

**EnviroChemie GmbH
In den Leppsteinswiesen 9
64380 Rossdorf**

Entwicklung einer Pilotanlage mit Vertikal-Membranmodulen insbesondere zum Einsatz bei der Aufbereitung von kolloidal hoch belasteten Abwässern

Abschlussbericht zu einem Entwicklungsprojekt,
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
unter dem Aktenzeichen DBU AZ 18948

in Zusammenarbeit mit

- Fachhochschule Köln
IAV Inst. f. Anlagen- und Verfahrenstechnik
Claudiusstr. 1
D-50678 Köln
- ITP Ingenieurgesellschaft
für Thermische Prozesstechnik mbH
Untergründemich 26
D-51491 Overath

von

Dr. Markus Engelhart

Mai 2008

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	2
Verzeichnis der Graphiken.....	3
Zusammenfassung.....	4
1. Einleitung und Zielsetzung.....	5
2. Arbeitsschritte und Ergebnisse	7
2.1 AP 1 Entwicklung und Herstellung der Spacer	7
2.2 AP 2 Entwicklung und Herstellung des Wickelelementes.....	15
2.3 AP 3 Entwicklung des Vertikal-Moduls	22
2.4 AP 4 Herstellung der Pilotanlage	24
2.5 AP 5 Versuche mit Vertikal-Modul	26
2.6 AP 6 Versuche mit Abwasser	32
3. Bewertung der Vorhabensergebnisse	36
3.1 Vergleich zum Stand der Technik.....	36
3.2 Bewertung der Umweltentlastung.....	37
3.3 Verbreitung der Vorhabensergebnisse / Umsetzung am Markt.....	38
4. Fazit.....	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Parameterfeld zum Vergleich Tunnel-Spacer und Parallel-Spacer	17
Tabelle 2	Kriterien zu untersuchten Pumpentypen zur Umwälzung in der VRM Pilotanlage	23
Tabelle 3	Auszug aus der Eingangsanalytik Abwasser aus der Papierproduktion.....	33
Tabelle 4	Bewertungsschema der Umweltentlastung als Vergleich zwischen Wickelementen mit Parallelspace und Tunnelspacer (47 mil – 50 mil).....	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Darstellung verschiedener Spacertypen	6
Abbildung 2	Spiralwickелеlement mit Parallel-Spacer.....	6
Abbildung 3	Test-Prägevorrichtung und erzeugte Wellenformen	8
Abbildung 4	Prägevorrichtung zur Produktion der Tunnel-Spacer.....	8
Abbildung 5	Kontur des produzierten Tunnel-Spacers	9
Abbildung 6	Anströmung und Membranabdeckung verschiedener Spacer-Typen.....	10
Abbildung 7	Gitternetz und Geschwindigkeitsverteilung in den Spacer-Kanälen	11
Abbildung 8	Umbau eines 4“-Wickelementes	13
Abbildung 9	Technikumsanlage zur Bestimmung der Trenncharakteristik.....	13
Abbildung 10	Schematischer Aufbau eines Spiralwickелеlements.....	16
Abbildung 11	Fertigung eines Spiralwickелеlementes.....	16
Abbildung 12	Spiralwickелеlement mit Tunnel-Spacer.....	17
Abbildung 13	Realisierte Konstruktion des Vertikal-Moduls	24
Abbildung 14	Vereinfachtes R&I-Fließbild der Pilotanlage	25
Abbildung 15	Vertikal-Modul Pilotanlage im Werk Rossdorf der EnviroChemie GmbH	26
Abbildung 16	VRM Pilotanlage im Technikumsversuch	32

Verzeichnis der Graphiken

Graphik 1	Rückhaltung und Permeatfluss im Vergleich bei 30 bar	14
Graphik 2	Rückhaltung und Permeatfluss im Vergleich bei 50 bar	15
Graphik 3	Tunnel-Spacer 10 g/L NaNO ₃	20
Graphik 4	Tunnel-Spacer 50 g/L NaNO ₃	20
Graphik 5	Parallel-Spacer 10 g/L NaNO ₃	21
Graphik 6	Parallel-Spacer 50 g/L NaNO ₃	21
Graphik 7	Differenzdruck über Vertikal-Modul ohne und mit Wickelementen unterschiedlicher Spacergeometrie	27
Graphik 8	Permeatfluss eines Wickelements mit Tunnelspacer in Abhängigkeit des Filtrationsdrucks und der Überströmung (NaNO ₃ = 5 g/L)	28
Graphik 9	Abhängigkeit des Permeatflusses von Filtrationsdruck und Spacergeometrie (NaNO ₃ = 5 g/L)	29
Graphik 10	Vergleich von 2 Testreihen mit Parallelspace und Tunnelspacer	30
Graphik 11	Abhängigkeit des Nitrat-Rückhalts von der Permeatausbeute in Abhängigkeit der Spacergeometrie (Versuchszahl n = 111, NaNO ₃ = 5 g/L)	31
Graphik 12	Rückhalt von CSB und LF in Abhängigkeit der Ausbeute u. des Elementtyps .	34
Graphik 13	Rückgang des erzielbaren Permatflusses durch Membranverblockung	35

Zusammenfassung

Im Rahmen des Entwicklungsvorhabens wurde eine Pilotanlage mit Vertikal-Membranmodul entwickelt. Für die Membranwickелеlemente der Vertikalfiltration wurde thermoplastische Verformung ein neuartiger feedseitiger Tubularspacer (Tunnelspacer) produziert und in unterschiedlichen Versuchsreihen mit Reinslösungen und Abwasser erprobt. Zur Herstellung des Tunnelspacers wurde eine Prägevorrichtung aus gegenläufig drehenden, beheizten Walzen mit axialen Rillen gefertigt und optimiert. In der Prägevorrichtung konnte eine Spacerhöhe von 50 µm erzeugt werden.

Die mit Tubularspacer bestückten Membranwickелеlemente (Baugrößen 2“ und 4“) wurden in den Testreihen hinsichtlich Strömungscharakteristik, Ionenrückhalt, Permeatausbeute und spezifischem Permeatfluss vergleichend zu konventionellen Elementen mit Parallelspace beurteilt. In Versuchen mit Natriumnitrat-Reinslösungen wurde für Elemente mit Parallelspace unter identischen Versuchsbedingungen ein geringfügig besserer Rückhalt ($R > 98\%$) gemessen als für Tunnelspacer-Elemente ($R > 96\%$). Durch höhere Membranabdeckung durch den Spacer war der Permeatfluss bei Tunnelspacer-Elementen um ca. 50 % reduziert. Dies kann vor allem auf die noch nicht ausgereifte Fertigungstechnik bei der Herstellung der Wickелеlemente mit Tunnelspacer zurückgeführt werden.

Anschließend wurde die Pilotanlage zur Aufnahme von 4“-Wickелеlementen entwickelt. Die ursprünglich für die Rezirkulation eingeplante Magnetkupplungspumpe konnte aufgrund der vertikalen Anordnung und eines zu geringen Maximaldrucks nicht eingesetzt werden, so dass eine Unterwasserpumpe für den Einsatz in der Pilotanlage adaptiert werden musste. Dies hatte eine weitgehende Umkonstruktion der ursprünglichen Anlage zur Folge, so dass nun eine Kombination aus Modul und Umwälzpumpe als getauchte Einheit in einem druckstabilen äußeren Hüllrohr realisiert wurde. Das Vertikalmodul wurde in eine transportable Pilotanlage zur Membranfiltration integriert, die eine kompakte Anordnung sämtlicher Messtechnik und Nebenaggregate ermöglicht. Anschließend wurden erneut Testversuche mit Elementtypen unterschiedlicher Spacergeometrie durchgeführt. Die zuvor am Teststand des IAV (FH Köln) gefundenen Ergebnisse zum Rückhalt und Permeatfluss und die Schwankungen in Abhängigkeit vom verwendeten Wickелеlement konnten hier grundsätzlich reproduziert werden.

Anschließend wurden bei der EnviroChemie GmbH vergleichende Versuche mit ausgewählten Abwasserproben aus der Papierindustrie durchgeführt. In Testversuchen wurden der CSB- und Ionenrückhalt bestimmt. Praktisch unabhängig von der Ausbeute wurde bei beiden Filtermodul-Ausführungen ein CSB-Rückhalt von $>98\%$ erzielt. Beim Ionenrückhalt wurden für Elemente mit Parallel-Spacer Werte von 97-98% gefunden, während diese bei Tunnel-Spacern nur 95-98% betragen. Mit zunehmender Ausbeute nahm der Rückhalt hier stärker ab als beim Einsatz von Parallel-Spacern. Die maximalen Permeatausbeuten betragen 50% bei 45 bar Eingangsdruck im Vertikalmodul.

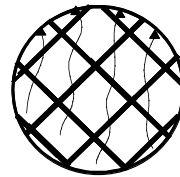
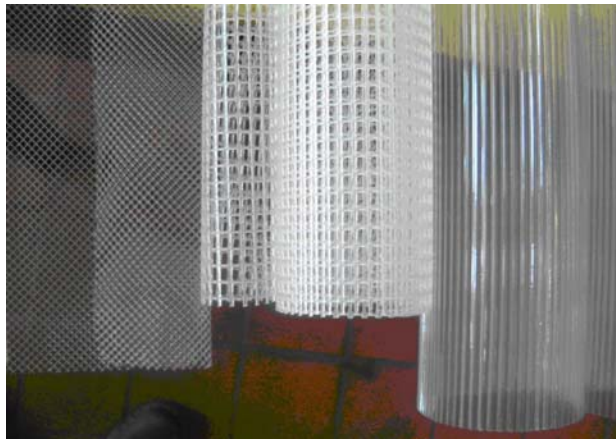
1. Einleitung und Zielsetzung

Membranprozesse haben in der Trenntechnik für industrielle Flüssigkeiten einen bedeutenden Platz eingenommen und bilden eine Schlüsseltechnologie bei der Trinkwassergewinnung und der Abwasseraufbereitung. Hier werden wegen ihrer sehr kompakten Bauweise und wegen ihres relativ geringen Energieverbrauches vorzugsweise Spiralwickелеlemente eingesetzt. Nachteilig ist jedoch die große Gefahr des Verblockens der Strömungskanäle und der Membranoberfläche durch gelöste und ungelöste Wasserinhaltsstoffe, wobei die Anwendungsgrenzen durch die engen Feedkanäle und die diese bildenden Feedspacer bestimmt werden.

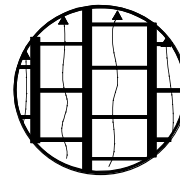
Der Feedspacer trennt die Membrantaschen und garantiert ausreichend Platz zum Überströmen der Membranen. Er sorgt im Idealfall für hohe Strömungsgeschwindigkeiten oder sogar Turbulenzen an der Membranoberfläche und gewährleistet dadurch eine hohe Trennleistung der Membrane. Dabei sollte durch den Feedspacer möglichst wenig Druckverlust entstehen und so wenig Membranfläche wie möglich durch den Spacer verdeckt werden.

Aus Sicht des Umweltschutzes ist es ein wichtiges Ziel der Weiterentwicklung, durch neue Spacerformen die Effizienz dieser Technologie zu verbessern und neue Einsatzgebiete vor allem bei der Aufbereitung von hoch kolloidhaltigen Abwässern mit sehr hohem Foulingpotenzial zu erschließen. Darüber hinaus gilt es für diese neuartigen Spiralwickелеlemente eine angepasste und optimierte Anlagentechnik zu entwickeln, zu fertigen und zu erproben.

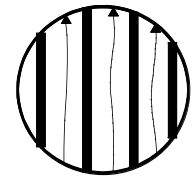
Herkömmliche so genannte Parallel-Spacer bestehen meist aus einem Kunststoff-Netz, das aus ca. 1,2 mm dicken Fäden gebildet wird, die parallel zur Strömung ausgerichtet sind und die durch dünnere Querfäden stabilisiert werden. Diese Querfäden erhöhen einerseits die Strömungsgeschwindigkeit an der Membranoberfläche und begünstigen somit die Trennleistung. Zum anderen kommt es aber im Bereich der Querfäden auch zu Strömungstotzonen und sogar zu Rückströmungen mit sehr geringem Stoffaustausch, wodurch sich Ablagerungen bilden können. Konstruktionsbedingt weist der Parallelspace einen Druckverlust auf, der den Einsatz gerade bei energiesparenden Niederdruck-Membranprozessen wie der Mikrofiltration sehr einschränkt, da der Druckverlust im Modul in der gleichen Größenordnung liegt, wie der gesamte zur Verfügung stehende Betriebsdruck.



Diamant-
Spacer



Parallel-
Spacer



Tubular-
Spacer

Abbildung 1 Darstellung verschiedener Spacertypen



Abbildung 2 Spiralwickелеlement mit Parallel-Spacer

Der in der Pilotanlage verwendete neuartige Tunnelspacer bildet durch seine wellenförmige Kontur große freie Strömungskanäle und weist somit in Strömungsrichtung keine Hindernisse auf, die Toträume bilden können. Somit ist der Tunnelspacer besonders geeignet für hoch belastete Abwässer. Auch ist der Druckverlust praktisch vernachlässigbar.

Die Zielsetzung des Projektes beinhaltet die

- Herstellung des neuartigen Feedspacers
- Herstellung von Spiralwickелеlementen unter Verwendung dieses Spacers
- Vergleichende strömungstechnische Analyse verschiedener Feedspacer mittels Computational-Fluid-Dynamics (CFD) Simulationen
- Untersuchung der Trenncharakteristik im Labor.
- Herstellung eines Vertikalmoduls mit angepasster Anlagentechnik zur Aufnahme der neuen Spiralwickелеlemente
- Untersuchung der Umweltentlastung mit dieser neuen Technik in Feldversuchen

2. Arbeitsschritte und Ergebnisse

2.1 AP 1 Entwicklung und Herstellung der Spacer

Wesentliches Bauelement des neu zu entwickelnden Vertikal-Membranmoduls ist der patentrechtlich geschützte Tunnel-Spacer, dessen Fertigung geplant, vorbereitet und durchgeführt wurde.

Die Planung der Spacer-Fertigung gliederte sich im Wesentlichen in folgende Teilschritte:

- Patent-Recherche
- Untersuchungen und Recherchen zur Materialauswahl in Hinblick auf Verarbeitungseigenschaften und auf Materialbeständigkeit
- Untersuchungen zur Spacerformung durch Kalandrieren
- Konstruktion und Fertigung der entsprechenden Kalandriervorrichtung
- Fertigung des Tunnel-Spacers

2.1.1 Patentrecherche

Parallel zu der technischen Bearbeitung wurde eine Patentrecherche durchgeführt, bei der 32 US-Patente, 32 Patente aus Japan, 74 europäische und 29 internationale WO-Patente mit betreffendem Inhalt gefunden wurden. Nach erfolgter Sichtung und ergaben sich ca. 20 Patente, die bei der Fertigung von Spiralwickелеlementen beachtet werden müssen. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei, dass kein Patent sich mit der Verwendung des Tunnel-Spacers schneidet.

