



Dr. Christian H. Möbius
Muesmannstr. 15 g
86199 Augsburg
Deutschland

Tel. +49 821 994120
Fax +49 821 994121
Mobiltel. +49 171 1244284
E-Mail: cm@cm-consult.de
Internet: www.cm-consult.de

Gewässerschutz und Abwasserreinigung

Christian H. Möbius

Diese Informationsschrift ist eine überarbeitete und erweiterte Fassung eines Vorlesungsblocks des Autors für die Duale Hochschule Karlsruhe im Papierzentrum Gernsbach, DH-Studiengang Papiertechnik VII. Matrikel, 5. Semester, Lehrveranstaltung Umwelttechnik Papierindustrie 2010.

Die Darstellung soll der Information von Mitarbeitern der Zellstoff- und Papierindustrie dienen, die nur am Rande mit den hier behandelten Fragen befasst sind. Auf ausführliche technische Darstellungen und Literaturverweise wird deshalb verzichtet.

Alle verfahrenstechnischen Hinweise beruhen auf den in C.H. MÖBIUS, Abwasser der Papier- und Zellstoffindustrie, 4. Auflage, Dezember 2010, Quelle: <http://www.cm-consult.de>, Datei *AbwasserCM_310.pdf* dargestellten allgemein akzeptierten technischen Regeln der Branche, worauf im Einzelnen nicht weiter hingewiesen wird. Gängige Abkürzungen und Fachausdrücke sind in der angegebenen frei verfügbaren Quelle ausgeführt und werden hier nicht weiter erläutert.

Inhalt

1 Gewässerschutz

1.1 Was soll geschützt werden?

1.2 EU Wasserrahmenrichtlinie

1.3 Wasserführung in Fließgewässern

1.4 Chemische und physikalische Parameter, Summenparameter

1.5 Konzentrationen und Frachten

1.6 Mikrobiologie

1.7 Wassergebrauch

2 Abwasserreinigung

2.1 Mechanisch-chemische und physikalisch-chemische Verfahren

2.2 Biologische Verfahren

2.2.1 anaerob

2.2.2 aerob

2.3 Verfahren der weitergehenden Reinigung

2.4 Besonderheiten der Abwässer der Papier- und Zellstoffindustrie

2.4.1 Spezifische Werte

2.4.2 Nährstoffbedarf

2.4.3 Neigung zur Blähschlammentwicklung

2.4.4 Hohe Zehrungsraten, fakultativ anaerobe Mikroorganismen, Sulfatreduktanden

2.4.5 Kalkproblem

2.4.6 Sehr unterschiedliche Konzentrationsniveaus und Zusammensetzungen abhängig vom Sortenprogramm: Auswahl der Konzepte

1 Gewässerschutz

1.1 Was soll geschützt werden?

Unsere Gewässer dienen nicht nur den darin lebenden Organismen als unabdingbarer Lebensraum, sondern sie sind auch integraler Bestandteil unserer Umwelt. Neben dem Erholungswert und der Nutzung als Brauchwasserquelle für Industrie und Gewerbe sind sie in dicht besiedelten Regionen wie Mitteleuropa auch oft (ggf. nach Aufbereitung) Quelle des Trinkwassers.

Sind die Gewässer verschmutzt, geht die Artenvielfalt der Gewässerorganismen zurück (bis zum weitgehenden Verschwinden in „toten“ Gewässern). Verschmutzte Gewässer wirken störend vom unangenehmen Anblick bis zur Geruchsbelästigung und der Nutzwert vom Fischerei- oder Bade-Gewässer bis zur Trinkwasserquelle geht verloren.

Die Qualität („Güte“) der Gewässer wird quantifiziert mit unterschiedlichen Bewertungssystemen. **Abbildung 1** zeigt das Güteklassensystem der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) in 5 Stufen, welches einen integrierten Ansatz unter Einbeziehung der 3 in **Abbildung 2** gezeigten Elemente chemisch-physikalische Bewertung, biologische Bewertung und strukturelle Bewertung verfolgt. EU-weit wird die Güte II, der so genannte gute Zustand, als Mindeststandard angestrebt.

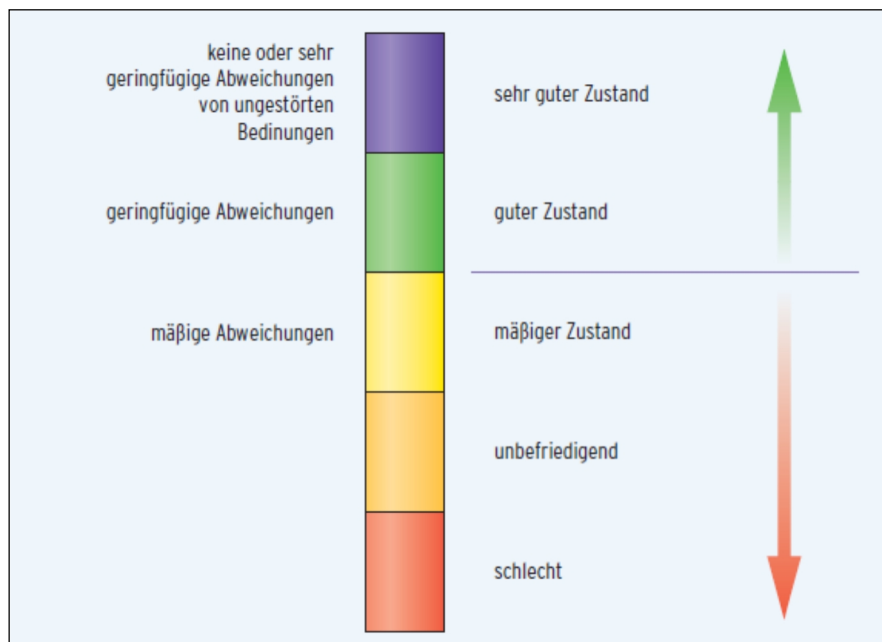


Abbildung 1: System der Gewässergütebewertung nach der EU-WRRL








Definitionen				
Güte- klassen	chemische/physikalische Bewertung (LAWA)	biologische Bewertung (Saprobienindex)	strukturelle Bewertung	farbliche Darstel- lung
I	anthropogen unbelastet	unbelastet	unveränderter Gewässerabschnitt	
I-II	sehr geringe Belastung	gering belastet	gering veränderter Gewässerabschnitt	
II	mäßige Belastung	mäßige Belastung	mäßig veränderter Gewässerabschnitt	
II-III	deutliche Belastung	kritisch belastet	deutlich veränderter Gewässerabschnitt	
III	erhöhte Belastung	stark verschmutzt	stark veränderter Gewässerabschnitt	
III-IV	hohe Belastung	sehr stark verschmutzt	sehr stark veränderter Gewässerabschnitt	
IV	sehr hohe Belastung	übermäßig stark verschmutzt	völlig veränderter Gewässerabschnitt	


Abbildung 2: Güteklassen nach verschiedenen Bewertungen

Die quantitative Bewertung der biologischen Gewässergüte erfolgt im Allgemeinen nach dem „Saprobien-system“, wobei die Artenvielfalt und Anzahl der Gewässerorganismen auf-genom-men wird (biologische Gewässergütebeurteilung). Ausgewählte Leitorganismen vereinfachen die Anwendung des Systems (siehe **Abbildung 3**). Mehr Beispiele zu den Leitorganismen findet man unter¹.

Leitorganismen Gütestufe II (Auswahl):

Fische: in großer Artenvielfahl

Güteklasse II



Leitorganismen Gütestufe IV (Auswahl):

Schlammröhrenwurm: Tubifex spp.
Schwebfliegenlarven: Eristalinae
Abwasser'pilz': Sphaerotilus natans

Güteklasse IV

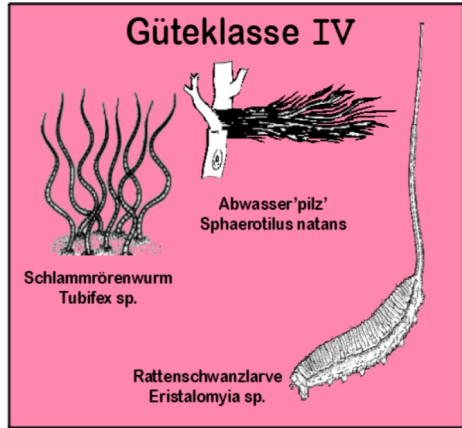


Abbildung 3: Beispiele für Leitorganismen zur biologischen Gütebewertung nach dem Saprobien-system

¹ <http://wasserwerke-sonneberg.de/v4/abwasser/wissenswertes/beeinflussung-gewaesserqualitaet.html>

Die Selbstreinigungskraft der Gewässer ist in der Lage, die Wasserqualität – besonders effektiv bei Fließgewässern – bei geringen und verteilten Beeinträchtigungen wiederherzustellen. Dies versagt mit zunehmender Siedlungsdichte und insbesondere bei massiven industriellen Einwirkungen.

Eine Auswahl der von der LAWA angegebenen Kriterien für die chemische Gewässergüte wird im Folgenden gezeigt.

Für den BSB5-Wert gelten folgende Richtwerte:

GK I < 1 mg/l, GK II 1,0 - 4,9 mg/l. GK III 5,0 - 9,9 mg/l, GK IV > 10 mg/l.

Chemische Gewässergüte nach LAWA-Einteilung* (Auswahl)

Sauerstoffgehalt

Einheit: mg/l	
I	> 8,5
I - II	> 8 - 8,5
II	> 6 - 8
II - III	> 5 - 6
III	> 4 - 5
III - IV	> 2 - 4
IV	<= 2
	Ohne Angabe

Gesamtstickstoff

Einheit: mg/l	
I	<= 1
I - II	> 1 - 1,5
II	> 1,5 - 3
II - III	> 3 - 6
III	> 6 - 12
III - IV	> 12 - 24
IV	> 24
	Ohne Angabe

TOC

Einheit: mg/l	
I	<= 2
I - II	> 2 - 3
II	> 3 - 5
II - III	> 5 - 10
III	> 10 - 20
III - IV	> 20 - 40
IV	> 40
	Ohne Angabe

Chlorid

Einheit: mg/l	
I	<= 25
I - II	> 25 - 50
II	> 50 - 100
II - III	> 100 - 200
III	> 200 - 400
III - IV	> 400 - 800
IV	> 800
	Ohne Angabe

Ammonium-N

Einheit: mg/l	
I	<= 0,04
I - II	> 0,04 - 0,1
II	> 0,1 - 0,3
II - III	> 0,3 - 0,6
III	> 0,6 - 1,2
III - IV	> 1,2 - 2,4
IV	> 2,4
	Ohne Angabe

Sulfat

Einheit: mg/l	
I	<= 25
I - II	> 25 - 50
II	> 50 - 100
II - III	> 100 - 200
III	> 200 - 400
III - IV	> 400 - 800
IV	> 800
	Ohne Angabe

Nitrat-N

Einheit: mg/l	
I	<= 1
I - II	> 1 - 1,5
II	> 1,5 - 2,5
II - III	> 2,5 - 5
III	> 5 - 10
III - IV	> 10 - 20
IV	> 20
	Ohne Angabe

AOX

Einheit: µg/l	
I	<= 0
I - II	> 0 - 10
II	> 10 - 25
II - III	> 25 - 50
III	> 50 - 100
III - IV	> 100 - 200
IV	> 200
	Ohne Angabe

* Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1998): Beurteilung der Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern in der Bundesrepublik Deutschland -Chemische Gewässergüteklassifikation-, herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 1. Auflage, Berlin August 1998, ISBN 3-88961-224-5. Bezug: Kulturbuchverlag Berlin GmbH, Sprosserweg 3, D-12351 Berlin.

1.2 EU Wasserrahmenrichtlinie

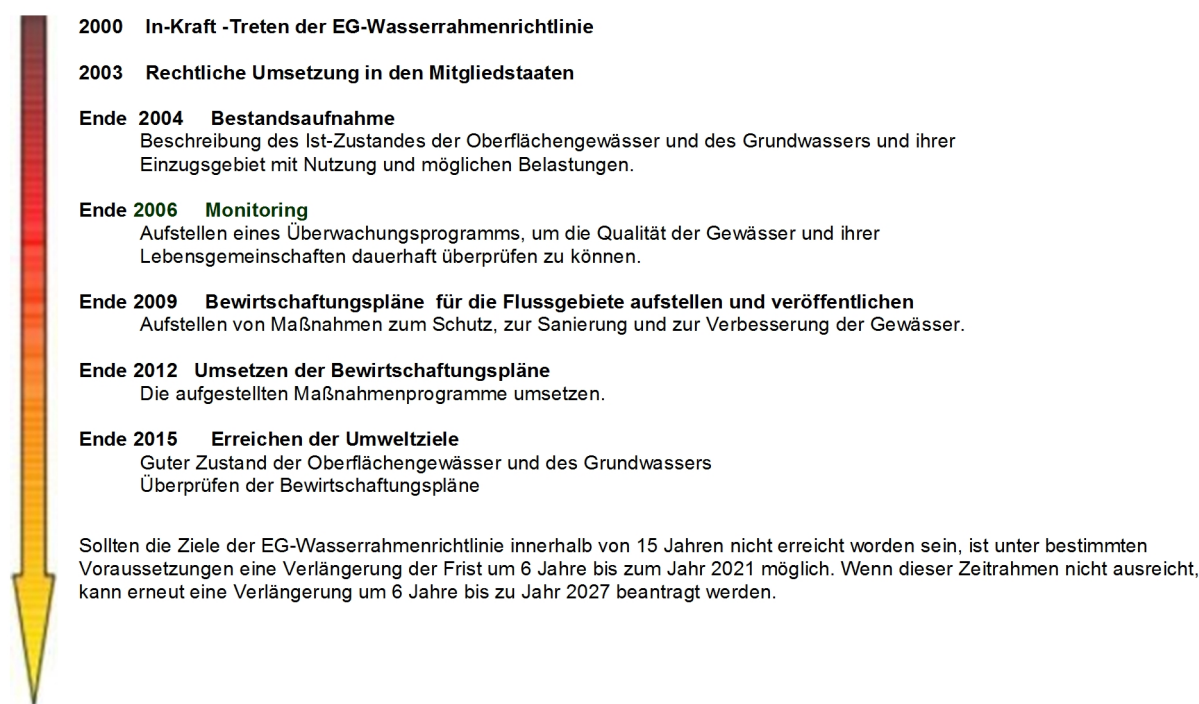
Die EU Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, *water frame directive* WFD, 2000/60/EG [ABl. L 327/1]) dient expressis verbis dem Gewässerschutz, der im Gesamttraum der EU auf einen einheitlichen Standard gebracht werden soll. Ziel ist die Schaffung oder Erhaltung mindestens der Gütestufe II („guter Zustand“) nach dem neuen Standard der WRRL.

