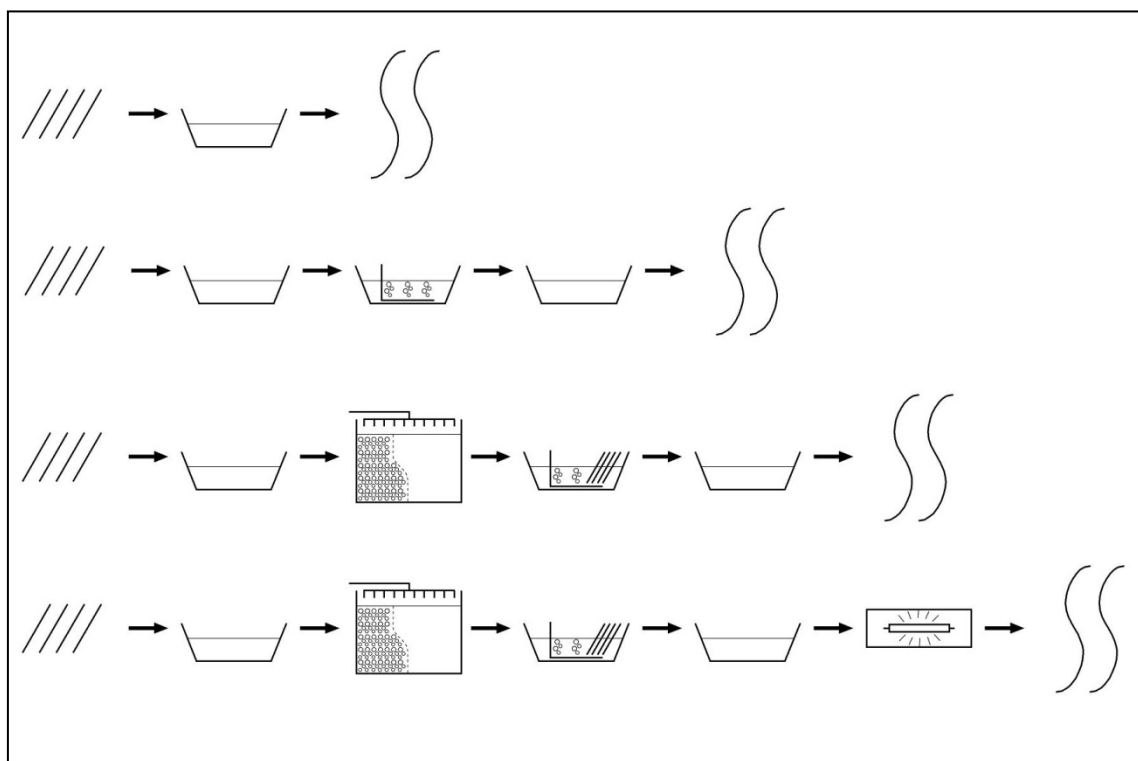


# Stufenausbaukonzepte für kommunale Kläranlagen unter verschiedenen landes- spezifischen Randbedingungen

Karl-Ulrich Rudolph, Markus Bombeck,  
Michael Harbach, Tim Fuhrmann

Institut für Umwelttechnik und Management  
an der Universität Witten/Herdecke gGmbH



Vorhabensbezeichnung (Thema):

Verbundprojekt „Exportorientierte FuE auf dem Gebiet Abwasser“,

Kernprojekt C „Simulation und Konzepte der Abwasserbehandlung“

Teilprojekt C 2 „Stufenausbaukonzepte für kommunale Kläranlagen unter verschiedenen landesspezifischen Randbedingungen“

Zuwendungsgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

über

Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gesellschaft

Projektträger für Wassertechnologie und Entsorgung im Forschungszentrum Karlsruhe

Zuwendungsempfänger (ZE):

Institut für Umwelttechnik und Management

an der Universität Witten/Herdecke gGmbH (UTM), Witten

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. pol. K.-U. Rudolph

Förderkennzeichen:

02 WA 0569

Laufzeit:

01.03.2005 - 31.07.2009

Das in diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WA0569 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung und Ziele .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Projektentwicklung .....</b>	<b>11</b>
2.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen .....	11
2.2	Voraussetzungen, Planung und Ablauf .....	11
2.3	Ermittlung des Stands von Wissenschaft und Technik.....	12
2.4	Verwertbarkeitsaussichten.....	13
2.5	Veröffentlichungen .....	15
<b>3</b>	<b>Stufenausbau kommunaler Kläranlagen .....</b>	<b>17</b>
3.1	Allgemeines .....	17
3.2	Abwasser unter landesspezifischen Aspekten .....	18
3.3	Beispiel eines Stufenausbaukonzeptes .....	20
<b>4</b>	<b>Verfahrenskomponenten.....</b>	<b>24</b>
4.1	Allgemeines .....	24
4.2	Mechanische Verfahrenskomponenten .....	24
4.2.1	Rechen .....	24
4.2.2	Absetzbecken für mineralische Stoffe .....	24
4.2.3	Absetzbecken für organische Stoffe.....	25
4.3	Biologische Verfahrenskomponenten .....	25
4.3.1	Fermenter .....	25
4.3.2	Teiche .....	25
4.3.3	Festbettreaktoren .....	27
4.3.4	Algenreaktoren .....	28
4.3.5	Biofilter .....	28
4.3.6	UASB-Reaktoren .....	29
4.4	Chemisch-physikalische Verfahrenskomponenten.....	34
4.4.1	Allgemeines .....	34
4.4.2	Phosphatfällung .....	34
4.4.3	Metallfällung.....	35
4.4.4	Desinfektion .....	35
4.4.5	Filtration .....	36
4.5	Übersicht der Abwasserreinigungstechnologien nach stufenausbaufähigen Komponenten.....	36
<b>5</b>	<b>Übersicht über die wichtigsten Verfahren der biologischen Abwasserreinigung .....</b>	<b>38</b>
5.1	Allgemeines .....	38
5.2	Belebungsverfahren.....	38
5.2.1	Herkömmliches Belebungsverfahren .....	38
5.2.2	Membranbelebungsverfahren.....	40

---

5.2.3	Aufstauverfahren (SBR).....	43
5.3	Festbettverfahren.....	45
5.3.1	Allgemeines.....	45
5.3.2	Tropfkörper.....	45
5.3.3	Tauchkörper.....	47
5.3.4	Getauchte Festbetten.....	48
5.4	Naturnahe Reinigungsverfahren.....	50
5.4.1	Teichkläranlagen.....	50
5.4.2	Pflanzenkläranlagen.....	52
<b>6</b>	<b>Verfahrenskombinationen und Stufenausbaukonzepte.....</b>	<b>56</b>
6.1	Allgemeines.....	56
6.2	Betriebsoptimierende Maßnahmen.....	56
6.3	Beispiele für Stufenausbaukonzepte.....	57
6.3.1	Tropfkörper- und Belebungsverfahren.....	57
6.3.2	Belebungsverfahren mit Festkörperpackung.....	61
6.3.3	Teichkläranlage mit Tropfkörper.....	63
6.3.4	Teichkläranlage mit UASB-Reaktor.....	65
6.3.5	Pflanzenkläranlage mit UASB-Reaktor.....	68
6.3.6	Festbett- und UASB-Reaktor.....	69
6.3.7	Membrananlage mit belüftetem Teich.....	72
6.4	Matrix zur Eignung zur Kombination von Komponenten und Verfahren.....	73
6.5	Technisch-wirtschaftliche Checkliste ausgewählter Stufenausbaukonzepte.....	76
<b>7</b>	<b>Plausibilisierung und Verifikation von Stufenausbaukonzepten anhand von Referenzbeispielen.....</b>	<b>77</b>
7.1	Referenzbeispiel 1.....	77
7.1.1	Allgemeines.....	77
7.1.2	Beschreibung des Referenzbeispiels 1.....	77
7.1.3	Dynamische Simulation Referenzbeispiel 1.....	79
7.1.4	Stufenausbaukonzept 1: Rezirkulation in das Bio-P-Becken.....	80
7.1.5	Stufenausbaukonzept 2: Vergrößerung des Denitrifikationsvolumens.....	82
7.1.6	Stufenausbaukonzept 3: Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation durch Halbierung der Vorklärung.....	83
7.1.7	Stufenausbaukonzept 4: Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation durch den Einsatz einer externen C-Quelle.....	83
7.1.8	Stufenausbaukonzept 5: Optimierung des Stickstoffabbaus durch Erhöhung der Rezirkulation.....	86
7.1.9	Zusammenfassung und Bewertung des Referenzbeispiels 1.....	87
7.2	Referenzbeispiel 2.....	87
7.2.1	Allgemeines.....	87
7.2.2	Beschreibung des Referenzbeispiels 2.....	88

7.2.3	1. Stufenausbau: Teichkläranlage .....	90
7.2.4	2. Stufenausbau: SBR .....	91
7.2.5	3. Stufenausbau: UV-Bestrahlung .....	93
7.2.6	Vorteilhaftigkeitsbetrachtung .....	93
7.2.7	Zusammenfassung und Bewertung des Referenzbeispiels 2 .....	94
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>98</b>

## Literatur- und Quellenverzeichnis

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Investitions-, Kapital- und Betriebskosten der Varianten 1 bis 3 .....	20
Tabelle 2:	Übersicht der Varianten .....	22
Tabelle 3:	Komponenten der kommunalen Abwasserreinigung .....	37
Tabelle 4:	Matrix zur Eignung verschiedener Kombinationen von Komponenten und Verfahren .....	74
Tabelle 5:	Technisch-wirtschaftliche Checkliste ausgewählter Stufenausbaukonzepte .....	75

### Abbildungsverzeichnis

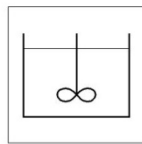
Abbildung 1:	Vergleich der kumulierten Jahreskosten .....	21
Abbildung 2:	Vergleich der spezifischen Kosten .....	23
Abbildung 3:	Grundprinzip aufwärts durchströmter Filter für Durchlaufspülung (Quelle: ATV-A 203 Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung) .....	29
Abbildung 4:	Schematische Darstellung UASB-Reaktor (Quelle: von Sperling und Chernicharo, 2005) .....	30
Abbildung 5:	Bestandteile des Belebungsverfahrens (Quelle: DWVK-ATV-A 131) .....	38
Abbildung 6:	Verfahren der Filtration (Quelle: <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Membranfiltration">http://de.wikipedia.org/wiki/Membranfiltration</a> ) .....	41
Abbildung 7:	Serielle und parallele Anordnung eines Membranbioreaktors (MBR) und einer konventionellen Belebung bei Trocken- und Regenwetterzufluss (Quelle: Evenblij et al., 2007) .....	43
Abbildung 8:	Fließbild für eine Belebungsanlage mit Aufstaubetrieb vom Typ „kontinuierliche Beschickung“, dargestellt ist eines von ggf. mehreren Aufstau Becken (nach ATV-M 210 Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb) .....	44
Abbildung 9:	Äquivalentes Schlammalter als Funktion der Raumbelastung in Tropfkörpern (Quelle: WEF, 2000) .....	46
Abbildung 10:	Tropfkörperverfahren .....	46

---

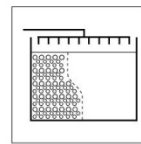
Abbildung 11:	Empfohlene konstruktive Anordnung der getauchten Festbetten im Reaktor (Quelle: Köser et al., 2009).....	48
Abbildung 12:	Beispiel einer Teichkläranlage.....	50
Abbildung 13:	Beispiel eines Stufenausbaukonzeptes für Teichkläranlagen.....	51
Abbildung 14:	Horizontal durchströmter bepflanzter Bodenfilter (Prinzip) (Quelle: DWA-A 262, 2006).....	52
Abbildung 15:	Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für eine Pflanzenkläranlage.....	55
Abbildung 16:	Kombination aus Tropfkörper- und Belebungsverfahren.....	57
Abbildung 17:	Abschätzung des abgebauten partikulären BSB <sub>5</sub> im Tropfkörper in Abhängigkeit der Raumbelastung (Quelle: Bogus, 1989).....	58
Abbildung 18:	Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination von Tropfkörper- und Belebungsverfahren.....	60
Abbildung 19:	Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für das Belebungsverfahren mit Festkörperpackung.....	62
Abbildung 20:	Verfahrenskombination Teiche und Tropfkörper (Quelle: DWA- A 201).....	63
Abbildung 21:	Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination aus Teich- und Tropfkörperverfahren.....	64
Abbildung 22:	Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination aus UASB-Reaktor und Teichklärverfahren.....	67
Abbildung 23:	Beispielhaftes Stufenausbaukonzept Kombination UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage.....	69
Abbildung 24:	Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination aus Anaerob- und Festbettreaktor.....	70
Abbildung 25:	Verfahrensfließschema Kläranlage Bonn-Beuel.....	78
Abbildung 26:	Kläranlage Bonn-Beuel als Modell.....	79
Abbildung 27:	Umnutzung des Bio-P-Beckens als Denitrifikation im Stufenausbaukonzept 1.....	81
Abbildung 28:	NO <sub>3</sub> im Ablauf der Denitrifikation der Stufenausbaukonzepte 1 und 2.....	82
Abbildung 29:	Modellierung der Regelung der C-Quelle im Stufenausbaukonzept 4.....	84
Abbildung 30:	NO <sub>3</sub> -N im Ablauf der Denitrifikation in den Stufenausbaukonzepten 3 und 4.....	85
Abbildung 31:	N <sub>ges</sub> im Ablauf beim Stufenausbaukonzept 5.....	86
Abbildung 32:	Fließschema für Referenzbeispiel 2 (* nach Checkliste für technisch-wirtschaftliche Kriterien).....	95

**Symbolverzeichnis**

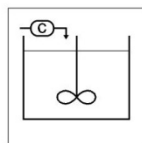
**biologische Komponenten**



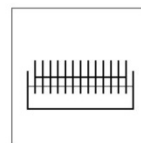
unbelüfteter Reaktor



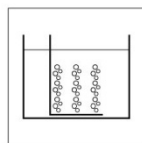
Tropfkörper



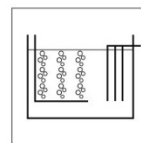
unbelüfteter Reaktor  
mit C-Quelle



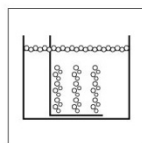
Scheibentauchkörper



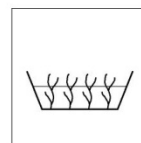
belüfteter Reaktor



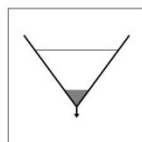
Membranbelebung



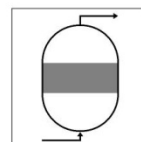
belüfteter Reaktor  
mit Festkörperpackung



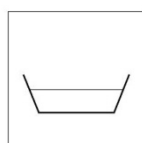
Pflanzenkläranlage



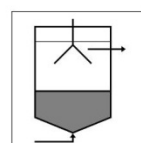
Nachklärbecken



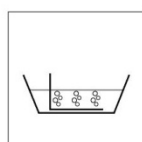
Biofilter



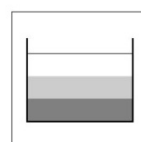
unbelüfteter Abwasserteich  
Schönungsteich  
Algenreaktor



anaerober Reaktor



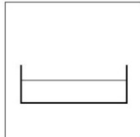
belüfteter Abwasserteich



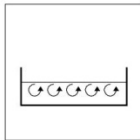
Aufstaubebehälter (SBR)

**mechanische Komponenten**

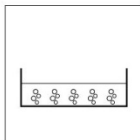
Rechen



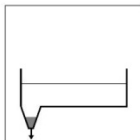
Langsandfang



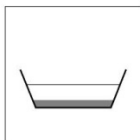
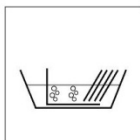
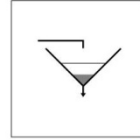
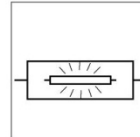
Sandfang, hydraulisch



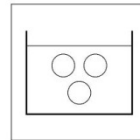
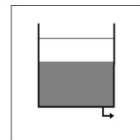
Sandfang, belüftet



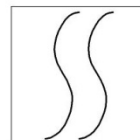
Vorklärbecken

Absetzteich  
Nachklärteichbelüfteter Teich mit  
Lamellenseparatoren**chem.-physik. Komponenten**Phosphorfällung  
Metallfällung

UV-Bestrahlung

Chlorung  
Ozon-Desinfektion

Filtration

**sonstige Komponenten**

Vorfluter



## 1 Aufgabenstellung und Ziele

Insbesondere in der südlichen Hemisphäre wachsen urbane Siedlungsgebiete schnell und unkontrolliert. Unter solchen Randbedingungen ist es unmöglich, den Ausbau und Betrieb von Abwasseranlagen „nach Lehrbuch“ aufgrund langfristiger Planung „aus einem Guss“ zu realisieren. Nicht nur der Umweltschutzgedanke, sondern ökonomische Ressourcen, politischer Wille, institutionelle Stärke und kultureller Hintergrund sind entscheidende Faktoren, die den Bau und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen beeinflussen.

Im Rahmen eines Verbundprojektes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil 2 Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“ im Kernprojekt C „Simulation und Konzepte der Abwasserbehandlung“ sollen Planungshilfen und fallweise geeignete Technologiekonzepte für den stufenweisen Ausbau von kommunalen Kläranlagen erarbeitet werden, die eine nachhaltige Abwasserreinigung ermöglichen.

Die vorliegende Planungshilfe umfasst eine strukturierte Darstellung verfahrenstypischer Ausbauoptionen aus technisch-wirtschaftlicher Sicht einschließlich modularer Konzepte. Maßgebend ist zunächst die technische Analyse und Evaluation von Verfahrenstypen und Bauformen in einer übersichtlichen Gesamtstruktur. Auf Basis einer Prioritäten-Rasterung soll dem Nutzer ermöglicht werden, aus der Vielfalt der möglichen Kombinationen von Verfahrensalternativen im Stufenausbau die jeweils grundsätzlich geeigneten herauszusuchen. Dazu werden einige repräsentative Falltypen als Beispiele aufgegriffen und diskutiert.

Darüber hinaus werden notwendige Instrumente (Methoden, Kriterienkatalog, Richtzahlen) zum wirtschaftlichen Vergleich von Verfahrenskombinationen aufgezählt. Fokussiert wird jeweils das Stufenausbaukonzept, welches eine möglichst gute Annäherung an die optimale Auslastung während der verschiedenen Entwicklungsphasen unter Berücksichtigung der so genannten „Schwellenkosten“ (siehe Kapitel 3.1) erlaubt.

Aus den recherchierten Projektfällen wird ein repräsentatives Referenzprojekt ausgewählt, um die entwickelten Planungshilfen exemplarisch anzuwenden und zu verifizieren.

Das Forschungsziel des beantragten Vorhabens besteht zunächst darin, eine Übersicht der Abwasserreinigungstechnologien nach stufenausbaufähigen Komponenten zu erarbeiten und die unter verschiedenen länderspezifischen Randbedingungen sinnvollen Kombinationen nach technischen und wirtschaftlichen Aspekten darzustellen. Wegen der Vielzahl der möglichen Verfahren und Verfahrenskombinationen und unterschiedlichsten örtlichen Randbedingungen ist es notwendig und sinnvoll, ein Prioritäten-Raster zu entwickeln und die strukturiert dargestellten denkbaren Stufenausbaukonzepte in Form einer Matrix nach den häufig auftretenden Randbedingungen zu ordnen, so dass diese für die Praxis verwertbar und anwendungsorientiert ist.

Wie jede andere technische Bemessungsregel, Kalkulationshilfe oder Checkliste wird es nie möglich sein, die völlige und bedingungslose Übertragbarkeit der Ergebnisse auf jeden denkbaren Einzelfall abzusichern. Sozioökonomische Faktoren, die Bevölkerungsdichte, Wasserdargebot und -bedarf, politische Stabilität sowie ökologische und ökonomische Randbedingungen sind wesentliche Einflussfaktoren und müssen von Projekt zu Projekt unterschiedlich bewertet werden. Die Planungshilfe soll jedoch grundsätzliche Ideen für den Einsatz von Stufenausbaukonzepten unter unterschiedlichen Bedingungen vor allem in Entwicklungs- und Transformationsländern liefern.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass ein Abwasserstrom, zum größten Teil aus kommunalem Abwasser bestehend, aus einem Abwassersystem mittels natürlichen Gefälles zu einer zentralen Abwasserreinigungsanlage gelangt. Der Neubau bzw. Ausbau von Kläranlagen erfolgt meist durch hydraulische Überlastung bestehender Anlagen, steigende Zulauffrachten oder aufgrund höherer Anforderungen an die Einleitwerte.

In Kapitel 3 wird auf die Besonderheiten von stufenweisem Ausbau von Kläranlagen sowie auf länderspezifische Randbedingungen eingegangen. In Kapitel 4 und 5 werden die grundlegenden Verfahrenskomponenten und typische Kombinationen aus diesen Komponenten dargestellt. Kapitel 6 untersucht Kombinationen aus den in Kapitel 4 und 5 aufgezeigten Komponenten und Verfahren, während in Kapitel 6.5 auf eine Plausibilisierung und Verifikation von Stufenausbaukonzepten anhand von Referenzbeispielen eingegangen wird.

## **2 Projektentwicklung**

### **2.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen**

In den Jahren 1998 und 1999 entwickelte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in Zusammenarbeit mit Wasserwirtschaftsexperten das Aktionskonzept „Nachhaltige und wettbewerbsfähige deutsche Wasserwirtschaft“. Das Ziel des Aktionskonzepts ist es, eine nachhaltige Wasserver- und -entsorgung insbesondere in Wachstums- und Entwicklungszonen der Welt zu konzipieren. Aufbauend auf den Zielen dieses Aktionskonzepts wurde das Forschungsverbundprojekt „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung“ erarbeitet.

Das vorliegende Teilprojekt C 2 „Stufenausbaukonzepte für kommunale Kläranlagen unter verschiedenen landesspezifischen Randbedingungen“ ist eingebunden in das o. g. Verbundprojekt „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet Abwasser“, Kernprojekt C „Simulation und Konzepte der Abwasserbehandlung“. Das vorliegende Forschungsvorhaben (als Bestandteil des Forschungsverbundprojekts) unterstützt damit die internationale Positionierung der deutschen Wasserwirtschaft sowie die Anpassung und Optimierung der in der Bundesrepublik Deutschland eingesetzten siedlungswasserwirtschaftlichen Verfahrenstechnik zur nachhaltigen Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Situation in anderen Ländern.

### **2.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf**

Die Arbeitsschwerpunkte des Teilprojektes liegen im empirischen Bereich. Experimentelle Arbeiten sind nicht vorgesehen, jedoch die indirekte Erhebung vorliegender Erfahrungen, die entsprechend im Berichtszeitraum durchgeführt wurde.

Das vorliegende Vorhaben beinhaltet Ergebnisse und Erfahrungen aus den Forschungsvorhaben des Kernprojektes A bzw. baut zum Teil auf den Ergebnissen der anderen Verbundpartner auf. Auf verschiedenen Projekttreffen, Sitzungen mit privatwirtschaftlicher Teilnahme (z. B. Kläranlagenbetreiber, Ingenieurbüros usw.) und auf der DWA-Sitzung des Arbeitskreises Wirtschaft wurden die zwischenzeitlichen Ergebnisse vorgestellt und mit den Teilnehmern diskutiert.

Gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan kam es u. a. im Zusammenhang mit dem versetzten Start anderer Teilprojekte zu punktuellen zeitlichen Verschiebungen.

Aus diesem Grund ist gemeinsam mit den anderen Verbundprojektbeteiligten der Gesamtprojektverlauf und die Anpassung der Zeitpläne der Einzelprojekte an den Rahmen der zeitlichen Streckung des Gesamtprojektes diskutiert worden, um eine abgestimmte Verbundprojektarbeit und insbesondere die Erarbeitung des Gesamtschlussberichtes und des Leitfadens sicherstellen zu können. Auf dem Koordinatoren-Treffen am 17.12.2007 in Bochum wurde gemeinsam mit dem Projektträger abschließend festgelegt, die Laufzeit dieses Projektes bis zum 31.07.2009 zu verlängern. Die Zeitplanung wurde an die Streckung der Projektlaufzeit angepasst.

### **2.3 Ermittlung des Stands von Wissenschaft und Technik**

Im Rahmen der im Berichtszeitraum durchgeführten laufenden Recherchen wurde der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik erhoben. Aufbauend auf eigenen Beständen umfasste die Erhebung neben der Literaturrecherche in einschlägigen Onlineverzeichnissen der Universitäts- und sonstigen Bibliotheken auch spezifische Fachdatenbanken (u. a. DVGW-Fachaufsatzdatenbank, DWA-Datenbank) wie auch die einschlägigen Datenbanken gemäß der Anlage „Übersicht über Fachinformationszentren und überregionale Informationseinrichtungen“ zum Zuwendungsbescheid. Darüber hinaus wurden allgemeine Internetrecherchen durchgeführt, bei denen Meinungen und Angaben von international tätigen Organisationen zu dem Forschungsthema ausgewertet wurden.

Ergänzende Diskussionen wurden mit Fachleuten aus der Privatwirtschaft und am Rande von Fachtagungen geführt, bei denen beispielsweise Informationen zur Verfahrensweise anaerober Vorbehandlung durch einen UASB-Reaktor und zu ökonomischen Randbedingungen gewonnen wurden.

In das Projekt flossen auch die Ergebnisse und Erfahrungen aus den Forschungsvorhaben des Kernprojektes A „Abwasserbehandlung“ aus demselben Verbundprojekt mit ein. Durch die zeitlich versetzte Bewilligung dieser Teilprojekte und insbesondere der Kernprojektkoordination war der im Rahmen des Verbundprojektes eigentlich vorgesehene fachliche Austausch, abgesehen von dem ebenfalls beim ZE bearbeiteten Projekt A 5 zu Abwasserteichanlagen zu Beginn der Projektlaufzeit, eingeschränkt. Dies hat sich mit der Übernahme einer provisorischen fachlichen Kernprojektkoordination durch die vorgesehenen Projektpartner gebessert. Es folgten im weiteren Projektverlauf eine Zusammenarbeit und ein Informationsaustausch mit den beteiligten Instituten u. a. im Hinblick auf Bemessungsgrundla-

gen für typische Verfahrensketten. U. a. wurde auch eine Befragung aller am Kernprojekt A „Abwasserbehandlung“ beteiligten Institutionen per E-Mail durchgeführt.

Bei einer Expertenbefragung wurde die Matrix über die Eignung zur Kombination von Reinigungskomponenten und -verfahren sowie die Checkliste für technisch-wirtschaftliche Kriterien den Projektleitern und externen Experten des Verbundprojekts schriftlich zur Diskussion freigestellt. Die in dieser Aktion gewonnenen Informationen und Kenntnisse sind in die Ergebnisse eingearbeitet.

## 2.4 Verwertbarkeitsaussichten

- a) Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises:

Die Arbeitsschwerpunkte dieses Forschungsvorhabens lagen im empirischen Bereich. Diese Aufgaben erforderten einen hohen Personaleinsatz. Die Personalkosten stellten daher den mit Abstand größten Teil des Budgets dar.

- b) Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit:

Als Bestandteil des Verbundprojekts „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet Abwasser“ leistete dieses Forschungsvorhaben einen Beitrag zur Umsetzung des vom BMBF ausgegebenen förderpolitischen Aktionskonzepts „Nachhaltige und wettbewerbsfähige deutsche Wasserwirtschaft“. Das Ziel des Aktionskonzepts war es, eine nachhaltige Wasserver- und -entsorgung insbesondere in Wachstums- und Entwicklungszonen der Welt zu konzipieren.

Aufbauend auf den Zielen dieses Aktionskonzeptes wurde das Forschungsverbundprojekt „Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung“ erarbeitet. Dieses Forschungsvorhaben (als Bestandteil des Forschungsverbundprojekts) unterstützt die internationale Positionierung der deutschen Wasserwirtschaft sowie die Anpassung und Optimierung der in der Bundesrepublik Deutschland eingesetzten siedlungswasserwirtschaftlichen Verfahrenstechnik zur nachhaltigen Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Situation in anderen Ländern.

- c) Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans:

Nr.	Art der Verwertung	Zeithorizont
1	Präsentationen und Publikationen: → Siehe ausführliche Liste in Kapitel 2.5	2008, kontinuierlich
2	Beiträge zum Projektverbund: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leitfaden</li> <li>- projektübergreifender Schlussbericht</li> <li>- Koordination des Kernprojekt C</li> </ul>	2009 2009 2005 – 2009
3	Zuarbeit zu anderen Projekten: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kernprojekt A</li> <li>- Kernprojekt C (insbes. C 0 und C 3.1)</li> <li>- IWRM Vietnam (Ruhr-Universität-Bochum, Prof. Stolpe)</li> </ul>	2006 – 2009 2006 – 2009 2008 - 2009
4	Einbringung von Ergebnissen in Fachverbände: <ul style="list-style-type: none"> <li>- BDE, VDMA, DWA, u. a.</li> </ul>	2009 ff.

- d) Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen:

Im Rahmen der im Berichtszeitraum durchgeführten laufenden Recherchen wurde der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik erhoben. Besonders hervorzuhebende Ergebnisse liegen in diesem Zusammenhang nicht vor (nach Kenntnisstand der Projektbearbeiter). Dies gilt auch für die aus den Parallelprojekten des Verbundprojektes eingeflossenen Ergebnisse, für die auf die jeweiligen Berichte verwiesen wird.

- e) Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses:

Siehe Kapitel 2.5 und Verwertungsliste im Erfolgskontrollbericht (nicht öffentlich).

Die gewonnenen Ergebnisse werden anderen Akteuren, wie z. B. wissenschaftlichen Institutionen, Dienstleistungsunternehmen und Herstellern von technischer Ausrüstung für Abwasserreinigungsanlagen durch Veröffentlichungen und den vorgesehenen Leitfaden für das Gesamtprojekt zur Verfügung gestellt und können dabei vor allem von exportorientierten deutschen Unternehmen genutzt werden, um ihren Zugang zu den Märkten in Transformations- und Entwicklungsländern zu verbessern.

Im Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit zeigen die Projekterfahrungen einen Bedarf an Wissenstransfer im Bereich des stufenweisen Ausbaus von Abwasserreinigungsanlagen, insbesondere in Transformations- und Entwicklungsländern, auf. Dies betrifft vor allem die Verknüpfung von technischen und ökonomischen Aspekten.

## 2.5 Veröffentlichungen

Ergebnisse aus dem Vorhaben wurden im Berichtszeitraum nicht explizit veröffentlicht, die Projekterkenntnisse sind aber teilweise in Vorträge zu anderen Projekten mit eingeflossen:

### Publikationen:

Fuhrmann, T.; Harbach, M.; Rudolph, K.-U. (2008): „Exportorientierte Forschung und Entwicklung – Strategie für eine erfolgreiche Wasserwirtschaft“, Newsletter zur 7. Handelsblatt Jahrestagung Wasser- und Abwasserwirtschaft 2008, S. 14f.

Harbach, M.; Rudolph, K.-U. (unveröff.): „Economics in the water sector – terms and methods need some revision for engineers in water management“, zur Veröffentlichung angenommen bei World Water (vorauss. Februar 2010).

Rudolph, K.-U. (2005): „Enhancement of Biological Wastewater Purification with Lamella Separators“, Beitrag für das Magazin asianWater, Ausgabe März 2005, Vol 21 Nr. 2, S. 16 ff., ISSN 0218-4540, Hrsg.: Syed Hussain Publications SDN BHD, Malaysia

### Vorträge:

Fuhrmann, T.; Rudolph, K.-U. (2007): „Wastewater ponds and subsequent UV disinfection – a lean cost option for agricultural wastewater reuse“, Vortrag für die 6th IWA Specialist Conference on Wastewater Reclamation and Reuse for Sustainability am 09. – 12. Oktober 2007 im Flanders Congress and Concert Centre in Antwerpen, Belgien.

Harbach, M. (2009): „L'économie du secteur d'eau (l'eau et les eaux usées) (Ökonomische Aspekte des Wassersektors)“, Annaba, Algerien, 23. – 25. November 2009.

Rudolph, K.-U. (2008): „The Economic Optimum of Quality – Examples from the Water Sector in Vietnam and other Countries“, Vortrag an der National Economics University (NEU) am 24. März 2008 in Hanoi, Vietnam.

Rudolph, K.-U. (2008): „Overview on Environmental Technologies & Minimum Quality Requirements for STP in Vietnam“, Vortrag für den Workshop Water Saving and Recycling in Industrial Operations of SMEs in Vietnam am 21. März 2008 in der Provinz Bac Giang in Vietnam.

Rudolph, K.-U.; Fuhrmann, T.; Harbach, M. (2008): „International Survey of Wastewater Pond Systems“ – Design, Operations & Performance for Different Regions – Technologic and Economic Innovations & Potentials – Specials: Disinfection, Water ReUse, Business Development, Vortrag für den Workshop beim Institute of Environmental Science and Research Ltd. (ESR) am 14. Juli 2008 in Christchurch, Neuseeland.



### **3 Stufenausbau kommunaler Kläranlagen**

#### **3.1 Allgemeines**

Als Stufenausbau kommunaler Kläranlagen wird die Anpassung von verfahrenstechnischen Komponenten an steigende Reinigungsanforderungen oder steigende Belastungen von Abwasserqualität und -menge unter Berücksichtigung der so genannten Schwellenkosten verstanden. Schwellenkosten entstehen, wenn die Kapazität der vorhandenen Anlage nicht mehr ausreicht und eine zusätzliche Baustufe neu errichtet werden muss. Die neu gebauten Zusatzkapazitäten sind in der Regel anfänglich schlecht ausgelastet, wodurch die spezifischen Kosten sprunghaft ansteigen und betriebliche Probleme wie z. B. die Bildung von Blähschlamm auftreten können. Aus technischen Gründen ist es nicht möglich, die Baustufen fortlaufend so „fein“ an den tatsächlichen Bedarf anzupassen, dass eine regelmäßig gute Kapazitätsauslastung vorhanden ist. Die Finanzierbarkeit von Infrastrukturinvestitionen hängt wesentlich von den Finanzierungsrisiken ab, und diese wiederum sind eng mit der zu erwartenden Kapazitätsauslastung und dem Risiko von Leerkapazitäten verbunden. Wegen des hohen Fixkostenanteils bei wassertechnischen Anlagen kann das Finanzierungsrisiko aufgrund von Schwellenkosten ein maßgebendes Kriterium für die Wahl bestimmter Stufenausbaukonzepte werden.

Der Schlüssel zu einer erfolgreichen flächendeckenden Abwasserreinigung ist die Benutzung von geeigneter Technologie, die auf einfachen Prozessen bei niedrigen Kosten, einfacher Bedienbarkeit und einer Kapazität zur Einhaltung der Einleiterwerte basiert (Libhaber, 2007). Oft sind Kosteneinsparungen auch deshalb wichtig, weil kostendeckende Gebühren nicht überall erhoben bzw. eingetrieben werden können.

Die vergleichsweise hohen Investitionskosten langlebiger Anlagenteile müssen zu einer nachhaltigen Planung des Ausbaus der Kläranlage führen, idealerweise sind erforderliche Anschlüsse usw. für zukünftige Ausbauoptionen bereits in der Planung enthalten. Daher sind nicht nur technische, sondern auch sozioökonomische, politische und ökonomische Rahmenbedingungen wesentliche Einflussfaktoren für den Bau, stufenweisen Ausbau und Betrieb von Kläranlagen.

Bei der Verfahrenswahl, der Bemessung sowie im Bauablauf muss auf die Einbeziehung der Voraussetzungen für zukünftige Erweiterungsstufen geachtet werden. Insbesondere muss z. B. Grundstück vorgehalten, Armaturen und Anschlüsse entsprechend ausgeführt oder Komponenten so gefertigt werden, dass ein späterer Stufenausbau erfolgen kann.

