

Untersuchungen zur Stofftrennung in Verfahrenskombinationen aus Membrantrennstufe und Kristallisation

AiF-FV-Nr.: 11472;

Forschungsstelle:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen

Autoren/Ansprechpartner: Prof. Dr. R. Kümmel, Dipl.-Ing. J. Robert und Dr.-Ing. A. Hoffmann

Die Arbeiten wurden im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 11472 (Laufzeit 01.01.1998 – 31.12.1999) durchgeführt und wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ gefördert. Dem BMWi und der AiF wird für die Förderung gedankt.

Zusammenfassung

Bei der Aufbereitung von Elektrolytlösungen mittels Nanofiltration werden mehrwertige Ionen selektiv von der Membran zurückgehalten. Dieser Effekt lässt sich zur Abscheidung von schwerlöslichen Salzen, wie z.B. Härtebildnern, aus wässrigen Lösungen nutzen. Durch die Kombination der Nanofiltration mit einem Kristallisationsprozess ist eine Abtrennung von schwerlöslichen Salzen in kristalliner Form - ohne den Einsatz thermischer Energie oder chemischer Zusatzstoffe - möglich.

Voraussetzung für die Realisierung eines solchen Anlagenkonzeptes ist das genaue Verständnis der Vorgänge in den jeweiligen Teilprozessen der Nanofiltration, der Kristallisation und der Abscheidung sowie ihrer gegenseitigen Beeinflussung. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Grundlagengerüst erarbeitet, das - bis hin zur Simulation des Gesamtprozesses - dessen Umsetzung ermöglicht.

Es wurde ein Modell entwickelt, das die Membran als mikroporöse Trennschicht ansieht, deren Trennwirkung gegenüber Ionen allein aufgrund membranspezifischer Parameter betrachtet wird. Die Ionenkonzentration in den Poren ist bei der Stofftrennung von wesentlicher Bedeutung.

Das externe Seeding, bei dem die Übersättigung der Lösung in einem Kristaller abgebaut und der Ablauf des Kristallers nach Klärung in den Vorlagetank zurückgeführt wird, erweist sich dem bekannten Verfahren des internen Seedings, bei dem ein Kristallslurry nanofiltriert wird, als deutlich überlegen.

Sowohl externes als auch internes Seeding ermöglichen die Feststoffabscheidung in einem Kombinationsprozess. Das externe Seeding liefert jedoch bis zu viermal höhere Nanofiltrationspermeatflüsse als das interne Seeding. Erklärbar ist dies durch die sich beim internen Seeding auf der Membran bildenden Deckschichten.

Im Dauerbetrieb wurde Calciumsulfat-Dihydrat aus einem nahezu gesättigten Prozessabwasser der Rauchgaswäsche einer Müllverbrennungsanlage abgetrennt, ohne dass detektierbare Kristalle im Modul oder auf der Membran entstanden. Eine Einstellung, bei der mit 35 °C, 10 bar und einem Verhältnis von 0,1 zwischen Permeat- und Feedvolumenstrom an der Membran aufkonzentriert wurde, hat sich als optimal erwiesen. Im Kristaller wird mit einer Anfangsfeststoffkonzentration von 6 g/L bei einer Aufenthaltszeit von 30 min bei 35 °C der Abbau der Übersättigung erzwungen. Der mikrofiltrierte Ablauf des Kristallers wird in den Vorlagetank zurückgeleitet.

Wie erste praktische Untersuchungen zeigen, bietet das im Forschungsvorhaben untersuchte Verfahren für zahlreiche Einsatzgebiete, wie z.B. Abtrennung von Metallsalzen aus Beizsäuren oder Gewinnung organischer Wertstoffe aus Salzlösungen, ein erhebliches Innovationspotential.

1 Einleitung

Die Ausnutzung von metastabilen Zuständen, d.h. das gezielte Erzeugen von temporär übersättigten

