

Berghof Filtrations- und Anlagentechnik GmbH & Co KG
(Bewilligungsempfänger)

Erprobung eines hocheffizienten energiearmen Verfahrens auf Basis einer thermophilen Biologie und Membranfiltration zur Prozesswasserrückgewinnung

Schlussbericht zum Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az.: 25332 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

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

Joachim Tränkner, Christian Weiß, Textilwerk Rökona GmbH, Tübingen

Dr. Ulrich Leitz, Berghof Filtrations- und Anlagentechnik GmbH & Co KG, Eningen

September 2008

Inhaltsverzeichnis:

1. ZUSAMMENFASSUNG	3
2. EINLEITUNG	5
2.1 AUSGANGSSITUATION.....	5
2.2 STAND DER VORARBEITEN ZUM VERBUNDVORHABEN	5
3. ZIELSETZUNG DES VORHABENS	9
4. BEHANDLUNGSKONZEPT UND LÖSUNGSWEG	9
4.1 BEHANDLUNGSKONZEPT.....	9
4.2 LÖSUNGSWEG	11
4.2.1 VORFILTRATION	11
4.2.2 THERMOPHILE ANAEROBIOLOGIE	11
4.2.2 MEMBRANTECHNIK.....	13
4.2.3 WIEDERVERWENDUNGSVERSUCHE	16
5. VERSUCHSERGEBNISSE	17
5.1 ENTWICKLUNG TEXTILBASIERTER TRÄGERMATERIALIEN ZUR IMMOBILISIERUNG VON MIKROORGANISMEN	17
5.2 BEHANDLUNG VON WASCHWÄSSER AUS DER GEWIRKEVORBEHANDLUNG.....	19
5.2.1 AUFBEREITUNG MITTELS THERMOPHILER ANAEROBER BIOLOGIE	19
5.2.2 NACHBEHANDLUNG MITTELS LOW-ENERGY ULTRAFILTRATION	20
5.2.3 WEITERBEHANDLUNG MITTELS NANOFILTRATION	23
5.3 BEHANDLUNG VON FARBABWÄSSER.....	25
5.3.1 PROZESSANALYSE	25
5.3.2 AUFBEREITUNG MITTELS NANOFILTRATION	28
5.3.3 NF-KONZENTRATBEHANDLUNG.....	30
5.4 WIEDERVERWENDUNGSVERSUCHE	32
5.4.1 LABORFÄRBEVERSUCHE	32
5.4.2 PRAXISVERSUCHE.....	33
6. KOSTENBETRACHTUNG.....	36
7. MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER VORHABENSERGEBNISSE.....	37
8. FAZIT UND AUSBLICK.....	37
9. LITERATURVERZEICHNIS	38

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde vom ITV Denkendorf und der Fa. Berghof ein innovatives Reinigungsverfahren auf biologischer und membrantechnischer Basis zur Prozesswasserrückgewinnung beim Textilwerk Rökona in Tübingen eingesetzt und erprobt. Dabei sollte zur Behandlung von heißen hochbelasteten Abwasserteilströmen aus der Gewirkewäsche und Färberei neben einer verfahrenstechnisch optimierten anaeroben thermophilen Biologie erstmals aufgrund eines neu entwickelten Wasser-Belüftungssystems eine energiearme Membranfiltration zur Wiedergewinnung zum Einsatz kommen. Das wesentliche Ziel des Reinigungsverfahrens zur Kreislaufführung war die Wiedergewinnung von heißem Brauchwasser (50 bis 60°C) und dadurch simultane Reduktion der Kosten für Frischwasser, Heizenergie und Abwassergebühren.

Aufbauend auf den Ergebnissen eines abgeschlossenen DBU-Projektes (Az. 23273) wurde im Rahmen des Projektes zunächst ein textiles Trägermaterial zur Ansiedlung von Mikroorganismen im anaeroben Bioreaktor weiter optimiert, um dessen spezifische Oberfläche zu vergrößern. Durch den Einsatz des entwickelten Trägerverbundwerkstoffes auf Basis von Textilien und Braunkohlekoks konnte eine Verbesserung der TOC-Abbauraten erreicht werden. Im Durchschnitt lag der TOC-Abbaugrad für den Abwasserteilstrom aus der Wäsche bei 29 %. Das Hauptaugenmerk der Versuche lag jedoch nicht alleine auf dem vollständigen Abbau der organischen Substanzen, sondern auf deren Aufspaltung bei kurzen Verweilzeiten, um die anschließende Filtrierbarkeit mittels Ultrafiltration zu verbessern. Dieses Ziel konnte durch die anaerobe thermophile Vorbehandlung erreicht werden.

Versuche zur Aufbereitung der biologisch vorbehandelten Waschwässer mittels einer neu entwickelten Low-Energy Ultrafiltration (UF) zeigten über mehrere Monate hinsichtlich der Permeatleistung und -qualität sowie Zuverlässigkeit gute Ergebnisse. Der Permeatfluss lag zwar mit 36,5 l/(m²·h) unterhalb der Leistung von Standard-Ultrafiltrationsanlagen (etwa 70 l/(m²·h)), jedoch reduzierte sich der Energieverbrauch durch Reduzierung der Membranüberströmgeschwindigkeit (0,5 m/s statt bisher 3-5 m/s). Ein gleichsam hervorragendes Ergebnis konnte bei Versuchen zur Weiterbehandlung der UF-Permeate mittels Nanofiltration erreicht werden.

Neben der Behandlung der Waschwässer aus der Gewirkevorbehandlung lag ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen in der Behandlung von Abwasserteilströmen aus der Färberei (Säure-/Dispersionsfarbstoffe). Zunächst wurden hierfür, nach einer Prozessanalyse, Filtrationsversuche mittels Nanofiltration (NF) durchgeführt. Dabei konnte eine weitestgehende Elimination des organischen Verunreinigungen und Farbigekeit erreicht werden.

Die Untersuchungen zur Behandlung der anfallenden NF-Konzentrate ergaben, dass eine effektive biologische Behandlung aufgrund des Vorhandensein von Dispersionsfarbstoffen, welche i.d.R. biologisch schlecht abgebaut werden und aufgrund einer hohen Schwefelkonzentration nicht möglich ist. Der hohe Schwefelgehalt resultiert vom Einsatz von Ammoniumsulfat als pH-Puffer im Säurefärbeprozess. Das reduktive Milieu im anaeroben Reaktor führt zur Bildung von Schwefelwasserstoff (H₂S), welcher auf Mikroorganismen toxisch wirkt.

Weitere Untersuchungen zur chemischen Behandlung der Konzentrate im Labormaßstab zeigten, dass diese Behandlungswege keine wirtschaftliche Alternative bieten. Die Konzentrate müssen demnach evtl. nach einer Volumenreduzierung durch Eindampfung anderweitig entsorgt werden.

Im Anschluss an die Behandlungsversuche wurden die gereinigten Prozesswässer (UF-Permeat und NF-Filtrat aus der Wäscherei, NF-Filtrat aus der Färberei) sowie Betriebswasser in anwendungstechnischen Wiederverwendungsversuchen bei der Fa. Rökona auf ihre Eignung geprüft. Zunächst wurden mit den Recyclingswässern Ausfärbeversuche im Labormaßstab durchgeführt. Die Ausfärbeversuche zeigten, dass lediglich die gereinigten Waschwässer problemlos wieder eingesetzt werden können und dass aufgrund der guten UF-Permeatqualität auf eine nachfolgende Nanofiltration verzichtet werden kann. Im Anschluss an die Laborfärbeversuche wurden vergleichende Auswaschversuche mit Recycling- und Betriebswasser und einer Industriewaschmaschine durchgeführt. Die Praxisversuche zeigten, dass die UF-Permeate der aufbereiteten Waschflotten aus technischer Sicht wieder in der Produktion in Auswaschprozessen eingesetzt werden können.

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen bildeten eine solide Grundlage für eine Kostenanalyse für den Aufbau und den Betrieb einer Behandlungsanlage. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten (inkl. Abschreibungen), Wartung-, Betriebs- und Personalkosten ergaben sich für die Behandlung und Wiedergewinnung der Waschwässer aus der Gewirkevorbehandlung (Thermophilbiologie/Low-Energy Ultrafiltration) Behandlungskosten von 2,66 Euro/m³ (ohne Überschussschlamm-Entsorgung). Für die Behandlung der Färbereiabwässer mittels Nanofiltration fallen Kosten in der Größe von 0,78 Euro/m³ an. Eine Kostenanalyse für die Entsorgung der anfallenden Konzentrate war nicht möglich, da der Entsorgungsweg noch nicht geklärt ist. Den ermittelten Behandlungskosten sind die Einsparungen an Frischwasser durch die Wiederverwendung von Prozesswasser, Primärenergie zur Betriebswassererwärmung, Abwassergebühren sowie Starkverschmutzerzulagen aber auch die Energiegewinnung in Form von Biogas gegenüber zu stellen.

Das entwickelte Verfahren bietet damit eine technische aber auch wirtschaftliche Möglichkeit zur Behandlung und Wiedergewinnung von heißen und hoch belasteten Abwässern bzw. Abwasserteilströmen. Die technische Anwendung kann prinzipiell in allen Industriezweigen, in denen solche Abwässer anfallen, gesehen werden. Als prädestiniert erscheint das Konzept neben dem Einsatz in der Textilveredlungsindustrie für die Papierindustrie, Lebensmittelindustrie zur Behandlung von fetthaltigen (emulgierte) Abwässern oder aber auch Milchindustrie.

2. Einleitung

2.1 Ausgangssituation

Vor dem Hintergrund der steigenden Kosten für Brauch- und Abwasser und einer möglichen Produktionserweiterung hat sich die Fa. Rökona in Tübingen zum Ziel gemacht, die Abwasserbelastung zu reduzieren und Abwasserteilströme nach einer adäquaten Behandlung z.B. als Spül- und Waschwasser im Produktionsprozess wiederzuverwenden.

Beim Textilwerk Rökona fallen beträchtliche Mengen an Abwässer aus dem Waschprozess der Gewirkevorbehandlung und der Färberei an. Diese Abwasserteilströme sind speziell durch ihre hohe CSB-Belastung von 1.000-3.000 mg/l (Waschwasser) bzw. 1.000-1.700 mg/l (Färberei), ihre hohe Abwassermenge von 10-12 m³/Std. (Waschwasser) bzw. 15-17 m³/Std. (Färberei) und ihre hohe Temperatur von 50 bis 60 °C gekennzeichnete t.

Voruntersuchungen zeigten, dass eine direkte Aufbereitung der Teilströme zur Prozesswasserrückgewinnung mittels Membranfiltration jedoch aufgrund der vorhandenen Verunreinigungen wie z.B. Spinnpräparationen (Gleitmittel, Emulgatoren, Antielektrostatike, Biozide, Netzmittel, Oligomere [1]) nicht möglich ist, da diese Substanzen sehr schnell zu einer Verblockung der Membranen führen.

Die chemischen Aufbereitungsverfahren kommen aufgrund der großen Abwassermengen aus Kostengründen nicht in Frage und aufgrund der hohen Temperaturen können diese Abwässer ohne Abkühlung auch nicht direkt mit konventionellen biologischen Verfahren behandelt werden.

2.2 Stand der Vorarbeiten zum Verbundvorhaben

Im Rahmen eines im Herbst 2006 abgeschlossenen DBU-Projektes [2] konnte anhand eines ausgewählten Abwasserteilstromes nachgewiesen werden, dass eine biologische Vorbehandlung durch Spaltung und/oder Zerstörung von Abwasserinhaltsstoffen prinzipiell zu einer wesentlichen Verbesserung der Filtrationsleistung einer nachgeschalteten Membranfiltration führt. Die Untersuchungen zeigten, dass in diesem Fall eine biologisch anaerobe Vorbehandlung einer aeroben vorzuziehen ist. Dadurch konnte der Permeatfluss einer nachgeschalteten Ultrafiltration aufgrund einer geringeren Membranbelagsbildung von 98 auf 180 l/(m²h) nahezu verdoppelt werden. Darüber hinaus sind die Folgekosten für die Schlammentsorgung, bedingt durch die um Faktor 10 geringere Schlammbildung, bei einer anaeroben Behandlung wesentlich niedriger als bei einer aeroben Behandlung [3, 4].

Eine weitere wichtige Erkenntnis der Untersuchungen war, dass für den heißen Abwasserteilstrom eine anaerobe thermophile Biologie gegenüber einer mesophilen wesentliche Vorteile mitbringt [5]:

- Eine Abkühlung der Teilströme vor der Reinigungsanlage sowie eine Aufheizung des gereinigten Abwassers vor der Wiederverwendung im Produktionsprozess entfällt.
- Thermophile Mikroorganismen zeigten bei gleicher Verweilzeit ein wesentlich günstigeres Abbauverhalten der Abwasserinhaltsstoffe als mesophile.
- Die UF-Versuche mit thermophil vorbehandeltem Abwasser zeigten eine höhere Permeatausbeute sowie langsameren Abfall der Filtrationsleistung.

Anwendungstechnische Wiederverwendungsversuche bei der Fa. Rökona auf einer Praxisanlage (Breitwaschmaschine) zeigten, dass mit dem gewonnenen Recyclingwasser beim

Auswaschen von Präparationen aus Rohware nahezu die gleichen Reinigungseffekte erreicht werden können wie mit Frischwasser bzw. Betriebswasser.

Aus wirtschaftlicher Sicht zeigte eine Kostenanalyse im Rahmen des abgeschlossenen Vorhabens, dass durch Auswahl und Einsatz des technisch und betriebswirtschaftlich geeignetsten Verfahrenskonzeptes „Thermophile Anaerobiologie/Ultrafiltration“ die Abwasserbehandlungskosten auf 4,37 Euro/m³ minimiert werden können. Durch die Abwasserbehandlung ergäbe sich für die Fa. Rökona im Verhältnis zu den aktuellen Betriebs- und Abwasserkosten jedoch eine Mehrbelastung von etwa 2,00 Euro pro Kubikmeter. Da die Fa. Rökona in einem äußerst preissensiblen Marktsegment (Automobilinnenausstattung) arbeitet, wäre jedoch eine daraus ergebende Preiserhöhung an die Kundschaft, vor allem vor dem Hintergrund der steigenden Energie-, Material- und Transportkosten, nicht durchzusetzen. Ein wirtschaftlicher Betrieb des technisch hocheffektiven Verfahrenskonzeptes wäre daher derzeit nicht gegeben.

Im Anschluss an das Projekt wurde in den Technikas des ITV Denkendorf und der Fa. Berghof untersucht, in wieweit die Kosten für die Abwasserteilstrombehandlung weiter reduziert werden können. Die Versuche zeigten, dass eine Möglichkeit der Kostenreduzierung in der weiteren Optimierung des eingesetzten Verfahrenskonzeptes durch die Reduzierung des Energieverbrauches der Ultrafiltration sowie Steigerung der Wiederverwendungsquote bestand. Im Vordergrund der Technikumsversuche stand der Einsatz eines innovativen Wasser-Belüftungssystemes zur Reduzierung der Überströmgeschwindigkeit der Ultrafiltrationsmembranen und damit Reduzierung der (Pump-)Energie sowie der Einsatz eines neuartigen Verbundwerkstoffes auf Basis textiler Trägermaterialien mit Braunkohlekoksbeschichtung zur Verbesserung der Effizienz der anaeroben thermophilen Biologie.

Die Vorversuche bei der Fa. Berghof zum neu entwickelten Wasser-Belüftungssysteme zeigten sehr vielversprechende Ergebnisse. Das Funktionsprinzip des innovativen Systems ist in Kapitel 4.2.2.1 beschrieben. Untersucht wurden in den Grundlagenversuchen im Technikumsmaßstab verschiedene Belüftungseinheiten, welche in Low-Energy-Fahrweise zur Filtration von Abwasser aus einem Belebungsbecken einer kommunalen Kläranlage (15 g TS/l) eingesetzt wurden. Zunächst wurde untersucht, in wieweit der Lufteintrag durch verschiedene Belüftungssysteme die Kreislaufmenge des Abwassers und damit gleichzeitig die Überströmgeschwindigkeit der Membranen erhöht. Dabei wurde in einem Versuch bei ausgeschalteter Kreislaufpumpe (Kreislaufmenge 0 m/s) und eingeschalteter Kreislaufpumpe (170 m/s) der Lufteintrag in das System systematisch erhöht. Die Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Vorversuche.

