

**EINSATZ VON BIOFILMPROZESSEN ZUR WEITERGEHENDEN CSB-ELIMINATION IN  
PAPIERFABRIKATIONSABWÄSSER**

<b>Inhalt .....</b>	<b>.....</b>
<b>1 Zusammenfassung .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
<b>4 Material und Methoden .....</b>	<b>9</b>
<b>5 Charakterisierung von Biofilmen aus Abwasserreinigungsanlagen.....</b>	<b>18</b>
<b>6 Auswertung der Batchtests und Auswahl von Biofilmen .....</b>	<b>21</b>
<b>7 Kontinuierliche Laborversuche .....</b>	<b>29</b>
<b>8 Ergebnisse .....</b>	<b>36</b>
<b>9 Schlussfolgerungen.....</b>	<b>45</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>47</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>49</b>

## 1 Zusammenfassung

<b>Zielstellung</b>	Durch den Einsatz von Endstufen der aeroben Abwasserreinigung, die Biofilme mit erhöhtem Eliminationspotenzial für schwer abbaubare Abwasserinhaltsstoffe (refraktärer CSB) nutzen, sollte, alternativ zu aufwendigen physikalischen oder chemischen Verfahren (Membrantrennung, Oxidation) der Reinigungsleistung biologischer Abwasserreinigungsanlagen gesteigert und zur Verminderung der CSB-Restbelastung beigetragen werden.
<b>Ergebnisse</b>	<p>Im ersten Teil des Projektes erfolgte eine Bewertung des Potenzials von Biofilmen aus großtechnischen Anlagen zur weitergehenden Reinigung von Papierfabrikationsabwasser. Dazu wurden Biofilme/Mikroorganismenkonsortien identifiziert und charakterisiert. Dies erfolgte zunächst in diskontinuierlichen und sich daran anschließenden kontinuierlichen Laborversuchen.</p> <p>In vergleichenden aeroben statischen Abbautests (modifizierter Zahn- Wellens-Test) mit Biofilmen und Belebtschlämmen aus 6 großtechnischen Anlagen zur Reinigung von Abwässern der Papierfabrikation wurde festgestellt, dass ein Eliminationspotenzial von 20 bis 40% zu einer weitergehenden CSB-Elimination existiert. Biofilme zeigten unter den Testbedingungen im Vergleich zu Belebtschlamm nur in der Hälfte der Fälle eine geringfügig bessere CSB-Elimination (max. 10%), was auf für Biofilme nachteilige Probenahme- und Testbedingungen zurückgeführt wurde.</p> <p>Der Versuch im kontinuierlichen Langzeitbetrieb einer Versuchsanlage Biofilme zu etablieren, die das im statischen Test erreichte Eliminationspotenzial ausschöpfen, war nur zum Teil erfolgreich. Die in den statischen Tests ermittelte CSB-Reduzierung ist demnach überwiegend auf komplexere Eliminationsmechanismen zurückzuführen, in denen biologische, chemische und physikalische Mechanismen gemeinsam wirken. Diese Schlussfolgerung wird durch die zur stofflichen Charakterisierung der Inhaltsstoffe eingesetzte LC-OCD-Analytik gestützt, die zeigte, dass keine stoffgruppenspezifische Elimination vorlag, sondern die Verminderung des refraktären CSB alle Stoffe in gleichem Maße betraf.</p> <p>Eine an Stichproben vorgenommene Charakterisierung des Biofilms und Belebtschlammes mittels molekularbiologischer Methoden konnte zeigen, dass die Biozönosen sich in ihrer Zusammensetzung unterschieden. Im Biofilm konnten mit den eingesetzten Gensonden nur ca. 50% der Organismen zugeordnet werden, was für eine hohe Diversität der Zusammensetzung spricht.</p> <p>Eine wirtschaftliche Betrachtung der Elimination des refraktären CSB mittels biologischer Endstufe ergab, dass die Kosten im ungünstigen Fall in der Größenordnung der Membran- oder Ozonbehandlung, in der Regel ca. 30% niedriger und unter günstigen Voraussetzungen mehr als 50% niedriger liegen.</p>
<b>Schlussfolgerung</b>	Um das Potenzial der biologischen Endreinigung vollständig zu erschließen, sind ergänzende Untersuchungen zu Verfahrensvarianten erforderlich, die eine Verknüpfung der biologischen mit chemisch-physikalischen Eliminationsmechanismen ermöglichen.

---

**Danksagung**

Das Forschungsvorhaben IGF 15740 BR 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:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

---

## 2 Einleitung

### Abwasserbehandlung in der Papierindustrie

Nahezu alle Abwässer der Papierproduktion in Deutschland werden vor ihrer Einleitung in den Vorfluter gereinigt. Bezogen auf die Produktion werden 95% der Abwässer in werkseigenen bzw. in kommunalen Kläranlagen biologisch gereinigt und 1% ohne biologische Behandlung eingeleitet. 4% der Produktion wird abwasserfrei erzeugt /1/.

### Problem Rest-CSB

Nach biologischer Reinigung beträgt die CSB-Restbelastung von Papierfabrikationsabwässern noch 100 - 500 mg/l, im Vergleich dazu weist kommunales Abwasser nur CSB-Werte von 10 - 20 mg/l auf. Für ca. 25% der Papierfabriken stellt der Rest-CSB ein Problem dar /1/, daher ist die Reduzierung der Rest-CSB-Konzentration im Abwasser der Papiererzeugung ein Schwerpunkt.

### Ursachen des Rest-CSB und weitergehende Reinigung

Die Belastung eines Papierfabrikationsabwassers wird durch die verwendeten Rohstoffe (Holz, Zellstoff, Altpapier), die Aufbereitungstechnologien für den Faserstoff (Deinkingtechnologie) und den Einsatz von Additiven bestimmt. Beim Rest-CSB handelt es sich um die nach der Reinigung im Abwasser verbleibenden gelösten organischen Stoffe, die entweder prinzipiell bzw. unter den gegebenen Prozessbedingungen der Abwasserreinigung nicht eliminierbar sind. Zur weiteren Reduzierung der Restbelastung biologisch gereinigter Abwässer können folgende physikalisch-chemisch Prozesse eingesetzt werden.

- Da ein großer Teil der nicht eliminierten Verbindungen adsorbierbar sind, können diese z.B. durch **Flockungs-/Fällungsprozesse** eliminiert werden. In diesen Prozessen fallen jedoch Abfallschlämme an, die einer weiteren Behandlung bedürfen und letztlich deponiert werden müssen, wenn auf den Einsatz aufwendiger Regenerierungsschritte (z.B. Brennen) verzichtet wird.
- **Oxidative Prozesse** mit Ozon, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oder UV-Bestrahlung können schwer abbaubare organische Abwasserinhaltsstoffe entweder vollständig in CO<sub>2</sub> und Wasser umsetzen oder durch Teiloxidation in biologisch abbaubare Fragmente umwandeln /2/. Eine vollständige Oxidation ist im Allgemeinen mit hohem Energie- bzw. Chemikalienverbrauch verbunden, die teilweise Oxidation erfordert eine zusätzliche biologische Nachbehandlung zur Elimination der gebildeten biologisch verfügbaren Abbauprodukte /3, 4, 5/.
- **Membranverfahren** können ebenfalls zur Abtrennung von refraktärem CSB eingesetzt werden. Die Aufarbeitung/Entsorgung der hierbei anfallenden Konzentrate ist ein bislang nicht zufrieden stellend gelöstes Problem. Außerdem erfordert die Behandlung der großen Abwassermengen einen erheblichen apparatetechnischen und energetischen Aufwand sowie zusätzliche Maßnahmen gegen Scaling und Fouling der Membranen /6/.

### Fazit

Alle Prozesse zur weitergehenden Abwasserreinigung sind durchweg kostenintensiv bzw. aufwendig und kommen daher nur in besonders kritischen Fällen zum Einsatz. Die Suche nach alternativen, kostengünstigeren Problemlösungen ist deshalb unerlässlich.

<b>Zielstellung</b>	<p>Ziel des Projekts war die Steigerung der Reinigungsleistung von biologischen Abwasserreinigungsanlagen zur Verminderung des Rest-CSB. Das soll durch Einsatz von Endstufen der aeroben Abwasserreinigung, die Biofilme mit Mikroorganismenkonsortien mit erhöhtem Eliminationspotenzial für schwer abbaubare (refraktäre) Inhaltsstoffe nutzen, erreicht werden.</p> <p>Die Projektergebnisse sollten den Kenntnisstand zur Entwicklung und Effektivität von Biofilmen erweitern und Grundlage für eine Verbreiterung des Einsatzfeldes von Biofilmprozessen als „biologische“ Alternative zu kostenintensiven chemischen Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung in Papierfabriken sein.</p>
---------------------	---

---

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Biofilmverfahren in der Abwassertechnik

<b>Verfahrensvarianten</b>	<p>Biofilm-Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Geometrie der Trägerkörper und des Aufbaus des Trägermaterials in den Reaktoren sowie der Art und Weise des Stoffaustausches zwischen fester und flüssiger Phase. So gibt es Verfahren mit fixiertem Trägermaterial bzw. mit geordnet bewegtem Trägermaterial (Festbett- bzw. Tauchkörperverfahren) oder Verfahren, in denen die Biofilm-Träger in den Reaktoren frei suspendiert sind (Fließ-, Wirbel- bzw. Schwebbettverfahren oder MBBR-Verfahren (Moving-Bed-Biofilm-Reactor). Eine Übersicht über Biofilmverfahren wird in /7/ gegeben. Da Anlagen mit fixiertem Trägermaterial zur Reinigung von Papierfabrikationsabwasser oft Probleme mit Verstopfungen/Ablagerungen zeigten und der Einsatz von Tauchkörper- bzw. Biofilteranlagen nur bei kleineren Abwassermengen empfehlenswert ist, werden in der Papierindustrie bevorzugt MBBR-Anlagen eingesetzt.</p>
<b>Biofilmverfahren und Anlagenerüchtigung</b>	<p>Durch zusätzliche im Belebungsbecken installierte rotierende, schwebende und ortsfeste Biofilm-Aufwuchsflächen können überlastete Belebungsanlagen mit nur geringem Aufwand nach- bzw. umgerüstet werden. Dadurch kann die Biomassekonzentration bei gleich bleibender oder gar verringerter Feststoffbelastung der Nachklärung erhöht werden /8/. Schwimmende Aufwuchskörper in Belebungsanlagen können die Bläh- und Schwimmschlamm Bildung vermindern und bei gleicher CSB-Elimination den Schlammvolumenindex ohne zusätzliche Dosierung von Fällungs- oder Flockungsmitteln signifikant reduzieren /9/.</p>
<b>Vorteilhafte Entkopplung von Prozessgrößen</b>	<p>Ein wesentlicher Vorteil von Biofilmverfahren stellt die vergleichsweise einfache <b>Entkopplung von hydraulischer Verweilzeit des Substrates und</b> der mittleren statistischen Verweilzeit der Mikroorganismen, <b>dem Schlammalter</b>, dar. Dies ermöglicht unter den Bedingungen der Abwasserbehandlung bei im Vergleich zur kontinuierlichen Fermentation deutlich geringeren Substratkonzentrationen eine Erhöhung der Raum-Zeit-Umsätze ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen Nachklärstufe /10/.</p>

---

---

**Biodichte** Häufig wurde auch eine absolute Erhöhung der Biodichte diskutiert. Allerdings ist gerade bei Hochlastanlagen die Biomassekonzentration in den Reaktoren zumeist vergleichbar oder sogar geringer als bei konventionellen Anlagen mit suspendierten Organismen. Hohe Biofilmdicken (>100 µm) erwiesen sich u.a. wegen der reduzierten Nährstoffversorgung in tieferen Schichten, des erhöhten Diffusionswiderstandes und einer möglichen Verblockung freier Strömungskanäle, bezüglich der Eliminationsleistung eher als nachteilig /11/.

---

**Verbesserte Prozessstabilität** Für die technische Anwendung von Interesse ist neben der hohen Leistungsfähigkeit der Biofilntechnologie auch die Stabilität gegenüber Stossbelastungen, die aus Anstiegen der Substratkonzentration oder Änderungen der Substratzusammensetzung, durch Einträge toxischer Stoffe sowie starken pH-Wert-Schwankungen resultieren /7/.

---

**MBBR-Verfahren** Das in der Papierindustrie häufig eingesetzte MBBR-Verfahren arbeitet mit frei beweglichen Aufwuchskörpern. Dadurch wird einerseits ein optimaler Kontakt zwischen Substrat und Biomasse hergestellt, andererseits bewirken die vorherrschenden hohen Abriebkräfte auf den Aufwuchskörpern einen gleichmäßigen, dünnen Biofilm. Weisen die Aufwuchskörper Hohlräume auf, können sich auch dickere Biofilme im Innern ausbilden, da dort praktisch kein Biomasseausstrag erfolgt. Technische Vorzüge sind:

- niedrige Druckverluste, keine Kanalbildung, keine Verstopfungsgefahr (Ausnutzung der gesamten Oberfläche), zumeist keine Rückspülung erforderlich,
- Biomasseanreicherung durch zusätzliche Aufwuchsflächen für Mikroorganismen, höherer Raumsatz durch verbesserten Massentransport (Durchmischung) und Reduzierung der Diffusionslimitierung im Vergleich zu reinen Biofilmreaktoren, Erhöhung des Schlammalters /12/,
- Reduzierung der Rücklaufschlammförderung /13/,
- stoffliche Entlastung der Nachklärung bei gleichzeitig verbesserten Absetzeigenschaften /14/.

Als nachteilig anzusehen ist allerdings der relativ hohe Energiebedarf, der für die Umwälzung des Trägermaterials benötigt wird /8/.

---

### 3.2 MBBR als Hochlaststufe in Papier- und Zellstoffindustrie

**Anwendungsfälle in Papierindustrie** In der deutschen Papierindustrie gibt es derzeit rund 20 Abwasserreinigungsanlagen, die als erste Stufe eine MBBR-Anlage bei Belastungen im Bereich von 5...30 kgCSB/m<sup>3</sup>d betreiben /15, 16/. Es ist davon auszugehen, dass die Zahl dieser Anlagen weiter steigen wird, da diese Systeme für die Sanierung und auch den Anlagenneubau große Vorteile bieten.

---

**Einsatzzweck** Die Reaktoren sind i. d. R. als Hochlaststufe vor einer Belebung ausgelegt und eliminieren bei hohen Raumbelastungen vor allem leicht abbaubare, niedermolekulare Abwasserinhaltsstoffe. Dadurch werden in der nachgeschalteten 2. Stufe bei regulärem Betrieb Bedingungen gesichert, die die bei der Behandlung

---

---

von Papierfabriksabwässern häufig zu beobachtende Bildung von Bläh- oder Schwimmschlamm vermindern.

---

### 3.3 Potenzial von Biofilm (MBBR)-Verfahren zur weitergehenden Reinigung

#### Biofilm als „Nährboden“

Ein Vorteil von Biofilmanlagen gegenüber konventionellen Belebungsanlagen besteht in der hohen Verweilzeit, die den auf den Aufwuchskörpern wachsenden Mikroorganismen geboten wird. Populationen langsam wachsender Organismen (z.B. Nitrifikanten) haben so bessere Möglichkeiten, sich im System anzureichern. Auch spezialisierte Organismen, die eine lange Kontaktzeit mit dem Substrat benötigen, um das entsprechende Enzymsystem zu entwickeln, werden begünstigt. So sollte sich die Biomasse an die Abwasserzusammensetzung anpassen und nach einer Adaptionszeit in der Lage sein, auch schwer abbaubare Substanzen zu metabolisieren.

#### Biofilmtchniken zur Elimination persistenter Inhaltsstoffe

Abwässer mit persistenten Inhaltsstoffen, wie Deponiesickerwässer konnten durch den Einsatz immobilisierter Organismen mit hoher Effektivität behandelt werden. Diese Ergebnisse bestätigten Vorteile der Biofilmtchnologie im Vergleich zu einem konventionellen Belebtschlammssystem. Lag die TOC-Elimination unter Einsatz suspendierter Biomasse bei ca. 83%, wurden mit einem Festbettreaktor mehr als 85% und im Wirbelschichtreaktor mehr als 94% Elimination erreicht. Man geht von einer adsorptiven Bindung der Huminstoffe an den Träger als Voraussetzung für die nachfolgende biologische Elimination aus. Gemäß gelpermeationschromatographischer Untersuchungen werden vorrangig Huminsäuren mit einem Molekulargewicht <1000 kD abgebaut /17/.

#### Eliminationsleistung in biologischer PF-ARA

Biologische Reinigungsanlagen sichern grundsätzlich eine weitgehende Elimination der Abwasserinhaltsstoffe. Die in der Praxis erreichten BSB<sub>5</sub>-Eliminationsraten betragen 98% und mehr, was einer biologischen Vollreinigung entspricht. Bei vollständiger biologischer Eliminierbarkeit aller organischen Inhaltsstoffe wird auch eine äquivalente CSB-Elimination erreicht. Da aber bei industriellen Abwässern, speziell auch bei Abwässern der Papierindustrie, die organischen Inhaltsstoffe nicht vollständig eliminiert werden können, liegt der CSB-Eliminationsgrad von Abwässern der Papierfabrikation zwischen 75% und 95%.

