



# Hochschule Wismar

Fachbereich Verfahrens- und Umwelttechnik

## Diplomarbeit

Untersuchungen des Einflusses einer Zugabe von Folsäure  
auf den Überschussschlammanfall bei der Reinigung  
häuslichen Abwassers mit dem Belebtschlammverfahren

Diplomarbeit zur Erlangung des Grades eines

### **Diplom-Verfahrens- und Umwelttechniker**

der Hochschule Wismar

eingrichtet von: Christian Schuldt                      Matrikel Nr.: 100970  
geboren am 20. Juni 1981 in Ludwigslust  
Studiengang und Immatrikulationsjahrgang: U 2001

Betreuer: Prof. Dr. Ing. Wolfgang Pfeiffer

weiterer  
wissenschaft-  
licher Gutachter:: Prof. Dr. M. Sellner

Groß Laasch, 26. Januar 2006

# **Inhaltsverzeichnis**

## **1. Zusammenfassung**

## **2. Einleitung**

## **3. Stand der Technik**

**3.1.** Grundlagen der biologischen Abwasserreinigung

**3.2.** Aufbau und Eigenschaften von Folsäure

**3.3.** Erfahrungen mit dem Einsatz von Folsäure

## **4. Zielsetzung der eigenen Untersuchungen und Vorgehensweise**

## **5. Planung und Bau der Versuchsanlage**

**5.1.** Planung und Bemessung der Versuchsanlage

**5.2.** Aufbau der Versuchsanlage

**5.3.** Funktionsbeschreibung

**5.4.** Steuerung der Versuchsanlage

**5.5.** Inbetriebnahme

## **6. Durchführung der Versuche**

**6.1.** Versuchsprogramm

**6.2.** Betrieb der Versuchsanlage

**6.3.** Messungen und Analysen

## **7. Versuchsergebnisse**

**7.1.** Verminderung der Überschussschlammproduktion

**7.2.** Verhalten der Biologie und Nebenwirkungen des Folsäureeinsatzes

## **8. Bewertung und Schlussfolgerungen**

**8.1.** wirtschaftliche Bewertung

**8.2.** Einschätzung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

**8.3.** Ausblick

# Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Versuchsanlage
- Abb. 2: biologische Phosphorelimination
- Abb. 3: Aufbau der Biologischen Reinigung
- Abb. 4: Struktur der Folsäure (Pteroylmonoglutamat)
- Abb. 5: Dosfolat®XS in der Dosierpumpenvorlage 1:400 verdünnt
- Abb. 6: Füllstandsänderung innerhalb eines Zyklus
- Abb. 7: Füllstandsänderung bei einem Klärwasserabzug nach 2 durchlaufenen Zyklen
- Abb. 8: Blockschema der Versuchsanlage
- Abb. 9: R&I – Schema der Versuchsanlage
- Abb. 10: Steuerprogramm der Versuchsanlage
- Abb. 11: Vergleich der entnommenen Überschussschlammengen
- Abb. 12: Vergleich der gebildeten Überschussschlammmenge
- Abb. 13: Entwicklung der spezifischen Überschussschlammproduktion
- Abb. 14: Entwicklung der berechneten und tatsächlichen Überschussschlammproduktion
- Abb. 15: Entwicklung des Trockensubstanzgehaltes in den Belebungsbecken der Versuchsanlage
- Abb. 16: CSB-Konzentrationen im Zulauf der Belebungsbecken der Versuchsanlage.
- Abb. 17: Auswirkung der Havarie auf die Überschussschlammproduktion
- Abb. 18: CSB im Ablauf der Versuchsanlagen
- Abb. 19: Ammoniumgehalt im Ablauf der Versuchsanlagen
- Abb. 20: Nitratlaufwerte der Versuchsanlage
- Abb. 21: Phosphorlaufwerte der Versuchsanlage
- Abb. 22: Schlammvolumenindex des Belebtschlammes der Versuchsanlagen
- Abb. 23: Sauerstoffgehalt am Ende der dritten Belüftungsphasen
- Abb. 24: Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes vom Trockensubstanzgehalt in den Belebungsbecken

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Einwohnerspezifische Frachten nach ATV-A 131
Tab. 2:	mittlere Konzentrationen der Prüflaborüberwachung vom 01.2004 bis 08.2005 im Ablauf der Flotation (entspricht Zulauf der Belebung)
Tab. 3:	mittlere Frachten bei 1400 m <sup>3</sup> Zulauf pro Tag im Ablauf der Flotation
Tab. 4:	Einteilung der Zyklen in die einzelnen Phasen
Tab. 5:	Überblick der Dosierpumpenregelung
Tab. 6:	Überblick Betriebsfeld der Dosierpumpen
Tab. 7:	Übersicht der Pumpenlaufzeiten für die Dosierung mit 1,0 ppm
Tab. 8:	Übersicht der Pumpenlaufzeiten für die Dosierung mit 0,2 ppm
Tab. 9:	Stückliste Versuchsanlage
Tab. 10:	Auflistung aller zu programmierenden Ein- und Ausgänge
Tab. 11:	Programmierte Phasen und Pumpenlaufzeiten im Überblick
Tab. 12:	Übersicht über die Startzeiten der Phasen
Tab. 13:	Grenzwerte der Kläranlage Zarrentin
Tab. 14:	Investitionskosten für eine Dosfolatdosierstation
Tab. 15:	Laufende Kosten bei einer Dosierung von 0,1 ppm
Tab. 16:	Laufende Kosten bei einer Dosierung von 0,13 l/t
Tab. 17:	Laufende Kosten bei einer Dosierung von 0,2 ppm
Tab. 18:	Klärschlamm Entsorgungskosten 2003 bis 2005
Tab. 19:	Überblick der Kostenstellen mit Einsparpotential
Tab. 20:	Wirtschaftlichkeit eines Folsäureeinsatzes

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Dimension	Langtext
TS	kg/m <sup>3</sup>	Trockensubstanzgehalt
TS <sub>R</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Schlamm-trockensubstanzgehalt im Aufstaubecken bezogen auf V <sub>R</sub>
CSB	mg/l	chemischer Sauerstoffbedarf
BSB <sub>5</sub>	mg/l	biologischer Sauerstoffbedarf
B <sub>d,...</sub> z.B. B <sub>d,CSB</sub>	kg/d	tägliche Fracht eines Parameters z.B CSB
C <sub>CSB,ZB</sub>	mg/l	Konzentration des CSB in der homogenisierten Probe aus dem Zulauf der Belebung
C <sub>BSB,ZB</sub>	mg/l	Konzentration des BSB <sub>5</sub> in der homogenisierten Probe aus dem Zulauf der Belebung
C <sub>Nges,ZB</sub>	mg/l	Konzentration des Stickstoffs in der homogenisierten Probe aus dem Zulauf der Belebung
C <sub>Pges,ZB</sub>	mg/l	Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe aus dem Zulauf der Belebung
C <sub>CSB,AN</sub>	mg/l	Konzentration des CSB in der homogenisierten Probe aus dem Ablauf der Belebung
C <sub>BSB,AN</sub>	mg/l	Konzentration des BSB <sub>5</sub> in der homogenisierten Probe aus dem Ablauf der Belebung
C <sub>NO<sub>3</sub>,AN</sub>	mg/l	Konzentration des Nitrats in der homogenisierten Probe aus dem Ablauf der Belebung
C <sub>NH<sub>4</sub>,AN</sub>	mg/l	Konzentration des Amoniums in der homogenisierten Probe aus dem Ablauf der Belebung
C <sub>Pges,AN</sub>	mg/l	Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe aus dem Ablauf der Belebung
ÜS <sub>d</sub>	kg/d	tägliche Überschussschlammproduktion (Trockensubstanz)
ÜS <sub>d,C</sub>	kg/d	tägliche Überschussschlammproduktion aus Kohlenstoffelimination
ÜS <sub>d,P</sub>	kg/d	tägliche Überschussschlammproduktion aus Phosphorelimination
ÜS <sub>C,BSB</sub>	kg/kg	Schlammproduktion aus der Kohlenstoffelimination, bezogen auf BSB <sub>5</sub>
B <sub>TS</sub>	kg/(kg*d)	Schlammbelastung
B <sub>d,BSB</sub>	kg/d	tägliche BSB <sub>5</sub> -Fracht
B <sub>d,CSB</sub>	kg/d	tägliche CSB-Fracht
B <sub>d,P</sub>	kg/d	tägliche Phosphorfracht
B <sub>d,Nges</sub>	kg/d	tägliche Stickstofffracht
ISV	ml/g	Schlammindex

V	m <sup>3</sup>	Volumen
V <sub>BB</sub>	m <sup>3</sup>	Volumen des Belebungsbeckens
V <sub>BB,HTA</sub>	m <sup>3</sup>	Volumen des Belebungsbeckens der halbtechnische Anlage
V <sub>BB,KA</sub>	m <sup>3</sup>	Volumen des Belebungsbeckens der Kläranlage
V <sub>N</sub>	m <sup>3</sup>	Für Nitrifikation genutztes Volumen des Belebungsbeckens
V <sub>D</sub>	m <sup>3</sup>	Für Denitrifikation genutztes Volumen des Belebungsbeckens
X <sub>TS,ZB</sub>	mg/l	Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe im Zulauf der Belebung
t <sub>TS</sub>	d	Schlammalter bezogen auf V <sub>BB</sub>
t <sub>Z</sub>	h	Zyklusdauer
t <sub>R</sub>	h	Dauer der Reaktionsphase
Θ <sub>x</sub>	d	mittlere Verweilzeit des Abwassers in einem Aufstaubecken
f <sub>A</sub>	-	Volumenaustauschverhältnis
T	°C	Temperatur
W <sub>T</sub>	m	Wassertiefe
EW <sub>XXX</sub>	E	Einwohnerwert bezogen auf den Parameter z.B.BSB <sub>5</sub>
VSV	l/m <sup>3</sup>	Vergleichsschlammvolumen
ISV	ml/g	Schlammvolumenindex
N		Nitrifikation
DN		Denitrifikation
BB		Belebungsbecken
Bio-P		biologische Phosphorelimination
NKB		Nachklärbecken
AN		Ablauf Nachklärung
Z		Zulauf Belebung
Rest DN		Denitrifikation des nach der Absetzphase noch vorhandenen Nitrats
SBR		(sequencing batch reactor) Belebungsanlage mit Aufstaubetrieb
ÜSS		Überschussschlamm

## 1. Zusammenfassung

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde die Wirkung von Folsäure auf die Überschussschlammproduktion einer biologischen Abwasserreinigungsstufe untersucht. Um die Wirkung der Folsäure eindeutig nachweisen zu können, wurde eine Versuchsanlage geplant und gebaut, in der zwei Belebungsbecken als Aufstaubiologie (SBR-Verfahren) parallel gefahren werden. In eines der beiden Belebungsbecken wird Folsäure zudosiert und das andere dient als Referenz. Durch den direkten Vergleich können alle anderen Einflüsse auf die Überschussschlammproduktion ausgeschlossen werden. Die Versuchsanlage wurde auf der einer Kläranlage errichtet und mit dem dort vorhandenen Abwasser betrieben. Planung und Bemessung orientierten sich ebenfalls an den auf der Kläranlage vorherrschenden Betriebsbedingungen, um eine Übertragung der Versuchsergebnisse zu ermöglichen.

Die Folsäure selbst gehört zu den B-Vitaminen und ist vor allem am C<sub>1</sub>-Stoffwechsel der Zellen beteiligt. Sie ist essenziell und muss mit der Nahrung aufgenommen werden. Die benötigte Menge ist jedoch sehr gering. Weil die Folsäure im Abwasser nicht stabil ist, kommt eine folsäurehaltige Substanz, die als Dosfolat®XS bezeichnet wird, zum Einsatz. Das Dosfolat ist gemäß Angabe des Herstellers im Abwasser relativ stabil und wird dem Belebtschlamm der Versuchsanlage in einer Dosis von 0,2 ppm, bezogen auf den Zulauf, zugeführt.

Das Wirkungsprinzip der Folsäure liegt in einer Erhöhung der Stoffwechselaktivität bei gleichzeitiger Reduzierung des Biomasseaufbaus. Eine Erhöhung der Stoffwechselaktivität durch Folsäure ist vorstellbar, weil im Abwasser ein Mangel an Folsäure vorherrscht. Angaben amerikanischer Wissenschaftler weisen auf einen im Abwasser festgestellten Folsäuremangel im Hinblick auf die aeroben Abbauvorgänge hin. Diese Angaben lassen sich auch theoretisch aus Angaben über die Folsäureabgabe des menschlichen Körpers und den Bedarf von aeroben Mikroorganismen nachvollziehen. Auch die Berücksichtigung eines Eintrags über Nahrungsmittel verändert das Ergebnis nicht wesentlich.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat eine mögliche Reduzierung des Überschussschlammfalls zwischen 30 und 40 % ergeben. Bei einer Übertragung auf die Kläranlage entspricht dies, abzüglich der zusätzlichen Aufwendungen, unter den derzeitigen Bedingungen etwa einer Kosteneinsparung im Bereich von 5.000,00 bis 27.000,00 €/jährlich.

Die Versuchsergebnisse zeigten jedoch auch, dass eine Überschussschlammreduzierung mit unerwünschten Nebenwirkungen verbunden ist. Durch den geringeren Biomasseaufbau und durch eine Beeinflussung der Stoffwechselfvorgänge wird die Nährstoffelimination beeinträchtigt. Besonders deutlich zeigte sich dieser Effekt bei der biologischen Phosphorelimination. Die Auswirkungen sind jedoch nicht so gravierend, dass sie nicht durch kleinere Anpassungen in der Betriebsweise der Kläranlage ausgeglichen werden können.

Die geringere Überschussschlammproduktion wirkt sich außerdem negativ auf den Kupfergehalt des Klärschlammes aus. Die Messung im Überschussschlamm der Versuchsanlage hat eine Erhöhung um 27 % ergeben. Für die Kläranlage bedeutet dies, dass ein Folsäureeinsatz nicht zu empfehlen ist, weil der Grenzwert für Kupfer im Faulschlamm der Kläranlage gegenwärtig nur gerade noch eingehalten werden kann.

Zusammengefasst sind die Ergebnisse eindeutig positiv ausgefallen und es hat sich gezeigt, dass es möglich ist, die Überschussschlammproduktion durch Zugabe von Folsäure deutlich zu vermindern, ohne dass die Reinigungsleistung beeinträchtigt wird. Nebenwirkungen wie z.B. eine verminderte Nährstoffaufnahme im Überschussschlamm, insbesondere eine verminderte biologische P-Elimination, und eine mögliche Erhöhung der Schwermetallgehalte im Klärschlamm müssen allerdings bei der Gesamtbewertung berücksichtigt werden.

## 2. Einleitung

Die Problematik der Klärschlamm Entsorgung gewinnt durch die steigenden Kosten immer mehr an Bedeutung. Besonders durch die umstrittene Klärschlammverbrennung und ein mögliches Verbot einer Entsorgung in der Landwirtschaft wird verstärkt nach Maßnahmen zur Reduzierung des Klärschlammfalls gesucht.

In der Februarausgabe 2005 der Fachzeitschrift „wwt“ wurde ein Bericht veröffentlicht, der den erfolgreichen Einsatz von Folsäure zur Klärschlammreduzierung beschreibt. In dem Artikel werden die Versuchsergebnisse der auf der Kläranlage Bramsche durchgeführten Untersuchungen beschrieben. Durch den Einsatz von Dosfolat, einer im Abwasser relativ stabilen Form der Folsäure, wurde auf dieser Anlage eine Reduzierung des Klärschlammfalls von etwa 40 % erreicht [5].

Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurde der Entschluss gefasst, die Wirkung des Dosfolats im Rahmen der Diplomarbeit auf der Kläranlage beim Abwasserzweckverband genauer zu untersuchen.

Um die Wirkung des Dosfolats eindeutig nachzuweisen, wurde beschlossen, eine Versuchsanlage zu errichten, in der zwei Belebungsbecken parallel betrieben werden. Der Hintergrund für diese Entscheidung war die Tatsache, dass die Ergebnisse, die bei einem Großversuch auf der Kläranlage messbar wären, nur mit den Werten aus dem Vorjahr oder den Monaten vor der Dosfolatzudosierung verglichen werden könnten. In diesem Fall ist es jedoch nicht möglich, alle Faktoren auszuschließen, die einen Einfluss auf die ermittelte Menge und Zusammensetzung des Klärschlammes haben. Der Parallelbetrieb der Versuchsanlage hat den Vorteil, dass die Ausgangsbedingungen gleich sind und der einzige Unterschied in der Dosfolatzugabe besteht.

Sollten sich die Erwartungen in Bezug auf die Überschussschlammreduzierung bestätigen, dann ergibt sich daraus ein gewaltiges Einsparpotential nicht nur für die Kläranlage.



Abb. 1: Versuchsanlage auf der Kläranlage



### 3.1. Grundlagen der biologischen Abwasserreinigung

Das Abwasser wird grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilt: in kommunales und industrielles Schmutzwasser. Das kommunale Schmutzwasser besteht vorwiegend aus den Abflüssen der Haushalte, Büros und kleingewerblichen Betriebe (häusliches Schmutzwasser genannt) und dem gewerblichen Schmutzwasser aus Gewerbe- und Industriebetrieben, Krankenhäusern, Schulen, Hotels oder Kasernen [3]. Um die Belastung von Kläranlagen, die durch die verschiedenen Abwässer verursacht wird, charakterisieren und vergleichen zu können, wurde der Einwohnergleichwert eingeführt. Er beschreibt die mittlere tägliche Fracht, die durch einen Einwohner eingeleitet wird. In der Tabelle 1 der ATV-A 131 [1] sind die einwohnerspezifischen Frachten in  $g/(E \cdot d)$  aufgeführt, die als Bemessungsgrundlage für Kläranlagen dienen. Die folgende Tabelle zeigt die einwohnerspezifischen Frachten des Rohabwassers und die daraus resultierenden Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage bei unterschiedlichem Wasserverbrauch.

Tab. 1: Einwohnerspezifische Frachten nach ATV-A 131

Parameter	Rohabwasser		
	Einwohnerspezifische Frachten	Zulaufkonzentration auf der Kläranlage bei 150 ( $l/E \cdot d$ )	Zulaufkonzentration auf der Kläranlage bei 100 ( $l/E \cdot d$ )
	in $g/(E \cdot d)$	in $mg/l$	in $mg/l$
BSB <sub>5</sub>	60	400	600
CSB	120	800	1200
TS	70	467	700
TKN	11	73	110
P	1,8	12	18

Die Reinigung des auf einer Kläranlage ankommenden Abwassers erfolgt im Allgemeinen mechanisch und biologisch. Über den mechanischen Weg können die Störstoffe, Sand, nicht emulgierte Fette und absetzbare Stoffe entfernt werden. Die Elimination der gelösten oder fein suspendierten Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorverbindungen erfolgt jedoch mit dem Belebtschlammverfahren. Die Phosphatelimination kann aber auch durch Fällung erfolgen.

Die Nitrifikation der mit dem Abwasser zugeführten Stickstoffverbindungen, die überwiegend in der Form von Ammonium vorliegen, erfolgt parallel zum Kohlenstoffabbau. Die Nitrifikanten unterliegen dabei jedoch ständig dem Konkurrenzdruck seitens der Kohlenstoffverwerter [4].

Damit sich die Nitrifikanten in einem Belebtschlammssystem anreichern und halten können, ist ein Mindestschlammalter erforderlich. Den begrenzenden Faktor dafür bildet die maximale Wachstumsrate der Ammoniumoxidanten (Nitrosomonas). Bei einer Temperatur von 15 °C liegt sie bei 2,13 Tagen. Dieser Wert gilt jedoch nur für den Idealzustand, der durch die in der Belebung immer vorhandenen hemmenden Einflussfaktoren jedoch nicht erreicht wird. Bei der Bemessung von Belebungsanlagen mit Nitrifikation wird abhängig von der Größe der Anlage ( $B_{d,BSB,Z}$  bis 1.200  $kg/d$  oder über 6.000  $kg/d$ ) und der Bemessungstemperatur (10 oder 12 °C) ein Schlammalter von 6,6 bis 10 Tage zugrunde gelegt. Bei der Ermittlung des erforderlichen Schlammalters sind die negativen Einflüsse, die auf Kläranlagen auftreten, mit berücksichtigt worden. Negative Auswirkungen auf die Wachstumsrate haben Schwankungen in der Abwasserzusammensetzung, der Temperatur oder dem pH-Wert. Auch eine zu hohe Ammoniumkonzentration hat eine hemmende Wirkung. Für eine stabile Nitrifikation ist eine ausreichende Versorgung mit Sauerstoff erforderlich. Als Richtwert gilt dabei eine Sauerstoffkonzentration im Nitrifikationsbecken von 2  $mg/l$  [1].

Die Denitrifikation ist ein biologischer Abbauprozess, bei dem man sich die Fähigkeit vieler heterotropher Bakterien zu nutze macht, das Nitrat als terminalen Elektronenakzeptor zu verwenden. Das Nitrat wird bis zum gasförmigen Stickstoff reduziert und dann in die Atmosphäre abgegeben. Voraussetzung für eine Denitrifikation ist ein sauerstofffreier, nitrat-haltiger Bereich, in dem eine Kohlenstoffquelle zur Verfügung steht. Dieser Zustand wird als anoxisch bezeichnet. Um die angesprochenen Bedingungen zu schaffen, gibt es unterschiedliche verfahrenstechnische Lösungen. In Abhängigkeit von der Betriebsweise und dem Aufbau der Kläranlage spricht man von vorgeschalteter, nachgeschalteter oder simultaner Denitrifikation [4]. Das erforderliche Schlammalter bei Belebungsanlagen mit Nitrifikation und Denitrifikation ist noch höher als das bei Anlagen nur mit Nitrifikation. Die maximale Wachstumsrate bildet auch hier die Bemessungsgrundlage. Genau wie bei den Nitrifikanten wird über das minimale Schlammalter abgesichert, dass sich die Bakterien im System entwickeln und gehalten werden können. Die Bemessung erfolgt wiederum in Abhängigkeit von der Anlagengröße und der Bemessungstemperatur. Das erforderliche Schlammalter für Belebungsanlagen mit Stickstoffelimination liegt zwischen 8,3 und 20 Tagen [1].

Einen sehr starken Einfluss auf die Wachstumsrate der Denitrifikanten haben Temperatur und pH-Wert. Der optimale Temperaturbereich liegt zwischen 27 und 40 °C. In den mitteleuropäischen Breiten werden diese Temperaturen jedoch nur selten erreicht. Weil die Absicherung der geforderten Stickstofffrachten im Ablauf der Kläranlagen aus diesem Grund bei zu niedrigen Temperaturen nur schwer zu gewährleisten ist, wird vom Gesetzgeber eine Einhaltung nur bei Wassertemperaturen über 12 °C gefordert. Das pH-Optimum für die Denitrifikanten liegt im neutralen bis leicht alkalischen Bereich. Möglich ist die Denitrifikation jedoch bei pH-Werten zwischen 5,8 und 9,2. Bei der Denitrifikation kommt es nicht nur zur Bildung von elementarem Stickstoff, sondern es entsteht auch Lachgas. Findet die Denitrifikation in einem pH-Wertbereich unter 7,3 statt, so kommt es vermehrt zur Lachgasbildung. Wie bereits erwähnt, ist die Denitrifikation an das Vorhandensein einer Kohlenstoffquelle gebunden. Auch die Art der Kohlenstoffquelle hat einen Einfluss auf die Bakterien. Besonders gut geeignet sind kurzkettige organische Fettsäuren wie Acetat. Auch der Einsatz von Methanol ist möglich. Weil dieses Substrat jedoch nur von den methylo-trophen Bakterien abgebaut wird, kommt es zu einer Artenverarmung [4].

Die Phosphatelimination kann durch biologische Phosphorelimination, Simultanfällung, einer Kombination aus beiden oder durch Vor- und Nachfällung erfolgen. Bei der Fällung wird ein Fällmittel zugegeben, das mit Phosphat reagiert und ein schwerlösliches Salz bildet. Das gebildete Salz setzt sich ab und wird je nach Einsatzort zusammen mit dem Primär- oder Sekundärschlamm aus dem Abwasser entfernt. Als Fällmittel kommen vor allem Eisen- und Aluminiumsalze zum Einsatz, aber auch die Verwendung von Kalk ist möglich [1].

Das Prinzip der biologischen Phosphorelimination (in Fachkreisen auch Bio-P genannt) beruht auf der Fähigkeit einer Gruppe von Bakterien, die in der Lage sind, einen Polyphosphatspeicher zu bilden. Um diese Bakterien in einem System zur biologischen Abwasserbehandlung anzureichern, wird ein Bereich geschaffen, in dem der Zulauf mit dem Rücklaufschlamm unter anaeroben Bedingungen vermischt wird. In diesem Bereich wird den Bakterien mit einem Polyphosphatspeicher ermöglicht, sich Substrat durch einen aktiven Transport in die Zelle zu sichern. Der Polyphosphatspeicher dient ihnen dabei als eine Art Energiespeicher, der beim Transport und den weiter durchgeführten Stoffwechselaktivitäten aufgebraucht wird. Beim Freisetzen der Energie wird Phosphat abgespalten und in das umgebende Medium abgegeben. Befinden sich die Bakterien wieder im aeroben Bereich, dann werden die eingelagerten Substrate zusammen mit dem aus der Umgebung aufgenommenen veratmet, und ein Teil der gewonnenen Energie wird genutzt, um den Speicher wieder aufzufüllen.

