

Abschlußbericht zum Verbundvorhaben

Verbundprojekt:

**„Entwicklung umweltgerechter
Aufschlusverfahren zur Gewinnung hochwertiger
textiler Fasern in Deutschland“**

Teilprojekt:

„Abwasserreinigung“

Förderkennzeichen: 033 9887

Laufzeit: 01.07.2000 – 31.12.2003

vorgelegt von:

**ENVIRO-CHEMIE GmbH
Wasser- und Abwassertechnik
In den Leppsteinswiesen 9
64380 Roßdorf bei Darmstadt**

Projektleiter:

Herr Dr. Markus Engelhart

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung / Ziele.....	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben geführt wurde.....	4
2.1. Faserherstellungsverfahren	4
2.1.1. Traditioneller Faseraufschluss	5
2.1.2. Mechanischer und chemischer Faseraufschluss	6
2.2. Umweltbelastung beim Rösteprozess / Abwasseranfall	7
2.2.1. Anaerobe Wasserröste	7
2.2.2. Aerobe Wasserröste	9
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	10
3.1. Verbesserung des Rösteprozesses durch das ITV Denkendorf	10
3.2. Untersuchungen zu Zusammensetzung und Anfall von Rösteeabwasser	10
3.3. Erarbeitung der technische Lösungen / Bau von Pilotanlagen	11
3.4. Technische Anlagenoptimierung / Wartung	12
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	12
4.1. Aerober Rührschlaufenreaktor.....	12
4.2. Aerober / Anaerober Festbettreaktor	15
4.3. Anaerober Festbettumlaufreaktor	18
4.4. Querstrom-Membranfiltrationsanlage.....	19
4.5. Vorgegangene Arbeiten des Antragstellers.....	23
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	24
6. Erzielte Ergebnisse	25
6.1. Pilotanlagen.....	25
6.1.1. Aerober Rührschlaufenreaktor	28
6.1.2. Anaerober / Aerober Festbettreaktor.....	30
6.1.3. Anaerober Festbettumlaufreaktor.....	33
6.1.4. Membranfiltrationsanlage.....	35
6.2. Technische Optimierungmaßnahmen an den Bioreaktoren	40
6.3. Maßnahmen zur Verbesserung der Membrantrennung.....	41
7. Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse	43
7.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	43
7.2. Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	44
7.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	44
8. Ergebnisse Dritter	44
9. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	44

1. Aufgabenstellung / Ziele

Bastfasern insbesondere Hanf- und Flachsfasern besitzen von Natur aus eine große Variabilität und sind als wertvolle nachwachsende Rohstoffe für die vielfältigsten Anwendungen geeignet. Die traditionelle Aufbereitung dieser Fasern ist jedoch auf einem technologischen Stand, der dem vor 50 Jahren entspricht, und daher dementsprechend unproduktiv und umweltgefährdend. Um diese Defizite zu beseitigen beteiligte sich die ENVIRO-CHEMIE GmbH als Projektpartner des ITV Denkendorf am Vorhaben „Entwicklung umweltgerechter Aufschlussverfahren zur Gewinnung hochwertiger textiler Fasern in Deutschland“. Der integrierte Umweltschutz in der Textilindustrie gehörte und gehört in Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf und anderen Forschungseinrichtungen zu einem Hauptgebiet der F&E-Aktivitäten der ENVIRO-CHEMIE GmbH. Das Vorhaben knüpft daher an die umfangreichen Erfahrungen von Vorläuferprojekten des Instituts für Textil- und Verfahrenstechnik, Denkendorf, und der ENVIRO-CHEMIE im Bereich des Umweltschutzes in der Textilindustrie sowie der Verarbeitung von Hanf- und Flachsfasern an und schreibt diese fort. Mit seinem Industriebezug kommt es der Intention des Förderungsschwerpunkts des integrierten Umweltschutzes in der Textilindustrie und der verbesserten Ausnutzung und Wertschöpfung der in Deutschland heimischen Hanffasern nach.

Aus den vielen Verwendungsmöglichkeiten für Hanffasern finden folgende Einsatzgebiete besonderes Interesse:

- Geotextilien
- Dämmstoffe
- Nadelfilze
- Vliese für Automobilinnenteile
- Verstärkungsfasern für Kunststoffe
- Oberbekleidungs- und Heimtextilien.

Um die Potenziale der des nachwachsenden Rohstoffes für technische Anwendungen besser nutzen zu können und eine Produktion in Deutschland sowohl ökonomisch als auch ökologisch realisierbar zu machen, sind sowohl die Herstellungsverfahren zur Fasergewinnung als auch die daraus resultierenden Umweltbelastungen einer eingehenden Prüfung zu unterziehen. Die wesentlichen Produktionsstufen und ihr Optimierungspotenzial gliedern sich wie folgt.

- Senkung der Erntekosten
- Reduzierung des Entersikos
- optimalen Fasergewinnung für High-Tech-Produkte und textile Anwendungsgebiete
- Aufbereitung und Weiterverarbeitung und -verhaltens
- Erweiterung der Einsatzgebiete

- *umweltschonenden Röstprozesse*
- *Reinigung und Wiederverwendung der beim Röstprozess anfallenden Abwässer, der Wiederverwendung von Energie*
- Elimination der beim Röstprozess entstehenden Geruchsprobleme

Die Umweltentlastung und eine wesentliche Energieeinsparung bei der Herstellung feiner und hochwertiger Bastfasern ist die Basis für die Entwicklung neuer High-Tech-Produkte im technischen Bereich und modischen Textilien aller Art mit einer höheren Wertschöpfung der in Deutschland angebauten Bastfasern. Dies soll erreicht werden durch:

- Erzeugung maßgeschneiderter Fasern für ein breites Anwendungsgebiet
- neue, hochproduktive und personalarme biologische Röstverfahren
- Rückgewinnung von Wertstoffen
- Rückgewinnung von Energie
- *Erhebliche Reduzierung des Wasserverbrauchs von derzeit 50 l/kg Bastfaser*
- *Rückführung der für den Röstprozess verantwortlichen Mikroorganismen*
- *Reinigung und Wiederverwendung der beim Röstprozess anfallenden Abwässer durch kostengünstige aerobe und anaerobe Abwasserreinigungsverfahren*
- Reduzierung der schädlichen Geruchsemissionen durch biologische Abluftreinigungsverfahren

Die im Wesentlichen umweltbezogenen Aspekte der Aufgabenstellungen sind in den oben genannten Aufzählungen kursiv dargestellt. Für die ENVIRO-CHEMIE ergibt sich somit die Entwicklung von Reinigungs- und Rückgewinnungsverfahren als zentrale Aufgabe. Dies sind insbesondere aerobe und anaerobe Verfahren zur Abwasserreinigung, sowie die Entwicklung einer Separierung von Enzymen und Mikroorganismen durch Mikrofiltration zur Rückführung in die Produktion / in den Röstprozess. Die ENVIRO-CHEMIE entwickelte dazu Pilotanlagen im Technikumsmaßstab, die durch das ITV Denkendorf zur Behandlung des in den Produktionsversuchen anfallenden Abwassers eingesetzt wurden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben geführt wurde

2.1. Faserherstellungsverfahren

Die Flachs- und Hanfpflanzenfasern bestehen zum größten Teil aus Zellulose. Zusätzlich enthalten sie Pektin, Hemicellulosen, Lignin, Fette und Wachse sowie wasserlösliche Substanzen. Die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften der Bastfasern unterscheiden sich je nach der Lokalisierung der Faser innerhalb der Pflanze. Anders als bei den freiliegenden Samenhaarfäsern befinden sich die Bastfasern eingebettet im Inneren der Pflanze als mehrzellige Faserbündel. Um die Bastfaser für technische und/oder textile Zwecke nutzen zu können, müssen die Bastfaserbündel zunächst

mechanisch vom Holz getrennt werden und dann weitgehend zu kleineren Bündeln oder einzelnen Fasern aufgelöst werden. Diese Verfeinerung der Bündel und der dazu notwendige Abbau der Begleitsubstanzen wird Aufschluss genannt.

Der Aufschluss kann grundsätzlich auf folgenden Wegen erreicht werden:

2.1.1. Traditioneller Faseraufschluss

Feld- bzw. Tauröste: Bei der Feldröste bleiben die Pflanzenstengel nach der Ernte am Boden liegen. Durch die Feuchtigkeit und Wärme wird die Entwicklung von Mikroorganismen gefördert, welche die Fasern aufschließen. Die Entwicklung der Mikroorganismen schwankt - je nach Ort, Wärme und Feuchtigkeitsgrad, Stadium der Röste und Lage der einzelnen Stengel - sehr stark. Die durch Feld- bzw. Tauröste erhaltenen Fasern sind daher meist von mittlerer Qualität und weisen eine dunkle Farbe auf. Aufgrund der hohen Wetterabhängigkeit wird über die Jahre gesehen eine sehr schlechte Reproduzierbarkeit erreicht. Traditionell dauert diese Röste ca. 3 bis 6 Wochen

Wasserröste: Die aerobe bzw. anaerobe Warmwasserröste erlaubt eine bessere Kontrolle des Röstvorganges und kann ganzjährig in geschlossenen Räumen durchgeführt werden. Dabei wird das Wasser in großen Becken oder Kanälen auf 28 °C bis 40 °C erwärmt. so dass aufgrund der beschleunigten Entwicklung der Mikroorganismen der Röstprozess nur noch 3 bis 5 Tage dauert. Bei der herkömmlichen anaeroben Wasserröste besteht der wesentlich Energieaufwand in Erwärmen des Röstwassers auf ca. 40 °C. Bei der aeroben Wasserröste muss zusätzlich noch Energie für die Belüftung der Mikroorganismen aufgewendet werden.

Verbesserter enzymatischer Aufschluss: Durch Zusatz von speziell adaptierten Mikroorganismen können Behandlungszeiten und Kosten herabgesetzt werden. Die Enzymbehandlung kann mit verschiedenen Enzympräparaten in unterschiedlichen Konzentrationen und Einwirkungszeiten erfolgen. Die optimalen Arbeitstemperaturen und pH-Werte sind bei den jeweiligen Produkten vom Hersteller vorgegeben. Dabei haben die Tensidkonzentrationen, wie sie in der Textilveredlung üblich sind, keinen negativen Einfluss auf eine Enzymbehandlung. Nach der Enzymbehandlung werden die Fasern aus der Flotte genommen und zur Denaturierung des Enzyms im Spülwasser kurz aufgeköcht. Anschließend werden die Fasern von kochend nach kalt gespült und getrocknet. Eine mechanische Nachbehandlung der so aufgeschlossenen Flachsfasern ist erforderlich. Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens sind die hohen Kosten für Enzympräparate, die einer industriellen Anwendung im Wege stehen.

Im Röstprozess (anaerobe Wasserröste) wird Essig- und Buttersäure, Ethanol, Buthanol, Aceton, Kohlendioxid, Wasserstoff sowie teilweise Methan und Schwefelwasserstoff gebildet. Das zum Rösten verwendete Wasser wird mit diesen Stoffen stark belastet. Durch den

anaeroben Abbau entstehen hohe unangenehme Geruchsemissionen, die vor allem durch die Buttersäure sowie durch Schwefelwasserstoff hervorgerufen werden.

Die Wasserröste ist Voraussetzung für die Gewinnung der wertvollen feinen und langen Fasern. Das bisher eingesetzte Röstverfahren ist jedoch höchst umweltschädlich und wird bislang nur in den ausländischen Hanfanbaugebieten durchgeführt, wo das Abwasser meist ungeklärt in die Vorfluter abgelassen wird. Produkte aus solchem Hanf werden dem unwissenden deutschen Verbraucher dann als umweltverträglich angepriesen.

Wegen der hohen Umweltbelastung werden in Deutschland keine Wasserrösten zur Gewinnung von Hanffasern durchgeführt. Durch diese Einschränkung wird eine weitestgehende Wertschöpfung der deutschen Hanffaser vergeben. Für den deutschen Bastfaseranbau ist es deshalb zwingend notwendig neue Wege der umweltschonenden Röstprozesse, der Reinigung und Wiederverwendung der beim Röstprozess anfallenden Abwässer sowie der Elimination der beim Röstprozess entstehenden Geruchsprobleme zu beschreiten.

2.1.2. Mechanischer und chemischer Faseraufschluss

Aufgrund der Umweltbelastung durch den Röstprozess hat sich in Deutschland die mechanische und chemische Kurzfasernerzeugung etabliert. Die Kurzfasertechnologie bietet die Möglichkeit, die Wasserröste zu umgehen und ungeröstetes bzw. (auf dem Feld) teilgeröstetes Ausgangsmaterial zu verwenden. Anschließend muss der Hanf in einer Entholzungsanlage von Schäben befreit werden und kann dann weiter mechanisch verfeinert werden. Die so entstandenen mechanisch aufgeschlossenen Fasern können nur im low-tech Bereich z. B. als Isoliermaterial eingesetzt werden. Sollen die Faser aber im textilen Bereich eingesetzt werden, müssen sie weiter aufgearbeitet werden. Dazu stehen z.Zt. drei neue chemische Aufschlussverfahren zur Verfügung:

Dampfdruckaufschluß (IAF): Die mechanisch entholzten Rohfasern werden auf eine dem Spinnverfahren angemessene Länge geschnitten und in ein Dampfdruckgefäß gegeben. Die Rohfasern werden mit verschiedenen Chemikalien imprägniert (meist Natronlauge mit reduzierenden Verbindungen) und danach während 1 bis 30 min lang mit gesättigtem Wasserdampf bis zu 12 bar Überdruck behandelt. Nach einer Dekompression bis auf 8 bar wird der Dampf schlagartig abgelassen, wobei die Fasern mittels Dampf ausgelassen werden. Die Fasern werden anschließend gewaschen, getrocknet und mechanisch geöffnet.

Chemisches Aufschlussverfahren: Die mechanisch entholzten Rohfasern werden in einer alkalischen Lösung bei 121 °C während ca. 30 min autoklaviert. Vor dem Öffnen wird der Autoklav auf unter 100 °C abgekühlt. Die Fasern werden mit Wasser gespült, neutralisiert und gewaschen. Nach dem Trocknen werden die Fasern mechanisch aufgeschlossen.

Ultraschallaufschluss: Die mechanisch entholzten Rohfasern werden in Wasser mit oder Zusatzstoffe vorbehandelt. Anschließend folgt die Ultraschallbehandlung in Wasser mit

Zusatzstoffen. Die Ultraschallwellen rufen lokale Druckunterschiede in Flüssigkeiten hervor, so dass in der Entspannungsphase winzige Dampf- und Gasblasen (Kaviationsblasen) gebildet werden. In der Kompressionsphase implodieren diese Blasen, wobei lokal sehr hohe Drücke und Temperaturen entstehen. Durch diese und weitere Effekte kommt es zu einer Trennung zwischen Faseroberfläche und organischen Klebern. Durch Modulation der Ultraschallamplitude und Variation der Fördergeschwindigkeit kann die Behandlungsintensität den Erfordernissen des Materials angepasst werden. Die Fasern werden anschließend gewaschen, getrocknet und mechanisch aufbereitet.

Diese neuen Aufschlussverfahren werden noch nicht im industriellen Maßstab angewandt. Trotzdem wurde versucht, eine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren durchzuführen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Bastfaser nur dann eine Chance als textiler Rohstoff haben kann, wenn ihre Preise im Bereich der Baumwollpreise liegen. (ca. 1,5 €/kg).

