

# Symbiotische Algen-Bakterien-Biomasse: Entwicklung eines neuen Abwasserreinigungsverfahrens für Länder mit hoher Sonneneinstrahlung

Gunar Gutzeit (Freyburg) und Uwe Neis (Hamburg)

## Zusammenfassung

*Im vorliegenden Artikel wird die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur biologischen Behandlung von Abwasser speziell für Länder des Südens vorgestellt. Der Ansatz beruht auf der Ausnutzung der symbiotischen Wechselwirkungen zwischen Algen und Bakterien und stellt demnach eine Weiterentwicklung der bekannten Abwasserteiche dar. Es ist gelungen an der TU Hamburg-Harburg gelungen, stabile und sedimentationsfähige Aggregate aus Mikroalgen und Abwasserbakterien zu entwickeln und verfahrenstechnisch in eine Abwasserreinigungsanlage zu implementieren (Labor- und Pilotmaßstab). In der „symbiotischen Algen-Bakterien-Biomasse“ produzieren Algen den für die auto- und heterotrophen Bakterien notwendigen Sauerstoff. Neben einer weitgehenden Kohlenstoffentfernung wurden in unseren künstlich bestrahlten Anlagen - ohne Bereitstellung einer technischen Belüftung - folgende spezifischen Abbauleistungen erzielt:  $10 \text{ gN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  und ca.  $0,9 \text{ gP m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Die Ergebnisse sind Erfolg versprechend und dokumentieren die prinzipielle Eignung symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse zur Abwasserreinigung in den relevanten Anwendungsgebieten zwischen 35. nördlichem und südlichem Breitengrad.*

*Schlagwörter: biologische Abwasserreinigung, Abwasserteiche, Symbiotische Algen-Bakterien-Biomasse, Länder des Südens*

## Abstract

### **Symbiotic algae-bacteria biomass – a novel technology for wastewater treatment in regions with high solar radiation**

*An innovative technology is presented for the biological treatment of wastewater in regions with sufficient solar radiation based on the simultaneous growth and degradation processes of algal and bacterial biomass. Aim of the work is the improvement of pond technology through the formation of stable algae-bacteria aggregates, which a) permit a simple separation of the algal biomass by gravity sedimentation, b) enable a high removal efficiency for organic carbon and nutrients, and c) are independent in terms of oxygen provision through algal photosynthesis. At the Technical University Hamburg-Harburg algae-bacteria aggregates could be developed with a suitable algal species as “model organism” in a wastewater environment. The morphology of symbiotic algal-bacterial aggregates is similar to activated sludge flocs. They are stable and settle quickly. Results of our experiments with an artificially irradiated lab as well as pilot-scale system, operated in continuous flow mode, revealed that even at a relatively short hydraulic detention time of 2 days a high elimination capacity of  $10 \text{ gN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  and  $0.9 \text{ gP m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  can be achieved.*

*Key words: biological wastewater treatment, pond technology, symbiotic algal-bacterial biomass, developing countries*

## 1 Einleitung

Algen bedeuten im Zusammenhang mit der biologischen Abwasserreinigung im mitteleuropäischen Kontext zumeist Betriebsprobleme, und zwar als Sekundärverschmutzung in Form von sich ablösenden sessilen Algen in offenen Ablaufgerinnen größerer Kläranlagen oder in Form von suspendierter Biomasse in Abwasserteichanlagen. In den sonnenreichen Regionen der Länder des Südens hingegen besitzen vor allem Grünalgen und Blaualgen (Cyanobakterien) ein hohes Potenzial zur biochemischen Produktion von Sauerstoff, der für den aeroben Abbauprozess heterotropher und autotropher Bakterien bei der

Abwasserreinigung benötigt wird [2]. Das Potenzial der Algen zur Abwasserreinigung beruht jedoch nicht nur auf der Produktion von Sauerstoff mittels Photosynthese, sondern auf verschiedenen biochemischen und auch physikalischen Prozessen, wie die Aufnahme organischer Verbindungen (mixotrophes Wachstum) und die Aufnahme von Stickstoff und Phosphor in die Algenzellen [3].

Im Folgenden wird ein am Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz der TU Hamburg-Harburg verfolgter innovativer Ansatz zur Entwicklung eines neuartigen Verfahrens für die biologische Behandlung von Abwasser speziell für Länder des Südens vorgestellt, der auf der Ausnutzung der symbiotischen Wechselwirkungen zwischen Algen und Bakterien beruht [4]. Wesentliches Merkmal des Verfahrens ist die Bereitstellung des von den Abwasserbakterien benötigten Sauerstoffs durch Algenphotosynthese und der vollständige Verzicht auf technische Belüftungsaggregate (vgl. Abbildung 1).

