Durchführung der Versuche im Rahmen des Vorhabens wurde zum Einen ein Filtrationsprüfstand benötigt, um die hergestellten Schlauchfilter zu testen, zum Anderen ein Partikelmessgerät, mit dem die Filtrationsergebnisse der eingesetzten Schlauchfilter ermittelt werden konnten.

Zum Ausbau und zur Erweiterung des Prüfstandes wurde zusätzlich eine Pilotanlage (Kap. 7) aufgebaut, um vornehmlich die Druckmessung von Zu- und Ablauf zu ermöglichen.

4.1.1 Filtrationsprüfstand

Bei dem Filterprüfstand, der für die Filtrationsversuche konzipiert wurde, handelt es sich um ein Cross-flow-System. Der Filterprüfstand setzt sich im Wesentlichen aus einer Zulaufpumpe, einem Vorlagegefäß (1.000 ml) und der Filtrationseinheit zusammen. Die Filtrationseinheit besteht aus einem transparenten Acrylrohr (Innendurchmesser: 19 mm), das an beiden Enden einen Ein- bzw. Ausgang hat. Der textile Schlauchfilter (Durchmesser 5 mm) ist in das Glasrohr eingebaut. Die zu filtrierende Probe wird aus dem Vorlagebehälter im Kreislauf durch die Filtrationseinheit gepumpt. Durch die Druckdifferenz gelangt ein Teil des Filtrats als Permeat von außen ins Innere des Filters und läuft in einen Permeat-Auffangbehälter ab. Der Fluss-Kreislauf des Filterprüfstandes ist in der Abbildung 3 bzw. schematisch in der Abbildung 4 dargestellt.

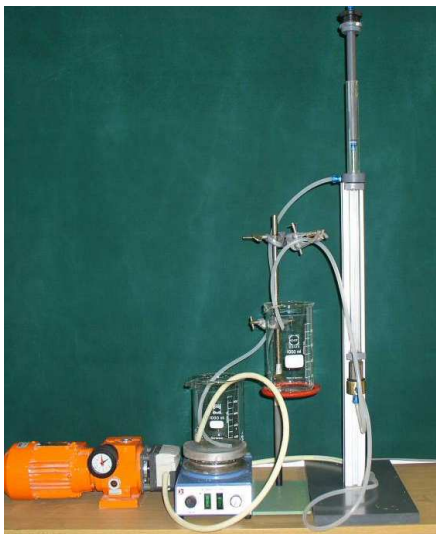


Abb. 3: Laborfilterprüfstand

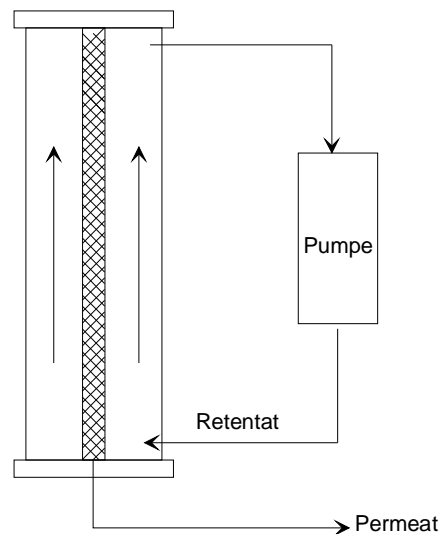


Abb. 4: Fluss-Kreislauf des Filterprüfstandes

Die Filtrationseinheit zeichnet sich dadurch aus, dass durch Veränderung der Einspannlänge des Schlauchfilters die Porengröße und damit die Trenngrenze der abgetrennten Partikel sehr einfach variierbar ist.

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die Abreinigung der Deckschicht durch Rückspülen bei stark vergrößerter Porenweite durch Verkürzung und Durchmessererweiterung des Filterelements. Durch die mechanische Abreinigung kann teilweise auf chemische Reinigungen verzichtet werden und die Standzeiten der Filtrationsanlage können merklich verlängert werden.

4.2 Verwendete Messgeräte

4.2.1 Partikelmessgerät

Zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung der Suspensionen und Permeatproben wurde der Laser-Streulichtspektrometer HORIBA LA-300 [7] der Fa. Retsch Technology verwendet (Abb. 5).

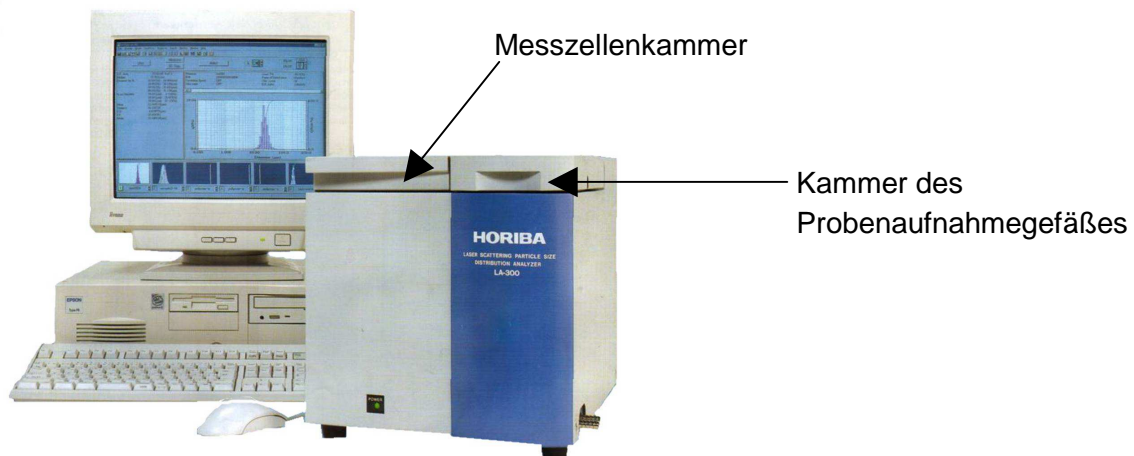


Abb. 5: HORIBA LA-300 [8]

Für die Messung dient eine im Gerät installierte Laserdiode. Dabei durchlaufen die in einer Probe dispergierten Partikel eine Durchflusszelle, sechs Winkeldetektoren sowie ein Multi-Element-Detektor, welcher aus 36 Fotodioden besteht, die das von den Partikeln gestreute Licht empfangen. Anhand elektrischer Signale, welche mit der Stärke des gestreuten Lichtes korrespondieren, wird die Größenverteilung der Partikel berechnet. Der Messbereich erstreckt sich hierbei von 0,1 bis 600 μm .

Die Abbildung 6 zeigt das Ergebnisfenster einer Messung, die mit dem Partikelmessgerät durchgeführt wurde.

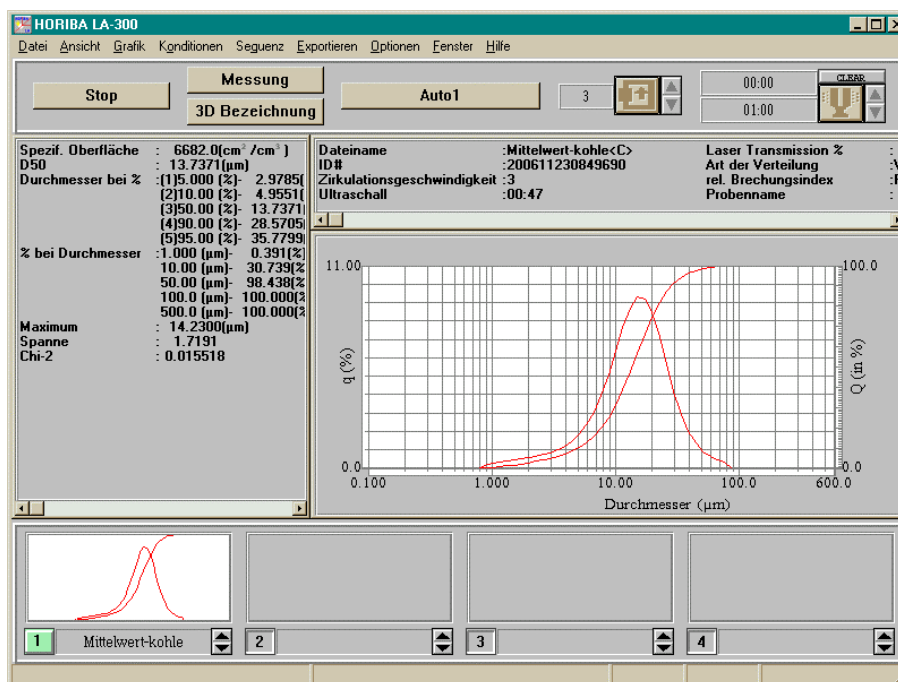


Abb. 6: Ergebnisfenster des HORIBA-Messgerätes

Im linken Bildbereich können die technischen Daten der Messung abgelesen werden. Werden die gemessenen Partikeldurchmesser in einem Diagramm in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit aufgetragen, ergibt sich i.d.R. eine Gaußsche Glockenkurve.

Eine Trennung lässt sich durch zwei Verteilungskurven beschreiben: die Dichte-Verteilungskurve wird mit $q(x)$, die Summen-Verteilungskurve mit $Q(x)$ bezeichnet.

Anhand der folgenden Graphik (Abb. 7) sind die Verteilungskurven einer Messung und die charakteristischen Partikelgrößen zu sehen.

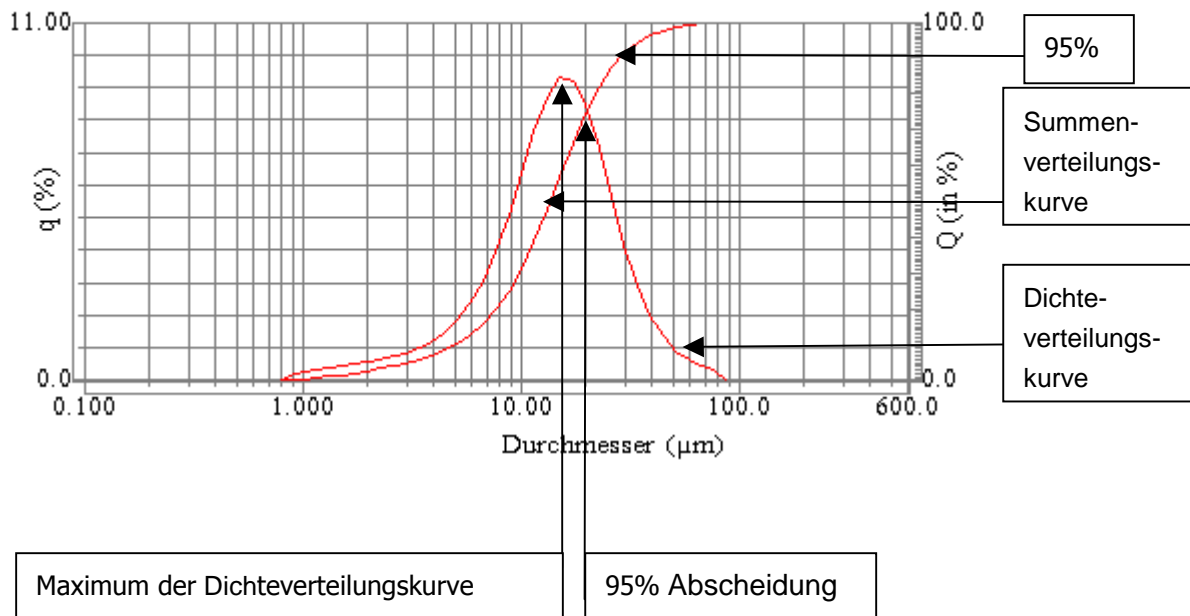


Abb. 7: Verteilungskurven

Auf der x-Achse ist der Partikeldurchmesser in μm dargestellt. Die y-Achse auf der linken Seite kennzeichnet die Dichteverteilungskurve ($q(x)$ in %), die y-Achse auf der rechten Seite die Summenverteilungskurve ($Q(x)$ in %). Weiterhin sind charakteristische Werte der Kurven dargestellt und eingezeichnet: das Maximum der Dichteverteilungskurve (d.h. dieser Partikeldurchmesser tritt am häufigsten im Permeat auf) bei einer Abscheidung von 95% der Partikel (d.h. 95% aller gemessenen Partikel sind kleiner als dieser Partikeldurchmesser).