Kosten pro kg Fasern:	
mechanisch	€ 0,56 – 0,72
Dampfdruck	€ 2,4 – 3,6
Ultraschall	€ 4,3

Sowohl der Preis von mit Dampf aufgeschlossenen Bastfasern als auch der Preis der mit Ultraschall aufgeschlossenen Fasern liegt deutlich über dem Preis der Baumwolle. Mit den in den letzten Jahren entwickelten chemischen Faseraufschlussverfahren ist es somit nicht möglich, in den Preisbereich der Baumwolle vorzudringen. Außerdem ist bei diesen Aufschlussverfahren mit gesteigerten Abwasserbelastungen zu rechnen. Als ökonomisch und ökologisch vertretbare Alternative bleibt somit der traditionelle Faseraufschluss durch Wasserröste, der somit vorrangig im Projekt betrachtet wird. Auch die Abwasserreinigungsverfahren werden auf dieses Aufschlussverfahren hin entwickelt und optimiert.

2.2. Umweltbelastung beim Rösteprozess / Abwasseranfall

2.2.1. Anaerobe Wasserröste

In der Literatur findet man sehr unterschiedliche Angaben zum Wasserverbrauch bei der anaeroben Wasserröste für Bastfasern. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass bei der Basinröste das optimale Flottenverhältnis, d.h. das Verhältnis von Stroh zu Wasser, 1:20 beträgt, so dass 20 l Röstwasser pro kg Stroh aufgewendet werden müssen. Dazu kommt der Wasserverbrauch für das Spülen der gerösteten Bastfasern, der bei ca. 30 l/kg Stroh liegt. Ohne Berücksichtigung des zeitweise noch hinzukommenden Spülwassers zum Reinigen der Röstbecken, ergibt sich somit ein Wasserverbrauch von 50 l pro kg Stroh.

Die Abwässer sind hellgelb bis dunkelbräunlich gefärbt, durch Kolloide getrübt und riechen säuerlich. Die Abwässer weisen aufgrund der in Lösung gegangenen pflanzlichen Zersetzungsprodukte eine hohe organische Belastung auf.

Die Zusammensetzung der anfallenden Abwässer der Hanfröste zeigt keine nennenswerte Unterschiede zur denen der Flachsröste so dass im Folgenden auf Angaben über Flachsröstabwasser zurückgegriffen wird.

Tab. 1: Zusammensetzung der Rösteabwässer von Flachs

Gesamtschwebestoffe	5 – 150 mg/l
Abdampfrückstand	1.000 – 6.500 mg/l
Glühverlust	550 – 3.500 mg/l
CSB	625 – 3.750 mg/l
BSB ₅	1.300 – 3.600 mg/l
Flüchtige organische Säuren	1.500 – 6.000 mg/l

Die flüchtigen organischen Säuren bestehen in der überwiegenden Menge aus Essig- und Buttersäure. Daneben treten auch Ameisen-, Propion- und Valeriansäure auf. Die Anteile dieser einzelnen Komponenten an der Gesamtmenge der flüchtigen organischen Säuren sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Unter den nicht flüchtigen organischen Säuren ist vor allem die Milchsäure zu nennen.

Tab. 2: Zusammensetzung der Röstwässer von Flachs

Essigsäure	61,2 %
Buttersäure	31,7 %
Propionsäure	6,5 %
Ameisensäure	0,7 %
Valeriansäure	0,6 %

Außer den organischen Zersetzungsstoffen enthalten die Röstabwässer Stickstoff-, Phosphorsäure, Kali, Kalk und andere Verbindung, deren Gehalte stark schwanken können.

Tab. 3: Verschiedene Verbindungen in den anaeroben Röstwässern von Flachs

Gesamtstickstoff (Gesamt-N)	7 – 109 mg/l
Ammoniak (NH ₃)	3 – 19 mg/l
Phosphate (P ₂ O ₅)	5 – 235 mg/l
Kali (K ₂ O)	101- 918 mg/l

Beim Stehen unter Luft- und Lichtabschluss gehen die Röstwässer, meist sogar noch in drei- bis fünffacher Verdünnung mit reinem Wasser, in faulige Zersetzung über. Die Abwässer dürfen nicht direkt in den Vorfluter eingeleitet werden, da es dort zu starken Sauerstoffschwund mit Fischsterben und lebhafter Pilzbildung zur Folge kommt. Das relativ hohe CSB/BSB₅-Verhältnis lässt auf die prinzipielle Abbaubarkeit der organischen Wasserinhaltsstoffe schließen. Problematisch kann lediglich der Ligningehalt des Wassers sein, da gelöste Lignine, insbesondere die hochmolekulare Fraktion, als biologisch schwer abbaubar gelten.

Zur Lösung des Röstabwasserproblems werden in Ungarn und Rumänien neue Wege diskutiert, wie das Aufbringen des Röstabwassers als Dünger auf die Felder. Zum Teil soll das Röstabwasser auch zur Verdunstung gebracht und der entstehende Schlick als Dünger aufgebracht werden. Inwieweit dieser Weg in der Praxis bereits beschritten werden und mit was für Folgen sie verbunden sind, ist unklar. Aufgrund der Geruchsprobleme dürfte in Deutschland diese Wege der Entsorgung nicht beschritten werden.

Die Röstabwässer der anaeroben Wasserröste weisen wie o.a. eine hohe organische Fracht auf, so dass sich zur wiederverwendungsgerechten Reinigung dieser Abwässer kostengünstige biologische (anaerobe und aerobe) Verfahren anbieten. Durch die kombinierte Anwendung von anaeroben und aeroben Verfahren lassen sich die zu entsorgenden Schlammengen reduzieren und der Energieeinsatz wesentlich verringern.

2.2.2. Aerobe Wasserröste

Eine Reduzierung des Wassereinsatzes und eine geringere Belastung des entstehenden Abwassers bei der Wasserröste ist mit dem moderneren Verfahren der aeroben Röste zu erreichen, das sich bislang noch nicht durchgesetzt hat. Bei dieser Wasserröste handelt es sich um einen biologischen Prozess, bei dem allerdings nicht alle Parameter gesteuert werden können. Ausbeute und Qualität der erzeugten Langfaser bestimmen bei diesem Prozess das Röstende wesentlich. Die Erkennung der Röststreife kann jedoch nicht gemessen werden und ist auch heute noch auf Übung und Erfahrung angewiesen. Die Röststreife erfolgt außerdem nicht gleichmäßig: verschiedene Bastfasersorten, verschieden lang gelagerte Bastfaserstengel rösten verschieden schnell; dicke Stengel rösten schneller als dünne. Selbst an demselben Stengel ist die Röststreife verschieden, der untere Teil des Stengels ist eher röstreif als die Spitze. Die produzierte Faserqualität ist somit erheblichen Schwankungen unterworfen, was für einen industriellen Einsatz der Fasern Probleme aufwirft.

Bei einer aeroben Wasserröste fällt ebenfalls Abwasser an, das entsorgt werden muss. Die Entsorgung des Röstabwassers ist z.Zt. ungeklärt. Zudem muss wesentlich mehr Energie für die Belüftung des aeroben Prozesses aufgewendet werden, als dies beim anaeroben Röstprozess der Fall ist.

Aufgrund bisher gesammelter Erfahrungen der ENVIRO-CHEMIE in der Textilindustrie und mit organisch hoch belasteten Abwässern können sowohl aerobe als auch anaerobe Verfahren zur Behandlung zum Einsatz kommen. Als besonders erfolg versprechend werden träger gestützte Bioreaktoren eingeschätzt, die ihre Eignung in großtechnischen Anlagen bereits unter Beweis gestellt hatten (Braun und Hellmann, 1994; Braun et al., 1996). Diese Reaktoren wurden in Festbettbauweise und als Schlaufenreaktor mit nachgeschalteter Sedimentation ausgeführt.

Literatur

Braun, G., Hellmann, W. (1994). Aufbereitung und Wiederverwendung von Textilabwässern. Chemie-Anlagen+Verfahren, Nr. 8

Braun, G., Hellmann, W., Janitza, J., Koscielski, S. (1996). Reinigung und Wiederverwendung von textilen Färbereiabwässern durch kombinierte Anwendung von braunkohlengestützter Biologie und UV-Oxidation. Wasser Abwasser Praxis, Nr. 06/1996

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1. Verbesserung des Röstprozesses durch das ITV Denkendorf

Durch das ITV Denkendorf wurde die Entholzung und der Feinaufschluss als kontinuierlicher Prozess durchgeführt. Das neue Prinzip stützt sich im Wesentlichen auf folgende Verfahrensmerkmale:

- Einsatz von höheren bzw. hohen Temperaturen zur Beschleunigung der chemisch/physikalischen Vorgänge;
- Rückführung der für den Röstprozess verantwortlichen Enzyme;
- Kontinuierlicher Betrieb im Gegenstromverfahren zur Reduzierung des Wasserverbrauchs.

Durch die Beschleunigung des Röstprozesses wird die Produktivität der Röste erhöht und die Fasergewinnung wirtschaftlicher. Die Intensität des Faseraufschlusses und damit die Qualität der Fasern kann im kontinuierlichen Verfahren gezielt gesteuert werden. Dies ist die Voraussetzung für eine gleichbleibend hohe Faserqualität, wie sie für hochwertige Anwendungsgebiete gefordert wird.

3.2. Untersuchungen zu Zusammensetzung und Anfall von Rösteabwasser

Durch das ITV Denkendorf wurde die stoffliche Bewertung (Ist-Analyse) des Röstgesamtabwasser bzw. der einzelnen Prozessabwässer nach abwassertechnischen Parametern (CSB, BSB₅, TOC, AOX, organischen und anorganischen Stickstoff, Farbigkeit, Wasserhärte) durchgeführt (Ergebnisse siehe Teilbericht ITV). Darüber hinaus wurden an

ausgewählten Proben Einzelstoffdaten wie Pektine und Lignine und deren Schwankungsbreite erhoben. Zur Ermittlung des möglichen aeroben biologischen Abbaus bzw. evtl. den aeroben Abbaus hemmender Inhaltsstoffe des Gesamttröstabwassers und der einzelner Prozessabwässer wurden Abbau und Hemmtests nach dem Zahn/Wellens-Verfahren bzw. im Sapromat durchgeführt. Die Ermittlung des möglichen anaeroben biologischen Abbaus erfolgte mittels Kulturgefäßen.

3.3. Erarbeitung der technische Lösungen / Bau von Pilotanlagen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Grundsatzuntersuchungen wurden durch die ENVIRO-CHEMIE GmbH in Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf Pilotanlagen konzipiert. Die Anlagen beruhten auf unterschiedlichen Verfahrensprinzipien, die zum Teil aus Erfahrungen der Projektpartner in Vorgängerprojekten bekannt waren bzw. neu für den Anwendungsfall entwickelt wurden. Es wurden eingesetzt:

- eine modifizierte aerobe Biologie: aerober Rührschlaufenreaktor mit interner Rezirkulationsschleife, als Sequencing Batch Reactor betrieben
- anaerobe Biologie 1: weitgehend horizontal durchströmte Festbettbiologie mit Braunkohlenkoks als Trägermaterial (durch Ausstattung mit Belüftungselementen rückspülbar bzw. aerob zu betreiben)
- anaerobe Biologie 2: vertikal durchströmter Festbettumlaufreaktor, ebenfalls mit Braunkohlenkoks als Trägermaterial, zusätzlich mit nachgeschalteter Abscheideeinheit ausgerüstet
- Membrananlage: Querstromfiltration mit Mikro- und Ultrafiltrationsmodulen auf keramischer Basis und Arbeitsbehälter

Mit diesen Pilotanlagen wurden umfangreiche Pilotversuche unter Praxisbedingungen durchgeführt. Die Reinigungsverfahren wurden dabei sowohl für die Behandlung von Gesamtmischabwasser als auch zur separaten Behandlung von Abwasserteilströmen eingesetzt. Besonders Prozessstabilität der Anlage wurden große Anforderungen gestellt, denn die Röstabwässer unterlagen in Zusammensetzung und Belastung – den Erfahrungen entsprechend - großen Schwankungen. Darüber hinaus waren durch die Summenparameter und Einzeluntersuchungen nicht alle organischen Inhaltsstoffe zweifelsfrei zu bestimmen, so dass die Beaufschlagung der Pilotanlagen mit Röstabwasser grundsätzlich mit versuchstechnischen Unsicherheiten behaftet war. Zu Erfüllung unterschiedlicher Anforderungen der Abwasserreinigung wurden die Pilotanlagen durch EC so konzipiert, dass die verschiedenen Komponenten in wechselnden Konstellationen kombiniert werden konnten.

3.4. Technische Anlagenoptimierung / Wartung

Da es sich bei allen Pilotanlagen um Prototypen handelte, wurde EC im weiteren Projektverlauf in der technischen Anlagenoptimierung und in der Wartung der Pilotanlagen tätig.

Die Versuche wurden durch Personal des ITV Denkendorf durchgeführt. Aus dem Betriebsverhalten der Pilotanlagen während dieser Untersuchungen wurden die Maßnahmen zur Anlagenoptimierung entwickelt. Umbau- und Wartungsmaßnahmen erfolgten vor Ort durch Personal der ENVIRO-CHEMIE GmbH.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Arbeiten der ENVIRO-CHEMIE im Vorhaben knüpfen an bekannte Verfahren zur Abwasserreinigung an, die bei der Konzeptionierung und Planung der Pilotanlagen Eingang fanden. Aufbauend auf dem in der Literatur dargestellten und in eigenen Projekten / Arbeiten erworbenen Wissen wurden dann die Rösteabwasserreinigungsverfahren optimiert und Weiterentwicklungen durchgeführt.

In den folgenden vier Abschnitten wird daher für jede der im Projekt verwendeten Pilotanlagen der wissenschaftliche und technische Stand erläutert und die in Recherchen ermittelten, maßgeblichen Literaturangaben aufgeführt.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird kurz auf die vorangegangenen Arbeiten der Antragssteller eingegangen.

4.1. Aerober Rührschlaufenreaktor

Die Ausführung des im Vorhaben entwickelten Rührschlaufenreaktors beruht im Wesentlichen auf zwei bekannten Verfahrensprinzipien: der Sequencing Batch Reactor-Technik und dem Konstruktionsprinzip des Schlaufenreaktors.

Das Sequencing Batch Reactor (SBR) Verfahren wird ein der kommunalen und industriellen Abwasserreinigung seit geraumer Zeit angewandt (EPA, 1999; Wilderer et al., 2001). Im Gegensatz zu einer kontinuierlich durchflossenen Belebtschlammanlage, bei der unterschiedliche Reinigungsschritte (Stickstoffelimination, CSB-Abbau, Sedimentation) in getrennten Reaktionszonen räumlich getrennt voneinander ablaufen, laufen beim SBR alle Reinigungsschritte zeitlich gestaffelt in einem Reaktor ab. Der Zulauf zum Reaktor erfolgt dabei nicht kontinuierlich sondern schubweise in einem sogenannten Befüllschritt. Es ergibt sich ein Reinigungszyklus, der immer wieder durchlaufen wird (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**1).

In Abhängigkeit der Reinigungsaufgabe können auch mehrere Befüllschritte oder aerobe / anoxische / anaerobe Reinigungsphasen eingesetzt werden. Jeder Reinigungszyklus endet

jedoch immer mit der Absetzphase des Belebtschlammes und dem Dekantieren des gereinigten, klaren Überstands entsprechend des eingestellten Austauschverhältnisses.