2.1.2 Materialauswahl und Konstruktion der Prägevorrichtung

Zur Herstellung des Tunnel-Spacers musste zunächst ein geeigneter Kunststoff und eine Prägetechnik gewählt werden. Da die Materialeigenschaften der Kunststoffe und die Prägetechnik aufeinander abgestimmt sein müssen, wurden hierzu Versuche mit verschiedenen Materialien in verschiedenen Stärken an zwei Test-Prägevorrichtungen (Walzendurchmesser 35 mm) mit radialen bzw. axialen Rillen in zwei Modulhöhen durchgeführt (siehe Abbildung 3). Es zeigte sich, dass mit radialen Rillen keine gleichmäßige Spacerkontur erzeugt werden kann, während aber mit axialen Rillen eine sehr gleichmäßige Wellenform erreicht wurde.

Als Material wurden PVC-Folien gewählt, da sie die beste Verformbarkeit aufweisen.

Radiale Rillen



Axiale Rillen



Abbildung 3 Test-Prägevorrichtung und erzeugte Wellenformen

Nach der Festlegung des Materials, der Walzenform und der entsprechenden Modulhöhe erfolgten Versuche zur Fertigungsmethode, bei der insbesondere der Grad der Erwärmung der Folie und die Walzengeschwindigkeit untersucht wurden. Auf Grund der Ergebnisse dieser Versuche wurde die endgültige Prägevorrichtung zur Produktion der in den späteren Untersuchungen verwendeten Tunnel-Spacer gefertigt.

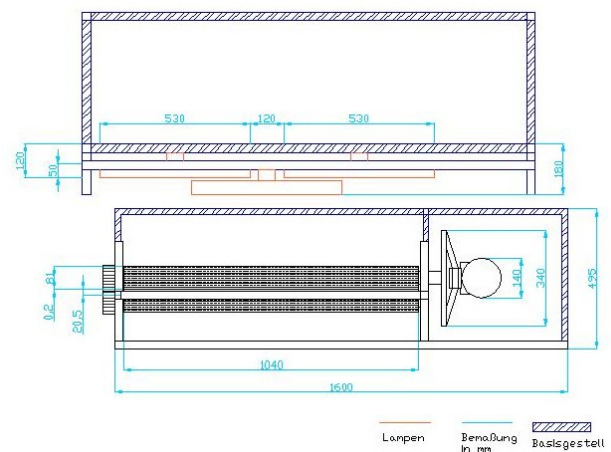
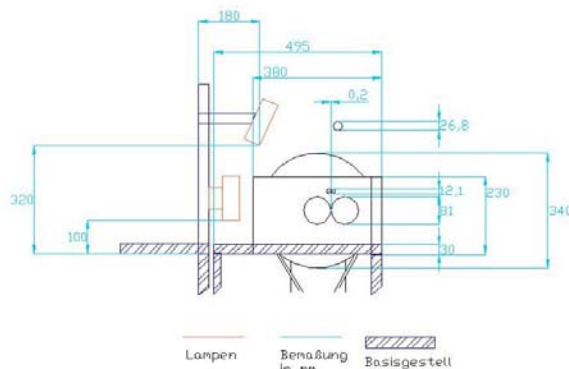


Abbildung 4 Prägevorrichtung zur Produktion der Tunnel-Spacer

Es wurde eine Ausführung für einen Membranabstand von 50 mil (1,2 mm) hergestellt. Dieser Abstand wurde in Hinblick auf die Hauptanwendungsbereiche gewählt, nämlich der Behandlung von Abwässern mit primär bereits vorhandenen hohem Feststoff- und Kolloidgehalt und solchen Flüssigkeiten, die die Gefahr von Fouling insbesondere durch Mikroorganismen in sich bergen.

Hierbei erfolgte eine Optimierung zwischen der aus Sicht der Strömungsführung erforderlichen Gestaltung des Spacers und der Gestaltung der Werkzeuge in Hinblick auf die Machbarkeit und Fertigungsgesichtspunkte. Dabei war zu beachten, dass im Unterschied zu entsprechenden industriell verfügbaren Verformungstechnologien hier nicht die Produktion einer großen Folienfläche im Vordergrund steht, sondern die Fertigung relativ kleiner Flächen in Quasi-Einzelfertigung.

Die mit dieser Prägevorrichtung erzeugte Kontur des Tunnel-Spacers ist vergrößert in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5 Kontur des produzierten Tunnel-Spacers

Die endgültige Fertigungsmethode kann zusammenfassend wie folgt beschrieben werden:

Die Spacerkontur wird in eine ebene Kunststoffolie mit entsprechender Materialstärke mit Hilfe zweier gegenläufig drehenden Walzen mit axialen Rillen geprägt. Diese axiale Rillenstruktur ist erforderlich, um die Folie gleichmäßig durch die Prägevorrichtung zu führen. Daraus ergibt sich allerdings, dass die wirksame Länge der Prägevorrichtung mindestens gleich der späteren Elementlänge sein muss.

Die Walzen werden dabei durch Wärmestrahler berührungslos beheizt. Die zu kalandrierende Folie wird ebenso erwärmt, um eine ausreichende Verformbarkeit zu gewährleisten. Damit der Tunnel-Spacer in Wickelementen verwendet werden kann, ist es erforderlich, dass er trotz der Verformung eben bleibt. Hierzu ist insbesondere eine gleichmäßige Temperaturverteilung als auch ein gleichmäßiger Kräfteintrag zu gewährleisten. Hierzu werden die Prägwalzen durch einen Motor mit regelbarer Drehzahl angetrieben. Um die optimale Drehzahl bzw. die optimale Geschwindigkeit für die Prägung zu ermitteln, wurden an der endgültigen Prägevorrichtung entsprechende Testläufe bei verschiedenen Heizleistungen der Wärmestrahler durchgeführt.

2.1.3 Ergebnisse der Spacer-Fertigung

Um zwischen den Membranen einen Strömungskanal für den Feed-Strom zu schaffen, muss der Spacer an einigen Stellen auf der Membran aufliegen. Dadurch wird die Membranfläche jedoch teilweise abgedeckt und es kann dort kein Permeat erzeugt werden. Der Anteil der abgedeckten Fläche ist von der Spacer-Geometrie abhängig.

Die abgedeckte Fläche wurde für die in Abbildung 6 dargestellten Spacer-Typen durch Erstellen eines Abdruckmusters bestimmt. Dabei zeigt sich, dass der Tunnel-Spacer eine gegenüber dem Parallel-Spacer erhöhte Membranabdeckung aufweist, die ihre Ursache darin hat, dass beim Parallel-Spacer die Auflage punktförmig erfolgt, beim Parallel-Spacer dagegen linienförmig. Die Höhe der Membranabdeckung ist jedoch akzeptabel.

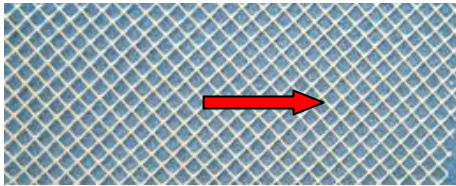
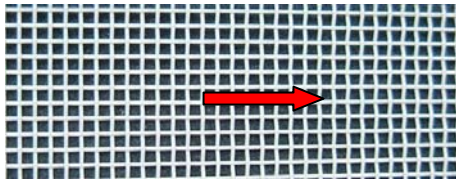

Spacer-Typ	Anströmungsrichtung	Membran-Abdeckung
Diamant-Spacer, 35 mil		15 %
Parallel-Spacer, 50 mil		11 %
Tunnel-Spacer, 50 mil		20 %

Abbildung 6 Anströmung und Membranabdeckung verschiedener Spacer-Typen

2.1.4 Strömungstechnische Eigenschaften des Tunnel-Spacers

Die Maschen des Diamant-Spacers werden in einem Winkel von 45° angeströmt. Dadurch entstehen in den Ecken vor und hinter der Anströmung Toträume, in welchen nur eine geringe Strömungsgeschwindigkeit vorliegt. Diese Ecken sind anfällig für Fouling und Scaling. Da sich in wenig überströmten Bereichen bei gleichem Anlagendruck die Wasserinhaltsstoffe höher aufkonzentrieren, können diese aufgrund von lokaler Übersättigung ausfallen (Scaling). Diese bieten auch weitere Anlagerungsmöglichkeiten für Partikel.

Der leiterartig aufgebaute Parallel-Spacer lässt ebenfalls Totzonen entstehen, in welchen sich Partikel ablagern können. Diese Totzonen entstehen direkt vor- und hinter den angeströmten Querfäden, insbesondere bei direkt auf der Membran aufliegenden Querfäden. Einseitig aufliegende Fäden begünstigen mehr Scaling, Fouling und die Partikelablagerung und mittige Querfäden verursachen höhere Wirbel, die ebenfalls Totzonen bilden können.

Da man die Strömungsverhältnisse in einem Strömungskanal zwischen zwei Membrantaschen nicht direkt beobachten kann, werden diese durch eine CFD-Simulation mittels der Software FLUENT berechnet. Ziel der Simulation ist es, Aussagen zur Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Feedkanal und insbesondere an der Membranoberfläche zu erhalten, da diese den Stoffübergang und die Konzentrationspolarisation bestimmt.

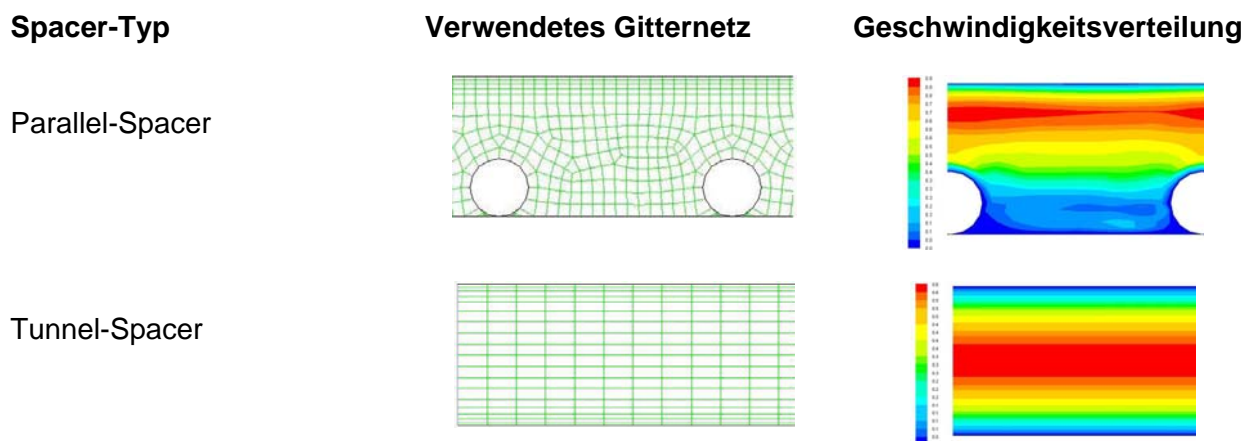


Abbildung 7 Gitternetz und Geschwindigkeitsverteilung in den Spacer-Kanälen

Hierzu wurden für eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Feedkanal von $v = 0,2 \text{ m/s}$ verschiedene Vector- und Contour-Plots für beide Spacer-Typen erstellt.

Wie die Abbildung 7 zeigt, steigt die Strömungsgeschwindigkeit über den Querfäden auf $v = 0,9$ m/s an. Dies führt an der oberen Membrane zu einer relativ geringen Grenzschichtbildung. Das Ablagern von Partikeln auf der Membranoberfläche wird dort also erschwert, ebenso wird die Konzentrationspolarisation reduziert.

Vor und zwischen den Spacerfäden ist jedoch die Geschwindigkeit deutlich reduziert. Besonders zu beachten ist außerdem, dass es zwischen den Querfäden zu einer Rezirkulationsströmung kommt. Hierdurch bildet sich eine ausgeprägte Grenzschicht, die das Ablagern von Feststoff-Partikeln aus dem Zulaufstrom begünstigt. Feststoffe können sich in den Totzonen ablagern und von dort ausgehend Membranverblockung verursachen. Ebenso begünstigt die Rückströmung die Bildung von Scaling.

Aus der Abbildung 7 ist ebenso ersichtlich, dass die Strömung im Tunnel-Spacer gleichmäßig verläuft und das typische Profil einer laminaren Strömung aufweist. Man erkennt deutlich die symmetrische Geschwindigkeitsverteilung und die Bildung der Grenzschicht an der Membran. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt von der Membran zum Kernstrom in der Mitte hin stetig zu bis zu einer Maximalgeschwindigkeit von $v = 0,6$ m/s. Das parabolische Strömungsprofil entspricht den laminaren Bedingungen im Kanal.

2.1.5 Versuche zur vergleichenden Bestimmung der Trenncharakteristik von Tunnel- und Parallel-Spacer

Um die Trenncharakteristik eines Spiralwickелеlementes mit Tunnel-Spacers mit der eines Spiralwickелеlementes mit einem Parallel-Spacer vergleichen zu können, wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

Es wurde der Permeatfluss und das Rückhaltevermögen eines 4“-Wickелеlement mit einem 50 mil Parallel-Spacer bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen mit verschiedenen Salzlösungen getestet. Anschließend wurde das Element ausgebaut, aufgeschnitten, der Parallel-Spacer entfernt und durch den Tunnel-Spacer ersetzt. Mit dem neu gewickelten Element wurden die Versuche zur Trenncharakteristik wiederholt. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass der Einfluss der Membran auf die Ergebnisse eliminiert wurde. Anschließend wurde wieder der Parallel-Spacers eingebaut und die Versuche wiederholt. Mit diesen Versuchen konnte der Einfluss des Elementumbaus ermittelt werden.

Die Abbildung 8 zeigt den Umbau eines 4“-Elementes an der Wickelvorrichtung.