4.2.2 Flächenkamera zur Aufnahme der Mikroskopbilder

Die mikroskopischen Aufnahmen wurden mit einer Flächenkamera A101f von Basler aufgenommen. Diese Kamera hat eine Auflösung von 1,3 Megapixel und ist für industrielle Anwendungen konzipiert. Die Größe eines Pixels beträgt $6,7 \mu\text{m} \times 6,7 \mu\text{m}$. Über diese Angabe kann eine Aussage über Größen- und Streckenverhältnisse der Aufnahmen gemacht werden.



Abb. 8: Basler Flächenkamera A101f [9]

4.2.3 Zugprüfmaschine von Zwick

Die Zugprüfmaschine Allround-Line von Zwick ist eine statische Prüfmaschine. Sie kann für unterschiedliche Nennkräfte bis 250 kN eingesetzt werden. Die folgende Abbildung 9 zeigt die Prüfmaschine.



Abb. 9: Zugprüfmaschine von Zwick [10]

Das Gerät wurde verwendet, um das zugelastische Verhalten der Geflechte zu prüfen. Das Geflecht wird unter Einwirkung einer Vorspannkraft zwischen zwei Klemmen eingespannt und 50 Mal zwischen den konstanten Dehngrenzen be- und entlastet. Die obere Dehngrenze wird so festgelegt, dass sie im elastischen Bereich des Geflechts liegt. Beim Anfahren der 6. Belastung wird die Restdehnung 1 bei Erreichen der Vorspannkraft bestimmt. Nach Abschluss der 50 Wiederholungen erfolgt eine Verdehnung bis zum Erreichen der Vorspannung, um die Restdehnung 2 zu bestimmen.

4.3 Filtrationsmessgrößen

4.3.1 Partikelbeschaffenheit und Suspensionseigenschaften

Die für die Filtrationsversuche verwendete Suspension bestand aus voll entsalztem Wasser, dem Polymerpartikel zugefügt wurden. Diese Partikel entstehen als Abfallprodukte bei der Polymerherstellung. Das verwendete Polymer ist ein Copolymer aus Glykolid, e-Caprolacton und Trimethylencarbonat. Für die Versuche zur Mikrofiltration wurden Partikel mit einem Durchmesser von 1 bis 600 μm eingesetzt. Die Konzentration lag bei 2 g/l.

Für die Vorversuche zur Ultrafiltration wurde eine Suspension verwendet, die kleinere Partikel enthielt. Diese Suspension bestand aus Wasser und Kohlenstaubpartikel. Hierfür wurde der Aktivkohlestaub Picactif CNB 200 der Fa. Aktivkohlen GmbH eingesetzt. Die Partikel hatten einen Durchmesser von 0,01-10 μm . Die Kohlenstaubkonzentration bestand aus 1g/l.

4.3.2 Bestimmung des Trenngrades und der Trenngrenze

Der Trenngrad kennzeichnet die prozentuale Abtrennung der Partikel durch das Filtermedium. Der Gesamttrenngrad wird über den Gewichtsanteil des Aufgabegutes und des Permeats ermittelt. Hierbei wird folgende Formel verwendet:

$$TG[\%] = 1 - \frac{m_P [g/L]}{m_A [g/L]}$$

wobei TG den Trenngrad, m_P den Massenanteil des Permeats und m_A den Massenanteil des Aufgabeguts beschreibt. Zur Ermittlung des Trenngrades wurde eine Vakuum-Filterflasche der Firma Sartorius verwendet (Abb. 10).

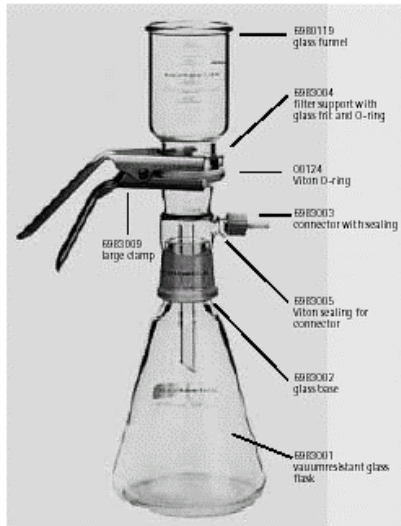


Abb. 10: Sartorius Vakuum-Filterflasche [11]

Diese Filterflasche wird für analytische Bestimmungen zur Abtrennung von Partikeln aus Flüssigkeiten verwendet. Die Flasche besteht aus drei Glasgefäßen: dem Glastrichter, der Glasfassung mit Abzug und dem Glaskolben.

Über den Glastrichter wird die Flüssigkeit eingefüllt. Ein PTFE-Ring mit einem Glasfilterelement verbindet Trichter und Glasfassung mit Abzug. An diesen Abzug wird ein Unterdruck angelegt, der die Flüssigkeit absaugt. Das unterste Teil ist ein Glaskolben, der die abfiltrierte Flüssigkeit auffängt. Der verwendete Filter ist ein Membranfilter aus Cellulose-Acetat.

Spezifikationen des Filters [12]:

Typ und Artikelnummer:	11107-050 N
Porengröße:	0,2 μm
Durchmesser:	50mm

Die gemessenen Partikel der Polymersuspension hatten alle eine Partikelgrößenverteilung $>0,8 \mu\text{m}$. Somit konnte ein Membranfilter mit der Porengröße $0,2 \mu\text{m}$ für die Filtration verwendet werden. Der Membranfilter wurde vor und nach der Filtration im Trockenschrank getrocknet, im Exikator klimatisiert und auf einer Analysenwaage gemessen. Die Differenz bestimmte den Gewichtsanteil der Partikel im Permeat.

4.3.3 Trenngrenze

Unter Trenngrenze wird ein Äquivalentdurchmesser im Überschneidungsbereich der Dichte-Verteilungskurven des Fein- und Grobgutes verstanden. In der Praxis werden folgende Definitionen verwendet:

- Präparative Trenngrenze oder Medianwert der Trennkurve
- Überschneidungstrenngrenze

Die *präparative Trenngrenze* gibt den Schnittpunkt der Dichte-Verteilungskurven von Fein- und Grobgut an (sofern die Massenanteile bekannt sind). Dieser Schnittpunkt wird als Äquivalentdurchmesser bezeichnet, bei dem Grob- und Feingut zu gleichen Teilen vorkommt. Die *Überschneidungstrenngrenze* (Abb. 11) gilt für Trennungen, wenn die Massenanteile unbekannt sind. Im Schnittpunkt x_0 schneiden sich die Summenverteilungskurve des Grobgutes $Q_G(x)$ und die sogenannte Rückstandskurve des Feingutes ($1-Q_F(x)$).

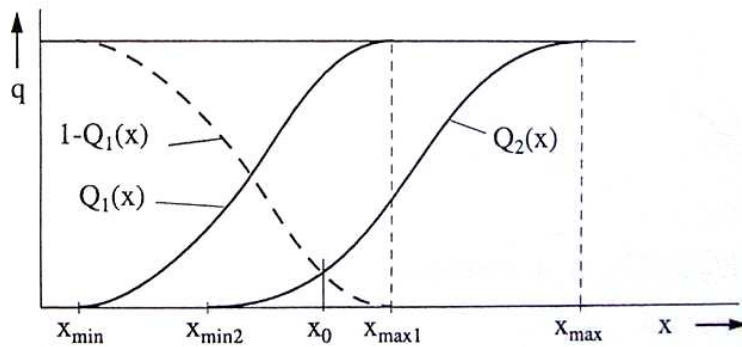


Abb. 11: Überschneidungstrenngrenze [13]

5 Anforderungen an die Schlauchfilter

Für die Schlauchfilter und das Schlauchfiltermodul gibt es einige Anforderungen, die bei der Herstellung beachtet und erfüllt sein sollen. Hierfür wurde in Absprache mit den Industriepartnern ein Anforderungskatalog erstellt, welcher die grundsätzlichen Anforderungen an das Produkt festlegt, um die Praxistauglichkeit zu gewährleisten.

Folgende Anforderungen der Filtration bei unterschiedlichen Branchen wurden definiert:

- Große Anströmfläche mit geringem Potential für zu starke Kuchenbildung (mäßiger Filterwiderstand über lange Zeiträume)
- Variable Porenweiten, die zur Rückhaltung von Teilchengrößen auch im Bereich von $1\text{-}10^{-2}$ μm liegen
- Geringe Neigung zu Bio-Fouling
- Material muss auch im Trinkwasserbereich einsetzbar sein (Inertes Material ohne Verkeimungspotentiale)
- Der Spülvorgang sollte nur kurze Zeit dauern (Totzeiten gering bzw. Ersatzkapazitätsvorhaltung sollte entfallen)
- Wenn möglich nur 1 Spülmedium – entweder Wasser oder Luft ggf. anderes Inertgas. Vielleicht kann Ultraschall von Vorteil sein.
- Platzierung einer großen Filterfläche auf kleinstem Raum (geringe Anlagenmächtigkeit bezogen auf Volumenstrom)
- Kostengünstige Fertigung bei hohen Stückzahlen, Fertigungstoleranzen dürfen die Reproduzierbarkeit der Filterleistung nicht beeinträchtigen.
- Geringste Wartungsanfälligkeit, einfaches Bauprinzip

Der Anforderungskatalog deckt ca. 90 – 95 % aller Branchen ab. Besondere Anforderungen sind im Bereich kommunale Kläranlagen und der Lebensmittelindustrie zu erwarten.

6 Entwicklung und Optimierung der Schlauchfilter

Eine Herausforderung bei der Herstellung der Geflechte lag in der Definition der Flechtparameter, um optimale Filtereigenschaften zu erhalten. Folgende Flechtparameter können dabei unter anderem variiert werden: Garnfeinheit, Fachung/Zwirnung des Garns, Anzahl der Filamente pro Klöppel, Anzahl der Klöppel. Für die Einstellung von Geflechtdurchmesser und Flechtwinkel können die Maschinenparameter Abzugsgeschwindigkeit und Federstärke der Klöppel variiert werden. Schließlich sind noch verschiedene Nachbehandlungen der Geflechte, z.B. thermische Behandlung, möglich.