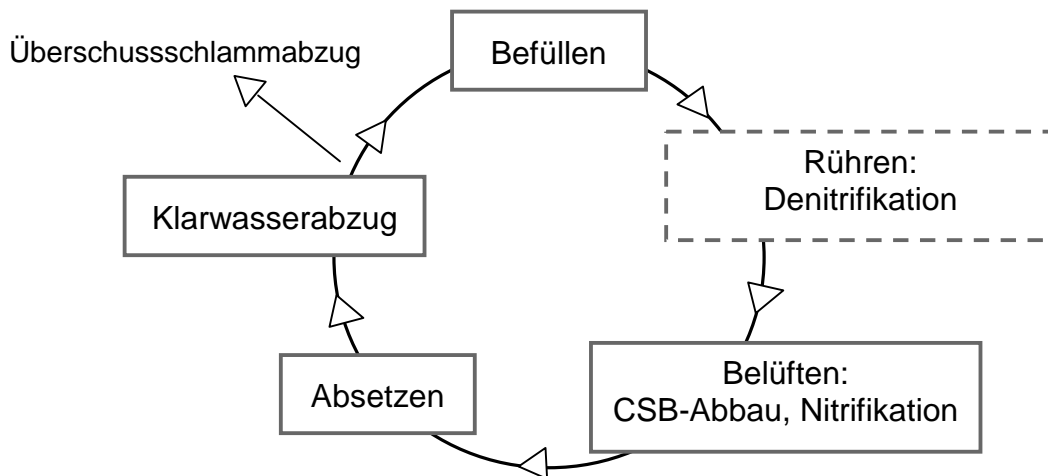


Abb. 1: Reinigungszyklus im Rührschlaufenreaktor

Durch heute verfügbare moderne Steuerungstechnik mit speicher-programmierbaren Steuerungen ist die Automatisierung solcher im Batch-Modus betriebenen Anlagen problemlos möglich. Die Dauer der einzelnen Zyklusphasen werden meist fest vorgegeben und gegebenenfalls durch Bedienungspersonal angepasst oder – weniger verbreitet da wesentlich aufwendiger in der Realisierung – durch on-line Messungen im Prozess variabel festgelegt (Wilderer et al., 2001). Das SBR-Verfahren legt somit die Betriebsweise der Abwasserreinigungsanlage fest, die Ausführung der Reaktortechnik (z.B. Durchmischung des Reaktors, Belüftungstechnik, Reaktorgeometrie) bzw. das Konstruktionsprinzip der verwendeten Reaktoren ist dagegen weitgehend variabel.

Ein solches Konstruktionsprinzip, das vor allem in der industriellen Abwasserreinigung Verwendung findet, ist der sogenannte Schlaufenreaktor. Ausführungsvarianten sind der Rührschlaufenreaktor, der Strahlschlaufenreaktor, der Prallstrahlreaktor oder HCR-Reaktor. Prinzipiell nutzen diese Reaktortypen eine Reaktorumlaufstömung und die damit verbundene Turbulenz zum effektiven Eintrag von Sauerstoff in die Flüssigkeitsphase (Keitel, 1978; Bank, 2000). In den Reaktoren ist ein Leitrohr eingebracht, in dem je nach Ausführungsform eine nach unten oder oben gerichtete Strömung des Abwasser-Belebtschlamm-Luft-Gemisches erfolgt. Entsprechend ergibt sich im konzentrisch um das Leitrohr liegende Reaktorraum eine entgegen gerichtete Strömung (vgl. folgende Abbildung mit Beispielen der Funktionsweise von Rührschlaufen und Strahlschlaufenreaktor).

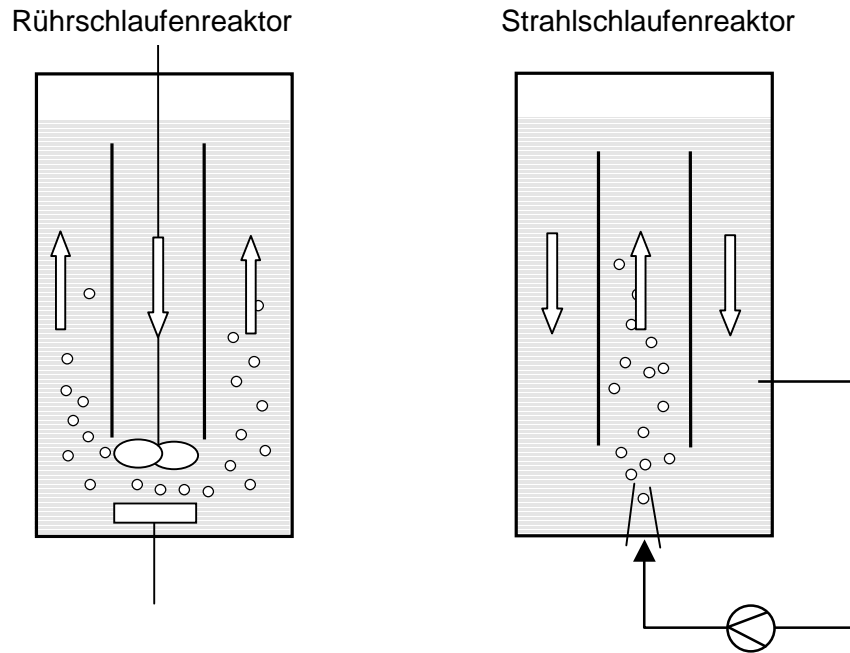


Abb. 2: Funktionsweise von Rührschlaufen- und Strahlschlaufenreaktor

Als Belüftungseinrichtungen kommen meist entweder Ejektoren / Düsen oder Druckbelüftungselemente (Diffusoren) zum Einsatz. Während im Rührschlaufenreaktor zusätzlich der Rührer als mechanisch bewegtes Element angebracht ist, realisieren Strahlreaktoren die Umlaufströmung ausschließlich aufgrund des Dichteunterschiedes des Luft/Wasser-Gemisches im Leitrohr und dem restlichen Reaktorraum (vgl. z.B. Venus, 2001). Bei diesem Verfahrensprinzip wird durch eine intensive Durchmischung des Abwassers mit der Umgebungsluft eine große, als Kontaktzone wirkende Oberfläche („Phasengrenzfläche“) geschaffen, so dass die Mikroorganismen eine optimale Sauerstoffversorgung und damit weitgehend optimale Lebensbedingungen erhalten. Auf diese Weise kann ihr maximales Umsatzpotential ausgeschöpft werden.

Wird in solchen Reaktorkonzepten die Integration von anaeroben oder anoxischen Prozessphasen beim biologischen Abbau gefordert, so lässt sich dies sinnvoll nur durch die Trennung von Umwälzung und Begasung erreichen. Diese Trennung wird durch den mechanischen Rührer im Rührschlaufenreaktor möglich. Die Intensität der Durchmischung wird u.a. durch die Reaktorgeometrie, den Durchmesser und Länge des Leitrohrs, die Drehzahl und Beschaffenheit des Rührorgans sowie das Fließverhalten des Drei-Phasengemisches aus Belebtschlamm, Abwasser und Gasblasen bestimmt.

Literatur

EPA (1999). Wastewater Technology Fact Sheet – Sequencing Batch Reactors. EPA 832-F-99-073. Office of Water, Washington

Wilderer, P.A., Irvine, R.L., Goronszy, M.C. (Edts.) (2001). Sequencing Batch Reactor Technology. IWA Scientific and Technical Report Series No. 10, ISBN 1900222213

Keitel, Gunter (1978). Untersuchungen zum Stoffaustausch in Gas-Fluessig-Dispersionen in Rueherschlaufenreaktor und Blasensaeule. Dissertation Universität Dortmund, Abt. Chemietechnik

Bank, Matthias (2000). Basiswissen Umwelttechnik. Wasser, Luft, Abfall, Lärm, Recht, 4., komplett neubearbeitete Auflage. 1769 Seiten, Vogel Verlag, Würzburg

Venus, J. (2001). Skript zur Vorlesung Bioverfahrenstechnik. ATB Potsdam, S. 29 - 31

4.2. Aerober / Anaerober Festbettreaktor

Festbettreaktoren sind laut Definition Behälter mit Füllstoffen, auf denen Mikroorganismen angesiedelt sind, die biochemische Abbauvorgänge bewirken, z.B. Tropfkörper, Tauschkörper, Biofilter (DIN 4045, 1985). Festbettreaktoren werden im Rahmen der Abwasserreinigung u.a. dann eingesetzt, wenn das Abwasser einen hohen Gehalt gelöster organischer Substanz enthält. Diese Reaktoren können sowohl aerob als auch anaerob betrieben werden. Beim aeroben Betrieb wird das intensiv mit Luft durchmischte Abwasser über die Füllkörper geleitet. Dabei kommt es zu katalytischen, aber auch biologischen Abbaureaktionen, wodurch die Reinigung im System erzielt wird. (vergleiche auch DIN EN 1085). In einem Festbettreaktor wachsenden Bakterien im Biofilm zeichnen sich gegenüber suspendierter Biomasse (Belebtschlamm) häufig durch eine größere Artenvielfalt aus. Dies führt bei der Abwasserreinigung zu besseren Bedingungen für die Elimination von schwer abbaubaren Stoffen und zu einer erhöhten Resistenz gegenüber toxischen Belastungen.

In der Regel kommen Festbettreaktoren zum Einsatz, die zusätzlich oder als Hauptkomponente noch eine Filterwirkung aufweisen und im Auf- bzw. im Abstrom betrieben werden (auch Systeme mit weitgehend horizontaler Fließrichtung sind möglich). Aufgrund der Schwebstoffe im Abwasser und dem Biomassewachstum kann es zu Verblockungen in den Hohlräumen zwischen den Aufwuchskörpern kommen. Daher muss diese Art von Reaktoren in bestimmten Intervallen zu Reinigungszwecken im Gegenstrom gespült werden. Beim aeroben Betrieb kommt eine Luft-Wasser-Spülung zum Einsatz, bei der durch hohe Turbulenz das Filterbett aufgelockert wird und die zwischen und auf den Füllkörpern gebildete Biomasse teilweise ausgetragen wird. Beim anaeroben Betrieb wird meist nur eine Wasser-Spülung angewendet.

Festbettreaktoren werden z.B. im Bereich der Wollverarbeitung zur Elimination schwer abbaubarer Substanzen (Pestizide, AOX-haltige Substanzen) eingesetzt (Cornel, 1993), für die Reinigung BTX-haltiger Abwässer (de Nardi et al., 2001) oder zur Reinigung von Abwasser in der Papierindustrie (Seguin et al., 1993).. Als Füllmaterial kommen unter anderem Blähton (System Biofor, Ondeo Degremont, im Aufstrom betrieben),

Styroporkügelchen (System Biostyr, Veolia Water, im Aufstrom betrieben), Aktivkohle / Blähschiefer (System Biocarbone, OTV, im Abstrom betrieben) oder Braunkohlenkoks (Biogest International, Dresden; BioCarb Reaktor, Vahldiek Prozess Service; überstauter Festbettreaktor im Abstrom betrieben).

In Deutschland bestehen technische Erfahrungen in der Textilindustrie vor allem mit braunkohlenkoksgestützten Festbettreaktoren, die vom ITV Denkendorf in Zusammenarbeit mit der Rheinbraun AG bzw. URT Umwelttechnik GmbH entwickelt wurden (Ehrler und Glöckler, 1986; Janitza und Koscielski, 1991, Braun et al., 1993). Die dort eingesetzten Festbettreaktoren werden im Normalfall im Abstrom betrieben. Die Festbettschüttung verbindet die adsorptiven Eigenschaften des Braunkohlenkokes mit der biologischen Aktivität der darauf siedelnden Mikroorganismen. Der Festbettreaktor stellt ein kontinuierlich durchströmtes System dar, das jedoch in Fließrichtung eine weitgehende Pfropfenströmung mit verminderter Rückvermischung aufweist. Die im Batch-Prozess im Reaktor erreichte zeitabhängige Abnahme der Schmutzstoffkonzentration nach einem Befüllschub (s.o.) vollzieht sich hier räumlich entlang des Fließweges von oben nach unten. Beim aeroben Betrieb ergibt sich durch die Belüftung eine Rückvermischung durch die Turbulenz der aufsteigenden Luftblasen. Im Anaerobbetrieb kann dies - wenn auch in wesentlich geringerem Maß - durch das sich in der Festbettschicht bildende Biogas erfolgen.

Besondere Verfahrensmerkmale der Braunkohlenkoks-Festbettreaktoren sind:

- Durch die Abnahme der Schadstoffkonzentration entlang des Fließweges ergeben sich unterschiedliche Milieubedingungen die eine unterschiedliche Entwicklung der Biofilmbiocoenose auf dem Braunkohlenkoks begünstigen. Leicht abbaubare Inhaltsstoffe werden bevorzugt in der Nähe des Reaktoreinlaufs abgebaut, während schlechter abbaubare Substanzen erst in größerer Entfernung zum Einlauf (nach längerer hydraulischer Aufenthaltszeit) umgesetzt werden.
- Durch die überlagernden adsorptiven Eigenschaften des Braunkohlenkoks der Festbettschüttung können auch solche Abwasserinhaltsstoffe zurückgehalten und metabolisiert werden, die einen herkömmlichen Belebtschlammreaktor bei gleichen hydraulischen Aufenthaltszeiten unverändert passieren würden. Deshalb eignet sich dieses Reaktorprinzip besonders für Abwässer industriellen Ursprungs mit schwer abbaubaren Substanzen.
- Durch die Filtrationseigenschaften der Koksschüttung werden auch partikuläre und suspendiert vorliegende Anteile der Abwasserverschmutzung im oberen Teil des Filters nach der Einlaufstelle zurück gehalten. Die Partikel können durch gezielte Spülungen aus dem Filterbett entfernt werden, so dass es nicht zur Verblockung der Filterschicht kommt.

Festbettreaktoren eignen sich sowohl für aerobe als auch anoxische / anaerobe Abwasserreinigung. Durch Wechsel zwischen belüfteten und unbelüfteten Reinigungsphasen kann auch in Festbettreaktoren eine weitergehende Stickstoffelimination erreicht werden. Da die Zusammensetzung des Rösteabwassers einen beträchtlichen Stickstoffanteil erwarten lässt (vgl. Tab. 3), ist diese Verfahrensoption ebenfalls bereits bei der Konzeptionierung dieses Pilotreaktors zu berücksichtigen. Für eine komplett anaerobe Nachbehandlung des Abwassers zur reduktiven Entfernung von organischen Verbindungen wie z.B. bei der anaeroben Wasserröste entstehenden organischen Säuren, muss darüber hinaus die Möglichkeit zur Temperierung des Reaktors gegeben sein. Für die Versuche beim ITV Denkendorf wurde der Temperaturbereich mesophiler anaerober Organismen als Prozessgrundlage angestrebt. Thermophile Prozesse sollen nicht untersucht werden.