Lösungen, ist eine moderne Entwicklung der Kristallisationstechnik, die neue Anwendungen in der Stofftrennung verspricht. In Kombination mit Membranverfahren, die in den letzten Jahren vor allem durch die Entwicklung säure- und laugebeständiger Membranen sowie die Bereitstellung von keramischen Membranmaterialien und die Steigerung des Betriebsdrucks bei der Umkehrosmose zu innovativen Aufgabenstellungen vorgedrungen sind, eröffnen sich neue Möglichkeiten. Mittels Nanofiltration oder Umkehrosmose können Salzlösungen bis zum Erreichen der Löslichkeitsgrenze der primär kristallisierenden Komponente aufkonzentriert werden. Die dann einsetzende Abscheidung von Feststoffen auf der Membran (Scaling) vermindert die effektive Membranfläche und begrenzt den transmembranen Volumenstrom. Diesem Effekt wurde bisher durch Zugabe von Seeding-Kristallen (Verhinderung der Primärkristallisation zugunsten des Kristallwachstums) bzw. von kristallisationsinhibierenden Zusätzen begegnet.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Kombinationsverfahren aus Membranfiltration und Kristallisation untersucht, bei dem wässrige Mehrkomponentensysteme durch gezielte Einstellung von temporären Übersättigungen der am wenigsten löslichen festen Phase dadurch aufgetrennt werden, dass Membranpermeation und Kristallisation in räumlich getrennten Kompartimenten der Anlage erfolgen und die Mutterlauge aus der Kristallisationsstufe dem Feed der Membraneinheit wieder zugeführt wird. Der Einfluss von Stoffsystem, Identität der kristallisierenden Phase und Grad der Übersättigung auf die der Kristallisation vorgelagerte Induktionsperiode konnte anhand der Fällung von Calciumsulfat-Dihydrat, der Aufbereitung von Prozesswasser der Rauchgasentschwefelung und der Aufbereitung von verbrauchten salzhaltigen Beizlösungen gezeigt werden. Ansätze zur Gewinnung organischer Stoffe in kristalliner Form wurden erarbeitet.

2 Problemstellung

Nanofiltrationsmembranen werden zur Aufkonzentrierung von organischen Inhaltsstoffen sowie zur Abtrennung von Ionen eingesetzt. Aufgrund ihres Rückhaltevermögens gegenüber Organika (Trenngrenze ca. 200 – 300 Dalton) kann ihr Porenradius - bei modellhafter Annahme einer mikroporösen aktiven Trennschicht - im Nanometerbereich angenommen werden.

Eine weitere Eigenschaft, die eine Nanofiltrationsmembran definiert, ist der selektive Ionrückhalt, d.h. die bevorzugte Rückhaltung einzelner, im allgemeinen mehrwertiger Ionen aufgrund von Oberflächenladungen in der polymeren Membranmatrix. Insbesondere in Gegenwart sowohl einwertiger als auch mehrwertiger Ionen kann mit der Nanofiltration eine Aufkonzentrierung allein der mehrwertigen Ionen durchgeführt werden.

Sowohl hinsichtlich der molekularen Trenngrenze als auch hinsichtlich der aufzubringenden transmembranen Druckdifferenz lässt sich die Nanofiltration zwischen der Umkehrosmose und der Ultrafiltration einordnen (Abb. 2.1). Bei gleicher transmembraner Druckdifferenz ist bei der Nanofiltration ein gegenüber der Umkehrosmose höherer Filtratfluss zu erwarten.