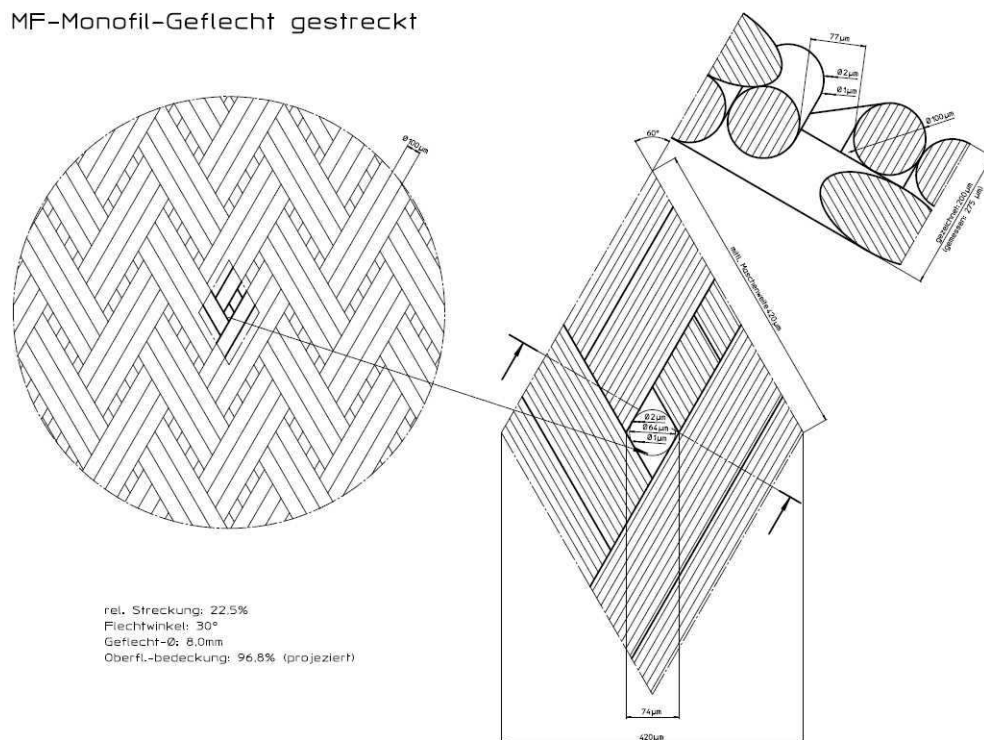
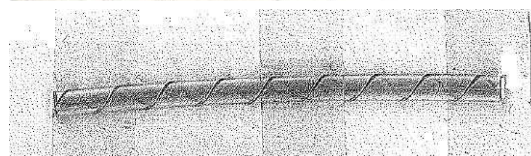
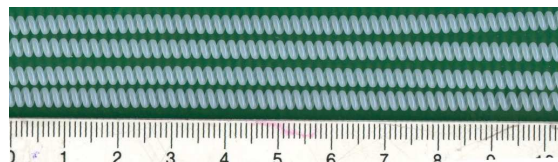


Abb. 12: Geflechtkonstruktion

Aus der Erkenntnis, dass Geflechte aus verfügbaren Monofilamenten mit entsprechender Fachung wegen der großen Zwickelporen (Abb. 12) für die MF ungeeignet sind, wurde ein neuer Lösungsweg beschritten:

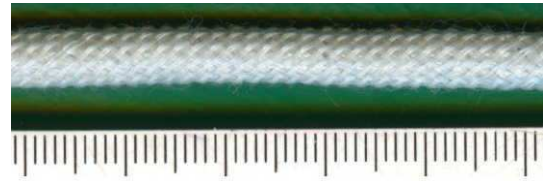
Favorisiert wurde eine asymmetrische Flechttechnik mit wasserlöslichem PVA-Garn für jeweils eine komplette Umlaufrichtung. Nach Auflösung des PVA-Garns vor der Inbetriebnahme sollte so eine Wickellage aus parallelen Monofilamenten entstehen, wobei als Stützkern zwei Varianten vorgesehen waren:

- Runddraht-Stützwendel
- geschnittene Schlauchwendel

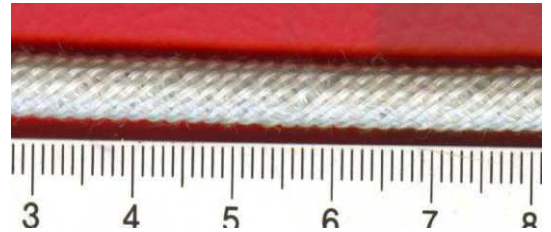


Im Rahmen der Optimierungsversuche wurden von den Projektpartnern Fa. Langendorf und Ingenieurbüro Dr. Bergemann folgende Filterschläuche hergestellt und dem ITV für die Filtrationsversuche zur Verfügung gestellt:

Typ 1: Runddraht-Stützwendel Ø4,5mm,



Typ 2: Schlauch-Stützwendel Ø 4,6mm, 7mm Steigung,



Typ 3: Schlauch-Stützwendel Ø 4,6mm, 2mm Steigung,

Verwendet wurde eine Flechtmaschine mit 48 Klöppeln. Allerdings mit einem für so geringe Geflechtdurchmesser zu großen Stichmaß, was zu erheblichen Qualitäts- und Effizienzproblemen führte. Geflochten wurde in einer Richtung mit 24 Klöppeln mit Polyester- Monofil Ø100µm, 5-fach und in der Gegenrichtung mit nur 12 Klöppeln mit PVA-Garn 300 dtex, 2-fach. Als Flechtwinkel wurde in beiden Richtungen ein Wert von 45° angestrebt, allerdings erst nach vielen Flechtversuchen in akzeptabler Genauigkeit erreicht. Daraufhin wurde die Schlauchfertigung ins Flecht-Technikum des ITV verlegt. Hier stand eine Flechtmaschine mit 48 Klöppeln, aber einem für die Geflechtabmessung angemessenen Stichmaß von nur 80mm zur Verfügung (Abb. 14).

Die vorgegebenen und dann auch in guter Qualität und Reproduzierbarkeit realisierten Geflechtparameter wurden beibehalten. Als Stützkern kam die Runddraht-Variante aus der Eigenfertigung des Ing.-Büros Dr. Bergemann zum Einsatz (Abb. 13)



Abb. 13: Flechtprozess mit Stützkern

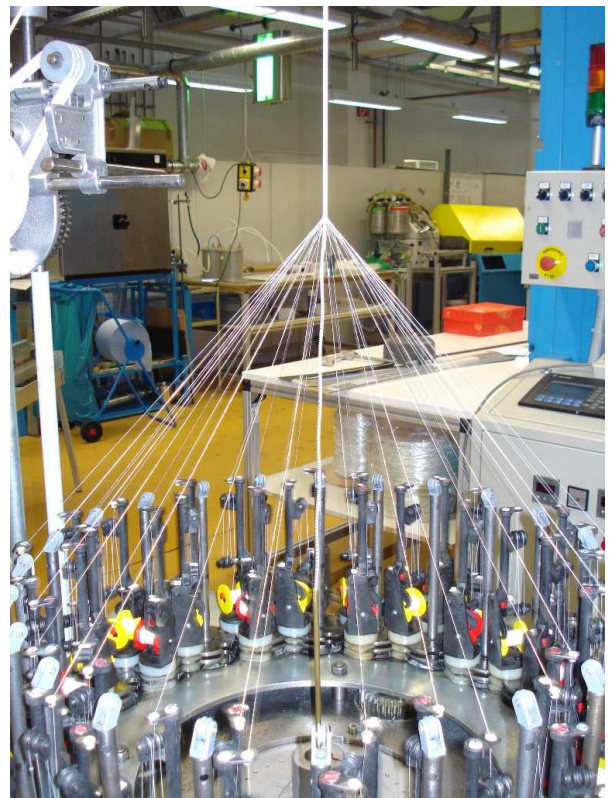


Abb. 14: Flechtmaschine ITV Denkendorf

Nach den unbefriedigenden Filtrationsergebnissen dieser Filterschlauchbauart (s. u.) wurde erneut nach einem besseren Lösungskonzept gesucht. Dieses bestand dann in der Rückkehr zum Multifilament-Geflecht (Abb. 15) (wie schon in Phase I), allerdings unter Beibehaltung des derzeitigen Geflechtdurchmessers von 4-5 mm und Verwendung eines verfügbaren und preiswerten Microfasergarnes PES 77 dtex f 216, d. h. einem Einzelfilament-Ø von nur 6 µm (statt 18 µm bei PES 78 dtex f24 in Phase I). Im ITV selbst werden derzeit noch feinere Microfasern (Ø 1-2 µm) entwickelt, standen für dieses Projekt aber nur bedingt zur Verfügung und wären für eine serielle Anwendung zu teuer gewesen.

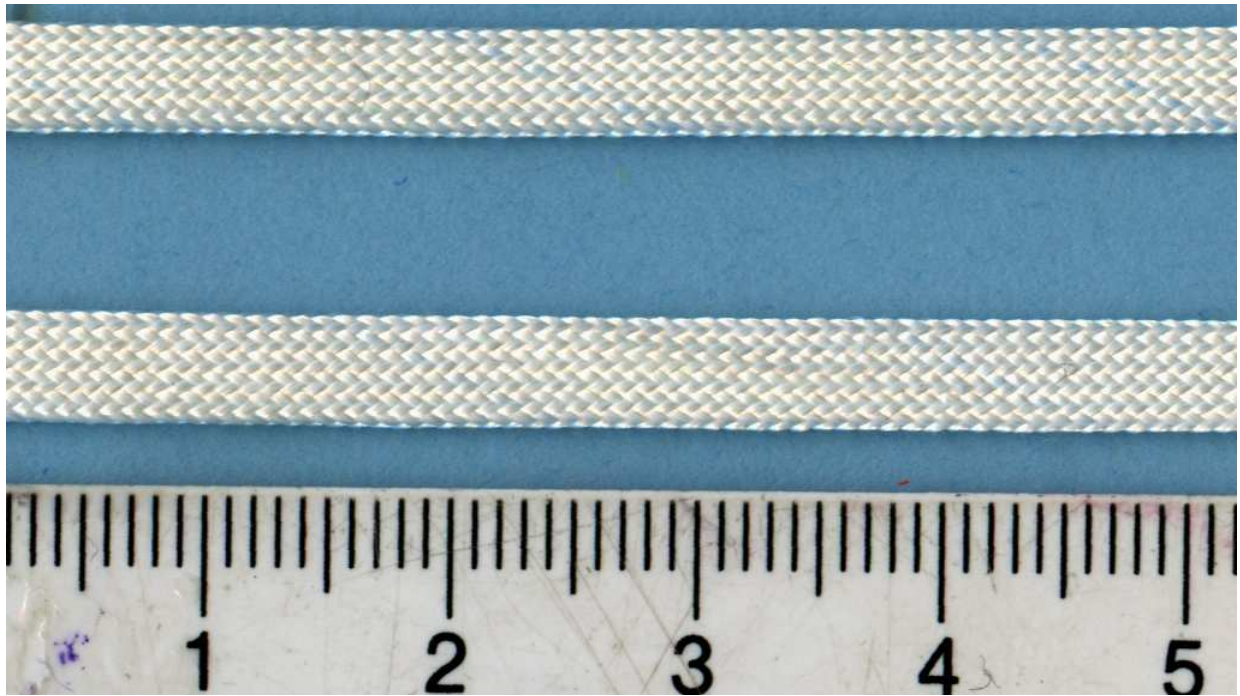


Abb. 15: Erste Muster der Filterschläuche

Nach ersten Filtrationsversuchen im ITV mit diesen Mustern wurde entschieden, für die Erstausrüstung der MF-Demoanlage ausschließlich geschnittene Schlauchstützwendeln mit 7 mm Steigung zu verwenden. Nach der Flechtung der hierfür erforderlichen ca. 50 lfm Filterschlauch wurden diese auch gleich im ITV in Zusammenarbeit mit dem Ing.-Büro Dr. Bergemann in einer für den Versuchsbetrieb spezifischen Weise konfektioniert und in die vom vorangegangenen Versuch vorhandene Anschlussarmatur zu einem Filtermodul mit 48 Schläuchen à 0,8 m und somit ca. 0,6 m² Filterfläche komplettiert.