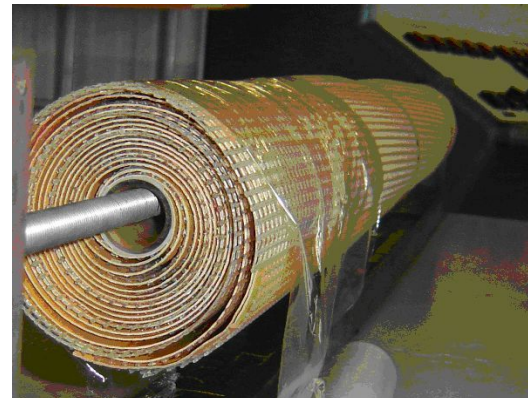


Abbildung 8 Umbau eines 4"-Wickelementes

Bei den Betriebsbedingungen wurden verschiedenen Konzentrationen an MgSO_4 (0,5 %; 1,0 %; 2,0 % w/w), Feeddrücke 30 bar und 50 bar, sowie Feed-Volumenströme von $Q_{\text{Feed}} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$; $2 \text{ m}^3/\text{h}$ und $3 \text{ m}^3/\text{h}$ bei den Parallel-Spacer-Versuchen und $Q_{\text{Feed}} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$; $3 \text{ m}^3/\text{h}$; und $5 \text{ m}^3/\text{h}$ bei den Tunnel-Spacer-Versuchen untersucht. Diese Versuche, sowie auch die späteren beschriebenen Testläufe zur Trennwirkung wurden an der in Abbildung 9 dargestellten Technikumsanlage durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Graphik 1 und Graphik 2 dargestellt.



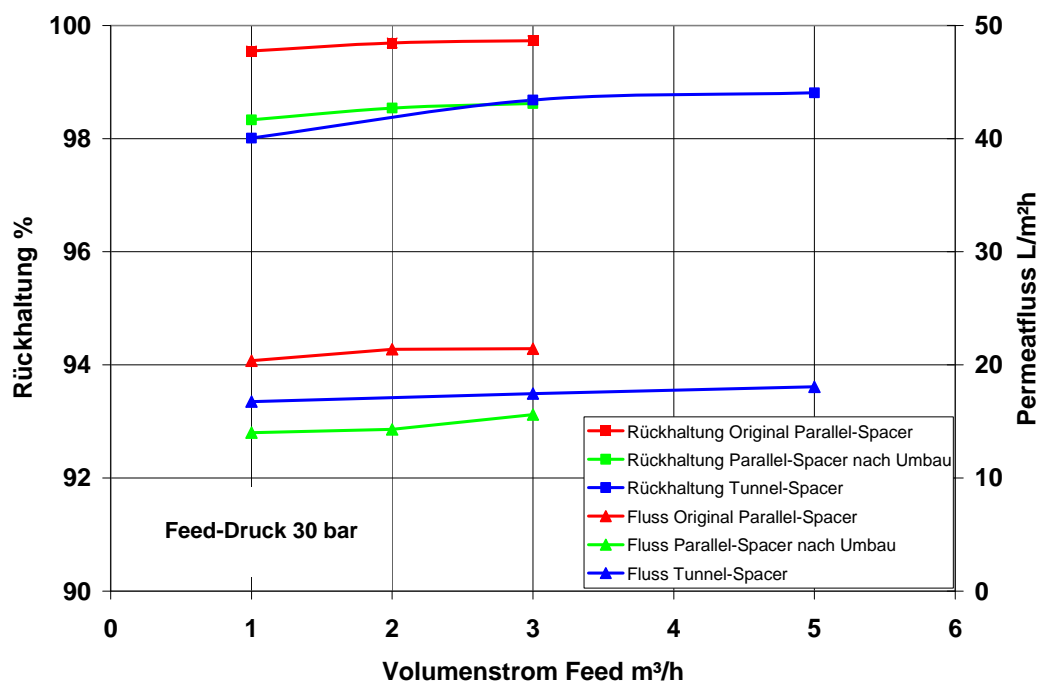
Abbildung 9 Technikumsanlage zur Bestimmung der Trenncharakteristik

Aus den Graphiken 1 und 2 ist zu entnehmen, dass das Original-Element mit Parallel-Spacer die beste Trenncharakteristik aufweist. Dieses drückt sich in der höchsten Rückhaltung und in dem höchsten Permeatfluss aus.

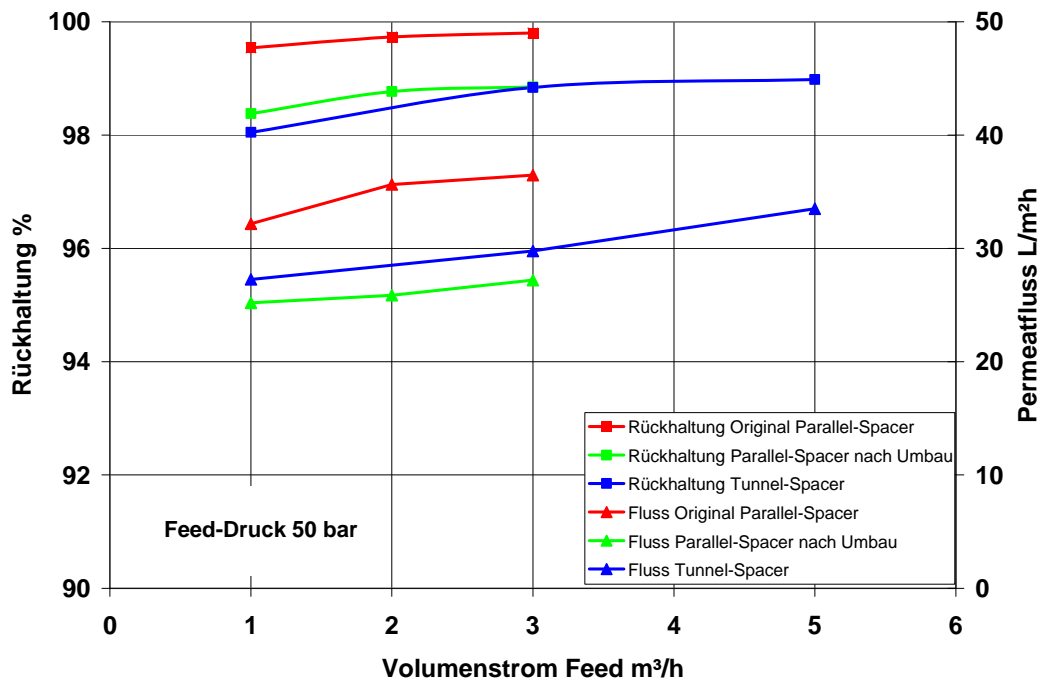
Die Rückhaltung R wird nach der folgenden Gleichung berechnet, in der c_P die mittlere Konzentration im Permeat und c_K diejenige im Konzentrat bedeutet.

$$R = 1 - \frac{c_P}{c_K}$$

Der Tunnel-Spacer zeigt demgegenüber eine reduzierte Rückhaltung und einen reduzierten Permeatfluss. Allerdings sind die Werte für die Rückhaltung vergleichbar mit denen, die nach dem wiederholten Einbau des Parallel-Spacers erzielt werden. Die erzielten Permeatflüsse für den Tunnel-Spacer sind sogar größer als die mit dem rück gebauten Element erzielt werden. D.h., dass die Leistungsabnahme nicht auf den Spacer zurückzuführen ist, sondern auf die Umbaumaßnahmen. Außerdem erkennt man aus den folgenden Abbildungen, dass die Überströmung der Membran, d.h. der Feedvolumenstrom, einen großen Einfluss auf die Rückhaltung bei dem Tunnel-Spacer in der Art hat, dass eine Mindest-Strömungsgeschwindigkeiten sinnvoll ist.



Graphik 1 Rückhaltung und Permeatfluss im Vergleich bei 30 bar



Graphik 2 Rückhaltung und Permeatfluss im Vergleich bei 50 bar

2.2 AP 2 Entwicklung und Herstellung des Wickelementes

2.2.1 Fertigung der Wickelemente

Parallel zur Entwicklung und Fertigung des Tunnel-Spacers erfolgte die Entwicklung und Fertigung der Spiralwickелеlemente. Dazu wurden verschiedene Wickeltechniken analysiert und bewertet. Die allgemeine Vorgehensweise bei der Fertigung von Spiralwickелеlementen kann wie folgt beschrieben werden:

Die zugeschnittene Flachmembran wird in Taschen gefaltet und zusammen mit dem Feed-Spacer und dem Permeat-Carrier auf einem Wickeltisch bereit gelegt. Der Permeat-Carrier wird um das perforierte Permeatsammelrohr gewickelt und an den Enden und auf dem Rohr verklebt. Anschließend werden die Taschen an den Seiten auf das Permeatrohr geklebt.

Damit der Weg, den das Permeat bis zum Permeatrohr zurücklegen muss, nicht zu lang, und damit der permeatseitige Druckverlust nicht zu groß wird, sind in der Regel eine Vielzahl von Membrantaschen erforderlich (siehe Abbildung 10).

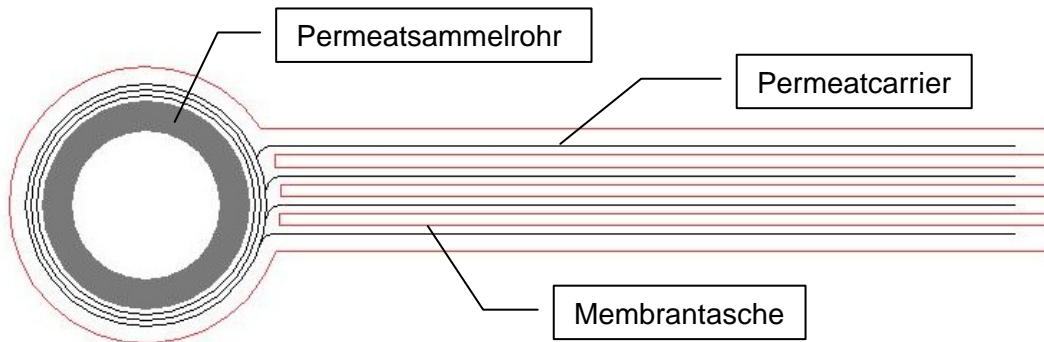


Abbildung 10 Schematischer Aufbau eines Spiralwickелеlements

Danach werden die Taschen zusammen mit dem Feed-Spacer und dem Permeat-Carrier spiralförmig um das Permeatsammelrohr gewickelt und die einzelnen Taschen werden dabei an den Seitenrändern ebenfalls verklebt. Zum Schluss werden die Taschen am Ende in Längsrichtung verklebt. Das Element wird nur in Form getrimmt und an den Stirnseiten beschnitten. Anschließend wird um das Element eine äußere Fixierung angebracht.



Abbildung 11 Fertigung eines Spiralwickелеlementes

Die Abbildung 12 zeigt die Frontseite eines des mit dem Tunnel-Spacer für die anschließenden Versuche gefertigten Elementes. Man erkennt deutlich die offenen Strömungskanäle im Vergleich zu dem in Abbildung 2 gezeigten Element mit einem Standard-Parallel-Spacer.

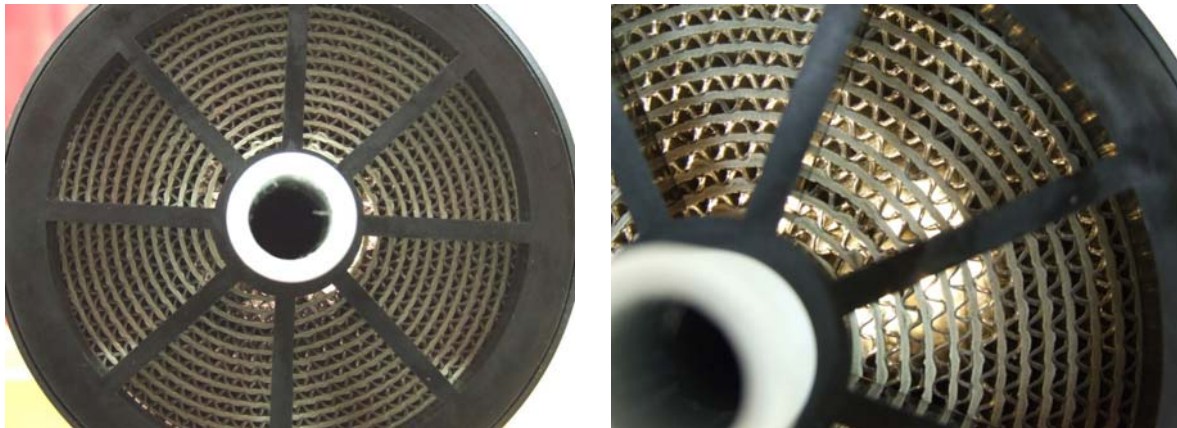


Abbildung 12 *Spiralwickелеlement mit Tunnel-Spacer*

2.2.2 Ergebnisse aus den Testversuchen an der Laboranlage mit 4“-Elementen

Mit den so produzierten Spiralwickелеlementen wurden verschiedenen Versuchsreihen an der in der Abbildung 9 dargestellten Laboranlage gefahren. Ziel der Untersuchungen war, die Trenncharakteristik von Elementen mit Tunnel-Spacer im Vergleich zu der mit Parallel-Spacer zu bestimmen. Das Parameterfeld der Versuchsbedingungen umfasste dabei die Variation der Salzkonzentration, die Variation des Feedvolumenstromes und der Drücke. Als Testsalz wurde NaNO_3 gewählt, das dieses Salz auch bei der Verwendung von Umkehrosiose-Membranen eine relativ geringe Rückhaltung erfährt. Damit wird es möglich, die Einflüsse der Versuchsparameter genauer zu erfassen. Da praktisch alle anderen relevanten Salze eine deutlich höhere Rückhaltung zeigen, wird so für die Rückhaltung ein unterer Wert bestimmt. Die Drücke wurden derart gewählt, dass ein maximaler Permeatfluss von $40 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ nicht überschritten wurde.

Tabelle 1 *Parameterfeld zum Vergleich Tunnel-Spacer und Parallel-Spacer*

Parameter	Werte	Einheit
Salzkonzentration	2; 5, 10; 20; 50	g/L
Feedvolumenstrom Tunnel-Spacer	1,5; 2; 3; 4; 5	m^3/h
Feedvolumenstrom Parallel-Spacer	1,0; 1,50; 1,75; 2,0; 2,25; 2,5; 3,0	m^3/h
Druck	10; 20; 30; 40; 50; 60	bar

Um die Trenncharakteristik der beiden Spacer-Typen zu vergleichen, wurden insbesondere die Rückhaltung und der Permeatfluss als Funktion des Druckes und des Feedvolumenstromes gemessen.

In der Graphik 3 sind für den Tunnel-Spacer die Ergebnisse für einen Salzgehalt von 10 g/L wiedergegeben; Graphik 4 zeigt die Ergebnisse für einen Salzgehalt von 50 g/L. Die Graphik 5 und die Graphik 6 zeigen die entsprechenden Ergebnisse für den Parallel-Spacer. Die Abkürzung R steht in den Diagrammen für die Rückhaltung und F steht für den Permeatfluss.

