

## **Combined ALgal and BActerial waste water treatment for high environmental QUALity effluents (ALBAQUA)**

G. Weinberger, C. Hentschke, U. Neis, A. Ergünel, R. Pereira

### **Inhalt**

|  | Page      |
|--|-----------|
| <b>1 Zusammenfassung</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung</b>  | <b>5</b>  |
| <b>3 Forschungsziel</b>  | <b>8</b>  |
| <b>4 Gesamtvorgehen</b>  | <b>9</b>  |
| <b>5 In mehreren Arbeitspaketen eingesetzte Methoden</b>   | <b>9</b>  |
| <b>6 Ergebnisse</b>  | <b>11</b> |
| 6.1 AP1- Kultivierung geeigneter Algenspezies  | 11        |
| 6.2 AP2: Test verschiedener Techniken zur Fixierung von Algen in gemischter ALBA-Biomasse                          | 13        |
| 6.3 AP4 - Designparameter für Pilotversuche  | 15        |
| 6.4 AP5 - Abbauleistung – Reinigung von Papierfabrikabwässern in einer Laboranlage mit symbiotischer ALBA-Biomasse | 18        |
| 6.5 AP6 - Nutzung der ALBA-Überschussschlämme  | 20        |
| 6.6 AP7 - Pilotversuch   | 21        |
| 6.7 AP8 - Bewertung des Nutzens der Abwasserreinigung mit Algen- oder ALBA-Bioreaktoren                            | 22        |
| 6.8 AP9 - Ermittlung der Wirtschaftlichkeit  | 23        |
| <b>7 Transfer der Forschungsergebnisse und Chancen für industrielles Scale-up nach Projektende</b>                 | <b>25</b> |
| <b>8 Schlussfolgerungen</b>  | <b>29</b> |
| <b>Glossar</b>   | <b>31</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>32</b> |
| <b>Anhang Beteiligte Forschungsinstitute</b>   | <b>35</b> |

## 1 Zusammenfassung

|   |  |
|---|--|
| <b>Zielstellung</b>   | Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur Reinigung von Papierfabriksabwässern mit Hilfe von Algen bzw. Algen-Bakterien-(ALBA)-Biomasse und Bewertung der Verwendbarkeit der Überschuss-Biomasse als Rohstoff.   |
| <b>Ergebnisse AP1</b><br>Kultivierung geeigneter Algenspezies | Die Kultivierung verschiedener Algenspezies bei unterschiedlichen Salzgehalten, mit Abwasser und mit Belebtschlamm ergab, dass fünf der ausgewählten Spezies prinzipiell für die Abwasserreinigung geeignet sind.  |
| <b>Ergebnisse AP2</b><br>Algen Fixiertechniken                | <i>Chlorella vulgaris</i> integrierte sich in den Belebtschlamm, der gute Absetzeigenschaften zeigte. Während der kontinuierlichen Versuche bei einem CSB des zugegebenen Abwassers von 2400 mg/l und Belüftung konnte keine stabile Algen-Belebtschlammbiozönose im System erhalten werden. Die Carrier zeigten keine Vorteile für die Etablierung der Algen, es wurden jedoch höhere Abbauraten erreicht als in der konventionellen Belegung.  |
| <b>Ergebnisse AP4</b><br>Entwicklung des Pilotsystems         | Einzelalgen und Algenkonsortien wurden aus dem Abwasser einer Papierfabrik isoliert und kultiviert. Diese sollen in weiteren Forschungsprojekten untersucht werden. Die Abwasserreinigung mittels ALBA-Biomasse konnte stabil betrieben werden. Es eignet sich für Abwässer mit CSB-Konzentrationen kleiner 800 (-1000) mg/l. Weitere Betriebsempfehlungen für den Betrieb des ALBA-Verfahrens wurden erarbeitet: Der Vergleich mit dem herkömmlichen Belebtschlammverfahren zeigt ähnliche Abbauraten bei höherer Verweilzeit, höherem Abbau an Gesamtstickstoff und geringerer Biomasseproduktion im ALBA-System.  |
| <b>Ergebnisse AP5</b><br>Abbauleistung                        | Trotz ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung sind Papierfabrikabwässer für die Reinigung mittels symbiotischer ALBA-Biomasse geeignet. Das Sedimentationsverhalten war in den meisten Fällen gut, so dass die Biomasse aufgrund der Bioflockenbildung gut vom gereinigten Abwasser getrennt werden konnte. Bei Abwässern mit hohem CSB-Gehalt (> 1000 mg CSB/l) wurde kein stabiler Anlagenbetrieb erreicht, da der Algengehalt aufgrund kürzerer bakterieller Generationszeiten abnahm. Die CSB-Abbauleistung war für die meisten der untersuchten Abwässer gleichbleibend hoch. Eine stets ausreichende, meist überschüssige Sauerstoffversorgung wurde ohne externe Belüftung sowohl in Hell- wie in Dunkelzeiten über lange Versuchsdauer erreicht. |
| <b>Ergebnisse AP6</b><br>Nutzung der Überschussbiomasse       | ALBA-Schlämme können auf dieselben Weisen entsorgt werden, wie herkömmliche Überschussschlämme. Eine Trennung von Algen- und Bakterien-Biomasse gestaltet sich schwierig. Der Algenanteil des ALBA-Schlammes macht ihn für die Energiegewinnung interessanter. Laut Literaturrecherche ist die Biogasgewinnung aus anaerober Vergärung das erfolversprechendste Verwertungsverfahren für ALBA-Schlämme.  |

---

**Ergebnisse AP7**

Pilotversuch

In den Pilotversuchen konnte gezeigt werden, dass das ALBA-Verfahren unter realen Bedingungen mit einem schwach belasteten Papierfabriksabwasser gut und weitgehend stabil arbeitet. Flockenbildung, Integration der Algen in die Belebtschlammflocken und Sedimentationseigenschaften waren durchgängig gut. Der CSB-Abbau lag meist über 80 %. In den Sommermonaten gab es Probleme mit Abfraß der Algen durch Mückenlarven, was durch ein Insektenschutznetz verhindert werden konnte. Die Abbauleistungen konnten auch in Zeiten geringerer Außentemperatur und deutlich verminderter Lichtverfügbarkeit (Herbst-Anfang Winter) auf hohem Niveau gehalten werden.

---

**Ergebnisse AP8**

Bewertung des Nutzens

Bei dem untersuchten Verfahren zur Abwasserreinigung mittels symbiotischer ALBA-Biomasse handelt es sich um eine interessante Alternative zum klassischen Belebungsverfahren. Es bedarf aber noch umfassender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine industrielle Umsetzung. Von Seiten der Industrie und Forschungsunternehmen wurden in einer Informations- und Diskussionsveranstaltung zu Projektende zahlreiche Vorschläge für weitere Optimierungs-, Nutzungs- und Anwendungspotenziale gemacht.

---

**Ergebnisse AP9**

Ermittlung der Wirtschaftlichkeit

Das ALBA-Verfahren ist wegen der Betriebskosteneinsparungen durch den deutlich geringeren Energieverbrauch und niedrigere Kosten für die Schlamm Entsorgung interessant. Auf Grund des hohen Landverbrauchs und der hohen Investitionskosten bei niedrigen Wasserständen sollten tiefere oder Alternativen zu den High-Rate-Algal-Ponds entwickelt werden.

Das reine Algen-System ist dagegen wegen der höheren Betriebskosten und deutlich höheren Investitionskosten beim Stand der Technik nicht rentabel.

---

**Schlussfolgerung**

Das ALBA-Verfahren kann für die Reinigung von Abwässern der Papierfabrikation mit CSB-Konzentrationen bis zu 800 mg/l (1000 mg/l) angewendet und stabil betrieben werden. Eine Belüftung ist nicht notwendig, dafür muss das System umgewälzt werden. Insgesamt ergibt sich eine im Vergleich zum konventionellen Belebtschlammverfahren deutliche Energieeinsparung beim ALBA-System, die sich in geringeren Betriebskosten niederschlägt. Kostenerträge aus energetisch verwertbarer Biomasse können zur Entwicklung von Gewinn bringenden Abwasserreinigungsanlagen Beitrag leisten. Mit der ersten Umsetzung des ALBA-Verfahrens zur Reinigung von Papierfabriksabwässern im Pilotmaßstab wurde der erste große Schritt hin zur Implementierung in großtechnischen Abwasserreinigungsanlagen der Industrie bewältigt.

---

---

**Danksagung**

Das Forschungsvorhaben IGF EN 23 der AiF-Forschungsvereinigung PTS wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Unser Dank gilt außerdem allen beteiligten Firmen der Papier- und Zulieferindustrie für die Unterstützung der Arbeiten.

---

## 2 Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

**Anlass für den Forschungsantrag** Anlass für den Forschungsantrag war, die Vorteile von Algen in der Abwasserreinigung zu nutzen und ein kostengünstiges Abwasserreinigungsverfahren für die Papierindustrie zu entwickeln. Die Entwicklung neuer Verfahrenskonzepte zur kostengünstigeren und/oder effizienteren Reinigung von Abwässern kann insbesondere für KMU mit geringem Budget von großem Nutzen sein.

---

**Ausgangssituation** Wasser ist in der Zellstoff- und Papierherstellung ein wesentlicher Rohstoff und Kostenfaktor. Wasser dient zum Erzeugen der Faserstoffsuspension und als Lösungsmittel für Chemikalien. Damit fallen täglich auch große Mengen Abwasser an. Üblicherweise werden die Abwässer mit Hilfe von Bakterien biologisch gereinigt. Es gibt viele unterschiedliche, auf bestimmte Reinigungsziele abgestimmte Verfahren. Die klassischen biologischen Verfahren haben jedoch auch ihre Grenzen, die durch den alleinigen Einsatz von Bakterien bisher nicht überwunden werden konnten: prioritäre Stoffe, endokrin wirksame Substanzen, Rest-CSB, Nährstoffe, Inhibitoren oder refraktäre Stoffe können beispielsweise durch reine Bakterienaktivität nicht entfernt werden.

Bei herkömmlichen aeroben Reinigungsverfahren verursacht die mechanische Belüftung zur Sauerstoffversorgung der aeroben Bakterien hohe Energiekosten. Die Bakterien brauchen Sauerstoff für den Abbau der organischen Abwasserbestandteile. Die Belüftung ist ein energieintensiver Prozess, der 45 % bis 75 % der Gesamtenergiekosten von Abwasserreinigungsanlagen ausmacht [1].

---

**Stand der Technik** Angesichts weltweiter Probleme im Zusammenhang mit Ressourcenknappheit und Erderwärmung erscheinen Mikroalgenreaktoren zur Abwasserreinigung vielen wieder als interessante Alternative. Mikroalgen haben eine ganze Reihe interessanter Eigenschaften.

Als autotrophe Lebewesen können sie (siehe Abbildung 1):

- den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß senken,
- durch Photosynthese Sauerstoff erzeugen, so dass weniger mechanische Belüftung notwendig ist,
- Nährstoffe aufnehmen (C, N und P),
- die Abbauleistung verbessern, weil sie zur Stickstoff- und Phosphorentfernung keinen Kohlenstoff benötigen,
- Sonnenenergie in Biomasse umwandeln.