#### Abbaubarkeit von Abwasserinhaltsstoffen

Der Grad der Abbaubarkeit ist immer sowohl von den stofflichen Eigenschaften des Substrats als auch von den Bedingungen des Abbauprozesses abhängig. Unter den Bedingungen ist besonders der Adaptionsgrad der abbauenden Biozönose an das entsprechende Substrat von großer Bedeutung.

#### Weitergehender Abbau im statischen Test

Eigene Untersuchungen zum biologischen Abbau mit Hilfe einer modifizierten Variante des diskontinuierlichen Zahn-Wellens-Tests zeigten, dass nach längerer Versuchsdauer eine fortschreitende CSB-Elimination erfolgt. Diese Befunde sprechen dafür, dass die Biozönosen des Belebtschlammes Organismen enthal-

---

---

ten, die eine Elimination dieser Inhaltsstoffe erlauben. Die CSB-Elimination eines typischen Papierfabriksabwassers im statischen Test. erreichte nach 10 Tagen die CSB-Ablaufkonzentration der Abwasserreinigungsanlage von ca. 400 mg/l. Im Verlaufe von weiteren 20 Testtagen konnte der CSB auf ca. 200 mg/l gesenkt werden. In einem weiteren Versuch konnte der Rest-CSB eines biologisch gereinigten Papierfabriksabwassers (Ablauf Nachklärung, großtechnische ARA) innerhalb von 25 Tagen von 150 auf ca. 100 mg/l verringert werden.

---

**Fazit** Eine weitere CSB-Elimination auf biologischem Wege erscheint möglich und die hier genutzten Biozönosen aus den technischen Anlagen scheinen über das Potenzial zur weiteren CSB-Elimination (ca. 50%) verfügen. Allerdings ist die Geschwindigkeit der Prozesse für eine technische Anwendung noch zu gering.

---

### 3.4 Biofilmentwicklung

**Spezifischer Biofilm für „Endstufe“** In der biologischen Abwassertechnik erfolgt in aller Regel die Entwicklung der Biomasse und somit auch der Biofilme hinsichtlich der Organismenpopulationen unter wenig spezifischen Bedingungen. Beim Einsatz von Biofilmprozessen als Endstufe der biologischen Reinigung sollen jedoch Biofilme zum Einsatz kommen, die über einen hohen Anteil an Organismen verfügen, die die schwerer abbaubaren Inhaltsstoffe des vorgereinigten Abwassers eliminieren können.

---

**Wachstum / Kultur von Biofilmen** Die Biofilmentwicklung verläuft in den nachfolgend aufgeführten vier Schritten:

- Kontakt der Zellen mit Biofilmmatrix,
- Stabilisierung der Wechselwirkung durch z.B. van der Waals-Kräfte, elektrochemische Kräfte und im Weiteren chemische Bindungen wie Wasserstoffbrücken- u. Ionenpaar-Bindungen,
- Fixierung der Organismen durch Ausscheidung extrazellulärer Polymere und Vermehrung der Zellen unter Clusterbildung,
- Ausbildung eines dreidimensionalen biologischen Aggregats, dessen Struktur durch die Umfeldbedingungen (Scherkräfte, Substrat- und Sauerstoffversorgung) bestimmt wird und welches letztlich im Fließgleichgewicht mit der Umgebung existiert.

---

**Immobilisierung** Die am meisten verbreitete Form der Immobilisierung von Mikroorganismen ist die Anlagerung an Oberflächen oder in den Poren von Trägermaterialien. Auch mikrobielle Zellaggregate und Belebtschlammflocken stellen eine Form der Immobilisierung dar. Ein Überblick über Leistungen unterschiedlicher Verfahren enthält /18/.

---



## 4 Material und Methoden

### 4.1 Versuchsdurchführung

#### Methodischer Ansatz

Biofilme, die sich im Ablaufbereich von Abwasserreinigungsanlagen unter den dort vorliegenden Bedingungen einer minimalen Verfügbarkeit leicht abbaubarer Substrate und der Gegenwart von organischen Abwasserinhaltsstoffen mit einem geringen Eliminationspotenzial entwickeln, wurden untersucht.

Die Charakterisierung von Biofilmproben diente der Identifikation geeigneter Mischbiozönosen, die als Impfmateriale für einen Aufbau von Biofilmen mit erhöhtem CSB-Eliminationspotenzial in einer Biofilm-Endstufe eingesetzt werden können.

Neben der Untersuchung von Biofilmproben aus Abwasserreinigungsanlagen erfolgte der Betrieb einer Laborversuchsanlage unter substratlimitierten Bedingungen, um Erfahrungen mit der Biofilmentwicklung unter diesen Bedingungen zu sammeln.

---

#### Hauptkomplexe Lösungsweg

Der Lösungsweg gliederte sich somit in drei Hauptkomplexe:

- das Screening nach geeigneten Inokula unter Anwendung statischer Abbautestmethoden
  - die Kultivierung geeigneter Biofilme und Versuche im kontinuierlichen bzw. semikontinuierlichem Betrieb im Labormaßstab,
  - die Ermittlung der Leistungsfähigkeit einer Biofilm-Endstufe als Basis für die Auslegung großtechnischer Systeme.
- 

### 4.2 Probenahmen, beprobte Abwasserreinigungsanlagen

#### ARA-Kenndaten

Informationen zu den Papierfabriken und den Abwasserreinigungsanlagen, von denen Abwasser- und Belebtschlamm-/Biofilmproben untersucht wurden, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Charakteristisch für die Werke 3, 5 (7) und 8, die Zeitungsdruckpapiere aus 100% Altpapier herstellen, sind der Einsatz des Deinkingverfahrens, ein geringer Frischwassereinsatz, ein hoher Grad der Wasserkreislaufschließung, woraus höhere Restbelastungen im biologisch gereinigten Abwasser (Ablauf-CSB) resultieren. Papiersortimente mit höheren Qualitätsansprüchen, wie in den Werken 1 und 2 (4) produziert, erfordern bessere Rohstoffqualitäten, einen höheren Frischwassereinsatz bei geringer geschlossenen Wasserkreisläufen, was letztlich zu geringeren Abwasserkonzentrationen führt. Werk 6 stellt einen Sonderfall einer Zellstofffabrik mit integrierter Papiererzeugung dar, so dass die Abwässer eine von den anderen Papierfabriken abweichende stoffliche Zusammensetzung aufweisen und diese nach der biologischen Behandlung eine höhere Rest-CSB-Belastung zeigen.

---

**ARA-Übersicht**

Tabelle 1 Produktion, Rohstoffeinsatz und ARA-Kenndaten der beprobten Papierfabriken

Werk	Sortiment	Rohstoff	ARA-Konfiguration	Zu-/Ablauf-CSB [mg/l]
1	Tapetenroh-papier, -vlies	Altpapier, Deinking, Zellstoff	MBBR-BB	400 ... 800 40 ... 80
2 (4)	Recycling-Druck- u. Kopier-papiere	Altpapier, Deinking	MBBR-BB	1000 ... 1400 80 ... 130
3	Zeitungsdruck-papier, Deinkingware	Altpapier, Deinking	Anaerob-BB	1200 ... 1600 200 ... 300
5 (7)	Zeitungsdruck-papier	Altpapier, Deinking	Anaerob-BB	1000 ... 1400 200 ... 350
6	holzfreie gestrichene, ungestrichene grafische Papiere, Zellstoff	Holz, Zellstoff	Anaerob-Teilstrom-BB	2000 ... 2500 350 ... 450
8	Zeitungsdruck-papier	Altpapier, Deinking	Anaerob/MBBR-BB	1600 ... 2000 270 ... 350

**Probenahmeorte** Aus den Abwasserreinigungsanlagen der in Tabelle 1 aufgeführten Papierfabriken wurden jeweils folgende Proben entnommen:

- Ablauf der Vorklä rung (ARA-Zulauf) – qualifizierte Stichprobe,
- Ablauf der Nachklärstufe - qualifizierte Stichprobe,
- Belebtschlamm aus der Belebungsstufe bzw. Rücklaufschlamm - qualifizierte Stichprobe bzw.
- Biofilme, Probenahme an ausgewählten Anlagenstellen (Ablaufleitungen, Wandungen der Nachklärbecken, Überlaufwehre).

Die Werke 2 (4) und 5 (7) wurden jeweils zweimal untersucht, wobei hier unterschiedliche Produktionszustände (Sorten) mit damit bedingter veränderter Abwasserzusammensetzung vorlagen.

**Probenahmebedingungen**

Die Probenahmen erfolgten generell in Phasen störungsfreien, stabilen Anlagenbetriebes. Untypische Betriebszustände im Zusammenhang mit Produktionsumstellungen und -stillständen wurden nicht beprobt.

Von den Abwasserproben (ARA-Zulauf/-Ablauf) wurden jeweils 20l Probe, von den Belebtschlamm-/Biofilmproben je 5-10l entnommen. Zur weitgehenden Aufrechterhaltung der Milieubedingungen für die Mikroorganismenpopulationen wurden die Belebtschlamm- und Biofilmproben bis zum Einsatz in den Batchtests bei Raumtemperatur unter schwacher Belüftung gelagert.

Bei den Probenahmen wurden relevante Randbedingungen (Probenahmeort, -zeitpunkt, Produktionsangaben) und wesentliche Betriebsparameter der jeweiligen Abwasseranlage registriert. Ein Zeitfenster von ca. 4 Wochen vor den Probenahmen wurde auf besondere Vorkommnisse wie z.B. zurückliegende Betriebsstörungen, Änderungen der Anlagenfahrweise u. ä. geprüft.

**4.3 Abwasseranalytik**

**Messverfahren** Die folgenden standardisierten Messmethoden wurden angewandt:

Tabelle 2 Normmethoden (Wasser, Abwasser)

Parameter	Messmethode
BSB <sub>5</sub>	DIN EN 1899-1:1998-05
CSB	Küvettest (hoch-lange)
TOC	DIN EN 1484:1997-08
Elektrische Leitfähigkeit	DIN 38409-2:1987-03
pH-Wert	DIN 38404-5:1984-01
Temperatur	DIN 38404-4:1976-12

**LC-OCD Analytik**

Die eingesetzte LC-OCD-Analytik diente der Beschreibung der chemisch-physikalischen Konstitution des Rest-CSB und ermöglichte die Zuordnung der Rest-CSB-Komponenten ausgehend von der Molekülmassenverteilung zu den in Tabelle 3 aufgeführten Stoffklassen und somit eine weitergehende Bewertung der Eliminationsprozesse /19, 20 /.

Tabelle 3 LC-OCD-Analytik, Stoffklassencharakterisierung

Stoffklasse	Molekulargewicht
Biopolymere	>>20.000 D
Humic Substances (HS)	ca. 1.000 D
HS-Building-Blocks	300 ... 500 D
Neutrals (LMC)	<350 D
Acids (LMC)	<350 D

#### 4.4 Biofilm-/Belebtschlammanalytik

##### Charakterisierungsmethoden

Die Charakterisierung der Belebtschlamm- bzw. Biofilmproben erfolgte durch die Bestimmung des Trockengehalts, des Gehalts an Stickstoff und Phosphor, der spezifischen Atmungsaktivität/O<sub>2</sub>-Zehrung (Respirometertest) sowie durch die Beurteilung des mikroskopischen Bildes (Struktur, Leitorganismen, ...). An ausgewählten Biofilmproben mit erhöhtem CSB-Eliminationspotenzial wurde eine zusätzliche Charakterisierung mit speziellen molekularbiologischen Methoden vorgenommen /21/. So erfolgte ein Screening der Populationszusammensetzung einer dieser Biofilmproben im Vergleich zum Belebtschlamm mittels Fluoreszenz in-situ Hybridisierung. Außerdem wurde die mikrobielle Diversität eines auf Trägerkörpern kultivierten Biofilmes während des Betriebs der Laborversuchsanlage mittels rRNA-Fingerprintmethoden ermittelt. Die folgenden Messverfahren wurden angewandt:

Tabelle 4 Methoden zur Biofilmcharakterisierung

Parameter	Messmethode
Trockengehalt	DIN 38409-2:1987-03
Glühverlust, -rückstand	DIN 38409-2:1987-03
Stickstoff (TKN)	DIN EN 13342:2001-01
Phosphor (Gesamtphosphat)	DIN 38414-12:1986-11
O <sub>2</sub> -Zehrung (Respiration)	DIN EN ISO 9408:1999
Molekularbiologische Methoden: Screening der Populationszusammensetzung von Belebtschlamm u. Biofilm	Fluoreszenz in-situ Hybridisierung (FISH)
Mikrobielle Diversität	rRNA-Fingerprint Sequenzierung einer 16S rRNA-Gen Klonbibliothek
Mikroskopie	Mikroskopisches Bild von Belebtschlamm

#### 4.5 Modifizierter aerober Eliminationstest (Batchtest) in Anlehnung an den Zahn-Wellens-Test

##### Statischer Zahn-Wellens-Test

Der Zahn-Wellens-Test nach EN ISO 9888:1999-11 als statischer Test auf „potentiell vorhandene Abbaubarkeit“ dient der Bestimmung der Elimination und der aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Substanzen. Stoffe, die unter den Testbedingungen keine ausreichende Veränderung erfahren, gelten als biologisch nicht oder schwer abbaubar. Charakteristisch für den Test sind eine hohe Bakterienkonzentration, eine lange Verweilzeit, relativ hohe Substratkonzentrationen und optimale Adaptionsbedingungen. Erfasst werden neben dem biologischen Abbau alle wesentlichen Eliminationsmechanismen (Strippung, Fällung, Adsorption am Belebtschlamm), die in aeroben biologischen Abwasserreinigungsanlagen auftreten.

### Zahn-Wellens-Testprinzip

Das Testprinzip des Zahn-Wellens-Tests zeigt schematisch die Abbildung 1.

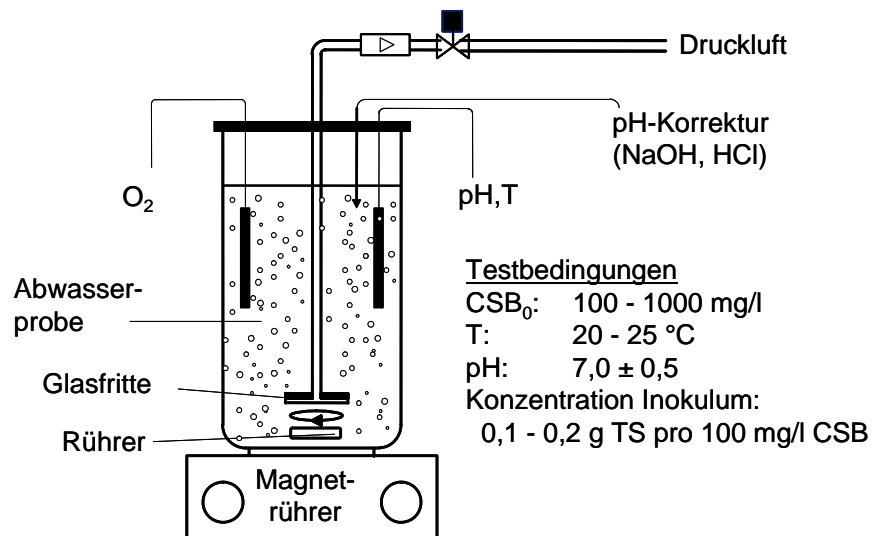


Abbildung 1 Messprinzip Zahn-Wellens-Test

Nach Einstellen der Testbedingungen werden die mit Belebtschlamm versetzten Abwässer unter Rühren kontinuierlich belüftet. Die Probenahmen erfolgen zu Testbeginn, nach 3h, 1, 3, 7, 14, 21 und ggf. 28 Tagen. Durch regelmäßige CSB-(oder auch TOC-) Messungen wird der Abbauperlauf charakterisiert und der Test beendet, wenn eine über mehrere Tage konstante Elimination >90 % erreicht ist.

### Aerobe Batch-tests

Im Projekt wurde der Zahn-Wellens-Test modifiziert zur Bestimmung der CSB-Elimination eingesetzt, wobei die Testbedingungen den zu untersuchenden Problemstellungen angepasst wurden.

Da jeweils alle Testmedien der gleichen Anlage entstammen, konnten die Biofilm- bzw. Belebtschlammproben ohne Vorbehandlung eingesetzt werden. Dadurch entsprachen die Testbedingungen weitgehend den in realen großtechnischen Abwasserreinigungsanlagen vorliegenden Bedingungen. Milieuänderungen, wie sie beim Standard-Zahn-Wellens-Test durch die dort übliche Wäsche des Inokulums und die dadurch bedingte Verdünnung auftreten, konnten vermieden werden.

Eine Gegenüberstellung der wesentlichsten eingesetzten Testbedingungen im Vergleich zum standardisierten Zahn-Wellens-Test nach DIN EN ISO 9888:1999-11 enthält die Tabelle 5.