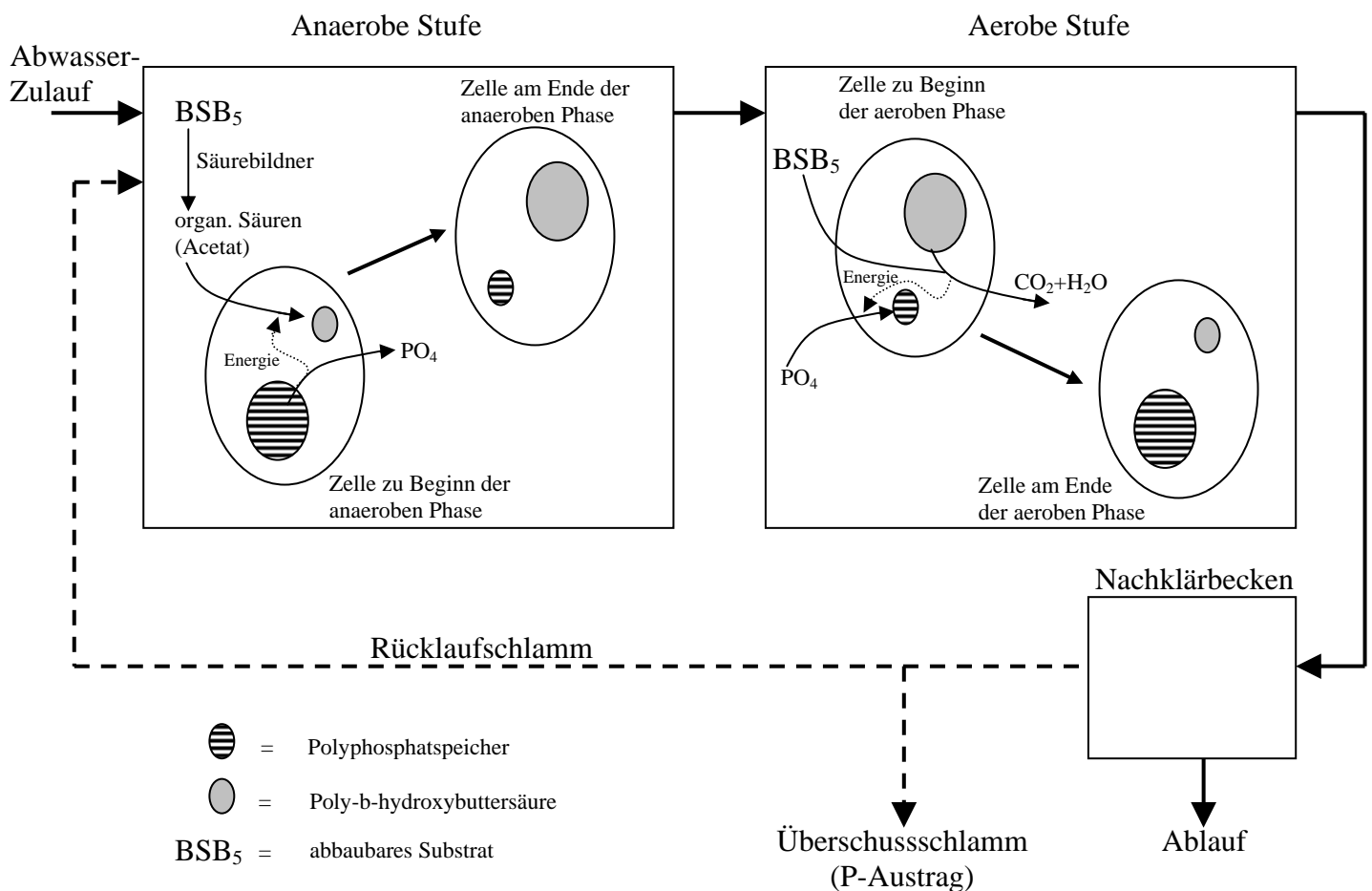


Abb. 2: biologische Phosphorelimination

Durch die Schaffung des anaeroben Bereiches entsteht eine ökologische Nische für die Bakterien mit Polyphosphatspeichern, und sie können sich im Konkurrenzkampf um das Substrat besser behaupten. Außerdem haben sie einen Wachstumsvorteil und gewinnen so durch die natürliche Selektion die Oberhand. Die Phosphorelimination wird nun dadurch erreicht, dass in dem aus dem Belebungssystem entfernten Überschussschlamm durch die Polyphosphatspeicher der Bakterien mehr Phosphor enthalten ist [3]. Von einer erhöhten Phosphorkonzentration spricht man, wenn mehr als 3 % der Trockenmasse enthalten ist [4].

Stellvertretend für die Vielzahl an technischen Lösungen wird an dieser Stelle der Aufbau der biologischen Reinigungsstufe der Kläranlage genauer betrachtet. Auf der Kläranlage wird das Abwasser durch Nitrifikation, Denitrifikation und biologische Phosphorelimination biologisch gereinigt. Die folgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung der Verfahrensführung.

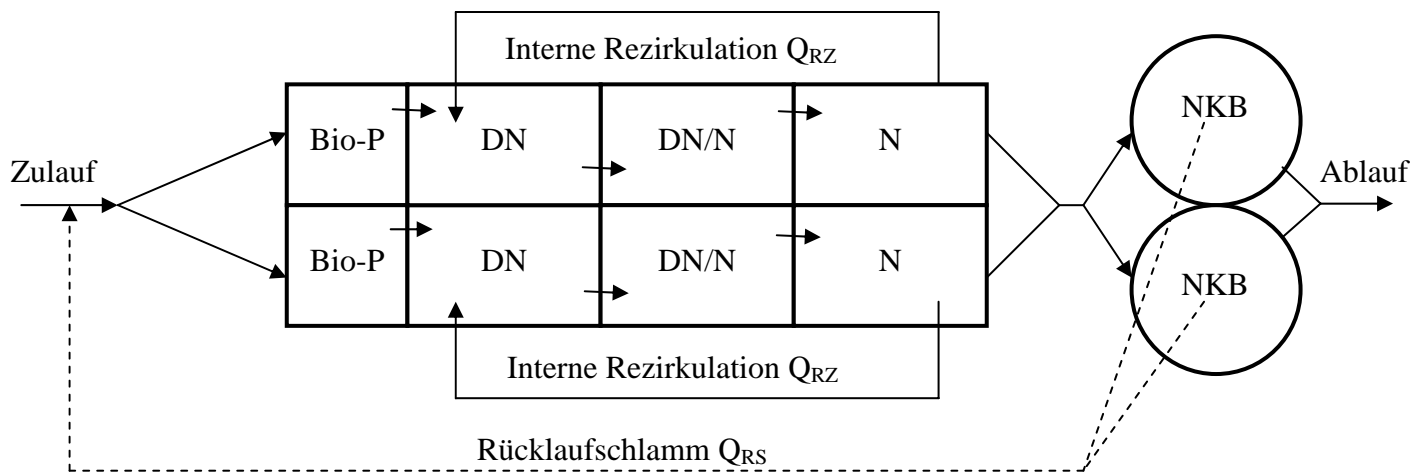


Abb. 3: Aufbau der Biologischen Reinigung der Kläranlage

Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird der Zulauf, bevor er in die Belebung fließt, mit dem Rücklaufschlamm vermischt. Der Strom aus Abwasser und Rücklaufschlamm wird gleichmäßig auf beide Straßen der Belebung aufgeteilt und gelangt zuerst in die Becken, die zur biologischen Phosphorelimination dienen. In diesem Becken werden die nötigen anaeroben Bedingungen geschaffen, die für die gezielte Anreicherung des Belebtschlammes mit Bakterien, die einen Polyphosphatspeicher besitzen, erforderlich sind. Die Bauweise der Anlage mit einer vorgeschalteten Denitrifikation erfordert eine Rückführung des mit Nitrat angereicherten Schlamms aus dem Nitrifikationsbecken. Diesen Vorgang bezeichnet man als Rezirkulation. Durch das Vorschalten der Denitrifikation ist gewährleistet, dass zu diesem Zeitpunkt der Abwasserreinigung noch ausreichend leicht abbaubares Substrat als Kohlenstoffquelle zur Verfügung steht. Die Nitrifikation und die Kohlenstoffelimination erfolgen im letzten Becken. Die aeroben Bedingungen werden durch Einblasen von Druckluft geschaffen. In den Nachklärbecken wird der Belebtschlamm durch Sedimentation vom gereinigten Abwasser getrennt. Der sich am Beckenboden absetzende Belebtschlamm wird kontinuierlich abgezogen und als so genannter Rücklaufschlamm zurück in den Zulauf der Belebung befördert. Das gereinigte Abwasser gelangt über getauchte Rohre in den Ablauf und wird dann in den Vorfluter gepumpt.

### 3.2. Aufbau und Eigenschaften von Folsäure

Schon im Jahr 1930 wurde in Leber, Hefen und Spinat ein Wachstumsfaktor entdeckt. Snell stellte 1940 fest, dass dieser Faktor für das Wachstum von *Lactobacillus casei* essentiell ist. Der Name „Folsäure“ stammt aus dem Lateinischen und ist von *folium* (Blatt) abgeleitet, weil eine Isolierung erstmals aus Spinatblättern erfolgte. Die chemische Struktur der Folsäure ist seit 1946 bekannt [6].

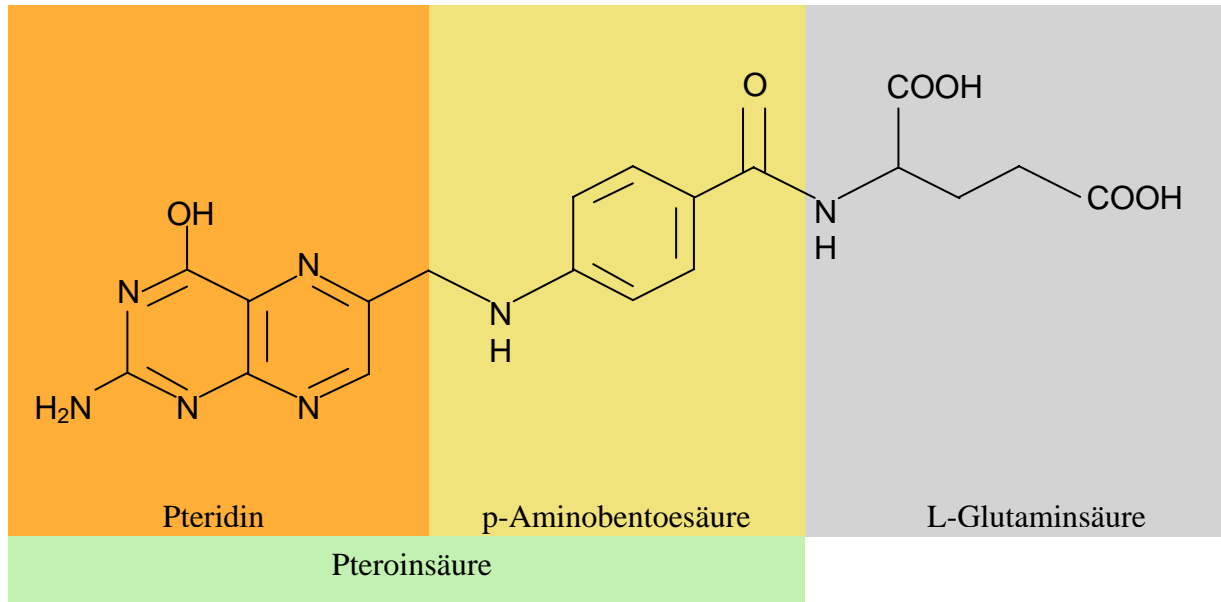


Abb.4: Struktur der Folsäure (Pteroylmonoglutamat)

Die Abbildung zeigt die Struktur der Folsäure in der Form wie sie isoliert wurde. In der Natur kommt sie in dieser Form nicht vor. Die Struktur wird durch die Isolierung künstlich verändert. Die natürliche Form der Folsäure unterscheidet sich im Hydrierungsgrad des Pteridinrings, der Substitution an N-5 und N-10 (Bindung von C<sub>1</sub>-Einheiten) und in der Länge der Glutamylkette. Die verschiedenen Formen der Folsäure und ihre biologisch aktiven Derivate werden unter dem Begriff Folacin zusammengefasst.

Das Pteroylmonoglutamat selbst ist ein gelbes bis orangegelbes kristallines Pulver und in dieser Form wasserunlöslich. Es schmilzt nicht, aber verfärbt sich bei etwa 250 °C. Die kristalline Folsäure ist an der Luft und bei Wärme stabil. In Lösung ist es jedoch lichtempfindlich [6].

In der Natur sind Folsäureäquivalente sowohl in Tieren als auch in Pflanzen zu finden. Im Spinat sind etwa 56 µg/100g enthalten. Als ebenfalls reich an Folsäure kann man Salat, Spargel, Tomaten, Gurken und Getreide bezeichnen. Die höchsten Konzentrationen finden sich in Rinderleber mit 242 µg/100g. Fisch, Fleisch und Obst sind dagegen relativ arm an Folsäure. Der Serum-Folatspiegel beim Menschen liegt zwischen 7-17 ng/ml. In schnell wachsendem Gewebe sind jedoch erhöhte Werte messbar. Die Gesamtmenge an Folat, die sich in einem normal ernährten Mensch befindet, ist nicht höher als 5-10 mg und davon wird allein die Hälfte in der Leber gespeichert. Weil die Folsäure ein essenzielles Vitamin ist, reicht dieser Vorrat nicht sehr lange. Der Vorrat in der Leber reicht etwa 3 bis 4 Wochen, bevor die ersten Entzugserscheinungen auftreten.

Die Folsäure wird beim Menschen über die Galle ausgeschieden. Die täglich abgegebene Menge von 10 bis 90 µg wird jedoch zum größten Teil vom Körper rückresorbiert. Ist der Mensch normal ernährt und nicht durch Darmerkrankungen geschwächt, dann werden über den Harn etwa 1 bis 12 µg/Tag ausgeschieden [6]. Das ergibt bei einem Abwasseranfall von 100 l/(d\*EW) einen Anteil von  $1 \cdot 10^{-11}$  bis  $1,2 \cdot 10^{-10}$  g/ml.

Untersuchungen mit Bakterienkulturen haben ergeben, dass bereits wenige Nanogramm Folsäure in 1 ml Nährlösung ausreichend sind, um den Bedarf zu decken [10]. Das würde im Abwasser einen Anteil von mindestens  $1 \cdot 10^{-9}$  g/ml erforderlich machen.

Tatsächlich konnte bei einer in den USA durchgeführten Untersuchung in mehreren Abwasserproben in Zuläufen von Kläranlagen ein Folsäuremangel festgestellt werden [8].

Die biologisch aktiven Formen der Folsäure sind die 5,6,7,8-Tetrahydrofolsäure und ihre Derivate. Sie spielen eine wichtige Rolle im C<sub>1</sub>-Stoffwechsel der Organismen und sind an der Synthese der für den DNA-Aufbau nötigen Nukleinsäuren beteiligt. Tritt also ein Mangel auf, dann wird das Wachstum und die Vermehrung der Zellen beeinträchtigt [6].

Durch die Zufuhr von ausreichend Folsäure wird die Stoffwechselaktivität in der Zellmembran der Organismen gesteigert. Selbst bei ausreichender Sauerstoffzufuhr erreichen die Organismen nicht ihre maximale Stoffwechselaktivität, sofern ein Mangel an Folsäure vorherrscht [7]. Um einen solchen Mangel auszugleichen, reicht es nicht aus, Folsäure in das Abwasser zu geben, weil sie in diesem Medium sehr instabil ist. Um den Organismen die Folsäure zugänglich zu machen, wurde das so genannte Dosfolat®XS entwickelt. Die genaue Zusammensetzung wird vom Hersteller nicht veröffentlicht, aber es ist bekannt, dass die Folsäure zusammen mit den ebenfalls erforderlichen Co-Faktoren in eine im Abwasser stabile Form gebracht wurde [7]. Dosfolat®XS ist eine wasserlösliche Flüssigkeit, die eine orange bis gelbbraune Farbe hat. Aus den Sicherheitsdatenblättern geht hervor, dass die Substanz nicht wassergefährdend oder brennbar ist. Eine Lagerung und Verwendung ist ohne besondere Schutzmaßnahmen für Mensch und Umwelt möglich. Die vom Hersteller angegebene Haltbarkeit liegt bei 2 Jahren. Anfällig ist das Dosfolat gegen UV-Strahlung und extreme Temperaturen von unter minus 10 °C oder mehr als plus 28 °C.

### 3.3. Erfahrungen mit dem Einsatz von Folsäure

Die ersten Erfahrungen mit dem Einsatz von Folsäure auf Kläranlagen wurden in den USA gemacht. Schon sein etwa 20 Jahren wird hier der Vitaminisierung von Abwasseraufbereitungsanlagen eine gewisse Bedeutung beigemessen [8].

Der Einsatz von Folsäure zur Überschussschlammreduzierung ist in Deutschland noch relativ selten. Es gibt zurzeit etwa 10 bis 15 Kläranlagen, die eine im Abwasser stabile Form der Folsäure (Dosfolat) in den Rücklaufschlamm dosieren. Nach Aussage des Dosfolatherstellers wurde auf diesen Kläranlagen eine Reduzierung des Überschussschlammmanfalls zwischen 20 % und 50 % erreicht. Entscheidend für das Ausmaß der Reduzierung scheint die Schlammbelastung zu sein. Die Anlagen mit niedriger Schlammbelastung erreichten nach der Dosfolatzugabe nur eine Reduzierung zwischen 20 % und 35 %. Auf den Kläranlagen mit hoher Schlammbelastung konnte dagegen 35 % bis 50 % des anfallenden Überschussschlammes eingespart werden. Auf der Kläranlage Bramsche, die in dem Bericht der Zeitschrift „wwt“ [5] dargestellt wurde, der den Anstoß zu dieser Diplomarbeit gab, konnte eine Überschussschlammreduzierung von etwa 40 % im Vergleich zum Vorjahr erzielt werden. Die eingesetzte Dosfolatmenge lag in Bramsche bei 0,1 ppm vom Trockenwetterzulauf. Neben den positiven Veränderungen, die sich laut Aussage des Betriebspersonals in einem stabileren Betrieb der biologischen Reinigungsstufe äußern, wurde auch eine Verdopplung des Kupfergehaltes im Klärschlamm gemessen.

Dr.-Ing. Jörg Strunkheide beschreibt in einer Veröffentlichung mit dem Titel „Stabilisiertes Folsäure-Vitamin zur Überschussschlammreduktion bei Kläranlagen“ [7] die Auswirkungen einer Folsäurezugabe auf drei weitere Kläranlagen. Auf der Kläranlage der Sasol Germany GmbH in Moers wurde mit einer Dosierung von 0,2 ppm des Trockenwetterzulaufs eine Reduzierung von 30 % erreicht. Auf dieser Kläranlage wird Industrieabwasser behandelt, das im Mittel eine CSB-Konzentration von 1200 mg/l hat und phenolische Alkylphenol-Rückstände enthält.

Auf der Kläranlage in Freist in Sachsen-Anhalt wurde bei einer Dosiermenge von 0,1 ppm eine Überschussschlammreduktion von 50 % erreicht, und auf der Kläranlage Hagen in Niedersachsen bei gleicher Dosierung sogar von 60 %. Beide Anlagen reinigen kommunales Abwasser. Die Daten, die zur Berechnung der Überschussschlammreduzierung verwendet wurden, erstrecken sich bei beiden Anlagen aber nur über einen Monat. Aufgrund des relativ kurzen betrachteten Zeitraums und der nicht bekannten Ungenauigkeit der Messungen, sowohl vor als auch während der Folsäurezugabe, sind die ermittelten Werte jedoch mit Vorsicht zu betrachten.

Auch in der Türkei wurden durch Angehörige der Universität von Istanbul Versuche mit Folsäure auf Kläranlagen durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen stand jedoch die Stabilisierung der Biologie und nicht die Überschussschlammreduzierung. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten eine deutliche Verbesserung der Schlammigenschaften und der CSB-Werte im Ablauf. Außerdem wurde eine geringere Anfälligkeit der biologischen Reinigungsstufe auf starke Schwankungen in der Belastung festgestellt [9].

#### **4. Zielsetzung der eigenen Untersuchungen und Vorgehensweise**

Die Untersuchungen haben zum Ziel, die Wirkung einer Folsäurezugabe auf die biologische Reinigungsstufe einer Kläranlage zu testen. Im Mittelpunkt steht dabei die Reduzierung des bei der Abwasserreinigung anfallenden Überschussschlamm. Im Rahmen der Untersuchungen werden alle ermittelten Veränderungen sowohl qualitativ als auch quantitativ erfasst. Im Anschluss daran ist zu klären, ob eine Wirkung eingetreten ist und ob sie den gestellten Erwartungen entspricht. Erwartet wird eine Überschussschlammreduzierung zwischen 20 % und 50 %, eventuell zusätzliche positive Wirkungen auf die Stabilität der biologischen Reinigung und das Ausbleiben von Nebenwirkungen, die den erreichten Vorteil zunichte machen. Nach einer Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Kläranlage wird die Wirtschaftlichkeit eines Folsäureeinsatzes geprüft.

Um die Wirkung der Folsäure eindeutig nachweisen zu können, werden zwei biologische Reinigungsstufen in einer dafür geplanten und gebauten Versuchsanlage parallel betrieben. Durch eine identische Betriebsweise können alle störenden Einflussfaktoren eliminiert werden. Der direkte Vergleich zwischen einem Betrieb mit und ohne Folsäurezugabe wird auf diese Weise möglich und alle auftretenden Unterschiede können nur mit einer Wirkung der Folsäure begründet werden. Bei der Planung der Versuchsanlage werden die auf der Kläranlage vorherrschenden Verhältnisse maßstabsgetreu übertragen. Dadurch wird es möglich, anhand der Versuchsergebnisse das Verhalten der Kläranlage bei einem Folsäureeinsatz vorherzusagen. Beim Bau der Versuchsanlage wird genauestens auf die identische Ausführung aller parallel betriebenen Anlagenteile geachtet.

Das Versuchsprogramm beinhaltet drei wesentliche Abschnitte. Zunächst wird die Versuchsanlage ohne Zugabe von Folsäure betrieben, um sicher zu stellen, dass die beiden parallelen Anlagen die gleichen Eigenschaften und die gleiche Leistungsfähigkeit haben. Dann erfolgt für 15 Tage eine so genannte „Schockdosierung“ mit Folsäure in eines der beiden parallel betriebenen Belebungsbecken, um die Zeit bis zum Einsetzen einer Wirkung zu verkürzen. Der größte Teil des Versuchszeitraums wird dazu verwendet, um einen Dauerbetrieb mit Folsäuredosierung in der einen und ohne Folsäuredosierung in der anderen Anlage durchzuführen.



## 5.1. Planung und Bemessung der Versuchsanlage

Die Bemessung der Versuchsanlage erfolgt nach dem Merkblatt ATV-M210 [2] für Belebungsanlagen im Aufstaubetrieb.

Für die Planung der Versuchsanlage wurden die auf der Kläranlage durchgeführten Messungen im Rahmen der Eigenüberwachung und behördlichen Kontrollen zugrunde gelegt. Die Eigenüberwachung erfolgt sowohl durch das Kläranlagenpersonal als auch monatlich durch ein staatlich anerkanntes Prüflabor.

Tab. 2: mittlere Konzentrationen der Prüflaborüberwachung vom 01.2004 bis 08.2005 im Ablauf der Flotation (entspricht Zulauf der Belebung)

Konzentrationen im Zulauf der Belebung der KA Zarrentin			
$C_{CSB,ZB}$	$C_{BSB5,ZB}$	$C_{Nges,ZB}$	$C_{Pges,ZB}$
in mg/l	in mg/l	in mg/l	in mg/l
1720	900	69	24

Die Planung der Versuchsanlage orientiert sich auch am Aufbau und den vorherrschenden Betriebsbedingungen der Kläranlage, um eine direkte Übertragung der Versuchsergebnisse auf die erreichbare Wirkung bei einem großtechnischen Einsatz zu ermöglichen.

Die Kläranlage ist für 28,000 Einwohnergleichwerte ausgelegt. Die Belastung aus kommunalem und Industrieabwasser steht etwa im Verhältnis 1 : 1 . Der mittlere Trockenwetterzulauf liegt bei 1400 m<sup>3</sup>/d. Daraus ergeben sich die folgenden täglichen Zulauffrachten.

Tab. 3: mittlere Frachten bei 1400 m<sup>3</sup> Zulauf pro Tag im Ablauf der Flotation

Zulauffrachten der KA Zarrentin			
$B_{d,CSB}$	$B_{d,BSB}$	$B_{d,Nges}$	$B_{d,Pges}$
in kg/d	in kg/d	in kg/d	in kg/d
2408	1260	97	34

Auf der Kläranlage wird das ankommende Abwasser durch eine Siebtrommel mit 2 mm Spaltbreite, einen unbelüfteten Sandfang und eine Flotation vorgereinigt. In der Versuchsanlage wird das so aufbereitete Abwasser als Zulauf verwendet. Das ermöglicht einen störungsarmen Betrieb und schafft die gleichen Ausgangsbedingungen, wie sie auch für die Belebung der Kläranlage vorliegen. Das Volumen der Belebung beträgt 4200 m<sup>3</sup> einschließlich der Bio P-Becken. Die Versuchsanlage hat zwei Belebungsbecken mit einem Nutzvolumen von jeweils 1 m<sup>3</sup> bei maximalem Füllstand. Setzt man die Volumen ins Verhältnis, so ergibt sich für die Versuchsbecken ein Zulauf von jeweils 333 l/d.

$$Q_{d,HTA,i}/V_{BB,HTA} = Q_{d,KA}/V_{BB,KA}$$

$$Q_{d,HTA,i} = 1400 \text{ m}^3/\text{d} * 1 \text{ m}^3 / 4200 \text{ m}^3 = 0.333 \text{ m}^3/\text{d}$$

Die Versuchsanlage wird im SBR-Betrieb gefahren. Das bedeutet, dass die Reinigungsstufen, die das Abwasser ansonsten nacheinander in den verschiedenen Becken durchläuft, hier in einem Becken zusammengefasst sind und durch eine zeitliche Taktung realisiert werden. Weil das Volumen des Beckens nicht über die gesamte Zykluszeit als Belebungsbecken zur Verfügung steht, muss der Anteil an Nichtbelebungsphasen auch bei den Berechnungen mit berücksichtigt werden. In jedem Zyklus sind 2 Stunden für Absetzphase und Klarwasserabzug eingeplant. Also werden jeweils nur 10 von den 12 Stunden eines Zyklus für die Belebung genutzt. Das ergibt einen Faktor von 0,833 der mit dem Zulauf aus der Berechnung ohne Zeitfaktor multipliziert wird. Durch die Berücksichtigung des Zeitfaktors entspricht die Belastung der Belebung der Versuchsanlage den Bedingungen wie sie auch auf der Kläranlage vorherrschen. Die Berechnungen für den Zulauf ergaben eine Menge von 278 l pro Tag und Becken.

$$Q_{d,HTA} = Q_{d,HTA,i} * 10/12 = 0,278 \text{ m}^3/\text{d}$$

Jeder Zyklus besteht aus 9 Phasen, die nacheinander durch das Steuerprogramm abgearbeitet werden. Beide Becken werden parallel betrieben, so dass sie sich immer in der gleichen Phase befinden. Diese Variante wurde gewählt, um die Steuerung zu vereinfachen, denn bei einem zeitlichen Versatz müsste jedes Aggregat einzeln angesteuert werden.