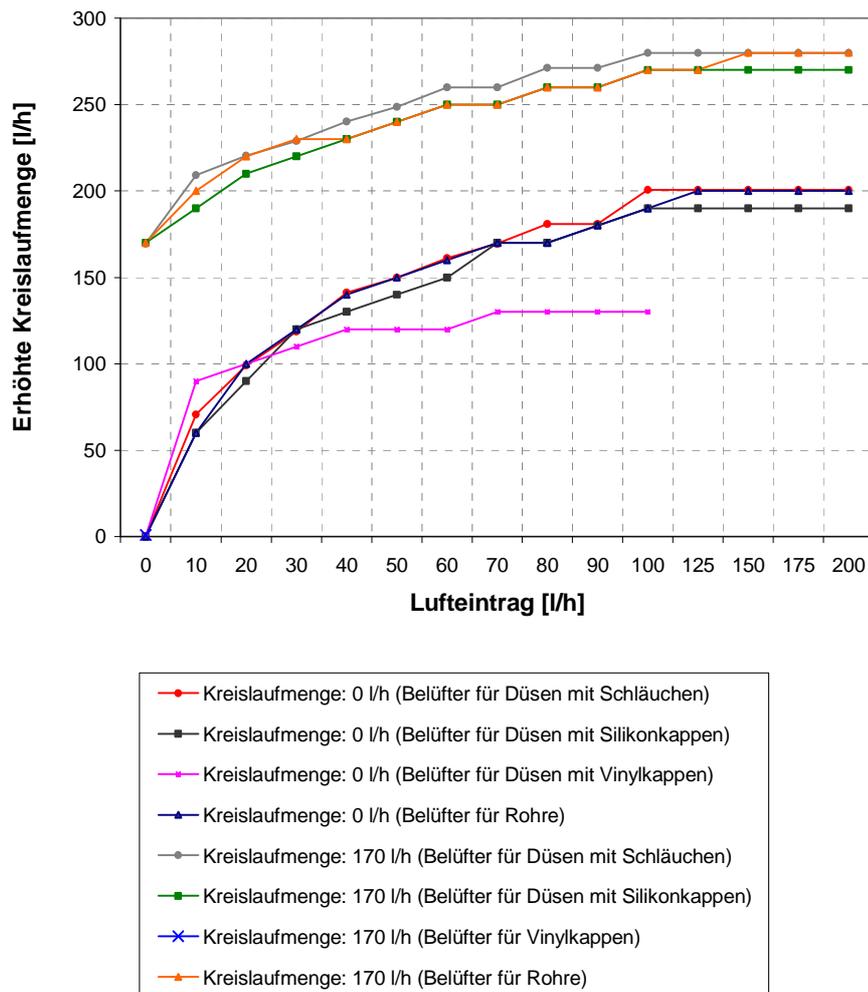


Abb. 1: Einfluss des Lufteintrages auf die tatsächliche Kreislaufmenge (Vorversuch)

Die Abbildung 1 gibt für das Abwasser aus einem Belebungsbecken deutlich wieder, dass lediglich durch die Eintragung von Luft die Kreislaufmenge bzw. Überströmungsgeschwindigkeit deutlich erhöht wird. Beispielsweise wird trotz ausgeschalteter Kreislaufpumpe - die Luft ist dabei die treibende Kraft - durch den Eintrag von 50 Liter pro Stunde bis zu 150 Liter Wasser pro Stunde übergewälzt und bei einer eingestellten Pumpenfördermenge von 170 l/h eine tatsächliche Kreislaufführung von bis 250 l/h gemessen werden.

Darüber hinaus wurden Voruntersuchungen zur Permeatleistung mit gleichem Abwasser mit der innovativen Low-Energy-(LE)-Fahrweise (mit und ohne Lufteintrag) sowie vergleichend mit einer konventionellen cross-flow-(CF)-Fahrweise durchgeführt. Die Membranüberströmungsgeschwindigkeiten betragen bei der LE-Fahrweise 0,5 m/s (mit einem Lufteintrag von 6-7 Nm³/h) bzw. 1,0 m/s (ohne Lufteintrag) und bei der cross-flow-Fahrweise 3,3 m/s. Die folgende Abbildung 2 gibt den Permeatfluss bezogen auf die transmembranen Druckdifferenz wieder.

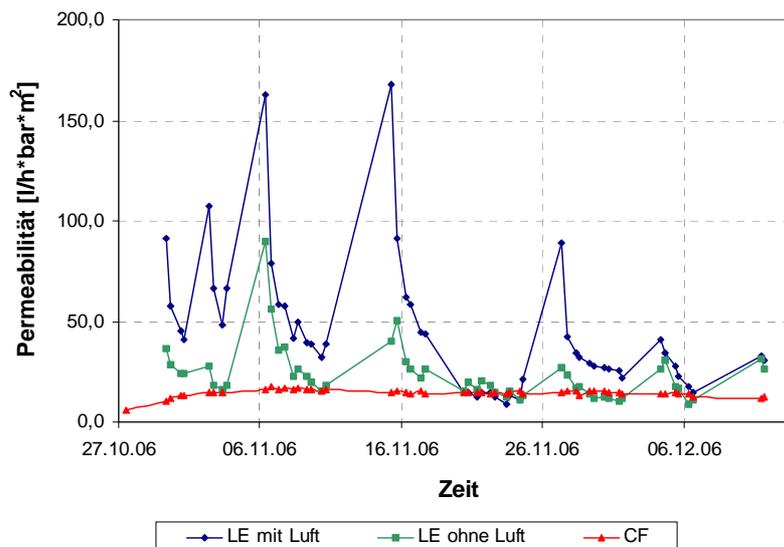


Abb. 2: Permeatfluss für verschiedene Ultrafiltrationsfahrweisen

Die Abbildung 2 zeigt, dass der Permeatfluss beim Einsatz des LE-Systemes deutlich über dem für die konventionelle Cross-Flow-Technik liegt. Darüber hinaus zeigten die Vorversuche, dass der Eintrag von Luft in das System den Permeatfluss um den Faktor 3 ansteigen lässt.

Erste Grundlagenuntersuchungen zum Einsatz von textilen Trägermaterialien mit fixiertem Braunkohlekoks zeigten ebenfalls vielversprechende Ergebnisse. Die Vorversuche erfolgten unter mesophilen anaeroben Bedingungen mit einem textilen Modellabwasser bestehend u.a. aus einem modifizierten Stärkeschlichtemittel sowie einem roten Reaktivfarbstoff. Eingesetzt wurde für die Vorversuche eine Braunkohlekoks-(BKK)-Schüttung sowie textile Trägermaterialien mit und ohne BKK (Reaktorvolumen jeweils ca. 10 Liter). Die Verweilzeit betrug zwei Tage. In der Abbildung 3 ist das Ergebnis der ersten Untersuchung wiedergegeben.

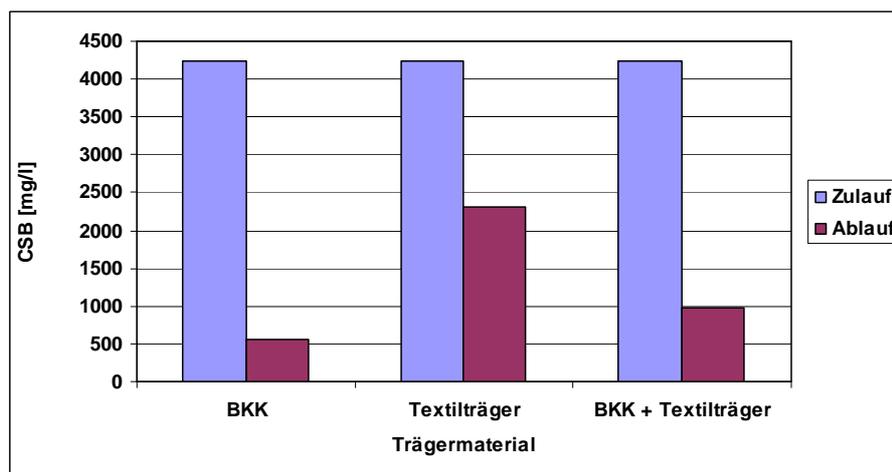


Abb. 3: CSB-Konzentration im Zu- und Ablauf der Anaerobreaktoren (Vorversuch)

Die Abbildung 3 zeigt deutlich, dass durch die Kombination Textilträgermaterial-BKK ein doppelter CSB-Abbau gegenüber reinem Textilmaterial erreicht werden kann. Weiterhin zeigten die Versuche, dass durch die Kombination die Verstopfungsneigung im Reaktor im Gegensatz zu einer BKK-Schüttung gegen Null tendierte.

3. Zielsetzung des Vorhabens

Im Rahmen des Verbundvorhabens sollte ein zuvor entwickeltes innovatives Reinigungsverfahren auf biologischer und membrantechnischer Basis zur Prozesswasserrückgewinnung (Teilströme aus der Gewirkewäsche und Färberei) in der Textilveredlungsindustrie weiterentwickelt und erprobt werden. Dabei sollte neben einer verfahrenstechnisch optimierten anaeroben thermophilen Biologie erstmals aufgrund eines neu entwickelten Wasser-Belüftungssystems eine energiearme Membranfiltration (Ultra-/Nanofiltration) zum Einsatz kommen. Das wesentliche Ziel des Reinigungsverfahrens zur Kreislaufführung war die Wiedergewinnung von heißem Brauchwasser und dadurch simultane Reduktion der Kosten für Frischwasser, Heizenergie, Chemikalien zur Membranreinigung sowie die Abwasserentsorgung.

Die Möglichkeit der Wiederverwendung wurde durch Auswasch- und Ausfärbeversuche im Labormaßstab und im Betrieb der Fa. Rökona geprüft. Dadurch sollte der Nachweis erbracht werden, dass das Ziel der Behandlung und der Wiederverwendung des gereinigten Prozesswassers unter Praxisbedingungen erreicht werden kann.

Die Auswertung aller Ergebnisse sollte zu einem unproblematischen kontinuierlichen Wiedereinsatz der ausgewählten Abwasserteilströme führen. Darüber hinaus sollte eine wirtschaftliche Abschätzung der erforderlichen Kosten für die Anschaffung und den Betrieb einer großtechnischen Reinigungsanlage durchgeführt werden.

4. Behandlungskonzept und Lösungsweg

4.1 Behandlungskonzept

Für das Erreichen der Projektziele wurde in Zusammenarbeit der Partner Fa. Berghof Filtrations- und Anlagentechnik, ITV Denkendorf, Fa. Rökona ein Verfahrenskonzept ausgewählt, welches sich in einem Vorprojekt (DBU Az. 23273 [2]) als das technisch effizientere und wirtschaftlichste für die Behandlung und den Wiedereinsatz von heißen Abwasser und/oder Abwasserteilströme hatte. Behandelt wurden Waschwässer aus der Gewirkevorbehandlung sowie aus Abwasser aus der Färberei, welche beide mit einer Temperatur von 50 bis 60°C anfallen. Das Behandlungskonzept beinhaltete eine Grobfiltration, eine anaerobe thermophile Biologie, eine nachgeschaltete Membranfiltration (Ultra- und Nanofiltration [6]) sowie Wiederverwendungsversuche mit den gereinigten Prozesswässern [7]. Die folgende Abbildung 4 zeigt das geplante Verfahrensschema der Abwasserteilstrombehandlung vor Ort bei der Fa. Rökona in Tübingen.

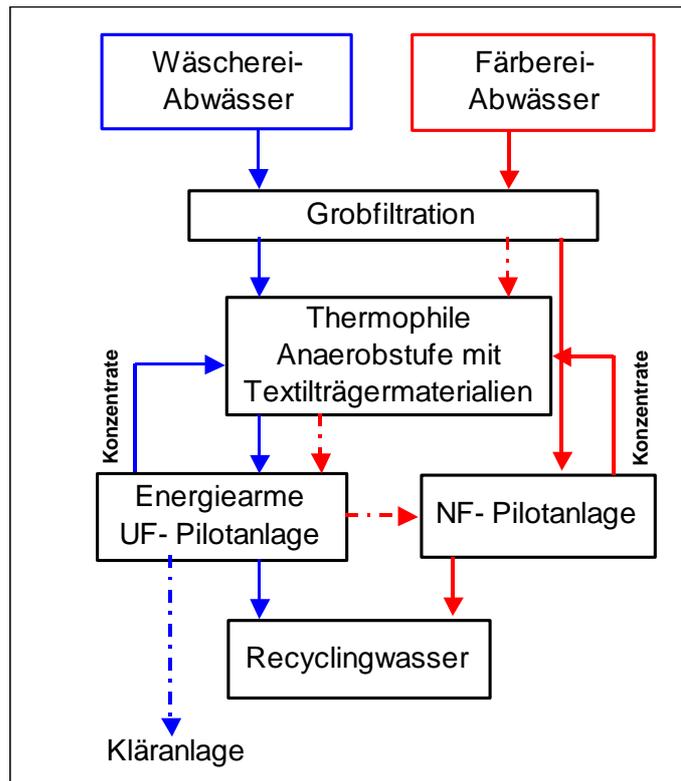


Abb. 4: Konzept zur Abwasserteilstrombehandlung

In der Abbildung 4 ist zu erkennen, dass die Abwässer aus der Wäscherei im Anschluss an eine Grobfiltration einer thermophilen biologischen Anaerobstufe zugeführt wurden und anschließend mittels Low-Energy-Ultrafiltration so weit aufbereitet wurden, dass das gereinigte Wasser als Recyclingwasser zur Verfügung steht. Das Permeat der Ultrafiltration wurde in weiteren Versuchen einer Nanofiltration zugeführt. Die Konzentrate der Filtration gelangten zurück in den Anaerobreaktor.

Die Abwässer aus der Färberei wurden nach einer Grobfiltration direkt einer Nanofiltration zugeführt, da eine Ultrafiltration hinsichtlich der Permeatqualität nicht ausreichen würde [8]. Die Konzentrate gelangen zurück in den Anaerobreaktor.

Die gereinigten Prozesswässer wurden im Anschluss an die jeweilige Membranfiltration (UF bzw. NF) in Wiederverwendungsversuche bei der Fa. Rökona vor Ort auf Ihre Eignung getestet.

4.2 Lösungsweg

Das realisierte Konzept zur Behandlung der Abwasserteilströme aus der Wäscherei und Färberei untergliederte sich in folgende vier Stufen, auf die in den nachstehenden Kapitel detailliert eingegangen werden soll:

- Vorfiltration
- Thermophile anaerobe Biologie
- Membrantechnik (Low-Energy-Ultrafiltration, Nanofiltration)
- Wiederverwendungsversuche

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes für die Färberei eine Prozessbilanzierung durchgeführt. Dabei wurden praxisorientiert die eingesetzten Textilhilfsmittel und Farbstoffe quantitativ erfasst und die CSB-Belastung der Stoffe getrennt voneinander aufgenommen. Darüber hinaus wurden die aus dem Färbebad und Spülbad resultierenden CSB-Belastungen aufgenommen.

Eine Prozessbilanzierung für den Prozess der Wäscherei war aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht durchführbar, da der Textilbetrieb fast ausschließlich Fremdware auswäscht und daher die während des Prozesses ausgewaschenen Stoffe nicht bekannt sind. Eine sehr aufwendige analytische Bestimmung dieser Stoffe wurde aus Kostengründen nicht durchgeführt.

Neben den technischen Untersuchungen wurde zu Projektende eine Kostenbetrachtung vorgenommen.

4.2.1 Vorfiltration

Die Abwasserteilströme aus der Waschwässer und Färberei wurden zunächst mit einem Scheibenfilter der Fa. Keim (Rodgau) zur Abscheidung von Flusen, partikulären Verunreinigungen und/oder anderweitigen Feststoffen vorgereinigt, um eine Prozesssicherheit in den nachgeschalteten Behandlungsstufen zu gewährleisten [9]. Die Maschenweite des Filtereinsatzes betrug 100 µm.