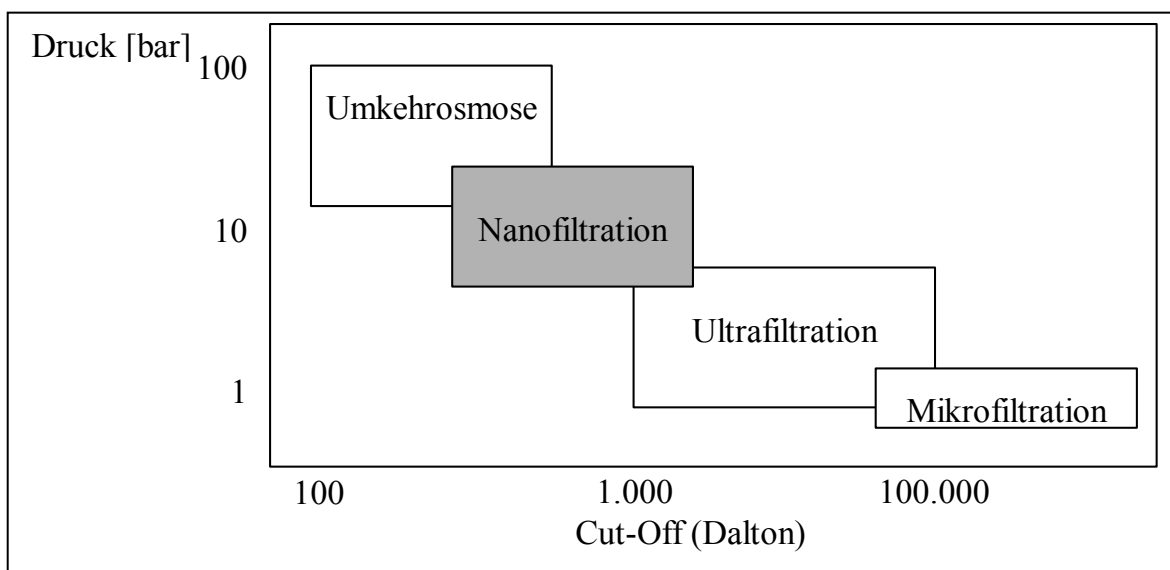


Abb. 2.1: Einordnung der Nanofiltration

Aufgrund dieser spezifischen Eigenschaften ist es mit der Nanofiltration möglich, Scalingbildner, die größtenteils aus mehrwertigen Ionen aufgebaut sind, aus Lösungen zu entfernen. Das Feed wird dabei in ein übersättigtes Konzentrat und in ein Permeat mit einem reduzierten Scalingpotential aufgetrennt. Durch die selektive Aufkonzentrierung und Übersättigung der schwerlöslichen Komponenten kommt es auch bei der Nanofiltration zum Scaling auf der Membran, wenn keine alternative Möglichkeit für den Abbau der Übersättigung existiert.

Bei der Seeding-Technik, die u.a. bei der Eindampfung von zum Scaling neigenden Flüssigkeiten eingesetzt wird, verringert die Zugabe von Kristallisationskeimen zur einzudampfenden Lösung die Bildung von Ablagerungen an den wärmeübertragenden Flächen, an denen aufgrund der Verdampfung des Lösungsmittels lokal übersättigte Zustände auftreten können. Die Zugabe von Seeding-Kristallen bewirkt dabei den bevorzugten Abbau der Übersättigung in der Lösung an den vorhandenen arteigenen Kristallobereflächen gegenüber der Kristallisation an den Wärmetauscherflächen.

Diese Seeding-Technik wurde bereits bei membrantechnischen Verfahren wie der Elektrodialyse und der Umkehrosmose eingesetzt. Im Deponiesickerwasserbereich wird die Anwendung der Nanofiltration in Kombination mit der Hochdruck-Umkehrosmose untersucht. Der zulaufende Abwasserstrom wird dabei vermischt mit der Seeding-Suspension dem Membranmodul zugeführt und dort aufkonzentriert. In einem anschließenden Abscheider können Überschusskristalle und Konzentrat voneinander getrennt werden.

Ein Problem, das bei dieser Verfahrensweise auftreten kann, ist, dass sich neben den bereits vorhandenen Transportwiderständen an der Nanofiltrationsmembran eine Deckschicht durch sedimentierende Kristallisationskeime aufbaut, die durch regelmäßige Spülungen entfernt werden muss.

3. Lösungsansatz

Aus der Kristallisationstechnik ist bekannt, dass, wie Abb. 3.1 zeigt, zwischen dem Zeitpunkt des Erreichens der Übersättigung und dem Beginn der Kristallisation eine vom Stoffsystem und von der Höhe der Übersättigung abhängende zeitliche Verzögerung auftreten kann. Diese Induktionszeit stellt eine theoretische Möglichkeit dar, mit der die Deckschichtbildung beim Einsatz der Seeding-Technik für die Membranfiltration umgangen werden kann.