Nach jeder Musterherstellung wurden Filtrationsversuche durchgeführt, um feststellen zu können, ob eine Verbesserung oder möglicherweise eine Verschlechterung der Filtrationsleistung eingetreten ist.

7 Darstellung der Ergebnisse mit der Laboranlage

7.1 Untersuchungen zur Auswahl der Filterschläuche für Praxisversuche

Das Ziel der Untersuchung lag in der Konstruktion eines Geflechtes, welches eine notwendige Stabilität aufweist, dehnbar ist (um den Schlauchfilter während der Filtration abreinigen zu können) und eine Partikelabscheidung $<1 \mu\text{m}$ erreicht.

Von den hergestellten Schlauchfiltern wurden zuerst die Dehnung und das Flächengewicht bestimmt. Anschließend wurden Filtrationsversuche am Laborprüfstand vorgenommen und die Partikelabscheidung (bzw. die Partikelverteilungen) untersucht.

Alle Filtrationsversuche wurden unter den gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Der Volumenstrom wurde gemessen und daraus konnte die Überströmungsgeschwindigkeit bestimmt werden (Tab. 1).

Druck Zulauf [bar]	0,15
Volumenstrom [m^3/sec]	$1,075 \cdot 10^{-5}$
Fläche [m^2]	$2,765 \cdot 10^{-4}$
Überströmungsgeschwindigkeit [m/s]	0,039

Tab. 1: Volumenstrom und Überströmungsgeschwindigkeit

Die Filtrationsversuche dienen in erster Linie zur Charakterisierung des Filters und zur Feststellung der Trenngrenze. Daher war der Druck im Zulauf relativ gering (0,15 bar). Die für die Filtrationsversuche eingesetzte Suspension bestand aus wasserunlöslichen Siliziumoxidpartikeln (Sikron SF600) mit folgender Partikelverteilung in Abb. 16:

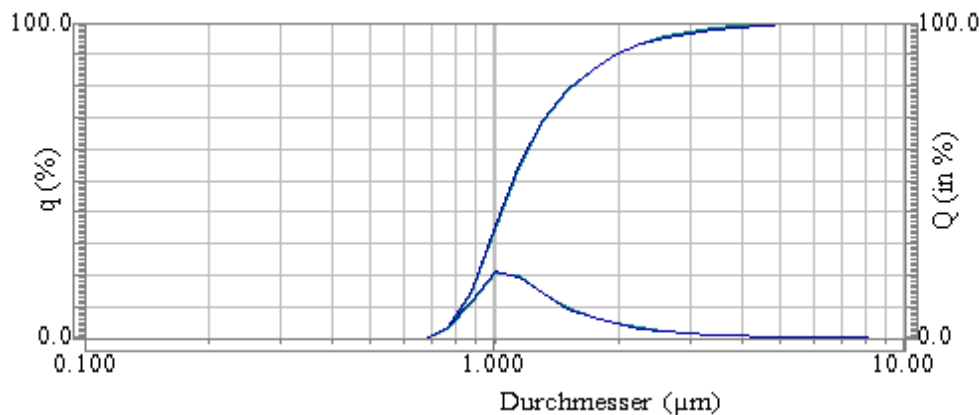


Abb. 16: Partikelsummen- und -dichteverteilung der Suspension

Für die Versuche zur Mikrofiltration wurden Partikel mit einem Durchmesser von 0,7 bis 5 μm eingesetzt. Die Konzentration lag bei 1 g/l.

7.2 Monofilament-Filterschläuche mit wasserlöslichem PVA-Garn

Die Filterschläuche Typ 1-3 (Abb. 17-24) wurden von der Fa. Langendorf gefertigt und vom Ing.-Büros Bergemann vermessen und konfektioniert. Sie wurden durch Schlauchfilteranalysen und unter Aufbringung verschiedener Zugkräfte charakterisiert. Eine Schlauchfilteranalyse ist die Bestimmung der Partikelsummen- und -dichteverteilung der Suspension und im Vergleich dazu der Permeate:

a1) Filterschlauch Typ 1, Suspension&Permeat nach 1 Std., Zugkraft 10 N:

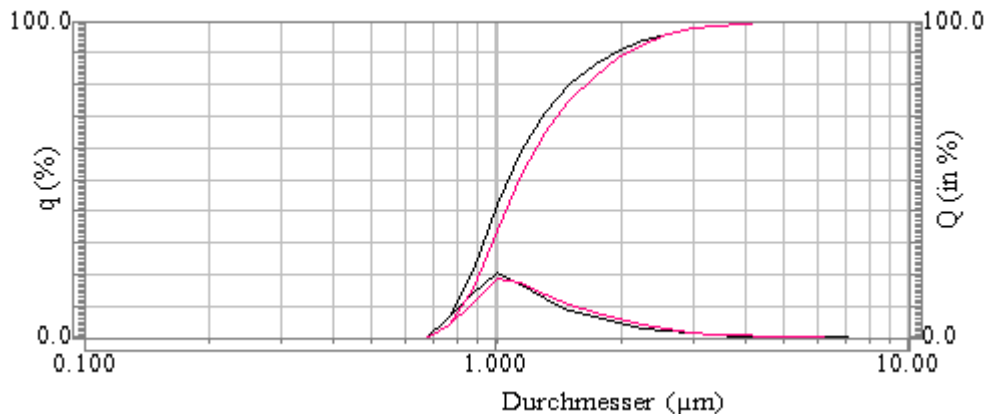


Abb. 17: Partikelgrößenverteilung mit Filterschlauch Typ 1 nach 1 h

a2) Filterschlauch Typ 1, Suspension&Permeat nach 3 Std., Zugkraft 10 N:

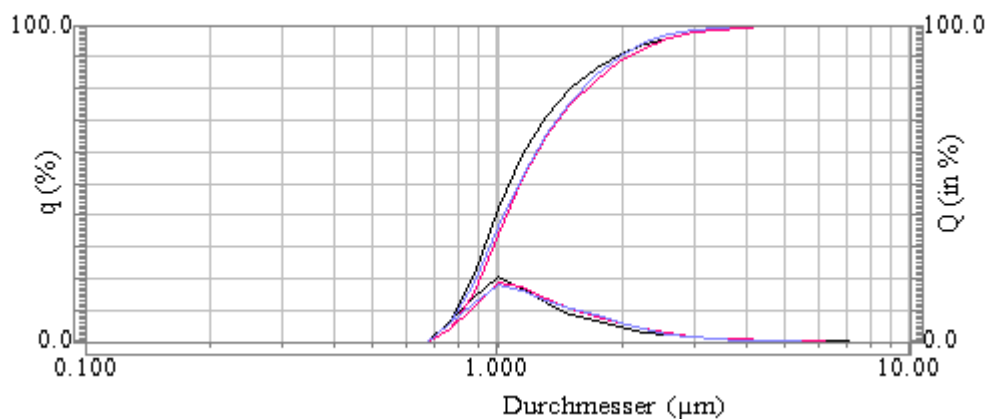


Abb. 18: Partikelverteilung mit Filterschlauch Typ 1 nach 3 h

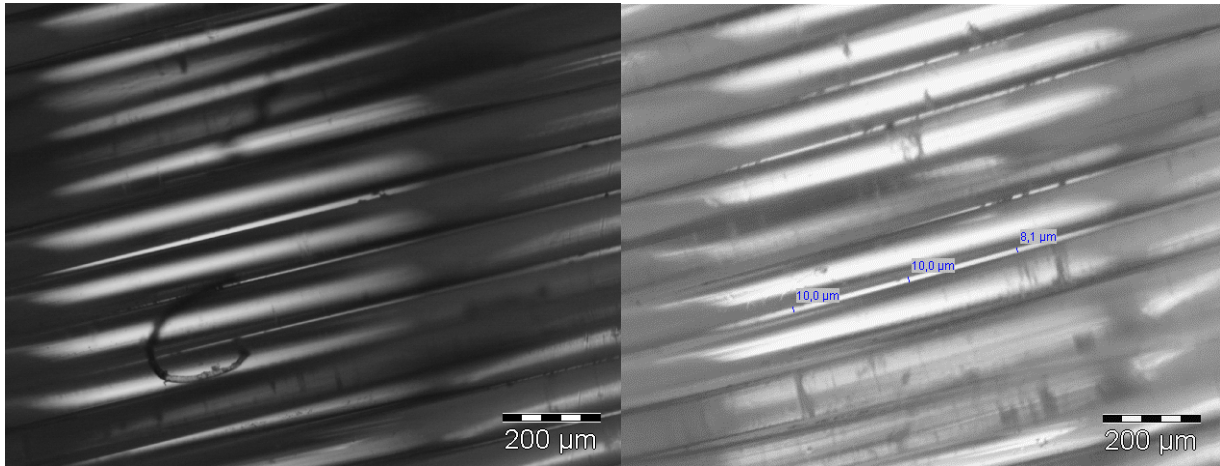


Abb. 19: Mikroskopaufnahmen des Filterschlauchs Typ 1 unter Vorspannung von 10 N

a3) Filterschlauch Typ 1, Suspension&Permeat, Zugkraft 20 N:

