

Fachhochschule Magdeburg - Stendal  
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

Studiengang Bachelor of Engineering Wasserwirtschaft

**Bachelorarbeit**

Optimierung der Phosphatelimination am Beispiel der Kläranlage Silstedt

Eingereicht von:	Vincent Sebastian Weber
Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wiese
Zweitprüfer:	Dipl. Ing. (FH) Stephan Sterzik
Tag der Abgabe:	25.08.2017

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VIII
Anhangsverzeichnis .....	IX
Eidesstattliche Erklärung .....	X
Aufgabenstellung .....	XI
1 Einführung .....	1
2 Phosphor .....	2
2.1 Das essentielle Element im Ökosystem .....	2
2.2 Parameter Phosphor in der Abwassertechnik .....	2
3 Theoretische Grundlagen der Phosphorelimination .....	5
3.1 Biologische Phosphatelimination .....	6
3.1.1 Grundlage .....	6
3.1.2 Verfahrenstechnik .....	8
3.1.3 Einflussfaktoren auf die Biologische P-Elimination .....	8
3.1.4 Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb .....	10
3.2 Fällung .....	12
3.2.1 Grundlage .....	12
3.2.2 Fällmittel .....	13
3.2.3 Konkurrierende Reaktionen .....	15
3.2.4 Verfahrenstechnik .....	16
3.2.5 Einflussfaktoren auf die Fällung .....	20
3.2.6 Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb .....	21
3.2.7 Bedarf des Fällmittels .....	23
4 Vorstellung des Wasser- und Abwasserverbandes Holtemme – Bode .....	27
4.1 Kläranlage Silstedt .....	28
4.2 Indirekteinleiter .....	30
4.3 Betriebsdatenauswertung der Kläranlage .....	32
4.3.1 Qualität der Daten .....	32
4.3.2 Messergebnisse .....	33
4.3.3 Dosierung .....	41

5	Experimentelle Betrachtung .....	44
5.1	Fällung .....	44
5.1.1	Prüfung der Dosierung .....	44
5.1.2	Anpassung des Fällmittelverbrauchs .....	45
5.2	Biologische Phosphorelimination.....	47
5.2.1	Ziel des Versuches.....	47
5.2.2	Versuchsbeschreibung.....	47
5.2.3	Auswertung .....	47
5.3	Jar-Test.....	50
5.3.1	Ziel des Versuches.....	50
5.3.2	Versuchsbeschreibung.....	50
5.3.3	Auswertung .....	51
5.3.4	Selbst durchgeführter Jar-Test.....	52
5.4	Mikroskopie.....	53
5.4.1	Ziel des Versuches.....	53
5.4.2	Versuchsbeschreibung.....	53
5.4.3	Auswertung .....	53
6	Großtechnischer Versuch.....	54
7	Ansatz zur Optimierung.....	57
7.1	Ausgangssituation.....	57
7.2	Optimierungskonzept .....	59
8	Bewertung der Optimierung .....	65
8.1	Monetäre Betrachtung.....	65
8.2	Nicht Monetäre Betrachtung.....	69
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	70

Literaturverzeichnis .....	XII
Anhang.....	XIV
10 Wasserbehörde.....	XIV
10.1 Aktuelle wasserrechtliche Erlaubnis .....	XIV
10.2 Zukünftige wasserrechtliche Erlaubnis .....	XV
11 Betriebsdaten.....	XVII
12 Versuchsdaten .....	XVIII
13 Produktblatt Eisen-II-Chlorid .....	XIX
14 Produktblatt Eisen-III-Chloridsulfat .....	XXI
15 KA Wernigerode Screening Feralco .....	XXIV
16 Fadenbakterienuntersuchung.....	XXX
17 Großtechnischer Versuch.....	XXXVI
18 Auszüge TÜV .....	XXXVII

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Auswahl von Phosphorverbindungen im rohen, kommunalen Schmutzwasser [modifiziert nach Baumann; 2003] .....	3
Abbildung 2 Prinzipieller Verlauf der P-Konzentration in einer Anlage zur biologischen Phosphorelimination [Quelle DWA Tagung: 2017 aus Schönberger: 1990] .....	6
Abbildung 3 Vereinfachte Darstellung der Stoffwechselprozesse bei der biologischen Phosphorelimination [Quelle: Helmer: 1994].....	7
Abbildung 4 Einfluss der Temperatur auf die Phosphatrücklösung im Anaerobbecken [Quelle Helmer: 1994].....	9
Abbildung 5 Einfluss der Temperatur auf die Phosphataufnahme im Belebungsbecken [Quelle Helmer: 1994].....	9
Abbildung 6 Diagramm der Löslichkeitsgleichgewichte für Eisen-, Aluminium- und Calciumphosphate [Quelle Witt: 1997].....	15
Abbildung 7 Dosierstellen Vorfällung [Quelle DWA-A 202: 2011] .....	16
Abbildung 8 Dosierstellen Simultanfällung [Quelle DWA-A 202: 2011] .....	17
Abbildung 9 Dosierstellen Nachfällung [DWA-A 202: 2011].....	18
Abbildung 10 Dosierstellen Flockenfiltration [Quelle DWA-A 202: 2011].....	18
Abbildung 11 Anteil den partikulären Phosphors im Ablauf in Abhängigkeit der abfiltrierbaren Stoffe und des Phosphorgehaltes [Baumann: 2003].....	19
Abbildung 12 Abhängigkeit der Phosphorelimination bei der Fällung von rohem/vorgeklärtem Abwasser (aus [Wedi et al., 1992][Baumann: 2003]) .....	25
Abbildung 13 Verbandsgebiet Holtemme – Bode [Broschüre des Verbandes: 2017].....	27
Abbildung 14 Luftbild der Kläranlage Silstedt [Quelle Google Maps mit Modifizierung].....	28
Abbildung 15 Fällmitteltanks der Kläranlage Silstedt [eigene Quelle: März 2017] .....	29
Abbildung 16 Fließschema der Kläranlage Silstedt [eigene Quelle 2017] .....	30
Abbildung 17 Verschiedene Probenahmeverfahren [Börnack: 2005/2006] .....	33
Abbildung 18 Zulaufkonzentrationen der Parameter CSB, BSB <sub>5</sub> und P <sub>ges</sub> aus dem Jahr 2016 [Betriebstagebuch: 2017].....	35
Abbildung 19 Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB, BSB <sub>5</sub> und P <sub>ges</sub> aus dem Jahr 2016 [Betriebstagebuch: 2017].....	35
Abbildung 20 Zulaufkonzentration des Parameters P <sub>ges</sub> der Jahre 2014 bis 2016 sowie dem Mittelwert der Jahre [eigene Quelle: 2017] .....	36
Abbildung 21 Ablaufkonzentration des Parameters P <sub>ges</sub> der Jahre 2014 bis 2016 sowie dem Mittelwert der Jahre [eigene Quelle: 2017] .....	36
Abbildung 22 Tägliche Konzentrationen des Gesamt Phosphors im Ablauf über einen Teilausschnitt des Jahres 2016 [eigene Quelle: 2017].....	37

Abbildung 23 Zusammenhang zwischen $P_{ges}$ und CSB Jahresausschnitt 2016 [eigene Quelle: 2017] .....	38
Abbildung 24 Rücklösungsverhalten Versuch vom 24.04.2017 [eigene Quelle].....	48
Abbildung 25 Laboruntersuchungen am 20.04.2017 Jar-Test [Feralco: 2017] .....	50
Abbildung 26 Phosphatfällung bei verschiedenen Dosierungen [Feralco: 2017].....	51
Abbildung 27 Selbst durchgeführter Jar-Test mit Belebtschlammaufbaupräparaten [eigene Quelle: 2017].....	52
Abbildung 28 Gram - Färbung, Vergrößerung 1000 – fach: <i>Microthrix parvicella</i> und <i>Chloroflexi</i> (Fäden mit Aufwuchs) [Feralco: 2017] .....	53
Abbildung 29 Aufgestellte IBC mit Eisen-III-Chloridsulfat [eigene Quelle: 2017] .....	54
Abbildung 30 Vergleich des Einsatzes einer Pumpe zum Umwälzen der Schwimmschlammdecke [eigene Quellen: 2017].....	55
Abbildung 31 Ablaufprobe im Imhofftrichter vom 03.08.2017 [eigene Quelle] .....	58
Abbildung 32 Ablauf des belüfteten Sandfanges KA Silstedt [eigene Quelle: 2017].....	61
Abbildung 33 Ablauf der Belebung KA Silstedt [eigene Quelle: 2017].....	62
Abbildung 34 Musterbeispiel einer Dosierung [KA Gerwisch: 2017].....	63
Abbildung 35 Fließschema mit Einbindung des Optimierungskonzeptes [eigene Quelle: 2017] .....	64
Abbildung 36 Abwasserdurchfluss der Monate Januar bis Dezember aus 2014 bis 2016 [Betriebstagebuch: 2017].....	XVII
Abbildung 37 CSB Zulauf fracht zur Belebung der Monate Januar bis Dezember aus 2014 bis 2016 [Betriebstagebuch: 2017].....	XVII
Abbildung 38 Gesamt Phosphorfracht der Monate Januar bis Dezember aus 2014 bis 2016 [Betriebstagebuch: 2017].....	XVIII

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Anteil der partikulären und gelösten Fraktionen im Abwasser (nach: [Siegrist et al., 1999] - Stand 1994); [nach Baumann: 2003] .....	3
Tabelle 2 Prozessbedingungen bei der biologischen Phosphatelimination [Quelle DWA: 2011] .....	7
Tabelle 3 Wechselwirkungen der biologischen Phosphatelimination mit anderen Teilprozessen der weitergehenden Abwasserreinigung [Quelle modifiziert nach Baumann: 2003] .....	11
Tabelle 4 Gebräuchliche Fällmittel (Tabelle 1) [Quelle DWA-A 202: 2011] .....	13
Tabelle 5 Charakterisierung der Verfahren zur Fällung [Quelle DWA-A 202: 2011] .....	19
Tabelle 6 Umrechnungstabelle der Wirksubstanz [DWA-A 202: 2011] .....	23
Tabelle 7 Stoßfaktoren für den Fällmittelbedarf [DWA-A 202: 2011] .....	26
Tabelle 8 Mittelwerte der betrachteten Indirekteinleiter des Jahres 2016 [WAHB: 2017] .....	31
Tabelle 9 Messwerte einzelner Parameter der drei Messstellen der Jahre 2014 - 2016 [Quelle Betriebstagebuch der KA Silstedt] .....	34
Tabelle 10 Auswertungen der Zu- und Ablaufparameter zwischen Ortho-Phosphat und Gesamt Phosphor [Auswertung der Labormitarbeiter der KA Silstedt: 2016] .....	37
Tabelle 11 Berechnung der Reinigungsleistung der KA Silstedt [eigene Quelle: 2017] .....	39
Tabelle 12 Messwerte der Säurekapazität aus dem Jahr 2016 der Belebung und des Ablaufes [Firma Ökocontrol: 2017] .....	39
Tabelle 13 Abwasserparameter der Kläranlage Silstedt [eigene Quelle: 2017] .....	40
Tabelle 14 Vergleich von berechneter und tatsächlicher Dosierung [eigene Quellen: 2017] .....	43
Tabelle 15 Auslitern der Fällmitteldosierung für 30 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017] .....	45
Tabelle 16 Auslitern der Fällmitteldosierung für 17 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017] .....	45
Tabelle 17 Senkung der Fällmitteldosierung unter Beobachtung von Abwasserparametern [eigene Quelle: 2017] .....	46
Tabelle 18 Rücklösungsverhalten Versuch vom 24.04.2017 [eigene Quelle] .....	48
Tabelle 19 Einstellungen der Dosierpumpe für die Fällung mit Eisen III Chloridsulfat [eigene Quelle: 2017] .....	55
Tabelle 20 Kläranlageneigenschaften und empfohlene Fällmittel [Scheer: 2017] .....	63
Tabelle 21 Ermittelte Investitionskosten für die Optimierung der chemischen P-Elimination [eigene Quelle: 2017] .....	65
Tabelle 22 Errechnete Abwasserabgabe aus der gemittelten Jahresschmutzwassermenge [eigene Quelle: 2017] .....	66
Tabelle 23 Kosten der Fällmittel (Stand 2017) [Scheer: 2017] .....	66
Tabelle 24 Laufende Kosten der Kläranlage Silstedt ohne und mit Optimierung [eigene Quelle: 2017] .....	67

Tabelle 25 Grenzwerte der bestehenden wasserrechtlichen Erlaubnis der KA Silstedt [aus behördlichen Bescheid: 2015] .....	XIV
Tabelle 26 Auszug aus der Stellungnahme des gewässerkundlichen Landesdienstes [Auszug der unteren Wasserbehörde: 2015] .....	XVI
Tabelle 27 Auslitern der Fällmitteldosierung für 29 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017] .....	XVIII
Tabelle 28 Auslitern der Fällmitteldosierung für 28 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017] .....	XVIII
Tabelle 29 Auslitern der Fällmitteldosierung für 27 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017] .....	XVIII
Tabelle 30 Betriebsauswertung der Kläranlage zum großtechnischen Versuch [eigene Quelle] .....	XXXVI



## Abkürzungsverzeichnis

AbwAG	Abwasserabgabegesetz
AbwV	Abwasserverordnung
ADP	Adenosindiphosphat
Al	Aluminium
ATP	Adenosintriphosphat
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
Bio-P	biologische Phosphorelimination
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
C	Kohlenstoff
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
EW	Einwohnerwert(e)
Fe <sup>2+</sup>	zweiwertiges Eisen
Fe <sup>3+</sup>	dreiwertiges Eisen
IBC	Intermediate Bulk Container
ISV	Schlammvolumenindex
MO	Mikroorganismen
N	Stickstoff
NO <sub>3</sub> -N	Nitratstickstoff
NH <sub>4</sub> -N	Ammoniumstickstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
Ortho-P	Ortho-Phosphatphosphor
P	Phosphor
P <sub>ges</sub>	Gesamt-Phosphor/ Gesamt-P
PLS	Prozessleitsystem
PO <sub>4</sub> -P	Phosphatphosphor
RS	Rücklaufschlamm
SE	Schadeinheit
SV	Schlammvolumen
TOC	Total Organic Carbon
TS	Trockensubstanz
ÜSS	Überschussschlamm
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

## **Anhangsverzeichnis**

- Wasserbehörde
- Aktuell wasserrechtliche Erlaubnis
- Zukünftige wasserrechtliche Erlaubnis
- Betriebsdaten
- Versuchsdaten
- Produktblatt Eisen-II-Chlorid
- Produktblatt Eisen-III-Chloridsulfat
- KA Wernigerode Screening Feralco
- Fadenbakterienuntersuchung
- Großtechnischer Versuch
- Auszüge TÜV

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter  
Zuhilfenahme der ausgewiesenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach anderen gedruckten oder  
im Internet verfügbare Werken entnommen sind, habe ich durch genaue Quellenangaben  
kenntlich gemacht.

Magdeburg, 01.05.2017

Vincent Sebastian Weber

## **Aufgabenstellung**

### **Bachelorarbeit**

## **Optimierung der Phosphatelimination am Beispiel der Kläranlage Silstedt**

Bearbeiter: Herr Sebastian Weber, 20132186

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wiese

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Stephan Sterzik, Wasser- und Abwasserverband Holtemme-Bode

### **Aufgabenstellung**

Der Wasser- und Abwasserverband Holtemme-Bode (kurz: WAHB) betreibt in Silstedt die Kläranlage Silstedt (ca. 80.000 EW). Die Phosphoremissionen aus Kläranlagen in unsere Gewässer sind trotz allen Anstrengungen der Vergangenheit nach wie vor hoch. In einigen Bundesländern wurden daher die Grenzwerte für Phosphor im Kläranlagenablauf zuletzt deutlich abgesenkt, sodass mittelfristig auch in Sachsen-Anhalt mit einer weiteren Verschärfung gerechnet werden muss. Aus diesem Grund will der WAHB vorausschauend prüfen, ob und wie die Phosphorelimination auf der Kläranlage Silstedt effizienter betrieben werden kann.

Herr Weber wird daher das bisherige Konzept der Phosphorelimination analysieren und bewerten sowie darauf aufbauend Überlegungen zur Optimierung vornehmen. Herr Weber wird zur Zielerreichung die folgenden Arbeitsschritte durchführen:

- Literaturrecherche zum aktuellen Stand
- Beschreibung der Anlage
- Auswertung der Betriebsdaten im Hinblick auf die Fragestellung (2014 – 2016)
- Laborversuche (z. B. Fällmittelversuche, Rücklöseversuche)
- Identifikation von Ansatzpunkten für eine Optimierung der Phosphorelimination (z. B. Mehrpunktfällkonzepte)
- Optional: Durchführung von großtechnischen Fällmittelversuche
- Beschreibung ggf. erforderlicher Umbauarbeiten
- Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf Technik, Kosten/Nutzen und Reinigungsleistung
- Zusammenfassung und Ausblick

gez. Jürgen Wiese

# 1 Einführung

Ein sauberes Umfeld und eine saubere Umwelt ist ein allgemeines Interesse der Öffentlichkeit. Darunter zählt nicht nur die Kreislaufwirtschaft im Bereich von Abfall, sondern auch das ordnungsgemäße Ableiten und Reinigen von Abwässern. In den Bereichen der Abwassertechnik sowie auch in der Agrarwirtschaft diskutiert die Politik in Deutschland über den Parameter Phosphor. Dabei handelt es sich nicht nur um das Einleiten des Stoffes bis zu festgesetzten Grenzwerten sondern auch um die Rückgewinnung des Nährstoffes aus Klärschlämmen zur Verwendung für die Landwirtschaft.

Infolgedessen erwartet der Wasser- und Abwasserverband Holtemme – Bode, mit Ablauf der wasserrechtlichen Erlaubnis am 31.12.2021 und dem Erhalt einer neuen wasserrechtlichen Erlaubnis ab dem 01.01.2022, vorrangig eine Verschärfung des Grenzwertes für Phosphor.

Ziel dieser Arbeit ist es, die mögliche Senkung des Parameters abzuschätzen und den Verband auf dieses Ereignis vorzubereiten. Hierzu müssen sowohl die bestehende Phosphateliminiierung evaluiert als auch infrage kommende Optimierungsvorschläge betrachtet und vorgestellt werden.

In der Arbeit wird zunächst ein Einblick in die theoretischen Grundlagen geschaffen, um bei den Leserinnen und Lesern ein Fundament für die Abwassertechnik, speziell auf das Thema P-Eliminierung, zu schaffen. Dabei werden Zusammenhänge und Abhängigkeiten aufgezeigt und verfahrenstechnische Strukturen erklärt.

Im darauffolgenden Teil der Arbeit soll die Kläranlage vorgestellt und anhand eines Fließschemas die für die Arbeit relevanten Anlagenbauteile erläutert werden. Ermittelte Parameter durchgeführter Analysen der Abwasserzusammensetzung dienen als Datengrundlage für die Bachelorarbeit. Zusätzlich wurden markante Indirekteinleiter der Abwasserbehandlungsanlage anonymisiert aufgeführt und auf ihre Indirekteinleitung hin beleuchtet. Durch den Kontakt mit der Unteren Wasserbehörde in Halberstadt konnten Erkenntnisse zum Ausmaß der Verschärfung des Grenzwertes Phosphat gezogen werden.

Anhand dieser Grundlagen wurden unterschiedliche Ansätze zur Optimierung theoretisch betrachtet und in diversen Versuchen durchgeführt. Danach erfolgte ein großtechnischer Versuch, der ein Teil der Optimierungsansätze mit Daten belegen soll. Die Bachelorarbeit endet mit einer theoretisch-praktischen und monetären Bewertung der Ergebnisse, der Zusammenfassung der wissenschaftlichen Ausarbeitung und dem Ausblick für die KA Silstedt.

## 2 Phosphor

### 2.1 Das essentielle Element im Ökosystem

Phosphor ist für Mensch, Tier und Pflanze ein überlebenswichtiger Stoff. Das Element gehört zu den Grundbausteinen des Energiestoffwechsels und dem Zellwachstum. Allerdings zählt Phosphor nicht zu den substituierbaren Stoffen und sein Vorkommen weltweit ist begrenzt. Dabei beschränken sich die Vorräte auf wenige Länder, für welche es unter Betrachtung der aktuellen technologischen Lage wirtschaftlich ist, Phosphatgestein abzubauen. Der Großteil des gewonnenen Phosphors wird in der Agrarwirtschaft für Dünge- und Futtermittel verwendet. [Baumann: 2003]

Allerdings beinhaltet dieser Pflanzennährstoff auch Gefahrenpotential für die Umwelt. Pflanzen sind in ihrem Wachstum an jenen Stoff limitiert, welcher in der geringsten Menge vorhanden ist. Nach diesem Prinzip ist Phosphor der Stoff, der für Pflanzen entscheidend ist.

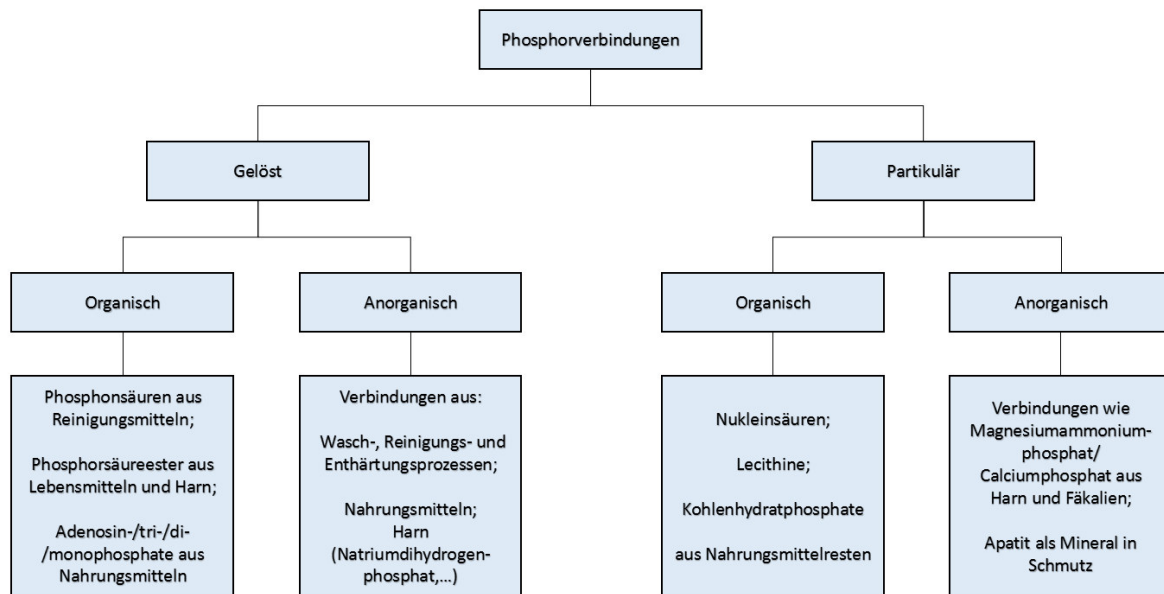
Liegt demzufolge ein erhöhtes Dargebot an Pflanzennährstoffen vor, so spricht man in der Gewässerökologie von der Eutrophierung [Kunst: 1991]. Hierbei findet ein erhöhtes Wachstum an Algen und Wasserpflanzen statt. Anschließend wird mehr Sauerstoff durch die gesteigerte Biomasse gezehrt. Es stellen sich mittelfristig anaerobe Verhältnisse ein, in denen die Pflanzen verenden, wodurch wiederum Sauerstoff gezehrt wird. Dieser Kreislauf verschlechterte die Gewässerqualität enorm und wird umgangssprachlich als „Umkippen des Gewässers“ bezeichnet [Baumann: 2003].