4.2.2 Thermophile Anaerobiologie

Die problematischen hochbelasteten Teilströme aus der Wäscherei, welche im Mittel eine Temperatur von 50 bis 60 °C aufweisen, wurden in Anschluss an die Grobfiltration einer biologischen anaeroben thermophilen Behandlung unterzogen. Thermophile Mikroorganismen weisen in diesem Temperaturbereich die höchsten Stoffwechselaktivitäten auf [5, 10, 11].

Als Impfkultur wurden thermophile anaerobe Mikroorganismen eingesetzt, welche in einem zuvor abgeschlossenen Projektes [2] mit Erfolg für die Behandlung der beschriebenen Waschwässer aus der Gewirkevorbehandlung eingesetzt wurden. Die eingesetzten Mikroorganismen waren demnach adaptiert auf die Inhaltsstoffe der Waschwässer. Für die Pilotversuche wurde ein doppelwandiger Bioreaktor mit einem Volumen von 1 m³ eingesetzt. Die Abbildung 5 zeigt auf der rechten Seite des Bildes den Bioreaktor sowie auf der linken Seite ein Vorratsbehälter.



Abb. 5: Anaerober thermophiler Pilotreaktor (r.)

Zahlreiche Veröffentlichungen [3, 12, 13, 14], aber auch das abgeschlossene Vorprojekt zeigen, dass der Einsatz von Trägermaterialien in anaeroben Bioreaktoren zur Ansiedlung bzw. Immobilisierung der Mikroorganismen einen wesentlichen Einfluss auf die Prozessstabilität, aber auch die Membranbelagsbildung bzw. Standzeit einer nachgeschalteten Membranfiltration hat. Trägermaterialien sorgen prinzipiell dafür, dass die Mikroorganismen über den gesamten Reaktorinhalt vertreten sind und sich nicht durch Sedimentation am Reaktorboden ansammeln, sowie für eine große Artenvielfalt durch hohes Schlammalter, für Sicherheit gegenüber hydraulischen Belastungsspitzen sowie durch die Rückhaltung der Mikroorganismen (kein Auswaschen der Schlammflocken) für ihre geringere Ansiedlung auf den Membranoberflächen. Die in den Vorversuchen eingesetzten Textilträgermaterialien zeichneten sich durch eine starke Strukturierung und große (Ansiedlungs-)Oberfläche aus, wie die Abbildung 6 wiedergibt. Darüber hinaus waren die eingesetzten Materialien sehr flexibel und konnten sich daher durch die leichte Turbulenz im Wasser bewegen und damit dicke Schlammschichten verhindern.



Abb. 6: Mikroorganismenbewuchs auf einem Textilträgermaterial

Verglichen mit hochporösen Schüttgütern zum Beispiel aus Kohlekoks [15] oder Bims [16] lag die spezifische Oberfläche des hochporigen textilen Trägermaterialien jedoch um den Faktor über 1.000 darunter. Der große Nachteil von Schüttungen ist jedoch deren große Verstopfungsgefahr. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des Projektes ein Trägermaterial-Verbundwerkstoff auf Basis der Textilien und Braunkohlekoks entwickelt und erprobt. Dieses Verbundwerkstoff sollte neben einer wesentlichen Verbesserung der Mikroorganismenansiedlung auch zur Adsorption biologisch weniger zugänglicher Substanzen zur selektiven Erhöhung von deren Verweilzeiten im Bioreaktor dienen.

4.2.2 Membrantechnik

Die Abwasserteilströme aus der Wäscherei wurden nach der biologischen Vorbehandlung mittels Membranfiltration zur Gewinnung von Recyclingwasser weiterbehandelt.

4.2.2.1 Low-Energy Ultrafiltration (UF)

Die Weiterbehandlung der Teilströme aus der Waschwässer erfolgte durch ein innovatives Ultrafiltrationssystem. Hierfür wurde von der Fa. Berghof ein neu entwickeltes Verfahren eingesetzt, bei welchem unabhängig von der Membranart in einem vertikal angeordneten Rohrmodul Luft dem Flüssigkeitsstrom zur Erzeugung der notwendigen Scherkräfte für eine turbulente Überströmung der Membranoberfläche beigemischt wird. Die Abbildung 7 zeigt die entwickelte Belüftungseinheit.

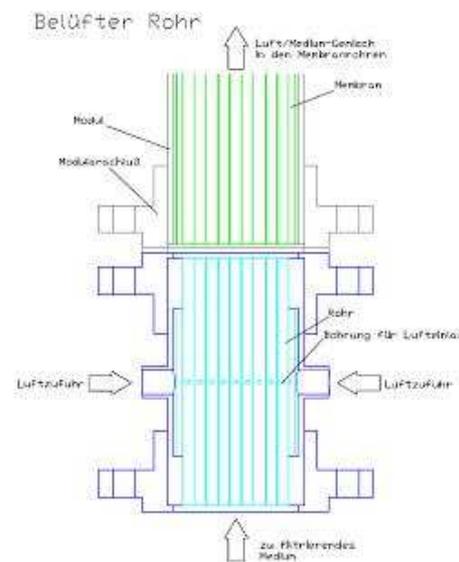


Abb. 7: Belüftungseinheit (l.: Draufsicht, r.: schematisch)

Beim Aufsteigen der Luftblasen infolge ihrer Auftriebskraft, beschleunigen diese dabei die umgebende Flüssigkeit, wobei das Mengenverhältnis zwischen Luft und Flüssigkeit von entscheidender Bedeutung ist. Ist die Luftmenge zu gering, bilden sich einzelne kleine Blasen, mit wenig Auswirkung auf die umgebende Flüssigkeit. Ist die Luftmenge zu groß, bilden sich sehr große Blasen und die Flüssigkeitsströmung reißt ab. Stimmt dagegen das Luft/Flüssigkeitsverhältnis bilden sich Blasen, die nahezu den vollen Querschnitt der Rohrmembran ausfüllen und eine Länge vom 5 bis 10-fachen des Rohrmembrandurchmessers aufweisen (Taylor-Blase, Abb. 8, I.). Damit wird die Flüssigkeit optimal beschleunigt. Zusätzlich zur Beschleunigung in der Rohrmembran wird die von der Blase verdrängte Flüssigkeit in der

Grenzschicht zwischen Blase und Membran weiter beschleunigt, wodurch am abströmenden Ende der Blase zusätzliche Turbulenzen an der Membranoberfläche entstehen (Abb. 8, r.). Diese Art der Strömung wird als Slug-flow bezeichnet.

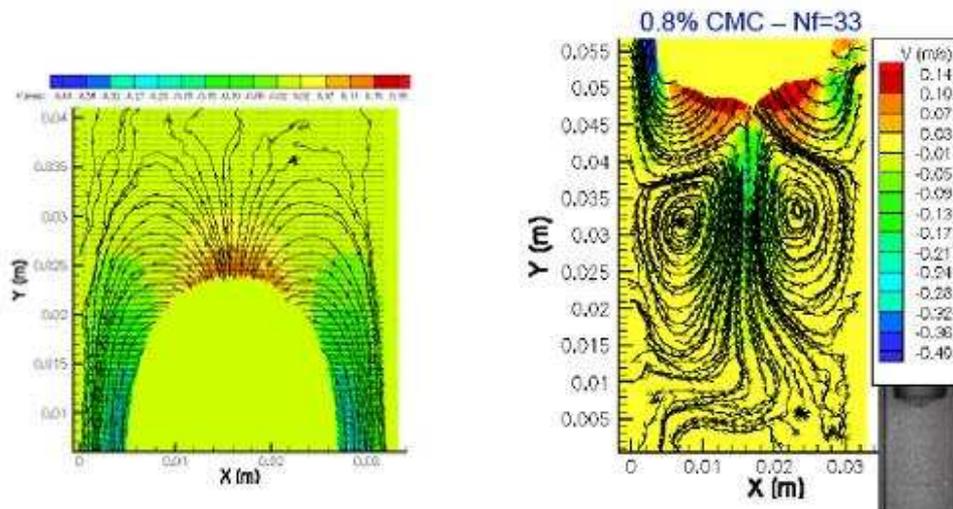


Abb. 8: Strömungsverhältnisse an der Spitze (l.) und am abströmenden Ende der Blase (r.)

Bei den bisherigen UF-Belüftungssystemen wurde versucht die Luft möglichst gleichmäßig über den gesamten Rohrleitungsquerschnitt verteilt einzutragen. Dabei muss aber möglichst viel freier Querschnitt verbleiben, damit der Strömungswiderstand im Gesamtsystem nicht unnötig erhöht wird (höherer Energieverbrauch). Ein feinblasiger Lufteintrag lässt sich so zwar relativ gleichmäßig verteilen, erreicht aber nicht den notwendigen Slug-flow-Effekt, bzw. es entstehen erst sehr spät durch Agglomeration ausreichend große Blasen, nachdem bereits der größte Teil der Rohrmembran ohne Effekt durchströmt wurde. Ein grobblasiger Lufteintrag erreicht zwar prinzipiell den notwendigen Slug-flow-Effekt, hat aber eine sehr ungleichmäßige Verteilung, im Gegensatz zu dem innovativen Belüftungssystem mit einer Verteilung von 100 %.

Durch den Einsatz der innovativen Belüftungseinheit zur Ultrafiltration kann mit einer wesentlich geringeren Strömungsgeschwindigkeit von unter 1 m/s (konventionell 3 bis 5 m/s) in den Rohrmembranen gearbeitet werden, wodurch der (Pump-)Energiebedarf deutlich sinkt. Darüber hinaus kommt es durch Entstehung von Turbulenzen an der Membranoberfläche zur einer kontinuierlichen Abtragung der Deckschicht und damit zu einer Verlängerung der Standzeiten. Dies führt wiederum zu einer Reduktion der Reinigungsintervallen bzw. des Bedarfes an Reinigungskemikalien. Diesen Vorteilen stehen aufgrund der ausgefeilten Verfahrenstechnik höhere Investitionskosten gegenüber, welche sich jedoch aufgrund der günstigen Betriebskosten schnell amortisieren lassen.

Die bei der Fa. Rökona eingesetzte UF-Pilotanlage (Abb. 9) war durch folgende Eckdaten gekennzeichnet:

Eingesetzte Membran:

Typ:	66.03
Membranmaterial:	PVDF
Trenngrenze:	30 nm
Membraninnendurchmesser:	8 mm
Membrananzahl:	13
Membranfläche:	0,595 m ²
Membranlänge :	1,35 m

Modul:

Typ: MO13G_I8LE
Modulanzahl: 1

Anlagendaten:

Eingangsdruck: 1,3 bar
Konzentratdruck: 1,2 bar
Anströmung Wasser: 0,5 m/s 576 m³/h
Anströmung Luft: 0,5 m/s 396 Nm³/h
Druckverlust: 0,1 bar/Modul
Backwash: 13,5 m³/h 0,5 bar



Abb. 9: Low-Energy Ultrafiltrationspilotanlage

4.2.2.2 Nanofiltration (NF)

Für die Weiterbehandlung der Permeate aus der Ultrafiltration (Wäschereiteilströme) sowie zur Behandlung der Teilströme aus der Färberei wurden eine Nanofiltrationsanlage der Fa. Berghof eingesetzt.

Die eingesetzte NF-Pilotanlage war durch folgende Eckdaten gekennzeichnet: Die folgenden Kenndaten charakterisieren die Filtrationsanlage (Abb. 10).

Eingesetzte Membran:

Typ:	TFC
Membranmaterial:	PS/PA
Trenngrenze:	300 D
Membraninnendurchmesser:	8 mm
Membranfläche:	5 m ²
Membranlänge:	1,016 m

Modul:

Typ:	NF4040
Gehäuse:	Edelstahl
Modulanzahl:	1 (Wickelmodul)

Anlagendaten:

Eingangsdruck:	6,5 bar
Konzentratdruck:	5,0 bar
Anströmung:	3,5 m ³ /h



Abb. 10: Nanofiltrationspilotanlage

4.2.3 Wiederverwendungsversuche

Ziel der Prozesswasseraufbereitung war neben der Reduzierung der Abwasserbelastung und besserer Filtrierbarkeit, vor allem die Wiederverwendung des gereinigten Abwassers. Daher wurden die gereinigten Abwässer in anwendungstechnischen Untersuchungen bei der Fa. Rökona getestet. Die Untersuchungen umfassten Ausfärbeversuche im Labor sowie Auswaschversuche in einer Praxiswaschmaschine mit Betriebswasser und den entsprechenden Permeaten/Filtraten der Membranfiltrationen. Auf die Vorgehensweise der Wiederverwendungsversuche wird im Detail in Kapitel 5.4 eingegangen.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Entwicklung textilbasierter Trägermaterialien zur Immobilisierung von Mikroorganismen

Als Basiskörper für die Entwicklung des textilbasierten Trägermaterialien wurde zunächst ein textiles Trägermaterial von einem Maschenhersteller der Schwäbischen Alb eingesetzt. Aufbauend auf den Voruntersuchungen [2][13] wurde als Faserpolymerwerkstoff für das textile Trägermaterial Polypropylen eingesetzt. Für Polypropylen spricht dessen Verfügbarkeit, der Preis, die Alterungs- und Abrasionsbeständigkeit sowie die Veränderbarkeit der Oberflächeneigenschaft für die selektive Beschichtung. Auf der linken Seite der Abbildung 11 ist der eingesetzte Textilträgersupport dargestellt, die rechte Seite zeigt eine Mikroskopaufnahme der hochflorigen Struktur des Materials.

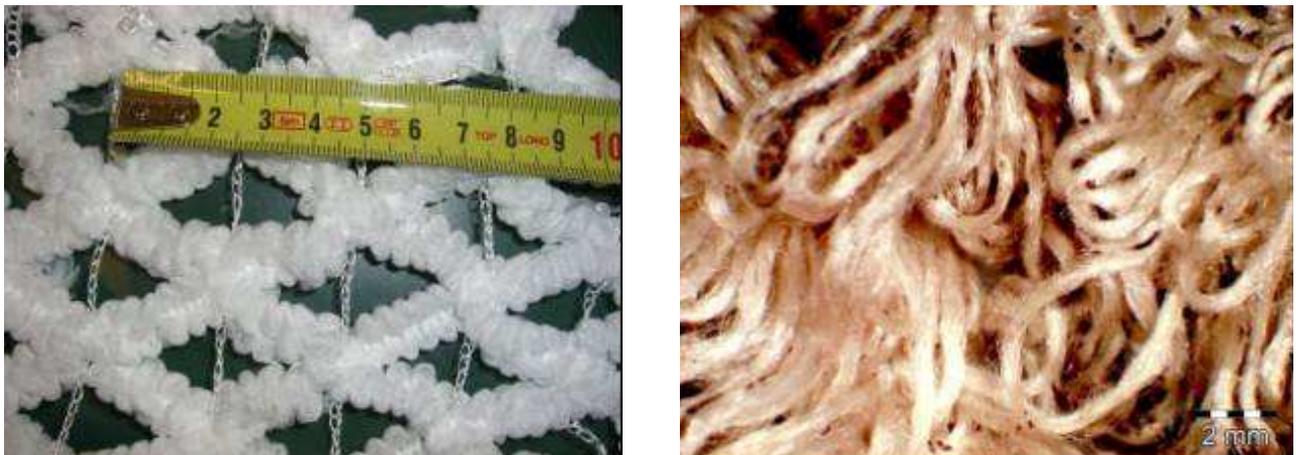


Abb. 11: Textilträgersmaterial

Zur Vergrößerung der aktiven Oberfläche wurden zunächst Versuche zum Aufbringen einer Braunkohlekoksstaub- und -körnerbeschichtung durchgeführt. Braunkohle, welcher gekörnt oder als Pulver angewendet wird, hat sich vor allem in Kombination mit einer Biologie für die Reinigung textiler Abwässer bewährt [17] und ist - verglichen mit Aktivkohle - so preisgünstig, dass sie als Einwegadsorbens eingesetzt werden kann.