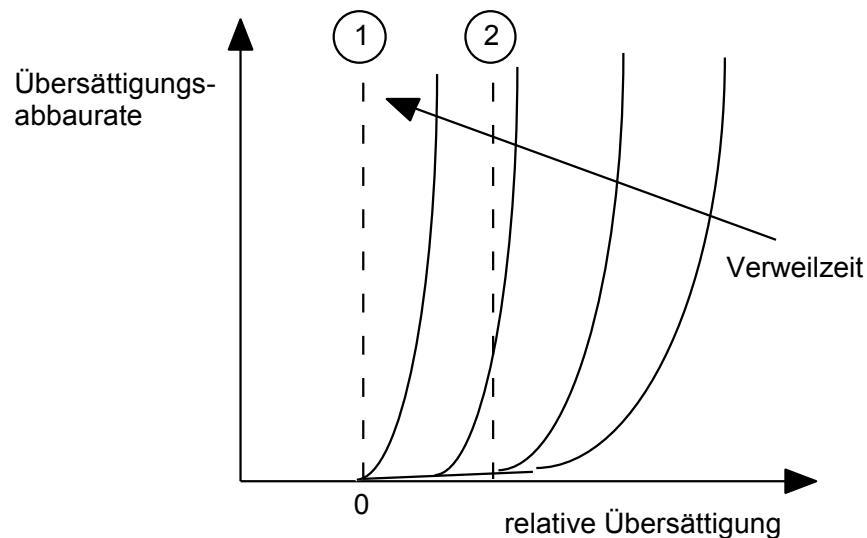


Abb. 3.1: Einfluss der Übersättigung und der Zeit auf den Übersättigungsabbau

Eine denkbare Variante des Seeding in Kombination mit einem Membranverfahren ist in Abb. 3.2 dargestellt, in der die Membranfiltration und der Seeding-Prozess in zwei räumlich getrennte Schritte aufgeteilt werden. Dabei soll die nahezu gesättigte Lösung durch die Membranfiltration übersättigt (②, vgl. auch Abb. 3.2) und innerhalb einer Zeitspanne, die kürzer ist als die dem Übersättigungsgrad entsprechende Induktionszeit der Kristallisation, aus dem Membransystem ausgeschleust werden. Die übersättigte Lösung wird anschließend in einer idealen Kristallisationsumgebung, d.h. an arteigenen Seeding-Kristallen, unter turbulenten Strömungsverhältnissen abgebaut. Durch die Rückführung der gesättigten (①, vgl. auch Abb. 3.2) und feststofffreien Lösung in die Membranvorlage kann ein kontinuierliches Verfahren zur Abscheidung schwerlöslicher Inhaltsstoffe in kristalliner Form ohne den Einsatz von thermischer Energie realisiert werden.

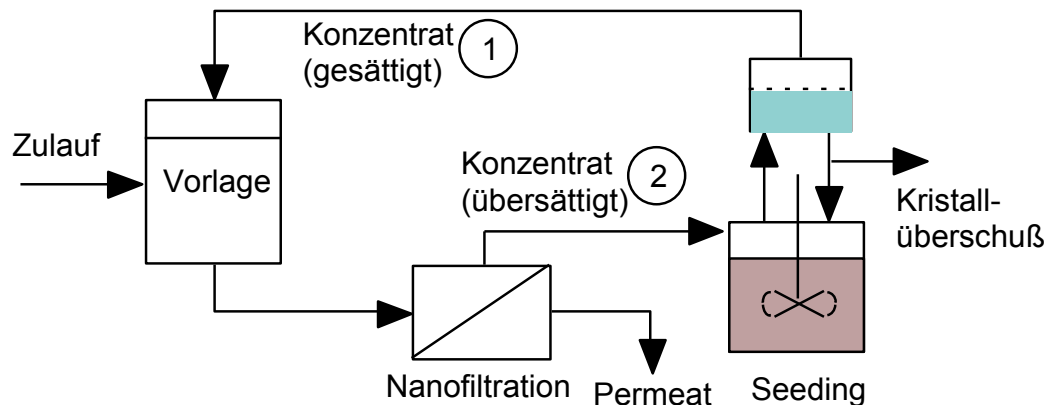


Abb. 3.2: Das Verfahrensprinzip des externen Seeding

4 Anlagenkonzept

Das Feed wird im Vorlagebehälter (B1) durch einen Thermostatisierungskreislauf mit Plattenwärmetauscher (W1) und Durchlauferhitzer (W2) auf eine konstante Temperatur eingestellt. Über eine Zulaufpumpe (P3, $p_{\max}=25$ bar) wird das Feed über einen Vorfilter (F1) in den Membranmodulkreislauf (MTMA-Modul) gefördert, in dem durch eine zusätzliche Pumpe (P4) die Überströmungsgeschwindigkeit der Membran vervielfacht wird. Das durch die Membran hindurchtretende Filtrat gelangt zum Permeatbehälter (B3). Der Zulauf des Kristallers wird hinter dem Druckminderventil der Nanofiltration entnommen, und der Ablauf wird zurück in den Feedbehälter geleitet. Die Durchmischung der Suspension erfolgt mittels einer Kreiselpumpe (P8), die den Kristaller von unten anströmt und das Medium über ein Tauchrohr entnimmt. Die Kristalle werden über eine Mikrofiltration (F2) abgeschieden.

Ein vereinfachtes Fließbild der Nanofiltrationsanlage ist in Abb. 4.1 dargestellt.