### 2.2 Parameter Phosphor in der Abwassertechnik

Festgestellt wurde die Eutrophierung von Gewässern, die in Punkt 2.1 erwähnt wurde, auch nach den Anfängen der Abwasserreinigung und trat in den achtziger Jahren in den Mittelpunkt der Abwasserentsorgung. Es wurden im Wasch- und Reinigungsmittelgesetz Höchstmengen für Phosphat festgelegt, um den Eintrag von Phosphor in das Entwässerungssystem zu minimieren. Gleichfalls wurde auf den Kläranlagen sowohl über die Phosphor als auch über die Stickstoffelimination nachgedacht [Schneider: 2011].

Phosphorverbindungen im rohen, kommunalen Schmutzwasser können vereinfacht in einen gelösten und in einen partikulären Zustand eingeteilt werden. In dem jeweiligen Zustand liegen die Verbindungen organisch oder anorganisch vor [Baumann: 2003].

In der Abbildung 1 ist die Einteilung der verschiedenen Phosphorverbindungen, modifiziert nach Tabelle 3.2 Baumann 2003, aufgeführt



**Abbildung 1 Auswahl von Phosphorverbindungen im rohen, kommunalen Schmutzwasser [modifiziert nach Baumann; 2003]**

In dem Kanalnetz oder spätestens in der biologischen Reinigungsstufe werden Polyphosphate durch mikrobielle Prozesse weitgehend zu Ortho-P hydrolysiert. Partikuläre Verbindungen hingegen können sich im Kanalnetz ablagern und bei Spülstößen mobilisiert werden [Baumann 2003].

Eine grobe Richtung der Aufteilung der Phosphorfracht lässt sich anhand der Tabelle 1 (nach: [Siegrist et al., 1999] - Stand 1994); [Baumann 2003] erschließen.

**Tabelle 1 Anteil der partikulären und gelösten Fraktionen im Abwasser (nach: [Siegrist et al., 1999] - Stand 1994); [nach Baumann: 2003]**

P-Fraktion	[ ]	Rohabwasser	Vorgeklärtes Abwasser
Organisch gebundenes P	%	8	10
Polyphosphat <sup>1)</sup>	%	14	16
Orthophosphat	%	42	48
Gelöstes P	%	64	74
Partikulär gebundenes P	%	36	26
Gesamt-P	%	100	100

<sup>1)</sup> ohne Hydrolyse in der Kanalisation

Interessant dabei ist der prozentuale Anteil an Ortho-P, denn dieser Teil des Phosphates ist jener, welcher hauptsächlich durch Fällungsprozesse aus dem Abwasser entfernt werden kann.

Durch Flockenbildung kann partikulär vorkommender Phosphor durch Sedimentation mit abgetrennt werden. [DWA-A 202: 2011] Dabei liegt der Anfall an Phosphor, der von den Menschen an das Entwässerungssystem abgegeben wird, bei rund 1,8 Gramm pro Einwohner und Tag. [DWA-A 202: 2011].

Laut Baumann ist der noch aktuelle Wert der ATV aus dem Jahr 2000 allerdings recht niedrig und nennt zusätzlich 2,0 Gramm pro Einwohner und Tag [Koppe et al.: 1999]. Zu erwarten sind dabei, abhängig vom Abwasseranfall und Fremdwasseranteil, Phosphor-Konzentrationen von 5 mg/l bis 20 mg/l im Zulauf von Kläranlagen [DWA-A 202: 2011].



### 3 Theoretische Grundlagen der Phosphorelimination

Die Phosphorelimination kann laut Baumann 2003 in gezielte und ungezielte Elimination eingeteilt werden. Bei der ungezielten Phosphorentfernung handelt es sich um verfahrenstechnische Einrichtungen, die hauptsächlich andere Ziele besitzen.

Darunter fällt die mechanische Reinigung im Bereich der Rechen und Siebe sowie im Sandfang. In diesem Teilschritt sollen Feststoffe aus dem Abwasser entfernt werden, um nachfolgende Prozesse und Bauteile, wie die Belüftung in der Belebung oder Pumpen und Rohrleitungen, nicht negativ zu beeinflussen. Da der partikulär vorliegende Phosphor für Rechen und Siebe zu fein ist und im Prozess der Sedimentation im Sandfang die herabgesetzte Fließgeschwindigkeit auf 0,3 m/s nicht ausreicht, um das partikuläre Phosphor abzusetzen, findet die P-Elimination hierbei in so geringem Maße statt, dass es für die Bilanz unberücksichtigt bleibt [Baumann: 2003].

Nur kurz zu erwähnen ist die Sedimentation in einer Vorklärung, da ein solches Bauteil noch nicht auf der Kläranlage Silstedt existiert. Die Fließgeschwindigkeit in einer Vorklärung beträgt etwa 1 cm/s, wodurch üblicherweise von einer P-Elimination um die 10% ausgegangen werden kann [DWA-A 131: 2016]. Allerdings sollte dieses durch eine Messkampagne von mindestens einer Woche ermittelt werden. Nach eigenen Untersuchungen von Baumann aus 2003 betrug eine Elimination im Mittel zwischen 20-25%. Die gelösten Phosphorverbindungen sind hiervon unbetroffen und begrenzen die Elimination in der Vorklärung.

Mit in die ungezielte Phosphorelimination eingerechnet wird die Entfernung des Parameters durch den Einbau in die Biomasse. Als Nährstoff für Zellen ist Phosphor zum Aufbau von Zellmasse unerlässlich. Allgemein spricht man in der Abwassertechnik von einem C:N:P-Verhältnis, wobei Kohlenstoff als  $BSB_5$  betrachtet wird. Die Literatur gibt dabei unterschiedliche Verhältnisse an. Baumann spricht dabei von einem Verhältnis  $BSB_5:P$  von 100:1, Koppe et al., 1999 und Siegrist et al., 1999 sowie die DWA aus dem Handbuch 2015 sprechen von einem C:N:P-Verhältnis 100:20:5. Laut der DWA-A 202 aus 2011 geht aus der Berechnung des zu fällenden Phosphors jedoch ein Wert von 1 % des  $BSB_5$  für die Assimilation und dem Zellaufbau hervor.

Angeschlossen sind die folgenden Unterpunkte, die zu den gezielten Methoden gehören, um Phosphor zu entfernen.

## 3.1 Biologische Phosphatelimination

### 3.1.1 Grundlage

Das Grundprinzip der biologischen P-Elimination beruht auf der Aufnahme von gelösten Phosphat von Mikroorganismen, um übergangsweise Energie zu gewinnen.

Festgestellt wurde die erhöhte „Tilgung“ von Phosphat Anfang der sechziger Jahre bei Belebtschlammanlagen ohne Zugabe von Fällmitteln. Dabei war der Prozess abhängig von der Intensität der Belüftung. Untersucht wurde dieses Phänomen von Levin und Shapiro 1965, die die Hypothese aufstellten, dass ein biochemischer Prozess verantwortlich ist. Bestätigt wurde diese These durch einer Reihe von Untersuchungen [Baumann: 2003].

Voraussetzung für diesen Prozess ist eine alternierende Verfahrensführung, bei der zwischen aeroben und anaeroben Bedingungen gewechselt wird. Dadurch wird die Belebung mit Bakterien angereichert, die die Eigenschaft besitzen Phosphat einzulagern. Ersichtlich ist dieser Prozess auch in der Abbildung 2 einer exemplarischen Darstellung.

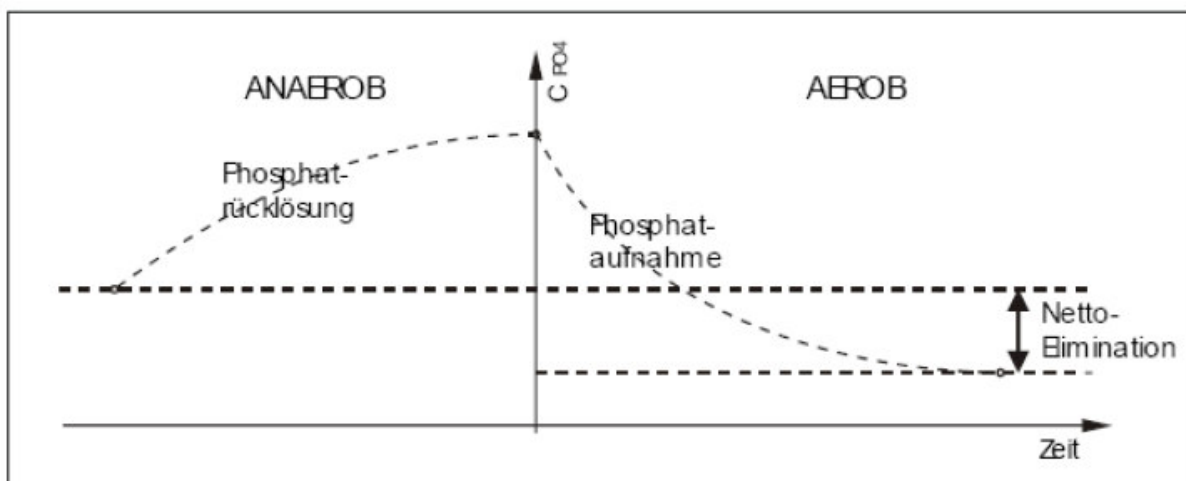


Abbildung 2 Prinzipieller Verlauf der P-Konzentration in einer Anlage zur biologischen Phosphorelimination [Quelle DWA Tagung: 2017 aus Schönberger: 1990]

Die Abbildung zeigt quantitativ, dass die Bakterien schon gespeichertes Phosphat in der anaeroben Phase abgeben und sich die Konzentration des Phosphates auf den Zulaufwert addiert. Wechselt die Phase und es entstehen aerobe Verhältnisse, durch zum Beispiel die Belüftung, so wird Phosphat wieder eingelagert. Bei dieser Aufnahme ist dabei signifikant, dass eine Netto-Elimination von dem zufließenden Phosphat entsteht. In diesem Vorgang sind aber auch noch anoxische Bedingungen mit beteiligt. Die Tabelle 2 der DWA gibt dabei zudem an, dass eine Rücklösung stattfindet, wenn die Nitratmassenkonzentration unter 0,1 Milligramm pro Liter fällt.

**Tabelle 2 Prozessbedingungen bei der biologischen Phosphatelimination [Quelle DWA: 2011]**

Anaerobbecken	Denitrifikation	Nitrifikation
$\text{NO}_3\text{-N} \rightarrow \text{N}_2$	$\text{NO}_3\text{-N} \rightarrow \text{N}_2$	$\text{NH}_4\text{-N} \rightarrow \text{NO}_3\text{-N}$
Wenn Nitrat < 0,1 mg/L P-Rücklösung		P-Aufnahme
$\text{O}_2 < 0,1 \text{ mg/L}$	$\text{O}_2 < 0,1 \text{ mg/L}$	$\text{O}_2 > 1 \text{ mg/L}$

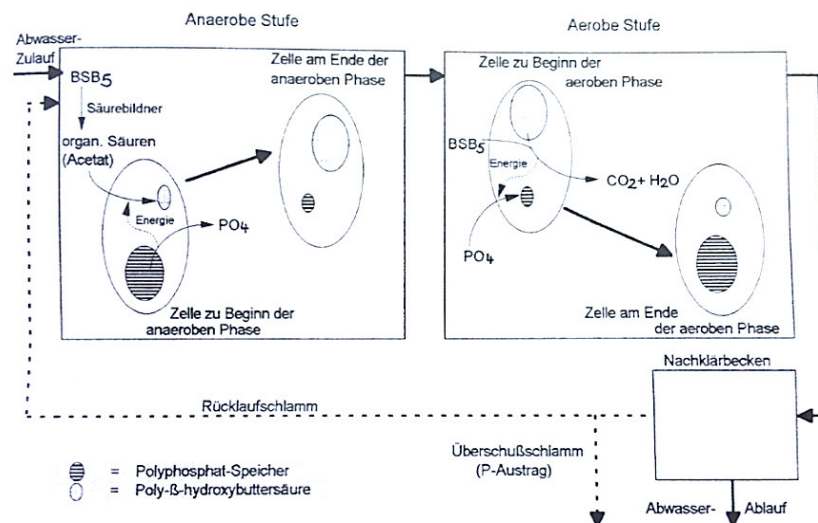
Die unterschiedlichen Verfahren beruhen dabei auf einer Modellvorstellung, die mithilfe der Abbildung 3 erläutert werden soll.

Heterotrophe fakultativ anaerobe Bakterien vergären im anaeroben Milieu leicht abbaubare organische Kohlenstoffverbindungen zu niederen organischen Fettsäuren. Neben diesen Bakterien sind verschiedene Arten obligat aerober Bakterien im Belebtschlamm vorhanden. Einige können das leicht abbaubare Substrat, aufgrund von Ausschluss an gelöstem und chemisch gebundenem Sauerstoff im Abwasser, nicht nutzen [Ante: 1997].

Andere phosphatspeichernde Mikroorganismen verwerten niedere organische Fettsäuren in Form von Acetat. Diese obligat aeroben MO, kurzum Bio-P-Bakterien, Bakterien der Gattung Acinetobacter [nach Helmer: 1996], können durch Aktivität bestimmter Enzyme Energie in Form von Adenosintriphosphat aus den Polyphosphaten gewinnen. Dabei kommt es zur Rücklösung von Phosphat, da dieses bei der Umwandlung von ATP zu ADP freigesetzt wird (anaerobe Rücklösung) [Baumann: 2003 und Helmer 1994]. Die Energie wird genutzt, um Reservestoffe wie Buttersäure und/oder Glykogen aus dem Substrat zu bilden.

Anschließend wird in der aeroben Phase Ortho-P aus dem Abwasser aufgenommen und als Polyphosphat und somit als „Energiespeicher“ eingelagert. Dabei ist ein Potenzial notwendig, welches aus dem oxidativen Abbau, hauptsächlich der Reservestoffe sowie auch Substrate aus der Umgebung gewonnen wird [Helmer: 1994].

Der Phosphataustrag findet nachfolgend der Nachklärung über den Überschussschlamm statt.



**Abbildung 3 Vereinfachte Darstellung der Stoffwechselprozesse bei der biologischen Phosphorelimination [Quelle: Helmer: 1994]**

### 3.1.2 Verfahrenstechnik

Die Verfahrenstechnik beruht bei der gezielten biologischen Phosphorelimination auf zwei Prinzipien mit mehreren Unterordnungen. In der Arbeit wurde darauf verzichtet jedes Verfahren ausführlich zu beschreiben. Die beiden Überordnungen wurden dabei nach Baumann 2003 kurz in ihrem Unterschied erläutert.

- Hauptstromverfahren

In dem Hauptstromverfahren wird darauf abgezielt, dass zusätzlich zu der biologischen P-Elimination eine weiterführende Stickstoffelimination vorgesehen ist. Weiterführend muss gesagt werden, dass die Entnahme des Phosphates über den Überschussschlammabzug realisiert wird. In dem Verfahren selbst unterscheidet sich die Anordnung der einzelnen Becken mit verschiedenen Sauerstoffbedingungen und der internen Rezirkulation.

- Nebenstromverfahren

Bei dem Nebenstromverfahren wird eine Kombination aus chemischer und biologischer P-Entfernung angewendet. Zuerst wird im Hauptstrom Phosphat biologisch in den Belebtschlamm eingelagert, danach erfolgt die Entnahme des Stoffes überwiegend nach Rücklösung und chemischer Fällung.

### 3.1.3 Einflussfaktoren auf die Biologische P-Elimination

Die Entfernung von Phosphor aus dem Abwasser durch Mikroorganismen unterliegt verschiedenen Faktoren, die den Prozess beeinflussen können. Die bedeutendsten Faktoren werden nachfolgend aufgezählt und erläutert.

- Kohlenstoffverbindung

Wie auch die Denitrifikation unterliegt die biologische P-Elimination der Verfügbarkeit leicht abbaubarer Substratverbindungen. Festgestellt wurde der Zusammenhang in den Niederlanden, wo mit der Zugabe von leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen im Nebenstromverfahren eine Verbesserung der Phosphatelimination festgestellt worden ist [Baumann: 2003]. Aber auch im Hauptstromverfahren wurde eine Verbesserung erreicht, indem schwankende Zulaufverhältnisse durch Essigsäurezugabe stabilisiert wurden. Im Mittel betrug der Bedarf 14,5 Gramm  $\text{CH}_3\text{COOH}$  pro Gramm zusätzlich eliminiertem Phosphat [Teichfischer: 1994].

- Aufenthaltszeit

Um eine Elimination des Phosphates zu erreichen, muss den Bakterien die Zeit gegeben werden, den Stoff abzugeben und anschließend aufzunehmen. Dies geschieht erst unter anaeroben und nachfolgend unter aeroben Bedingungen und setzt Aufenthaltszeiten von 1 bis 2 Stunden voraus [Teichfischer: 1994].

- Nitratgehalt

Was den Abbau von leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen betrifft, ist die Denitrifikation ein Konkurrenzprozess zur Bio-P. Oxidierte Stickstoffverbindungen wie Nitrit und Nitrat haben dabei einen negativen Einfluss und hemmen die Rücklösung [Baumann: 2003].

- Sauerstoff

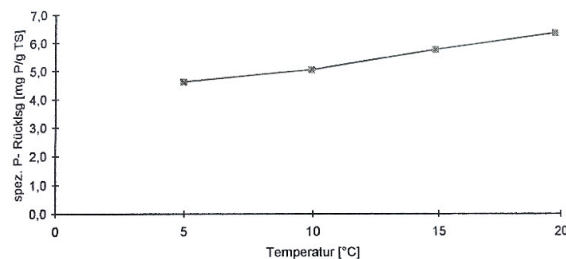
In der anaeroben Zone ist ein hoher Sauerstoffeintrag kontraproduktiv, wird aber durch den Zulauf, den Rücklaufschlamm oder Rückwerke über die Wasseroberfläche eingetragen [Baumann: 2003].

- pH-Wert

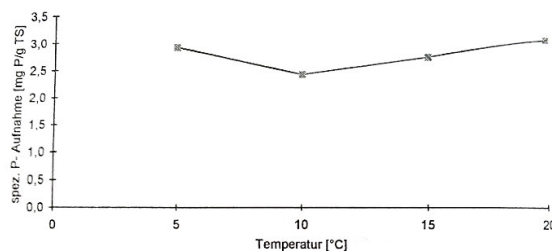
Der pH-Wert betrifft einerseits die MO andererseits in welcher Form das Phosphat im Abwasser vorliegt. Bei den MO findet ab einem pH-Wert unter 4,7 keine Rücklösung, aber auch keine Einlagerung des Phosphates mehr statt. Wird der pH-Wert weiter herab gesetzt, so bewirkt dies eine beschleunigte Rücklösung. Beeinflusst wird außerdem die Gleichgewichtsreaktion des Phosphates. Hier liegt Phosphat bei unterschiedlichen pH-Werten in unterschiedlicher Form vor. Diese Formen besitzen jede ein anderes Löslichkeitsprodukt. So liegt, je nach der Molaren Verteilung, schwer wasserlösliches Hydrogenphosphat bei einem pH kleiner 7 vor und mäßig lösliches Dihydrogenphosphat bei einem pH-Wert größer 7 [Witt: 1997 und Kunst: 1991].

- Temperatur

In Modellversuchen wurde der Einfluss der Temperatur auf die Elimination festgestellt. Es wurde in Temperaturbereichen von 5°C bis 20°C gearbeitet und die Auswirkungen für Rücklösung und Aufnahme des Phosphates ermittelt. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen mit steigender Temperatur und Erhöhung eine Rücklösung und Aufnahme. Allerdings ist eine Steigerung der Aufnahme bei 5°C im Vergleich zu 10°C verzeichnet worden, was durch einen Einbruch der Nitrifikation in diesen niedrigen Temperaturbereichen zu erklären ist [Helmer 1994].



**Abbildung 4 Einfluss der Temperatur auf die Phosphatrücklösung im Anaerobbecken [Quelle Helmer: 1994]**



**Abbildung 5 Einfluss der Temperatur auf die Phosphataufnahme im Belebungsbecken [Quelle Helmer: 1994]**

### **3.1.4 Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb**

Mit der Anreicherung von Mikroorganismen, die vermehrt Phosphor aufnehmen, verändert sich die Zusammensetzung der einzelnen Schlammarten in der Kläranlage. Dabei wird der Schlammanfall auf circa 3 Gramm pro Gramm Phosphor geschätzt [DWA 202: 2011]. Der angereicherte Schlamm besitzt eine hohe Rücklösekapazität, was im anaeroben Milieu zum Beispiel der Schlammeindickung und in Abschnitten Denitrifikation zu starken Rücklösungen von Phosphat führt [Baumann, 1994].

Die geschaffenen Bedingungen, um eine Bio-P zu erzielen, können dazu führen, dass es zu einem Auftreten von Fadenbakterien kommt, welche für Bläh und Schwimmschlamm verantwortlich sind [Baumann: 2003].

Bei der Bio-P kommt es zur Umwandlung von Kohlenstoffen. Es besteht daher die Möglichkeit, dass nicht mehr ausreichend leicht abbaubare Verbindungen für die Denitrifikation zur Verfügung stehen. Bei funktionierender biologischer Phosphoreliminierung muss beachtet werden, dass bei Betrieb einer chemischen Abwasserbehandlung der Verbrauch an Fällmittel sinkt. Zusammengefasst wurden die Wechselwirkungen in der Tabelle 3 nach Baumann 2003 strukturiert und sind nach diversen Zielen, den dazugehörigen Maßnahmen und den dadurch entstehenden Auswirkungen gegliedert. Da die Bio-P Auswirkungen auf den weiteren Anlagenbetrieb hat, sollte man diesen Teilprozess nicht isoliert betrachten.