Literatur

DIN 4045 (1985). Abwassertechnik; Begriffe

DIN EN 1085 (1997). Abwasserbehandlung-Wörterbuch; Dreisprachige Fassung EN 1085

Ehrler, P.; Glöckler, R.; et al. (1986). Einsatz von Braunkohlenkoks in biologische Kläranlagen, Braunkohle (7/86), S. 171-177

Janitza, J.; Koscielski, S. (1991). Einsatz von Braunkohlenkoks zur Optimierung der Nitrifikation/Denitrifikation in Kläranlagen mit hohem Industrieabwasser-Anteil. *textilpraxis international* (1991), S.906-910

Cornel, P. (1993). Pestizid- und AOX-Entfernung aus Abwässern der Wollverarbeitung mittels Bio-Festbett- und Aktivkohlefiltern. 1. GVC/IUV-Kolloquium Produktionsintegrierter Umweltschutz – Abwässer der Textilindustrie und Wollverarbeitung, Bremen, 13.-15.9.93, S. 324-334

De Nardi, I.R., Varesche, M.B.A., Zaiat, M., Foresti, E. (2001). Anaerobic degradation of BTEX in a packed-bed reactor. 9th World Congress Anaerobic Digestion, Antwerpen, Proceedings Part 1, S. 613 – 624

Seguin, F.A., Tremblay, B., Zaloum, R., Lavalley, P., Lapointe, S. (1993). Biofiltration Pilot Test at the Daishowa Pulp and Paper Mill Using the Biocarbone Process. *Water Pollution Research Journal of Canada*, 28(3), S. 621 – 634

Braun, G. Felgener, G.; Janitza, D. (1993). Verfahren zur Aufbereitung und Wiederverwendung von Abwässern, die bei der Herstellung und Veredelung von Textilien anfallen. 1. GVC/IUV-Kolloquium Produktionsintegrierter Umweltschutz – Abwässer der Textilindustrie und Wollverarbeitung, Bremen, 13.-15.9.93, S. 232-249

4.3. Anaerober Festbettumlaufreaktor

Der Festbettumlaufreaktor wird - wie auch ein anaerob betriebener Festbettreaktor – in der Anaerobtechnik verwendet um möglichst hohe Biomassekonzentrationen zu erreichen, die durch Immobilisierung der Mikroorganismen in den Hohlräumen und auf den Partikeln der Festbettschüttung zustande kommen. Beim Betrieb von Festbettreaktoren kann es durch Biomassewachstum und Bildung von Ablagerungen (z.B. Ausfällungen durch Überschreiten des Löslichkeitsgleichgewichtes) zur Verblockung der freien Strömungskanäle kommen. Dem wird beim Festbettreaktor durch periodische Rückspülung der Braunkohlenkoks-schüttung entgegengewirkt. Im Festbettumlaufreaktor wird dagegen eine möglichst kontinuierliche Umwälzung und Reinigung der Partikelschüttung angestrebt, um das Wachstum der Biomasse und die Biofilmbildung bzw. die Bildung von Ablagerungen besser kontrollieren zu können. Festbettumlaufreaktoren wurden bereits zur Reinigung reaktivfarbstoffhaltiger Abwässer aus der Textilveredelungsindustrie (Ballabio, 1997) oder zur Reinigung metallhaltiger Abwässer (Sternad et al., 1999) eingesetzt.

Festbettumlaufreaktoren werden meist von unten nach oben mit dem zu reinigenden Medium durchströmt. Ein Teil des Trägermaterials wird entweder durch erhöhte Turbulenz im Reaktor in einem Förderrohr oder in einer externen Abscheideeinrichtung nach Austrag aus dem Reaktor (z.B. Sedimentation oder Hydrozyklon) gereinigt. Je nach Zustand des Schüttungsmaterials wird es verworfen und durch neues Material ersetzt oder wieder in den Reaktor zurückgeführt. Das im Pilotreaktor angewendete Verfahrensprinzip besteht aus einer extern angeordneten Abscheideeinheit zur selektiven Ausschleusung von Kokspartikeln aus dem Umwälzungskreislauf (siehe folgende Abbildung).

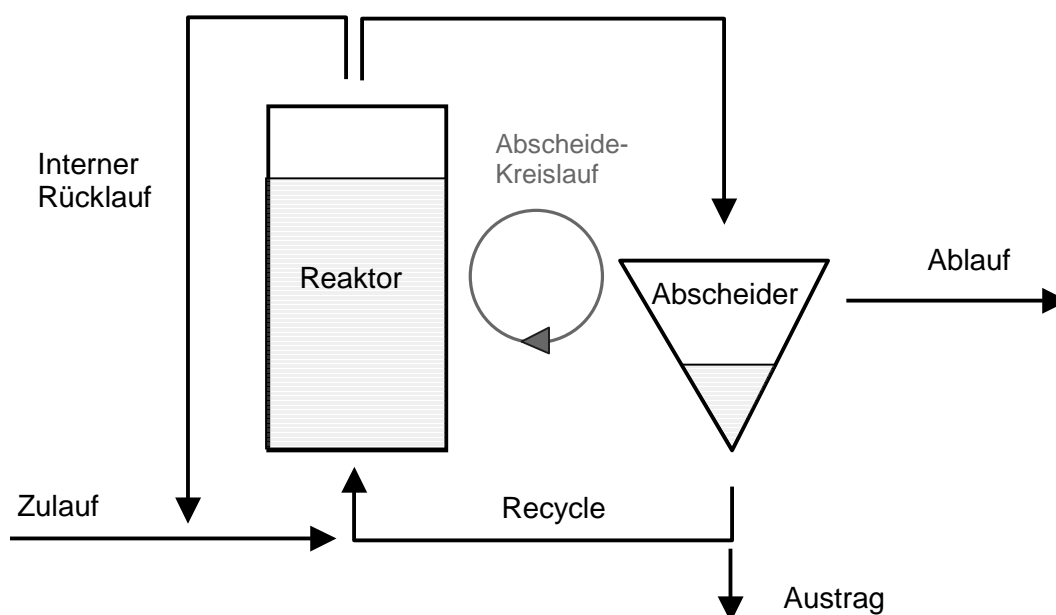


Abb. 3: Verfahrensprinzip des anaeroben Festbettumlaufreaktors

In Abhängigkeit der Schaltung des Abscheidekreislaufs werden die Feststoffpartikel entweder dem Umlaufreaktor von unten erneut zugeführt oder über den Austrag aus dem System entfernt. Der Partikelaustrag wird letztendlich durch die hydraulische Aufstromgeschwindigkeit über den Reaktorquerschnitt v_A ($m^3/(m^2 \cdot h)$) gesteuert, die sich als Summe der hydraulischen Belastung aus dem Zulauf zur Anlage und aus dem internen Rücklauf ergibt. Die Steuerungsgröße ist der interne Rücklauf, der in Abhängigkeit der organischen Belastung im Zulauf gewählt wird. Mit steigendem v_A steigt der Austrag der Partikel, die aus der Festbettschüttung ausgetragen werden. Gleichzeitig ergibt sich mit erhöhter Aufstromgeschwindigkeit eine gesteigerte Turbulenz im Reaktor, die die Stoffübergangsprozesse (z.B. Diffusion der gelösten Substanzen im Abwasser) aus der Flüssigkeitsphase in den Biofilm um die Braunkohlenkokspartikel verbessert. Als überlagernde Einflussgröße nimmt ebenfalls die Biogasbildung Einfluss, da durch die Gasauftiegs-geschwindigkeit des aufsteigenden Biogases zusätzliche turbulente Strömungsanteile durch den Abbauprozess erzeugt werden. Durch das Zusammenspiel der verschiedenen Strömungskomponenten kommt es zur Auflockerung der Festbettschüttung im Anaerobreaktor, die bis zur Fluidisierung der Partikel führen kann.

Literatur

Ballabio, Umberto (1997). Untersuchungen zur anaeroben Behandelbarkeit reaktivfarbstoffhaltiger Teilstromabwässer aus der Textilveredlungsindustrie in einem Festbettumlaufreaktor. Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart

W. Sternad, S. Wisst, W. Trösch (1999). Biotechnische Metallfällung im Festbett-Umlaufreaktor. 4. GVC-Kongreß »Verfahrenstechnik der Abwasser- und Schlammbehandlung – additive und prozessintegrierte Maßnahmen«, Bremen , 6.-8. September 1999, Band 1 S. 319 - 326

4.4. Querstrom-Membranfiltrationsanlage

Die im Projekt durch das ITV untersuchte anaerobe oder aerobe Wasserröste beruht letztendlich auf mikrobiellen Umsetzungsprozessen, die den Faseraufschluss der Bastfasern zur Folge haben. Im Rösteabwasser befinden sich daher, neben gelösten organischen Produkten des Abbaus, ebenfalls die dafür verantwortlichen Bakterien und Pilze bzw. von diesen Organismen ausgeschiedenen Exoenzyme. Exoenzyme sind Biokatalysatoren, die durch Mikroorganismen gebildet werden, um extrazelluläre Polymere in Einzelbausteine (sog. Monomere) zerlegen zu können und damit erst die Aufnahme durch die Zellwand und den Übergang in den zellulären Stoffwechsel zu ermöglichen. Exoenzyme werden in der Natur immer dann gebildet, wenn Mikroorganismen partikuläre, polymere Feststoffe abbauen. Bei der Wasserröste ist dieser Vorgang erwünscht um die Vereinzelung der

Bastfasern zu erreichen. Er muss rechtzeitig abgebrochen werden, um die Faserfestigkeit und Faserlänge nicht negativ zu beeinflussen. Es ist bekannt, dass ein verbesserter Aufschluss durch die Zugabe von Enzymen erreicht werden kann (Tubach und Kessler, 1995; Keller, 2001). Die verbesserte enzymatische Röste scheitert jedoch noch daran, dass die Kosten für extern zugegebene Enzyme zu hoch sind.

Für eine Optimierung der Wasserröste wurde daher in der Planung des Vorhabens vorgesehen, die sich in der Röste entwickelnden Mikroorganismen (Bakterien / Pilze), und in einem zweiten Schritt die sekretierten Makromoleküle (z.B. Exoenzyme), in weiteren Rösteprozessen erneut zu verwenden, um eine Verkürzung der Röstedauer zu ermöglichen. Die geeignete Technik zur Abtrennung von Mikroorganismen und Makromolekülen ist die Membrantechnologie, die schon in der industriellen und abwassertechnischen Anwendung vielfach eingesetzt wird (Rautenbach, 1997; z. B. Abtrennung von Hefe aus Fermentationsbrühen, Abtrennung von Mikroorganismen in Membranbioreaktoren, Rückgewinnung von Molkeprotein aus Restmolke).

Neben den Aufgaben zur Abwasserreinigung wurde in der Vorbereitung des Projektes daher auch der Einsatz von Membrantechnologie beschlossen, um einen selektiven Rückhalt von im Röstewasser suspendiert vorliegenden Mikroorganismen (Pilze / Bakterien) bzw. Makromolekülen (wie z.B. Exoenzyme) zu ermöglichen. Wie in der folgenden Tabelle gezeigt wird, eignen sich – in Abhängigkeit der gewünschten Trennschärfe – für diese Aufgaben die Mikrofiltration und die Ultrafiltration der Röstewässer.

Tab. 4: Trenngrenzen unterschiedlicher Membranfiltrationsverfahren

Mikrofiltration (MF) Symmetrische Porenmembran	Abtrennung kolloidaler und suspendierter Teilchen (0,1-10 µm)
Ultrafiltration (UF) Asymmetrische Porenmembran	Abtrennung von Makromolekülen (0,005-0,5 µm) Keine Entsalzung (sofern gelöst)
Nanofiltration (NF) Asymmetrische Lösungs-Diffusion-Membran	Abtrennung im Bereich MW 100 – 1000 (g/mol) Teilentsalzung findet statt
Umkehrosmose (UO) Asymmetrische Lösungs-Diffusion-Membran	Abtrennung im Bereich MW < 100, Weitgehende Entsalzung (> 90%)

Während die Mikrofiltration nur kolloidale und suspendiert vorliegende Teilchen abzutrennen vermag (hier als Mikroorganismen u.ä.), erfasst die Ultrafiltration auch Makromoleküle (hier z.B. Exoenzyme).

Die Versuchsanlage wurde als Querstromfiltration (Cross-Flow) ausgeführt. Im Gegensatz zur kuchenbildenden Filtration (Dead-End), bei der der Volumenstrom des zu reinigenden Mediums senkrecht auf die Oberfläche des Filtermaterials trifft, wird im Cross-Flow-Modus das Abwasser tangential zur Membranoberfläche geführt (vgl. Abb. 4).

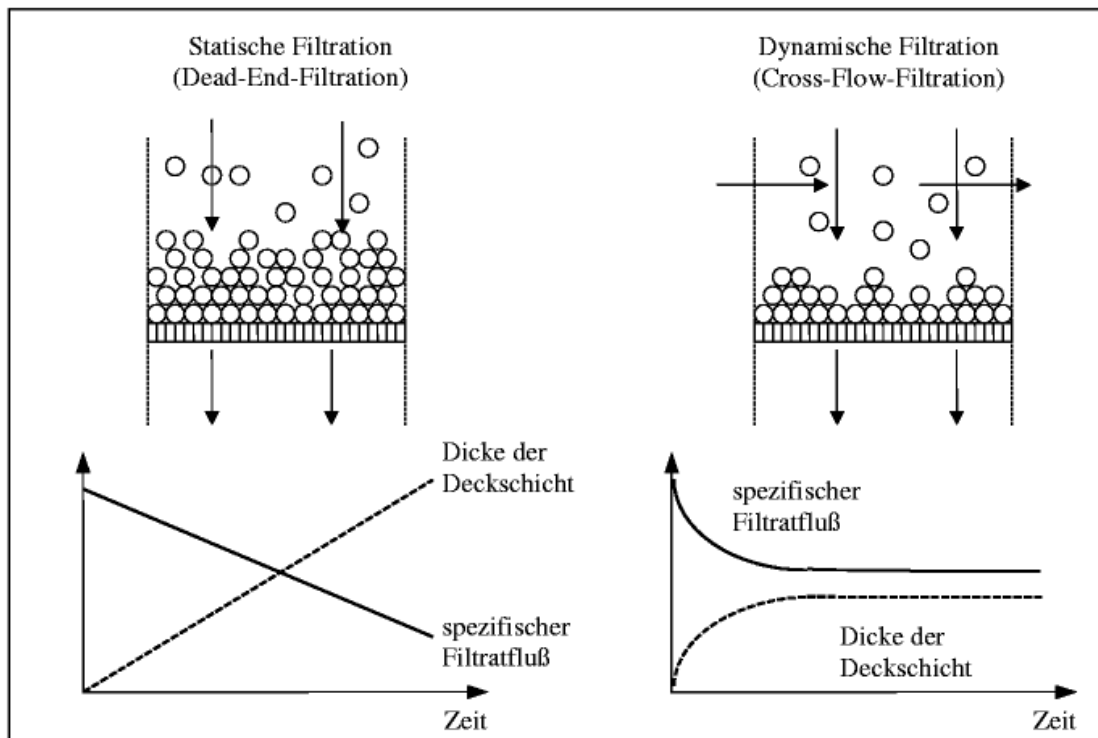


Abb. 4: Prinzip der (links) Dead-End-Filtration und (rechts) Cross-Flow-Filtration

Durch diese Verfahrenstechnik werden Partikel, die sich aufgrund des Permeatstroms auf der Zuführseite (Feed-Seite) der Membran ablagern immer wieder in den Flüssigkeitsstrom zurück gefördert. Durch die Überströmgeschwindigkeit an der Membranoberfläche und die dadurch erzeugte Turbulenz, lässt sich die sogenannte Deckschichtbildung kontrollieren und der Permeatstrom über einen langen Versuchszeitraum bei nur leicht ansteigendem Druckverlust weitgehend konstant halten. In einer kuchenbildenden Filtration ist dagegen mit einem ständig ansteigenden Filtrationsdruck mit zunehmenden Partikelablagerungen auf der Membran zu rechnen.

Die maßgeblichen Baugruppen der im den Versuchen verwendeten Cross-Flow-Membranfiltrationsanlage sind in der folgenden Abbildung (Abb. 5) dargestellt. Der Abwasserzulauf aus der Wasserröste (Feed) wird zunächst mit einer Feedpumpe in einen Arbeitsbehälter überführt, der bis zu einem bestimmten Niveau gefüllt wird. Danach wird die die Überströmpumpe im Membrankreislauf aktiviert, die einen konstanten Abwasserstrom über das Membranmodul führt. An der Membran werden die Schmutzstoffe zurückgehalten und erneut in den Arbeitsbehälter zurückgeführt, während das gereinigte Permeat durch die Membran tritt und das System verlässt.