Die WRRL gibt zunächst nur Handlungsanweisungen an die Regierungen und die zuständigen Behörden der Mitgliedsstaaten. Einleiter sind nicht unmittelbar betroffen. Sie können aber von dem durch die WRRL ausgelösten Handeln der Behörden betroffen sein, da diese – soweit es sich aus der Bestandsaufnahme ergibt – Maßnahmen zur Sanierung der Gewässer ergreifen müssen.

In der seit Oktober 2000 vorliegenden Richtlinie werden verschiedene durch die Mitgliedsstaaten zu erbringende Leistungen bis zum Jahr 2015 terminiert. Den Zeitplan zeigt die nachstehende Übersicht:

Zeitplan

Den straffen Zeitplan zur Umsetzung der Umweltziele gibt die EG-Wasserrahmenrichtlinie wie folgt vor:



Die Maßnahmen werden durch die Vorgaben der WRRL strukturiert, welche eine Gliederung von der großräumigen „Flussgebietseinheit“ bis zum „Wasserkörper“ (einheitlicher und bedeutender Abschnitt eines Oberflächengewässers) vorgibt.

Die Bewirtschaftungspläne orientieren sich an einem „kombinierten Ansatz“ für Punktquellen und diffuse Quellen durch die Begrenzung von Einleitungen und Emissionen in Oberflächengewässer, der die Erreichung der Umweltziele unter anderem durch die Festlegung von Emissionsbegrenzungen und Emissionsgrenzwerten für Punktquellen anstrebt. Solche Grenzen sind sowohl für Direkteinleiter als auch für Indirekteinleiter (unter Berücksichtigung der Reinigungsleistung der eingeschalteten Reinigungsanlage) erforderlichenfalls festzulegen. Von solchen Festlegungen sind auch Papierfabriken betroffen, insbesondere solche, die in empfindliche oder hoch belastete Wasserkörper einleiten.

Eine besonders für Papierfabriken an kleineren Vorflutern zu erwartende zusätzliche Belastung resultiert aus dem in der WRRL konsequent verfolgten integrierten Ansatz, der die Zielsetzung des „guten Zustands der Oberflächengewässer“ bzw. des „guten ökologischen Potentials“ bei erheblich veränderten oder künstlichen Wasserkörpern an biologischen, chemischen und strukturellen Kriterien misst. Die Struktur der Gewässer wurde in der Vergangenheit besonders an Papierfabrik-Standorten durch Entnahmestauhaltungen (Wehre) und Überbauungen des Gewässers oft erheblich verändert. Solche ohne substantielle Einschränkungen des Produktionsstandorts meist nicht reversiblen Eingriffe werden ein erhebliches Problem bei der Realisierung der von den Behörden zur Sicherung der durch die WRRL definierten Umweltziele festzulegenden Maßnahmen darstellen.

1.3 Wasserführung in Fließgewässern

Industrielle Abwässer werden in Mitteleuropa nahezu ausschließlich in Fließgewässer eingeleitet, weshalb wir uns hier auf diese konzentrieren.

Die Anforderungen, die an die Qualität eingeleiteter Abwässer zu stellen sind, müssen die Durchflussmenge des Gewässers („Schüttung“) berücksichtigen. Diese ist jahreszeitlich sehr unterschiedlich und witterungsabhängig ist der jahreszeitliche Verlauf auch von Jahr zu Jahr verschieden. Deshalb werden langfristige Leitwerte (Beobachtungszeitraum in der Regel > 10 Jahre) für das Gewässer aufgestellt, wobei hervorzuheben sind

- NQ Niedrigster Abfluss im Beobachtungszeitraum
- **MNQ Mittlerer niedrigster Abfluss im Beobachtungszeitraum**
- MQ Mittlerer Abfluss im Beobachtungszeitraum
- MHQ Mittlerer höchster Abfluss im Beobachtungszeitraum
- HQ Höchster Abfluss im Beobachtungszeitraum

Die Durchflussmengen von Gewässern werden üblicherweise in l/s angegeben. Grundlage für die gewässerbezogene Berechnung zulässiger Einleitungsfrachten ist gewöhnlich MNQ.

1.4 Chemische und physikalische Parameter, Summenparameter

Die an die Qualität eingeleiteter Abwässer zu stellenden Anforderungen können aus der chemisch-biologischen Gewässergüte des aufnehmenden Gewässers, der Vorbelastung und dem Güteziel in Verbindung mit der Durchflussmenge des Gewässers abgeleitet werden.

Wesentlichen Einfluss haben

- die physikalischen Parameter pH, T, Farbe,
- die chemischen Parameter N, P, Cl, SO₄,
- die Summenparameter CSB, BSB, TOC, AOX.

Dies sind auch die bei der Festlegung von Einleitungsbedingungen vorzugsweise zu beachtenden Parameter (Cl und SO₄ werden dabei in der Regel vernachlässigt).

Zur **Temperatur** ist anzumerken: Eine über das natürliche jahreszeitlich bedingte Niveau hinaus erhöhte Gewässertemperatur hat gravierend nachteiligen Einfluss auf die Gewässerorganismen, insbesondere ihre Reproduktionszyklen. Um eine übermäßige Erwärmung des aufnehmenden Gewässers zu vermeiden wird die Einleittemperatur für das Abwasser begrenzt, in der Regel auf 30 °C. Höhere Temperaturen können beschränkt auf bestimmte Jahreszeiten oder bei besonders leistungsfähigen (großen) Vorflutern akzeptiert werden. Zusätzlich wird oft die Aufwärmspanne kontrolliert, teilweise auch begrenzt: ΔT oberhalb der Einleitung und unterhalb nach Vermischung (bei Salmonidengewässern 1,5 °C, bei Cyprinidengewässern 3 °C). Dies setzt bei Papierfabriken oft eine Abwasserkühlung voraus.

Die **Summenparameter** bedürfen eines Kommentars. Sie werden wie Stoffgrößen behandelt, was zulässig ist, wenn man sich bewusst bleibt, dass sie das nicht tatsächlich sind. TOC und AOX repräsentieren Stoffmengen, allerdings handelt es sich hier um die Summe verschiedenartiger Stoffe, die im Einzelnen nicht bekannt sind. Angegeben wird nicht die Menge der Stoffe, sondern eine Größe, welche diese repräsentiert (bei TOC die Menge des in den Stoffen enthaltenen Kohlenstoffs, bei AOX die Menge Chlorid, die in den an Aktivkohle adsorbierbaren organischen Stoffen enthalten ist).

CSB und BSB sind **Wirkgrößen**, die nur hilfsweise wie Stoffmengen behandelt werden. Die Wirkgrößen kennzeichnen aber nur die Auswirkungen - Sauerstoffzehrung bei BSB, Oxidationsmittelbedarf bei CSB - von Stoffen unter bestimmten Bedingungen. Für eine bestimmte organische Substanz ist ein unveränderliches Verhältnis BSB/CSB gegeben, d. h. eine

Menge dieser Substanz verursacht stets die gleiche als BSB oder CSB messbare Wirkung. Wird der BSB biologisch abgebaut, wird die entsprechende „Menge“ CSB gleichzeitig eliminiert (übrig bleibt der biologisch nicht abbaubare Anteil des CSB). Kohlenhydrate, die den größten Teil der biologisch abbaubaren Stoffe in Papierfabriks-Abwässern darstellen, haben ein Verhältnis BSB_5/CSB von 0,6 bis 0,65. Diese Erkenntnis ermöglicht eine Vorausberechnung des Rest-CSB nach biologischer Reinigung (unter Vernachlässigung von Rücklösung und Autolyse). Dies wird in **Abbildung 4** veranschaulicht.

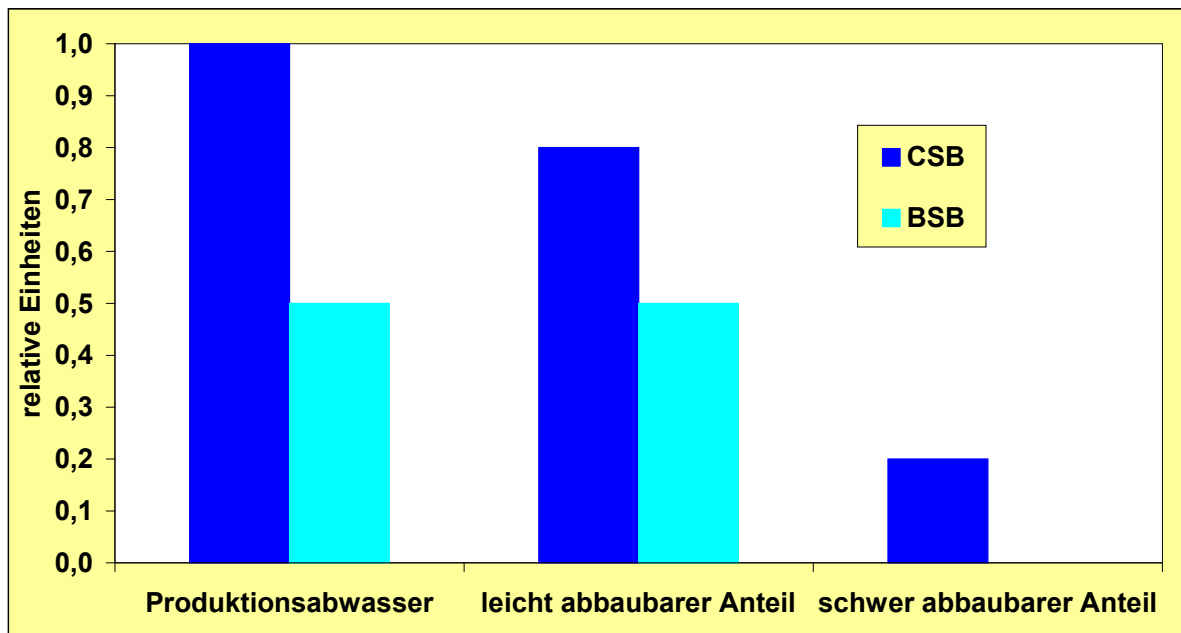


Abbildung 4: Schematische Darstellung von BSB und CSB in Papierfabriks-Abwässern

1.5 Konzentrationen und Frachten

Die Fracht ergibt sich als Produkt aus Menge und Konzentration $B = Q \cdot c$.

In Gewässerschutz und Abwasserreinigung sind meist Frachten der belastenden Stoffe relevant. Nur in Ausnahmefällen sind Konzentrationen bedeutsam, so z. B. bei toxischen Stoffen, die oberhalb einer bestimmten Konzentrationsschwelle (unabhängig von der Fracht) zur akuten Schädigung von Organismen führen. Im Gewässer ist die Einleitkonzentration von Stoffen im Abwasser nur in unmittelbarer Nähe der Einleitungsstelle wirksam, nach Vermischung mit dem aufnehmenden Gewässer stellt sich abhängig von der eingeleiteten Fracht und der Durchflussmenge des Gewässers eine neue – sehr viel geringere – Konzentration ein, die dann im vorher dargestellten Sinn für die Gewässergüte entscheidend ist.

1.6 Mikrobiologie

Die Biozönose des Gewässers wird wesentlich bestimmt von der Summe der Mikroorganismen, d. h. Bakterien, Protozoen, Pilze und Algen. Diese sorgen einerseits für die Selbstreinigung des Gewässers, zehren aber dabei auch Sauerstoff und können so – bei auftretendem Sauerstoffmangel – zum „Kippen“ des Gewässers führen.

Bei übermäßiger Versorgung mit Nährstoffen (insbesondere Stickstoff und Phosphor) tritt ein übermäßig hohes Wachstum von Algen und Kleinstlebewesen (Phyto- und Zoo-Plankton) ein („Eutrophierung“). Diese sterben dann ab und werden von Mikroorganismen unter Sauerstoffverbrauch zersetzt, weshalb dies für ein Gewässer gefährlich ist.

Die für die Selbstreinigung des Gewässers verantwortlichen Mikroorganismen werden auch bei der biologischen Abwasserreinigung genutzt, wobei sie allerdings in deutlich höherer Konzentration eingesetzt werden müssen, damit der Prozess bei vertretbaren Aufenthaltszeiten in den Reaktoren ablaufen kann.

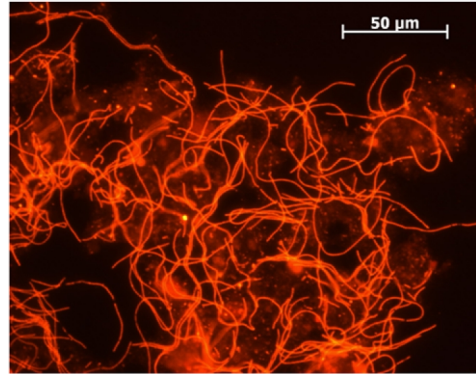
Man unterscheidet zwischen aeroben Mikroorganismen – die Sauerstoff brauchen – und anaeroben, die nur unter Ausschluss von Sauerstoff aktiv werden. Die Gruppe der fakultativ anaeroben Mikroorganismen² kann in sauerstoffarmem Milieu (sog. anoxische Systeme, etwa < 0,3 mg/l O₂) wirksam sein. Alle 3 Gruppen sind in unbehandelten Papierfabriks-Abwässern vorhanden. Welche davon sich in einer gegebenen Umgebung vermehren, hängt von den Bedingungen ab (pH, T, O₂).

Eine Auswahl an Gewässer-Mikroorganismen, die auch bei der biologischen Abwasserreinigung auftreten, zeigt **Abbildung 5**.