Für die Aufbringung der Braunkohle auf dem textilen Support wurden die Textilien in einem Foulard zunächst mit einem wasserbeständigen Polyurethankleber imprägniert und abgequetscht. Anschließend wurden parallel zueinander Braunkohlekoksstaub ($\varnothing < 1$ mm) und Braunkohlekokspartikel ($\varnothing 1$ bis 4 mm) auf den Kleber aufgerieselt und in einem Ofen bei 150°C fixiert. Im Fixierprozess wurde das Lösungsmittel ausgetrieben und der Kleber vernetzte mit dem Support und den Partikeln.

Die Beschichtungsversuche zeigten zunächst, dass durch das flächige Aufbringen des Klebers die textile Struktur äußerst steif bzw. starr wurde. Die Flexibilität (ein Merkmal des Textilträgersmaterials) ging demnach verloren. Des Weiteren zeigten die Versuche, dass die Fixierung der Staub- bzw. Kokspartikel auf dem Textil entweder nicht ausreichend war, also bei leichter Bewegung des Verbundmaterials sich die Braunkohlepartikel vom Kleber lösten, oder aber die Oberfläche der Partikel komplett mit Kleber zugedeckt war. Damit war das Verbundmaterial nicht geeignet.

Die Abbildung 12 zeigt ein Muster mit aufgerieselten Braunkohlekokspartikel auf einem textilen Support.



Abb. 12: Textiles Trägermaterial mit aufgerieselten Braunkohlekokspartikel

Nachdem die Versuche zum Aufbringen von Braunkohle auf dem textilen Support nicht den gewünschten Erfolg gebracht hatten, wurde eine weitere Technik zum kombinierten Einsatz von Braunkohlekoks und Textilträger untersucht.

In diesem Fall wurden zunächst offene Geflechschläuche (mit großem Flechtwinkel) aus Polypropylen mit einem Innendurchmesser von ca. 1 cm hergestellt. Im Anschluss daran wurden Braunkohlekokspartikel mit Durchmesser von 3 bis 4 mm in den Geflechschlauch eingefüllt. Die Koks vorlage musste zuvor von kleineren und größeren Partikel befreit werden, da diese entweder durch die Geflechtöffnungen wieder verloren gegangen wären oder die Partikelzuführung verstopft hätten. Das Ergebnis war ein flexibler, offener, d.h. für das zu behandelnde Abwasser gut durchströmbarer Geflechschlauch mit sehr großer spezifischer Oberfläche. Die Abbildung 13 zeigt den entwickelten Geflechschlauch mit Braunkohlekokspartikel.



Abb. 13: Offener Geflechschlauch mit Braunkohlekokspartikel

Die Geflechschläuche wurden anschließend in den Bioreaktor eingebracht. Dabei wurden die gefüllten Schläuche über die gesamte Reaktorbreite senkrecht zwischen den einzelnen Textilbahnen gelegt. Die Textilbahnen sowie die Geschlechschläuche hatten eine Länge von 1,2 Meter. Die Abbildung 14 zeigt eine Draufsicht auf die eingebauten Trägermaterialien. Der Einfluss der Geflechschläuche auf die Abwasserbehandlungsergebnisse ist in Kapitel 5.2.1 wiedergegeben.

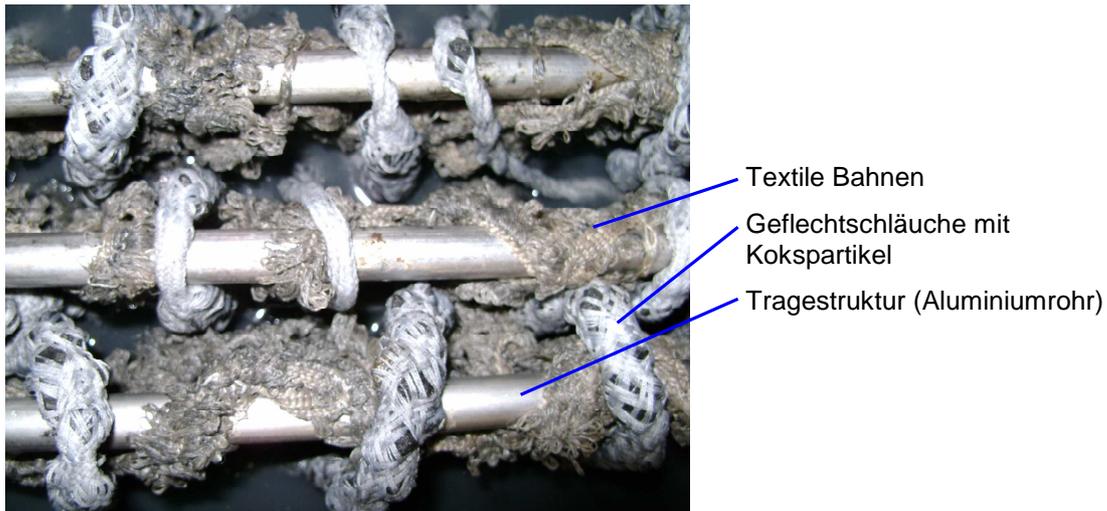


Abb. 14: Trägermaterialien (Draufsicht)

5.2 Behandlung von Washwässer aus der Gewirkevorbehandlung

5.2.1 Aufbereitung mittels thermophiler anaerober Biologie

Die Pilotversuche zur anaeroben thermophilen Behandlung der Abwasserinhaltsstoffen bei der Fa. Rökona erfolgten aufgrund von vorherigen Untersuchungen bei einer Verweilzeit von einem Tag. Als Trägermaterial für die Ansiedlung der Mikroorganismen wurde im ersten Versuchszeitraum ein textiles eingesetzt, im zweiten eine Kombination aus textilem Träger mit Braunkohlekokspartikel. Die folgende Abbildung 15 zeigt den zeitlichen TOC-Verlauf der Versuche.

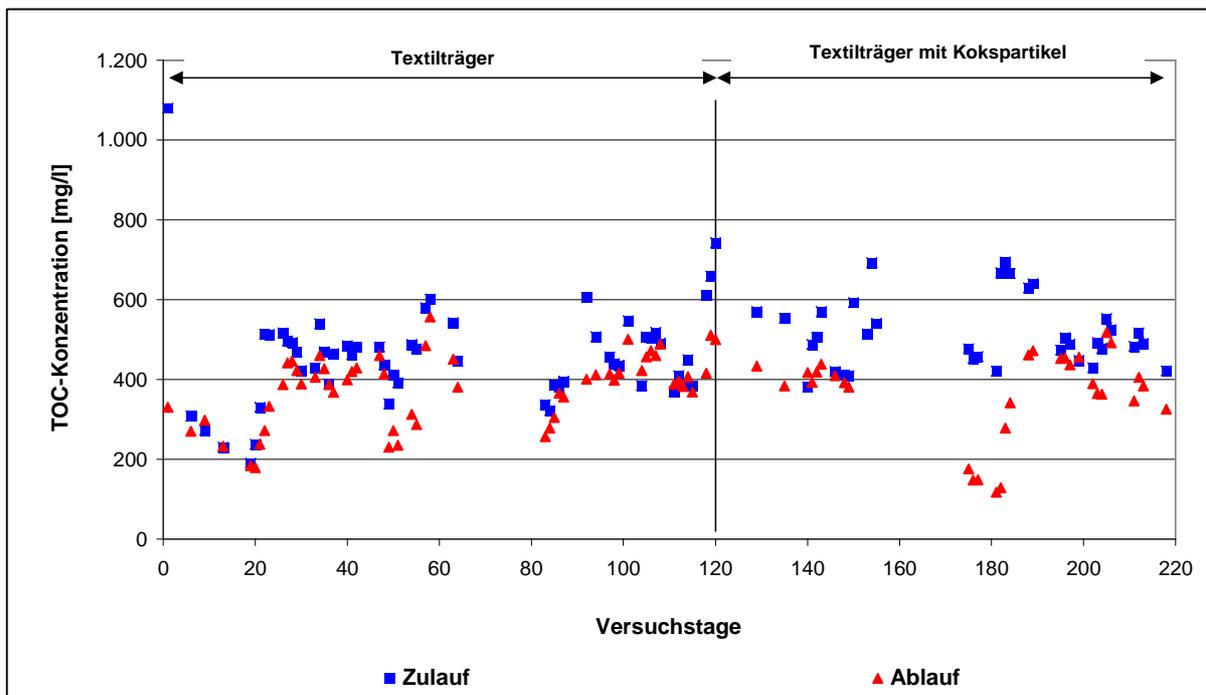


Abb. 15: Zeitlicher Verlauf der TOC-Konzentration im Zu- und Ablauf des anaeroben thermophilen Reaktors

Der mittlere TOC-Abbaugrad betrug nach einer Abwasserverweilzeit von einem Tag beim Einsatz des Textilträgermaterials (erste 120 Versuchstage) 18 %, während beim zusätzlichen Einsatz von Kokspartikel (letzte 110 Versuchstage) der durchschnittliche Abbau 29 % betrug. Dadurch wird deutlich, dass der Einsatz von fixierten Kokspartikel durch die einhergehende Vergrößerung der Mikroorganismenansiedlungsfläche deutlich das Ergebnis der biologischen Stufe verbessert. Die Tabelle 1 gibt die Versuchsergebnisse zusammenfassend wieder.

Parameter	Textilträgermaterial			Textilträgermaterial/Kokspartikel		
	Zulauf	Ablauf		Zulauf	Ablauf	
	Mittel	Mittel	Abbau	Mittel	Mittel	Abbau
pH-Wert [-]	6,0	6,2	-	6,0	6,3	-
spez. Leitf. [mS/cm]	0,7	0,7	-	0,6	0,7	-
TOC [mg/l]	460	379	18 %	516	366	29 %

Tab. 1: Mittlere Abwasserbelastung im Zu- und Ablauf sowie prozentualer Abbau bezogen auf den Zulauf; Anaerober thermophiler Reaktor

Stichprobenartige Gasanalysen ergaben einen beträchtlichen Methananteil im Biogas von 80 %, während der Rest aus Kohlendioxid und Restgasen (in Spuren) bestand.

Die Untersuchungen im Vorprojekt [2] zeigten bereits, dass es während einer anaeroben thermophilen Behandlung nicht zu einem Abbau aller organischen Verunreinigungen kommt. Dies wurde durch die aktuelle gaschromatographische Untersuchung bestätigt. Das primäre Ziel der anaeroben thermophilen Untersuchungen lag jedoch nicht alleine im vollständigen Abbau aller Abwasserinhalte, sondern vor allem in der Veränderung der Molekülstrukturen um einen besseren Filtrationsfluss der nachgeschalteten Ultrafiltration zu ermöglichen.

5.2.2 Nachbehandlung mittels Low-Energy Ultrafiltration

Der Ablauf des anaeroben thermophilen Reaktors wurde in einer nachgeschalteten Ultrafiltration über mehrere Monate kontinuierlich weiterbehandelt. Entscheidend für die Beurteilung dieses Prozesses war aus technischer Sicht die Permeatqualität, die Zuverlässigkeit der Ultrafiltration, d.h. ein über mehrere Monate kontinuierlicher Permeatfluss und der einwandfreie Betrieb.

In der folgenden Abbildung 16 soll exemplarisch ein Ausschnitt der umfangreichen Untersuchungen dargestellt werden. Die Abbildung zeigt das Ergebnis von Versuchen über einen Zeitraum von 5 Wochen. Die Membrananlage war zu diesem Zeitpunkt seit einem halben Jahr in Betrieb.

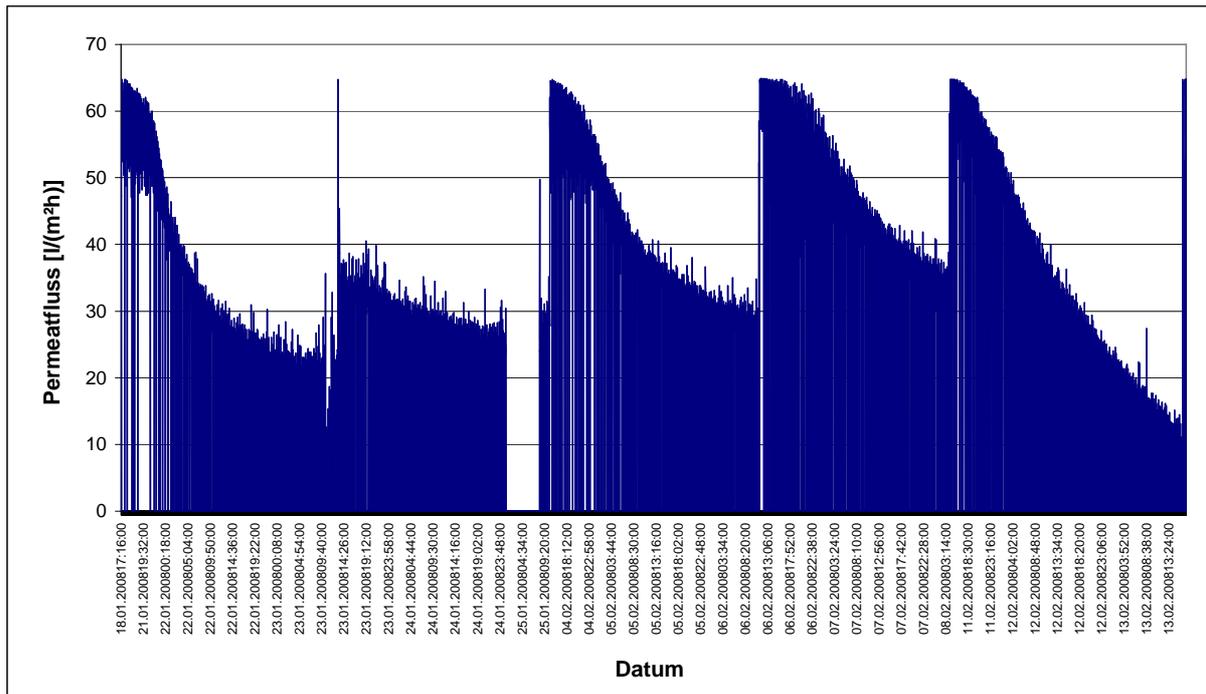


Abb. 16: Zeitlicher Permeatfluss für die UF-Behandlung des anaeroben thermophilen Reaktorablaufes

Eine über den Versuchszeitraum beobachtete Permeatabnahme aufgrund einer membranseitigen Deckschichtbildung konnte naturgemäß nicht verhindert werden, eine Regeneration der Membranen infolge einer wöchentlichen Reinigung mit adäquaten Mitteln war jedoch jederzeit möglich. Die dadurch erreichte Regenerierung der Membranen ist durch den steilen Anstieg des Permeatflusses zu Wochenbeginn zu erkennen. Dadurch konnte quasi der Ausgangszustand der Filtration wieder erreicht werden.

Eine sehr effektive und kostengünstige Verbesserung der Filtrationsleistung konnte durch eine zyklische kurzzeitige Spülung der Membranen erreicht werden. Dabei wurden während des Filtrationsbetriebes die vertikal angeordneten Membranen alle 10 Minuten ca. 10 Sekunden lang mit eingepulsten Luftblasen mechanisch umspült. Durch diese „Backwash“-Steuerung kann die Leistung der Membranen erheblich verbessert werden. Eine dreiwöchige Versuchsreihe ohne zwischenzeitliche Rückspülung bestätigte die Vorteile der neuen Spültechnik eindrucksvoll. Die nachstehende Abbildung 17 zeigt den zeitlichen Permeatfluss ohne Backwash-Steuerung, welcher im Vergleich zum Permeatfluss mit kontinuierlich Rückspülung deutlich niedriger ist.