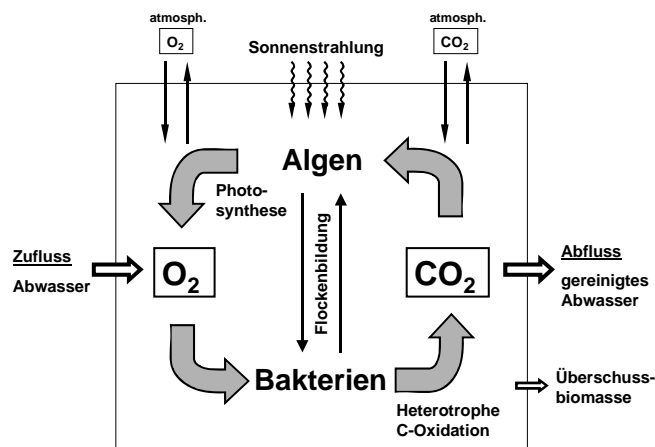


Abbildung 1: Prinzipdarstellung des Systems mit symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse

Ziel ist es,

- stabile und sedimentierbare Algen-Bakterien-Aggregate zu entwickeln, in welche die sonst nur schlecht sedimentierbaren Algen eingebunden sind,
- eine dauerhafte symbiotische Beziehung zwischen Algen und Bakterien zu erreichen, wobei die Algen durch Photosynthese den Sauerstoff für die Bakterienbiomasse bereitstellen und
- das Anwendungspotenzial eines Abwasserreinigungsverfahrens mit symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse in den Ländern des Südens, insbesondere im Hinblick auf die Prozessstabilität und die Elimination von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor sowie pathogener Keime zu ermitteln.

## 2 Experimentelle Untersuchungen

### 2.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen des Algen-Bakterien-Systems wurden im Labor- und halbtechnischen Maßstab durchgeführt (siehe Abbildung 2). Die 3-straßige Laboranlage bestand aus kubischen Becken mit einer maximalen Wassertiefe von 0,3 m. Diese Becken konnten sowohl im SBR-Modus, als auch kontinuierlich durchflossen betrieben werden. Eine permanente Umwälzung dieser Reaktoren erfolgte mittels vertikal angeordneten Rührwerken. Je zwei zeitgesteuerte Metall-Halogendampf-Lampen, die eine maximale photosynthetisch aktive Strahlung (PAR-Wert) von  $2.000 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  an der Wasseroberfläche erzeugten, wurden zur Bestrahlung verwendet. Dieser PAR-Wert korrespondiert mit der Quantenflussdichte zur Mittagszeit an einem wolkenlosen Frühjahrs-

oder Spätsommertag in Norddeutschland. Die Pilotanlage im halbtechnischen Maßstab mit einer maximalen Wassertiefe von 0,5 m wurde im kontinuierlich durchflossenen Modus betrieben. Die Beleuchtungseinheit bestand aus 6 Metall-Halogendampf-Lampen, deren Intensität (PAR-Wert) aufgrund des konstruktionsbedingten großen Abstands zwischen Lampe und Wasseroberfläche jedoch lediglich  $500 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  betrug. Tracerversuchen zufolge können sowohl die Laborreaktoren als auch die Pilotanlage als vollständig durchmischte Reaktoren angesehen werden.

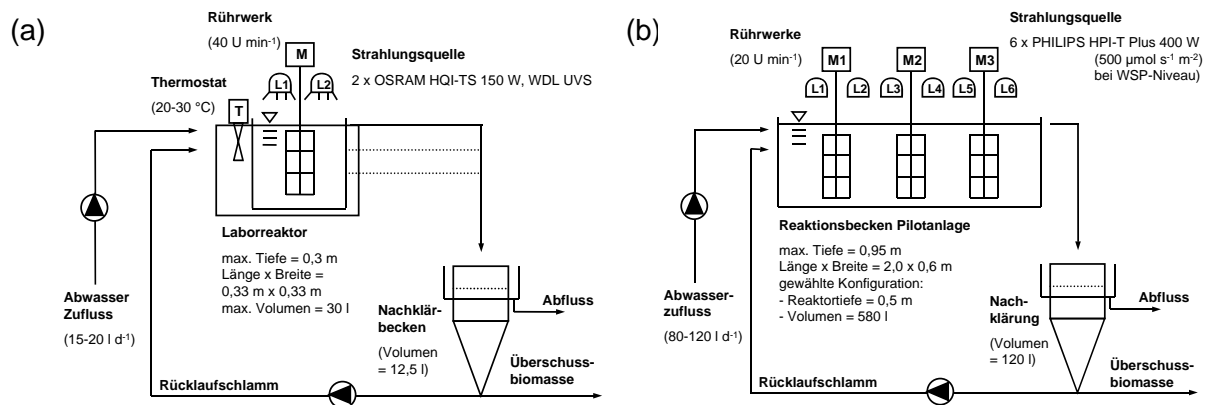


Abbildung 2: Versuchsanlagen im Labormaßstab (a) und im halbtechnischen Maßstab (b)

Als Abwassermedien wurden synthetisches Abwasser, modifiziert nach DIN 38412 Teil 26, und mechanisch gereinigtes Abwasser einer kommunalen Kläranlage verwendet.