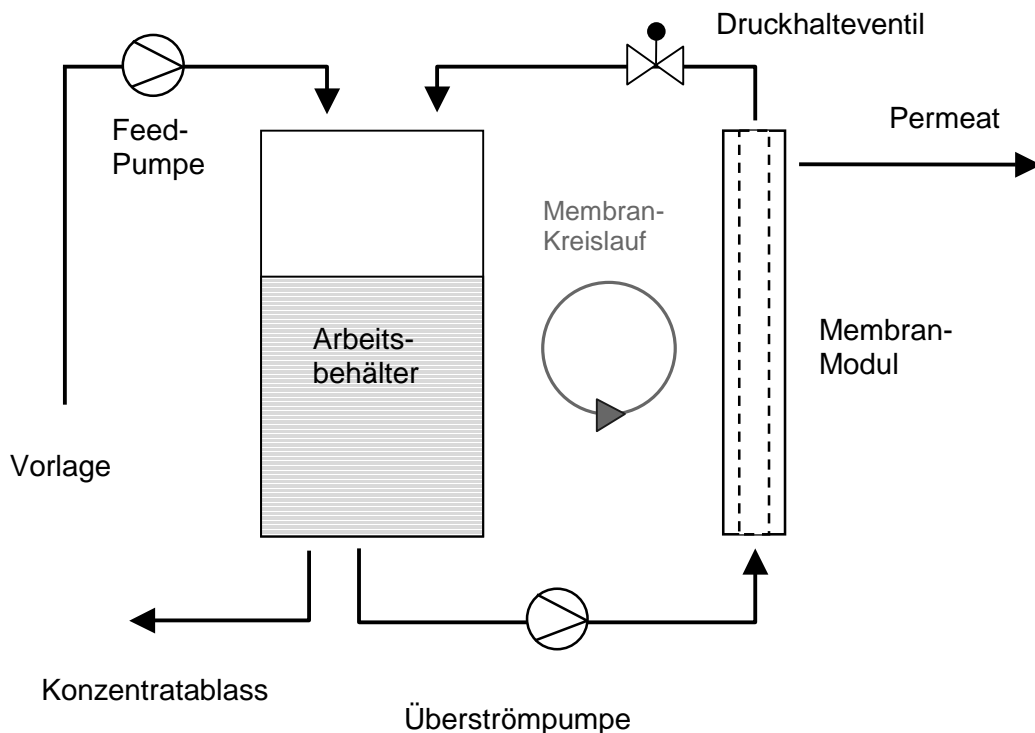


Abb. 5: Verfahrensprinzip der Querstromfiltrationsanlage

Durch die kontinuierliche Ausschleusung des Permeatstroms ergibt sich eine stetige Aufkonzentrierung der zurück gehaltenen Stoffe im Arbeitsbehälter. Dieser Vorgang wird zu einem bestimmten Zeitpunkt abgebrochen und das Konzentrat über den Konzentratablass entweder verworfen, oder einer weiteren Verwendung zugeführt. Die Überströmung und die Druckverhältnisse im Filtrationsmodul werden durch die Öffnung des am Ausgang des Membranmoduls eingebauten Druckhalteventils bestimmt.

Die wesentlichen Betriebsparameter für die Cross-Flow-Filtration sind die Überströmungsgeschwindigkeit im Membranmodul (die sich aus dem Umwälzvolumenstrom bezogen auf die freie Anström-Querschnittsfläche des Moduls ergibt) und die transmembrane Druckdifferenz Δp als mittlere treibende Kraft für den Permeatfluss.

$$v_s = Q/A_{\text{quer}}$$

v_s : tangentele Überströmgeschwindigkeit [m/s]

Q : Umwälzvolumenstrom [m³/s]

A_{quer} : zur Anströmung freie Querschnittsfläche des Moduls [m²]

$$\Delta p = (p_{\text{ein}} - p_{\text{aus}})/2 - p_{\text{Perm}}$$

Δp : transmembrane Druckdifferenz [bar]

p_{ein} : Absoluter Druck am Moduleingang [bar]

p_{aus} : absoluter Druck am Modulausgang [bar]

p_{Perm} : an der Permeatseite der Membran anstehender absoluter Druck [bar]

Als Größe für die Auslegung der zu installierenden Membranfläche der Anlage wird meist der spezifische Permeatfluss (Flux) in $[L/(m^2 \cdot h)]$ erfasst. Wird der Flux darüber hinaus noch auf die aufgewendete transmembrane Druckdifferenz bezogen, so spricht man von der Membranpermeabilität $[L/(m^2 \cdot h \cdot bar)]$.

$$Q_{\text{spez,Perm}} = Q_{\text{Perm}}/A_{\text{Membran}}$$

$Q_{\text{spez,Perm}}$: spezifischer Permeatfluss $[L/(m^2 \cdot h)]$

Q_{Perm} : Permeatfluss $[L/h]$

A_{Membran} : installierte Membranoberfläche $[m^2]$

Weitere wichtige Parameter sind der Rückhalt und die mögliche maximale Aufkonzentrierung die das Verhältnis von eingesetztem Feed-Volumen zum zurückbehaltenen Konzentrationsvolumen darstellt.

Literatur

Tubach, M., Kessler, R.W. (1995). Neue Aufschlussverfahren – Ein Schlüssel für innovative Anwendungen von Flachs. 1. Hunsrücker Leintage. 12 S

Keller, A. (2001). Pflanzenfaser-Werkstoffe – Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten. FAT-Berichte Nr. 575, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik

Rautenbach, R. (1997). Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Springer Verlag, Heidelberg, ISBN: 3540615733

4.5. Vorangegangene Arbeiten des Antragstellers

Die ENVIRO-CHEMIE GmbH beschäftigt sich seit 1976 als Ingenieurunternehmen mit Problemlösungen für industrielles Abwasser. In dieser Zeit wurden mehrere tausend Behandlungsanlagen verschiedenster Verfahrenstechniken und Größenordnungen realisiert. Das Leistungspaket umfasst die Phasen Problemanalyse, Analytik und Labortests, Pilotversuche, Anlagenplanung und –konstruktion, Montage sowie Service und Betriebsführung. Im Vordergrund standen und stehen individuell geplante und standardisierte Wasser- und Abwasser-Problemlösungen für Industriebetriebe unterschiedlichster Branchen. Wesentliche Bausteine der ENVIRO-CHEMIE Anlagentechnik sind die drei Hauptverfahren

Chemisch/physikalische Verfahren	ENVOCHEM [®]
Biologische Verfahren	BIOMAR [®]
Membranverfahren	ENVOPUR [®]

ENVIRO-CHEMIE hat bereits Anlagen zur Abwasseraufbereitung und –wiederverwendung in der Textilindustrie mit Kapazitäten von 0,2 m³/d bis 3000 m³/d realisiert.

Bei einem Veredler von Samtstoffen in Tschechien wurde zum Beispiel eine Verfahrenskombination aus zwei Bioreaktoren realisiert, die im SBR-Modus betrieben werden, und denen eine chemisch-physikalische Nachbehandlung mit Fällung / Flockung nachgeschaltet ist. Der Zulaufstrom zu dieser Anlage beträgt bis zu 500 m³/d, bei maximaler CSB-Belastung von 2800 mg/L.

Mit einer Kombination aus Querstromultrafiltration und nachgeschalteter Umkehrosmose wurde eine ca. 80%ige Recyclingrate von Abwasser eines textilveredelnden Betriebes in Berlin erreicht. Die Anlage wurde 1999 in Betrieb genommen und behandelt einen Abwasserstrom von bis zu 12 m³/h mit max. 1.600 mg CSB/L. Die aus den Membrantrennstufen anfallenden Konzentrate werden in einer chemisch-physikalischen Nachbehandlung weiter gereinigt und eingeeignet.

Bei zwei Textilfabriken in Deutschland wurden Komplettlösungen aus unterschiedlichsten Verfahrensschritten zum Recycling von Textilabwasser realisiert (vgl. auch Oles et al., 1995). Das Konzept der Anlagen basiert auf dem Einsatz von braunkohlenkoks-gestützten Rührschlaufenreaktoren, einer nachgeschalteten Fällungs-/Flockungsstufe mit Flotation, und Sandfiltration, einer Aktivkohleadsorption und einer Umkehrosmoseanlage. Die Umkehrosmose dient zur Entsalzung des Abwassers. Das anfallende Konzentrat wird als Sole zum Neuansatz von Solelösungen für die Fabrik wieder eingesetzt. Durch diese Maßnahmen ergibt sich bei einer Durchsatzleistung von ca. 2500 m³/d eine Recyclingquote von ca. 60 % und eine Reduktion des Salzverbrauchs um ca. 30 %. Diese Anlagen fanden aufgrund der hochentwickelten Technologie bereits Erwähnung auf europäischer Ebene (European Commission, 2001).

Mit dem Institut für Textil- und Verfahrenstechnik in Denkendorf verbindet die ENVIRO-CHEMIE eine langjährige positive Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Abwasserreinigung und –wiederverwendung textiler Abwässer.

Literatur

Oles, V., Hellmann, W., Lazar, D. (1995). Abwasseraufbereitungskosten in der Textilveredelungsindustrie. Melliand Textilberichte, 9/1995, S. 720-723

European Commission (2001). Integrated Pollution Prevention Control (IPPC) – Reference Document on Best Available Techniques für Textile Industry. Draft Nov. 2001, S. 390 – 395

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Hauptansprechpartner für die ENVIRO-CHEMIE GmbH im Vorhaben war das ITV Denkendorf, da die Pilotanlagen durch Personal des ITV betreut wurden und auch im Technikum des ITV aufgestellt wurden. Im Vorfeld der Anlagenrealisierung wurden daher

intensive Abstimmungsgespräche geführt, bei denen die Wünsche und Anregungen des ITV aufgenommen wurden. Diese Anregungen flossen in die Konstruktion und den Bau der Anlagen mit ein. Für die Planung und Umsetzung der Braunkohlenkoks-gestützten Bioreaktoren erfolgte freundliche Unterstützung durch Prof. Dr. Gerd Braun von der FH Köln, der über langjährige Erfahrungen mit diesen Systemen verfügt.

Da für den Bau der Pilotanlagen Komponenten benötigt wurden, die die ENVIRO-CHEMIE GmbH nicht selbst produziert, gab es in der Phase der Anlagenplanung eine rege Zusammenarbeit mit Lieferanten und Komponentenherstellern (z.B. Allweiler GmbH, Getriebbau Nord GmbH&Co. atech innov. GmbH, KAT GmbH, USF Schumacher GmbH und anderen). Die verfahrenstechnische Auslegung wurde von EC vorgegeben und Angebote der Lieferanten eingeholt und abgeglichen. Bei der technischen Optimierung der Pilotanlagen wurden erneut die Komponentenlieferanten mit einbezogen, um die Verbesserung des Betriebszustandes der Pilotanlage sicher zu stellen und die Bedienerfreundlichkeit zu erhöhen

Der Austausch mit den anderen Projektpartnern erfolgte im Rahmen der regelmäßigen Projekttreffen beim ITV Denkendorf.

6. Erzielte Ergebnisse

Die Aufgabe der ENVIRO-CHEMIE GmbH im Vorhaben war die Entwicklung und Umsetzung von Pilotanlagen zur Durchführung von Versuchen zur Reinigung von Rösteabwasser. EC oblag die Auslegung und Konstruktion aller maßgeblichen technischen Komponenten. Die Ergebnisse der Arbeit von EC sind in der Erstellung der Pilotanlagen dokumentiert, die im Folgenden nochmals näher vorgestellt werden.

6.1. Pilotanlagen

Die Anlagen wurde in der ersten Jahreshälfte 2001 an den Projektpartner ITV Denkendorf ausgeliefert. In der Vorbereitungsphase wurde in der Diskussion mit dem ITV Denkendorf die Dimension der Pilotanlagen gemäß Absprache bestätigt. Die verschiedenen Pilotanlagen entsprachen den unterschiedlichen Verfahrensstufen bzw. Teilstrombehandlungen auf der Basis der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Restabwässer.

Die Verfahrensschemata und Konstruktionszeichnungen der Apparate bzw. Pilotanlagen wurden in Abstimmung mit dem ITV erstellt. Die notwendigen Einzelkomponenten wurden bestellt. Die Fertigung der Anlagen wurde im Dezember 2000 begonnen und im Januar 2001 abgeschlossen. Hierzu zählt auch die komplette Mess- und Regeltechnik. Alle Pilotanlagen wurden im März 2001 zum ITV Denkendorf geliefert und seither dort betrieben.

Das erste Zwischenziel (Fertigstellung der Anlagen und Funktionsnachweis) wurde im März 2001 erreicht.

Bilder der Pilotanlagen sind auf den nächsten Seiten zu sehen. Die erste Abbildung zeigt Die Vorderansicht der Membranfiltrationsanlage mit Schaltschrank. Die Zuführpumpe ist auf der Anlagengrundplatte montiert .Der Zulauf erfolgt über den blauen Vorfilter in den rechts montierten Arbeitstank. Der Umwälzkreislauf wird links am Behälter mit Drosselventil sichtbar. Umwälzpumpe und Membranmodul befinden sich auf der Anlagenrückseite. Die Dosierstation für Membranreiniger befindet sich rechts am Arbeitsbehälter.



Abb. 6: Ansicht der Membranfiltrationsanlage

Frontansichten der drei biologischen Abwasserreinigungsverfahren mit der Einheit aus Reaktor, Schaltschrank, Zuführungs- und Rezirkulationspumpen, Temperiereinheit und der nötigen Verrohrung mit Kugelhähnen und Ventilen zeigt Abb. 7. Auch hier sind die Pumpenaggregate auf der Grundplatte montiert.



Abb. 7: Frontansicht der drei biologischen Behandlungsanlagen
(v.l.n.r. Rührschlaufenreaktor, Festbettreaktor, Festbettumlaufreaktor)

Alle Anlagen sind auf Stahlgestellen und bilden einzeln funktionsfähige Einheiten mit allen notwendigen Steuerungs- und Anlagenkomponenten. Zur Pilotierung unterschiedlicher Verfahrenskombinationen können die Anlagen parallel und seriell betrieben werden. Das zu reinigende Abwasser muss für alle Anlagen in einem bauseitigen Stapeltank vorgelegt werden, aus dem die in den Pilotanlagen integrierten Zuführpumpen das Abwasser in die Reaktoren überführen.

6.1.1. Aerober Rührschlaufenreaktor

6.1.1.1. Verfahrenstechnische Umsetzung

Der Rührschlaufenreaktor wird in den Pilotversuchen im SBR-Modus betrieben, d.h. es werden definierte Zykluszeiten hintereinander durchlaufen. In Abhängigkeit der Abbaubarkeit des Rösteabwassers und der daraus resultierenden Überschussschlammproduktion bzw. Absetzbarkeit des Überschussschlammes können die Zeiten der einzelnen Zyklusphasen in der programmierbaren Anlagensteuerung entsprechend der Anforderungen angepasst werden. Durch die diskontinuierliche Reaktorbeschickung wird eine Zwischenspeicherung des Rösteabwassers im Pilotmaßstab unumgänglich. Da jedoch auch die Wasserröste ein Batch-Prozess mit diskontinuierlichem Wasseranfall ist (die Röstebecken werden befüllt und erst nach Ablauf der Röstedauer komplett entleert), wird auch bei der Verwendung von kontinuierlich beschickten Abwasserreinigungsanlagen eine Zwischenspeicherung erforderlich. Im Hinblick auf einen späteren großtechnischen Einsatz ergeben sich durch Notwendigkeit einer Zwischenspeicherung damit keine negativen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens im Vergleich zu kontinuierlich beschickten Anlagen.