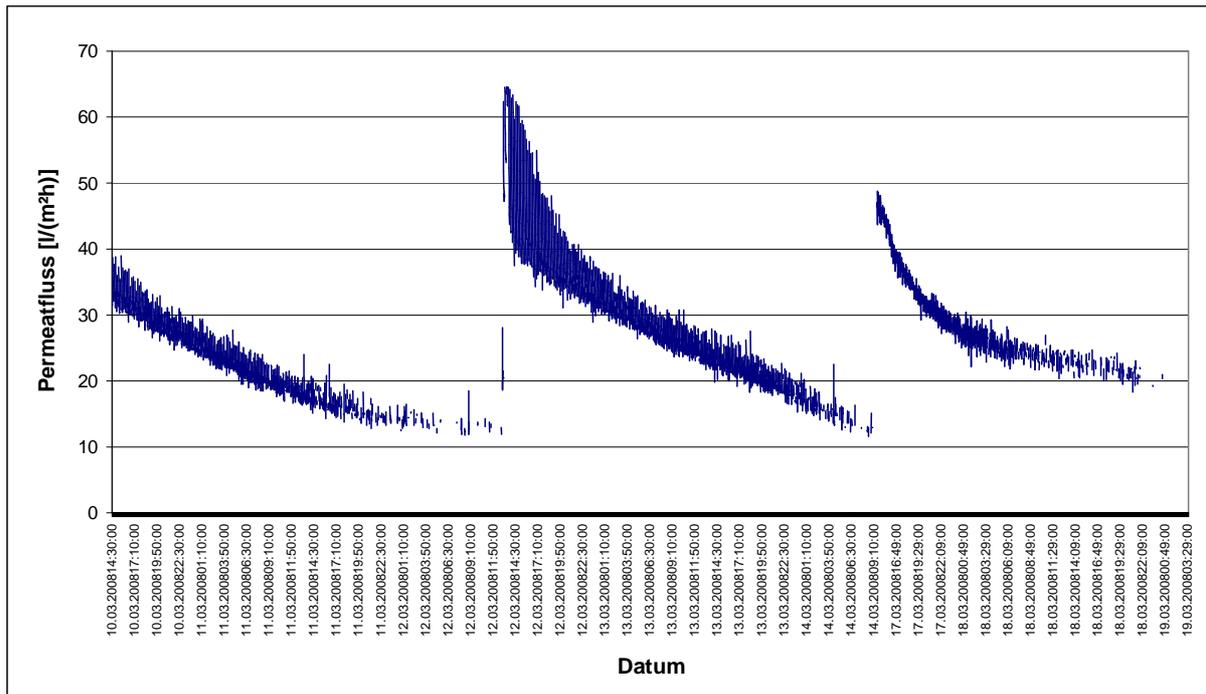


Abb. 17: Zeitlicher Permeatfluss für die UF-Behandlung des anaeroben thermophilen Reaktorablaufes ohne zyklischer „Backwash“-Reinigung

Ein Vergleich der Permeatmittelwerte verdeutlicht nochmals den Einfluss der Rückspülung: Mit Backwash-Spülung: 36,5 l/(m²*h), ohne Spülung: 27,3 l/(m²*h).

Verglichen mit Standard-Ultrafiltrationsanlagen (etwa 70 l/(m²*h)) liegt der erreichte Permeatfluss niedriger. Demgegenüber muss bei der eingesetzten Low-Energy-Ultrafiltration aufgrund der erheblich geringeren Anströmgeschwindigkeit (0,5 m/s statt bisher 3-5 m/s) jedoch nur ein Bruchteil an (Pump-)Energie aufgewendet werden.

Abwassertechnische Untersuchungen zeigten hinsichtlich der Permeatqualität eine über den gesamten Versuchszeitraum nahezu konstanten TOC-Konzentration. Die nachstehende Abbildung 18 gibt die TOC-Konzentration des Permeates im Vergleich zum Zulauf wieder. Die mittlere Konzentration im Zulauf betrug 942 mg/l und im Permeat 75 mg/l. Demnach lag die TOC-Reduktion bei 92 %.

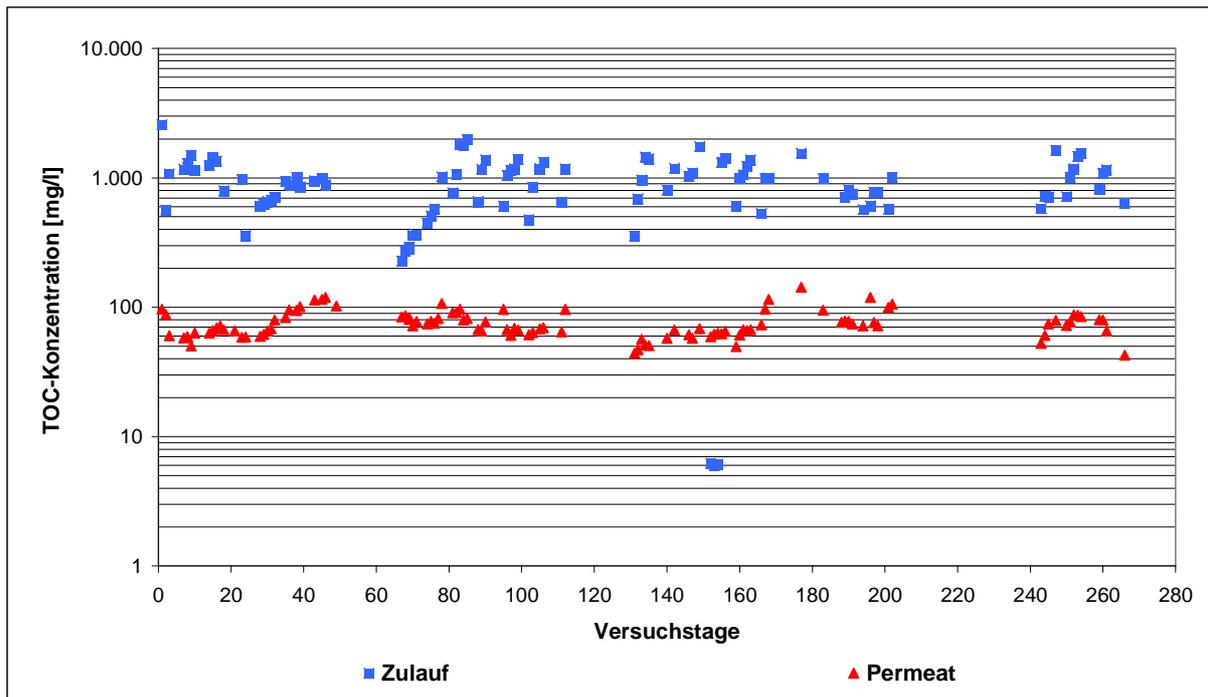


Abb. 18: TOC-Konzentration im Zulauf und Permeat für die UF-Nachbehandlung des anaeroben Reaktorablaufes

5.2.3 Weiterbehandlung mittels Nanofiltration

In einer weiteren Versuchsreihe wurde das aus der Low-Energy Ultrafiltration gewonnene Permeat mittels Nanofiltration weiterbehandelt. Das Permeat der Ultrafiltration wurde hierfür in einem 1 m³ Vorratsbehälter gesammelt und diskontinuierlich über die Nanofiltration geführt. Die Abbildung 19 zeigt das Ergebnis eines Batch-Versuches. Im Gegensatz zur Ultrafiltration wurden die Messwerte hier nicht kontinuierlich online aufgenommen.

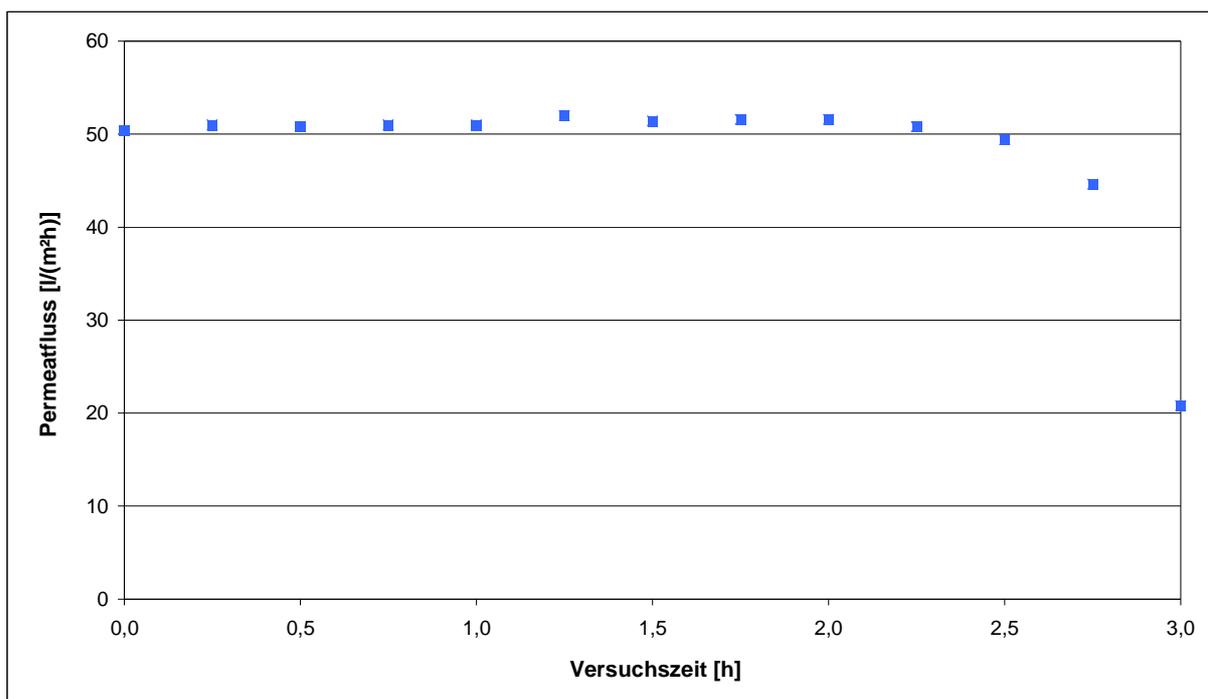


Abb. 19: Zeitlicher Permeatfluss für die NF-Behandlung des UF-Permeates

Die Abbildung 19 gibt wieder, dass der Permeatfluss über die ersten 2,5 Versuchsstunden nahezu konstant bei $51 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ lag. Erst danach fiel der Permeatfluss aufgrund der sehr hohen Aufkonzentrierung bzw. Akkumulation der zurückgehaltenen Partikel und Verunreinigungen an der Membranoberfläche (sog. Konzentrationspolarisation), was zum limitierenden Fluss führt [16]. Der Aufkonzentrierungsfaktor lag insgesamt bei etwa 98 %. Aus ökonomischen Gesichtspunkten wäre aufgrund des starken Abfalls der Permeatleistung die Filtration - auch unter Hinnahme eines geringeren Aufkonzentrierungsgrades - spätestens nach 2,5 Stunden zu beenden.

Die Untersuchungen des gewonnenen Filtrates ergaben einen mit zunehmenden Aufkonzentrierung ansteigenden TOC-Gehalt im Feed- und Permeatstrom (Abb. 20).

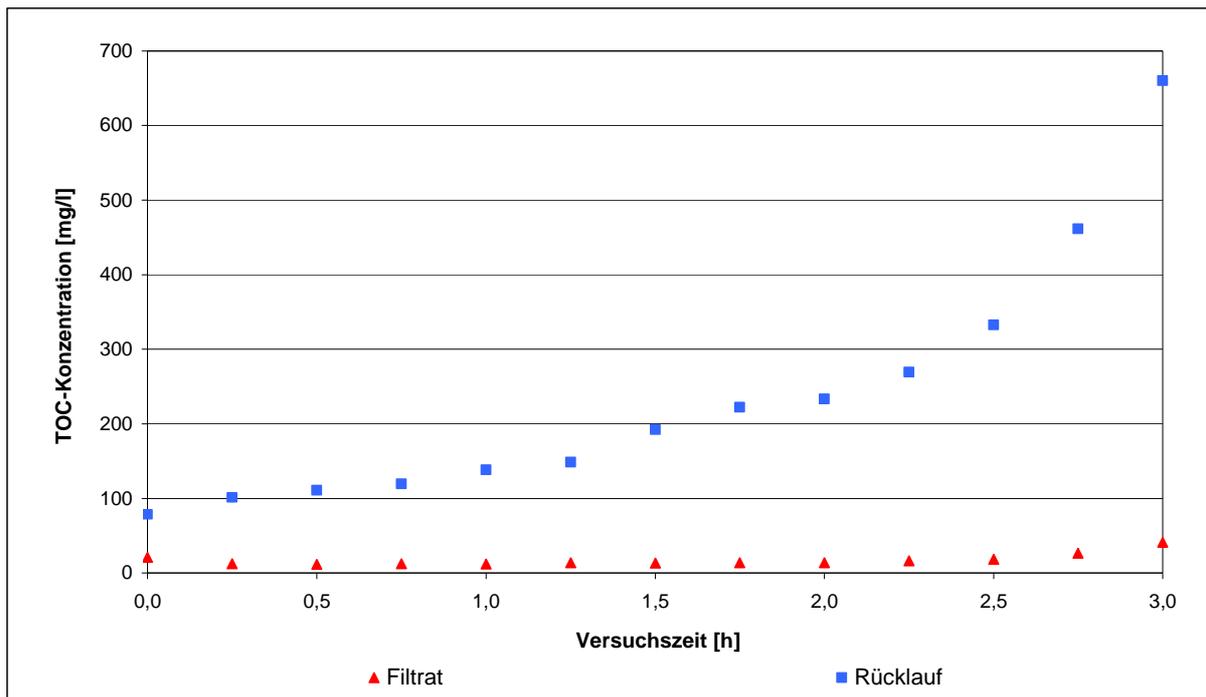


Abb. 20: TOC-Konzentration im Kreislauf und Filtrat der NF-Behandlung des UF-Permeates

5.3 Behandlung von Farbabwässer

5.3.1 Prozessanalyse

Die industriellen Abwässer aus der Färberei und Ausrüstung der Fa. Rökona gelangen nach dem Durchfließen eines kleinen Ausgleichsbeckens mit kontinuierlicher pH-Wert- und Temperaturmessung in die kommunale Kläranlage der Stadt Tübingen.

In der Färberei fallen täglich ca. 239 m³ Abwasser an, davon entfallen ca. 60 m³/d auf die Färbeapparate (Tab. 2) und 179 m³/d auf die Spülwässer.

Bezeichnung der Anlage	Art der Anlage	Volumen
HT-1	Färbeaggregat	300 l
HT-2	Färbeaggregat	1.000 l
HT-3	Färbeaggregat	1.500 l
HT-4	Färbeaggregat	1.500 l
HT-5	Färbeaggregat	5.000 l
HT-6	Färbeaggregat	5.000 l
HT-7	Färbeaggregat	6.000 l
HT-8	Färbeaggregat	6.000 l
HT-9	Färbeaggregat	10.000 l
HT-10	Färbeaggregat	10.000 l
HT-roto	Färbeaggregat	3.500 l
Softstream	Färbeaggregat	3.500 l
Soft-Mustermaschine	Färbeaggregat	400 l
Softstream V	Färbeaggregat	2.500 l
Volumen gesamt		56.200 l

Tab. 2: Maschinenbestand in der Färberei

Bei den Produktionsverfahren der Färberei werden ausschließlich Polyamid- und Polyesterwaren gefärbt. Je nach Farbvorgabe kommen dabei Dispersions- und Säurefarbstoffe zum Einsatz, die mit entsprechenden Färbehilfsmitteln auf die Textilware aufgebracht werden. Die nachstehende Tabelle 3 gibt einen Überblick über den Jahresverbrauch und die CSB-Konzentration der eingesetzten Textilhilfsmittel in der Färberei.

Textilhilfsmittel	Jahresverbrauch	CSB
	[kg]	[mg/g]
Faltenverhinderer 1	23.210	63
Faltenverhinderer 2	675	590
Egalisiermittel 1	1.025	885
Egalisiermittel 2	920	720
Egalisiermittel 3	2.885	980
Egalisiermittel 4	100	1.210
Egalisiermittel 5	12.530	1.916
Egalisiermittel 6	80	431

Egalisiermittel 7	520	982
UV-Absorber 1	6.780	665
UV-Absorber 2	113	210
UV-Absorber 3	3.870	770
UV-Absorber 4	3.995	765
Dispergiermittel 1	13.290	635
Dispergiermittel 2	10.170	635
Echtheitsverbesserer	1.385	497
Oligomerbinder	645	1.520
Waschmittel	190	2.002
Reduktionsmittel	4.350	200

Tab. 3: Eingesetzte Textilhilfsmittel in der Färberei

Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über die in der Färberei eingesetzten Farbstoffe sowie ihren Jahresverbrauch und die zugehörige CSB-Konzentration.