## 2.2 Entwicklung stabiler Algen-Bakterien-Aggregate

Unser Anspruch bestand zunächst darin eine geeignete Algenart als „Modellorganismus“ zu finden, die möglichst alle folgenden Anforderungen erfüllt:

- tolerant gegenüber Abwasserbedingungen
- hohe Sauerstoff-Produktionsraten
- selbst sedimentierbar oder Bildung sedimentierbarer Aggregate mit Bakterien
- keine Ausscheidungen wachstumshemmender Substanzen für die Bakterien

In vergleichenden Wachstumsversuchen mit Blaualgen und diversen Grünalgen stellte sich schließlich die einzellige Grünalge *Chlorella vulgaris* (Stamm Hamburg) als geeigneter Modellorganismus für die weiteren Untersuchungen heraus. Die aus einer Umweltprobe isolierte *Chlorella* Spezies mit durchschnittlichen Zellgrößen von 3 bis 6  $\mu\text{m}$  ist robust, toleriert Abwasserbedingungen und weist hohe Sauerstoffproduktionsraten auf.

Der Ansatz zur Ausbildung stabiler Algen-Bakterien-Flocken bestand nun darin, Bakterien- und Algenbiomasse im SBR-Verfahren nach und nach so zu kultivieren, dass durch Abtrennung der nicht sedimentierbaren Bestandteile im Überstand Wachstumsvorteile für sedimentierbare (symbiotische) Biomasse im System entsteht. Im Zyklus von 2 bis 3 Tagen wurde in den Laborreaktoren neues synthetisches Abwasser zudosiert, nachdem die sedimentierbare Biomasse im Reaktor verblieb und die nicht sedimentierbaren Organismen mit dem gereinigten Abwasser aus dem System entfernt wurden. Die ursprünglich frei schwebenden einzelnen *Chlorella* Zellen lagerten sich die mehr und mehr in die Belebtschlammflocken ein, bis nach etwa 4-5 Wochen eine nahezu vollständige Inkorporierung der Algen in die Flocken zu beobachten war. Der Überstand enthielt nach 30 Tagen Versuchsdauer nahezu keine freien Algen mehr (vgl. Abbildung 3).

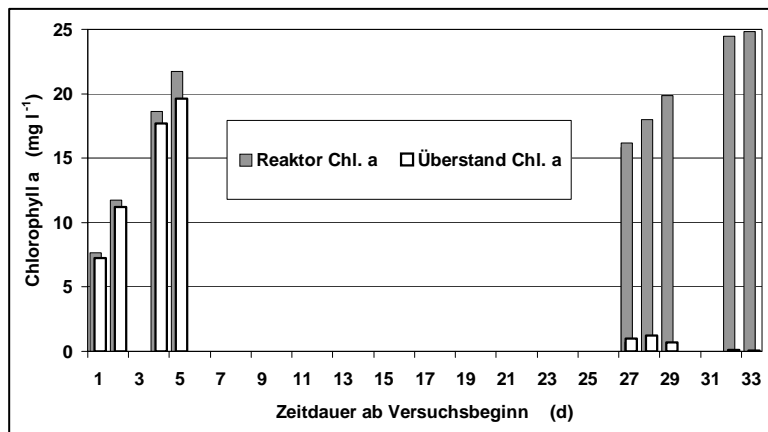


Abbildung 3: Chlorophyll a - Konzentration im Reaktor (voll durchmischt) und in der Wasserphase (nach Sedimentation) während 5-wöchiger Versuchsphase im SBR-Betrieb

Abbildung 3 zeigt, dass die Chl.a-Konzentration im Überstand als Maß für die frei suspendierten Algen nach 30 Tagen SBR-Betrieb unter  $0,1 \text{ mg l}^{-1}$  sank, während der Gesamtchlorophyllgehalt im Reaktor bis zu  $25 \text{ mg l}^{-1}$  aufwies. Die Algen wurden folglich nahezu vollständig in die Flocken inkorporiert. In der folgenden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme der Oberfläche einer Algen-Bakterien-Flocke sind die eingelagerten Algen als kugelhähnliche Gebilde mit einem Durchmesser von  $5-6 \mu\text{m}$  zu erkennen.