### **3.2 Abwasser unter landesspezifischen Aspekten**

Nach der Prognose des IPCC (2007) wird die Bevölkerung im Jahr 2050 auf über 9 Mrd. Menschen steigen, der Zuwachs vorwiegend in Entwicklungsländern erfolgen und der Trend zur Urbanisation sich weiter fortsetzen. Nach Libhaber (2007) führt dies dazu, dass der städtische Wasserverbrauch, die Erzeugung von kommunalem Abwasser und die Bewässerungsfläche zur Abdeckung des Nahrungsmittelbedarfs, der aus der gestiegenen Bevölkerungsanzahl resultiert, ansteigen. Außerdem führt der weltweite Trend zur Urbanisierung und damit einer Konzentrierung der Bevölkerung einerseits zu regionaler Wasserknappheit, aber auch zu Problemen mit der Abwasserentsorgung.

Die Investitionshierarchie in Entwicklungsländern besteht nach Libhaber (2007) in folgendem Raster:

1. Wasserversorgung,
2. Kanalisation und
3. Abwasserreinigung.

Bevor also Investitionen in die Abwasserreinigung getätigt werden, sind zunächst die Wasserversorgung und danach die Erfassung des Abwassers in einer funktionierenden Kanalisation zu gewährleisten. Denn ohne Existenz einer Kanalisation kann die beste Kläranlage kein Abwasser reinigen. Daher schätzt Libhaber (2007), dass der Anteil des Abwassers, der einer Reinigung unterzogen wird, 10 % nicht übersteigt. Bevor nicht innovative und erschwingliche Alternativen für die Abwasserreinigung bereitgestellt werden und ein Umdenken in dieser Hinsicht erfolgt, wird sich dieser Anteil nicht wesentlich verändern.

Der Fokus der Abwasserreinigung darf sich demnach zunächst nicht allein auf die Anlage am Ende der Kanalisation beziehen, sondern muss vielmehr die Ausgangssituation unter den Randbedingungen Versorgung und Erfassung des Abwassers mit einbeziehen. Des Weiteren sind einfache, kostengünstige und robuste Verfahren erforderlich, um die Erschwinglichkeit einer Abwasserreinigung zu erhöhen und dadurch die Belastung der Umwelt zu entschärfen. Stufenausbaukonzepte können zu dieser Entschärfung beitragen, da sie vor allem auf die Finanzierbarkeit von Abwasserreinigungsanlagen einen positiven Einfluss haben.

Die Anforderungen an die Reinigungsleistung und -qualität sind zum Teil regionsbezogen sehr unterschiedlich. So wird nach Menzel (2005) in Brasilien i. A. zunächst die Kohlenstoff-Elimination, dann eine Kapazitätserhöhung von Kanal und

Kläranlage und danach eine Nährstoffentnahmestufe geplant. Die Realisierung ist jedoch nicht planmäßig festgelegt, da nötige finanzielle Mittel zur Verfügung stehen müssen.

Platzer und Hoffmann (2008) gehen in ihrem Bericht auf einige Besonderheiten in wärmeren Klimaten ein. So setzt die Nitrifikation sehr viel schneller ein, so dass es leichter zu einer Konkurrenz um den verfügbaren Sauerstoff und zu einer erhöhten Säureproduktion kommt. Es sind im Gegensatz zu Deutschland keine Frosttage vorhanden, auf die Ausrüstung und Gebäude ausgelegt werden müssen. Die Fokussierung auf Ersatzteile bzw. Reparaturen, die vor Ort hergestellt bzw. getätigt werden können, ist einer Langlebigkeit und dem vollständigen Ersatz der Komponenten vorzuziehen.

Es kann festgehalten werden, dass

- das Klima, insbesondere Niederschlag und Temperatur, einen starken Einfluss auf die Reinigungsleistung und Abwasserentsorgung haben,
- Gebiete mit hohen Niederschlägen einen höheren Wasserverbrauch aufweisen (von Sperling und Chernicharo, 2005),
- in der Regenzeit höhere Mengen mit geringeren Konzentrationen, in Trockenzeiten geringere Mengen mit erhöhten Konzentrationen, verstärkt durch hohe Verdunstungsraten bei offenen Wasserflächen auftreten,
- gerade in Entwicklungsländern urbane Gebiete andere Abwassermengen und -qualitäten aufweisen als ländliche Gebiete, und somit erhebliche regionale Schwankungen zu erwarten sind,
- sich die Anforderungen an die Abwasserreinigung von Land zu Land unterscheiden und abhängig vom Vorfluter bzw. von einer evtl. Wiederverwendung sind,
- für die richtige Auswahl der Abwasserreinigungstechnologie die Situation vor Ort zu betrachten ist.

Zusätzlich ist auch im Zuge der Angleichung der Schwellen- und Entwicklungsländer auf das Niveau der Industrieländer eine Verschärfung der Einleiterwerte zu erwarten. Für die Auswahl angepasster Abwasserreinigungskonzepte müssen die Anforderungen in Bezug auf Menge und Qualität betrachtet werden, sowie zukünftige Entwicklungen gerade im Hinblick auf die Möglichkeit eines stufenweisen Ausbaus von Abwasserreinigungsanlagen geprüft werden.

### 3.3 Beispiel eines Stufenausbaukonzeptes

Im Folgenden werden anhand eines Beispiels die Vorteile von Stufenausbaukonzepten dargestellt. Die zugehörigen Berechnungen unterliegen empirischen Formeln und müssen in jedem Einzelfall genauer untersucht werden.

Als Szenario wird eine Ausschreibung für eine neue Abwasserreinigungsanlage in Brasilien gewählt. Die neue Abwasserreinigungsanlage soll eine Kapazität von 20.000 Einwohnerwerten (EW) besitzen. Nach Abschätzung des Anlagenplaners kann aufgrund der kontinuierlich steigenden Anschlusszahl, dem Anschlussgrad an die Kanalisation usw. ausgegangen werden, dass die Belastung konstant ansteigt, nach 10 Jahren 10.000 EW übersteigt und nach 20 Jahren 20.000 EW erreicht. Es werden daher folgende Varianten betrachtet:

- Variante 1: Belebungsanlage mit einer Kapazität von 20.000 EW, Betrachtungszeitraum 20 Jahre,
- Variante 2: Abwasserteichanlage mit nachgeschalteter UV-Elimination, Kapazität 20.000 EW, Betrachtungszeitraum 20 Jahre,
- Variante 3: Stufenausbaukonzept mit einer Teichkläranlage für eine Kapazität von 10.000 EW und nach 10 Jahren Bau einer Belebungsanlage für eine Kapazitätssteigerung um weitere 10.000 EW, im Endausbau beträgt die Kapazität somit 20.000 EW, Betrachtungszeitraum 20 Jahre.

Die Belastung und Auslegung erfolgt unter Berücksichtigung von für alle Varianten gleich angenommenen landesspezifischen Randbedingungen. Für die Investitionskosten werden die Werte Libhaber (2007, Tabelle 3) entnommen, für die Belebungsanlage werden 100 EUR pro EW, für eine Abwasserteichanlage 40 EUR pro EW angesetzt. Die daraus berechneten Investitions-, Kapital- und Betriebskosten sind in der folgenden Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Investitions-, Kapital- und Betriebskosten der Varianten 1 bis 3

	Belebung 20.000 EW	Abwasserteich 20.000 EW	Stufenausbau	
			1. Stufe: Abwasserteich 10.000 EW	2. Stufe: Belebung 10.000 EW
Invest	1,7 Mio. EUR	0,68 Mio. EUR	0,4 Mio. EUR	0,74 Mio. EUR
CAPEX	110.500 EUR/a	44.200 EUR/a	26.000 EUR/a	48.400 EUR/a
OPEX	85.000 EUR/a	6.800 EUR/a	4.000 EUR/a	37.200 EUR/a

Die in diesem Beispiel genannten Kostenansätze folgen aufgrund der vergleichbaren Bauweise den Libhaber-Ansätzen. Die Investitionskosten für den Vollausbau erhalten einen Abschlag von 15 %, da die spezifischen Kosten je Einwohnerwert mit steigendem Anschlussgrad sinken. Die Investitionskosten der 2. Stufe verringern sich um einen angenommenen Realzins von 3 % aufgrund der späteren Investition auf

$$\frac{10.000 \text{ EW} \cdot 100 \frac{\text{EUR}}{\text{EW}}}{1,03^{10}} = 0,74 \text{ Mio. EUR.}$$

Die *Kapitalkosten* werden überschlägig mit der Gleichung

$$\begin{aligned} \text{CAPEX} &= \text{Abschreibung} + \text{Zinsen} \\ &\approx \frac{\text{Invest}}{\text{Laufzeit}} + \text{Invest} \cdot 0,5 \cdot \text{Zins} \end{aligned}$$

berechnet. Die Betriebskosten werden ebenfalls Libhaber (2007, Tabelle 3) entnommen und betragen 5 EUR pro EW und Jahr für die Belebung und 0,4 EUR pro EW und Jahr für die Abwasserteiche.

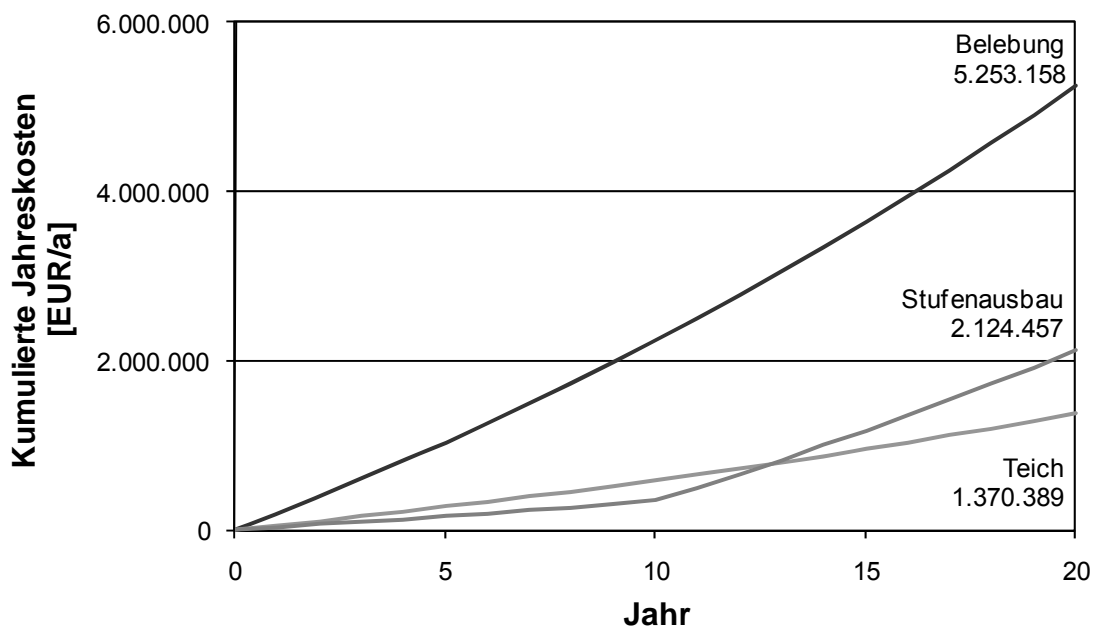


Abbildung 1: Vergleich der kumulierten Jahreskosten

In Abbildung 1 sind die kumulierten Jahreskosten für die Belebungsanlage, für die Abwasserteichanlage und für das Stufenausbaukonzept bei einer Verzinsung mit einem Realzins von 3 % dargestellt. Die Belebungsanlage weist die höchsten kumulierten Kosten nach 20 Jahren Laufzeit mit über 5 Mio. EUR auf. Der stufenweise Ausbau zeigt anfänglich die geringsten kumulierten Kosten, nach Bau der 2. Stufe belaufen sich die kumulierten Kosten nach 20 Jahren auf über 1,8 Mio. EUR. Die günstigste Lösung nach 20 Jahren Betrachtungszeitraum ist die Teichkläranlage.

Tabelle 2: Übersicht der Varianten

	Elimination hinsichtlich folgender Parameter	Operationskosten	Mittlere spezifische Kosten je EW bei einer Laufzeit von 20 Jahren *
Variante 1 (Belebungsanlage)	CSB / BSB <sub>5</sub> Stickstoff Schlammabtrennung	85.000 EUR/a	35,17 EUR
Variante 2 (Abwasserteichanlage)	CSB / BSB <sub>5</sub> Keime Schlammabtrennung	6.800 EUR/a	9,17 EUR
Variante 3 (Stufenausbaukonzept)	CSB/BSB <sub>5</sub> Stickstoff Keime Schlammabtrennung	4.000 EUR/a bzw. 41.200 EUR/a	8,26 EUR

\* Berechnung ohne Verzinsung des eingesetzten Kapitals

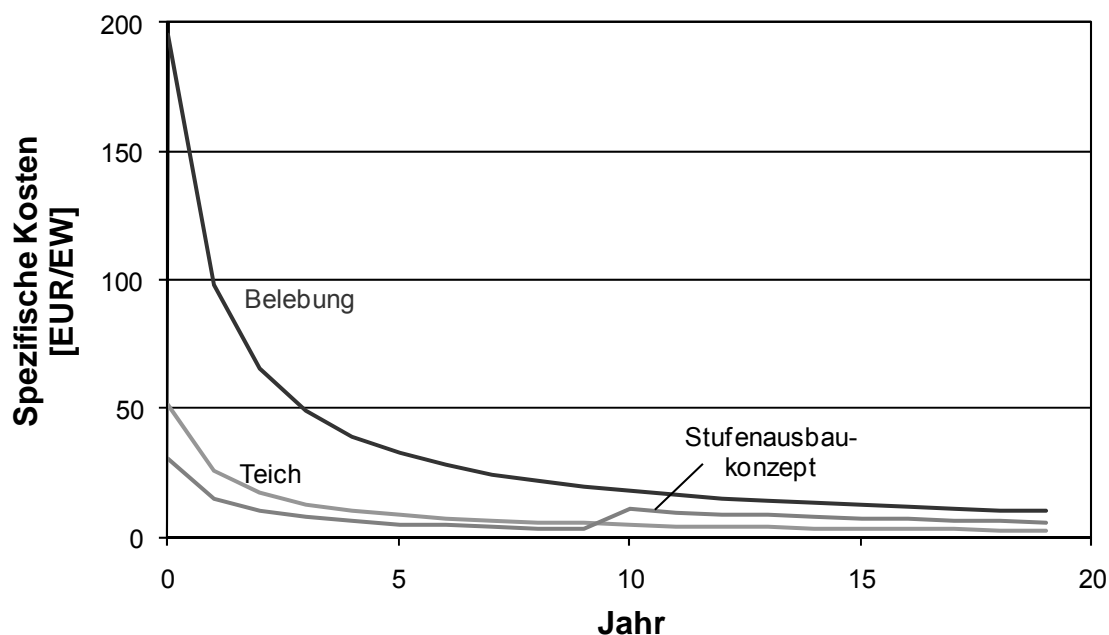


Abbildung 2: Vergleich der spezifischen Kosten

In Abbildung 2 ist der Vergleich der spezifischen Kosten aller drei Varianten dargestellt. Vorteile des stufenweisen Ausbaus im Vergleich zu den anderen Verfahren sind:

- sichere Elimination von CSB/BSB<sub>5</sub>, Stickstoff, Keime,
- geringste spezifische Kosten von Projektbeginn an (Mittelwert bei 8,30 EUR pro EW),
- Kapazität der Abwasserreinigungsanlage entspricht dem tatsächlichen Reinigungsbedarf,
- höhere Entscheidungsflexibilität hinsichtlich der 2. Stufe bei geringerem Planungsrisiko,
- Verlagerung von Investition in Zukunft, Entlastung des aktuellen Budgets und Reduktion der Kapitalkosten.

Die Nachrüstung einer Anaerobstufe zur Schlammfäulung bzw. (bei höheren BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen des Rohabwassers) zur Abwasserbehandlung ist bei allen drei Varianten möglich (siehe Kapitel 4.4.6.4), sobald die Anlagenauslastung eine wirtschaftliche Biogasnutzung erlaubt oder um die Methanemissionen zu verringern.

## **4 Verfahrenskomponenten**

### **4.1 Allgemeines**

Im Folgenden werden die grundsätzlich gebräuchlichsten Komponenten kommunaler Abwasserreinigung kurz beschrieben sowie auf die Hauptbemessungsgröße eingegangen. Die Komponenten werden nach ihrer Reinigungswirkung in mechanische, biologische und chemisch-physikalische Verfahrenskomponenten eingeteilt. Zur detaillierten Beschreibung wird auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.

### **4.2 Mechanische Verfahrenskomponenten**

#### **4.2.1 Rechen**

Grob-, Sieb- und Feinrechen unterscheiden sich hauptsächlich in der Maschenweite und in der Ausführung. Grundsätzlich werden sie als erstes Bauwerk im Zulauf zur Kläranlage gebaut, um weitere Verfahrensstufen vor Grobstoffen zu schützen. Die Auswahl des Rechens bestimmt sich weitgehend aus der Elimination der im Zulauf auftretenden Grobstoffe.

#### **4.2.2 Absetzbecken für mineralische Stoffe**

Sandfänge dienen zur Abtrennung von mineralischen Fraktionen aus dem Zulauf zur Kläranlage. Die höhere Sinkgeschwindigkeit von mineralischen gegenüber organischen Stoffen wird dabei genutzt. Der Sandfang wird so ausgelegt, dass eher organische Stoffe im Sandfang als mineralische Stoffe in weiteren Reinigungsstufen anfallen, da mineralische Stoffe einen höheren Verschleiß der Anlagenteile verursachen können.

Der Langsandfang wird über die Oberflächenbeschickung bemessen, dabei sollte die Geschwindigkeit im Sandfang auch bei Zuflussschwankungen 0,3 m/s nicht überschreiten. Um eine optimale Hydraulik zu erreichen, sollte die Breite des Sandfanges ungefähr der Tiefe entsprechen.

In einem belüfteten bzw. hydraulischen Sandfang wird eine Wasserwalze quer zur Strömungsrichtung mit Luft bzw. mit Wasser erzwungen, welche die Sedimentationsvorgänge unterstützt und somit die erforderliche Beckengröße erheblich reduziert werden kann.



### **4.2.3 Absetzbecken für organische Stoffe**

Zu den Absetzbecken für organische Stoffe zählen Vor- und Nachklärbecken. Neben dem Absetzvorgang können auch meist unkontrollierte biologische Prozesse ablaufen (z. B. „wilde Denitrifikation“).

Vorklärbecken werden über die Aufenthaltszeit, Nachklärbecken über die Oberflächenbeschickung bemessen. Die erforderliche Beckenoberfläche berechnet sich aus dem Quotienten des Mischwasserzuflusses und der Oberflächenbeschickung. Nachklärbecken werden in vier vertikale Zonen eingeteilt, nämlich die Klarwasserzone, Trenn- und Rückstromzone, Dichtestrom- und Speicherzone sowie die Eindick- und Räumzone.

In Lamellenseparatoren sind zur Erhöhung der Oberfläche mehrere Platten schräg eingebaut, so dass der Schlamm abrutscht und das Klarwasser durch das Absinken des Schlammes nach oben gedrückt wird. Durch ein höheres Verhältnis von Oberfläche zu Grundfläche werden Lamellenseparatoren vorwiegend bei beengten räumlichen Verhältnissen eingesetzt.

## **4.3 Biologische Verfahrenskomponenten**

### **4.3.1 Fermenter**

Als Fermenter werden kontinuierlich durchflossene Reaktoren bezeichnet, in denen biologische oder chemische Prozesse ablaufen (z. B. im Belebungsbecken oder Fällungsbecken). Um einen ausreichenden Kontakt der suspendierten Bakterienmasse bzw. der Chemikalie mit dem Abwasser zu erreichen, werden Rührer bzw. Belüftungseinrichtungen eingesetzt. Fermenter werden vielfältig in der Abwasserreinigung genutzt, die Bemessung erfolgt nach entsprechendem Einsatzfall. Als Sonderform wird der Sequencing Batch Reactor (SBR) hervorgehoben, in dem alle für die Abwasserreinigung benötigten Prozesse in einem Reaktor ablaufen.

### **4.3.2 Teiche**

Die Abwasserreinigungsprozesse in Teichkläranlagen erfolgen in belüfteten, unbelüfteten, Absetz-, Nachklär- und Schönungsteichen. In belüfteten und unbelüfteten Teichen laufen vorwiegend biologische Abbauprozesse ab. Absetz- und Nachklärteiche haben die Funktion, sedimentierbare Stoffe, ähnlich wie ein

Nachklärbecken, von der Wasserphase zu trennen. Folgende Teichtypen lassen sich (auch als mögliche Bausteine für Stufenausbaukonzepte) unterscheiden:

- **Unbelüftete Teiche** sind bei der Abwasserreinigung weltweit die Standardausführung. Je nach Ausführung und vorgesehenen Behandlungsprozessen werden Anaerobteiche (mit anaeroben Verhältnissen) oder Fakultativteiche (mit oberflächennaher aerober Zone und darunter liegender anaerober Zone) unterschieden. Die am meisten verwendeten Fakultativteiche werden in Deutschland über Flächenerfahrungswerte bemessen (DWA-A 201). Pro Einwohnergleichwert wird eine Fläche  $A_{EW}$  von mindestens  $10 \text{ m}^2$  vorgeschlagen, bei vorgeschaltetem Absetzteich auch  $A_{EW} \geq 8 \text{ m}^2/\text{EW}$ . Bei zusätzlicher Regenwasserbehandlung ist ein Zuschlag von  $5 \text{ m}^2/\text{EW}$  erforderlich. Die Tiefe sollte nicht weniger als  $1 \text{ m}$  betragen; es sollten mindestens zwei Teiche hintereinandergeschaltet werden. Durch natürliche Umwälzung der Teiche und durch Photosynthese von Algen erfolgt ein gewisser Sauerstoffeintrag in das Teichwasser.
- **Belüftete Teiche** werden über die Raumbelastung von  $B_R \leq 25 \text{ g BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  und eine Durchflusszeit von mindestens fünf Tagen bei Trockenwetter bemessen. Belüftungssysteme können sowohl Oberflächen- als auch Druckbelüftung sein. Der spezifische Sauerstoffverbrauch liegt bei ca.  $OV_{C,BSB} \geq 1,5 \text{ kg O}_2/\text{kg BSB}_5$  für die Kohlenstoffelimination (DWA-A 201). Umwälzgeräte sollten eine Leistungsdichte von  $P_R = 1$  bis  $3 \text{ W/m}^3$  besitzen, die Wassertiefe muss abhängig vom Belüftungssystem gewählt werden (DWA-A 201).
- **Absetzteiche** haben die Aufgabe, absetzbare Stoffe abzuscheiden und die Ausfaltung des abgesetzten Schlammes zu gewährleisten. Die organische Belastung soll in Absetzteichen um 35 bis 50 % reduziert werden. Nach deutschen Erfahrungswerten für die Bemessung von Absetzteichen ist ein Volumen von  $V_{EW} \geq 0,5 \text{ m}^3/\text{EW}$  erforderlich, dabei ist ein Schlammvolumen des abgesetzten Schlammes von  $0,15 \text{ m}^3/\text{EW}$  eingeschlossen (DWA-A 201). Es sollten immer mindestens zwei Teiche parallel gebaut werden, um Schlammräumungen ohne Betriebsunterbrechung zu ermöglichen.
- Als **Schönungsteiche** werden Teiche bezeichnet, die neben geringen biologischen Abbauprozessen hauptsächlich eine Pufferwirkung gegenüber Fracht- und hydraulischen Spitzen durch das große Retentionsvolumen sowie die Entfernung pathogener Organismen durch eine erhöhte Aktivität von Algen erzielen. Sie werden im Allgemeinen auf eine Durchflusszeit von ein bis zwei Tagen bemessen. Die flach gebauten Schönungsteiche (Tiefe kleiner als  $1 \text{ m}$ ) ermöglichen ein aerobes Milieu.

Bei Teichkläranlagen ist zu beachten, dass Wasserverluste in den Untergrund durch Undichtigkeiten der Teichböden verhindert werden sollten. Ist der Bau von Teichen in undichten Böden unumgänglich, so sollten Maßnahmen zum Abdichten ergriffen werden. Dichtungsbahnen z. B. aus Beton, Asphalt, Kunststoff oder Bentonit sind kostenintensiv. Eine günstige Alternative ist das Auftragen von bindigen Böden als Dichtungsschicht unter den Teichen. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Oberflächen für eine evtl. Schlammräumung befahrbar sein müssen. Ebenso können Oberflächenbelüfter durch die auftretenden Sogbelastungen Beschädigungen an den Dichtungsschichten hervorrufen.

Die Vorteile von Teichanlagen liegen im geringen Wartungs-, Kontroll- und Reinigungsaufwand, einem vergleichsweise robusten Betriebsverhalten sowie guter Reduktion mikrobiologischer Belastungen (z. B. Bakterien, Wurmeier). Sandfang und Rechen sind bei diesem Verfahren nicht unbedingt erforderlich.

Zu den Nachteilen bei der Anwendung von Abwasserteichen zählen der hohe Platzbedarf und die zum Teil großen Wasserverluste durch Evaporation in ariden Klimazonen sowie die damit einhergehende Aufkonzentration von Abwasserinhaltsstoffen im verbleibenden Wasser. Bei mangelhaftem Betrieb einer Anlage kann es dazu kommen, dass die Abwasserteiche in wärmeren Klimaten als Brutstätte von Insekten dienen können. Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor werden zwar zu einem gewissen Teil abgebaut, für eine sichere Elimination der Nährstoffe zur Einhaltung von Einleitwerten sind jedoch weitere Maßnahmen erforderlich.

### **4.3.3 Festbettreaktoren**

Als Festbettreaktoren (Tropfkörper, (Scheiben-) Tauchkörper, getauchtes Festbett) werden Systeme mit sessiler Biomasse bezeichnet. Die Biomasse wächst dabei auf im System zurückgehaltenen Festkörpern auf.

Die Bemessung von Tropfkörpern erfolgt über die Raumbelastung mit einer Unterscheidung zwischen Anlagen mit und ohne Nitrifikation. Eine Vorklärung ist aus Verstopfungsgründen erforderlich, ebenso eine Nachklärung zur Vermeidung von abgespültem Bewuchs im Ablauf. Eine anaerobe Ausführung und damit eine Denitrifikation lassen sich verfahrenstechnisch nur schwierig gestalten.

Bei Scheibentauchkörpern wächst die Biomasse auf rotierenden Scheiben, die bis zu einer gewünschten Tiefe in das Abwasser getaucht sind. So kann eine Abwechslung zwischen Belüftung und Nährstoffaufnahme gewährleistet werden. Die Bemessung erfolgt über die Raumbelastung.

Getauchte Festbetten bestehen aus feststehenden Aufwuchskörpern, die in einem Reaktor getaucht und belüftet werden. Die Bemessung von getauchten Festbetten erfolgt über die Flächenbeschickung.

#### **4.3.4 Algenreaktoren**

In Algenreaktoren existieren biologische Abbauprozesse, die von den „herkömmlichen“ Verfahren mit Nitrifikation und Denitrifikation abweichen. Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen werden direkt von den Algen aus dem Abwasser geklärt. Eine Vorklärung ist erforderlich, um Grobstoffe zu entfernen, ebenso wie ein Verfahren zur Abtrennung überschüssiger Biomasse aus dem Ablauf. Im Vergleich zum herkömmlichen Belebungsverfahren hat dieses Verfahren den Vorteil eines geringen baulichen Aufwands, eines geringeren Energieverbrauchs, ist aber vor allem geeignet für Länder mit wärmeren Klimaten (Jung et al., 2006).

#### **4.3.5 Biofilter**

Biofilter sind geschlossene Behälter, in denen der Abwasserstrom einen aus Bakterien bestehenden Filter passiert. Dies schließt auch so genannte Wirbelbettverfahren mit ein. Die Filterbetthöhe beträgt üblicherweise zwischen 1 bis 2,5 m. Eine Unterscheidung erfolgt hinsichtlich der Strömungsrichtung (Aufströmungs- und Abströmungsrichtung), Art des Füllmaterials und Art der Spüleinrichtung.

Verschiedene Verfahren sind rechtlich geschützt und dürfen nur mit Zustimmung der jeweiligen Patentinhaber gebaut werden. Allen ist gemeinsam, dass die Aufenthaltszeit des Abwassers in den geschlossenen Behältern durch eine künstlich hochgehaltene aktive Oberfläche deutlich geringer ist als bei anderen Verfahren. Die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen erfolgt durch eine interne Belüftung, die auch zur Verwirbelung bzw. Durchmischung des Abwassers dient. Der Nährstoffabbau funktioniert ähnlich zu anderen Festbettverfahren, nämlich dass der Abwasserstrom die Bakterien passiert und dabei Nährstoffe aus dem Abwasser entnommen werden. Hauptsächlich wird Kohlenstoff abgebaut, u. U. kann es auch zu einer Nitrifikation kommen. Eine Denitrifikation ist nur sehr schwer erreichbar. Eine Vorklärung zum Entfernen von Grobstoffen aus dem Abwasser und eine Nachklärung zum Entfernen von ab gespültem Bewuchs sind erforderlich. Da die Filterwirkung nur unter einem gewissen Druck stattfindet, kann dieses Verfahren nicht im Freigefälle erfolgen, sondern nur in geschlossenen Behältern. Dies und die erforderlichen Rückspülungen führen zu einem höheren Energiebedarf als bei anderen Festbettverfahren. Der Platzbedarf ist im Gegensatz zu herkömmlichen Belebtschlammverfahren geringer, jedoch die Baukosten deutlich höher.

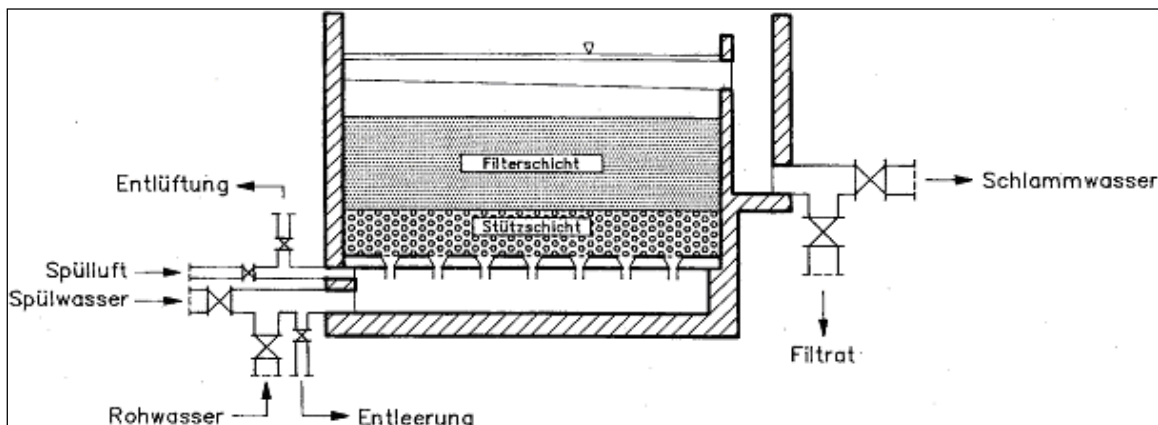


Abbildung 3: Grundprinzip aufwärts durchströmter Filter für Durchlaufspülung (Quelle: ATV-A 203 Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung)

Biofilteranlagen werden nach der Flächenbelastung bemessen, also welche Abwassermenge auf die aktive Oberfläche trifft. Der erforderliche Lufteintrag berechnet sich über den Sauerstoffbedarf der abzubauenen Abwasserinhaltsstoffe. Eine Filterspülung muss in zeitlich regelmäßigen Abständen erfolgen, um einer Verstopfung vorzubeugen.

#### 4.3.6 UASB-Reaktoren

Anaerobe Verfahren beinhalten jede Abwasserreinigung, die unter Ausschluss von Sauerstoff erfolgt. Dies hat den Vorteil gegenüber der aeroben Reinigung, dass die energie- und kostenintensive Versorgung der aeroben Bakterien mit Sauerstoff unterbleiben kann. Libhaber (2007) fordert sogar dazu auf, in Entwicklungsländern von der Verwendung jeglicher Technologie mit aeroben Prozessen Abstand zu nehmen.

Als Vertreter für anaerobe Abwasserreinigungsverfahren wird hier aufgrund seiner weltweiten Verbreitung der sogenannte Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) - Reaktor betrachtet. Das Verfahren eignet sich für Abwasserströme mit hohen Kohlenstoffkonzentrationen und wird für die Reinigung von kommunalen und industriellen Abwasserströmen eingesetzt.

UASB-Reaktoren dienen hauptsächlich zur Kohlenstoffelimination. Die meist biologisch schwer abbaubaren Reststoffe im Ablauf können in einer nachgeschalteten biologischen Reinigungsstufe weiterbehandelt werden. Nährstoffe wie Stickstoff oder Phosphor werden in einem UASB-Reaktor nur geringfügig abgebaut. Durch den hohen Anteil von Nährstoffen im Ablauf des UASB-Reaktors kann das gereinigte Abwasser Düngungszwecken zugeführt werden. Bei Wiederverwen-

Abwasser muss jedoch eine Desinfektionsstufe passieren, da ein Keimabbau im UASB-Reaktor nicht ausreichend stattfindet.

Unter anaerober Abwasserreinigung versteht man den Abbau von den im Abwasser enthaltenen Schmutzstoffen unter Ausschluss von Sauerstoff. In der so genannten Vergärung mit den Teilschritten Hydrolyse, saure Gärung, Acetogenese und Methanogenese werden Kohlenhydrate, Proteine und Fette hauptsächlich in Kohlendioxid, Wasser und Methan umgesetzt. Auf die einzelnen Teilschritte wird hier nicht eingegangen, es verbleibt jedoch der Hinweis auf die Sensitivität von Methanbakterien insbesondere auf Änderungen gegenüber pH- und Temperaturschwankungen.

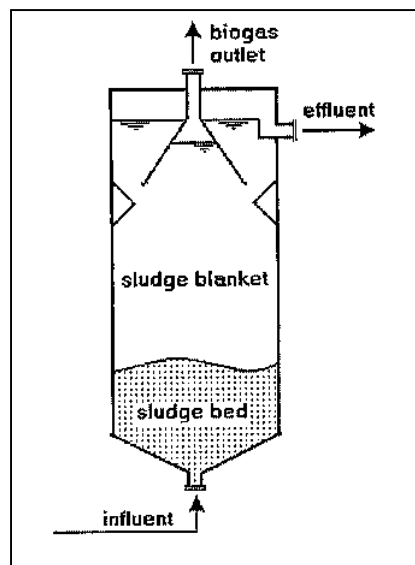


Abbildung 4: Schematische Darstellung UASB-Reaktor (Quelle: von Sperling und Chernicharo, 2005)

Der Abwasserstrom wird von unten in den Behälter eingepumpt. Er durchströmt zunächst die Schlammdecke, in der alle für eine anaerobe Reinigung ablaufenden Prozesse ablaufen. Die Schlammkonzentration sinkt demnach von unten bis oben. Es finden alle für den anaeroben Stoffumsatz erforderlichen Teilprozesse in dieser Schlammdecke statt.

Die im Schlamm befindlichen Bakterien bauen hauptsächlich Kohlenstoff ab. Das entstehende Gas wird durch eine entsprechende Konstruktion aufgefangen, abgeführt und kann zu Heiz- oder Stromerzeugungszwecken weiterverwendet werden. Optimal ist eine Gaswäsche, um das Biogas von unerwünschten Komponenten zu reinigen, sowie eine Nachklärung zum Auffangen und Wiederbenutzen der wertvollen Schlammteilchen. Die durch Ausfällung von Karbonaten entstehenden Pel-

lets im Reaktor dienen als Trägermaterial für Bakterien. Für eine Verkürzung der Startphase kann bis zur eigenständigen Bildung von Pellets Impfschlamm aus anderen anaeroben Anlagen in den Reaktor eingetragen werden.

UASB-Reaktoren weisen geringere Kohlenstoffabbauraten auf als herkömmliche Verfahren. Im Allgemeinen wird unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Abbauleistung von 60 bis 70 % des CSB erreicht. Die anaerobe Reinigungsleistung hinsichtlich organischer Bestandteile des Abwassers bei Wassertemperaturen höher als 12 °C ist vergleichbar mit aeroben Verfahren (Libhaber, 2007).

Eine geringere Schlammproduktion und die bessere Eindickungseigenschaft des entstehenden Schlammes führen zu geringeren Schlammentsorgungskosten als bei aeroben Verfahren. Zusätzlich zum geringen Energieverbrauch pro m<sup>3</sup> gereinigtem Abwasser entsteht Biogas, welches zur Wärme- und Stromgewinnung genutzt werden kann, so dass dieses Verfahren einen deutlich besseren energetischen Nutzungsgrad hat als aerobe Verfahren.