Rückhaltung

In allen Fällen steigt die Rückhaltung, wie erwartet, mit dem Druck und dem Feedvolumenstrom an.

Die Zunahme der Rückhaltung mit steigendem Druck folgt aus dem Lösungs-Diffusions-Modell (LDM). Die Zunahme der Rückhaltung mit steigendem Feedvolumenstrom hat ihre Ursache in der Reduzierung der Konzentrationspolarisation an der Membran. Diese macht sich vor allem bei kleinen treibenden Drücken und geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Element bemerkbar.

Beim Tunnel-Spacer wird bei einem NaNO_3 -Gehalt von 10 g/L und 5 m³/h Überströmung ein Rückhalt von 97,1 % bei einem Druck von 30 bar erreicht, bei einer Überströmung von 3 m³/h sind es dagegen nur 96,1 %. Bei einem Salzgehalt von 50 g/L wird bei einer Überströmung von 5 m³/h ein Rückhalt von 96,4 % wegen des größeren osmotischen Druckes erst bei 50 bar erreicht.

Die Werte für die Rückhaltung liegen beim Parallel-Spacer unter gleichen Bedingungen höher als beim Tunnel-Spacer. Bei einem NaNO_3 -Gehalt von 10 g/L und 3 m³/h Überströmung ein Rückhalt von 98,6 % bei einem Druck von 30 bar erreicht, bei einer Überströmung von 1,5 m³/h sind es dagegen nur 98,1 %. Bei einem Salzgehalt von 50 g/L wird bei einer Überströmung von 3 m³/h ein Rückhalt von 98,8 % wegen des größeren osmotischen Druckes erst bei 50 bar erreicht.

Es sei jedoch nochmals betont, dass die Versuche mit NaNO_3 durchgeführt wurden, dass ohnehin nur sehr schlecht von Umkehr-Osmose-Membranen zurückgehalten wird. In der Regel dürfte die Rückhaltung für die beabsichtigten Anwendungen ausreichend sein.

Permeatfluss

Die Zunahme des Permeatflusses mit steigendem Druck folgt ebenfalls aus dem Lösungs-Diffusions-Modell. Im Vergleich zum Tunnel-Spacer ist der Permeatfluss beim Parallel-Spacer unter gleichen Bedingungen etwa doppelt so groß.

Dieses Verhalten kann im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

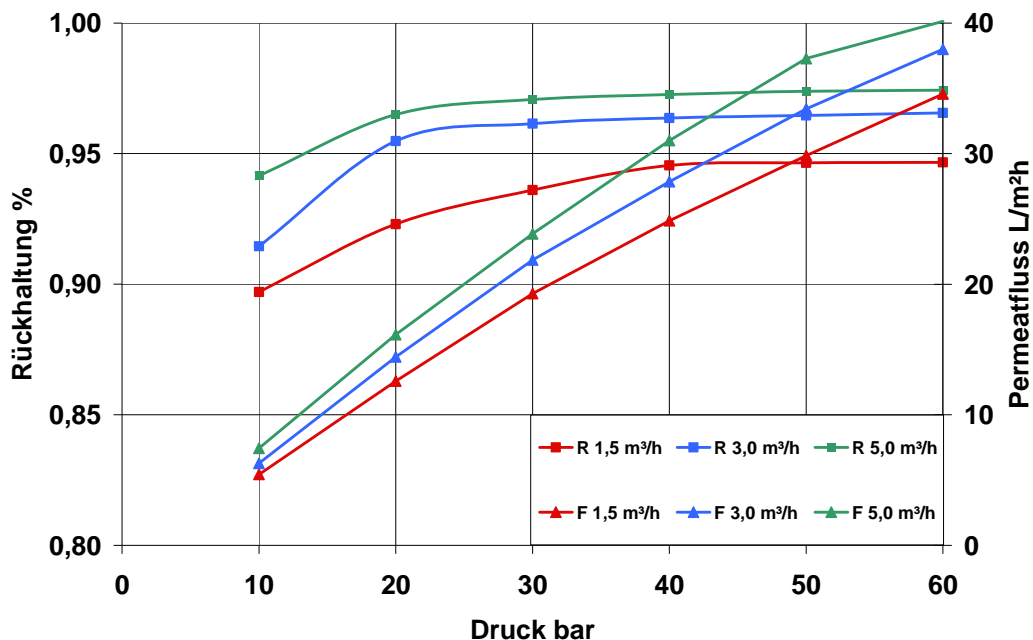
Zum einen ist aus den Diagrammen ersichtlich, dass die Kurven der Permeatflüsse bei dem Tunnel-Spacer mit zunehmender Überströmung eine größere Spreizung erfahren. Das bedeutet, dass ein größerer Feedvolumenstrom die Konzentrationspolarisation reduziert und damit den treibenden Druck deutlich erhöht.

Der zweite Grund liegt in der Fertigung der Wickelelemente begründet. Bei der Fertigung der Prototypen wurde eventuell eine zu hohe Zugkraft beim Wickeln in das Element eingetragen, wodurch der Tunnel-Spacer teilweise an den Rundungen verformt wurde und so eine größere Membranfläche bedeckt. Dadurch muss ein höherer Druck aufgewendet werden, um den gleichen Permeatfluss pro Wickelelement zu erzeugen.

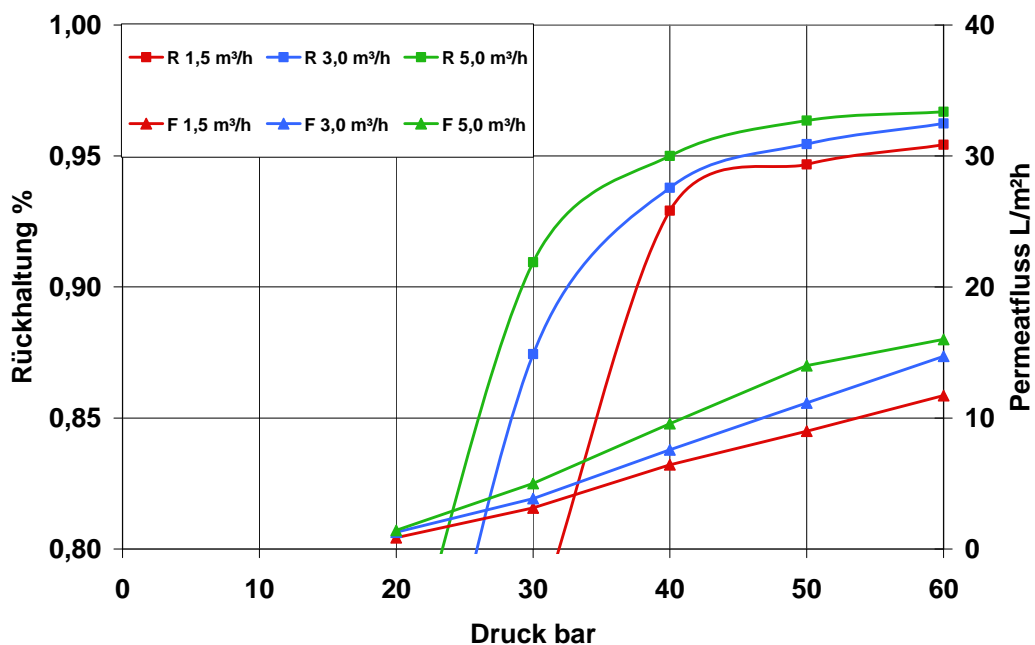
Da ein Spiralwickелеlement mit einem Tunnel-Spacers jedoch praktisch keinen Druckverlust aufweist, kann man die angebotene Membranfläche leicht erhöhen, indem man mehrere Elemente in ein Druckrohr hintereinander einbaut. Wegen der hohen Überströmung ist die Permeatausbeute relativ gering, so dass in den folgenden Elementen praktisch die gleichen hydraulischen Verhältnisse herrschen. Dabei würden sich lediglich die Membrankosten erhöhen, wobei die absolute Größe des Permeatflusses für Anwendungen im Abwasserbereich vollkommen ausreichend ist.

Fazit

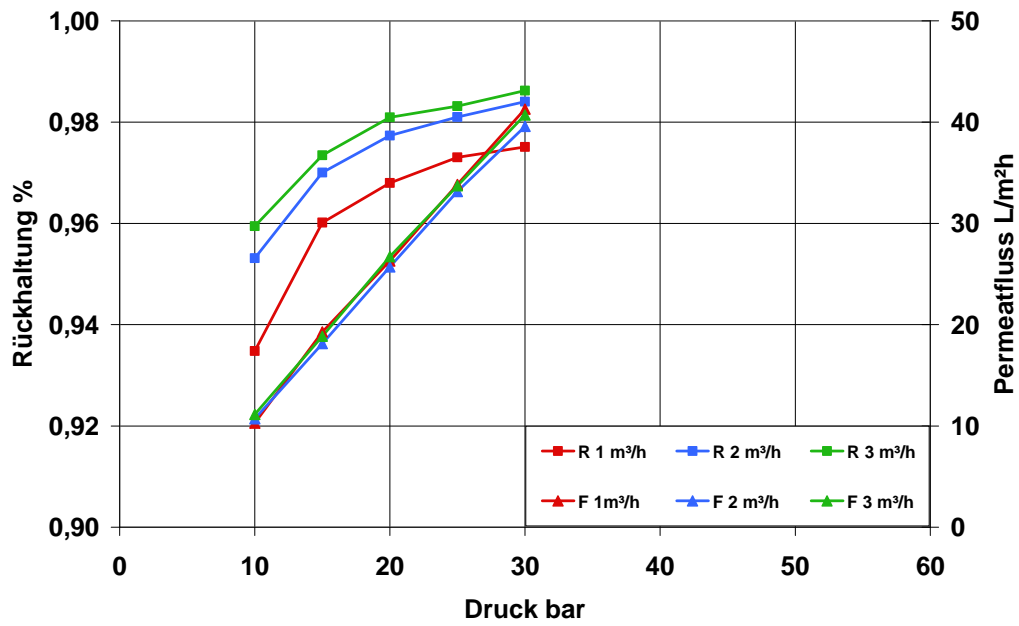
Aus diesen Ergebnissen folgt für das Vertikal-Modul, dass ein Feedvolumenstrom von 3 m³/h - 5 m³/h für den freien Querschnitt eines 4 Zoll-Wickelmoduls mit 50 mil Tunnelspacer ausreichend ist. Im Hinblick auf die energetische Optimierung des Vertikal-Moduls ist ein Volumenstrom von $Q = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ vorzuziehen. Unterhalb dieser Volumenstroms sind erhöhte Effekte der Konzentrationspolarisation auf den Ionenrückhalt an der Membran zu erwarten.



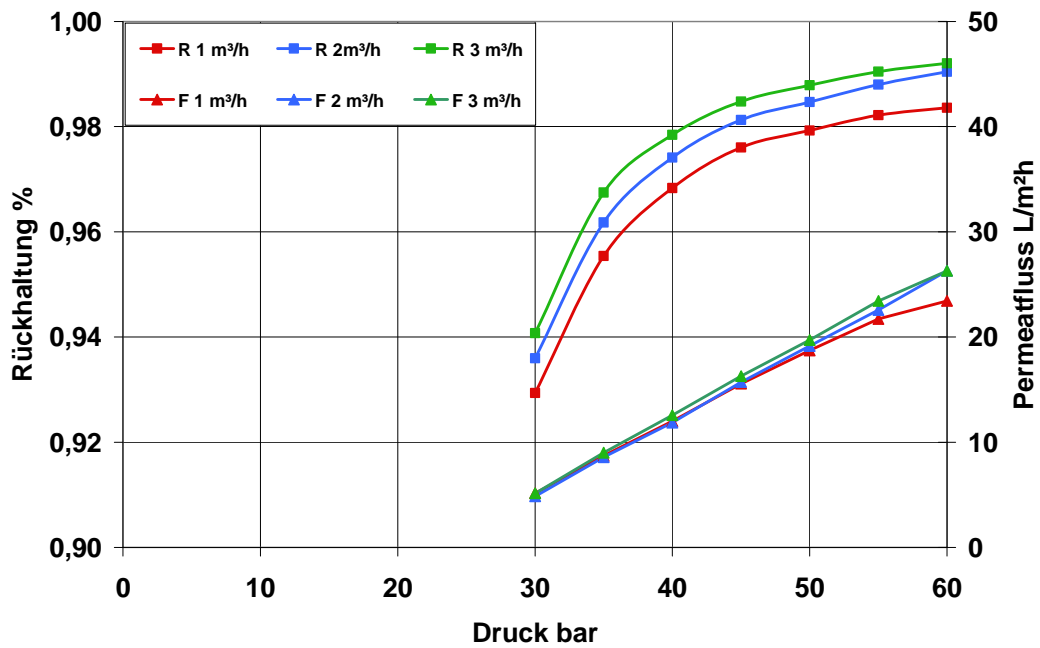
Graphik 3 Tunnel-Spacer 10 g/L NaNO₃



Graphik 4 Tunnel-Spacer 50 g/L NaNO₃



Graphik 5 Parallel-Spacer 10 g/L NaNO₃



Graphik 6 Parallel-Spacer 50 g/L NaNO₃

2.3 AP 3 Entwicklung des Vertikal-Moduls

Zur Integration der Membranmodule mit Tunnelspacer erfolgte im Rahmen des Vorhabens die Entwicklung einer Pilotanlage zur Aufnahme der Prototypen von 4 Zoll Wickelelementen. Ziel bei der Entwicklung war die integrierte Anordnung von Umwälzpumpe und Modul in einer kompakten Einheit unter Verzicht auf eine aufwendige Hochdruck-Verrohrung. Die Anordnung des Moduls sollte senkrecht erfolgen um bei Abwässern mit erhöhten Feststoff- und Kolloidanteilen eine Ablagerung innerhalb des Wickelelements zu vermeiden.