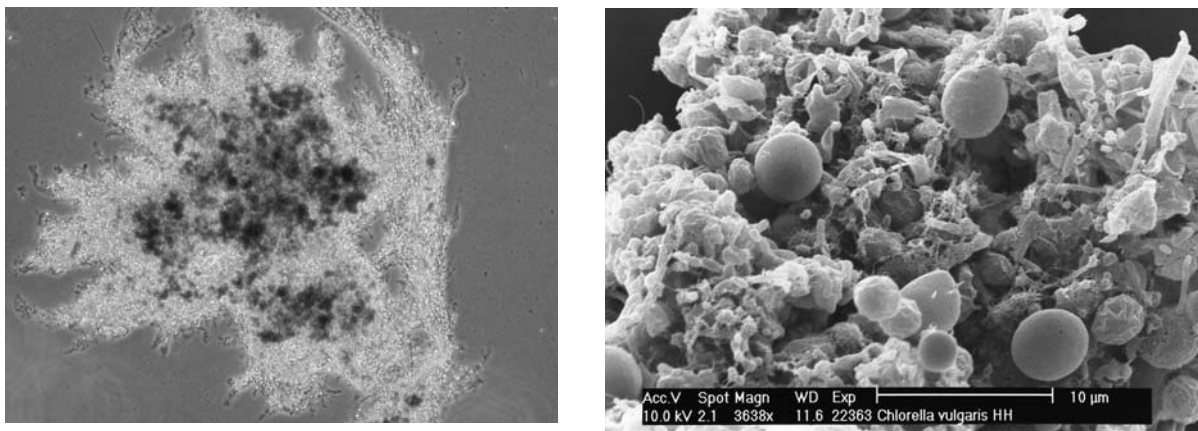


Abbildung 4: links: Lichtmikroskopisches Bild einer Algen-Bakterien-Flocke (Durchmesser ca. 1mm), rechts: Raster-Elektronen-Mikroskop Aufnahme der Oberfläche einer Algen-Bakterien-Flocke.

### 2.3 Abbauleistung im Batch-Experiment mit Hell-Dunkel-Wechsel

Die Eliminationsleistung der neu entwickelten Algen-Bakterien-Aggregate in synthetischem Abwasser bezüglich Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor wurde danach im Batch-Experiment und Hell-Dunkel-Wechsel ermittelt. Nachfolgend sind die Ergebnisse eines ausgewählten repräsentativen Versuchs dargestellt (siehe Abbildung 5).

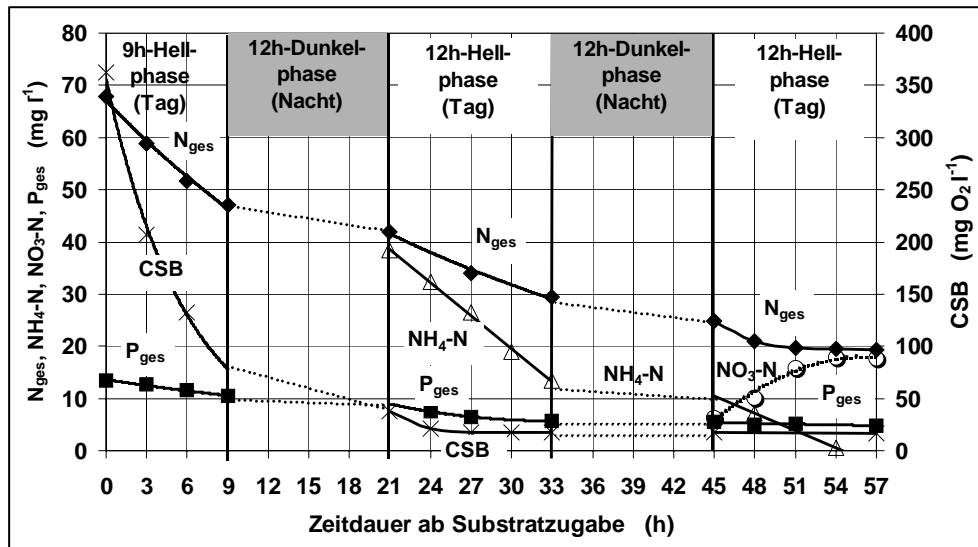


Abbildung 5: C-, N- und P-Abbau im Batchversuch mit Algen-Bakterien-Biomasse. Strahlung: ca.  $2.000 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  an Wasseroberfläche; Temperatur= 27-32 °C; pH = 7,0-8,1 ;Biomasse: TR=2,1-2,4 g l<sup>-1</sup>; oTR=1,7-1,9 g l<sup>-1</sup>; Chl.a=28-39 mg l<sup>-1</sup>

Die Abbaukurven der Parameter CSB,  $N_{\text{ges}}$  und  $P_{\text{ges}}$  lassen sich im Verlauf der ersten und teilweise noch der zweiten Hellphase mit Exponential-Funktionen annähern. Der Abbau von  $\text{NH}_4\text{-N}$  in der zweiten Hellphase (21 h bis 45 h nach Substratzugabe) erfolgte linear. Es ist zu vermuten, dass die Differenz zwischen  $N_{\text{ges}}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  in der zweiten Hellphase auf  $\text{NO}_3\text{-N}$  durch einsetzende Nitrifikation zurückzuführen ist. Mit Ende der dritten Hellphase (57 h nach Substratzugabe) lag als Stickstoffkomponente nahezu ausschließlich Nitrat vor. Unter den gegebenen Bedingungen wurde nach 24 h der organische Kohlenstoff (CSB) nicht mehr weiter abgebaut. Nach 48 h erfolgte keine weitere Elimination des Stickstoffs ( $N_{\text{ges}}$ ) mehr, da nun Nitrat als voll oxidierte Form in einer Endkonzentration von ca.  $18 \text{ mg NO}_3\text{-N l}^{-1}$  vorlag. In den Dunkelphasen war die Elimination von Stickstoff zwar eingeschränkt, kam jedoch nicht zum Erliegen. Offenbar fand ein weiterer heterotropher Abbau durch Restnutzung des noch vorhandenen Sauerstoffs bzw. ein anoxischer Abbau (Denitrifikation) statt. Kohlenstoffabbau war während der Dunkelphase vermutlich aufgrund des mixotrophen Algenstoffwechsels, nicht in dem Maße limitiert wie der N- und P-Abbau.