Aufgrund des nicht vorhandenen Bemessungsvorschlags in der deutschen DWA wird hier näher auf einen Bemessungsvorschlag für einen UASB-Reaktor eingegangen. Der wichtigste Parameter ist die Raumbelastung, die abhängig vom partikulären Anteil des CSB und der Reaktionstemperatur ist. Metcalf und Eddy (2003) schlagen für die Raumbelastung B<sub>R</sub>-Werte von 2 bis 25 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d) vor, von Sperling und Chernicharo (2005) unter 12 kg CSB/(m<sup>3</sup>·d). Die hydraulische Aufenthaltszeit des Abwassers sollte dabei zwischen acht bis zwölf Stunden betragen. Das nominale Volumen V<sub>n</sub> des Reaktors beträgt:

$$V_n \text{ [m}^3\text{]} = \frac{\text{Schmutzfracht} \left[ \frac{\text{kg CSB}}{\text{d}} \right]}{\text{Raumbelastung} \left[ \frac{\text{kg CSB}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right]}$$

Der Anteil des Volumens, welches durch das Schlammbett eingenommen wird, wird durch einen Effektivitätsfaktor berücksichtigt. Demnach ermittelt sich das effektive Volumen der flüssigen Phase V<sub>l</sub> nach folgender Formel:

$$V_l \text{ [m}^3\text{]} = \frac{V_n \text{ [m}^3\text{]}}{\text{Effektivitätsfaktor} [-]}$$

Die Grundfläche des Reaktors bestimmt sich aus der Abwassermenge und der Auftriebsgeschwindigkeit. Die Auftriebsgeschwindigkeit  $v$  ist abhängig von der Abwasserzusammensetzung (Anteil von gelösten und partikulären Stoffen) im Bereich von 0,8 und 3,0 m/h zu wählen. Je kleiner der partikuläre Anteil ist, desto höher muss die Auftriebsgeschwindigkeit sein.

$$A \text{ [m}^2\text{]} = \frac{Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{v \left[ \frac{\text{m}}{\text{h}} \right]}$$

Die Höhe des flüssigen Teils des Reaktors bestimmt sich aus dem berechneten effektiven Volumen  $V_1$  und der Querschnittsfläche  $A$ . Für die Gasspeicherung wird eine Höhe von 2,5 bis 3,0 m addiert. Die Gasspeicherhöhe hängt vor allem vom täglichen Gasanfall und der Produktivität der Methanbakterien ab.

Im Gegensatz zu anaeroben Abwasserteichen, aus denen das entstehende Biogas in die Atmosphäre entweicht, sind UASB-Reaktoren nur dann klimaschädlich, wenn das entstehende Biogas nicht aufgefangen und verbraucht bzw. entsorgt wird.

Das Temperaturoptimum des anaeroben Abbauprozesses liegt im mesophilen und thermophilen Temperaturbereich. Anaerobe Reinigungsverfahren sind vor allem dann geeignet, wenn kein großer Energieaufwand betrieben werden muss, um den Zulauf auf eine entsprechende Temperatur zu erhitzen. UASB-Reaktoren sind daher zurzeit vor allem in warmen Klimaten, insbesondere in Südamerika, anzutreffen.

Erhöhte Aufmerksamkeit aufgrund der Auswirkungen auf die Bemessung sollten folgenden Aspekten zukommen:

- Abwasserinhaltsstoffe (Beeinträchtigung der Pelletbildung, Förderung von Schaumbildung, Sulfatreduktion als Konkurrenzreaktion zur Methanogenese),
- Konstruktion (Bauweise des Reaktors, Gestaltung des Abwassereinlaufs, des Gassammlers und des Ablaufs).

Reinigungsunterbrechungen können bei Schwankungen der Zuflussmenge, der Zuflusskonzentrationen (Änderungen der Abwasserzusammensetzung), des pH-Wertes oder der Temperatur auftreten.



Die einfache Betriebsführung und leichte Bedienbarkeit, der geringere Verschleiß von mechanischen Teilen, die doppelte Wirksamkeit gegenüber herkömmlichen primären Absetzbecken und die geringeren Konstruktions-, Betriebs- und Wartungskosten sprechen für einen Einsatz vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern warmer Klimate.

Insgesamt kann ein UASB-Reaktor als eine Low-Cost-Lösung angesehen werden. Der Energiebedarf ist aufgrund des nicht vorhandenen Belüftungserfordernisses geringer als bei aeroben Verfahren.

Die Betriebskosten liegen beim Vergleich mit anderen Verfahren im mittleren Bereich. Die Verfahrenstechnik besteht aus keinen bewegten Teilen (außer Zulauf- und evtl. Rezirkulationspumpen). Es ist keine Nachklärung, jedoch eine Vorbehandlung zur Entfernung von Störstoffen wie z. B. Sand und Grobstoffen zur Vermeidung von Verstopfungsproblemen erforderlich. Eine geringe Überwachungsanforderung, geringer Grundstücksbedarf, geringer Personalbedarf und eine geringe Wartungsintensität aufgrund geringer Anzahl von elektromechanischen Komponenten sowie kein erforderlicher Einsatz von Chemie außerhalb der Analysen stehen jedoch der Erfordernis von ausreichend qualifiziertem Personal, welches auch in der Handhabung mit Gas unterrichtet sein muss, gegenüber. Eine gewisse Fällung von Schwermetallen aufgrund der Entstehung von Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff und der daraus resultierenden pH-Wert-Verschiebung wurde beobachtet. Die Aerosolbelastung ist beim UASB-Reaktor geringer als bei z. B. Belebungsverfahren, jedoch besteht eine geringfügige  $H_2S$ -Oberflächendiffusion, die zu Luftverunreinigungen führen kann. Eine Abluftbehandlung aber ist nicht erforderlich.

Der Überschussschlamm von UASB-Reaktoren kann als weitgehend stabilisiert angesehen werden, die Produktion wird nach von Sperling und Chernicharo (2005) auf 10 bis 15 l/(EW·a) bei 0,05 bis 0,3  $g_{Organik}/g_{CSB_{abgebaut}}$  angegeben.

Das beim anaeroben Verfahren entstehende Biogas kann mit oder ohne Aufbereitung (Reduktion von Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff usw.) in ein Leitungsnetz eingespeist oder in Gasflaschen abgefüllt und weiterverwendet werden. Je höher die Konzentration von  $H_2S$  im Zulauf ist, desto höher ist auch die Gefahr von Geruchs- und Korrosionsproblemen (Libhaber, 2007).

Die optimale Temperatur von anaeroben Abbauprozessen liegt im mesophilen Bereich zwischen 31 und 37 °C sowie im thermophilen Bereich zwischen 50 und 65 °C. Im thermophilen Temperaturbereich ist jedoch die Schockresistenz redu-

ziert, so dass das Verfahren anfälliger bei Betriebsschwankungen ist. Von einer thermophilen Verfahrensweise ist daher ohne genaue Kontrolle der Zulaufparameter abzuraten. Steigt die Betriebstemperatur im UASB-Reaktor, so ist auch eine Zunahme der Leistung zu verzeichnen.

Die Verschaltung einer anaeroben Komponente mit aeroben Verfahren kann sich als durchaus sinnvoll erweisen, um zunächst erhöhte BSB<sub>5</sub>-Frachten in der anaeroben Stufe zu eliminieren und das Abwasser in der aeroben Stufe nachzubehandeln. In diesem Zusammenhang berichten Platzer und Hoffmann (2008), dass Anaerobreaktoren als alleinige Reinigungsstufe in manchen Ländern (z. B. in Brasilien) nicht genehmigungswürdig sind.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass anaerobe Verfahren allen aeroben Verfahren vor-, zwischen- oder nachgeschaltet werden können. Dabei muss beachtet werden, dass im Ablauf von Anaerobverfahren i. d. R. wenig leicht biologisch abbaubarer Kohlenstoff vorhanden ist, der für eine nachgeschaltete Denitrifikation genutzt werden könnte.

Es muss beim Einsatz von anaeroben Abwasserreinigungsverfahren darauf geachtet werden, dass das gebildete Methan und Kohlendioxid aus Klimaschutzgründen aufgefangen und entsorgt bzw. verwendet wird. Dazu muss das Betriebspersonal qualifiziert für den Umgang mit Gas ausgebildet sein.

Verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von UASB-Reaktoren mit aeroben Verfahren werden in Kapitel 6.3 dargestellt und untersucht.

## **4.4 Chemisch-physikalische Verfahrenskomponenten**

### **4.4.1 Allgemeines**

Unter chemisch-physikalischen Verfahrenskomponenten werden in diesem Kapitel die Abwasserreinigungsmaßnahmen vorgestellt, die mithilfe von chemischen und bzw. oder physikalischen Reaktionen Abwasserinhaltsstoffe eliminieren. Neben Phosphat- und Metallfällung wird kurz auf Desinfektion und Filtration eingegangen.

### **4.4.2 Phosphatfällung**

Der Abbau von Phosphaten kann neben der Elimination durch die Aufnahme von Biomasse und Abzug dieser als Überschussschlamm (Bio-P-Verfahren) auch durch Fällung erfolgen. Mithilfe von Fällmitteln (Eisen, Aluminium, Calcium usw.) können gelöste PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-Ionen gebunden und als Schlamm abgezogen werden. Da-

bei muss darauf geachtet werden, dass eine gute Durchmischung mit dem Abwasser erfolgt, um eine ausreichende Kontaktzeit zu erreichen. Die Fällung kann als Vor-, Simultan- oder Nachfällung erfolgen. Bei hohen Anforderungen hinsichtlich des Phosphor-Einleiterwertes hat es sich bewährt, zusätzlich zu einer biologischen Phosphorelimination eine chemische Phosphatfällung zu bauen, damit der Einleiterwert auch bei Ausfall des Bio-P-Verfahrens oder bei Konzentrationsspitzen gewährleistet werden kann.

#### **4.4.3 Metallfällung**

Unerwünschte oder zu hohe Konzentrationen von Metallen im Abwasser können durch eine pH-Wert-Verschiebung in den basischen Bereich mithilfe von Hydroxiden wie Natronlauge, Kalklauge, Soda usw. behandelt werden. Die gelösten Metalle fällen aus und können als Schlamm abgezogen werden. Eine zu hohe Dosierung von Lauge kann jedoch eine Rücklösung des Metalls verursachen. Nachteilig an diesem Verfahren sind die hohen Betriebsmittelverbräuche, da das Abwasser nach der Ausfällung des Metalls für eine biologische Reinigung in einen geeigneten pH-Bereich gebracht werden muss. Ebenfalls sind die hohen Metallbelastungen des hier anfallenden Tertiärschlammes zu beachten.

#### **4.4.4 Desinfektion**

##### UV-Bestrahlung

Eine Bestrahlung mit UV-Licht zerstört die DNA von biologischen Einheiten und erwirkt damit ein gewisses Absterben von Biomasse. Dies kann für Ablaufwasser zur Keimelimination genutzt werden, wenn es gelingt, das gesamte Abwasser ausreichend lange mit einer ausreichenden Dosis zu bestrahlen.

Eine Trübung des bestrahlten Abwassers kann dazu führen, dass es zu einer nicht ausreichenden UV-Bestrahlung kommt. Daher ist die Desinfektion durch UV-Bestrahlung erst nach einer Trennung von Schlamm und Klarwasser anzuwenden.

##### Chlorung

Zur Chlorung werden u. a. Chlorgas ( $\text{Cl}_2$ ), Hypochlorite ( $\text{NaOCl}$ ,  $\text{Ca(OCl)}_2$ ) und Chlordioxid ( $\text{ClO}_2$ ) eingesetzt. Die Lagerung der Chlorungsmittel findet in verschiedenen Aggregatzuständen statt, wobei es verschiedene Vor- und Nachteile der gasförmigen, flüssigen und festen Lagerung gibt. Vor allem muss auf die Giftigkeit für das Personal und für den Vorfluter, auf die Haltbarkeit und Verfügbarkeit sowie auf die Kosten hingewiesen werden. Bei der Anwendung von Chlor können außerdem unerwünschte Nebenprodukte auftreten.

Die Chlorung desinfiziert das Abwasser, indem Viren und andere Krankheitserreger inaktiviert werden. Da dieses Verfahren teuer ist und daher auf eine große Effizienz geachtet werden muss, wird es meist als letzte Verfahrensstufe gebaut.

### Ozon

Ozon ist ein leichtflüssiges, leichtentzündliches Gas, welches aus Sauerstoff gewonnen wird. Ozon besitzt ein sehr hohes Oxidationspotential und kann daher gut für eine Desinfektion von Abwasser herangezogen werden, weil es Viren und andere Krankheitserreger inaktiviert. Nachteil ist der aufwendige Herstellungs- und Lagerungsprozess, so dass ein Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern genau geprüft werden sollte.

#### **4.4.5 Filtration**

Als Filtration wird das Durchfließen von Abwasser durch eine Filterschicht verstanden. Die Filterschicht kann aus fein- oder grobkörnigen Materialien natürlicher oder künstlicher Herkunft bestehen. Das Abwasser durchfließt das Filtermaterial, die Abwasserinhaltsstoffe werden vom Filtermaterial abgefangen und so dem Abwasserstrom entnommen. Bakterien, die sich auf dem Filtermaterial angesiedelt haben, können durch ihre Aktivität, ähnlich wie bei einem Tropfkörper, zusätzlich einen biologischen Abbau hervorrufen.

Eine Filtration kann keine erhöhte Reinigungsleistung von gelösten Substanzen erzielen. Sie dient ausschließlich zur Reinigung des Abwassers von partikulären Substanzen. Um Verstopfungen vorzubeugen, ist eine Rückspülung der Filter in regelmäßigen zeitlichen Abständen erforderlich.

#### **4.5 Übersicht der Abwasserreinigungstechnologien nach stufenausbaufähigen Komponenten**

In Tabelle 3 werden die grundsätzlich gebräuchlichsten Komponenten kommunaler Abwasserreinigung tabellarisch aufgearbeitet und die Hauptbemessungsgröße dargestellt.

Tabelle 3: Komponenten der kommunalen Abwasserreinigung

Abwasserreinigungs- komponente	Beschreibung	Bemessung
Rechen	Grob-, Sieb- und Feinrechen	Austrag von Grobstoffen
Mineralische Absetzbe- cken	Lang-, hydraulischer und belüfteter Sandfang	Sinkgeschwindigkeit mineralischer Fraktionen
Organische Absetzbecken	Vorklärbecken, Absetz- und Nachklärteich, Lamellenseparatoren	Aufenthaltszeit, Oberflächenbeschickung, Volumenerfahrungswert
Reaktor	Belüftete und unbelüftete Reaktoren	Aufenthaltszeit, Schlammalter, Raumbelastung
Abwasserteiche	Belüfteter Teich, unbelüfteter (anaerober, fakultativer) Teich, Schönungsteich	Raumbelastung, Aufenthaltszeit, Flächenerfahrungswert
Biofilmverfahren	Tropfkörper, (Scheiben-) Tauchkörper, getauchtes Festbettverfahren	Raumbelastung, Flächenbelastung
Algenreaktor	Abwasserreinigung durch Algen	Flächen- bzw. Raumbelastung
Membranbelebung	Einsatz von Membranmodulen	Fluxrate
Pflanzenkläranlage	Bodenfilter	Aufenthaltszeit, Flächenerfahrungswert
Biofilter	Geschlossener aerober Schlammbedreaktor	Flächenbelastung
Anaerober Reaktor	Hier betrachtet: UASB-Reaktor	Raumbelastung
Aufstaubebehälter (SBR)	Alle Abwasserreinigungsvorgänge in einem Behälter	Schlammalter, Raumbelastung, Oberflächenbeschickung
Fällungsreaktor	Phosphorfällung, Metallfällung	Zu fällende Stoffe
Desinfektion	UV-Bestrahlung, Chlorung, Ozonung	Zu desinfizierende Stoffe
Filtration	Filterstufe	Zu filternde Stoffe

## 5 Übersicht über die wichtigsten Verfahren der biologischen Abwasserreinigung

### 5.1 Allgemeines

Im Folgenden wird eine Übersicht über die wichtigsten Verfahren der biologischen Abwasserreinigung gegeben. Die Grundlagen der Verfahren werden beschrieben und übersichtlich auf die Bemessungen eingegangen. Dabei beruhen die Bemessungen auf aktuellen Vorschriften, Merk- oder Arbeitsblättern. Neben Belebungsverfahren werden Festbett- und Naturnahe Abwasserreinigungsverfahren beschrieben.

### 5.2 Belebungsverfahren

#### 5.2.1 Herkömmliches Belebungsverfahren

Als herkömmliches Belebungsverfahren wird die Kombination aus Belebungsbecken mit Belüftungseinrichtung, Nachklärbecken, Rücklaufschlammkreislauf und Überschussschlammabzug bezeichnet. Das Schlammalter wird von der hydraulischen Aufenthaltszeit entkoppelt, so dass auch schwer abbaubare Stoffe umgesetzt werden können. Dabei müssen eine ausreichende Sauerstoffversorgung und eine ausreichende Durchmischung sichergestellt sein. Begrenzend für die maximale Konzentration von Biomasse im Belebungsbecken ist die Trennleistung des Nachklärbeckens.

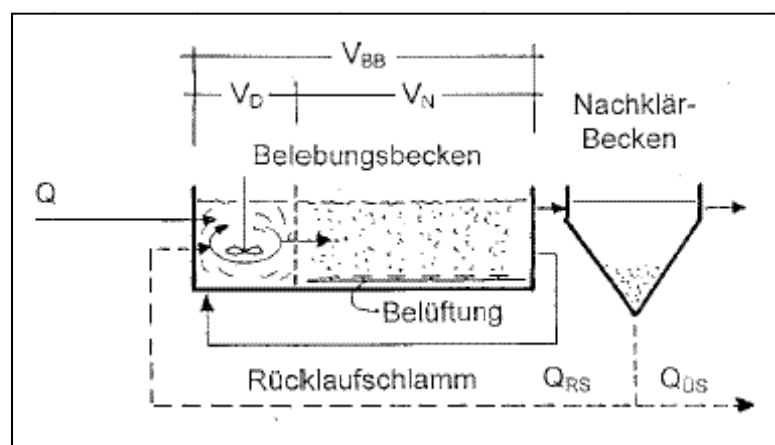


Abbildung 5: Bestandteile des Belebungsverfahrens (Quelle: DWVK-ATV-A 131)

Die Bemessung des Belebungsverfahrens in Deutschland erfolgt nach ATV-DVWK-A 131 oder dem Hochschulgruppenansatz. Das erforderliche Schlammalter für die reine Kohlenstoffreduktion kann auf 4 bis 5 Tage angenommen werden. Ist eine weitergehende Nährstoffelimination in Bezug auf Stickstoff erforderlich, so ist auch das Schlammalter anzupassen. Das für die Nitrifikation benötigte Schlammalter berechnet sich aus der Bemessungstemperatur und der Ausbaugröße der Kläranlage. Wird auch eine Denitrifikation angestrebt, so errechnet sich das Schlammalter aus dem aeroben und anaeroben Schlammalter. Ist zusätzlich eine aerobe Schlammstabilisierung angedacht, so beträgt das Schlammalter mehr als 18 Tage bei einer geringen Schlammbelastung.

Wichtigste Bemessungsparameter für das Volumen des Belebungsbeckens sind neben den Zulauffrachten das erforderliche Schlammalter und die Trockensubstanz im Belebungsbecken.

$$V_{BB} \text{ [m}^3\text{]} = \frac{t_{TS} \text{ [d]} \cdot BSB_5 \left[ \frac{\text{g}}{\text{d}} \right] \cdot \ddot{U}S_{BSB_5} \left[ \frac{\text{kgTS}}{\text{kgBSB}_5} \right]}{TS_{BB} \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]}$$

und

$$t_{TS} = t_{TS, \text{Aerob}} + t_{TS, \text{anoxisch}}$$

mit

$V_{BB}$ : Volumen des Belebungsbeckens,

$t_{TS}$ : Schlammalter,

$BSB_5$ : Fracht an  $BSB_5$ ,

$\ddot{U}S_{BSB_5}$ : Überschussschlammproduktion aus Phosphatfällung und  $BSB_5$ -Abbau,

$TS_{BB}$ : Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken,

$t_{TS, \text{Aerob}}$ : aerobes Schlammalter,

$t_{TS, \text{anoxisch}}$ : anoxisches Schlammalter.

Dabei nimmt man für  $TS_{BB}$  einen Wert zwischen 3 und 5 g/l an. Dieser Wert ist maßgeblich abhängig von der Reinigungswirkung des Nachklärbeckens. Zur Berechnung des Nachklärbeckens wird auf Kapitel 4.2.3 verwiesen.

Es ist sinnvoll, mechanische Absetzbecken vorzuschalten, um prozessstörende Grobstoffe zu eliminieren. Die Beckenformen und -größen bzw. die Aufteilung in Straßen kann variabel gestaltet werden. Belebungsanlagen werden heute oft in Kombination mit biologischer Phosphatelimination und Phosphatfällung gebaut.

Das herkömmliche Belebungsverfahren erfordert aufgrund des starken Mechanisierungsgrades geschultes Personal für den Betrieb. Die hohen Betriebskosten (Belüftungsenergie, Betriebsmittel, Personal etc.) sind ebenfalls Kriterien, die beim Einsatz dieses Verfahrens berücksichtigt werden müssen. Das Problem der Behandlung bzw. Verbringung von Überschussschlamm in Entwicklungsländern ist zu beachten (Platzer und Hoffmann, 2008).

### **5.2.2 Membranbelebungsverfahren**

Das Membranbelebungsverfahren ist eine Weiterentwicklung des Belebungsverfahrens. Statt die Biomasse vom biologisch gereinigten Abwasser in einem Nachklärbecken zu trennen, werden feinporige Membranen in das Belebungsbecken eingehängt oder das Wasser-Schlamm-Gemisch zirkuliert durch ein Membranmodul. Durch einen angelegten Unterdruck wird gereinigtes Abwasser (Permeat) durch die Membrane gesaugt, während der Schlamm zurückbleibt. Durch den Wegfall der Nachklärung und der Schlammrückführung kann ein höherer Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken gehalten werden, so dass dadurch kleinere Beckengrößen erforderlich sind als beim Belebungsverfahren. Die Biomasse besitzt ein höheres Schlammalter, so dass auch schwer abbaubare Stoffe reduziert werden. Der Einsatz von Membranbioreaktoren kann günstige Auswirkungen auf den ISV haben.

Die Reinigungsleistung ist sehr gut, Schmid-Schmieder und Hasselbach (2006) berichten von regelmäßigem Unterschreiten von  $2,2 \text{ mg N}_{\text{ges}}/\text{l}$  im Ablauf, Winkler et al. (2009) berichten von im Vergleich zum Belebungsverfahren ähnlichen Abbauraten für die Leitparameter (CSB, N, P). Die Porendurchmesser der Membrane können so klein (von  $\sim 0,0001$  bis  $1,0 \mu\text{m}$ ) ausgeführt werden, dass selbst Viren zurückgehalten werden können und dadurch eine verstärkte Keimreduktion erfolgt.

In der Umkehrosmose werden gelöste Moleküle oder Ionen im Retentat zurückgehalten, nur Wassermoleküle können die Membran durchstoßen. In der Nanofiltration und der Ultrafiltration werden Makromoleküle oberhalb einer bestimmten Molmasse zurückgehalten, Wassermoleküle und kleinere gelöste Moleküle und Makromoleküle werden durchgelassen. Bei der Mikrofiltration werden Feststoffteil-



chen und Kolloidteilchen oberhalb eines bestimmten Durchmessers zurückgehalten, Wassermoleküle und gelöste Stoffe werden durchgelassen.

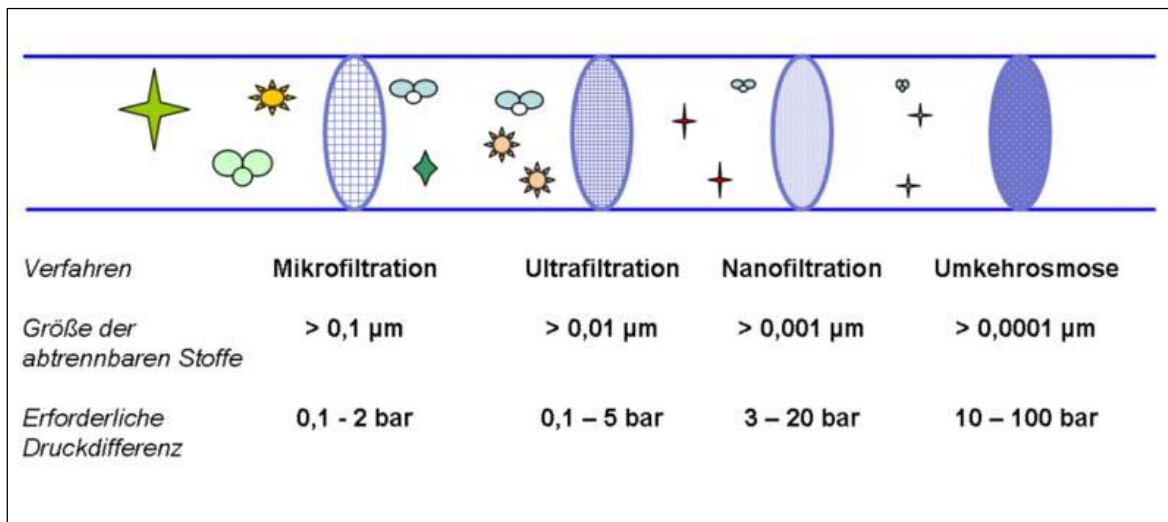


Abbildung 6: Verfahren der Filtration  
(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Membranfiltration>)

Der Trockensubstanzgehalt kann aufgrund der Sauerstoffeintragsrate nicht beliebig hoch gewählt werden, erfahrungsgemäß ist ein TS-Gehalt zwischen 8 und 10 g/l im Allgemeinen am effektivsten. Wichtigster Parameter zur Ermittlung der erforderlichen Membranfläche ist die Fluxrate  $F_w$ . Abhängig vom angelegten Druck, der Porenweite, des Membranmaterials und dem Trockensubstanzgehalt definiert sie die Wassermenge, die pro Quadratmeter Membranfläche und Stunde durch die Membran gesogen werden kann. Die Fluxrate wird meist vom Hersteller der Membran angegeben. Der Durchfluss durch die Membran berechnet sich aus der Fluxrate  $F_w$  und der Membranfläche:

$$Q_p \text{ [m}^3\text{]} = F_w \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] \cdot A \text{ [m}^2\text{]}$$

mit:

$Q_p$ : Permeatmenge,

$F_w$ : Fluxrate,

A: aktive Membranfläche.

Das so genannte Fouling ist der Verstopfungsprozess von kleinsten Partikeln, die sich in den Membranporen festsetzen und einen geringeren Wirkungsgrad bzw. eine mit der Einsatzzeit geringer werdende Fluxrate der Membrane bewirken. Da-

her müssen die Membrane in regelmäßigen Abständen gereinigt werden. Die Reinigung kann mit chemischer Behandlung, Rückspülung oder geeigneter Belüftungstechnik, die ein Fouling erschwert, erfolgen.

Nachteilig an diesem Verfahren sind die hohen Investitions- und Betriebskosten der Membrane, daher wird dieses Verfahren im kommunalen Bereich vor allem dort eingesetzt, wo ein geringes Platzangebot, erhöhte Einleitanforderungen (z. B. Einleitung in ein Badegewässer) oder bei Wiedernutzung des Abwassers geboten ist (Schmid-Schmieder und Hasselbach, 2006). Über die Lebensdauer ist derzeit noch wenig bekannt, jedoch geht man von einer Standzeit von 6-8 Jahren aus (Schmid-Schmieder und Hasselbach, 2006). Das technische Know-how, die richtige Betriebsführung und die richtige technische Wartung müssen vom Betreiber durchgeführt werden können. Auch bei starken Überlastungen sowie bei stark schwankenden Zulaufwerten können starke Schaumbildung in der Belebung, Absterben des Belebtschlammes und die Verblockung der Membranen durch Schleimbildung aufgrund kranker Biomasse oder ungenügendem Abbau der Abwasserinhaltsstoffe auftreten (Winkler et al., 2009).

Insgesamt ist das Membranbelebungsverfahren nicht als Low-Cost-Lösung anzusehen, da sowohl Investitions- als auch Betriebskosten deutlich höher sind als bei anderen Verfahren. Das ökonomische Level und das technische Know-how müssen ebenso wie die richtige Betriebsführung und Wartung der Anlage vorhanden sein. Einsatzfähig ist dieses Verfahren in Gebieten mit hohen Qualitätsanforderungen des gereinigten Abwassers, wo eine Wiederverwendung des Abwassers angestrebt wird, Grundfläche entweder teuer oder nicht vorhanden ist, oder in Ländern mit niedrigen Energiekosten.

Membrananlagen eignen sich auch bei Kapazitätserweiterungen bestehender Anlagen. Zum Rückspülen der Membrane sind umkehrbare Pumpen erforderlich. Ein modularer Aufbau der Membrane und eine damit flexible Anpassung an die jeweiligen Anforderungen ist möglich.

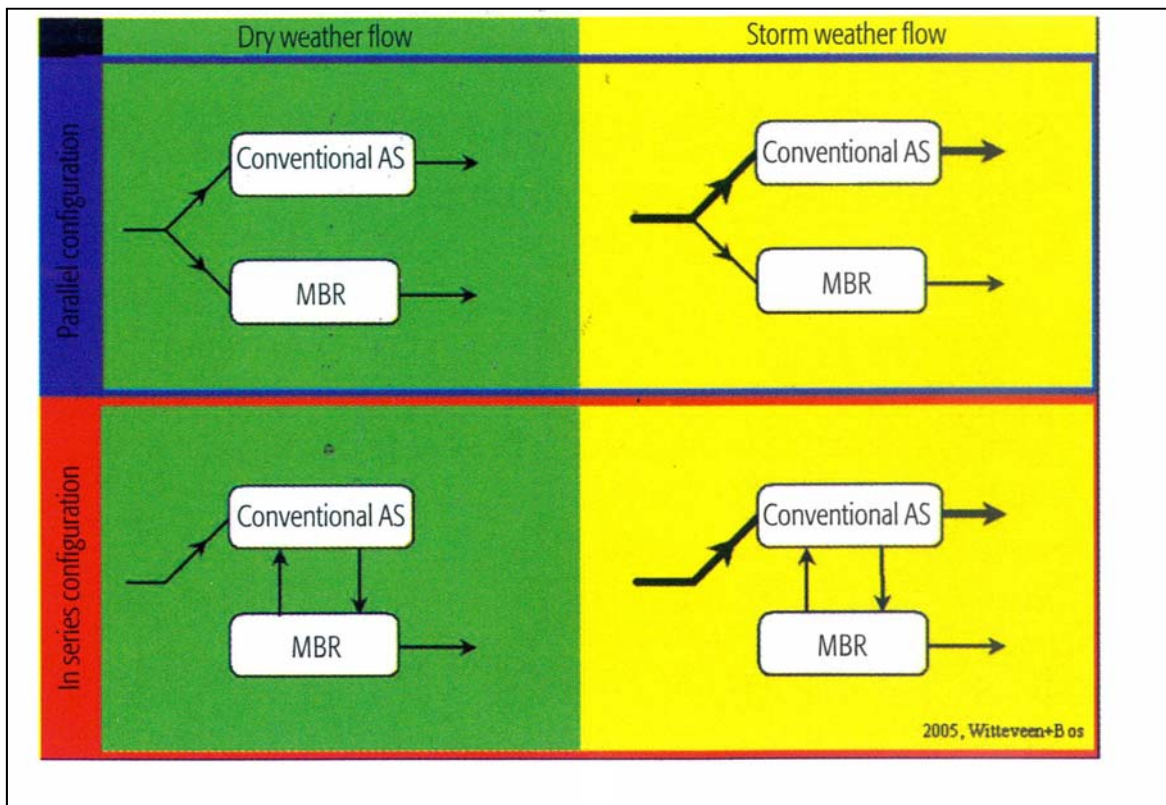


Abbildung 7: Serielle und parallele Anordnung eines Membranbioreaktors (MBR) und einer konventionellen Belebungsanlage bei Trocken- und Regenwetterzufluss (Quelle: Evenblij et al., 2007)

Membranbioreaktoren können in Reihe oder parallel zu bestehenden Belebungsanlagen operieren, dabei kann der TS-Gehalt in der Belebungsanlage abhängig von der Rezirkulationsrate und dem Membrandurchfluss gesteuert werden. Dadurch wird die Nachklärung entlastet sowie eine Steigerung der Reinigungskapazität erreicht. Auf hydraulische Stöße wie z. B. Regenwetterzufluss muss bei der Auslegung der Membrananlage geachtet werden.

### 5.2.3 Aufstauverfahren (SBR)

Als Sonderform des Belebungsverfahrens wird auf das Aufstauverfahren eingegangen. Das Verfahren beruht darauf, dass Abwasser in einen Behälter diskontinuierlich zugegeben wird und alle Abbauvorgänge in diesem Behälter stattfinden. Daher wird dieser in einem sich wiederholenden Zyklus betrieben, der z. B. aus einer Füllungs-, Mischungs-, Belüftungs-, Absetz- und Abzugsphase besteht. Eine gewisse Schlammmenge verbleibt stets im Reaktor, um das Schlammalter von der hydraulischen Verweilzeit des Abwassers zu entkoppeln.

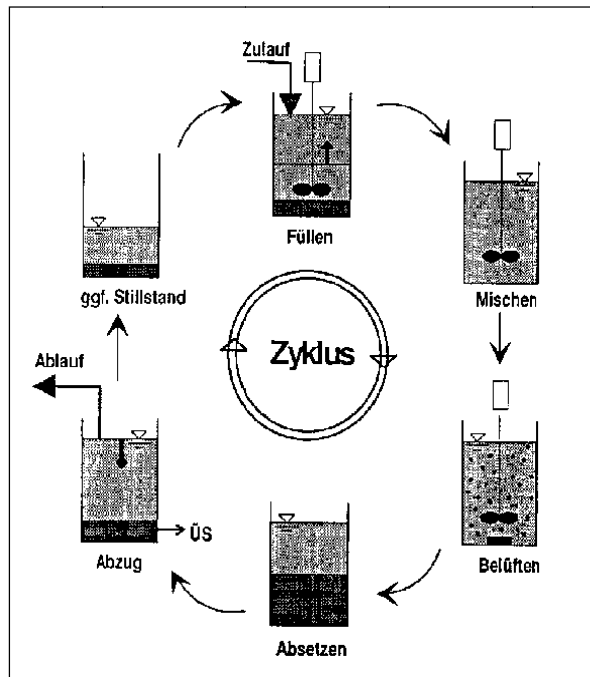


Abbildung 8: Fließbild für eine Belebungsanlage mit Aufstaubetrieb vom Typ „kontinuierliche Beschickung“, dargestellt ist eines von ggf. mehreren Aufstau-becken (nach ATV-M 210 Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb)

Aufstauanlagen werden analog zum herkömmlichen Belebungsverfahren bemessen. Aufgrund der verfahrenstechnisch erforderlichen Stillstands-, Ruhe- und Absetzzeiten erfolgt ein Aufschlag auf das erforderliche Belebungsvolumen. Um Engpässe in der Beschickung zu vermeiden, werden meist mehrere Aufstauanlagen parallel betrieben, evtl. ist auch ein Speicherbecken vorgeschaltet.

Vorteile des Verfahrens sind die im Vergleich zum herkömmlichen Belebungsverfahren höheren Wirkungsgrade in der Sedimentationsphase, da sich der Schlamm im völlig ruhigen Wasserkörper absetzen kann. Alle Nährstoffabbauvorgänge finden in einem Behälter statt, und es kann auf eine Nachklärung verzichtet werden. Es müssen jedoch alle Reaktoren mit einer Belüftungseinrichtung versehen werden. Ein sicherer Betrieb und zeitweise höhere Substratumsatzraten als bei der herkömmlichen Belebung steht der erforderliche Bau von Speicherbecken gegenüber, um einen schwankenden Zulauf abzufangen.