Zur Verbesserung der Umlaufströmung im Rührschlaufenreaktor wurde bei der Konstruktion auf eine hohe schmale Bauform des Reaktors Wert gelegt. Die Zugänglichkeit von Belüftungseinrichtungen und Rührer wird durch ein seitliches Mannloch gesichert.

Der Rührschlaufenreaktor hat ein Volumen $V_{Rk} = 300 \text{ L}$. In Abhängigkeit der Abwasserverschmutzung können in Schlaufenreaktoren hohe Raumzeitausbeuten respektive kurze hydraulische Verweilzeiten realisiert werden. Die SBR-Konzeption sah daher eine Variabilität in der Zulaufbeschickung $100 \text{ L/h} \leq Q_0 \leq 500 \text{ L/h}$ vor. Zur Optimierung der Umlaufströmung im Schlaufenreaktor wurde das integrierte Rührwerk frequenzgesteuert ausgelegt mit Nenndrehzahlen $200 \text{ min}^{-1} \leq \text{UPM} \leq 1000 \text{ min}^{-1}$. Ein Rührrichtungswechsel sollte im Versuchsbetrieb ebenfalls möglich sein, um Ablagerungen im Reaktor sicher zu minimieren.

6.1.1.2. Beschreibung der Pilotanlage (R&I-Schema siehe Anlage 1)

Der Aufbau des Rührschlaufenreaktors wird im zugehörigen R&I-Schema (siehe Anlage 1) deutlich. Der Reaktor B 10 wird durch die Zuführpumpe P 10.1 befüllt. P 10.1 ist als

Tauchmotorpumpe direkt in das vorgeschaltete Speicherbecken eingehängt und mit einem Trockenlaufschutz versehen. Entsprechend der in der Programmsteuerung vorgegebenen Füllstände wird der Reaktor bis zum oberen Füllstand LS+ (ML 10.4) mit Abwasser beschickt. Als Sicherheitsausrüstung verfügt der Reaktor über einen separaten Überlauf- und Trockenlaufschutz (ML 10.5, ML 10.1).

Nach Befüllen des Reaktors wird das Belebtschlamm/Wasser-Gemisch durch das interne Rührwerk mit Leitrohr umgewälzt. Die erzeugte Umlaufströmung kann in Abhängigkeit der Drehrichtung und Frequenz des Rührwerks R 10.1 eingeregelt werden. Am Reaktorboden ist das Luftverteilungssystem der feinblasigen Druckbelüftung mit Membrantellerbelüftern montiert. Die Luftversorgung in der belüfteten Reaktionsphase erfolgt durch externen Anschluss an eine bauseitige Druckluftversorgungsleitung. Die Belüftungsdauer wird in der Steuerung vorgegeben. Entsprechend des vorgegebenen Zeitintervalls wird das VP 10.1 geöffnet. Der Druckluftstrom kann über ein Nadelventil geregelt werden, der Durchfluss wird an einem Schwebekörperdurchflussmesser abgelesen.

Nach der eingestellten Belüftungszeit wird das Rührwerk gestoppt und VP 10.1 geschlossen. In der Sedimentationsphase sinkt der Schlammspiegel im Reaktor und die überstehende Klarphase kann entsprechend des über die Füllstände eingestellten Austauschvolumens an den Ventilen VH 10.2 – 10.5 abgezogen werden. Das Abzugsniveau wird vor Versuchsbeginn festgelegt.

Der Klarwasserabzug erfolgt bis zum unteren Füllstand LS- (ML 10.3) durch Öffnen des Pneumatikventils VP 10.3.

Durch die biologische Überschussschlammproduktion kommt es zum Anstieg der Trockensubstanzkonzentration im Reaktor. Die TS-Konzentration wird im Labor routinemäßig erfasst. Anhand der Messungen wird der Überschussschlammabzug ebenfalls in Intervallen durch Öffnen des Pneumatikventils VP 10.2 und Einschalten der ÜS-Abzugpumpe P 10.2 realisiert. Öffnungszeit des Ventils und Laufzeit der Pumpe werden ebenfalls über Timer-Einstellungen vorgegeben.

6.1.1.3. Steuerung

Der Schaltschrank der Pilotanlage ist entsprechend Industriestandard mit einer SPS ausgerüstet. Alle Alarme werden optisch (Meldeleuchte und Meldetext) und akustisch angezeigt. Aus Sicherheitsgründen kann die Anlage erst nach quittieren der Alarmmeldung erneut gestartet werden. Im Automatikbetrieb werden alle oben genannten Funktionen und Abläufe timergesteuert ausgeführt und überwacht. Über das Hauptbild der Anlagensteuerung ist jedoch eine komplett manuelle Bedienung des Pilotreaktors möglich, um von Standardeinstellungen abweichende Verfahrensabläufe und -situationen realisieren zu können (z.B. Kompletentleerung des Reaktors, Zustände bei Wartungs- und Umbaumaßnahmen am Reaktor etc.).

6.1.2. Anaerober / Aerober Festbettreaktor

6.1.2.1. Verfahrenstechnische Umsetzung

Festbettreaktoren mit Braunkohlenkoksschüttung werden bisher als im Abstrom betriebene belüftete Biofilter betrieben. Die Pfropfenströmung im Reaktor wird durch die Belüftung teilweise gestört, da die Turbulenz aufsteigender Luftblasen eine Rückvermischung verursacht. Daher verfolgt die Pilotanlage ein neues Prinzip, bei der neben der vertikalen Strömungskomponente eine horizontale Durchströmung der Festbettschüttung durch Schikanen herbeigeführt werden soll. Diese Reaktoreinbauten sollen bei der zu untersuchenden Anwendung beim Bastfaseraufschluss die Pfropfenströmung weiter optimieren und eine gleichmäßige Durchströmung des Festbettes gewährleisten (vgl. Abb. 8). Die Abnahme der Schadstoffkonzentration vollzieht sich somit eher horizontal entlang des Fließweges des Abwassers.

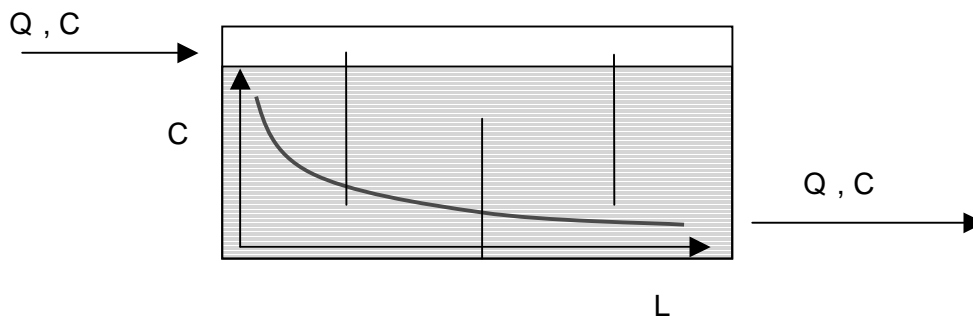


Abb. 8: Abnahme der Schadstoffkonzentration entlang des Fließweges im Reaktor (Prinzipdarstellung)

Insgesamt erhält man durch die Schikanen eine gleichmäßigere Verweilzeitverteilung über den Reaktorquerschnitt, die die Realisierung geringer Ablauf-Restkonzentrationen der maßgeblichen Parameter unterstützt.

Aus der Abwasserzusammensetzung und den unterschiedlichen Versuchsaufgaben ergab sich eine Reihe von Anforderungen an den Pilot-Festbettreaktor. Eine Auflistung der Anforderungen mit den daraus resultierenden Konstruktionsmerkmalen des Pilotreaktors wird in der nächsten Tabelle gezeigt.

Tab. 5: Anforderungen und Konstruktionsmerkmale des Festbett-Pilotreaktors

Anforderung	Konstruktionsmerkmal
Temperierung des Reaktors	Doppelwandige Ausführung des Rechteckreaktors und Einstellung über externes Wasserbad mit Regelkreis
Aerober Reaktorbetrieb	Belüftung über Keramikkerzen mit Druckluft aus bauseitiger Druckluftversorgung

Anaerober Reaktorbetrieb	Gasdichte Reaktorabdeckung und Detektion der Biogasentwicklung mit Trommelgaszähler
Abtrennung von Partikeln	Rückspülung des Reaktors über Stadtwasseranschluss (optional gekoppelt mit Druckluftspülung)
Entkopplung Hydraulik und CSB-Raumbeschickung	Rezirkulation gereinigten Abwassers aus dem Reaktorablauf über Schlauchpumpe

Die Umsetzung dieser Anforderungen war im Pflichtenheft für die Reaktorkonstruktion festgeschrieben und wurde dementsprechend berücksichtigt.

6.1.2.2. Beschreibung der Pilotanlage (R&I-Schema siehe Anlage 2)

Der Pilotreaktor wurde als doppelwandiger Rechteckreaktor aus Polypropylen mit $V_{\text{Rk}} = 800 \text{ L}$ ausgeführt. Durch interne Trennwände / Schikanen wird der Reaktorinnenraum in drei Zonen unterteilt. Der Zulauf wird aus einem bauseitigen Stapelbehälter mit einer Schlauchpumpe (P 10.1) entnommen und über eine Einlaufrinne mit höhenverstellbarem Zackenwehr über die gesamte Reaktorbreite gleichmäßig zugeführt. Die Einstellung des Volumenstroms erfolgt manuell über das Bypass-Ventil VH 10.16. der Volumenstrom wird am Durchflussmesser MF 10.3 angezeigt. Das Abwasser durchströmt die Braunkohlenkoksschüttung des Reaktors und kann am Reaktorablauf in vier verschiedenen Filterhöhen (25 %, 50 %, 75 %, 100 %) an den Ventilen VH 10.18 – VH10.21 abgezogen werden.

Zu Entkopplung von Abwasserhydraulik und CSB-Raumbelastung des Reaktors kann ein teil des Reaktorablaufs über die Pumpe P 10.2 in den Zulauf zurückgeführt werden. Auch dieser Volumenstrom ist im Bypass über das Membranventil VH 10.17 einzuregeln.

Die Reaktortemperatur wird durch den Heizkreislauf mit Temperaturfühler (MT 10.1), Wärmetauscher (WT 10.1) und integrierter Kreiselpumpe P 10.3 eingeregelt.

Die Luftversorgung kann für jedes Reaktorabteil getrennt eingeregelt werden (VH 10.3 – 10.5), so dass über die interne Rezirkulation auch eine vorgeschaltete Denitrifikation im ersten Reaktorabteil möglich wird. Ein Druckabfall in der externen Versorgungsleitung wird am Druckmesser MP 1.1 registriert und bei Unterschreiten eines voreingestellten Minimaldrucks ein Alarmsignal ausgegeben.

Unter strikt anaeroben Betriebsbedingungen kann der entstehende Biogasvolumenstrom mit einem Trommelgaszähler (MQ 10.1) erfasst werden. Biogasanalysen werden gegebenenfalls off-line in einem Labor durchgeführt. Das entstehende Biogas wird an die Abluft abgegeben.

Die Abteile des Reaktors können ebenfalls einzeln mit Stadtwasser rückgespült werden. Der Rückspülvoluenstrom wird angezeigt (MF 10.2) und über ein Membranventil (VH 10.10) eingeregelt. Durch Öffnen der Ventile an den Reaktorabteilen (VH 10.6 – 10.8) werden die Abteile mit Spülwasser beaufschlagt. Am Reaktorkopf wird das Ablaufventil VH 10.11 geöffnet und das verunreinigte Rückspülwasser (Schlamm-Wasser-Gemisch) im Freigefälle abgezogen. Zusätzlich kann bei der Rückspülung die Rückspülwirkung durch Erhöhung der Belüftungsleistung verbessert werden.

6.1.2.3. Steuerung

Im Gegensatz zum Rührschlaufenreaktor erfordert die Bedienung der kontinuierlich durchflossenen Anlage keine aufwendige Steuerungs- und Regelungstechnik. Der

Warmwasserkreislauf mit Temperaturregelung stellt einen eigenständigen Regelkreis dar. Jedes Aggregat der Anlage wird manuell über Hand-Automatikschalter am Schaltschrank bedient. Alle Antriebe sind mit Motorschutzschalter abgesichert. Der Schaltschrank ist mit einer Sammelalarmmeldestörleuchte ausgerüstet, die als optisches Signal bei Unterschreiten des Vordrucks in der Druckluftleitung oder bei Aggregatestörungen dient.

6.1.3. Anaerober Festbettumlaufreaktor

6.1.3.1. Verfahrenstechnische Umsetzung

Die sich aus den Anforderungen des Pilotbetriebes ergebenden und in Absprache mit den Projektpartnern festgelegten Konstruktionsmerkmale des anaeroben Festbett-Umlaufreaktors sind in Tab. 6 zusammenfassend aufgelistet. Als Abcheideeinheit von der ausgetragenen Partikel wurde aus versuchstechnischen Gründen eine einfache Sedimentation gewählt, die gute Zugänglichkeit und geringe Verstopfungsanfälligkeit aufweisen sollte.

Tab. 6: Anforderungen und Konstruktionsmerkmale des Festbett-Umlaufreaktors

Anforderung	Konstruktionsmerkmal
Temperierung des Reaktors	Doppelwandige Ausführung des Rechteckreaktors und Einstellung über externes Wasserbad mit Regelkreis
Anaerober Reaktorbetrieb	Gasdichte Reaktorabdeckung und Detektion der Biogasentwicklung mit Trommelgaszähler
Entkopplung Hydraulik, CSB-Raumbeschickung und Aufstromgeschwindigkeit	Interner Rücklauf (teil)gereinigten Abwassers aus dem Reaktorkopf über Schlauchpumpe, Zugabe in den Reaktorzulauf
Umwälzung Partikelschüttung	Externer Abscheidekreislauf mit Abzugsvorrichtung am Reaktorkopf und außen angeordnetem Sedimeter. Teilrückführung bzw. Partikelabzug über Schlauchpumpe
pH- Regulierung	Dosierstationen für Säure und Lauge im Reaktorzulauf, pH-Messstellen und selbstständiger Regelkreis

Für den Umlaufreaktor wurde zur Verbesserung der Umlaufströmung der Festbettpartikel (wie auch der Rührschlaufenreaktor) ebenfalls eine hohe, schlanke Bauform gewählt. Aufgrund der rein anaeroben Fahrweise wurde als Zusatzoption in diese Pilotanlage eine automatische pH-Regulierung im Zulauf integriert.

Über den Betrieb von Festbettumlaufreaktoren lagen zu Projektbeginn im Vergleich zu den anderen biologischen Behandlungsanlagen die geringsten Grundlagenkenntnisse vor. Deshalb wurde besonders bei diesem Reaktortyp auf weitgehende Variabilität gelegt. Ein hoher Optimierungsbedarf war trotz dieser Maßnahmen nicht vollständig auszuschließen.

6.1.3.2. Beschreibung der Pilotanlage (R&I-Schema siehe Anlage 3)

Der Reaktor wurde – ebenso wie der Festbettreaktor – als Doppelwand-Behälter mit einem Heiz-Wasserkreislauf mit Temperaturfühler (MT 10.1), Wärmetauscher (WT 10.1) und Kreislaufpumpe (VR 10.4) ausgeführt ($V_{Rk} = 240 \text{ L}$). Die externe Abscheideeinheit besitzt ein Volumen von $V_{Sed} = 50 \text{ L}$. Der Zuführung des Abwassers erfolgt aus einem bauseitigen Stapelbehälter über die Schlauchpumpe P 10.1 zentral von unten am Anaerobreaktor. Über einen Durchflussmesser und ein Membranventil im Bypass kann der Zulaufvolumenstrom variiert werden. Interner Rücklauf und Recycle aus dem Abscheidekreislauf werden ebenfalls in die Zuführleitung eingespeist. Rückschlagventile verhindern den direkten Übertritt von zulaufendem Abwasser in die Rezirkulationsleitungen (VR 10.2, VR 10.3).