Erst nachdem der Kohlenstoffabbau und die Oxidation des Stickstoffs beendet waren (nach ca. 51 h), stieg die Konzentration des gelösten Sauerstoffs auf ca.  $9 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$  an. Während der vorangegangenen Abbauphase waren nur sehr geringe Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff ( $< 0,2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ ) messbar. Offenbar wurde der durch die Algen produzierte Sauerstoff sofort von den Sauerstoff zehrenden Bakterien verbraucht oder / und innerhalb der Algen-Bakterien-Flocken gespeichert.

Wir vermuten, dass der für die aeroben Umsetzungsprozesse notwendige und offensichtlich im Algen-Bakterien-System auch vorhandene Sauerstoff innerhalb der Algen-Bakterien-Flocke gespeichert wird, jedoch nicht in der freien Wasserphase messbar ist. Dazu wurden Messungen der Sauerstoffkonzentration im Grenzbereich Wasserphase-Biomasse (d.h. an und in den Algen-Bakterien-Flocken) mit Hilfe eines neuartigen, nur stecknadelgroßen optischen Sauerstoffmikrosensors durchgeführt. Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Sauerstoffkonzentration in Lösung und nach „Einstecken“ des Sensors in die Flocke. In Abbildung 6 sind zwei ausgewählte, repräsentative Messwert-Verläufe dargestellt. Die Messwertaufnahme erfolgte in Abständen von 60 Sekunden.

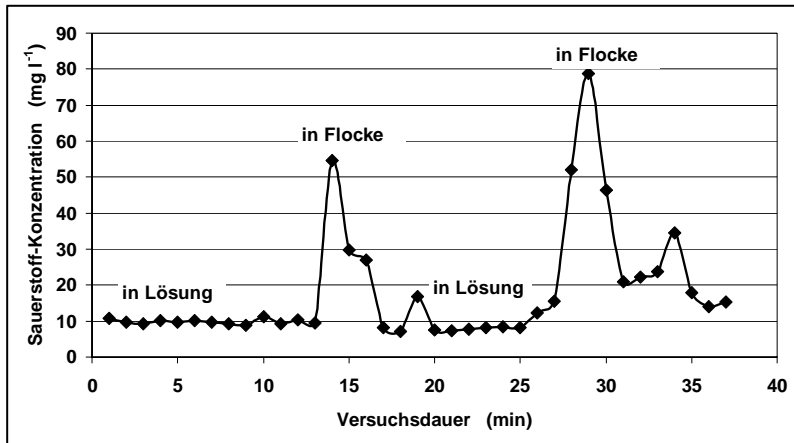


Abbildung 6: Sauerstoffkonzentration in Lösung und in den Algen-Bakterien-Flocken

Innerhalb der Flocke steigt die Sauerstoffkonzentration sprunghaft von  $10 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$  auf 55 bzw.  $80 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$  an. Die Vermutung, dass Sauerstoff innerhalb der Algen-Bakterien-Aggregate eingelagert wird, wird somit bestätigt. Wir haben bis zu 800 %  $\text{O}_2$ -Übersättigung in den Flocken gemessen. Aus diesem systemspezifischen Phänomen leiten sich zwei wesentliche Vorteile des Systems mit symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse ab:

1. Der durch Algenphotosynthese produzierte Sauerstoff steht den aeroben Bakterien innerhalb der Flocken unmittelbar für ihre Stoffwechselvorgänge zur Verfügung.
2. Innerhalb der Algen-Bakterien-Flocken herrscht starke  $\text{O}_2$ -Übersättigung, eine Art Sauerstoffspeicher entsteht.

## 2.4 Untersuchung kontinuierlich durchflossener Anlagen im Labormaßstab

Für Versuche im Labormaßstab mit realem Abwasser wurde eine hydraulische Verweilzeit von 48 h, eine Strahlungsintensität von  $2.000 \mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  und ein Licht-Dunkel Wechsel von 10h:14h eingestellt. Die Betriebsparameter für die Versuchsreihen sind in Tabelle 1 und die mittleren Ablaufkonzentrationen für organischen Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor in Tabelle 2 zusammengestellt. In Tabelle 3 stehen die Eliminationswerte für C, N und P.