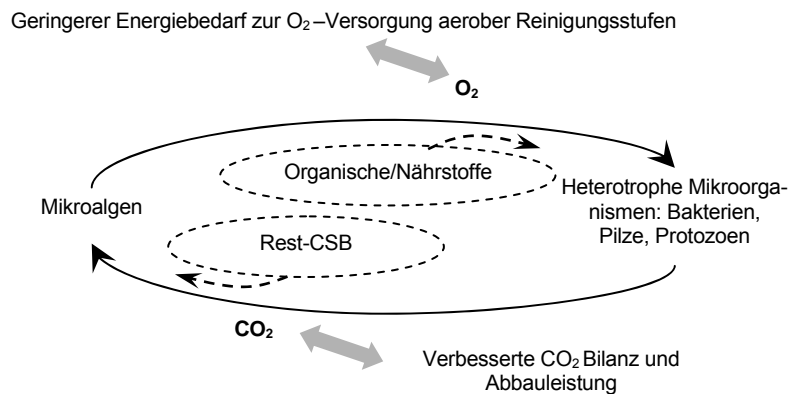


Abbildung 1: Wechselwirkungen (Austausch von  $\text{O}_2$  und  $\text{CO}_2$ ) zwischen Mikroalgen und heterotrophen Mikroorganismen

### **Einsatz von Algen in der Abwasser- reinigung**

Der Einsatz von Algen zur Abwasserreinigung war bereits vor einigen Jahren Ziel der Forschung. Aktuell gewinnen die Algen aufgrund ihres „grünen“ Potenzials, steigenden umwelttechnischen und gesetzlichen Anforderungen große Bedeutung. Im Gegensatz zu den vielen herkömmlichen biologischen und chemischen Verfahren ermöglichen Mikroalgen in der Abwasserreinigung zusätzlich eine Nährstoffentfernung, die im Abwasserreinigungssystem am Ende Energie spart. [2, 3] Sie eignen sich aufgrund ihres im Vergleich zu höheren pflanzlichen Organismen mehrfach höherer N- und P-Aufnahmekapazität von 10 und 1% bezogen auf Trockenmasse ausgezeichnet zur Nährstoffentfernung [4].

Im Abwasserbereich setzt man bevorzugt grüne Mikroalgen ein, da sie weniger Toxine als *Cyanobakterien* erzeugen. Mit *Cyanobakterien* lässt sich in kontinuierlich beleuchteten Reaktoren durch pH-Wert-Erhöhung eine gute P-Entfernung erzielen, das Sedimentationsverhalten ist gut. Bei Schwankungen der Abwasserfracht werden sie jedoch instabil und von anderen Algen oder Bakterien verdrängt [5]. Im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen sichert der Einsatz von Algen einen kontinuierlichen Nährstoffzyklus. Algen nutzen das Sonnenlicht, eine nachhaltige, umweltfreundliche Energiequelle.[6] Durch Verwendung immobilisierter Algen – d.h. Biofilme – glaubte man das Problem der Abtrennung aus dem Abwasser lösen zu können, es wurde jedoch auch von Instabilitäten in der Filmbildung und zu hohem Platzbedarf berichtet.[7]

Die Qualität des gereinigten Abwassers reicht für viele industrielle Einsatzbereiche aus [3]. Die Mikroalgen-Biomasse lässt sich vielseitig verwenden, was die Kostenbilanz verbessern und den Prozess wirtschaftlicher machen kann. Denkbar wären beispielsweise geeignete Nebenprodukte, hochwertige biochemische Produkte oder Methangewinnung. Anbieten würde sich auch die Nutzung der Biomasse als Tierfutter oder zur Erzeugung von Biokraftstoff.[8]

---

---

**Abwasserreinigung mit Algen in Belebtschlammflocken**

Es gibt weitaus mehr wissenschaftliche Publikationen zum Einsatz von Mikroalgen für die Abwasserreinigung als Beispiele für den industriellen Einsatz. Die hohen Kosten für die Ernte der Mikroalgen, die bis zu 57 % der Gesamt-Algenkosten ausmachen, ist eines der Haupthindernisse für die Anwendung von Mikroalgenteichen zur Abwasserreinigung [9, 10]. Für teure Verfahren wie Zentrifugieren, Filtration, Koagulation und/oder Flockenbildung müssen daher preisgünstigere Alternativen gefunden werden [10]. Die biologische Flockenbildung bietet eine einfachere und billigere Möglichkeit zum Abtrennen der Biomasse. Mikroalgen-Bakterien-Flocken sind Ansammlungen von Mikroalgen und Bakterien, die sich aufgrund ihrer Größe unter Schwerkraft schnell absetzen [11].

In [12] wurden folgende Unterschiede von Verfahren mit Algen-Bakterien-Biomasse zu herkömmlichen Abwasserteichen statiert: a) geringerer Flächenbedarf (25-30 %), b) kein Bedarf für eine Anaerobstufe, c) Notwendigkeit eines Rührwerks, d) kontrollierte Stickstoffentfernung, e) Umwandlung gelöster Nährstoffe in verwertbare Biomasse, z.B. für anaerobe Vergärung, f) schnelles Absetzen der Mikroalgen-Bakterien-Biomasse, um bis zu 2 % Trockensubstanz nach einer Absetzzeit von 30 min zu erreichen.

Das auf einer Kombination von Mikroalgen und Belebtschlamm basierende Verfahren der Mikroalgen-Bakterien-Flockenbildung wurde 2001 von Gutzeit und Neis an der TU Hamburg-Harburg erstmals vorgestellt. Seither erfolgten umfangreiche Labortests zur Abwasserreinigung mit Algen-Bakterien-Flocken, um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu optimieren [13, 14].

Auch an den Universitäten Gent und Howest laufen seit einiger Zeit Laboruntersuchungen zur Flockenbildung von Mikroalgen und Bakterien [15]. Ein aktuell laufendes Projekt beschäftigt sich mit der CO<sub>2</sub>-Verminderung und dem Wechsel zu nachhaltig nutzbaren Energiequellen durch Produktion von Algenbiomasse (<http://www.enalgae.eu/>).

---

### **3 Forschungsziel**

**Ziel** Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Reinigung von Papierfabriksabwässern mit Hilfe von Algen bzw. ALBA-Biomasse. Außerdem soll die Verwendbarkeit der im Verfahren produzierten Überschuss-Biomasse als Energiequelle oder Rohmaterial für industrielle Prozesse bewertet werden.

---



## 4 Gesamtvorgehen

### Übersicht

Die Arbeiten des Forschungsprojektes gliedern sich in 9 Arbeitspakete. Diese wurden unter Leitung des in Spalte 2 angegebenen Projektpartners bearbeitet und durch andere Projektpartner (Spalte 3) unterstützt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Gliederung und Themen der Arbeitspakete, verantwortliche und beteiligte Projektpartner

| Arbeitspaket No. | Arbeitspaket-Leitung | Weitere Beteiligte | Thema                                |
|------------------|----------------------|--------------------|--------------------------------------|
| AP1              | TUHH                 | ICP-TCP            | Kultivierung geeigneter Algenspezies |
| AP2              | PTS                  | -                  | Algen Fixiertechniken                |
| AP3              | PRI                  | -                  | Betrieb eines reinen Algenreaktors   |
| AP4              | TUHH                 | -                  | Designparameter für Pilotversuche    |
| AP5              | PTS                  | CELABOR            | Abbauleistung                        |
| AP6              | ICP-TCP              | TUHH, PTS          | Nutzung der Überschussbiomasse       |
| AP7              | Celabor              | ICP-TCP, TUHH      | Pilotversuch                         |
| AP8              | Celabor              | PTS                | Bewertung des Nutzens                |
| AP9              | PTS                  | CELABOR, TUHH      | Ermittlung der Wirtschaftlichkeit    |

### Material und Methoden

Die mehrfach eingesetzten Materialien und Methoden sind im Kapitel 5 beschrieben. Materialien und Methoden spezifisch für die Arbeitspakete sind vor den Ergebnissen der jeweilig durchgeführten Untersuchungen aufgeführt.

## 5 In mehreren Arbeitspaketen eingesetzte Methoden

### Bestimmung von Chlorophyll a+b nach Barnes [16]

Die Konzentration an Chlorophyll a+b dient zur Quantifizierung der Algenbiomasse. Je Probe werden zwei Parallelansätze analysiert und daraus der Mittelwert gebildet. Ein definiertes Probevolumen wird über einen Glasfaserfilter filtriert. Der Filter mit den Algen wird in ein Sovirel-Röhrchen gegeben und mit Dimethylsulfoxid versetzt. Das Röhrchen wird anschließend bei 70°C im Wasserbad für 10 Min. extrahiert und vor der Messung nochmals mindestens weitere 10 Min. im Dunkeln nachextrahiert. Nach der Extraktion werden die Röhrchen bei 3000 U/min für 10 Min. zentrifugiert und der klare Überstand in Küvetten überführt. Anschließend erfolgt eine photometrische Messung im Bereich von 350 nm bis 760 nm. Die Extinktion bei 750 nm wird als Blindwert von den Extinktionen bei 665 nm und 648 nm subtrahiert, welche dann entsprechend als E 665 nm und E 648 nm und bezeichnet werden. Die Berechnung des Chlorophyll a+b erfolgt nach folgender Formel:

$$\text{Chl}_{a+b} [\mu\text{g/mL}] = 1,6 \times (7,49 \times E_{665 \text{ nm}} + 20,34 \times E_{648 \text{ nm}})$$

**Normverfahren**

Tabelle 2: Normverfahren zur Bestimmung von Abwasserparametern

| PARAMETER        | BESCHREIBUNG                     | NORM                            |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| T                | Temperatur                       | DIN 38 404 Teil 4               |
| pH-Wert          |                                  | EN 12176:1998                   |
| O <sub>2</sub>   | Gelöster Sauerstoff              | EN 25 814:1992<br>ISO 5814:1990 |
| TS               | Trockenrückstand                 | EN 12880:2000                   |
| GV               | Glühverlust                      | EN 12879:2000                   |
| TOC              | Gesamter organischer Kohlenstoff | EN 1484:1997                    |
| DOC              | Gelöster organischer Kohlenstoff | EN 1484:1997                    |
| TNb              | Gebundener Stickstoff            | EN 12260:2003                   |
| BSB <sub>5</sub> | Biochemischer Sauerstoffbedarf   | EN 1899-1:1998                  |
| ISV              | Schlammvolumenindex              | EN 14702-2                      |

**Küvettentests**

Tabelle 3: Küvettentests Abwasserparameter

| PARAMETER                   | KURZ            | KÜVETTENTEST | KONZENTRATION (mg/l)         |
|-----------------------------|-----------------|--------------|------------------------------|
| Chemischer Sauerstoffbedarf | CSB             | LCK 114      | 150-1000                     |
|                             | CSB             | LCK 514      | 100-2000                     |
| Nitrat                      | NO <sub>3</sub> | LCK 339      | 0.23-13.5 NO <sub>3</sub> -N |
| Nitrit                      | NO <sub>2</sub> | LCK 341      | 0.015-0.6 NO <sub>2</sub> -N |
| Phosphat                    | PO <sub>4</sub> | LCK 349      | 0.05-1.5 PO <sub>4</sub> -P  |
| Ammonium                    | NH <sub>4</sub> | LCK 304      | 0.05-2 NH <sub>4</sub> -N    |

**Berechnete Werte**

Der Aschegehalt berechnet sich aus 100% abzüglich GV.

**Lichtintensität**

Mit Hilfe eines PAR-Sensors (photosynthetic active radiation) wurde das photosyntheseverfügbare Licht im Bereich von 400 nm bis 700 nm gemessen. Dieses Gerät gibt als Wert den Photonenflux für den photosyntheserelevanten Strahlungsbereich in  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$  an, wobei sich die Einheit mol auf Photonen bezieht.