Handelsname	Jahres- verbrauch	CSB	Handelsname	Jahres- verbrauch	CSB
	[kg]	[mg/g]		[kg]	[mg/g]
Dispersionsfarbstoff 1	74	1.400	Dispersionsfarbstoff 22	1.041	1.490
Dispersionsfarbstoff 2	3	1.485	Dispersionsfarbstoff 23	3.775	1.400
Dispersionsfarbstoff 3	3	1.525	Dispersionsfarbstoff 24	67	1.365
Dispersionsfarbstoff 4	4	1.130	Dispersionsfarbstoff 25	345	1.515
Dispersionsfarbstoff 5	144	1.250	Dispersionsfarbstoff 26	25	1.490
Dispersionsfarbstoff 6	66	1.700	Dispersionsfarbstoff 27	1.675	1.590
Dispersionsfarbstoff 7	75	1.389	Dispersionsfarbstoff 28	337	1.500
Dispersionsfarbstoff 8	80	1.200	Dispersionsfarbstoff 29	978,5	1.550
Dispersionsfarbstoff 9	30	1.330	Dispersionsfarbstoff 30	452	1.450
Dispersionsfarbstoff 10	47	1.450	Dispersionsfarbstoff 31	1143	1.400
Dispersionsfarbstoff 11	517	1.490	Dispersionsfarbstoff 32	421	1.135
Dispersionsfarbstoff 12	431	1.590	Dispersionsfarbstoff 33	55	1.445
Dispersionsfarbstoff 13	600	1.550	Dispersionsfarbstoff 34	3895	1.400
Dispersionsfarbstoff 14	86	1.550	Dispersionsfarbstoff 35	1099	1.284
Dispersionsfarbstoff 15	514	1.388	Dispersionsfarbstoff 36	40	1.135
Dispersionsfarbstoff 16	329	1.462	Dispersionsfarbstoff 37	1037	1.490
Dispersionsfarbstoff 17	954	1.348	Dispersionsfarbstoff 38	704	1.456
Dispersionsfarbstoff 18	1.776	1.590	Dispersionsfarbstoff 39	314	1.090
Dispersionsfarbstoff 19	845	1.400	Säurefarbstoff 1	10	1.200
Dispersionsfarbstoff 20	388	1.550	Säurefarbstoff 2	24,5	1.200
Dispersionsfarbstoff 21	350	1.365			

Tab. 4: Eingesetzte Farbstoffe

Im Rahmen der Bestandsaufnahme wurden weiterhin exemplarisch die Abwasserteilströme aus einer Hell-, Mittel- und Dunkelfärbung einer PA- und PES-Ware auf ihre spezifische Belastung untersucht (Tab. 5).

Ware	CSB [mg/l]
Polyamid (PA)	
PA-hell, Farbbad	5.970
PA-hell, 1.Spülbad	1.181
PA-mittel, Farbbad	2.784
PA-mittel, 1.Spülbad	563
PA-mittel, letztes Spülbad	151
PA-dunkel, Farbbad	2.455
Polyester (PES)	
PES-hell, Farbbad	2.345
PES-hell, 1.Spülbad	364
PES-mittel, Farbbad	4.820
PES-mittel, 1.Spülbad	808
PES-dunkel, Farbbad	6.380
PES-dunkel, 1.Spülbad	451
PES-dunkel, 2.Spülbad	52

Tab. 5: Abwasseruntersuchung der Teilströme aus der Färberei

Aufgrund des Jahresverbrauchs an Farbstoffe, Hilfsmitteln und Chemikalien sowie der entsprechenden Abwassermengen lassen sich die durchschnittlichen CSB-Frachten der einzelnen Produktionsbereiche berechnen. In der folgenden Tabelle 6 wurden die Jahresmengen der Farbstoffe, Chemikalien und Hilfsmittel auf ihre durchschnittlichen Ausziehgrade innerhalb der entsprechenden Einsatzbereiche bezogen und der anteilige CSB-Wert berechnet. Zusammen mit dem jährlichen Abwasseraufkommen lassen sich daraus die durchschnittlichen täglichen CSB-Frachten bestimmen.

Abwasserteilstrom	Abwasser- aufkommen [m³/d]	CSB- Konzentration [mg/l]	CSB-Fracht [kg/d]
Restflotten, Färbebad	60	3.300	198,0
Spülwässer, Färberei	179	150	26,8
Gesamt Färberei	239	-	224,8

Tab. 6: Berechnung der CSB-Konzentration und -Frachten

5.3.2 Aufbereitung mittels Nanofiltration

Die Abwasserteilströme der Färberei wurden direkt einer Nanofiltration zugeführt. Da kein größerer Pufferbehälter zur Verfügung stand, wurden die Prozesswässer in einfachen Containern (1,0 m³) gesammelt und in Batch-Fahrweise filtrierte. Nach jeder Filtration wurden die Membranen gespült und zu Wochenende chemisch gereinigt. Die Kenndaten der Filtrate sind im Kapitel 4.2.2.2 zusammengefasst. In der nachstehenden Abbildung 22 ist exemplarisch der Filtratfluss von zwei Versuchen wiedergegeben.

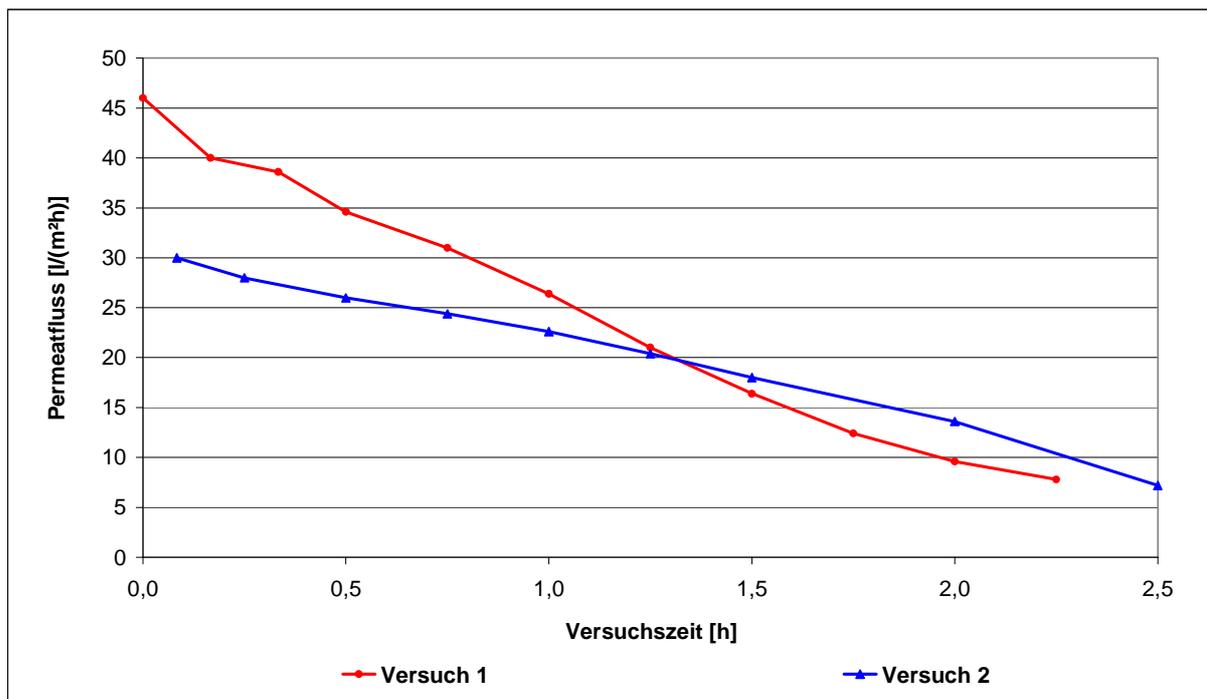


Abb. 21: Zeitlicher Permeatfluss für die NF-Behandlung von Färbereiabwässer

Die Abbildung 21 zeigt, dass die Permeatflüsse aufgrund der Aufkonzentrierung kontinuierlich abnehmen. Der rapide zeitliche Abfall ist auf die Batch-Fahrweise zurückzuführen und würde bei einer kontinuierlichen Filtrationsweise langsamer vonstatten gehen. Der Abfall der Permeatleistung ist prinzipiell auf die Rückhaltung der Verunreinigungen durch die Membran zurückzuführen. Dadurch steigt die osmotische Druckdifferenz zwischen der Membran, welche dem transmembranen Druck entgegenwirkt [18, 19]. Die Versuche wurden bei einem Permeatfluss von ca. 8 l/(m²·h) abgebrochen. Dies entspricht einem Aufkonzentrierungsfaktor von etwa 97 %. Angesichts der Permeatqualität (Abb. 22 und 23), aber auch aus ökonomischen Gründen wäre die Filtration nach etwa 1,5 Stunden abubrechen. In der Abbildung 22 ist der Anstieg der TOC-Konzentration, als Maß der organischen Verunreinigungen, im Filtrat als Folge der Aufkonzentrierung wiedergegeben.

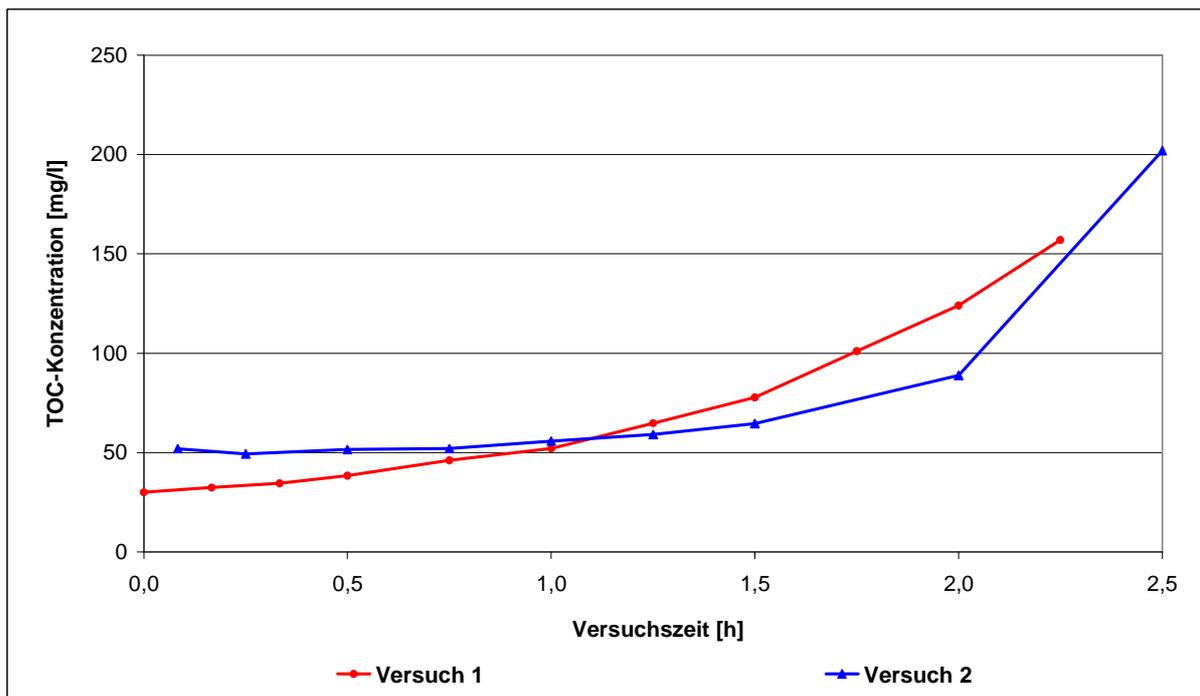


Abb. 22: Zeitlicher Verlauf der TOC-Konzentration im NF-Filtrat

Die TOC-Konzentration lag zu Versuchsbeginn bei 1.110 mg/l. Durch die Filtration wurde diese im Mittel um 84 % reduziert.

Neben dem Anstieg der TOC-Konzentration während des Batch-Filtrationsprozesses konnte ebenfalls eine Zunahme der Farbigkeit im NF-Filtrat beobachtet werden. Die Abbildung 23 zeigt exemplarisch den Verlauf der Farbigkeit für den Versuch 1, ausgedrückt als Durchsichtsfarbzahl DFZ bei den entsprechenden Wellenlängen [3]. Andere Versuche zeigten einen fast identischen Verlauf.

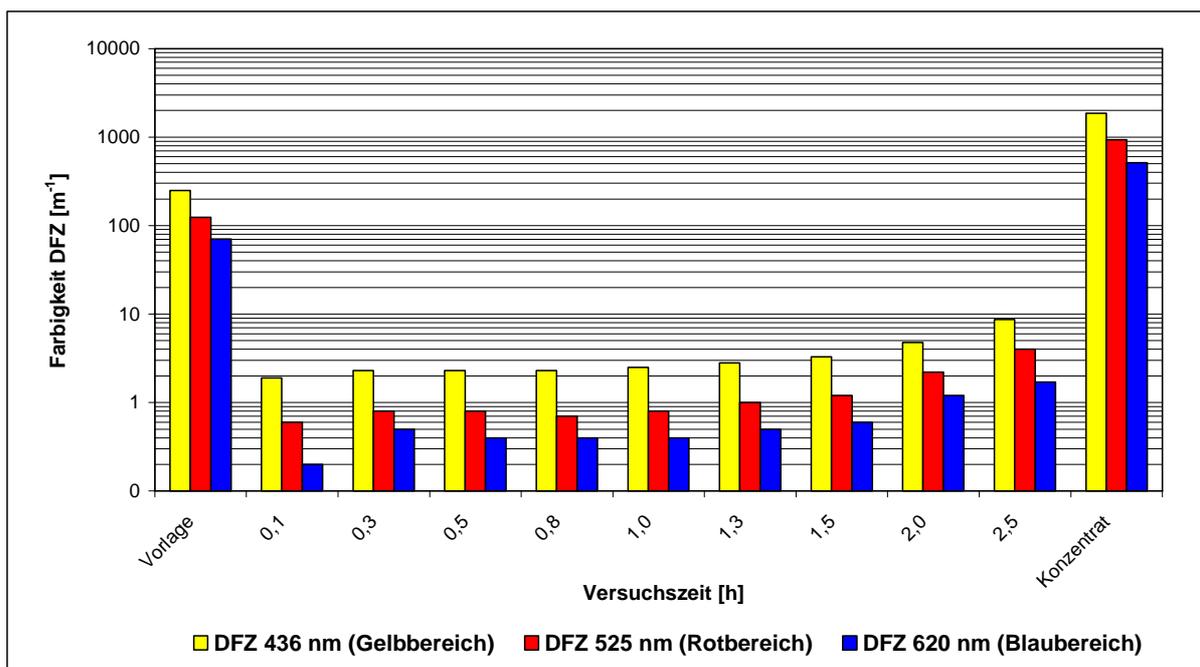


Abb. 23: Zeitlicher Verlauf der Farbigkeit im NF-Filtrat

Die Abbildung 23 gibt zu erkennen, dass das Filtrat im Gelbbereich eine wesentlich ausgeprägtere Farbigkeit aufwies als im Rot- und Blaubereich. Dies konnte ebenfalls optisch durch eine leichte Gelbfärbung beobachtet werden. Die Farbigkeit in allen drei gemessenen Spektralbereichen reduzierte sich um 83,2 bis 84,2 %.

5.3.3 NF-Konzentratbehandlung

5.3.3.1 Thermophile anaerobe Biologie

Die Konzentrate von verschiedenen Nanofiltrationsversuchen wurden im Anschluss aufgrund ihrer hohen organischen und Farbbelastung in 1 m³ Vorratsbehälter vermischt und einem thermophilen anaeroben Bioreaktor (4 Tage Verweilzeit) zugeführt. Nach einer Einlaufphase musste jedoch beobachtet werden, dass die Biogasbildung zunehmend abnahm. Parallel dazu nahm die TOC-Konzentration im Ablauf des Bioreaktors zu. Die Abbildung 24 verdeutlicht, den Verlauf der TOC-Konzentration im Ablauf im Vergleich zum Zulauf.