**Tabelle 3 Wechselwirkungen der biologischen Phosphatelimination mit anderen Teilprozessen der weitergehenden Abwasserreinigung [Quelle modifiziert nach Baumann: 2003]**

Nr.	Ziel	Maßnahme	Auswirkung
4	Verminderung des Nitrateintrages in der AN-Zone	Verminderung des Rücklaufschlammstromes	ggf. Schlammstapelung in der Nachklärung
5		Forderung nach weitgehender Denitrifikation	Bereitstellung entsprechender verfahrenstechnischer Randbedingungen
6	Phosphataufnahme in der aeroben Zone	Gewährleistung eines minimalen Sauerstoffgehaltes in der aeroben Zone	Minimale Sauerstoffzufuhr bei der Sicherstellung der Nitrifikation eingeschränkt
7	Verhinderung Phosphatrücklösung in der Nachklärung	Nitratkonzentration von > 5 mg/l in der Nachklärung erwünscht	Begrenzung der Denitrifikation
8	Optimierung Betriebskosten	Verminderung Fällmittelzugabe	Absenkung der Eisenzugabe möglicherweise Gefahr des H <sub>2</sub> S-Bildung bei der Faulung. Kompensation möglich
9		Verminderung Fällmittelzugabe	ggf. höhere Phosphorgehalte im zu entsorgenden Schlamm (einschränkung der landwirtschaftlichen Verwertung)
10		Verminderung Fällmittelzugabe	Dosierung nach Abschluss der Teilprozesse der biologischen Phosphatelimination ( auch Auswirkung auf einsetzbare Fällmittel)
11	Verhinderung Rücklösung bei der Schlammbehandlung	Eingeschränkter Betrieb von statischen Überschussschlamm-Eindickern	Bereitstellung entsprechender verfahrenstechnischer Randbedingungen
12	Hohe Phosphatrücklösung	Hoher Anteil des Belebten Schlammes unter anaeroben Verhältnissen	Schädigung der Biozönose bei zu hohen unbelüfteten Anteilen (> 66 %) im System
13	Verminderung P-Rücklösungen in der Nachklärung	Ansatz einer geringe Eindickzeit $t_e$	Rechnerisch geringe, zulässige TS-Gehalte in der Belebung
14	Optimierung Bio-P	Schaffung anaerober Zonen und weitgehende Denitrifikation	ggf. Verschlechterung des Absetzverhalten des belebten Schlammes, Bildung von Schaum und Blähschlamm

## 3.2 Fällung

### 3.2.1 Grundlage

Als Fällung wird ein chemischer Prozess beschrieben, der gelöste, meist ionische Teilchen im Wasser in eine schwerlösliche Form überführt. Diese Überführung wird durch ein sogenanntes Fällmittel ausgelöst. Nachträglich kann das entstandene Produkt auf physikalischem Wege entfernt werden [DWA 2015 und Baumann 2003].

Physikalische Verfahren in der Abwassertechnik sind nach DWA 2015 folgende Prozesse, die kurz angesprochen werden:

- Sedimentation: Absetzen der im Wasser enthaltenden Stoffe.
- Flockung: Bildung von Flocken durch das Überführen feinsten, im Wasser schwebender oder kolloidal verteilter Stoffe. (kolloidal = Stoffe feiner und nicht erkennbarer Verteilung)
- Flotation: Auftreiben von Abwasserinhaltsstoffen durch Einperlen feinsten Luftblasen.
- Adsorption: Anlagern eines Stoffes an die Oberfläche eines anderen Stoffes.

Bezogen auf das Abwasser wird mit der chemischen Fällung Phosphor aus dem Wasser eliminiert, wobei das Arbeitsblatt DWA 202 von 2011 angibt, dass nur Ortho-P durch diese Fällung betroffen ist. Betrachtet man hingegen alle Verfahrensschritte der Fällung, erkennt man, dass auch andere Phosphorverbindungen aus dem Abwasser abgetrennt werden sollten [DWA 202: 2011].

- **Dosierung** und **Einmischung** des Fällmittels in das Abwasser
- **Entstabilisierung**
- **Bildung partikulärer Verbindungen** von Fällmittelkationen und Phosphatanionen (sowie anderer Anionen)
- **Mikroflockenbildung**
- **Flockenbildung**: Bildung von Makroflocken; Einschluss von Schwebestoffen und Kolloide (Mitfällung und –flockung)
- **Abtrennung** der Flocken durch Sedimentation, Flotation und/oder Filtration

Bei dem Teilschritt der Flockenbildung wird die Mitfällung und Mitflockung beschrieben. Dabei werden partikulär vorliegende Phosphatverbindungen mit in die Flocke eingeschlossen und aus dem Abwasser entfernt [DWA 202: 2011].



### 3.2.2 Fällmittel

Aus wirtschaftlichen Gründen werden nur wenige Elemente in verschiedenen Verbindungen zur Fällung von Phosphat in der Abwassertechnik verwendet, obwohl viele mehrwertige Metallionen unlösliche Verbindungen mit den Abwasserinhaltsstoffen eingehen [DWA-A 202: 2011]. Zusammengefasst werden auf Kläranlagen Aluminium, Eisen – in drei- und zweiwertiger Form – und Calcium als Fällmittel eingesetzt. Dabei sind auch Mischprodukte aus Eisen und Aluminium oder hochpolymere Aluminiumverbindungen möglich. Die Tabelle 4 listet die Produkte, die üblicherweise Anwendung in der Abwassertechnik finden, mit zusätzlichen Informationen, wie zum Beispiel dem Wirkstoffgehalt, auf.

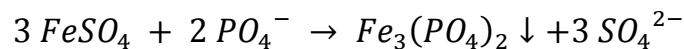
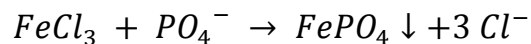
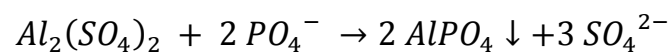
**Tabelle 4 Gebräuchliche Fällmittel (Tabelle 1) [Quelle DWA-A 202: 2011]**

Produktbezeichnung	chemische Formel	typische Lieferform Dichte bzw. Schüttgewicht in t/m <sup>3</sup>	Lagerung und Dosierung	wirksames Kation zur P-Fällung	übliche Wirkstoffgehalte je kg Lieferform	pH-Wert der (gesättigten) Lösung
Aluminiumchlorid	AlCl <sub>3</sub>	Lösung 1,3	Tank säurefeste Pumpe	Al <sup>3+</sup>	58 – 60 g/kg 2,2 mol/kg	1
Aluminium-Eisen(III)-chlorid	AlCl <sub>3</sub> + FeCl <sub>3</sub>	Lösung 1,15	Tank säurefeste Pumpe	Al <sup>3+</sup> Fe <sup>3+</sup>	19 g/kg 10 g/kg 0,9 mol/kg	1
Aluminiumsulfat	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Granulat, Pulver 1 Lösung 1,27	Silo Schnecke Tank säurefeste Pumpe	Al <sup>3+</sup>	40 g/kg 1,5 mol/kg 24 g/kg 0,9 mol/kg	3
Aluminium-Eisen(III)-sulfat	[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ] · n H <sub>2</sub> O	Granulat 0,95	Silo Schnecke u. säurefeste Exzenterpumpe	Al <sup>3+</sup> Fe <sup>3+</sup>	82 g/kg 10 g/kg 3,2 mol/kg	2
Eisen(II)-chlorid	FeCl <sub>2</sub>	Lösung 1,24 – 1,37	Tank säurefeste Pumpe	Fe <sup>2+</sup> → Fe <sup>3+</sup>	86 – 135 g/kg 1,5 – 2,4 mol/kg	1
Eisen(III)-chlorid	FeCl <sub>3</sub>	Lösung 1,41 – 1,43	Tank säurefeste Pumpe	Fe <sup>3+</sup>	135 – 138 g/kg 2,4 – 2,5 mol/kg	1
Eisen(III)-chloridsulfat	FeClSO <sub>4</sub>	Lösung 1,43 – 1,52	Tank säurefeste Pumpe	Fe <sup>3+</sup>	123 g/kg 2,2 mol/kg	1
Eisen(II)-sulfat	FeSO <sub>4</sub> · 7 H <sub>2</sub> O	restfeuchtes (Grün-)Salz 1	Einsumpfbunker säurefeste Pumpe	Fe <sup>2+</sup> → Fe <sup>3+</sup>	178 – 195 g/kg 3,2 – 3,5 mol/kg	2
Eisen(III)-sulfat	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Lösung 1,5	Tank säurefeste Pumpe	Fe <sup>3+</sup>	118 g/kg 2,1 mol/kg	1
Calciumhydroxid Weißkalkhydrat (gelöschter Kalk) stabilisierte Kalkmilch (20%ig)	Ca(OH) <sub>2</sub>	Pulver 0,45 Suspension 1,15	Silo Schnecke Tank Exzenterpumpe	Ca <sup>2+</sup>	376 g/kg 9,4 mol/kg 75 g/kg 1,9 mol/kg	12,5
Natriumaluminat	NaAl(OH) <sub>4</sub>	Lösung 1,3 – 1,5	Tank Pumpe	Al <sup>3+</sup>	62 – 105 g/kg 2,3 – 3,9 mol/kg	14
Polyaluminium-(hydroxid)-chlorid (PAC)	[Al(OH) <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> ] <sub>n</sub>	Lösung 1,2 – 1,37	Tank säurefeste Pumpe	Al <sup>3+</sup>	70 – 90 g/kg 2,6 – 3,3 mol/kg	1 – 3
Polyaluminium-(hydroxid)-chloridsulfat	Al <sub>x</sub> (OH) <sub>y</sub> Cl <sub>z</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>k</sub>	Lösung 1,4	Tank säurefeste Pumpe	Al <sup>3+</sup>	52 – 90 g/kg 1,9 – 3,3 mol/kg	1

### 3.2.2.1 Metallverbindungen

Zu den Metallverbindungen, die ihren Einsatz in der Abwassertechnik finden, lassen sich Aluminium- und Eisensalze zählen. Bei der Reaktion der Metallsalze und dem gelösten anorganischen Phosphat kommt es zu einem Austausch der Ionen. Die Kationen der Metallverbindung reagieren mit dem Phosphat. Organische Phosphorverbindungen und Polyphosphate sind dabei nicht fällbar, lassen sich aber teilweise durch physikalische Flockungsprozesse (Adsorption an die Fällungsprodukte) aus dem Abwasser entnehmen. Die eingesetzten Anionen Chlorid und Sulfat verbleiben dabei in gelöster Form im Abwasser [Baumann: 2003].

Beispielhaft wurden hier die Reaktionsgleichungen für Aluminiumsulfat, Eisenchlorid und Eisensulfat aufgeführt [modifiziert nach Baumann: 2003].



Des Weiteren kann für Fällung auch Natriumaluminat eingesetzt werden. Jedoch unterscheidet sich die Reaktion gegenüber der eines Aluminiumsalzes und wirkt alkalisch.

### 3.2.2.2 Kalkhydrat

Eine weitere Variante der Fällung ist die Überführung in die schwerlösliche Form mittels Kalkhydrat. Dabei handelt es sich um einen Vorgang mit hoher Komplexität, welcher aber vereinfacht so ausgedrückt werden kann, dass mit stark angehobenem pH-Wert eine Fällungsreaktion zwischen Calcium, Phosphat und Karbonat entsteht. Zuzüglich hängt die Löslichkeit der entstandenen Produkte, wie zum Beispiel Apatit, abgesehen von dem pH-Wert, auch noch von thermodynamischen Faktoren ab. Nach damaligen Erfahrungen lassen sich Phosphatkonzentrationen von 0,5 mg/l bei über pH 10,5 erreichen [Baumann: 2003].

Abgesehen von weichen Wässern kann gesagt werden, dass ausreichend Calcium im Abwasser vorhanden ist. Die Dosierung von Kalkhydrat soll vielmehr primär eine Anhebung des pH-Wertes bezwecken als eine Zugabe von Calcium. Es gibt allerdings Wässer, bei denen die Calciumfällung durch das Einmischen einer anderen Lauge hervorgerufen wird [DWA-A 202: 2011].

### 3.2.3 Konkurrierende Reaktionen

Bei der Dosierung der Fällmittel existieren weitere Reaktionen, die mit der gewollten Phosphatfällung konkurrieren. Wichtige konkurrierende Reaktionen sind bei der Verwendung von Metallsalzen die Fällung mit Hydroxid und bei den Calciumsalzen die Bildung von Carbonat. Die DWA-A 202 aus 2011 fasste vier konkurrierende Reaktionen zusammen, die zu einem Mehrverbrauch an Fällmittel und damit zu einer Erhöhung der Menge des Schlammes aus der Fällung führen.

- Hydroxidbildung  $Me^{3+} + 3 OH^{-} \rightarrow Me(OH)_3$
- Karbonatbildung  $Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$
- Komplexierung mit organischen Stoffen
- Adsorptionsreaktionen

Die beiden zuletzt genannten Punkte beschreiben vielmehr die Mitfällung von organischem Phosphat und weisen nur indirekt auf eine konkurrierende Reaktion hin.

Aufschluss über die Bildung von Hydroxid gibt die Abbildung 6, welche die Löslichkeitsgleichgewichte, der in der Abwassertechnik angewandten Fällungspartner für Phosphat, darstellt. Es ist erkennbar, dass der optimale pH-Wert bei Eisenverbindungen bei 5,0 – 5,5 liegt und bei Aluminiumverbindungen bei einem pH-Wert um 6. Teilweise sind diese pH-Werte in der Abwasserreinigung nicht gegeben. Gleichermäßen setzt die Bildung von Hydroxidverbindungen mit dem metallischen Fällmittel voraus, dass  $OH^{-}$  im Wasser vorliegt. Der pH-Wert gibt Auskunft über die Konzentration der  $OH^{-}$ -Ionen. Ist dieser niedrig, so ist die Konzentration der  $OH^{-}$ -Ionen gering. Durch die beiden unterschiedlichen pH-Verhältnisse ist mit einer Hydroxidbildung bei der Fällung zu rechnen.

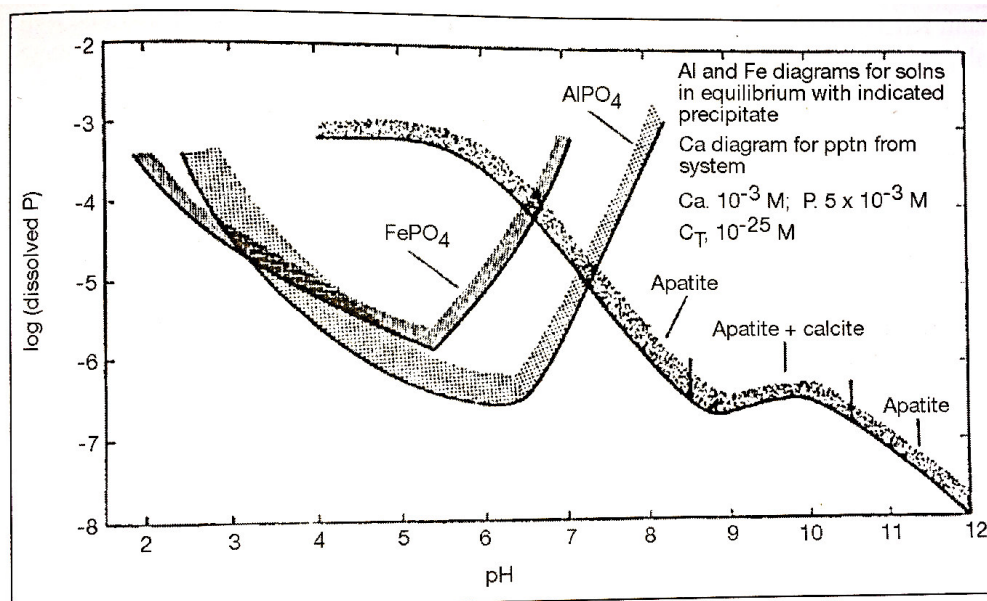


Abbildung 6 Diagramm der Löslichkeitsgleichgewichte für Eisen-, Aluminium- und Calciumphosphate [Quelle Witt: 1997]

### 3.2.4 Verfahrenstechnik

Die Verfahrenstechnik bestimmt sich nach dem Einsatzort und dem Prozessbecken, in dem das Fällmittel eingebracht wird. Nach der DWA-A 202 aus 2011 werden drei Verfahrensvarianten aufgezählt.

#### 1. Vorfällung

Als Vorfällung ist die Zugabe eines Fällmittels vor dem Sandfang oder vor der Vorklärung definiert, wie in der Abbildung 7 grafisch dargestellt wird. Es wird darauf abgezielt, die gefällten Phosphatverbindungen in der Vorklärung mit den in der Vorklärung abgeschiedenen organischen Stoffen zu entnehmen, wodurch der Fällschlamm über den Primärschlamm entfernt wird. Aus wirtschaftlichen Gründen wird in der Regel, im Gegensatz zu Metallverbindungen, bei denen ein niedriger Phosphatgehalt sinnvoll ist, Kalkhydrat bei Phosphatkonzentrationen größer als 8 mg/l eingesetzt [Baumann: 2003]. Typische Fällmittel bei diesem Verfahren sind Kalkhydrat bis pH 9,5 oder Eisen(II)-Salze unter Voraussetzung eines belüfteten Sandfangs, um das zweiwertige Eisen aufzuoxidieren [DWA-A 202: 2011].

Im Zusammenspiel zwischen der Vorklärung und der Vorfällung wird das Stickstoff/Kohlenstoff-Verhältnis für den Zulauf zur biologischen Stufen verschoben. Dies liegt daran, dass organisches Material von beiden Prozessen abgeschieden wird. Einerseits kann es zu einer Verschlechterung der Denitrifikation kommen, andererseits ist es vorteilig für einen verbesserten Kohlenstoffabbau oder um die Nitrifikation zu unterstützen [Baumann: 2003].

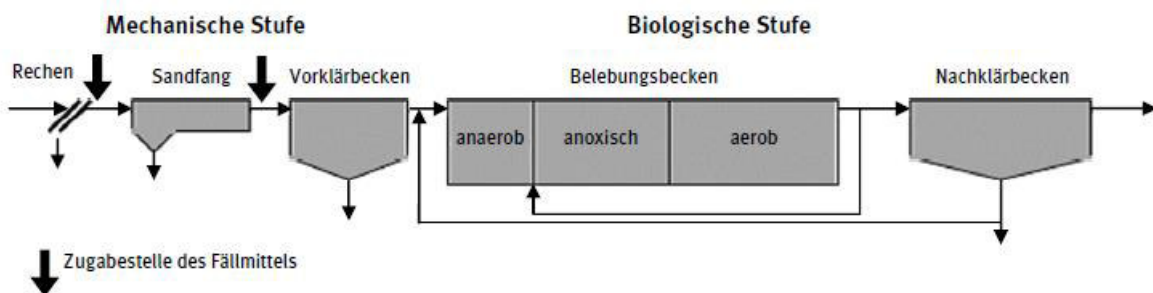


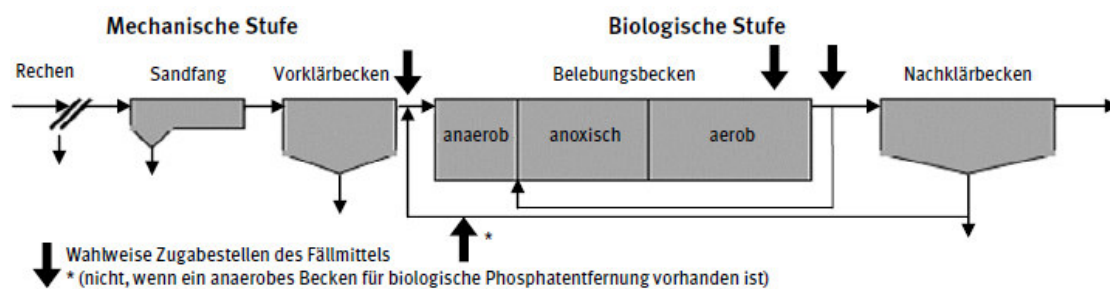
Abbildung 7 Dosierstellen Vorfällung [Quelle DWA-A 202: 2011]

#### 2. Simultanfällung

Für die Simultanfällung, das weltweit wichtigste Verfahren [Gujer: 2007], vorgesehene Orte der Zugabe sind folgende vier Punkte, welche in der Abbildung 8 grafisch aufgezeigt werden.

- Vor dem Belebungsbecken
- In das Belebungsbecken
- In den Zulauf zum Nachklärungsbecken
- In den Rücklaufschlamm

Der anfallende Fällschlamm wird über den Überschussschlamm abgezogen und aus der Anlage entfernt. Die Fällungsprodukte selbst verbleiben über die Dauer des Schlammalters im Belebungsprozess und können hohe Phosphatspitzen während dieser Zeit abpuffern [DWA-A 202: 2011]. Die Wahl des einzusetzenden Fällmittels in dem Verfahren bestimmt sich nach dem Ort der Einbringung und der Auswirkung. Für zweiwertiges Eisen steht bei der Dosierung zum Zulauf der Nachklärung eventuell nicht ausreichend Sauerstoff für die Oxidation zur Verfügung [Baumann: 2003]. Auch ist die Zugabe von einem Fällmittel zum Zulauf des Belebungsbeckens in Form des herkömmlichen Abwasserstroms sowie auch über den Rücklaufschlamm für die biologische Phosphatelimination unzutraglich [DWA-A 202: 2011]. Kalkhydrat hingegen setzt eine Einstellung des pH-Wertes voraus, um weitgehend effektiv Phosphat zu entfernen.