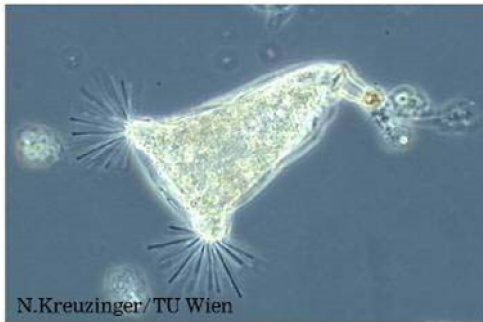
² Organismen, die sowohl unter anaeroben als auch unter aeroben Bedingungen wachsen können (http://www.pflegewiki.de/wiki/Fakultativ_anaerob)



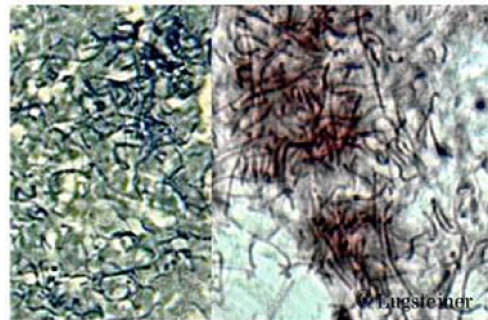
Brachionus



Microthrix parvicella



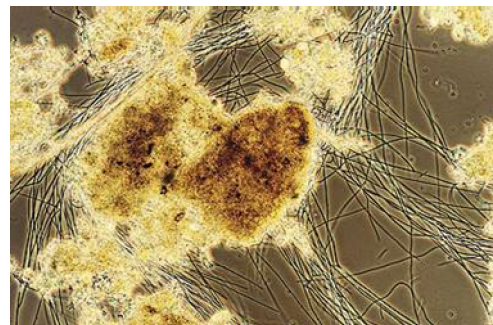
Tokophrya lemnae



Nocardia



Paramecium



Sphaerotilus



Nematoden



Epistylis

Abbildung 5: Mikroorganismen im Gewässer, die auch bei der biologischen Abwasserreinigung aktiv werden

1.7 Wassergebrauch der Industrie

Der Wassergebrauch und der Abwasseranfall werden in der Papier- und Zellstoffindustrie durch spezifische Werte, bezogen auf die erzeugte Menge, gekennzeichnet. Diese Werte können durch unterschiedliche Grade der Wasserwiederverwendung beeinflusst werden. Die Unterschiede sind einerseits von der technischen Entwicklung - und der individuellen Umsetzung im einzelnen Betrieb - und andererseits sehr stark von den Anforderungen des erzeugten Produktes abhängig.

Wir beziehen uns auf folgende Definitionen³:

- **Wassergebrauch** ist die Menge des für die Produktion verwendeten Wassers, wobei getrennter oder zusätzlicher Kühlwasserbedarf nicht erfasst wird, wenn dies nicht ausdrücklich gekennzeichnet wird.
- **Wasserverbrauch** ist die Menge des für die Produktion verwendeten Wassers, die (vorwiegend durch Verdampfung) irreversibel verloren geht.
- **Wasserbedarf** ist die für die Produktion technisch notwendige Wassermenge (ohne Berücksichtigung ggf. nach interner oder externer über die Entstoffung hinausgehender Reinigung zurückgeführter Mengen).

Die relevante Größe ist in der Regel der Wassergebrauch.

2 Abwasserreinigung

Die Abwasserreinigung muss so durchgeführt werden, dass die Qualität des gereinigten Abwassers bestimmten Zielen entspricht.

In der EU werden die branchenspezifisch beschriebenen *best available techniques* (BAT, dt. beste verfügbare Techniken BVT) als Standard vorgegeben. Sie sind festgelegt in den *best available technique reference papers* (BREF), für die Zellstoff- und Papierindustrie im BREF *pulp and paper*.

Bei allen neuen Anlagen sind die Genehmigungsbehörden gehalten, diese Standards bei der Festlegung von Grenzwerten zugrunde zu legen.

³ C.H. MÖBIUS, Abwasser der Papier- und Zellstoffindustrie, 4. Auflage, Dezember 2010, Quelle: <http://www.cm-consult.de>, Datei *AbwasserCM_410.pdf*

In der Bundesrepublik Deutschland wurden branchenspezifische Mindestanforderungen festgesetzt, die als Anhänge zur Abwasserverordnung veröffentlicht werden. Für die Zellstoffindustrie ist das der Anhang 19, für die Papierindustrie der Anhang 28. Die darin definierte Qualität der gereinigten Abwässer darf in der Genehmigung nicht unterschritten werden. Höhere Qualitätsanforderungen müssen angewendet werden, wenn dies zur Erhaltung oder Erreichung der Gewässerqualitätsziele erforderlich ist.

Abbildung 6 zeigt in einer Übersicht die heutige Aufteilung der Reinigungsverfahren (unter Einschluss des Anteils der abwasserlosen Erzeugung) in der Papierindustrie der Bundesrepublik Deutschland und veranschaulicht damit die Bedeutung der anschließend behandelten biologischen Verfahren, wobei die mechanisch-chemischen und physikalisch-chemischen Verfahren lediglich der Vor- oder Nachreinigung dienen.

Eine Übersicht über die in der Zellstoff- und Papierindustrie üblichen Verfahren der Abwasserreinigung unter Einschluss sowohl der hier dargestellten Verfahren der Vorreinigung als auch der Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung gibt **Abbildung 7**.

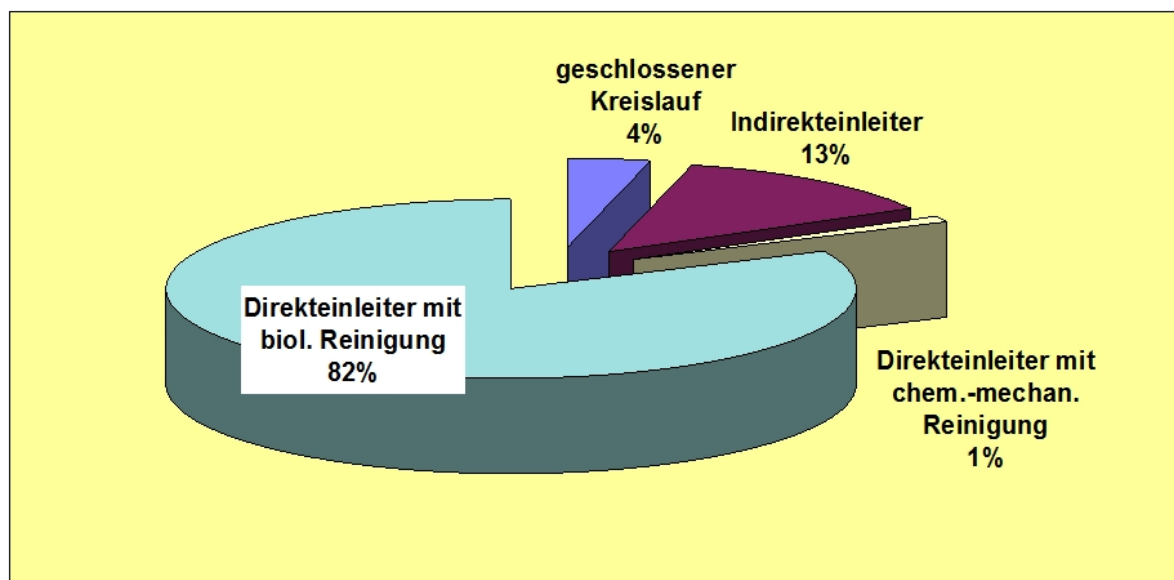


Abbildung 6: Abwasser der deutschen Papierindustrie bezogen auf die erzeugte Produktmenge im Jahr 2007 (nach Jung, Hentschke, Pongratz und Götz)

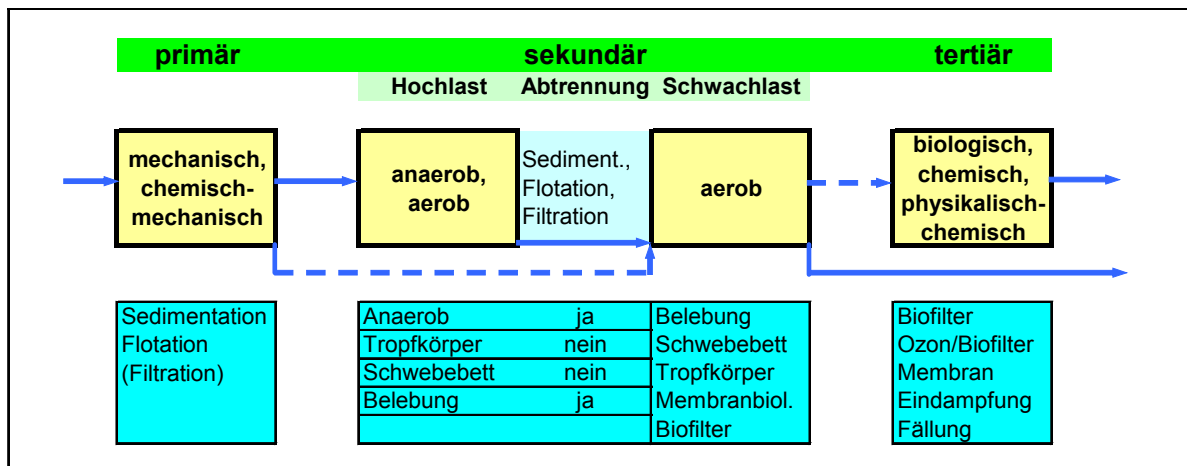


Abbildung 7: Übersicht über bewährte Verfahrensketten in der Zellstoff- und Papierindustrie

2.1 Mechanisch-chemische und physikalisch-chemische Verfahren

Mechanische oder chemisch-mechanische Trennverfahren werden in der Regel Bioreaktoren vorgeschaltet, um inerte Feststoffe vor der biologischen Behandlungsstufe zu entfernen. Hierfür werden in der Regel Sedimentationsbecken (vorzugsweise Rundklärbecken mit Pendelschildräumern) oder Flotationsanlagen verwendet. Die Trennung kann durch Einsatz von Flockungs- und/oder Flockungshilfsmitteln unterstützt werden.

Diese vorgeschaltete Abtrennung ist bei den meisten biologischen Verfahren zum Schutz der Bioreaktoren erforderlich. In der Regel genügt dabei eine Abtrennung auf eine Konzentration suspendierter Stoffe (abfiltrierbarer Stoffe AFS) von < 80 mg/l.

Die physikalisch-chemische Behandlung ist für die Abwässer der Papier- und Zellstoffindustrie im Allgemeinen ein der biologischen Behandlung untergeordnetes Verfahren. Einerseits ist dies so, weil sie meist nicht ausreicht, um die Anforderungen zu erfüllen, andererseits ist die biologische Behandlung fast immer der kostengünstigste Weg, um das Abwasser weitgehend von der Belastung mit organischen Stoffen zu befreien. Die physikalisch-chemische und die physikalische Behandlung (Adsorption, Fällung, chemische Oxidation, Membranverfahren, Eindampfung) können jedoch oft eine sinnvolle oder notwendige Ergänzung der biologischen Reinigung - vor- oder nachgeschaltet - sein. Für die zunehmend Bedeutung gewinnenden Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung sind teilweise physikalisch-chemische oder chemische Verfahren, auch in Kombination mit biologischen Verfahren, besonders geeignet.

2.2 Biologische Verfahren

2.2.1 anaerob

Die anaerobe Abwasserbehandlung fand in den letzten 25 Jahren weitere Verbreitung in der Papier- und Zellstoffindustrie. Die wesentlichsten Gründe dafür sind der geringe Energiebedarf und die geringe Überschussschlammproduktion dieses Abwasserbehandlungsverfahrens im Vergleich zur üblichen aeroben Behandlung.

Für die Behandlung von Papierfabriks-Abwasser hat sich das Verfahren bei der Erzeugung von Verpackungspapieren, insbesondere den sulfatarmen Wellpappenrohwpapieren, gut eingeführt.

Der anaerobe Abbau erfolgt in 4 Teilschritten, an denen jeweils unterschiedliche Bakteriengruppen beteiligt sind (**Abbildung 8**). Die Kenntnis dieser Vorgänge ist Grundlage der Lösung in der Praxis auftretender Probleme ebenso wie der Diskussion der bei der anaeroben Abwasserbehandlung über Erfolg oder Misserfolg entscheidenden verfahrenstechnischen Fragen.

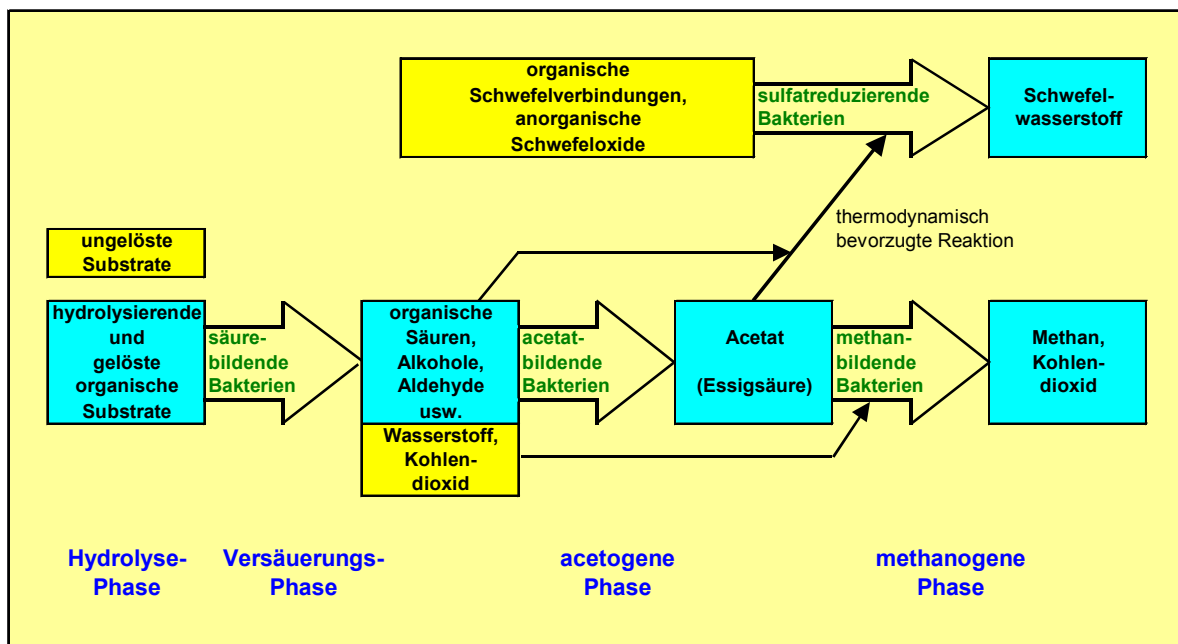


Abbildung 8: Anaerober Abbau organischer Substanz mit Nebenreaktionen nach SEYFRIED U. SIXT

Anaerob behandelte Abwässer müssen vor der Einleitung in ein Gewässer immer aerob nachbehandelt werden, da eine anaerobe Vollreinigung - d.h. Behandlung mit vollständigem BSB-Abbau auf < 20 mg/l - nach bisherigem Kenntnisstand nicht möglich ist.