Weiterhin wurde der Zeitanteil jeder Phase festgelegt und der Mengenanteil vom Gesamtzulauf des Zyklus, der in dieser Phase beschickt wird. Die Festlegungen wurden aufgrund von Erfahrungswerten aus früheren Projekten der Hochschule Wismar getroffen, bei denen SBR-Anlagen zum Einsatz kamen. Die Beschickungsmenge pro Zyklus ist 139 l. Für die Realisierung des Zulaufs werden Schlauchquetschpumpen verwendet. Bei dem eingesetzten Schlauch mit einem Innendurchmesser von 9,5 mm haben sie eine konstante Durchflussleistung von 3 l/min. In Verbindung mit den errechneten Beschickungsmengen ergeben sich daraus die entsprechenden Laufzeiten. Bedingt durch die Zustände, die entsprechend der Phasen in den Belebungsbecken vorherrschen müssen, sind auch die Ein- und Ausschaltpunkte von Belüftung und Rührwerken festgelegt.

Tab. 4: Einteilung der Zyklen in die einzelnen Phasen

	Rest DN	Bio P	N1	DN1	N2	DN2	N3	Absetzen	Klarwasserabzug	Summe
Phase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Zyklusanteil	0,04	0,13	0,17	0,08	0,17	0,08	0,17	0,15	0,02	1,00
Zeit in h	0,5	1,5	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,8	0,2	12,0
Beschickung in %	20	30	0	25	0	25	0	0	0	100
Beschickung in l	27,8	41,7	0,0	34,7	0,0	34,7	0,0	0,0	0,0	139
Pumpenlaufzeit in min	9,26	13,89	0,00	11,57	0,00	11,57	0,00	0,00	0,00	46,30
Rühren	x	x	-	x	-	x	-	-	-	
Belüften	-	-	x	-	x	-	x	-	-	

Für die Bemessung der Versuchsanlage nach ATV-M-210 wurden nach der Bestimmung des Zulaufs und der Frachten die Prozessparameter festgelegt. Das Schlammalter  $t_{TS}$  wurde mit 25 Tagen veranschlagt. Die Zyklusdauer  $t_Z$  wurde wie bereits erwähnt auf 12 h und die Dauer der Reaktionsphase auf  $t_R = 10$  h festgelegt. Daraus ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des belebten Schlammes im Aufstaubecken von 30 Tagen.

$$\Theta_x = t_{TS} * t_Z / t_R \quad [d]$$

Das maximale Volumen der Aufstaubecken  $V_R$  liegt wie schon erwähnt bei 1000 l und der Zulaufvolumenstrom  $\Delta V$  pro Zyklus bei 139 l. Daraus ergibt sich ein  $f_A$  oder Volumenaustauschverhältnis von rund 14 %.

$$f_A = \Delta V / V_R = 0,14 \quad [-]$$

Bei der Inbetriebnahme der Anlage stellte sich jedoch heraus, dass die Schwimmer der Klarwasserpumpen nicht sensibel genug schalteten, um den Klarwasserabzug nach jedem Zyklus zu ermöglichen. Aus diesem Grund erfolgte der Abzug immer erst nach zwei durchlaufenen Zyklen. Die Volumenänderung in den Becken lag demzufolge jetzt bei 278 l und das Volumenaufstauverhältnis bei 28%. Die Ganglinien der tatsächlichen und geplanten Füllstandsänderungen in den SBR-Becken der Versuchsanlage zeigen die folgenden zwei Abbildungen.

## Graphiken zur Füllstandsänderung

Abb. 6: Füllstandsänderung innerhalb eines Zyklus

Abb. 7: Füllstandsänderung bei einem Klärwasserabzug nach 2 durchlaufenen Zyklen



Für die weiteren Berechnungen musste zunächst der tägliche Überschussanfall ermittelt werden.

Die Berechnung des Überschussschlammanfalls erfolgte nach ATV-DVWK-A131 [1] und auf der Grundlage der mittleren Zulaufbelastung. Der zu erwartende Überschussschlammanfall bildete die Grundlage für die Dimensionierung des Belebungsbeckenvolumens und des Schlammspeichers.

Zur Berechnung wurden zunächst einige Annahmen getroffen. Die daraus entstehenden Ungenauigkeiten wurden jedoch bei der Planung der Versuchsanlage berücksichtigt, indem sie so konzipiert wurde, dass auch größere Abweichungen durch eine hohe Flexibilität ausgeglichen werden konnten. Das mittlere Schlammalter  $t_{TS}$  wurde mit 25 Tagen angenommen, die abfiltrierbaren Stoffe im Zulauf  $X_{TS,ZB}$  mit 150 mg/l und die mittlere Temperatur  $T$  mit 15°C. Die abfiltrierbaren Stoffe im Zulauf der Belebung werden auf der Kläranlage durch die aufwendige Vorreinigung stark reduziert. Der angenommene Wert wurde an die vorherrschenden Betriebsbedingungen angepasst. Die mittleren Konzentrationen von BSB<sub>5</sub> und Phosphor wurden auf der Grundlage der Messwerte vom 01.2004 bis 08.2005 ermittelt. Das arithmetische Mittel aller Werte ergab eine BSB<sub>5</sub>-Konzentration von 900 mg/l und eine Phosphatkonzentration von 24 mg/l. Bei dem für die Versuchsanlage festgelegten täglichen Zulauf von 278 l wird den Belebungsbecken jeweils eine BSB<sub>5</sub>-Fracht von 250 g/d und eine Phosphorfracht von 7 g/d zugeführt.

Der Überschussschlammanfall wird aus zwei Teilmengen berechnet. Man unterscheidet zwischen dem Überschussschlamm, der bei der Kohlenstoffelimination gebildet wird und dem der Phosphorelimination.

$$\dot{U}S_d = \dot{U}S_{d,C} + \dot{U}S_{d,P} \quad [\text{kg}]$$

Der Überschussschlamm aus der Kohlenstoffelimination wird mithilfe einer empirisch ermittelten Gleichung berechnet.

$$\dot{U}S_{d,C} = B_{d,BSB} * \{0,75 + (0,6 * X_{TS,ZB} / C_{BSB,ZB}) - [(1 - 0,2) * 0,17 * 0,75 * t_{TS} * F_T] / (1 + 0,17 * t_{TS} * F_T)\} \quad [\text{kg}]$$

Sie enthält einen Temperaturfaktor  $F_T$  der den Einfluss der Temperatur auf die Stoffwechselaktivitäten der Organismen berücksichtigt.

$$F_T = 1,072^{(T-15)} \quad [-]$$

Setzt man die angenommene durchschnittliche Temperatur von 15 °C in die Gleichung ein, so ergibt sich ein Faktor von 1,0. Die Berechnung des Überschussschlammanfalls der Kohlenstoffelimination ergab nach dem Einsetzen aller Parameter eine tägliche Menge von 91 g Trockensubstanz.

Der aus der Phosphorelimination resultierende Überschussschlamm wird nach folgender Gleichung berechnet.

$$\dot{U}S_{d,P} = Q_d * (3 * X_{P,BioP} + 6,8 * X_{P,Fäll,Fe} + 5,3 * X_{P,Fäll,AL}) / 1000 \quad [\text{kg}]$$

Die Überschussschlammrechnung für die Phosphorelimination berücksichtigt zwei verfahrenstechnische Lösungsansätze. Einmal die Möglichkeit einer Fällung durch Zugabe von gelöstem Eisen- oder Aluminiumsalz und dann die biologische Phosphorelimination. In der Versuchsanlage werden jedoch keine Fällmittel verwendet, deshalb ergibt sich für die entsprechenden Glieder der Formel der Wert Null. Für die Berechnung wird die folgende Gleichung verwendet.

$$\dot{S}_{d,P} = Q_d * 3 * X_{P,BioP} / 1000 \quad [\text{kg}]$$

Die mithilfe der biologischen Phosphorelimination aus dem Abwasser entfernte Phosphormenge  $X_{P,BioP}$  ist die Differenz aus zugeführter und abgegebener Fracht. Weil sich die Zu- und Ablaufmengen jedoch nur geringfügig unterscheiden ist es möglich sie gegeneinander zu kürzen und es entsteht die folgende Gleichung.

$$X_{P,BioP} = C_{Pges,ZB} - C_{Pges,AN} \quad [\text{mg/l}]$$

Die Berechnung des Überschussschlammes aus der Phosphorelimination ergab nach dem Einsetzen der Werte eine tägliche Menge von 20g Trockensubstanz. Zusammen mit dem Überschussschlamm aus der Kohlenstoffelimination entstehen dann 111 g TS pro Tag. Geht man davon aus, dass der Überschussschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von etwa 10g/l abgezogen wird, so ergibt sich daraus eine Menge von ca. 11 l/d.

Nachdem der tägliche Überschussschlammfall bekannt ist, ist es möglich den erforderlichen Trockensubstanzgehalt  $TS_R$  in den Belebungsbecken zu bestimmen.

$$TS_R = \Theta_x * \dot{S}_d / V_R \quad [\text{kg/m}^3]$$

Der berechnete erforderliche Trockensubstanzgehalt liegt bei 3,3 kg/m<sup>3</sup>. Er diene bei der späteren Fahrweise der Anlage als Richtwert. Der Abzug des Überschussschlammes wurde immer möglichst so angepasst, dass der angestrebte Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken erreicht wird. Geht man von einer gleich bleibenden mittleren Zulaufkonzentration aus, dann ist der Trockensubstanzgehalt maßgeblich für die auftretende Schlammbelastung  $B_{TS,BSB}$ . Sie wird nach folgender Gleichung berechnet.

$$B_{TS,BSB} = Q_d * C_{BSB,ZB} / (V_R * TS_R) * (t_Z / t_R) \quad [\text{kg}/(\text{kg} * \text{d})]$$

Bei einem Trockensubstanzgehalt von 3,3 kg/m<sup>3</sup> und einer mittleren Zulaufkonzentration des BSB<sub>5</sub> von 900 mg/l ergibt sich eine Schlammbelastung von 0,09 kg BSB/(kg TS \* d). Das entspricht, wie geplant, genau der Belastung der Belebungsanlage und zeigt, dass die Berechnungen des Zulaufs, des Überschussschlammfalls und des erforderlichen Trockensubstanzgehaltes stimmig sind.

Für den Einbau der Klarwasserpumpen in die SBR-Belebungsbecken ist es erforderlich die Höhe des Schlammspiegels nach der Absetzphase zu ermitteln. Damit wird sichergestellt, dass die Pumpen beim Einschalten nicht im Schlamm hängen und ihn dann in den Ablauf befördern. Zur Berechnung der Höhe des zu erwartenden Schlammspiegels wurde ein Schlammvolumenindex von 150 ml/g angenommen. Auf der Kläranlage werden zwar durchgängig Werte unter 120 ml/g gemessen, was jedoch nicht zwangsläufig auf die Versuchsanlage zutreffen muss. Der Vorteil einer SBR-Anlage ist das Fehlen der störenden Strömungen durch Zu- und Ablauf, wie es in der Nachklärung der Fall ist. Die nach dem Abschalten der Belüfter teilweise noch austretenden Gasblasen sind dagegen eher nachteilig und behindern das Absetzen des Schlammes. Für die Berechnung des Schlammspiegels  $h_s$  wurden der berechnete Trockensubstanzgehalt  $TS_R$  von 3,3 kg/m<sup>3</sup> und eine Wassertiefe  $h_w$  von 0,95 m eingesetzt.

$$h_s = h_w * TS_R * ISV / 1000 \quad [\text{m}]$$

Die Berechnung ergab eine Schlammspiegelhöhe von 0,47 m. Während des Klarwasserabzugs werden genau die 278 l, die beschickt wurden, wieder abgepumpt. Der Wasserstand senkt sich dabei um rund 28 cm. Der mit dem Ausschaltpunkt der Schimmer festgelegte minimale Wasserstand liegt also bei 67 cm. Der Abstand zwischen der höchstgelegenen und der tiefsten Ansaugöffnung der Klarwasserpumpen liegt durch den leicht geneigten horizontalen Einbau bei etwa 10 cm. Die verwendeten Tauchpumpen wurden nicht vertikal eingebaut, damit sie sich während des gesamten Pumpvorgangs unter Wasser befinden. Das hat den Vorteil, dass Korrosionserscheinungen, die gerade im Übergangsbereich zwischen Luft und Wasser besonders stark auftreten, vermindert werden und eine gute Motorkühlung zu jedem Zeitpunkt gegeben ist. Der Abstand der höchstgelegenen Ansaugöffnung zur Wasseroberfläche muss selbst bei minimalem Wasserstand mindestens 5 cm betragen, damit kein Schwimmschlamm mit angesaugt werden kann. Das bedeutet, dass bei dem errechneten Schlammspiegel von 47 cm ein Abstand von 5 cm zur Pumpe verbleibt. Durch die Berechnung des Schlammspiegels über den Schlammvolumenindex, besteht jedoch noch eine weitere Sicherheit. Der Schlammvolumenindex wird aus dem Vergleichsschlammvolumen  $VSV$  und dem Trockensubstanzgehalt  $TS_R$  berechnet.

$$ISV = VSV / TS_R \quad [l/kg]$$

Der Schlammvolumenindex wird allerdings durch die Messung des Schlammvolumens ermittelt und das wird nach einer Absetzzeit von 30 Minuten bestimmt. Die Absetzphase der Versuchsanlage dauert jedoch 1,8 Stunden und der Schlamm hat damit mehr Zeit zu sedimentieren. Durch die Verdünnung des Schlammes bei der VSV Messung wird das Absetzverhalten jedoch begünstigt und das Schlammvolumen wird positiver dargestellt als es unter realen Bedingungen ist. Die zusätzliche Absetzzeit wiegt jedoch wesentlich schwerer und der zu erwartende Schlammspiegel liegt deshalb niedriger als der berechnete.

Für die Berechnung der nötigen Dosiermengen an Dosfolat wurde die vom Hersteller geforderte Verfahrensweise eingehalten. Die zu dosierende Menge ist vom Zulauf zur biologischen Reinigungsstufe abhängig. Der Hersteller empfiehlt eine so genannte „Schockdosierung“ mit 0,5 ppm in den ersten 14 Tagen, in denen das Dosfolat zum Einsatz kommt. Nach dieser Zeit wird die Menge für den Dauerbetrieb auf 0,1 bis 0,4 ppm heruntersetzt. Vor der Inbetriebnahme der Versuchsanlage wurde der Sachverständige (Dr.-Ing. Jörg Strunkheide) auf Empfehlung des Herstellers konsultiert. Auf der Grundlage der getroffenen Absprachen erfolgte die Festlegung der Dosiermengen. Für die ersten 15 Tage wurden 1,0 ppm geplant und für den Dauerbetrieb 0,2 ppm. Die Mengen wurden erhöht, weil seitens des Herstellers Bedenken aufgrund der kleinen Anlagengröße und der möglichen Dosiergenauigkeit geäußert wurden. Das Dosfolat wird nicht in reiner Form zugeführt. Es erfolgt vor dem Einsatz eine Verdünnung mit destilliertem oder entionisiertem Wasser im Verhältnis von 1 : 400.

Die bei der Anlagenplanung bereits festgelegte Beschickung von konstant 278 l/d erleichterte die Dosierung, da eine zulaufabhängige Steuerung entfallen konnte. Die Berechnung der erforderlichen Dosiermenge konnte somit auch im Vorfeld erfolgen. Für die ersten 15 Tage mit 1,0 ppm ergab sich ein Wert von 0,278 ml Dosfolat pro Tag. Bei einer Verdünnung von 1 : 400 ergibt das eine Förderleistung für die Dosierpumpe von 111 ml/d. Die Berechnung für den Dauerbetrieb mit 0,2 ppm ergibt eine Menge von 0,056 ml Dosfolat pro Tag und eine Förderleistung bei einer Verdünnung auf 1 : 400 von 22 ml/d.



Die eingesetzte Dosierpumpe ist eine Membrankolbenpumpe mit ausreichend kleiner Fördermenge. An der Pumpe können zwei verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, die einen Einfluss auf die Leistung haben. Zum einen lässt sich das Hubvolumen verstellen und zum anderen die Taktfrequenz, in der die Hübe ausgeführt werden. Beide Regler sind in Stufen eingeteilt, die sich über durchgeführte Versuche genau zuordnen ließen. Die Veränderung des Hubvolumens wurde mit Stufe Q bezeichnet und die der Frequenz mit Stufe F. In der folgenden Tabelle wird einmal die bei einer bestimmten Stufe Q und genau 100 Hüben geförderte Menge angegeben und die Zahl der Hübe pro Minute bei eine Stufe F.

Tab. 5: Überblick der Dosierpumpenregelung

Stufe Q	Q/100Hübe	Stufe F	Hübe
□	in ml	□	min <sup>-1</sup>
3	21	1	10
5	27	3	34
5,5	30	5	54
6	32	10	100

Durch die Kombination der Stufen ergibt sich das Betriebsfeld der Dosierpumpe. In der folgenden Tabelle sind nur die durch Messungen überprüften Stufen dargestellt.

Tab. 6: Überblick Betriebsfeld der Dosierpumpen

Q in ml/min				
Stufe F \ Stufe Q	1	3	5	10
3	2,1	7,1	11,3	21,0
5	2,7	9,2	14,6	27,0
5,5	3,0	10,2	16,2	30,0
6	3,2	10,9	17,3	32,0

Aus dem Betriebsfeld der Dosierpumpen lässt sich zusammen mit der zuvor errechneten Dosiermenge die jeweilige Pumpenlaufzeit ermitteln. Für den Pumpenbetrieb wurde wegen der geringen Mengen die Entscheidung getroffen, jeweils zwei Zugaben pro Zyklus durchzuführen. Bei der Dosierung mit 1,0 ppm ergeben sich die in der Tabelle dargestellten Pumpenlaufzeiten für jeweils eine Pumpphase. Das grau hinterlegte Feld zeigt die gewählte Einstellung der Dosierpumpe für die ersten 15 Tage an.

Tab. 7: Übersicht der Pumpenlaufzeiten für die Dosierung mit 1,0 ppm

Verbrauch bei 1ppm Zugabe 2x pro Zyklus				
Q <sub>Dosfolat,S</sub>	0,111			l/d
Q pro Zugabe	27,8			ml
Pumpenlaufzeit pro Zugabe in min				
Stufe F \ Stufe Q	1	3	5	10
3	13,2	3,9	2,5	1,3
5	10,3	3,0	1,9	1,0
5,5	9,3	2,7	1,7	0,9
6	8,7	2,6	1,6	0,9

Die gleichen Berechnungen erfolgten auch für die Dosfolatzugabe von 0,2 ppm. Die gewählte Pumpeneinstellung wurde auch hier grau hinterlegt.

Tab. 8: Übersicht der Pumpenlaufzeiten für die Dosierung mit 0,2 ppm

<b>Verbrauch bei 0,2ppm Zugabe 2x pro Zyklus</b>				
Q <sub>Dosfolat,N</sub>	<b>0,022</b>			l/d
Q pro Zugabe	<b>5,56</b>			ml
<b>Pumpenlaufzeit pro Zugabe in min</b>				
StufeF Stufe Q	1	3	5	10
3	2,6	0,8	0,5	0,3
5	2,1	0,6	0,4	0,2
5,5	1,9	0,5	0,3	0,2
6	1,7	0,5	0,3	0,2

Die Pumpeneinstellung wurde so gewählt, dass die Zugabe über einen möglichst langen Zeitraum erfolgt. Die Zeitangaben in den Tabellen sind in der Kommastelle dezimal angegeben. Durch die Umrechnung ergibt sich für die Dosierung mit 1,0 ppm eine Pumpenlaufzeit von 10 Minuten und 18 Sekunden und für 0,2 ppm von 2 Minuten und 6 Sekunden. Der Start für die beiden Laufzeiten der Dosfolatdosierpumpe wurde jeweils auf den Beginn der Phasen Rest DN und DN1 gelegt. In beiden Phasen erfolgt eine Beschickung der Versuchsanlage. Auf diese Weise wird das Dosfolat den Organismen immer zusammen mit dem Substrat zur Verfügung gestellt.

## 5.2. Aufbau der Versuchsanlage

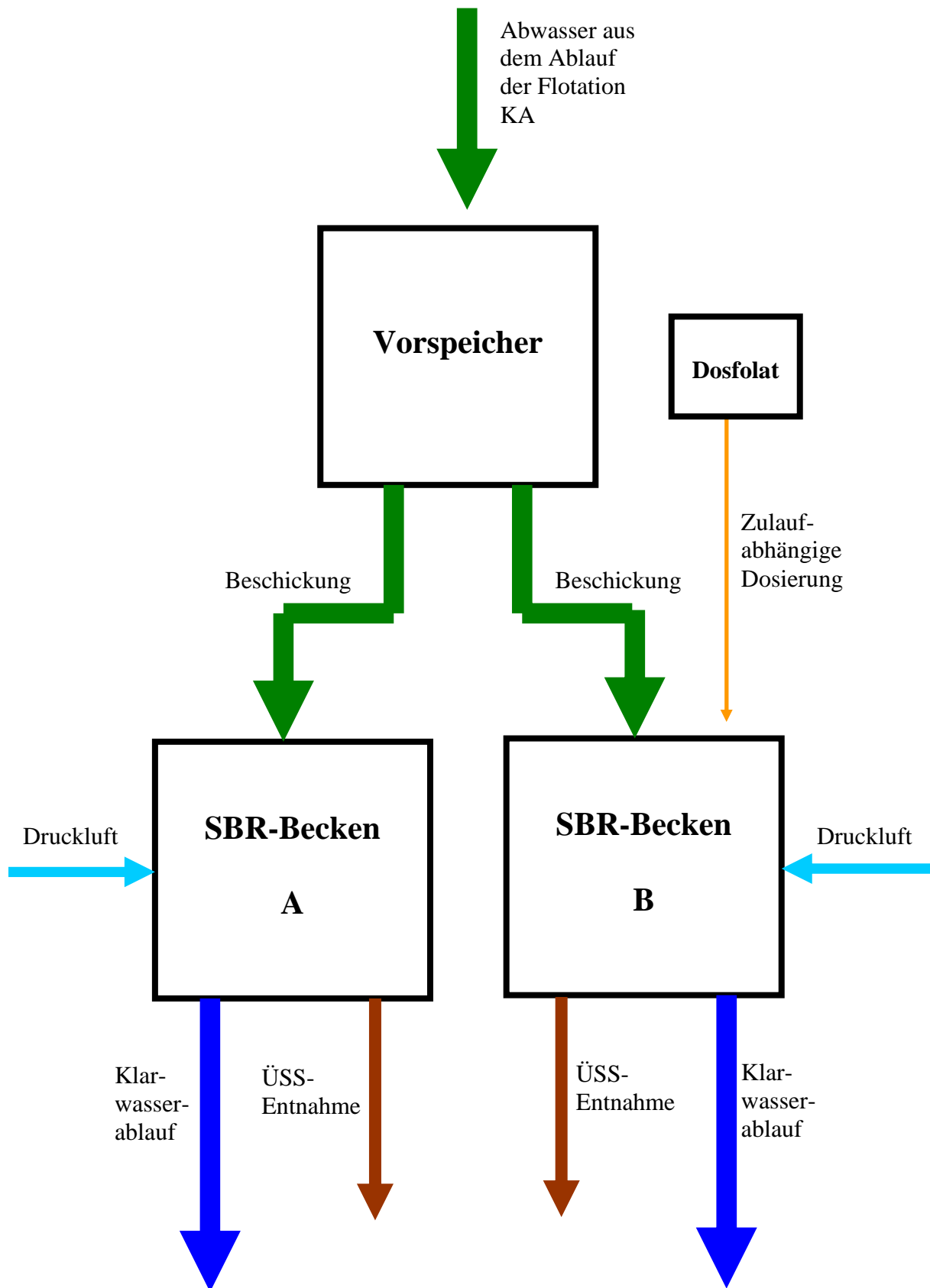
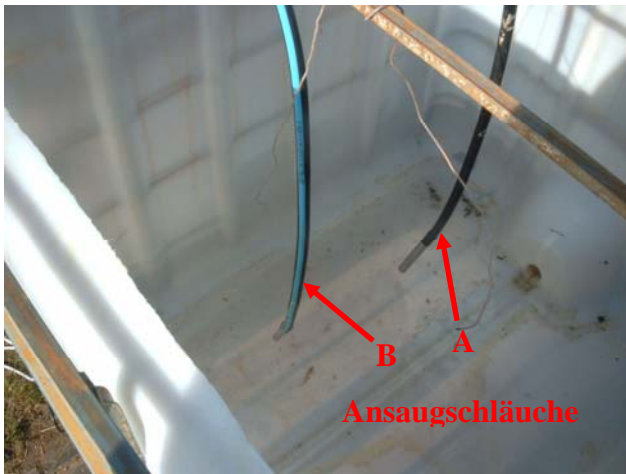


Abb. 8: Blockschema der Versuchsanlage

Der Vorlagebehälter (B1.1) hat ein Volumen von 1 m<sup>3</sup> und ist mit einem Rührwerk (R1.1) ausgestattet, um Absetzvorgänge zu verhindern und den Beckeninhalt zu homogenisieren. Der Behälter ist mit einem Überlauf ausgestattet, weil die Beschickung diskontinuierlich erfolgt und die Fördermenge der Zulaufentnahmepumpe (P1.1) die der Beschickungspumpen (P1.2 und P2.2) um ein Vielfaches übersteigt. Zudem wird durch einen Vorlauf immer sichergestellt, dass den Versuchsanlagen „frisches“ Abwasser zugeführt wird.



Die Beschickung der beiden Belebungsbecken (B1.2 und B2.1) wird jeweils durch eine Schlauchquetschpumpe (P1.2 und P2.2) realisiert. Die Ansaugschläuche enden etwa 15 cm über dem Boden des Vorlagebeckens. Damit sie nicht aufschwimmen oder von der Strömung, die durch das Rührwerk verursacht wird, herumgewirbelt werden, wurde jeweils an den Schlauchenden ein etwa 20 cm langes Stahlrohr angebracht. Durch das Gewicht des Stahlrohrs werden die Schläuche in Position gehalten.