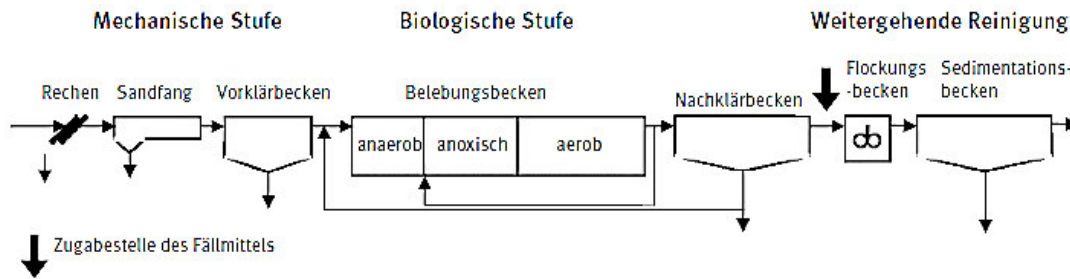


**Abbildung 8 Dosierstellen Simultanfällung [Quelle DWA-A 202: 2011]**

### 3. Nachgeschaltete Verfahren

#### a. Nachfällung

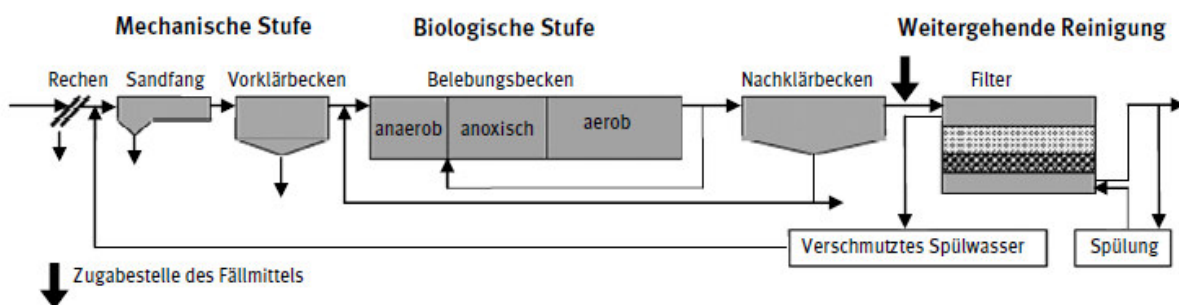
Als nachgeschaltetes Verfahren wird das konventionelle Verfahren genannt. Der Ablauf des Belebungsbeckens, der weitgehend in der biologischen Stufe gereinigt und im Nachklärbecken der Schlamm vom Klarwasser abgetrennt wurde, wird in ein Flockungsbecken/ Mischbecken geleitet. In dessen Zulauf wird ein Fällmittel dosiert und kann vor Ort reagieren. Anschließend wird der mit Fällmittel versetzte Abwasserstrom in ein Sedimentationsbecken, Lamellenabscheider oder Flotationsreaktor geleitet, um dort den Fällschlamm abzutrennen [DWA-A 202: 2011 und Baumann: 1994]. Vorteil dieser Anlagenstruktur ist, dass er die vorgeschalteten Prozesse kaum bis gar nicht beeinflusst und geringe P-Ablaufkonzentrationen erreichen kann. Zudem kann der Fällschlamm, auch Tertiärschlamm genannt, separat abgeschieden werden. Der Einsatz des Fällmittels schränkt sich dahingehend ein, dass ein Aufwand wie Belüftung, pH-Wertanpassung und Neutralisation je nach eingesetztem Mittel erforderlich wird [Baumann: 2003]. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9 Dosierstellen Nachfällung [DWA-A 202: 2011]**

b. Flockungsfiltration

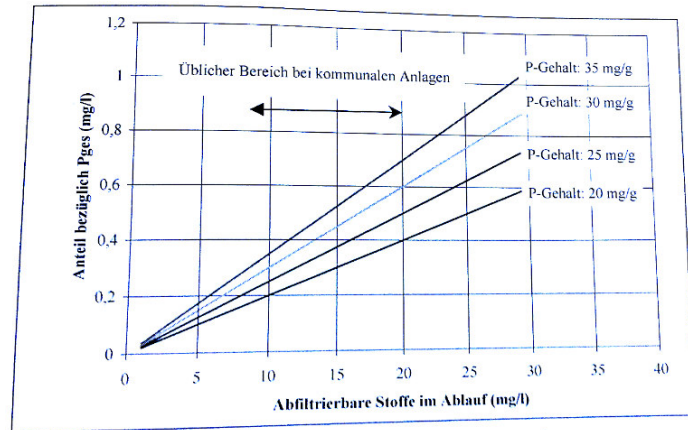
Die Flockungsfiltration ist das andere nachgeschaltete Verfahren und ist bildlich in Abbildung 10 dargestellt. Der Filtration ist eine Einmischung eines Fällmittels, wahlweise auch eines Flockungsmittel, vorgeschaltet. Anschließend wird das Gemisch aus Abwasser und Fäll-/Flockungsmitteln dem Filter zugeführt [Baumann: 1994] und es kommt im Filterbett zu einer Flockenbildung. Eingesetzte Filtermaterialien sind Feinkornfilter, aber auch Mikrosiebe und Tuchfilter [Barjenbruch: 2017]. Partikuläre Stoffe werden nun in dem Filter zurückgehalten. Die Voraussetzung dieses Verfahrens ist aber, dass eine vorgeschaltete Fällung, Elimination durch Vor- oder Simultanfällung oder der biologischen Entfernung von Phosphor auf der Anlage betrieben wird. Dadurch wird verhindert, dass der Filter schnell beladen ist und es zu Standzeiten wegen einer Spülung kommt.



**Abbildung 10 Dosierstellen Flockenfiltration [Quelle DWA-A 202: 2011]**

Aus der Abbildung 11 wird noch einmal deutlich, dass partikuläre Stoffe das Potenzial beinhalten die Konzentration an Phosphor im Ablauf zu steigern. Das gilt für Anlagen mit Filtration, aber auch für Anlagen, die ausschließlich mit einer Nachklärung den Ablauf von Schwebstoffen befreien. Je nach Zusammensetzung der Schlammflocken kann ein Gramm Schlamm eine Spanne von 20 bis 35 Milligramm Phosphor enthalten. Je nach abfiltrierbaren Stoffen im Ablauf kann der Gesamtposphorgehalt zwischen 0,4 bis 0,6 mg/l auftreten [Baumann: 2003].





**Abbildung 11 Anteil den partikulären Phosphors im Ablauf in Abhängigkeit der abfiltrierbaren Stoffe und des Phosphorgehaltes [Baumann: 2003]**

Aus den vorgestellten Verfahrensarten können unterschiedliche Verbindungen erstellt werden. Dadurch kann eine zweistufige Fällung realisiert werden. Die Gründe dafür können die Entlastung nachfolgender Verfahrensstufen, der wirtschaftlicher Einsatz von Chemikalien oder die Filterlaufzeiten sein [DWA-A 202: 2011]. Es sind beispielsweise folgende Kombinationen denkbar:

- Vorfällung und Simultanfällung
- Vorfällung und Nachfällung
- Simultanfällung und Nachfällung
- Simultanfällung und Flockungsfiltration

Die DWA hat die Tabelle 5 erstellt, welche die Verfahrensvarianten auflistet und jeweils prägnante Informationen dazu liefert. Bei der Fällung ist es wichtig eine optimale Einmischung in das Abwasser zu erzielen, um das Fällmittel in Kontakt mit dem zu fällenden Stoff zu bringen.

Die Kenngröße  $\beta_{\text{Fäll}}$  wird in dem nachfolgenden Punkt 3.2.7 Bedarf des Fällmittels erläutert.

**Tabelle 5 Charakterisierung der Verfahren zur Fällung [Quelle DWA-A 202: 2011]**

	Vorfällung	Simultanfällung	Nachfällung	Flockungsfiltration
einhaltbarer Überwachungswert <sup>1)</sup> (mg/l P)	2	1	1	0,5
Anhaltswerte zu $\beta_{\text{Fäll}}$	1,2	1,2	1,2/2,5 <sup>2)</sup>	2,5 <sup>2)</sup>
Dosierstelle(n)	vor Vorklärbecken (z. B. Venturi, belüfteter Sandfang)	vor/in/nach Belebungsbecken, nach Tropf- oder Tauchkörper	nach Nachklärbecken	vor Filter oder zweistufig: vor Filter und wie bei Simultan- oder Vorfällung
Einmischung	Stellen hoher Turbulenz	Stellen hoher Turbulenz	Mischer	vor/nach Pumpe bzw. im Mischreaktor
Ort der Flockenabtrennung	Vorklärbecken	Nachklärbecken	zusätzliches Sedimentations- oder Flotationsbecken	im Filterbett
ANMERKUNGEN				
1) Unter günstigen Umständen und optimalen Betriebsbedingungen können auch niedrigere Werte eingehalten werden.				
2) Bei Nachfällung als zweite Stufe.				

### 3.2.5 Einflussfaktoren auf die Fällung

- Energieeintrag

Der Energieeintrag ist wichtig, um eine gute Einmischung des Fällmittels in kurzer Zeit zu gewährleisten. Dadurch wird sichergestellt, dass das Fällmittel direkt mit den Phosphationen reagiert. Es wird eine Leistungsdichte von 100 bis 150 W/m<sup>3</sup> vorgeschlagen, die in Rohr, Gerinne oder dem Mischungsreaktor vorherrschen sollte. Die Aufenthaltszeit in der Mischzone sollte für die Reaktion ungefähr eine Minute betragen [DWA-A 202: 2011].

Anschließend sollte in der Phase der Flockenbildung die Leistungsdichte auf 5 W/m<sup>3</sup> reduziert und eine Reaktionszeit von 20 bis 30 Minuten für die Makroflockenbildung eingeplant werden [DWA-A 202: 2011].

- pH-Wert

Der pH-Wert ist, wie in der Abbildung 6 des zuvor beschriebenen Themas 3.2.3 konkurrierende Reaktionen bereits deutlich gemacht wurde, für die Löslichkeit entscheidend. Die geringste Löslichkeit für Eisenphosphat liegt bei pH 5,0 – 5,5 und von Aluminium bei einem pH-Wert um circa 6, wobei die Literatur der DWA-A 202 einen Bereich von 6,0 – 7,0 angibt. Bei diesen pH-Werten kann es allerdings dazu kommen, dass die Flockenbildung nicht zufriedenstellen verläuft [DWA-A 202: 2011].

- Sauerstoff

Sauerstoff spielt ausschließlich bei der Verwendung von Eisen-(II)-Produkten eine Rolle, da hierbei eine Oxidation des zweiwertigen Eisen erfolgen muss, um mit dem Phosphat reaktiv zu sein. Laut DWA 202 reichen die Sauerstoffeinträge eines belüfteten Sandfanges aus, um den Prozess zu aktivieren.

- Biologische Stufe

Sollte die biologische Stufe wechselnde Zonen mit anaeroben, anoxischen oder aeroben Verhältnissen vorweisen, dann kommt es vorzugsweise zu einer vermehrten Aufnahme von Phosphat durch die Mikroorganismen. Dieses Verhalten muss bei der Berechnung der Fällmittelmenge berücksichtigt werden [DWA-A 202: 2011].

- Temperatur

Betrachtet man ausschließlich den Vorgang der Fällung, so ist die Temperatur nicht direkt abhängig, da dieser auch bei kalten Rohwässern nahezu vollständig abläuft. Über den Teilschritt im Bereich der Flockung ist jedoch indirekt eine Temperaturabhängigkeit gegeben. In der Winterperiode wurden häufig erhöhte Trübungswerte am Ablauf des Sedimentationsbeckens festgestellt [Kermer: 1991].



### 3.2.6 Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb

- Säurekapazität

Bei der Säurekapazität handelt es sich um den Wert an Säure, der verbraucht wird, um einen pH-Wert von 4,3 bei einer definierten Wasserprobe von 100 ml einzustellen [Schneider: 2011]. Bei der chemischen Fällung kommt es zu Veränderungen der Säurekapazität. Unter Verwendung von Metallsalzen wird die Säurekapazität vermindert, was bei sehr weichen Wässern noch extremer ist. Bei der Dosierung von Kalk und Natriumaluminaten wird diese erhöht. Im Ablauf der biologischen Stufe, bei der Luft eingeperlt wird, wird eine Säurekapazität von 1,5 mmol/l, besser noch 2 mmol/l empfohlen, da es ansonsten zu Störungen in der biologischen Stufe und der Nachklärung kommt [Schneider: 2011].

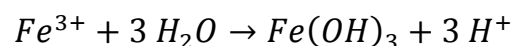
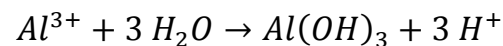
Als Berechnungsgrundlage kann folgende Formel aus Baumann 2003 angewendet werden.

$$S_{KS,ab} = S_{KS,zu} - (0,06 * S_{Fe^{3+}}) - (0,04 * S_{Fe^{2+}}) - (0,11 * S_{Al^{3+}}) + 0,03 * (X_{p,Fäll})$$

Die Angaben von  $X_{p,Fäll}$ ;  $S_{Al^{3+}}$ ;  $S_{Fe^{2+}}$  und  $S_{Fe^{3+}}$  sind als Massenkonzentrationen in mg/l anzugeben. Die Säurekapazität im Ablauf  $S_{KS,ab}$  und im Zulauf  $S_{KS,zu}$  sind als Stoffmengenkonzentration in mmol/l anzugeben.  $X_{p,Fäll}$  ist der zu fällende Phosphor und wird im Punkt 3.2.7 Bedarf des Fällmittels erläutert.

- pH-Wert

Bei der konkurrierenden Reaktion, welche bei der Fällung auftritt, wird erkennbar, dass durch die Bildung von Metallhydroxiden freie Wasserstoffionen entstehen. Dadurch wird der pH-Wert in Richtung saures Milieu verschoben [Kermer: 1991]. Sie hängt dementsprechend von der Dosiermenge und dem Reaktionspartner ab.



- Leitfähigkeit

Unweigerlich kommt es bei der Verwendung von Metallsalzen, wie Aluminiumsulfat oder Eisenchlorid, zur Aufsalzung des Abwassers und auch des Gewässers. Bei der Fällungsreaktion werden die jeweiligen Anionen frei und befinden sich gelöst im Wasser.

- Schlammanfall und Volumen

Bei der Verwendung von Fällmitteln kommt es zu einer Erhöhung der Feststofffracht, weil gelöster Phosphor mit Hilfe des Fällmittels in eine absetzende Flocke überführt wird. Dabei werden Werte für Eisen, Aluminium und Kalkhydrat angegeben. Der Trockensubstanzgehalt soll um 2,5 Gramm pro Gramm Eisen und um 4 Gramm pro Gramm Aluminium steigen. Bei der Dosierung von Kalk soll die Feststoffzunahme um Faktor den 1,35 steigen [DWA-A 202: 2011].

Das Schlammvolumen verhält sich trotz größerer Feststofffracht unterschiedlich. Dabei ist entscheidend, welche Verfahrensweise eingesetzt wird.

Bei der Vor- sowie Nachfällung soll aus dem Grund des Sinkens des Feststoffgehaltes des Primär- und Tertiärschlammes durch die Zugabe von Fällmitteln das Schlammvolumen zunehmen.

Im Falle der Simultanfällung steigt der niedrige Feststoffanteil des Sekundärschlammes bei zunehmender Dosierung an und bewirkt, dass sich das Schlammvolumen reduziert [DWA-A 202: 2011].

- Schwermetallkonzentrationen

Die angewendeten Fällmittelprodukte auf Metallbasis enthalten Schwermetalle und werden bei der Dosierung in das Abwasser eingetragen. Allerdings sollen diese nicht in den Vorfluter gelangen, da bei der Flockenbildung Schwermetalle gebunden werden. Hierbei ist zu beachten, dass nur eine Verschiebung des Problems an eine andere Stelle getätigt wird. Die abgesetzten Schwermetalle verbleiben in dem Schlamm und somit in der Schlammbehandlung und dem entwässerten Schlamm [Hesse und Seyfried: 1989]. Betrachtet man beispielhaft die Fällmittel aus dem Anhang, so kann gesagt werden, dass der dadurch entstehende Schlamm zurzeit die Grenzwerte im Bereich der Schwermetalle seitens der Düngemittel- sowie Klärschlammverordnung einhält.

### 3.2.7 Bedarf des Fällmittels

Die Berechnung des Bedarfs an Fällmittel wird anhand der Vorlage der DWA-A 202 aus dem Jahr 2011, die von dem Thema der chemische-physikalischen Phosphorelimination handelt, erläutert.

Der Bedarf an Fällmittel erfordert verschiedene Werte. Beginnend wird die Wirksubstanz ermittelt. Da unterschiedliche Angaben auf den mitgelieferten Datenblättern der Fällmittellieferanten angegeben werden, gibt die DWA eine Umrechnungstabelle an, um die Einheit Kilogramm Aluminium oder Eisen pro Kilogramm Fällmittel  $WS_{Me}$  zu bestimmen.

**Tabelle 6 Umrechnungstabelle der Wirksubstanz [DWA-A 202: 2011]**

▪ kg Me je kg Fällmittel	=	$WS_{Me}$ (hier benutzte Definition)
▪ % Me (Massenprozent)	=	$100 \cdot WS_{Me}$
▪ g Me je kg Fällmittel	=	$1000 \cdot WS_{Me}$
▪ mol Me je kg Fällmittel für $Fe^{2+}$ und $Fe^{3+}$	=	$1000 \cdot WS_{Me} / AM_{Fe}$
	=	$1000 \cdot WS_{Me} / 55,8$
	=	$17,9 \cdot WS_{Me}$
▪ für $Al^{3+}$	=	$1000 \cdot WS_{Me} / AM_{Al}$
	=	$1000 \cdot WS_{Me} / 27,0$
	=	$37,0 \cdot WS_{Me}$
▪ Dichte der Fällmittellösung $\rho_{FML}$ (kg/m <sup>3</sup> Lösung)		

Anschließend wird aus diesem berechneten Wert und der Molaren Massen des jeweiligen Stoffes der Wirkungsbeiwert  $z$  berechnet.

$$z = \frac{AM_P}{AM_{Fe}} * WS_{Fe} + \frac{AM_P}{AM_{Al}} * WS_{Al}$$

$AM_P$  = Molare Masse Phosphor 31 g/mol

$AM_{Fe}$  = Molare Masse Eisen 55,8 g/mol

$AM_{Al}$  = Molare Masse Aluminium 27 g/mol

Um nun die im Mittel zu dosierende absolute Fällmittelmenge  $B_{d,FM}$  in Gramm Fällmittel pro Tag zu berechnen, werden folgende Werte benötigt:

- $Q_{T,d}$  der täglichen Abwassermenge bei Trockenwetter ( $m^3/d$ )
- $X_{P,Fäll}$  durch Fällung eliminiertes Phosphor (mg/l)
- $\beta_{Fäll}$  der zu wählenden relativen Fällmittelmenge  $X_{ME}$  bezogen auf den zu fällenden Phosphor  $X_{P,Fäll}$  ((mol/l)/mol/l)

$$B_{d,FM} = X_{P,Fäll} * \beta_{Fäll} * \frac{Q_{T,d}}{z} \quad (\text{g Fällmittel/d})$$

Die Berechnung des zu fällenden Phosphors wird durch den Zulaufparameter abzüglich des Ablaufwertes an Phosphor sowie beseitigter Phosphor durch Zellaufbau und Bio-P ermittelt.

$$X_{P,Fäll} = c_{P,ZB} - c_{P,aM,AN} - X_{P,BM} - X_{P,BioP} \quad (\text{mg/l})$$

mit

- $X_{P,Fäll}$  Konzentration des zu fällenden Phosphors (mg/l)
- $c_{P,ZB}$  Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe im Zulauf zur Belebungsanlage (nach Vorklämung) (mg/l)
- $c_{P,aM,AN}$  Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe im Ablauf des Nachklärungsbeckens, Jahresmittelwert (Betriebsmittelwert) (mg/l)
- $X_{P,BM}$  zum Zellaufbau benötigter Phosphor bei der Kohlenstoffelimination und Nitrifikation (mg/l)
- $X_{P,BioP}$  durch biologische P-Elimination (Denitrifikation und anaerobes Vorbecken) entfernbare Phosphor (mg/l)

Angesetzt für den Zellaufbau der Biomasse  $X_{P,BM}$  wird 1% der BSB<sub>5</sub>-Zulaufkonzentration zur biologischen Stufe an Phosphor. Durch Bio-P und Denitrifikation, dem Wert  $X_{P,BioP}$ , können 1,5% der BSB<sub>5</sub>-Zulaufkonzentration zur biologischen Stufe an Phosphor veranschlagt werden.

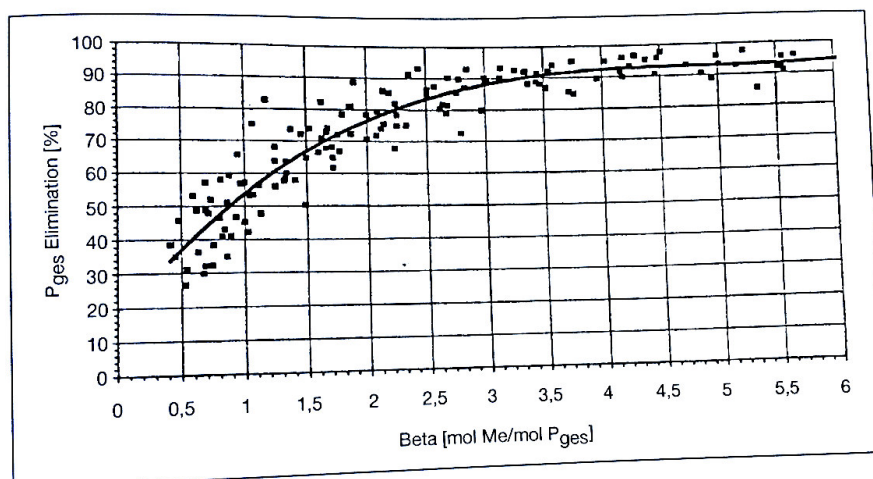
Der Wert  $\beta_{Fäll}$  ist ein anzunehmender Wert, der sich zunächst aus der Stöchiometrie beziehungsweise der Reaktionsgleichung entsteht. Daraus geht hervor, dass ein Mol Metallionen mit einem Mol Phosphor/Phosphat reagiert. Da jedoch auch die konkurrierenden Nebenreaktionen mit Hydroxid ablaufen, liegt der Wert über 1. Die Berechnung laut der DWA-A 202 aus 2011 bezieht noch die erforderliche Fällmittelmenge an Metall mit ein. Dadurch wird der Charakter der Stöchiometrie zu einem Erfahrungswert überführt.

$$\beta_{Fäll} = \frac{X_{Me}/AM_{Me}}{X_{P,Fäll}/AM_P}$$

mit

- $X_{Me}$  erforderliche Fällmittelmenge (Metall) in mg Me/l Abwasser
- $X_{P,Fäll}$  zu fällender Phosphor in mg P/l Abwasser
- $AM_{Me}$  Atommasse des Metalls in mg/mol
- $AM_P$  Atommasse des Phosphors in mg/mol
- 

Die Tabelle 5 aus dem Punkt 3.2.4 Verfahrenstechnik gibt Anhaltswerte zur Bemessung der zu dosierenden Fällmittelmenge. Der  $\beta_{Fäll}$  ist dabei von vielen Größen abhängig. Die Turbulenz und Einmischung in das Abwasser spielt eine entscheidende Rolle, sowie die Art des Verfahrens, welches angewendet wird oder ob die zu fällende Phosphorfracht mit einer 1 Punkt Fällung oder einer 2 Punkt Fällung bewältigt wird. Dies sind Faktoren, die den  $\beta_{Fäll}$ -Wert beeinflussen [Scheer: 2017].



**Abbildung 12 Abhängigkeit der Phosphorelimination bei der Fällung von rohem/vorgeklärtem Abwasser (aus [Wedi et al., 1992][Baumann: 2003])**

In der Abbildung 12 ist die Abhängigkeit zwischen dem Beta Wert und dem Eliminationsgrad dargestellt und bezieht sich ausschließlich auf Vor- und Simultanfällungsanlagen. Hier ist ersichtlich, dass mit zunehmender Elimination an Phosphor der Beta Wert auf über 5 Mol Metall pro Mol steigt.

Auf der anderen Seite der Grafik werden Beta Werte von kleiner 1 erzielt, was nach Aussage von Baumann 2003 nicht möglich ist. Erklären lässt sich dieses Phänomen durch die miteinbezogene Elimination an Phosphor durch den Zellaufbau oder der biologischen Phosphorelimination.

Des Weiteren kann die Mitfällung an partikulären Phosphorverbindungen verantwortlich für die niedrigen Beta Werte sein, da der Abwasserparameter  $P_{ges}$  gemessen wurde. Welches Fällmittel zum Einsatz kam, ist nicht bekannt.

Der Zulaufparameter Phosphor unterliegt auch Schwankungen. Um entstehende Spitzen abzufuffern, wird ein Stoßfaktor  $f_p$ , welcher von dem Verfahren und der Anlagengröße, bemessen an dem biochemischen Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen, abhängt, bestimmt. Aufgeführt dazu sind in der Tabelle 7 Stoßfaktoren für den Fällmittelbedarf.

**Tabelle 7 Stoßfaktoren für den Fällmittelbedarf [DWA-A 202: 2011]**

Anlagengröße <sup>*)</sup>	Verfahren der chemischen P-Elimination		
	Vorfällung	Simultanfällung	Nachfällung
$\leq 1200 \text{ kg BSB}_5/\text{d}$ $f_p$	2,5	2,0	1,5
$> 6000 \text{ kg BSB}_5/\text{d}$ $f_p$	2,0	1,8	1,5
ANMERKUNG *) Bei dazwischen liegenden Werten muss interpoliert werden.			