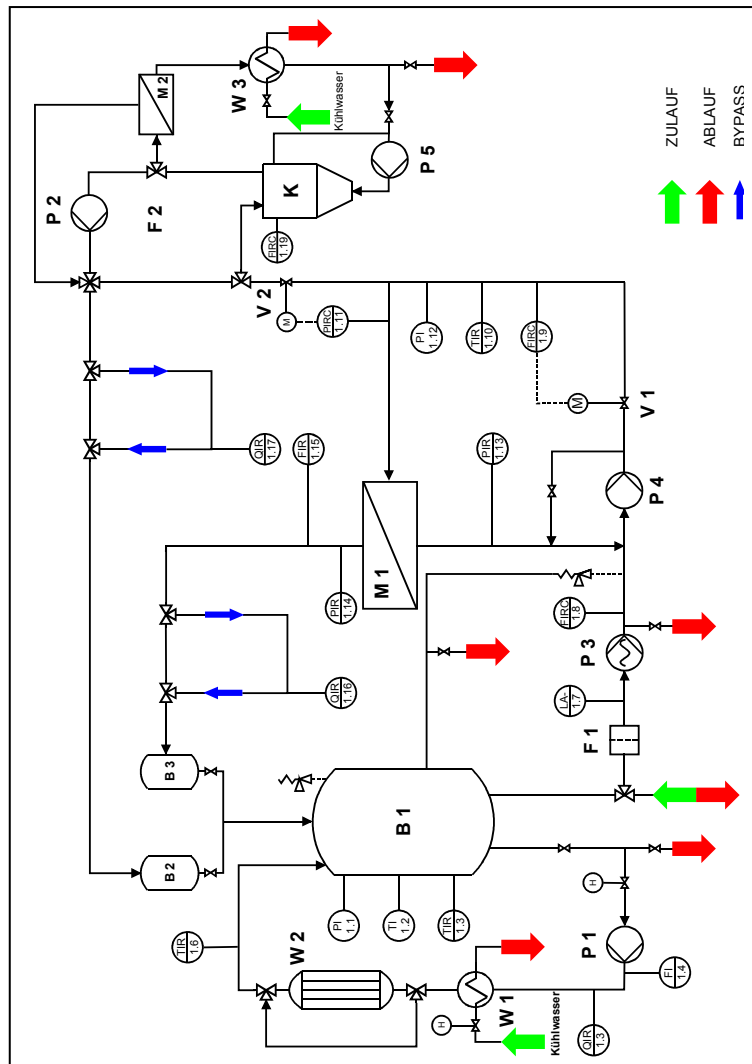


Abb. 4.1: R&I-Fließbild der Nanofiltrationsanlage

5 Ergebnisse

Das Verfahren des externen Seedings kann durch eine Reihe von Prozessparametern beeinflusst werden. Da es sich hierbei um ein System handelt, das den metastabilen Zustand von übersättigten Lösungen ausnutzt, ist es notwendig, die Beeinflussbarkeit und die Stabilität des Systems in Abhängigkeit von den Prozessparametern genau zu kennen. Der Druck im Feed sowie das Verhältnis zwischen Permeatvolumenstrom und Feedvolumenstrom haben einen großen Einfluss auf die Nanofiltration. Im Kristallisationsprozess bestimmen die Temperatur im Kristaller, die Aufenthaltszeit der Lösung sowie die Anfangsfeststoffkonzentration den Kristallisationsgrad.

Im Betrieb der Calciumsulfat-Dihydrat-Abtrennung hat sich eine Standardeinstellung, bei der die Lösung mit 35 °C, 10 bar und einem Verhältnis von 0,1 zwischen Permeat- und Feedvolumenstrom an der Membran aufkonzentriert wird, als geeignet erwiesen. Im Kristaller wird mit einer Anfangsfeststoffkonzentration von 6 g/L bei einer Aufenthaltszeit von 30 min bei 35 °C der Abbau der Übersättigung durchgeführt.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Kombinationsverfahrens auf ein industrielles Abwasser wurde das REA-Abwasser aus mehreren Müllverbrennungsanlagen eingesetzt. Es handelt sich um vorbehandeltes Abwasser, bei dem zuvor die Schwermetalle in einer Fällungsstufe entfernt worden sind. Die Zusammensetzung der Chargen ist in **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.5.1** dargestellt.

Wegen der erheblichen Chlorid- und Calciumkonzentrationen und der daraus resultierenden osmotischen Druckdifferenz wurde die Nanofiltration bei 20 bar betrieben. Die Temperatur an der

Membran und im Kristaller wurde auf 35 °C eingestellt.

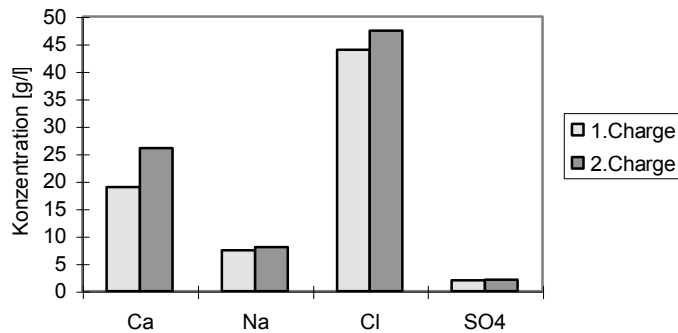


Abbildung 5.1: Zusammensetzung der REA-Abwasserchargen, die zur Aufbereitung an der Kombinationsanlage eingesetzt wurden