Tabelle 5 Testbedingungen der durchgeführten aeroben Batchtests und des standardisierten Zahn-Wellens-Tests

Kriterium	Zahn-Wellens-Test	Aerober Batchtest
Analytik	CSB-/DOC-Bestimmung (filtrierte Probe)	CSB-Bestimmung (filtrierte Probe)
Inokulum	Belebtschlamm	Belebtschlamm, Biofilm
Inokulum-Vorbehandlung	Wäsche mit Leitungswasser oder Nährstoff-Testmedium	ohne Vorbehandlung
CSB-Testansatzkonzentration	100 - 1000 mg/l	ARA-Ablaufkonzentration
TS- Konzentration	0,2 - 1,0 g/l	0,2 g/l
Initiale Schlammbelastung (B-TS)	0,5 - 1,0 g CSB/g BS-TS	0,5 - 2,5 g CSB/g BS/BF-TS
Nährstoffe	C : N : P = ca. 100 : 3 : 300	
Temperatur	20 - 25 °C	
pH-Wert	7,0 ± 0,5	
Inokulumaktivität	Bestimmung der Elimination einer abbaubaren wasserlöslichen organischen Substanz (Referenzansatz) bzw. respirometrische Bestimmung der Sauerstoffverbrauchsrate (OVR)	
Blindwertansätze	Testansatz mit Inokulum und dest. Wasser	
Versuchsdauer, Testabbruchkriterium	max. 28d bzw. bei Erreichen eines konstanten Abbaugrades >80%	ca. 35d bzw. früher, wenn über 5d keine CSB-Änderung festgestellt wird
Probenahme	Testbeginn, 3h, 7d, 14d, 21d, 28d (bzw. bei vorzeitigem Testabbruch an den letzten beiden Tagen)	Testbeginn, 1-2x wöchentlich, Testende
Testansätze	mindestens Doppelbestimmungen	

## 4.6 Auswertemethodik der aeroben Batchtests

### Verfahren zur Ermittlung der Testendwerte

Um die Eliminationsleistung der verschiedenen Belebtschlamm- bzw. Biofilmproben vergleichen zu können, sind die am Ende der aeroben Batchtests erreichten CSB-Eliminationen maßgeblich.

Zur Ermittlung der jeweiligen Endwerte der Messreihen können prinzipiell herangezogen werden:

- der Testendwert (35d-Messwert) ohne Berücksichtigung des Testverlaufs bzw.
- ein nach Linearisierung aus dem Testverlauf berechneter Testendwert.

### Linearisierung in Anlehnung an LINEWEAVER-BURK

Um bei der Auswertung der Testreihen ein möglichst gering von Messfehlern beeinflusstes Ergebnis zu erhalten, wurde nicht der jeweils am Testende (35. Versuchstag) ermittelte Konzentrations- bzw. Eliminationswert herangezogen, sondern ein unter Berücksichtigung des Testverlaufs ab dem 7. Versuchstag berechneter Testendwert.

Da sich die Verläufe der Eliminationskurven generell asymptotisch dem jeweiligen Endwert nähern, konnte ein Linearisierungsverfahren in Anlehnung an LINEWEAVER-BURK /22/ angewendet werden.

Das Vorgehen nach diesem, speziell für die Michaelis-Menten-Kinetik entwickelten Verfahren wird nachfolgend am Beispiel einer Abbaustreihe (Belebtschlamm, Biofilm) aus Werk 6 gezeigt.

### Auswertungsbeispiel

Die relevanten Eliminationswerte (vgl. Tabelle 6) wurden in ein reziprokes Koordinatensystem transformiert, für die transformierten Werte die linearen Regressionskoeffizienten ermittelt und abschließend durch Rücktransformation der Testendwert berechnet (vgl. Abbildung 2).

Durch dieses Vorgehen kann der Einfluss der Streuung der Einzelwerte im Verlauf der Messung minimiert und eine möglichst objektive Endpunktbestimmung erreicht werden.

Tabelle 6 Eliminationswerte und transformierte Werte (Beispiel)

t [d]	eta-CSB [%]	1/t [1/d]	1/eta-CSB [1/%]
6,7	13,0	0,149	7,67
13,7	19,6	0,073	5,10
18,7	21,8	0,053	4,59
21,7	24,0	0,046	4,17
25,8	29,1	0,039	3,44
28,8	27,0	0,035	3,70
32,7	26,0	0,031	3,85
34,7	25,4	0,029	3,94

Linearisierungs-  
gleichung:

$$\frac{1}{\text{CSB} [\%]} = b \frac{1}{t} + a$$

b, a ... Koeffizienten der linearen  
Regression

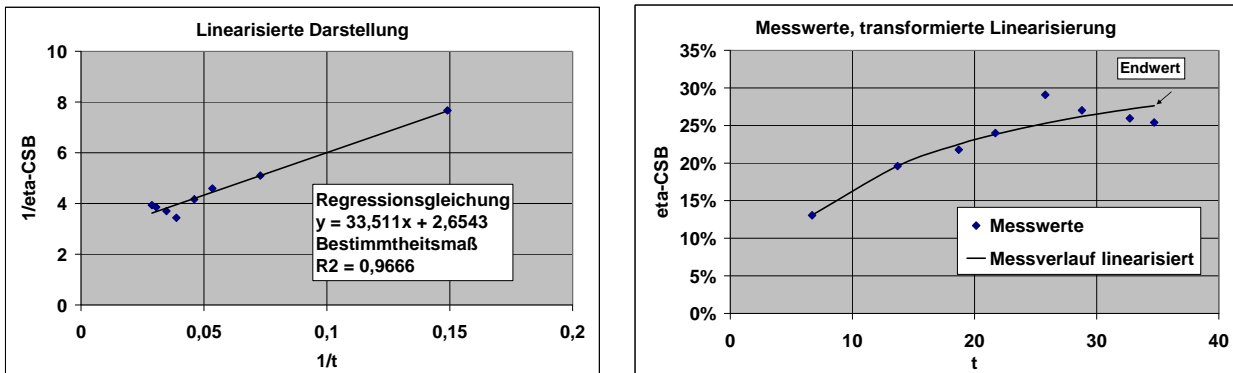


Abbildung 2 Grafische Darstellung der Endpunktbestimmung der aeroben Batchtests (Beispiel)

**Blindwerte, Referenzansätze** Zur Kontrolle der Aktivität der eingesetzten Belebtschlämme bzw. Biofilme wurden parallel zu den Testansätzen Blindwert- und Referenzansätze durchgeführt.

## 4.7 Einrichtung der Laborversuchsanlage

**Einrichtung Laborversuchsanlage** Basierend auf einer standardisierten (gemäß DIN/DEV 38412-L24, L26) Laborkläranlage, bestehend aus Vorratsgefäß, Dosierpumpe, Luftmengenmesser, Fritte, Belüftungsgefäß, Mammutpumpe, Absetzgefäß und Probensammelgefäß, wurde eine Laborversuchsanlage (LVA) aufgebaut, die sowohl für Sequenz Batch (SB) als auch kontinuierliche Versuche zur Biofilmkultivierung auf Trägerkörpern geeignet war.

**Versuchsaufbau** Das Kernstück der Laborversuchsanlage bildete ein voll durchmischter, belüfteter Reaktor mit einem Nutzvolumen von ca. 4 Litern, in dem Trägerkörper (Kaldnes K2, vgl. Abbildung 3) eingebracht wurden. Der Anlagenzulauf (Abwasser) wurde über eine Dosierpumpe aus einem Vorratsgefäß gespeist. Die Sauerstoffzufuhr erfolgte über Druckluftbelüftung mittels Fritte am Reaktorboden. Relevante Betriebsbedingungen des Biofilmreaktors wie u.a. Verweilzeiten, hydraulische Belastungen wurden den Versuchserfordernissen entsprechend eingestellt, Prozesskenngrößen wie  $\text{O}_2$ -Gehalt, pH, Temperatur wurden durch die integrierte Messtechnik überwacht.



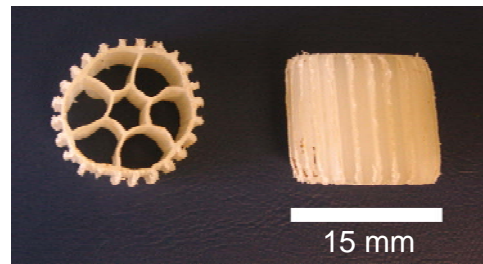


Abbildung 3 Trägerkörper zur Biofilmanzucht

**LVA-Erweiterung** Um den geplanten Anlagenbetrieb nach SB-Prinzipien zu realisieren war es erforderlich, die vorhandene Laborkläranlage entsprechend zu erweitern bzw. umzurüsten. Diesbezüglich wurden folgende Regeleinheiten integriert:

- Pumpensteuerung (Zeit, Füllstand) zur periodischen Reaktorbefüllung mit dem zu behandelnden Abwasser,
- Druckluftsteuerung (Zeit) zur periodischen Belüftung des Reaktors,
- Pumpensteuerung (Zeit) zum periodischen Abzug des behandelten Abwassers.

### Schema

Die Abbildung 4 zeigt den Aufbau der Anlage schematisch.

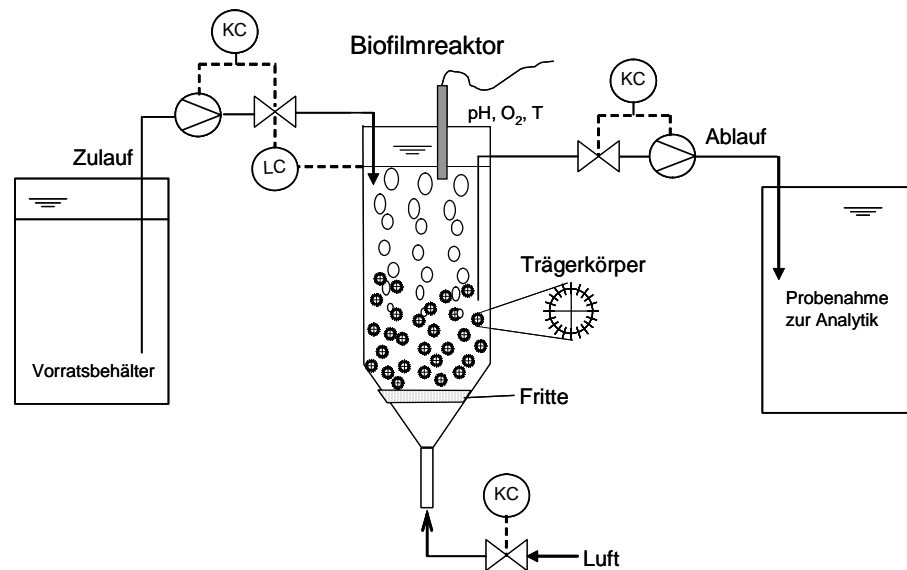


Abbildung 4 Laborversuchsanlage, Prinzipschema

## 5 Charakterisierung von Biofilmen aus Abwasserreinigungsanlagen

### 5.1 Vorgehen (Testplanung, -durchführung)

#### Anpassung Batchtest, Testmilieu

Der erste Arbeitsschritt war auf die Präzisierung der Arbeitsmethodik für die Durchführung der durchzuführenden aeroben Abbautests ausgerichtet. In einer Reihe von Voruntersuchungen wurde die geeignete Testdurchführung ermittelt. Die wesentlichsten Testbedingungen, verglichen mit denen des standardisierten Zahn-Wellens-Tests sind in Tabelle 5 im Abschnitt 4.4 aufgelistet.

#### Planung der Abbautests

Zur Bestimmung des CSB-Eliminationspotenzials von Biofilmen aus dem Bereich der Nachklärung aerober Abwasserreinigungsanlagen wurden auf Grundlage der in Vorversuchen festgelegten Bedingungen je Probenahme (Belebtschlamm, Biofilm, Abwasser) die in Tabelle 7 aufgeführten Tests durchgeführt.

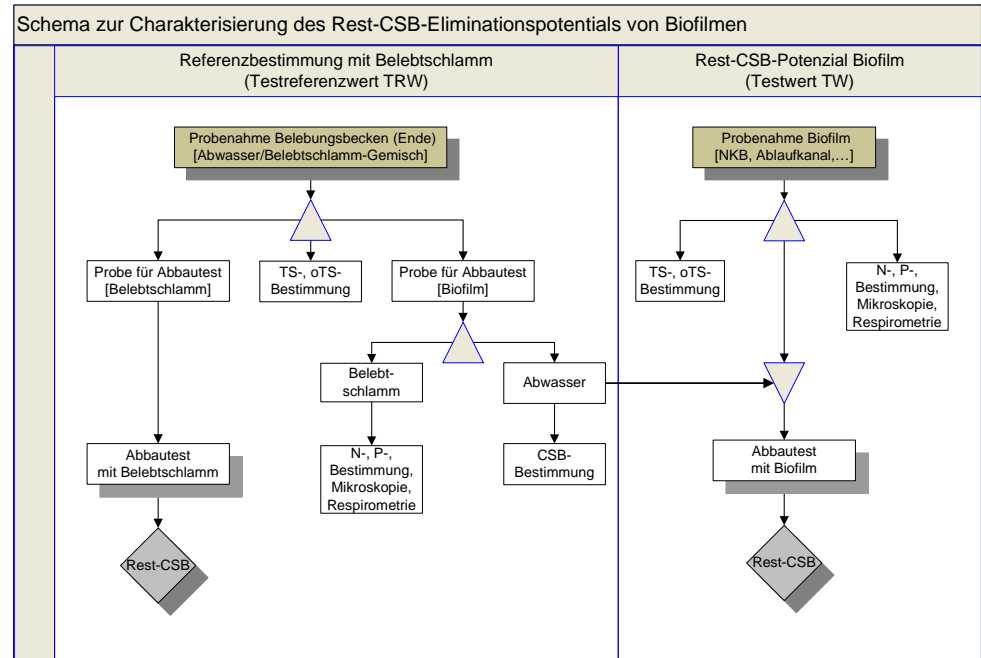
Tabelle 7 Abbautests, Planung

Abbautest		Testmedien		Ergebnis
		Biomasse	Wasser	
Biofilm	Test	Biofilm	Ablauf ARA	Eliminationspotenzial Biofilm
	Blindwert		dest. Wasser	
Belebtschlamm	Test	Belebtschlamm	Ablauf ARA	Eliminationspotenzial Belebtschlamm
	Blindwert		dest. Wasser	
Biofilm/ Belebtschlamm	Test	Biofilm/ Belebtschlamm	Ablauf ARA	Eliminationspotenzial Biofilm/Belebtschlamm (evtl. synerg. Effekt)
	Blindwert		dest. Wasser	

**Testschema**

Das Vorgehen von den Probenahmen, der Testdurchführung bis hin zur Bestimmung der Testwerte ist in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 8 CSB-Eliminationspotential von Biofilmen**



Die am Testende erhaltenen CSB-Werte dienen der Bewertung des CSB-Eliminationspotentials der Biofilme.

**LC-OCD Analytik**

Von allen durchgeführten Batchtests wurden am Testende Rückstellproben für die LC-OCD-Analytik genommen. Diese Proben wurden konserviert, indem sie über ein Membranfilter (0,45 µm) filtriert und anschließend bei 89°C sterilisiert wurden. Analysiert wurden dann Proben, bei denen die Auswertung ein hohes CSB-Eliminationspotential aufzeigte. Als Referenzproben wurden sowohl die unbehandelten Ablaufproben als auch die entsprechenden Proben der Referenztests mit Belebtschlamm untersucht.

## 5.2 Charakterisierung der Belebtschlämme und Biofilme

### Biomasse- Eigenschaften

Wesentliche physikalisch-chemische Parameter der aus den Abwasserreinigungsanlagen entnommenen Belebtschlamm- bzw. Biofilmproben zeigt die Tabelle 9.

Tabelle 9 Biofilm- und Belebtschlammproben, Kennwerte

Werk/Probe	TS	GV	TKN	TKN	Pges	Pges
	g/l	%	mg/g TS	mg/g oTS	mg/g TS	mg/g oTS
1/BS	11,4	68,8	46,3	67,3	5,8	8,4
1/BF	17,8	69,9	47,4	67,8	5,7	8,2
2/BS	10,6	61,5	44,9	73,0	3,6	5,9
2/BF	6,0	66,9	49,4	73,8	4,6	6,9
3/BS	8,2	77,9	65,4	84,0	4,7	6,0
3/BF	12,2	75,2	63,2	84,0	4,6	6,1
4/BS	12,1	62,0	45,1	72,7	3,5	5,6
4/BF	15,1	65,2	47,8	73,3	4,2	6,4
5/BS	29,1	47,6	34,4	72,3	2,8	5,9
5/BF-1	35,8	44,9	28,1	62,6	1,9	4,2
5/BF-2	31,2	42,9	26,3	61,3	1,8	4,2
6/BS	15,6	58,3	36,7	63,0	3,6	6,2
6/BF-1	26,4	57,3	39,3	68,6	3,0	5,2
6/BF-2	29,3	55,5	39,4	71,0	2,7	4,9
7/BS	14,8	45,9	35,2	76,7	3,3	7,2
7/BF-1	12,4	43,5	29,0	66,7	2,2	5,1
7/BF-2	16,4	45,0	28,9	64,2	2,2	4,9
8/BS	8,9	51,1	44,7	87,5	4,5	8,8
8/BF-1	12,3	42,7	34,1	79,9	2,2	5,2
8/BF-2	8,6	45,9	37,1	80,8	3,2	7,0
MW	16,7	56,4	41,1	72,5	3,5	6,1
MIN	6,0	42,7	26,3	61,3	1,8	4,2
MAX	35,8	77,9	65,4	87,5	5,8	8,8
STDAbw	8,7	11,5	10,7	7,7	1,2	1,3
rel.STDAbw	52%	20%	26%	11%	34%	22%

Der TS-Gehalt der Belebtschlämme und Biofilme ist stark abhängig von den Probenahmen und dient im Wesentlichen der Dosierung der Schlammproben in den Testansätzen. Der organische Anteil der Schlämme, gemessen als Glühverlust beträgt im Mittel 56% und stellt einen typischen Praxiswert dar. Auch der Stickstoff- und Phosphorgehalt der Bioschlämme bewegt sich in einem relativ begrenzten Bereich (besonders bezogen auf die organische TS). Die Belebtschlämme wiesen im Vergleich zu den Biofilmproben meist einen etwas höheren Stickstoff- und Phosphor-Gehalt auf. Die N- und P-Werte der Belebtschlämme lagen durchweg an der unteren Grenze der empfohlenen Wertebereiche.