Nach den internen Rückführungen wird der pH-Wert in der Zulaufleitung in-line gemessen und über selbsttätige Regelkreise auf einen vorgewählten Sollwert eingestellt. Die Dosierung von Lauge oder Säure erfolgt über Kolbenmembranpumpen, deren Hub und Frequenz der aktuellen Zulaufsituation angepasst werden kann. Das konditionierte Abwasser durchströmt die Braunkohlenkoksschüttung vertikal von unten nach oben und verlässt den Reaktor entweder über die Ablaufleitung des externen Abscheidekreislaufs oder die internen Rücklaufleitungen. Ablauf und Rücklauf können in der Höhe an unterschiedlichen Stellen des Anaerobreaktors variiert werden (VH 10.5 – 10.8).

Der interne Rücklauf des Reaktors erfolgt über Pumpe P 10.2 in die Zuführleitung. Der Volumenstrom des Rücklaufs wird über MF 10.2 gemessen und über das Membranventil VH 10.14 in einer Bypassleitung eingeregelt.

Der Ablauf über die externe Abscheideeinrichtung erfolgt im Freigefälle. Das gereinigte Abwasser verlässt den Sedimeter über die Ablaufkante. In Abhängigkeit des Betriebszustands wird der im Abscheider sedimentierte Feststoff entweder über P 10.3 in den Reaktorzulauf zurückgefördert oder verworfen (VH 10.4).

Über einen Trommelgaszähler wird die gebildete Biogasmenge erfasst und kontinuierlich aufsummiert (MQ 10.2).

6.1.3.3. Steuerung

Wie der anaerobe / aerobe Festbettreaktor erfordert die Bedienung der kontinuierlich durchflossenen Anlage keine aufwendige Steuerungs- und Regelungstechnik. Der Warmwasserkreislauf mit Temperaturregelung stellt einen eigenständigen Regelkreis dar. Jedes Aggregat der Anlage wird manuell über Hand-Automatikschalter am Schaltschrank bedient. Alle Antriebe sind mit Motorschutzschalter abgesichert. Der Schaltschrank ist mit einer Sammelalarmmeldestörleuchte ausgerüstet, die als optisches Signal bei Unterschreiten des Vordrucks in der Druckluftleitung oder bei Aggregatestörungen dient.

6.1.4. Membranfiltrationsanlage

6.1.4.1. Verfahrenstechnische Umsetzung

In Abstimmung mit dem ITV Denkendorf und mit den Lieferanten der ENVIRO-CHEMIE wurde die Querstromfiltrationsanlage mit modular aufgebauten Membranmodulen bestückt, deren Einzelelemente bei Bedarf einfach gewechselt werden können. Als Membranmaterial wurden keramische Werkstoffe gewählt, über die im Mikrofiltrations- bzw. Ultrafiltrationsspektrum bereit langjährige Anwendungserfahrungen vorliegen.

Im Vergleich zu Membranen mit Kunststoff oder Polymeren bieten keramische Membrane folgende Vorteile:

- minimale Adsorption von biologischen Substanzen
- hohe chemische Beständigkeit (pH 1-14)
- hohe thermische Beständigkeit (über 100 ° C)
- hohe mechanische Beständigkeit (Druckstöße/- differenzen)
- gute Selektivität
- sehr hohe Filtrateleistungen
- keine Alterung des Membranmaterials
- gute Regenerierbarkeit im alkalischen und im sauren Bereich
- widerstandsfähig gegenüber abrasiven Substanzen

Die Anordnung der einzelnen Keramikstäbe in einem Membranmodul wird in den nächsten Abbildungen verdeutlicht. Jeder Stab ist einzeln austauschbar.



Abb. 9: Mehrkanal-Rohrmodule mit keramischen MF / UF-Stäben

Die in der Pilot-Anlage eingesetzten Mikro- oder Ultrafiltrationsfiltrationsmembranen bestehen aus einem hochporösen Keramikstützkörper (7 Keramikmodule mit jeweils 19 Kanälen und insgesamt 1,4 m² Filterfläche). Auf der Innenseite der Kanäle ist eine Schicht aus hochreinem Aluminiumoxid aufgezogen, welche die eigentliche aktive Membranschicht bildet. Die Membranelemente werden in hochwertigen Edelstahlrohren zu einem Modul zusammengefasst. Aufgrund der modularen Bauweise kann die benötigte Membranfläche und damit auch die Filterleistung variiert werden.

6.1.4.2. Beschreibung der Pilotanlage (R&I-Schema siehe Anlage 4)

Das bauseitig gestapelte Abwasser aus der Wasserröste wird über einen Kerzenfilter in dem Arbeitsbehälter B1 geführt und mittels der Hochdruckpumpe (Umwälzpumpe) über die Mikrofiltrationsmembran gefahren. Ist der Arbeitsbehälter gefüllt, startet die Anlage. Die Anströmung des Membranmoduls erfolgt über die Umwälzpumpe. Aufgrund der hohen Überströmung der Membran permeiert ein Teil des Volumenstroms durch den Membrankörper (Filtrat / Permeat); hierbei werden die partikulären oder kolloidalen Inhaltsstoffe vom Wasser getrennt. Das Permeat wird ausgeschleust. Der andere Teil (Konzentrat / Retentat) gelangt zurück in den Arbeitsbehälter und wird nach und nach aufkonzentriert (Kreislaufführung) bis der maximale Aufkonzentrierungsgrad erreicht ist. Das Konzentrat wird entweder einer Wiederverwendung zugeführt oder bei Bedarf entsorgt.

Während des gesamten Filtrationsvorganges wird in periodischen Abständen ein Rückspülimpuls von außen (permeatseitig) auf die Membran aufgegeben, wodurch eventuelle Ablagerungen auf der Membran abgesprengt und die Filtratleistung auf einem hohen Niveau gehalten werden.

Ist die maximale Aufkonzentrierung erreicht bzw. die Filtratleistung unter einen vertretbaren Wert abgesunken, schaltet die Anlage automatisch ab und das Konzentrat wird aus der Anlage ausgeschleust. Im Anschluss daran wird die Anlage automatisch gereinigt und geht erneut wieder in Betrieb.

Die im Einzelnen durchlaufenen Verfahrensschritte sind im Folgenden näher erläutert:

Befüllung

Der Arbeitsbehälter B 1 wird durch die Pumpe P 1.1 über das Vorfilter F 51 befüllt. Hierbei sind die Ventile V P 1.2 und V P 1.3 geschlossen, die Ventile VP 1.1 und VP 1.4 geöffnet. Erreicht das Flüssigkeitsniveau im Arbeitsbehälter B 1 die Füllhöhe (Füllstand LS+/L1.3 ist erreicht), die durch die analoge Füllstandsonde überwacht wird, beginnt die Anlage automatisch mit der Filtration. Die Pumpe P 1.1 schaltet ab. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft bis der gewünschte Aufkonzentrierungsgrad erreicht ist. Der Vorgang wird ebenfalls beendet, wenn kein Abwasser mehr aus der Produktion zufließt. Die Anlage steht im Stand-

by-Modus, die Ventile VP 1.1, VP 1.2 und VP 1.4 schließen. Bei einem erneuten Abwasseranfall geht die Anlage wieder in Betrieb.

Normalbetrieb

Aus dem Arbeitsbehälter B1 (Füllstand LS+/L1.3 ist erreicht) werden die Abwässer mit der Hochdruckpumpe P 1.2 über das Mikrofiltrationsmodul F 50 geführt. Mit dem Handventil VH 1.1 lässt sich der Membrandruck einstellen, mit dem Handventil VH 50.1 wird der Permeatvolumenstrom eingestellt.

Die Membranelemente werden dabei tangential von der Umwälzpumpe P 1.2 durchströmt. Auf diese Weise permeiert ein Teil des Volumenstroms (Filtrat) durch den Membrankörper und wird über den Durchflussmesser dem bauseitigen Permeatbehälter (das Ventil VP 1.7 ist dabei geöffnet) zugeführt.

Der andere Teil des Volumenstroms, der die Verunreinigungen enthält (Retentat) wird über den einstellbaren Kugelhahn VH 1.1 wieder dem Arbeitsbehälter B 1 zugeführt.

Durch die kontinuierliche Abführung von Permeat sinkt der Flüssigkeitsspiegel im Arbeitsbehälter B 1 immer wieder ab. Wird der Flüssigstand LS-/L1.2 erreicht, läuft die Befüllpumpe P 1.1 automatisch an und befüllt den Arbeitsbehälter B 1 erneut bis LS+/L1.3. Hierbei sind die Ventile V P 1.2 und V P 1.3 geschlossen, die Ventile VP 1.1 und VP 1.4 geöffnet.

So steigt die Konzentration der Verunreinigungen im Arbeitsbehälter B 1 nach der Zahl der abgearbeiteten Behältervolumina an.

Der Druck auf der Konzentratseite wird kontinuierlich angezeigt.

Aufkonzentration

Fällt der Filtratstrom unter einen im Durchflussmesser MF 51.1 definierten Wert, wird der Behälter B1 noch bis zum Niveau LS-/L1.2 abgearbeitet (die Umwälzpumpe P 1.2 stoppt und das Ventil VP 1.7 schließt). Danach wird der Entleerungsvorgang von Konzentrat eingeleitet.

Entleerung

Der Behälter B 1 wird mittels der Pumpe 1.1 bis zum Flüssigkeitsniveau LS-/L1.1 entleert. (Hierbei sind die Ventile VP 1.1 und VP 1.4 geschlossen, die Ventile VP 1.2 und VP 1.3 geöffnet) und das Konzentrat aus dem Prozess ausgeschleust. Die Anlage geht automatisch in die Reinigungsstufe.

Während des Filtrationsbetriebs kann zur Minimierung der auftretenden Deckschichtbildung eine permeatseitige Rückspülung, durch einen sogenannten Druckstoß erfolgen. Über die permeatseitige Ausgleichsstrecke wird dabei Permeat entgegen der ursprünglichen

Fließrichtung durch das druckstabile Membranmodul gepresst. Dieser Druckstoß dient dazu die Intervalle zwischen zwei Reinigungen mit sauren oder alkalischen Hilfsmitteln zu verlängern.

Druckstoß

Während des Normalbetriebs und der Aufkonzentration wird in periodisch einstellbaren Zeiten ein Druckluftstoß auf das Membranmodul F 50 gegeben. Der Druck wird durch die Messstelle MP 1.3 angezeigt und kann durch die Wartungseinheit auf den gewünschten Druck (mindestens 5 bar) reduziert werden.

Zur Ausführung des Druckstoßes schließt bei Normalbetrieb das Ventil VP 1.7, VP 50 wird geöffnet, das Ventil PV 1.6 öffnet kurzzeitig (für ca. 1 Sekunde). Das Ventil VP 1.7 öffnet wieder für den Normalbetrieb.

Der mehrstufige Reinigungsablauf wurde an der Membrananlage ebenfalls automatisiert hinterlegt. Nach erfolgreicher Auswahl des geeigneten Reinigungsmittels kann daher auch dieser Vorgang ohne manuellen Eingriff erfolgen. Reinigungszeiten können an der SPS vorgewählt werden und richten sich ebenfalls nach dem Reinigungserfolg. Die Reinigungsschritte sind im Einzelnen:

Klarspülen I

Über das Ventil VP 1.5 wird nun der Arbeitsbehälter B 1 mit Stadtwasser bis zum Niveau LS+/L1.2 gefüllt, die Pumpe P 1.2 fördert das Wasser zeitgesteuert im Kreislauf. Danach stoppt die Pumpe P 1.2 und die Pumpe P 1.1 läuft an. zusätzlich werden die Ventile VP 1.2 und VP 1.3 zur Ausschleusung des Wassers geöffnet, bis das Niveau LS-/L1.1 im Behälter B1 erreicht ist.

Reinigung I

Erneut wird über das Ventil VP 1.5 (geöffnet) des Arbeitsbehälters bis zum Flüssigkeitsniveau LS+/L1.2 mit Stadtwasser befüllt und gleichzeitig läuft zeitgesteuert die Dosierpumpe P 21 und dosiert Reinigungsmittel zu. Das Ventil VP 1.5 wird geschlossen. Die Laufzeit ist so berechnet, dass sich im Arbeitsbehälter B1 eine ca. 2%ige Lösung einstellt.

Und die Pumpe P 1.2 fördert die Reinigungslösung zeitgesteuert im Kreislauf. Danach stoppt die Pumpe P 1.2 und die Pumpe P 1.1 läuft an, zusätzlich werden die Ventile VP 1.2 und VP 1.3 zur Ausschleusung des Reinigungswassers geöffnet, bis das Niveau LS-/L1.1 im Behälter B1 erreicht ist.

Klarspülen II

Ablauf und Ventilstellung wie beim Klarspülen I. Danach geht die Anlage wieder automatisch an den Anfang der Schrittkette und die Filtration beginnt von vorne.

6.1.4.3. Steuerung

Die Anlage wird durch eine Speicher-programmierbare Steuerung automatisch gesteuert. Sämtliche Sollwerte werden automatisch überwacht und Abweichungen / Alarmmeldungen gegebenenfalls optisch und akustisch angezeigt.

Der Schaltschrank ist mit einem Hauptschalter ausgerüstet.

Die Anlage kann von eingewiesenem Personal auch im Handmodus betrieben werden. Die Stellung Hand ist ausschließlich für Servicezwecke vorgesehen, und es sind keine Überwachungen in Funktion, so dass die Überwachung der Anlage vom Bedienungspersonal erfolgen muss.

Alle 380 V - Antriebe sind mit je einem Motorschutzschalter abgesichert.

Alarmer werden optisch (rot blinkende Meldeleuchte), akustisch, sowie durch einen Meldetext im Bediengerät OP angezeigt. Gleichzeitig wird eine entsprechende Sicherheitsfunktion ausgelöst.

6.2. Technische Optimierungsmaßnahmen an den Bioreaktoren

Nach Inbetriebnahme der Anlagen und ersten Betriebserfahrungen wurden im Oktober 2001 die Pilotanlagen umgebaut, so dass ein störungsfreier Betrieb sichergestellt war. Danach wurden die Anlagen weiter durch das ITV Denkendorf betrieben.

Zunächst wurde der braunkohlenkoksgestützte Festbettreaktor in Betrieb gesetzt. Darauf folgten Rührschlaufenreaktor und Festbettumlaufreaktor. Besonders bei den kohlenkoksgestützten Reaktoren, hier insbesondere dem Umlaufreaktor, wurden Anpassungen von Durchsatzmenge und Umlaufströmung vorgenommen. Die Umlaufströmung des Braunkohlenkoks im Festbettumlaufreaktor musste durch Erhöhung des externen Umlaufvolumenstroms verbessert werden. Eine zunächst zu Testzwecken durchgeführte provisorische Anpassung wurde später in einer festen Umbaumaßnahme fixiert.

Am 22. Mai 2001 fand die erste Verbundpräsentation des Gesamtprojektes beim ITV Denkendorf statt.

Im weiteren Ablauf erfolgte der Betrieb der Versuchsanlagen weitgehend störungsfrei. Die Ergebnisse der biologischen Reinigungsverfahren waren laut Aussagen des Projektpartners sehr zufrieden stellend. Insbesondere der Festbettreaktor mit Koksfüllung zeichnete sich durch hohen Eliminationsgrad und damit verbundenen geringen Ablaufkonzentrationen aus.