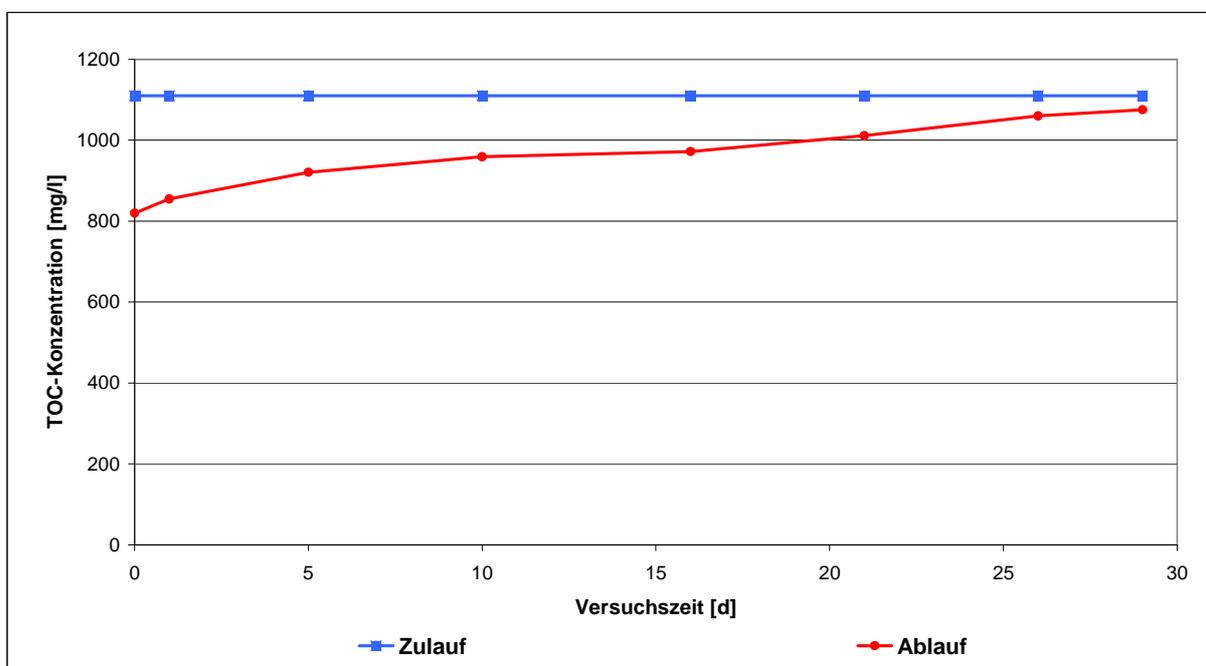


Abb. 24: Zeitlicher Verlauf der TOC-Konzentration im Zu- und Ablauf des anaeroben thermophilen Reaktors (Farbkonzentrate)

Die Farbigkeit (DFZ) im Ablauf des Bioreaktors näherte sich ebenfalls dem des Zulaufes. Die nachstehende Abbildung 25 gibt einen Überblick über die Farbigkeiten in den Wellenlängen 436 nm (Gelbbereich), 525 nm (Rotbereich) und 620 nm (Blaubereich) im Zu - und Ablauf.

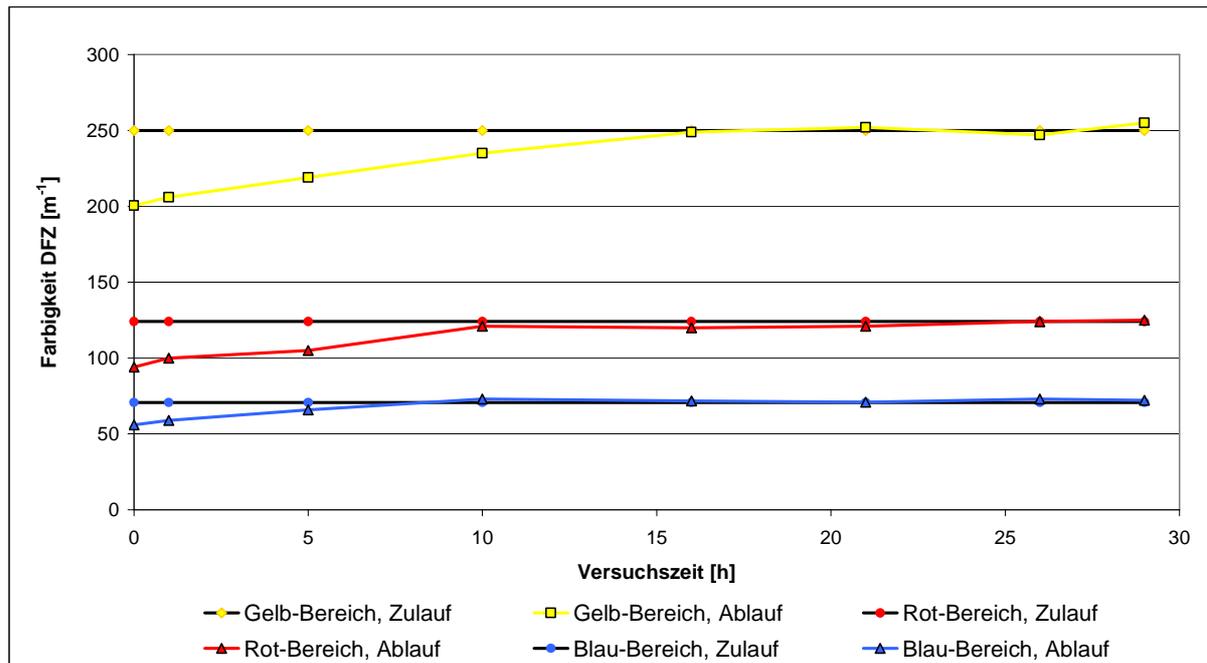


Abb. 25: Zeitlicher Verlauf der Farbigkeit im Zu- und Ablauf des anaeroben thermophilen Reaktors (Farbkonzentrate)

Der prinzipiell schlechte Abbau der Konzentrate ist bedingt durch das Vorhandensein von Dispersionsfarbstoffen, welche i.d.R. biologisch schlecht abgebaut werden können [3].

Darüber hinaus konnte ein zeitlich rasante Abnahme der Gasbildung bis zum Stillstand sowie Zunahme der TOC-Konzentration bzw. Farbigkeit im Bioreaktorablauf beobachtet werden. Dies ist auf eine zunehmende Schädigung der Biozönose während des Versuches im Reaktor zurückzuführen. Als Grund für die Schädigung konnte die hohe Schwefelkonzentration im Abwasserteilstrom der Färberei ausgemacht werden. Stichprobenmessungen zeigten im Abwasserteilstrom Sulfatkonzentrationen von 149 bis 750 mg/l. Die hohen Sulfatkonzentrationen resultieren vom Einsatz von Ammoniumsulfat (NH_4SO_4) als pH-Puffer im Säurefärbeprozess.

Bedingt durch das reduktive Milieu im anaeroben Reaktor kam es während der Versuche zur Bildung von Sulfid in Form von Schwefelwasserstoff (H_2S), welcher ab einer Konzentration ca. 25 mg/l auf Mikroorganismen toxisch wirkt. Darüber hinaus führt Sulfat im Abwasser zu einer Verminderung der Methanbildung, weil sulfatreduzierende Bakterien und Methanbakterien um Wasserstoffionen und Essigsäure konkurrieren. Da die Sulfat Bakterien gegenüber den Methanbakterien energetisch begünstigt ist, geht die Methanbildung zurück [3, 20].

5.3.3.2 Alternative NF-Konzentratbehandlungsmöglichkeiten

Nachdem die Möglichkeit einer biologischen Behandlung der NF-Konzentrate verworfen werden musste, wurden alternative Behandlungswege [21] geprüft.

I. Fällung- und Flockungsverfahren

Für die Laborversuche zur Fällung/Flockung [22] wurden vier verschiedene Flockungsmittel der Fa. Sachtleben Chemie (Duisburg) eingesetzt: Syntafloc 8329, Syntafloc 4612, Biotol 26 und Biotol 23.

Die Ergebnisse zeigten, dass trotz der Bildung von nur kleinen agglomerierten Flocken eine TOC-Reduktion von bis zu 86 % erreicht werden konnte. Die Farbigkeit nahm in allen drei gemessenen Wellenlängen um über 96 % ab. Gegen das Behandlungsverfahren der Fällung/Flockung sprechen jedoch die relativ hohen Betriebs- und Folgekosten (Schlamm Entsorgung) von über 10 Euro/m³ [23][24].

II. Nassoxidationsverfahren

Die Untersuchungen zur Nachbehandlung der NF-Konzentrate durch eine chemische Oxidation mittels Wasserstoffperoxid(H₂O₂)/UV [25] wurden mit einer Laboranlage am ITV Denkendorf durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe (Behandlungszeit 60 Minuten) zeigten, dass auch bei hohen Konzentrationen an Wasserstoffperoxid (5 ml/l, 33%) keine signifikante Reduktion der TOC-Konzentration und Farbigkeit erreicht werden konnte. Aufgrund der prinzipiell hohen Behandlungskosten (ca. 2,30 Euro/m³ [24]) wurden keine weiteren Versuche mit höheren Konzentrationen an Wasserstoffperoxid durchgeführt.

III. Sonstige Entsorgungsmöglichkeit

Ist eine effektive und kostengünstige Entsorgung der Konzentrate durch eine biologische oder chemische Behandlung nicht gegeben, so müssen die Konzentrate als Sondermüll entsorgt werden. Hier könnten die Kosten durch die Eindampfung der Konzentrate bei Ausnutzung der Abwärme der Spannrahmen [26], also eine Volumenreduzierung reduziert werden. Eine Kostenanalyse müsste hier jedoch zunächst durchgeführt werden.

5.4 Wiederverwendungsversuche

Das vordringliche Ziel der Fa. Rökona ist die Wiederverwendung des aufbereiteten Abwassers in den Produktionsprozess. Daher wurde die Eignung der Recyclingwässer vor Ort zunächst in Laborversuchen und anschließend in einer Industriewaschmaschine geprüft.

5.4.1 Laborfärbeversuche

Im Färbereilabor der Fa. Rökona wurde mit den folgenden, verschieden aufbereiteten Abwasserteilströmen Färbeversuche durchgeführt:

- NF - Filtrat aus Färbereiabwasser
- UF - Permeat aus Waschwasser
- UF/NF - Filtrat aus Waschwasser

Es lag jeweils das identische Färbesubstrat mit der gleichen Vorbehandlung und der gleichen Menge vor. Der Färbeansatz wurde jeweils in der 4-fachen Menge hergestellt um Pipetierungenauigkeiten auszuschließen. Die Ausfärbungen wurden auf dem Laborfärbeapparat „Nuance“ durchgeführt.

Alle vorliegenden Abwässer wurden im Vergleich mit dem Betriebswasser der Fa. Rökona gefärbt. Die Bewertung der Farbunterschiede erfolgt nach Bestimmung des Farbabstandes [27].

Dieser ist definiert als:

- ΔL : Farbabstand im Hell-Dunkel-Bereich
- Δa : Farbabstand im Rot-Grün-Bereich
- Δb : Farbabstand im Gelb-Blau-Bereich
- ΔE : Gesamtfarbabstand

Die folgende Tabelle 7 zeigt das Ergebnis der Ausfärbungen.

Artikel	Farbe	4-facher Ansatz	ΔL	Δa	Δb	ΔE
109787 100% Polyester	13619 rot	Betriebswasser	0,39	0,49	0,31	0,70
		NF-Filtrat	0,31	0,55	0,41	0,76
		UF-Permeat	0,24	0,41	0,27	0,55
		UF/NF-Filtrat	0,43	0,61	0,41	0,85
110821 100% Polyester	10018 leuchtgelb	Betriebswasser	0,24	1,35	1,67	2,16
		NF-Filtrat	-0,33	2,68	3,17	4,17
		UF-Permeat	-0,04	1,79	1,83	2,56
		UF/NF-Filtrat	0,28	1,22	1,93	2,30
110650 100% Polyester	18266 silber	Betriebswasser	-1,15	0,42	-0,20	1,24
		NF-Filtrat	-0,74	0,37	0,02	0,83
		UF-Permeat	-0,94	0,36	-0,17	1,02
		UF/NF-Filtrat	-0,91	0,36	-0,04	0,98

Tab. 7: Ausfärbeversuche mit Betriebs- und Recyclingwasser (Laborfärbeapparat)

Die in der Tabelle 7 wiedergegebenen Farbtonverschiebungen von 0,1 bis 0,2 sind auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Die Versuche zeigten, dass die Abweichungen beim Einsatz des NF-Filtrats (Färbereiteilstrom) am Größten sind. Da der Wiedereinsatz von aufbereitetem Prozesswasser nur dann Sinn macht, wenn dieses für *alle* Farbtöne eingesetzt werden kann, kann folglich das aufbereitete Färbereiabwasser nicht als Recyclingwasser in der Färberei (wieder) eingesetzt werden.

Die Abweichungen beim UF-Permeat und UF/NF-Filtrat des Wäschereiteilstromes liegen in der Toleranz und können als i.O. betrachtet werden. Der Wiedereinsatz der Waschabwässer ist theoretisch denkbar. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse könnte aufgrund der guten UF-Permeatqualität auf eine nachfolgenden Nanofiltration verzichtet werden.

5.4.2 Praxisversuche

Im Anschluss an die Laborfärbeversuche wurden vergleichende Auswaschversuche mit Recycling- und Betriebswasser durchgeführt. Aufgrund der Laborversuche wurde für die Praxisversuche das klare und qualitativ hochwertige UF-Permeat eingesetzt.

Zunächst wurde hierfür direkt an der UF-Anlage Permeat in zwei Container mit je einem 1 m³ Inhalt gesammelt.

Um einen Vergleich zu gewährleisten, wurden zwei Partien des gleichen Artikels (Nr. 107768.09) und der gleichen Farbe (oliv brown, 68008) eingeteilt. Die Partien für den Einsatz des Recyclingwassers wurde mit der Nummer 150781 bezeichnet und für den Einsatz von Betriebswasser mit der Nummer 150796.

Der ausgewählte Artikel durchläuft in der Produktion in folgender Reihenfolge:

1. vorwaschen – fixieren
2. färben
3. trocknen – finish
4. kontrollieren

Der Prozessschritt „vorwaschen- fixieren“ läuft in einem Prozess ab. Hier wurden die ausgewählten Wässer zunächst eingesetzt. Es kam dabei eine kleine Waschmaschine und ein Spanrahmen zum Einsatz (Abb. 26).



Abb. 26: Waschmaschine zur Vorwäsche und Fixierung der Partien

Die Partie 150796 (Betriebswasser) wurde wie Serienware vorgewaschen und fixiert, bei der Partie 150781 wurde die Waschmaschine aus einem der zwei Container mit Recyclingwasser über eine Pumpe gefüllt. Das Nachfüllen mit Recyclingwasser wurde ebenfalls mit einer Pumpe aus dem zweiten Container während des Prozesses gewährleistet. Die Prozessbedingungen beim Waschen, wie Wassertemperatur, Wassermengenzulauf und Einsatzmenge des Tensids, waren bei beiden Partien identisch.

Die Abbildung 27 zeigt eine Aufnahme des ausgewählten Artikels.



Abb. 27: Aufnahme des ausgewählten Artikels

Nach dem Auswaschprozess wurden beide Partien zum Färben auf einen Färbebaum gewickelt und nach dem Färben beide Partien nacheinander, unter identischen Bedingungen, getrocknet und beurteilt.

Bei der optischen Kontrolle konnte kein Unterschied zwischen beiden Partien festgestellt werden. Von beiden Partien wurden jeweils am Anfang, in der Mitte und am Ende Prüfmuster entnommen. Diese Muster wurden im qualitätstechnischen Labor der Fa. Rökona auf Farbe, Waschschrumpf, Gewicht, Waschechtheit, Schweißechtheit sauer und alkalisch, Wasserechtheit und Reibechtheit untersucht und beurteilt. Die Tabelle 8 zeigt das Ergebnis der Textilprüfungen.