Tabelle 1: Betriebsparameter für das Laborsystem mit realem Abwasser

Run Nr.	Betriebsdauer	HRT	Schlammalter	Temperatur (°C)	TR (g l <sup>-1</sup> )	oTR (GV) (g l <sup>-1</sup> )	Chl.a (mg l <sup>-1</sup> )
I-1	14 Tage	36 h	15 d	19,1-27,2	1,50-2,00	0,99-1,38	15,04-22,54
I-2	15 Tage	36 h	17 d	18,7-26,2	1,81-2,27	1,26-1,64	19,57-30,74
II-1	23 Tage	48 h	25 d	16,8-24,4	1,72-2,20	1,12-1,72	22,76-29,13
II-2	35 Tage	48 h	25 d	16,0-24,1	1,69-2,54	1,11-1,93	26,06-37,04

Tabelle 2: Ablaufkonzentrationen (Mittelwerte) für das Laborsystem mit realem Abwasser

Run Nr.	CSB (mgO <sub>2</sub> l <sup>-1</sup> )	DOC (mg l <sup>-1</sup> )	TN (mg l <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> -N (mg l <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> -N (mg l <sup>-1</sup> )	TP (mg l <sup>-1</sup> )
I-1	n.a.	16,6	19,8	18,3	0,2	4,7
I-2	n.a.	17,1	24,6	24,5	0,1	4,8
II-1	51,8	17,2	12,0	9,3	2,0	4,9
II-2	66,2	17,8	10,7	8,0	2,3	4,9

n.a. nicht analysiert

Tabelle 3: Eliminationsraten für C, N und P im Laborsystem mit realem Abwasser

Parameter	Zulauf (Mittelwert)	Ablauf (Mittelwert)	Reduktion (mg l <sup>-1</sup> )	Reduktion (%)
CSB (mgO <sub>2</sub> l <sup>-1</sup> )	471,5	51,8	419,7	89
BSB <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> l <sup>-1</sup> )	280	4,5	275,5	98
TN (mg l <sup>-1</sup> )	78,5	12,0	66,5	85
NH <sub>4</sub> -N (mg l <sup>-1</sup> )	54	9,3	44,7	83
TP (mg l <sup>-1</sup> )	10,8	4,9	5,9	55

Zulaufwerte: unfiltrierte, homogenisierte Proben

Ablaufwerte: filtrierte Proben (0,45 µm)

Organischer Kohlenstoff wird gut entfernt (BSB<sub>5</sub>: 98 %-ige Reduktion von ca. 280 auf ca. 5 mg l<sup>-1</sup>, CSB: 89 %-ige Reduktion von ca. 470 auf ca. 50 mg l<sup>-1</sup>). Die Flächenabbauleistung für Stickstoff und Phosphor beträgt ca. 10 gN m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> sowie 0,9 gP m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (TN: 85 %-ige Reduktion auf ca. 12 mg l<sup>-1</sup>, TP: 55 %-ige Reduktion auf ca. 4,9 mg l<sup>-1</sup>). Die Keimindikatoren Gesamt-Coliforme und *E. coli* wurden um 2-3 lg-Einheiten reduziert (nicht in Tabelle 3).

Als geeignete Betriebsbedingungen für eine gute Reinigungsleistung des symbiotischen Algen-Bakterien-Systems (0,3 m Tiefe) haben sich bei Bestrahlung mit 2.000 µmol s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> für 10 h d<sup>-1</sup> herausgestellt:

- Belastung des Systems: ca. 70 gCSB m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>
- Biomassekonzentration: 1-2 gTR l<sup>-1</sup>
- Hydraulische Verweilzeit: 2 d
- Schlammalter: 15-25 d

## 2.5 Eigenschaften der Algen-Bakterien-Biomasse

Die Algen-Bakterien-Flocken weisen Durchmesser von 0,5-2 mm auf und sedimentieren sehr gut. Der Schlammvolumenindex lag durchschnittlich bei 80-120 ml g<sup>-1</sup>. In realem Abwasser betrug die Produktion von Überschussbiomasse 0,5-0,6 kg oTR kgBSB<sub>5, abgebaut</sub><sup>-1</sup>. Der Anteil der Algen an der Gesamtbiomasse beträgt 65-80 %. Durch die Einbindung der Algen in die Flockenaggregate und die gute Sedimentationsfähigkeit der Flocken ist eine Abtrennung der gesamten Biomasse mittels Schwerkraft ohne Zudosierung von chemischen Hilfsmitteln möglich. Abbildung 7 verdeutlicht die gute Sedimentationswirkung.