Auf Grund gewonnener Kenntnisse des Projektpartners wurden weitere Umbaumaßnahmen und Verbesserungen durchgeführt. Die Hauptarbeiten betrafen den Rührschlaufenreaktor, mit dem Ziel die erzeugte Umlaufströmung und das resultierende Mischungsverhalten zu

verbessern. Im Rührschlaufen-Reaktor wurden im Wesentlichen zwei Umbaumaßnahmen notwendig:

- Das verwendete Rührorgan (Schrägblattrührer), das die Umlaufströmung im Reaktor sicherstellt, wurde ausgetauscht. Es hatte sich gezeigt, dass trotz maximaler Rührerdrehzahl die Umlaufströmung nur unzureichend ausgebildet war, was den Sauerstoffaustausch und das allgemeine Durchmischungsverhalten des Reaktors negativ beeinflusste. Das Austauschrührorgan verfügte über mehr Flügel mit stärkerem Anstellwinkel, was die Umlaufströmung begünstigen sollte (vgl. Abb. 10).

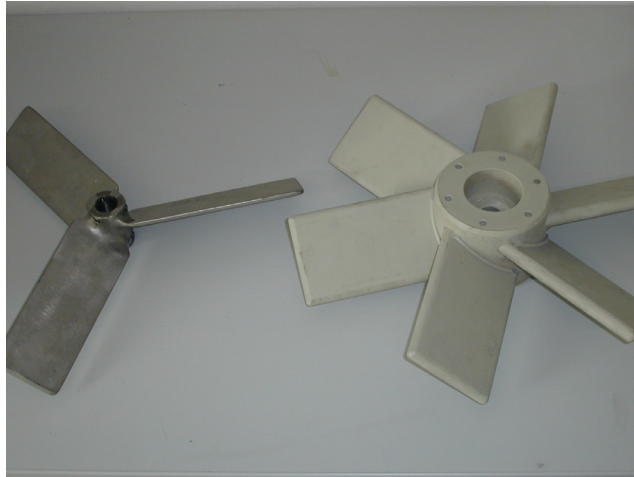


Abb. 10: Vergleich der Rührorgane

- Als weitere Verbesserungsmaßnahme wurde das zentrale Leitrohr, in dem sich der Propeller befindet, verlängert. Durch die Verlängerung des Leitrohrs sollten bodennahe Ablagerungen beseitigt werden, die dadurch entstanden, dass die Umlaufströmung den konischen unteren Reaktorteil nicht erreichen konnte. Durch die Verlängerung des Leitrohrs wurde der Abstand verringert und eine erhöhte Turbulenz in diesem Reaktorteil erreicht.

In der Fortsetzung der Pilotversuche zeigte die Anpassung des Rührschlaufen-Reaktors den gewünschten Erfolg, so dass der Versuchsbetrieb ohne Störungen fortgesetzt werden konnte.

6.3. Maßnahmen zur Verbesserung der Membrantrennung

Für die Membranfiltrationsanlage wurden turnusgemäß Wechsel und Reinigung der Filtrationsmodule durchgeführt. Die notwendigen Arbeiten wurden von der ENVIRO-CHEMIE GmbH in Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf festgelegt und durchgeführt.

Für weitere Untersuchungen im Jahre 2002 war ein vorgezogener Wechsel der Module angedacht, um Membranen mit anderen Trenngrenzen einsetzen zu können. Die werkseitig installierten Mikrofiltrationsmembranen sollten durch Keramikstäbe identischer Abmessung,

jedoch mit feinerer Trenngrenze ersetzt werden. Durch den besseren Rückhalt von Exoenzymen mit UF-Membranen wurde eine weitere Optimierung der Röstprozesse und der Abwasserreinigung angestrebt.

Am 18.06.2002 fand eine Verbundpräsentation im Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf statt, in deren Anschluss der Einsatz der Ultrafiltrationsmembranen diskutiert wurde.

Nach ersten Erkenntnissen des ITV konnte die Rückführung des Konzentrats der Ultrafiltrationsanlage in den Rösteprozess die Güte der erzeugten Fasern steigern und die Röste beschleunigen. Dieser Ansatz wurde daher in Zusammenarbeit mit der ENVIRO-CHEMIE weiter verfolgt. Vor einer Umrüstung der Pilotanlage sollten jedoch in einem Technikumsversuch die damit verbundenen Änderungen der spezifischen Permeatleistung und anderer Prozessparameter untersucht werden. Daher wurden in Absprache mit dem ITV Denkendorf im Technikum der ENVIRO-CHEMIE GmbH Versuche zur Ultrafiltration des Abwassers aus der Flachröste gefahren. Ziel dieser Untersuchungen war es zu überprüfen, ob die im Abwasser der Röste enthaltenen lignin- und pektinabbauenden Mikroorganismen / Pilze und Enzyme abgetrennt werden, und erneut im Rösteprozess eingesetzt werden können. Dazu wurde eine Aufkonzentrierung des Röstabwassers mit einer nominellen Trenngrenze von 50.000 Da durchgeführt. Die Trenngrenze wurde so gewählt dass einerseits die gewünschten Enzyme und MO im Konzentrat verbleiben, niedermolekulare Komponenten die Membran jedoch passieren können.

Das Fließbild des Membranteststands, der im Technikum der ENVIRO-CHEMIE installiert war, kann der folgenden Abbildung entnommen werden. Das Röstabwasser wurde nach einer Vorfiltration zur Entfernung von Grobstoffen (Stroh, Bastteile und anorganisches Material) in den Arbeitsbehälter gefüllt und mit konstantem Volumenstrom $Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$ über das Membranmodul ($A = 0,22 \text{ m}^2$) umgewälzt. Durch den freien Querschnitt bedingt errechnet sich eine Überströmungsgeschwindigkeit $v = 4,8 \text{ m/s}$. Der Modulvordruck betrug konstant 3 bar. Die Temperatur im Umwälzkreislauf wurde auf maximal 30°C begrenzt, um eine Denaturierung der Wertstoffe im Konzentrat zu verhindern. Der Permeatfluss unter den gewählten Bedingungen betrug bei Verwendung von Trinkwasser und $T = 15^\circ\text{C}$ ca. $750 - 800 \text{ L/hm}^2$.

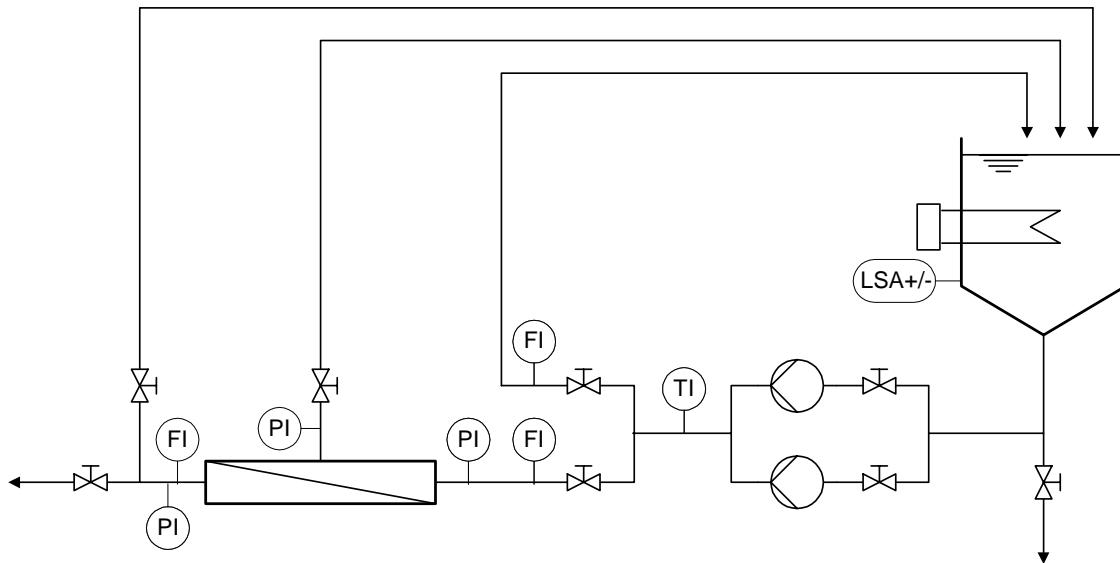


Abb. 11: Fließbild des Membranteststands

In einem 48-stündigen Aufkonzentrierungslauf wurde das vom ITV Denkendorf aus der Wasserröste entnommene Abwasser auf 10 % des Ausgangsvolumens eingengt. Über den gesamten Versuchslauf konnten spezifische Permeatleistungen von 40 – 50 L/(m²·h) erzielt werden, die nahezu unabhängig vom Aufkonzentrierungsgrad waren. Das entstehende Permeat wurde verworfen, während das Konzentrat dem ITV für weitere Untersuchungen und zum erneuten Einsatz in der Röste zur Verfügung gestellt wurde.

Nach Abschluss des Testlaufs wurden Membranreinigungsversuche durchgeführt. Eine einfache alkalische Standardreinigung reichte aus, um den vor Versuchsbeginn gemessenen Klarwasser-Permeatfluss wieder herzustellen. Irreversible Membranverblockungen durch Abwasserinhaltsstoffe aus dem Rösteprozess waren zumindest in diesem Versuchslauf nicht zu verzeichnen, was die grundsätzliche technische Eignung des Verfahrens belegt.

7. Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse

7.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden im Wesentlichen durch die Randbedingungen der Bastfaserproduktion in Deutschland festgelegt. Die mit verbesserten Rösteprozessen verbundenen Investitionskosten müssen durch Reduktion in den Personalkosten und durch höhere Marktpreise der hochwertigen Produkte aufgefangen werden. Die gesamtwirtschaftlichen Rahmenbedingungen dazu haben sich im Laufe der letzten Jahre kontinuierlich verschlechtert. Die wirtschaftliche Umsetzung der im Projekt erarbeiteten Maßnahmen ist damit weitgehend erschwert.

7.2. Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten gestalten sich im Gegensatz zu den derzeitigen wirtschaftlichen Erfolgsaussichten überaus positiv. Die technischen Lösungen der ENVIRO-CHEMIE haben ihre Zuverlässigkeit im Pilotbetrieb unter Beweis gestellt. Aus den Erfahrungen konnten wichtige Impulse für zukünftige großtechnischen Entwicklungen gegeben werden, so dass im Vorhaben ein konkreter Bezug zur Praxis des Anlagenbaus gegeben war. Die technischen Lösungen werden als Spezialverfahren bei zukünftigen Anwendungen – nicht nur in der Textilindustrie- weitere Anwendung finden.

7.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit besteht für die ENVIRO-CHEMIE in der großtechnischen Umsetzung der im Pilotversuch erarbeiteten halbtechnischen Lösungen. Durch die Modifikation bekannter Standardverfahren wurden Alleinstellungsmerkmale geschaffen, die im Wettbewerb im In- und Ausland genutzt werden können. Durch die steigende Nachfrage nach biologischen Behandlungsverfahren für industrielle Abwässer besteht konkrete Anschlussfähigkeit im Projektgeschäft.

8. Ergebnisse Dritter

Für die von der ENVIRO-CHEMIE gewählten technischen Lösungen wurden im Bereich der Reinigung von Rösteabwässern keine weiteren Ergebnisse Dritter bekannt.

9. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Da es sich bei den technischen Lösungen der ENVIRO-CHEMIE um firmeneigenes Spezialwissen handelt sind dazu keine weitergehenden Veröffentlichungen geplant. In Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf werden jedoch Veröffentlichungen zur Wirkungsweise und Reinigungsqualität der Pilotanlagen – als Nachweis für die Leistungsfähigkeit der gebauten Systeme – angestrebt.

Roßdorf, im Juli 2004

(G. Hupfer)

(Dr. M. Engelhart)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht	
3a. Titel des Berichtes Entwicklung umweltgerechter Aufschlussverfahren zur Gewinnung hochwertiger textiler Fasern in Deutschland		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Herr Dr. Engelhart, Markus	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2003	6. Veröffentlichungsdatum
4b. Autoren der Publikation (Name, Adresse)	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ENVIRO-CHEMIE GmbH Wasser- und Abwassertechnik In den Leppsteinswiesen 9 64380 Roßdorf bei Darmstadt	9. Ber.Nr. Durchführende Institution	10. Förderkennzeichen *) 033 9887
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) 53170 Bonn	11a. Seitenzahl Bericht	11b. Seitenzahl Publikation
16. Zusätzliche Angaben	12. Literaturangaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	14. Tabellen	
18. Kurzfassung	15. Abbildungen	
<p>Das Gesamtziel lag in einer Verfahrensentwicklung für die Aufbereitung und Weiterverarbeitung von Bastfasern, der Erweiterung der Einsatzgebiete, der umweltschonenden Röstprozesse sowie der Reinigung und Wiederverwendung der beim Röstprozess anfallenden Abwässer, einer Energieeinsparung und der Elimination der bei den Röstprozessen entstehenden Geruchsprobleme. Die Aufgabe der Enviro-Chemie GmbH im Vorhaben lag in der Entwicklung und Umsetzung von Pilotanlagen zur Durchführung von Versuchen zur Reinigung von Rösteabwasser. Enviro-Chemie oblag die Auslegung und Konzeption aller maßgeblichen technischen Komponenten. Die Ergebnisse der Arbeit von Enviro-Chemie sind in der Erstellung der Pilotanlage dokumentiert, die im vorliegenden Abschlussbericht näher dargestellt werden.</p> <p>Folgende Anlagen wurden entwickelt und bereitgestellt: Membranfiltrationsanlage, drei biologische Behandlungsanlagen (Rührschlaufenreaktor, Festbettreaktor, Festbettumlaufreaktor). Gleichfalls wurden erfolgreiche Versuchsreihen in Zusammenarbeit mit dem ITV Denkendorf durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.</p>		
19. Schlagwörter Faserherstellungsverfahren, Faseraufschluss, Röstprozess, aerobe und anaerobe Wasserröste, Membranfiltrationsanlage, Rührschlaureaktor, Festbettreaktor, Festbettumlaufreaktor		
20. Verlag	21. Preis	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report	
3a. Report Title Entwicklung umweltgerechter Aufschlussverfahren zur Gewinnung hochwertiger textiler Fasern in Deutschland		
3a. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Herr Dr. Engelhart, Markus	5. End of Project 31.12.2003	6. Publication Date
4b. Author(s) of the Publikation (Family Name, First Name(s))	7. Form of Publication	
8. Performing Organization(s) (Name, Address) ENVIRO-CHEMIE GmbH Wasser- und Abwassertechnik In den Leppsteinswiesen 9 64380 Roßdorf bei Darmstadt	9. Originator's Report No.	10. Reference No.
	11a. No. of Pages Report	11b. No. of Pages Publication
	12. No. of References	
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) 53170 Bonn	14. No. of Tables	
	15. No. of Figures	
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract <p>The total goal was the development of a process for thea subsequent treatment of phloem fibers, the extension of the operational areas, the environmentalcareful roasting processes as well as the cleaning and re-use of the waste water of the roasting process, an energy conservation and the elimination of smell problems.</p> <p>Die task of Enviro-Chemie GmbH was the development and conversion of pilot devices to the execution from attempts to the cleaning of roasting waste water. Enviro chemistry was incumbent on the planning and conception of all relevant technical components. The results of the work from Enviro-Chemie are documented in the available final report</p> <p>Following plants were developed and made available: Diaphragm filtration plant, three biological treatment plants (agitating loop reactor, fixed bed reactor, fixed bed rotating reactor). Also successful test series were accomplished successfully in co-operation with the ITV Denkendorf.</p>		
19. Keywords fiber manufacturing process, fiber explanation, roasting process, aerobe and anaerobic water roasting process, diaphragm filtration plant, agitating loop reactor, fixed bed reactor, fixed bed rotating reactor		
20. Publisher	21. Price	