**Mikroskopie**

Algen und ALBA-Schlamm wurden regelmäßig mit dem Phasen-Kontrast-Mikroskop und einem Stereomikroskop angeschaut. Stereo- und Phasen-Kontrast-Mikroskop-Bilder wurden in 10-, 40- und 100-facher Vergrößerung mit einer Digital-kamera aufgenommen.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 AP1- Kultivierung geeigneter Algenspezies

|  |   |
|--|---|
| <b>Laboranlage für Parallelversuche</b>                                  | Eine Versuchsanlage zur Algenkultivierung wurde konzipiert und zusammengestellt. Das Laborsystem diente zur Kultivierung ausgewählter Mikroalgenspezies in den Arbeitspaketen 1 und 4, die in Parallelversuchen untersucht werden sollten.  |
| <b>Vorauswahl geeigneter Algenspezies für die weiteren Arbeitspakete</b> | Ausgehend von Literaturrecherchen und früheren Arbeiten des AP-Leiters TUHH wurde <i>Chlorella vulgaris</i> in AP 1 als wichtigste Algenspezies zum Animpfen für die Labor- und Pilotversuche aller weiteren Arbeitspakete ausgewählt. Der in den Untersuchungen verwendete Algenstamm wurde von der Abteilung Zellbiologie der Pflanzen und Phykologie Universität Hamburg bereitgestellt.   |
| <b>Vorauswahl von Algenspezies für nachfolgende Untersuchungen</b>       | In Voruntersuchungen wurden weitere Algenspezies auf ihre Eignung zur Abwasserreinigung getestet. Anhand dieser Testergebnisse wurden 9 geeignet erscheinende Spezies ausgewählt, die in weiteren Untersuchungen, u.a. Temperatur- und Salinitätsverträglichkeit, Anpassung an Fabrikabwasser, und Integration in Belebtschlammflocken getestet wurden.   |
| <b>Nährmedium</b>  | Für die Versuche mit Temperatur und Salinität dienten Kessler & Czygan (KC-Medium) sowie KC mit Pepton, Hefeextrakt und Harnstoff (KCY) als Nährmedien.   |
| <b>Salinitätsversuche - Ergebnisse</b>                                   | <p>In den ersten Tests zeigten <i>Species 6</i> und <i>Species 9</i> im KC-Nährmedium nur ungenügendes oder gar kein Wachstum. Für diese beiden Spezies erfolgten daher keine Salinitätsversuche.</p> <p>Die komplette Entfernung von NaCl aus dem Medium wirkt sich ungünstig auf das Wachstum von <i>Species 3</i> und <i>Species 8</i> aus. Bei allen anderen Spezies war ein gutes Wachstum zu beobachten.</p> <p>Mit steigender NaCl-Konzentration war bei allen Spezies ein gutes Wachstum zu beobachten. Hierbei ist anzumerken, dass auch <i>Species 2</i> ein sehr gutes Wachstum zeigte, was aber wegen Problemen mit der Messung nicht dargestellt werden konnte.</p> <p>Die Versuchsergebnisse zeigen, dass alle untersuchten Spezies mit Ausnahme von <i>Species 7</i>, für Untersuchungen in realen Abwassersystemen verwendet werden können. <i>Species 7</i> wurde in den nachfolgenden Tests nicht mehr verwendet.</p> |
| <b>Versuche mit realem Abwasser u. Belebtschlamm</b>                     | In beiden Versuchen diente <i>Chlorella vulgaris</i> aufgrund ihres außerordentlich guten Wachstums in Abwasser und Belebtschlammflocken (Flockenbildung) als Positivkontrolle.   |
| <b>Bedingungen</b>   | <p>Zur Kultivierung im Abwasser einer Papierfabrik wurden Abwasser und KC im Verhältnis 1:1 verwendet. Die Tests hatten eine Dauer von 14 Tagen.</p> <p>Für die Kultivierung mit Belebtschlamm wurde Algenmasse und Schlamm im Verhältnis 2:1 verwendet. Die Versuchsdauer lag bei 48 h; dies ist die zur Flockenbildung nötige Zeitspanne.</p>   |

**Versuche mit Abwasser und Belebtschlamm**

Tabelle 4: Kultivierung in Abwasser und Belebtschlamm

**Ergebnisse**

|                           | KC medium | Wastewater + KC | Activated sludge |
|---------------------------|-----------|-----------------|------------------|
| <i>Species 1</i>          | +++       | ++              | -                |
| <i>Species 2</i>          | +++       | +               | ++               |
| <i>Species 3</i>          | +++       | -               | -                |
| <i>Species 4</i>          | +++       | ++              | +++              |
| <i>Species 5</i>          | +++       | +               | ++               |
| <i>Species 8</i>          | +++       | ++              | ++               |
| <i>Species 10</i>         | +++       | +++             | +++              |
| <i>Chlorella vulgaris</i> | +++       | +++             | +++              |

Die Versuche mit Abwasser + KC-Medium (Tabelle 4) führten zum Ausschluss von *Spezies 3*, da diese im Abwasser keinerlei Wachstum zeigte. *Spezies 1*, *Spezies 4*, *Spezies 8* und *Spezies 10* zeigten hingegen ein sehr gutes Wachstum. *Spezies 2* und *Spezies 5* zeigten ein zufriedenstellendes Wachstum.

Die Ergebnisse der Belebtschlamm-Versuche (Algen und Schlamm im Verhältnis 2:1, siehe Tabelle 4) waren fast identisch mit denen der Abwassertests – bis auf das ungenügende Wachstum von *Spezies 1*. Diese hatte in Abwasser gute Ergebnisse erreicht – ihr schwaches Wachstum ist vermutlich auf konkurrierende Mikroorganismen im Belebtschlamm zurückzuführen.

**Versuche zur Integration in Belebtschlammflocken**

Trotz des guten Wachstums der Algen im Belebtschlamm musste noch deren Integration in die Flocken untersucht werden.

Anhand mikroskopischer Untersuchungen ließ sich zeigen, dass sich alle getesteten *Spezies* integrierten. Besonders gut integrierten sich *Spezies 4* und *10* (neben *Chlorella vulgaris*, die als Positivkontrolle diente).

**Untersuchung verschiedener Algenarten**

Nach Auswertung aller Untersuchungen und Ergebnisse wurden neben *Chlorella vulgaris* fünf weitere Arten als geeignet für die Anforderungen der Abwasserreinigung bewertet:

**Zusammenfassung**

- *Spezies 2*
- *Spezies 4*
- *Spezies 5*
- *Spezies 8*
- *Spezies 10*

Diese Arten sollten in weiteren Versuchen getestet werden, um ihr Verhalten in der biologischen Abwasserreinigung zu analysieren.

## 6.2 AP2: Test verschiedener Techniken zur Fixierung von Algen in gemischter ALBA-Biomasse

### Beschreibung Versuchsanlage

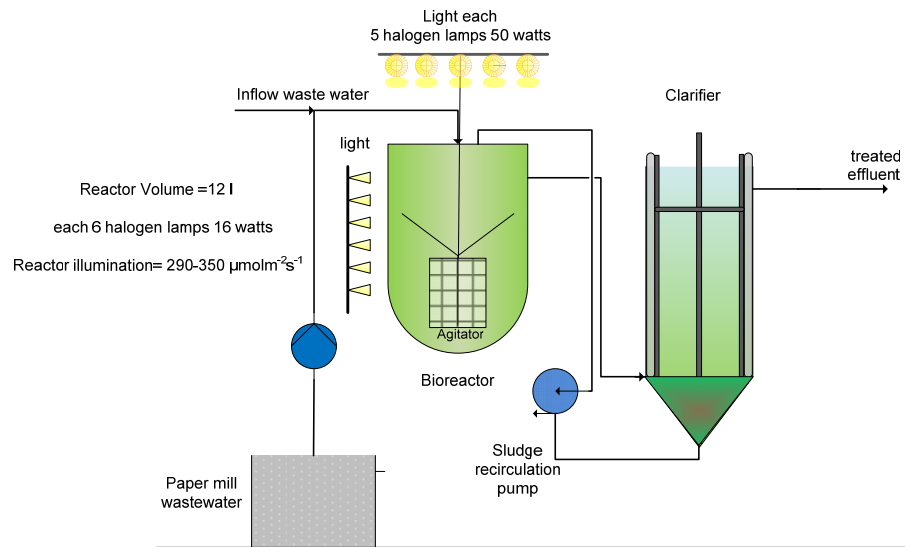


Abbildung 2: Schema Einfachansatz Laboranlage

Die Versuchsanlage besteht aus vier identischen Einzelreaktoren mit nachgeschalteter Nachklärung, die schematisch wie in Abbildung 2 dargestellt aufgebaut wurden und parallel betrieben werden können.

### Inbetriebnahme

Das verwendete Abwasser wurde ca. alle 2 Wochen frisch aus der Papierfabrik 1 (siehe AP5, Tabelle 5) angeliefert. Der CSB des Abwassers lag bei ca. 2.400 mg/l. Zur Entwicklung einer stabilen ALBA-Biozönose wurden 2 Reaktoren der Versuchsanlage im Batch-Modus betrieben. Es wurde Belebtschlamm aus einer nahegelegenen Papierfabrik mit einem TS-Gehalt von 2-3 g/l verwendet. Die Algensuspension wurde mit ca. 2 g/l Algengehalt zugegeben.

### Ergebnis Algenfixierung in Belebtschlamm

Die gezielte Entwicklung von stabilen Algenaggregaten mit der einzelligen Grünalge *Chlorella Vulgaris* (*Sp. Han...*) und fadenbildenden Abwasserorganismen im SBR-Modus war möglich. Nach wenigen Tagen waren die Algen nahezu vollständig mit dem Schlamm vergesellschaftet.

Die Flocken im SBR-Modus waren überwiegend groß mit schwacher Struktur. Sehr selten traten Fadenbakterien auf, welche größtenteils keinen negativen Einfluss auf die Absetzbarkeit hatten. Abbildung 3 zeigt eine Flocke mit eingeschlossenen *Chlorella Vulgaris* in 40-facher Vergrößerung im Phasenkontrast.

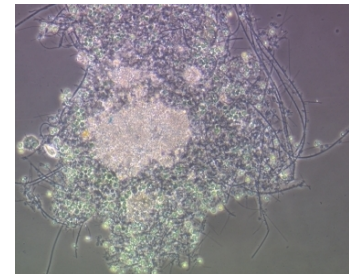


Abbildung 3:  
Belebtschlammflocke aus  
Ansatz im SBR-Modus

---

### Auswahl von Trägermaterialien

Die Trägermaterialien sollten möglichst offenporig sein und die Lichtverfügbarkeit nicht zu sehr vermindern. So fiel die Wahl auf zwei in der Abwasserbehandlung mittels Biofilmverfahren gängige Träger, Mutag BioChip™ und AnoxKaldness™ BiofilmChip P. Außerdem wurden zwei verschiedene Spezies Schaumstoffwürfel getestet, die von Seiten eines Mitglieds im Projekt begleitenden Ausschuss empfohlen wurden.

---

### Übersicht Versuche

Reaktor 1 (konventionelles Belebtschlammverfahren) wurde als Referenzansatz geführt. Reaktor 2 wurde mit ALBA Biomasse ohne Trägermaterial betrieben. Reaktor 3 wurde zunächst mit Mutag BioChip™ und in einem Nachfolgeversuch mit Schaumstoffwürfel Typ 1 bestückt, Reaktor 4 zuerst mit BiofilmChip P und anschließend mit Schaumstoffwürfel Typ 2. Alle Reaktoren wurden belüftet.

---

### Eignung der Carrier

Der Mutag BioChip™ erwies sich als besonders gut geeignet, da sich *Chlorella vulgaris* während 4 Tagen gut in den Poren ansiedeln konnte. Außerdem verteilten sich die Mutag BioChips™ auf Grund ihrer Form gut im Bioreaktor. Auf dem BiofilmChip P siedelten sich die Algen nur wenig an. Außerdem schwammen die meisten dieser Träger auf der Wasseroberfläche auf. Schaumstoffwürfel Typ 1 schwamm ebenfalls auf, da die Poren teilweise luftdicht waren und eignete sich deshalb auch schlecht für die Besiedlung mit Biomasse. Schaumstoffwürfel Typ 2 verhielten sich wie ein Schwamm mit guter Biomassebesiedlung und ließen sich gut im Bioreaktor verteilen.

---

### Besiedelung der Carrier mit Algen und ALBA-Biomasse

Trotzdem auch während der Versuchslaufzeit immer wieder Algensuspension zudosiert wurde, zeigte sich, dass die Algen auf den Carriern schon bald von Bakterien verdrängt wurden. Nach einiger Zeit etablierten sich vor allem Cyanobakterien neben den Abwasserbakterien.