## 6 Auswertung der Batchtests und Auswahl von Biofilmen

**Vorgehen** Die in den Abbautests gewonnenen Daten wurden einer gemeinsamen systematischen Auswertung unterzogen und geeignete Biofilme für die weiteren kontinuierlichen Versuche unter Nutzung einer Laborversuchsanlage ausgewählt.

### 6.1 Eliminationspotential von Biofilmen

**Bewertung der Biofilmproben** Im ersten Schritt wurden die mit Biofilmproben bzw. Belebtschlamm/Biofilm-Gemischen erhaltenen Resultate der Abbautests mit den Referenztests (Belebtschlamm als Inokulum) aus der gleichen betrieblichen Abwasserreinigungsanlage verglichen. Da die Versuchsdurchführung keine Verdünnung der Abwässer vorsah, konnten die ermittelten CSB-Konzentrationen direkt miteinander verglichen werden. Dadurch gelang es, auch relativ geringe Unterschiede im CSB-Niveau der Proben nachzuweisen.

**Datenbasis** Zur Bewertung des CSB-Eliminationspotentials der Biofilmproben wurden die in Tabelle 10 aufgeführten Test- und Referenzwerte herangezogen.

Tabelle 10 Test- und Referenzwerte

Daten zur Ermittlung des Eliminationspotenzials				
	CSB <sub>Ablauf ARA</sub>	CSB <sub>Abbautest BS</sub>	CSB <sub>Abbautest BF</sub>	CSB <sub>Abbautest BS/BF</sub>
Bedeutung	CSB-Wert zum Zeitpunkt der Probenahme, der für den Normalbetrieb der ARA typisch ist.	CSB-Wert, der im Batchtest mit der in der Belebung vorhandenen Biozönose erreicht wird.	CSB-Wert, der am Ende der Batchtests mit der suspendierten Biofilm-Biozönose erreicht wird.	CSB-Wert, der im statischen Abbautest am Testende mit einem Gemisch der suspendierten Biofilm-/Belebtschlamm-Biozönose erreicht wird.
	<b>Anlagenreferenzwert (ARW)</b>	<b>Testreferenzwert (TRW)</b>	<b>Testwert (TW)</b>	<b>„alternativer“ Testwert (ATW)</b>

**Interpretation Testergebnisse** Bei der Interpretation der Ergebnisse der Abbautests wurden zunächst der Anlagenreferenzwert (ARW), der Testreferenzwert (TRW) und die Testwerte (TW) betrachtet. Im Falle, dass der „alternative“ Testwert (ATW) bessere Ergebnisse als der Testwert lieferte, wurde auch dieser zur Bewertung der Testergebnisse mit herangezogen.

### CSB- Eliminations- potenzial

Das CSB-Eliminationspotenzial der Biofilme kann unter Bezugnahme auf den CSB-Wert des zum Test eingesetzten Anlagenablaufs (ARW) oder auf den Testreferenzwert (TRW) bezogen, wie folgt, angegeben werden:

$$\text{Elim}_{\text{CSB-ARW}} [\%] = \frac{\text{ARW} - \text{TW}}{\text{ARW}} * 100 ,$$

$$\text{Elim}_{\text{CSB-TRW}} [\%] = \frac{\text{TRW} - \text{TW}}{\text{TRW}} * 100$$

bzw.

$$\text{Elim}_{\text{CSB-TRW}} [\%] = \frac{\text{TRW} - \text{ATW}}{\text{TRW}} * 100 .$$

Zur vergleichenden Bewertung der Eliminationspotenziale der verschiedenen Biofilme sowie Biofilm-/Belebtschlamm-Gemische wurden die auf den Testreferenzwert bezogenen Eliminationswerte ( $\text{Elim}_{\text{CSB-TRW}}$ ) verwendet.

### Testverlauf und Eliminations- werte

Die Abbildung 5 veranschaulicht am Beispiel des Verhaltens einer Belebtschlamm- bzw. Biofilmprobe aus Werk 6 das praktizierte Vorgehen zur Ermittlung des Eliminationspotenzials dieser Biozönosen im aeroben Batchtest.

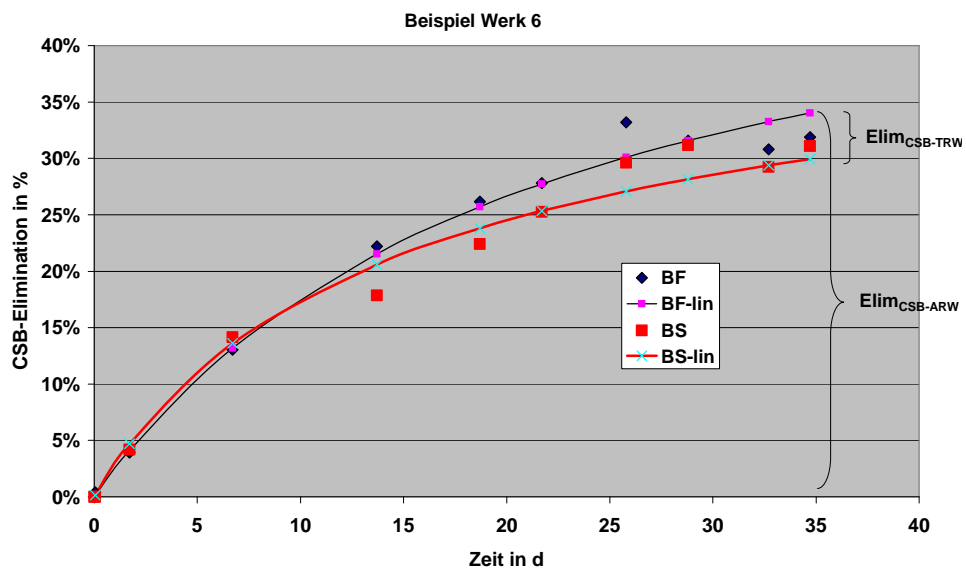


Abbildung 5 Testverlauf und Testwerte (Auswertebeispiel)

### Testergebnisse

In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen sind die Ergebnisse der aeroben Batchtests zusammengestellt. Diese basieren auf den linearisierten Endwerten der Tests.

**CSB-Konzentrationen am Testbeginn und Testende**

Abbildung 6 zeigt die zu Testbeginn (ARW) und am jeweiligen am Ende der Batchtests ermittelten CSB-Konzentrationen (ARW-Bel, TRW, TW, ATW).

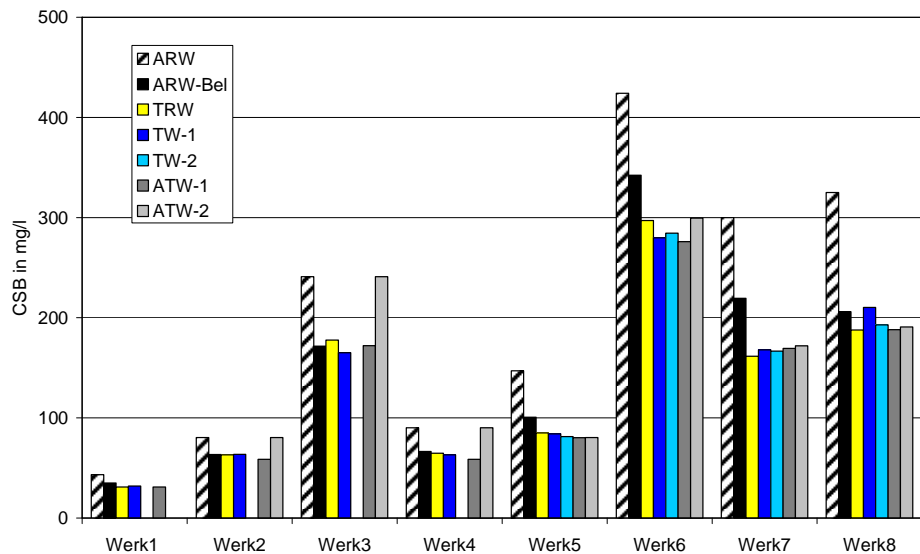


Abbildung 6 Anlagenreferenzwerte und Testwerte im aeroben Batchtest

Die Anlagenreferenzwerte (ARW) zeigten im Vergleich zu den am Ende der Batchtests ermittelten Werten erwartungsgemäß die höchste Restbelastung.

**CSB-Eliminationen am Testende**

Die Abbildung 7 zeigt die in den Testreihen erreichten CSB-Eliminationen. Am jeweiligen Testende wurden CSB-Eliminationen zwischen ca. 20% und 45% erreicht, wobei die Biofilm- und die Testreferenzproben (Belebtschlämme) allerdings oft nur geringe Unterschiede zeigten.

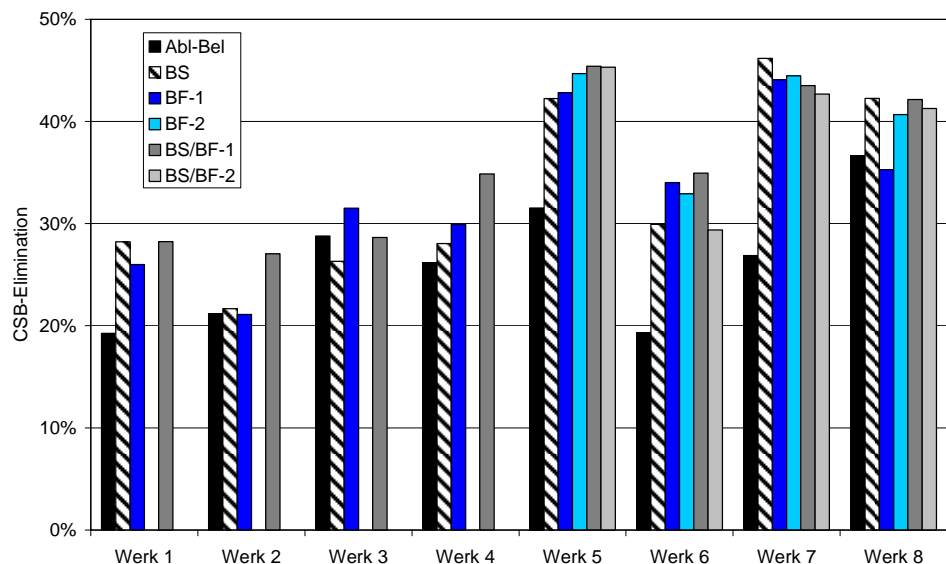


Abbildung 7 CSB-Elimination von Biofilmen, Belebtschlämmen und Belebtschlamm-/Biofilm-Gemischen im aeroben Batchtest

**CSB-  
Eliminationen  
am Testende,  
relativ zum Test-  
referenzwert**

Abbildung 8 veranschaulicht die in den Testreihen erreichten CSB-Eliminationen bezogen auf den jeweiligen Testreferenzwert (Belebtschlamm).

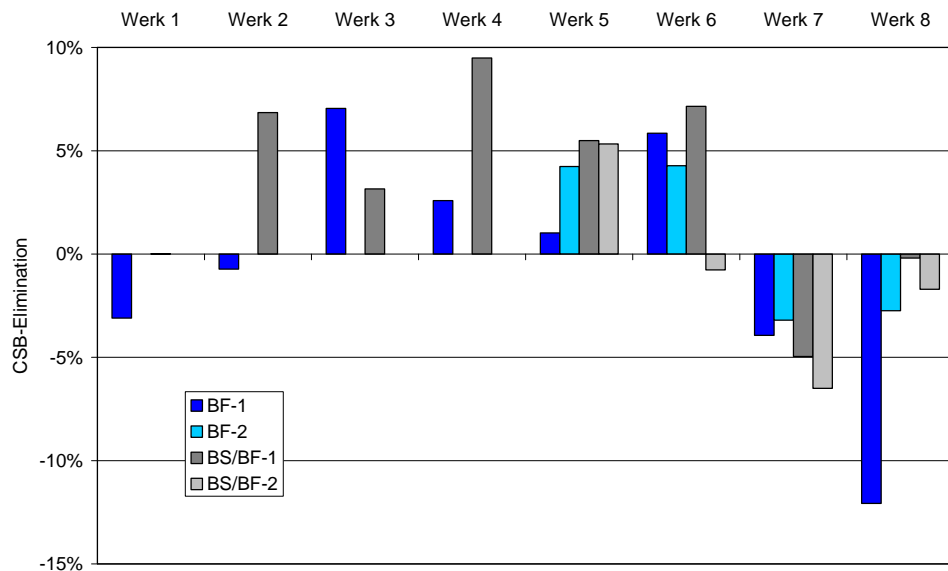


Abbildung 8 CSB-Eliminationspotential von Biofilmen und Belebtschlamm-/ Biofilm-Gemischen im Vergleich zum Testreferenzwert (Belebtschlamm)

Die nachfolgenden Biofilme bzw. Belebtschlamm-/Biofilmgemische zeigten im Vergleich zum jeweiligen Testreferenzwert (Belebtschlamm), eine um maximal 9% erhöhte CSB-Elimination:

- Werk 2 - BS-/BF,
- Werk 3 - BF u. BS-/BF,
- Werk 4 - BF u. BS-/BF,
- Werk 5 - BF-1/2 und BS-/BF-1/2 bzw.
- Werk 6 - BF-1/2 und BS-/BF-1.

In den anderen Fällen wiesen die Belebtschlammproben höhere CSB-Eliminationen als die Biofilme bzw. Belebtschlamm-/Biofilmgemische auf.



**Zusammenfassung der Testergebnisse**

In Tabelle 11 sind die nach linearisierter Auswertung (vgl. 4.6) ermittelten Endwerte und die erreichten CSB-Eliminationen zusammengestellt.

Tabelle 11 Testwerte und CSB-Eliminationen der Batchtests

Werk	ARW	TRW	TW	CSB-Elimination	
	mg/l	mg/l	mg/l	ARW	TRW
Werk 1	43	31	32	26%	-3,1%
Werk 2	80	63	63	21%	-0,7%
Werk 3	241	178	165	32%	7,1%
Werk 4	90	65	63	30%	2,6%
Werk 5	147	85	81	45%	4,2%
Werk 6	424	297	280	34%	5,9%
Werk 7	300	161	167	44%	-3,2%
Werk 8	325	188	193	41%	-2,7%

Anmerkung: TW/TRW-Angaben bei mehr als einer untersuchten Biofilmprobe jeweils für die Probe mit der höheren CSB-Elimination

**Diskussion der Testergebnisse**

Generell war bei allen Batchtests ein Potenzial zu einer weiteren CSB-Elimination in der Größenordnung von 20%...40% zu verzeichnen. Der Unterschied der Elimination durch Belebtschlamm bzw. durch die Biofilm-Biomassen war weniger signifikant. Nur in 4 Fällen zeigten die Tests mit Biofilmbiomasse eine etwas höhere CSB-Elimination. Eine Ursache hierfür könnte in der nicht vermeidbaren Zerstörung der Biofilmstruktur während der Probenahme begründet sein.

**6.2 Stoffliche Charakterisierung der CSB-Restbelastung (LC-OCD)****LC-OCD Analytik**

Die Resultate der LC-OCD-Untersuchungen an ausgewählten Proben lieferten Aussagen zur chemisch-physikalischen Konstitution der CSB-Restbelastung bzw. einer möglichen Veränderung im Laufe der durchgeführten aeroben Batchtests. So konnte die Molekülmassenverteilung der Rest-CSB-Komponenten ermittelt und diese bestimmten Stoffgruppen zugeordnet werden.

**LC-OCD-  
Ergebnisse**

In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind Konzentrationen und relative Anteile der Stoffgruppen der organischen Restbelastung als OC am Ende der Abbautests (n-ABL: Blindwert ohne Biomasse; n-BS: bzw. n-BF: Testwert mit Belebtschlamm bzw. Biofilm) dargestellt.