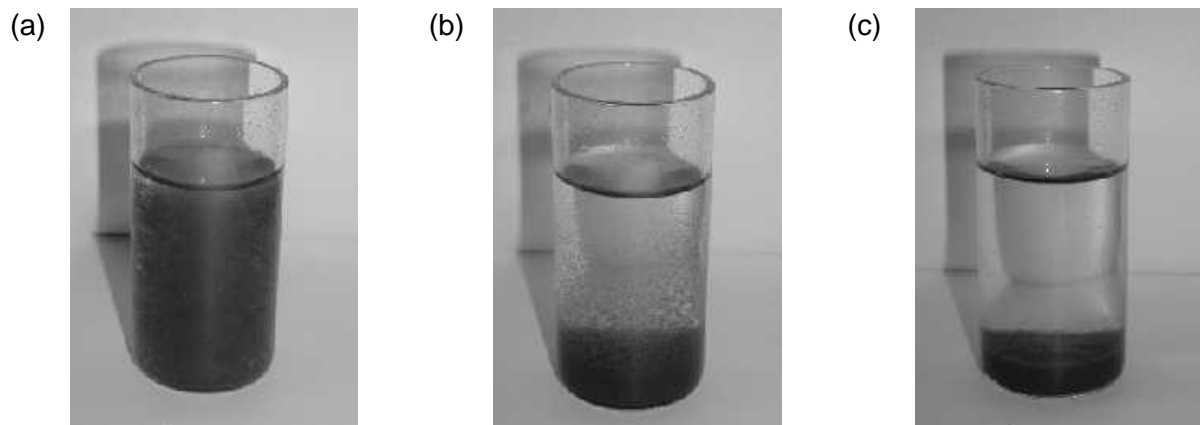


Abbildung 7: Sedimentation der Algen-Bakterien-Biomasse im Becherglas (a. Beginn - voll durchgemischte Probe, b. nach 1 min, c. nach 10 min)

Es wurde jedoch auch festgestellt, dass sich die Absetzfähigkeit der Algen-Bakterien-Biomasse in negativer Hinsicht ändert, und zwar unter folgenden Bedingungen:

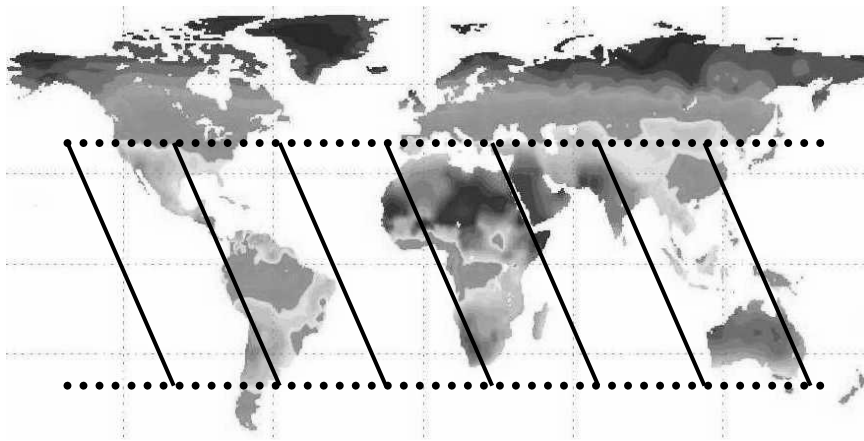
- kürzere hydraulische Verweilzeit (< 48 h) sowie

- erhöhter Feststoffgehalt im Reaktor ( $> 2,0 \text{ g oTR l}^{-1}$ ).

Der Schlammvolumenindex stieg dann bis auf  $250 \text{ ml g}^{-1}$ . Die Flockenstruktur wies nicht mehr die sonst typische Kompaktheit auf, sondern wurde von stark fadenförmigen Organismen geprägt. Die Belastung des Systems muss folglich hinreichend gering und das Strahlungsangebot auch in tieferen Wasserschichten ausreichend hoch sein, damit nicht nur der Reinigungsprozess, sondern auch der Sedimentationsprozess optimal abläuft.

### 3 Gesamtkonzeption und Ausblick

Die Ergebnisse unserer experimentellen Untersuchungen unter verschiedenen Strahlungsbedingungen und Simulationsrechnungen bestätigen die prinzipielle Anwendbarkeit des Verfahrens mit symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse in den sonnenreichen Regionen zwischen  $35\text{-}40^\circ$  nördlicher und südlicher Breite.



Diese Karte zeigt die Globalstrahlung (Jahresmittelwerte für 1961-1990) in verschiedenen Abstufungen [5]. Im schraffierten Bereich liegen die Regionen mit hoher bis mäßiger Strahlungsintensität ( $150\text{-}300 \text{ W m}^{-2}$ ), wo das Algen-Bakterien-Verfahren primär Anwendung finden kann. Konzeptionell sehen wir für das neuartige Verfahren mit symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse die unten im Schema skizzierte Einsatzmöglichkeit.

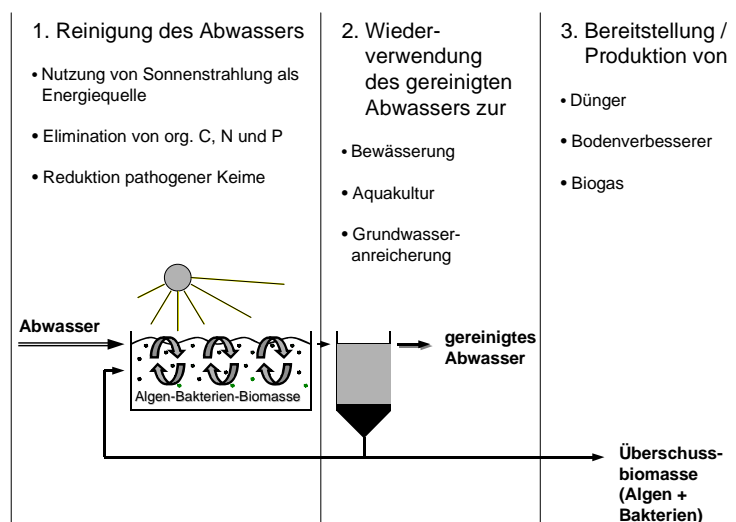


Abbildung 8: Konzept für ein Verfahren mit symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse