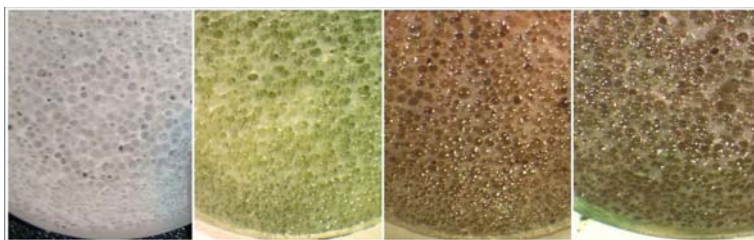


Abbildung 4: Mutag BioChip™ vor Versuchsbeginn, nach 4 Tagen in reiner Algensuspension, nach 4 und 6 Wochen kontinuierlichem Betrieb.

---

### Reinigungsleistung bei Verweilzeit < 72 h

Trotzdem die Algen nicht stabil im System verblieben, zeigte sich in allen drei Bioreaktoren bei einem Zulauf-CSB von ca. 2.400 mg/l mit ca. 80 % im Mittel eine etwas bessere Abbauleistung als in der konventionellen Belegung (75 %). Die Abbauleistungen in den einzelnen Algentöpfen unterschieden sich dagegen nicht. Der pH-Wert lag mit ca. 8,4 in allen Reaktoren im für den aeroben Abbau optimalen Bereich von 7,5-8,5.

---

---

**Reinigungsleistung bei Verweilzeit 120 h**

Auch hier verschwanden die Grünalgen aus allen Algentöpfen. Bei einem durchschnittlichen Zulauf-CSB von ca. 2400 mg/l lag der Abbaugrad in der Belebung in diesem Versuch wieder bei 75 % während er in Algentopf 1 auf 83 %, in Algentopf 2 und 3 auf 84 % und 85 % stieg. Der pH-Wert lag in allen Reaktoren, möglicherweise auf Grund des massiven Auftretens von Cyanobakterien, bei ca. 9 und damit nicht im optimalen Bereich.

---

**Zusammenfassung**

Die Algen der Spezies *Chlorella vulgaris* konnten sich während der ersten Batch-Tests gut in den Belebtschlamm integrieren. Der ALBA-Schlamm zeigte gute Absetzeigenschaften. Während der kontinuierlichen Versuche verblieben die Algen jedoch trotz wiederholter Zugabe nicht im System. Die Carrier zeigten dabei keinen Vorteil für die Etablierung der Algen. Trotzdem wurden während der kontinuierlichen Versuche mit fortwährender Belüftung in den Reaktoren mit Algen höhere Abbauraten erreicht als in der konventionellen Belebung. Offensichtlich erhöht die zusätzliche Belüftung der Reaktoren mit der symbiotischen ALBA-Biomasse die Reinigungsleistung

---

### 6.3 AP4 - Designparameter für Pilotversuche

**Versuchsaufbau**

Für die Versuche wurden zwei 30 Liter-Reaktoren mit Wasserbad und Absetzbecken installiert (Abbildung 5). Die Temperatur des Wasserbads wurde mittels Thermostat und Kühlwasser in einem Bereich von 20 - 25 °C gehalten. Als Lichtquelle dienten pro Reaktor zwei Halogenlampen von 150 W. In beiden Reaktoren wurden Rührwerke mit einer Drehzahl von 30-40 U/min verwendet. In beiden Reaktoren wurden pH-Wert und Sauerstoff kontinuierlich überwacht. Die Messdaten wurden auf elektronischen Medien gespeichert.

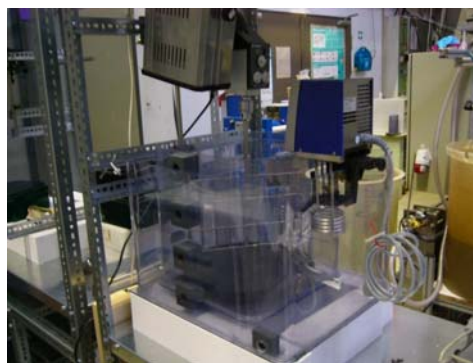


Abbildung 5: Fotografie eines Versuchssystems während des Aufbaus

---

**Versuchsprogramm**

Beide Reaktoren wurden zunächst mit synthetischem Abwasser (SAW), später mit realem Abwasser in Betrieb genommen. Der anfängliche Betrieb erfolgte mit Belebtschlamm aus der Kläranlage Seevetal, später erfolgte dann in einem der Reaktoren die Zugabe von *Chlorella vulgaris*. Zeitgleich wurde die Belüftung für das ALBA-System abgestellt. Sauerstoff und pH-Wert wurden kontinuierlich überwacht, außerdem wurden TOC, TN und Chlorophyll a+b bestimmt.

---

**Versuche mit**

Die Versuche mit SAW (synthetisches Abwasser) dienten dazu, die Ergebnisse vo-

---

---

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <b>SAW</b>                        | rangegangener Projektarbeiten sowie die dauerhafte Leistungsfähigkeit der hergestellten ALBA-Biomasse zu verifizieren. Das verwendete SAW entsprach den Vorgaben von DIN 38 412 Teil 24 und wurde nach Bedarf modifiziert. Es wurden verschiedene synthetische Abwässer hergestellt (DOC 120/160/240/315 mg/l; TN 64 - 68 mg/l)   |
| <b>Versuche mit PAW1</b>          | Das erste Papierfabrikabwasser (PAW1) stammte aus der Papierfabrik 2 (siehe auch AP5, Tabelle 5). Der DOC-Wert des Abwassers (zirka 500 mg/l, CSB 1500 mg/l) war für den Betrieb des ALBA-Systems offensichtlich zu hoch – die Algen verschwanden aus dem System. Aus diesem Grund wurde das Abwasser verdünnt und Harnstoff als Stickstoffquelle zugegeben.  |
| <b>Versuche mit PWW2</b>          | Das zweite Fabrikabwasser (PAW2) stammte aus der Papierfabrik 3 (siehe auch AP5 Tabelle 5). Das Werk betreibt eine zweistufige biologische Reinigung. Das im Versuch verwendete Abwasser wurde nach der ersten Reinigungsstufe entnommen (DOC 123 mg/l) und unverdünnt und ohne weitere Nährstoffzugabe in die Versuchsanlage eingeleitet.  |
| <b>Referenzreaktor</b>            | Zum Vergleich der Abbauleistungen wurde parallel zum Versuchsreaktor ein Referenzreaktor mit Belebtschlamm betrieben. Die Betriebsbedingungen des ALBA- und des Belebtschlammsystems waren identisch (bis auf die Belüftung) – d.h. lange Verweildauer und hohes Schlammalter.  |
| <b>DOC-Entfernung</b>             | Die durchschnittlich erzielte DOC-Entfernung liegt bei allen Abwässern über 80%, beim synthetischen Abwasser sogar bei mehr als 90%. Das ist möglicherweise auf die biologisch leichter abbaubaren Inhaltsstoffe des SAW zurückzuführen.<br><br>Ein wichtiger Aspekt ist das Erreichen des Systemgrenzwerts beim Versuch mit PAW1 (DOC of 375 mg/l). Das System arbeitete noch kurzzeitig normal und brach dann zusammen. Bei einem DOC-Wert von 300 mg/l traten hingegen keinerlei Probleme auf.   |
| <b>Chlorophyll a+b im Reaktor</b> | Mit steigendem DOC-Gehalt des synthetischen Abwassers nahm auch Chl a+b im Reaktor zu. Dieser Zusammenhang bestätigt die Grundannahme für das ALBA-System, dass durch Veratmung von organischen Bestandteilen erzeugtes CO <sub>2</sub> von der Algen-Biomasse genutzt wird.<br><br>Die Chl a+b-Konzentrationen der verwendeten Papierfabrikabwässer lagen insgesamt unter denen des synthetischen Abwassers, was vermutlich daran liegt, dass das SAW alle zur Algenproduktion benötigten Nährstoffe und Mikronährstoffe enthält. Obwohl die Chl a+b-Konzentration keinen direkten Einfluss auf die DOC-Entfernung hat, sind niedrige Chl a+b-Werte ein guter Hinweis, dass das ALBA-System in einem schlechten Zustand ist. |
| <b>Biomasseproduktion</b>         | Die durchschnittliche Biomasseproduktion lag generell unter dem beim Belebtschlammverfahren üblichen Wert. Dies liegt vermutlich an dem Betrieb unter Schwachlastbedingungen (geringe Schlammbelastung und hohes Schlammalter) welche zu einer verstärkten endogenen Atmung führen.   |

---



---

**Algengehalt im  
Ablauf**

Wie auf Grund früherer Arbeiten der TUHH erwartet, war die als Chl a+b gemessene Algenkonzentration im Ablauf sehr niedrig.

---

**Zusammenfas-  
sung**

Der Vergleich mit dem herkömmlichen Belebtschlammverfahren zeigt einen ähnlichen Substratabbau der beiden Systeme. Die DOC-Entfernung lag stets höher als 80%. Die wichtigsten Unterschiede des biologischen Verfahrens sind der höhere Abbau an Gesamtstickstoff und die geringere Biomasseproduktion.

Die Regelung des ALBA-Systems unterscheidet sich zwar geringfügig von der des Belebtschlammverfahrens, kann jedoch ebenfalls mit typischen Laborgeräten realisiert werden. Die Systemfarbe ist ein guter Indikator für den Betriebszustand.

Das ALBA-System hat sich für die Reinigung von Papierfabrikabwässern als erfolgversprechend erwiesen. Es sind jedoch noch weitere Untersuchungen zum besseren Verständnis des ALBA-Prozesses notwendig.

---

**Empfehlungen  
zum Betrieb der  
Pilotanlage**

- Je nach CSB-Gehalt des Abwassers empfiehlt sich eine hydraulische Verweildauer (HRT) von 1-3 Tagen. Für stark verschmutztes Abwasser (DOC über 300 mg/l, CSB über 800 mg/l) ist das System nicht empfehlenswert.
  - Um die Flocken in Suspension zu halten und insbesondere Totzonen zu vermeiden, sollte ein Rührwerk verwendet werden. Axialrührwerke sollten eine niedrige Drehzahl haben, um die Flocken nicht zu zerstören. Paddelrührer sind eine gute Alternative. Eine Belüftung mit Gebläse fördert das Wachstum heterotropher Bakterien im System und ist daher zu vermeiden.
  - O<sub>2</sub>, pH-Wert und Systemfarbe sollten überwacht werden.
-

### 6.4 AP5 - Abbauleistung – Reinigung von Papierfabrikabwässern in einer Laboranlage mit symbiotischer ALBA-Biomasse

#### Experimental program

Alle Versuche des AP5 wurden in der PTS-Laboranlage durchgeführt. Ein paralleles Versuchskonzept ermöglichte den Vergleich der Ergebnisse. Eine genaue Beschreibung der PTS-Laboranlage ist auf Seite 2 zu finden. Es erfolgte keine Belüftung des ALBA-Systems.

Tabelle 5 zeigt die untersuchten Papierfabriken mit den jeweils verwendeten Rohstoffen, dem Produktprogramm sowie der Herkunft der untersuchten Abwässer einschließlich CSB-Charakteristik

| Paper mill | Raw material                       | Paper production                      | Effluent tested          | Effluent COD       |
|------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| 1          | Mech. pulp, waste paper            | printing papers                       | Inflow wwtp              | 2.500 – 3.300 mg/l |
|            |                                    |                                       | Inflow wwtp (diluted)    | 500 - 800 mg/l     |
| 2          | Groundwood pulp, pulp, waste paper | wood containing coated printing paper | Inflow wwtp              | 1.100 – 1.700 mg/l |
|            |                                    |                                       | Inflow wwtp (diluted)    | 500 - 800 mg/l     |
| 3          |                                    |                                       | Partial stream           | 900 - 1.100 mg/l   |
|            |                                    |                                       | Partial stream (diluted) | 450 – 600 mg/l     |
| 4          | waste paper                        | board                                 | Inflow as tank           | 200 – 400 mg/l     |
| 5          | pulp                               | Woodfree graphic paper                | Inflow wwtp              | 200 – 250 mg/l     |
| 6          | waste paper                        | board                                 | Inflow as tank           | 400 – 600 mg/l     |
| 7          | waste paper                        | board                                 | Inflow as tank           | 400 – 600 mg/l     |
| 8          | waste paper, pulp                  | Woodfree graphic paper                | Inflow wwtp              | 650 – 850 mg/l     |
| 9          | waste paper mech. pulp             | Newsprint                             | Inflow as tank           | 500 – 750 mg/l     |

Tabelle 5: Untersuchte Abwässer und Produktionstypen der Papierfabriken

#### Sauerstoff-zufuhr als Funktion der Beleuchtung am Beispiel von Reaktor R1

Die Sauerstoffkonzentration reichte zur Versorgung der Bakterien aus – auch während der Dunkelperioden zur Simulation nächtlicher Beleuchtungsverhältnisse (Abbildung 6).