Die Beschickungspumpen befinden sich auf einem überdachten Podest etwas unterhalb des Wasserspiegels der Vorlage. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass selbst bei einer geringen Undichtigkeit der Schraubverbindungen zur Pumpe keine Luft angesaugt wird. Die Stromversorgung der Pumpen erfolgt über Akkus, die kontinuierlich aufgeladen werden. Die in den Pumpen bereits vorhandene Steuerung wurde umgangen und erfolgt ausschließlich über die zentrale Steuereinheit.



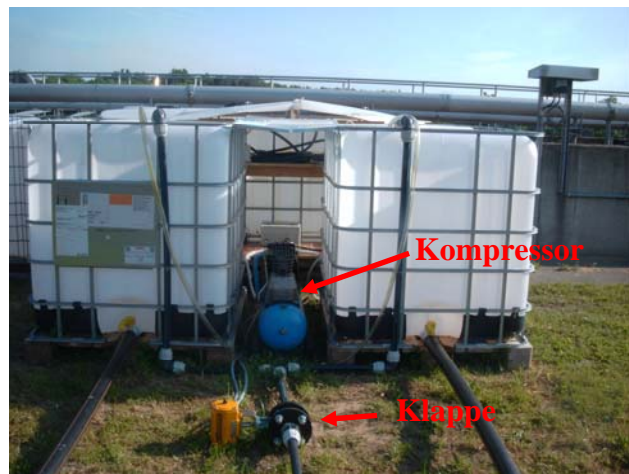
Das gepumpte Abwasser wird oberhalb des Wasserspiegels in die Belebungsbecken eingeleitet, damit die Schläuche auf der Druckseite nach der Beschickung zumindest teilweise leer laufen können. Das hat den Vorteil, dass sich der Bewuchs an den Schlauchwänden in Grenzen hält.

Die zentrale Steuereinheit befindet sich ebenfalls auf dem Podest aber eine Etage unterhalb der Beschickungspumpen. Die Steuerung wurde an einen separaten Stromanschluss angeschlossen, weil ausgehend von diesem Anschluss die Klarwasserpumpen (P1.3 und P2.3), die Rührwerke (R1.2 und R2.2) in den Belebungsbecken und das Dreiwegeventil (V1.3) mit Strom versorgt werden. Alle Leitungen, Steckdosen und Verteiler befinden sich auf der untersten Etage, wo sie genau wie auch die Steuerung und die Beschickungspumpen vor der Witterung geschützt sind.



Die für die Belüftung der Belebungsbecken erforderliche Druckluft, wird von der Versorgungsleitung der Kläranlage abgezweigt. Direkt nach dem Abzweig wurde ein Kugelhahn (V1.4) installiert, mit dem die zugeführte Luftmenge gedrosselt werden kann. Die Druckluftleitung wurde als PE-Wasserleitung in DN 50 ausgeführt. Die Temperatur der Druckluft lag auch an heißen Tagen an dieser Stelle unter 40°C. Es ist also sichergestellt, dass sich die Leitung nicht verformt oder schmilzt.

Das Ein- und Ausschalten der Belüftung erfolgt durch die pneumatisch gesteuerte Klappe (V1.2). Die zum Öffnen und Schließen der Klappe nötige Druckluft, wird durch einen Kompressor (K1.1) erzeugt. Der Druck wird mithilfe eines durch die SPS angesteuerten Dreiwegemagnetventils (V1.3) jeweils am erforderlichen Eingang der Klappe beaufschlagt. Die Zusammenschaltung der beteiligten Elemente wurde so realisiert, dass die Klappe geschlossen wird, wenn kein Signal von der SPS anliegt. Bei einem Ausfall des Kompressors bleibt die Klappe im zuletzt anliegenden Zustand.



Die Druckluftleitung versorgt beide Belebungsbecken. Damit die Aufteilung der Druckluft gleichmäßig erfolgt, muss auf beiden Abgängen der gleiche Gegendruck anliegen. Um dies zu erreichen, wurden die Rohrleitungslängen und Einbauteile bei beiden Becken genau gleich ausgeführt. Am Ende der Leitung wurde jeweils ein Tellerbelüfter installiert, der die ankommende Luft in Form von kleinen Bläschen im Becken verteilt. Zusätzlich wurde am tiefsten Punkt der beiden Leitungen ein Schlauch angebracht, über den bei Bedarf das entstandene Kondenswasser abgelassen werden kann.



Die Belebungsbecken(B1.2 und B2.1) haben bei maximalem Wasserstand ein Volumen von 1 m<sup>3</sup>. Sie sind jeweils mit einem Rührwerk (R1.2 oder R2.2) und einer Klarwasserpumpe(P1.3 oder P2.3) ausgerüstet. Das abgepumpte Ablaufwasser wird über das Belebungsbecken der Kläranlage entsorgt. Der Überschussschlamm wird durch das Öffnen des Hahns (V1.1 oder V2.1), der sich auf Höhe des Beckenbodens befindet abgezogen. Der abgelassene Schlamm wird zunächst in den Überschussschlammspeichern (B1.3 oder B2.2) aufgefangen und dann ebenfalls über das Belebungsbecken der Kläranlage entsorgt.

Die Zudosierung der 1:400 verdünnten Dosfolatlösung erfolgt durch eine Membranpumpe (P2.1). Die Pumpenleistung ist fest eingestellt und die Fördermenge wird über die Laufzeit geregelt. Die Regelung erfolgt über eine Zeitschaltuhr, die in den Zyklus der Anlagensteuerung ingetaktet ist.



Die Pumpenvorlage (B2.4) bildet ein mit Dosfolatlösung gefüllter Messzylinder mit einem Volumen von 1000 ml. Der Trockenlaufschutz der Dosierpumpe musste außer Kraft gesetzt werden weil der dazugehörige Sensor durch die vorgegebenen Abmessungen nicht in den Speicherbehälter eingetaucht werden konnte. Damit die Pumpe nicht abgeschaltet wird wurde der Sensor in einen mit Wasser gefüllten Behälter eingetaucht. Das Außerkraftsetzen der Schutzeinrichtung war möglich, weil der Füllstand im Rahmen der Messungen täglich überwacht wurde.



Tab. 9: Stückliste Versuchsanlage

<b>Stückliste</b>			
Bezeichnung kurz	Bezeichnung lang	Beschreibung/Ort	Eigenschaften
P1.1	Kreiselpumpe	Zulaufentnahme	KP150
P1.2	Schlauchquetschpumpe	Beschickung	
P1.3	Kreiselpumpe	Klarwasserabzug	KP150
P2.1	Membranpumpe	Dosfolatdosierung	
P2.2	Schlauchquetschpumpe	Beschickung	
P2.3	Kreiselpumpe	Klarwasserabzug	KP150
B1.1	Behälter	Vorlage	V=1 m <sup>3</sup>
B1.2	Behälter	Belebung	V=1 m <sup>3</sup>
B1.3	Behälter	Schlamm Speicher	20l Kanister
B2.1	Behälter	Dosfolatspeicher	1000 ml
B2.2	Behälter	Belebung	V=1 m <sup>3</sup>
B2.3	Behälter	Schlamm Speicher	20l Kanister
R1.1	Rührwerk	Beschickung	KP150
R1.2	Rührwerk	Belebung	KP150
R2.2	Rührwerk	Belebung	KP150
V1.1	Ventil	ÜSS	am Behälter
V1.2	Klappe	Belüftung	DN 50
V1.3	Dreiwegeventil	Belüftung	24V
V1.4	Kugelhahn	Belüftung	
V2.1	Ventil	ÜSS	am Behälter
K1.1	Kompressor	Belüftung (Pneumatik)	
LIS1.1	Füllstandsmessung	Belebung	Schwimmer
LIS2.1	Füllstandsmessung	Belebung	Schwimmer

Abb. 9: R&I – Schema der Versuchsanlage



### 5.3. Funktionsbeschreibung

Der Zulauf der halbtechnischen Anlage (HTA) wird mit einer Tauchpumpe (P1.1) aus dem Ablauf der Flotation der KA entnommen und in den Vorlagebehälter (B1.1) geleitet. Die Entnahmestelle des Zulaufes wurde gewählt, um die Versuchsbecken mit der gleichen Abwasserzusammensetzung zu beschicken, wie es auch bei den Belebungsbecken der Kläranlage der Fall ist. Zusätzlich wird die Verstopfungs- und Verzapfungsanfälligkeit der Versuchsanlage und dessen Aggregate durch das, bereits durch Rechen, Sandfang und Flotation vorgereinigte und nahezu feststofffreie Abwasser, auf ein Minimum begrenzt. Im Vorlagebehälter befindet sich ein Rührwerk (R1.1), um ein Absetzen von suspendierten Abwasserinhaltsstoffen zu verhindern und die Konzentration bei der Beschickung konstant zu halten. Der Behälter ist mit einem Überlauf zum Belebungsbecken der KA ausgestattet, weil die Tauchpumpe (P1.1) ein Vielfaches der Förderleistung der Beschickungspumpen hat. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass immer frisches Abwasser zur Verfügung steht und ein das Anfaulen im Vorlagebehälter wird verhindert.

Die halbtechnische Anlage wird, wie bereits erwähnt im SBR-Betrieb gefahren. Am Tag durchläuft die Anlage 2 Zyklen von jeweils 12 Stunden. Jeder Zyklus besteht aus 9 Phasen, die nacheinander durch das Steuerprogramm abgearbeitet werden. Beide Becken werden parallel betrieben, so dass sie sich immer in der gleichen Phase befinden.

In den ersten beiden Phasen werden zunächst anoxische und dann anaerobe Zustände im Becken geschaffen. Dazu ist das Rührwerk eingeschaltet und die Belüftung aus. Das Rührwerk verhindert das Absetzen des Schlammes und sorgt für eine gute Einmischung des Zulaufs.

In der 1. Phase (Rest DN) wird das restliche Nitrat aus dem vorangegangenen Zyklus mit den frisch zugeführten Abwasserinhaltsstoffen denitrifiziert. Hierzu wird in 30min 20% der Abwasserzugabemenge eines Zyklus mit Hilfe der Schlauchquetschpumpen in die Belebungsbecken gepumpt. Die 2. Phase ist eine die biologische Phosphorelimination. Sie dauert 1,5 Stunden und es wird 30% der Abwasserzugabemenge eingeleitet.

Die 3. Phase ist die Nitrifikation, in der  $\text{NH}_4$  über  $\text{NO}_2$  zu  $\text{NO}_3$  umgewandelt wird. In dieser Phase werden aerobe Zustände geschaffen, deshalb wird nun die Belüftung eingeschaltet. Die erforderliche Luftmenge wird manuell mit einem Kugelhahn so eingestellt, dass die Sauerstoffkonzentration in den Becken etwa 2mg/l beträgt. Das Einschalten der Belüftung erfolgt durch eine pneumatisch angetriebene Klappe, die mit einem von der SPS angesteuerten Dreiwegeventil geöffnet oder geschlossen wird. Die hierfür nötige Druckluft kommt aus einem Kompressor. Die 3. Phase dauert 2 Stunden bei einem Zulauf von 0%.

In der 4. Phase erfolgt die Denitrifikation. In dieser Phase wird das Becken mit 25% der Abwasserzugabemenge beschickt und gerührt. Während der Denitrifikationsphase herrschen anoxische Zustände, deshalb wird die Belüftung für 1 Stunde ausgeschaltet. Das in der Nitrifikation entstandene  $\text{NO}_3$  wird jetzt durch Umwandlung zu  $\text{N}_2$  aus dem Abwasser eliminiert. In der 5. und 7. Phase wird ebenfalls für 2 Stunden nitrifiziert und 0% Abwasser zugegeben. Alle Aggregate sind wie in der 3. Phase geschaltet. In der 6. Phase wird wieder denitrifiziert und es werden die restlichen 25% der Abwasserzugabemenge beschickt. Phase 8 ist das Absetzen. In dieser Phase werden Belüftung und Rührwerk ausgeschaltet und der Schlamm kann sich 1.8 Stunden absetzen.

Für die 9. Phase (Klarwasserabzug) stehen jetzt noch 12 Minuten zur Verfügung. In dieser Phase wird mit Hilfe einer Tauchpumpe genau die Menge an Klarwasser abgezogen, die bis dahin an Abwasser beschickt wurde. Die Pumpe wird durch einen Schwimmer gesteuert, der bei Erreichen des minimalen Füllstandes ausschaltet. Der Überschussschlamm wird manuell durch das Öffnen eines Ventils am Beckenboden abgezogen und in einem Speicherbehälter aufgefangen. Die abzunehmende Menge und die Häufigkeit werden mit Hilfe der TS-Bestimmung und der Höhe des Schlammspiegels bestimmt. Der entnommene Schlamm wird für weitere Untersuchungen zwischengelagert und danach wie auch alle anderen Abläufe über die Kläranlage Zarrentin entsorgt.

#### 5.4. Steuerung der Versuchsanlage

Für die Steuerung der Versuchsanlage wurde eine SPS der LOGO!-Reihe mit Display verwendet und die Programmierung erfolgte mit dem Programm LOGO!Soft-Comfort.

Das Programm hat die Aufgabe die einzelnen Phasen des SBR-Betriebes zu simulieren. Es muss die vorgegebenen Zeiten der Phasen intern simulieren und die erforderlichen Ausgänge zum richtigen Zeitpunkt Ein- oder Ausschalten. Zusätzlich muss die Laufzeit und damit die Fördermenge der Beschickungspumpen in jeder Phase separat über eigene Zeitglieder einstellbar sein. Am Display soll die anstehende Phase angezeigt werden und die Zeit die seit Beginn dieser Phase bereits verstrichen ist.

Bevor mit der Programmierung begonnen wurde, wurden alle Ein- und Ausgänge festgelegt. Außerdem wurden alle bereits bestehenden Verbindungen zwischen Ausgang SPS und den vorhandenen Schützen und Steckdosen auf die richtige Verdrahtung hin überprüft.

Tab. 10: Auflistung aller zu programmierenden Ein- und Ausgänge

Bezeichnung	Anschluss	Agregat	Aufgabe
I1	nicht Belegt		
I2	nicht Belegt		
I3	nicht Belegt		
I4	nicht Belegt		
Q1	Schütz 230V	Kreiselpumpe	Rühren Belebung
Q2	Schütz 24 V	Schlauchquetschpumpe	Beschickung
Q3	Schütz 230V	Kreiselpumpe	Klarwasserabzug
Q4	24 V	Dreiwegeventil	Belüftung

Das Programm soll die Steuerung des kontinuierlichen Betriebs der SBR-Anlage automatisieren und entsprechend den Anforderungen in den verschiedenen Phasen zum geforderten Zeitpunkt die richtigen Aggregate ein- und ausschalten.

Die folgende Tabelle zeigt die Dauer der einzelnen Phasen und die errechneten Pumpenlaufzeiten für die Beschickung. Die Uhrzeiten stehen jeweils für den Beginn der Phasen und werden durch den Zeitpunkt der Inbetriebnahme festgelegt.

Tab. 11: Programmierte Phasen und Pumpenlaufzeiten im Überblick

	Rest DN	Bio P	N1	DN1	N2	DN2	N3	Absetzphase	Klarwasserabzug
Phase	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zyklusanteil	0,04	0,13	0,17	0,08	0,17	0,08	0,17	0,15	0,02
Zeit in h	0,5	1,5	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,8	0,2
Beschickung in %	20,0	30,0	0,0	25,0	0,0	25,0	0,0	0	0
Beschickung in l	27,8	41,7	0,0	34,7	0,0	34,7	0,0	0,0	0,0
Pumpenlaufzeit 3l/min	9,26	13,89	0,00	11,57	0,00	11,57	0,00	0,00	0,00
Rühren	x	x	-	x	-	x	-	-	-
Belüften	-	-	x	-	x	-	x	-	-
Uhrzeit Z1	10:30	11:00	12:30	14:30	15:30	17:30	18:30	20:30	22:18
Uhrzeit Z2	22:30	23:00	00:30	02:30	03:30	05:30	06:30	08:30	09:18

Abb. 10: Steuerprogramm der Versuchsanlage

## Beschreibung des Programmaufbaus

Weil an der SPS keine Eingänge anliegen wurde als Startsignal ein Fester Pegel (High) eingefügt. Das Programm startet also, sobald die SPS eingeschaltet wird. Weil sich ein dauerhaft anliegendes Signal bei den ersten Programmdurchläufen aber als Fehlerquelle herausgestellt hat, wurden nach dem High noch ein Taktgeber, ein Zähler und ein NOT eingefügt. Durch diese Schaltung liegt zuerst ein Signal an, welches in Abhängigkeit von der Parametrierung nach einer kurzen Zeitspanne wieder erlischt. Das so erzeugte Startsignal setzt den Zähler B25 auf 1 und das Wischrelais B01 wird aktiviert. Das Wischrelais B01 initialisiert die 1.Phase (Rest DN), die in diesem Fall 30min dauert. Der Ausgang der Wischrelais B01 ist mit dem Ausgang Q1 (Rühren Belegung), einem weiteren Wischrelais B22 und einem Meldetext verbunden. Das Wischrelais B22 bestimmt die Laufzeit der Beschickungspumpen die mit dem Ausgang Q2 verbunden sind. Der Meldetext zeigt den Namen der Phase und die Zeit, die bereits verstrichen ist an.

Die 2. Phase (DN1) soll genau dann beginnen, wenn die 1. Phase zu Ende ist. Dieser Punkt ist im Programm erreicht, wenn das Signal vom Wischrelais B01 erlischt. Um nun den Zähler B10 auszulösen wird das Ausgangssignal vom Wischrelais B01 negiert und dann mit dem Zählereingang verbunden. Der löst nun das Wischrelais B02 aus und die 2. Phase beginnt.

Wie auch in der 1. Phase wird der Ausgang des Wischrelais genutzt, um die gewünschten Aggregate zu aktivieren. In der 2. Phase (DN1) werden wieder Ausgang Q1 (Rührwerk), ein Wischrelais für die Beschickungspumpe und ein Meldetext angesteuert. Die 3. Phase beginnt wiederum in dem Moment, wenn das Signal der 2. Phase erlischt. Die Negation löst den Zähler aus und das Wischrelais B03 startet die 3. Phase (N1). Der Ausgang des Wischrelais schaltet den Ausgang Q4 (Magnetventil Belüftung) und den Meldetext B40. Das Ausgangssignal wird außerdem genutzt um den Zähler B25 der 1. Phase wieder auf 0 zu setzen. Es ist nicht entscheidend in welcher Phase dies geschieht, es darf nur nicht in der letzten Phase sein, weil sonst gleichzeitig Zählsignal und Rücksetzsignal anliegen und der Zyklus zum Stillstand kommt. Wie auch in den anderen Phasen, löst das Erlischen des Signals die nächste Phase über eine Negation und einen Zähler aus. Nach dem gleichen Schema wird der gesamte Zyklus durchlaufen. Ist das Programm in der letzten Phase angekommen, dann sind alle Zähler bis auf den der 1.Phase auf 1. Die Zähler haben die Aufgabe dem Programm anzuzeigen ob eine Phase im laufenden Zyklus schon aktiviert war oder nicht. Damit wird verhindert, dass zwei Phasen gleichzeitig starten. Ist der komplette Zyklus abgeschlossen, dann wird auch der Ausgang des Wischrelais B36 wieder den Zustand 0 annehmen. Über eine Negation wird daraus wieder eine 1, welche mithilfe eines dazwischengeschalteten Merkers die 1. Phase neu startet. Beim Start der 1. Phase werden alle Zähler bis auf den ersten auf 0 zurückgesetzt und der Kreislauf ist geschlossen.

Da es sich bei der verwendeten SPS um ein älteres Model handelt, ist die Zahl der maximal verwendbaren Blöcke einer Sorte und die der Gesamtanzahl begrenzt. Aus diesem Grund wurden bei der letzten Programmerweiterung die ersten beiden Phasen RestDN und Bio P in einem Wischrelais zusammengefasst. Dies war möglich, weil beide Phasen die gleichen Ausgänge schalten (Q1 Rühren Belegung und Q2 Beschickung) Die zeitliche Trennung der Phasen erfolgt durch eine Einschaltverzögerung für die Beschickungspumpen. Über die Dauer der Verzögerung wird nun die Länge der ersten Phase bestimmt. Es stehen außerdem für die Ausgabe von Meldetexten auch nur 5 Blöcke zur Verfügung. Um aber die Zeiten aller 9 Phasen Anzeigen zu können, war es nötig die Meldetexte doppelt zu belegen und sie auch durch beide anzuzeigenden Phasen auszulösen. Beim Programmieren mit der LOGO!Soft-Comfort Software haben sich einige Schwächen herausgestellt. So ist die zur Verfügung stehende Zeichenfläche sehr begrenzt und die Blöcke sind nicht in der Größe veränderbar. Diese Umstände führen dazu, dass der Stromlaufplan mit zunehmender Blockzahl immer unübersichtlicher wird und die Verdrahtung übereinander liegt oder am Bildrand verläuft.

## 5.5. Inbetriebnahme

Vorbereitungen zur Inbetriebnahme:

Nach dem alle Behälter verbunden und komplett ausgerüstet waren, wurden sie auf Dichtheit getestet. Hierzu wurden Sie mit Wasser gefüllt und auf undichte Verbindungen und Ventile geprüft. Nachdem keine Fehler festgestellt wurden, konnte die Belüftung manuell geöffnet werden. Durch das zuvor eingelassene klare Wasser war die Blasenverteilung gut zu erkennen und die Belüfterposition konnte den Beobachtungen entsprechend korrigiert werden. Als nächstes wurde der Kondenswasserablass getestet. Hierfür wurde bei geschlossener Belüftung etwas Wasser eingefüllt. Nach dem Öffnen der Belüftung wurde das Wasser nun wieder wie geplant aus der Luftleitung gedrückt.

Vor dem Entleeren war es wichtig die Schaltpunkte der Klarwasserpumpenschwimmer zu ermitteln, um sie dann für den Betrieb richtig einstellen zu können. Der Abschaltpunkt bestimmt dabei die Entnahmemenge und legt gleichzeitig den Minimalwasserstand des Beckens fest. Er lässt sich durch die Höhe der Schwimmerbefestigung einstellen. Der Abstand zwischen Ein- und Ausschaltpunkt kann über die Länge des Kabels zwischen Schwimmer und Befestigung verändert werden. Dabei gilt, je länger das Kabel umso höher muss der Wasserspiegel steigen, damit der Schwimmer nach dem Ausschalten den Einschaltpunkt wieder erreicht.

Vor Betriebsbeginn war es nötig alle anderen Pumpen und die Steuerung auf ihre Funktionsfähigkeit zu prüfen. Hierfür wurden die Abwasserentnahmepumpe eingeschaltet und das Vorlagebecken bis zu den Überläufen gefüllt. Um ein Überlaufen des Vorlagebeckens auszuschließen, musste sichergestellt sein, dass der Zulaufvolumenstrom auch bei Dauerbetrieb der Abwasserentnahmepumpe nicht die Kapazität der Überlaufrohre überschreitet.

Vor dem Einbau der Beschickungspumpen mussten sie auf ihre Funktionsfähigkeit getestet werden. Um sicherzustellen, dass die Pumpen beim Betrieb der Anlage die geforderte Abwassermenge in die Belebungsbecken fördern, wurden zunächst Versuche mit Leitungswasser durchgeführt. Beide Pumpen konnten mithilfe eines kurzen Programms, das für die Leistungstests geschrieben wurde, für einen zuvor genau festgelegten Zeitraum eingeschaltet werden. Die in diesem Zeitraum geförderte Abwassermenge wurde in einem Behälter aufgefangen und anschließend nachgemessen. Das Messprogramm beinhaltete das zehnmahlige Einschalten jeder Pumpe für jeweils eine Minute und das dreimalige Einschalten für jeweils zehn Minuten. Am Ende jedes Zeitabschnitts erfolgte die Messung des geförderten Volumens. Die Auswertung der Testergebnisse zeigte, dass beide Schlauchquetschpumpen genau die auch in den Herstellerangaben beschriebene Förderleistung von 3 l/min erbringen. Zur Sicherheit wurde anschließend dieser Test mit mechanisch vorgereinigtem Abwasser als Zulauf der Versuchsanlage wiederholt. Dazu erfolgte der Einbau der Pumpen in die Versuchsanlage und somit praktisch ein Test unter Betriebsbedingungen. Der einzige Unterschied zum praktischen Betrieb bestand darin, dass die Belebungsbecken noch nicht gefüllt waren und das geförderte Abwasser in Messbehältern aufgefangen wurde. Die Anzahl der durchgeführten Messungen konnte bei diesem Test jedoch auf 2 Untersuchungszeiträume pro Pumpe von jeweils 10 min beschränkt werden, weil sich die Förderleistung unter diesen Bedingungen nicht veränderte.

Der Testlauf der Rührwerke erfolgte nachdem Vorspeicher und Belebungsbecken gefüllt waren. Die Funktionsfähigkeit war vollständig gegeben und die notwendige Homogenisierung der Beckeninhalte konnte erreicht werden.

Um auch das Risiko eines Fehlers im Steuerprogramm zu minimieren, wurde die Version, die aus der SPS übertragen wurde, über 24 Stunden am PC simuliert. Dieser Zeitraum ist gewählt worden, damit das Programm zwei volle Zyklen durchlaufen konnte.

Inbetriebnahme der Versuchsanlage:

Als erstes wurden beide Belebungsbecken mit Belebtschlamm aus dem Nitrifikationsbecken der Kläranlage bis zum maximalen Wasserstand gefüllt. Die hierfür verwendete Tauchpumpe wurde etwa 1,5m tief in das Belebungsbecken abgesenkt, um möglichst wenig Schwimmschlamm in die Versuchsanlage zu bekommen. Beim Einschalten der Anlage, beginnt die Steuerung mit der 1. Phase. In dieser Phase werden aber die Becken beschickt und gerührt. Das würde aber zum Überlaufen führen, weil die Belebungsbecken bereits voll sind. Um die Anlage nun starten zu können, muss in den Becken der Minimalstand anliegen. Dieser Zustand wurde hergestellt, indem der Schlamm ca. 1 Stunde sedimentierte und mit den Klarwasserpumpen im Handbetrieb das überschüssige Wasser bis zum Ausschaltpunkt des Schimmers abpumpt wurde. Es wäre auch möglich gewesen, die Becken nur bis zum Minimalstand mit Belebtschlamm zu füllen. Mit der hierfür verwendeten Pumpe war es nur schwer möglich, die Wasserstände in beiden Becken genau einzustellen. Außerdem wurde angestrebt, möglichst so viel Belebtschlamm in die Becken zu bekommen, dass der bei der Planung errechnete Trockensubstanzgehalt von 3,3 g/l bei Maximalfüllung möglichst erreicht wird. Da im Belebungsbecken der Kläranlage am Tag der Schlammentnahme ein Trockensubstanzgehalt von 3,5 gemessen wurde, lag es nahe die Befüllung der Becken auf diese Weise durchzuführen.