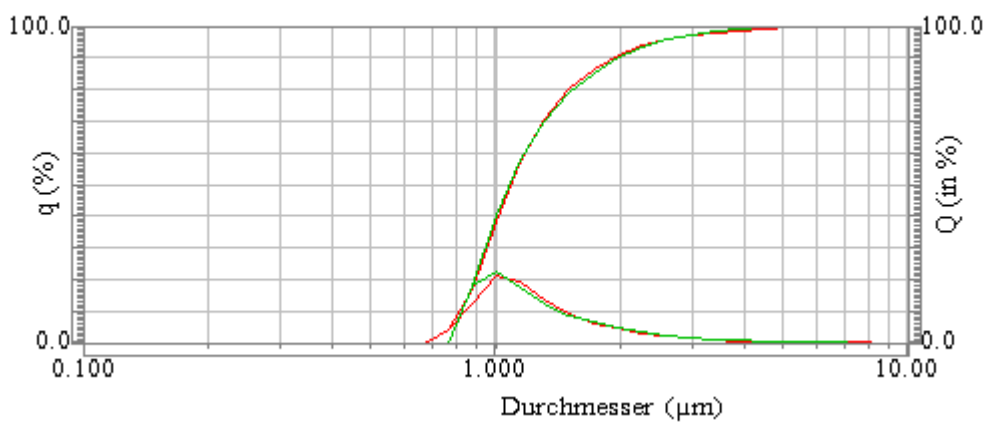


Abb. 20: Partikelverteilung mit Filterschlauch Typ 1 unter 20 N Vorspannung

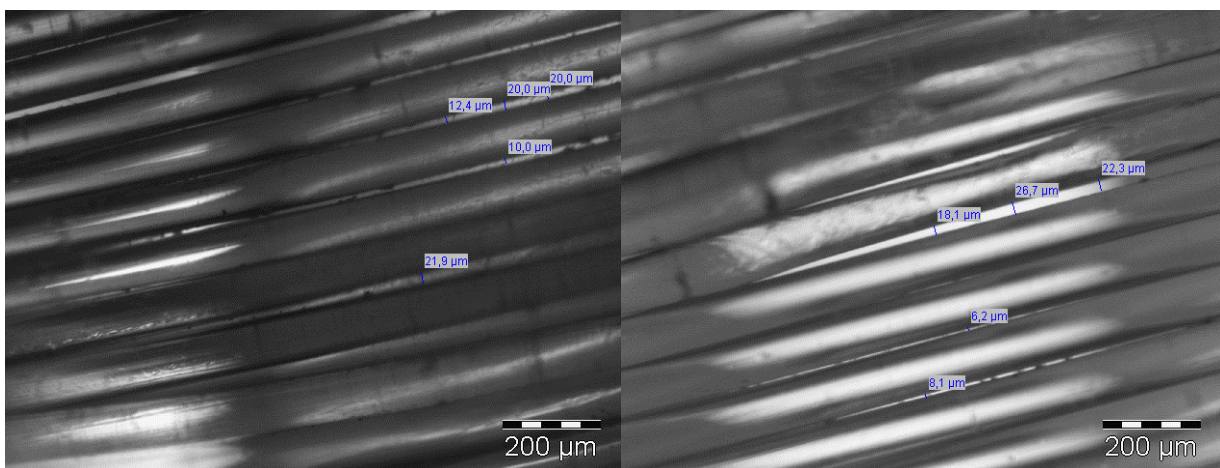


Abb. 21: Mikroskopaufnahme des Filterschlauchs Typ 1 unter Vorspannung von 20 N

b1) Filterschlauch Typ 2, Suspension&Permeat nach 1 Std., Zugkraft 10 N:

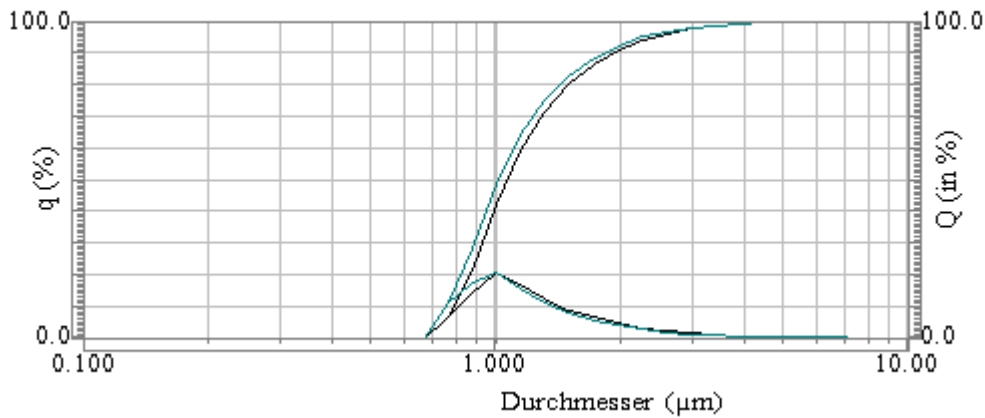


Abb. 22: Partikelverteilung des Filterschlauchs Typ 2 unter 10 N Vorspannung

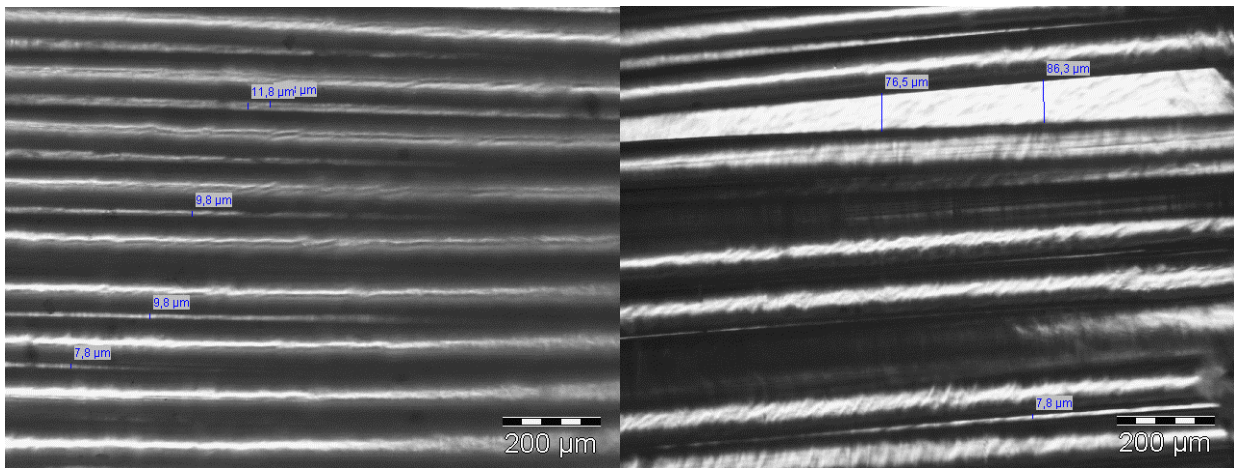


Abb. 23: Mikroskopaufnahmen des Filterschlauchs Typ 2 unter 10 N Vorspannung

b2) Filterschlauch Typ 2, Suspension&Permeat, Zugkraft 20 N:

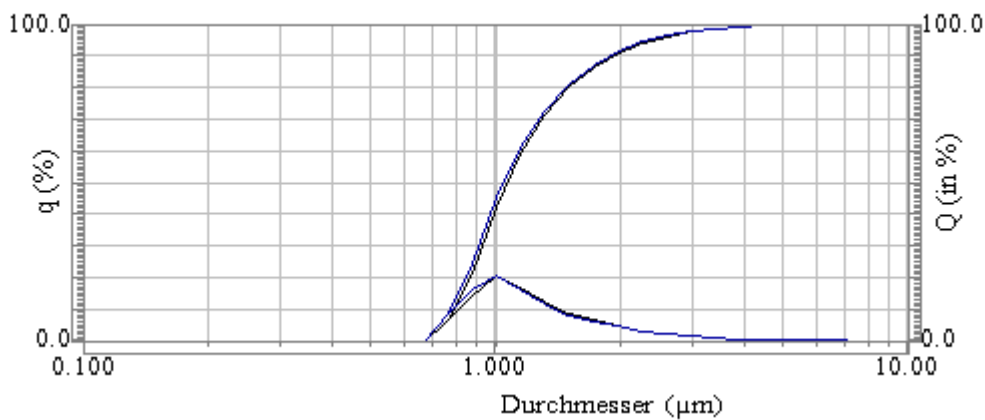


Abb. 24: Partikelverteilung mit Filterschlauch Typ 2 unter 20 N Vorspannung

c1) Filterschlauch Typ 3, Suspension&Permeat nach 1 Std., Zugkraft 10 N:

Keine Filterprüfung möglich, da alle drei Schlauchfilter bei einer Belastung von 10 N im unteren Einklemmbereich einrissen.

Vergleichsmessung mit Glasfilter (0,8 μm):

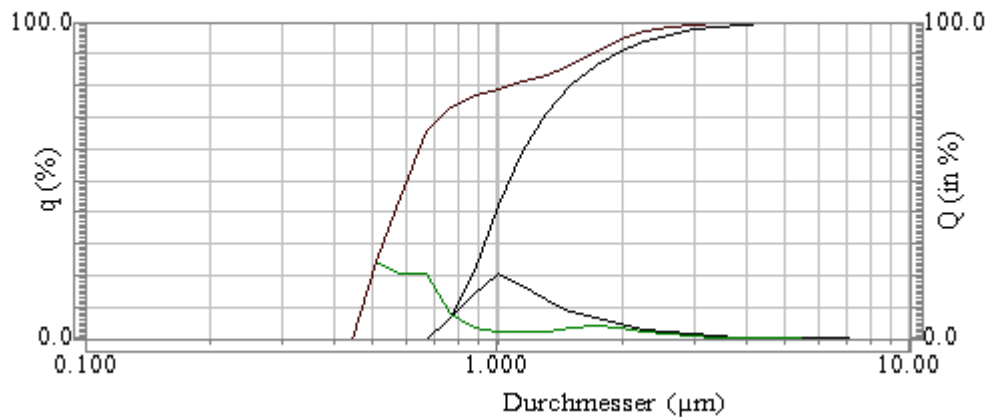


Abb. 25: Partikelverteilung mit Glasfilter

Unterer Einspannbereich des Schlauches Typ 1 (20 N) beim Einsatz von Polymerpartikel (Abb. 26):

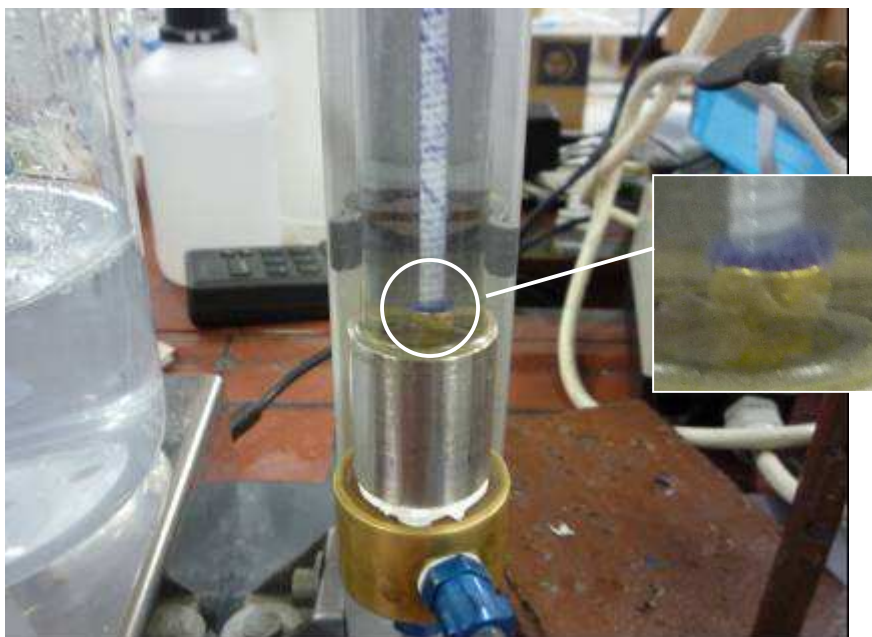


Abb. 26: Unterer Einspannbereich des Filterschlauches

Starke Filterkuchenbildung im Übergangsbereich Monofilgelege-Messingendnippel (eingekreister Bereich) weist darauf hin, dass dieser Bereich nicht ausreichend abgedichtet ist.