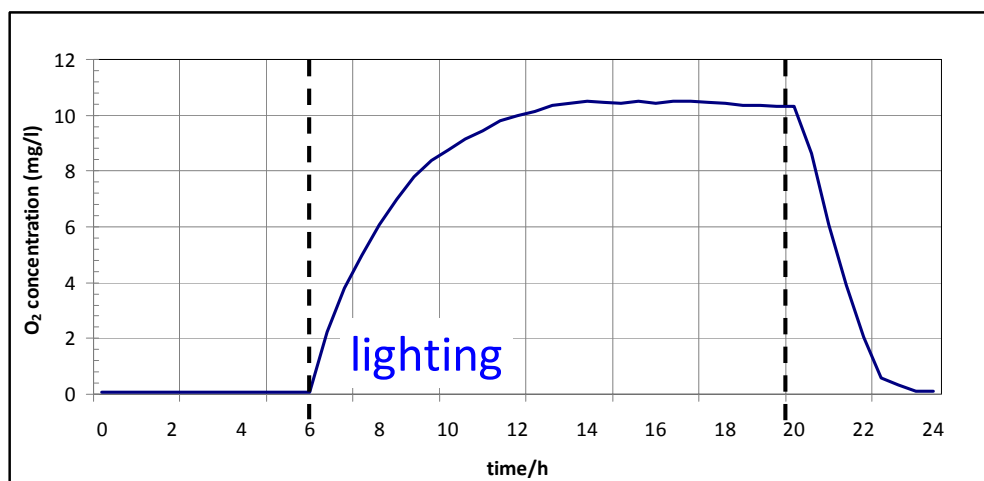


Abbildung 6: Entwicklung der Sauerstoffkonzentration im Tagesverlauf – Versuche mit Abwasser in Reaktor R1

**Diversität der  
symbiotischen  
ALBA Biomasse**

Die verschiedenen Fabrikabwässer führten in den Versuchen zu Unterschieden in der Zusammensetzung der ALBA-Biomasse und Morphologie der Flocken (Abbildung 7). Das Absetzverhalten blieb davon jedoch weitestgehend unbeeinflusst.

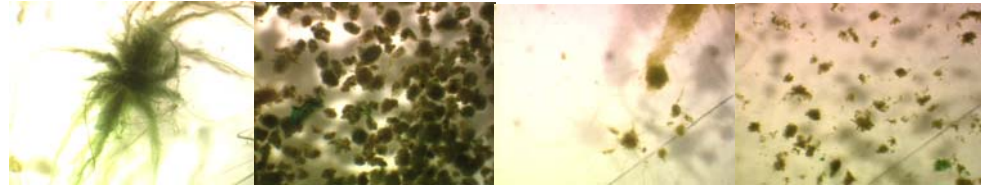


Abbildung 7: Eigenschaften der ALBA-Flocken in den Reaktoren bei der Reinigung verschiedener Fabrikabwässer (v.l.n.r.: R1: Abwasser aus Fabrik Nr. 5, R2: Abwasser aus Fabrik Nr. 6, R3: Abwasser aus Fabrik Nr. 7, R4: Abwasser aus Fabrik Nr. 8)

**Zusammenfassung**

Das Projekt hat gezeigt, dass Papierfabrikabwässer trotz ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung für die Reinigung mittels symbiotischer ALBA-Biomasse geeignet sind. Das Absetzverhalten war in den meisten Fällen gut, so dass die Biomasse mittels Bioflockenbildung gut vom gereinigten Abwasser getrennt werden konnte. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Abbauversuche aller in AP5 untersuchten Abwässer im Überblick.

Tabelle 6: Abbauergebnisse der in AP5 untersuchten Abwässer

| paper mill | Raw material            | Products                              | Settle-ability | ØDegradation performance | Chl a+b µg/ml | O <sub>2</sub> supply |
|------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------------|---------------|-----------------------|
| 1          | waste paper mech. pulp, | printing papers                       | ☺              | 80 %                     | ☹             | ☹                     |
|            |                         |                                       | ☺              | 70 %                     | ≤ 12          | ☺                     |
| 2          | pulp, waste paper       | wood containing coated printing paper | ☺              | 80 %<br>76 %             | ☹<br>≤ 15     | ☹<br>☺                |
|            |                         |                                       | ☺              | 80%<br>75%               | ☹<br>≤ 14     | ☹<br>☺                |
| 3          | waste paper             | board                                 | ☺              | 70 %                     | ≤ 16          | ☺                     |
| 4          | pulp                    | Woodfree graphic paper                | ☺              | 76 %                     | ≤ 14          | ☺                     |
| 5          | waste paper             | board                                 | ☺              | 72 %                     | ≤ 23          | ☺                     |
| 6          | waste paper, mech. pulp | Newsprint                             | ☺              | 65 %                     | ≤ 12          | ☺                     |
| 7          | waste paper, pulp       | Woodfree graphic paper                | ☺              | 76 %                     | ≤ 12          | ☺                     |
| 8          | waste paper             | board                                 | ☺              | 70 %                     | ≤ 16          | ☺                     |

Bei den Abwässern mit hohem CSB-Gehalt (> 1000 mg CSB/l) wurde erwartungsgemäß kein stabiler Anlagenbetrieb erreicht, da der Algengehalt abnahm und somit nicht genug Sauerstoff zur Verfügung stand. Ursache waren die unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten der Algen und Bakterien, die zu einer erhöhten Aktivität der Bakterien und zum Austrag bzw. Überwachsen der Algen durch die Bakterien führten. Ungeachtet dessen war die erzielte CSB-Abbauleistung für die meisten der untersuchten Abwässer gleichbleibend hoch, wenn auch für Wässer mit zu hohen CSB-Konzentrationen keine stabile ALBA-Biomasse erhalten werden konnte. Ein geringerer CSB-Abbau war nur bei Abwässern mit Holzextraktanteil wie z.B. aus Papierfabrik 6 festzustellen.

## 6.5 AP6 - Nutzung der ALBA-Überschussschlämme

**Energiegewinnung aus Algen** Algen haben Potential für energetische Verwertung, zur Biogas- bzw. Methanproduktion durch anaerobe Vergärung der Algenbiomasse, als Rohstoff zur Bioethanolproduktion durch alkoholische Vergärung, Biodieselherstellung durch die Ableitung der extrahierten Öle aus Algen mit Methanol sowie Biowasserstoffproduktion durch photobiologische Prozesse [17].

---

**Ergebnisse einer Studie** Eine kürzlich veröffentlichte Studie zeigt, dass durch die Umwandlung der Rest-Algenbiomasse in Biogas mehr Energie gewonnen wird als durch die vorhergehende Extraktion von Öl aus den Algen. Wenn der Ölgehalt der Algen kleiner 40 % ist, ist die optimale Verwertung zur Energiegewinnung die anaerobe Vergärung ohne Öl-Extraktion. Mikroalgen-Bakterien-Flocken, die auf Abwasser mit Zugabe von Abgasen gezüchtet wurden, hatten einen Öl-Gehalt von ungefähr 20 %.[15] Deshalb dürfte die anaerobe Vergärung in diesem Fall der beste Weg zur Energiegewinnung sein.

---

### 6.5.1 Eigenschaften der Überschussschlämme

**Herkunft der Überschussschlämme** Untersucht wurden neun repräsentative ALBA-Schlämme von den Laborversuchen bei PTS, TUHH und den Pilotversuchen. Hierfür wurde aus den Experimenten von PTS und TUHH über die Dauer eines Versuchs Schlamm gesammelt, um eine für die Analytik ausreichende Menge zur Verfügung stellen zu können. Als Referenzen wurden ein typischer Überschussschlamm aus der aeroben Stufe einer Abwasserreinigung einer Papierfabrik und *Chlorella vulgaris Sp. Hamburg* herangezogen.

---

**Zusammensetzung von *Chlorella vulgaris Sp. Hamburg*** *Chlorella vulgaris Sp. Hamburg* wurden von ICP-TCP kultiviert und anschließend analysiert. Die Algen enthielten 44-52% Proteine und 15-20% Kohlenhydrate. Der Aschegehalt betrug 9% und der Heizwert 29 MJ/kg.

---

**Aschegehalt der ALBA-Schlämme** Die Aschegehalte der ALBA-Schlämme lagen zwischen 37 % und 68 % und damit nach Erfahrung der PTS im Bereich typischer Überschussschlämme aus Abwasserreinigungsanlagen in der Papierindustrie (Bakterien-Referenz-Schlamm: 43 %).

---

**Heizwert der ALBA-Schlämme** Die Heizwerte der ALBA-Schlämme lagen mit 8-12 MJ/kg höher als der Wert des Bakterien-Referenz-Schlammes von 7 MJ/kg (typische Werte für Überschussschlämme aus Abwasserreinigungsanlagen der Papierindustrie: 7-9 MJ/kg [18]).

---

**Algenanteil der Überschussschlämme** Die ALBA-Überschussschlämme enthielten zwischen 2% und 22% Algen, wobei die Schlämme aus den ersten Versuchen der PTS (1+2) nur sehr geringe Algenkonzentrationen aufwiesen, während spätere Laborversuche (7-9) mit 14-22 % und die Pilotanlage mit 15 % deutlich höhere Algen-Anteile aufwiesen. Die geringen Algenkonzentrationen in den ersten Schlammproben erklären sich aus den Betriebsbedingungen in AP2, die zu einer Verdrängung der Algen- durch Bakterienbiomasse führten (siehe Seite 2). Die höheren Werte in späteren Versuchen zeigen, dass es in AP4, AP5 und bei den Pilotversuchen in AP7 geglückt war, eine stabile ALBA-Biozönose aufzubauen.

**Zusammenfassung** Grundsätzlich können die ALBA-Schlämme auf dieselbe Weise entsorgt werden, wie herkömmliche Überschussschlämme. Eine Trennung von Algen- und Bakterien-Biomasse gestaltet sich schwierig. Die Literaturrecherche und die Untersuchungen zeigen, dass eine Trennung der erhaltenen gemischten ALBA-Biomasse gar nicht sinnvoll ist. Die gemischte Biomasse enthält auf der einen Seite nicht genügend Algen, um in die Algenzucht einzusteigen, andererseits erhöht der Algenanteil in der Biomasse den Energieinhalt der Biomasse erheblich, so dass eine energetische Nutzung der gemischten Biomasse ein deutlich besseres Energienutzungspotenzial aufweist als vergleichbare bakterielle Biomasse aus Belebtschlammanlagen. Den größten Vorteil bietet die Nutzung zur Biogasgewinnung durch Vergärung der ALBA-Biomasse.

---

## 6.6 AP7 - Pilotversuch

**Standort der Pilotanlage** Als Standort der Pilotanlage wurden zunächst zwei geeignete Papierfabriken ausgewählt: eine in Deutschland und eine in Slowenien. Da der slowenische Partner ICP-TCP die Pilotversuche betreuen sollte, wurde schließlich die Papierfabrik in Slowenien als Standort bestimmt.