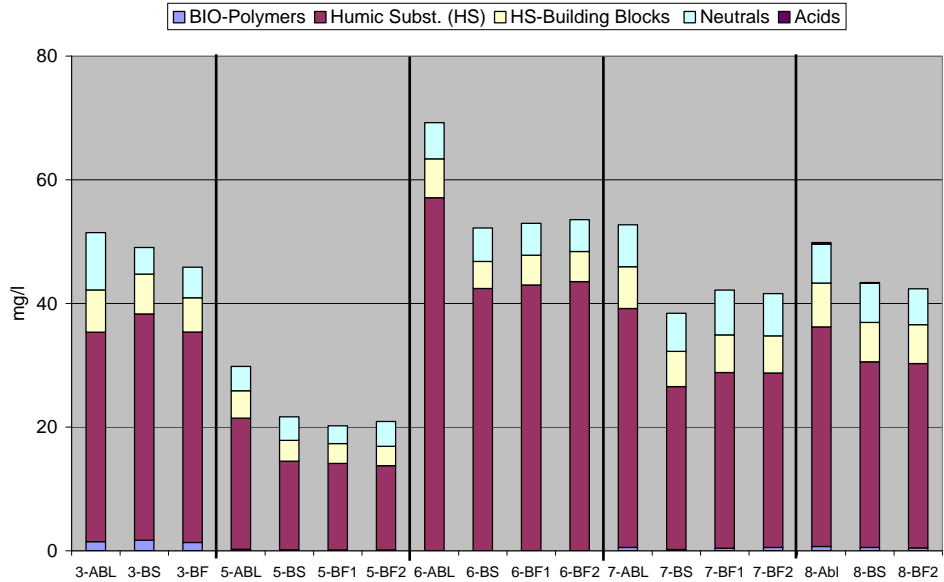


Abbildung 9 OC-Charakteristik der Restbelastung am Ende der Batchtests, Konzentrationen

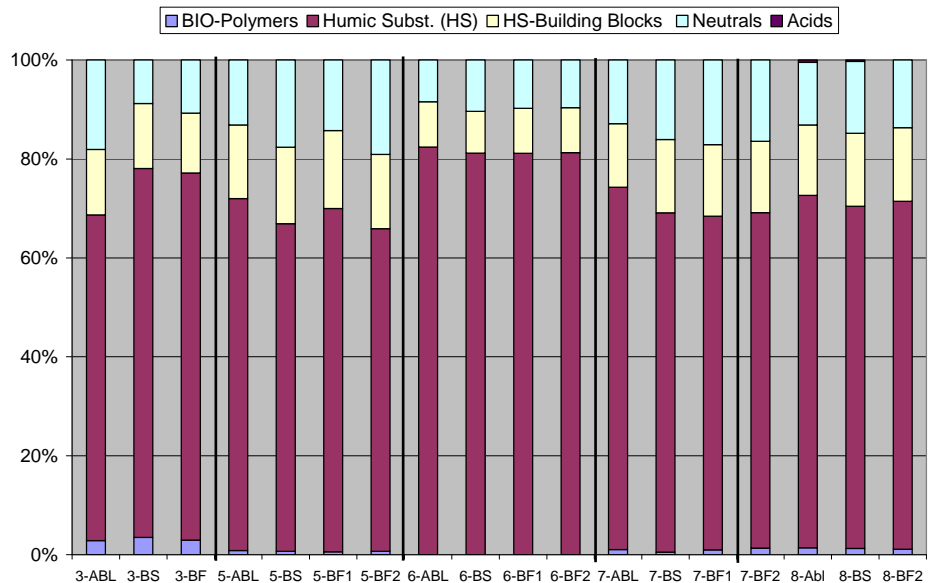


Abbildung 10 OC-Charakteristik der Restbelastung am Ende der Batchtests, relative Anteile der Stoffgruppen

---

<b>Interpretation der LC-OCD-Ergebnisse</b>	<p>Die OC-Konzentrationen am Ende der Batchtests wiesen für die Ablaufproben (Blindwerte ohne Inokulum) generell höhere OC- Werte auf, als die Proben mit BS, BF. Innerhalb der Messreihen sind keine signifikanten Unterschiede der Stoffgruppen in Abhängigkeit des Inokulum-Einsatzes (BS, BF) nachweisbar. Die relative Verteilung der OC-Stoffgruppen der Abwasserproben entspricht den bisherigen Kenntnissen /23/, d.h.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• HS/HS-Building-Blocks (300 -1.000D): ca. 70-90%,</li><li>• höhermolekulare Anteile (&gt;&gt;20.000D): nur geringe Anteile (&lt;5%),</li><li>• Neutralstoffe: 10-20%</li><li>• LMW-Säuren: nicht nachweisbar.</li></ul>
---	---

---

### 6.3 Auswahl eine Inokulums und molekularbiologische Charakterisierung

<b>Biofilmauswahl</b>	<p>Auf der Grundlage der Ergebnisse der aeroben Abbautests wurden folgende Biofilmproben mit einem im Vergleich zum Belebtschlamm erhöhten CSB-Eliminationspotential für die nachfolgend geplanten kontinuierlichen Laborversuche ausgewählt:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Biofilm-1 / Biofilm-2 aus Werk 6</li></ul> <p>Biofilm 1 und als Vergleichsprobe der Belebtschlamm aus dieser Anlage wurde einer molekularbiologischen Charakterisierung unterzogen.</p>
-----------------------	---

---

### Molekularbiologische Charakterisierung von Belebtschlamm u. Biofilm

Das Ziel der Untersuchung war ein grobes Screening der Populationszusammensetzung eines Belebtschlammes und Biofilms, die eine hohe Eliminationsleistung erwarten ließen. Prinzipiell wurde eine quantitative Analyse der Mischpopulationen von Belebtschlamm und Biofilm 1 aus Werk 6 mittels Fluoreszenz in-situ Hybridisierung (FISH) vorgenommen.

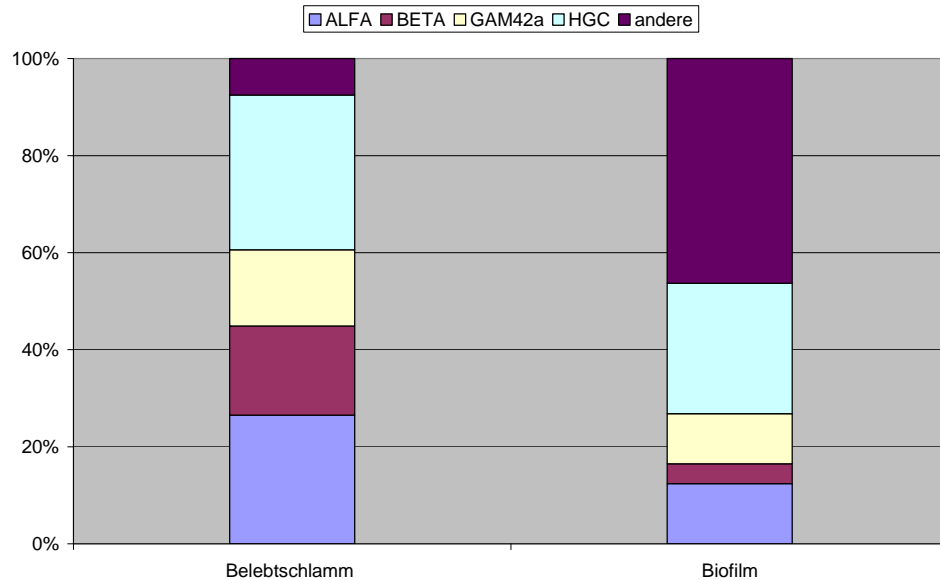


Abbildung 11 Bakterienscreening des Belebtschlammes und eines Biofilms (BF1) aus Werk 6

- ALFA: Alpha-Proteobakterien
- BETA: Beta-Proteobakterien
- GAM42a: Gamma-Proteobakterien
- HGC: Actinobakterien (gram-positiv, hoher GC-Gehalt)

In Abbildung 11 sind die prozentualen Anteile der untersuchten Eubakteriengruppen in den Proben Belebtschlamm und Biofilm dargestellt. In beiden Proben wies die HGC Gruppe die höchste Abundanz auf. Unterschiede gab es im Anteil der Alpha- bzw. Gamma-Proteobakterien, der in beiden Proben zwischen 10 und 26% lag. Die deutlichsten Unterschiede waren im Anteil an Beta-proteobakterien zu erkennen (4,1% im Biofilm und 18,4% in Belebtschlamm). Zur Interpretation dieser Daten muss gesagt werden, dass über die physiologischen Eigenschaften, die Aktivität und die Diversität innerhalb der untersuchten phylogenetischen Gruppen keine Aussagen gemacht werden kann. Der Nachweis der einzelnen Gruppen und deren Abundanzen gibt jedoch einen groben Hinweis auf die Zusammensetzung der Bakteriestruktur- bzw. der Diversität in den verschiedenen Proben. Ca. 50% der Organismen im Biofilm konnten mit den eingesetzten Gensonden nicht zugeordnet werden. Man kann daher davon ausgehen, dass im Biofilm eine größere Diversität der Mikroorganismen gegeben ist.

## 7 Kontinuierliche Laborversuche

### 7.1 Zielstellung, Versuchsbedingungen

#### Zielstellung

Die Versuchsanlage diente der Durchführung von Versuchen zur Kultivierung von Biofilmen unter Bedingungen, die sich durch die fehlende Verfügbarkeit von leicht utilisierbaren Substraten auszeichnen. Ziel war es, Biofilme auf Trägerkörpern zu etablieren, die einen hohen Anteil an Mikroorganismen enthalten, die die im vorgereinigten Abwasser der Papierfabrikation enthaltenen schwer oder langsam abbaubaren Verbindungen für ihre Stoffwechselprozesse nutzen können. Da es sich hier um Mikroorganismen handelt, die ein langsames Wachstum und damit eine hohe Generationszeit aufweisen, waren diese Versuche mit einem hohen Zeitaufwand verbunden.

Bei der Kultivierung des Biofilms waren zwei wichtige Faktoren zu berücksichtigen. Zum Einen sollte ein Selektionsdruck die Entwicklung einer spezifischen, zur Rest-CSB-Elimination befähigten Biozönose fördern. Zum Anderen war es erforderlich, dass diese Biozönose als Biofilm immobilisiert wurde, um letztlich eine hohe Organismenkonzentration sicherzustellen, die dann bei typischen Verweilzeiten eine ausreichende Rest-CSB- Elimination gewährleistet. Die Immobilisierung auf Trägerkörpern sollte den langsamer wachsenden Mikroorganismen die Möglichkeit geben, länger im System zu verweilen und nicht sofort ausgeschwemmt zu werden.

Einen Überblick über alle Versuchsphasen gibt Tabelle 12.

---

Tabelle 12 LVA-Versuchsbetrieb, Versuchsphasen

Versuchsphase	Versuchstage	Bedingungen	Zulauf-CSB (MW) mg/l	Ablauf-CSB (MW) mg/l
0 Einarbeitung	(126)	Inbetriebnahme (PF-Abwasser, periodischer Zusatz von leicht abbaubarem Substrat)	105	-
	(113)	SBR-Betrieb (PF-Abwasser, Kreislaufbetrieb, Animpfen: 2/BF)	122	-
	1 ... 32	SBR-Betrieb (Modellabwasser)	1024	734
1 Biofilmkultivierung	33 ... 46	SBR-Betrieb (Modellabwasser)	1021	693
2 Biofilmkultivierung	47 ... 109	SBR-Betrieb (Modellabwasser, Animpfen: 6/BF-1)	1072	758
3 Biofilmkultivierung	110 ... 364	SBR-Betrieb (Modellabwasser, Kreislaufbetrieb, periodischer Zusatz von leicht abbaubarem Substrat, Animpfen: 6/ BF-2)	719	652
4/1 bis 4/4 Prozessoptimierung	365 ... 402	SBR-Betrieb (Modellabwasser, Änderung der hydraulischen Belastung)	742	499
	403 ... 413		778	478
	414 ... 433		781	423
	434 ... 445		755	476
5 Prozessoptimierung	446 ... 465	SBR-Betrieb (Modellabwasser, Zusatz von leicht abbaubarem Substrat)	743	431

**Strategien der Biofilmanzucht**

Unter Beachtung dieser allgemeinen Prinzipien der Biofilmentwicklung waren verschiedene Strategien der Biofilmanzucht realisierbar, wobei die nachfolgenden Strategien praktiziert wurden:

- Kontinuierlicher Anlagenbetrieb unter streng Substrat limitierenden Bedingungen (keine leicht abbaubaren Substrate) bzw.
- kontinuierlicher Betrieb unter Zusatz von Anteilen leicht abbaubaren Substrats zur Unterstützung der Biofilmentwicklung.

Über die gesamte Versuchsdauer hinweg erfolgte abhängig von der Biofilmentwicklung und der –aktivität (Respirometertest) wöchentlich die prozessbegleitende Analytik gemäß der unter Punkt 4.2 und 4.6 aufgeführten Parameter.

**Brennlauge**

Als Ausgangssubstanz für die Herstellung des Modellwassers diente Brennlauge aus der Sulfatzellstofferzeugung mit der in Tabelle 13 aufgeführten mittleren chemischen Zusammensetzung.

Tabelle 13 Sulfat-Brennlauge, Zusammensetzung

Parameter		Wert
TS	%	75,4
C <sub>ges</sub>	% d. TS	32,7
C <sub>organ</sub>	% d. TS	31,3
Asche	% d. TS	41,0
N	% d. TS	0,1
P	% d. TS	2,2
CSB	g/kg TS	ca. 1000
BSB <sub>5</sub>	g/kg TS	ca. 165

Zur Herstellung des synthetischen Modellwassers wurde die Brennlauge 1:30 verdünnt, so dass der CSB-Gehalt ca. 40.000 mg/l betrug. Diese Stammlösung diente, auf einen CSB von 1.000 mg/l weiter verdünnt, über den gesamten Versuchszeitraum als Hauptkomponente des LVA-Zulaufs. Aufgrund der starken Alkalität der Brennlauge musste der pH-Wert des Modellwassers auf 6-8 mittels Salzsäure eingestellt werden, um Calciumcarbonat-Ausfällungen im Reaktor zu vermeiden. Außerdem erforderten die nur geringen N- und P-Gehalte des Ausgangssubstrates die Zugabe von Nährstoffen. Dies erfolgte durch Dosierung von Ammoniumchlorid (N) und Kaliumdihydrogenphosphat (P) in einem Verhältnis von BSB:N:P wie 100:5:1 um Nährsalzmangel zu vermeiden. Eine Kontrolle der Nährstoffzufuhr wurde durch die Überprüfung der Stickstoff - und Phosphorkonzentrationen im Ablauf realisiert.

**Modellabwasser**

Eine Übersicht zu den Eigenschaften des synthetisch hergestellten Modellabwassers ist in Tabelle 14 dargestellt.

Das BSB<sub>5</sub>/CSB–Verhältnis des Modellabwassers betrug 0,16 und gilt damit als schwer abbaubar.

Tabelle 14 Zusammensetzung des Modellabwassers

Parameter		Wert
T	°C	22...25
pH	-	6...8
LF	mS/cm	1,0...1,3
CSB	mg/l	750...1100
BSB <sub>5</sub>	mg/l	125...180
TOC	mg/l	130...170
N <sub>ges</sub>	mg/l	14...17
P <sub>ges</sub>	mg/l	4,0...6,0
TS	mg/l	<20

**LVA-Anlagenparameter**

Die Laborversuchsanlage wurde nach dem Sequenzing-Batch-Verfahren (SBR) betrieben. Dabei wurden täglich drei Zyklen durchlaufen, wobei jeder Zyklus aus den Phasen Befüllen (I), Belüften (II) und Absetzen/ Ablassen des Reaktorinhalts (III) bestand.

Die Durchmischung des Reaktorinhaltes erfolgte mittels Druckluft. Dazu wurden während des gesamten Zyklus 60 l/h Luft in den Reaktor eingeblasen. Die Laborversuchsanlage wurde bei Zimmertemperatur betrieben, sodass sich eine Temperatur von ca. 24°C im Reaktor einstellte. Eine Übersicht zu den wichtigen Betriebsdaten wird in Tabelle 15 gegeben.

Tabelle 15 LVA-Versuchsbetrieb, Anlagenparameter

Parameter		Wert
Reaktorvolumen	l	4,25
Luftmenge	l/h	60
Anzahl Trägerkörper	-	390
Füllgrad Trägerkörper	%	42
Durchmesser Trägerkörper	mm	15
spezifische Aufwuchsfläche	m <sup>2</sup> /l	0,2



**LVA-  
Belastungs-  
parameter**

Einen Überblick über die wichtigsten Betriebsparameter der Laborversuchsanlage gibt die Tabelle 16.

Tabelle 16 LVA-Versuchsbetrieb, Belastungsparameter

Versuchs- phase	$B_{hydr}$	$B_{hydr-OF}$	$BR_{CSB}$
	$l/(l*d)$	$l/(m^2*d)$	$g/(m^2*d)$
0	1,35	6,6	1,35
1			
2			
3			
4	0,9 ... 2,7	4,4 ... 13,2	0,7 ... 2,1
5	0,9	4,4	0,7

**7.2 Einarbeitung der Anlage****Aspekte der Bio-  
filmkultivierung**

Bei der Kultur eines Biofilms waren zwei wichtige Faktoren zu berücksichtigen. Zum Einen sollte ein Selektionsdruck die Entwicklung einer spezifischen, zur Rest-CSB-Elimination befähigten Biozönose fördern, zum Anderen war es erforderlich, dass diese Biozönose als Biofilm immobilisiert wird, um letztlich eine hohe Organismenkonzentration sicherzustellen, die dann bei typischen Verweilzeiten eine ausreichende Rest-CSB-Elimination gewährleistet.

In der Abwassertechnik beruht die Biofilmentwicklung im Wesentlichen auf dem Prinzip der Oberflächenimmobilisierung. Unter streng Substrat (Nährstoff) limitierten Bedingungen existiert ein hoher Selektionsdruck, da für Organismen, die auf leicht verwertbares Substrat angewiesen sind, keine Entwicklungschancen gegeben sind. Das kann zur Folge haben, dass die Biofilmentwicklung zu langsam verläuft, wenn die Wechselwirkung der Organismen mit der Oberfläche nicht stark genug ist. Es kann daher vorteilhaft sein, für die Immobilisierung der gewünschten Mikroorganismenkonsortien einen Biofilm unter Zufuhr von Anteilen schnell verwertbaren Substrat als Matrix aufzubauen.