### 1. Abwasserreinigung (hinsichtlich C, N und P)

Mit dem Algen-Bakterien-Verfahren lassen sich hohe Eliminationsraten für Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor erzielen. Dies bedeutet eine etwa 10-fach höhere Flächenabbauleistung für Stickstoff im Vergleich zu konventionellen Teichverfahren, die Eliminationsraten von durchschnittlich  $0,5-2,0 \text{ gN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  erreichen [6].

### 2. Wiederverwendung des gereinigten Abwassers

Das gereinigte Abwasser kann zu Zwecken der Bewässerung, zur Fischzucht oder zur Grundwasseranreicherung genutzt werden. In unseren Tests erzielten wir im realen Abwasser eine Keimzahlreduzierung von 2-3 lg Einheiten. Die *E.coli* Konzentration lag jedoch mit  $> 10^4 \text{ KBE (100 ml)}^{-1}$  noch in einem Bereich, der ggfs. eine weitere Behandlungsstufe zur Reduktion pathogener Keime notwendig macht.

### 3. Produktion verwertbarer Biomasse.

Die spezifische Produktion an Überschussbiomasse im realen Abwasser betrug 20-30 gTS  $\text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  bzw. bezogen auf die organische Substanz,  $0,5-0,6 \text{ kg oTR kgBSB}_{5,\text{abgebaut}}^{-1}$ . Somit bewegt sich die Produktion an Überschussbiomasse in der gleichen Größenordnung wie für Belebungsanlagen mit simultaner Schlammstabilisierung. In konventionellen Abwasserteichen beträgt die Produktion an Überschussbiomasse lediglich ca.  $0,5 \text{ gTR m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , so dass mit dem Algen-Bakterien-System eine vergleichsweise hohe Produktion verwertbarer Biomasse einhergeht. Als Verwertungsoptionen für die Algen-Bakterien-Biomasse kommen grundsätzlich die stoffliche und die energetische Verwertung in Betracht. Stofflich kann die protein- und nährstoffreiche Algen-Bakterien-Biomasse als Dünger und Bodenverbesserer in der Landwirtschaft eingesetzt werden.

## Danksagung

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sei an dieser Stelle ausdrücklich für die Bereitstellung der finanziellen Mittel zur Durchführung des Forschungsvorhabens (Förderkennzeichen 02WA0146) gedankt.

Die Autoren danken weiterhin sehr herzlich dem Institut für Allgemeine Botanik und Botanischer Garten der Universität Hamburg, namentlich Herrn Prof. Weber, Herrn Dr. Lorch und Frau Dr. Engels, für die erfolgreiche und angenehme Zusammenarbeit im Rahmen dieses Forschungsvorhabens.

## Literatur

- [1] De-Bashan, L.E., Hernandez, J.-P., Taylor, M., Bashan, Y. (2004). Microalgae growth-promoting bacteria as „helpers“ for microalgae: a novel approach for removing ammonium and phosphorus from municipal wastewater. *Water Research*, 38, 466-474.
- [2] Evans, R., Fallowfield, H.J., Cromar, N. (1999). Treatment of abattoir wastewater using high rate algal ponds. *Proc. of the 18<sup>th</sup> Federal Convention, Australian Water Association*, 11.-14. April 1999, Adelaide (Australia).
- [3] Groeneweg, J. (1986). *Untersuchungen zur Behandlung von Schweineflüssigmist in Algengräben*. Bericht der Kernforschungsanlage Jülich GmbH Nr. 1999, Institut für Biotechnologie, Jülich.
- [4] Gutzeit, Gunar (2006). Entwicklung und Modellierung eines neuartigen Abwasserreinigungsverfahrens mit symbiotischer Algen-Bakterien-Biomasse. *Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, Band 54.
- [5] Internet:  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)

www.worldenergy.org

- [6] Richmond, A. (Hrsg.) (1986). *CRC Handbook of microalgal mass culture*. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.

## **Autoren**

Dr.-Ing. Gunar Gutzeit  
EURAWASSER Aufbereitungs- und  
Entsorgungsgesellschaft Saale-Unstrut mbH  
Gewerbegebiet Kiesgrube 2, 06632 Freyburg  
Email: g.gutzeit@eurawasser.de

Prof. Dr.-Ing. Uwe Neis  
TU Hamburg-Harburg 1-02  
Eißendorfer Straße 42, 21073 Hamburg  
Email: neis@tu-harburg.de