Die zu dosierende absolute Fällmittelmenge  $B_{d,FM}$  wird um den Stoßfaktor erweitert und auf die maximal stündliche Dosierung umgerechnet.

$$B_{h,FM} = X_{P,F\ddot{a}l} * \beta_{F\ddot{a}l} * \frac{f_P * Q_{T,d}}{24 * Z} \quad (\text{g Fällmittel/h})$$

Mit Hilfe der angegebenen Dichte  $\rho_{FML}$  des Fällmittels kann der zu dosierende Volumenstrom  $Q_{FM}$  des gelösten Fällmittels berechnet werden.

$$Q_{d,FM} = \frac{B_{d,FM}}{\rho_{FML}} \quad (\text{l/d}) \quad \text{bzw.} \quad Q_{h,FM} = \frac{B_{h,FM}}{\rho_{FML}} \quad (\text{l/h})$$

## 4 Vorstellung des Wasser- und Abwasserverbandes Holtemme – Bode

Der Wasser- und Abwasserverband Holtemme – Bode, kurz WAHB, ist im Landkreis Harz in Sachsen-Anhalt verantwortlich für die Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung. Er wird in den Bereich Holtemme sowie den Bodebereich aus der Abbildung 2 unterteilt.



Abbildung 13 Verbandsgebiet Holtemme – Bode [Broschüre des Verbandes: 2017]

Da die Bachelorarbeit im Bereich Abwassertechnik angesiedelt ist, werden nur die Eckdaten dieses Themengebietes dargelegt. Die Größe des Verbandsgebietes beträgt ca. 610 km<sup>2</sup>, in denen eine zusammengefasste Länge aus Schmutz- und Niederschlagswasserkanälen von rund 619 Kilometern verlegt sind. In das Entwässerungsnetz sind 25 Regenrückhaltebecken eingearbeitet und aufgrund der geologischen Gegebenheiten des Harzes mit 70 Pumpwerken und Hebeanlagen versehen. Dabei sind um die 62000 Einwohner an das Entwässerungssystem angeschlossen [Stand 30.06.2016]. Der Einwohnerwert an sich ist allerdings um einiges größer, da die Indirekteinleiter mit einbezogen werden. Aufgeteilt sind diese Eckdaten auf 3 Kläranlagen: Silstedt, Rübeland und Schmatzfeld, welche dem WAHB unterliegen und mehr als 23 Millionen Liter Abwasser am Tag klären.



## 4.1 Kläranlage Silstedt

An die Kläranlage Silstedt, die Standort der Optimierung im Rahmen der Bachelorarbeit ist, sind 80.000 Einwohnerwerte angeschlossen. Sie ist somit im WAHB die größte Anlage. Laut AbwV aus dem Jahr 1997, welche 2004 neu gefasst und 2017 zuletzt geändert worden ist, wird sie der Größenklasse 4 zugeordnet. Neben dem Fachbereichsleiter Herr Sterzik und dem Fachbereichsleiter für Technische Dienste Herr Meldau, die die Verantwortung für die Kläranlage haben, ist ein Team aus fachkundigen Mitarbeitern der Abwasser-, Labor- und Elektrotechnik auf der Kläranlage beschäftigt, welches dafür Sorge trägt, dass ein reibungsloser Betrieb stattfindet.

Zur Veranschaulichung des gegenwärtigen Aufbaus und der Größen- und Platzverhältnisse ist die Abbildung 14 gegeben.

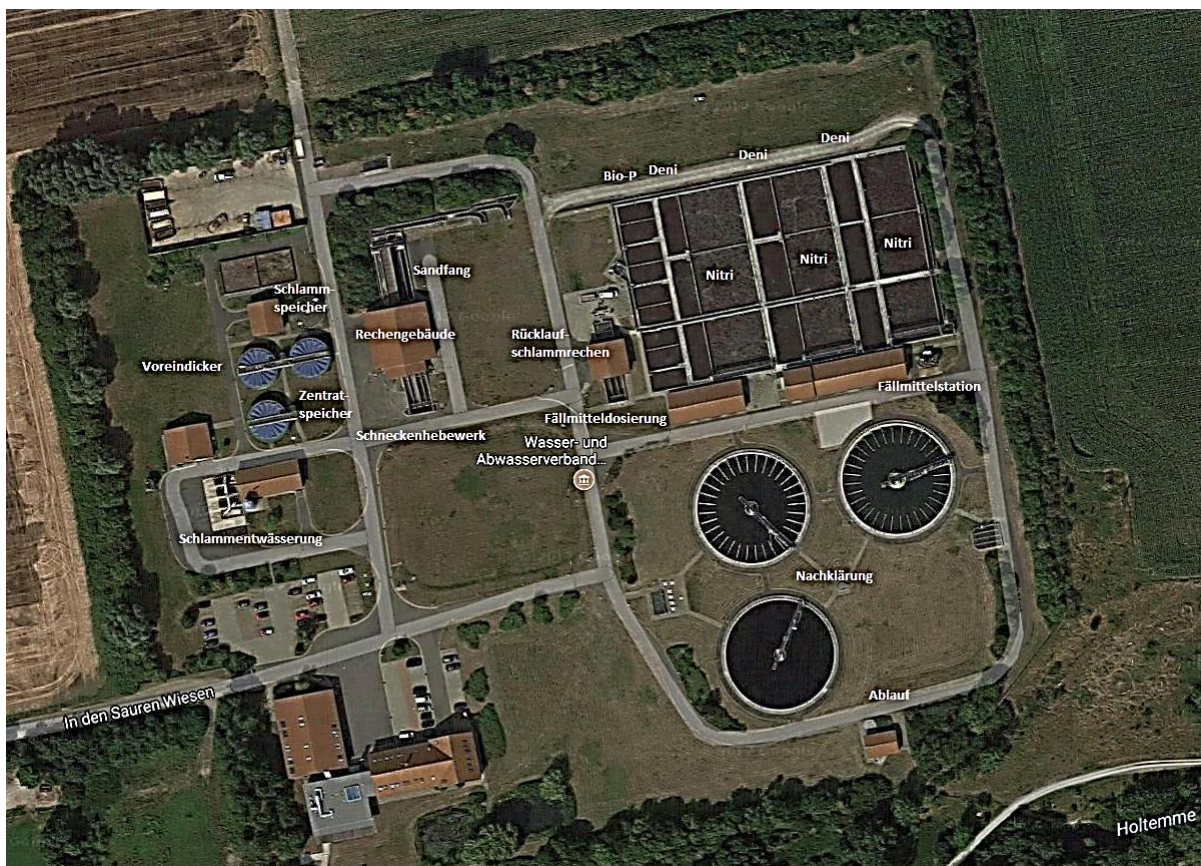


Abbildung 14 Luftbild der Kläranlage Silstedt [Quelle Google Maps mit Modifizierung]

Das Trennsystem leitet das anfallende Schmutzwasser in die ARA, wobei ein Trockenwetterabfluss von bis zu 11.000 Kubikmetern pro Tag erreicht wird. Bei markanten Wetterereignissen kann der Abfluss durch eindringendes Fremdwasser in den Kanal um etwas mehr als das 3-fache ansteigen. Das Abwasser wird über ein Schneckenhebewerk mit 4 Schnecken in das Rechengebäude angehoben. Aktuell findet ein Umbau des Gebäudes statt. Betroffen sind hier Anlagenbauteile der mechanischen Reinigung, speziell der Rechenanlage, sowie einem Sandwaschklassierer mit nachfolgendem Organikbehälter.



Dem Rechen nachgeschaltet befindet sich ein belüfteter Langsandfang, der Leichtstoffe und Sande abscheiden soll. Der Sandfang ist mit einer Räumbrücke und Sandpumpen versehen, die das Sand-Wasser-Gemisch zum Sandwaschklassierer fördern sollen.

Der Durchfluss des nun mechanisch vorgereinigten Abwassers wird mittels eines Venturigerinnes gemessen und führt zu einem Verteilerbauwerk. Hier besteht die Möglichkeit zukünftig eine freie Fläche zu nutzen und eine Vorklärung für eine anaerobe Schlammstabilisierung zwischenzuschalten.

Das Abwasser wird nun in die biologische Reinigungsstufe geführt. Hierbei wurde eine drei-straßige Ausführung der Kaskadendenitrifikation mit drei-Stufen und vorgeschaltetem Bio-P Becken verwendet. Insgesamt fasst die umgangssprachliche „Biologie“ 30.000 Kubikmeter Volumen. Derzeit ist hier ein Druckluftsystem über Tellerbelüfter verbaut. Dieses System ersetzte 2013 die vorher eingebauten Belüftungslanzen. Das Abwasser der drei Straßen wird in einem betonierten Gerinne zusammengeführt. In dem Gerinne ist eine Pumpe, die einen kleinen Volumenstrom des Belebtschlammes zur Messung von Parametern entnimmt, installiert. Als Online-Messung werden Nitrat, Ammonium und Ortho-P über Analytoren der Firma Hach Lange gemessen.

Über einen Düker gelangt das Schlamm-Wasser-Gemisch zu einem Verteilerbauwerk und kann auf drei Nachklärungen verteilt werden. Die Verteilung wird händisch geregelt und bestimmt sich nach dem Zulauf zur Kläranlage. Demnach wird eine zweite Nachklärung in Betrieb genommen, wenn ein Starkregeneignis die Kläranlage passiert. Die dritte Nachklärung dient als Reservebauwerk, um einen Ausfall einer Nachklärung zu überbrücken. Das Gemisch aus Schlamm und Wasser trennt sich in der Bauwerkskombination, bestehend aus Zylinder und Trichter. Dabei sedimentiert der Großteil der Schlammflocken und scheidet sich von dem Klarwasser ab. Die Volumina der Nachklärungen betragen jeweils 3800 Kubikmeter, was eine Aufenthaltszeit bei Trockenwetterabfluss von 8 bis 9 Stunden beinhaltet. Nach dem Trennvorgang wird das gereinigte Abwasser über eingebaute Drainageleitungen dem Vorfluter zugeführt. Der abgesetzte Schlamm in der Trichterspitze, auch Rücklaufschlamm genannt, wird zu einem weiteren Schneckenhebewerk gepumpt. In dem Schneckensumpf wird über eine Dosierleitung, im Rohr-in-Rohr-Prinzip, das Fällmittel Eisen-II-Chlorid zudosiert. Gelagert wird das Fällmittel am Ende der biologischen Stufe oberirdisch in zwei 15 Kubikmeter Behältern (Abbildung 15).



**Abbildung 15 Fällmitteltanks der Kläranlage Silstedt [eigene Quelle: März 2017]**

Bevor der Rücklaufschlamm dem Zulauf der Belebung zugeführt wird, wird dieser durch einen Rechen geleitet und anschließend ein Teil des Schlammes, als Überschussschlamm, abgezogen. Der ÜSS wird in einem Voreindicker voreingedickt und in den Schlamm Speicher überführt. Der Klärschlamm wird durch einen Dekanter erzeugt, dabei wird der gespeicherte Schlamm mit Flockungsmittel versetzt und mittels der Zentrifugalkraft in der Zentrifuge entwässert. Das daraus anfallende Zentratwasser wird, zusammen mit dem Überstandswasser aus dem Voreindicker, in einem weiteren Behälter gespeichert und dem Zulauf als Prozesswasser zugeführt.

Dabei sind in der Abbildung 16 in dem Fließschema die Beziehungen der Kläranlage Silstedt dargestellt.

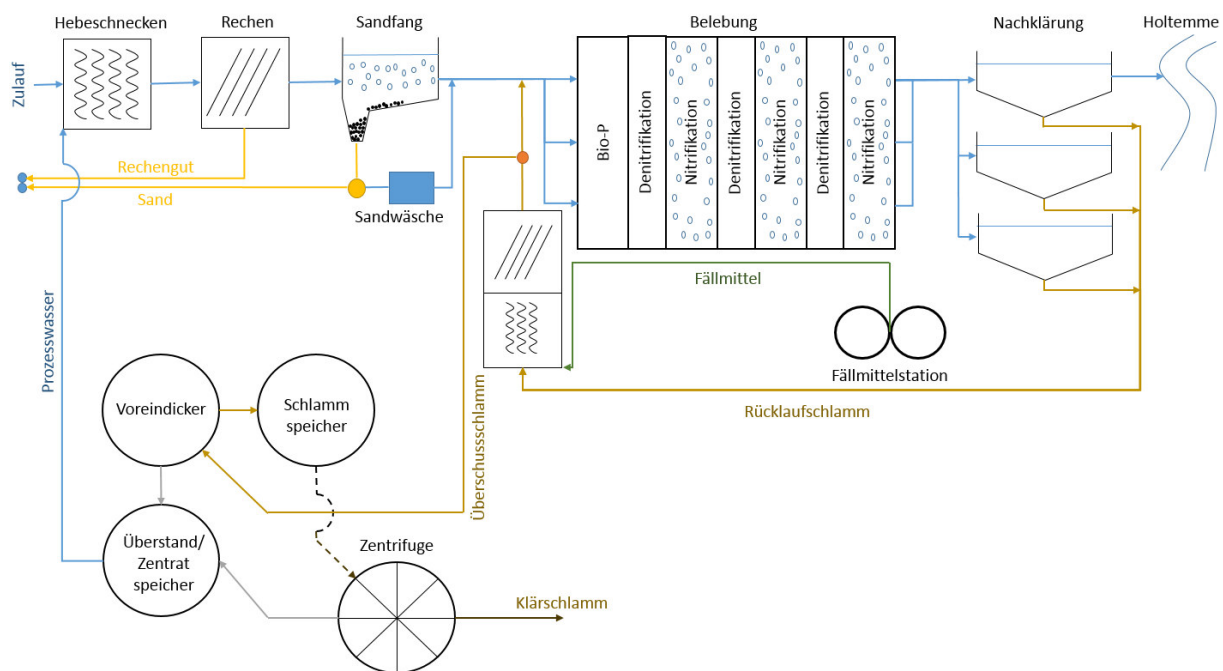


Abbildung 16 Fließschema der Kläranlage Silstedt [eigene Quelle 2017]

## 4.2 Indirekteinleiter

Laut dem DWA Merkblatt 115 sind Indirekteinleiter Gewerbe- oder Industriebetriebe oder vergleichbare Einrichtungen, dessen/deren nicht häusliches Abwasser über eine öffentliche Abwasseranlage in ein Gewässer eingeleitet wird.

Auch im Einzugsgebiet des WAHB befinden sich Indirekteinleiter, welche ihr industrielles Abwasser an die Kläranlage abgeben. Insbesondere werden die Größten, ca. 40 Gewerbe- und Industriebetriebe über die Indirekteinleiterkontrolle, überprüft. Dabei ist die Herkunft des industriellen Abwassers der einzelnen Betriebe vielseitig. Diese reicht von Abwässern aus der Agrarwirtschaft, also zu säubernde Wässer von pflanzlichen und tierischen Produkten, über Krankenhaus- und pharmazeutische Abwässer, bis hin zu anfallenden Wässern aus der Lebensmittelindustrie mit festen und flüssigen Nahrungsmitteln, aber auch Abwässer aus Metallverarbeitungsindustrien. Dabei leisten die Indirekteinleiter zusammengefasst ein Einwohnerequivalent von rund 20.000 EW, was anteilig rund 25% der Auslegungsgröße der Kläranlage entspricht. Anhand dieser Tatsache, soll eine Einschätzung über das Ausmaß der Auswirkung auf die Kläranlage gegeben werden.

Zur Bearbeitung wurde eine Eingrenzung und Anonymisierung der Indirekteinleiter vorgenommen. Dabei wurden Betriebe ausgewählt, von denen angenommen wird, dass diese einen starken Einfluss besitzen.

Vorweg muss gesagt werden, dass die Indirekteinleiter die Abwasserbeseitigungssatzung des WAHB einhalten müssen, in der Grenzwerte nach den Richtwerten der DWA-M 115 festgelegt sind. Abweichend gelten aber auch für einige Indirekteinleiter andere Regelungen und privatrechtliche Verträge über Grenzwerte einzelner Parameter. Die ausführliche Indirekteinleiterkontrolle sowie die Grenzwerte dienen dem WAHB dabei zum Schutz der Betriebssicherheit der Kläranlage.

**Tabelle 8 Mittelwerte der betrachteten Indirekteinleiter des Jahres 2016 [WAHB: 2017]**

Parameter	A	B	C		Einheit
Volumenstrom	30	1000	50		[m <sup>3</sup> /d]
Gesamt-P	1,53	14,78	27,67	6,37	[mg/l]
CSB	244	490	7350	15600	[mg/l]

Betrachtet wurde der Volumenstrom, der Gesamt-P, der chemische Sauerstoffbedarf und Sulfat. Hauptaugenmerk wurde auf die beiden ersten Parameter der Tabelle 8 gelegt. Der CSB soll als weiterer Indikator der Einschätzung der Indirekteinleiter dienen. Festzustellen sind starke Unterschiede im Bereich einzelner Parameter und der eingeleiteten Menge an Abwasser. Erkennbar ist, dass es Indirekteinleiter (A) gibt, deren Fracht und Menge so abgeschwächt worden ist, dass keine störenden Auswirkungen auf die Kläranlage zu erwarten sind.

Dem gegenüber stehen Betriebe (B), deren Konzentrationen weitaus größer sind. In Verbindung mit dem eingeleiteten Volumenstrom können enorme Frachten entstehen, die einen großen Einfluss auf die Kläranlage zur Folge haben.

Andere Betriebe (C) leiten über mehrere Einleitstellen in das Kanalnetz des WAHB ein, dabei kann sich die Abwasserbeschaffenheit auffallend unterscheiden. Die Summe des eingeleiteten Volumenstroms ist im Verhältnis zum durchschnittlichen Zulauf der Kläranlage sehr gering, dennoch ist die Konzentration der Abwasserparameter Gesamt-P und CSB gegenüber der anderen Betriebe deutlich größer.

Absehbar ist dabei nicht, wann Spitzen durch das Einleiten von industriellem Abwasser mehrerer Indirekteinleiter entstehen. Diese Gefahr und die Tatsache, dass der Kläranlage kein Puffer zur Verfügung steht, machen es der Kläranlage schwer auf Belastungsspitzen zu reagieren.

## 4.3 Betriebsdatenauswertung der Kläranlage

Für die Auswertung der Betriebsdaten wurden die Werte des Betriebstagebuchs aus den Jahren 2014, 2015 und 2016 entnommen. Als Grundlage der Arbeit dienten dabei Monatsmittelwerte sowie die Maximal- und Minimalwerte der Jahre.

### 4.3.1 Qualität der Daten

Eingangs sollte erwiesen werden, dass die ausgewerteten Messergebnisse plausibel sind und für Berechnungen der Bachelorarbeit verwendet werden können.

Das Kläranlagenpersonal, welches im Außenbereich und Labor arbeitet, nimmt an Seminaren und Lehrgängen zur Weiterbildung teil und wird geschult. Außerdem wird zur eigenen analytischen Qualitätssicherung der ADDISTA Test durchgeführt und an dem externen und unabhängigen Ringversuch der Firma Hach teilgenommen.

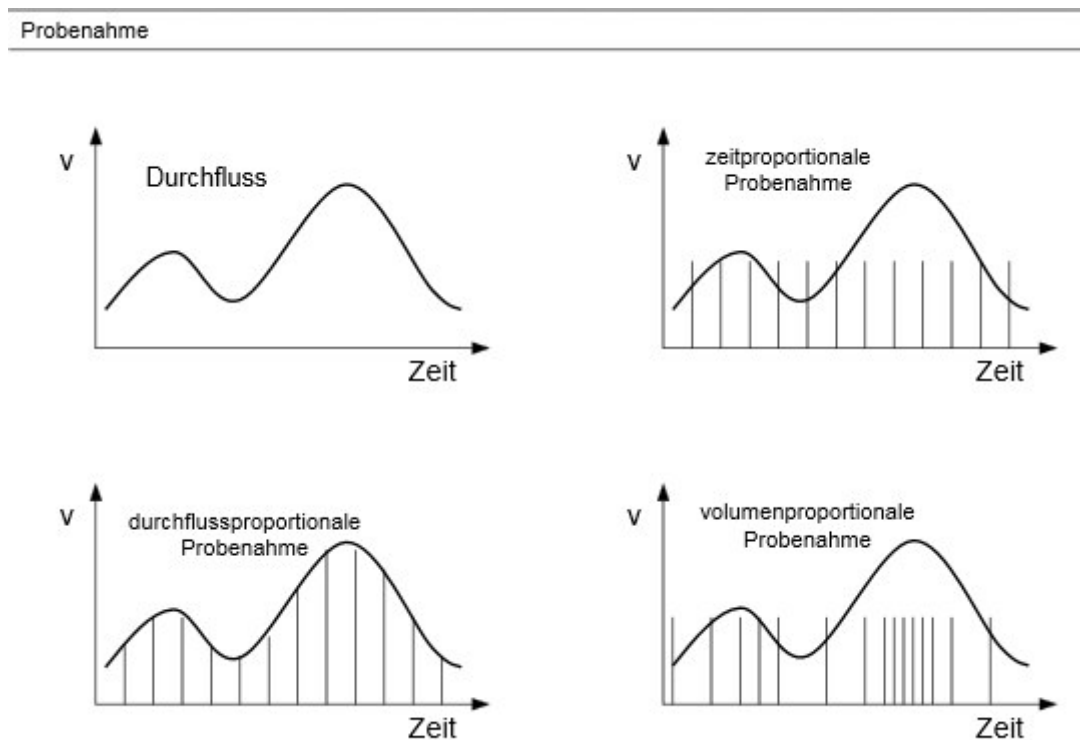
Durch einen Vergleich zwischen der Auswertung der amtlichen Probe von der LHW und der Eigenüberwachung derselben Probe (2016) kann eine zweite Aussage über die Qualität der Messergebnisse getroffen werden. Dabei fällt auf, dass bei der Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfes teils große Unterschiede auftreten. Diese Abweichungen resultieren aus der Methode der Berechnung des CSB aus dem TOC, die das LHW anwendet und der Tatsache, dass die Betriebsanalytik den CSB anhand des Kürvettentests von Hach bestimmt. Bei den weiteren photometrischen Auswertungen sind die Abweichungen tolerierbar.

Ein weiteres Maß für die Plausibilität der Messwerte ist die Häufigkeit der Messungen beziehungsweise die Anzahl der Messwerte. Dabei kann auf eine Vielzahl von Messungen, die bei den Auswertungen der letzten drei Jahre – 2014 bis 2016 – entstanden sind, zurückgegriffen werden. Im Schnitt wurden pro Verfahrensschritt (Zulauf/ Zulauf Belebung/ Ablauf) und Abwasserparameter (CSB/ Phosphor) 20 Kürvetten im Monat verwendet. Für die Auswertung der Stickstoffparameter, Ammonium und Gesamtstickstoff, sowie BSB<sub>5</sub> wurde einmal in der Woche ein Ergebnis ermittelt.

Die unterschiedlichen Probenentnahmestellen unterliegen auch verschiedenen Probenahmeverfahren. Aufgeführt sind die drei Stellen mit dazugehörigem Verfahren und kurzer Beschreibung.