**Inbetriebnahme-  
phase  
Versuchsphase 0**

Das Anfahren der LVA erfolgte mit biologisch gereinigtem Abwasser einer Deinking-PF (ca. 105 mg/l CSB), das gleichzeitig als Impfmateriale diente.

In ca. wöchentlichen Intervallen erfolgte eine stoßweise Dosierung von leicht abbaubarem Substrat (D-Glucose, L-Glutaminsäure), so dass unmittelbar nach der Dosierung ein CSB von ca. 450 mg/l vorlag. Als Belastungswerte hochgerechnet ergab sich bei wöchentlicher Intervaldosierung eine Raumbelastung von ca. 0,02 g BSB<sub>5</sub>/(l\*d). Dies entspricht einem Zehntel der Belastung einer schwach belasteten Belebungsstufe. Auf ein ausreichendes Nährsalzangebot wurde geachtet. Nach der Dosierung war stets eine kurzzeitige Zunahme der Trübung im Ablauf zu beobachten, die ein Bakterienwachstum anzeigte.

---

<b>SBR-Betrieb</b>	Nachdem mittels Respirometrie sich eine Aktivität des auf den Trägerkörpern gebildeten Biofilms nachweisen ließ, wurde eine Phase mit streng limitierter Nährstoffversorgung gestartet. Zu Beginn dieser Phase erfolgte eine Animpfung des Reaktorinhalts mit Biofilm aus der Abwasseranlage von Werk 2. Um ein stabiles biologisches Milieu in der LVA zu gewährleisten, wurde der kontinuierliche Betrieb unter Kreislaufführung des Abwassers aufgenommen. Gleichzeitig erfolgte eine Umstellung auf SBR-Betrieb, um durch eine Sedimentationsphase möglichst geringe Verluste an Biomasse zu gewährleisten.
<b>Einsatz Modellabwasser Versuchsphase 1</b>	<p>Die in den vorangegangenen Arbeiten gesammelten Erfahrungen hatten gezeigt, dass beim Einsatz von Papierfabriksabwasser mit produktionsabhängigen Schwankungen in der Abwasserzusammensetzung gerechnet werden muss. Eine Bevorratung mit einer Abwassercharge über längere Fristen erschien ebenfalls nicht zweckmäßig. Da die zu erwartenden Effekte in der CSB-Elimination in einer Größenordnung von ca. 10...20 mg/l lagen, konnte eine Schwankung der Abwasserzusammensetzung diese Effekte überlagern bzw. falsch positive Effekte vortäuschen. Daher wurden die weiteren Versuche mit einem Modellabwasser durchgeführt, das als schwer abbaubare Hauptkomponente Ligninverbindungen aus der Zellstofferzeugung (Brennlaug) enthielt. Die Eigenschaften dieses Abwassers sind unter 7.1 beschrieben.</p> <p>Diese Versuchsphase ist dadurch gekennzeichnet, dass dieses Modellabwasser einen geringen Anteil (ca. 10...15%) von leicht abbaubarem Substrat (Kohlenhydrate) enthält, wodurch Nährstofflimitierung auf einem niedrigen Niveau vorliegt. In der letzten Phase der Einarbeitung wurde eine CSB-Elimination von durchschnittlich 28% (20% – 34%) erreicht. Durch die respirometrischen Messungen konnte das Vorliegen und die Aktivität des etablierten Biofilms nachgewiesen werden. Der dünne Biofilm konnte allerdings noch nicht gravimetrisch nachgewiesen werden.</p>

---

### 7.3 Biofilmkultivierung mit ausgewähltem Inokulum

<b>Ziel</b>	Unter Nutzung der bisherigen Erfahrungen, bezüglich der geeigneten Strategie zur Biofilmanzucht, wurde in der Versuchsanlage ein Biofilm mit hohem CSB-Eliminationspotenzial etabliert.
<b>Versuchsphase 2</b>	In einer ersten kurzen Phase erfolgte eine Stabilisierung des Versuchsbetriebs. Die CSB-Elimination betrug hier im Mittelwert 32% (31% - 34%). Nach der Stabilisierung erfolgte eine Animpfung mit einem ausgewählten Biofilm aus Werk 6. Innerhalb dieser Versuchsphase war keine Erhöhung der CSB-Elimination durch den Biofilm zu beobachten. Respirometrische Messungen konnten auch eine unveränderte Aktivität des Biofilms nachweisen. Da es kaum einen nennenswerten Zuwachs an Biomasse gab, wurde vermutet, dass zuwachsende Biomasse mit dem Ablauf aus dem kontinuierlich betriebenen Reaktor ausgebracht wurde.

---

---

**Versuchsphase 3** Um diese Biomasseverluste zu vermeiden, erfolgte eine Prozessumstellung auf Kreislaufbetrieb. Für die Biofilmetablierung notwendige leicht abbaubare Substratanteile wurden ähnlich wie in der Einarbeitungsphase über Intervaldosierung eines Gemisches aus D-Glucose und L-Glutaminsäure zugeführt. Die unvermeidlichen Verdunstungsverluste wurden durch destilliertes Wasser vor den Probenahmen ausgeglichen.

Über einen Zeitraum von mehreren Wochen war keine zusätzliche Elimination der organischen Inhaltsstoffe des Abwassers festzustellen. Nach ca. 20-wöchigem Versuchsbetrieb erfolgte eine nochmalige Animpfung mit Biofilm aus Werk 6. Erst gegen Ende der Versuchsphase 3 war eine deutliche Verminderung des CSB im System zu erkennen.

---

## 7.4 Ermittlung Leistungsfähigkeit der Biofilmstufe

**Ziel** Im Anschluss an einen erfolgreichen Biofilmaufbau mit Inokulum aus Werk 6 wurde die Leistungsfähigkeit einer Biofilmstufe bezüglich der Rest-CSB-Elimination und der Praxistauglichkeit bewertet. Neben der Ermittlung des Rest-CSB-Eliminationspotenzials war die Stabilität des Prozesses und des Biofilms zu beurteilen.

---

**Versuchsphase 4** Die CSB-Belastung der Laborversuchsanlage wurde in Versuchsphase 4 schrittweise von  $0,7 \text{ g}/(\text{l} \cdot \text{d})$  auf  $2,1 \text{ g}/(\text{l} \cdot \text{d})$  gesteigert und am Ende von Versuchsphase 4 wieder auf die Ausgangsbelastung zurückgeführt. Demzufolge erhöhte sich die CSB-Oberflächenbelastung des Biofilms von  $3,4$  auf  $10,3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . Der Einfluss auf die CSB-Eliminationsleistung wurde erfasst.

---

**Versuchsphase 5** In der Versuchsphase 5 erfolgte eine Veränderung der stofflichen Belastung durch Zugabe von leichtabbaubarem Substrat (D-Glucose, L-Glutaminsäure). Es wurde untersucht, ob durch die Zugabe von Substrat die CSB-Elimination aufgrund der Anwesenheit von leicht metabolisierbaren Kohlenstoffquellen verschlechtert wird. Bei einer konstanten Raumbelastung von  $0,9 \text{ l}/(\text{l} \cdot \text{d})$  wurde die CSB-Zulaufkonzentration um 25% erhöht, so dass der CSB im neu angesetzten Modellabwasser durchschnittlich  $1100 \text{ mg/l}$  betrug.

---

## 8 Ergebnisse

### 8.1 CSB-Elimination

#### Darstellung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des kontinuierlichen Laboranlagenbetriebs für alle Versuchsphase, beginnend mit der Einarbeitung bis hin zur Optimierung von Leistungsparametern dargestellt. Detaillierte Angaben zum Versuchsbetrieb sind unter Punkt 7.1 aufgeführt. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen die erreichbaren CSB-Werte bzw. die CSB-Elimination.

#### CSB-Werte

Abbildung 12 zeigt für die einzelnen Versuchsphasen die CSB-Werte im Zu- und Ablauf der Anlage. Es ist zu erkennen, dass erwartungsgemäß nur ein geringer Anteil des Zulauf-CSB eliminiert wird. In den Phasen 0, 1 und 2 sind die Verhältnisse relativ konstant. In Phase 3 war eine vergleichsweise geringe Elimination festzustellen, da hier das Abwasser im Kreislauf geführt wurde, um eine strenge Substratlimitierung und damit Selektionsdruck zu bewirken. In den Phasen 4/1 bis 4/4 wurde die Anlage unter variierenden hydraulischen und Raumbelastungen betrieben. Diese Veränderungen zeigten keine signifikanten Einflüsse auf den Ablauf-CSB. Auch eine Dosierung von leicht abbaubarem Substrat in Phase 5 zeigte nur einen geringen Effekt.

#### Zu- und Ablauf-CSB

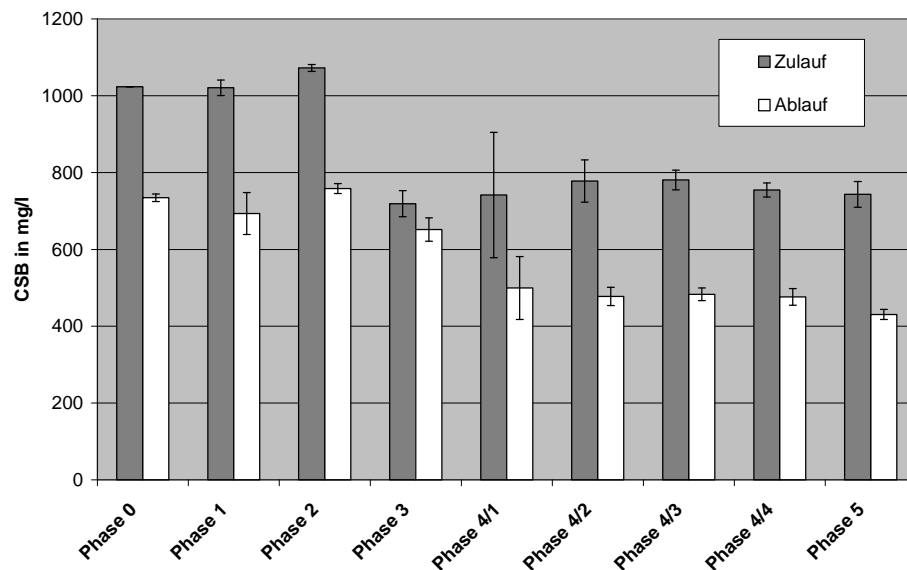


Abbildung 12 Mittlerer Zulauf-/Ablauf-CSB in den Versuchsphasen (mit Kennzeichnung der Standardabweichung)

**CSB-Elimination**

Abbildung 13 zeigt die in den verschiedenen Versuchsphasen erreichten mittleren CSB-Eliminationen. Die CSB-Elimination stieg zwar zwischen der Einarbeitung der Anlage bis zum Versuchsende von ca. 30% auf 40% an, erreichte aber nicht das aus den Batchtest abgeleitete Eliminationspotenzial.

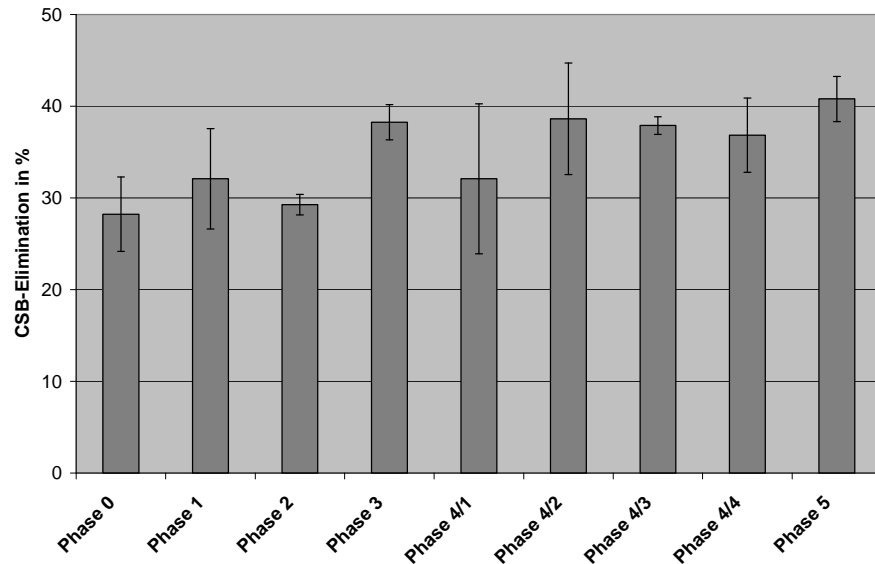


Abbildung 13 Mittlere CSB-Elimination in den Versuchsphasen (mit Kennzeichnung der Standardabweichung)

**CSB-Elimination und Raumbelastung**

In Abbildung 14 sind die in den jeweiligen Versuchsphasen erreichten CSB-Eliminationen den CSB-Raumbelastungen gegenübergestellt. In den ersten Versuchsphasen (Ende der Einarbeitung bis Phase 2) wurde die Anlage unter konstanten CSB-Raumbelastungen von 1,35 g/(l\*d) betrieben. In der nachfolgenden Versuchsphase 3 verminderte sich die Belastung auf 0,9 g/(l\*d) auf Grund des praktizierten Kreislaufbetriebs.

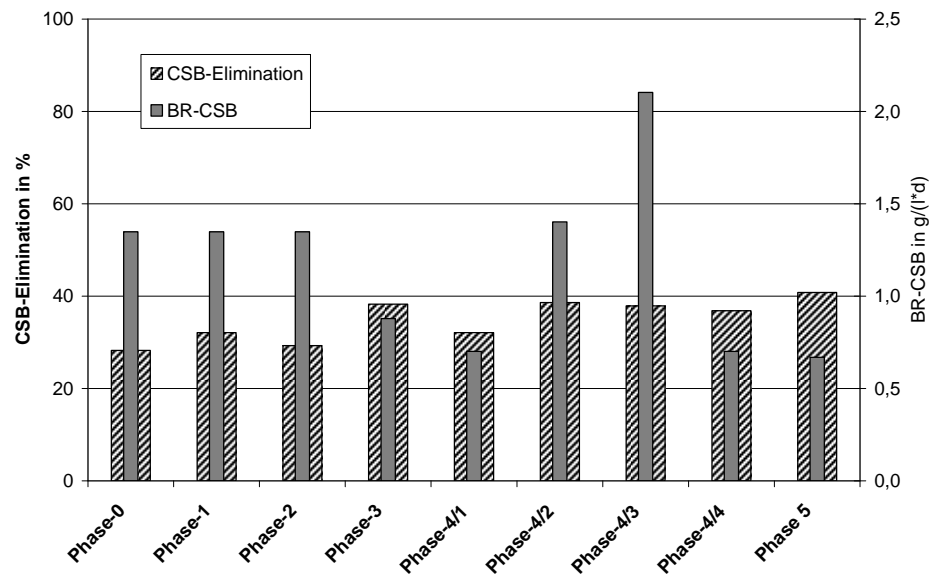


Abbildung 14 Mittlere CSB-Elimination und CSB-Raumbelastungen

**Einfluss auf die CSB-Elimination**

In Phase 4 wurde gezielt der Einfluss der Belastung auf die CSB-Elimination untersucht. Um die Einstellung eines Fließgleichgewichts zu ermöglichen, wurde nach der Steigerung des Zuflusses die hydraulische Beschickung der Laborversuchsanlage über einen längeren Zeitraum, zumeist 2-3 Wochen, konstant gehalten. Durch die Steigerung der täglichen Beschickungsintervalle wurde der Anlagenzulauf von zunächst 3,8 l/d (Phase 4/1) auf 11,5 l/d (Phase 4/3) erhöht und anschließend erneut die Anfangsbelastung von 3,8 l/d in der Phase 4/4 eingestellt. Es zeigte sich, dass die mittleren CSB-Eliminationen zwischen 32 und 39% schwankten, wobei jedoch kein signifikanter Zusammenhang mit der Belastung nachweisbar war, wie aus Abbildung 14 ersichtlich.

**Biofilm-entwicklung**

Die Entwicklung der Biofilmmasse in Phase 4, bezogen auf den Trägerbewuchs bzw. den Reaktorinhalt, ist in Tabelle 17 angegeben. Die Werte zeigen einen Trend der Zunahme des Biofilmbewuchses der Trägerkörper mit steigender Anlagenbelastung, wobei allerdings auch in dieser Versuchsphase nur ein geringer Biofilmaufwuchs auf den Trägern zu verzeichnen war.

Tabelle 17 Biofilmmasse in Versuchsphase 4, Mittelwerte

Versuchsphase	Biofilm	
	mg/Tk	g/l
4/1	14,5	1,3
4/2	19,9	1,8
4/3	23,2	2,1
4/4	18,4	1,7

**Simulation gestörten Anlagenbetriebs**

Durch eine zeitlich begrenzte zusätzliche Dosierung eines leicht abbaubaren synthetischen Substrats (zur Simulation unzureichender Abbauleistung der vorhergehenden Stufe) sollte in Phase 5 geprüft werden, ob ein nachteiliger Einfluss auf die Rest-CSB-Elimination auftritt. Nach einer stabilen Phase des Anlagenbetriebs wurde die CSB-Konzentration des Modellabwassers durch Zugabe von leicht abbaubaren Substanzen (D-Glucose, L-Glutaminsäure) um ca. 25 % erhöht, wobei die hydraulische Belastung konstant blieb.