7.3 Microfaser-Filterschläuche

Unter Einsatz der Filterschläuche I und II wurden die Partikelsummen- und -dichteverteilungen der Permeate im Vergleich zur Suspension bestimmt. Der Suspension wurde der Partikel Sikron SF 800 (SiO_2 -Partikel) beigemischt. Die Filterschläuche erzielten folgende Ergebnisse (Abb. 27-29):

a) Filterschlauch I:

Garn 1: Polyester (78 dtex f24)

Garn 2: Polyester (77 dtex f216)

Wendel: geschnittene Schlauchstützwendel

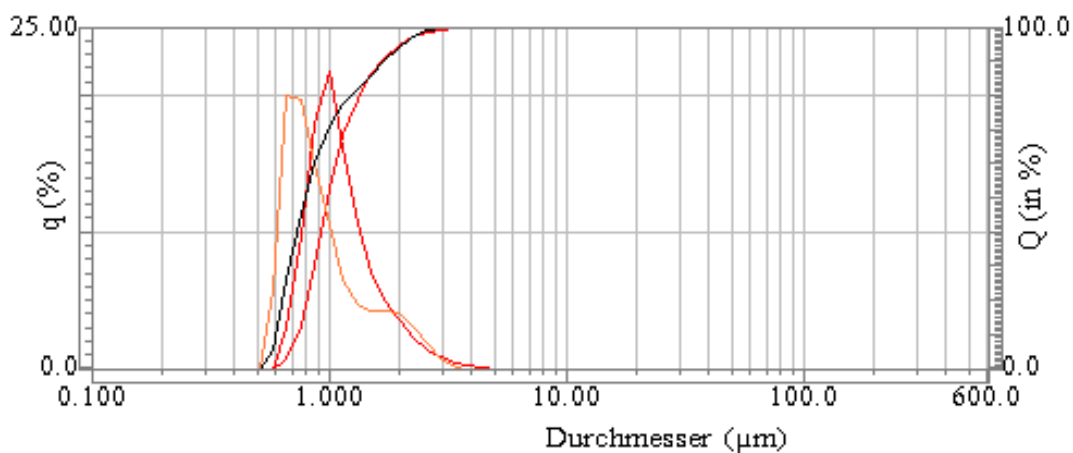


Abb. 27: Partikelverteilung Filterschlauch I

Rote Kurve: Vorlage

Orange Kurve: Permeat

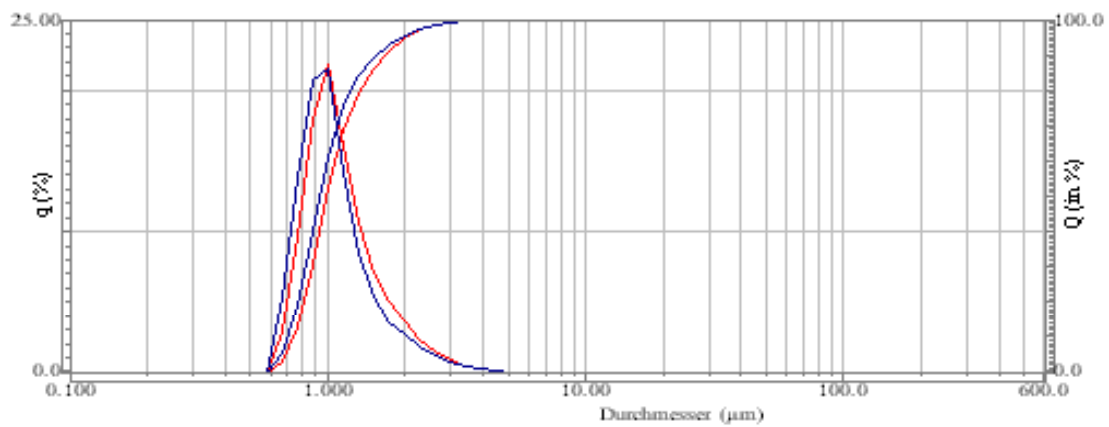
Durch den Filterschlauch I wurde das Maximum der Partikelgrößenverteilung von 1,0 µm auf 0,7 µm verschoben.

b) Filterschlauch II:

Garn 1: Polyester (78 dtex f24)

Garn 2: Polyester (77 dtex f216)

Wendel: Runddraht-Stützwendel

**Abb. 28: Partikelverteilung der Filterschlauch II****Rote Kurve: Vorlage****Blaue Kurve: Permeat**

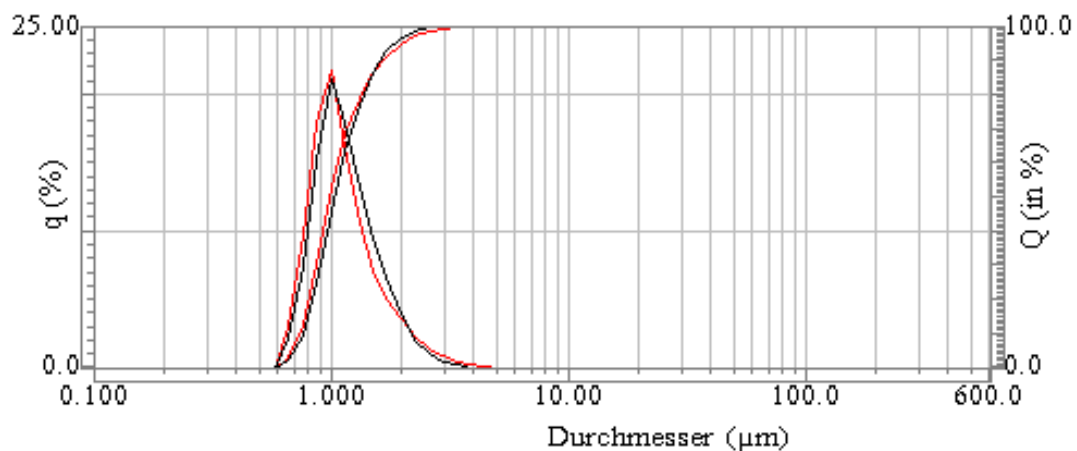
Durch den Filterschlauch II wurde das Maximum der Partikelgrößenverteilung nur geringfügig verschoben. Die Ursache hierfür blieb zunächst ungeklärt. Das Geflecht war das gleiche wie bei Filterschlauch I. Lediglich die andere Stützwendel erklärt noch nicht den Ergebnisunterschied.

c) Filterschlauch III:

Garn 1: Polyester (78 dtex f24)

Garn 2: Mikrofasern ITV

Wendel: Runddraht-Stützwendel

**Abb. 29: Partikelverteilung Filterschlauch III****Rote Kurve: Vorlage****Schwarze Kurve: Permeat**

Der Einsatz des Filterschlauches III hatte keine wesentliche Filtrationswirkung. Die Summen- und Dichteverteilung des Permeats blieben nahezu gleich. Ursache hierfür war offenbar eine nicht korrekte Nachbehandlung des noch nicht fertig gesplitteten Microfasergarns aus der ITV-Versuchsproduktion.

Aufgrund der Ergebnisse der Laboruntersuchungen wurde der Filterschlauch I aus den Polyestergeräten 78 dtex f24 und 77 dtex f216 mit der Schlauch-Stützwendel für die Demoanlage eingesetzt.

8 Konzeption, Bau und Inbetriebnahme einer MF-Demonstrationsanlage

Parallel zur Schlauchfilteroptimierung wurde eine Demoanlage konzipiert und gebaut. Die Arbeitsweise der Demoanlage erfolgte, wie schon der Filtrationsprüfstand, als Cross-flow-Filtration, allerdings mit signifikant größerer Überströmgeschwindigkeit durch Verwendung einer so genannten Dralldrossel im Filtratzulauf. Das Modul ist eine Zylinderform mit einer Länge von 100 cm, in das zur Erhöhung der Permeatleistung 48 MF-Filterschläuche parallel nebeneinander eingesetzt wurden (Abb. 30).

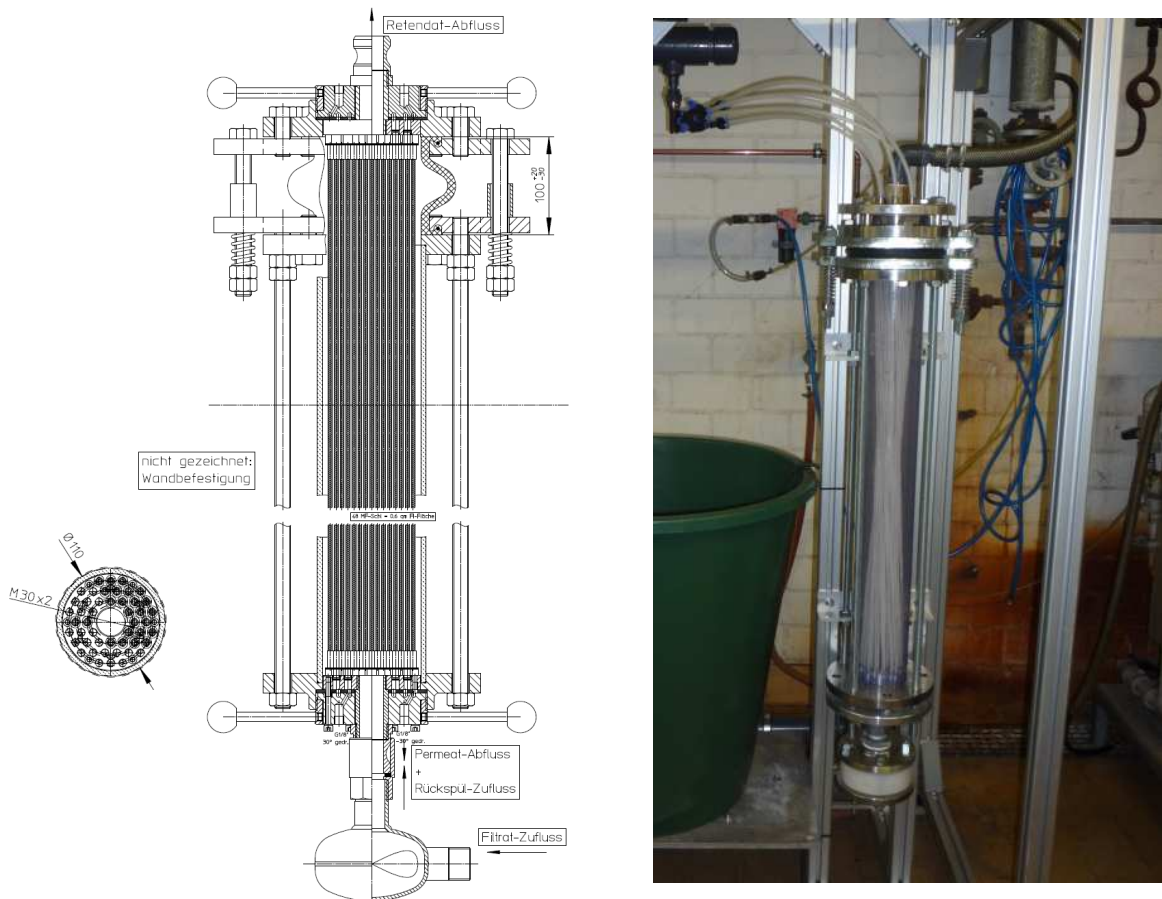


Abb. 30: Schematischer Aufbau des Filtermoduls mit den Filterschläuchen

Die Länge der MF-Schlauchfilter und damit deren Porengröße wird dabei durch eine pneumatische Steuerung beliebig variiert. Das heißt, bei bestimmten transmembranen Druckdifferenzen wird die Filterlänge automatisch verändert und im Anlagenstillstand die Abreinigung durch dynamische Bewegungen vollzogen. Der sich auf dem Filterschlauch aufbauenden Filterkuchen kann demnach sehr energieeffizient abgebaut werden.