- 1 Zulauf Kläranlage: Der Zulaufprobenehmer befindet sich vor dem Schneckenhebewerk des Rechengebäudes und erfasst alle externen Abwässer bis auf ein Einzugsgebiet mittels zeitproportionaler Probenahme in einer 24h-Mischprobe.
- 2 Zulauf Belebung: Der Zulaufprobenehmer der Belebung befindet sich beim Zulauf des Schneckenhebewerks und erfasst den Zufluss zur Belebung. Darin enthalten ist ein kleines Einzugsgebiet, welches der Zulaufprobenehmer nicht erfasst, und das interne Prozesswasser der Kläranlage mittels zeitproportionaler Probenahme in einer 24h-Mischprobe.
- 3 Ablauf: Der Ablaufprobenehmer ist zwischen den Nachklärungen und dem Gewässer installiert und erfasst den Volumenstrom mittels zeitproportionaler Probenahme in 2h-Mischproben über den Tag verteilt.

Unter dem Gesichtspunkt des Probenahmeverfahrens und der Veranschaulichung der Abbildung 17 sieht man, dass Abwasserspitzen nicht erfasst werden und niedrige Abwasserdurchflüsse überprobt werden.



**Abbildung 17 Verschiedene Probenahmeverfahren [Börnigk: 2005/2006]**

Für die Arbeit wird jedoch davon ausgegangen, dass die bestimmten Messergebnisse der Abwasserbehandlungsanlage repräsentativ sind.

### 4.3.2 Messergebnisse

Bei der Auswertung der Betriebsdaten wurden von drei Jahren die Parameter biochemischer und chemischer Sauerstoffbedarf und der Gesamt-P anhand der Massenkonzentrationen beobachtet. Die Tabellen 9 listet die Jahresmittelwerte, Maxima und Minima der betrachteten Zeiträume auf. Zu erkennen ist, dass die Mittelwerte nur geringen Schwankungen unterliegen. Nimmt man allerdings die Extrema in Augenschein, so fällt auf, dass die Kläranlage deutlichen Spitzen ausgesetzt ist. Vor allem der Zulauf der Kläranlage unterliegt Stresssituationen, da Minima und Maxima sehr deutlich bei allen drei aufgezählten Abwasserparametern vom Mittelwert abweichen. Erklärt werden kann dieses Auftreten durch das Einleiten von gewerblichem Abwasser mit hohen Konzentrationen, auch in Kombination mit einem großen Niederschlag und Abwassermengen, bei denen Schmutzstoffe mobilisiert und in die Kläranlage geleitet werden.

Die Unterschiede zum Zulauf der Biologie halten sich bei einer einheitlichen Abweichung zum Mittelwert. Im Ablaufwert zeigt sich deutlich das Annähern der Ablaufwerte an die Überwachungswerte der Behörde. Gravierend sind die Phosphorkonzentrationen im Ablauf, die bei ungünstigen Wetterbedingungen wie Regen, Regennachlauf bzw. Schneeschmelze auftreten. Es kommt zu trübem Ablauf, bei dem Schlammpartikel abtreiben und hohe Konzentrationen erzeugen.

Von einer Betrachtung der Stickstoffparameter im großen Zeitraum wurde abgesehen, da der Fokus auf die Elimination von Phosphor gelegt worden ist. Dennoch wurde vereinzelt bei Experimenten Stickstoff in bestimmten Abwasserparametern ermittelt.

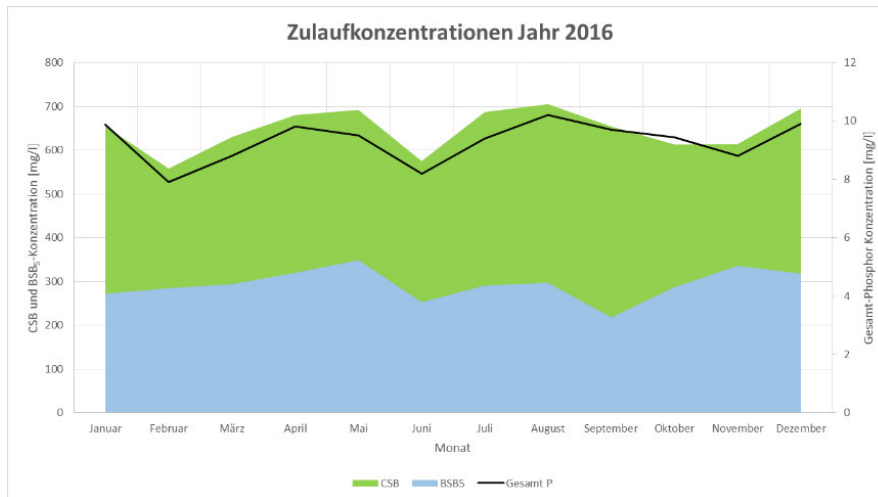
**Tabelle 9 Messwerte einzelner Parameter der drei Messstellen der Jahre 2014 - 2016 [Quelle Betriebstagebuch der KA Silstedt]**

Massenkonzentration [mg/l]	Zeitraum	Zulauf			Zulauf Belebung			Ablauf		
		Mittelwert	Maxima	Minima	Mittelwert	Maxima	Minima	Mittelwert	Maxima	Minima
Biochemischer Sauerstoffbedarf	2014	270	442	171	319	468	224	4,4	6,5	2,4
	2015	318	498	183	362	605	204	4,7	7,3	2,3
	2016	293	511	209	409	592	286	4,3	7,1	2,7
Chemischer Sauerstoffbedarf	2014	626	1457	452	691	1383	539	33,5	46,3	28,0
	2015	662	1324	443	762	1193	493	36,9	48,6	27,1
	2016	646	1384	427	761	1272	554	35,7	47,2	30,1
Gesamt-Phosphor	2014	9,0	13,2	6,9	10,3	15,7	7,6	0,64	1,49	0,23
	2015	9,6	14,2	7,0	11,3	16,6	7,2	0,61	1,42	0,24
	2016	9,3	12,8	7,2	11,2	15,5	9,0	0,63	1,43	0,25

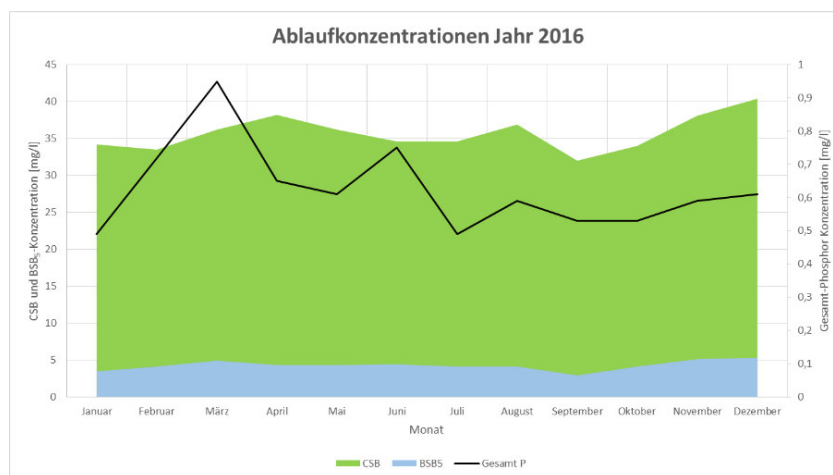
An den Tabellen 9 sowie der Abbildung 19 kann man unschwer erkennen, dass der aktuelle Überwachungswert für den Parameter Gesamt-P von 1,5 Milligramm pro Liter (Punkt 10.1) deutlich unterschritten wird. Die Ablaufwerte halten sich durchschnittlich im Bereich von um die 0,6 Milligramm pro Liter.

Dieser Ablaufwert ist das Resultat aus der biologischen Phosphatelimination und der verwendeten Simultanfällung mit Eisen-II-Chlorid bei der Dosierung in den Rücklaufschlamm bei dem Rücklaufschlamm-Schneckenhebewerk (siehe Punkt 4.3.3 Dosierung).

In der Abbildung 18, die die Jahressganglinie des Jahres 2016 widerspiegelt, ist zu erkennen, dass beim Zulauf der Phosphor in Abhängigkeit zum CSB steht. Betrachtet man hingegen die Abbildung 19, so ist diese Abhängigkeit nicht mehr erkennbar. Die Ganglinien aus dem Jahr 2014 und 2015 weisen das gleiche Verhalten auf, wurden aber aufgrund der Fülle im Anhang hinterlegt.



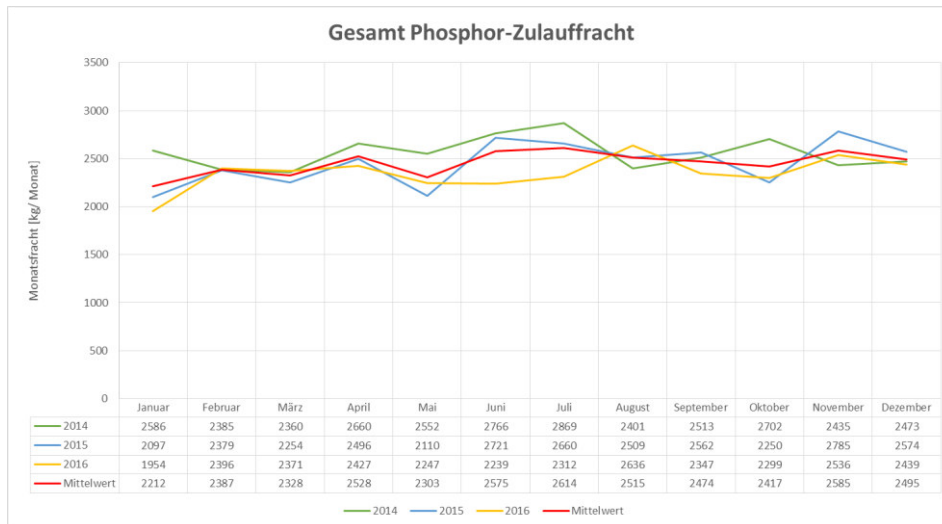
**Abbildung 18 Zulaufkonzentrationen der Parameter CSB, BSB<sub>5</sub> und P<sub>ges</sub> aus dem Jahr 2016 [Betriebstagebuch: 2017]**



**Abbildung 19 Ablaufkonzentrationen der Parameter CSB, BSB<sub>5</sub> und P<sub>ges</sub> aus dem Jahr 2016 [Betriebstagebuch: 2017]**

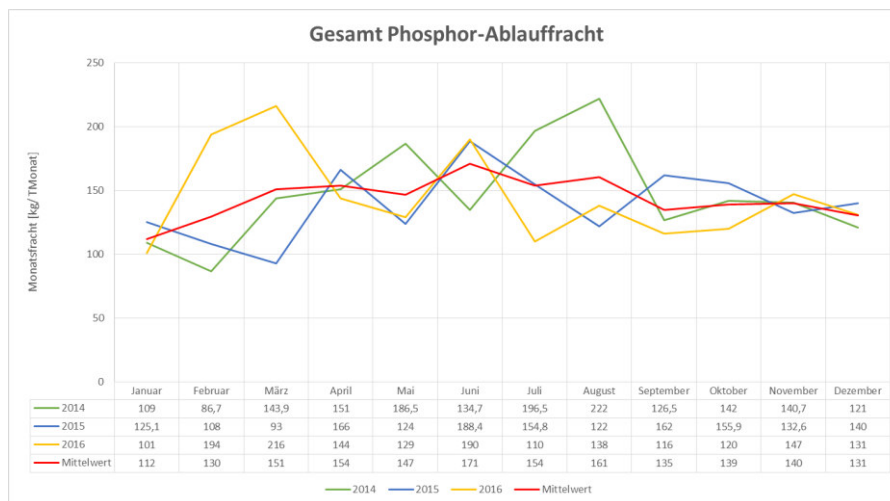
Die Diagramme 20 und 21 spiegeln grafisch und tabellarisch die Zulaufmengen der Biologie und die Ablaufmengen der Kläranlage des Parameters P wieder.

Die Mengen des Zulaufes ähneln sich weitestgehend. Addiert man die Monatswerte der Jahre, so kann man feststellen, dass eine Reduzierung von 30.700 kg/a im Jahr 2014 auf 28.203 kg/a im Jahr 2016 stattgefunden hat. Verantwortlich für diese Senkung des P-Eintrages in die Kläranlage könnten verschärfte Einleitwerte für Indirekteinleiter sein.



**Abbildung 20 Zulaufrecht des Parameters Pges der Jahre 2014 bis 2016 sowie dem Mittelwert der Jahre [eigene Quelle: 2017]**

Betrachtet man die Ablauffrachten, so sieht man, dass das Jahr 2014 eine enorme Spitze im Vergleich zu den Folgejahren enthält. Zurückzuführen ist diese Struktur auf die Wetterbedingungen im August, in dem wenige Trockenwettertage zu hohen Abwasserdurchflüssen führten. Aber auch das Jahr 2016 enthält einen Peak, der sich nur durch die mittlere Konzentration von 0,95 mg/l erklären lässt. Dagegen hat man mit einem erhöhten Fällmittelverbrauch im März versucht anzukämpfen. Aus den Aufzeichnungen geht jedoch auch hervor, dass der Fällmittelverbrauch von 310,5 m<sup>3</sup> im Jahr 2014 auf 296,6 m<sup>3</sup> im Jahr 2015 bis hin zu 272,0 m<sup>3</sup> gesenkt werden konnte.



**Abbildung 21 Ablauffrecht des Parameters Pges der Jahre 2014 bis 2016 sowie dem Mittelwert der Jahre [eigene Quelle: 2017]**

Zurückgegriffen auf die Auswertungen der Labormitarbeiter aus dem Jahr 2016 ist in der Tabelle 10 eine Reihe von Messungen dargestellt. Die Monatswerte sind Mittelwerte aus Messungen an allen Arbeitstagen. Festgestellt werden soll damit der Zusammenhang zwischen Gesamt-P und Ortho-P. Dabei ist erkennbar, dass die Zulaufkonzentrationen ziemlich konstant im Bereich der 50 % angesiedelt sind. Bei den Ablaufkonzentrationen hingegen sind die Werte schwankender. Leider kann keine Aussage darüber gemacht werden, ob bei den Ergebnissen ein Zusammenhang zu den abfiltrierbaren Stoffen herrscht.



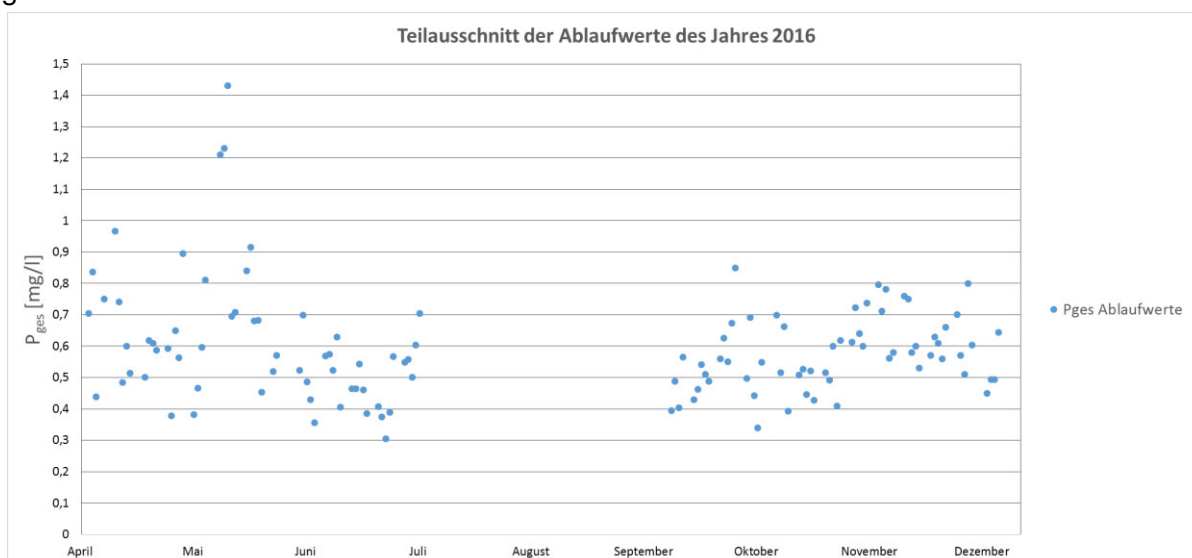
**Tabelle 10 Auswertungen der Zu- und Ablaufparameter zwischen Ortho-Phosphat und Gesamt Phosphor [Auswertung der Labormitarbeiter der KA Silstedt: 2016]**

Monat	Zulauf				Ablauf			
	Ortho Phosphat	P gesamt	Differenz	Verhältnis	Ortho Phosphat	P gesamt	Differenz	Verhältnis
Januar	3,778	7,787	4,009	48,55	0,140	0,547	0,407	25,48
Februar	4,011	8,392	4,380	47,91	0,068	0,459	0,391	13,93
März	4,173	8,916	4,743	47,40	0,038	0,429	0,392	9,01
April	3,834	8,141	4,307	47,39	0,194	0,619	0,425	26,13
Mai	4,700	9,476	4,776	49,89	0,162	0,626	0,464	24,64
Juni	4,872	10,603	5,730	46,31	0,233	0,847	0,614	27,84
Juli	4,344	9,623	5,279	45,63	0,118	0,636	0,518	18,53
August	4,495	9,630	5,135	46,77	0,087	0,521	0,433	17,64
September	4,777	10,445	5,668	46,27	0,144	0,739	0,595	19,44
Oktober	4,844	10,522	5,678	46,34	0,077	0,653	0,576	11,76
November	4,773	11,022	6,249	44,19	0,071	0,604	0,533	11,94
Dezember	4,977	10,647	5,670	47,50	0,075	0,653	0,578	10,88
Mittelwert	4,465	9,600	5,135	47,0	0,117	0,611	0,494	18,1
Minimum	3,778	7,787	4,009	44,2	0,038	0,429	0,391	9,0
Maximum	4,977	11,022	6,249	49,9	0,233	0,847	0,614	27,8

Die Monate Mai, Juni, Juli, Oktober, November und Dezember des Jahres 2016 wurden auszugsweise, als Stichproben, aus dem Betriebstagebuch entnommen.

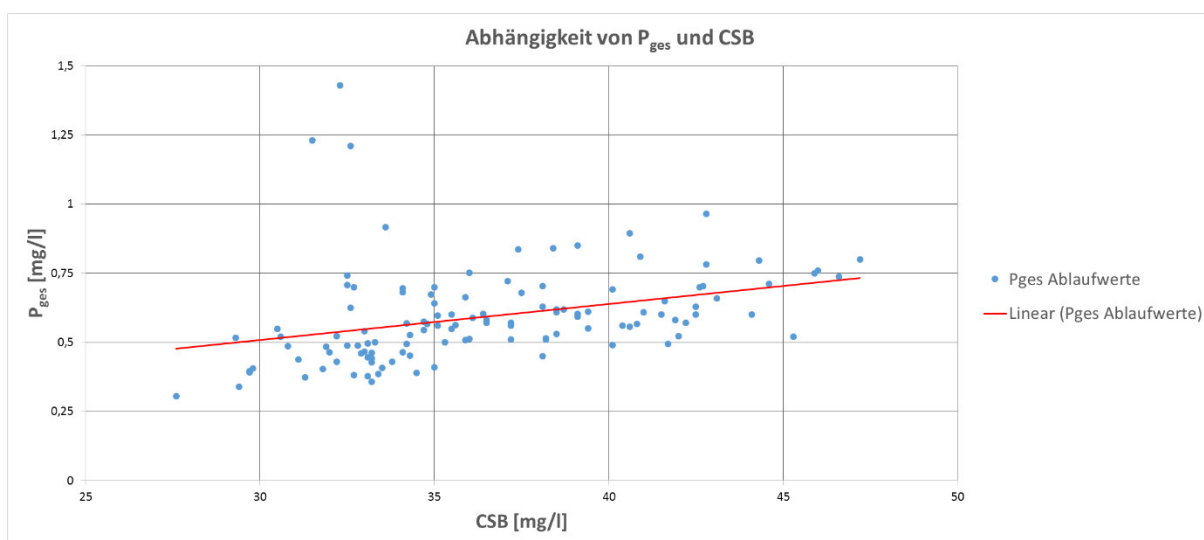
Erstellt wurde die Abbildung 22, die den Verlauf der Konzentrationen an Phosphor im Ablauf widerspiegelt. Der Überwachungswert ist als oberste Grenze bei 1,5 mg/l ersichtlich. Im Schnitt hält sich die Konzentration zwischen 0,5 und 0,7 mg/l auf. In Ausnahmefällen wurde eine Konzentration von 1,2 und 1,4 mg/l erreicht. Als Grund dafür wurde ein Regennachlauf festgestellt.

Deutlich wird, dass es im Verlauf des Jahresausschnitts immer wieder zu Massenkonzentration zwischen 0,7 und 1,0 mg/l, aber auch Werten unter 0,5 mg/l kam. Verantwortlich dafür können schwankende Zulaufbedingungen und die Tatsache der derzeitigen Fällung gemacht werden.



**Abbildung 22 Tägliche Konzentrationen des Gesamt Phosphors im Ablauf über einen Teilausschnitt des Jahres 2016 [eigene Quelle: 2017]**

Um eine Korrelation zwischen den abfiltrierbaren Stoffen und dem Gesamt-P herzustellen, wurde sich dem Parameter CSB bedient. Dazu wurden die Tageswerte von  $P_{ges}$ , die der Größe nach sortiert wurden, in Verhältnis zum täglich gemessenen CSB gestellt. In der folgenden Abbildung kann eine Trendlinie linearen Verlaufes abgezeichnet werden. Daraus ergibt sich, dass bei steigendem CSB auch der Gesamt-P des Ablaufes steigt. Dabei spielen kolloidal gelöste Stoffe eine wichtige Rolle. Zudem konnte ein Zusammenhang mit partikulärem Phosphor nachgewiesen werden. Erkennlich sind auch die Messwerte von 1,2 und 1,4 mg/l, die hier eher weniger im Zusammenhang zum CSB stehen. Zurückzuführen ist das Verhalten durch den Betrieb einer zweiten Nachklärung, mit der hydraulische Belastungen abgefangen wurden und sich wenig Trübung abzeichnete. Gleichzeitig fand eine Auswaschung des Fällmittels durch hohe Durchflüsse statt. Diese Gegebenheit würde die Messwerte erklären. Abgesehen davon werden diese Werte als Ausreißer deklariert.



**Abbildung 23 Zusammenhang zwischen  $P_{ges}$  und CSB Jahresausschnitt 2016 [eigene Quelle: 2017]**

Betrachtet man die Reinigungsleistung der Parameter  $BSB_5$ , CSB und Phosphor, berechnet aus den durchschnittlichen Frachten des Jahres 2014 bis 2016 der Kläranlage in Tabelle 11, so erkennt man, dass die Reinigungsleistung im Schnitt sehr gut funktioniert. Auch der Gesamt-P wird mit bis zu 94% eliminiert.

Auffällig war die geringe Fracht an  $BSB_5$ . Bei näherer Betrachtung fiel ein Berechnungsfehler auf. Dabei wurden die Summen einzelner Parameter der Tage im Monat in den Jahresberichten eingetragen. Der Fehler dabei ist, dass die  $BSB_5$  Messung nur jede Woche stattfindet und die daraus resultierende Summe des Monats nicht der Realität entspricht. Die Tage, die nicht mit der Messung erfasst wurden, entfallen in der Berechnung. Selbiges gilt für die Parameter CSB und Gesamt-P. Folglich wurde eine Berechnung aus der Jahresabwassermenge und der durchschnittlichen Konzentrationen durchgeführt, wobei keine großen Unterschiede beim Abbaugrad zu erkennen sind. Eine kleine Differenz von etwas mehr als 1% wurde bei dem  $BSB_5$  festgestellt.