---

**Lieferung von *Chlorella vulgaris* für das Animpfen** Zur Inokulation der Pilotanlage wurden für das erste Animpfen und mehrfach erneutes Animpfen nach Verschwinden der Algen aus dem System durch Abfraß durch Mückenlarven regelmäßig Algensuspension von TUHH zur Verfügung gestellt.

---

**Beratung während des Betriebs** Auf Grundlage der aus Arbeitspaket 4 gewonnenen Erkenntnisse diskutierten TUHH und PTS fortlaufend die Zwischenergebnisse des Betriebs der Pilotanlage mit ICP-TCP und CELABOR und beriet bei Betriebsproblemen sowie bei Änderung von Betriebsparametern.

---

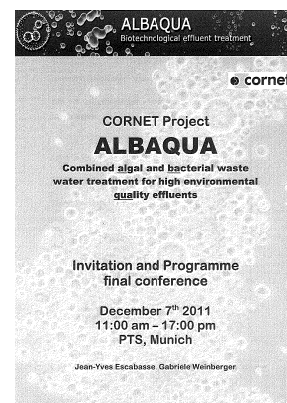
**Ergebnisse des Pilotversuchs** In den Pilotversuchen konnte gezeigt werden, dass das ALBA-Verfahren auch unter realen Bedingungen mit einem schwach belasteten Papierfabrikabwasser im Rahmen üblicher Schwankungen gut arbeitet. Der CSB-Abbau lag meist über 80 %. Der BSB des Ablaufs war fast bei allen Messungen unter der Nachweisgrenze von 5 mg/l. Flockenbildung, Integration der Algen in die Belebtschlammflocken und Sedimentationseigenschaften waren durchgängig gut. In den Sommermonaten gab es Probleme mit Abfraß der Algen durch Mückenlarven, was durch ein Insekenschutznetz verhindert werden konnte.

---

## 6.7 AP8 - Bewertung des Nutzens der Abwasserreinigung mit Algen- oder ALBA-Bioreaktoren

**Ziel** Ziel war, die Anwendbarkeit, die Vor- und Nachteile der untersuchten innovativen Verfahren zur Abwasserreinigung mit Algen, auch im Vergleich zum konventionellen Belebungsverfahren zu bewerten und zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich zu diskutieren.

**Durchführung** Dazu wurde im Rahmen der ALBAQUA final conference am 7. Dezember 2011 in der Forschungsstelle eine Diskussionsrunde gehalten, in der die im Ziel genannten Fragen mit den Projektpartnern und Fachleuten aus Forschung und Industrie diskutiert wurden. Insgesamt besuchten 35 Teilnehmer diese Veranstaltung und die Diskussion. Den Fachleuten aus der Industrie wurden in einem vorhergehenden Vortragsprogramm die Inhalte und Ergebnisse des Forschungsprojektes präsentiert.



### Fragen der Diskussionsteilnehmer

Die Fragen der Diskussionsteilnehmer sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die Lichtverfügbarkeit ist der limitierende Faktor. Auch wenn entsprechende Reaktorkonzepte entwickelt werden – ist das ein Ausschlusskriterium für die Verbreitung der Technologie in Orte „ungünstiger“ Lichtbedingungen? Großtechnische Anlagen sind bereits in Belgien in Betrieb.
- In der Papierindustrie geht die Entwicklung hin zu stärkerer Kreislaufwassereinnutzung mit der Folge von Aufkonzentrierungsprozessen. Kann hier die Algentechnologie zum Anaerobverfahren konkurrieren? Die Algentechnologie wird keine Alternative zu vorreinigenden Hochleistungsverfahren werden, nur in Ergänzung zu diesen, als Nachbehandlung.

### Einschätzungen/Meinungen der Diskussionsteilnehmer

Einschätzungen/Meinung der Diskussionsteilnehmer sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die Nutzung der symbiotischen Biomasse für die Energieerzeugung erscheint zu wenig attraktiv für industrielle Anwendungen, oder es muss noch sehr viel Entwicklungsarbeit in die bessere Aufbereitung der Biomasse gesteckt werden. Möglicherweise wäre eine Nutzung der Biomasse als Rohstoff für Produktentwicklungen wirtschaftlich attraktiver.
- Der Vorteil der Algentechnologie liegt in der verbesserten Eliminierbarkeit von Abwasserinhaltsstoffen wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen im Vergleich zu klassischen aeroben Behandlungsverfahren.
- In der Papierindustrie ist ein hohes Temperaturpotenzial gegeben, dieses sollte für die Temperierung von Algenverfahren genutzt werden, um den Einfluss kälterer Jahreszeiten auf die Betriebsstabilität zu eliminieren.
- In der Papierindustrie liegen sehr hohe Volumenströme vor. Sinnvoll wäre ggf. die Behandlung von Teilströmen, mit speziellen Eigenschaften, wie erhöhte Stickstoffgehalte, die vorteilhaft für die Algenbehandlung sind.
- Verfügbare Reaktortechnologien gibt es für die Herstellung hochwertiger Pro-

---

dukte, wie Biotreibstoffe oder Pharmazeutika. Die Investitionskosten für tubuläre Systeme sind im Moment für die Abwasserreinigung als Kostenverbraucher zu teuer. Solche sind derzeit ausschließlich für die Herstellung von Hochwertprodukten in der Anwendung.

---

**Fazit der Diskussion**

Zusammengefasst waren alle Teilnehmer der Meinung, dass es sich bei dem untersuchten Verfahren um eine vielversprechende Alternative zum klassischen Belebungsverfahren handelt, aber noch umfassender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine industrielle Umsetzung bedarf. Die Teilnehmer erbatene eine zeitnahe Information über die weiteren Forschungsaktivitäten an der Forschungsstelle.

---

## 6.8 AP9 - Ermittlung der Wirtschaftlichkeit

**Stand der Technik für Algenzucht: Raceway ponds**

Außer sehr einfacher Abwasserteiche mit langen hydraulischen Verweilzeiten existiert noch keine Technik für Abwasseranlagen mit Mikroalgen-Bakterien-Biozönosen. In 98 % der kommerziellen Mikroalgen-Produktionsanlagen werden sogenannte Raceway Ponds (Fließkanäle, auch HRAPs - High Rate Algal Ponds genannt) verwendet, die mit Schaufelrädern („paddle wheels“) umgewälzt werden [19]. Diese Technik müsste auch für die Abwasserreinigung mit ALBA-Flocken geeignet sein und wurde deshalb in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kalkuliert.

---

**Aufbau der ALBA- bzw. Algen-Anlage**

Literaturstellen zu existierenden Raceway ponds für Forschung oder Produktion geben meist Wassertiefen von 0,3 m an [20, 21, 22]. Die Raceway ponds für die Abwasserreinigung mit symbiotischer ALBA-Biomasse bzw. nur Algenbiomasse wurden mit einer Wassertiefe von 0,3 m kalkuliert. Zusätzlich wurden Szenarien mit Wassertiefen von 0,5 m und 1,0 m kalkuliert, da angenommen wird, dass die verfahrenstechnische Entwicklung Potenzial für tiefere Reaktoren gibt, um den Landverbrauch zu verringern und die Investitionskosten zu senken.

Auf Grund der Erfahrung aus den Pilotversuchen in AP7 - durch Kontamination mit Mückenlarven werden Algen von diesen gefressen und verschwinden aus dem System - wurde kalkuliert, die Raceway Ponds mit einem Insektenschutznetz zu überspannen.

Des Weiteren wurde angenommen, dass für die Raceway Ponds in der Nähe des Papierfabrikstandortes Ackerfläche angekauft wird. Für das konventionelle Belebtschlammverfahren wurden keine Grundstückskosten einkalkuliert, da davon ausgegangen wurde, dass sich dieses System auf dem Grundstück der Papierfabrik unterbringen lässt.

---

**Vergleich mit einstufiger Belegung**

Zum Vergleich wurde die Abwasserreinigung mit einer konventionellen einstufigen Belegung mit 4 m Wassertiefe kalkuliert.

---

**Zu Grunde gelegte Daten Beispiel-Papierfabrik**

Als Beispiel wurde für die Kalkulation eine Papierfabrik mit einer Produktion von 80.000 t/a und einem Abwasseraufkommen von 12 l/kg gewählt. Als CSB wurde ein mittlerer Wert von 400 mg/l und als BSB<sub>5</sub> ein mittlerer Wert von 150 mg/l angenommen.

---

**Investitionskosten**

Die Investitionskostenberechnung (Tabelle 7) ergibt etwa gleich hohe Investitions-

---

**tenvergleich AL-BA und konventionelles Belebtschlammverfahren**

kosten für das konventionelle Belebtschlammverfahren wie für das ALBA-Verfahren bei einer Reaktortiefe von 1,0 m. Für Reaktortiefen von 0,5 m und 0,3 m liegen sie um 50 % bzw. 100 % höher und damit deutlich darüber.

Tabelle 7: Investitionskosten für das Belebtschlammverfahren sowie das ALBA-System bei Reaktortiefen von 0,3 m, 0,5 m, 1,0 m.

| System       | Activated sludge | ALBA 0.3 m         | ALBA 0.5 m       | ALBA 1.0 m       |
|--------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|
| <b>Total</b> | <b>570,000 €</b> | <b>1,200,000 €</b> | <b>860,000 €</b> | <b>580,000 €</b> |

**Investitionskosten Algen-System**

Beim reinen Algen-Verfahren ist mit deutlich höheren Investitionskosten zu rechnen, da auf Grund der geringen Schlammkonzentration und Schlammbelastung im Vergleich zum ALBA-System doppelt so großen Reaktorvolumina zu rechnen ist. Dies schlägt sich jeweils in fast doppelt so hohen Investitionskosten für die Reaktortiefen von 0,3 m, 0,5 m und 1,0 m im Vergleich zum ALBA-System nieder. Tabelle 8 zeigt die Kosten für die Gesamtinvestitionen.

Tabelle 8: Investitionskosten für das Belebtschlammverfahren sowie das reine Algen-System bei Reaktortiefen von 0,3 m, 0,5 m, 1,0 m.

| Konzept       | Belebtschlamm    | nur Algen 0,3 m    | nur Algen 0,5 m    | nur Algen 1,0 m    |
|---------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Gesamt</b> | <b>570.000 €</b> | <b>2.100.000 €</b> | <b>1.600.000 €</b> | <b>1.000.000 €</b> |

**Betriebskostenvergleich ALBA- und konventionelles Belebtschlamm-system**

Tabelle 9: Betriebskosten für das Belebtschlammverfahren sowie das ALBA-System bei Reaktortiefen von 0,3 m, 0,5 m, 1,0 m.

| System     |                | Activated Sludge | ALBA 0.3 m     | ALBA 0.5 m     | ALBA 1.0 m     |
|------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
|            |                | [€/a]            | [€/a]          | [€/a]          | [€/a]          |
| <b>Sum</b> | <b>[€/ m³]</b> | <b>164,000</b>   | <b>225,000</b> | <b>173,000</b> | <b>135,000</b> |
|            |                | <b>0.17</b>      | <b>0.23</b>    | <b>0.18</b>    | <b>0.14</b>    |

Sieht man sich die reinen Betriebskosten an, so wird deutlich, dass das ALBA-System auch bei einer Wassertiefe von 0,3 m konkurrenzfähig ist.

**Betriebskosten inklusive Abschreibung und Verzinsung Algen-System**

Auf Grund der deutlich höheren Investitionskosten ist das reine Algen-System nicht rentabel, da die Betriebskosten inklusive Abschreibung und Verzinsung auch bei einer Wassertiefe von 1,0 m noch deutlich höher liegen als beim konventionellen Belebtschlamm-system.



---

**Schlussfolgerung** Das ALBA-Verfahren ist ein vielversprechendes Verfahren, das wegen der Betriebskosteneinsparungen durch den deutlich geringeren Energieverbrauch und niedrigere Kosten für die Schlamm Entsorgung interessant ist. Die Abwasserreinigung nur mit Algen ist auf Grund der höheren Betriebs- und deutlich höheren Investitionskosten bisher nicht interessant.