Die Membranfläche beträgt bei 48 eingesetzten Schlauchfiltern insgesamt ca. $0,6 \text{ m}^2$.

Die Filtration erfolgt wie bei dem Filterprüfstand von außen nach innen (Filterüberströmgeschwindigkeit 2 m/s). Folgende Abbildungen verdeutlichen den Aufbau der Demoanlage (Abb. 31 u. 32).

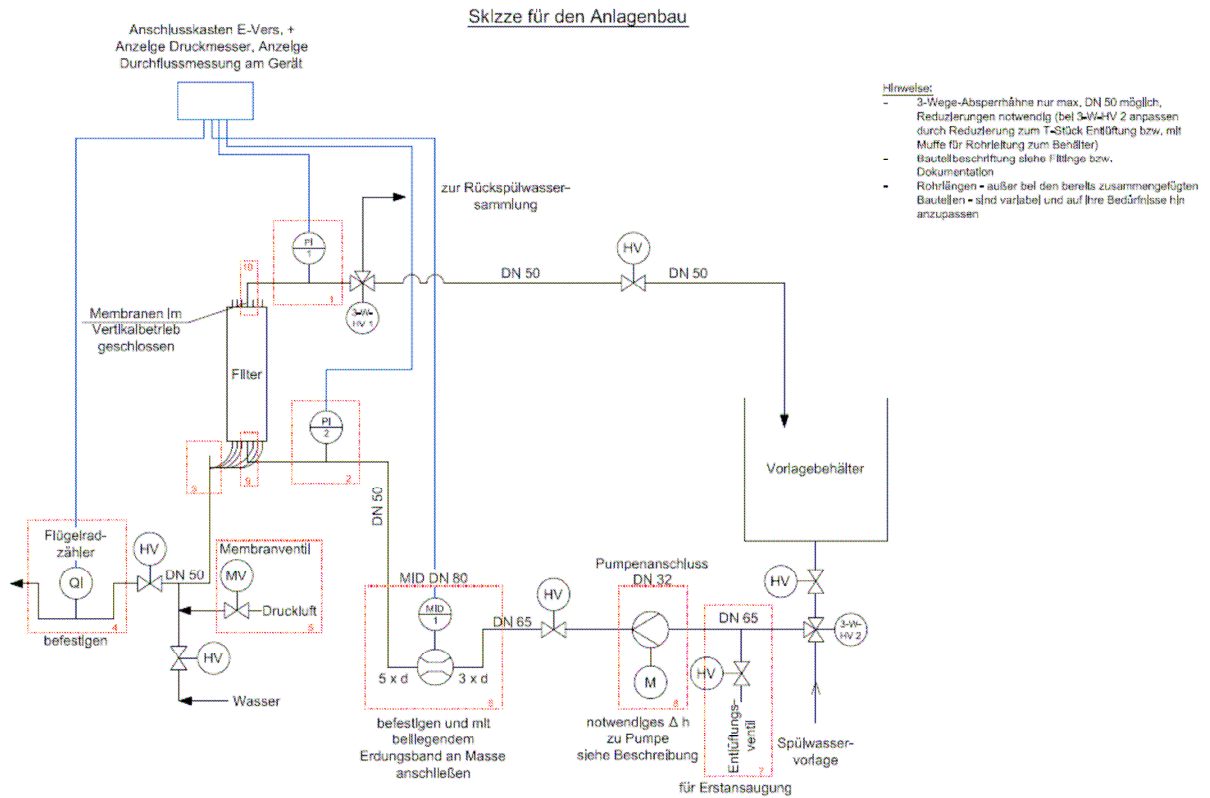


Abb. 31: Schematische Darstellung der Pilotanlage



Abb. 32: MF-Demoanlage

Anlagendaten:

Volumenstrom Q [m^3/h]	4,0
Eingangsdruck p_{ein} [bar]	1,0
Ausgangsdruck p_{aus} [bar]	0,2

Transmembrandruck p_{TMP} [bar]	0,6
Gesamtoberfläche A_{gesamt} [m ²]	0,565

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Demoanlage wurde die Übertragbarkeit der Laborergebnisse in die Demoanlage geprüft. Dazu wurden **MF-Filterschläuche I** in die Demoanlage eingebaut und getestet. Hierbei wurde die Suspension mit Sikron SF 800 (SiO₂-Partikel) analog den Laborversuchen verwendet. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abb. 33 dargestellt.

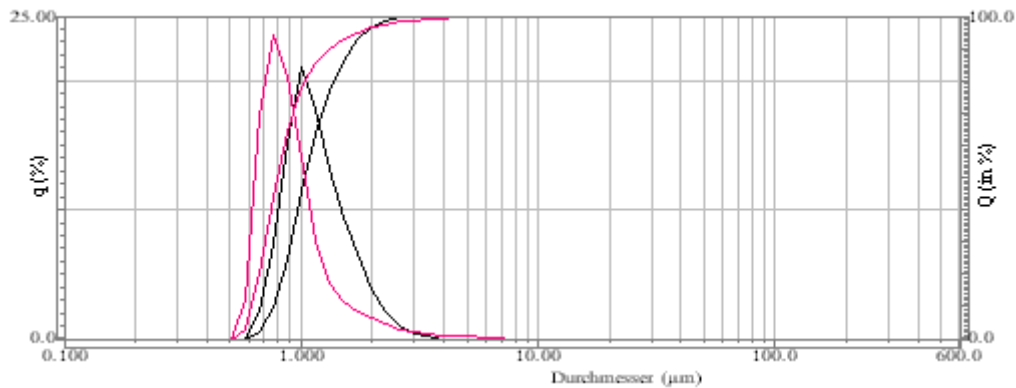


Abb. 33: Partikelverteilung bei Einsatz des Filterschlauches I in der Demoanlage
Schwarze Kurve: Vorlage
Rosa Kurve: Permeat

Wie aus dem Diagramm zu erkennen wird das Maximum der Partikelverteilung der Suspension von 1,0 µm auf 0,7 µm verschoben. Dies bestätigt die Ergebnisse mit der Laboranlage.

9 Ergebnisse der Praxisversuche mit Abwasser

Für die Praxisversuche wurde Abwasser der Firma Kaliko mit einem CSB-Wert von 7120 mg/l eingesetzt. Die Partikelgrößenverteilungen des Abwassers vor der Filtration (Vorlage) und im Permeat nach dem Filtrationsprozess sind in den beiden nachfolgenden Abbildungen (Abb. 34-35) dargestellt.

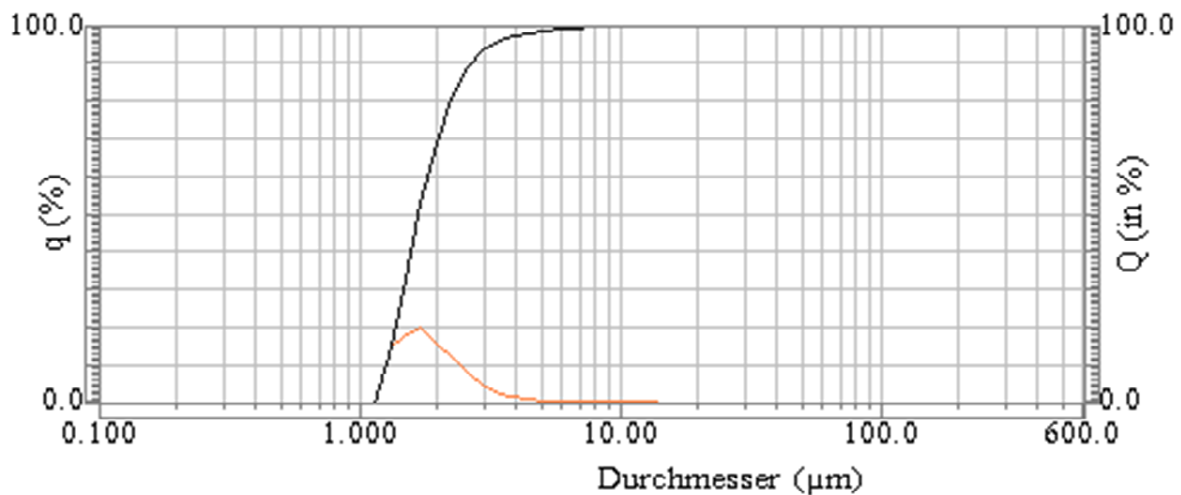


Abb. 34: Partikelgrößenverteilung des Abwassers (Vorlage)

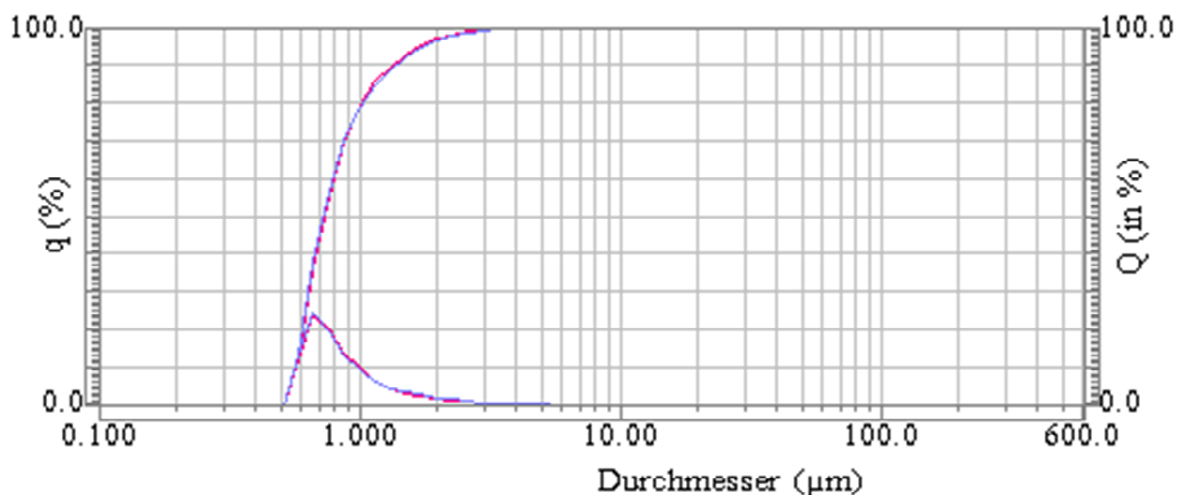


Abb. 35: Partikelgrößenverteilung des Permeats nach dem Filtrationsprozess

Aus diesen Abbildungen ist zu erkennen, dass die Maxima der Partikelverteilung des Abwassers durch die MF- Demoanlage von 1,7 µm auf 0,65 µm verschoben wurden. Dies bestätigt die Ergebnisse der Laborversuche mit der Suspension mit Sikron SF 800 (SiO₂-Partikel).

Im Rahmen der Praxisversuche war die Bestimmung des zeitlichen Permeatflusses, um damit Aussagen über den Einfluss der Filterkuchenbildung auf die Permeatleistung treffen zu können, notwendig. In der folgenden Abbildung 36 ist der Verlauf des Permeatflusses erkennbar. Nach einer Filtrationsdauer von einer Stunde erfolgte eine Rückspülung der Demoanlage, sodass der Belag auf der Filteroberfläche entfernt wurde.