Nachdem die Belebungsbecken angeimpft und auf Minimalwasserstand gebracht waren, konnten die Abwasserentnahmepumpe im Ablauf der Flotation eingeschaltet und die Steuerung gestartet werden. Das Einschalten der Steuerung fand genau um 10:30 Uhr statt. Der Zeitpunkt wurde gewählt, damit die Phasen in denen Messungen und Probenahmen stattfinden in den Tagesrhythmus passen. In den ersten beiden Phasen (Rest DN und Bio P) werden 50 % der in einem Zyklus zugeführten Abwassermenge durch die Beschickungspumpen in die Becken befördert. Zur Überprüfung der beschickten Menge wurde die Füllstandsänderung der Becken überwacht. Nach dem Ende der zweiten Beschickung war der Wasserspiegel in beiden Becken genau wie geplant bis zum „halbmaximalen“ Füllstand angestiegen. Damit war gleichzeitig sichergestellt, dass beide Beschickungspumpen die gleiche Förderleistung haben und dass in den eingestellten Laufzeiten auch genau die geforderten Mengen gepumpt werden.

Nachdem die ersten beiden Phasen durchlaufen waren, öffnete wie geplant die Belüftungsklappe. Jetzt konnte die Luftmenge über den eingebauten Kugelhahn so eingeregelt werden, dass der Sauerstoffgehalt in beiden Belebungsbecken spätestens nach der Hälfte der ersten Belüftungszeit einen Wert von 2 mg/l erreicht. Bei der Messung des Sauerstoffgehaltes konnte ein leichter Unterschied zwischen den Becken festgestellt werden. Diese Abweichung war auf einen kleinen Unterschied des Füllstandes der Becken zurückzuführen. Die Abweichung wurde durch die Schwimmer, welche die Klarwasserpumpen ausschalten, hervorgerufen. Obwohl die Anordnung, Bauweise und Einstellung in beiden Becken identisch war, schaltete einer der beiden Schwimmer immer etwas später. Das hatte zur Folge, dass in diesem Becken durch die leichte Verzögerung beim Ausschalten der Klarwasserpumpe die Füllstände immer etwas tiefer lagen. Das daraus entstehende Druckgefälle in der Belüftungsleitung verursachte eine Ungleichverteilung der zugeführten Luftmenge. Dieser Fehler konnte jedoch durch eine Änderung der Höhe der Schwimmerbefestigung behoben werden. Um den optimalen Schaltpunkt zu finden, erfolgte die Veränderung in kleinen Schritten.

## 6.1. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm lässt sich in drei Abschnitte unterteilen.

Der erste Abschnitt beinhaltet die Einfahrphase und den Nachweis über die Gleichheit der parallel betriebenen Becken. Für eine Zeit von drei Wochen sind beide Belebungsbecken identischen Bedingungen ausgesetzt. Treten in diesem Zeitraum dennoch Unterschiede auf, dann ist es immer noch möglich, sie zu beseitigen oder im Nachhinein bei den Berechnungen zu berücksichtigen. Erfolgt dieser Vergleich nicht, so kann man nicht eindeutig nachweisen, dass die Veränderung allein auf die Zugabe des Dosfolats zurückzuführen ist.

Im zweiten Abschnitt wird dem Belebungsbecken B der Versuchsanlage eine so genannte „Schockdosierung“ an Dosfolat zugeführt, um die Zeit bis zum Eintreten einer Wirkung zu verkürzen. Die Zugabemenge liegt für eine Zeit von 15 Tagen bei 1,0 ppm des Zulaufs.

Der dritte Abschnitt entspricht dem Normalbetrieb der biologischen Reinigung mit und ohne Zugabe von Dosfolat. Nach Ablauf der 15 Tage mit „Schockdosierung“ wird die zudosierte Menge auf 0,2 ppm des Zulaufs herabgesetzt und bis zum Ende des Versuchszeitraums beibehalten.

Diese Planung des Versuchsprogramms wurde vor der Inbetriebnahme der Versuchsanlage vorgenommen. Der Ablauf der Versuche ist jedoch nur einzuhalten, sofern auch die geplanten Ergebnisse erzielt werden. Aus diesem Grund wurde von Anfang an die Möglichkeit in Betracht gezogen, das Versuchsprogramm im Fall eines Misserfolges dynamisch an die Umstände anzupassen. Vorgesehen war vor allem eine Erhöhung der Dosfolatdosierung, sofern die geplante Verringerung des Überschussschlammanfalls ausbleiben würde.

## 6.2. Betrieb der Versuchsanlage

Der tägliche Ablauf richtet sich nach den Phasen, die die halbtechnische Versuchsanlage durchläuft. Die Programmierung der Steuerung im 24 Stundenrhythmus hat den Vorteil, dass die einzelnen Phasen immer zur gleichen Tageszeit aktiviert sind.

Tab. 12: Übersicht über die Startzeiten der Phasen

Zeittafel										
	Rest DN	Bio P	N1	DN1	N2	DN2	N3	Absetzen	Klarwasserabzug	Summe
Phase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Zyklusanteil	0,04	0,13	0,17	0,08	0,17	0,08	0,17	0,15	0,02	1,00
Phasendauer in h	0,5	1,5	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,8	0,2	12,00
Startzeit Phasen Zyklus 1	10:30	11:00	12:30	14:30	15:30	17:30	18:30	20:30	22:18	
Startzeit Phasen Zyklus 2	22:30	23:00	00:30	02:30	03:30	05:30	06:30	08:30	10:18	

Die Tabelle zeigt die Startzeiten der Phasen und deren Dauer. Die Entnahme der einzelnen Proben und die Durchführung der Vorortmessungen sind an bestimmte Phasen gebunden, weil die Verfügbarkeit nur während der jeweiligen Zeitspanne besteht.

Die erste Messung und Probenahme erfolgt in der Phase N3 des Zyklus 2 gegen 8:00 Uhr. Dieser Zeitpunkt wurde gewählt, weil die Belebungsbecken jetzt den für die Messung des Schlammvolumens und des Trockensubstanzgehaltes nötigen maximalen Füllstand haben und voll durchmischt sind. Für die Messung des Schlammvolumens werden jeweils 500 ml und für die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes jeweils 250 ml Belebtschlamm aus beiden Becken entnommen. Anschließend an die Probenahme werden Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffgehalt in den Belebungsbecken gemessen. Die Messung des Sauerstoffgehaltes erfolgt am Ende der Phase N3, weil man zu diesem Zeitpunkt erkennen kann ob die Sauerstoffzufuhr ausreichend ist. Durch den Wechsel zwischen aeroben und anaeroben oder anoxischen Phasen unterliegt der Sauerstoffgehalt starken Schwankungen. Ist der Sauerstoffgehalt am Ende der Phase N3 hoch, dann war die Belüftung auch in den vorangegangene Phasen ausreichend, damit die in diesem Zyklus zugeführten Abwasserinhaltsstoffe veratmet oder umgewandelt werden konnten. Die Messung der Temperatur wurde aus rein praktischen Gründen an die Sauerstoffmessung gekoppelt, weil sie mit dem gleichen Messgerät ermittelt wurde. Zur Überprüfung der zudosierten Dosfolatmenge wird der Füllstand des als Dosfolatspeicher verwendeten Messzylinders festgehalten. Die Ablesung erfolgt während sich das Sauerstoffmessgerät nach dem eintauchen der Sonden auf den richtigen Wert einpendelt.

Kurz vor Ende der Absetzphase gegen 10:05 Uhr wird der Überschussschlamm manuell abgezogen. Hierzu wird bei beiden Belebungsbecken das Überschussschlammventil so lange geöffnet, bis die erforderliche Menge abgelaufen ist. Aus den Auffangbehältern wird dann jeweils eine Probe von 100 ml für die Trockensubstanzbestimmung entnommen.

Die Phase, in der das Klarwasser aus den Behältern abgepumpt wird beginnt um 10:18 Uhr. Kurz nach dem Einschalten der Pumpen wird jeweils eine Klarwasserprobe direkt aus dem Strahl des Ablaufes entnommen.



### 6.3. Messungen und Analysen

Die Durchführung der Messungen und die dafür erforderlichen Probenahmen erfolgen immer zur gleichen Uhrzeit. Dies ist notwendig, weil sich die Messwerte durch den Phasenwechsel im Tagesverlauf ändern. Erfolgt die Messung oder Probenahme aber immer zum selben Zeitpunkt der Phase, so ist die Vergleichbarkeit gegeben und Veränderungen oder Tendenzen werden sichtbar.

Alle Messungen die mithilfe von Küvettentests durchgeführt wurden, konnten aus Kostengründen nur zweimal wöchentlich erfolgen. Davon betroffen sind die Nitrat-, Ammonium- und Phosphatmessung sowie die Ermittlung des chemischen Sauerstoffbedarfs. Alle anderen Werte wurden werktäglich ermittelt.

Für die tägliche Bestimmung des **Schlammvolumens** der beiden Belebungsbecken wird gegen Ende der Phase N3 des Zyklus 2 jeweils eine Belebtschlammprobe von 500 ml entnommen. In dieser Phase sind beide Belebungsbecken bis zum maximalen Füllstand gefüllt und durch die eingeschaltete Belüftung ausreichend durchmischt. Diese Voraussetzungen sind nötig, um das Schlammvolumen bestimmen zu können. Ist die Durchmischung zu gering, dann ist die Probe nicht repräsentativ für den Zustand des gesamten Beckens. Erfolgt eine Messung in einer Phase in der die Becken nicht bis zum Maximalwasserstand gefüllt sind, dann sind die gemessenen Werte durch die beim Klarwasserabzug entfernte Wassermenge zu hoch. Bei genauer Kenntnis der fehlenden Wassermenge zum Zeitpunkt der Probenahme ist jedoch eine Umrechnung möglich. Die Proben werden für die Messung jeweils in einen Messzylinder mit 1000 ml Fassungsvermögen gegeben. Dann werden beide Zylinder mit Ablaufwasser bis auf 1000 ml aufgefüllt und umgerührt. Nach 30 Minuten hat sich der Belebtschlamm am Boden abgesetzt und das Schlammvolumen kann an der Grenzfläche zwischen Schlamm und Wasser abgelesen werden. Um den Verdünnungsfaktor wieder herauszurechnen, wird der ermittelte Wert wieder mit zwei multipliziert. Die Verdünnung der Belebtschlammprobe ist erforderlich, weil die Bestimmung des Absetzverhaltens mit zunehmender Höhe des Schlammvolumens durch die Beeinflussung des Messzylinder immer ungenauer wird. Aus diesem Grund erfolgt die Messung nur bis zu einem Schlammvolumen von maximal 250 ml/l.

Die Probenahme zur Bestimmung des **Trockensubstanzgehalts** der Belebungsbecken erfolgt aus den gleichen Gründen zum selben Zeitpunkt wie bei der Schlammvolumenbestimmung. Für die Messung wird aus beiden Belebungsbecken eine Belebtschlammprobe von 250 ml gezogen. Bei der Entnahme der Proben wurde darauf geachtet, dass kein Schwimmschlamm enthalten war, damit keine Verfälschung der Messergebnisse auftritt. Vor dem Trocknen wird der Schlamm filtriert. Durch das Filtrieren werden gelöste Bestandteile und Feststoffe die vom Filter nicht zurückgehalten werden bei der Messung des Trockensubstanzgehaltes nicht berücksichtigt. Der Trockensubstanzgehalt ist also im Bezug auf die Menge der enthaltenen Mikroorganismen aussagekräftiger als der Trockenrückstand, bei dem diese Anteile enthalten sind. Der Filterkuchen wird zusammen mit dem Filterpapier in einer Schnelltrockenofenwaage getrocknet. Zieht man vom Trockengewicht das Gewicht des Filters ab, so ergibt sich der Trockensubstanzgehalt der 250 ml Belebtschlammprobe. Für die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes des Überschussschlammes wird jeweils eine Probe von 100 ml aus den beiden Schlammspeichern entnommen. Bei der Probenentnahme wird darauf geachtet, dass der Überschussschlamm im Behälter homogenisiert ist. Hat sich der Schlamm bereits abgesetzt, dann ist die Probe nicht repräsentativ und die Messwerte spiegeln nicht die wahren Verhältnisse wider. Die Messung des TS-Gehaltes erfolgt nach demselben Muster wie bei der Belebtschlammprobe. Zuerst wird der Schlamm filtriert und anschließend wird der Filterrückstand getrocknet. Die geringere Probenmenge wurde gewählt, weil der Trockensubstanzgehalt des Überschussschlammes viel höher ist. Das hat zur Folge, dass die Filtration und Trocknung bei gleicher Menge wesentlich länger dauern würde und das Nassgewicht des

Filterkuchens den Maximalwert des Messbereichs der Schnelltrocknofenwaage überschreiten würde.

**Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffgehalt** werden ebenfalls in der Phase N3 des Zyklus 2 gemessen. Der gewählte Zeitpunkt ist vor allem für die Messung des Sauerstoffgehaltes wichtig, weil die ermittelten Werte am Ende der Phase zur Einstellung der zugeführten Druckluftmenge genutzt werden. Für die Messungen werden die Sonden der beiden Messgeräte etwa 10 cm tief immer an der gleichen Stelle im Becken eingetaucht. Die Ablesung erfolgt erst wenn der angezeigte Messwert sich stabilisiert hat. Nach der Messung werden die Sonden gereinigt. Ist eine Kalibrierung eines der Messgeräte erforderlich, so wird dies im Display angezeigt. In einem solchen Fall wird die notwendige Wartung vor Beginn der Messungen vorgenommen. Sollte aber häufiger und regelmäßig vorgenommen werden.

Die Zu- und Ablaufwerte der Versuchsanlage werden mithilfe von Küvettentests zweimal wöchentlich bestimmt. Für die erforderlichen Messungen werden Ablaufproben von beiden Becken und eine Zulaufprobe gezogen.

Die Bestimmung des **chemischen Sauerstoffbedarfs** (CSB) im Ablauf wird mit Küvetten des Typs LCK 314 (vergleichbar DIN 38409/T41) durchgeführt, die einen Messbereich zwischen 15 und 150 mg/l haben. Der CSB im Zulauf wird mit Küvetten des Typs LCK 514 (vergleichbar DIN 38409/T41) bestimmt, die einen Messbereich zwischen 100 und 2000 mg/l haben. Für beide Küvettentests sind 2 ml Probe nötig, die mithilfe einer Pipette in die Küvetten gefüllt werden. Für die Entnahme der 2 ml aus den Probenahmeflaschen wird die Pipettenspitze immer nur für die gleiche Probe verwendet, um Messfehler durch Vermischung auszuschließen. Nachdem die Küvetten verschlossen und geschüttelt wurden, müssen sie für 2 Stunden bei 148°C kochen. Die Auswertung der Messungen erfolgt mit einem Photometer, das die Barcodes auf den Küvetten erkennt und dementsprechend die passende Wellenlänge des Lichts automatisch auswählt. Die gemessene Absorption wird mithilfe der gespeicherten Eichkurve automatisch umgerechnet und dann als Konzentration in mg/l ausgegeben.

Die Messung der **Nitratkonzentration** im Ablauf wird mit Küvettentests des Typs LCK 339 (vergleichbar DIN EN ISO 10304) durchgeführt, die einen Messbereich von 1 bis 60 mg/l haben. In die Küvetten wird 1 ml der Ablaufprobe gegeben. Die Auswertung der Messung erfolgt nach 15 min Reaktionszeit wie beim CSB mit dem Photometer. Die enthaltene Konzentration wird auch hier nach dem einlesen des Barcodes automatisch bestimmt und in mg/l ausgegeben.

Die Messung der **Ammoniumkonzentration** wird mit den Küvettentests des Typs LCK 305 (vergleichbar EN ISO 11732) durchgeführt, die einen Messbereich von 1 bis 15 mg/l haben. Für die Messung werden 0,5 ml Ablaufwasser in die Küvetten gefüllt. Reaktionszeit und Auswertung erfolgen wie bei der Nitratmessung.

Die Messung der **Phosphatkonzentration** im Ablauf wird mit den Küvettentests des Typs LCK 348 (vergleichbar DIN EN ISO 1189) durchgeführt, die einen Messbereich von 0,5 bis 5,0 mg/l haben. Für die Messung wird 0,5 ml Ablaufwasser in die Küvetten gefüllt. Zur Phosphatmessung im Zulauf werden Küvetten des Typs LCK 350 (vergleichbar DIN EN ISO 1189) verwendet mit einem Messbereich von 6 bis 60 mg/l. Es werden 0,4 ml Zulaufwasser in die Küvette eingefüllt. Beide Küvettentests werden für 60 Minuten auf 100° C erhitzt. Die Auswertung erfolgt auch hier mit dem Photometer.

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit der verwendeten Küvettentests wurde ein Teil von den Proben entnommen, die im Rahmen der Eigenüberwachung von einem staatlich anerkannten Prüflabor getestet wurden. Die Messergebnisse, die mit den Küvetten ermittelt wurden, stimmten mit den Werten vom Prüflabor ziemlich genau überein und zeigten wenn überhaupt, dann nur sehr geringe Abweichungen. Für die Auswertung der Versuchsergebnisse und den Betrieb der Anlage sind die Küvettentests also gut geeignet. Die Vorteile dieser

Messverfahren liegen vor allem im Vergleich mit den Werten der Kläranlage Zarrentin, die mit den gleichen Küvettentests ermittelt werden.

Die **Mengenmessung** des entnommenen **Überschussschlamm**s erfolgt über den Füllstand der Überschussschlamm Speicher. Dazu wurden vor der Inbetriebnahme der Anlage Markierungen an der Seitenwand angebracht, an denen sich der Behälterinhalt ablesen lässt.

Die Messung des Schlammvolumens und des Trockensubstanzgehaltes ist nötig um den Betrieb der Versuchsanlage steuern zu können. Aufgrund der wochentäglich ermittelten Daten, kann die jeweils zu entnehmende Menge an Überschussschlamm festgelegt werden. Aus den Werten kann außerdem eine Aussage über das Absetzverhalten des Belebtschlamm getroffen werden, was für den Betrieb der Anlage wichtig ist und auch bei der Auswertung der Versuchsergebnisse, im Hinblick auf positive oder negative Auswirkungen der Folsäurezugabe, einen wichtige Rolle spielt. Die Bestimmung der enthaltenen Trockensubstanz im Belebungsbecken und im Überschussschlamm ermöglicht eine genaue Bilanzierung für beide Belebungsbecken. Über diese Messwerte wird die zentrale Frage der möglichen Überschussschlammreduktion durch Folsäure beantworten.

Anhand der Messung des Sauerstoffgehaltes wird die Zuführte Luftmenge geregelt. Die gemessene Temperatur im Belebungsbecken wird zusammen mit den CSB- und Phosphorfrachten im Zulauf zur Berechnung des theoretischen Überschussschlammmanfalls verwendet. Die Ablaufkonzentrationen geben Aufschluss über die Abbauleistung und die Nährstoffelimination. Außerdem wird die Einhaltung der Grenzwerte für den Ablauf überwacht.

## 7.1. Verminderung der Überschussschlammproduktion

Der während des Versuchszeitraums entnommene Überschussschlamm wird über die entnommene Menge und über den darin enthaltenen Trockensubstanzgehalt ermittelt. Die sich ergebende Masse in kg Trockensubstanz wird über den Versuchszeitraum kumuliert in einer Kurve dargestellt. Dies hat den Vorteil, dass die durch das diskontinuierliche Abziehen entstehenden Schwankungen ausgeglichen und die Daten in eine übersichtliche und aussagekräftige Form gebracht werden.

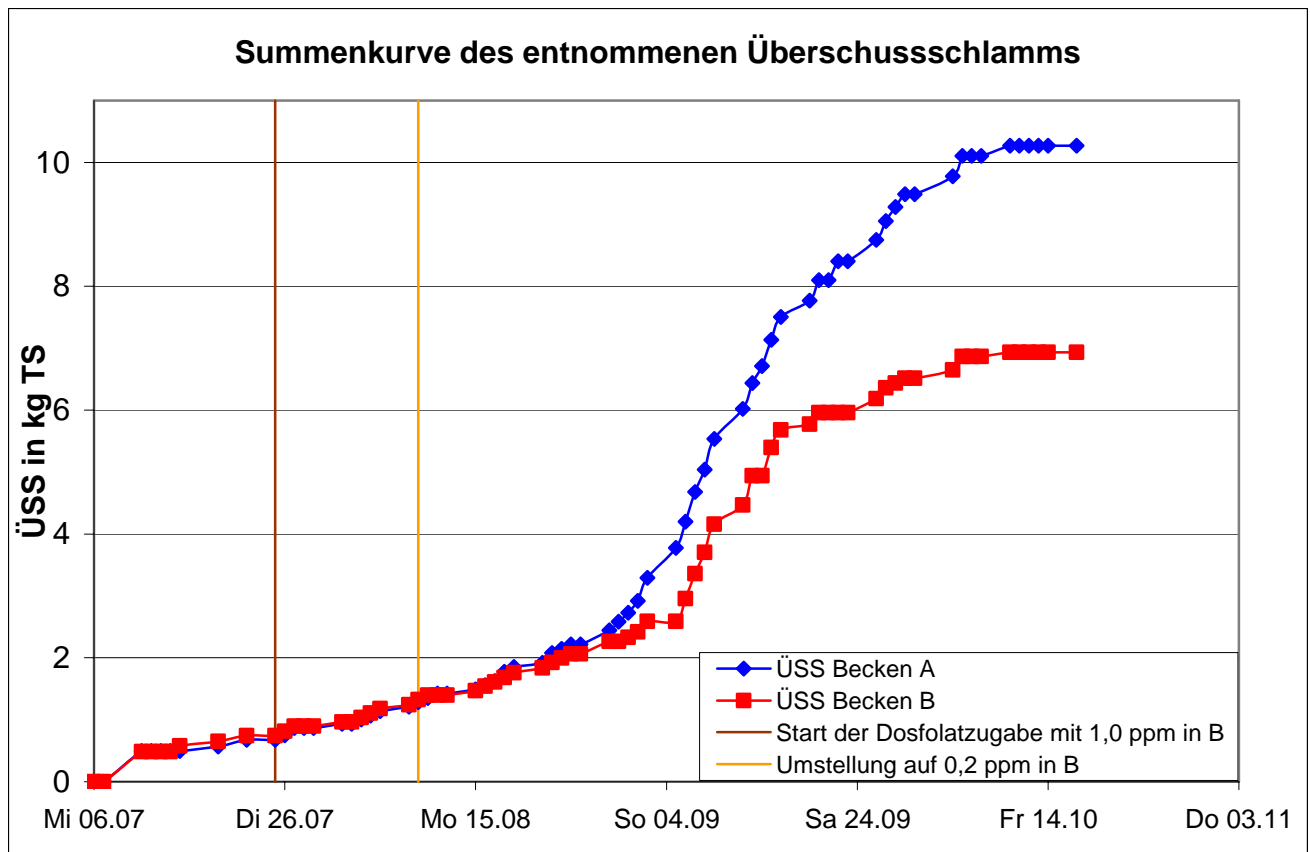


Abb. 11: Vergleich der entnommenen Überschussschlammengen

Bei einem Vergleich der Summenkurven wird deutlich, dass zunächst aus beiden Becken gleich viel Überschussschlamm entnommen wurde. Dies änderte sich auch nicht innerhalb der 15 Tage mit Dosfolatzugabe von 1,0 ppm. Ein Unterschied ist erst etwa ab dem 01.09 zu verzeichnen. Die ersten Anzeichen für eine Wirkung der Folsäure zeigten sich also etwa 3 Wochen nach Beginn der Normaldosierung mit 0,2 ppm. Wie deutlich zu sehen ist, wächst die aus Becken A entnommene Menge an Überschussschlamm von diesem Zeitpunkt an wesentlich schneller als die von Becken B. Über die Laufzeit des Versuchs wurde aus Becken A kumuliert etwa 3,3 kg mehr Trockensubstanz entnommen.

Weil der entstehende Überschussschlamm aber auch im Belebungsbecken gespeichert wird, kann man eine Verringerung nur dann allein über die abgezogene Menge bestimmen, sofern der Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken konstant bleibt. Dies ist jedoch nicht für den gesamten Versuchszeitraum der Fall. Eine Möglichkeit diesen Fehler auszugleichen ist die Betrachtung eines Zeitraums an dessen Anfang und Ende in etwa der gleiche Trockensubstanzgehalte in den Belebungsbecken festzustellen waren. Diese Methode ist jedoch nicht für beide Becken gleichzeitig anwendbar, weil die zeitlichen Bereiche mit gleichem Trockensubstanzgehalt in der Belebung nicht zum gleichen Zeitpunkt beginnen und enden. Um dies Problem zu lösen, wurde die bei Versuchsbeginn in den Belebungsbecken enthaltene Masse

an Trockensubstanz als Ausgangswert zugrunde gelegt. Zur Bestimmung des an einem bestimmten Tag entstandenen Überschussschlammes, wurde jeweils die Differenz zwischen der an diesem Tag und der zu Beginn enthaltenen Masse im Becken bestimmt. Dieser Wert gibt die Änderung der Menge an Belebtschlamm im Becken an. Wenn mehr Überschussschlamm entnommen wurde als entstanden ist dann kann sich auch ein negativer Wert ergeben. Verrechnet man nun die Änderung mit der entnommenen Menge, dann erhält man die wahre Überschussschlammproduktion.