Aufstauanlagen erfordern einen hohen technischen Ausrüstungsgrad. Neben dem Erfordernis einer messtechnischen, elektrotechnischen und steuertechnischen Ausrüstung ist auch das Qualifikationserfordernis des Bedienpersonals als hoch einzuschätzen.

## **5.3 Festbettverfahren**

### **5.3.1 Allgemeines**

Zu Festbettverfahren werden alle Verfahren gezählt, die eine sessile Biomasse besitzen. Dies bedeutet, dass die Bakterien auf einer festen Aufwuchsfläche wachsen und nicht im Abwasser suspendiert sind. Vertreter dieser Gruppe sind Tropf-, (Scheiben-)Tauchkörper und getauchte Festbetten.

### **5.3.2 Tropfkörper**

Das Abwasser wird beim Tropfkörper oberhalb der Aufwuchsflächen meist mithilfe eines Drehsprengers aufgebracht, rieselt über die Aufwuchskörper aufgrund der natürlichen Schwerkraft nach unten und wird dort abgezogen. Als Aufwuchsflächen werden meist Steinbrocken oder Kunststoffelemente verwendet.

Die Bemessung von Tropfkörpern erfolgt nach der Raumbelastung. Eine Unterteilung ergibt sich nach dem Reinigungsziel. Ist ausschließlich Kohlenstoffabbau vorgesehen, so können mit Raumbelastungen unter  $0,5 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  Abbauquoten über 90 % erreicht werden. Ist das Reinigungsziel Kohlenstoffabbau und Nitrifikation, so sollen Raumbelastungen unter  $0,3 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  angestrebt werden, da eine Nitrifikation des Abwassers im Biofilm erst stattfindet, nachdem der Kohlenstoff weitgehend abgebaut ist. Das jeweilig benötigte Volumen berechnet sich aus den erforderlichen Volumina für Kohlenstoffabbau und Nitrifikation.

Als Füllelemente eignen sich Stoffe mit hohen spezifischen Oberflächen. Mineralische Füllelemente (Lavabrocken, Schotter) sind gegenüber künstlichen (Kunststoffe) dann kostengünstiger, wenn sie regional gewonnen werden können. Kunststoffe können dagegen sehr viel höhere spezifische Oberflächen besitzen.

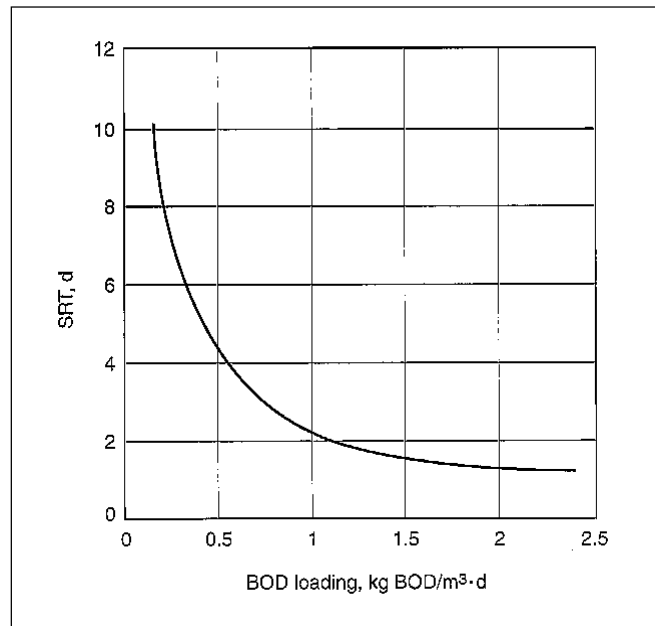


Abbildung 9: Äquivalentes Schlammalter als Funktion der Raumbelastung in Tropfkörpern (Quelle: WEF, 2000)

Abbildung 9 zeigt eine Studie der Water Environment Federation aus dem Jahr 2000, in der das äquivalente Schlammalter in Abhängigkeit der gewählten Raumbelastung berechnet wurde. Erkennbar ist, dass mit einer geringen Raumbelastung ein hohes Schlammalter erreicht werden kann. Nimmt die Raumbelastung zu, so verringert sich äquivalent das Schlammalter. Erst bei der Wahl einer geringen Raumbelastung unter  $0,3 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  ist das Schlammalter groß genug, dass es auch zu einer Nitrifikation kommen kann.

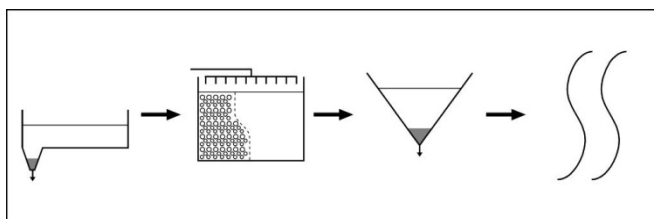


Abbildung 10: Tropfkörperverfahren

Ammoniumspitzen sind u. a. durch den Aufraß des Biofilms durch die Larven der Tropfkörperfliege möglich. Ein vorgeschaltetes und nachgeschaltetes Absetzbecken zur Vermeidung von Verstopfungen des Tropfkörpers und zur Beseitigung abgespülten Bewuchses sind erforderlich. Eine kontrollierte Denitrifikation kann im Tropfkörper nur schwer realisiert werden. Besser ist es, eine Denitrifikation verfahrenstechnisch in einem vor- oder nachgeschalteten anoxischen Reaktor zu integrieren.

rieren, ggf. mit zusätzlicher Kohlenstoffquelle. Je höher der Tropfkörper ist, desto höher ist auch der Bedarf einer zusätzlichen Belüftung.

Die Reinigungsleistung eines Tropfkörpers ist nicht mit derjenigen des Belebungsverfahrens vergleichbar, denn sowohl der Kohlenstoff- als auch der Stickstoffabbau sind unvollständig. Trotzdem stellen Tropfkörper eine Low-Cost-Möglichkeit dar, um Abwasser grob zu reinigen, denn sowohl Investitions- als auch Betriebskosten sind im Vergleich zu anderen Verfahren gering. Die einfache Handhabung setzt kein hochqualifiziertes Personal voraus. Eine hohe Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen geht mit einer hohen Betriebsstabilität einher. Dies kann mit einer Rückführung des Schlammwassers aus der Nachklärung unterstützt werden. Durch die Besiedelung von Bakterien mit langen Generationszeiten, einem hohen Schlammalter entsprechend, können auch schwer abbaubare Stoffe eliminiert werden. Der Platzbedarf kann bei Füllelementen mit hohen spezifischen Oberflächen geringer ausfallen als bei Belebungsverfahren.

### **5.3.3 Tauchkörper**

Tauchkörper, insbesondere der Scheibentauchkörper, werden in den Abwasserstrom bis zu einer gewünschten Tiefe eingetaucht. Die Scheiben dienen als Aufwuchsfläche für Bakterien. Durch die langsame Rotation der Scheiben (z. B. 1 bis 2 Umdrehungen pro Minute) befinden sich die Mikroorganismen abwechselnd im aeroben und anoxischen Milieu. Meist sind mehrere Scheiben hintereinander angeordnet. Es bestehen verschiedenartige Ausführungen der Scheiben in Hinblick auf aktive Oberfläche, selbständige Belüftung bei der Drehbewegung usw. Tauchkörper können in Richtung des Abwasserstroms als auch quer zum Abwasserstrom rotieren. Es ist sinnvoll, mehrere Straßen parallel und hintereinander zu bauen.

Die Hauptbemessungsgröße für Scheibentauchkörper ist die Flächenbelastung. Erfahrungswerte bezeichnen eine Beaufschlagung von weniger als  $10 \text{ g BSB}_5/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  für Kohlenstoffabbau in der 1. Stufe als zweckmäßig. Bei Nitrifikation ist eine Flächenbelastung von kleiner als  $1,5 \text{ g TKN}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  erforderlich, da eine Nitrifikation des Abwassers im Biofilm erst stattfindet, nachdem der Kohlenstoff weitgehend abgebaut ist. Eine Denitrifikation kann mit diesem Verfahren durch ein vollständiges Eintauchen und gleichzeitigem Einhalten aller sonstigen Voraussetzungen realisiert werden.

### 5.3.4 Getauchte Festbetten

Unter getauchte Festbetten sind feststehende Aufwuchskörper zu verstehen, die in einem Reaktor getaucht und belüftet werden. Die Aufwuchskörper bestehen meist aus strukturierten Kunststoff-Materialien mit einem Hohlraumanteil von ca. 85 bis 90 %. Auf diesen Füllstoffen wächst, ähnlich zum Tropfkörper, die sessile Biomasse. Daher werden die getauchten Festbetten auch als „getauchter Tropfkörper“ bezeichnet.

Die Erhöhung der Aufenthaltszeit des Schlammes gegenüber der des Abwassers wird beim getauchten Festbett durch die Immobilisierung der Biomasse auf den Füllkörpern erreicht. Eine Rezirkulation ist daher für getauchte Festbetten unüblich. Die hohe spezifische Biomasse pro Reaktorvolumen führt im Vergleich zu anderen Abwasserreinigungsverfahren zu kompakten Anlagenabmessungen.

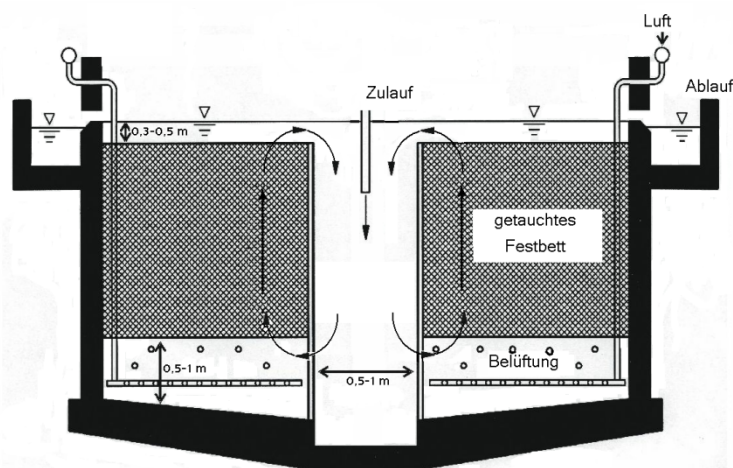


Abbildung 11: Empfohlene konstruktive Anordnung der getauchten Festbetten im Reaktor (Quelle: Köser et al., 2009)

Die Hauptbemessungsgröße für getauchte Festbetten ist die Flächenbelastung. Die erforderliche Fläche berechnet sich aus den Quotienten der erforderlichen Fläche für den Abbau von BSB<sub>5</sub>- und TKN-Belastung und der spezifischen Festbettfläche (in m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), welche für die jeweiligen Füllmaterialien unterschiedlich ausfällt. In Ländern mit wärmeren Klimaten hat die erhöhte Temperatur erheblichen Einfluss auf die biologische Umsatzgeschwindigkeit der Bakterien, daher sind dort höhere Flächenbelastungen, insbesondere für BSB<sub>5</sub>-Abbau, möglich.

Die obligatorischen Belüfter sind flächig unterhalb der Festbetten installiert, um die Sauerstoffzufuhr und Durchmischung zu gewährleisten. Durch die Gasblasen erfährt der Biofilm außerdem eine kontinuierliche Abscherung, und diese überschüs-



sige Biomasse kann mit dem behandelten Abwasser abgeführt und dadurch Verstopfungen vermieden werden. Die relativ langen Verweilzeiten des Abwassers im Festbettreaktor führen dazu, dass getauchte Festbetten auch bei stark schwankenden Belastungen einsetzbar sind.

Getauchte Festbetten sind für verschiedene Anwendungszwecke als vor-, zwischen- und nachgeschaltete Lösungen zur Abwasserreinigung geeignet. Für den Einsatz eines Reaktors mit getauchten Festbetten ist ein Rechen vorzuschalten, um Verstopfungsproblemen vorbeugen. Wie bei einem Tropfkörper ist auch ein nachgeschaltetes Absetzbecken erforderlich, um abgespülten Bewuchs aufzufangen. Dieser setzt sich jedoch im Vergleich zu anderen Festbettverfahren besser ab (Köser et al., 2009), daher sind höhere Flächenbeschickungen der Absetzeinrichtungen möglich.

Die Füllkörper sind meist aus Kunststoff (PE, PP oder PVC) gefertigt, der Füllgrad beträgt ca. 60 bis 80 % des Beckenvolumens. Erfahrungen liegen bei einer Tiefe bis 6 m vor.

Getauchte Festbettreaktoren können einen Stickstoffabbaugrad von bis ca. 50 % erreichen, der Phosphor-Abbau ist dagegen limitiert. Für höhere Eliminationsanforderungen der Nährstoffe sind weitere Maßnahmen wie z. B. Denitrifikationsbecken oder Fällungsbecken erforderlich. Eine regelmäßige Spülung kann einer Verschlammung der getauchten Festbetten vorbeugen. Eine mögliche Schaumbildung kann mit den üblichen Maßnahmen wie Dosierung von Entschäumungsmitteln oder Sprüheinrichtungen bekämpft werden. Konstruktionstipps u. a. zur Vermeidung anaerober Verhältnisse sind in Köser et al. (2009) zu entnehmen.

Insgesamt qualifizieren sich die getauchten Festbetten als geeignetes stufenaufbaufähiges Verfahren, um bestehende Reinigungsanlagen durch Umfunktionierung einzelner Komponenten (z. B. Tropfkörper, belüftetes Becken) zu ertüchtigen. Der Energiebedarf wird mit „mittel“ eingestuft und ist damit vergleichbar mit anderen Verfahren. Es werden keine mechanisch bewegten Teile außer Pumpen, Gebläse und Rechen eingesetzt.

## 5.4 Naturnahe Reinigungsverfahren

### 5.4.1 Teichkläranlagen

Teichkläranlagen bestehen in der Regel aus den in Kapitel 4.3.2 genannten Komponenten. Die Reinigungsleistung von Abwasserteichen kann neben den üblichen Parametern (Kohlenstoff, Nährstoffe) auch die Elimination von pathogenen Keimen und Helminthen (Wurmeiern) umfassen. Allerdings ist die Reinigungsleistung der Leitparameter (CSB, N, P) geringer im Vergleich zu anderen Abwasserreinigungsverfahren. Die Nutzung von in Teichen gereinigtem Abwasser ist aufgrund der Nährstoffkonzentration und der in der Regel geringen Keimbelastung für z. B. Düngungszwecke geeignet.

Die Bemessung einer Teichkläranlage erfolgt über den Parameter  $BSB_5$ . Die produzierte Biomasse bestimmt sich aus der Differenz der  $BSB_5$ -Fracht im Zu- und Ablauf (entspricht dem abgebauten  $BSB_5$ ). Die Trockensubstanz im Ablauf des belüfteten Teiches und der Sauerstoffverbrauch für die  $BSB_5$ -Veratmung können berechnet werden. Die daran anschließende Bemessung der Belüftung ist analog zum Belebungsverfahren durchzuführen. Es ist sinnvoll, Teichkomponenten redundant zu errichten, damit ein Schlammräumen im laufenden Betrieb ermöglicht wird.

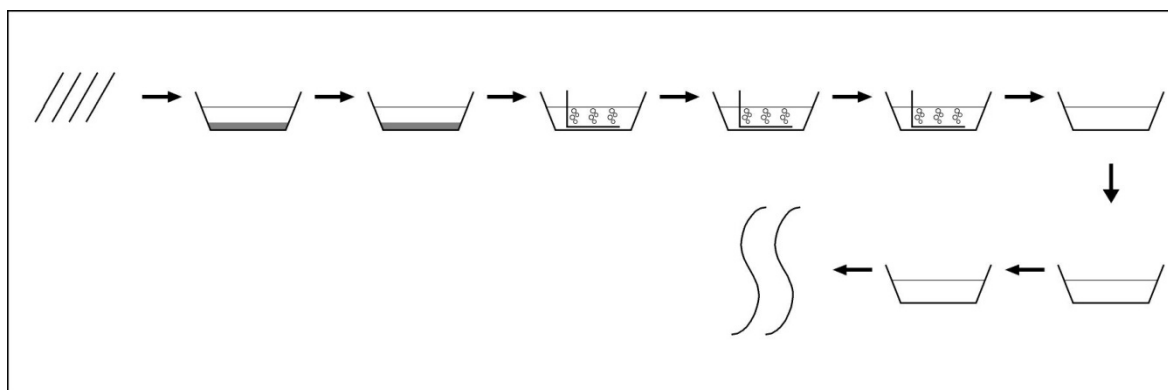


Abbildung 12: Beispiel einer Teichkläranlage

In Abbildung 12 ist eine fiktive Teichkläranlage ohne Rezirkulation dargestellt. Damit entspricht das Schlammalter der hydraulischen Aufenthaltszeit des Abwassers. Das Abwasser durchfließt einen Rechen und zwei Absetzteiche bevor es in drei belüfteten Teichen biologisch gereinigt wird. In den folgenden drei Schöningsteichen wird neben geringen biologischen Abbauprozessen hauptsächlich eine Pufferwirkung gegenüber Fracht- und hydraulischen Spitzen durch das große

Retentionsvolumen sowie die Entfernung pathogener Organismen durch eine erhöhte Aktivität von Algen erzielt.

Neben den in Kapitel 4.3.2 aufgezeigten Nachteilen können bei Teichkläranlagen Algen und Geruchsbildung auftreten. Die Bekämpfung von Algen kann durch eine hydraulische Aufenthaltszeit von zwei Tagen oder weniger, oder durch den Einsatz von geeigneten Filtern aus Sand oder Steinen erfolgen. Geruchsbelästigungen können durch eine genügende Wassertiefe über der Schlammdecke von mindestens einem Meter vermindert werden, da sich die aus dem faulenden Schlamm aufsteigenden Gasblasen im Wasser lösen und abgebaut werden. Teichkläranlagen besitzen einen hohen Flächenbedarf, und die Reinigungsleistung kann nicht gezielt gesteuert werden. Durch jahreszeitliche Einflüsse kann es zu schwankenden Reinigungsleistungen kommen.

Die einfache Betriebsweise erfordert eine geringfügige Infrastruktur, Personalstruktur und -qualifikation. Die Betriebskosten sind im Vergleich zu anderen Abwasserreinigungsverfahren gering. Es ist wenig Anlagentechnik und damit ein geringer Wartungsaufwand erforderlich. Eine naturnahe Einbindung in die Umgebung ist möglich. Somit stellen Teichkläranlagen eine kostengünstige Lösung zur Reinigung von Abwasser dar.

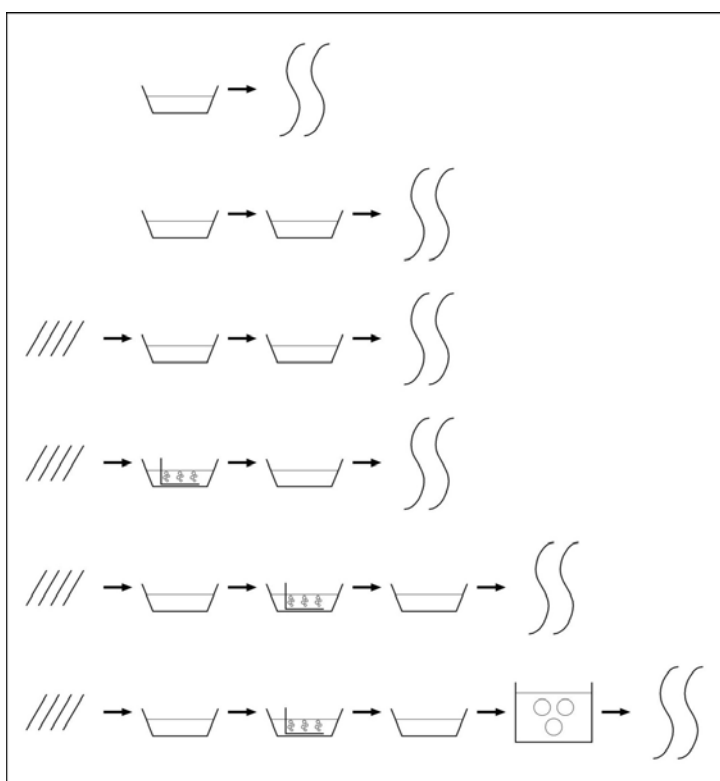


Abbildung 13: Beispiel eines Stufenausbaukonzeptes für Teichkläranlagen

In Abbildung 13 ist ein beispielhaftes Stufenausbaukonzept für Teichkläranlagen dargestellt. Ausgehend von einer einstufigen Abwasserreinigung mithilfe eines unbelüfteten (anaerob oder fakultativ) Teiches ist als 2. Ausbaustufe ein Schöpfungsteich nachgeschaltet. Nach Hinzunahme eines Rechens zur Abscheidung von Grobstoffen kann der unbelüftete Teich als belüfteter Teich umfunktioniert werden oder ein weiterer Teich hinzugefügt werden. Die einzelnen Reinigungsstufen sollten parallel gebaut werden, um Schlammräumungen im laufenden Betrieb zu ermöglichen. Als letzte Ausbaustufe ist eine Desinfektion zur Reduzierung der Keimbelastung dargestellt.

#### 5.4.2 Pflanzenkläranlagen

Pflanzenkläranlagen oder bewachsene Bodenfilter sind Reinigungsanlagen, die in vertikaler oder horizontaler Strömungsrichtung vom Abwasser durchflossen werden. Die Reinigungsleistung von organischen Bestandteilen kann 90 % betragen (z. B. Libhaber, 2007).

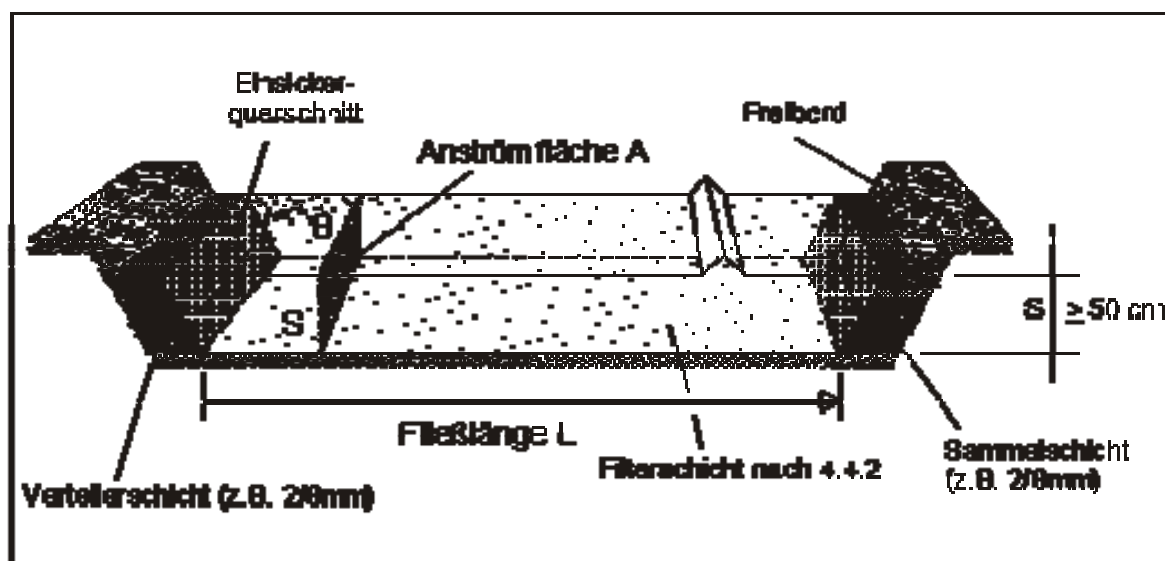


Abbildung 14: Horizontal durchströmter bepflanzter Bodenfilter (Prinzip)  
(Quelle: DWA-A 262, 2006)

Pflanzenkläranlagen werden grundsätzlich für den Kohlenstoffabbau bemessen. Die erforderliche Grundstücksfläche hängt von der Zulaufmenge, der verwendeten Pflanzkultur und der Schmutzfracht ab. Die erforderliche Oberfläche wird mit 4 bis 5 m<sup>2</sup> je angeschlossenem Einwohnergleichwert vorgeschlagen, die Mindestoberfläche sollte 20 m<sup>2</sup> nicht unterschreiten. Die Flächenbelastung orientiert sich stark an den eingesetzten Pflanzen. Die CSB-Flächenbelastung sollte höchstens

16 g CSB pro Quadratmeter und Tag, die hydraulische Flächenbelastung unter 40 mm pro Tag (entspricht 40 l/(m<sup>2</sup>·d)) betragen.

Platzer und Hoffmann (2008) weisen auf ausreichende Flächenansätze hin, damit es zu keiner Überlastung der Pflanzenfilter kommt. Es ist ein geeignetes Filtermaterial zu wählen. Insbesondere im Einlaufbereich besteht eine erhöhte Kolmationsgefahr. Weitergehende Informationen zur Dimensionierung von Pflanzenkläranlagen sind z. B. in WSP (2005) zu finden.

In der Literatur wird die Elimination von Stickstoff über die Nitrifikation bis zu 90 % bezogen auf den TKN bei einer Ammoniumzulaufkonzentration von kleiner als 10 mg/l und bei Temperaturen über 12 °C bezeichnet. Von Sperling und Chernicharo (2005) geben eine Gesamtstickstoffeliminationsrate abhängig von Faktoren wie Pflanzenkultur, Flächenbelastung, Bewegung des Wasserkörpers im Boden usw. zwischen 20 und 30 % an. Libhaber (2007) gibt dagegen eine geringe Nährstoffelimination von 30 % an.

Die Phosphor-Elimination erfolgt über Sedimentation am und Adsorption im Bodenkörper sowie in den Pflanzen. Der TS-Abbau ist sehr effizient, wenn die Fließgeschwindigkeit des Abwassers durch die Pflanzenkläranlage zwischen 0,3 und 3 cm/s beträgt und die abgesunkene Trockensubstanz so als Substrat für den Biofilm dient und von diesem abgebaut werden kann (von Sperling und Chernicharo, 2005). Um den gesamten Phosphor im Abwasser durch Aufnahme in die Pflanzen zu eliminieren, wäre ein erhebliches Wachstum der Pflanzen erforderlich. Um eine sichere Nährstoffelimination zu erreichen, sind weitere Maßnahmen erforderlich. Außerdem erfolgt in Pflanzenkläranlagen keine effiziente Eliminierung von Keimen, so dass bei Bedarf eine Desinfektionsstufe nachgeschaltet werden muss.

Der Bodenfilter muss gut belichtet sein und sich in gut belüfteter Umgebung befinden. Das Abwasser kann Versickern oder Verdunsten, es ist evtl. ein Abfluss für unversickertes Abwasser einzurichten.

Da eine große Verstopfungsgefahr des Filterkörpers besteht, muss mithilfe einer Vorklärung (ggf. auch einem Rechen) eine gewisse Schwebstoff-Reduktion erzielt werden. Ebenso ist eine Grob- und Schwimmstoffentfernung erforderlich, und der Bodenfilter darf nicht mit Schlamm beschickt werden.

Die eingesetzten Filterkörper bestehen aufgrund der Kolmationsgefahr aus einer homogenen Filterlage. Zusätzlich müssen Maßnahmen im Einlauf- und Auslaufbereich, insbesondere in der Verteilung und Sammlung des gereinigten Abwassers,

getroffen werden. Das Filtermaterial sollte aus eng gestuften Korngemischen ohne Anteil bindiger Materialien bestehen.

Das Abwasser muss am höchsten Punkt des Bodenfilters zugegeben werden, damit es der Schwerkraft folgend abfließen und versickern kann. Die Abdichtung erfolgt entsprechend Kapitel 5.4.1. Die Bepflanzung des Bodenfilters kann mit Schilf, Segge, Schwertlilie u. a. erfolgen. Die Pflanzen können kommerziell genutzt werden. Im Allgemeinen sollte für eine Erhöhung der Effizienz die Vegetation regelmäßig abgeerntet werden.

Verfahrenstechnisch kann eine Reihenschaltung mehrerer Pflanzenkläranlagen die Reinigungsleistung erhöhen. Eine Denitrifikation ist grundsätzlich möglich, besonders bei einer Rückführung vom Ablauf in den Zulauf (entspricht einer vorgeschalteten Denitrifikation). Eine geringe Produktion von Sekundärschlamm sowie ein geringer Energieverbrauch sind Vorteile des Systems. Bewachsene Bodenfilter haben vor allem dann eine positive Umweltwirkung, wenn örtlich verfügbare Filtermaterialien eingesetzt werden. Unwirtschaftlich ist dieses Verfahren bei großen Transportwegen der Filtermaterialien.

Durch Geruchsemissionen kann die Geruchsbelästigung hoch sein, somit ist ein großer Abstand der Pflanzenkläranlage zu Wohngebieten erforderlich. Bei der Entsorgung des Filtermaterials können hohe Kosten für die Untersuchung bzgl. der Schadstoffbelastung entstehen. Pflanzenkläranlagen können in einschlägigen Gebieten als Brutstätte von Insekten dienen, dies sollte bei einer Entscheidung für eine Pflanzenkläranlage berücksichtigt werden. Außerdem ist ein hoher Verlust durch Evapotranspiration zu erwarten, dies ist bei evtl. Wiederverwendung des aufbereiteten Abwassers in Wassermangelgebieten zu berücksichtigen.

Da Pflanzenkläranlagen am besten mit einem konstanten Abwasserzufluss funktionieren, ist diese Art der Abwasserreinigung unwirtschaftlich in Gebieten mit starken Regenereignissen. Die kulturelle Akzeptanz dieser Art der Abwasserbehandlung muss in vielen Regionen der Erde Berücksichtigung finden, ebenso wie flaches oder sehr steiles Gelände ungeeignet für den Einsatz von Pflanzenkläranlagen ist.

Insgesamt kann die Abwasserreinigung mit Hilfe einer Pflanzenkläranlage als einfach und kostengünstig bezeichnet werden, da wenig Anlagentechnik und dadurch ein geringer Wartungsaufwand und ein geringer Stromverbrauch erforderlich ist. Eine naturnahe Einbindung in die Umgebung ist durch eine minimale bauliche Beeinflussung bzw. Veränderung der Umwelt möglich. Jedoch ist die Reinigungsleistung

tung einer Pflanzenkläranlage stark klimaabhängig bzw. stark durch jahreszeitliche Einflüsse beeinflusst. Um geeigneten Biofilm aufzubauen, ist meist eine lange Startphase erforderlich. Die Reinigungsleistung kann daher nicht wie bei anderen Reinigungsverfahren gezielt gesteuert werden. Der Flächenbedarf ist im Gegensatz zu anderen Abwasserreinigungsverfahren hoch.

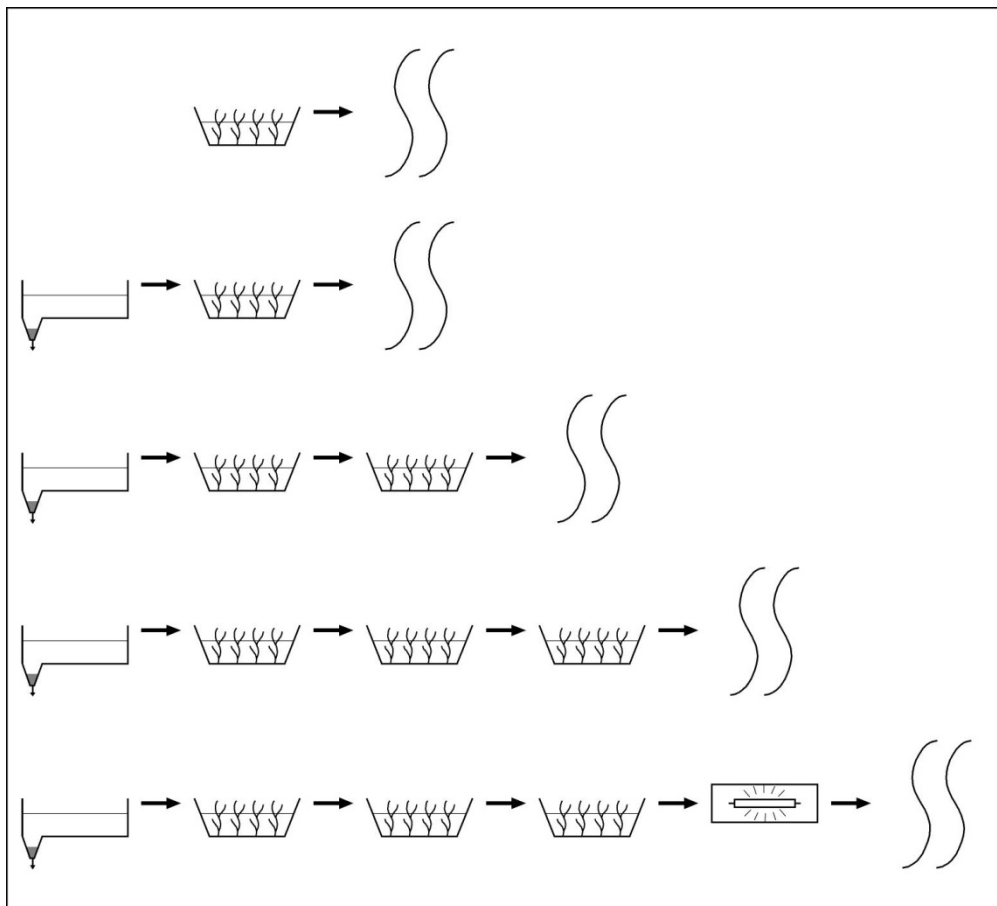


Abbildung 15: Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für eine Pflanzenkläranlage

In Abbildung 15 ist ein beispielhaftes Stufenausbaukonzept für eine Pflanzenkläranlage dargestellt. Ausgehend von einer einstufigen Abwasserreinigung ist die Zuschaltung einer Vorklärung und von weiteren Reinigungsstufen sinnvoll, evtl. mit einer Desinfektion im Ablauf zur Keimreduzierung.

## **6 Verfahrenskombinationen und Stufenausbaukonzepte**

### **6.1 Allgemeines**

In diesem Kapitel werden Kombinationen aus den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Komponenten und Verfahren der Abwasserreinigung untersucht und bewertet. Eine grundsätzliche Aussage, welche Kombinationen technisch und ökonomisch sinnvoll sind und inwiefern sich ein Stufenausbau konzipieren lässt, soll getroffen werden. Dazu werden typische Kombinationen von Verfahren vorgestellt, über die in der Literatur berichtet wird. Vor- und Nachteile werden dargestellt sowie die Anwendbarkeit unter verschiedenen länderspezifischen Aspekten diskutiert.

### **6.2 Betriebsoptimierende Maßnahmen**

Die Erhöhung der Reinigungsleistung von kommunalen Kläranlagen kann durch den Neubau von Anlagenkomponenten oder durch die Optimierung hinsichtlich der betrieblichen Fahrweisen erfolgen. Da es eine Vielzahl von Kläranlagen gibt, die generell überlastet sind und zusätzlich mit ungünstigen Nährstoffverhältnissen und Lastspitzen im Zulauf betrieben werden müssen, stehen in der Regel aufwendige Erweiterungsinvestitionen zur Debatte. Alternativ stehen aber auch moderne Möglichkeiten der Prozesssteuerung zur Verfügung, um die Klärwerkskapazität zu erhöhen, die wesentlich kostengünstiger sind als bauliche Neuinvestitionen. Um deren Leistungsfähigkeit zu ermitteln, können komplexe Simulationsmodelle eingesetzt werden, die dann fallspezifisch an die besonderen Verhältnisse auf dem Klärwerk anzupassen sind.

Betriebsoptimierende Maßnahmen umfassen alle kapazitätssteigernden Maßnahmen außerhalb von baulichen Neuerrichtungen. Beispiele sind die Veränderung des Vorklärvolumens, die Änderung von verfahrensinternen Verbindungsströmen (Rezirkulation, Rücklaufschlamm, ...) usw. Bevor kostenintensive Investitionen getätigt werden, sollte die Optimierung von diesen betrieblichen Maßnahmen geprüft und bewertet werden.