Partie	Farbe ΔE	Wasch- schrumpf L/B	Gewicht L-M-R	Wasch- echtheit	Schweiss- echtheit sauer	Schweiss- echtheit alkalisch	Wasser- echtheit	Reib- echtheit T-N
150781- Anfang	0,88	-4/-4	28-29-28	3-4	4-5	4	4-5	5-5
150781- Mitte	1,09	0/-5	28-28-28	3-4	4-5	4	4-5	5-5
150781- Ende	1,05	0/-5	28-29-29	3	4-5	4-5	4-5	5-5
150796- Anfang	0,99	-1/-4	28-28-29	3-4	4-5	4	4-5	5-5
150796- Mitte	0,96	-2/-5	28-30-28	3-4	4	4	4-5	5-5
150796- Ende	1,18	-1/-5	30-30-30	3	4	4	4-5	5-5

Tab. 8: Qualitätstechnische Beurteilung der Auswaschversuche auf einer Industriewaschmaschine (Partien 150781 (Recyclingwasser), 150796 (Betriebswasser))

Die in der Tabelle 8 wiedergegebenen Ergebnisse zeigen auf, dass zwischen beiden Partien keine relevanten Unterschiede zu erkennen sind. Die Unterschiede in der Tabelle 8 sind auf Prozessschwankungen zurückzuführen. Das Recyclingwasser könnte daher aus technischer Sicht wieder in den Produktionsprozess als Waschwasser eingesetzt werden.

6. Kostenbetrachtung

Aufbauend auf den Ergebnissen der Untersuchungen wurde für das untersuchte Verfahrenskonzept eine Kostenbetrachtung von der Fa. Berghof und dem ITV Denkendorf durchgeführt. Die Rechnung geht für den Abwasserteilstrom Wäscherei von 250 m³/d (80.000 m³/d) und für den Abwasserteilstrom Färberei 239 m³/d (76.480 m³/d) aus.

Als Abschreibungsdauer wurden 5 Jahre und als Kapitalzinsen 10 % pro Jahr gewählt.

I. Biologische Vorbehandlung (Waschwässer)

Die Kostenanalyse für die biologisch anaerobe Vorbehandlung der Washwässer geht von folgenden Basisdaten aus:

- Investitionskosten: 390.000 Euro
- Jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten: 2 % der Investitionskosten
- Personalkosten inkl. Personalnebenkosten: 0,5 Std./d à 45 Euro
- Betriebskosten (Energie): 10,80 Euro/d

Auf Basis der Daten ergeben sich für die biologische anaerobe Vorbehandlung der Washwässer aus der Gewirkevorbehandlung überschlägig Kosten von **1,69 Euro/m³**. Die Kosten für die Überschussschlamm Entsorgung aber auch die effektive Energiegewinnung bei Verwertung des gebildeten Biogases (ca. 90 l/g TOC_{eli}) können derzeit noch nicht abgeschätzt werden.

II. Low-Energy Ultrafiltration (Waschwässer)

Die Kostenanalyse für die Nachbehandlung der Washwässer mittels Ultrafiltration geht von folgenden Basisdaten aus:

- Investitionskosten: 238.000 Euro
- Jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten: 2 % der Investitionskosten
- Personalkosten inkl. Personalnebenkosten: 0,5 Std./d à 45 Euro
- Betriebskosten (Energie, Chemikalien, Membranen): 57,06 Euro/d

Ausgehend von den Basisdaten ergeben sich für die Nachbehandlung des Biologieablaufes mittels Ultrafiltration überschlägig Kosten von **0,97 Euro/m³**.

Die **Behandlungskosten** für die Wiedergewinnung der Washwässer aus der Gewirkevorbehandlung belaufen sich damit auf **insgesamt 2,66 Euro/m³**.

Den dargestellten Behandlungskosten sind die Einsparungen an Frischwasser durch die Bereitstellung von Recyclingwasser, von fossilen Energieträgern zur Betriebswassererwärmung, Abwassergebühren sowie Starkverschmutzerzulagen gegenüberzustellen.

III. Nanofiltration (Färbereiabwässer)

Die Kostenanalyse für die Behandlung der Abwasserteilströme aus der Färberei mittels Nanofiltration geht von der folgenden Basisdaten aus:

- Investitionskosten: 73.800 Euro
- Jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten: 2 % der Investitionskosten
- Personalkosten inkl. Personalnebenkosten: 0,5 Std./d à 45 Euro

- Betriebskosten (Energie, Chemikalien, Membranen): 113,92 Euro/d

Daraus ergeben sich für die Behandlung der Färbereiabwässer mittels Nanofiltration überschlägig Kosten von **0,78 Euro/m³**. Eine Kostenanalyse für die Entsorgung der anfallenden Konzentrate ist derzeit noch nicht möglich, da der Entsorgungsweg noch nicht geklärt ist.

7. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Das entwickelte Verfahren, Teile des Verfahrenskonzeptes bzw. die gemeinsam erzielten Resultate wurden zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse bis dato wie folgt publiziert:

- Vortrag in der Arbeitskreissitzung Umwelt beim Forschungskuratorium Textil, Eschborn, 27.02.2007 (nicht veröffentlicht).
- Vortrag auf der Fachtagung "High-Tex from Germany" im Rahmen der Fachmesse „Tectextil India“, Abdruck im Tagungsband, Mumbai (Indien), 10.10.2007.
- Ausstellung auf der Fachmesse „Tectextil India“, Mumbai (Indien), 10.-12.10.2007 (ITV Denkendorf).
- Ausstellung auf der Fachmesse „IFAT“, München, 05.-08.05.2008 (Fa. Berghof).
- Posterschau im Rahmen des Colloquiums „Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik“, Abdruck im Tagungsband, Bremen, 22.-23.09.2008 (ITV Denkendorf)
- Ausstellung auf der Fachmesse „Aquatech“, Amsterdam (NL), 30.09.-03.10.2008 (Fa. Berghof).
- Publikation in der Fachzeitschrift "Melliand Textilberichte": „Lösungskonzepte zur Kreislaufführung von Prozessabwasser in der Textilveredlungsindustrie“, 10, 2008.

8. Fazit und Ausblick

Das mittel- und langfristige Ziel der Fa. Rökona auf dem Abwassersektor ist neben der Reduzierung der Abwasserbelastung vor allem im Hinblick auf eine mögliche Produktionserweiterung die Wiederverwendung von Abwasserteilströmen z.B. als Wasch- und Spülwasser im Produktionsprozess. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes ein Verfahrenskonzept auf Basis einer anaeroben thermophilen Biologie und Membranfiltration entwickelt und erprobt.

Die Untersuchungen ergaben, dass das entwickelte Konzept für die Gewinnung von Recyclingwasser aus den anfallenden Waschwässern aus der Gewirkevorbehandlung technisch sehr gut geeignet ist. Die membrantechnische Behandlung der bei der Fa. Rökona anfallenden Färbereiabwässer zeigte, dass die anfallende Konzentrate aufgrund der Dispersionsfarbstoffe und des hohen Schwefelgehaltes bedingt durch den Säurefärbeprozess biologisch nicht behandelt werden können. Die Konzentrate müssen demnach evtl. nach einer Volumenreduzierung durch Eindampfung als Sondermüll entsorgt werden.

Ökonomisch betrachtet bietet das entwickelte Verfahrenskonzept ebenso eine sehr attraktive Möglichkeit Abwasserteilströme soweit aufzubereiten, dass sie dem Produktionsprozess wieder zur Verfügung stehen.

Aus der ökologischer Sicht führt die Implementierung des Verfahrens zur Rückführung von (behandelten) Waschwässer in die Gewirkevorbehandlung zur Entlastung der kommunalen Kläranlage Tübingen sowie des Vorfluters (Neckar).

Der nächste Schritt für die Implementierung des Verfahrenskonzeptes wäre zunächst der Aufbau einer Demonstrationsanlage bei der Fa. Rökona in Tübingen zur Behandlung eines Teils der anfallenden Waschwässer. Die Finanzierbarkeit einer solchen Demonstrationsanlage wird derzeit geprüft. Parallel dazu wurde vom Konsortium (Fa. Berghof, ITV Denkendorf, Fa. Rökona) zusammen mit den Firmen Weucon (Heidenheim) und Aureco (Königsbronn) beim Umweltministerium Baden-Württemberg eine finanzielle Unterstützung im Rahmen der Ausschreibung „Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung (Teil EFRE)“ am 01.08.2008 beantragt.

Die technische Anwendung des entwickelten Verfahrens kann prinzipiell in allen Industriezweigen, in denen heiße und hoch belastete Abwässer und/oder Abwasserteilströmen anfallen, vorgenommen werden, da es sowohl eine technische aber auch wirtschaftliche Möglichkeit zur Wiedergewinnung von Prozesswasser bietet [28]. Als prädestiniert erscheint dieses Konzept neben dem Einsatz in der Textilveredlungsindustrie beispielsweise für die Papierindustrie [29], Lebensmittelindustrie zur Behandlung von fetthaltigen (emulgierte) Abwässer [30] oder aber auch Milchindustrie [31].

Die Autoren des Berichtes danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Unterstützung dieses Forschungs- und Entwicklungsprojektes.

9. Literaturverzeichnis

- [1] SCHÖNBERGER, H.; SCHÄFER, T.: *Beste verfügbare Techniken in Anlagen der Textilindustrie*. Umweltbundesamt, Berlin, Februar 2002.
- [2] BERGHOF FILTRATIONS- UND ANLAGENTECHNIK GmbH & Co. KG (Bewilligungsempfänger): *Erarbeitung eines Lösungskonzeptes zur Kreislaufführung von Prozesswasser in der Textilveredlungsindustrie*. Schlussbericht zum DBU-Projekt (Az. 23273), Dezember 2006.
- [3] SARSOUR, J.: *Reduzierung der Belastung des Textilveredlungsabwassers durch eine kombinierte anaerobe/aerobe Behandlung hochkonzentrierter Abwasserteilströme*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2004.
- [4] WANDREY, C.; AIVASIDIS, A.: *Zur Reaktionstechnik der anaeroben Fermentation*. Chemie Ingenieur Technik, 7, 1983.
- [5] vLIER, J.; REBAC, S.; LETTINGA, G.: *High-rate anaerobic wastewater treatment under psychrophilic and thermophilic conditions*. Water Science and Technology, 10, 1997.
- [6] ATV-DVWK-ARBEITSBERICHT: *Aufbereitung von Industrieabwasser und Prozesswasser mit Membranverfahren und Membranbelebungsverfahren*. Arbeitsbericht der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe IG 5.5 Membrantechnik und IG-5 Industrieabwasserreinigung, Korrespondenz Abwasser, 10 u. 11, 2002.

- [7] SARSOOR, J.; JANITZA, J.; STEGMAIER, T.; PLANCK, H.: *Integrierter Umweltschutz in der Textilindustrie: Abwasserreinigung und -wiederverwendung*. Melliand Textilberichte, 9, 2003.
- [8] SCHÄFER, T.; GROSS, R.; JANITZA, J.; TRAUTER, J.: *Nanofiltration von Färbereiabwasser*. Filtrieren und Separieren, 1, 1999.
- [9] KEIM, G.: *Hier haben Flusen keine Chancen*. Wasser, Luft und Boden, 6, 2006.
- [10] ROSSOL, D.; SCHMELZ, K.H.; MEYER, H.: *Schlammfäulung bei erhöhten Temperaturen*. KA-Abwasser, Abfall, 10, 2005.
- [11] WILLETS, J.R.M.: *Thermophilic decolourisation of textile dye waste water*. PhD Thesis, University of New South Wales, Sydney, 2000.
- [12] HEINZ, A.; RÖTLICH, H.; LESSEL, T.; KOPMANN, T.: *Erfahrungen mit Ringlace-Festbettreaktoren in der kommunalen Abwasserreinigung*. Wasser, Luft und Boden, 4, 1996.
- [13] LINKE, M.; SARSOOR, J.: *Reinigung und Wiederverwendung textiler Abwasserteilströme*. Wasser, Luft und Boden, 6, 2005.
- [14] WANDA, U.: *Untersuchungen zum Aufwuchs anaerober Bakterien in Festbettreaktoren für die Abwasserreinigung*. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Paderborn, 1988.
- [15] BAUER, S.; KRAUSE-WIECZOREK, S.; VAHLDIEK, M.: *Abwasserreinigung in der chemischen Industrie über Braunkohlekoks*. KA-Abwasser, Abfall, 4, 2003.
- [16] JÖRDENING, H.J.; MÖSCHE, M.: *Konstruktion und Betrieb eines 500m³ Fließbettreaktors zur anaeroben Abwasserreinigung*. Technik anaerober Prozesse, Tagungsband DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz, TU Hamburg-Harburg. 7.-9.10.1998.
- [17] SARSOOR, J.; JANITZA, J.: *Reinigung und Recycling von Abwasser durch biologische Verfahren*. Melliand Textilberichte, 4, 1999.
- [18] LIPNIZKI, J.; KRAUSE, S.; MEYER-BLUMENROTH, U.: *Auf der Suche nach der geeigneten Membran*. Wasser, Luft und Boden, 9, 2006.
- [19] RAUTENBACH, R.; ALBRECHT, R.: *Membrane Processes*. John Wiley & Sons Verlag, New York, 1989.
- [20] SCHLEGEL, H.G.: *Allgemeine Mikrobiologie*. 7. Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart, 1992.
- [21] SARSOOR, J.; JANITZA, J.; BRAUN, G.: *Reinigung und Recycling textiler Abwässer durch biologische Verfahren*. Wasser Abwasser Praxis, 6, 1998.
- [22] FOERSTER, H.; SCHÖNBERGER, H.: *Textilabwasserentfärbung im Teilstrom*. Melliand Textilberichte, 6, 2006.

- [23] JANITZA, J.; KOSCIELSKI, S.: *Nutzen/Kostenverhältnis chemischer Fällungs/Flockungs-Flotationsverfahren für die Reinigung und Entfärbung farbiger Textilabwässer*. Melliand Textilberichte, 10, 1996.
- [24] KLOTZ, M.; EICKEN, U.; BÖTTCHER, D.; MEYER, C.; LANGMANN, N.; HENTZSCHEL, C.: *Membrantechnologie - Aufbereitung der Konzentrate aus der Membrantechnik (Teil II)*. Textilveredlung, 11/12, 2006.
- [25] KURBUS, T.; SLOKARA, Y.M.; LE MARECHAL, A.M.; VONCINAB, D.B.: *The use of experimental design for the evaluation of the influence of variables on the H₂O₂/UV treatment of model textile waste water*. Dyes and Pigments, 58, 2003.
- [26] SCHÖNBERGER, H.: *Reduktion der Abwasserbelastung in der Textilindustrie*. Umweltbundesamt, Forschungsbericht 102 06 511, Berlin, Januar 1994.
- [27] BROCKES, A.; STROCKA, D.; BERGER-SCHUNN, A.: *Farbmessung in der Textilindustrie*. Mitteilung für die Farbstoffverarbeitende Industrie, ISSN 0722-0391, 1986.
- [28] LYKO, H.: *Membrantechnik: Innovative Technik für viele Einsatzbereiche*. Welt-Handbuch der Filtrations- und Separationsindustrie, VDL-Verlag GmbH, 2008.
- [29] SCHMID, F.; WEINBERGER, G.; PAULY, D.: *Anwendbarkeit und Grenzen der thermophilen anaeroben Reinigung von innerbetrieblichen Teilströmen der Papierproduktionsprozesse*. Papiertechnische Stiftung (PTS), Schlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben (FKZ 12712), 2003.
- [30] REIMANN, I.; KLATT, A.; MÄRKL, H.: *Behandlung fetthaltiger Abwässer der Lebensmittelindustrie mit einem thermophilen Mikroorganismus*. Chemie Ingenieur Technik, 4, 2002.
- [31] DUGBA, P.N.; ZHANG, R.: *Treatment of dairy wastewater with two-stage anaerobic sequencing batch reactor systems - thermophilic versus mesophilic operations*. Bioresource Technology, 68, 1999.