Die bekannten anaeroben Verfahren können zunächst in solche ohne und solche mit Bio-masse-Träger - das sind Aufwuchsflächen für die Mikroorganismen im Reaktor - unterteilt werden. Die letzten in der Papierindustrie gebauten Anlagen bedienen sich alle der sogenannten EGSB-Reaktoren, einer Weiterentwicklung des UASB-Verfahrens (Verfahren ohne Biomasseträger), siehe **Abbildung 9**.

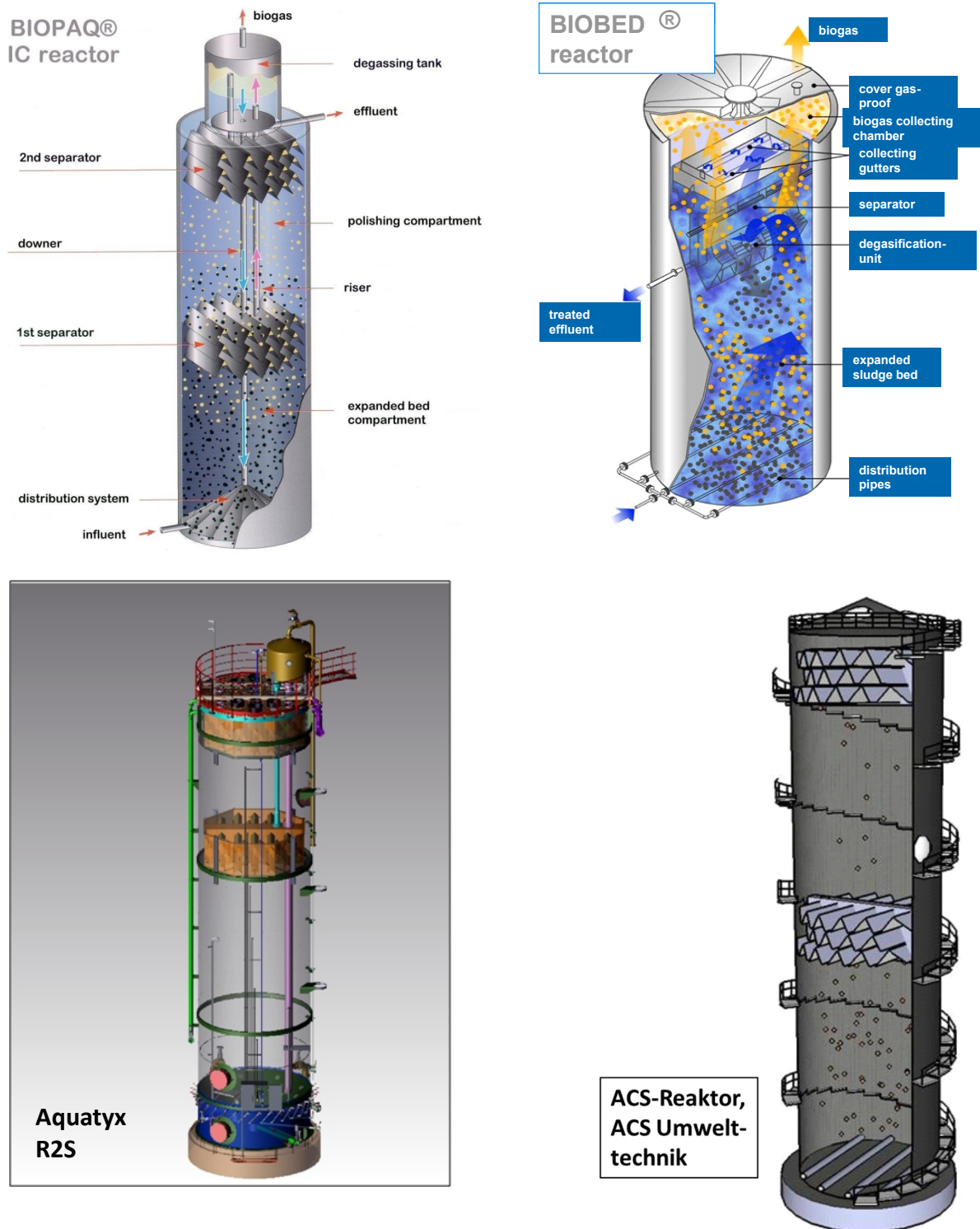


Abbildung 9: Anaerobe Hochreaktoren (Quellen: Paques, VA Tech, Voith, ACS)

Ein Beispiel für eine solche Anlage zeigt **Abbildung 10**.



Abbildung 10: Beispiel einer Biobed-Anlage (Quelle: VA Tech)

Folgende allgemeine Voraussetzungen für eine anaerobe Behandlung von Abwässern der Papier- und Zellstoffindustrie sind zu nennen:

- Geringe Konzentrationen von suspendierten Stoffen (sS, AFS), vorzugsweise im Mittel < 50 mg/l, höchstens kurzzeitig 80 mg/l. Fixed-Film- und Fließbett-Reaktoren vertragen höhere sS-Konzentrationen als andere Verfahren. Besonders empfindlich auf höhere Konzentrationen von suspendierten Stoffen reagieren UASB-Reaktoren.
- Voraussetzung für die wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens ist eine ausreichend hohe Substratkonzentration (CSB), die sich allerdings mit Weiterentwicklung der Verfahren zu geringeren Werten verschoben hat. Mindestens 1.000 bis 2.000 mg/l CSB sollten im Mittel vorliegen.
- Im Verhältnis zur CSB-Konzentration geringe Sulfat-Konzentrationen, wobei für die Praxis folgende Richtwerte gelten können (wenn die Konzentrationen zwischen den genannten Werten liegen, sind besondere Rücksichten bei der Verfahrenswahl erforderlich):

- CSB 4 g/l, Sulfat möglichst < 100 mg/l, maximal 560 mg/l,
 - CSB 3 g/l, Sulfat möglichst < 70 mg/l, maximal 420 mg/l,
 - CSB 2 g/l, Sulfat möglichst < 50 mg/l, maximal 280 mg/l.
- Calciumgehalt möglichst gering halten, bei unvermeidlich höheren Calciumgehalten ist auf die Verfahrenswahl zu achten und ggf. eine Inhibition anzuwenden oder eine Kalkabtrennung einzuschalten.
 - Keine Stoffe einsetzen, die toxisch für die anaeroben Mikroorganismen sind. Besonders empfindlich sind die methanogenen Mikroorganismen. Größte Vorsicht bei der Auswahl von Hilfsmitteln, insbesondere von Mikrobiziden und Reinigern.
 - Temperatur und pH-Wert des Abwassers sind vor Eintritt in den eigentlichen Methanreaktor einzustellen. Der pH-Wert kann bei Eintritt in den Methanreaktor < 7 sein, wenn sicher gestellt wird, dass nach Methanisierung der organischen Säuren der pH-Wert neutral ist. Eine Temperatur von 38 °C ist für das übliche mesophile Verfahren optimal. Geringere und höhere Temperaturen führen zu Leistungsabfall.

2.2.2 aerob

Der aerobe Abbau der organischen Stoffe erfolgt nahezu ausschließlich durch Bakterien und niedere Pilze (vgl. Abb. 5). Diese nehmen gelöste kohlenstoffhaltige Substanz durch die Zellwand auf. Bei gleichzeitiger Anwesenheit von Sauerstoff, Nährstoffen (Phosphor, Stickstoff) und essentiellen Spurenelementen kann die Zelle daraus körpereigene Substanz (Protein) aufbauen. Gleichzeitig wird der Energiebedarf der Zelle durch „Verbrennung“ der C-Substanz unter Sauerstoffverbrauch gedeckt. Insgesamt sind also die Endprodukte dieser Vorgänge Kohlendioxid, Wasser und Biomasse (Protein).

Die Gesamtheit der Organismen in einer aerob-biologischen Reinigungsanlage („Biozönose“) besteht außer aus den genannten Bakterien und Pilzen auch aus Protozoen und bei Langzeit-Belüftungsanlagen sowie Teichen auch aus Algen. Diese Organismen spielen für den Abbau eine untergeordnete Rolle, sind jedoch in anderer Hinsicht von Bedeutung.

Bevorzugte Verfahren zur aeroben Behandlung der Papierfabriks-Abwässer sind:

- Das Belebtschlamm-Verfahren,
- Hochlast-Trägerbiologie (*moving bed biofilm reactor* MBBR, *suspended carrier biofilm process*, Schwebebettverfahren) + Schwachlast-Belebung ohne Zwischenklärung,
- Schwachlast-Anlagen (bei geringer BSB-Konzentration des zu behandelnden Abwassers), vorzugsweise Abwasser-Biofilter.

Außerdem werden vereinzelt andere Verfahren angewendet, wobei beispielhaft *sequencing batch reactor* (SBR) und *rotating disk reactor* zu nennen sind. Verbreitet angewendet wurden (und noch anzutreffen sind) Hochlast-Tropfkörper als erste biologische Stufe (überwiegend vor einer Belebtschlamm-Anlage).

In einer verfahrenstechnischen Systematik wäre abweichend von dieser praktisch orientierten Einteilung zu unterscheiden zwischen Submersreaktoren (Belebtschlamm-Anlagen, SBR, belüftete Teiche) und Biofilm-Reaktoren (Tropfkörper, Scheibentauchkörper, Schwebebett-Reaktor, Biofilter, Belebungsmit Biomasse-Träger).

Das Prinzip des Belebtschlamm-Verfahrens, welches weiterhin das Standard-Verfahren in den üblicherweise angewendeten Verfahrensketten ist (vgl. Abb. 6) zeigen die **Abbildungen 11 und 12**.

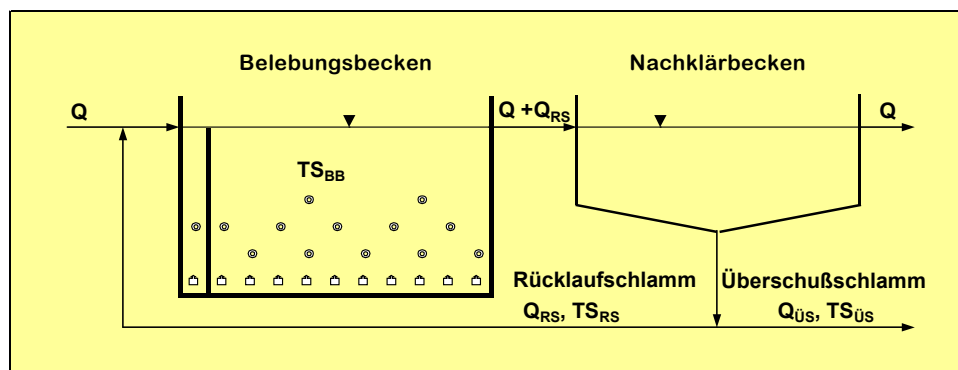


Abbildung 11: Einstufig total durchmischter Belebtschlamm-Reaktor mit Selektor und Nachklärbecken (mit Hinweisen auf den Schlammkreislauf)

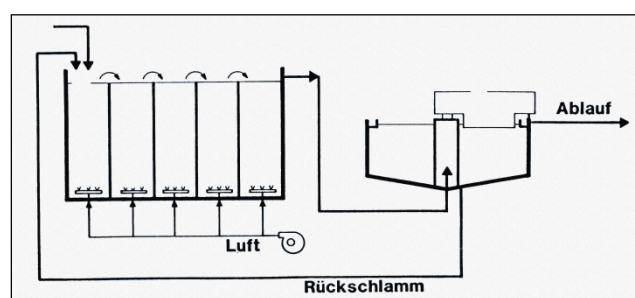


Abbildung 12: Belebungskaskade

Abbildung 13 zeigt ein Beispiel einer solchen Anlage.



Abbildung 13: Belebtschlammanlage

Zusätzlich zu erwähnen ist der **Membran-Bio-Reaktor (MBR)**, ein Verfahren, welches bisher – trotz hohen technischen Entwicklungsstands – in der Zellstoff- und Papierindustrie nur in wenigen Fällen angewendet wurde, aber als aussichtsreich betrachtet werden muss. Bisher behindern die Kosten eine breitere Anwendung.

Es handelt sich dabei um Belebtschlamm-Anlagen, bei welchen die Nachklärung durch eine Membran-Trennung ersetzt wird (**Abbildung 14**). Anwendung finden vorwiegend Ultrafiltrations-Membranen, die entweder als getauchte Module direkt in das Belebtschlammbecken (**Abbildung 15a**) bzw. wegen der besseren Zugänglichkeit in einem externen Becken (**Abbildung 15b**) oder als externe Module (vorwiegend nach dem Cross-Flow-Prinzip) außerhalb des Belebtschlammbeckens angeordnet werden (**Abbildung 16**).