**Tabelle 11 Berechnung der Reinigungsleistung der KA Silstedt [eigene Quelle: 2017]**

Parameter	Werte aus den Jahresberichten			Eigene Berechnungen aus den Mittelwerten		
	Zulauffracht [kg/a]	Ablauftracht [kg/a]	Abbaugrad [%]	Zulauffracht [kg/a]	Ablauftracht [kg/a]	Abbaugrad [%]
Biochemischer Sauerstoffbedarf	192.050,33	1.778,00	99,07	1.497.680,00	18.319,88	98,78
Chemischer Sauerstoffbedarf	2.044.995,00	100.381,00	95,09	3.044.870,00	145.997,46	95,21
Gesamt-Phosphor	29.434,00	1.722,77	94,15	45.136,70	2.578,65	94,29

Ein wesentlicher Teil bei der Betrachtung der Phosphatelimination in Bezug auf die Fällung ist die Säurekapazität. Um eine deutliche Aussage zu treffen, wurden hier die Werte der Firma Ökocontrol von 2016 herangezogen, die in der Belebung und im Ablauf der Kläranlage die Säurekapazität über das Jahr bestimmt haben. Hier wird deutlich, dass die Kläranlage bei Sommer- und Winterbedingungen nicht unter die empfohlenen 2,0 mmol/l aus dem Punkt 3.2.6 der Arbeit kommt.

**Tabelle 12 Messwerte der Säurekapazität aus dem Jahr 2016 der Belebung und des Ablaufes [Firma Ökocontrol: 2017]**

	Säurekapazität		
	Messung im	Belebung	Ablauf
Jahr 2016	Januar	6,62	4,91
	Februar	7,78	5,59
	März	7,60	4,78
	April	7,64	5,22
	Mai	7,20	4,93
	Juni	7,40	5,54
	Juli	6,20	4,02
	August	7,10	4,98
	September	6,68	5,07
	Oktober	5,72	4,25
	November	6,66	4,79
	Dezember	6,70	4,74

In der Tabelle 13 sind die wichtigsten Abwasserparameter aufgelistet worden. Aufgezählt wurden Durchschnittswerte für die Berechnungen und Spannen, um den Anlagenverlauf über das gesamte Jahr nachzuvollziehen. Ersichtlich ist der hohe Schlammvolumenindex, mit dem die Kläranlage fährt. Empfohlen sind Werte im Bereich von 80 bis 120 Milliliter pro Gramm [DWA: 2015]. Dabei besteht die Möglichkeit von auftreibendem Schlamm.

**Tabelle 13 Abwasserparameter der Kläranlage Silstedt [eigene Quelle: 2017]**

Abwasserparameter		Messwert	Einheit
Abwasserdurchfluss		4125841	[m <sup>3</sup> /a]
		11461	[m <sup>3</sup> /d]
Schmutzwasserdurchfluss		3898876	[m <sup>3</sup> /a]
		10604	[m <sup>3</sup> /d]
pH-Wert Abwasser		8	[-]
Abwassertemperatur		12 bis 21	[°C]
BSB5	Zulauf	296,42	[mg/l]
	Zulauf Biologie	363,14	[mg/l]
	Ablauf	4,44	[mg/l]
CSB	Zulauf	644,83	[mg/l]
	Zulauf Biologie	738,11	[mg/l]
	Ablauf	35,39	[mg/l]
Gesamt-P	Zulauf	9,31	[mg/l]
	Zulauf Biologie	10,94	[mg/l]
	Ablauf	0,63	[mg/l]
Schlammvolumen		250 bis 330	[ml/l]
Trockensubstanzgehalt		2,4 bis 2,7	[g/l]
Schlammvolumenindex		100 bis 130	[ml/g]
Fällmittelverbrauch		262,80	[m <sup>3</sup> /a]
Überschlussschlamm		288544	[m <sup>3</sup> /a]
		670 bis 760	[m <sup>3</sup> /d]
Rücklaufschlamm		600 bis 700	[m <sup>3</sup> /h]
Rücklaufschlammverhältnis		1	[-]
Zentrat		3116,79	[m <sup>3</sup> /a]
		170	[m <sup>3</sup> /d]
Gesamt-P im Zentrat		85,59	[mg/l]

Im Hinblick auf die Optimierung sind auch die internen Prozesse und Rückbelastungen zu beobachten. Der ausschlaggebende Punkt betrifft hierbei das Prozesswasser aus der Zentrifuge beziehungsweise dem Überstands- und Zentratsspeicher. An den Arbeitstagen werden täglich rund 170 m<sup>3</sup> gefördert. Das Zentratwasser selbst ist mit 85,6 mg/l hoch belastet, aber der Mittelwert scheint nicht sehr aussagekräftig zu sein. Zeitweise existieren Messungen, die doppelt so groß oder halb so klein wie der Mittelwert sind. Allerdings kann bei dem Volumenstrom von 170 m<sup>3</sup>/d gesagt werden, dass im Vergleich zu dem Abwasser- oder dem Schmutzwasserdurchfluss der Anteil des Zentrats vergleichbar gering ist.

Bestätigt wird dies durch die Betrachtung der Zulaufparameter der Kläranlage und der Biologie, bei der sich die Zunahme der Massenkonzentrationen gering hält.

### 4.3.3 Dosierung

#### 4.3.3.1 Berechnete Dosierleistung

Die Berechnung des theoretischen Fällmittelbedarfs wurde nach der Anleitung der DWA-A 202 durchgeführt und in den Teilschritten des Punktes 3.2.7 Bedarf des Fällmittels beschrieben.

Die Wirkungsweise der Fällung der Anlage ergibt sich aus dem Prozessablauf und des eingesetzten Fällmittel. Wie in der Abbildung 16 gezeigt wird, wird das Fällmittel in dem Schneckenhebewerk des Rücklaufschlammes gefördert. Anschließend wird es über die Schnecken angehoben und in die Belebung transportiert. Dabei wird das Prinzip der Simultanfällung angewendet.

Zwischen diesen Schritten findet der Abzug des Überschussschlammes statt. Eine geringe Menge des Eisen-II-Chlorids wird bei dem Anheben mit den Förderschnecken aufoxidiert und kann mit dem Ortho-P reagieren. Der andere Teil des zweiwertigen Eisens wird erst in dem aeroben Teil der Belebung zu dreiwertigem Eisen oxidiert und fällt die Phosphate.

Bei der Berechnung des zu fällenden Phosphats ist entscheidend, welche Ausgangskonzentration das Abwasser besitzt. Im Falle der Kläranlage Silstedt ist diese Konzentration 10,94 mg/l. Folglich ist auch wichtig, welchen Überwachungswert die Kläranlage einzuhalten hat. Für die Kläranlage gelten die 1,5 mg/l als oberer Grenzwert, die am Ablauf einzuhalten sind. Da aber aufgrund von Schwankungen aus Regenspenden oder Trockenwetter und Belastungsspitzen auch höhere Werte als die mittlere Konzentration an Phosphat im Zulauf ankommen, dosiert das Personal der Anlage auf eine geringere Ablaufkonzentration. Damit wird ein Puffer im Belebungsbecken hergestellt und Spitzen können abgefangen werden. Zu prüfen ist dementsprechend auch das zu fällende gelöste Phosphat bis zur Ablaufkonzentration von 0,63 mg/l.

Außerdem wird 1% der BSB<sub>5</sub>-Konzentration an Phosphat durch den aeroben Abbau der Mikroorganismen fixiert. Weitere 1% durch die Bio-P und 0,5% fallen der Denitrifikation zu. Als BSB<sub>5</sub>-Konzentration wird der Zulaufwert zur Biologie verwendet.

$$X_{P,BM} = \left( 363 \frac{\text{mg BSB}_5}{\text{l}} * \frac{1\%}{100\%} \right) = 3,63 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$
$$X_{P,BioP} = \left( 363 \frac{\text{mg BSB}_5}{\text{l}} * \frac{1\%}{100\%} \right) + \left( 363 \frac{\text{mg BSB}_5}{\text{l}} * \frac{0,5\%}{100\%} \right) = 4,13 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$
$$X_{P,Fäll} = 10,94 - 1,5 - 3,63 - 4,13 = 1,68 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

Damit ergibt sich ein zu fällender gelöster Phosphatwert von 1,68 mg/l für einen Ablaufwert von 1,5 mg/l und analog für den Wert 2,55 mg/l ein Ablaufwert von 0,63 mg/l.

Entscheidend ist nun das eingesetzte Fällmittel, wobei man auf die Tabelle 4 verweisen kann, die alle gängigen Fällmittel sowie deren Dichte und Wirksubstanz aufzählt. Genauer ist das Produktblatt des Herstellers, das zusätzlich zu den Angaben zur Berechnung des Fällmittelbedarfs weitere Inhaltsstoffe, Lagerungs- und Schutzhinweise liefert.

Für das eingesetzte Fällmittel befindet sich dieses in den Anlagen. Hierbei ist der Wirksubstanzanteil des Fällmittels von 8,7 % Eisen angegeben. Der Wirkungsbeiwert  $z$  wird ausschließlich aus Eisen bestimmt, da kein Aluminium anteilig im Produkt vertreten ist.

$$z = \frac{31 \frac{g}{mol}}{55,8 \frac{g}{mol}} * \left( \frac{8,7\%}{100\%} \right) = 0,048 \frac{kg \text{ Wirksubstanz Fe}}{kg \text{ Fällmittel}}$$

Zur Berechnung der absoluten Fällmittelmenge bedarf es der Abschätzung des  $\beta_{Fäll}$  Wertes. Angesetzt wird der Wert aus Tabelle 5 mit 1,2 für den Überwachungswert von 1,5 mg P/l und dem derzeitigen mittleren Ablaufwert 0,63 mg P/l der letzten drei Jahre. Die Abbildung 12 gibt jedoch größere  $\beta_{Fäll}$  Werte bei einem Eliminationsgrad von 86% - bei 1,5 mg P/l - und 94% - die von der Kläranlage erreicht werden - an. Dementsprechend muss der  $\beta_{Fäll}$  Wert nach der Annahme noch einmal berichtigt werden. Der tägliche Durchfluss wird mit 10.604 m<sup>3</sup>/d angesetzt.

$$B_{d,FM} = 1,68 \frac{mg}{l} * 1,2 * \frac{10.604 \frac{m^3}{d}}{0,048} : 1.000 \frac{g}{kg} = 442 \frac{kg}{d}$$

$$B_{d,FM} = 2,55 \frac{mg}{l} * 1,2 * \frac{10.604 \frac{m^3}{d}}{0,048} : 1.000 \frac{g}{kg} = 671 \frac{kg}{d}$$

Umgerechnet mit der Dichte der Lösung von 1.365 Kilogramm pro Kubikmeter ergeben sich folgende Dosiervolumina.

- 324,0 l/d für den Überwachungswert von 1,5 mg/l
- 491,8 l/d für den Ablaufwert von 0,63 mg/l

Zur Deckung von maximalen Spitzenwerten der Phosphorkonzentration wird die Tabelle 7 Stoßfaktoren für den Fällmittelbedarf herangezogen. Da die tägliche BSB<sub>5</sub>-Fracht um die 4000 kg/d liegt, wurde bei der Simultanfällung ein Wert von 1,88 interpoliert und auf 1,9 aufgerundet.

$$B_{h,FM} = 1,68 \frac{mg}{l} * 1,2 * \frac{1,9 * 10.604 \frac{m^3}{d}}{24 * 0,048} : 1.000 \frac{g}{kg} = 35,3 \frac{kg}{h}$$

$$B_{h,FM} = 2,55 \frac{mg}{l} * 1,2 * \frac{1,9 * 10.604 \frac{m^3}{d}}{24 * 0,048} : 1.000 \frac{g}{kg} = 53,5 \frac{kg}{h}$$

Umgerechnet mit der Dichte der Lösung von 1.365 Kilogramm pro Kubikmeter ergeben sich folgende Dosiervolumina für Stoß- und Spitzenbelastungen.

- 25,8 l/h für den Überwachungswert von 1,5 mg/l
- 39,2 l/h für den Ablaufwert von 0,63 mg/l

#### 4.3.3.2 Tatsächliche Dosierleistung

Die reale Dosierung ist, wie im vorhergehenden Punkt erwähnt, höher als erforderlich angesetzt. Von den Fällmittelbehältern wird über eine Dosierpumpe das Eisen-II-Chlorid mit einem Volumenstrom von 720 l/d beziehungsweise 30 l/h in den Rücklaufschlamm dosiert.

#### 4.3.3.3 Vergleich zwischen berechneter und tatsächlicher Dosierung

Für den Vergleich werden die Werte des Ablaufwertes von 0,63 mg/l herangezogen, wobei die Stoßbelastung vorerst unberücksichtigt bleibt. Gegenüber stehen sich folgende Punkte.

**Tabelle 14 Vergleich von berechneter und tatsächlicher Dosierung [eigene Quellen: 2017]**

Berechnete Dosierung	Tatsächliche Dosierung
491,8 l/d	720 l/d
20,50 l/h	30 l/h

Die Abweichung, bei der die tatsächliche Dosierung die berechnete Dosierung übersteigt, beläuft sich auf circa ein Drittel. Große Abweichungen können bei der Berechnung des Dosierbedarfes entstehen, da Annahmen im Bereich der P-Fixierung durch aerobe und anaerobe Prozesse getroffen wurden. Die Elimination durch vermehrte Aufnahme in die Biologie, also die Bio-P, ist eine Annahme, die getroffen wurde. Die Abschätzung des  $\beta_{Fäll}$  Wertes ist ein weiterer großer Aspekt, der viel Fehlerpotenzial beinhaltet. Dieser Wert ergibt sich aus einer Vielzahl von Faktoren, wie die Einmischung in das Abwasser, um die Konkurrenzreaktion zu vermindern, der Prozessführung und der Eliminationsrate des Phosphors.

## **5 Experimentelle Betrachtung**

Um zusätzliche Informationen zu sammeln, wurden Versuche durchgeführt, die sich auf die Elimination von Phosphor beziehen. Die Versuche wurden mit einem Ziel definiert und der Aufbau des Versuches dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse zusammen mit der Auswertung präsentiert. Die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus den einzelnen Versuchen sind dem Punkt 7.1 verzeichnet.

Folgende Versuche wurden in der Arbeit durchgeführt:

- Durchflussmessung der aktuellen Fällung
- Anpassung der Fällmitteldosierung
- Rücklösungserscheinungen
- Jar-Test
- Mikroskopie

### **5.1 Fällung**

#### **5.1.1 Prüfung der Dosierung**

##### **5.1.1.1 Ziel des Versuches**

Ziel des Versuches ist es die bestehende Fällung auf ihre Dosierleistung zu überprüfen, um eventuelle Abweichungen festzustellen. Zur Prüfung der Abweichungen wurde die Dosierpumpe bei verschiedenen Einstellungen ausgelitert.

##### **5.1.1.2 Versuchsbeschreibung**

Es wurden jeweils 6 Messungen durchgeführt, bei denen mit einer Stoppuhr die Zeit gemessen worden ist, um ein definiertes Volumen zu befüllen. Für die Messungen wurde ein Probevolumen von 1000 Milliliter befüllt. Danach wurde auf den eingestellten Dosierwert hochgerechnet und per Mittelwertbildung versucht Messungenauigkeiten zu minimieren. Die Werte sind dabei in den Tabellen 15 und 16 aufgezählt. Es wurde die Dosierleistung von 30, 29, 28, 27 und von 17 Litern pro Stunde überprüft. Aufgeführt sind die Tabellen für 30 und 17 Liter pro Stunde, alle weiteren Daten befinden sich in dem Anhang.

##### **5.1.1.3 Auswertung**

Dabei traten Abweichungen von 1,31% bis 1,75% auf. Diese Abweichungen können durch den Menschen entstanden sein. Jedoch fällt auf, dass die bestimmten Werte sich immer unterhalb des vorgegebenen Dosierwertes befinden. Demnach könnten die Leitungslänge und damit entstehende Verluste zur Abweichung führen.



**Tabelle 15 Auslitern der Fällmitteldosierung für 30 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017]**

Datum	Volumen ml	Zeit s	Umrechnung		Sollwert Liter/Stunde	Abweichung vom Mittelwert %
			L/s	L/h		
30.03.2017	1000	122	0,00820	29,51	30	1,75
	1000	124	0,00806	29,03		
	1000	124	0,00806	29,03		
	1000	118	0,00847	30,51		
	1000	123	0,00813	29,27		
	1000	122	0,00820	29,51		
Mittelwerte der Berechnung			0,00819	29,48		

**Tabelle 16 Auslitern der Fällmitteldosierung für 17 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017]**

Datum	Volumen ml	Zeit s	Umrechnung		Sollwert Liter/Stunde	Abweichung vom Mittelwert %
			L/s	L/h		
28.06.2017	1000	220	0,00455	16,36	17	1,32
	1000	218	0,00459	16,51		
	1000	210	0,00476	17,14		
	1000	214	0,00467	16,82		
	1000	217	0,00461	16,59		
	1000	209	0,00478	17,22		
Mittelwerte der Berechnung			0,00466	16,78		

## 5.1.2 Anpassung des Fällmittelverbrauchs

### 5.1.2.1 Ziel des Versuches

In der Tabelle 14, dem Vergleich zwischen berechneter und tatsächlicher Dosierung, wurde bei diesen ein Unterschied festgestellt. Ziel des Versuches ist die Annäherung der tatsächlichen Dosierung an die berechnete Dosierung. Es soll eine Aussage über die Veränderung des Phosphor-Wertes in Abhängigkeit zu der Dosierleistung gemacht werden.

### 5.1.2.2 Versuchsbeschreibung

Vor Beginn des Versuches wurden die Abwasserparameter im Labor bestimmt und ein geeigneter Startpunkt für den Versuch festgelegt. Diese Maßnahme musste getroffen werden, da der Versuch im Praxismaßstab abläuft und den Anlagenbetrieb nicht stören sollte. Gestartet wurde der Versuch am 10. März 2017, an dem die Dosierung der Fällung von 30 l/h auf 29 l/h herabgesetzt wurde. Unter Berücksichtigung der Aufenthaltszeit in dem Belebungsbeckens und der Nachklärung sowie der gemessenen Ablaufparametern wurde die Fällung stetig reduziert. Die Tabelle 17 enthält die Aufzeichnungen über die Dosiermenge und den im Labor gemessenen Parametern im täglichen Verlauf. Gelb markierte Zellen sind Wochenenden.

### 5.1.2.3 Auswertung

Bei Beginn des Versuches am 10. März konnte noch keine Aussage über ein Verhalten der Phosphorkonzentration bei Reduzierung der Dosiermenge getroffen werden, da die Aufenthaltszeit in dem Belebungsbecken rund drei Tage und in einer Nachklärung um die 8 bis 9 Stunden dauert. Betrachtet man die folgenden Tage, so gibt es keine signifikanten Änderungen, die an den Überwachungswert von 1,5 mg/l herantreten und auch der mittlere Ablaufwert von 0,63 mg/l wurde noch nicht überschritten. Gleichzeitig wurde der CSB vermerkt, da mit der Fällung auch eine Beschwerung des Schlammes und Mitfällungsreaktionen hervorgerufen werden möchte. Auch dieser unterliegt noch keinen Einflüssen durch die Senkung der Fällmittelmenge.

Bis zur Reduzierung auf 27 l/h konnte der Ablaufwert, auch zwischenzeitlich bei hohen Phosphorkonzentrationen im Zulauf der Belebung von 14,20 mg/l am 17. März, gesichert werden. Bewiesen wird diese Aussage durch die Beobachtung des Ablaufwertes am 20./21. März. Ansonsten unterliegt die Konzentration normalen Schwankungen.

Am 28. März wurde der Versuch, bei 27 Liter Fällmittel pro Stunde, vom Anlagenpersonal abgebrochen, da die CSB-Konzentration auf über 40 mg/l anstieg. Auch der Phosphorgehalt im Ablauf ist auf 0,652 mg/l angehoben wurden. Obwohl aus Gründen der Anlagensicherheit gehandelt wurde, hätte der Versuch noch weitergeführt werden können.

Hervor geht dies aus den Konzentrationen am Folgetag. Diese reduzierten sich wieder auf ein bekanntes Maß, wobei die Steigerung der Fällmitteldosierung von 27 l/h auf 30 l/h, aufgrund der Aufenthaltszeiten, noch keine Auswirkungen gehabt haben kann.

Der Versuch beweist die Möglichkeit der Senkung des Fällmittelverbrauchs ohne markanten Anstieg der Ablaufwerte. Dennoch muss gesagt werden, dass der Ablaufwert von Phosphor bei Spitzenbelastungen und Stößen nicht gesichert werden kann, wenn die Fällung drastisch reduziert wird.

**Tabelle 17 Senkung der Fällmitteldosierung unter Beobachtung von Abwasserparametern  
[eigene Quelle: 2017]**

Fällung [l/h]	Datum	Zulauf		Zulauf Biologie	Ablauf		
		P <sub>ges</sub>	Fracht	P <sub>ges</sub>	P <sub>ges</sub>	Fracht	CSB
30	01. Mrz	9,78	138	15,00	0,468	6,1	36,7
	02. Mrz	9,04	124	13,40	0,524	6,6	37,7
	03. Mrz	7,09	90	10,50	0,438	5,0	33,3
	04. Mrz						
	05. Mrz						
	06. Mrz	7,37	90	10,60	0,390	4,7	32,3
	07. Mrz	8,54	123	12,00	0,510	6,8	30,5
	08. Mrz	6,33	94	9,83	0,346	4,6	30,5
	09. Mrz	7,42	112	9,63	0,605	8,4	36,2
29	10. Mrz	6,90	96	9,14	0,393	4,7	33,3
	11. Mrz						
	12. Mrz						
	13. Mrz	7,44	99	-	0,612	7,6	36,7
	14. Mrz	8,66	111	13,10	0,433	5,1	26,8
28	15. Mrz	8,38	107	13,00	0,381	4,5	27,0
	16. Mrz	10,30	125	13,80	0,418	4,8	33,7
	17. Mrz	11,00	136	14,20	0,405	4,5	29,4
	18. Mrz						
	19. Mrz						
	20. Mrz	7,66	97	8,70	0,360	4,3	31,0
	21. Mrz	8,88	117	10,80	0,447	5,5	34,0
27	22. Mrz	9,15	116	11,90	0,329	3,9	29,7
	23. Mrz	8,56	108	10,90	0,296	3,4	31,2
	24. Mrz	8,20	103	12,10	0,282	3,0	29,7
	25. Mrz						
	26. Mrz						
	27. Mrz	8,36	94	8,55	0,288	3,1	31,7
	28. Mrz	9,28	107	12,00	0,652	7,2	40,6
30	29. Mrz	9,25	107	11,60	0,359	3,8	32,9
	30. Mrz	9,26	106	12,30	0,341	3,6	35,9
	31. Mrz	10,10	114	12,40	0,416	4,4	35,8

## **5.2 Biologische Phosphorelimination**

### **5.2.1 Ziel des Versuches**

Bekannt aus der Literatur ist das Verhalten der biologischen Phosphorelimination durch wechselnde Bedingungen der Sauerstoffverfügbarkeit. Um ein Ausmaß an Aufnahme von Phosphor in die Biomasse und Rücklösung des Phosphors abzuschätzen, wurde der Versuch durchgeführt.