**Einfluss von leicht abbaubarem Substrat**

In Abbildung 15 sind die CSB-Ablaufkonzentrationen über den Versuchszeitraum von insgesamt ca. 14 Wochen dargestellt:

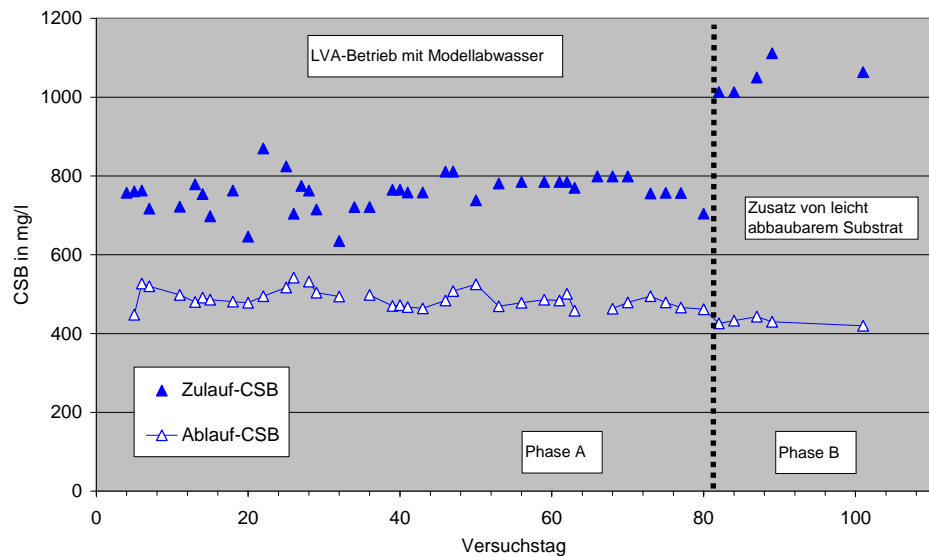


Abbildung 15 Einfluss von leicht abbaubarem Substrat auf die CSB-Elimination der Laborversuchsanlage

Durch das vorhandene leicht abbaubare Substrat war keine Erhöhung der CSB-Ablaufwerte zu verzeichnen. Eher war sogar ein Trend zu geringeren Konzentrationen im Anlagenablauf nachweisbar (MW-Phase A: 489 mg/l, MW-Phase B: 431 mg/l). Dabei unterschieden sich die mittleren CSB-Eliminationsraten bezogen auf den schwer abbaubaren Substratanteil nicht signifikant.

**Ergebniszusammenfassung LVA-Betrieb**

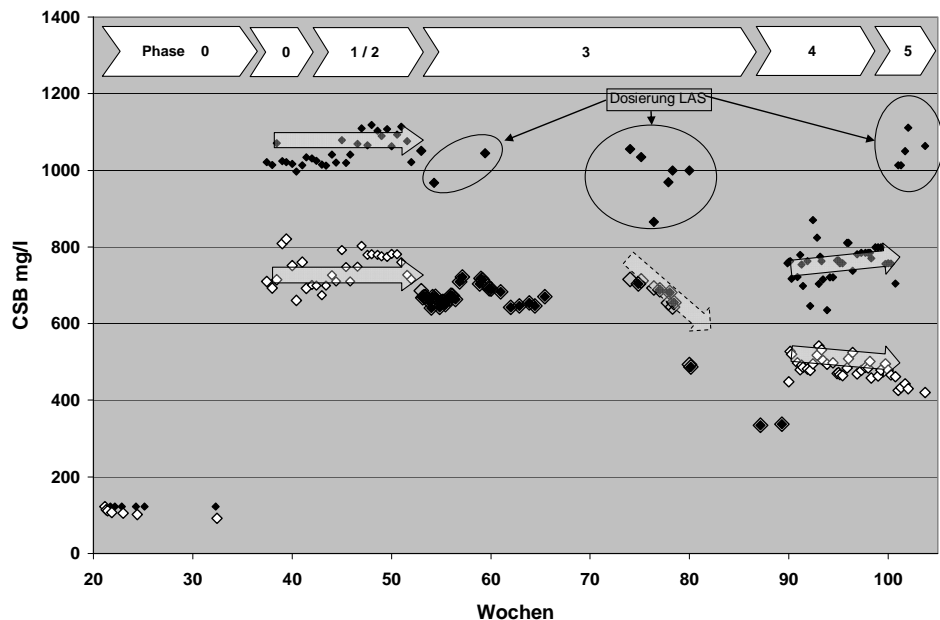


Abbildung 16 LVA-Versuchsbetrieb, Gesamtüberblick

---

**Bewertung  
Versuchsphasen**

Betrachtet man in Abbildung 16 die Ablauf-CSB-Werte in den Versuchsphasen 0 bis 3 ist festzustellen, dass eine Verringerung der CSB-Werte erst in der zweiten Hälfte der Phase 3 festzustellen war. In den Phasen 0 bis 2 wurde die Anlage im kontinuierlichen Durchflussbetrieb gefahren und die Differenz zwischen Zu- und Ablauf resultiert hauptsächlich aus der Elimination des leicht abbaubaren Anteils des Modellabwassers. Eine Adaption der Biozönose des Biofilms mit erhöhtem Eliminationspotenzial bezüglich des Rest-CSB war nicht festzustellen. Allenfalls zeigen sich schwache Tendenzen, die statistisch nicht gesichert sind.

In der Phase des „Kreislaufbetriebs“ kam es erst nach einem Zeitraum von ca. 20 Wochen zu einer merklichen Absenkung des CSB von ca. 700 mg/l auf Werte kleiner 400 mg/l. Diese wurde zunächst als ein Adaptionseffekt der Biomasse im Reaktor angesehen. Anlässlich einer notwendigen Revision der Anlage musste festgestellt werden, dass im Bereich des Abscheiders sich offensichtlich durch einen Filtrationseffekt massive Ablagerungen gebildet hatten, Der Weiterbetrieb der Anlage nach Beseitigung dieser Ablagerungen mit einer Zulaufkonzentration in der Größenordnung des Kreislaufbetriebs zeigte allerdings, dass die CSB-Elimination mit den Phasen 1 und 2 vergleichbar war und überwiegend chemisch-physikalische Effekte diese Ablagerungen und die daraus resultierende weitergehende Elimination verursacht hatten.

---

**Vergleich  
LVA- Abbautest**

Um das maximale CSB-Eliminationspotenzial für das Modellabwasser zu ermitteln wurde parallel zum Betrieb der Laborversuchsanlage ein modifizierter Zahn-Wellens-Test (s. Kapitel 4.4) mit Belebtschlamm aus Werk 6 durchgeführt. In dem über 26 Tage betriebenen Batch-Versuch konnte eine maximale CSB Elimination von  $64 \pm 5 \%$  ermittelt werden.

Abbildung 17 zeigt die Zu- und Ablaufkonzentration der Laborversuchsanlage sowie die CSB-Werte im Batchtest nach 2, 9, 16 und 26 d.

Die Darstellung lässt erkennen, dass bereits nach zwei Tagen 40 % des CSB eliminiert wurden, wohingegen die weitere CSB-Elimination nur sehr langsam verlief. Innerhalb der restlichen 24 Tage bis zum Versuchsende konnten nur noch rund 20 % zusätzlich abgebaut werden.

Die Verweilzeit in der kontinuierlichen betriebenen Laboranlage betrug im Vergleichszeitraum ca. 1 d. Da zu Beginn der Versuchsphase mit Kreislaufbetrieb keine dem Zahn-Wellens-Test vergleichbare Elimination beobachtet wurde, muss angenommen werden, dass die weitergehende CSB-Elimination im Batchtest eher durch eine Adsorption der Abwasserinhaltsstoffe an dem Belebtschlamm als durch einen biologischen Abbau erfolgte. In diesem Kontext kann auch die am Ende der Versuchsphase 3 (Kreislaufbetrieb) beobachtete CSB-Elimination gesehen werden, da in dieser Phase durch häufigere Dosierung von leicht abbaubarem Substrat eine Biomassebildung gefördert wurde.

---



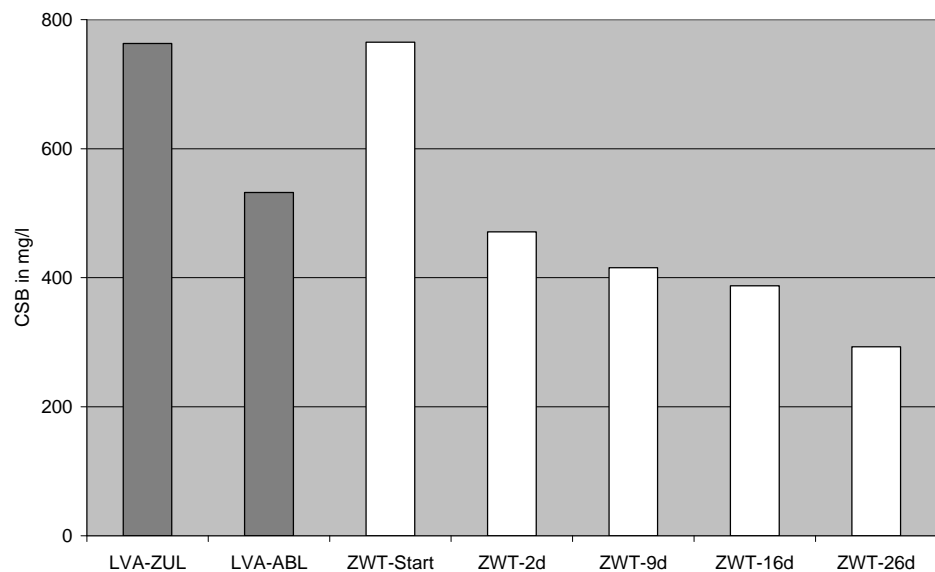
**CSB-Elimination**

Abbildung 17 CSB-Elimination, Laborversuchsanlage im Vergleich zum Zahn-Wellens-Test

## 8.2 Stoffliche Aspekte der CSB-Elimination

### LC-OCD-Analytik

Die Ergebnisse der LC-OCD-Analytik der in der Phase 4 untersuchten Zu- und Ablaufproben der Versuchsanlage zeigten, dass neben der erwartungsgemäß vollständigen Eliminierung niedermolekularer Säuren (Acids) vorrangig niedermolekulare Huminstoffanteile (HS-Building Blocks) des Modellabwassers zu ca. 70 % eliminiert wurden. Die geringste DOC-Elimination (<20%) erzielte der Reinigungsprozess in Bezug auf höhermolekulare Huminstoffe, wie Abbildung 18 verdeutlicht.

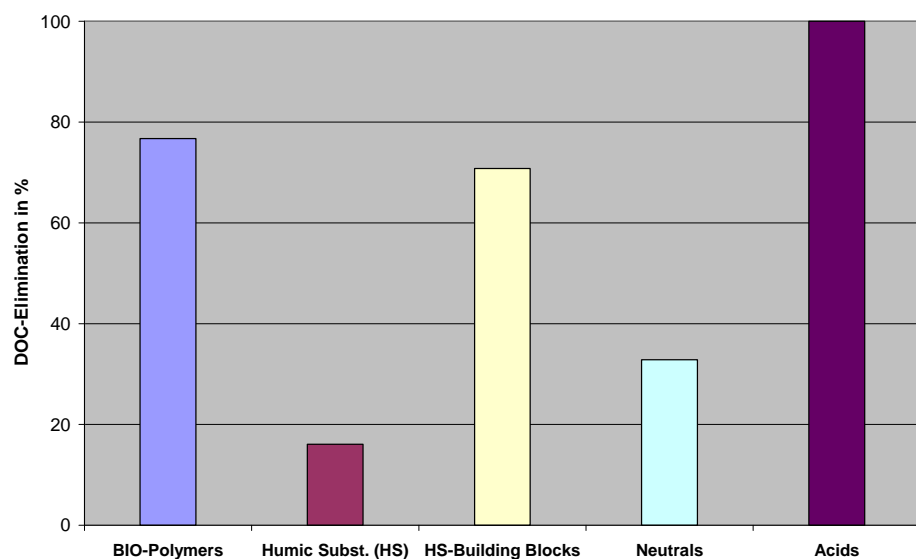


Abbildung 18 OC-Stoffklassenelimination der Versuchsanlage (Mittelwerte)

Die im Anlagenablauf verbleibende organische Restbelastung war ähnlich der am Ende der Batchtests (vgl. Abbildung 9, Abbildung 10) dadurch gekennzeichnet, dass der Hauptanteil der Restbelastung höhermolekularen Huminstoffen zuzuordnen ist. Dies zeigt auch die Abbildung 19.

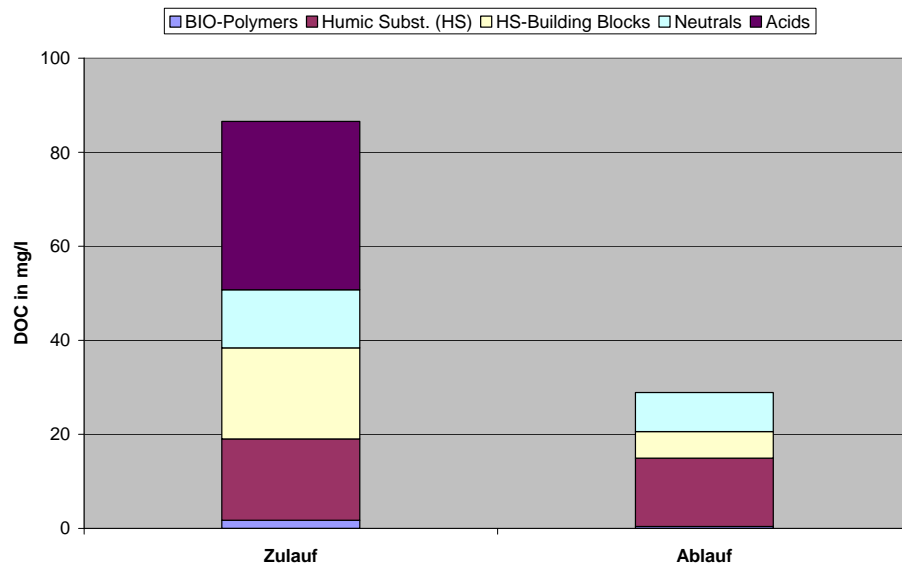


Abbildung 19 OC-Charakteristik von Zu- und Abläufen der Versuchsanlage (Mittelwerte)

### 8.3 Molekularbiologische Charakterisierung

#### Untersuchungsziel

Um Aufschluss darüber zu erhalten, welche Bakterienpopulationen in der Lage waren, sich unter den vorherrschenden Substratbedingungen (Modellabwasser) anzusiedeln, erfolgte eine Analyse der mikrobiellen Diversität eines auf den Trägerkörpern in Versuchsphase 4 etablierten Biofilmes mittels Sequenzierung einer 16S rRNA-Gen Klonbibliothek.

#### Analyse der mikrobiellen Diversität

Von den 96 sequenzierten Klonen konnten 86 gut auswertbare Nukleotidsequenzen erhalten werden. Durch Abgleich mit der NCBI-Datenbank konnten die Sequenzen den in nachfolgender Abbildung dargestellten Bakteriengruppen zugeordnet werden.

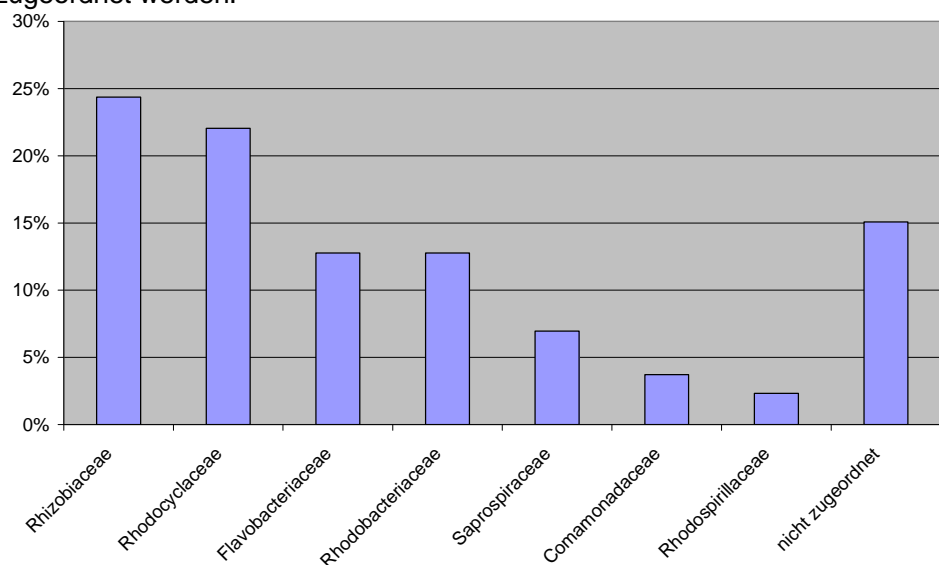


Abbildung 20 Bakteriologische Zusammensetzung eines Biofilmes (Laborversuchsanlage, Phase 4)

#### In der Biofilmprobe gefundene Bakterienfamilien

Die in der Biofilmprobe gefundenen Bakterien konnten den nachfolgenden Bakterienfamilien zugeordnet werden:

- Familie Rhizobiaceae  
(Rhizobium, Agrobacterium, Allorhizobium, Carbophilus, Chelobacter, Ensifer, Sinorhizobium)
- Familie Rhodocyclaceae  
(Rhodocyclus, Azoarcus, Azonexus, Azospira, Azovibrio, Dechloromonas, Propionibacter, Propionivibrio, Thauera, Zoogloea)
- Familie Flavobacteriaceae  
(u.a. Flavobacterium, Cellulophaga, Capnocytophaga)
- Familie: Rhodobacteriaceae  
(u.a. : Rhodobacter, Paracoccus)
- Familie Saprospiraceae  
(Haliscomenobacter).