## 6.3 Beispiele für Stufenausbaukonzepte

### 6.3.1 Tropfkörper- und Belebungsverfahren

Die Kombination aus Tropfkörper- und Belebungsverfahren besteht aus den Hauptkomponenten Tropfkörper, belüfteter Reaktor und Nachklärbecken (Abbildung 16). Dieses Verfahren ist insbesondere für Abwässer mit hohem Kohlenstoffanteil bzw. für eine Kapazitätssteigerung einer Abwasserreinigungsanlage hinsichtlich Kohlenstoffelimination geeignet. Der Abfluss aus dem Tropfkörper fließt in ein belüftetes Becken. Der Schlamm aus der Nachklärung wird in einem Rücklaufschlammkreislauf zurück in das Belebungsbecken gepumpt, um die Aufenthaltszeit des biologisch aktiven Schlammes von der des Abwassers zu entkoppeln. Der Überschussschlamm wird abgezogen und entsorgt.

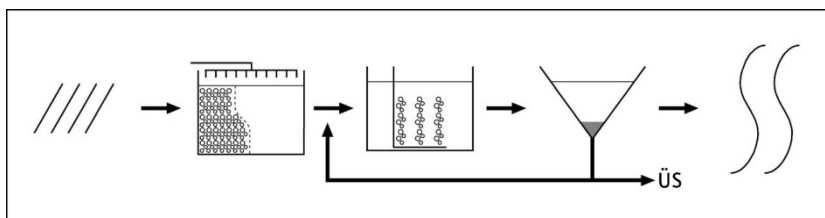


Abbildung 16: Kombination aus Tropfkörper- und Belebungsverfahren

Der Vorteil eines Verfahrens mit vorgeschalteten Tropfkörpern gegenüber einem herkömmlichen Belebungsverfahren ist eine geringere Aufenthaltszeit des Abwassers im belüfteten Becken. Dadurch können Investitions- und Betriebskosten im Hinblick auf kleinere Becken und weniger Belüftung eingespart werden. Wird im Belebungsbecken ein Schlammalter gewählt, das eine Nitrifikation zulässt, so kann diese durch den weitgehend abgebauten Kohlenstoff im Belebungsbecken ablaufen.

Bei diesem Verfahren liegt eine Schwerpunktbildung der Abwasserreinigung hinsichtlich der Parameter, die in den Reinigungsstufen eliminiert werden, vor. Grundsätzlich können in beiden Verfahrensstufen eine Kohlenstoffveratmung sowie eine Nitrifikation erfolgen. In dieser Kombination ist es jedoch sinnvoll, im Tropfkörper vorwiegend Kohlenstoff abzubauen. Im Belebungsbecken kann dann der restliche Kohlenstoff abgebaut und die Nitrifikation des Abwassers erfolgen. In der angloamerikanischen Literatur ist diese Kombination als TF/SC (Trickling Filter/Solid Contact) -Verfahren mit geringer Raumbelastung und geringem Schlammalter, oder auch RF/AS (Roughing Filter/Activated Sludge) -Verfahren mit höherer Raumbelastung und höherem Schlammalter bekannt. Im Allgemeinen

kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verfahren Schlämme mit guten Absetzeigenschaften produziert, da viel gelöster BSB<sub>5</sub> im Tropfkörper abgebaut wird und er so als biologischer Selektor fungiert. Als Variante kann durch die Wahl einer geringen Raumbelastung im Tropfkörper auch eine Nitrifikation stattfinden.

Die Bemessung dieser Verfahrenskombination gestaltet sich in Abhängigkeit von der Wirksamkeit des Tropfkörpers. Der Sauerstoffverbrauch orientiert sich am BSB<sub>5</sub>-Abbau im Tropfkörper. Folgender Bemessungsvorschlag ist Metcalf und Eddy (2003) entnommen:

1. Bemessung des Tropfkörpers mittels Raumbelastung.
2. Ermittlung des Abbaus der gelösten und partikulären Anteile des Abwassers im Tropfkörper.
3. Äquivalentes Schlammalter im Tropfkörper über die gewählte Raumbelastung aus Kapitel 5.3.2 und daraus die Produktion von Biomasse ermitteln.
4. Ermittlung des Sauerstoffs, der im Tropfkörper verbraucht wurde.
5. Ist das Schlammalter größer oder gleich zehn Tage, so kann davon ausgegangen werden, dass der restliche BSB<sub>5</sub> im belüfteten Becken abgebaut wird. Ist das Schlammalter kleiner zehn Tage, so kann mit folgender Grafik der Abbau des gelösten BSB<sub>5</sub> abgeschätzt werden:

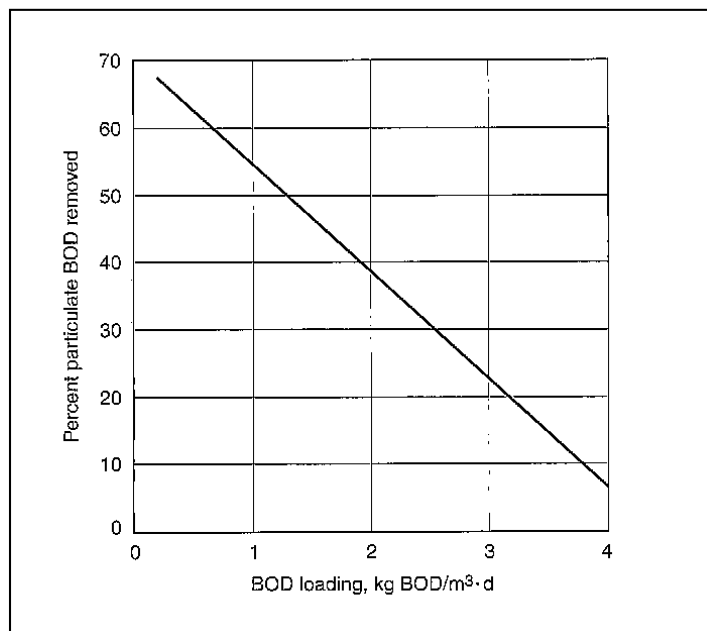


Abbildung 17: Abschätzung des abgebauten partikulären BSB<sub>5</sub> im Tropfkörper in Abhängigkeit der Raumbelastung (Quelle: Bogus, 1989)

6. Aus dem Abbau des  $BSB_5$  kann die Biomassenproduktion im belüfteten Becken ermittelt werden.
7. Aus der ermittelten gesamtanfallenden Biomasse kann eine  $BSB_5$ -Massenbilanz aufgestellt werden, um den gesamten Sauerstoffbedarf zu berechnen. Subtrahiert man den Sauerstoffverbrauch im Tropfkörper, so erhält man den Sauerstoffbedarf in der Belebung. Dieser wird mit einem Sicherheitsfaktor zur Abdeckung von Frachtspitzen multipliziert.
8. Aus der Summe der Schlammproduktion, dem Schlammalter und der gewählten Trockensubstanz kann das Volumen des Belebungsbeckens ermittelt werden.
9. Bemessung der Nachklärung siehe Kapitel 4.2.3.

Als interessante Variation dieser Verfahrenskombination kann der Rücklaufschlamm auch direkt in den Tropfkörper gepumpt werden. Dieser kann dann als aktivierter Biofilter (ABF) bezeichnet werden. Erfahrungen über Probleme mit der Sauerstoffversorgung bei Steinfüllungen im Tropfkörper bei dieser Kombination weisen auf eine bessere Eignung von Plastikfüllungen. Ein ABF ergibt eine sehr geringe organische Belastung im Ablauf, da auch schwer abbaubare Kohlenstoffverbindungen schon im Tropfkörper reduziert werden können.

Das Tropfkörper-Belebungsverfahren mit Nitrifikation ist kombinierbar mit einer Denitrifikationsstufe, um das anfallende Nitrat zu denitrifizieren. Dabei ist jedoch eine zusätzliche externe Kohlenstoffquelle zu dosieren, da mit einer sehr geringen  $BSB_5$ -Konzentration im Ablauf des belüfteten Beckens zu rechnen ist.

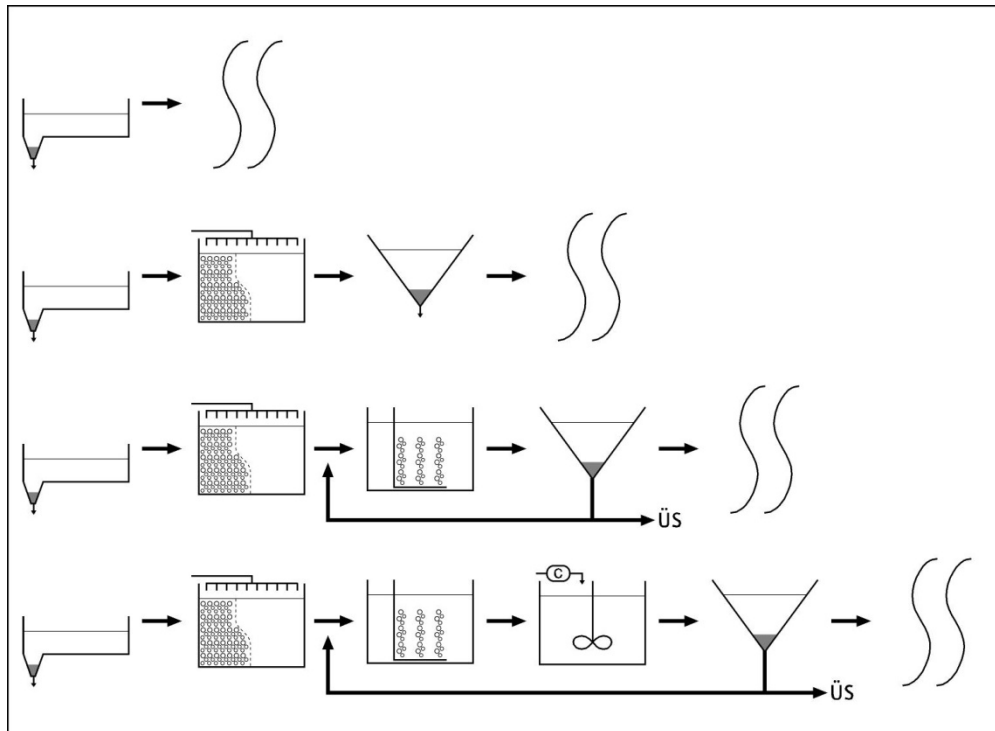


Abbildung 18: Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination von Tropfkörper- und Belebungsverfahren

In Abbildung 18 ist ein beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination von Tropfkörper- und Belebungsverfahren dargestellt. Ausgehend von einer einfachen mechanischen Abwasserreinigung in einem Absetzbecken, kann in einem Tropfkörper die Reinigungsleistung hinsichtlich CSB erhöht und evtl. auch eine Nitrifikation ermöglicht werden. Die vorgeschaltete mechanische Reinigungsstufe dient zur Vermeidung von Verstopfungen im Tropfkörper. Ein nachgeschaltetes Absetzbecken dient zur Beseitigung abgespülten Bewuchses. Als weitergehende Reinigungsstufen sind ein belüfteter Reaktor sowie ein unbelüfteter Reaktor bei einer Schlammrückführung aus dem Nachklärbecken (Belebungsverfahren) dargestellt. Um die Denitrifikation im unbelüfteten Reaktor zu gewährleisten, ist es evtl. erforderlich, eine C-Quelle hinzuzuschalten. Um die Schlammmenge zu reduzieren, jedoch das Schlammalter im belüfteten Becken zu halten, kann ein Absetzbecken zwischen Tropfkörper und belüftetem Becken eingerichtet werden (hier nicht dargestellt).

Ein Tropfkörper kann auch als Erweiterung einer bestehenden Belebung dienen. Insbesondere bei einem Zulauf von Abwasserströmen mit hohen  $BSB_5$ -Konzentrationen kann die Anordnung eines Tropfkörpers vor der Belebung sinnvoll sein.

### **6.3.2 Belebungsverfahren mit Festkörperpackung**

Unter Belebungsverfahren mit Festkörperpackung versteht man die Kombination eines herkömmlichen Belebungsverfahrens und dem Einsatz von Festkörpern oder Füllelementen. Die Festkörper sind dabei in der Belebung fest installiert oder schwimmen auf dem Abwasser auf. Die aktive Biomasse ist sowohl suspendiert im Abwasser als auch sessil auf den Aufwuchsflächen der Füllelemente vorhanden. Durch den Einsatz von Festkörpern ist eine höhere Raumbelastung durch eine höhere Biomassenkonzentration im Belebungsbecken realisierbar. Das Verhältnis von Beckenvolumen zur Schmutzfracht ist im Vergleich zum herkömmlichen Belebungsverfahren geringer und das Verfahren damit unter Umständen wirtschaftlicher.

Der TS-Gehalt in der Belebung wird im herkömmlichen Belebungsverfahren durch die Reinigungsleistung der Nachklärung begrenzt. Der Anteil der Trockensubstanz, der den maximal möglichen TS-Gehalt für die Nachklärung überschreitet, verbleibt beim Einsatz der Festkörperpackung auf dieser und damit im Belebungsbecken. Neben erhöhter Nitrifikation kann auch eine erhöhte Denitrifikation erreicht werden, indem die anoxischen Zonen im Biofilm aktiviert werden (z. B. durch eine intermittierende Druckbelüftung).

Aufgrund der Komplexität der Verfahrenskombination gibt es bisher nur empirische Bemessungstabellen. Es sind jedoch sehr gute Sedimentationseigenschaften bei granuliertem belebtem Schlamm beobachtet worden. Ein höherer Biomassegehalt bis 18 mg/l wurde auf verschiedenen Anlagen erreicht, oberhalb von 18 mg/l kann es verstärkt zu Problemen mit der Sauerstoffversorgung der Biomasse kommen.

Das Absetzverhalten ist beim Einsatz der Festkörperpackung besser als bei herkömmlicher Belebung, daher haben die Nachklärbecken eine höhere Wirksamkeit, was zusätzlich zum Vorteil dieses Verfahrens beiträgt. Das Schlammalter kann hoch gehalten werden, so dass auch schwer abbaubare Substanzen eliminiert werden können. Die Rücklaufschlammmenge ist geringer, und es kommt zu einer stofflichen Entlastung der Nachklärung bei gleichzeitig verbesserten Absetzeigenschaften. Es besteht die Möglichkeit zur Entkopplung von C- und N-Abbau.

Allgemein kann der Einsatz von Festkörpern als optionale Erweiterung für das Belebungsverfahren angesehen werden, um eine höhere Reinigungsleistung ohne große Investitionskosten und erhöhten Platzbedarf zu erreichen. Die Betriebskosten bleiben im Vergleich zum herkömmlichen Belebungsverfahren gleich. Beim

Einsatz dieser Verfahrenskombination ist im Vergleich zum Belebungsverfahren keine erhöhte Personalqualifikation erforderlich. Der Einsatz von Festkörpern im Belebungsverfahren muss jedoch im Einzelfall auf Tauglichkeit hinsichtlich der baulichen und abwasserinhaltlichen Randbedingungen geprüft werden, optimal ist die Untersuchung einer stabilen Prozessführung in Versuchsreaktoren.

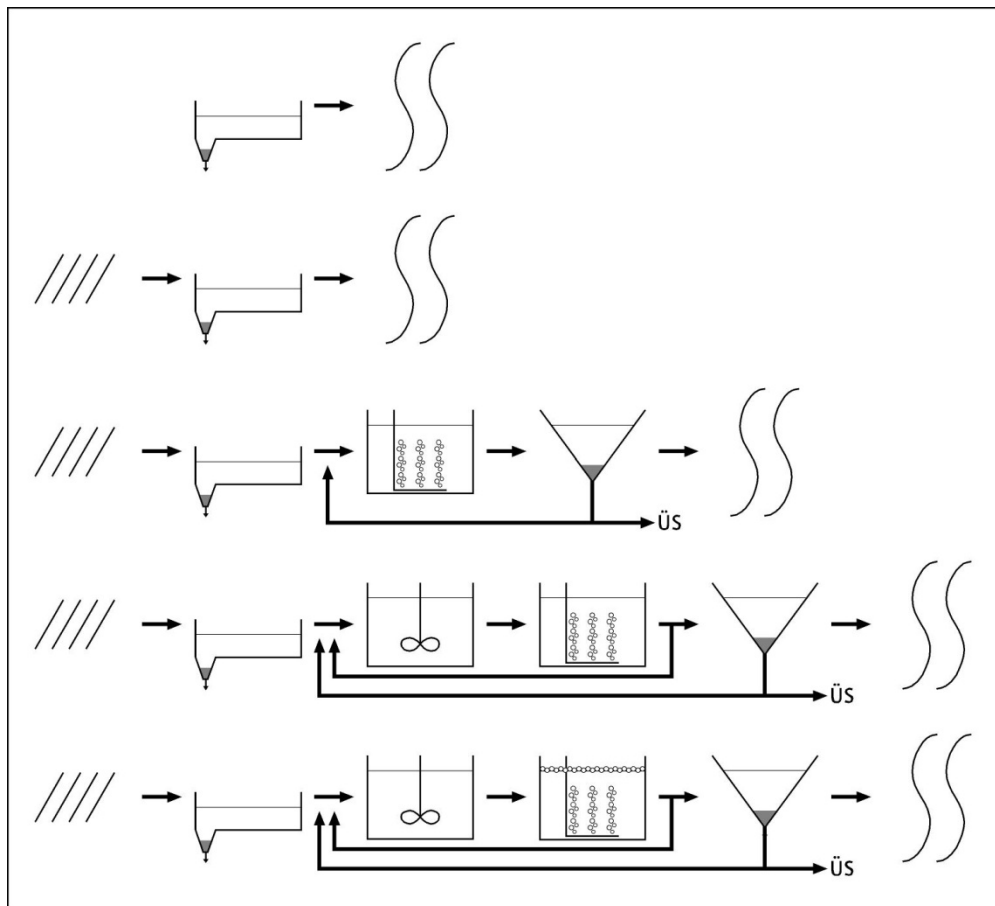


Abbildung 19: Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für das Belebungsverfahren mit Festkörperpackung

In Abbildung 19 ist ein beispielhaftes Stufenausbaukonzept für das Belebungsverfahren mit Festkörperpackung dargestellt. Ausgehend von einer mechanischen Reinigung in einem Vorklärbecken und einem Rechen, wird zunächst ein belüfteter Reaktor (Belebungsbecken) und ein Nachklärbecken mit einem Schlammrücklauf gebaut. Ein vorgeschalteter unbelüfteter Reaktor mit einer Rezirkulation des Abwassers aus dem Ablauf des Belebungsreaktors in den Zulauf des unbelüfteten Reaktors ermöglicht auch die Denitrifikation. Als letzte Reinigungsstufe ist die Erhöhung der Reinigungsleistung durch die Hinzunahme von Festkörpern im belüfteten Reaktor dargestellt.

### 6.3.3 Teichkläranlage mit Tropfkörper

Unter der Verfahrenskombination von Teichkläranlage und Tropfkörper ist die Anordnung eines Tropfkörpers vor, zwischen oder hinter einer Teichkläranlage zu verstehen. Diese Verfahrenskombination zielt neben der Elimination von Kohlenstoff und Nährstoffen in den Teichen auf eine Erhöhung der Reinigungsleistung durch den Einsatz des Tropfkörpers. Ein Rücklauf des Schlammwassers ist sinnvoll, um das erforderliche Schlammalter für eine Nitrifikation in den Teichen und im Tropfkörper zu erreichen. Ein Absetzbecken oder -teich ist dem Tropfkörper vorzuschalten.

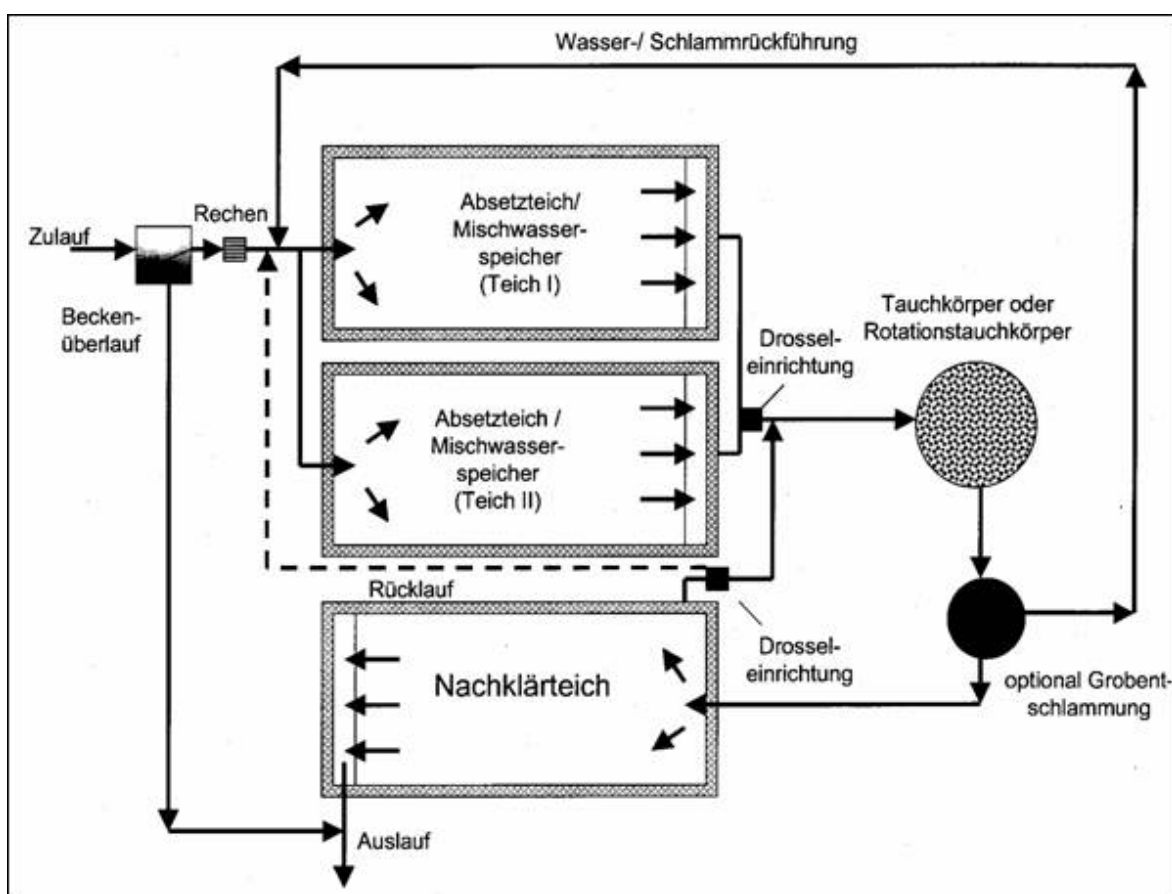


Abbildung 20: Verfahrenskombination Teiche und Tropfkörper (Quelle: DWA- A 201)

Hinter dem Zulaufbecken ist ein Rechen angeordnet. Der Abwasserstrom, aufgeteilt in zwei Straßen, durchfließt zunächst die parallel angeordneten Absetzteiche, bevor es dann in den Tropfkörper gelangt. Hinter dem Tropfkörper folgt eine Wasser- und Schlammrückführung in den Zulaufbereich, um die Geruchsemissionen der Absetzteiche zu minimieren und eine gewisse Denitrifikation zu erzielen. Das Abwasser fließt durch einen Nachklärteich, bevor es zum Auslauf gelangt.

Vorteil des Verfahrens ist die schwerpunktmäßige Ausbildung von Reinigungszielen. Wird in der Teichkläranlage vorwiegend Kohlenstoff eliminiert, erfolgt im Tropfkörper vorwiegend die Nitrifikation des Abwassers.

Die Bemessung der Verfahrenskomponenten erfolgt aufgrund der getrennten Reinigungsziele unabhängig voneinander. Im Tropfkörper ist eine Raumbelastung von kleiner als unter  $0,3 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  einzuhalten, damit das Schlammalter eine Nitrifikation zulässt. Der Tropfkörper kann prinzipiell vor-, zwischen- und nachgeschaltet werden. Sinnvoll ist allerdings eine Zwischenschaltung, um eine ausreichende Absetzvorrichtung vor und hinter dem Tropfkörper zu erhalten.

Die Kombination aus Tropfkörper und Teichkläranlage ist dann sinnvoll, wenn aufgrund begrenzter Platzverhältnisse oder gestiegener Reinigungsanforderungen ein weiterer Ausbau der Teichkläranlage nicht möglich oder nicht sinnvoll ist. Die Investitions- und Betriebskosten sind verhältnismäßig gering im Vergleich zur erhöhten Reinigungsleistung. Das technische Niveau ist bei beiden Komponenten gering, daher eignet sich diese Verfahrenskombination in Entwicklungs- und Schwellenländern. Allerdings ist eine zusätzliche Pumpe für die Beschickung des Tropfkörpers erforderlich.

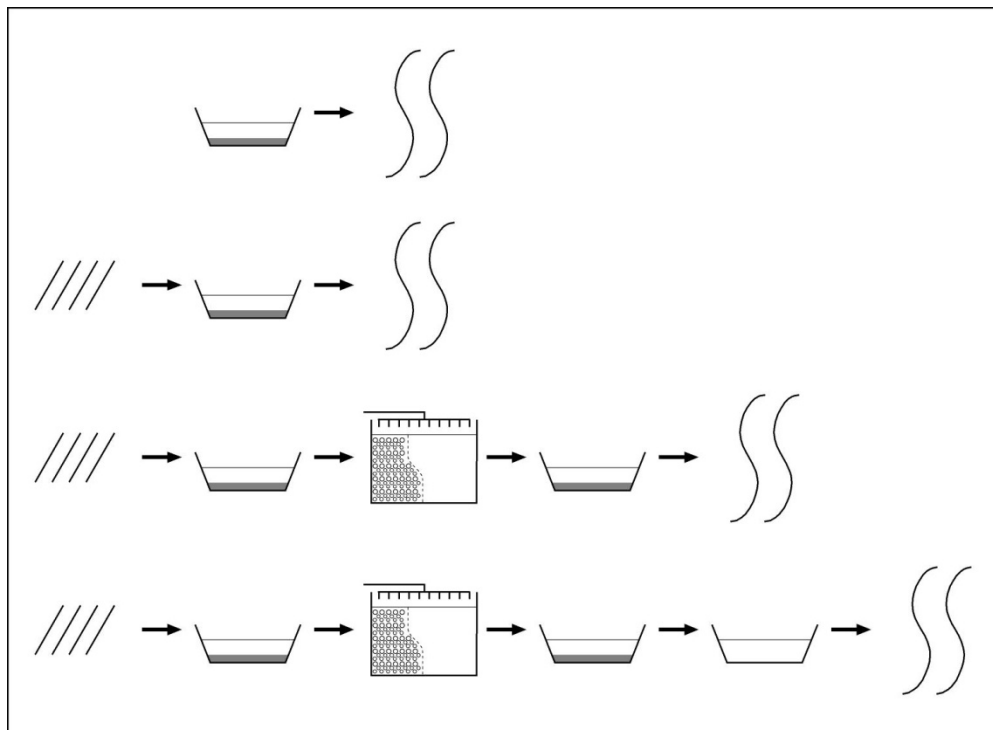


Abbildung 21: Beispielhaftes Stufenbaukonzept für die Kombination aus Teich- und Tropfkörperverfahren



In Abbildung 21 ist ein beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination aus Teich- und Tropfkörperverfahren dargestellt. Ausgehend von einer einfachen mechanischen Abwasserreinigung in einem Absetzteich und einem Rechen, kann in einem Tropfkörper die Reinigungsleistung hinsichtlich CSB erhöht und evtl. auch eine Nitrifikation ermöglicht werden. Die vorgeschalteten mechanischen Reinigungsstufen dienen dabei zur Vermeidung von Verstopfungen im Tropfkörper. Ein nachgeschalteter Absetzteich dient zur Beseitigung abgespülten Bewuchses. Im folgenden Schönungsteich wird neben geringen biologischen Abbauprozessen hauptsächlich eine Pufferwirkung gegenüber Fracht- und hydraulischen Spitzen durch das große Retentionsvolumen sowie die Reduktion pathogener Organismen durch eine erhöhte Aktivität von Algen u. a. über die Anhebung des pH-Wertes erzielt.

#### **6.3.4 Teichkläranlage mit UASB-Reaktor**

Unter der Verfahrenskombination UASB – Teichkläranlage ist die Kombination eines anaeroben Reinigungsverfahrens, hier UASB-Reaktor, mit einer Teichkläranlage zu verstehen. Reinigungsleistungen von UASB-Reaktoren sind hauptsächlich auf die Reduzierung von Kohlenstoff im Abwasser beschränkt. Um die im Abfluss des anaeroben Reaktors hohen Nährstoffkonzentrationen abzubauen, hat sich in den letzten Jahren die Anordnung von Teichkläranlagen als 2. Reinigungsstufe hinter der anaeroben Reinigungsstufe weitgehend durchgesetzt. Dabei wird ein weitergehender Abbau von Kohlenstoff, Nährstoffen sowie pathogenen Keimen erreicht (von Sperling und Chernicharo, 2005). Die Erhöhung der Reinigungsleistung durch den Einsatz eines UASB-Reaktors ist dann sinnvoll, wenn aufgrund begrenzter Platzverhältnisse oder gestiegener Reinigungsanforderungen ein weiterer Ausbau der Teichkläranlage nicht möglich oder die Nutzung des im UASB-Reaktor entstehenden Biogases gewünscht ist.

Eine sinnvolle Anordnung ist die Zwischenschaltung des UASB-Reaktors hinter den Vorklärteichen. Es sollte darauf geachtet werden, dass kaum partikuläre, aber ausreichend gelöste Kohlenstoffverbindungen im Zulauf zum UASB-Reaktor vorhanden sind. In nachgeschalteten belüfteten Teichen und Schönungsteichen kann die Nachreinigung des Abwassers erfolgen.

In Reihe geschaltete Schönungsteiche erfahren eine besondere Bedeutung. Der Abfluss aus dem UASB-Reaktor kann direkt in die Teiche geleitet werden, ohne dass Probleme mit organischer Überlast auftreten (Cavalcanti et al., 2001).

Der Vorteil dieser Verfahrenskombination ist, dass im Abwasser nach dem Durchlaufen des UASB-Reaktors der Kohlenstoff größtenteils abgebaut ist und somit die nachfolgenden Abwasserteiche eine geringe Belastung durch Kohlenstoff erfahren. Die nicht abgebauten Nährstoffe sowie der Rest-CSB im Ablauf der anaeroben Stufe können in den Teichen biologisch abgebaut werden. Der Flächenbedarf ist durch den Einsatz des UASB-Reaktors mit seiner hochaktiven Biomasse im Gegensatz zu einer herkömmlichen Teichkläranlage deutlich geringer. Die in der anaeroben Stufe anfallende Gasmenge kann energetisch genutzt werden. Die Emissionen im Hinblick auf Geruchsbelästigungen sind aufgrund des hohen Abbaugrades von Kohlenstoff im UASB-Reaktor gering.

Nachteile sind einerseits, dass aufgrund des UASB-Reaktors eine Vorbehandlung zur Entfernung von Störstoffen wie z. B. Sand und Grobstoffen erforderlich ist (siehe Kapitel 4.3.6). Der im UASB-Reaktor anfallende Schlamm muss in regelmäßigen Abständen entsorgt werden (im Gegensatz zum Schlamm aus Abwasserteichen, der in der Regel nur in mehrjährigen Abständen geräumt wird).

Der Energiebedarf einer Kombination von UASB-Reaktor und Teichkläranlage ist gering, jedoch ist für den UASB-Reaktor eine Pumpe erforderlich.

Für eine Bemessung wird vorgeschlagen, mit den zu erwartenden Ablaufwerten des UASB-Reaktors die nachgeschalteten Teiche auszulegen. Ist mit erhöhten CSB- oder Ammoniumfrachten zu rechnen, so ist eine Teilbelüftung der Teiche sicherlich sinnvoll. Die Belastung an  $BSB_5$  der Teiche sinkt nach Erfahrungswerten auf ca. 20 bis 40 % des  $BSB_5$  im Rohabwasser ab (von Sperling und Chernicharo, 2005).

Insgesamt qualifiziert sich die Kombination von UASB-Reaktor und Teichkläranlage als kostengünstige und zielführende Alternative zu herkömmlichen biologischen Reinigungsverfahren. Sowohl Investitions- als auch Betriebskosten sind deutlich geringer als beim Belebungsverfahren. Grundsätzlich besteht kein Chemikalienbedarf, da keine Phosphatfällung oder Desinfektion erforderlich ist. Die Anforderung an die Qualifikation des Betriebspersonals ist als gering einzuschätzen. Der Grundstücksbedarf ist als mittel bis hoch einzuschätzen, da der geringe Platzbedarf des UASB-Reaktors durch den hohen Platzbedarf der Teichkläranlage ausgeglichen wird.

Als stufenweiser Ausbau kann der Einsatz von UASB-Reaktor und Teichkläranlage gerade im Hinblick auf die schwerpunktmäßige Abbaukapazität interessant sein, wenn das Gelände (Gefälle) und das Grundstücksdargebot ausreichend sind.

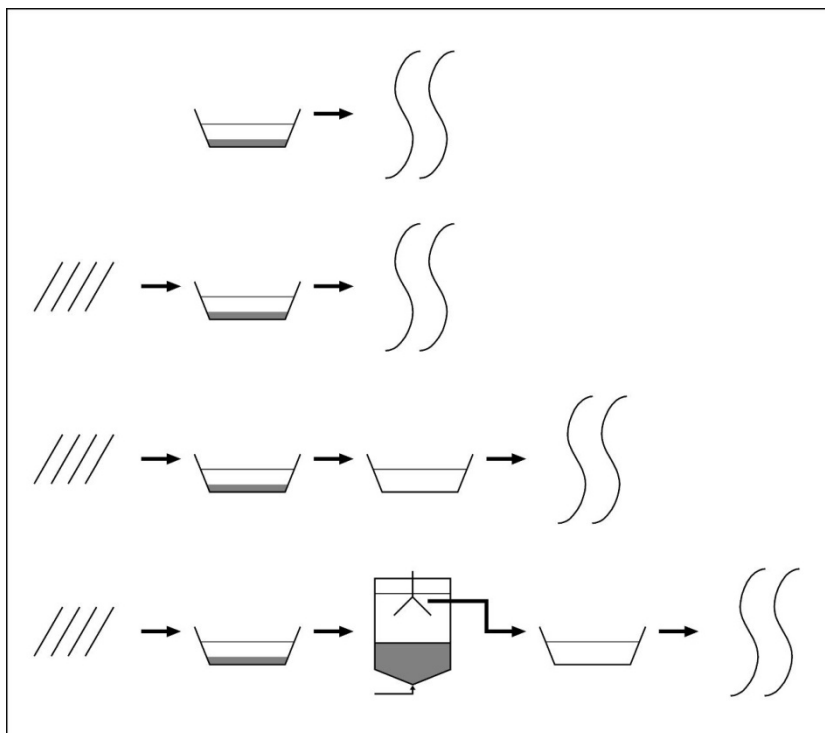


Abbildung 22: Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination aus UASB-Reaktor und Teichklärverfahren

In Abbildung 22 ist ein beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination von Anaerob- und Teichklärverfahren dargestellt. Ausgehend von einer einfachen mechanischen Abwasserreinigung in einem Absetzteich und einem Rechen sowie einem nachgeschalteten Schönungsteich, in dem neben geringen biologischen Abbauprozessen hauptsächlich eine Pufferwirkung gegenüber Fracht- und hydraulischen Spitzen durch das große Retentionsvolumen sowie die Entfernung pathogener Organismen durch eine erhöhte Aktivität von Algen erzielt wird, kann in einem Anaerobreaktor eine erhöhte Reinigungsleistung vorwiegend hinsichtlich CSB erreicht werden. Die vorgeschalteten mechanischen Reinigungsstufen dienen dabei zur Vermeidung von Verstopfungen im Anaerobreaktor. Alle Abwasserteiche sollten parallel ausgeführt werden, um Schlammräumungen im laufenden Betrieb zu ermöglichen.

### 6.3.5 Pflanzenkläranlage mit UASB-Reaktor

Bei der Kombination aus UASB-Reaktor und einer nachgeschalteten Pflanzenkläranlage dient der erstere vorwiegend zum Kohlenstoffabbau, die Pflanzenkläranlage vorwiegend zum Nährstoffabbau.