Die Konzentrationsverläufe und der Permeatfluss des über 45 Stunden laufenden Versuchs, dies entspricht 8 Versuchstagen, bei denen die Membranen kontinuierlich mit dem Medium betrieben wurden, sind in **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.5.2** aufgetragen. Nach Versuchsende wurden die Membranen ausgebaut und gereinigt. Es waren keine kristallinen Ablagerungen auf den Membranen oder im Modul zu erkennen. Zur Abschätzung der Permeatflussabnahme aufgrund des gestiegenen osmotischen Drucks wurden die gereinigten Membranen wieder eingebaut und der Fluss gegenüber der konzentrierten Lösung erneut bestimmt. Die Ursache des Flussabfalls kann aufgrund dieser Untersuchung zu ca. 80% auf den Anstieg der osmotischen Druckdifferenz zurückgeführt werden. Der Fluss lag zum Versuchsende bei 25% des Flusses der Untersuchungen mit 10 bar an binären gesättigten Calciumsulfatlösungen. Das heißt, dass durch eine Anhebung des Drucks im Feed bis hin zu den derzeitigen Obergrenzen der Nanofiltration (60 bar) eine Steigerung im Durchsatz zu erzielen sein wird, ohne in einen - hinsichtlich des Scalings - kritischen Bereich zu gelangen.

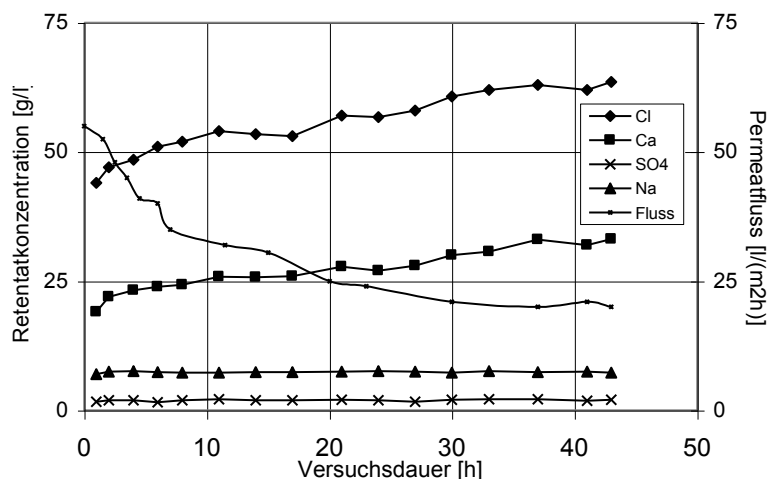


Abbildung 5.2: Fluss- und Konzentrationsverlauf für die wesentlichen Inhaltsstoffe über den Versuchsverlauf

Daraus ist ersichtlich, dass sowohl die Natriumionen als auch das Sulfat nicht aufkonzentriert werden. Aufgrund der guten Rückhalteeigenschaften der Membranen gegenüber den Calciumionen konzentrieren diese sich gemeinsam mit dem in ausreichender Menge zur Verfügung stehenden Anion - dem Chlorid - auf, was aus der Darstellung hervorgeht. Die leicht geänderte Zusammensetzung des

nach 17 h erstmals eingesetzten Abwassers der 2. Charge hat aufgrund der Vermischung mit dem in der Vorlage noch vorhandenen Konzentrat keinen Einfluss auf den Versuchsverlauf.

Für das Sulfat wird der höchste Rückhalt erzielt. Die Konzentration des Sulfats wird durch das externe Seeding auf einem konstanten Wert gehalten. Aus einer Massenbilanz für das Sulfat ergibt sich, dass über die 45 h Versuchsdauer ca. 1 kg $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ als Feststoff im Kristallisator abgeschieden wurde.

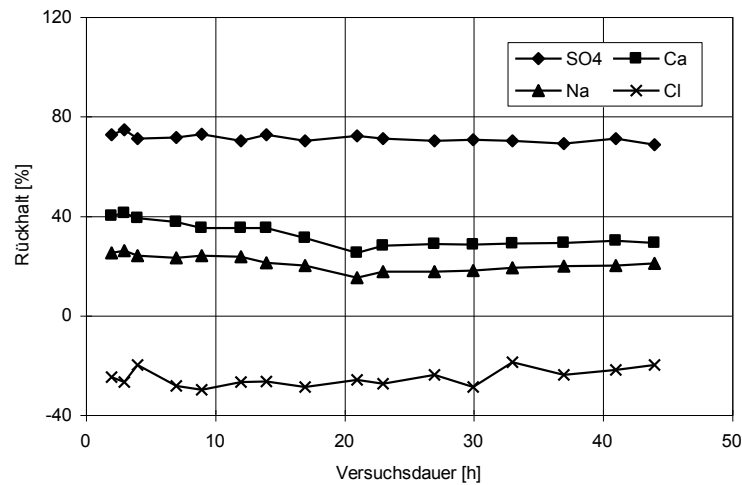


Abbildung 5.3: Rückhalt der Membran über den Versuchsverlauf

Ein konstanter Wert hinsichtlich des Permeatvolumenstroms und somit der Calciumionenkonzentration und der Chloridkonzentration hat sich nach 40 Stunden eingestellt. Dies bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt die zugeführten Ionenkonzentrationen des REA-Abwassers den Ionen entsprechen, die durch das Permeat abgeführt werden.