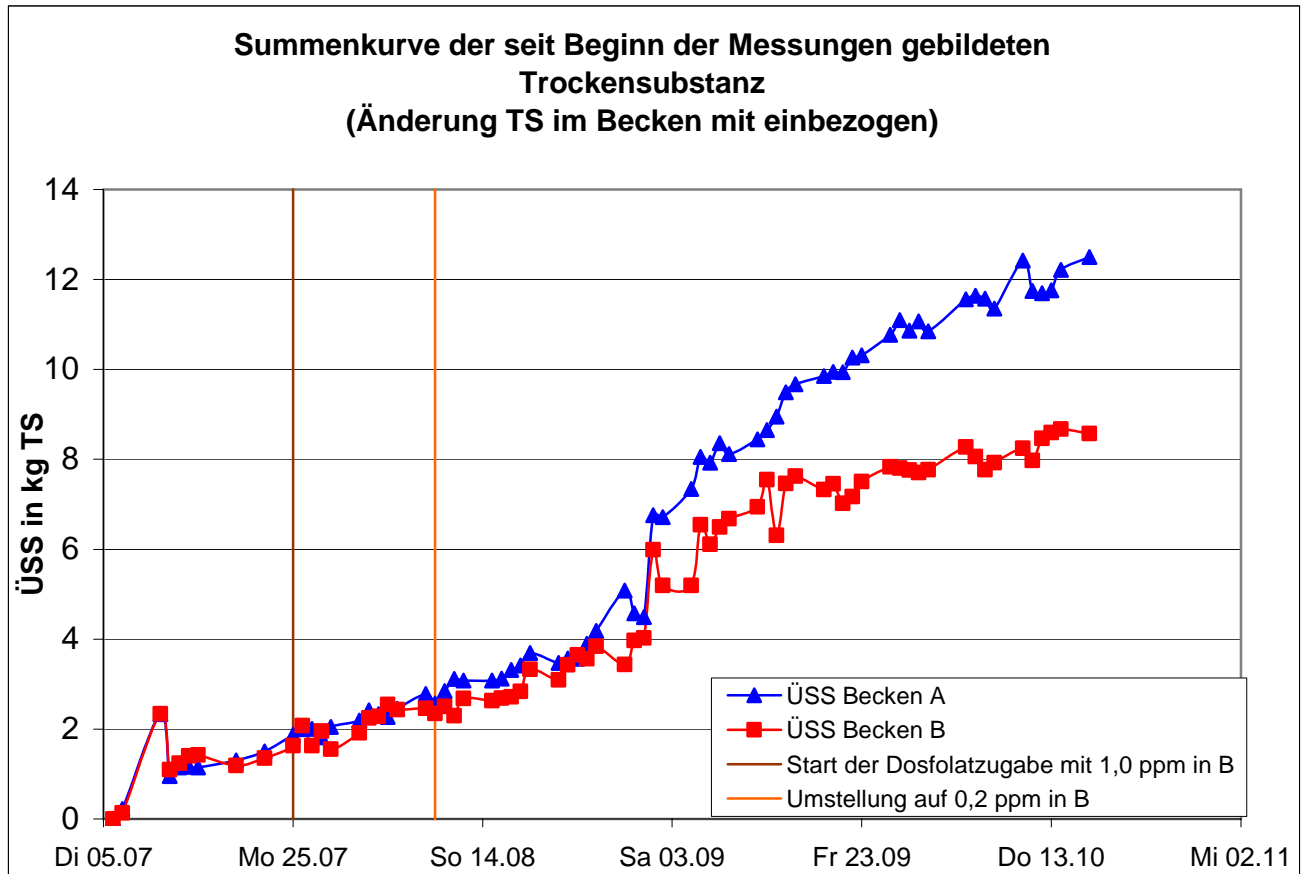


Abb. 12: Vergleich der gebildeten Überschussschlammmenge

Die Entwicklung der Überschussschlammproduktion zeigt die gleichen Tendenzen wie sie sich auch bei der Entnahmemenge abzeichnen. Die tatsächlich gebildete Menge liegt jedoch aufgrund der mit eingerechneten Speicherwirkung der Belebungsbecken wesentlich höher. In Becken A entstand eine Gesamtmenge an Überschussschlamm von 12,5 kg Trockensubstanz und in Becken B 8,6 kg. Der Unterschied zwischen A und B ist mit 3,9 kg höher als die 3,3 kg, die sich bei einer reinen Betrachtung der entnommenen Überschussschlammmenge ergeben. Die errechneten Abweichungen zwischen entnommener und gebildeter Menge sind so hoch weil sich innerhalb der Versuchszeit der Trockensubstanzgehalt in den Belebungsbecken relativ stark verändert hat. Der Unterschied wird auch vom betrachteten Zeitraum beeinflusst. Je länger die Entwicklung beobachtet wird, umso größer wird die Summe des entstandenen Überschussschlammes. Dadurch wird der Anteil des im Becken gespeicherten immer kleiner.

Die spezifische Überschussschlammproduktion der Versuchsanlage wurde aus der gebildeten Überschussschlammmenge und der zugeführten BSB-Fracht errechnet.

$$\dot{U}_{C,BSB} = \dot{U}_d / B_{d,BSB}$$

Für die Ermittlung der mit dem Abwasser zugeführten BSB<sub>5</sub>-Fracht wurde zweimal wöchentlich die CSB-Konzentration im Zulauf gemessen und mit 0,5 multipliziert. Diese Umrechnung ist möglich, weil CSB und BSB<sub>5</sub> im Zulauf im Verhältnis 2:1 enthalten sind. Diese Annahme wird durch die bisher im Rahmen der Eigenüberwachung gemessenen CSB- und BSB<sub>5</sub>-Werte bestätigt. Das arithmetische Mittel aller vom 01.01.04 bis 31.08.05 durchgeführten Messungen ergab ein Verhältnis von CSB/BSB<sub>5</sub> = 1,976.

Für alle Tage an denen keine Messung des CSB erfolgt ist, wird immer der zuletzt gemessene Wert angenommen. Die Berechnung der täglichen BSB<sub>5</sub>-Fracht erfolgt nach der Gleichung:

$$B_{d,BSB} = C_{CSB} * 0,5 * Q_{zu} .$$

Der Zulauf der Versuchsanlage  $Q_{zu}$  wurde bei der Planung auf 278 l/d festgelegt. Abweichungen, die durch Betriebsausfälle entstanden sind, werden ebenfalls erfasst und bei der Berechnung mit berücksichtigt.

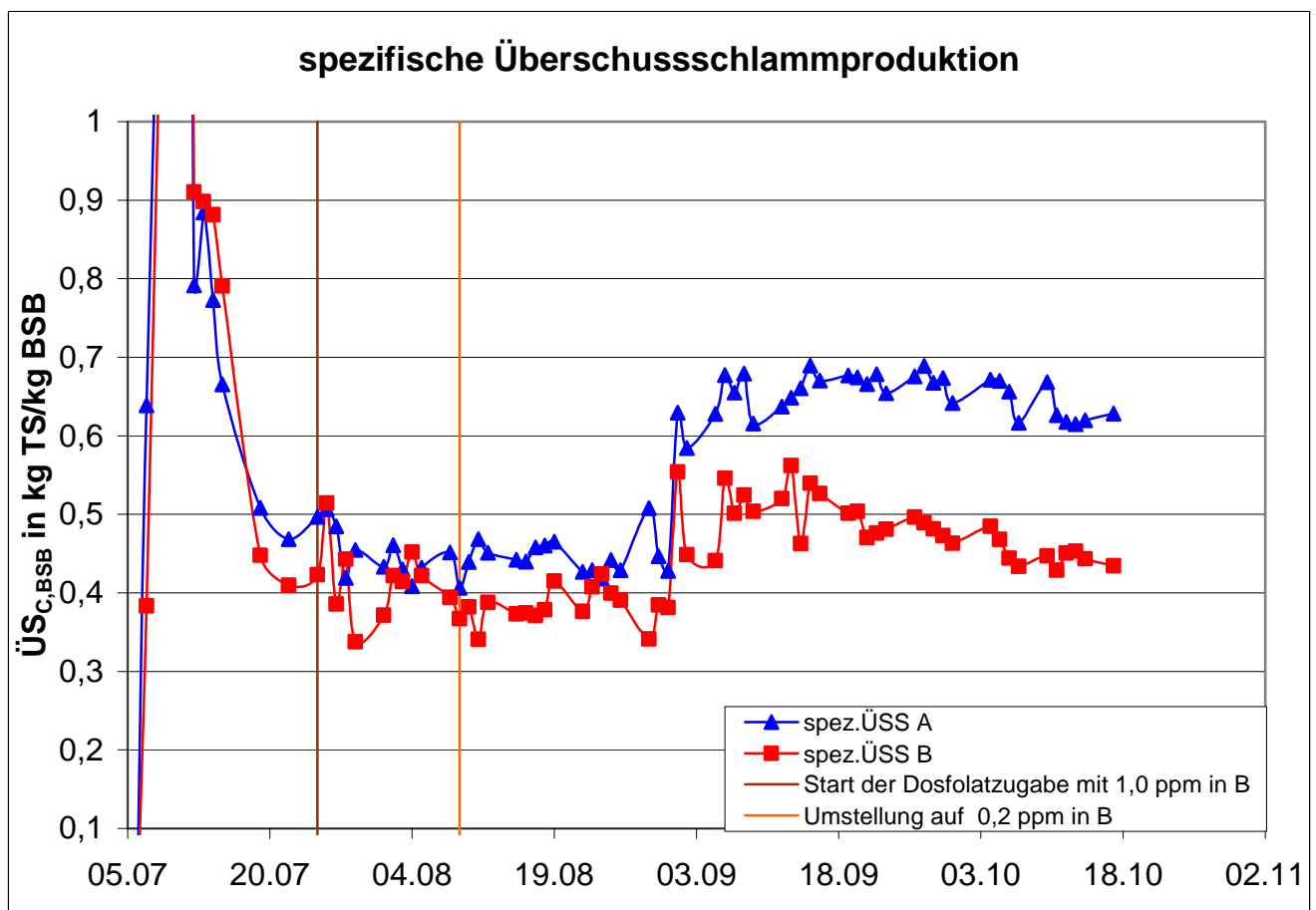


Abb. 13: Entwicklung der spezifischen Überschussschlammproduktion

Bei der Berechnung der Werte für die graphische Darstellung wurden immer die kumulierten Mengen der einzelnen Tage verwendet. Dies war erforderlich, weil die gebildete Überschussschlammmenge aus den bereits beschriebenen Gründen in dieser Form berechnet wurde. Die Art der Berechnung hat jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Aussagekraft der ermittelten Werte. Wie in der Graphik zu sehen ist steigt die spezifische Überschussschlammproduktion kurz nach Inbetriebnahme der Versuchsanlage sehr hohe Bereiche. Diese Werte spiegeln jedoch nicht die wahren Bedingungen wider, weil die Summe des zugeführten BSB am Anfang noch klein ist und trotzdem eine relativ große Überschussschlammmenge entnommen wurde. Ab dem 19.07 kann man jedoch davon ausgehen, dass der Einfluss dieses Effektes nicht mehr relevant ist. Die Werte liegen bis zum 01.09 relativ konstant zwischen 0,4 und 0,5 kg/kg. Der Sprung der ab dem 01.09 zu erkennen ist, hängt mit einer Havarie auf der Kläranlage zusammen, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird. Die durch die Veränderung der Zulaufzusammensetzung verursachte Abweichung wird durch die Berechnung mit den kumulierten Werten auf alle folgenden übertragen. So kann man davon ausgehen, dass die spezifische Überschussschlammproduktion nach dem Abklingen der Havariewirkung um einen Betrag, welcher in etwa der Höhe des Sprungs entspricht, tiefer liegt.

Um die Versuchsergebnisse besser einordnen zu können, wurde die Überschussschlammmenge berechnet, die theoretisch entstehen müsste. Im Unterschied zur Planung werden die gemessenen Zulauffrachten und Temperaturen eingesetzt. Die Grundlage für die Berechnung der Überschussschlammmenge bilden die Gleichungen des ATV-DVWK-A 131.

$$\dot{U}S_d = \dot{U}S_{d,C} + \dot{U}S_{d,P}$$

$$\dot{U}S_{d,C} = B_{d,BSB} * \{0,75 + (0,6 * X_{TS,ZB} / C_{BSB,ZB}) - [(1-0,2) * 0,17 * 0,75 * t_{TS} * F_T] / (1 + 0,17 * t_{TS} * F_T)\}$$

$$F_T = 1,072^{(T-15)}$$

$$\dot{U}S_{d,P} = Q_d * 3 * (C_{Pges,ZB} - C_{Pges,AN})$$

Zur Ermittlung der mit dem Abwasser zugeführten BSB<sub>5</sub>-Fracht wurden wie zuvor bei der Berechnung der spezifischen Überschussschlammproduktion die zweimal wöchentlich gemessenen CSB-Konzentrationen im Zulauf mit 0,5 und den Zulaufvolumenströmen multipliziert. Für alle Tage, an denen keine Messung des CSB erfolgt ist, wird der zuletzt gemessene Wert angenommen. Die täglich ermittelten Temperaturen fließen über den Term  $F_T$  in die Gleichung ein. Die für die Berechnung des Überschussschlammfalls aus der Phosphatelimination wichtigen Zu- und Ablaufkonzentrationen an Phosphat wurden wie der CSB nur zweimal wöchentlich gemessen. Auch hier wird der zuletzt gemessene Wert für die Tage ohne Messung angenommen. Das Schlammalter  $t_{TS}$  wurde für die Berechnung auf 25 Tage festgelegt. Diese Annahme wurde schon vor Versuchsbeginn getroffen, um eine Grundlage für die Fahrweise der Versuchsanlage zu schaffen. Das tatsächlich gemessene Schlammalter unterlag aufgrund des diskontinuierlichen Abzugs des Überschussschlammes starken Schwankungen. Das mittlere Schlammalter über den gesamten Versuchszeitraum liegt bei beiden Becken etwas höher als 25 d. In Becken A liegt es bei knapp 30 Tagen. Durch die Überschussschlammreduzierung in Becken B mit Hilfe der Folsäure ist natürlich auch die Verweilzeit des Schlammes gestiegen und es ergibt sich ein Schlammalter von rund 48 Tagen.

Weil der berechnete Überschussschlammanfall jedoch den Unterschied zum zur realen Entwicklung aufzeigen soll, wurde darauf verzichtet das Schlammalter als abhängige Größe zu betrachten. Der in der Gleichung berücksichtigte Einfluss des Schlammalters wird durch die Wirkung der Folsäure verfälscht, weil mit der Verringerung des Überschussschlammanfalls automatisch eine Erhöhung des Schlammalters erfolgt. Die auf der Grundlage der Zulauffracht und der Temperatur basierenden Berechnungen sind also als idealisiert zu betrachten.

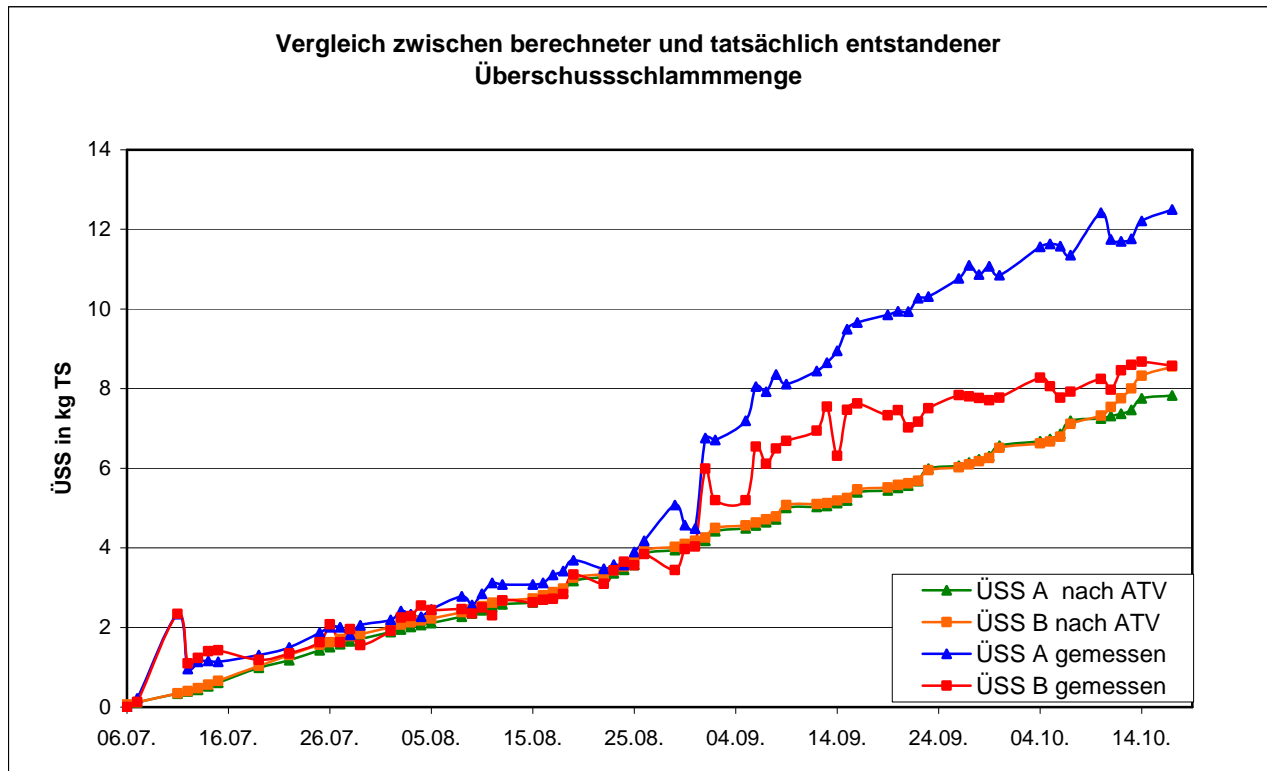


Abb. 14: Entwicklung der berechneten und tatsächlichen Überschussschlammproduktion

Wie die Graphik zeigt, ist die Entwicklung der berechneten und tatsächlichen Überschussschlammproduktion zunächst in etwa gleich. Ab dem 01.09 liegen die gemessenen Werte plötzlich höher. Der Sprung, der bei beiden Kurven zu sehen ist, lässt sich nur auf eine Veränderung im Zulauf zurückführen. Zeitgleich mit dem Sprung ereignete sich auf der Kläranlage eine Havarie im Grobrechen der Fäkalannahme, die einen etwa zweiwöchigen Ausfall zur Folge hatte. Der in diesen Zeitraum angelieferte Fäkalschlamm wurde direkt über die Vorreinigung gepumpt. Die Siebtrommel mit einer Spaltweite von 2 mm wurde dadurch völlig überlastet und setzte sich innerhalb kürzester Zeit zu. Immer, wenn dies der Fall war, überströmte das Abwasser die Siebtrommel und die Störstoffe, die zuvor immer zurückgehalten wurden, gelangten direkt in die Flotation. In der Flotation war der Bodenschlamm bereits aufgestaut, weil im Vorfeld Probleme mit der Heizung des Faulturms aufgetreten waren und der Schlammabzug dadurch minimiert werden musste. Die Konsequenz aus all diesen Vorfällen war, dass der Bodenschlamm stoßweise in den Zulauf der Belebung gelangte. In diesem Bodenschlamm sind viele Feststoffe, die über die im Ablauf der Flotation installierte Zulaufentnahmepumpe in die Versuchsanlage gelangen. Das eine Änderung der Abwasserzusammensetzung stattgefunden hatte, wurde zunächst an der Tatsache auffällig, dass die Entnahmepumpe praktisch täglich von verstopfenden Materialien befreit werden musste. In der Zeit vor der Havarie war dies nicht ein einziges Mal der Fall. Die Ursache für die Probleme konnte zwar schnell beseitigt werden, aber die Auswirkungen waren für etwa zwei Wochen spürbar. Auf ein herausrechnen der Abweichung wurde jedoch erachtet weil es



kaum möglich ist das Abklingen der Nachwirkungen der Havarie von den Veränderungen in den Becken zu unterscheiden.

Der Betrieb der Versuchsanlage und die ermittelten Messwerte wurden ebenfalls durch die Havarie in Mitleidenschaft gezogen. Durch die unverhältnismäßig hohe Zufuhr von Feststoffen in die Belebungsbecken der Versuchsanlage erfolgte ein sprunghafter Anstieg des gemessenen Trockensubstanzgehaltes.

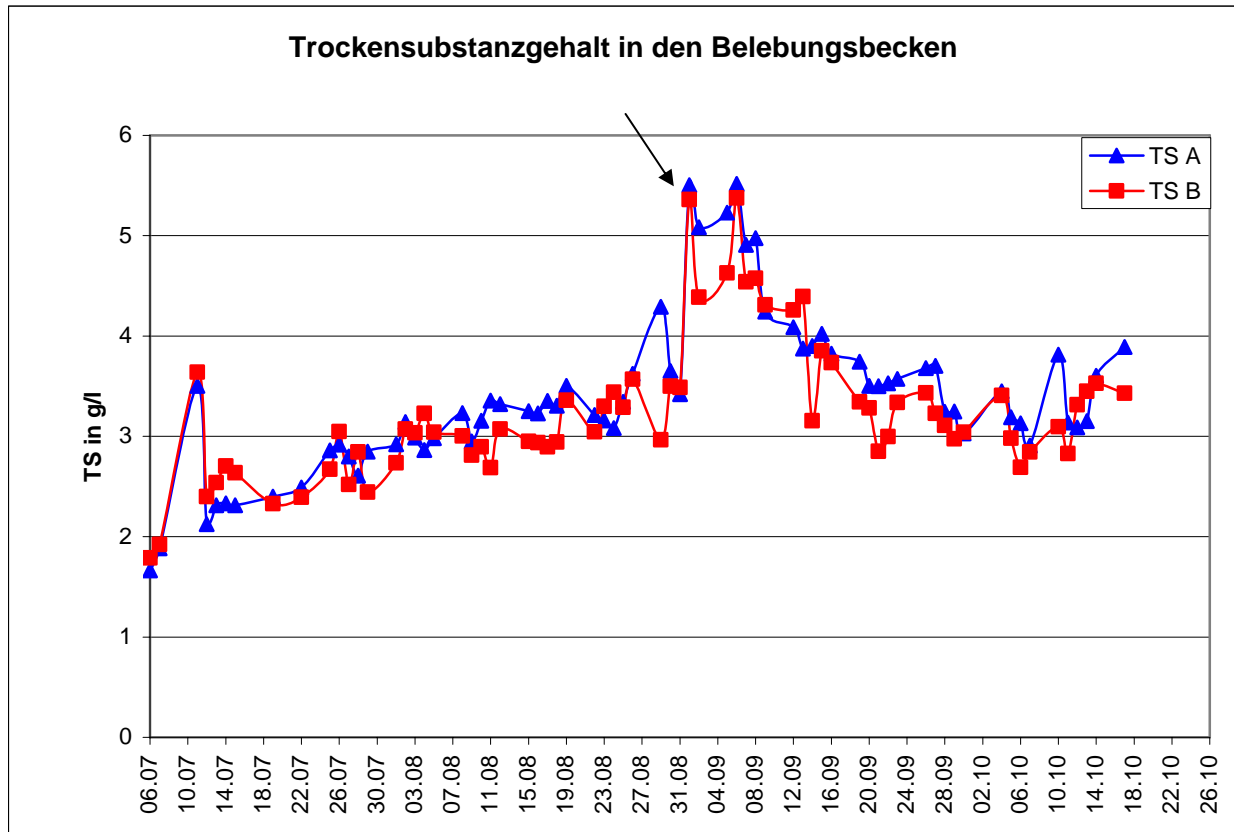


Abb. 15: Entwicklung des Trockensubstanzgehaltes in den Belebungsbecken der Versuchsanlage

Am Verlauf des Trockensubstanzgehaltes ist eindeutig der Zeitpunkt der Havarie zu erkennen. Am 01.09 ist der Trockensubstanzgehalt von beiden Belebungsbecken innerhalb von 24 Stunden um 2 g/l angestiegen. Diese Veränderung kann unmöglich durch Neubildung von Überschussschlamm entstanden sein. Auch ein Messfehler wie am dritten Tag nach Inbetriebnahme ist auszuschließen, weil die in den darauf folgenden Tagen gemessenen Werte zusammen mit den entnommenen Überschussschlammengen zeigen, dass sich die Menge an Trockensubstanz tatsächlich um diesen Wert geändert hat. Dass die Änderung nicht auf ein erhöhtes Zellwachstum zurückzuführen ist, sondern durch die kurzzeitig im Zulauf vorhandenen Feststoffe (keine Biomasse) hervorgerufen wurde, zeigen auch die gemessenen CSB-Werte im Zulauf.

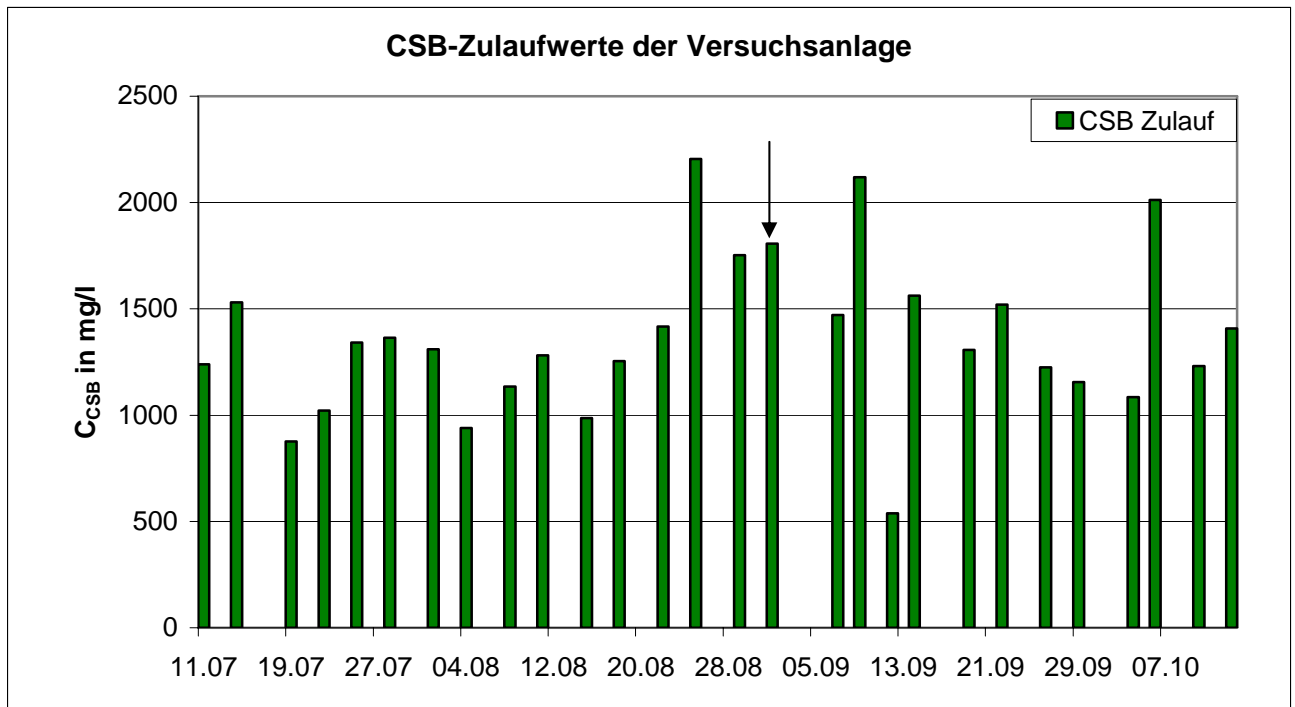


Abb. 16: CSB-Konzentrationen im Zulauf der Belebungsbecken der Versuchsanlage.