Die Effizienz bezüglich des Kohlenstoffabbaus in nachgeschalteter Pflanzenkläranlage beträgt normalerweise insgesamt 80 bis 90 % sowie bezüglich der Stickstoffelimination insgesamt 75 bis 90 % (Chernicharo et al., 2001a). Die Phosphor-Eliminationsrate kann bis 89 % betragen, da in der vorgeschalteten anaeroben Reinigungsstufe P in die Biomasse eingebunden wird und eine Elimination im Pflanzenbett stattfindet (von Sperling und Chernicharo, 2005). Ein gewisser Keimabbau ist vorhanden, jedoch kann eine sichere Elimination von Keimen nur mithilfe einer Desinfektionsstufe erfolgen.

Eine organische Überbelastung der Pflanzenkläranlage bei Kohlenstoff-Spitzen ist unbedingt zu vermeiden, da sonst die Reinigungsleistung stark vermindert wird. Eine Überlastung könnte z. B. durch den Einsatz eines vorgeschalteten Ausgleichsbehälters erfolgen. Der Flächenbedarf ist bei Verwendung eines UASB-Reaktors mit seiner hochaktiven Biomasse im Vergleich zu einer Pflanzenkläranlage mit derselben Reinigungsleistung deutlich geringer. Die in der anaeroben Stufe anfallende Gasmenge kann überdies energetisch genutzt werden. Der Einsatz des UASB-Reaktors bedingt allerdings eine Vorbehandlung zur Entfernung von Störstoffen wie z. B. Sand und Grobstoffen. Der im UASB-Reaktor anfallende Schlamm muss in regelmäßigen Abständen entsorgt werden.

Der Energiebedarf einer Kombination von UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage ist gering, jedoch wird für das Durchfließen des UASB ein geodätisches Gefälle benötigt. Grundsätzlich ist kein Chemiebedarf für dieses Verfahren erforderlich, da keine Phosphatfällung erforderlich ist. Bei Einsatz einer Desinfektionsstufe kann jedoch ein Chemiebedarf vorhanden sein. Die Qualifikation des Bedienpersonals ist für die Kombination UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage als gering einzuschätzen. Der Grundstücksbedarf ist als mittel bis hoch einzuschätzen, da der geringe Platzbedarf des UASB-Reaktors durch den hohen Platzbedarf der Pflanzenkläranlage ausgeglichen wird. Die Investitions- und Betriebskosten sind als gering einzuschätzen, da der Einsatz der Pflanzenkläranlage zur Nährstoffelimination keine hohen Investitionen erfordert.

Die Bemessung der beiden Komponenten UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage erfolgt unabhängig voneinander. Abhängig von der erzielten Reinigungsleistung im

UASB-Reaktor ist ein reduzierter Flächenbedarf der Pflanzenkläranlage abzuschätzen.

Insgesamt qualifiziert sich die Kombination von UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage als einfache, kostengünstige und zielführende Alternative zu herkömmlichen biologischen Reinigungsverfahren. Als stufenweiser Ausbau kann der Einsatz von UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage gerade im Hinblick auf den schwerpunktmäßigen Abbau der Komponenten UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage interessant sein, wenn das Gelände (Gefälle) und das Grundstücksdargebot ausreichend sind.

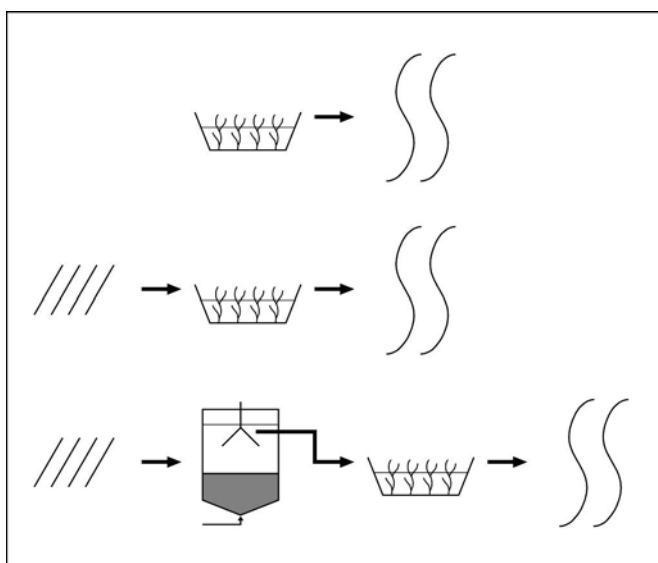


Abbildung 23: Beispielhaftes Stufenausbaukonzept Kombination UASB-Reaktor und Pflanzenkläranlage

### 6.3.6 Festbett- und UASB-Reaktor

Unter der Kombination UASB- und Festbettreaktor wird die Verschaltung eines anaeroben mit einem aeroben Reaktor verstanden. Festbettreaktoren können nach Kapitel 5.3 Tropfkörper-, Tauchkörperanlagen oder Biofilter sein.

Die schwerpunktmäßige Reinigungsleistung von Kohlenstoff in UASB-Reaktoren kann durch den Einsatz von Festbettreaktoren komplettiert werden. Der Rest-CSB und Nährstoffe im Ablauf der anaeroben Reinigungsstufe können im Festbettreaktor weiter abgebaut werden. Die schwerpunktmäßige Elimination von Kohlenstoff erfolgt im UASB-, von Nährstoffen im Festbettreaktor. Um auch den schwer abbaubaren CSB im Ablauf der anaeroben Reinigungsstufe zu eliminieren, ist der Einsatz von Rücklaufschlamm in den Zulauf zum Tropfkörper sinnvoll. Da die an-

aerobe Stufe bereits im Verfahren integriert ist, kann eine Rückführung des aeroben Schlammes aus dem Tropfkörper in den Zulauf zum UASB-Reaktor erfolgen und damit eine anaerobe Vergärung des Schlammes erzielt werden. Durch den Einsatz eines UASB ist eine Vorbehandlung zur Entfernung von Störstoffen, wie z. B. Sand und Grobstoffen, und durch den Einsatz des Tropfkörpers eine Nachklärung erforderlich. Die Verfahrenskombination eignet sich vorwiegend für Kohlenstoffreduktion und Nitrifikation. Für eine sichere Elimination aller Nährstoffe sind weitere Maßnahmen erforderlich.

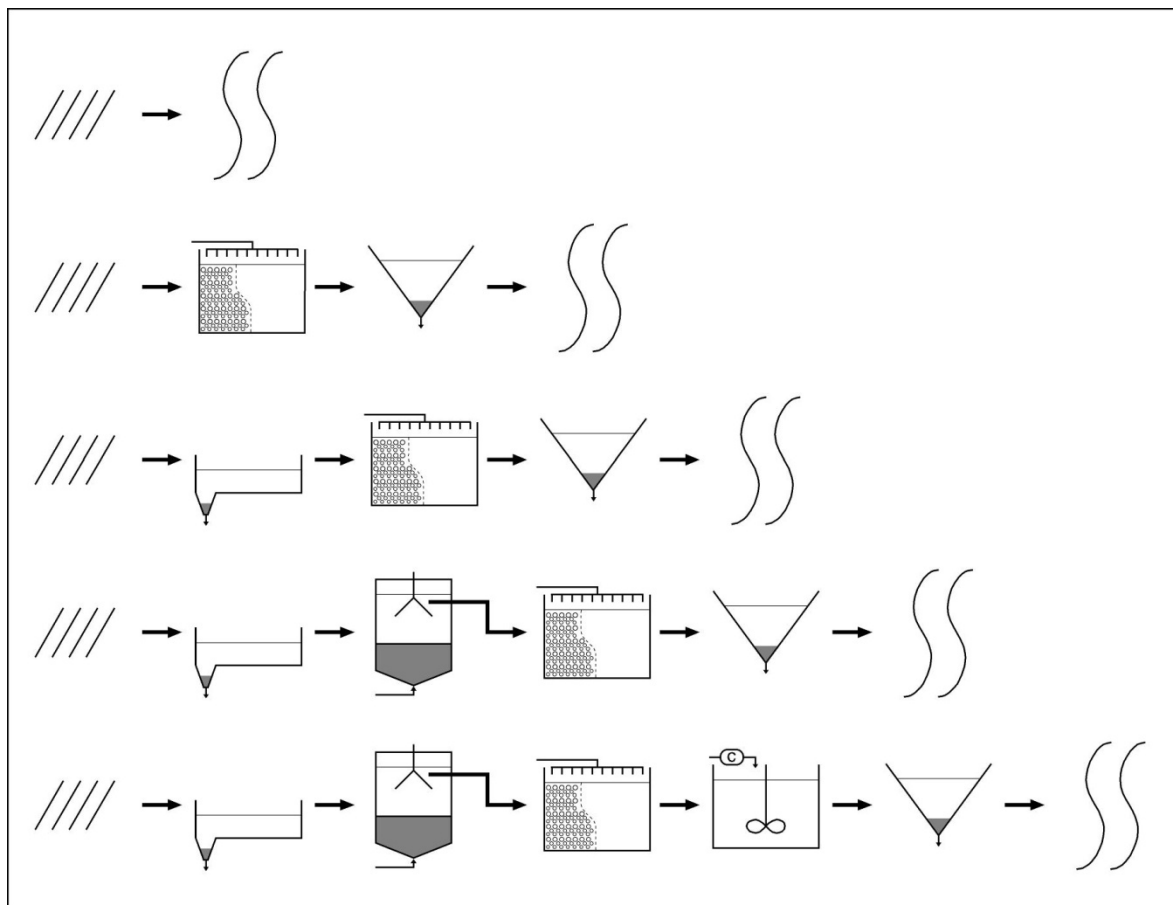


Abbildung 24: Beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination aus Anaerob- und Festbettreaktor

In Abbildung 24 ist ein beispielhaftes Stufenausbaukonzept für die Kombination aus UASB-Reaktor und Tropfkörper dargestellt. Ausgehend von einer Abwasserreinigung in einem Tropfkörper mit vorgeschaltetem Absetzbecken zur Vermeidung von Verstopfungen und nachgeschaltetem Absetzbecken zur Beseitigung von abgespültem Bewuchs, kann in einem zwischengeschalteten Anaerobreaktor eine erhöhte Reinigungsleistung insbesondere hinsichtlich CSB erreicht

werden. Der Tropfkörper kann zur vorwiegenden Nitrifikation dienen. Um eine Denitrifikation zu erreichen, wird ein unbelüfteter Reaktor nachgeschaltet. Hierbei muss auf das evtl. Erfordernis einer Kohlenstoffquelle geachtet werden.

Die Vorteile der Kombination Anaerob-Aerob sind nach Sobrinho und Jordao (2004):

- Die Schlammeindickung und Schlammfäulung kann entfallen.
- Durch die Schlammrückführung aus dem Tropfkörper in den UASB-Reaktor kann der aerobe Schlamm einer anaeroben Vergärung unterzogen werden. Der dadurch geringere Schlammanfall und die bessere Schlammeindickung führen zu geringeren Schlamm Entsorgungskosten.
- Der Energieverbrauch bei einer vorgeschalteten anaeroben Behandlung ist gering aufgrund der geringeren Belüftungserfordernis für den Kohlenstoffabbau, und
- die Konstruktionskosten betragen ca. 80 % gegenüber herkömmlichen Abwasseranlagen.

Tropfkörper können sowohl für die Kohlenstoffelimination als auch für die Ammoniumelimination eingesetzt werden. Aufgrund der begrenzten Reinigungsleistung bezüglich Nitrat bei einem Festbettreaktor ist auch darauf zu achten, dass bei höheren Reinigungsanforderungen eine Denitrifikationsstufe und der Einsatz einer externen Kohlenstoffquelle berücksichtigt wird, da im Ablauf von UASB- und Festbettreaktor mit ungenügend leicht abbaubarem Kohlenstoff zu rechnen ist.

Nach Durchlaufen der anaeroben Stufe ist der Kohlenstoff weitgehend abgebaut, so dass der Tropfkörper eine geringe Belastung durch Kohlenstoff erfährt. Die in der anaeroben Stufe nicht abgebauten Nährstoffe sowie der Rest-CSB im Ablauf der anaeroben Stufe können im Tropfkörper biologisch abgebaut, aber nicht vollständig entfernt werden. Der Flächenbedarf ist durch den Einsatz des UASB-Reaktors mit seiner hochaktiven Biomasse und dem Tropfkörper mit Füllkörpern hoher spezifischer Oberfläche gering. Die in der anaeroben Stufe anfallende Gasmenge kann energetisch genutzt werden. Emissionen im Hinblick auf Geruchsbelästigung können aufgrund des Einsatzes des Tropfkörpers durchaus auftreten. Der im UASB-Reaktor anfallende Schlamm muss in regelmäßigen Abständen entsorgt werden.

Der UASB-Reaktor wird von unten nach oben durchflossen, dies muss bei ungeeignetem Gelände durch eine Zulaufpumpe gewährleistet werden. Das Abwasser

kann direkt ohne weitere Pumpvorgänge zum Tropfkörper fließen, der von oben nach unten durchflossen wird. Die Energie aus der Zulaufpumpe des UASB-Reaktors wird demnach doppelt genutzt und die Effizienz der eingesetzten Energie ist entsprechend hoch. Grundsätzlich besteht kein Chemiebedarf, wenn keine weitergehenden Reinigungsanforderungen für Nitrat, Phosphor und Keime bestehen. Für höhere Anforderungen hinsichtlich Nitrat, Phosphor und Keime sind weitere Verfahrensstufen anzuordnen.

Die Qualifikation des Bedienpersonals ist für die Kombination UASB-Reaktor und Tropfkörper als gering einzuschätzen. Der Grundstücksbedarf ist gering, da weder Tropfkörper noch UASB einen hohen Platzbedarf besitzen. Die Investitionskosten sind als mittel einzuschätzen, die Betriebskosten jedoch insgesamt gering.

Insgesamt qualifiziert sich die Kombination von UASB-Reaktor und Festbetтанlage als kostengünstige und zielführende Alternative zu herkömmlichen biologischen Reinigungsverfahren. Als stufenweiser Ausbau kann der Einsatz von UASB-Reaktor und Tropfkörper gerade im Hinblick auf die schwerpunktmäßige Abbaukapazität interessant sein.

### **6.3.7 Membrananlage mit belüftetem Teich**

Die Kombination aus Teich- und Membrankläranlage ist grundsätzlich ähnlich zum Membranbelebungsverfahren. Als Besonderheit ist der Einsatz einer Teichkläranlage anstatt einer herkömmlichen Belebungsanlage gegeben. Diese Kombination kann dann sinnvoll sein, wenn eine bestehende Teichkläranlage z. B. mit der Einhaltung erhöhter Reinigungsanforderungen der Leitparameter konfrontiert wird. Als Alternative zum Komplettumbau der Teichkläranlage kann dann der Einsatz einer Membrananlage geprüft werden.

Die Funktion einer herkömmlichen Teichkläranlage mit Kohlenstoff- und Nährstoffelimination ist uneingeschränkt, lediglich wird der Ablauf nicht über Schönungsteiche in den Vorfluter geführt. Durch einen angelegten Unterdruck wird gereinigtes Abwasser durch die Membrane gesaugt. Die Porendurchmesser der Membrane können so klein (von  $\sim 0,0001$  bis  $1,0 \mu\text{m}$ ) ausgeführt werden, dass selbst Viren zurückgehalten werden, dadurch eine verstärkte Keimreduktion stattfindet und das gereinigte Abwasser eine exzellente Qualität hat.

Ein Vorteach kann dabei als Vorklärung und Sandfang dienen. Die Membrane sind entweder auf das maximale Regenerereignis auszulegen oder es ist ein Ausgleichsbecken für hydraulische Stöße zu installieren. Die Teichkläranlage dient als Schlammstapelraum sowie zur biologischen Teilreinigung, in der Membrananlage



erfolgt die weitergehende biologische Reinigung und die Fest/Flüssig-Trennung mit der Möglichkeit der Keimrückhaltung. Vor dem Zulauf zur Membrananlage ist die Anordnung eines Rechens sinnvoll, um Verstopfungen oder Fouling der Membrane durch in der Teichklärung nicht sedimentierte Schwebstoffe zu verhindern. Allerdings ist die Notwendigkeit einer regelmäßigen Reinigung der Membrane mittels chemischer Behandlung oder Rückspülung erforderlich.

Vorteil dieser Verfahrenskombination ist die Möglichkeit einer Kapazitätserweiterung von einer bestehenden Teichkläranlage ohne Neubau weiterer Teiche oder dem Komplettumbau der Reinigungsanlage. Die Steigerung der Reinigungsleistung kann in die naturnahe Anlagengestaltung integriert werden.

Nachteilig an der Verwendung von Membranen sind die hohen Investitions- und Betriebskosten. Das technische Know-how, die richtige Betriebsführung und die richtige technische Wartung müssen vom Betreiber erwartet werden, daher muss eine hohe Personalqualifikation vorhanden sein.

#### **6.4 Matrix zur Eignung zur Kombination von Komponenten und Verfahren**

In Tabelle 4 sind die Kombinationsmöglichkeiten in den Abstufungen ungeeignet – nicht sinnvoll – nicht erforderlich – geeignet – sinnvoll – erforderlich bewertet. Mithilfe dieser Matrix soll eine Aussage getroffen werden, ob eine vor-, zwischen- oder nachgeschaltete Kombination grundsätzlich möglich ist. In diesem Zusammenhang sei noch mal darauf hingewiesen, dass, wie jede andere technische Bemessungsregel, Kalkulationshilfe oder Checkliste, es nie möglich sein wird, die völlige und bedingungslose Übertragbarkeit der Ergebnisse auf jeden denkbaren Einzelfall abzusichern, so dass projektspezifische Randbedingungen in jedem Fall abzuwägen sind.

Tabelle 4: Matrix zur Eignung verschiedener Kombinationen von Komponenten und Verfahren

betrachtetes Verfahren		Belebungsverfahren		Aufstauverfahren (SBR)		Tropfkörper		Tauchkörper		Getauchtes Festbett		Teichkläranlage		Pflanzenkläranlage, bewachsene Bodenfilter		Kapitel	
Kombination mit																	
Verfahren	Belebungsverfahren			geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor- oder nachgeschaltet	geeignet	vorgeschaltet	5.2.1	
	Aufstauverfahren (SBR)	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet			geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet für C-Abbau oder Nitrifikation	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet für C-Abbau oder Nitrifikation	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	ungeeignet	grundsätzlich verschiedene Verfahren	geeignet	vorgeschaltet	5.2.3	
	Tropfkörper	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet für C-Abbau oder Nitrifikation			geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	5.3.2	
	Tauchkörper	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet		geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet			geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	5.3.3	
	Getauchtes Festbett	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet			geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	5.3.4	
	Teichkläranlage	geeignet	vor- oder nachgeschaltet	ungeeignet	grundsätzlich verschiedene Verfahren	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet			geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	5.4.1	
	Pflanzenkläranlage, bewachsener Bodenfilter	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet			5.4.2	
Komponenten	Rechen	sinnvoll	zur Abtrennung von Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von Grobstoffen	geeignet	zur Abtrennung von Grobstoffen	4.2.1	
	Sandfang	sinnvoll	zur Abtrennung von Sand	sinnvoll	zur Abtrennung von Sand	sinnvoll	zur Abtrennung von Sand	sinnvoll	zur Abtrennung von Sand	sinnvoll	zur Abtrennung von Sand	nicht erforderlich	Sandabtrennung nicht erforderlich	nicht erforderlich	Sandabtrennung nicht erforderlich	4.2.2	
	Vorklärbecken	sinnvoll	zur Abtrennung von org. Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von org. Grobstoffen	erforderlich	zur Abtrennung von org. Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von org. Grobstoffen	sinnvoll	zur Abtrennung von org. Grobstoffen	nicht erforderlich	Abtrennung von org. Grobstoffen nicht erforderlich	geeignet	Abtrennung von org. Grobstoffen nicht erforderlich	4.2.3	
	Absetz- oder Vorklärteich	nicht sinnvoll	grundsätzlich unterschiedliche Verfahren	geeignet	vorgeschaltet zur Abtrennung von Grobstoffen	geeignet	vorgeschaltet zur Abtrennung von Grobstoffen	geeignet	vorgeschaltet zur Abtrennung von Grobstoffen	geeignet	vorgeschaltet zur Abtrennung von Grobstoffen	geeignet	vorgeschaltet zur Abtrennung von Grobstoffen	geeignet	vorgeschaltet zur Abtrennung von Grobstoffen	4.3.2	
	unbelüftetes Becken	geeignet	Denitrifikation, Bio-P-Becken	nicht sinnvoll	Funktion bereits im SBR enthalten	geeignet (bei C-Zugabe)	vorgeschaltet zur Bio-P-Elimination, nachgeschaltet zur Denitrifikation	geeignet (bei C-Zugabe)	vorgeschaltet zur Bio-P-Elimination, nachgeschaltet zur Denitrifikation	geeignet	Denitrifikation, Bio-P-Elimination	nicht sinnvoll	grundsätzlich unterschiedliche Verfahren	nicht sinnvoll	grundsätzlich unterschiedliche Verfahren	4.3.1	
	belüftetes Becken	erforderlich	essentieller Teil des Belebungsverfahrens	nicht sinnvoll		geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	nicht sinnvoll		nicht sinnvoll	nicht erforderlich	Absetzwirkung im durchströmten Pflanzenkörper	4.3.1
	Nachklärbecken	erforderlich	essentieller Teil des Belebungsverfahrens	nicht sinnvoll		erforderlich	zur Abtrennung abgespülten Bewuchses	sinnvoll	zur Abtrennung abgespülten Bewuchses	erforderlich	zur Abtrennung abgespülten Bewuchses	nicht sinnvoll		nicht erforderlich	Schlammabtrennung nicht erforderlich	4.3.1	
	unbelüfteter Teich	nicht sinnvoll	grundsätzlich unterschiedliche Verfahren	nicht sinnvoll		geeignet (bei C-Zugabe)	vorgeschaltet zur Bio-P-Elimination, nachgeschaltet zur Denitrifikation	geeignet (bei C-Zugabe)	vorgeschaltet zur Bio-P-Elimination, nachgeschaltet zur Denitrifikation	geeignet	Denitrifikation, Bio-P-Elimination	geeignet	essentieller Teil einer Teichkläranlage	geeignet	vorgeschaltet	4.3.2	
	belüfteter Teich	nicht sinnvoll		geeignet		vor- oder nachgeschaltet	geeignet	vor- oder nachgeschaltet	geeignet	vor- oder nachgeschaltet	geeignet	essentieller Teil einer Teichkläranlage	geeignet	vorgeschaltet	4.3.2		
	Nachklärteich	nicht sinnvoll		geeignet		zur Abtrennung abgespülten Bewuchses, Alternativ zu Nachklärbecken	geeignet	zur Abtrennung abgespülten Bewuchses, Alternativ zu Nachklärbecken	geeignet	zur Abtrennung abgespülten Bewuchses, Alternativ zu Nachklärbecken	geeignet	zur Abtrennung abgespülten Bewuchses, Alternativ zu Nachklärbecken	geeignet	essentieller Teil einer Teichkläranlage	nicht erforderlich	Schlammabtrennung nicht erforderlich	4.3.2
	Schönungsteich	geeignet	nachgeschaltet zur Ablaufverbesserung	geeignet		nachgeschaltet zur Ablaufverbesserung	geeignet	nachgeschaltet zur Ablaufverbesserung	geeignet	nachgeschaltet zur Ablaufverbesserung	geeignet	nachgeschaltet zur Ablaufverbesserung	geeignet	essentieller Teil einer Teichkläranlage	geeignet	nachgeschaltet zur Ablaufverbesserung	4.3.2
	Algenreaktor	nicht sinnvoll	grundsätzlich unterschiedliche Verfahren	nicht sinnvoll	grundsätzlich unterschiedliche Verfahren	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	geeignet	zwischen- geschaltet	geeignet	vor-, zwischen- oder nachgeschaltet	4.3.4	
	Membranstufe	geeignet	anstelle des Nachklärbeckens, auch partieller Einsatz möglich	geeignet	bei erhöhten Reinigungsanforderungen	geeignet	nachgeschaltet	geeignet	nachgeschaltet	geeignet	nachgeschaltet	geeignet	nachgeschaltet	geeignet	nachgeschaltet	5.2.2	
	Biofilter	geeignet	vor- oder zwischengeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vor- oder zwischengeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vor- oder zwischengeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vor- oder zwischengeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	nachgeschaltet zur Nitrifikation oder Denitrifikation nach C-Zugabe	geeignet	vor- oder zwischengeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vor- oder zwischengeschaltet bei viel CSB im Zulauf	4.3.5	
	Anaerober Reaktor (UASB)	geeignet	vorgeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vorgeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vorgeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vorgeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vorgeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vorgeschaltet bei viel CSB im Zulauf	geeignet	vorgeschaltet bei viel CSB im Zulauf	4.3.5	
	Phosphorfällung	geeignet	Vor-, Simultan- oder Nachfällung	geeignet	Vor-, Simultan- oder Nachfällung	geeignet	Vor-, Simultan- oder Nachfällung	geeignet	Vor-, Simultan- oder Nachfällung	geeignet	Vor-, Simultan- oder Nachfällung	geeignet	Vor-, Simultan- oder Nachfällung	geeignet	nachgeschaltet zur sicheren Elimination von Phosphor	4.4.2	
	Desinfektion	geeignet	zur Keimreduktion im Ablauf	geeignet	zur Keimreduktion im Ablauf	geeignet	zur Keimreduktion im Ablauf	geeignet	zur Keimreduktion im Ablauf	geeignet	zur Keimreduktion im Ablauf	geeignet	zur Keimreduktion im Ablauf	geeignet	zur Keimreduktion im Ablauf	4.4.4	
Filtration	geeignet	zur Reduktion der Feststoffkonzentration	geeignet	zur Reduktion der Feststoffkonzentration	geeignet	zur Reduktion der Feststoffkonzentration	geeignet	zur Reduktion der Feststoffkonzentration	geeignet	zur Reduktion der Feststoffkonzentration	geeignet	zur Reduktion der Feststoffkonzentration	nicht erforderlich	Filtration durch Pflanzenkläranlage	4.4.5		

Tabelle 5: Technisch-wirtschaftliche Checkliste ausgewählter Stufenausbaukonzepte

		Wesentliches Reinigungsziel							Sonstige Parameter								
		Sand- abtrennung	Kohlen- stoffabbau	Schlamm- abtrennung	Nitrifikation	Denitrifikation	Phosphor- elimination	Schwermetall- entfernung	Keimabbau	Geruchsbelä- stigung	Energiebedarf	Chemiebedarf	Importbedarf	Personal- qualifikation	Grund- stücksbedarf	Investitions- kosten	Betriebs- kosten
<b>Mechanische Reinigungskomponenten</b>	Rechen (Grob-, Fein-, Sieb-)	√								hoch	mittel - hoch	kein	mittel - hoch	gering	gering	mittel	mittel
	Langsandfang	√								hoch	gering	kein	gering - mittel	mittel - hoch	hoch	mittel	gering
	Sandfang, hydraulisch	√								mittel	hoch	kein	mittel - hoch	mittel - hoch	mittel	hoch	mittel - hoch
	Sandfang, belüftet	√								mittel	hoch	kein	mittel - hoch	mittel - hoch	mittel	hoch	mittel - hoch
	Vorklärbecken		√	√						mittel - hoch	gering	kein	gering	mittel - hoch	gering	mittel	gering
	Absetzteich		√	√					√	hoch	gering	kein	gering	gering	hoch	gering	gering
	Lamellenseparator			√						gering	gering	kein	hoch	mittel - hoch	gering	mittel	gering
<b>Biologische Reinigungskomponenten</b>	Belebungsverfahren	unbelüfteter Reaktor				√	√ <sup>(1)</sup>			mittel	gering	kein	gering	gering	mittel	mittel	gering
		belüfteter Reaktor		√		√ <sup>(2)</sup>		√ <sup>(1)</sup>		mittel	hoch	kein	mittel	mittel - hoch	mittel	hoch	hoch
		Nachklärbecken			√					gering - mittel	mittel	kein	gering	mittel - hoch	mittel - hoch	hoch	mittel
	Teichklärung	unbelüfteter Abwasserteich		√	√		√		√	hoch	kein	kein	gering	gering	hoch	gering	gering
		belüfteter Abwasserteich		√	√	√			√	mittel	hoch	kein	mittel	gering	hoch	mittel	hoch
		Nachklärteich			√				√	gering	gering	kein	gering	gering	hoch	gering	gering
		Schönungsteich			√				√	gering	kein	kein	gering	gering	hoch	gering	gering
	Festbett	Tropfkörper ohne Nitrifikation		√						mittel - hoch	gering - mittel	kein	gering - mittel	mittel	gering - mittel	mittel - hoch	gering - mittel
		Tropfkörper mit Nitrifikation		√		√				mittel - hoch	gering - mittel	kein	gering - mittel	mittel	gering - mittel	mittel - hoch	gering - mittel
		(Scheiben-) Tauchkörper		√		√	√	√		mittel	mittel	kein	gering - mittel	mittel	gering - mittel	mittel	mittel
		Getauchtes Festbett ohne Nitrifikation		√						mittel	mittel	kein	gering - mittel	mittel	gering	mittel	mittel
		Getauchtes Festbett mit Nitrifikation		√		√	√ <sup>~50%</sup>			mittel	mittel	kein	gering - mittel	mittel	gering	mittel - hoch	mittel
	Sonstige	Algenreaktor		√		√ <sup>(3)</sup>	√ <sup>(3)</sup>			mittel	gering	kein	gering	gering	mittel - hoch	mittel	gering
		Membranbelebung		√		√ <sup>(2)</sup>	√		√	mittel	hoch	gering	hoch	hoch	gering	hoch	hoch
Pflanzenkläranlage, bewachsener Bodenfilter			√	√	√	√	√		mittel	gering	kein	gering	gering	hoch	gering	gering	
Biofilter			√						gering	mittel	kein	hoch	mittel	gering	hoch	mittel	
Anaerober Reaktor (UASB)			√						mittel	kein - gering <sup>(4)</sup>	kein	gering - mittel	mittel	gering	mittel - hoch <sup>(4)</sup>	gering - mittel <sup>(4)</sup>	
Aufstaubehälter (SBR)			√	√	√	√	√		mittel - hoch	hoch	kein	mittel - hoch	mittel	gering	hoch	hoch	
<b>Chemisch-physikalische Reinigungskomponenten</b>	Phosphorfällung (evtl. Reaktor)						√		gering	gering	hoch	mittel	mittel - hoch	gering	gering	mittel	
	Metallfällung (evtl. Reaktor)						√		gering	gering	hoch	mittel	mittel - hoch	gering	gering	hoch	
	UV-Bestrahlung							√	gering	hoch	kein	hoch	mittel - hoch	gering	mittel	mittel - hoch	
	Chlorung							√	mittel	gering	hoch	mittel	mittel	gering	mittel	gering	
	Filtration							√	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering - mittel	mittel	
	Ozon-Desinfektion							√	gering	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	gering	mittel	hoch

√ Entspricht wesentlichem Reinigungsziel

<sup>(1)</sup> bei wechselnd aeroben/anaeroben Betrieb und anderen erfüllten Voraussetzungen zum P-Abbau

<sup>(2)</sup> bei entsprechend hohem Schlammalter

<sup>(3)</sup> N-Abbau durch direkte Aufnahme in Algen

<sup>(4)</sup> abhängig von der Nutzung des Biogases

## **6.5 Technisch-wirtschaftliche Checkliste ausgewählter Stufenausbaukonzepte**

In der Checkliste für technisch-wirtschaftliche Kriterien sind die wesentlichen Reinigungsziele aller im Kapitel 4 genannten Komponenten kommunaler Abwasserreinigung dargestellt und die Parameter Luftemissionen, Energie- und Chemiebedarf, Importbedarf, Personalqualifikation, Grundstücksbedarf sowie für Investitions- und Betriebskosten mit den Abstufungen kein – gering – mittel – hoch bewertet (Tabelle 5).

## **7 Plausibilisierung und Verifikation von Stufenausbaukonzepten anhand von Referenzbeispielen**

In diesem Kapitel werden für ausgewählte Beispiele eine Plausibilisierung und Verifikation von Stufenausbaukonzepten durchgeführt. Mithilfe der in Kapitel 6.4 aufgestellten Matrix und des Werkzeugs der dynamischen Simulation werden sinnvolle Stufenausbaukonzepte der Referenzbeispiele untersucht und bewertet. Im Rahmen des vorliegenden F+E-Projektes wurden in Deutschland, Südafrika, Namibia und Vietnam verschiedene Kläranlagen besichtigt, um ein geeignetes Fallbeispiel zu finden. Als Referenzbeispiel 1 wird die Kläranlage Bonn-Beuel ausgewählt, weil Untersuchungsergebnisse den Autoren zur Verfügung standen und so die entwickelten Planungshilfen exemplarisch angewendet und verifiziert werden können. Das Referenzbeispiel 2 ist eine Untersuchung eines Stufenausbaukonzepts einer kommunalen Kläranlage in Vietnam.

### **7.1 Referenzbeispiel 1**

#### **7.1.1 Allgemeines**

Im Referenzbeispiel 1 werden Stufenausbaukonzepte der Kläranlage Bonn-Beuel untersucht. Da die Kläranlage bereits für die weitergehende Reinigung ausgebaut ist, besteht das Ziel dieser Untersuchung in der Aufstellung von Perspektiven zur Steigerung der Reinigungsleistung, insbesondere in Bezug auf den Parameter  $\text{NO}_3$ . Dies soll unter Berücksichtigung des Standes der Technik, der aktuellen Reinigungsanforderungen und des bereits auf der Anlage verwendeten Abwasserreinigungsverfahrens (herkömmliches Belebungsverfahren) erfolgen. Die Betriebsoptimierung umfasst nicht nur die Verfahrenstechnik, sondern bezieht auch den Betriebsmittelverbrauch und den Energiebedarf ein.

#### **7.1.2 Beschreibung des Referenzbeispiels 1**

Die Kläranlage Bonn-Beuel wurde in den 90er Jahren an die Anforderungen der „Weitergehenden Abwasserreinigung“ angepasst und auf 80.000 Einwohnerwerte (EW) ausgebaut. Ihr Einzugsgebiet umfasst mehrere Ortsteile der Bundesstadt Bonn und der Stadt Sankt Augustin, deren Entwässerung im Mischsystem erfolgt. Aus zwei Hauptsammlern strömt das überwiegend kommunale Abwasser der Kläranlage zu. Nach Hebepumpwerk, Rechen (3 mm) und Langsandfang durchfließt das Abwasser die Vorklärung mit einem Volumen von  $1.300 \text{ m}^3$ . Es folgt die

Dosierung von Fällmittel und die Zumischung von Rücklaufschlamm bevor das Abwasser durch das Bio-P-Becken, ausgeführt als Umlaufbecken, mit einem Volumen von 2.975 m<sup>3</sup> strömt. In der Denitrifikation mit einem Volumen von 5.400 m<sup>3</sup> und der Nitrifikation mit einem Volumen von 9.500 m<sup>3</sup> wird das Abwasser weitgehend biologisch gereinigt. Der in den beiden Nachklärbecken mit einer Gesamtoberfläche von 1.300 m<sup>2</sup> anfallende Schlamm wird als Rücklaufschlamm zurück in das Bio-P-Becken bzw. als Überschussschlamm zusammen mit dem Primärschlamm aus der Vorklärung ohne Zwischenspeicherung zu einer benachbarten Kläranlage gepumpt und dort weiterbehandelt. Es besteht keine Rückbelastung durch Schlammwasser auf der Kläranlage Bonn-Beuel.

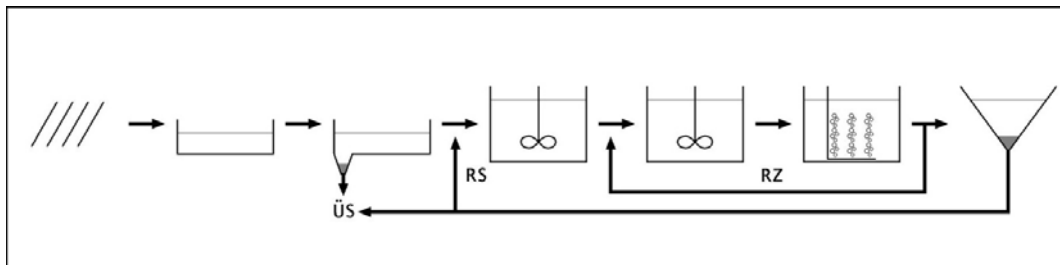


Abbildung 25: Verfahrensfliessschema Kläranlage Bonn-Beuel

Da die Erschließung eines größeren Wohngebietes und die Ausweitung einer Gewerbeansiedlung beabsichtigt sind, ist zu untersuchen, welche Konzepte zu einer Steigerung der Reinigungsleistung beitragen. Im Vorfeld wurde bereits erkannt, dass die Reinigungsleistung insbesondere hinsichtlich des Parameters Nitratstickstoff (NO<sub>3</sub>) zu erhöhen ist, da dieser Parameter im Vergleich zu Ammonium, CSB und Phosphor am ehesten zur Überschreitung eines Einleiterwertes beitragen wird.