Auf Grund des hohen Landverbrauchs und der hohen Investitionskosten bei niedrigen Wasserständen wird empfohlen, dass Fließkanal-Systeme mit Wassertiefen um 1 m oder Alternativen zu den High-Rate-Algal-Ponds entwickelt werden. Außerdem sollte untersucht werden, ob das Kontaminierungsproblem durch geeignete Betriebsparameter oder Verfahrensführung gelöst werden kann, um die Investitions- und Wartungskosten für das Insektenschutznetz einzusparen.

## 7 Transfer der Forschungsergebnisse und Chancen für industrielles Scale-up nach Projektende

**Wirtschaftliche/technische Erfolgsaussichten** Die Forschungsstellen und ihre Partner sehen in der untersuchten Technologie des Forschungsprojektes große wirtschaftliche und technische Erfolgsaussichten. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Technologie anwendbar, applizierbar ist und Potenzial für ökonomischen und ökologischen Einsatz hat. Sobald die derzeit noch auftretenden Betriebsempfindlichkeiten beseitigt werden können, und Konzepte für einen wirtschaftlichen Betrieb des Verfahrens entwickelt wurden, ist mit einem raschen Einzug der Technologie in die industrielle und kommunale Abwasserreinigung zu rechnen.

---

**Zeithorizont** Mit der Umsetzung der Technologie ist kurzfristig noch nicht zu rechnen, da bislang noch keine geeigneten Reaktortechnologien für das Verfahren auf dem Markt verfügbar sind. Sobald hier durch weitere Forschung geeignete Reaktoren vorhanden sind, die den wirtschaftlichen und räumlichen Anforderungen in verschiedenen Industrieregionen Rechnung tragen, ist mit einem zügigen Einsatz der Technologie im industriellen Maßstab zu rechnen. Die dazu veranschlagende Zeitspanne ist derzeit schwer abschätzbar, da die Forschung in diesem Fachgebiet aktuell erst richtig in Bewegung kommt. Ein realistischer Zeithorizont für die ersten technischen Umsetzungen wäre mit 3 – 5 Jahren anzunehmen.

---

**Einschätzung der  
Finanzierbarkeit  
einer anschlie-  
ßenden industriellen  
Umsetzung**

Bereits im Absatz Zeithorizont wurde beschrieben, dass die Forschungsstellen davon ausgehen, dass innerhalb von 3 – 5 Jahren eine technische Umsetzung der Technologie realistisch erscheint. Hauptbedingung dafür ist, Reaktorkonzepte zu finden, mit denen die wirtschaftliche Anwendung gewährleistet wird. Aus den Wirtschaftlichkeitsberechnungen in Arbeitspaket 9 (siehe Seite 3) ergeben sich - würde man die derzeitigen Betriebswerte anwenden, d.h. Betrieb von Bioreaktoren mit einer Tiefe von 0,3 m - deutlich erhöhte Betriebs- und Investitionskosten (0,23 €/m<sup>3</sup> bei 1.2 Mio. € Investitionskosten) gegenüber dem klassischen Belebtschlammverfahren (0,17 €/m<sup>3</sup> bei 570.000 € Investitionskosten). Gelingt es aber, die Reaktortiefe anhand der Funktion Lichtmenge in Abhängigkeit der Sauerstofferzeugung zu beeinflussen, könnte bereits unter diesem Szenario eine wirtschaftliche Betriebsweise (z. B. mit Reaktoren von 1,0 m Beckentiefe) erreicht werden. Dann lägen die Investitionskosten vergleichbar denen des klassischen Belebungsverfahrens und die Betriebskosten wären mit 0,14 €/m<sup>3</sup> deutlich geringer. Anlagen für Hochwertprodukte sind bereits verfügbar, für die Zwecke der Abwasserreinigung aber nicht finanzierbar. Eine Finanzierbarkeit wäre auch dann gegeben, wenn es gelänge, solche Anlagen durch Verwendung kostengünstigerer Baustoffe oder durch andere Bauart hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten zu vermindern, bis diese vergleichbar oder niedriger den derzeitigen lägen.

Die Finanzierbarkeit der industriellen Umsetzung steht und fällt damit mit der Entwicklung von wirtschaftlich arbeitenden Reaktoren und Verfahrenskonzepten. Sobald diese vorhanden sind und stabile Betriebsbedingungen eingestellt werden können ist auch die Finanzierbarkeit der industriellen Umsetzung des Verfahrens gegeben.

---

**Weiterentwicklungen Reaktoren/Messtechnik/Technologie**

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass das vorgestellte Abwasserreinigungsverfahren mittels symbiotischer, flockenbasierter Algen-Bakterien-Biomasse technisch anwendbar ist und zu industriell nutzbaren Ergebnissen führt. Zusätzlich lassen sich interessante Teilaspekte ökologischer und ökonomischer Natur nutzen, um die Abwasserreinigungskosten zu senken und sich umwelttechnologischen Zielen von Seiten der Gesetzgebung zu nähern. Bis dieses Verfahren aber eine industrielle Reife erreicht, sollten verschiedene Optimierungen/Weiterentwicklungen erreicht werden:

- Bereits mehrfach angesprochen, die Entwicklung wirtschaftlich einsetzbarer Reaktoren/Konzepte. Dies kann durch Verbesserung der Ausnutzung regelbarer Parameter wie der Beleuchtungsstärke erfolgen oder durch Konzeption alternativer, kostengünstiger Reaktorbauweisen.
- Für die Bewertung des stabilen Anlagenbetriebs gibt es derzeit noch keine einfache Betriebsanalytik, die Anlagenbetreibern zur Dokumentation des Betriebszustandes solcher symbiotischer, flockenbasierter Algen-Bakterien-Biomasse-Verfahren an die Hand gegeben werden könnte. Hier ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten, die sich insbesondere auf die Identifizierung und Quantifizierung der Algenbestandteile in der Biomasse bezieht.

### Ausblick

Das untersuchte Verfahren der Abwasserreinigung mittels symbiotischer, flocken-basierter Algen-Bakterien-Biomasse ist technisch umsetzbar und zeigt ökonomische und ökologische Vorteile, wenn es gelingt, durch Optimierung von Betriebs- und/oder Anlagenparametern die Betriebs- und Investitionskosten auf gleiche oder geringere Beträge als beim bisherigen Referenzverfahren der klassischen Belebtschlammanlagen zu senken. Die Forschungsstellen und ihre Partner halten dies für realistisch und mittelfristig umsetzbar. Dies wird auch durch die derzeit spürbare Intensivierung der Forschungsaktivitäten europa- und weltweit deutlich.

### Umsatzpotential

In der Papier- und Nahrungsmittelindustrie arbeiten in Europa mehr als 1,2 Mio. Unternehmen, die mehr als 19 Mio. Menschen beschäftigen und einen Umsatz von mehr als 3,6 Billionen EUR in 2007 erwirtschafteten [23]. Zu diesen Unternehmen gehören auch sehr viele KMUs. Die Forschungsstellen erwarten einen anfänglichen Deckungsanteil von 0.5 % in diesem Bereich, da viele dieser Unternehmen auch eine Abwasserreinigung betreiben müssen. Damit könnten etwa 5.000 Unternehmen mit den Projektergebnissen adressiert werden.

Tabelle 10: Umsatz und Beschäftigung in der EU-27 in verschiedenen Industriebereichen [23]

| Industriebereich                    | Unternehmen  | KMUs         | Umsatz         | Beschäftigung |
|-------------------------------------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| EU-27, 2007                         | (1000)       | (1000)       | (EUR billion)  | (1000)        |
| Nahrung & Getränke                  | 301.3        | 298.6        | 934.5          | 4,647         |
| Textil & Leder                      | 261.6        | 260.3        | 250.3          | 2,838         |
| Papierindustrie                     | 19.2         | 18.6         | 170.0          | 696           |
| Chemie & Faserstoffe                | 33.6         | 32.2         | 745.7          | 1,861         |
| Gummi & Kunststoffe                 | 66.1         | 65.1         | 291.2          | 1,776         |
| Andere nicht metallische Mineralien | 106.1        | 105.1        | 261.3          | 1,602         |
| Maschinen & Ausrüstung              | 176.9        | 174.6        | 687.0          | 3,757         |
| <b>Total</b>                        | <b>964.8</b> | <b>954.5</b> | <b>3,340.0</b> | <b>17,177</b> |

**Umsatzpotential  
der Anwender-  
branchen**

Europa spielt in der globalen Papierindustrie eine dominierende Rolle. Dabei ist Deutschland der viertgrößte Produzent und Verbraucher von Papier, nach China, Nordamerika und Japan. In der EU werden aktuell etwa 82 Millionen t Papier und Karton produziert. Die Papierindustrie ist ein starker Verbraucher von natürlichen Ressourcen wie Wasser und Energie, letztere aus fossilen Quellen. Der Energiebedarf hat sich seit 2005 bei etwa 3000 kWh pro Tonne Produkt eingependelt[24]. Eine Umfrage in der deutschen Papierindustrie von 2010 [25] zeigt eine mittlere spezifische Abwassermenge über alle Produktionsgruppen von 10.7 l/kg Produkt über die Bruttoproduktionskapazität. Dieselbe Umfrage zeigt, dass fast 90% der Papierfabriken eine biologische Abwasserreinigungsanlage betreiben oder betreiben lassen. Dominierende Technologie hier ist das konventionelle Belebtschlammverfahren, welches häufig mit anaeroben oder aeroben Hochlastverfahren als Vorbehandlungsstufe kombiniert ist.

In Deutschland sind die Industriebereiche, die durch das im Projekt untersuchte Verfahren der Abwasserreinigung mittels symbiotischer, flockenbasierter Algen-Bakterien-Biomasse tangiert werden Abwasserreinigungsanlagen in der Papierindustrie und von Biogasanlagen (Tabelle 11) Die Forschungsstellen erwarten ein Anwendungspotenzial von 10 % in der Papierindustrie und von 5 % in Biogasanlagen, das bedeutet eine anfängliche Anwendung in über 300 Unternehmen nach Etablierung eines wirtschaftlich stabil arbeitenden Verfahrens.

Tabelle 11: Umsatzpotential in Deutschland (Zahlen aus 2008)

| Industriebereich         | Unternehmen<br>(1000) | KMUs<br>(1000)      | Umsatz<br>(EUR billion)                  | Beschäftigte<br>(1000) |  |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|--|------------------------|--|
| <b>Deutschland, 2008</b> |                       |                     |  |                        |  |
| Papierindustrie          | 0,177                 |                     | 14,80                                    | 43,40                  |  |
| Biogasanlagen            | 6,00                  | 5,95                | 4,70                                     | 19,00                  |  |
| <b>Total</b>             | <b>6,18</b>           | <b>5,95</b>         | <b>19,50</b>                             | <b>62,40</b>           |  |
| Industriebereich         | Unternehmen           | erwartete Anwendung | entsprechende Anwendungen in Unternehmen | Produktion             | Produktion der Unternehmen mit Anwendungspotenzial |
|                          |                       | %                   |  | 1000 t                 | 1000 t   |
| <b>Deutschl., 2008</b>   |                       |                     |  |                        |  |
| Papierindustrie          | 177                   | 10                  | 18                                       | 22828                  | 2283   |
| Biogasanlagen            | 6000                  | 5                   | 300                                      |                        |  |
| <b>Total</b>             | <b>6177</b>           |                     | <b>318</b>                               |                        | <b>2283</b>  |

## 8 Schlussfolgerungen

### Resümee

Das Forschungsziel Entwicklung eines Verfahrens zur Reinigung von Papierfabrikabwässern mit Hilfe von ALBA-Biomasse wurde erreicht.