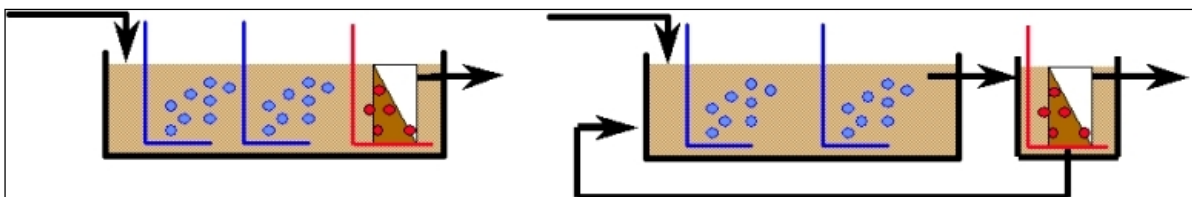


Abbildung 14: Verfahrensschema des Membranbioreactors (MBR) in interner und externer Anordnung des Membranmoduls



Abbildung 15a: getauchtes Membranmodul im Belebungsbecken

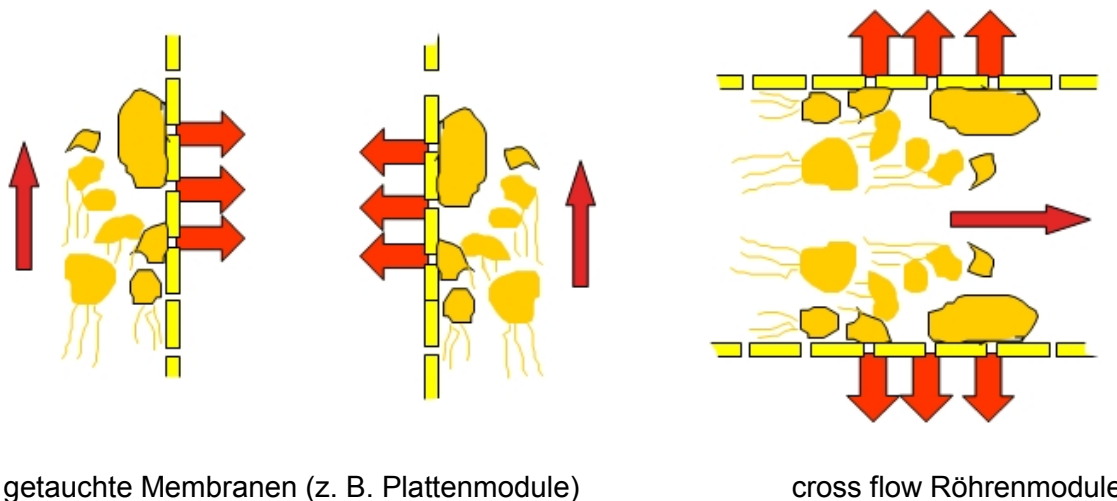


Abbildung 15b: getauchtes Membranmodul in externen Becken



Abbildung 16: Beispiel eines extern trocken aufgestellten Membranmoduls (Röhrenmodul) für einen MBR (die Bauformen sind unterschiedlich)

Die aus energetischen Gründen und um das Blockieren der Membranen gering zu halten bevorzugten Anström-Verfahren zeigt **Abbildung 17**:



getauchte Membranen (z. B. Plattenmodule)

cross flow Röhrenmodule

Abbildung 17: Bevorzugte Anströmvarianten für die Membranmodule im MBR

Von den erwähnten Biofilmprozessen haben sich in jüngster Zeit die Hochlast-Trägerbiologien nach dem Schwebebettverfahren für die Papierindustrie besonders bewährt. Das Prinzip des Verfahrens zeigt **Abbildung 18**. In **Abbildung 19** werden in diesen Anlagen verwendete typische Biomasseträger gezeigt (es gibt zahlreiche unterschiedliche Trägerkörper). **Abbil-**

Abbildung 20 zeigt bewachsene Biomasseträger und **Abbildung 21** die Oberfläche des Reaktorbeckens, aus dem die Träger in Abb. 19 entnommen wurden, wobei die durch die Belüftung umgewälzten Träger an der Oberfläche zu erkennen sind.

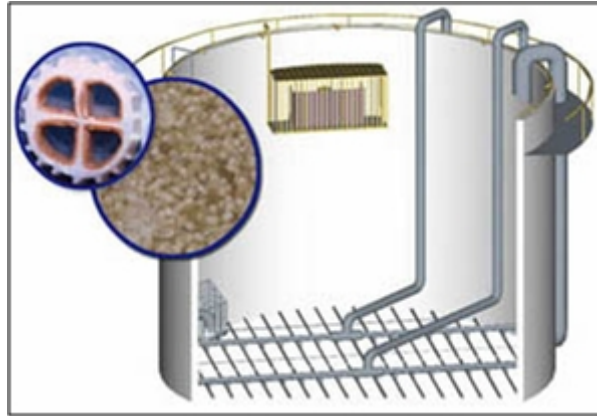


Abbildung 18: Prinzip des Schwebebettverfahrens

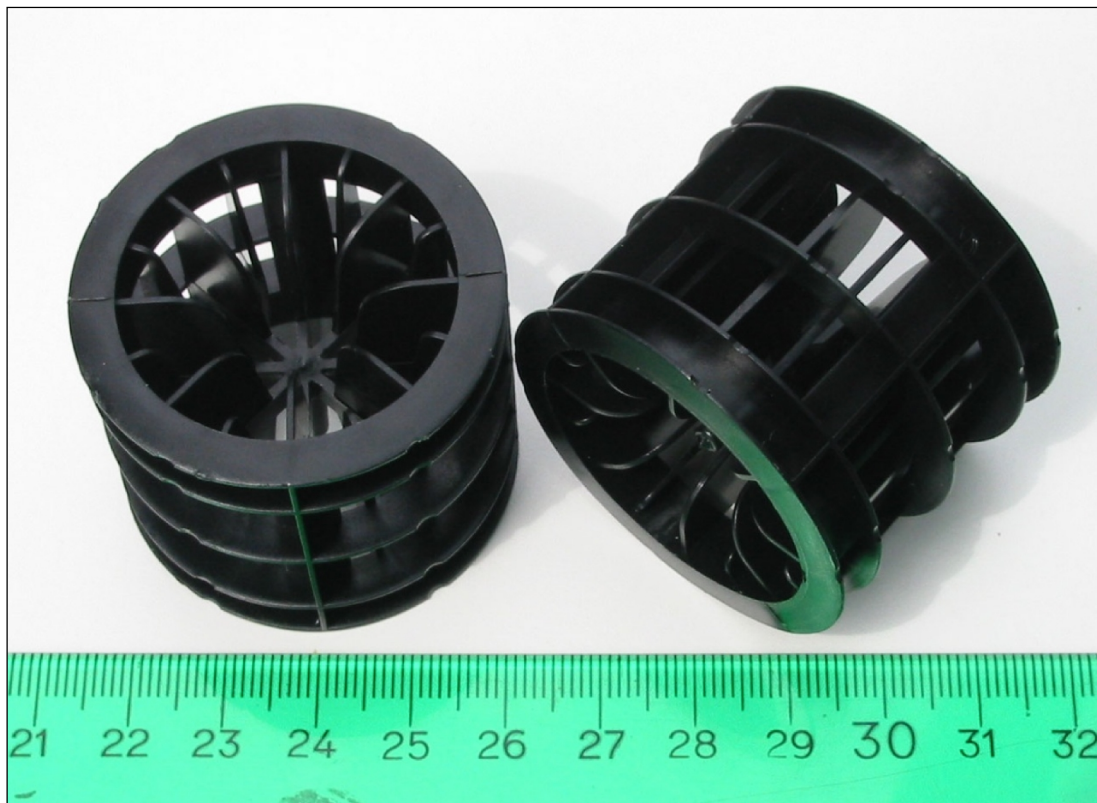


Abbildung 19: Biomasseträger für das Schwebebettverfahren



Abbildung 20: Bewachsene Biomasseträger



Abbildung 21: Oberfläche eines Schwebebettreaktors

Die Verfahren werden in unterschiedlicher Weise miteinander kombiniert (vgl. Abb. 6). Generell werden heute für Papierfabriks-Abwässer, soweit sie nicht sehr geringe BSB-Konzentrationen aufweisen, mindestens zweistufige Anlagen, bestehend aus Hochlastreaktor (anaerob oder aerob, dabei meist Schwebebett) und Schwachlastbelebung, angewendet.

Verbreitet angewendete Beispiele für vollständige Kombinationsanlagen mit den üblichen peripheren Aggregaten zeigen die **Abbildungen 22 bis 24**:

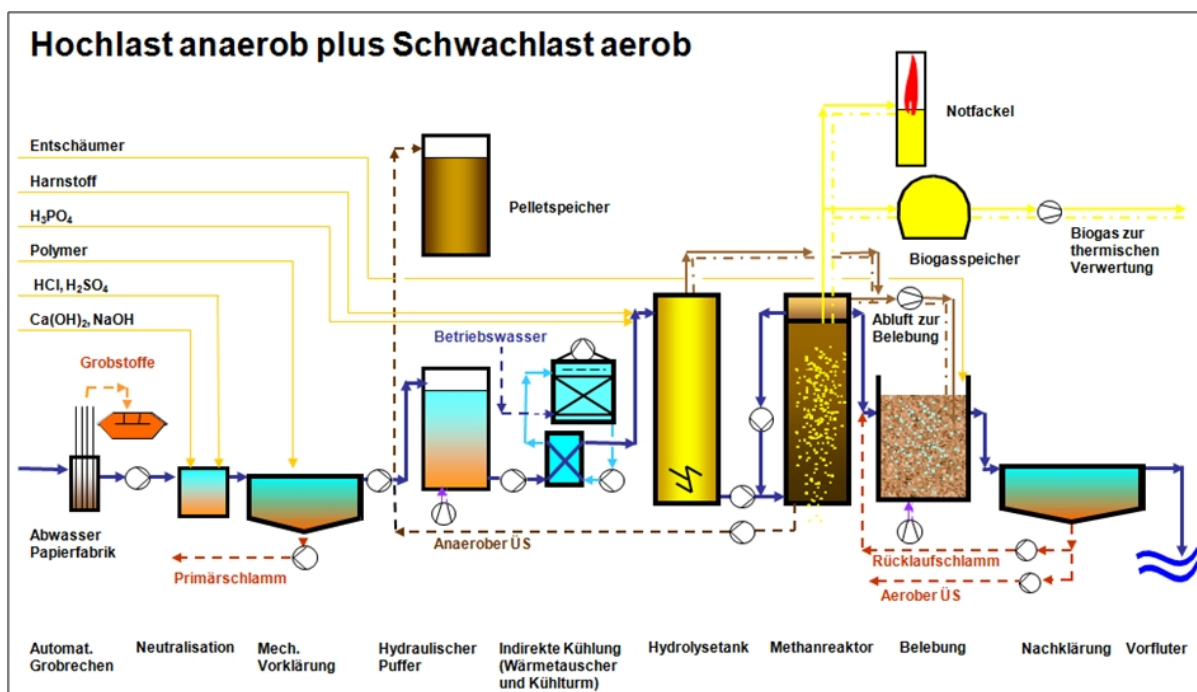


Abbildung 22: Beispiel einer anaerob-aeroben Abwasserreinigungsanlage

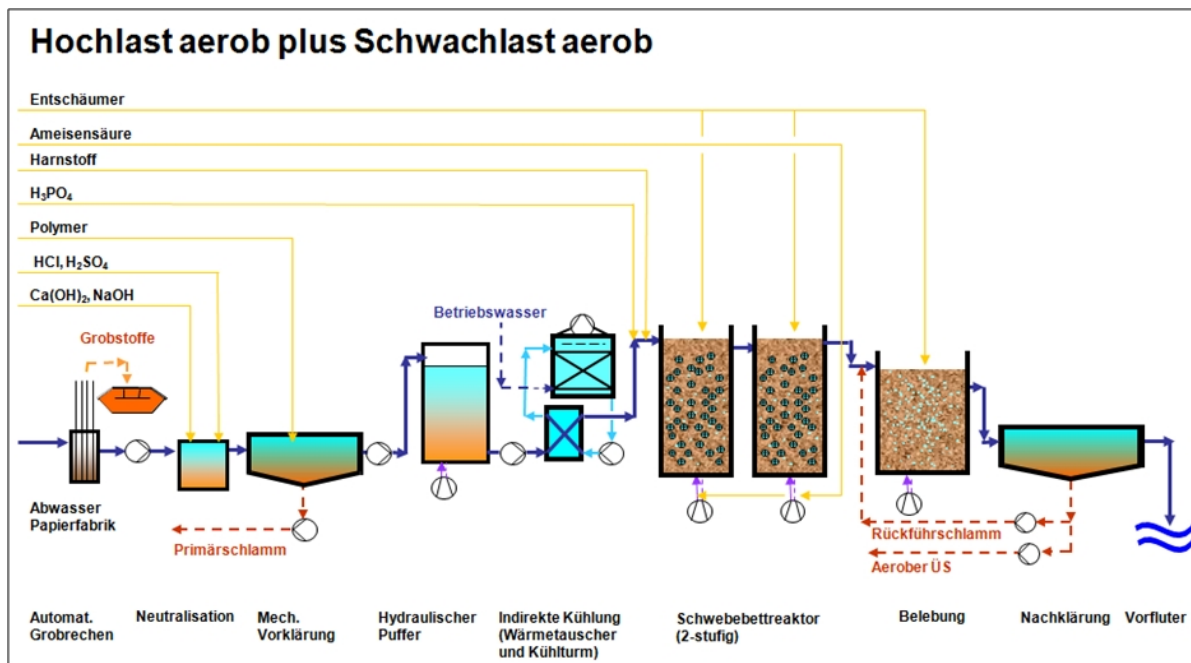


Abbildung 23: Beispiel einer zweistufig aeroben Abwasserreinigungsanlage

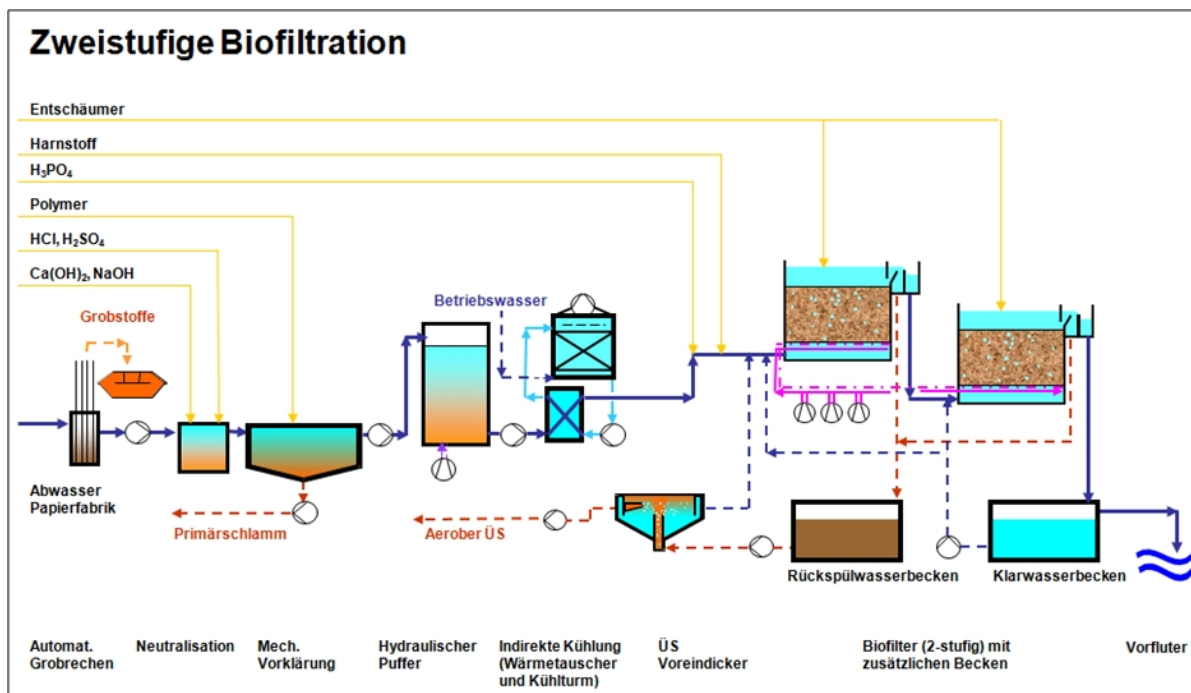


Abbildung 24: Beispiel einer zweistufig aeroben Biofilter-Anlage zur Abwasserreinigung