2.3.1 Lösungsansatz mit Magnetkupplungspumpe zur Rezirkulation

Zur Rezirkulation im Modul wurde ursprünglich der Einsatz einer Magnetkupplungspumpe favorisiert, die unter Systemdruck arbeiten sollte. Vorteile dieser Konzeption waren:

- geringer Energieaufwand
- niedriger Schalldruckpegel
- keine Wellenabdichtungen gegen Umgebungsdruck notwendig

In magnetgekuppelten Pumpen wird die Trennung zwischen dem Medium berührten Laufradraum und der Antriebseinheit mit Magnetanker durch einen so genannten Spalttopf realisiert. Dieser Spalttopf muss druckstabil (Systemdruck vs. Umgebungsdruck) ausgeführt werden, wobei sich ein Konflikt zwischen Materialstärke des Spalttopfs und der Übertragung des Drehmoments durch den Magnetanker ergibt. Magnetgekuppelte Kreiselpumpen werden üblicherweise in horizontaler Anordnung aufgestellt. Das Laufrad im Laufradraum befindet sich auf einer horizontalen Welle und rotiert auf einem durch das umgebende Medium geschmierten Gleitlager. Bei der Rotation löst sich das Laufrad vom so genannten Anlaufring an der Seite des Spalttopfs und dreht sich auf der horizontalen Welle „frei im Raum“.

Beim Einsatz dieses Pumpentyps ergeben sich damit zwei prinzipielle Schwierigkeiten.

- Bauartbedingt werden durch die Pumpenhersteller maximale Systemdrücke von $p = 40$ bar zugelassen. Höhere Systemdrücke sind nur in Sonderanfertigungen unter erheblichem Kostenanstieg zu erreichen.
- Eine vertikale Anordnung der Pumpe, wie in der VRM Anlage angestrebt, ist in der Standardkonstruktion nicht vorgesehen. Durch die vertikale Anordnung kann sich das Laufrad nicht vom Anlaufring am Spalttopf lösen und reibt kontinuierlich auf dem Anlaufring an der Medium berührten Seite des Spalttopfs.

Als Alternativen wurden daher in der Konstruktion andere Pumpentypen untersucht. Unterschiede, Vor- und Nachteile der Pumpentypen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2 Kriterien zu untersuchten Pumpentypen zur Umwälzung in der VRM Pilotanlage

Pumpentyp	Kreiselpumpe magnetgekuppelt	Kreiselpumpe trocken aufgestellt	Unterwasserpumpe komplett getaucht
Hersteller	KSB, IWAKI o.ä.	KSB, Ritz, Edur o.ä.	Grundfos o.ä.
Beständigkeit	+++	++	++
Wellenabdichtung	+++	-	+
Systemdruck	0	++	++
Zugänglichkeit	++	++	-
Verrohrung	+	-	+
Motorabdichtung	++	++	-
Kabeldurchführung	+	+	0
Verfügbarkeit	-	++	++
Preis	--	0	+

Für eine angestrebten Systemdruck von $p = 60 \text{ bar}$ (6000 kPa) sind Verfügbarkeit und Preis der Pumpentypen maßgebliche Kriterien für die Auswahlentscheidung. Unterwasserpumpen (so genannte Druckmodule) sind komplett getauchte Einheiten, die unter Systemdruck arbeiten und keine Wellenabdichtung benötigen. Die Druckmodule werden bereits erfolgreich in Anwendungen der Membranfiltration als extern angeordnete Pumpeneinheiten eingesetzt. Nachteile dieses Pumpentyps sind die eingeschränkte Zugänglichkeit der getauchten Antriebseinheit und die Notwendigkeit einer Kabeldurchführung (beständig gegen Systemdruck) aus der Vertikal-Einheit. Durch die getauchte Anordnung kann die Verrohrung im Modul sehr einfach ausgeführt werden.

Unter Berücksichtigung von Verfügbarkeit, Preis und den Betriebserfahrungen wurde daher für den Einsatz in der VRM Pilotanlage eine Unterwasserpumpe der Fa. Grundfos adaptiert.

2.3.2 Druckgehäuse und Modulkreislauf

Wesentliche Merkmale des Vertikal-Moduls sind die senkrechte Modulanordnung und die möglichst kompakte Anordnung von Umwälzpumpe und Modul in einem Element. Durch den Wechsel des Pumpenkonzepts bedingt wurde eine weitgehende Umkonstruktion der ursprünglichen VRM-Einheit notwendig. Die Kombination aus Modul und Umwälzpumpe wurde als getauchte Einheit in einem druckstabilen äußeren Hüllrohr realisiert. Pumpensegment und Modulsegment sind in der Pilotanlage noch durch kurze Rohrkanäle für Auf- und Abstrom des umgewälzten Mediums verbunden, um wesentliche Prozessparameter wie Druck und Volumenstrom messtechnisch erfassen zu können (vgl. Abbildung 13). Zu einem späteren Zeitpunkt besteht bei der großtechnischen Anwendung die Möglichkeit, diese verbindende Rohrstücke durch einen einfachen Adapterflansch auszutauschen.

Die Umströmung des Vertikal-Moduls erfolgt im Spalt zwischen Hüllrohr und Wickelelement bzw. im Freiraum um die getauchte Pumpeneinheit. Die Pumpeneinheit wird durch das umströmende Medium gekühlt. In der Pumpeneinheit ist eine druckstabile Kabeldurchführung zur elektrischen Versorgung der Umwälzpumpe integriert. Die Konzentratabnahme erfolgt am Fuß des Pumpensegments, die Permeatabnahme am Kopf des Modulsegments.

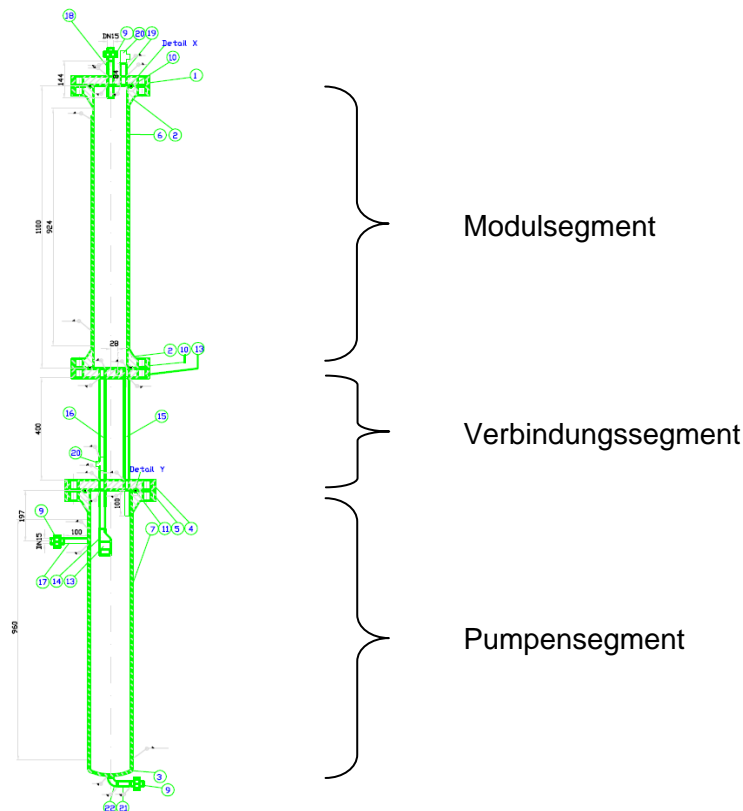


Abbildung 13 Realisierte Konstruktion des Vertikal-Moduls

Die Einbringung des 4 Zoll Membran-Wickelelementes erfolgt am Kopf des Vertikal-Moduls. In Abhängigkeit der verfügbaren Bauhöhe und der Pumpenleistung ist es möglich, bei Verlängerung des Modulsegments auch mehrere Membranelemente in Reihe zu schalten.

2.4 AP 4 Herstellung der Pilotanlage

Das Vertikal-Modul wurde in eine transportable Pilotanlage zur Membranfiltration integriert. Alle notwendigen Messaufnehmer und Nebenaggregate sind auf einem kompakten Stahlgestell montiert, das auch den Schaltschrank mit speicherprogrammierbarer Steuerung trägt (siehe Abbildung 15). Die Steuerung und Visualisierung der Pilotanlage erfolgt über ein PC-basiertes Prozessleitsystem. Messsignale werden direkt auf Festplatte gespeichert und können zur

Weiterverarbeitung in gängiger Software ausgelesen werden. Mit der vertikalen Anordnung des Moduls kann eine außerordentlich Platz sparende Bauweise der Membrananlage auf kleiner Stellfläche realisiert werden. Vor allem bei Anwendungen mit beengtem Raum (z.B. im produktionsintegrierten Einsatz) bieten sich dadurch Vorteile gegenüber konventioneller Technik.

Zulauf- (Feed), Konzentrat- und Permeatstrom werden kontinuierlich überwacht (Durchfluss, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert). In allen Volumenströmen sind ebenfalls manuelle Probenahmen möglich, um zusätzliche Laboranalytik durchführen zu können (siehe Abbildung 14). Zum Schutz der Hochdruckpumpe (P10.1) und des Vertikalmoduls (F50.1) vor Verblockung durch grobe Feststoffe ist ein Kerzenfilter (F1.1) in der Pilotanlage installiert.

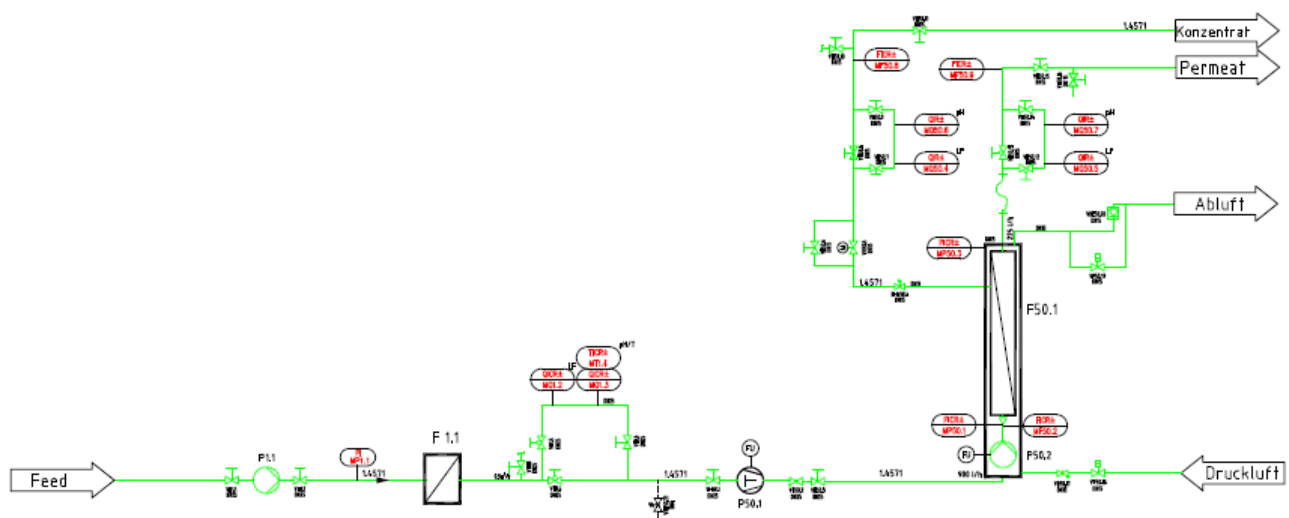


Abbildung 14 Vereinfachtes R&I-Fließbild der Pilotanlage

Nach Bedarf werden der Anlage Vorlagebehälter sowie Permeat- und Konzentrat-Sammeltanks beige stellt, die ebenfalls füllstandsüberwacht ausgeführt werden können. Die Filterfeinheit der Vorfiltration kann den jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden. Ein Austausch des Vorfilters ist durch wenige Handgriffe möglich.



Abbildung 15 Vertikal-Modul Pilotanlage im Werk Rossdorf der EnviroChemie GmbH
(links: Gesamtansicht mit Prozessrechner, rechts: Detail Vertikal-Modul)

2.5 AP 5 Versuche mit Vertikal-Modul

Zur Untersuchung der Randbedingungen des Betriebs der Pilotanlage wurden Versuche mit allen extern gefertigten Elementtypen unterschiedlicher Spacergeometrie durchgeführt. Diese Versuche dienen sowohl dazu, die im Teststand am IAV der FH Köln ermittelten Moduldaten zu überprüfen, als auch die spezifischen Anlagendaten des Vertikal-Moduls aufzuzeichnen.

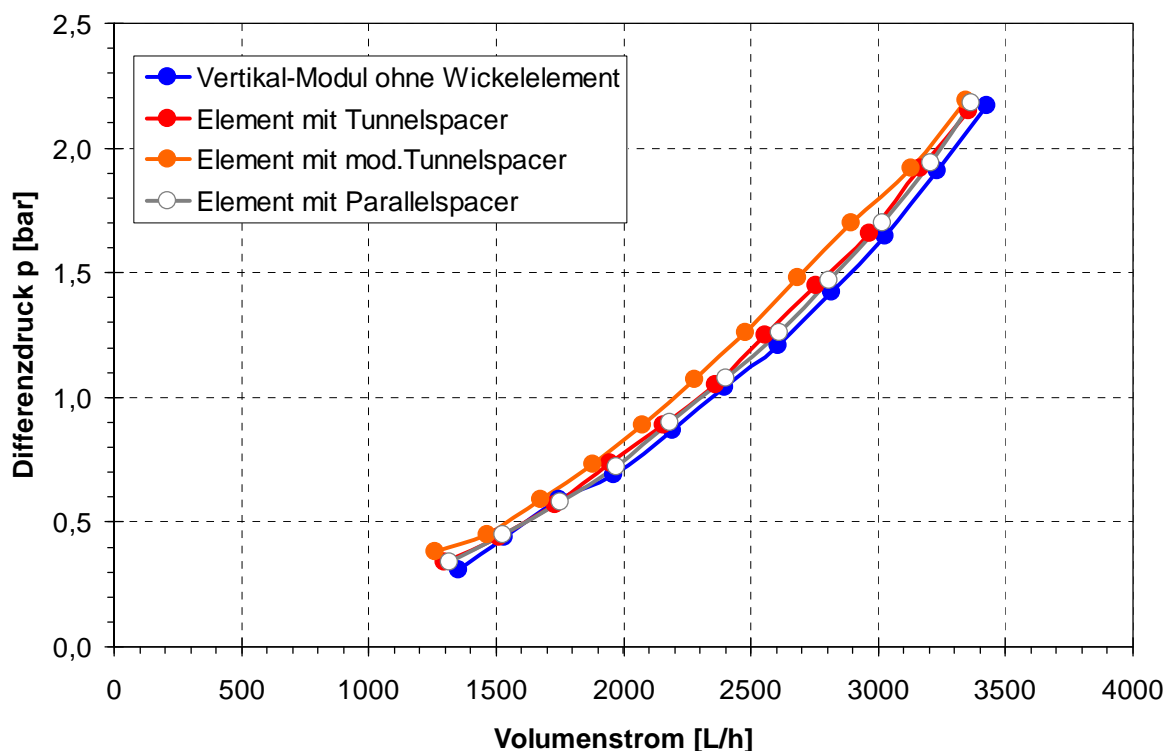
2.5.1 Druckdifferenz ohne und mit Wickelementen unterschiedlicher Spacergeometrie

Im Gegensatz zu herkömmlichen Parallelspacern werden bei der Verwendung von Tunnelspacern in Wickelmodulen definierte feedseitige Strömungskanäle ausgebildet, zwischen denen im Normalfall kein Stoffaustausch erfolgt. Ein Wickelmodul mit Tunnelspacer ähnelt in dieser Hinsicht einem Kapillar-Membranmodul. Der einmal in den Strömungskanal eingetretene Volumenstrom verlässt den Strömungskanal auf der Konzentratseite, vermindert um das durch die Membran getretene Permeat. Theoretisch ist damit um jeden einzelnen Strömungskanal eine

Massenbilanz aufstellbar. Wickelemente mit Parallelspace oder modifiziertem Tunnelspace erlauben dagegen einen Stoffaustausch quer zur Strömungsrichtung, da keine definierten Strömungskanäle ausgebildet werden.