6 Anwendungspotentiale

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes lassen sich in vielfältigen Wirtschaftszweigen und Fachgebieten nutzen und liefern damit einen Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kleineren und mittleren Unternehmen, die besonders in den folgenden Bereichen als Anlagenbauer oder -betreiber auftreten.

Ein wesentlicher Anwendungsbereich liegt in der metallbe- und verarbeitenden Industrie. Bei der Be- und Verarbeitung von Metallen entstehen auf den Metalloberflächen Zunder und Oxide sowie weitere Korrosionsprodukte, die - dem Stand der Technik folgend - vor nachfolgenden Verarbeitungsstufen mit Hilfe von Säuren entfernt werden müssen. Die dafür genutzten Säure- oder Beizbäder haben nur eine begrenzte Nutzungsdauer, bevor die Konzentration der sich bildenden Metallkomplexe und anderer schwer löslicher Verbindungen so weit gestiegen ist, dass die Menge der freien Säure nicht mehr zur Fortführung des Beizprozesses ausreichend ist und sie erneuert werden muss. Jährlich werden ca. 1,3 Mill. Tonnen Prozesslösungen aus der Metallindustrie als Sonderabfall entsorgt. Ursachen dafür sind u.a. die relativ geringe Nutzungsdauer konzentrierter Prozesslösungen und der Mangel an verfügbaren Regeneriertechnologien. So werden allein in Deutschland jährlich etwa 30.000 t Salzschlamm aus verbrauchten Mischsäurebeizen (Gemisch aus Salpeter- und Flusssäure) mit einem durchschnittlichen Preis von etwa 700,- DM pro Tonne entsorgt. Hemmnis für die durchgängige Benutzung von Aufarbeitungstechnologien zur Rückgewinnung von Mischsäuren ist die Unwirtschaftlichkeit der herkömmlichen Techniken.

Durch neuartige Membranmaterialien erscheint es heute denkbar, in zahlreichen Anwendungsfällen verunreinigte Säuren und Laugen von den gelösten Schmutzstoffen und Salzen zu befreien und sie so bis zur Wiederverwendbarkeit aufzubereiten.

Im Rahmen dieses Projektes wurden einige kommerzielle Membranen hinsichtlich ihrer chemischen

Stabilität, ihrer Rückhalteeigenschaften und ihres Leistungsvermögens eingehend untersucht. Zur Metallionenabtrennung verbrauchter Säuren aus der Metalloberflächen bearbeitenden Industrie konnten Membranen gefunden werden, die bei bestimmten Prozessparametern den gewünschten Anforderungen entsprachen.

Bezüglich der Beständigkeit übertrafen die aus Polyethersulfon gefertigten Membranen die aus Polyamid gefertigten. Als beständig erwiesen sich diese Membranen in 10 Gew.-%iger Schwefelsäure. In Salzsäure und noch stärker in Salpetersäure zeigte sich schon nach vier Wochen eine deutliche Membranveränderung.

Für Kupfer-, Eisen- und Zinksulfate wurden Rückhalteraten zwischen 60 % und 90 % erreicht.

Diese dürften für ein Recycling in Galvanikprozessen völlig ausreichend sein, da letztlich nur das Niveau des Salzgehaltes im Beizbad gesenkt bzw. konstant niedrig gehalten werden soll.

Hinsichtlich der Schwefelsäure ergab sich ein deutlich negativer Rückhalt, d.h. sie wurde im Permeat angereichert. Bei einer Zulaufkonzentration von ca. 100 g/l wurde eine Gesamtpermeatkonzentration von 120 g/l erzielt.

Die hier betrachteten Galvaniksäuren enthielten Salzkonzentrationen nahe an ihrer Sättigungsgrenze. Durch die Aufkonzentrierung wurde diese überschritten. Unter Ausnutzung der Induktionszeit gelang es, die resultierende Kristallisation nicht im Membranmodul, sondern in einem externen Kristallisator stattfinden zu lassen.

Die im letzten Teil dieser Arbeit durchgeführte Simulation eines kontinuierlichen Hybridprozesses aus Nanofiltration und Kristallisation ergab für die NF 45 Membran eine 99 %ige Schwefelsäureausbeute bei 80 %iger Salzausschleusung.

Da mit einer weiteren Verbesserung der chemischen Beständigkeit von Nanofiltrationsmembranen zu rechnen ist, dürfte das hier vorgestellte Aufbereitungsverfahren in den nächsten Jahren der Schließung von Wertstoffkreisläufen bedeutende Impulse geben.