Das ALBA-Verfahren kann für die Reinigung von Abwässern der Papierfabrikation mit CSB-Konzentrationen bis zu 800 mg/l (1000 mg/l) stabil angewendet werden. Eine Belüftung ist nicht notwendig, eine Umwälzung aber erforderlich. Durch dieses Verfahren ergibt sich eine deutliche Energieeinsparung beim ALBA- System gegenüber dem Belebtschlammverfahren. Außerdem werden durch geringere Produktion von Überschussschlamm Kosten für die Schlammentsorgung eingespart. Mit der ersten Umsetzung des ALBA-Verfahrens zur Reinigung von Papierfabrikabwässern im Pilotmaßstab wurde der erste große Schritt hin zur Implementierung in großtechnischen Abwasserreinigungsanlagen der Industrie getan.

Im Vergleich zum Stand der Technik vor Projektbeginn sind nun die ersten Auslegungs- und Betriebsdaten für das ALBA-Verfahren bekannt. Die Eignung von *Chlorella vulgaris* für das Verfahren konnte bestätigt werden. Weitere Algenspezies wurden gefunden, die für die Abwasserreinigung geeignet erscheinen (siehe AP1) oder sein könnten (isolierte Algen aus AP4).

Die vorliegenden Forschungsergebnisse bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung des Verfahrens. Die Ergebnisse können für die Auslegung größerer Pilotanlagen und erster großtechnischer Umsetzungen in Abwasserreinigungsanlagen der Papierindustrie verwendet werden. Außerdem dienen sie als Anhaltspunkt für die Umsetzung des Verfahrens in weiteren Industriebranchen und in der kommunalen Abwasserreinigung, wie sie bereits in einem neuen Forschungsprojekt beantragt ist. Die in AP1 als geeignet gefundenen Algenspezies sowie die in AP4 isolierten Algenspezies sollten in dem neu beantragten Forschungsprojekt auf ihr Verhalten im ALBA-Verfahren untersucht werden.

KmU profitieren von den Forschungsergebnissen für künftige Produktentwicklungen in diesem sich ausbauenden Themensegment. Hier ist insbesondere die dringend notwendige Entwicklung geeigneter Reaktoren mit geringerem Landverbrauch und geeigneten Mischsystemen durch Maschinen- und Anlagenbauer zu nennen. Biotechnologie-Unternehmen und Messgerätehersteller können geeignete Analysemethoden und Messgeräte für die Überwachung des ALBA-Systems entwickeln. Aber auch Ingenieurbüros profitieren von den Forschungsergebnissen für ihre zukünftige Planung und Beratung von Abwasserreinigungsanlagen. Kleine und mittlere Industrieunternehmen können bei zukünftiger Umsetzung des Verfahrens einen Teil der hohen Kosten für die Abwasserreinigung einsparen.

---

**Ansprechpartner für weitere Informationen:**

Gabriele Weinberger  
Tel. 089 / 12146-463  
[Gabriele.Weinberger@ptspaper.de](mailto:Gabriele.Weinberger@ptspaper.de)

Prof. Dr. Uwe Neis, Prof. Dr.-Ing. Ralf Otterpohl  
Tel. 040 / 325 07 203  
[neis@tuhh.de](mailto:neis@tuhh.de)

Papiertechnische Stiftung PTS  
Papiertechnisches Institut PTI  
Heißstraße 134  
80797 München  
Tel. (089) 1 21 46-0  
Fax (089) 1 21 46-36  
e-Mail: [info@ptspaper.de](mailto:info@ptspaper.de)  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)  
Institut für Abwasserwirtschaft  
Eissendorfer Straße 42  
21073 Hamburg  
Tel. 040 / 325 07 - 0  
Fax 040 / 325 07 204

## Glossar

|         |   |
|---------|---|
| AiF     | Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung |
| ALBA    | Algen-Bakterien                             |
| AP      | Arbeitspaket                                |
| BSB     | Biologischer Sauerstoff-Bedarf              |
| Chl a+b | Chlorophyll a+b                             |
| CPF     | Cluster Papierforschung                     |
| CSB     | Chemischer Sauerstoff-Bedarf                |
| DOC     | Gelöster organischer Kohlenstoff            |
| FS      | Fachseminar                                 |
| FST     | Forschungsstelle                            |
| FuE     | Forschung und Entwicklung                   |
| FV      | Forschungsvereinigung                       |
| GV      | Glühverlust                                 |
| HRAP    | High Rate Algal Pond                        |
| HRT     | Hydraulische Verweilzeit                    |
| ICP-TCP | Institut za celulozo in papir               |
| ISV     | Schlammvolumenindex                         |
| KC      | Kessler & Czygan Medium                     |
| KCY     | KC plus Pepton, Hefeextrakt und Harnstoff   |
| kmU     | Kleine und mittlere Unternehmen             |
| LCA     | Life Cycle Analysis (dt.: Ökobilanz)        |
| N       | Stickstoff                                  |
| P       | Phosphor                                    |
| PAW     | Papierfabrikabwasser                        |
| PBA     | Projektbegleitender Ausschuss               |
| PBR     | Photobioreaktor                             |
| PRI     | Paper Research Institute                    |
| PTS     | Papiertechnische Stiftung                   |
| SAW     | Synthetisches Abwasser                      |
| SBR     | Sequencing Batch Reactor                    |
| SRT     | Schlammalter                                |
| TN      | Gesamtstickstoff                            |
| TNb     | Gebundener Stickstoff                       |
| TOC     | Gesamter organischer Kohlenstoff            |
| TS      | Trockenrückstand                            |
| TUHH    | Technische Universität Hamburg-Harburg      |

## Literaturverzeichnis

- 1 Oswald W. J. (2003). My sixty years in applied algology. *Journal of Applied Phycology* , 99-106
- 2 Shi,J., Podola, B., and Melkonian, M. (2007), Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater using microalgae immobilized on twin layers: an experimental study, *Journal of Applied Phycology*, 19(5), 417-423
- 3 Kryder, L. (2007) *Microalgae for Wastewater Treatment and Reuse*, Water Reuse
- 4 Rodriguez, M. (2006) *Floc formation in wastewater treatment systems using algae bacterial symbiosis*, Gesellschaft zur Förderung und Entwicklung der Umwelttechnologien an der Technische Universität Hamburg-Harburg e. V. , Hamburg
- 5 Sekoulov, I. (1972) *Die Phosphorelimination mit Hilfe von kontinuierlich belichteten Blaualgen*. Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e. V. in Stuttgart, Stuttgart
- 6 De la Noüe, J., Laliberté, G. and Proulx, D. (1992) *Algae and wastewater*, *Journal of Applied Phycology*, 4, 247-254
- 7 Schumacher, G. (2002) *Beitrag zum Einsatz von Algenbiofilmen in der Abwasserreinigung* Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg
- 8 Groenlund, E., Klang, A., Falk, S., and HanAeus, J. (2004) Sustainability of wastewater treatment with microalgae in cold climate, evaluated with energy and socio-ecological principles, *Ecological Engineering*, 22(3), 155-174
- 9 Richmond A, 2004. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Oxford: Blackwell Science.
- 10 Uduman N, Qi Y, Danquah MK, Forde GM, Hoadley A, 2010. Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of Renewable Sustainable Energy*, doi: 10.1036/1.3294480.
- 11 Gutzeit G, 2006. *Symbiotische Algen-Bakterien-Biomasse: Entwicklung eines neuen Abwasserreinigungsverfahrens für Länder mit hoher Sonneneinstrahlung*. Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, TU Hamburg, 53.
- 12 Van Den Hende S, Vervaeren H, Desmet S, Boon N, 2011a. Bioflocculation of microalgae and bacteria combined with flue gas to improve sewage treatment. *New Biotechnology*, doi:10.1016/j.nbt.2011.04.009.
- 13 Medina-Rodriguez L M, 2006. *Floc formation in wastewater treatment systems using algal bacterial symbiosis*. Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, TUHH Hamburg, 59. ISBN 978-3-930400-94-2.
- 14 Medina M, Neis U, 2007. Symbiotic algal bacterial wastewater treatment: Effect of food to microorganism ratio and hydraulic retention time on the process performance. *Water Science and Technology* 55, 165–171.
- 15 Van Den Hende S, Vervaeren H, Saveyn H, Maes G, Boon N, 2011b. Microalgal bacterial floc properties are improved by a balanced inorganic/organic carbon ratio. *Biotechnology and Bioengineering* 108, 549-558.
- 16 Barnes, J.D.; Balaguer, L.; Manrique, E.; Elvira, S.; Davison, A.W. 1992. "A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants". *Environmental and Experimental Botany*,32: 85-100.
- 17 Yusuf Chisti, *Biodiesel from microalgae New Zealand : Biotechnology Advances* 25 (2007) 294–306, Februar 2007



- 18 Hamm, U. (2000) Final fate of waste from recovered paper processing and nonrecycled paper products, in: Göttschling, L. und Pakarinen, H. (Hrsg.) Papermaking Science and Technology Book 7 Recycled Fiber and Deinking, Fapet Oy, Helsinki
- 19 <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/benemann.pdf>
- 20 Weissman&Goebel, 1987, Design and Analysis of Microalgal Open Pond Systems for the Purpose of Producing Fuels, <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/2840.pdf>
- 21 Norsker, Niels-Henrik, Microalgal production – A close look at the economics, Biotechnology Advances 29, p. 24-27, 2011
- 22 Yan Li u. a., Utilization of carbon dioxide from coal-fired power plant for the production of value-added products, 2006, submitted in partial fulfillment of the requirements for the Design Engineering of Energy and Geo-Environmental Systems Course (EGEE 580)
- 23 EUROSTAT Pocketbooks. Key figures on European business. 2010 edition. ISSN 1830-9720
- 24 VDP – Das Papier – ein Leistungsbericht, 2011
- 25 H. Jung, J. Kappen, A. Hesse, B. Götz. Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie – Ergebnisse der Wasserumfrage 2010. Veröffentlichung in wfp in Vorbereitung



## Anhang 1 Beteiligte Forschungsinstitute

| Deutschland                         | Forschungsstelle 1 (FST1)   | Forschungsstelle 2 (FST2)  |
|-------------------------------------|---|--|
| <b>Name des Forschungsinstituts</b> | Papiertechnische Stiftung<br>Papiertechnisches Institut – PTS-PTI,<br>München | Technische Universität Hamburg-<br>Harburg (TUHH)<br>Institut für Abwasserwirtschaft |
| <b>Adresse</b>                      | Heßstr. 134<br>80797 München  | Eissendorfer Straße 42<br>21073 Hamburg  |
| <b>Leiter der Forschungsstelle</b>  | Dr. F. Miletzky   | Prof. Dr.-Ing. Ralf Otterpohl  |
| <b>Projektleiter</b>                | Dipl.-Ing. (FH) Gabriele Weinberger   | Prof. Dr.-Ing. U. Neis   |

| Ungarn                              | Forschungsinstitut              |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Name des Forschungsinstituts</b> | Paper research institute (PRI)  |
| <b>Adresse</b>                      | H-9400 Sopron, Bajcsy-Zs. u. 4. |
| <b>Leiter der Forschungsstelle</b>  | Mr. István Lele                 |
| <b>Projektleiter</b>                | Mr. Pál Gere                    |

| Slovenien                           | Forschungsinstitut                     |
|-------------------------------------|--|
| <b>Name des Forschungsinstituts</b> | Institut za celulozo in papir (ICP)    |
| <b>Adresse</b>                      | 1000 LJUBLJANA, BOGIŠIČEVA 8, Slovenia |
| <b>Leiter der Forschungsstelle</b>  | Dr. Bogomil Breznik                    |
| <b>Projektleiter</b>                | Ms. Janja Zule                         |

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Belgien / Wallonien</b>          | <b>Forschungsinstitut</b>               |
| <b>Name des Forschungsinstituts</b> | CELABOR                                 |
| <b>Adresse</b>                      | 4650 HERVE, Avenue du Parc, 38, Belgium |
| <b>Leiter der Forschungsstelle</b>  | Mr. Pierre Lefebvre                     |
| <b>Projektleiter</b>                | Mr. Quentin Thiebaut                    |