Aus dieser Überlegung heraus wird deutlich, dass für eine effektive Ausnutzung der im Modul mit Tunnelspace zur Verfügung stehenden Membranfläche eine möglichst gleichförmige Verteilung des Feed- bzw. Umwälz-Volumenstroms über die gesamte freie anströmseitige Querschnittsfläche des Wickelementes gegeben sein muss. Ansonsten besteht die Gefahr eines „channeling“ in wenigen Kanälen. Dazu wurde im Vertikal-Modul ein Pralltopf mit mehreren Verteilungsöffnungen realisiert, aus dem der Umwälzstrom vor dem Eintritt in das Wickelement umgelenkt wird.

Die Auswirkungen dieser Verteilereinrichtung auf den Druckverlust im Vertikal-Modul in Abhängigkeit des Umwälzstroms wird in der folgenden Graphik dargestellt.

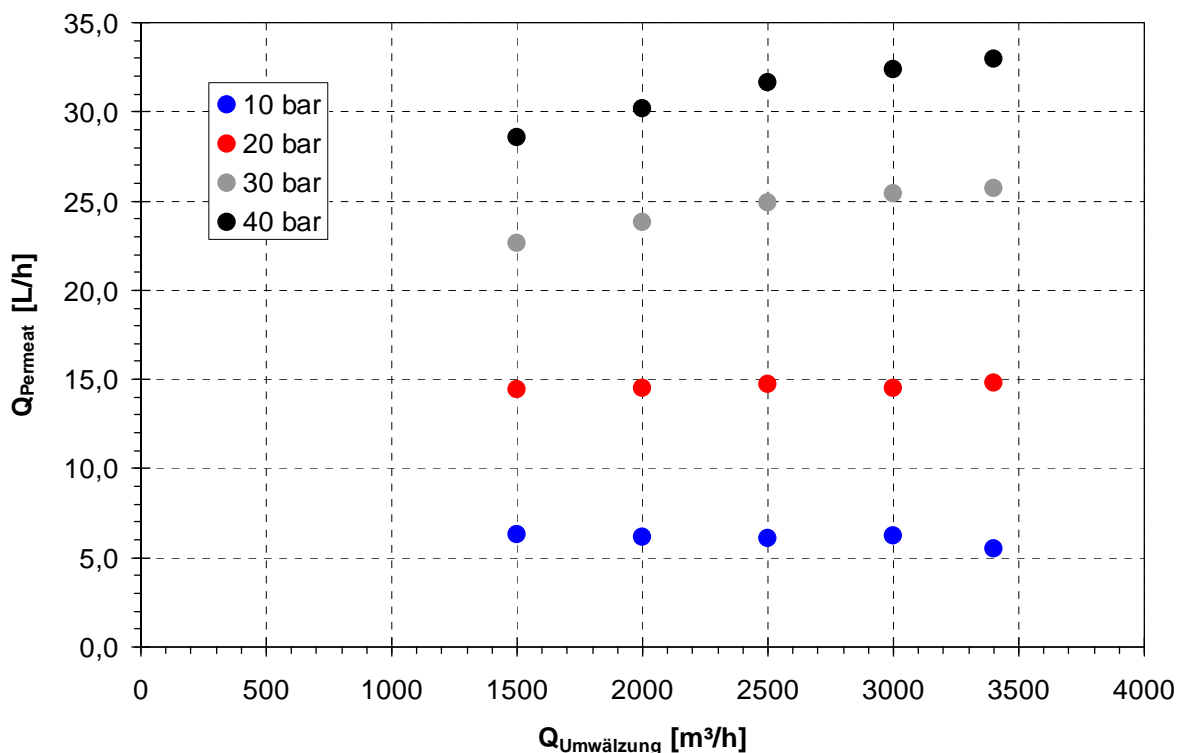


Graphik 7 Differenzdruck über Vertikal-Modul ohne und mit Wickelementen unterschiedlicher Spacergeometrie

Mit steigendem Volumenstrom, der im Vertikal-Modul umgewälzt wird steigt auch der Druckverlust Δp im Modul an. Bei $Q = 1500 \text{ L/h}$ beträgt $\Delta p = 0,45 \text{ bar}$, während bei Verdoppelung des Volumenstroms auf $Q = 3000 \text{ L/h}$ bereits $\Delta p = 1,72 \text{ bar}$ erreicht wird. Demgegenüber ist der

zusätzliche durch das Wickelement verursachte Druckverlust untergeordnet, wie im Vergleich mit Elementen unterschiedlicher Spacergeometrie deutlich wird. Elemente mit Tunnelspacer und Parallelspace zeigen nahezu gleichen Druckverlust bei gleicher Überströmung (ca. $\Delta p = 0,1$ bar bei $Q = 2500$ L/h). Elemente mit modifiziertem Tunnelspacer haben leicht erhöhten Strömungswiderstand (ca. $\Delta p = 0,2$ bar bei $Q = 2500$ L/h). Da die Prototypen der Elemente mit modifiziertem Tunnelspacer bei späteren Tests zur Ermittlung des Permeatflusses ungewöhnlich hohe Flüsse bei geringem Rückhalt aufwiesen, muss von einer Beschädigung der Membranfläche in diesen Elementen ausgegangen werden. Durch die Modifikation des Tunnelspacers wurde wahrscheinlich die Membran perforiert, da der dafür angewendete Prägeprozess noch nicht ausgereift ist. Diese Elemente werden daher bei den weiteren Tests nicht berücksichtigt.

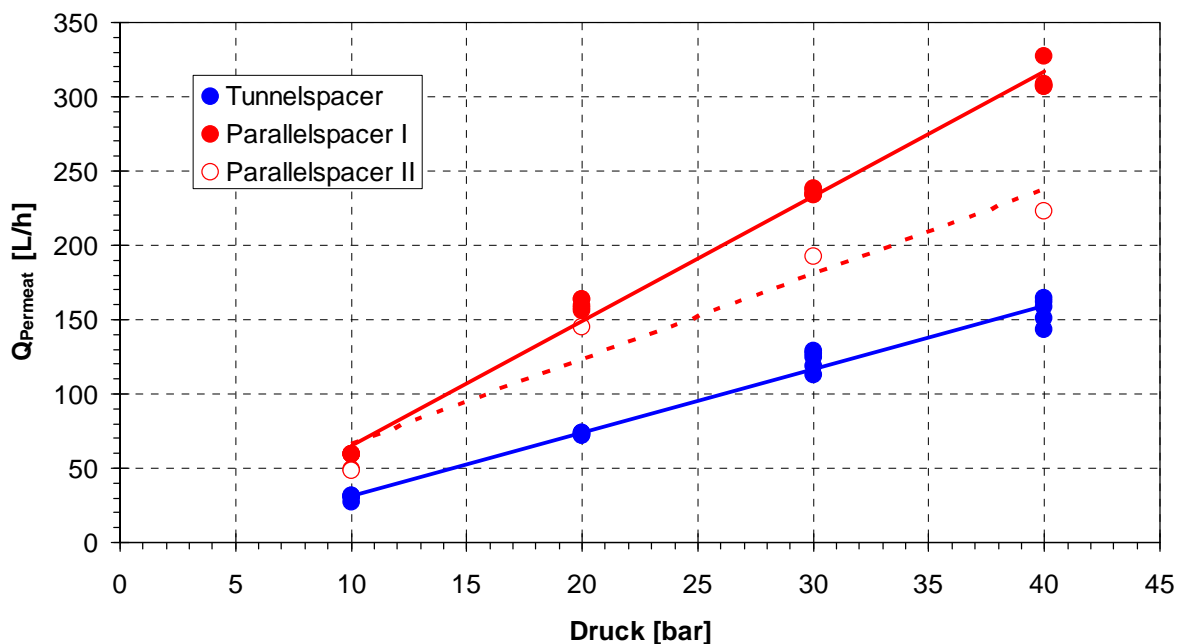
Wie bereits in den Vorversuchen auf dem Teststand des IAV der FH Köln beobachtet wurde, wird auch beim Einbau des Wickelements mit Tunnelspacer in das Vertikal-Modul bei höheren Überströmungen im Modulkreislauf ein höherer Permeatfluss registriert. Dies macht sich besonders bei hohen treibenden Druckdifferenzen bemerkbar (vgl. Graphik 8).



Graphik 8 Permeatfluss eines Wickelements mit Tunnelspacer in Abhängigkeit des Filtrationsdrucks und der Überströmung ($\text{NaNO}_3 = 5 \text{ g/L}$)

Mit steigendem Filtrationsdruck steigt auch der flächenbezogene Permeatfluss. Die Größenordnung der gemessenen Werte ist mit den Versuchen im Teststand vergleichbar. Da die NaNO_3 -Konzentration bei den Versuchen im Vertikal-Modul mit $\text{NaNO}_3 = 5 \text{ g/L}$ geringer als im Teststand ist, liegt der real erzielbare Permeatfluss geringfügig unter den im Teststand erzielten Werten.

Durch die geringere freie Membranfläche im Wickelement mit Tunnelspacer kann gegenüber Elementen mit Parallelspace bei ansonsten weitgehend identischen Versuchsbedingungen ($Q_{\text{Feed}} = 280 - 300 \text{ L/h}$, $T = 18 \text{ °C} - 22 \text{ °C}$, Variation des Umwälzstroms im Vertikal-Modul von 1500 L/h bis 3500 L/h) ebenfalls nur ein reduzierter Permeatfluss erzielt werden. Der mit steigendem Filtrationsdruck erzielbare Permeatfluss bei $\text{NaNO}_3 = 5 \text{ g/L}$ ist in der folgenden Graphik dargestellt. Zum Vergleich wurden zwei Prototypen von Wickelementen mit Parallelspace und ein Element mit Tunnelspacer heran gezogen.



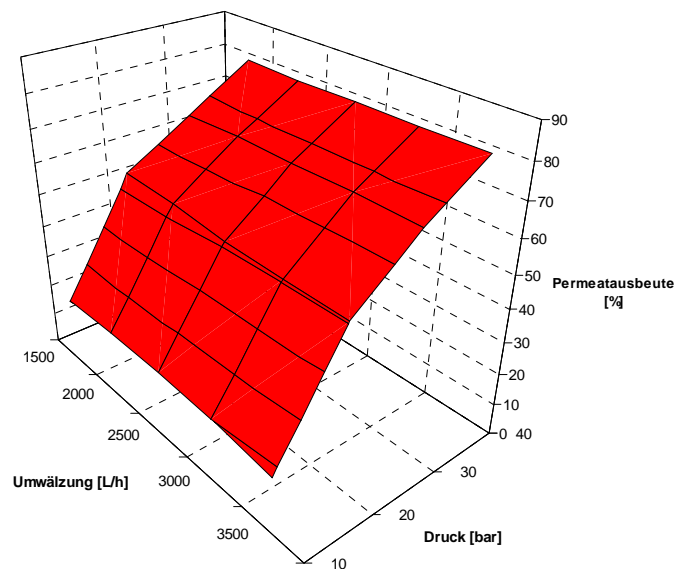
Graphik 9 *Abhängigkeit des Permeatflusses von Filtrationsdruck und Spacergeometrie ($\text{NaNO}_3 = 5 \text{ g/L}$)*

Aus den Daten wird bei vergleichbarem Filtrationsdruck unter Verwendung von Elementen mit Parallelspace ein bis zu zweifach erhöhter Permeatfluss erzielt (ähnlich der Teststandversuche in Abschnitt 2.2.2). Dieser hohe Unterschied im Permeatfluss lässt sich nicht alleine durch eine um ca. 10% erhöhte Abdeckung der Membranfläche durch den Tunnelspacer erklären (vergleiche Abbildung 6). Wie aus dem Vergleich der Elemente mit Parallelspace allein hervorgeht, weisen auch diese – eigentlich identischen Elemente – unter vergleichbaren

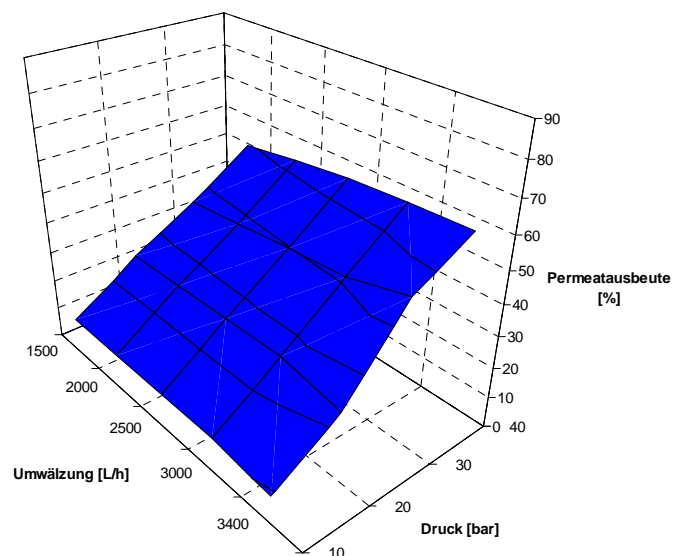
Versuchsbedingungen keinen identischen Permeatfluss auf. Als Erklärung sind damit Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der Wickelelemente durch hohe Zugkraft beim Wickeln der Elemente und evtl. zusätzlich eine schwankende Qualität des eingesetzten Membranmaterials in Betracht. Die manuelle Fertigung der Wickelemente beruht maßgeblich auf der Erfahrung der herstellenden Personen.