2.3 Verfahren der weitergehenden Reinigung

Generell werden als tertiäre Verfahren zur weitergehenden Reinigung in der Behandlung von Papier- und Zellstofffabriks-Abwässern eingesetzt:

- a) Tertiäre Abwasserbiofilter,
- b) Advanced Oxidation Processes (AOP, hier der Prozess Ozon/Biofilter),
- c) Membranverfahren (Ultrafiltration, Nanofiltration, Umkehrosmose),
- d) Eindampfung,
- e) Fällung.

Solche den sekundären (biologischen) Stufen nachgeschaltete Behandlungen werden immer dann angewendet, wenn die Anforderungen an die Einleitungsqualität von den biologischen Stufen nicht erreicht werden. Obwohl es auch in der Zellstoff- und Papierindustrie erprobte Beispiele für solche Behandlungen gibt, gelten sie nicht als Stand der Technik oder *best available technique* (BAT), sie werden vielmehr im BREF *pulp and paper* als *emerging techniques* beschrieben.

Wir betrachten Sandfilter oder Schönungsteiche, die der sekundären Stufe nachgeschaltet sind, nicht als Verfahren der weitergehenden Reinigung. Sie erweisen ihre Funktion nur dann, wenn die sekundäre Stufe gestört ist.

Mit der sekundären Stufe nachgeschalteten tertiären Biofiltern (schematische Darstellung **Abbildung 25**) werden abhängig von der vorher erreichten Reinigungsqualität in von uns untersuchten Anlagen zwischen 14 und 33 % CSB-Elimination bezogen auf den Ablauf der sekundären Stufe als 100 % erreicht (**Abbildung 26**). Als tertiäres Biofilter bezeichnen wir das nach anderen Bioreaktoren (z. B. nach Tropfkörper oder Belebtschlammanlage bzw. nach einem sekundären Biofilter in zweistufigen Biofilteranlagen) oder nach einer partiellen Oxidation, z. B. mit Ozon, eingesetzte Biofilter.

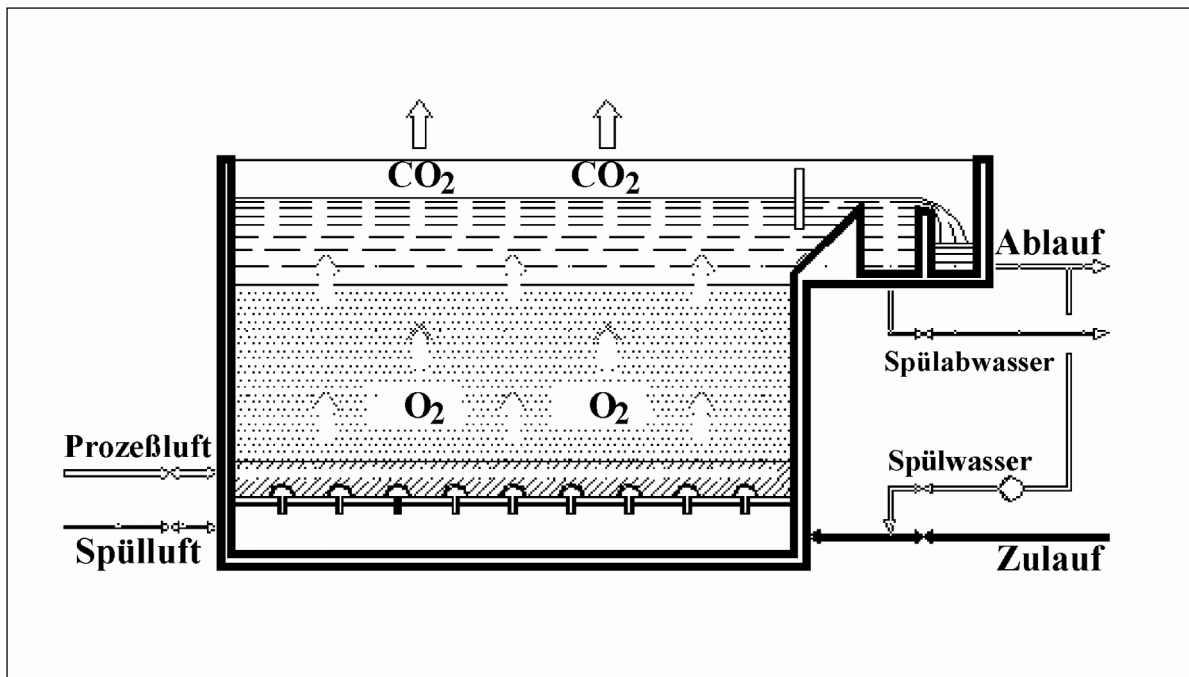


Abbildung 25: schematische Darstellung des Abwasser-Biofilters Typ Biofor

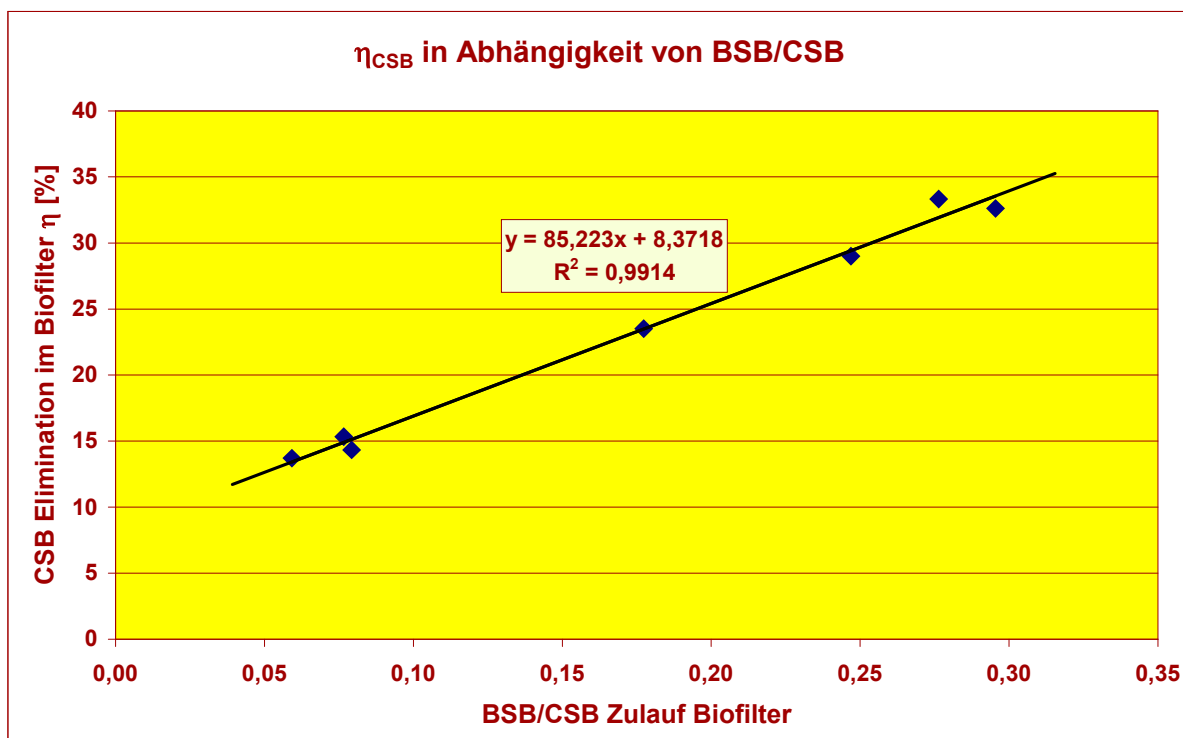


Abbildung 26: CSB-Elimination in tertiären Biofiltern

Ähnliche und in Einzelfällen auch noch höhere Eliminationsraten werden mit einer Fällung, z. B. mit Eisensalzen, in der tertiären Stufe erreicht. Da hierbei aber erhebliche Mengen Fällungsschlamm anfallen, der zu beseitigen ist, wird dieses Verfahren nicht als zukunfts-fähig angesehen.

Membranverfahren und Eindampfung sind technische Möglichkeiten der weitergehenden Reinigung, die sich bisher aus unterschiedlichen Gründen nicht durchsetzen konnten. Neben dem Betriebskostenaspekt sind bei den Membranverfahren die noch nicht befriedigend gelösten Fouling- und Alterungsprobleme bei den Membranen mit höherer Trennleistung (besser als Nanofiltration) sowie die Frage des Verbleibs der Konzentrate und bei der Eindampfung neben dem Energiebedarf die Frage des Verbleibs des Eindampfrückstands (nur in der Zellstoffindustrie durch Verbrennung gelöst) Hauptgründe dafür.

Mit der chemisch-biochemischen Oxidation (Ozon + Biofilter) als bevorzugter Variante des *Advanced Oxidation Process* (AOP) können in einer der biologischen Stufe nachgeschalteten einstufigen Behandlung bis zu 60 % CSB-Elimination (bezogen auf das biologisch vollständig gereinigte Abwasser) bei Einsatz von 0,4 bis 1,0 g Ozon pro g CSB eliminiert erreicht werden. Zwei derartige Anlagen sind zurzeit in Mitteleuropa zur Behandlung von Papierfabriks-Abwasser in Betrieb. Mit einem zweistufigen System wurden in Pilotversuchen 85 % CSB- und 98 % Farbelimination (bei > 80 % AOX-Elimination) mit 0,65 g Ozon / g CSB erreicht. Die Betriebskosten einer solchen Anlage betragen – abhängig von der Art des Abwassers sowie der Größe und der technischen Ausrüstung der Anlage – 0,05 bis 0,2 € pro m³ behandeltes Abwasser (in der Praxis, wenn die maximale Elimination nicht gefordert ist, 0,02 bis 0,04 €/m³).

Leistung und Effizienz dieses Verfahrens wurden in den letzten Jahren wesentlich gesteigert. Dies lässt weitere Verbesserungen in den nächsten Jahren mit zunehmender Verbreitung der technischen Anwendung erwarten.

Das Prinzip dieser chemisch-biochemischen Oxidation erklärt am Beispiel von Papierfabriks-Abwässern **Abbildung 27**: Es handelt sich bei der Ozonung um eine partielle Oxidation. Ziel ist nicht die Totaloxidation der organischen Stoffe, sondern lediglich die (teilweise) Umwandlung persistenter in biologisch abbaubare Stoffe.

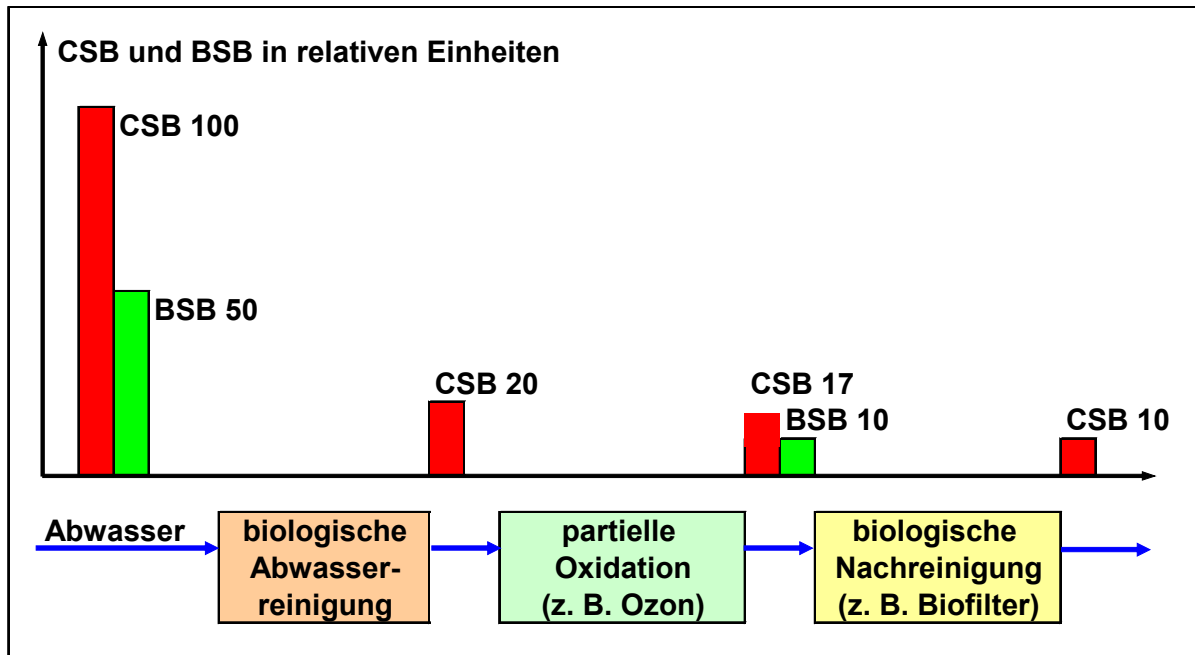


Abbildung 27: Chemisch-biochemische Oxidation am Beispiel von Papierfabrik-Abwässern

Abbildung 28 zeigt die Wirkung der optimierten Ozondosierung: Je höher das Verhältnis BSB/CSB nach der Ozondosierung ist, umso besser ist die CSB-Elimination im nachgeschalteten biologischen Filmreaktor. Wird die optimale Dosierung überschritten, dann wird zwar mehr CSB durch das Ozon direkt oxidiert, wegen der parallelen Oxidation bereits gebildeter biochemisch abbaubarer Stoffe (BSB) sinkt aber die Leistung des biologischen Reaktors. Die Gesamtelimination des Prozesses geht zurück, vor allem aber sinkt die Kosteneffizienz. Durch Unterschreitung des Wirkungsoptimums kann die CSB-Eliminierung bei sinkenden Kosten dem Bedarf angepasst werden.