Folgende Verfahrensstufen können aus der Checkliste für technisch-wirtschaftliche Kriterien (siehe Kapitel 6.5) als Reinigungsverfahren, mit welchen eine Steigerung der Denitrifikationskapazität erfolgen kann, herausgefiltert werden:

- unbelüfteter Reaktor,
- unbelüfteter Teich,
- Scheibentauchkörper,
- Algenreaktor,
- Membranbelebung,
- Pflanzenkläranlage und
- Aufstaubehälter.

Um den derzeitigen technischen Stand auf dem Gelände der Kläranlage Bonn-Beuel beizubehalten, wurde die Errichtung von Klärteichen und Pflanzenkläranlagen verworfen, ebenso wie die Verwendung von Scheibentauchkörpern, Algenreaktoren, Membrananlagen und Aufstauhbehältern für eine Verwendung nach Rücksprache mit dem Betreiber ausgeschlossen wurde. Es soll daher untersucht werden, welche Auswirkungen der Neubau eines unbelüfteten Reaktors auf die Reinigungswirkung der Anlage hat.

### 7.1.3 Dynamische Simulation Referenzbeispiel 1

Für die dynamische Simulation der Kläranlage Bonn-Beuel wurde die Software SIMBA in der Version 5.12 verwendet. Als Modellierungsgrundlage wurde das modifizierte Modell ASM3BioPm, welches im Oktober 2007 veröffentlicht wurde (Alex et al., 2007) und u. a. einen Konverter zur Aufteilung in die CSB-Fractionen nach der gültigen ATV-DVWK-A 131 enthält, verwendet. Die Stoffgruppe  $X_{TSS}$  wurde durch die Stoffgruppe  $X_{Mi}$  ersetzt und die Berechnung des TS-Gehalts auf die Summe der partikulären Stoffgruppen vereinfacht.

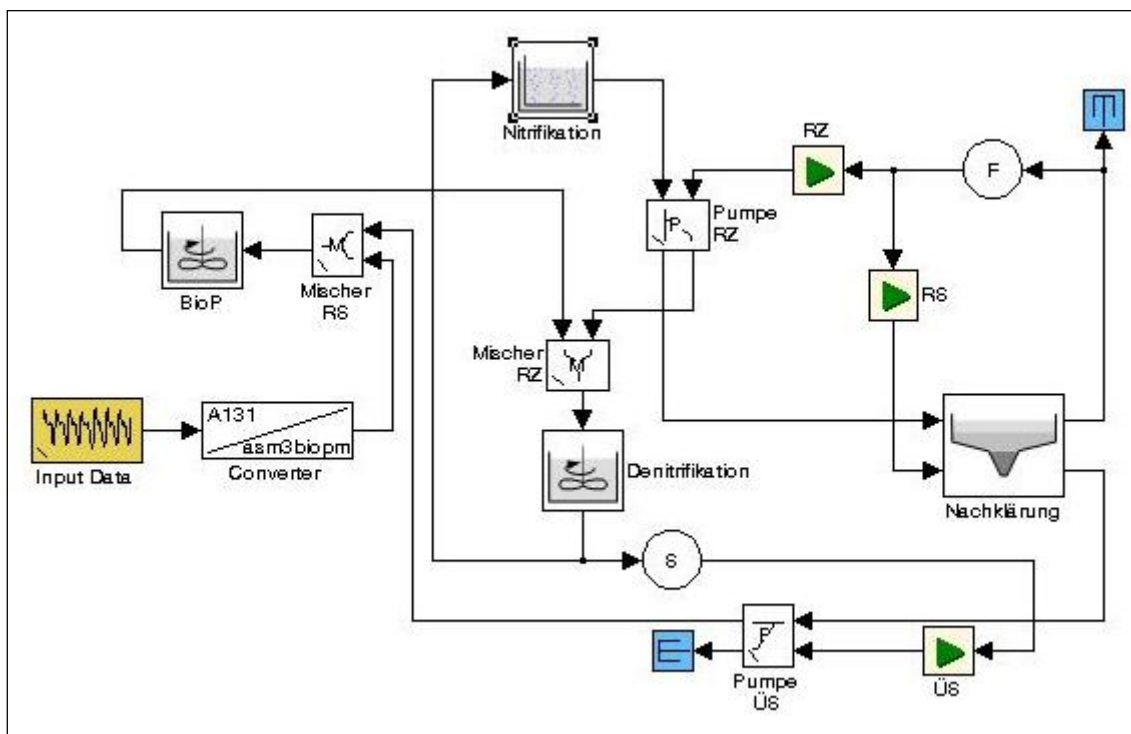


Abbildung 26: Kläranlage Bonn-Beuel als Modell

Nach Kalibrierung und Validierung des Modells mit mehrtägigen Messreihen konnten Stufenausbaukonzepte am Modell ausprobiert werden, um erwartete zukünftige Situationen zu simulieren und deren Auswirkungen hinsichtlich der Ablaufwerte und Einsparpotentiale zu untersuchen. Eine Simulation bietet hier den Vorteil, Auswirkungen von verschiedenen Änderungen zu analysieren ohne in den tatsächlichen Betrieb eingreifen zu müssen.

Neben den in Kapitel 7.1.2 aufgezählten baulichen Neuinvestitionen sollen in diesem Beispiel auch betriebliche Optimierungsansätze geprüft werden. Zusammen mit dem Betreiber wurde daher die Untersuchung folgender Stufenausbaukonzepte mithilfe der dynamischen Simulation vereinbart:

- Vergrößerung des Denitrifikationsvolumens durch Rezirkulation in das Bio-P-Becken,
- Vergrößerung des Denitrifikationsvolumens durch Neubau von Denitrifikationsbecken,
- Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation durch Halbierung der Vorklärung,
- Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation durch den Einsatz einer externen C-Quelle und
- Erhöhung der Rezirkulation.

#### **7.1.4 Stufenausbaukonzept 1: Rezirkulation in das Bio-P-Becken**

Das Ziel dieser Variantenuntersuchung ist die Optimierung der Nitratstickstoffabbauleistung durch die Vergrößerung des Denitrifikationsvolumens durch die Einleitung der Rezirkulation in das Bio-P-Becken. Das Anaerobbecken dient dann nicht mehr als wechselnd anoxisch-anaerobe, sondern als reine anoxische Stufe. Das Denitrifikationsvolumen erhöht sich dadurch um  $2.975 \text{ m}^3$  auf insgesamt ca.  $8.400 \text{ m}^3$ . Die  $\text{NO}_3$ -Abbaukapazität kann allerdings nur dann erhöht werden, wenn genug Kohlenstoff für die Denitrifikation vorhanden ist.

In einer Versuchsreihe wurde die Rezirkulation in den Zulauf zum Anaerobbecken geleitet und festgestellt, dass maximal  $150 \text{ l/s}$  in das Bio-P-Becken eingeleitet werden können, um Nitrat-Konzentrationen größer  $1 \text{ mg/l}$  im Ablauf des Bio-P-Beckens zu vermeiden. Im Modell wurde die Einleitung von Rezirkulationsabwasser in das Bio-P-Becken durch entsprechendes Verschieben der Verbin-



dungspfeile erreicht. Sind weniger als 150 l/s im System, so wird die gesamte Abwassermenge ins Bio-P-Becken geleitet. Übersteigt die Rezirkulationsmenge 150 l/s, so wird der über 150 l/s liegende Anteil in die Denitrifikation gefördert.

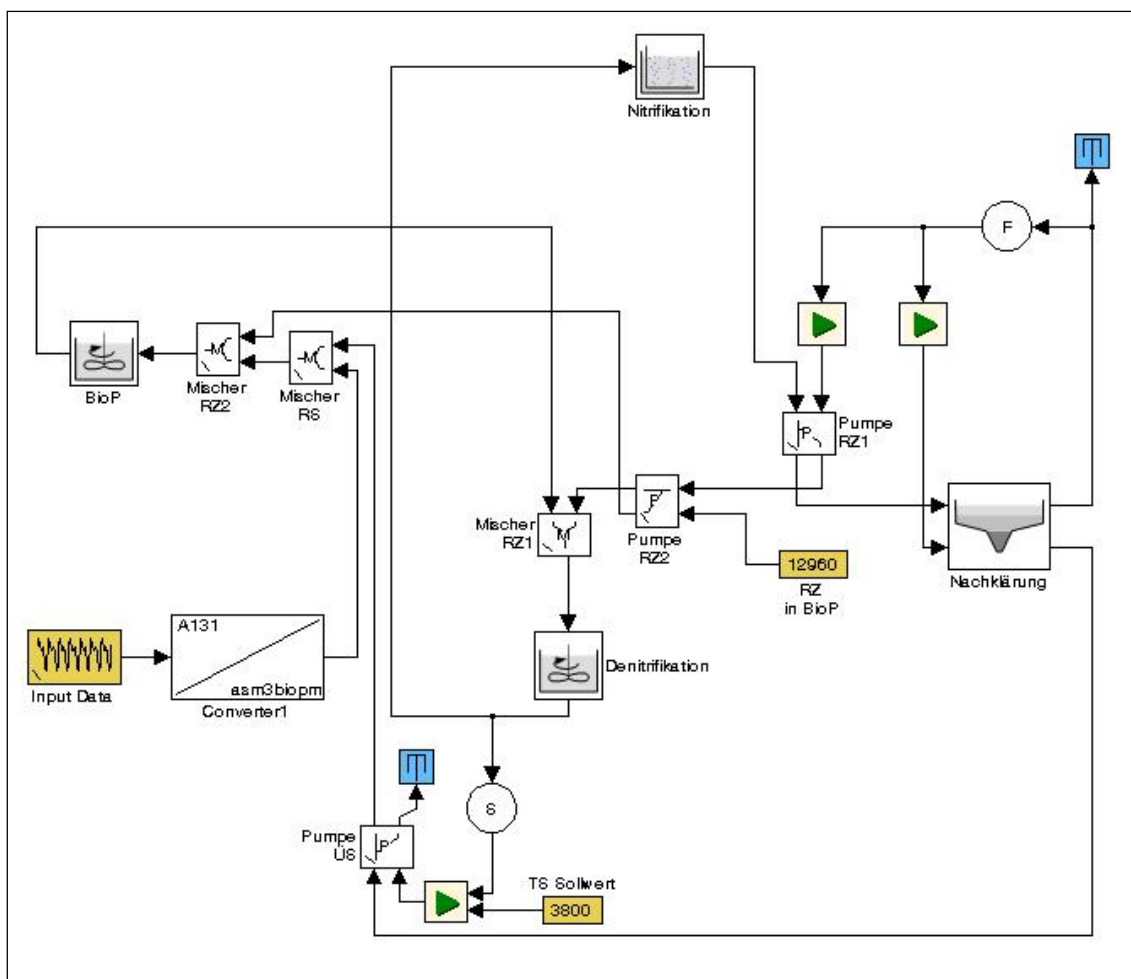


Abbildung 27: Umnutzung des Bio-P-Beckens als Denitrifikation im Stufenausbaukonzept 1

Durch die Rezirkulation einer Teilmenge in das Bio-P-Becken werden im Bio-P-Becken nicht wie derzeit anaerobe, sondern anoxische Verhältnisse vorherrschen. Durch das vermehrt anwesende Nitrat wird sich der Bio-P-Effekt vermindern und damit der Fällmittelbedarf geringfügig erhöhen. Somit ist bei dieser Maßnahme mit etwas erhöhten Betriebskosten zu rechnen. Die Ergebnisse sind zusammen mit denen des Stufenausbaukonzepts 2 in der Abbildung 28 dargestellt.

### 7.1.5 Stufenausbaukonzept 2: Vergrößerung des Denitrifikationsvolumens

In diesem Stufenausbaukonzept wird untersucht, welche Auswirkungen eine Verdoppelung des Denitrifikationsvolumens auf die Stickstoffabbauleistung der Kläranlage hat. Dazu wird im Modell das Volumen der bestehenden Denitrifikationsbecken entsprechend vergrößert. Bei doppeltem Denitrifikationsvolumen ist der  $\text{NO}_3$ -Abbau in der Denitrifikation fast komplett, aber es muss mit einem erhöhten ISV aufgrund der geringeren Schlammbelastung gerechnet werden.

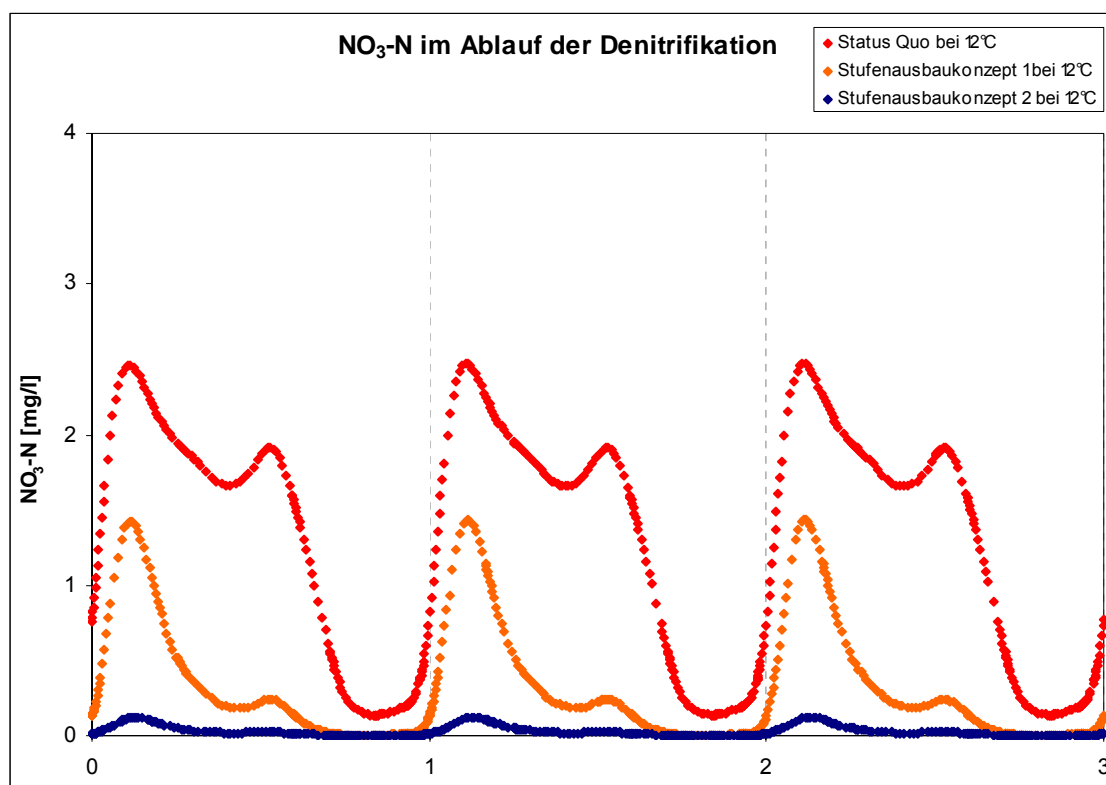


Abbildung 28:  $\text{NO}_3$  im Ablauf der Denitrifikation der Stufenausbaukonzepte 1 und 2

Die Rezirkulation von 150 l/s hat nahezu dieselben Auswirkungen auf den Stickstoffabbau wie eine Verdoppelung des Denitrifikationsvolumens, wobei die Investitionskosten bei einer Verdoppelung des Denitrifikationsvolumens deutlich höher liegen. Eine Reduzierung von  $N_{\text{ges}}$  im Ablauf der Kläranlage von ca. 1,0 mg/l bzw. 1,5 mg/l kann erreicht werden.

### **7.1.6 Stufenausbaukonzept 3: Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation durch Halbierung der Vorklärung**

Die Aufenthaltszeit des Abwassers in der Vorklärung von mehr als zwei Stunden bei Trockenwetter führt zu einer hohen Kohlenstoffelimination. Dadurch kann es zu fehlenden Kohlenstofffrachten für eine ausreichende Denitrifikation kommen. Ein zusätzlicher Kohlenstoffeintrag in die Denitrifikation durch eine externe Kohlenstoffquelle kann die Leistung der Denitrifikation erhöhen. Ziel dieser Variantenuntersuchung ist die Optimierung der Abbauleistung von Nitratstickstoff in der Denitrifikation.

Die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts in der Denitrifikation wird in der Simulation über einen erhöhten CSB-Zulaufwert berücksichtigt, da dieser im Wesentlichen aus Kohlenstoffanteilen besteht. Die Auswirkung der verkleinerten Vorklärung auf den verfügbaren Kohlenstoff muss anhand von zwei Aspekten betrachtet werden. Einerseits steigt die insgesamt verfügbare Menge von Kohlenstoff, andererseits verschiebt sich das Verhältnis von gelösten zu partikulären Stoffen, da eine Erhöhung des CSB im Ablauf der kleineren Vorklärung vor allem eine Erhöhung der partikulären Substanzen darstellt. Die Verschiebung des Schwerpunktes von gelösten zu partikulären Substanzen wird bei der Fraktionierung des CSB im SIMBA-Modellblock „ASM3BioPm-Converter“ berücksichtigt. Die gestiegene Gesamtmenge von CSB wurde anhand der Messungen im Zulauf und Ablauf der Vorklärung in den Jahren 2004 bis 2006 bei verkürzten Durchlaufzeiten des Abwassers an Regentagen in der Vorklärung geschätzt. Dabei wurde ein ca. 14 %ig höherer Anteil von CSB im Ablauf der halbierten Vorklärung überschlägig ermittelt.

Die Ergebnisse dieses Stufenausbaukonzeptes sind in Abbildung 30 dargestellt.

### **7.1.7 Stufenausbaukonzept 4: Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation durch den Einsatz einer externen C-Quelle**

Alternativ zu der Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation durch die Halbierung der Vorklärung im Stufenausbaukonzept 3, wird in dieser technischen Variante der Einsatz einer externen C-Quelle untersucht. Dazu wird die Zugabe von leicht verfügbaren CSB in den Zulauf zur Denitrifikation simuliert (siehe Abbildung 29). Als Kohlenstoffquelle wird eine 100 %ige Essigsäurelösung angenommen, da diese im Gegensatz zu Methanol auch bedarfsweise z. B. bei Stickstoff-Frachtspitzen eingesetzt werden kann. Die externe Kohlenstoffquelle erhöht ausschließlich den Anteil von gelösten abbaubaren CSB ( $S_S$ ). Der CSB von Essigsäure wird entsprechend ATV-DVWK-A 131 mit 1.135 g/l angenommen. Der Ver-

brauch der C-Quelle kann auf beliebige andere Kohlenstoffquellen über die in der Simulation eingesetzt Menge und mithilfe des Molgewichts umgerechnet werden. Essigsäure besitzt als 100 %ige Lösung ein Molgewicht von 60,05 g/Mol und eine Dichte von 1,05 g/cm<sup>3</sup>.

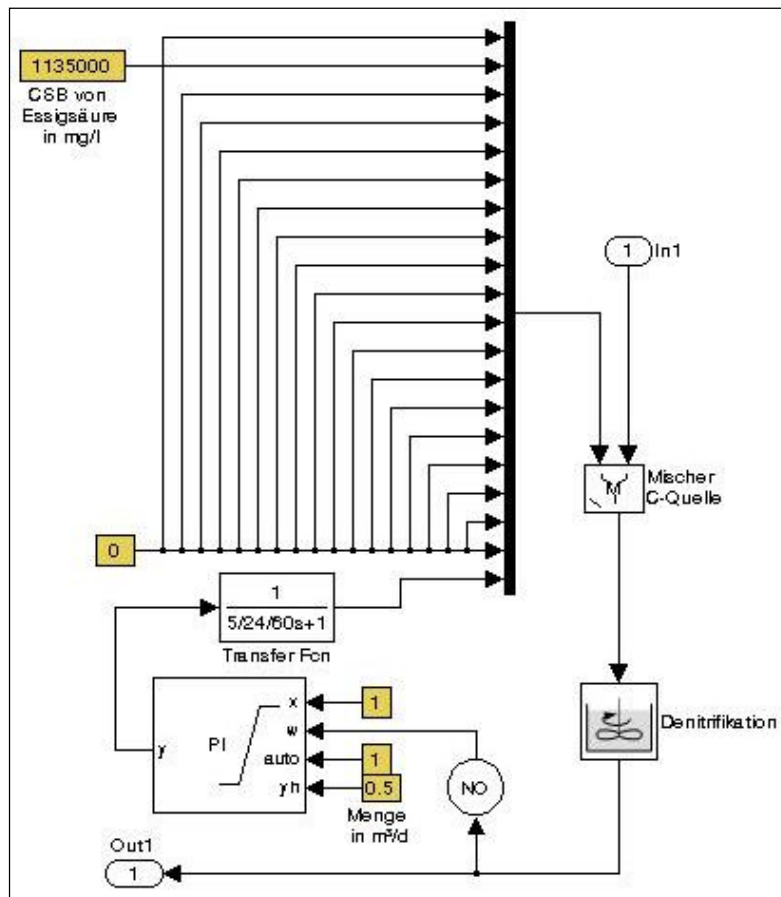


Abbildung 29: Modellierung der Regelung der C-Quelle im Stufenausbaukonzept 4

In Abbildung 29 ist die Regelung der Kohlenstoffzugabe im Stufenausbaukonzept 4 dargestellt. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentration im Ablauf der Denitrifikation wird an einen PI-Regler weitergegeben. Übersteigt der NO<sub>3</sub>-N-Gehalt 1 mg/l im Ablauf der Denitrifikation, so wird Essigsäure in den Zulauf zur Denitrifikation zugegeben. Dazu wird ein Vektor mit den in ASM3BioPm definierten Fraktionen erstellt. Die Fraktion S<sub>S</sub> (gelöster abbaubarer CSB) erhält den CSB von Essigsäure von 1.135.000 mg/l. Die Menge Q wird über den PI-Regler eingestellt. Alle anderen Fraktionen werden gleich Null gesetzt. Um die Regelungstechnik in Realität abzubilden und um Schwingungen der Regelungstechnik zu verhindern, wird das Messsignal aus dem PI-Regler mindestens fünf Minuten gehalten.

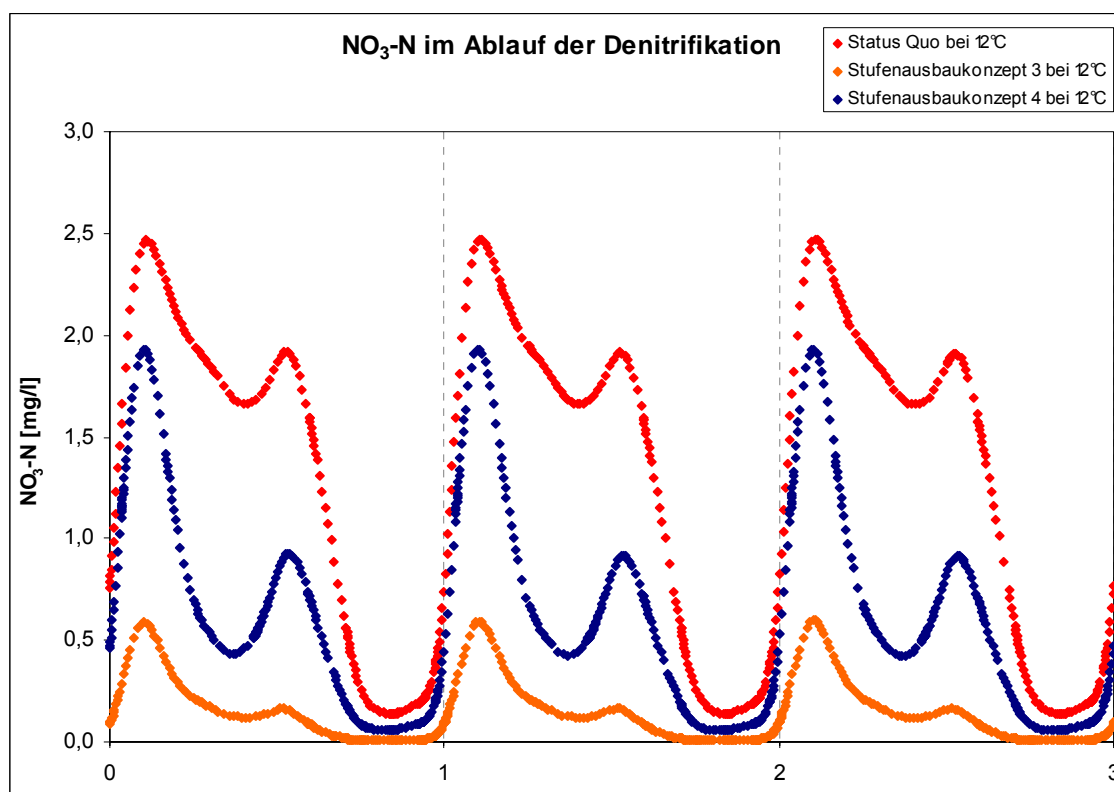


Abbildung 30: NO<sub>3</sub>-N im Ablauf der Denitrifikation in den Stufenausbaukonzepten 3 und 4

Durch das verbesserte C:N-Verhältnis steht mehr Kohlenstoff zum Abbau von NO<sub>3</sub> in der Denitrifikationsstufe zur Verfügung. Damit ist eine Reduktion von ca. 2,0 mg NO<sub>3</sub>/l bei halbiertes Vorklärunge und bis ca. 1,0 mg NO<sub>3</sub>/l beim Einsatz einer externen C-Quelle möglich. Eine zusätzliche Dosierung von Kohlenstoff bei halbiertes Vorklärunge ist nicht erforderlich. Beim Einsatz einer externen C-Quelle werden jedoch auch die Betriebskosten durch den Verbrauch von Essigsäure steigen.

Insgesamt weisen die Untersuchungen zur Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit auf einen Mangel von Kohlenstoff in der Denitrifikationsstufe hin. Dadurch können die Nitrat-Frachten nicht ausreichend denitrifiziert werden. Wird das C:N-Verhältnis durch Erhöhung der Kohlenstoffverfügbarkeit in der Denitrifikation verbessert, so kann die Abbauleistung von Stickstoff und damit die Reinigungsleistung der Kläranlage erhöht werden.

### 7.1.8 Stufenausbaukonzept 5: Optimierung des Stickstoffabbaus durch Erhöhung der Rezirkulation

Die Ablaufkonzentration von  $\text{NO}_3$  wird u. a. durch das Rezirkulationsverhältnis bestimmt. Dieses ist mithilfe der Rezirkulationspumpen auf das derzeit 3,3fache der Ablaufmenge geregelt. In Regenwetterzuflüssen sinkt es jedoch aufgrund der Maximalförderleistung von 550 l/s je Pumpe auf Werte unter 2 bzw. in Nachtzufüssen aufgrund der Minimalförderleistung von 246 l/s je Pumpe auf Werte über 10. In diesem Stufenausbaukonzept soll die Optimierung der Stickstoffabbauleistung durch die Veränderung des Rezirkulationsverhältnisses bzw. der minimalen und maximalen Förderleistung der Rezirkulationspumpen erfolgen. Dazu wird im Modell keine Begrenzung der Förderleistung der Rezirkulationspumpen nach oben und nach unten angesetzt.

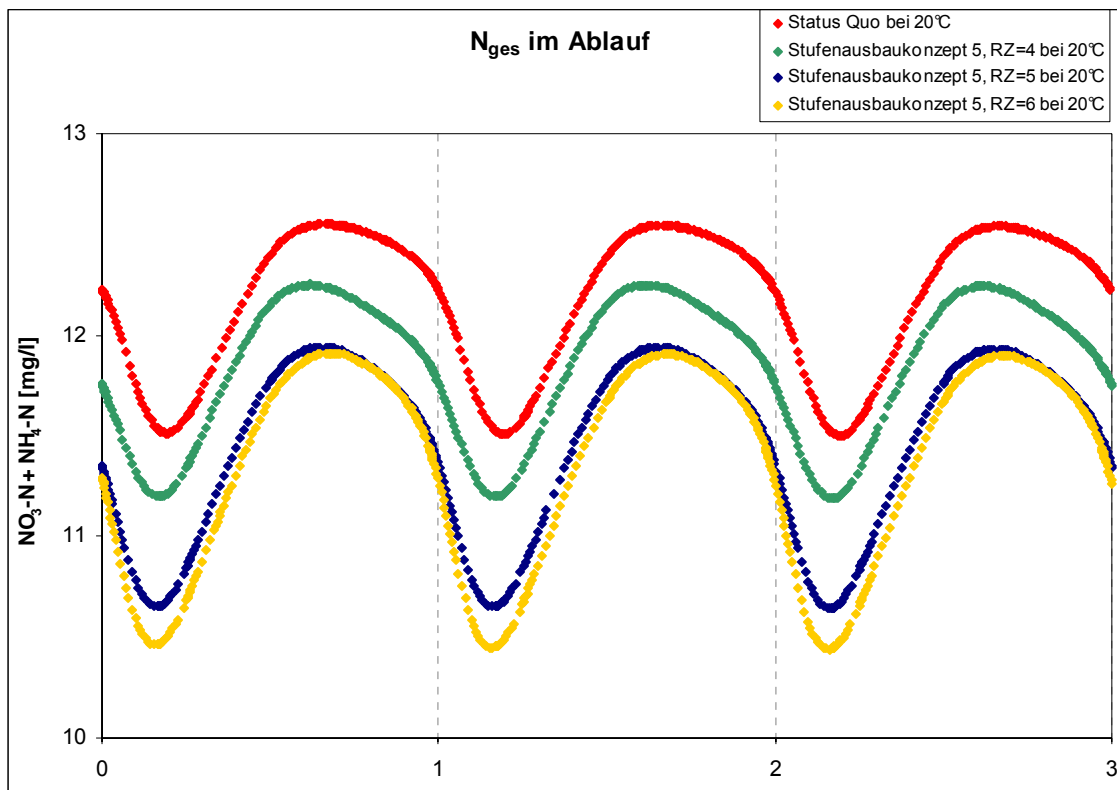


Abbildung 31:  $N_{\text{ges}}$  im Ablauf beim Stufenausbaukonzept 5

Bei einem RZ-Verhältnis von  $\text{RZ} = 4,0$  kann eine Verringerung von ca.  $0,3 \text{ mg } N_{\text{ges}}/\text{l}$  im Ablauf der Kläranlage erreicht werden, ebenso von ca.  $0,6 \text{ mg } N_{\text{ges}}/\text{l}$  bei  $\text{RZ} = 5,0$ . Bei  $\text{RZ} = 6,0$  ist keine wesentliche Verbesserung festzustellen. Es ist jedoch bei steigendem RZ-Verhältnis auch mit einer erhöhten Sauerstoffverschleppung in die Denitrifikation zu rechnen. Eine Erhöhung des

Rezirkulationsverhältnisses ist sinnvoll, solange das Denitrifikationsvolumen ausreichend ist. Der Aufwand für bauliche und ausrüstungstechnische Erneuerungen, z. B. Ersetzen der Pumpen und Vergrößerung der Leitungsquerschnitte, stehen jedoch nicht im Verhältnis zu den geringen Verbesserungen der Stickstoffablaufwerte dieses Stufenausbaukonzeptes.

### **7.1.9 Zusammenfassung und Bewertung des Referenzbeispiels 1**

Durch verschiedene bauliche und betriebliche Optimierungsansätze konnten durch den Einsatz von dynamischen Simulationsmodellen an einer Beispielanlage Stufenausbaukonzepte untersucht und bewertet werden. Es ist eine Kapazitätssteigerung von bis zu 2,0 mg  $N_{ges}/l$  im Ablauf der Kläranlage möglich. Investitionen in betriebliche Optimierungen von voraussichtlich unter 1 Mio. EUR stehen einem Neubau eines Denitrifikationsbeckens und einer dadurch wahrscheinlichen Vergrößerung der Nachklärung entgegen. Bei Umsetzung der Optimierungen sind ausreichende Leistungsreserven für eine wachsende Belastung ohne einen Neubau von Becken bei gleichzeitiger Steigerung der Reinigungsleistung und Erhöhung der Betriebssicherheit möglich.

Wie durch dynamische Simulationsmodelle berechnet, dominieren in diesem Beispiel die betrieblichen Optimierungen gegenüber baulichen Neuinvestitionen wie z. B. Neubau eines Denitrifikationsbeckens.

## **7.2 Referenzbeispiel 2**

### **7.2.1 Allgemeines**

Im Referenzbeispiel 2 wird ein Stufenausbaukonzept für eine Kläranlage in einem tropischen Schwellenland untersucht und auf Basis konkreter Planungskonzepte mit technischen und Kostenzahlen hinterlegt analysiert. Im Kontext zu Referenzbeispiel 1 (Kläranlage in Deutschland) werden die besonderen Anforderungen für die Anwendung von Abwasserkonzepten in Entwicklungs- und Schwellenländern deutlich.

Der ausgewählte Fall betrifft eine Kommune mit mehreren Industriezonen in Nordvietnam, weil im Rahmen eines anderen BMBF-Projektes Kontakte bestanden und auch umfangreiche Abwasserdaten erhoben werden konnten, insbesondere auch zu den industriellen Einleitern. Finanziert aus Mitteln der Entwicklungshilfe, hatte es auch für diesen Standort schon konkrete Projektplanungen gegeben, die auf

einem Sofortausbau auf die prognostiziert erforderliche Endkapazität hinausliefern, für eine herkömmliche Belebungsanlage.

Das Ziel der Untersuchung im Rahmen des BMBF-Vorhabens bestand darin, eine Alternative für den Bau einer herkömmlichen Belebungsanlage aufzuzeigen und so vergleichsweise geringe Investitions- und Betriebskosten zu erreichen. Aufgrund der bestehenden Vorarbeiten und Synergie der genannten BMBF-Projekte war es dann auch in der Tat möglich, das Stufenausbaukonzept für den Fall 2 so detailliert durchzuarbeiten, dass die Zielaussage sich tatsächlich auch verifizieren ließ, nämlich „günstigere Kosten bei gleicher technischer Leistung“ und „verringertes technisches Risiko durch Anpassungsflexibilität an die Zukunftsentwicklung“.

Obwohl es sich hier von der Datenlage her um einen günstigen Fall handelte, muss immer noch konstatiert werden: Insbesondere hinsichtlich der Datenlage besteht bei Projekten in Schwellenländern ein deutlicher Unterschied zu Projekten in konsolidierten Industriestaaten, was auch den wesentlichen Unterschied zwischen Referenzbeispiel 2 und Referenzbeispiel 1 ausmacht. Während in Deutschland, basierend auf der großen und detaillierten Datenlage, ein Feinstuning durch Optimierung der verschiedenen Reinigungsprozesse möglich ist, sind aufgrund der dynamischen Entwicklung in Vietnam ausschließlich Grobdaten für die Auslegung von Kanalnetzen und Kläranlagen verfügbar. Eine Plausibilitätsprüfung dieser Daten ist meist erforderlich. Im Referenzbeispiel 2 sind optimistische Ansätze „auf der sicheren Seite“ in Zusammenarbeit mit der verantwortlichen Behörde gewählt worden.

### **7.2.2 Beschreibung des Referenzbeispiels 2**

Für die gemeinsame Behandlung von kommunalen und industriellen Abwässern (anstelle der getrennten Abwasserklärung für Industriezone und Kommune; das war eine vorausgegangene Grundsatzentscheidung auf Planungsebene) der vorgenannten Stadt ist die Errichtung einer Kläranlage „auf grüner Wiese“ für 65.000 EW geplant. Der mittlere Zufluss beträgt 17.572 m<sup>3</sup>/d bei einer Stunden Spitze von 1.172 m<sup>3</sup>/h. Die BSB<sub>5</sub>-Fracht beträgt im Tagesmittel 3.898 kg/d, dies entspricht einer Konzentration im Tagesmittel von ca. 220 mg BSB<sub>5</sub>/l.