Die gesammelten Ergebnisse der Versuchsreihen mit Parallel- und Tunnelspacer sind in den folgenden Graphiken dargestellt. Graphik 10 stellt die erzielbare Permeatausbeute in Abhängigkeit von Filtrationsdruck und Umwälzstrom im Vertikal-Modul in zwei Testreihen dar. Graphik 11 zeigt den dabei erzielbaren Nitrat-Rückhalt in Abhängigkeit der Permeatausbeute und des Spacertyps.

Parallelspace II



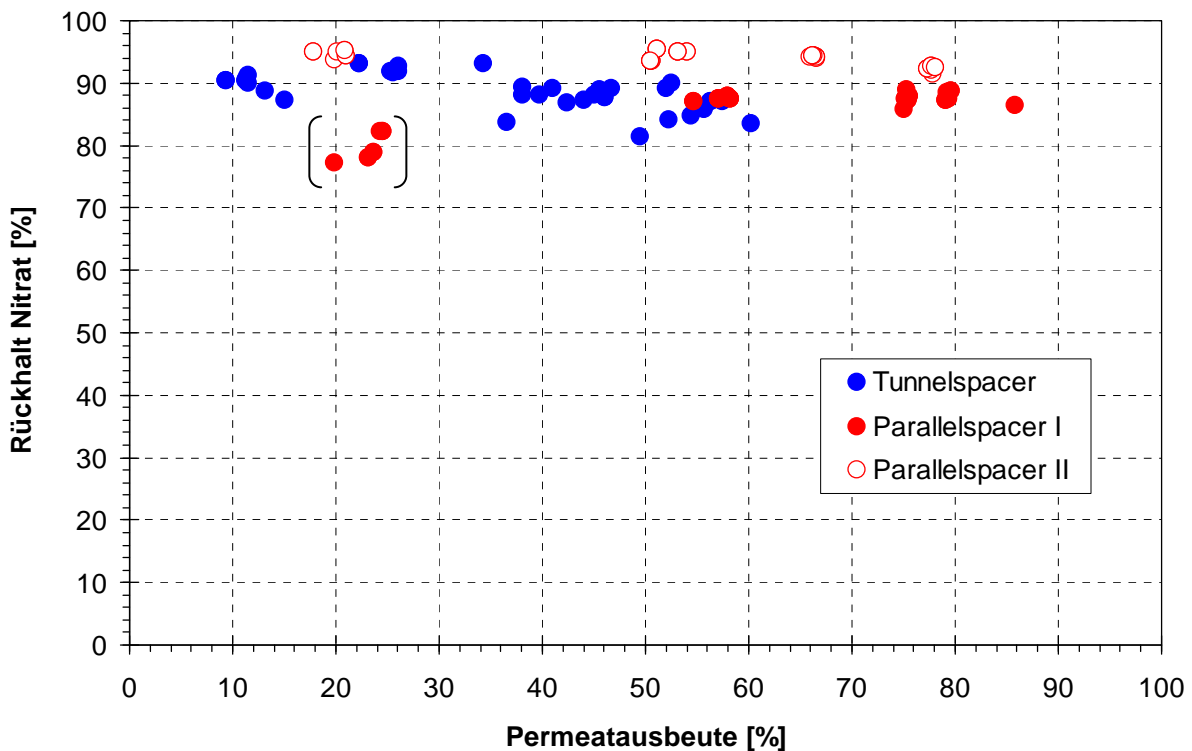
Tunnelspacer



Graphik 10 Vergleich von 2 Testreihen mit Parallelspace und Tunnelspace

Wie bereits in den Teststandversuchen ermittelt weisen Module mit Tunnelspacer eine höhere Spreizung der Permeatausbeute mit steigendem Umwälzstrom im Vertikal-Modul auf. Während mit Parallelspace die Ausbeute nicht mit zunehmender Überströmung ansteigt, kann der Anstieg mit Tunnelspacer bis zu 7% bei identischem Filtrationsdruck betragen. Bei den gewählten Versuchsbedingungen lässt sich im Element mit Tunnelspacer bei $p = 40$ bar maximal eine Ausbeute von 56 % (bezogen auf den Feed-Strom) erzielen. Im Element mit Parallelspace sind dies bis zu 78 %.

Der Vergleich des Nitrat-Rückhalts der Elemente in Abhängigkeit der Permeatausbeute zeigt zugleich, dass der Rückhalt nicht die im Teststand erzielten Werte erreicht ($R = 98$ % für Parallelspace, $R = 95$ % für Tunnelspacer bei $\text{NaNO}_3 = 10$ g/L im Teststand). Mit zunehmender Ausbeute sinkt der Rückhalt beim Tunnelspacer von ca. 92 % auf ca. 85 % ab. Die beiden Wickelemente mit Parallelspace zeigen auch hier große Unterschiede. Das Element mit höherem Permeatfluss zeigt geringeren Rückhalt. Beim Element mit besserem Rückhalt sinkt dieser mit zunehmender Permeatausbeute von ca. 95 % auf ca. 90 % ab. Auch hier bestätigen sich also fertigungsbedingte Unterschiede im Versuchsbetrieb. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Fehlstellen im Element zu diesen Ergebnissen führen.



Graphik 11 *Abhängigkeit des Nitrat-Rückhalts von der Permeatausbeute in Abhängigkeit der Spacergeometrie (Versuchszahl $n = 111$, $\text{NaNO}_3 = 5$ g/L)*

2.6 AP 6 Versuche mit Abwasser

Aufgrund der in den Versuchen ermittelten Schwankungen in Abhängigkeit des verwendeten Wickelelements wurden Versuche an ausgewählten Abwasserproben durchgeführt, die ins Werk Rossdorf der EnviroChemie GmbH geliefert wurden. Für diese Vorgehensweise sprach die bessere Verfügbarkeit von Analytik und Messtechnik als auch die Möglichkeit unmittelbar auf eventuell auftretende technische Probleme reagieren zu können. Der Versuchsaufbau für die Abwasserversuche ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Versuche wurden ebenfalls als Vergleichsversuche des Parallelspace-Elements mit dem zuvor ermittelten besten Nitrat-Rückhalt und eines Tunnelspace-Elements durchgeführt.



Abbildung 16 VRM Pilotanlage im Technikumsversuch
(links: Versuch mit Abwasservorlage, rechts: Ultraschall-Messkopf zur Überwachung der Kreislaufströmung im Vertikal-Modul)

Exemplarisch sind im folgenden Versuche mit Abwasser der Papier verarbeitenden Industrie dargestellt. Aufgabenstellung in diesen Versuchen war die Nachreinigung eines biologisch anaerob und aerob vorbehandelten Abwassers aus der Papierherstellung mittels Umkehrosmose. Das Abwasser soll zukünftig zu Recyclingzwecken erneut in die Produktion zurückgeführt werden. Nach biologischer Behandlung weist das Abwasser noch eine braune

Restfärbung auf und enthält feine Suspensa, insbesondere kleine Schlammflocken aus einer vorgeschalteten Belebtschlammanlage. Die Idee der Versuche war, die Membranbehandlung ohne zusätzliche Ultrafiltration zum Suspensarückhalt vor der Umkehrosmose durchzuführen. Das Vertikal-Modul mit Tunnelspacer-Wickelelementen sollte dafür besonders geeignet sein.

Abwasserzusammensetzung

Ein Auszug der Zusammensetzung des Produktionsabwassers wird in der folgenden Tabelle gelistet (LF = 3,1 mS/cm, pH = 8,5).

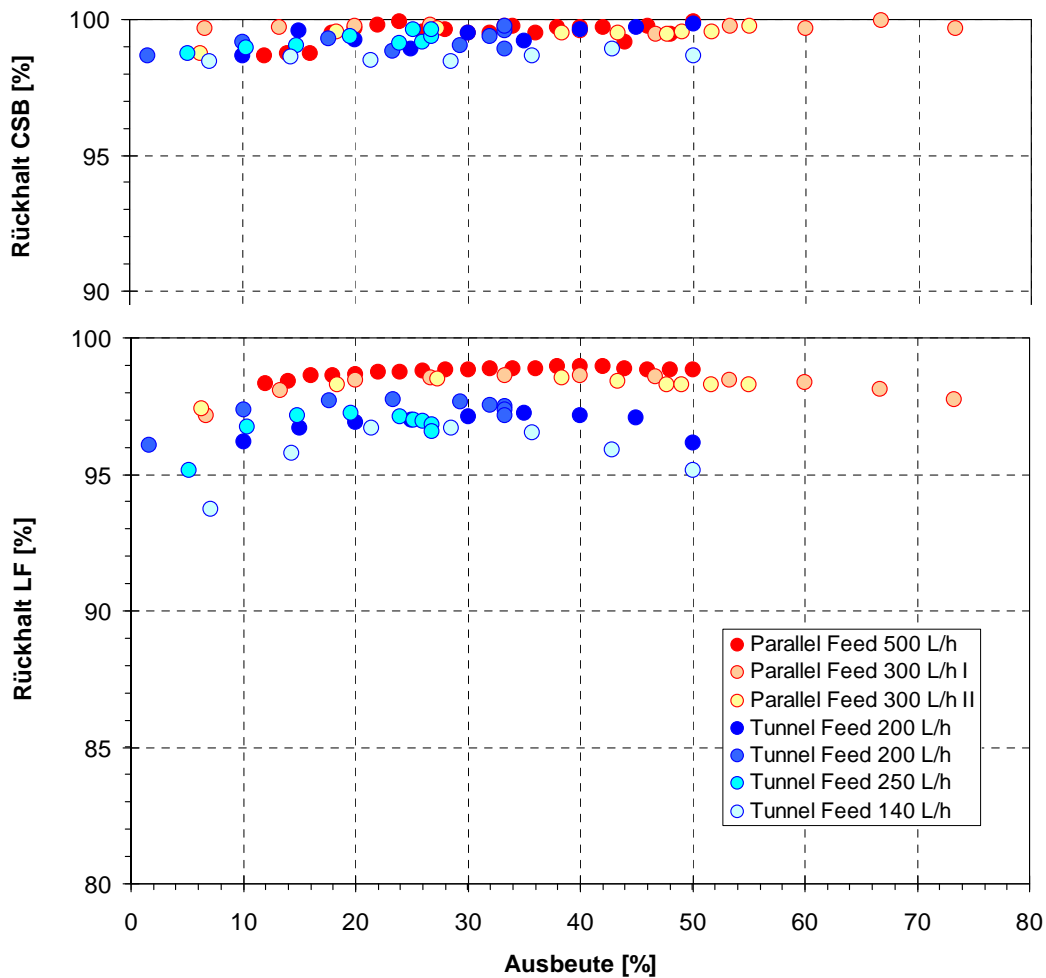
Tabelle 3 Auszug aus der Eingangsanalytik Abwasser aus der Papierproduktion

Parameter	Einheit	BG	Methode	
Bestimmung aus der homogenisierten Probe				
CSB	mg/l	15	DIN 38409 H41	295
Chlorid	mg/l	1	DIN EN ISO 10304-2	24
Sulfat	mg/l	1	DIN EN ISO 10304-2	438
Ammonium	mg/l	0,02	DIN 38406 E5	1,2
Ammonium-Stickstoff	mg/l	0,02	DIN 38406 E5	0,94
Bestimmung aus dem oxidativen Abwasseraufschluß				
Phosphor	mg/l	0,05	DIN EN ISO 17294-2	0,20
ICP-Screening aus dem oxidativen Abwasseraufschluß				
Aluminium	mg/l	0,1	DIN EN ISO 17294-2	< 0,1
Antimon	mg/l	0,1	DIN EN ISO 17294-2	< 0,1
Arsen	mg/l	0,1	DIN EN ISO 17294-2	< 0,1
Barium	mg/l	0,02	DIN EN ISO 17294-2	0,08
Beryllium	mg/l	0,002	DIN EN ISO 17294-2	< 0,002
Blei	mg/l	0,05	DIN EN ISO 17294-2	< 0,05
Bor	mg/l	0,01	DIN EN ISO 17294-2	0,29
Cadmium	mg/l	0,005	DIN EN ISO 17294-2	< 0,005
Calcium	mg/l	0,1	DIN EN ISO 17294-2	64,6
Chrom gesamt	mg/l	0,01	DIN EN ISO 17294-2	< 0,01
Eisen	mg/l	0,02	analog E DIN EN ISO 17294-2	0,93
Kalium	mg/l	5	DIN EN ISO 17294-2	11
Kobalt	mg/l	0,02	DIN EN ISO 17294-2	0,03
Kupfer	mg/l	0,01	DIN EN ISO 17294-2	< 0,01
Lithium	mg/l	0,02	DIN EN ISO 17294-2	< 0,02
Magnesium	mg/l	0,05	DIN EN ISO 17294-2	10,6
Mangan	mg/l	0,005	DIN EN ISO 17294-2	0,547
Molybdän	mg/l	0,02	DIN EN ISO 17294-2	0,03
Natrium	mg/l	5	DIN EN ISO 17294-2	617
Nickel	mg/l	0,01	DIN EN ISO 17294-2	0,04
Phosphor	mg/l	0,05	DIN EN ISO 17294-2	0,2
Schwefel	mg/l	0,05	analog E DIN EN ISO 17294-2	202
Silber	mg/l	0,01	DIN EN ISO 17294-2	< 0,01
Vanadium	mg/l	0,01	DIN EN ISO 17294-2	< 0,01
Zink	mg/l	0,02	DIN EN ISO 17294-2	0,12
Zinn	mg/l	0,05	DIN EN ISO 17294-2	< 0,05

Bei einem biologisch nicht-abbaubaren Rest-CSB von ca. CSB = 300 mg/L weist das Abwasser vor allem eine hohe Konzentration an Sulfat-Ionen auf. Neben Calcium und Magnesium trägt vor allem Barium zum hohen Scaling-Potenzial des Abwassers bei. Die Ionenbilanz zeigt einen Überschuss an Kationen, der beim vorliegenden pH durch Hydrogencarbonat kompensiert wird. Zur Verringerung des Scaling-Potenzials durch BaSO₄ und anderen Sulfat-Verbindungen bei Aufkonzentrierung an der Membran wurde dem Abwasser vor der Membranbehandlung 10 ppm eines Inhibierungsmittels auf Phosphonatbasis zugesetzt. Auf eine Einstellung des pH-Wertes mit anorganischen Säuren wurde zunächst verzichtet.

Reinigungsergebnis

In mehreren Membranläufen wurde der sowohl der CSB-Rückhalt als auch der Ionen-Rückhalt (summarisch als Leitfähigkeit) ermittelt (vgl. Graphik 12).