Die Verfahrenskombination könnte weiterhin überall dort Anwendung finden, wo es um die Abscheidung oder Fraktionierung organischer Stoffe aus dem Bereich der Naturstoffchemie, wie beispielsweise Mono-, Di- und Oligosaccharide, Aminosäuren, Peptide, Proteine usw. sowie von Wertstoffen der pharmazeutischen Produktion geht. Es erschließt die Möglichkeit, wertvolle Naturstoffe aus Prozessströmen zu gewinnen, deren Gehalt an nutzbaren Inhaltsstoffen bisher als zu gering eingestuft wurde, um diese wirtschaftlich zu gewinnen. Insbesondere gilt dies für kleinere und mittlere Unternehmen der Nahrungsmittelindustrie.

In der Rauchgaswäsche liegt ein weiterer Anwendungspunkt, der in diesem Forschungsprojekt als Hauptuntersuchungspunkt gewählt wurde. Das Washwasser ist nach der Absorption unter anderem stark mit Calciumsulfat belastet, das daraus wieder entfernt werden muss, um ein einleitfähiges Abwasser zu erhalten. Die Verfahrenskombination von Nanofiltration und Kristallisation ermöglicht die selektive Ausschleusung von einwertigen Ionen, so dass in der Kristallisation ein reines Produkt anfällt, das einer weiterführenden Nutzung offen steht, und ein einleitfähiges Abwasser, das im wesentlichen nur noch einwertige Salze enthält. Bei der Eindampfung entsteht dazu im Gegensatz ein Mischprodukt aus verschiedenen kristallinen Stoffen. Ein weiterer Vorteil ist der geringere Energiebedarf gegenüber der Eindampfung und das Ausbleiben der Bildung von Salzkrusten, wie es in der Eindampfung erfolgt und zur Verschlechterung des Wärmeübergangs sowie unter Umständen zur Zerstörung der Wärmeüberträger führt.

Die Einleitwerte für Calciumsulfat sind regional sehr unterschiedlich. Da es betonkorrosiv wirkt, ist seine Einleitung oftmals beschränkt. Natriumchlorid, das oft als zusätzliches Salz in den Abwasserströmen gelöst ist, unterliegt nur in Ausnahmefällen einer deutlichen Einleitbeschränkung. Abwasser der Rauchgaswäsche enthält bis zu 5 % Natriumchlorid. Es darf z.B. in Frankreich nach der Calciumsulfatentfernung eingeleitet werden.

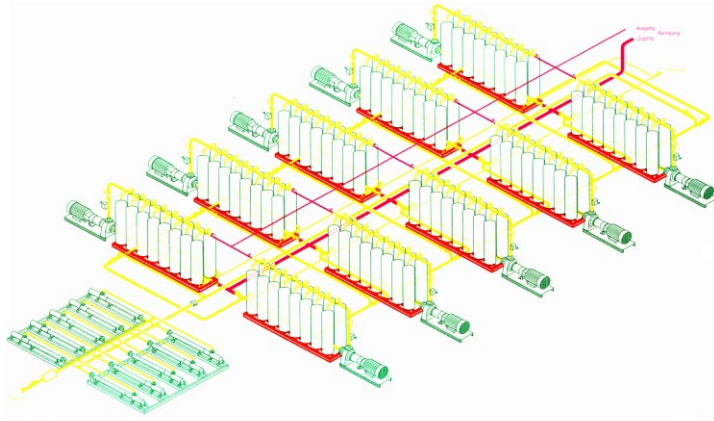


Abbildung 6.1: Modellanlage mit 5000 m² Filterfläche

Die beschriebene Anlagentechnik ist modular aufgebaut. Vom Kleinchargenbetrieb bis zur Anlage mit 200 m³ Stundenleistung sind Kosten und Anlagenabschätzung erstellt worden. In **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** ist eine Anlage mit 5000 m² Filterfläche für etwa 200 m³/h gesättigte Calciumsulfat-Lösung dargestellt.

7 Literaturhinweis

Kombination aus Nanofiltration und Kristallisation - Chancen für umweltverträgliche Stofftrennung und Stoffabscheidung, Prof. Dr. Kümmel, Dr.-Ing. A. Hoffmann und Dipl.-Ing. J. Robert, Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen, VDI Seminar in Düsseldorf am 26. und 27. November 1998

Stofftrennung an Nanofiltrationsmembranen – neue Konzepte der Aufbereitung von Prozessströmen, Prof. Dr. Kümmel, Umweltverfahrenstechnisches Seminar, Bremen, 18. Mai 1999

Kombination aus Nanofiltration und Kristallisation zur Abtrennung von schwerlöslichen Salzen – Calciumsulfatabtrennung in der Rauchgasreinigung, Dipl.-Ing. J. Robert, VDI Seminar in Düsseldorf am 22. und 23. November 1999