Wie die Messwerte zeigen, wurde die CSB-Konzentration durch die Havarie allenfalls leicht erhöht. Die bereits an anderen Tagen auftretenden Spitzenbelastungen liegen wesentlich höher und haben trotzdem vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die Überschussschlammproduktion. Bei einem Vergleich zwischen der berechneten Produktion auf der Grundlage der Zulauffrachten und der real abgezogenen Mengen wird dies noch deutlicher.

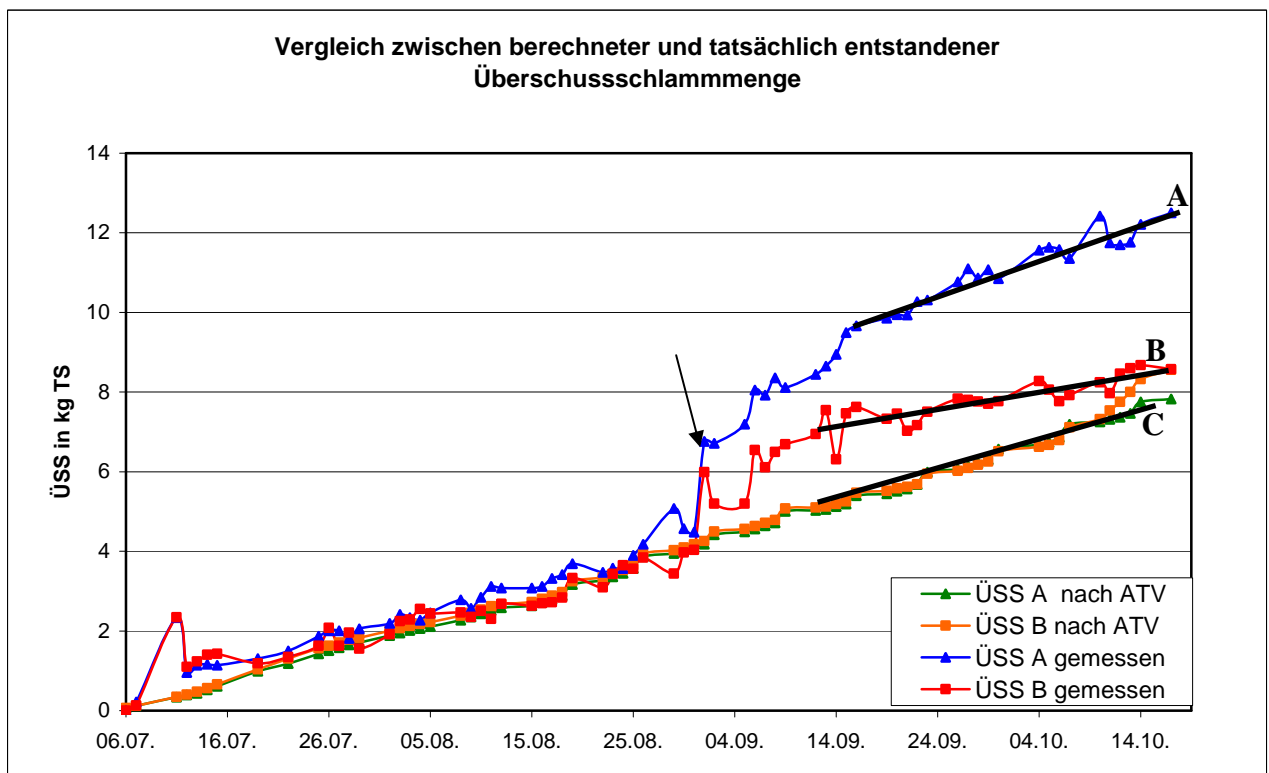


Abb. 17: Auswirkung der Havarie auf die Überschussschlammproduktion

Die eingezeichneten Trendlinien zeigen den Anstieg der Kurven nach dem Abklingen der Havariewirkung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Trendlinie A parallel zur Trendlinie C verläuft. Das bedeutet, dass die Überschussschlammproduktion im Becken A wieder mit der Berechneten übereinstimmt. Durch die Berechnung in kumulierter Form liegt sie aber weiterhin genau um die Menge höher, die durch die Havarie zusätzlich entstanden ist. Der Anstieg der Trendlinie B ist deutlich flacher als der der anderen. Das zeigt, dass die Überschussschlammproduktion zumindest in diesem Zeitraum geringer ist als die Berechnete. Betrachtet man den übermäßig starken Anstieg, der sich am 01.09 zeigt, als reine Folge eines Feststoffeintrags in die Belebung, dann ist es möglich, den fälschlicherweise als Biomasse erfassten Überschussschlamm von der Summenkurve abzuziehen. In diesem Fall liegt die Kurve des Beckens B mit der Folsäurezugabe unterhalb der Berechneten. Durch die unglücklichen Umstände während des Versuchszeitraums ist es jedoch nicht möglich dies anhand der Versuchsergebnisse zu zeigen.

Die Berechnung des Einsparpotentials erfolgt über einen Vergleich der Überschussschlammproduktion von Versuchsbecken A und B. Bei einer Betrachtung über den gesamten Versuchszeitraum ist die Menge an Trockensubstanz in Becken A um 12,49 kg angewachsen und in Becken B um 8,57 kg. Das bedeutet, dass rund 31 % weniger Überschussschlamm entstanden ist. Diese Betrachtungsweise ist jedoch nur teilweise richtig, weil die Folsäure nicht von Beginn an zugesetzt wurde. Auch die Wirkung auf die Überschussschlammproduktion setzte verzögert ein. Um das wahre Einsparpotential herauszubekommen, kann natürlich nur der Zeitraum ab dem Zeitpunkt gewertet werden, ab dem auch eine Wirkung der Folsäurezugabe vorhanden ist. Durch eine genaue Betrachtung der Messergebnisse wurde der 28.08 für den Beginn der Wirkung festgelegt. Von diesem Zeitpunkt an bis zum Ende der Versuche sind in Becken A 8,32 kg Trockensubstanz entstanden und in Becken B 4,73 kg. Das ergibt eine Verringerung der Überschussschlammproduktion bei gleichem Zulauf und gleichen Betriebsbedingungen von rund 43 %.

## 7.2. Verhalten der Biologie und Nebenwirkungen des Folsäureeinsatzes

Für den Betrieb der Versuchsanlage und um die positiven oder negativen Einflüsse der Folsäurezugabe aufzeigen zu können, wurden die Ablaufwerte beider Becken regelmäßig gemessen. Weil die Einhaltung der Grenzwerte im Ablauf für den Betrieb einer Kläranlage Voraussetzung ist, kommt ein Einsatz von Folsäure nur in Frage, wenn die Einhaltung der behördlich geforderten Grenzwerte mit Sicherheit gewährleistet bleibt. Eine Verschlechterung der Ablaufwerte oder eine Beeinträchtigung der Betriebsstabilität ist nicht akzeptabel. Auf der Kläranlage müssen laut wasserrechtlicher Erlaubnis folgende Grenzwerte eingehalten werden:

Tab. 13: Grenzwerte der Kläranlage

Parameter	Einheit	Grenzwert
BSB <sub>5</sub>	mg/l	20
CSB	mg/l	90
NH <sub>4</sub> -N	mg/l	10
N <sub>ges</sub> anorg.	mg/l	18
P <sub>ges</sub>	mg/l	2

Die Grenzwerte der Kläranlage dienen zur Einschätzung der Messergebnisse. Die Einhaltung ist jedoch aufgrund der geringen Anlagengröße schwieriger, weil sich Veränderungen schneller und gravierender auswirken.

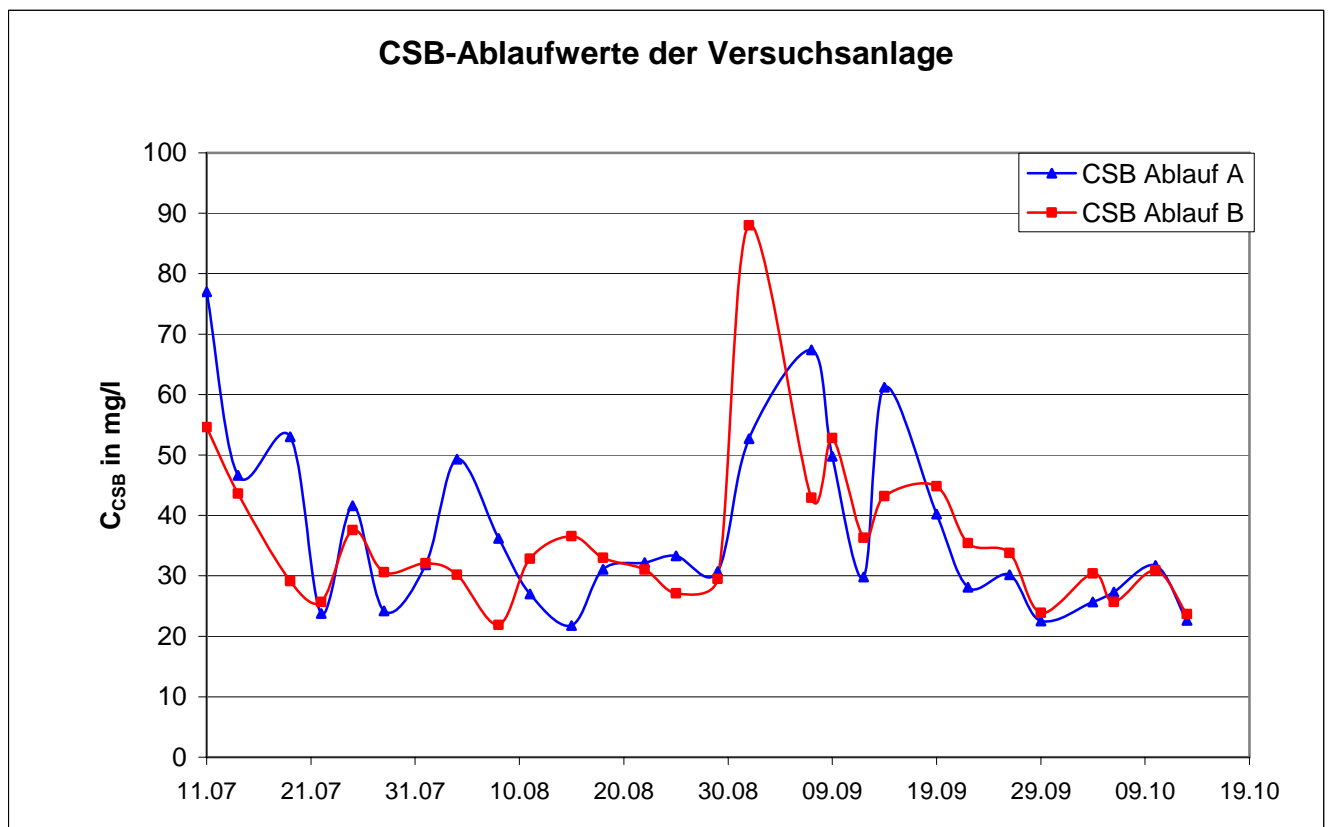


Abb. 18: CSB im Ablauf der Versuchsanlage

Wie in der Abbildung deutlich zu sehen ist, konnte der Grenzwert von 70 mg/l bis auf eine Ausnahme eingehalten werden. Die Verschlechterung der Ablaufwerte nach dem 01.09 ist auf die bereits angesprochene Havarie zurückzuführen. Durch den, in dieser Zeit, sehr hohen Abzug an Überschussschlamm wurde die Belastung der Organismen erhöht. Auch wenn sich der Trockensubstanzgehalt in den Belebungsbecken erhöht hat, ist der darin enthaltene Anteil an Mikroorganismen durch den Feststoffeintrag gesunken. Dies hatte zur Folge, dass die Menge an Organismen, die am Abbau beteiligt sind, im Vergleich zu vorher gesunken ist. Der höhere Ausschlag im Becken B ist eine Folge des etwas geringeren Trockensubstanzgehaltes, der auch schon kurz vor der Havarie vorhanden war und so eine höhere Belastung verursachte.

Eine negative oder positive Wirkung der Folsäurezugabe ist jedoch nicht zu erkennen.

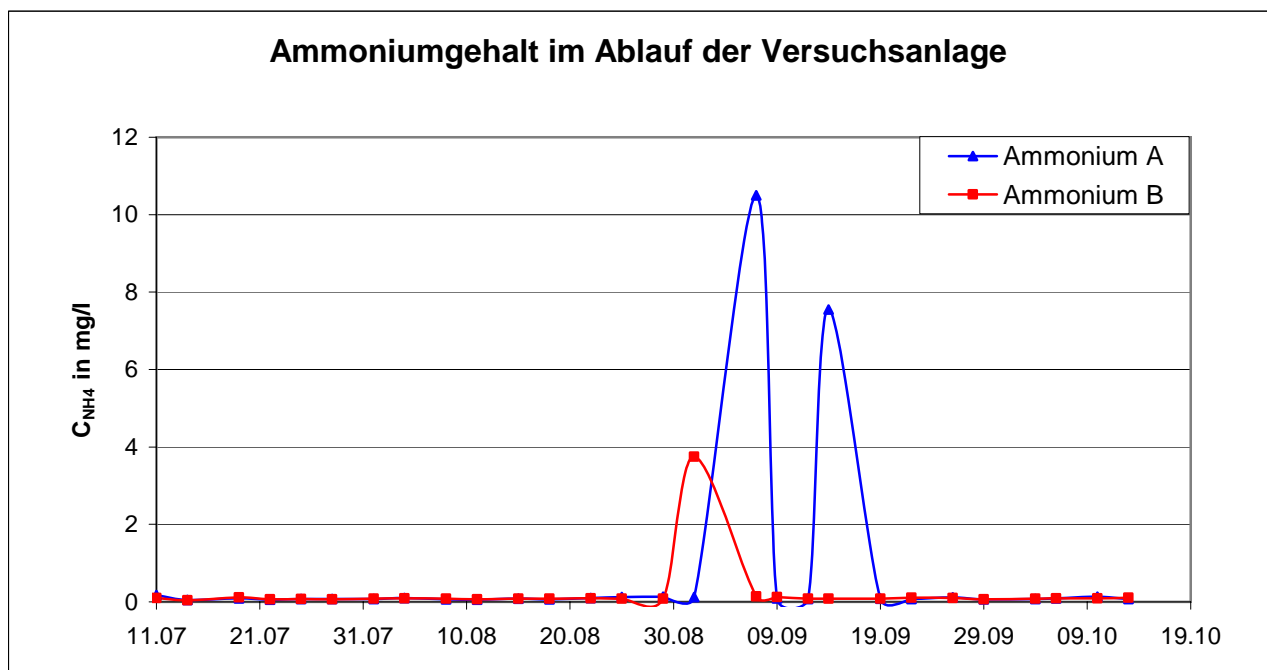


Abb. 19: Ammoniumgehalt im Ablauf der Versuchsanlage

Die Grenzwerte für den Ammoniumgehalt konnten, wie die Abbildung zeigt, relativ sicher eingehalten werden. Auch hier ist die Auswirkung der Havarie deutlich zu sehen und im Ablauf von Becken A wurde der Grenzwert von 10 mg/l einmal überschritten. Die zweite Spitze bei Becken A ist jedoch auf einen kurzfristigen Defekt in der Belüftung der Versuchsanlage zurückzuführen. Die Auswirkungen, die der hohe Überschussschlammabzug auf die kohlenstoffeliminierenden Organismen hat, treten natürlich auch bei den Nitrifikanten auf. Betrachtet man jedoch den störungsfreien Normalbetrieb, dann ist keine positive oder negative Wirkung der Folsäurezugabe auszumachen.

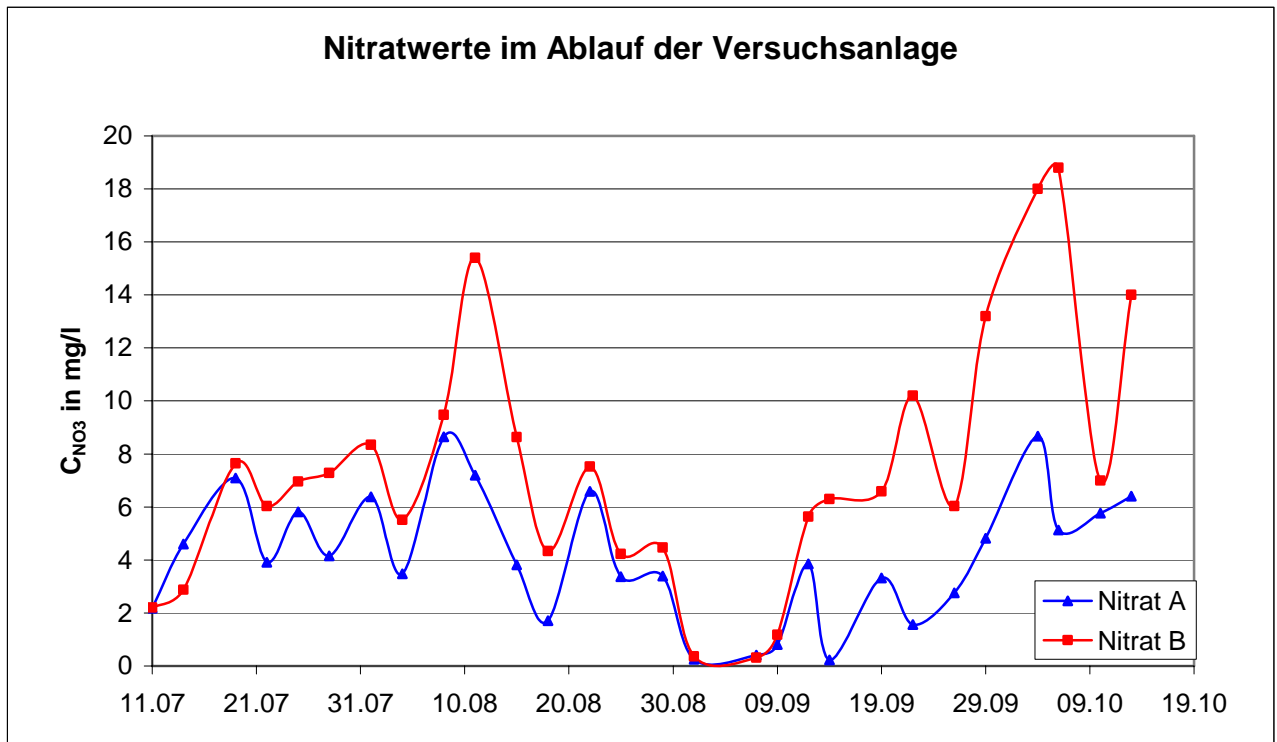


Abb. 20: Nitratablaufwerte der Versuchsanlage

Die im Ablauf der Versuchsanlage enthaltene Nitratkonzentration weist starke Schwankungen auf. Es ist zu erkennen, dass die Konzentrationen nach dem Einsetzen der Wirkung der Folsäure im Becken B immer höher sind als in A. Daraus jedoch eine negative Wirkung auf die Denitrifikanten abzuleiten, ist schwierig, weil die Werte schon vom Beginn der Versuche an immer etwas höher waren. Weil die Grenzwerte bis auf eine Ausnahme jedoch immer sicher eingehalten wurden, steht dem Einsatz der Folsäure auch von dieser Seite nichts entgegen.

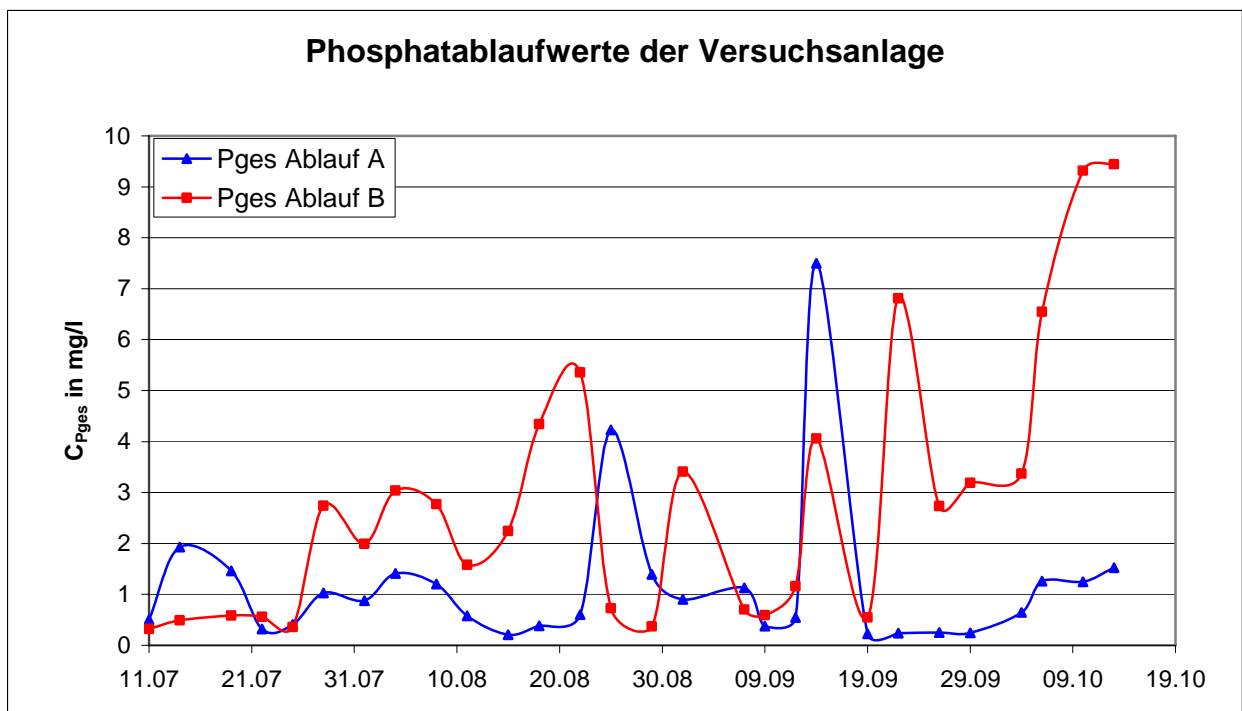


Abb. 21: Phosphorablaufwerte der Versuchsanlage

Der Grenzwert der Kläranlage für Phosphor mit 2 mg/l Gesamtposphatgehalt konnte in Becken B nicht eingehalten werden. Auffällig ist, dass die Erhöhung der Werte genau mit dem Beginn der Folsäuredosierung am 25.07 zusammenfällt. In Becken A dagegen konnte der Grenzwert bis auf zwei Ausnahmen eingehalten werden. Die Zugabe von Folsäure scheint einen negativen Einfluss auf die biologische Phosphorelimination zu haben. Sollte sich diese Beobachtung bestätigen, dann ist die Begründung wahrscheinlich in der gesteigerten Stoffwechselaktivität der Organismen zu suchen. Der Wachstumsvorteil, den die phosphoreliminierenden Bakterien durch ihren Polyphosphatspeicher haben, wird bei einer Leistungssteigerung durch die Folsäure geringer. Auch die Auffüllung des Polyphosphatspeichers in der aeroben Phase, kann durch einen gestiegenen Konkurrenzdruck bei der Nahrungsaufnahme beeinträchtigt werden. Ein weiterer Ansatzpunkt ist eine verminderte Aufnahme aller Organismen in der Summe aufgrund der Senkung der Biomassebildung. Theoretisch müsste sich dieser Effekt zwar auch auf den Stickstoff auswirken, aber eine Änderung der Ablaufwerte ist beim Stickstoff nicht zwangsläufig gegeben, da bei dessen Elimination eher noch Reserven vorhanden sind. Um jedoch genaue Aussagen zur Nährstoffelimination treffen zu können, müsste diese gezielt und über einen längeren Zeitraum untersucht werden.