**Fazit**

Bei den im Biofilm gefundenen Bakterien handelt es sich um Organismen, die zum Teil unter anoxischen bzw. anaeroben Bedingungen existieren bzw. in der Lage sind elementaren Stickstoff zu verwerten. Die Bakterien der Gattung Zoogloea als schleimbildende Bakterien kommen sehr häufig im Belebtschlamm und Biofilmen vor. Auch schwefelhaltige Bakterien, die unter anaeroben Bedingungen in Gegenwart von H<sub>2</sub>S existieren, wurden gefunden. Organismen der Familie der Saprospiraceae, die typisch für Kläranlagen ist, wurden nur in geringerem Umfang gefunden.

**8.4 Wirtschaftliche Betrachtungen****Berechnungsbasis**

Zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung sollen die spezifischen Kosten der CSB-Elimination herangezogen werden. Als grobe Richtwerte für den Einsatz innovativer Reinigungsverfahren gelten ca. 3,25 €/kg CSB-Elimination für eine Ozonbehandlung bzw. 6,7 €/kg CSB-Elimination für eine Nanofiltration. Zum Vergleich wurden die Kosten einer MBBR-Endstufe für verschiedene typische Abwassermengen, Verweilzeiten und CSB-Elimination berechnet.

Den in Tabelle 18 aufgeführten Kosten der CSB-Elimination liegen folgende Daten zu Grunde:

Spezifische Investkosten (pro m<sup>3</sup> Reaktorvolumen):

Betonbau Reaktor:	1.200 €/m <sup>3</sup>
Rohrleitungen, Belüftungssystem;	263 €/m <sup>3</sup>
Trägerkörper 25% FG:	128 €/m <sup>3</sup>

Spezifische Betriebskosten:

Energie: (E-Preis: 0,1 €/kWh)	14 €/m <sup>3</sup> u. Jahr
Personal:	18.250 €/a
sonstige Kosten:	10% v. Energie u. Personal
Amortisation Investkosten:	10% pro Jahr

**Kostenvergleich**

Die in Tabelle 18 für verschiedenen Anlagendurchsätze, Verweilzeiten (und damit Reaktorgrößen) und unterschiedliche CSB-Elimination berechneten Werte liegen, abhängig von den Randbedingungen unter bzw. im Bereich der Kosten der o.g. innovativen Verfahren Ozonbehandlung bzw. Nanofiltration, die eine sehr spezifische Anlagentechnik erfordern und demzufolge immer mit hohen Investitionen verbunden sind. Investitionen in die Anlagentechnik eines MBBR-Verfahren können zumindest teilweise durch Nutzung vorhandener Anlagenteile minimiert werden, wodurch die Betriebskosten der CSB-Elimination vermindert werden können. Deshalb enthält Tabelle 18 in der letzten Spalte die reinen laufenden Betriebskosten ohne den Anteil zur Refinanzierung der Anlagentechnik.

**Kosten der CSB-Elimination**

Tabelle 18 Abgeschätzte Kosten der CSB-Elimination durch eine Biofilm-Endreinigungsstufe

Anlagenparameter			Betriebskosten in €/kg CSB <sub>eliminiert</sub>	
Abwassermenge in m <sup>3</sup> /d	VWZ in h V <sub>Reaktor</sub> in m <sup>3</sup>	CSB <sub>eliminiert</sub> in mg/l	mit Investkosten	ohne Investkosten
1000	8 333	50	4,29 €	1,38 €
		100	2,14 €	0,69 €
		150	1,43 €	0,46 €
	10 417	50	5,08 €	1,45 €
		100	2,54 €	0,73 €
		150	1,69 €	0,48 €
	12 500	50	5,88 €	1,52 €
		100	2,94 €	0,76 €
		150	1,96 €	0,51 €
2000	8 667	50	3,74 €	0,83 €
		100	1,87 €	0,42 €
		150	1,25 €	0,28 €
	10 833	50	4,53 €	0,90 €
		100	2,27 €	0,45 €
		150	1,51 €	0,30 €
	12 1000	50	5,33 €	0,97 €
		100	2,67 €	0,49 €
		150	1,78 €	0,32 €

**Vorteile**

Unterstellt man eine zusätzliche CSB-Elimination von 100 mg/l bei Verweilzeiten von <10 h, kann man mit diesem Verfahren Betriebskosten erreichen, die unter denen der Ozonbehandlung und der Nanofiltration liegen. Als Vorteil dieses Verfahrens ist des Weiteren zu sehen, dass keine bzw. nur geringe Aufwendungen für eine Nachbehandlung (Abtrennung von Biomasse) erforderlich sind, die im Falle der Ozonbehandlung bzw. Nanofiltration z.T. erheblich oder noch nicht vollständig gelöst (Konzentratverwertung) sind.

**9 Schlussfolgerungen****Nachweis Eliminationspotenzial**

In zahlreichen statischen aeroben Eliminationstests konnten die aus Voruntersuchungen abgeschätzten Potenziale zur weiteren CSB-Elimination von ca. 30 bis 50% durch biologische Prozessstufen bestätigt werden. Allerdings zeigten die aus den großtechnischen Anlagen entnommenen Biofilme im Vergleich zu den Belebtschlämmen nur ein geringfügig höheres CSB-Eliminationspotenzial.

---

<b>Eliminationsmechanismen</b>	<p>Bei der in kontinuierlichen Laborversuchen erfolgten Kultivierung eines Biofilms unter substratlimitierten Bedingungen konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die auf dem biologischen Abbau resultierende CSB-Elimination nicht die aus den Batchtests erwarteten Effekte aufwies. Die am Ende der Versuchsphase 3 erreichte hohe Elimination war auf die Ausbildung einer „biologischen Filtermatte“ im Ablaufsieb des Trägerkörperreaktors zurückzuführen.</p> <p>LC-OCD-Untersuchungen zeigten, dass die Elimination des refraktären CSB keinen Einfluss auf dessen stoffliche Zusammensetzung hat, was für die Dominanz physikochemischer Eliminationsprozesse spricht.</p>
<b>Biofilmetablierung</b>	<p>Die Etablierung eines Biofilms mit höherem CSB-Eliminationspotenzial auf den Trägerkörpern der Laboranlage stellte sich im kontinuierlichen Betrieb als schwierig dar.</p>
<b>Resümee</b>	<p>Eine Erhöhung der CSB-Elimination durch den alleinigen Einsatz des MBBR-Prinzips war trotz des Langzeitbetriebs der Versuchsanlage nur in geringem Umfang zu erkennen (Phase 1 u. 2 ca. 30-32%; Phase 3 u. 4 ca. 34-36%).</p> <p>Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass die in den Voruntersuchungen und den im Projekt durchgeführten Batchtests aufgezeigten Potenziale zur weitergehenden CSB-Elimination nicht ausschließlich durch reine biologische Abbauprozesse mittels Biofilmen erreicht werden können sondern weitere physikalisch-chemische Prozesse z.T. erheblich zu den aufgezeigten Potenzialen beitragen.</p>
<b>Verfahrensoptimierung</b>	<p>Die Projektergebnisse sind für die Konzipierung und Auslegung von biologischen Verfahren zur Elimination von refraktärem CSB von großer Bedeutung. Das erarbeitete Know-how kann zur Weiterentwicklung dieser Verfahren durch die kmU geprägten Hersteller von Anlagen und Ingenieurbüros genutzt werden.</p>

---

**Ansprechpartner für weitere Informationen:**

Dr. Rainer Spörl  
Tel. 03529/551-642  
[rainer.spoerl@ptspaper.de](mailto:rainer.spoerl@ptspaper.de)

Dipl.-Chem. Andreas Wagenknecht  
Tel. 03529/551-689  
[andreas.wagenknecht@ptspaper.de](mailto:andreas.wagenknecht@ptspaper.de)

Papiertechnische Stiftung PTS  
Pirnaer Str. 37  
01809 Heidenau  
Tel. (03529) 551-60  
Fax (03529) 551-899  
e-Mail: [info@ptspaper.de](mailto:info@ptspaper.de)  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

## Literaturverzeichnis

- 1 JUNG H., C.HENTSCHKE, J. PONGRATZ. u. B. GÖTZ:  
Wasser- und Abwassersituation in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie – Ergebnisse der Wasserumfrage 2007  
Wochenblatt für Papierfabrikation, **137** (2009) 6-7, 280-283
- 2 ÖLLER H.-J., WEINBERGER G. u. I. DEMEL:  
Weitergehende CSB-Elimination und Entfärbung durch Ozonbehandlung biologisch gereinigter Papierfabriksabwässer  
Das Papier **51** (1997) 4, S. 177-18
- 3 SCHMIDT TH., DEMEL I. u. S. LANGE:  
Weitergehende Abwasserreinigung von Papierfabriksabwässern mit Ozon: Konzeption und erste Betriebserfahrungen  
Das Papier (2001) 2, T30-T34
- 4 Möbius C.H. u. A. Helble  
Combined ozonation and biofilm treatment for reuse of paper mill waste waters  
Water Science and Technologie **49**(2004)4, 319-323
- 5 BIERBAUM S. und H.-J ÖLLER:  
Ozonbehandlung von Papierfabriksabwässern  
GWf Wasser Abwasser **150** (2009), Nr. 12, S. 1024 – 1028.
- 6 SIMSTICH B.; ÖLLER H.-J.  
Entwicklungspotenzial nutzen – Membranprozesse in der Papierindustrie  
Wasserwirtschaft Wassertechnik (wwt) (2007)7-8; S.25
- 7 SCHMID-SCHMIEDER V.:  
Leistungsfähigkeit von Biofilmverfahren  
wwt wasserwirtschaft wassertechnik (2002) 5; 33-38
- 8 N.N.  
Aerobe Biofilmverfahren in der Industrieabwasserreinigung - Definitionen, Verfahrenstechniken, Einsatzgebiete, Bemessungshinweise;  
Arbeitsbericht der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe IG-5.6 „Biofilmverfahren“  
KA-Abwasser, Abfall **51** (2004), 195 - 198
- 9 BLANK A., HOFFMANN E. u. H.H. HAHN:  
Integration von schwimmenden Aufwuchskörpern in Belebungsanlagen zur Erhöhung der Sedimentationsleistung von Nachklärbecken  
KA-Abwasser, Abfall **54** (2007), 484 - 487
- 10 DALETHOFT E. u. P. THULIN:  
The use of the Kaldnes suspended carrier process in treatment of waste water from the forest industry  
Water Science and Technology **35** (1997), 123 - 127
- 11 NICOLELLA C., DI FELICE R. u. M. ROVATTI:  
Biomass concentration in fluidized bed biological reactors  
Water Res. **31** (1997), 936 - 940

- 12 GRAJA S., COMETT I. u. P. A. WILDERER:  
Abwässer aus der anaeroben Vergärung biogener Abfälle - Charakterisierung und  
Behandlungsstrategien  
München: Technische Universität, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wassergüte- und  
Abfallwirtschaft 2004, BayFORREST-Forschungsvorhaben F144, 2004, 16 S.
- 13 ANDREOTTOLA G., FOLADORI P., RAGAZZI M. u.a.:  
Experimental comparison between MBBR and activated sludge systems of the treatment of  
municipal wastewater  
Water Science and Technology **41** (2000), 375 - 382
- 14 MUDRACK K. u. S. KUNST: Biologie der Abwasserreinigung  
Stuttgart: Gustav Fischer Verlag 2003, 4. Aufl.
- 15 KROEHER B., DEUCHERT K. u. U. RICHTER:  
Aerobe biologische Abwasserbehandlung in einer Spezialpapierfabrik  
WLB. Wasser; Luft und Boden **43** (1999), 11/12, 30 - 31
- 16 STEUBE K., RICHTER U. u. C. HÜNER: Biologische Abwasserreinigung mittels  
Schwebebettverfahren – Verfahrensprinzip, Anwendungsbeispiele und Betriebserfahrungen aus  
der Papier- und Zellstoffindustrie  
In: N.N. 1. PTS-CTP-Symposium Umwelttechnik, I. Demel u. H.-J. Öller (Hrsg.),  
München: PTS 1999 PTS-Symposium WU-SY 908
- 17 MARTIENSSEN M.:  
Leistungen immobilisierter Mikroorganismen bei der Eliminierung von Umweltschadstoffen;  
Habilitationsschrift zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. nat. habil.  
Halle/Saale: Martin-Luther-Universität (Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät)  
2001, 201 S.
- 18 FITCH M.W., PEARSON N., RICHARDS G. u.a.:  
Biological fixed film systems  
Water Environ. Res. **70** (1998), 495 – 518
- 19 HUBER ST.:  
Analytical Laboratory specialised in Characterisation of Organic Matter in Waters (LC-OCD: Liquid  
Chromatography - Organic Carbon Detection)  
[www.doc-labor.de](http://www.doc-labor.de) (Webseite )
- 20 SPÖRL R., WAGENKNECHT A. u. H.-J. ÖLLER:  
Neue Erkenntnisse zum stofflichen Charakter der organischen Restbelastung im Abwasser der  
Papierfabrikation;  
PTS-Webveröffentlichung unter [www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de); 18 S.
- 21 DUNGER, W. u. H.-J. FIEDLER:  
Methoden der Bodenbiologie  
Gustav-Fischer-Verlag, 1997
- 22 HÄNEL K.  
Biologische Abwasserreinigung mit Belebtschlamm.  
Jena:Gustav Fischer Verlag (1986)
- 23 R. SPÖRL, A. WAGENKNECHT u. H.-J. ÖLLER  
Neue Erkenntnisse zum stofflichen Charakter der organischen Restbelastung im Abwasser  
der Papierfabrikation  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de), PTS-Forschungsberichte, 28.01.2005, 18 S.



## Glossar

<b>Glossar</b>	Abl	Ablauf
	ALFA	Alpha-Proteobakterien
	ARA	Abwasserreinigungsanlage
	ATW	Alternativer Testwert
	B <sub>d, BSB</sub>	BSB-Tagesfracht
	B <sub>d, CSB</sub>	CSB-Tagesfracht
	B <sub>R, BSB</sub>	BSB-Raumbelastung
	B <sub>R, CSB</sub>	CSB-Raumbelastung
	B <sub>hydr</sub>	Hydraulische Belastung
	B <sub>hydr-OF</sub>	Hydraulische Oberflächenbelastung (Trägerkörper)
	Bel	Belüftung
	BETA	Beta-Proteobakterien
	BF	Biofilm
	BS	Belebtschlamm
	BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
	BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
	CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
	CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
	CTMP	Chemo Thermo Mechanical Pulp
	d	Tag
	Da	Dalton
	DOC	Dissolved Organic Carbon
	Elim	Elimination
	eta	Wirkungsgrad
	FISH	Fluoreszenz in-situ Hybridisierung
	GAM	Gamma-Proteobakterien
	GV	Glühverlust
	HGC	High Guanin/Cytosin
	HOC	Hydrophobic Organic Carbon
	HS	Huminstoff
	kDa	Kilodalton
	LAS	Leicht abbaubares Substrat
	LC	Liquid Chromatography
	LVA	Laborversuchsanlage
	LMW	Low Molecular Weight
	MBBR	Moving-Bed-Biofilm-Reactor
	MW	Mittelwert
	NKB	Nachklärbecken
	OC	Organischer Kohlenstoff
	OCD	Organic Carbon Detection
	oTS	Organische Trockensubstanz
	P <sub>ges</sub>	Gesamtphosphor
	pH	pH-Wert
	rel	Relativ
	rRNA	Ribosomale Ribonukleinsäure
	STABW	Standardabweichung

SB	Sequenzierung Batch
SBR	Sequenzierung-Batch-Reaktor
STDAbw	Standardabweichung
T	Temperatur
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen
TMP	Thermo Mechanical Pulp
TRW	Testreferenzwert
TW	Testwert
TS	Trockensubstanz
UV	Ultraviolett
V	Volumen
$V_{\text{Reaktor}}$	Reaktorvolumen
VWZ	Verweilzeit
vgl.	Vergleiche
VT	Versuchstag
Zul	Zulauf
ZWT	Zahn-Wellens-Test

---

[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

Papiertechnische Stiftung

PTS in München: Heßstraße 134 · 80797 München · Telefon +49 (0)89-12146-0 · Telefax +49 (0)89-12146-36

PTS in Heidenau: Pirnaer Straße 37 · 01809 Heidenau · Telefon +49 (0)3529-551-60 · Telefax +49 (0)3529-551-899