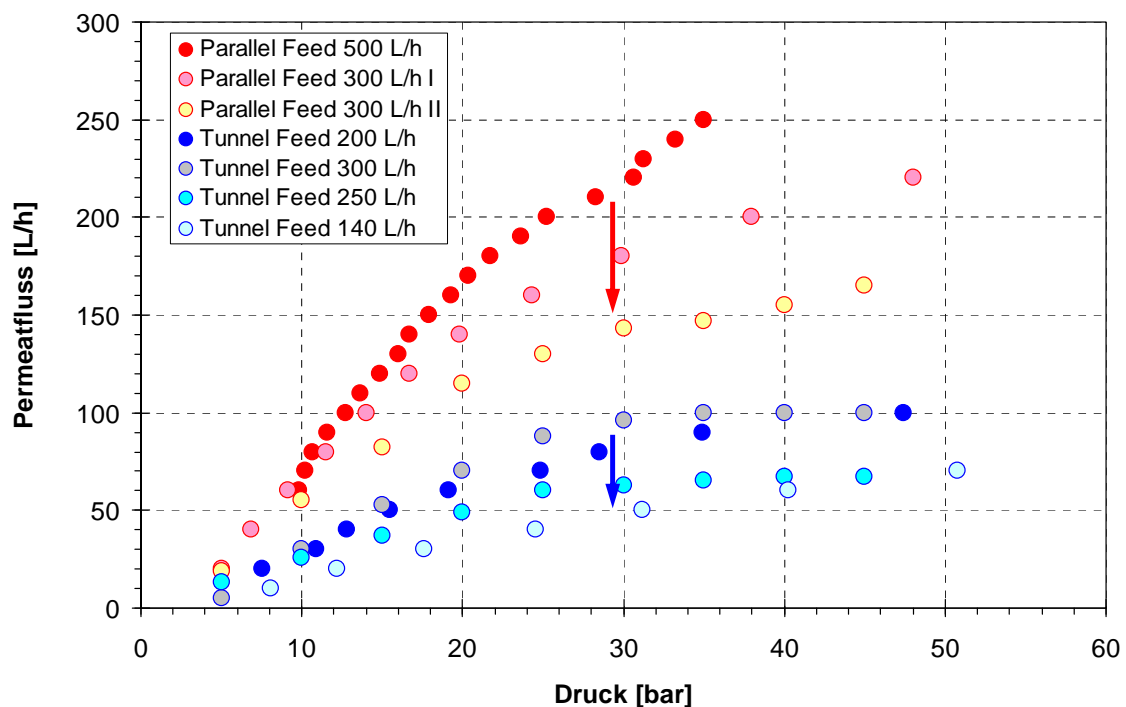


Graphik 12 Rückhalt von CSB und LF in Abhängigkeit der Ausbeute und des Elementtyps

Dabei zeigte sich, dass der CSB nahezu unabhängig von der gewählten Ausbeute zu mehr als 98 % reduziert wurde (bezogen auf den Feed-CSB). Allenfalls tendenziell war ein geringfügig schlechterer Rückhalt bei Verwendung des Wickelements mit Tunnelspacer zu verzeichnen. Für den Ionenrückhalt wurde ein größerer Unterschied zwischen den Elementen unterschiedlicher Spacertypen ermittelt (vgl. Graphik 12). Während unter Verwendung von Elementen mit Parallelspace 97 % $\leq R \leq 99$ % erreicht wurde, wurden in Versuchen mit Tunnelspacer Rückhaltungen im Bereich 95 % $\leq R \leq 98$ % erzielt. Mit zunehmender Ausbeute wurde der Rückhalt ebenfalls stärker reduziert als bei Elementen mit Parallelspace. Maximale Perematausbeuten von ca. 50 % wurden zunächst bei ca. 45 bar Eingangsdruck im Vertikal-Modul erreicht.

Permeatfluss und Membranverblockung

Wie auch bei den Versuchen mit Reinlösungen am Teststand und am Vertikal-Modul zeigte sich in Versuchen mit Abwasser die Tendenz, dass mit Tunnelspacer-Elementen geringere Permeatflüsse bei vergleichbarem Filtrationsdruck gefahren werden konnten. Die Ursachen für dieses Verhalten wurden bereits in vorangegangenen Abschnitten erläutert und bestätigen im Wesentlichen die mit NaNO_3 -Reinlösungen erzielten Ergebnisse.



Graphik 13 Rückgang des erzielbaren Permeatflusses durch Membranverblockung

Trotz Stabilisierung kam es in den Membranläufen unter Verwendung des Abwassers aus der Papierproduktion zu einer zunehmenden Verblockung der Membran, sowohl im Parallelspace- als auch im Tunnelspacer-Modul. Die in Graphik 13 dargestellten Ergebnisse der Testläufe (erzielbarer Permeatfluss als Funktion des Filtrationsdrucks) sind chronologisch geordnet. Sowohl das Element mit Parallelspace als auch das Element mit Tunnelspacer zeigten mit zunehmender Zahl der Testläufe geringeren Permeatfluss bei vergleichbarem Druck, mithin also eine zunehmende Verblockung der Membran.

Die Art der Membran verblockenden Ablagerungen konnte im Vorhaben nicht abschließend geklärt werden. Sondierende Reinigungsuntersuchungen zeigten jedoch, dass saure Reinigungen besseren Erfolg in der Wiederherstellung der ursprünglichen Membranpermeabilität zeigten als Reinigungen mit alkalischen Reinigungslösungen. Dies spricht dafür, dass es sich bei der Verblockung der Membran um fortschreitendes Scaling maßgeblich durch anorganische Ausfällungen handelte. Da jedoch eine Kombination von saurer und alkalischer Reinigung den besten Erfolg zeigte, kann auch der Beitrag organischen Foulings zur Verblockung nicht ausgeschlossen werden. Sowohl im Tunnel- als auch im Parallelspace-Element wurde eine weitgehende Wiederherstellung der Ausgangspermeabilität erzielt.

3. Bewertung der Vorhabensergebnisse

3.1 Vergleich zum Stand der Technik

Mit der Entwicklung der Membranwickелеlemente mit Tunnelspacer zum Einsatz im Vertikal-Modul ist in dem durch die DBU geförderten F&E-Vorhaben eine Technologiekombination entstanden zu der derzeit am Markt keine vergleichbare Alternative existiert. Der Tunnelspacer ist patentrechtlich geschützt und stellt damit ein Alleinstellungsmerkmal im Bereich der Membran-Wickелеlemente dar. Wie die zahlreichen Vergleichsversuche jedoch ebenfalls gezeigt haben, sind mit dieser Technik Nachteile beim Salzurückhalt und der Permeatausbeute gegenüber Elementen mit konventionellen Parallelspace-Modulen verknüpft. Versuche mit Abwasser haben bisher ergeben, dass die Einbußen beim Rückhalt organischer Verschmutzungen vergleichsweise gering sind. Der Einsatz von Wickелеlementen mit Tunnelspacer ist daher im Vorfeld genau zu prüfen und auf den Anwendungsfall abzustimmen.

Wie anhand der Dokumentation eindeutig ersichtlich wird (siehe Abbildung 12) liegt der Hauptvorteil in der feedseitig offenen Geometrie der Spiralwickелеlemente mit Tunnelspacer. Die komplett offenen Strömungskanäle sind einzigartig für Wickелеlemente und stellen eine Kombination aus dem Strömungsverhalten in Kapillarmodulen mit der relativ preiswerten Fertigungstechnik von Wickелеlementen dar. Erst diese Kombination ermöglicht für einige Membrantypen wie z.B. RO- und NF-Membranen überhaupt ein offenkanales Membranmodul.

3.2 Bewertung der Umweltentlastung

Die Umweltentlastung bei der Membranfiltration mit Tunnelspacer-Wickelementen ergibt sich primär aus dem Verzicht einer vor geschalteten Mikro- oder Ultrafiltrationsstufe zum Suspensarückhalt. Da zum Abschluss des Vorhabens noch keine absolut gesicherten Erkenntnisse über das Scaling- und Foulingverhalten der Wickelelemente mit Tunnelspacer vorliegen wird in Tabelle 4 ein Vergleichsschema mit Bewertungskriterien und deren Erreichungsgrad dargestellt. Die Auswirkungen dieser Bewertungskriterien auf die zahlenmäßige Kalkulation der Umweltentlastung können erst an einer ausgeführten Demonstrationsanlage unter realitätsnahem Dauerbetrieb ermittelt werden.

Tabelle 4 *Bewertungsschema der Umweltentlastung als Vergleich zwischen Wickelelementen mit Parallelspace und Tunnelspacer (47 mil – 50 mil)*

Kriterium	Horizontales Druckrohr mit Parallelspace-Wickelement	Vertikal-Modul mit Tunnelspacer-Wickelement	Bemerkung zum Vertikal-Modul
Toleranz gegen Suspensa	+	++	Freie Strömungsquerschnitte
Ablagerung im Druckrohr	-	+	Austrag von Ablagerungen am Modulfuß
Chemische Reinigung	o	o	Reinigungsverhalten unverändert
Mechanische Reinigung	-	+	Druckluftspülung nur im Vertikalmodul möglich
Überströmung	+	o	Umwälzstrom ca. 50 % – 100 % erhöht
Aktive Membranfläche	+	o	ca. 20 % reduziert bei Tunnelspacer
Druckverlust	+	+	Druckverlust nahezu unverändert
Permeatfluss	+	o	siehe aktive Membranfläche
Permeatqualität	++	+	geringfügig reduzierter Rückhalt
Permeatausbeute	+	o	Reduktion der Ausbeute um ca. 10 % - 15 %
Aufstellungsfläche	o	+	vertikale Bauart bietet Platzvorteile
Energiebedarf	o	+	Verzicht auf vorgeschaltete Ultrafiltration
Investition	o	+	Verzicht auf vorgeschaltete Ultrafiltration

Die maßgebliche Umweltentlastung bei Verwendung von Vertikal-Modulen mit Tunnelspacer Wickelelementen ergibt sich durch den Verzicht auf eine vorgeschaltete Ultrafiltrationseinheit. Der Energiebedarf der gesamten Filtration sinkt dadurch beträchtlich, obwohl durch die geringere Ausbeute und die reduzierte aktive Membranfläche die Baugröße der UO-Einheit größer als bei vergleichbaren Parallelspace-Elementen gewählt werden muss. Der Verzicht auf eine UF-Einheit mit Rohrmodulen überkompensiert ebenfalls den geringfügig höheren Energieeinsatz im Vertikalmodul aufgrund gesteigerter Überströmung.

3.3 Verbreitung der Vorhabensergebnisse / Umsetzung am Markt

Die Verbreitung der Vorhabensergebnisse beginnt im Jahr 2008 mit der Vorstellung des Modulkonzepts auf der Messe „IFAT“ in München. Zur Absicherung der Qualität der hergestellten Membranwickелеlemente werden derzeit mit Element-Herstellern Gespräche über ein Fertigungsabkommen bzw. eine Lizenzvereinbarung zur Fertigung geführt. Diese Vereinbarung soll zu einer qualitativ hochwertigen und reproduzierbaren Produktion der Tunnelspacer-Elemente in Deutschland oder Westeuropa führen.

Die Ergebnisse des F&E-Vorhabens stoßen bereits jetzt auf reges Interesse in der Industrie und Fachöffentlichkeit. Obwohl weitere Tests noch ausstehen, liegen konkrete Anfragen über den Einsatz von Tunnelspacer-Elementen vor für

- die Filtration zur Aufreinigung salzhaltigen Industrieabwassers, das zur Bildung kristalliner Ausfällungen neigt.
- die Filtration zum Recycling biologisch vorbehandelten Abwassers das aufgrund des Gehalts an organischen Suspensa zur Verschlämzung derzeit verfügbarer Wickelelemente mit Parallelspace führt.

Mit den Interessenten werden derzeit Gespräche über Pilotanwendungen geführt. Neben dem Einsatz der Tunnelspacer-Elemente in Vertikalmodulen bietet auch die Ersatzbestückung bereits existierender Anlagen mit horizontalen Druckrohren mit Tunnelspacer-Elementen wirtschaftliche Erfolgsaussichten. Die Vermarktungsaktivitäten werden daher nach weiteren Tests im Jahr 2008 fortgeführt.

4. Fazit

Die Entwicklung eines Vertikal-Moduls auf der Basis von Membranwickелеlementen mit Tunnelspacer bietet hohes ökologisches als auch ökonomisches Potenzial und ist derzeit weltweit einzigartig. Sowohl die Entwicklung und der Bau der Pilotanlage als auch die Herstellung der neuen Spacergeometrie mit der eigens dafür gefertigten Prägevorrichtung wurden erfolgreich durchgeführt. Die vergleichenden Versuche zum Membranrückhalt mit Reinlösungen und kolloidal belastetem Abwasser lieferten reproduzierbare Ergebnisse beim Übergang vom Teststand in die Pilotanlage. Auch wenn im F&E-Vorhaben bis dato noch nicht alle offenen Fragen zur Anwendung der Wickелеlemente abschließend geklärt werden konnten, so wird bereits jetzt das Interesse von Dritten für diese technische Lösung deutlich.

Die EnviroChemie GmbH und ihre F&E-Partner wurden durch die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in die Lage versetzt eine technische Lösung mit weitgehenden Alleinstellungsmerkmalen zu entwickeln. Dies dient einerseits der Umweltentlastung bei der energieaufwendigen Umkehrosmose hoch kolloidal und partikulär belasteter Wässer, andererseits wird damit konkret die Wettbewerbsfähigkeit im Markt gestärkt.

Vor einer erfolgreichen Markteinführung dieser Membrantechnologie sind noch einige Punkte zu klären. Insbesondere das Langzeitverhalten der neuen Wickелеlemente bedarf noch weiterer Untersuchungen. Von besonderer Bedeutung ist hierfür der Zusammenhang zwischen Geometrie des Tunnelspacers, Fertigung der Wickelmodule und erzielbarem Permeatfluss bzw. gemessenem Rückhalt. Anhand der bisherigen Versuchsergebnisse wird deutlich, dass Effekte der Konzentrationspolarisation nicht ausschließlich für Einbußen bei Permeatfluss und Rückhalt verantwortlich sein können. Eine genauere Betrachtung bzw. Variation der Randbedingungen bei der Elementherstellung (Verklebung, Permeatspacer, Zugkraft bei Wicklung etc.) soll weitere Hinweise auf fertigungsbedingte Einflüsse auf das spätere Verhalten der Wickелеlemente im Versuch geben.

Daher werden die Aktivitäten bei der EnviroChemie GmbH auch nach Abschluss des Vorhabens weiter fortgesetzt.