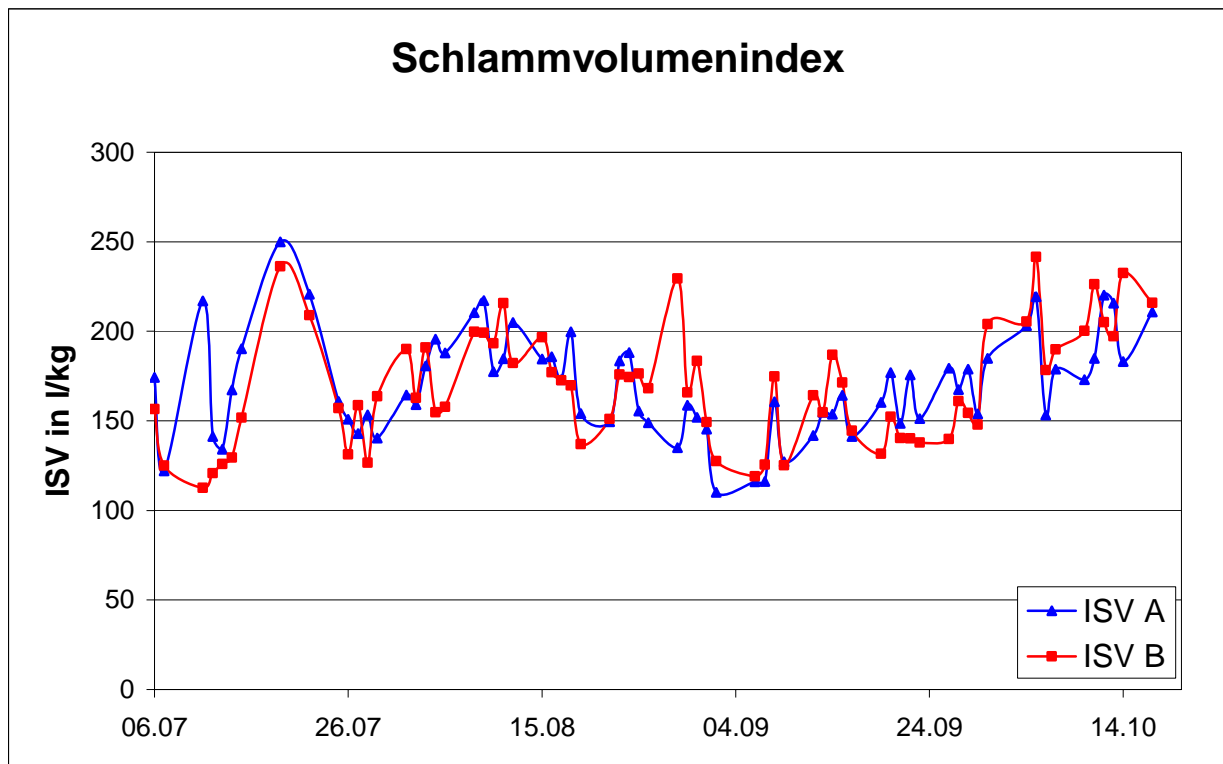


Abb. 22: Schlammvolumenindex des Belebtschlammes der Versuchsanlage

Der Schlammvolumenindex von beiden Belebungsbecken der Versuchsanlage ist im Durchschnitt höher als bei der Planung angenommen. Für den Betrieb der Anlage hatte dieser Umstand jedoch kaum störende Auswirkungen. Der Trockensubstanzgehalt im Überschussschlamm wurde durch das schlechtere Absetzverhalten gesenkt und der Schlamm Spiegel nach der Absetzphase lag etwas höher. Ein erhöhter Schlamm Spiegel kann zwar zum Schlammaustrag durch die Klarwasserpumpen führen, aber in der Planung waren genügend Sicherheiten berücksichtigt worden, so dass der Betrieb der Versuchsanlage ohne weitere Maßnahmen und ohne Schlammabzug beim Klarwasserabzug aufrecht erhalten werden konnte. Der Einsatz der Folsäure hat, wie die Versuchsergebnisse zeigen, keinen Einfluss auf das Absetzverhalten des Belebtschlammes. Die Unterschiede zwischen den

Becken sind bis auf wenige Ausnahmen minimal. Auch die vom Hersteller beschriebene hemmende Wirkung auf die Schwimmschlammneubildung konnte nicht beobachtet werden. In die Versuchsbehälter wurde durch das Animpfen mit Belebtschlamm von der Kläranlage auch Schwimmschlamm eingetragen. Am Ende der Versuche hatte sich die Schwimmschlammsschicht, trotz zwischenzeitlicher manueller Beseitigung, bei keinem der Becken verringert.

Der im Vorfeld der Untersuchung aufgeworfene Verdacht, dass der Sauerstoffverbrauch der Organismen bedingt durch den durch die Zugabe von Folsäure intensivierten Stoffwechsel steigt, wurde nicht speziell untersucht. Anhand des gemessenen Sauerstoffgehaltes in den Belebungsbecken am Ende der dritten Belüftungsphase, ist jedoch zu erkennen, dass die Luftmenge, die vor der Folsäurezugabe eingestellt wurde auch nach Einsetzen der Wirkung ausreichend war.

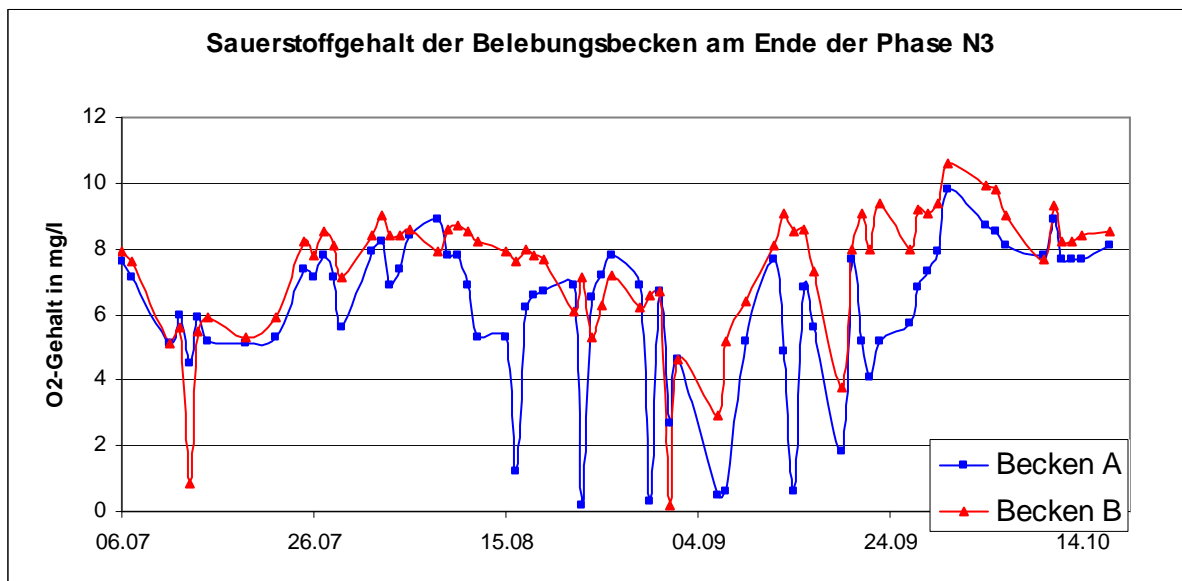


Abb. 23: Sauerstoffgehalt am Ende der dritten Belüftungsphase

Wie die Kurven deutlich zeigen ist bei einem Vergleich zwischen den beiden Becken kein wesentlicher Unterschied zu erkennen. Die auftretenden Schwankungen sind in der Veränderung des Feststoffgehaltes in der Belebung, der Änderung des Drucks in der Versorgungsleitung durch die Regelung der Kläranlage und in der schwankenden Zulaufbelastung begründet. Hinzu kommen kurzzeitige Stromausfälle, die den Ablauf der Phasen in der Steuerung der Versuchsanlage durcheinander gebracht haben.



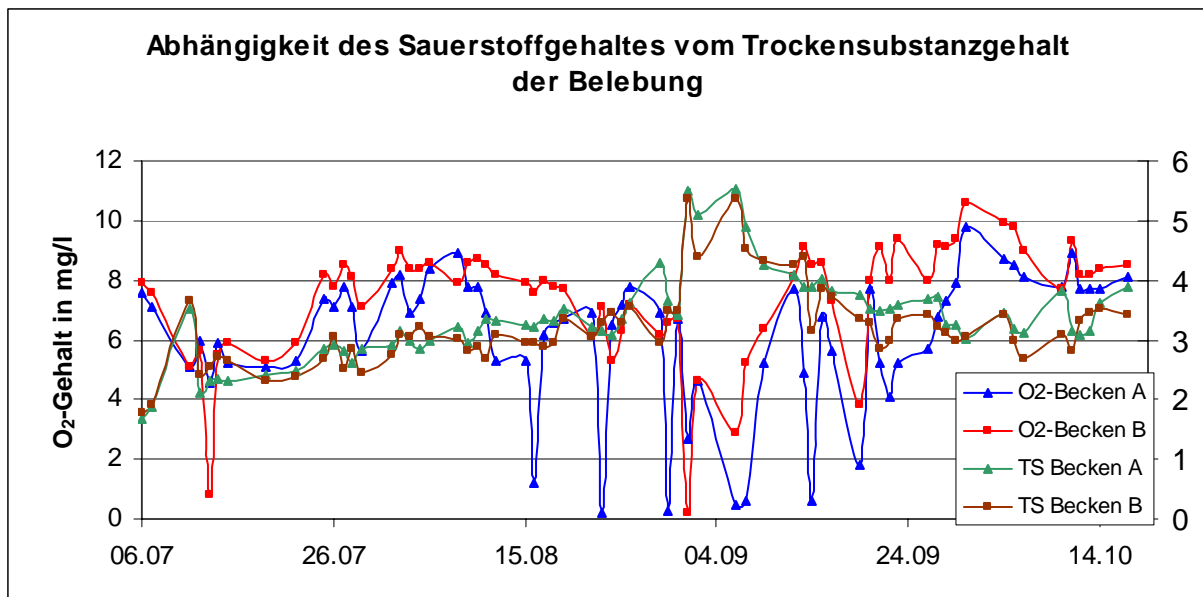


Abb. 26: Abhängigkeit des Sauerstoffeintrags vom Trockensubstanzgehalt in den Belebungsbecken

Ein entscheidender Faktor, der sich negativ bei der Überschussschlammreduzierung auswirken kann, ist die Anreicherung von Schadstoffen im Klärschlamm. Weil auf der Kläranlage der Grenzwert von Kupfer, der für die Ausbringung des Klärschlammes auf die Felder gilt, nur knapp eingehalten werden kann, ist besonders eine Veränderung dieses Faktors relevant. Geht man davon aus, dass die Kupferfracht im Zulauf gleich bleibt, dann muss die Konzentration im Klärschlamm bei einer vergleichsweise geringeren Überschussschlammproduktion ansteigen, vorausgesetzt die Ablaufwerte steigen nicht an. Zur Überprüfung wurde am Ende des Versuchszeitraums der Kupfergehalt im Überschussschlamm der Versuchsanlage bestimmt. Der Schlamm aus Becken A hatte einen Kupfergehalt von 4,96 mg/l bei einem Trockensubstanzgehalt von 7,53 g/l und der aus Becken B 6,50 mg/l bei 7,80 g/l. Daraus ergibt sich eine Belastung des Schlammes von 659 mg Cu/kg TS ohne Dosfolatzugabe und von 833 mg Cu/kg TS mit. Der Grenzwert liegt bei 800 mg Cu/kg TS. Zeitgleich wurde der Kupfergehalt auch im Klärschlamm der Kläranlage bestimmt. Er lag bei 689 mg Cu/kg TS im Überschussschlamm und bei 753 mg Cu/kg TS im Faulschlamm. Die gemessenen Werte der Versuchsanlage zeigen genau die Entwicklung auf, die vor der Messung vermutet wurde. Der Unterschied ist mit knapp 27 % sogar noch niedriger, als bei einer Überschussschlammreduzierung von rund 40 % erwartet. Es muss also zwangsläufig ein größerer Anteil der zugeführten Fracht im Ablauf enthalten sein. Wie sich die Anteile der Kupferfracht bei einer Überschussschlammreduktion genau aufteilen kann nicht aufgrund einer Messung bestimmt werden. Fakt ist, dass eine Erhöhung der Konzentration durch die Verringerung der Überschussschlammproduktion vorprogrammiert ist, weil sich die zugeführte Fracht nicht durch die Folsäurezugabe ändern wird. Die Höhe der Änderung ist jedoch von der Aufnahmefähigkeit des Schlammes abhängig.

## 8.1. wirtschaftliche Bewertung

Basierend auf den Versuchsergebnissen kann das Einsparpotential für die Kläranlage bestimmt werden. Hierfür ist eine Gegenüberstellung von den zusätzlich anfallenden und den eingesparten Kosten erforderlich. Die zusätzlich anfallenden Aufwendungen werden in laufende Kosten und Investitionskosten unterteilt. Für den Betrieb der Kläranlage mit Dosfolatzugabe ist die Anschaffung einer Enthärtungsanlage, eines Speicherbehälters, einer Dosierpumpe und einer Steuerung erforderlich. Hinzu kommen Montagearbeiten und eventuell die Schaffung eines neuen Stromanschlusses.

Tab. 14: Investitionskosten für eine Dosfolatdosierstation

<b>Investitionskosten</b>					
Aufwand und Qualität	Enthärtungsanlage	Montagearbeiten	Dosierpumpe	Steuerung	Summe
	Euro	Euro	Euro	Euro	Euro
hochwertig	700	1000	3000	500	<b>5200</b>
gut	500	500	1000	100	<b>2100</b>
ausreichend	300	30	300	20	<b>650</b>

Bei der Berechnung der Investitionskosten wurden die Kosten für einen Speicher auf Null gesetzt, weil für diesen Zweck ein herkömmlicher 1 m<sup>3</sup> Behälter, in dem das Polymer angeliefert wird, genutzt werden kann. Weil die Höhe des Preises von der Qualität und dem nötigen Aufwand abhängig ist, wurden drei Stufen festgelegt. Bei der Stufe, die mit hochwertig bezeichnet wurde, entspricht die Anlage höchsten Anforderungen und ist damit auch in der obersten Preisklasse einzuordnen. Für die Stufe „gut“ wurde ein durchschnittlicher Aufwand und eine mittlere Preiskategorie zugrunde gelegt. Bei der Variante „ausreichend“ wird davon ausgegangen, dass am Standort bereits die meisten Voraussetzungen vorhanden sind und so nur ein geringer Aufwand nötig ist. Die benötigten Aggregate sind in kostengünstigster Ausführung oder second Hand eingerechnet.

Die laufenden Kosten wurden nach den Angaben des Herstellers berechnet. Der Einkaufspreis für das angebotene Dosfolat richtet sich nach der abgenommenen Menge. Für den Einsatz auf der Kläranlage wurde vom Hersteller ein Preis von 700 Euro/Gallone genannt. Die Berechnung der erforderlichen Menge an Dosfolat erfolgt über zwei verschiedene Kennzahlen, die ebenfalls vom Hersteller vorgegeben wurden. Die Dosierung kann mit einer Menge von 0,1 ppm bezogen auf den Trockenwetterzufluss erfolgen oder mit 0,13 l pro t CSB-Fracht.

Tab. 15: Laufende Kosten bei einer Dosierung von 0,1 ppm

<b>Laufende Kosten bei einer Dosierung mit 0,1 ppm vom Trockenwetterzufluss</b>				
Q <sub>TR</sub>	Q <sub>Dosfolat</sub>	Kosten <sub>Dosfolat</sub>	Kosten <sub>Personal</sub>	Summe
m <sup>3</sup> /d	l/d	Euro/d	Euro/d	Euro/d
1700	0,17	31,44	4,67	<b>36,11</b>
m <sup>3</sup> /a	l/a	Euro/a	Euro/a	Euro/a
620500	62,05	11475,56	1703,33	<b>13178,89</b>

Die Berechnung des mittleren Trockenwetterzulaufs pro Tag erfolgte durch Auswertung der Daten des Zulaufs der ersten drei Quartale des Jahres 2005. Zur Ermittlung der Jahresmenge wurde dieser Wert mit 365 multipliziert. Dies ist ohne weiteres möglich, weil die Dosieranlage nicht Zulauf abhängig gesteuert wird. Die Dosiermenge wird fest eingestellt muss nur geändert werden, wenn sich der Zulauf zum Beispiel durch Neuanschlüsse drastisch ändert. Deshalb kann man davon ausgehen, dass die kalkulierten Kosten auch ziemlich genau eingehalten werden können. Der erforderliche Personalaufwand für den Betrieb der Dosieranlage ist nicht sehr hoch. Es ist lediglich die Funktionsfähigkeit zu überwachen und bei einem Speicher vom 1000 l muss alle zwei Wochen eine neue Gebrauchslösung angesetzt werden. Zusammen ergibt das etwa einen Arbeitsaufwand von 10 Minuten pro Tag, bei einem Stundenlohn von 28,00 Euro.

Tab. 16: Laufende Kosten bei einer Dosierung von 0,13 l/t

<b>Laufende Kosten bei einer Dosierung mit 0,13 l Dosfolat / t CSB</b>				
$B_{CSB}$	$Q_{Dosfolat}$	$Kosten_{Dosfolat}$	$Kosten_{Personal}$	Summe
t/d	l/d	Euro/d	Euro/d	Euro/d
2,38	0,3094	57,22	4,67	<b>61,89</b>
t/a	l/a	Euro/a	Euro/a	Euro/a
868,7	112,931	20885,52	1703,33	<b>22588,86</b>

Die Tagesfracht an CSB wurde auf der Grundlage der Eigenüberwachungsmesswerte der Kläranlage ermittelt. Für die Berechnung wurde das arithmetische Mittel aller Werte von 2005 gebildet und mit dem mittleren Trockenwetterzulauf multipliziert. Die ermittelte Tagesmenge an Dosfolat, die sich bei dieser Berechnungsweise ergibt, ist jedoch fast doppelt so hoch wie die, die allein über die Zulaufmenge errechnet wurde. Begründen lässt sich dies mit dem hohen Anteil an Industrieabwasser im Zulauf der Kläranlage. Die CSB-Konzentration ist wesentlich höher als bei rein häuslichem Abwasser. Daraus ergibt sich eine vergleichsweise hohe Belastung bei einem relativ kleinen Trockenwetterzulauf. Weil dieser Umstand nur bei der Berechnung über die CSB-Fracht berücksichtigt wird, weichen die Mengen so stark voneinander ab. Bei einer Dosierung, wie sie auch bei der Versuchsanlage eingesetzt wurde, ergeben sich folgende Werte.

Tab. 17: Laufende Kosten bei einer Dosierung von 0,2 ppm

<b>Laufende Kosten bei einer Dosierung mit 0,2 ppm vom Trockenwetterzulauf</b>				
$Q_{TR}$	$Q_{Dosfolat}$	$Kosten_{Dosfolat}$	$Kosten_{Personal}$	Summe
m <sup>3</sup> /d	l/d	Euro/d	Euro/d	Euro/d
1700	0,34	62,88	4,67	<b>67,55</b>
m <sup>3</sup> /a	l/a	Euro/a	Euro/a	Euro/a
620500	124,1	22951,12	1703,33	<b>24654,46</b>

Für die Berechnung der möglichen Einsparung wurden die Klärschlamm Entsorgungskosten der Kläranlage in den letzten drei Jahren ermittelt. Die Quelle für die Zahlen ist der Entsorgungsnachweis.

Tab. 18: Klärschlamm Entsorgungskosten 2003 bis 2005

Jahr	Verbringungsort	Menge t	Menge TS t	Kosten Euro
			Preis/t:	24,59
2003		308,2	53,3	7574,33
2003		1535,6	265,7	37745,05
2003		170,7	27,3	4195,81
2003		440,4	57,0	10823,80
		2454,8	403,3	<b>60338,98</b>
2004		958,4	141,2	23557,47
2004		313,0	46,9	7693,54
2004		1404,9	208,6	34531,21
		2676,3	396,7	<b>65782,23</b>
2005		1227,7	196,4	30176,87
2005		357,7	57,2	8791,04
2005		121,1	25,3	2975,41
2005		244,1	51,0	5999,98
2005		655,6	104,0	16113,42
	Summe 2005:	2606,1	433,9	<b>64056,71</b>

Die Entsorgungskosten für den Klärschlamm des Jahres 2005 sind noch nicht vollständig. Der angegebene Wert wurde schon im November erreicht. Die zu erwartende Endsumme liegt etwa bei 70.000,- Euro. Dieser Wert wurde auch als Grundlage für die Berechnung des Einsparpotentials verwendet.

Wird der entstehende Überschussschlammanfall auf der Kläranlage gesenkt, dann verringert sich auch die benötigte Menge an Polymer beim Eindicken und Entwässern. Geht man davon aus, dass die Schlammeigenschaften unverändert bleiben, dann sinkt der Polymerverbrauch proportional zur Schlammeinsparung. Die Kosten für Polymer belaufen sich beim Betrieb der Kläranlage auf 25.000,- Euro.

Die mithilfe der Versuchsanlage ermittelte Überschussschlammverringerung wird auch für die Kläranlage zugrunde gelegt. Weil der Einfluss der unterschiedlichen Verfahren der biologischen Reinigungsstufe nur schwer abzuschätzen ist und der Versuchszeitraum relativ kurz war, werden zwei Varianten berechnet. Es wird einmal die für die gesamte Versuchszeit ermittelte Überschussschlammverringerung von 31% angenommen und als Zweites die für die Zeit nach Einsetzen der Wirkung des Dosfolats von 43%.

Tab. 19: Überblick der Kostenstellen mit Einsparpotential

	Klärschlamm- entsorgungskosten	Polymerkosten	Gesamtkosten	Einsparung
	Euro/a	Euro/a	Euro/a	Euro/a
Im Jahr 2005	70000	25000	95000	0
Einsparung von 43% ÜSS	39900	14250	54150	40850
Einsparung von 31% ÜSS	48300	17250	65550	29450

Von den in der Tabelle dargestellten Einsparungsmöglichkeiten müssen für eine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit noch die dafür erbrachten Aufwendungen abgezogen werden. In der folgenden Tabelle wurden die Kosten der unterschiedlichen Dosiermengen den Einsparmöglichkeiten gegenübergestellt und miteinander verrechnet.

Tab. 20: Wirtschaftlichkeit eines Folsäureeinsatzes

Dosierung	Dosfolatkosten	Gewinn bei Einsparung von 43% ÜSS	Gewinn bei Einsparung von 31% ÜSS
	Euro/a	Euro/a	Euro/a
0,1 ppm	13178,89	27671,11	16271,11
0,2 ppm	24654,46	16195,54	4795,54
0,13 l/t	22588,86	18261,14	6861,14

Wie die berechneten Werte deutlich zeigen hätte sich der Bau der Dosierstation selbst bei pessimistischer Betrachtung innerhalb eines Jahres amortisiert. Außerdem wurden die kleineren Einsparungen z.B. beim Stromverbrauch der Antriebe in der Schlammbehandlung oder der geringere Zeitaufwand beim Entwässern und Eindicken nicht berücksichtigt. Somit kann man von der rein wirtschaftlichen Seite betrachten einen Folsäureeinsatz nur empfehlen.

## 8.2. Einschätzung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die erzielten Ergebnisse der durchgeführten Versuche mit Folsäure sind im Wesentlichen positiv ausgefallen. Das Hauptziel, das in einer Überschussschlammreduzierung in der Größenordnung von 20 und 50 % bestand, wurde voll erfüllt. Mit einer Verminderung der Überschussschlammproduktion von rund 43 % liegt die Versuchsanlage im Vergleich mit den bisher bekannten Ergebnissen aus Deutschland im vorderen Drittel. In Anbetracht der Tatsache, dass bei der Planung der Versuchsanlage die in der Kläranlage vorherrschenden Betriebsbedingungen berücksichtigt wurden und in den Versuchen das Abwasser des Zulaufs zur Belebung verwendet wurde, sollten die Ergebnisse auf direkt auf den technischen Maßstab übertragbar sein. Eine Reduzierung des Überschussschlammfalls in der Höhe wie in den Versuchen festgestellt für die Kläranlage angenommen, ist für den Folsäureeinsatz eine Wirtschaftlichkeit gegeben. Schon bei Berücksichtigung nur der laufenden Kosten für die Polymere und die Klärschlammentsorgung ergibt sich ein Einsparpotential von 5.000,00 bis 27.000,00 €/a. Alle noch unberücksichtigten kleineren Faktoren, wie Einsparungen beim Stromverbrauch der Schlammumpen und Entwässerungsaggregate und der reduzierte Personalaufwand durch Zeiteinsparung bei der Schlammbehandlung, wirken sich eher noch positiv auf die Gesamtbilanz aus.

Zusätzlich positive Wirkungen der Folsäure auf die Stabilität der biologischen Reinigungsstufe, eine Verbesserung der Ablaufwerte oder die Verminderung der Schwimmschlamm-Bildung konnten nicht beobachtet werden. In diesen Punkten zeigte sich kein Unterschied zum Betrieb ohne Folsäurezugabe.

Einige negative Begleiterscheinungen, die sich bei den Versuchen gezeigt haben, sind zwar nicht als unbedingt gravierend zu bewerten, sollten aber auch nicht unbeachtet bleiben. Eine wahrscheinlich verminderte Leistung der biologischen Phosphorelimination kann mit wenig Aufwand durch eine gesteigerte Fällung ausgeglichen werden. Die Erhöhung der Kupferwerte im Überschussschlamm können auf der Kläranlage allerdings nur schwer kompensiert werden, weil hier bereits jetzt das obere Limit für die landwirtschaftliche Verwertung erreicht ist. Bis eine Möglichkeit gefunden wird, die Kupfergehalte deutlich zu senken, ist daher vom Einsatz der Folsäure auf der Kläranlage abzuraten. Eine Einsparung würde sich trotz reduzierter Klärschlamm-mengen in diesem Fall nicht ergeben, da eine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlamm nicht mehr möglich wäre.

Wird es in Zukunft jedoch erforderlich den Klärschlamm über eine Verbrennung zu entsorgen, wäre ein erhöhter Kupfergehalt nicht mehr relevant und in Anbetracht der höheren Kosten der Verbrennung würde sich das Einsparpotential der Folsäurezugabe noch deutlich erhöhen.

### 8.3. Ausblick

Durch die in Zukunft eher steigenden Entsorgungskosten für Klärschlamm wird die Verminderung des Schlammanfalls auf den Kläranlagen immer mehr zum Thema und rechtfertigt zunehmend einen höheren Aufwand zur Minimierung anfallender Überschussschlammmengen. Allein schon die heutigen Kosten für die Polymere und die Klärschlamm-entsorgung ergeben einer Wirtschaftlichkeit für eine Überschussschlammreduzierung durch Folsäure. Im Zusammenhang mit einer Schlamm-trocknung würde sich die Wirtschaftlichkeit noch nachhaltig verbessern.

Um die genauen Wirkmechanismen der Folsäure zu verstehen wird, es bei zukünftigen Untersuchungen vor allem darum gehen, die mikrobiologischen Stoffwechselfvorgänge der im Abwasser enthaltenen Organismen zu untersuchen. Aufbauend auf einer genauen Kenntnis der Wirkmechanismen ist es sicher noch möglich die Leistung und die Dosierung zu optimieren.

Weiterhin gilt es die erhöhte Stoffwechselaktivität der Organismen nachzuweisen und den damit verbundenen geringeren Biomasseaufbau. Möglich wäre dies zum Beispiel durch die Messung des gebildeten  $\text{CO}_2$ . Auch eine Betrachtung der verminderten Nährstoffaufnahme beim Aufbau der Biomasse wäre wichtig, um die erforderliche Eliminationsleistung sicherstellen zu können. Sollte die Wirkung der Folsäure wissenschaftlich anerkannt werden, wird auch eine Anpassung der Bemessungshinweise zur Auslegung von Belebungsanlagen erforderlich werden. Vor allem betroffen wären die Bemessung des erforderlichen Schlammalters sowie die Ansätze für die Überschussschlammproduktion und die Nährstoffelimination.

Die bisher erzielten Ergebnisse rechtfertigen auf jeden Fall zukünftig einen höheren Forschungsaufwand für dieses Thema.

## **Anlagenverzeichnis**

- Anlage 1: Beschreibung der bei der Programmierung der Steuerung verwendeten  
Programmbausteine
- Anlage 2: CD mit den Versuchsdaten und Literatur aus dem Internet