In **Abbildung 29** wird der Effekt einer zweistufigen Behandlung mit dem Prozess Ozon/Biofilter als Ergebnis von Pilotversuchen mit einem durch huminähnliche Stoffe nach der biologischen Reinigung dunkelbraun gefärbten Abwasser mit hohem CSB gezeigt.

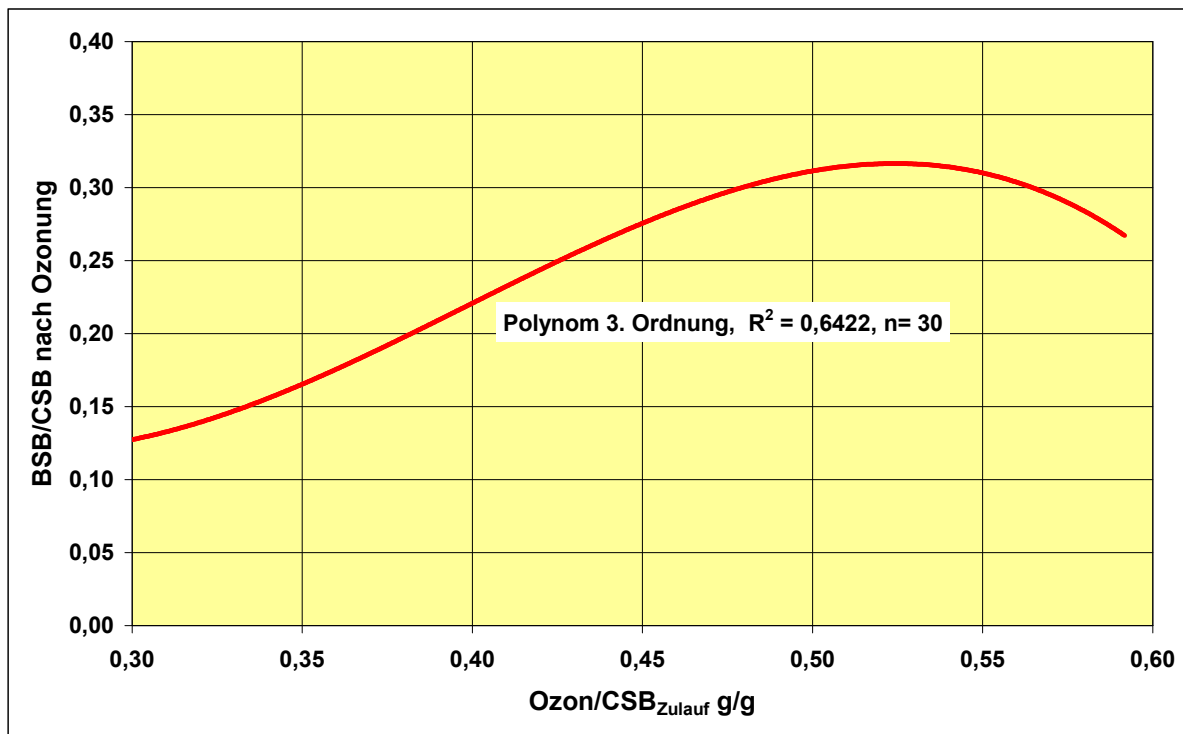


Abbildung 28: Eintragsoptimum bei der Ozonung (Ergebnisse aus Pilotversuchen mit Papierfabriks-Abwasser)

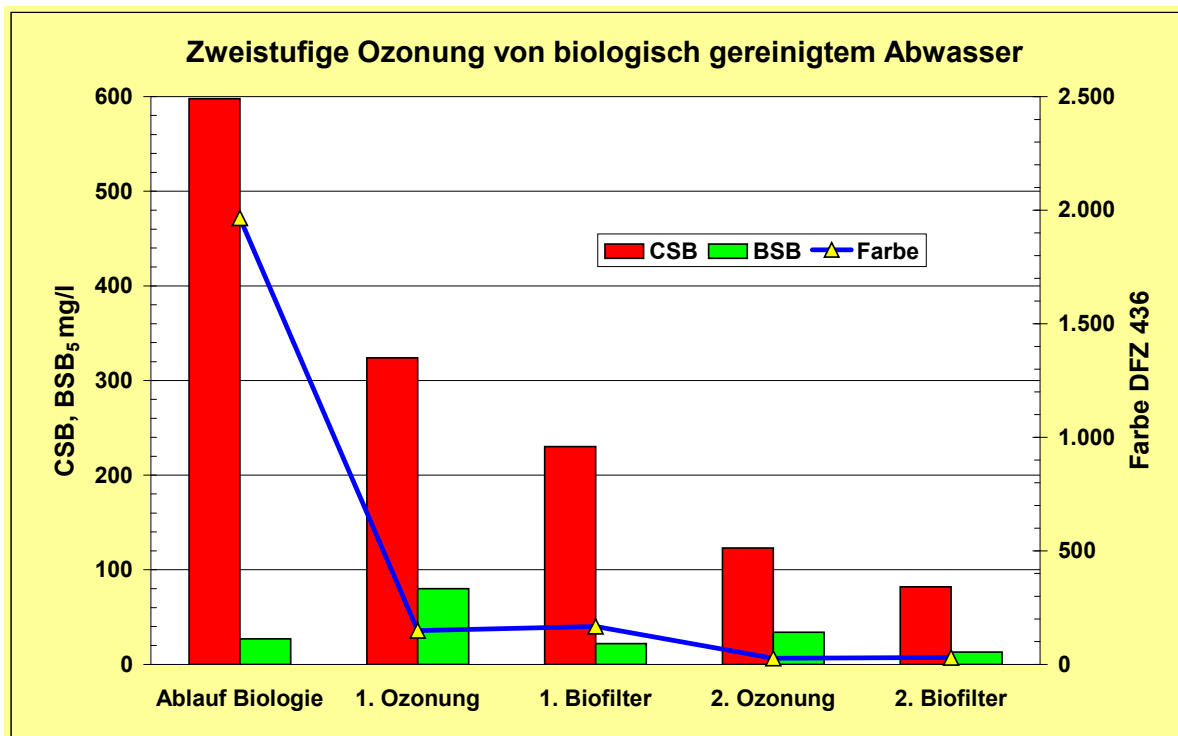


Abbildung 29 : Ergebnis einer zweistufigen Behandlung Ozon/Biofilter

2.4 Besonderheiten der Abwässer der Papier- und Zellstoffindustrie

2.4.1 Spezifische Werte

Sehr viel stärker als in den meisten anderen Industriezweigen wird in der Zellstoff- und Papierindustrie mit produktionsspezifischen Daten (meist einfach „spezifisch“ genannt) gearbeitet. Dies sind

- spezifische Frischwassermengen,
- spezifische Abwassermengen,
- spezifische Frachten.

Die spezifischen Frischwassermengen einer Produktionsanlage werden sehr unterschiedlich gekennzeichnet. Oft werden Begriffe wie „Wasserverbrauch“ oder „Wasserbedarf“ in einem sprachlich nicht ganz einwandfreien Sinn verwendet. Ich empfehle deshalb die konsequente Anwendung der nachstehend definierten Begriffe, wonach der am häufigsten angewendete Wert als „Wassergebrauch“ zu bezeichnen wäre, da die überwiegende Menge des Wassers nicht verbraucht wird (es wird nach Reinigung wieder abgeleitet), und der technische Wasserbedarf wegen der Kreislaufführung höher ist als die zugeführte Menge:

- **Wassergebrauch** ist die Menge des für die Produktion verwendeten Wassers, wobei getrennter oder zusätzlicher Kühlwasserbedarf nicht erfasst wird, wenn dies nicht ausdrücklich gekennzeichnet wird.
- **Wasserverbrauch** ist die Menge des für die Produktion verwendeten Wassers, die (vorwiegend durch Verdampfung) irreversibel verloren geht.
- **Wasserbedarf** ist die für die Produktion technisch notwendige Wassermenge (ohne Berücksichtigung ggf. nach interner oder externer über die Entstoffung hinausgehender Reinigung zurückgeführter Mengen).

Die spezifischen Daten bedürfen dringend der Definition der Bezugsgröße, weil hierfür sehr unterschiedliche Möglichkeiten bestehen und der übliche Gebrauch sich in der Zellstoffindustrie einerseits und in der Papierindustrie andererseits unterscheidet.

In der Zellstoffindustrie werden spezifische Daten weit überwiegend auf die lufttrockene Produktionsmenge bezogen. Dies kann die tatsächlich erzeugte Menge oder die Kapazität der Anlage sein (letzteres ist die Bezugsgröße für die Mindestanforderungen an die Abwasserqualität in Anhang 19 zur Abwasserverordnung).

In der Papierindustrie sollte, sofern es sich um Frisch- oder Abwasser handelt, für spezifische Werte vorwiegend der Bezug auf die Bruttomaschinenerzeugung an absolut trockener Ware (Anfall am Poperoller) gewählt werden (BME). Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der Jahresproduktion, der mittleren Produktionsmenge pro Tag (z. B. Jahresproduktion dividiert durch die Anzahl der Produktionstage pro Jahr) und der anlagentechnisch möglichen Produktion (Kapazität) bezogen auf den Tag.

Die Bruttomaschinenkapazität (BMK) dagegen ist ein Begriff, den der Anhang 28 zur Abwasserverordnung definiert und der (vereinfacht) die maximal mögliche Produktion einer Anlage in 2 Stunden beschreibt.

Offensichtlich ist die Angabe eines spezifischen Wertes ohne die Nennung der Bezugsgröße wenig hilfreich.

2.4.2 Nährstoffbedarf

Für den biologischen Abbau organischer Substanz, die Umsetzung in Protein und Energie, benötigen die Mikroorganismen neben verschiedensten, in Papierfabriks-Abwässern offenbar meist in ausreichender Menge vorhandenen, Spurenelementen auch als zusätzliche Nährstoffe Stickstoff- und Phosphorverbindungen in biologisch verwertbarer Form. In natürlichen Gewässern und in häuslichen Abwässern sind diese Verbindungen im Verhältnis zu den abbaubaren organischen Stoffen ausreichend vorhanden, im häuslichen Abwasser in deutlichem Überschuss. Sie stammen aus menschlichen und tierischen Ausscheidungen und aus der Zersetzung abgestorbener Tier- und Pflanzensubstanzen.

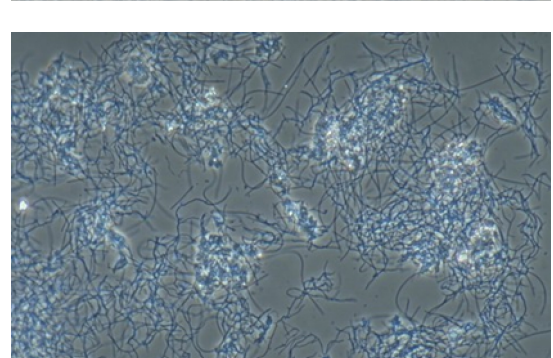
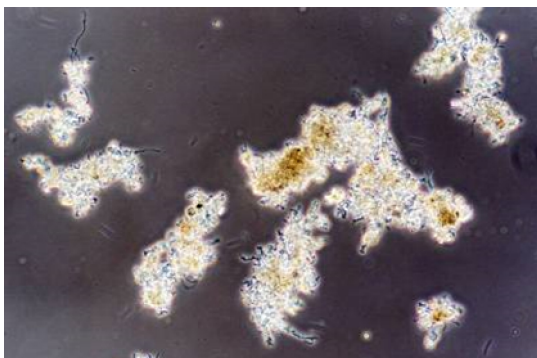
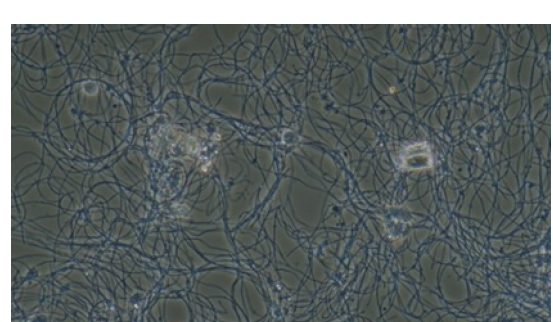
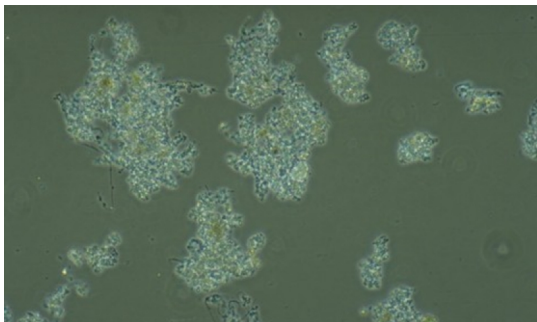
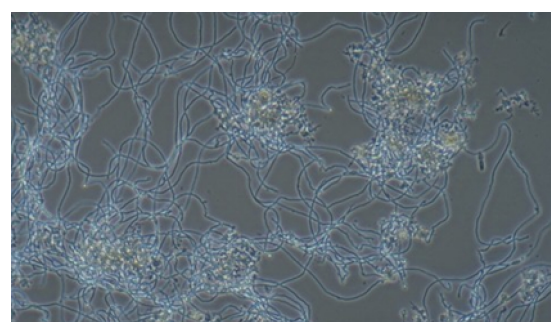
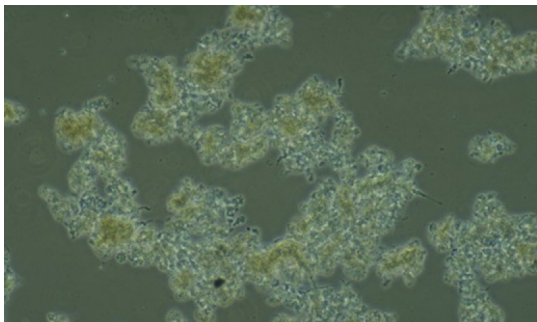
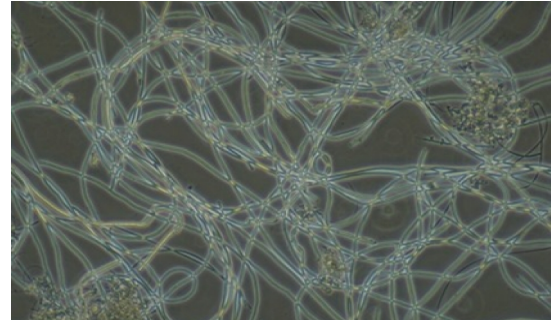
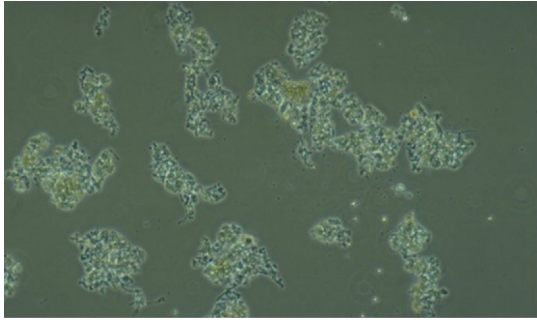
Papierfabriks-Abwässer enthalten auch bei hohen Konzentrationen an biochemisch abbaubarem organischem Kohlenstoff (vorwiegend Kohlenhydrate) meist nur geringe Mengen an Stickstoff und Phosphor.