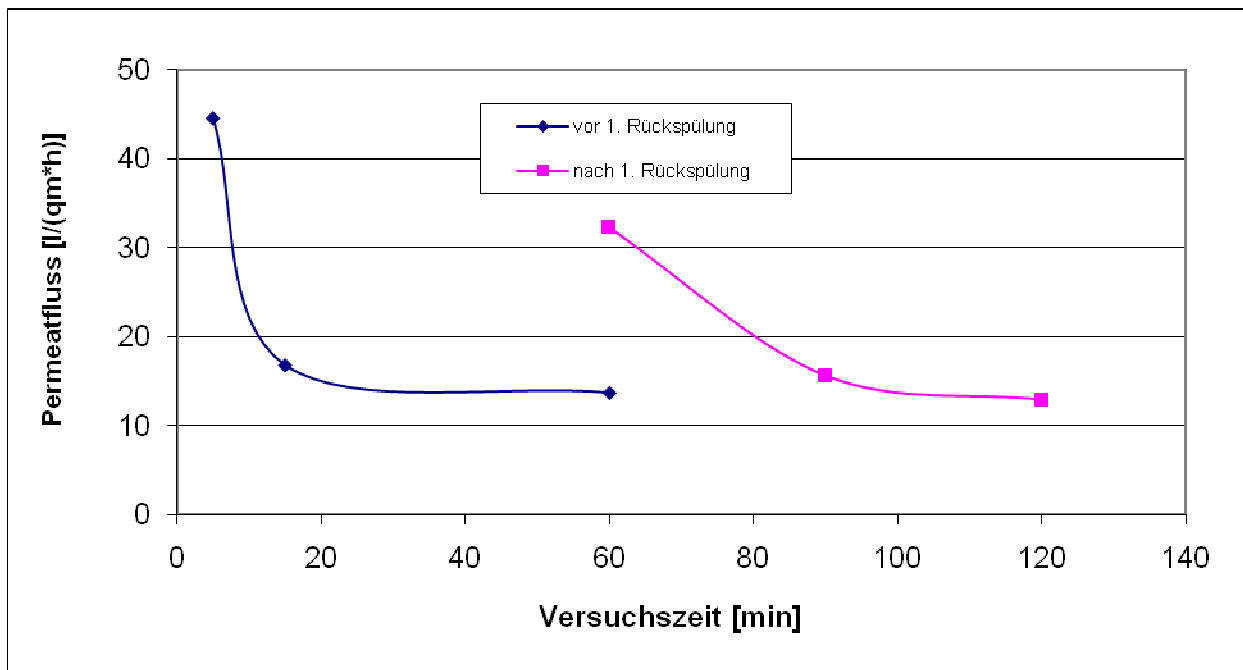


Abb. 36: Zeitlicher Verlauf des Permeatflusses der MF-Demoanlage

Während des Filtrationsprozesses wurde die CSB- Konzentration im Permeat gemessen. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt. Wie daraus zu erkennen ist, wurde die CSB Konzentration von 7.120 mg/l in der Vorlage auf 1.945 mg/l reduziert. Dies bedeutet eine Reduzierung der CSB- Konzentration von 73 % durch die MF-Demoanlage.

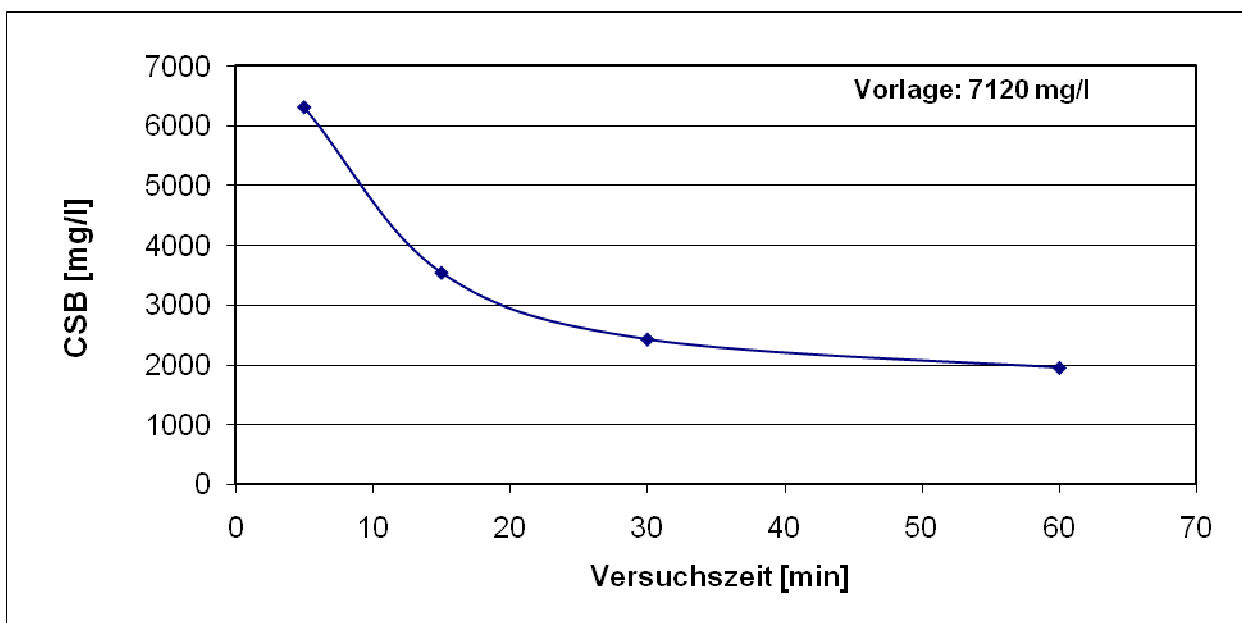


Abb. 37: Zeitlicher Verlauf der CSB-Konzentration im Permeatfluss

10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die folgende vereinfachte Kostenbetrachtung soll verdeutlichen, dass durch den Einsatz der entwickelten Mikrofiltration mit veränderbarer Porengröße als Vorfilterstufe deutliche Einsparungen gegenüber dem Einsatz einer konventionellen Mikrofiltration resultieren.

Zur Ausarbeitung der Kostenbetrachtung wurden Vergleichsmessungen mit einer MF-Membrananlage der Fa. Enviro durchgeführt. Dabei wurde das Abwasser der Fa. Kaliko sowohl mit der MF-Demoanlage als auch mit einer MF-Membrananlage behandelt (Tab. 2).

Parameter	Textilbasierte Filterelemente	Mikrofiltration - Stand der Technik*
Permeatdurchsatz	48 l/m ² *h	49,7 l/m ² *h
Permeatspezifischer Energiebedarf	66 %	100 %
Modul- und Energiekosten pro m ³ Permeat	ca. 0,60 Euro/m ³	ca. 0,86 Euro/m ³
Standzeit	4-5 Jahre	2-3 Jahre
Reinigungszyklen, -zeit	Mechanisch: 4 x pro Tag à 5 Min. Chemisch: 0,5x pro Tag à 30 Min., => insges. ca. 35 Min./Tag	Chemisch: 2 x pro Tag à 30 Min., => insges. ca. 60 Min./Tag
Chemikalieneinsatz	25 %	100 %
Energiebedarf pro Reinigungszyklus	0,067 kWh	0,563 kWh
Energiebedarf pro Reinigungszyklus	12 %	100 %

*) Für Behandlung eines Abwassers mit kolloidalen Verunreinigungen mittels Kapillar-Mikrofiltrationsmembranen, Feedstrom 6,25 m³/h, Filterüberströmgeschwindigkeit 2 m/s, Transmembrane Druckdifferenz 0,5 bar.

Tab. 2: Vergleich der MF-Demoanlage zum Stand der Technik

Eine Kostenkalkulation im Rahmen des Projektes zeigte, dass verglichen mit einer Standardfiltrationsanlage für die Behandlung von 57.098 m³/a alleine durch die Minimierung der Anzahl der chemischen Reinigungszyklen jährlich Einsparungen von 0,4 Tonnen Chemikalien, 8,55 MW Energie und 174 Arbeitsstunden bzw. 4,5 Arbeitswochen möglich sind. Neben diesem wirtschaftlichen Aspekt für den betreffenden Betrieb darf der umweltrelevante Aspekt nicht außer acht gelassen werden, da durch die Reduzierung der chemischen Reinigungszyklen die Belastung der kommunalen Kläranlage durch die eingeleiteten chlorhaltigen Reinigungsmittel reduziert wird.

11 Abbruchentscheidung

Trotz der letztlich positiven, erfolgsversprechenden Teilergebnisse mit den zuletzt entwickelten und erprobten Microfaser-Filterschläuchen wurde von allen Projektpartnern eingeschätzt, dass diese Entwicklung im Rahmen des ursprünglich geplanten und geförderten Budgets nicht bis zu der vorgegebenen Praxisreife entwickelt werden kann. Alle Partner stimmten zu, dieses Projekt nicht fortzusetzen, sondern bei diesem Stand der Entwicklung abzubrechen.

12 Literaturverzeichnis

- [1] ATV-DVWK-Arbeitsgruppe IT-5.5 „MEMBRANTECHNIK“: Aufbereitung von Industrieabwasser und Prozesswasser mit Membranverfahren und Membranbelebensverfahren. Teil 1 und 2. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. 10 und 11, 2002.
- [2] Ripperger, S.: *Stand und Perspektiven der Membrantechnik*. F&S Filtrieren und Separieren, 1, 2006.
- [3] Ströhle, J., Böttger, D.: *Abwasserrecycling und Wärmerückgewinnung in der Textilveredlung*. Melliand Textilberichte, 5, 2008.
- [4] Cleartec Water Management GmbH (Bewilligungsempfänger): *Entwicklung innovativer geflochtener Schlauchfiltersysteme für eine energiearme Membranfiltration nach biologischem Vorbild*. Schlussbericht zum DBU-Forschungsvorhaben (AZ 24159), September 2007.
- [5] Firk, W.: *Seegrass statt Sedimentation*, Entsorga-Magazin Abfall, Abwasser, Luft und Boden, 2, 2000.
- [6] Keim, G.: *Hier haben Flusen keine Chancen*, Wasser, Luft und Boden, 6, 2006
- [7] Retsch Technology GmbH: *Partikelgrößenanalyse mit statistischer Laserstreuung*. Technische Informationsbroschüre 2005
- [8] Lipnizki, J.; Krause, S.; Meyer-Blumenroth, U.: Auf der Suche nach der geeigneten Membran. Wasser, Luft und Boden, 9, 2006.
- [9] Homepage der Basler AG:
http://www.baslerweb.com/beitraege/beitrag_de_17654.html, Stand 28.08.2011
- [10] Homepage der Zwick GmbH & Co. KG:
<http://www.zwick.de/en/products/static-materials-testing-machines/testing-machines-from-5-kn-to-250-kn/allround-line-testing-machine.html>
Stand 28.08.2011
- [11] Homepage der Sartorius AG:
http://www.sartorius.de/fileadmin/sartorius_pdf/laboratory_filtration/all_glass_holder.pdf,
Stand 28.08.2011
- [12] Homepage der Sartorius AG:
http://www.sartorius.de/fileadmin/sartorius_pdf/laboratory_filtration/cellulose_acetate.pdf,
Stand 28.08.2011
- [13] Leschonski, K.: *Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Vorlesung, TU Clausthal, SS 2000