Für die Auslegung soll eine Alternative zum Bau einer herkömmlichen Belebungsanlage aufgezeigt werden. Dabei steht die Minimierung von Investitions- und Betriebskosten (Personal-, Wartungs- und Energiekosten) im Vordergrund. Im Zuge eines stufenweisen Ausbaus werden daher die folgenden Verfahrenskomponenten ausgewählt:



1. Ausbaustufe: zwei redundante Feinrechen zur Abtrennung von Grobstoffen, zwei Absetzteiche zur Abtrennung organischen Schlammes, biologischen Stabilisierung des Schlammes und anoxischen Vorbehandlung des Abwassers, zwei Oxidationsteiche zur Abwasserreinigung mithilfe von Algen. Die Absetzteiche dienen gleichzeitig als Schlammstapelraum.
2. Ausbaustufe: zwei Sequencing-Batch-Reaktoren (SBR) als nachgeschaltete Reinigungsstufe zum Abbau von BSB<sub>5</sub> sowie bei Bedarf zur Nitrifikation und Denitrifikation, evtl. auch zur Phosphorelimination.
3. Ausbaustufe: UV-Filtration zur Elimination von Keimen.

Die Auslegung der Verfahrenstechnik folgt dem PETRO-Prinzip (PETRO = pond enhanced treatment operations). Bei PETRO wird durch eine intelligente Verschaltung von Komponenten eine Optimierung der Abwasserreinigung erreicht. Kennzeichen von PETRO ist z. B. die Rezirkulation eines Teils des Ablaufs aus den Oxidationsteichen in den Zulauf. So entsteht eine anoxische Schicht auf dem abgesetzten Schlamm in den Absetzteichen, in der die aus dem Schlamm entweichenden Geruchsstoffe eliminiert werden. So werden von vornherein Geruchsprobleme verhindert. In den Oxidationsteichen wird bei Sonneneinstrahlung durch Algen Sauerstoff angereichert, wobei die Algen in der nachfolgenden Reinigungsstufe (SBR) auch als leicht abbaubarer Kohlenstoff dienen (z. B. für die Denitrifikation). Im Feinrechen und in den Teichen wird zusammen ca. 50 % des BSB<sub>5</sub> abgebaut, so dass

- energieverbrauchende Einheiten durch eine intelligente Anordnung von Anlagenteilen ersetzt werden,
- eine einfachere Bedienbarkeit und ein robustes Abwasserreinigungssystem geschaffen wird,
- eine integrierte Schlammstabilisierung bei Verhinderung von Geruchsproblemen erfolgt und
- deutliche Einsparmöglichkeiten der Investitions- als auch Betriebskosten im Vergleich zu einer Ausführung nach dem herkömmlichen Belebungsverfahren zu erwarten sind.

Die einzelnen Ausbaustufen sollen nach Bedarf beauftragt und gebaut werden. Dadurch soll insbesondere eine Angleichung an den tatsächlichen Reinigungsbedarf geschaffen werden. Im Folgenden werden die einzelnen Ausbaustufen detailliert dargestellt.

### 7.2.3 1. Stufenausbau: Teichkläranlage

Im ersten Stufenausbaukonzept soll das Abwasser in einer Teichkläranlage mechanisch und biologisch gereinigt werden. Dazu ist eine Anordnung von Feinrechen, Absetzteichen und Oxidationsteichen vorgesehen. Zur Ermöglichung einer Außerbetriebnahme aller Anlagenteile, z. B. zur Schlammräumung, sind alle Komponenten redundant ausgelegt. Ein Teil des Abflusses aus den Oxidationsteichen wird in den Zufluss zu den Absetzteichen rezirkuliert (ca. 25 %).

Die Feinrechen mit 3 mm Öffnungsweite werden auf den Stundenspitzenzufluss von 1.172 m<sup>3</sup>/h ausgelegt. Damit erreichen sie einen BSB<sub>5</sub>-Eliminationsgrad von ca. 5 %.

Die Absetzteiche besitzen eine Tiefe von 2 bis 5 m inklusive der Schlammstapelzone. Das Volumen der Reinigungszonen beträgt damit 2 x 3.650 m<sup>3</sup>, das Volumen der Schlammstapelzonen 2 x 2.850 m<sup>3</sup>. Die große Schlamm-speicherung ermöglicht eine Langzeitabsetzung des Schlammes bei gleichzeitiger Schlammstabilisierung. In der anoxischen Reinigungszone erfolgt eine biologische Vorbehandlung des Abwassers.

Die Oxidationsteiche besitzen eine Tiefe von 2,5 m. Die Teichvolumina betragen somit 2 x 4.200 m<sup>3</sup>. Die natürliche Sauerstoffanreicherung aus der umgebenden Atmosphäre wird durch die Sauerstoffproduktion der im Oxidationsteich vorhandenen Algen verstärkt.

Die Rezirkulationsrate beträgt 0 bis 25 % (entsprechend bis 183 m<sup>3</sup>/h). Für die Rezirkulation werden zwei redundante Pumpen sowie ein Trennbauwerk mit Schiebern eingerichtet. Die Fördermenge kann entsprechend der Belastung gewählt werden. Aufgrund des geringen Fließverlustes beträgt die Förderhöhe nur 20 cm. Durch die Rezirkulation herrschen in der oberen Durchflusszone der Absetzteiche anoxische Verhältnisse. Das in der anaeroben Schlamm-schicht entstehende Gas wird in der anoxischen Schicht abgebaut und kann somit nicht entweichen und Geruchsprobleme verursachen.

Ein Schlamm-speicherbehälter ist nicht erforderlich, da diese Funktion bereits in den Teichen integriert ist. Die Schlammräumung der Teiche muss in regelmäßigen Abständen erfolgen. Nach Erfahrungen auf der Kläranlage Ho Chi Minh City sind halbjährliche Reinigungszyklen realistisch. Bei Schlammräumung eines Teiches wird der Zulauf zu diesem Teich unterbrochen und die Abwasserreinigung erfolgt durch die anderen Reinigungskomponenten. Die Redundanz aller Anlagenteile

verhindert jedoch einen Komplettausfall der Kläranlage und garantiert somit eine fortlaufende Einhaltung der Einleiterwerte.

Das Gesamtreinigungsvolumen der Teichkläranlage beträgt somit 15.700 m<sup>3</sup>. Die mittlere Durchflusszeit des Abwassers durch die Teiche berechnet sich auf 0,9 Tage. Der BSB<sub>5</sub>-Eliminationsgrad in Abwasserteichen beträgt ca. 45 %. Damit wird zusammen mit den Feinrechen in der ersten Reinigungsstufe die Hälfte der ankommenden BSB<sub>5</sub>-Fracht eliminiert.

#### 7.2.4 2. Stufenausbau: SBR

Als 2. Ausbaustufe der Kläranlage werden zwei SBR (siehe auch Kapitel 5.2.3) eingesetzt. In Kombination mit den Abwasserteichen stellt der Einsatz der SBR-Technologie eine geeignete Weiterentwicklung dar. Die Teiche dienen dabei als Vorbehandlungs- und Speicherstufe.

Die SBR werden auf eine Reinigungsleistung von 50 % des BSB<sub>5</sub> (entsprechen 1.949 kg BSB<sub>5</sub>/d) bemessen. Erfolgt die Bemessung überschlägig über die Austauschrate, so gilt näherungsweise:

$$\text{Volumenaustauschverhältnis } f_A: V_{\text{Zufluss pro Zyklus}} / V_{\text{Vollfüllung}} \leq 0,5$$

$$\begin{aligned} \text{Gesamtreaktorvolumen } V_{R,\text{total}}: & Q_d \cdot (t_Z / 24) / f_A \\ & = 17,572 \times (4 / 24) / 0,5 \\ & = 5,857 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen je Reaktor } V_R: 5,857 / 2 = 2,929 \text{ m}^3$$

$$\text{Schlammstapelzone je SBR: } 800 \text{ m}^3$$

$$\text{Gesamtvolumen je SBR: } 3,729 \text{ m}^3$$

Folgende Zyklenaufteilung wurde für die SBR-Fahrweise gewählt:

<b>SBR A</b>		
Füllung		
Vermischung		
Belüftung		
Sedimentation		
Klarwasserabzug		

<b>SBR B</b>		
Füllung		
Vermischung		
Belüftung		
Sedimentation		
Klarwasserabzug		

Die Austauschbarkeit der beiden SBR führt dazu, dass stets ein konstanter Abwasserstrom abgereinigt werden kann. Die abwechselnden Zyklen der SBR führen zu einem geringen Gleichzeitigkeitsfaktor im Strombezug, was sich wiederum positiv auf die Betriebskosten auswirkt. Eine simultane Schlammstabilisierung wird durch das große Schlammstapelvolumen realisiert. Überschussschlamm muss in regelmäßigen Abständen entfernt werden.

Die SBR sind jeweils mit zwei Dekantern für einen Klarwasserabzug von 620 m<sup>3</sup>/h ausgestattet. Bei der Auslegung der Belüfter ist darauf zu achten, dass bereits 50 % des BSB<sub>5</sub> in der 1. Ausbaustufe gereinigt ist. Die Sauerstoffeintragsrate berechnet sich auf jeweils ca. 100 kg O<sub>2</sub>/h. Insgesamt vier Oberflächenbelüfter ( $\alpha$ OC = 50 kg O<sub>2</sub>/h) versorgen die Biomasse mit ausreichend Sauerstoff.

Für eine funktionierende Steuerung der SBR sind entsprechende Sauerstoff- und Füllstandsmessungen erforderlich. Die automatische Steuerung ist in einem Kontrollschrank neben den SBR angeordnet. Das Klärwerkspersonal muss in die Programmierung der Steuerung eingewiesen sein, um Änderungen der spezifischen Zyklenprogramme, z. B. für die Regensaison, vornehmen zu können.

### **7.2.5 3. Stufenausbau: UV-Bestrahlung**

Zur Eliminierung von Keimen wird als 3. Ausbaustufe eine UV-Bestrahlung in den Klarwasserablauf eingebaut. Die UV-Bestrahlung zeichnet sich durch eine hohe Robustheit und hohe Prozessstabilität aus. Die Reinigungsleistung umfasst ca. 1 bis 3 log.-Einheiten der pathogenen Keime wie Viren, Bakterien und Protozoen.

Im rechteckigen Ablaufgerinne werden die UV-Strahler mit einer Leistung von jeweils 25 W installiert. Die Abmessung des Gerinnes beträgt ca. 1,2 m Tiefe, 1,3 m Breite und 15 m Länge. Die Schaltanlagen und Einrichtungen für Reinigung und Wartung der UV-Module werden zu beiden Seiten des Gerinnes untergebracht. Das Personal muss in die Handhabung der UV-Strahler insbesondere für Instandhaltungsmaßnahmen eingewiesen werden.

Um eine wirtschaftliche Auslegung der UV-Bestrahlung zu erreichen, sollten vor Errichtung der 3. Ausbaustufe Untersuchungen über einen längeren Zeitraum zur Bestimmung der Grunddaten für die Betriebsanlage stattfinden. Insbesondere die Parameter Transmission, abfiltrierbare Stoffe, Hydraulik, Reduktionsleistung, Belagbildung usw. müssen abwasserspezifisch bestimmt werden.

### **7.2.6 Vorteilhaftigkeitsbetrachtung**

Das Stufenausbaukonzept wurde bemessen und im Sinne eines vereinfachten Vorentwurfes durchgeplant (basierend auf den Grundstücksplänen und abwasser- sowie bautechnischen Daten, die zum Teil vorlagen und zum Teil von den Verfassern komplettiert und verifiziert werden mussten). Basierend auf dieser Vorlage ist eine Kostenkalkulation durchgeführt worden, in Kooperation mit lokalen Unternehmen und im Abgleich mit den Einheitspreisen eines internationalen Anlagenbauers, der in der Region tätig ist.

Diese Arbeitsergebnisse sind wissenschaftlich möglicherweise nicht interessant, waren zur Verifizierung der Zielaussagen aber erforderlich. Aus Platzgründen können Details in den Schlussbericht nicht übernommen werden. In der nachfolgenden Abbildung ist das Fließschema der Anlage dargestellt, außerdem verkleinert ein Lageplan. In der Anlage ist außerdem eine Kurzbemessung enthalten sowie Eckpunkte für die Kostenkalkulation.

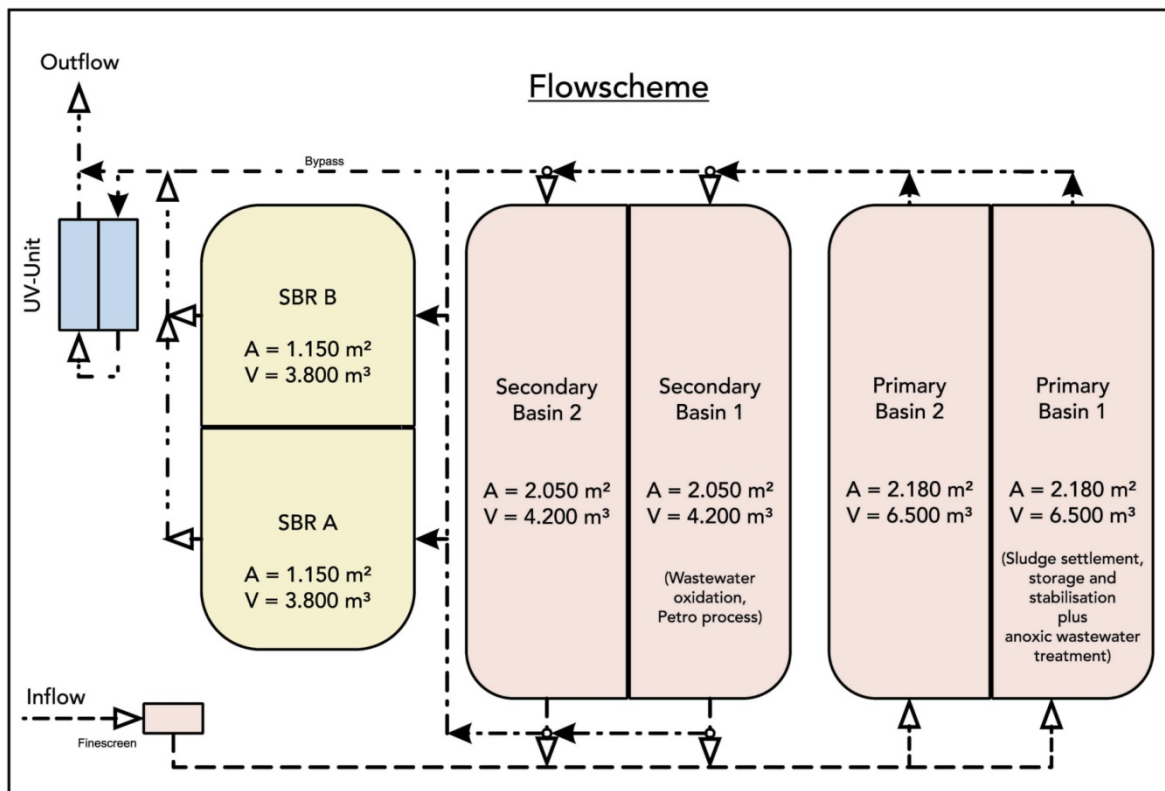
Im Ergebnis war diese Lösung (gemessen am Projektkostenbarwert, ermittelt nach betriebswirtschaftlichen Komponenten, d. h. ohne Einrichtung volkswirtschaftlicher Vorteile, die durch den höheren lokalen Anteil sicherlich anfallen) um über 30 % günstiger als eine Ausführung nach dem herkömmlichen Belebungsverfahren.

Die technischen Vorteile durch die Anpassungsflexibilität (die späteren Ausbaustufen können bei Änderungen der Entwicklungsgeschwindigkeit oder anderer Zusammensetzung der Abwässer entsprechend modifiziert werden, was bei Sofortausbau nicht möglich bzw. nur im Nachhinein mit aufwendigen Umbaumaßnahmen) lassen sich quantifizieren, dürften aber als erheblich betrachtet werden.

### **7.2.7 Zusammenfassung und Bewertung des Referenzbeispiels 2**

Im Kapitel 7.2 ist die Errichtung einer Kläranlage für eine vietnamesische Stadt dargestellt. Unter der Randbedingung, eine möglichst investitions- und betriebskostenoptimierte Variante zu erstellen, wurde ein 3-stufiges Ausbaukonzept mit Teichkläranlage, SBR und UV-Bestrahlung dargestellt. Durch den Einsatz des PETRO-Prinzips (PETRO = pond enhanced treatment operations) wird durch eine intelligente Verschaltung von Komponenten eine Optimierung der Abwasserreinigung erreicht.

Speziell der Energiebedarf der Oberflächenbelüfter in den SBR sowie die Rezirkulationspumpen wurden auf ein Minimum reduziert. Überschlägig ergibt sich somit eine Energieeinsparung von ca. 50 % gegenüber einer herkömmlichen Belebungsanlage. Zusätzlich beinhaltet das gewählte System die vollständige Schlammstabilisierung in den Absetzteichen. Auch bei Ausfall der Stromversorgung ist ein kontinuierlicher Fluss durch die Anlage bei verringerter, aber vorhandener Reinigungswirkung gewährleistet. Die Verringerung sowohl der Investitions- als auch der Betriebskosten im Vergleich zum herkömmlichen Belebungsverfahren konnte mithilfe des vorliegenden Stufenausbaukonzeptes erreicht werden.



Legende:




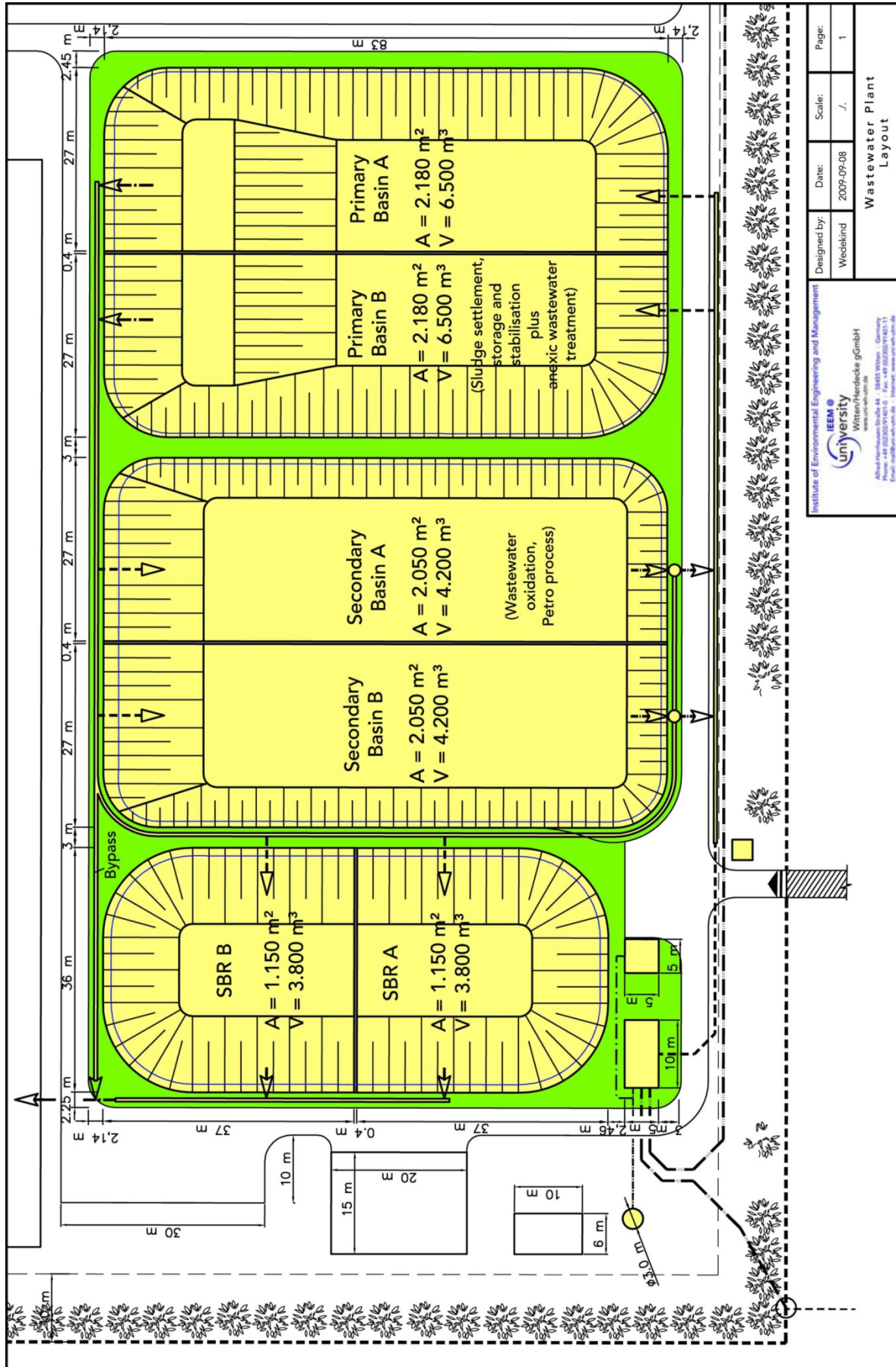

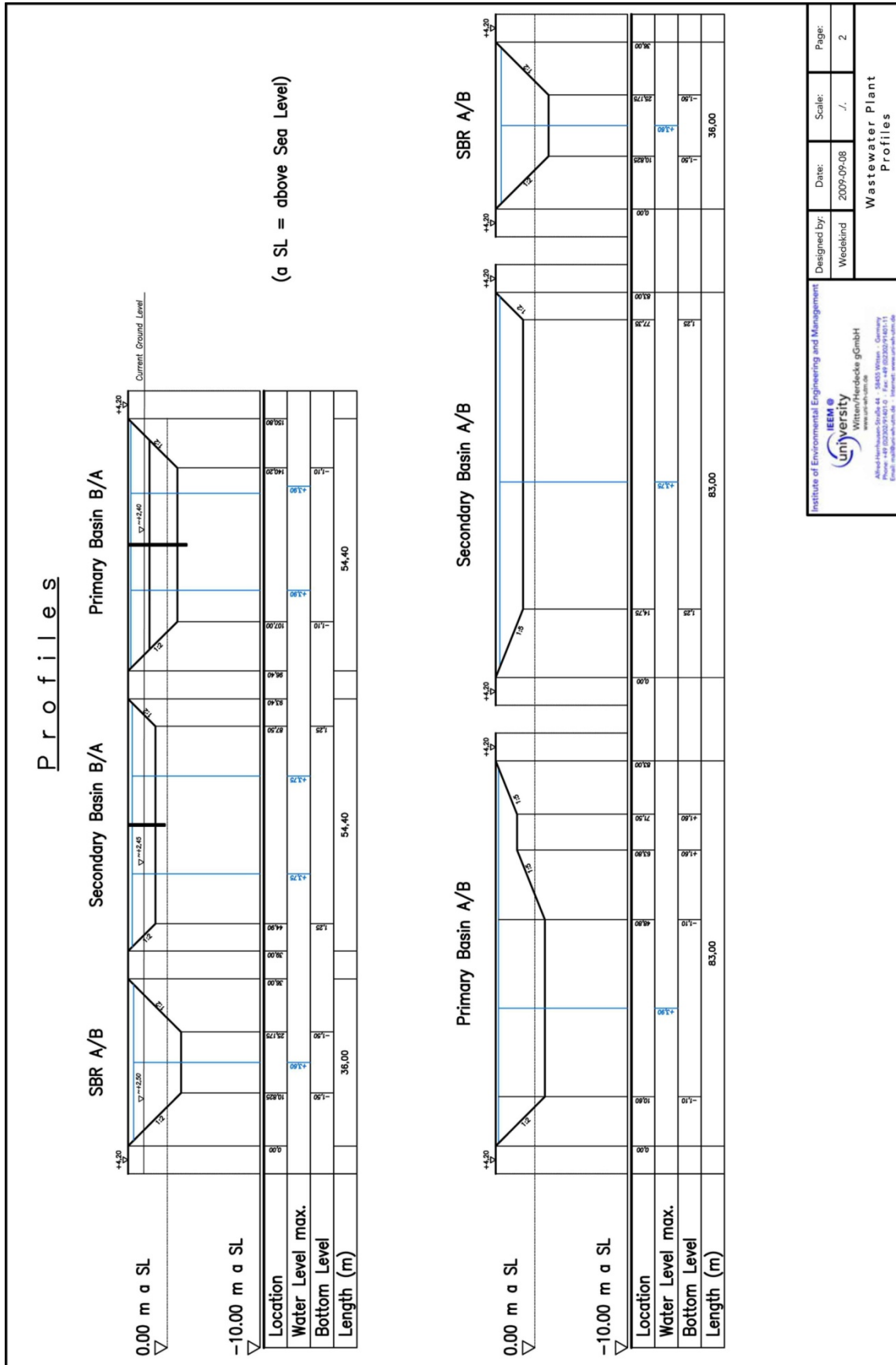
Ausbaustufe	Reinigungsleistung [Standard ADC]	Ausbaugröße [EW]	spezifische Investitionskosten* [EUR]	spezifische Betriebskosten* [EUR]
	B	35.000	gering	gering
	A <sup>-</sup>	65.000	gering - mittel	gering - mittel
	A <sup>+</sup>	65.000	mittel	mittel

Abbildung 32: Fließschema für Referenzbeispiel 2  
(\* nach Checkliste für technisch-wirtschaftliche Kriterien)



Designed by:		Date:		Scale:		Page:	
Wedekind		2009-09-08		/.		1	
<b>Wastewater Plant Layout</b>							
<p><b>IEEM</b>  <b>university</b>          Institute of Environmental Engineering and Management          Witten/Herdecke gGmbH          www.univ-wi.de          Alfred-Herrhausen-Str. 44 · 58353 Witten · Germany          Phone: +49 (0)201 2412-111          Email: info@univ-wi.de · Internet: www.univ-wi.de</p>							





## 8 Zusammenfassung

Zur Klärung von Abwässern unter landesspezifischen Randbedingungen steht eine große Anzahl bewährter Verfahrenstechnik zur Auswahl. Das breite Spektrum reicht von Low-Cost-Ansätzen für eine grundlegende Reinigung einzelner Abwasserparameter bis hin zu High-Tech-Lösungen für höchste Anforderungen an die Elimination von Schadstoffen.

Maßgeblich für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg einer Abwasserreinigungsanlage ist zunächst die sinnvolle Auswahl der geeigneten Technologie entsprechend der Randbedingungen im jeweiligen Einsatzfall. Im Vergleich zu Industrieländern sind Entwicklungs- und Schwellenländer von einer wesentlich dynamischeren Bevölkerungsentwicklung mit einem Trend zur Urbanisierung geprägt. Die Zeithorizonte für den Ausbau von Abwasserreinigungsanlagen sollten daher entsprechend kurzfristig gewählt werden, um vorteilhafte Reaktions- und Anpassungsmöglichkeiten zu erhalten und hohe Schwellenkosten zu vermeiden. Dies lässt sich durch stufenweisen, d. h. den steigenden Anforderungen folgenden, Ausbau verwirklichen.

In der vorliegenden Studie liegt, ausgehend von der Darstellung ausgewählter Komponenten und Verfahren der Abwasserreinigung, die sich für einen stufenweisen Ausbau von Kläranlagen eignen, eine leicht verständliche Matrix zur Eignung der Kombination von Komponenten und Verfahren vor, die mögliche aufeinander aufbauende Stufenausbaukonzepte aufgezeigt und bewertet. Diese Planungshilfe ist als Entscheidungsgrundlage zu verstehen, die eine individuelle Betrachtung nicht ersetzen kann.

Bei der Auswahl geeigneter Verfahren für einen stufenweisen Ausbau sind des Weiteren über die Investitionskosten hinaus die betrieblichen Randbedingungen für die jeweilige Erweiterung zu berücksichtigen. Geschieht dies in unzureichendem Maße, werden trotz günstig und richtig scheinender Investitionen Probleme und Kosten lediglich in die Zukunft verschoben. Um dies zu entschärfen, liegt in übersichtlicher Tabellenform eine Checkliste für technisch-wirtschaftliche Kriterien vor, die über grundsätzliche Entscheidungen hinaus eine Eingrenzung der zu untersuchenden Variantenplanungen unter Einbeziehung von Investitions- und Betriebskosten, Geruchsbelästigung, Energie-, Chemie-, Import-, Grundstücksbedarf und Personalqualifikation erlaubt.

Zur Implementierung von bewährten Abwasserbeseitigungskonzepten in Entwicklungs- und Schwellenländern muss darüber hinaus als Vorabbetrachtung eine Abschätzung des Unterhaltungsaufwands in Bezug auf Versorgungssicherheit von Energie, Betriebsmitteln und Personalqualifikation dienen. In Kombination mit der Matrix zur Eignung verschiedener Kombinationen von Komponenten und Verfahren, stellt die technisch-wirtschaftliche Checkliste eine Diskussionsgrundlage zur Eingrenzung von technisch und ökonomisch erfolgversprechenden Varianten dar.

Anhand mehrerer Beispiele sind mögliche Stufenausbaukonzepte dargestellt, untersucht und bewertet. Des Weiteren sind mithilfe einer Simulation eines Referenzbeispiels Stufenausbaukonzepte exemplarisch angewendet und verifiziert. Neben der sicheren Elimination vorgegebener Parameter, der Angleichung der Reinigungskapazität an den tatsächlichen Reinigungsbedarf, einer höheren Entscheidungsflexibilität hinsichtlich weiterer Stufen, einem geringeren Planungsrisiko, der Verlagerung von Investitionskosten in die Zukunft, der Entlastung des aktuellen Budgets und Reduktion der Kapitalkosten sind vor allem geringe spezifischen Kosten von Projektbeginn an wesentliche Merkmale eines Stufenausbaukonzeptes.

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- Alex, J.; Wichern, M.; Spering, V.; Halft, N.; Ahnert, M.; Frehmann, T.; Hobus, I.; Langergraber, G.; Plattes, M.; Winkler, S.; Woerner, D. (2007): „A method to use dynamic simulation in compliance to stationary design rules to refine WWTP planning“, IWA Publishing 2007
- Ante, A.; Braun, C.; Hasselbach, R.; Janke, H.D. (2007): „Membranbelebung mit belüftetem Vorteich“, in: wwt wasserwirtschaft wassertechnik, Ausgabe August 7-8/2007, S. 17-23
- ATV-A 203: „Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung“, DK 628.33, April 1995
- ATV-DVWK-A 131: „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“, Mai 2000, ISBN 3-933707-41-2
- ATV-M 210: „Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb“, September 1997, ISBN 3-927729-49-3
- Blank, Hoffmann, Hahn (2007): „Integration von schwimmenden Aufwuchskörpern in Belebungsanlagen zur Erhöhung der Sedimentationsleistung von Nachklärbecken“, in: KA-Abwasser, Abfall, 2007 (Jahrgang 54), Nr. 5, Seite 484
- Bogus, B. J. (1989): A Spreadsheet Design Model for the Trickling Filter/Suspended Growth Process, Master's Thesis, University of Washington, Department of Civil Engineering, Seattle, WA.
- Büscher, E. (1995): „Teilreinigung von Abwässern mit hohem Stickstoffgehalt durch Separation und biologische Behandlung mit schwimmenden Scheibentauchkörpern“, Band 12 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Umwelttechnik und Management, Private Univ. Witten/Herdecke, ISBN 3-927112-11-9
- Cavalcanti, P.F.F.; van Handel, A.C.; Kato, M.T.; von Sperling, M.; Ludovice, M.L. und Monteggia, L.O. (2001): Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por lagoas de polimento. In Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, (C.A.L. Chernicharo coordenador), cap 3, FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil, 544 p. (in Portugiesisch)
- Chernicharo, C.A.L.; Cota, R.S.; Zerbini, A.M.; von Sperling, M.; Castro. Brito, L.N. (2001a): „Post-treatment of anaerobic effluents in an overland flow system“, Water Sci. Technol. 44 (4), 229-236
- Chernicharo, C.A.L.; van Handel, A.C.; Cybis, L.F.; Forestri, E. (2001b): „Post treatment of anaerobic effluents in Brazil: state of the art“, in: Proceedings of the 9<sup>th</sup> World Congress on Anaerobic Digestion, Technologisch Instituut, IWA, Netherlands Association for Water Management, Antwerpen, Belgien, Seiten 747-752.
- DWA-A 201: „Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen“, August 2005, 3-937758-86-0
- DWA-A 262: „Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers“, März 2006, 978-3-939057-12-3

- Evenblij, H.; van Nieuwenhuizen, A.; Mulder, J.W. (2007): „Hybrid MBR – the perfect upgrade?“, in: *Water21*, Ausgabe April 2007, S. 25f
- Fuhrmann, T.; Rudolph, K. U. (2009): „Advanced disinfection of wastewater ponds' effluent by UV irradiation“, Vortrag für die 8th IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilization Ponds am 28. April 2009 in Belo Horizonte, Brasilien
- IPCC (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change, „Climate Change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability“, Fourth Assessment Report, Summary for Policymakers, Working Group II of the IPCC, Brussels, April 2007
- Jung, R.; Prechtl, S.; Bischof, F. (2006): „Abwasserreinigung in ariden Klimazonen mit einem Algenreaktor“, in: *Korrespondenz Abwasser, Abfall 2006* (Jahrgang 53), Nr. 11, Seite 1145
- Libhaber, M. (2007): „Appropriate Technology for Wastewater Treatment and Reuse in Developing Countries“, prepared for the International Symposium „Water Supply and Sanitation for All“, September 27-28, Berching, Germany, ISBN 13978-1-84339-514-0
- Menzel, U. (2005): Länderstudie Brasilien, in: „Anforderungen an die Abwassertechnik in anderen Ländern“, Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben 02WA0452, Hrsg. Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, ISBN: 3-9810255-0-4
- Metcalf, L.; Eddy, H.P. (2003): „Wastewater Engineering, Treatment and Reuse“, Fourth Edition, revised by Tchobanoglous, Burton, Stensel. International Edition.
- Platzer, C.; Hoffmann, H. (2008): „Exportchancen deutscher Wasserwirtschaft“, in: *KA- Korrespondenz Abwasser, Abfall 2008* (Jahrgang 55), Nr. 5, Seite 549
- Rudolph, K. U.; Fuhrmann, T.; Harbach, M. (2009): „Economic Criteria and Parameters to Evaluate Wastewater Pond Systems“, Vortrag für die 8th IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilization Ponds am 29. April 2009 in Belo Horizonte, Brasilien
- Rudolph, K.-U. (1999): „Kostenoptimierung der Abwasserentsorgung durch technische und organisatorische Maßnahmen“, in: Kuhnert, L.; Schroedter, W. T. (Hrsg.): *Kosten und Gebühren der Abwasserentsorgung*, PROAQUA-Schriften Band 1
- Rudolph, K.-U.; Block, T. (2005): „Wasserleitfaden – Leitfaden zur Herausbildung leistungsstarker kommunaler und gemischtwirtschaftlicher Unternehmen der Wasserver- und Abwasserentsorgung“
- Schmid-Schmieder, V.; Hasselbach, R. (2006): „Membrananlage mit belüftetem Teich“, in: *wwt 06/2006*, Seite 19
- Sobrinho, P.A.; Jordao, E.P. (2004): „Investigación y Experiencia con es Pos-Tratamiento oara Reactores UASB en Brasil“, in: *Agua Latinoamérica*, Ausgabe November/Dezember 2004, Seiten 17-20 (in Spanisch)

- von Sperling, de Lemos Chernicharo (2005): „Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions“, IWA Publishing
- WEF (2000): Aerobic Fixed-Growth Reactors; A Special Publication, Water Environment Federation, Alexandria, VA.
- Winkler, M.; Stein, S.; Lutscher, B. (2009): „Die Kläranlage Knautnaundorf, Erweiterung der Membranbelebungsanlage von 900 auf 1.500 EW - die ersten Betriebserfahrungen“, in: wwt 1-2/2009, Seite 30
- WSP (2005): „Bio-Filters“, in: „Alternative Technologies for Water Supply and Sanitation in Small Towns“, The World Bank Water and Sanitation Program, April 2005