Das erforderliche Nährstoffverhältnis wird gewöhnlich als $BSB_5 : N : P = 100 : 5 : 1$ angegeben. Tatsächlich wird bei der biologischen Reinigung von Papierfabriks-Abwässern in der Regel ein Verhältnis von $100 : 4 : 0,8$ bis zu $100 : 3 : 0,5$ eingestellt und erweist sich als ausreichend. Die Nährstoffzugabe erfolgt meist durch Dosierung einer Lösung von technischem Harnstoff und technischer Phosphorsäure in geeignetem Verhältnis. Die Kontrolle der Dosierung erfolgt durch Messung der Ablaufkonzentrationen und zusätzliche sporadische Überprüfung der Zusammensetzung des Belebtschlammes.

2.4.3 Blähschlammneigung

Die Zusammensetzung der Papierfabriks-Abwässer, besonders der hohe Anteil an Kohlenhydraten, bedingt eine starke Neigung zur Blähschlamm-Entwicklung. Blähschlamm ist ein

Mikroorganismenschlamm in Belebtschlammanlagen, der sehr geringe Sinkgeschwindigkeit aufweist und im mikroskopischen Bild eine große Anzahl fadenförmiger Mikroorganismen erkennen lässt (**Abbildung 29**).



Belebtschlamm-Flocken

Blähschlamm

Abbildung 29: Flockenbildender, gut absetzbarer Belebtschlamm im Vergleich zu stark fädigem, schlecht absetzbarem Blähschlamm

Die Blähschlammentwicklung wird durch verschiedene Einflüsse begünstigt, von denen in Papierfabriks-Anlagen folgende eine besondere Rolle spielen:

- Mangel an den Nährstoffen Phosphor und Stickstoff,
- Stoffwechselprodukte anaerober Mikroorganismen (organische Säuren und Schwefelwasserstoff),
- Einfluss hemmender Stoffe im Abwasser (Hilfsmittel),
- zu hohe oder zu geringe Sauerstoffkonzentration c_{O_2} ,
- zu hohe oder zu geringe BSB-Schlammbelastung $B_{TS,BSB}$.

Die beiden letztgenannten Punkte besagen, dass für die Sauerstoffkonzentration und die BSB-Schlammbelastung optimale Bereiche einzuhalten sind, deren Unter- oder Überschreitung zu Blähschlamm Bildung führen kann.

Durch geeignete Konstruktion und Dimensionierung der Anlagen sowie durch die Wahl geeigneter Betriebsparameter kann der Blähschlammentwicklung erfolgreich entgegengewirkt werden.

2.4.4 Hohe Zehrungsraten, fakultativ anaerobe Mikroorganismen, Sulfatreduktanden

Bedingt durch die chemische und mikrobiologische Zusammensetzung weisen Papierfabriks-Abwässer, insbesondere wenn sie aus Werken mit Altpapiereinsatz stammen, eine sehr hohe Sauerstoffzehrungsgeschwindigkeit auf. Daher wird bereits nach relativ kurzen Verweilzeiten ohne Sauerstoffeintrag ein anoxischer (sauerstoffarmer) Zustand erreicht, auch wenn das Abwasser vorher hohe Sauerstoffkonzentrationen aufwies. Da die Abwässer oft einen hohen Anteil an fakultativ anaeroben Mikroorganismen enthalten, wird die anoxische mikrobielle Zersetzung von Feststoffen und höhermolekularen gelösten organischen Stoffen rasch eingeleitet. Dies führt zur Bildung flüchtiger organischer Säuren.

Bei höheren Sulfatkonzentrationen und den in ausreichender Menge vorhandenen sulfatreduzierenden Bakterien (Sulfatreduktanden) wird rasch Schwefelwasserstoff gebildet.

Beides ist aus ökologischen und ökonomischen Gründen mit verfahrenstechnischen Maßnahmen zu vermeiden.

2.4.5 Kalkproblem

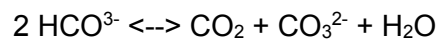
Besonders die Produktionsbereiche, die geeignet sind für eine anaerobe Hochlaststufe in der Abwasserreinigung (Verpackungspapiere, Deinking-Abwasser) haben oft hohe Calcium-Konzentrationen im Abwasser (bedingt durch den Altpapiereinsatz und relativ eng geschlossene Kreisläufe). Dies ergibt eine ausgeprägte Neigung zur Ausfällung und Ablagerung von Kalk, besonders in Bereichen, in denen das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gestört ist. Dies geschieht im Bereich des Anaerob-Reaktors, wobei die Ausfällungen überwiegend erst nach diesem Reaktor, also gewöhnlich in der Belebung, auftreten.

Auch die Ausfällungen im Anaerob-Reaktor verursachen Probleme.

Um das zu verhindern, kann man die Kalkausfällung mit Inhibitoren verzögern oder die Ausfällung gezielt an einer Stelle der Verfahrenskette vornehmen, in dem sie nicht stört und der Kalk gut abgetrennt werden kann.

Die verschiedenen Systeme zur Kalkabscheidung machen sich das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht zunutze:

Hydrogencarbonat steht mit Carbonat und CO₂ in folgendem Gleichgewicht:



Entfernt man CO₂ aus dem System, wird das Gleichgewicht auf die Seite des Carbonats gezogen, welches mit den vorhandenen Calcium-Ionen schwer lösliches Calciumcarbonat Ca(CO₃)₂ bildet, welches man abtrennen kann.

Die CO₂-Entfernung kann z. B. durch Einblasen von Luft (ggf. unterstützt durch Natronlauge) geschehen.

Ein dafür geeignetes Gerät ist z. B. die Kalkfalle® (**Abbildung 30**), die gewöhnlich nach dem Anaerob-Reaktor angeordnet wird (**Abbildung 31**). Vergleichbare Systeme werden von verschiedenen Lieferanten angeboten. Ein Teil des so gewonnenen Abwassers mit verminderter Calcium-Konzentration wird dann in den Anaerob-Reaktor zurück geführt, um diesen von Kalk zu entlasten.

In der nachfolgenden aeroben Stufe (gewöhnlich der Belebung) wird so die Kalkausfällung vermieden oder erheblich vermindert und die daraus resultierenden Probleme werden vermieden.



Abbildung 30: Kalkfalle® (Quelle: Voith Paper⁴)

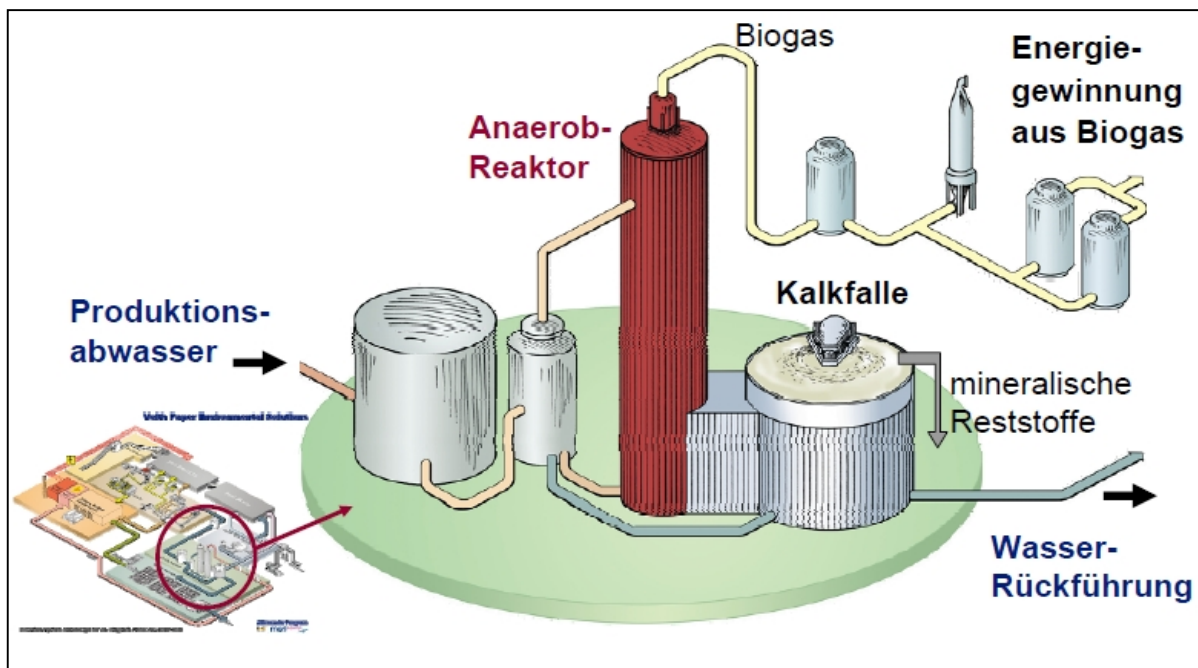


Abbildung 31: Typische Einbindung des Kalkfällungs-Reaktors (Quelle: Voith Paper⁴)

⁴ http://www.ikb.de/content/de/branchen_und_maerkte/veranstaltungen/Zukunftstrends_2008/Zukunftstrends_Voith.pdf

2.4.6 Sehr unterschiedliche Konzentrationsniveaus und Zusammensetzungen abhängig vom Sortenprogramm: Auswahl der Konzepte

Abhängig von den Sortenprogrammen, die in der das Abwasser liefernden Produktionsanlage erzeugt werden, weisen die Abwässer sehr unterschiedliche Konzentrationen organischer Stoffe und ein unterschiedliches Verhältnis von BSB zu CSB auf. Das Konzept der Abwasserreinigung ist danach zu wählen.

Bei der Behandlung von Abwasser aus der Sulfatzellstoffherzeugung ist die sauerstoffbegaste Belebungs-kaskade verbreitet. In Nordeuropa und Nordamerika werden oft Anlagen mit mehrtägiger Aufenthaltszeit gebaut, die in Mitteleuropa aus Gründen des Flächenbedarfs (und der Investitionskosten) keine Anwendung finden. In den letzten Jahren haben sich zweistufige Anlagen, bestehend aus Schwebebett und Belebungs-, gut bewährt.

Bei der Produktion von Sulfitzellstoff ist es üblich, die mit biologisch leicht abbaubaren Stoffen hoch belasteten Brüdenkondensate aus der Eindampfung der verbrauchten Kochsäure anaerob vorzureinigen. Der Ablauf des Anaerobreaktors wird dann zusammen mit den Bleichereiabwässern in einer Belebtschlamm-anlage behandelt, die oft sauerstoffbegast wird. Die Anwendung des Kaskadenprinzips ist vorteilhaft, aber nicht zwingend erforderlich.

Die für unterschiedliche Sortenprogramme der Papierherzeugung genannten Verfahren kommen bei nicht integrierten Produktionsanlagen – oder im Fall von integrierten Anlagen bei getrennter Behandlung des Abwassers aus der Papierherzeugung – zur Anwendung (**Abbildung 32**).

Produktionsprogramm	bevorzugte biologische Verfahren
Sulfatzellstoff	sauerstoffbegaste Belebungs-kaskade Schwebebettreaktor + Belebungs-
Sulfitzellstoff	Anaerobreaktor + Belebungs-
holzfreie Papiere BSB < 70 mg/l: BSB > 70 mg/l:	Biofilter 2-stufige Biofilter, Belebungs-kaskade
gestrichene Papiere	Belebungs-kaskade Schwebebettreaktor + Belebungs-
holzhaltige Papiere	Schwebebettreaktor + Belebungs-
altpapierhaltige Papiere	Schwebebettreaktor + Belebungs- Anaerobreaktor + Belebungs-

Abbildung 32: Auswahl der Konzepte bei den sehr unterschiedlichen Konzentrationsniveaus und Zusammensetzungen abhängig vom Sortenprogramm