### **5.2.2 Versuchsbeschreibung**

Der Aufbau des Versuches beschränkte sich auf die Laboreinrichtung der ARA. Es wurde eine Probe aus dem Ablauf der Belebungsbecken gezogen, um den Zulauf der Nachklärung zu repräsentieren und die größtmögliche Sauerstoffsättigung und damit auch die Aufnahme von Ortho-P zu gewährleisten. Die Probe wurde in einem 1 Liter Becherglas abgefüllt, mit einem Magnetrührer versehen und auf eine Magnetrührerplatte gestellt. Nachdem eine „Nullprobe“ zum Anfangszeitpunkt von dem Überstandswasser genommen wurde, wurde die Probe mittels Magnetrührer durchmischt. Die Nullprobe wurde zuvor über einen Spritzenfilter von Partikeln befreit und auf Ortho-P und Nitrat untersucht. Im Abstand von 30 Minuten wurden nach kurzer Absetzzeit weitere Proben von dem Überstandswasser genommen und auf die 2 zuvor analysierten Abwasserparameter untersucht. Nach Unterschreiten des Messbereiches von Nitrat wurde das Probenahme-Intervall auf einmalig 20 Minuten (aus messtechnischer Verzögerung) und endgültig 15 Minuten reduziert und die Nitratmessung beendet.

### **5.2.3 Auswertung**

Die entstandenen Messdaten wurden in der Tabelle 18 festgehalten und in der Abbildung 24 grafisch dargestellt. Die Tabelle zeigt den Verlauf des Ortho-Phosphatgehaltes in Abhängigkeit zur Zeit und Verfügbarkeit von Sauerstoff in Form von gelöstem Nitrat. Anfangs wurde der Messbereich des Phosphattests mit Werten von unter 0,05 mg/l unterschritten. Die Messdaten wurden trotzdem eingebunden, geben allerdings keine aussagekräftigen Werte sondern Tendenzen wieder. Man kann eine Steigung des Phosphatwertes erkennen, gleichzeitig wird das gelöste Nitrat zu elementarem Stickstoff umgewandelt, was eine Senkung der Nitratkonzentration hervorruft.

Vier Stunden nach Versuchsbeginn wurde der Messbereich des Nitrattestes unterschritten und in der Phosphatkonzentration eine drastische Steigerung verzeichnet. Der Versuch wurde bis zu 5 Stunden und 20 Minuten weitergeführt, bei dem eine Konzentration von 0,876 mg/l gemessen worden ist. Nachfolgende Messungen konnten nicht mehr durchgeführt werden, da die Einrichtung um 18 Uhr geschlossen werden musste.

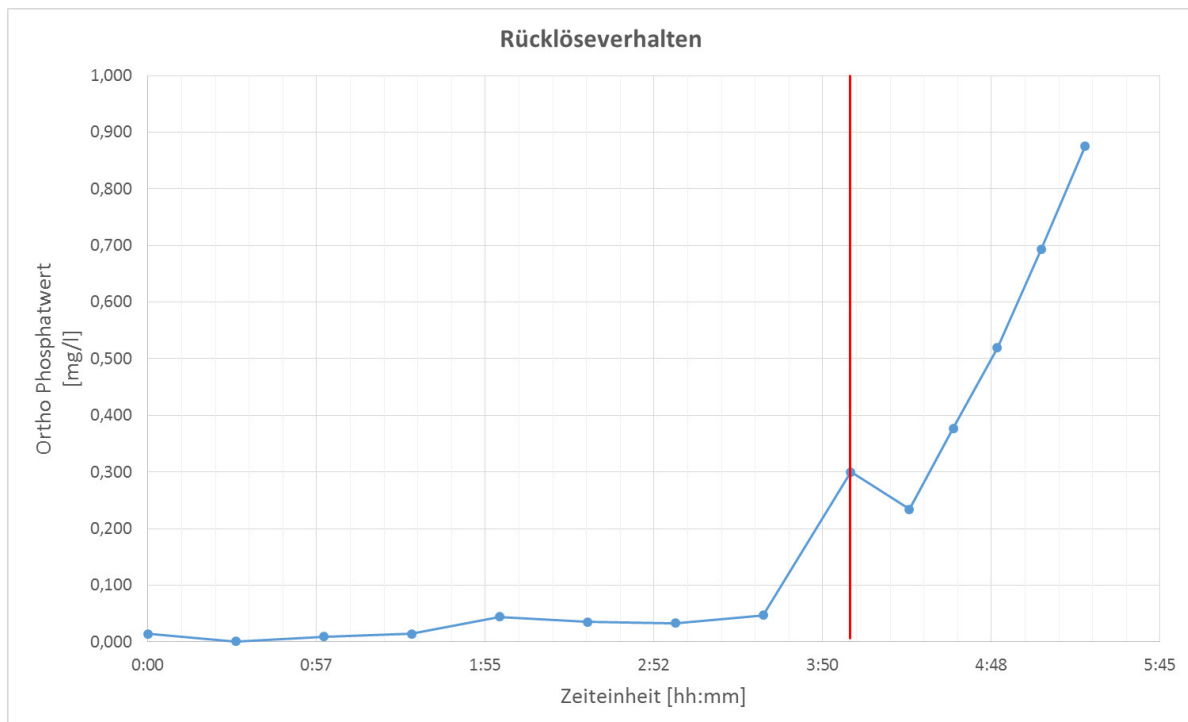
Um das gesamte Ausmaß der Funktionalität festzustellen, sollte eine Messreihe des Ortho-P in der aeroben und besonders in der anaeroben Zone der Belebung durchgeführt werden. Dadurch, dass die Belebung mit Eisen-II oder Eisen-III angereichtert ist, können Verfälschungen oder Fehlinterpretationen auftreten.

**Tabelle 18 Rücklösungsverhalten Versuch vom 24.04.2017 [eigene Quelle]**

Rücklöseverhalten				
Datum	Uhrzeit	Zeit [hh:mm]	Ortho Phosphat mg/L	Nitrat mg/L
24.04.2017	12:25	00:00	0,014	5,820
	12:55	00:30	0,001	5,970
	13:25	01:00	0,009	5,480
	13:55	01:30	0,014	4,700
	14:25	02:00	0,044	3,580
	14:55	02:30	0,035	2,630
	15:25	03:00	0,033	1,890
	15:55	03:30	0,047	0,975
	16:25	04:00	0,300	0,219
	16:45	04:20	0,234	-
	17:00	04:35	0,377	-
	17:15	04:50	0,519	-
	17:30	05:05	0,693	-
	17:45	05:20	0,876	-

Messbereich unterschritten

In der grafischen Darstellung ist sehr gut erkennbar, dass zwischen 3 Stunden und 30 Minuten und 4 Stunden ein deutlicher Anstieg der Phosphatkonzentration stattgefunden haben muss. Dies kann die Folge der Absenkung des Nitratgehaltes sein und die damit einhergehende Rücklösungen von Phosphat sein. Die rot markierte Linie gibt den unterschrittenen Messbereich der Nitratmessung wieder. An diesem Punkt könnte ein Fehler in der Messung des Phosphates liegen, da dieser aus der Rücklösungskurve herausfällt.



**Abbildung 24 Rücklösungsverhalten Versuch vom 24.04.2017 [eigene Quelle]**

Da der Versuch im Labormaßstab durchgeführt wurde und andere Bedingungen, als im Anlagenmaßstab herrschen, gibt der Versuch nur eine Aussage über das Potenzial der biologischen Phosphatrücklösung. Der Abzug des Rücklaufschlammes, der Zulauf der Nachklärung mit nitratreichem frisch belüftetem Belebtschlamm und die Trennung der Schlammzone und der Klarwasserzone sind Umstände, die den Prozess der Rücklösung hemmen.

Eine Erkenntnis über die Rücklösung im großen Verhältnis der Anlage kann jedoch aus dem Vergleich zwischen der Online Ortho-P Messung am Ablauf der Belebung und den gemessenen Ortho-Phosphatkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage gezogen werden. Die Online-Messung gibt im PLS an unauffälligen Tagen ohne große hydraulische Belastungen Ortho-P Werte von 0,08 mg/l bis 0,1 mg/l wieder. Verantwortlich dafür ist das Zusammenspiel aus der hoch eingestellten Eisen-II-Dosierung und der biologischen P-Elimination. Richtet man den Blick zeitverzögert auf den gemessenen Ablauf, so wird aus der Differenz deutlich, dass es vereinzelt zu Rücklösungen kommt.

## 5.3 Jar-Test

### 5.3.1 Ziel des Versuches

Da bis jetzt nur das Fällmittel Eisen-II-Chlorid eingesetzt und testweise in einem Versuch ein dreiwertiges Eisen ausprobiert wurde, jedoch derzeit darüber keine Aufzeichnungen vorhanden sind, soll ein Jar-Test durchgeführt werden. Ziel des Versuches ist es verschiedene Fällmittelprodukte auf ihre Wirksamkeit bei dem Abwasser der Kläranlage Silstedt zu testen. Die Wirksamkeit bezieht sich dabei auf die Eigenschaft des Absetzverhaltens und die gefällte Konzentration an Phosphat.

### 5.3.2 Versuchsbeschreibung

Der ganze Versuch wurde durch einen fachkundigen Ingenieur der Firma Feralco betreut. Zunächst wurde eine Zulaufprobe der Belebung genommen und die Phosphat-Referenzkonzentration der filtrierten Probe bestimmt. Anschließend wurden 4 verschiedene Fällmittel (Ferrapac 1625, Eisen-III-Chlorid, Ferraplus und Ferrifloc) in jeweils 3 unterschiedlichen Dosierungen – 30, 60 und 90  $\mu\text{l/l}$  - getestet. Zum Einsatz kamen dabei Flokkulatoren, die eine zeitgleiche optische Auswertung möglich machen und gleiche Einmisch- und Ruheverhältnisse erstellen. Dabei wurde das Abwasser mit dem dosierten Fällmittel 30 Sekunden schnell gerührt, um eine gute Durchmischung zu erhalten. Anschließend wurde es 10 Minuten langsam gerührt, um die Flockenbildung zu fördern. Zum Schluss erfolgte eine 30-minütige Sedimentationsphase. Danach wurden die über einen Spritzenfilter filtrierten Proben der Überstandswasser auf ihre Phosphatkonzentration untersucht.

Bei dem Versuch wurde der Vergleich zu dem aktuell angewendeten Eisen-II-Chlorid außer Acht gelassen, da die Aufoxidierung im dem Labor nur schwer möglich war.



Abbildung 25 Laboruntersuchungen am 20.04.2017 Jar-Test [Feralco: 2017]

### 5.3.3 Auswertung

Die Abbildungen der optischen Auswertungen befinden sich im Anhang. Dabei fällt auf, dass die Flockenbildung bei dem Eisen-III-Chlorid und dem Ferrifloc in der höchsten Dosierung sehr gut funktioniert und subjektiv die Trübung optisch am geringsten erscheint.

Die optische Auswertung gleicht sich teilweise mit der Auswertung der Phosphatkonzentrationen. Wie die Abbildung 26 zeigt, ist das Eisen-III-Chlorid von der Fällung des Ortho-P unter den getesteten Fällmitteln am effektivsten. Es wurde von der Null-Probe des Zulaufes der Belebung von 7,62 mg/l ausgegangen.

Bei der Betrachtung schnitt das Ferraplus am schlechtesten ab. Die Produkte Ferrifloc und Ferrapac 1625 halten sich bei der kleinen und mittleren Dosiermenge im Mittelfeld auf, erweisen aber in der hohen Dosierung ähnlich gute Fällungswerte wie das Eisen-(III)-Chlorid. Das dreiwertige Eisenchlorid erreichte im Vergleich zu den anderen Fällmitteln in den unterschiedlichen Dosiermengen eine konstant gute Fällung.

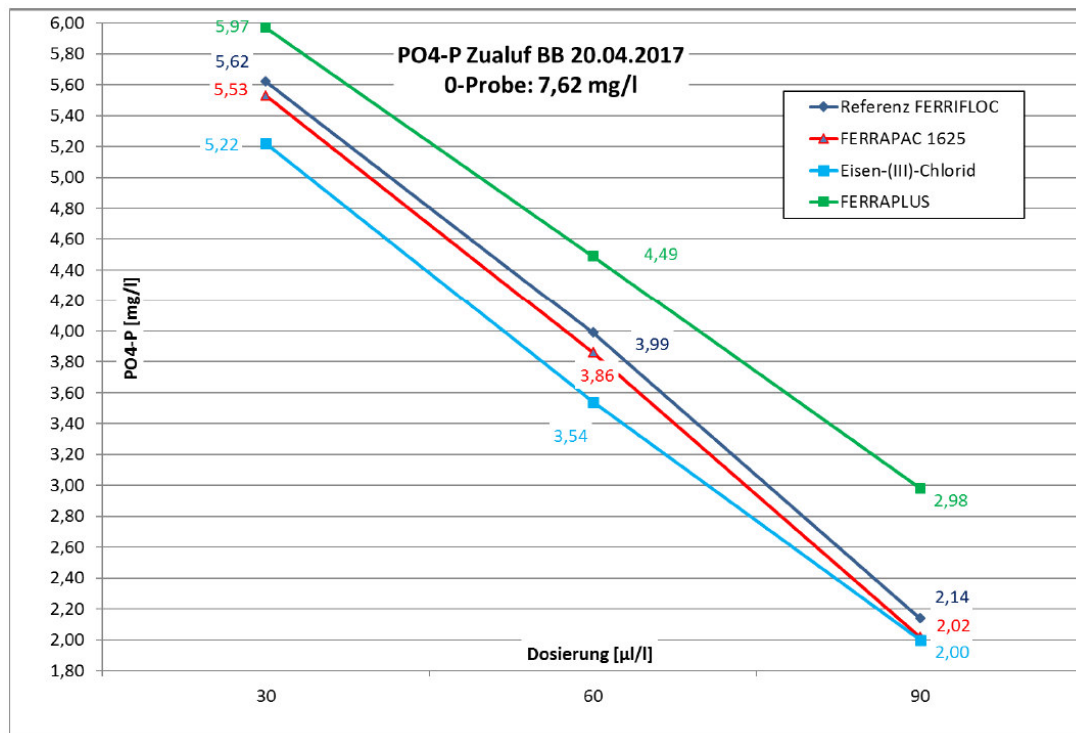


Abbildung 26 Phosphatfällung bei verschiedenen Dosierungen [Feralco: 2017]

Inhalt des Screenings der Firma Feralco ist eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, bei der der Preis im Verhältnis zur Phosphatfällleistung betrachtet wird. Dabei wurde das Ferrifloc der Firma Kronos, als Referenzfällmittel angegeben, um die drei Produkte der Firma Feralco damit vergleichen. Im preislichen Vergleich ist das Ferrapac 1625 mit 191 €/t am teuersten, das Ferraplus mit 168 €/t im mittleren Preissegment und das Eisen-(III)-Chlorid mit 147 €/t am preiswertesten. Rechnet man mit ein, dass die Fällung mit dem günstigsten Produkt optimal verlief, so ergibt sich das beste Preis-Leistungsverhältnis. Das gesamte Dokument ist im Anhang hinterlegt.

In dem Versuch wurde eine Betrachtung der unterschiedlichen Wirkstoffgehalte vernachlässigt.

### 5.3.4 Selbst durchgeführter Jar-Test

Auf meine Anfrage nach einem Produkt mit höherem Polymeranteil wurden 2 Probefällmittel zur Verfügung gestellt. Für den Versuch konnte die labortechnische Einrichtung der Abwasserbehandlungsanlage benutzt werden. Zur Verfügung standen ein Becherglas, mit dem Volumen von 1 Liter, eine Stoppuhr, ein Magnetrührer und eine Pipette. Bei dem selbst durchgeführten Experiment wurde versucht ähnliche Bedingungen wie beim vorherigen Jar-Test zu erstellen. Da allerdings die Zugabe des Fällmittels in einer kleinen Dosierung, welche mit den in der Laborausstattung vorhandenen Pipetten nicht möglich war, erfolgen musste, wurde der kleinst einzustellende Pipettenhub von 0,3 ml ausgewählt. Damit wurde die Dosierung um eine 10 Potenz überschritten. Der Ortho-P Wert der filtrierten Probe vom Zulauf der Belebung lag bei 6,04 mg/l. Vorrangig sollte durch das Einbringen des Fällmittels ein verbessertes Absetzverhalten und eine Senkung des Phosphatwertes hervorgerufen werden.

Im Laufe des Versuches konnte in den Phasen Einmischung, Flockenbildung und Sedimentation eine deutliche Trennung des Schlammes vom Klarwasser im Versuch mit beiden Fällmitteln erkannt werden, wie in Abbildung 27, einem Bild des ersten Präparates, ersichtlich wird. Nach der Absetzphase wurde der Ortho-P der filtrierten Probe ermittelt. Erreicht wurden Werte im negativen Bereich von um die 0,03 mg/l. Dieser Fehler lässt sich ausschließlich durch die Überdosierung der Proben mit den beiden Fällmitteln erklären.

Nachfolgend wurde versucht den Test mit einer Verdünnung beider Präparate durchzuführen, jedoch wurde der Versuch abgebrochen, da sich kein Absetzverhalten der Probe nach Einmischung und Flockenbildung zeigte. Möglicherweise wurde die Struktur der Produkte durch die Verdünnung mit Wasser verschlechtert oder zerstört, sodass keine Verbesserung der Absetzeigenschaften zustande kam.



Abbildung 27 Selbst durchgeführter Jar-Test mit Belebtschlamm aufbaupräparaten [eigene Quelle: 2017]



## 5.4 Mikroskopie

### 5.4.1 Ziel des Versuches

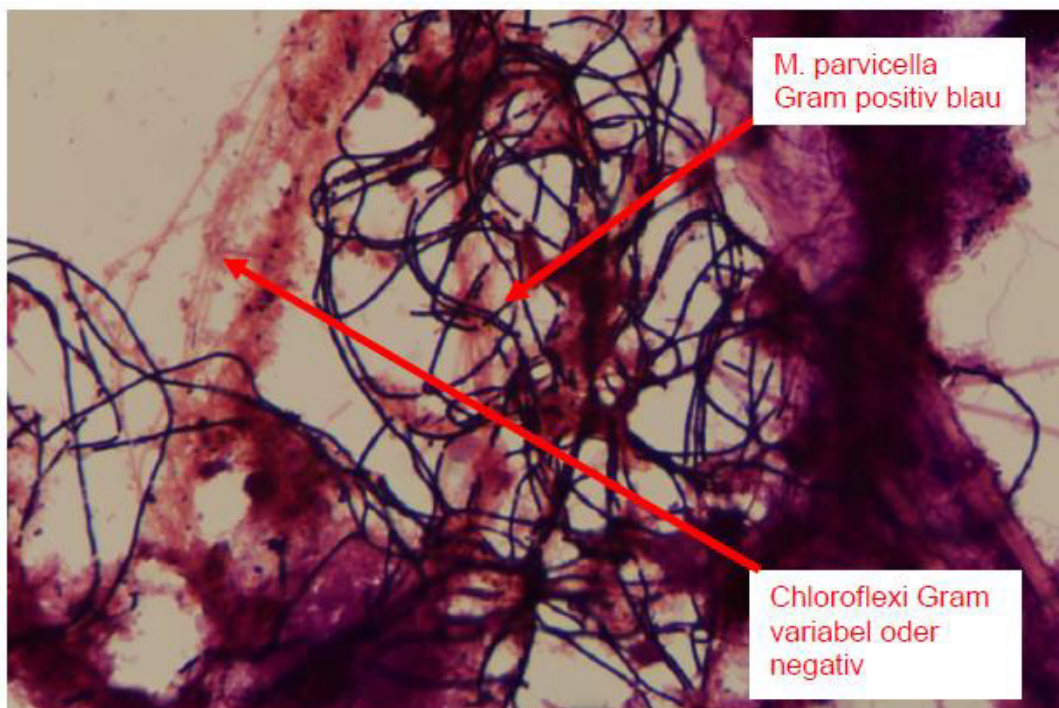
Bei der Verwendung von bestimmten Fällmitteln kann eine Verbesserung der Schlammeigenschaften erzielt werden. Ausgelöst wird dies durch das Verknäulen von Fadenbakterien. Ziel des Versuches ist die Feststellung der Schlammstruktur und der Nachweis bestimmter Fadenbakterien, um eine Aussage über ein einzusetzendes Fällmittel zu gewinnen.

### 5.4.2 Versuchsbeschreibung

Die Untersuchung der Belebtschlammprobe der Kläranlage Silstedt wurde von der Firma Feralco durchgeführt. Dazu wurde die Probe im ungefärbten und gefärbten Zustand mikroskopiert. Als Färbung wurden eine Neisser-Färbung und eine Gram-Färbung verwendet.

### 5.4.3 Auswertung

Die Mikroskopischen Aufnahmen wurde bei 100 – facher und 1000 – facher Vergrößerung abgelichtet. Dabei wurde ein artenreicher Schlamm festgestellt, der jedoch eine leicht erhöhte Fädigkeit aufweist. Diese Fädigkeit, bedingt durch *Microthrix parvicella* und Chloroflexi, wirkt sich auf den Schlammindex aus. Dies ist auf der Abbildung 28 zu sehen.



**Abbildung 28 Gram - Färbung, Vergrößerung 1000 – fach: *Microthrix parvicella* und Chloroflexi (Fäden mit Aufwuchs) [Feralco: 2017]**

Mit der Zugabe eines Eisen-Aluminium Mischproduktes kann eine Reduzierung der Fadenbakterien erzielt und somit der ISV gesenkt und die Sichttiefe in der Nachklärung verbessert werden. Jedoch sollte zum aktuellen Zeitpunkt eine Umstellung nicht erforderlich sein. Die Fadenbakterienanalyse ist im Anhang hinterlegt.

## 6 Großtechnischer Versuch

Im ersten Schritt wurden Berechnungen für eine Zweipunktfällung durchgeführt. Dabei wurde auf das zweiwertige Eisenchlorid der Anlage als Grunddosierung zurückgegriffen. In Absprache mit dem Anlagenbetreiber und dem Anwendungstechniker der Firma Kronos wurde sich, auch im Hinblick auf die durchgeführten Versuche, zusätzlich für ein dreiwertiges Eisen als zweiten Fällpunkt entschieden.

Dabei stand die Auswahl zwischen frei aufgestellten Kubikmeterbehältern und einer Containereinrichtung zum sicheren Aufstellen und Dosieren von Fällmitteln mit Wassergefährungsklasse. Entschieden wurde sich für die frei aufgestellten IBC's, die auf dem Platz der Fällmitteltanks gelagert werden. Dadurch ist eine Absicherung bei Austreten des Fällmittels und Einsickern in das Grundwasser durch die undurchlässige Wanne gegeben.



**Abbildung 29 Aufgestellte IBC mit Eisen-III-Chloridsulfat [eigene Quelle: 2017]**

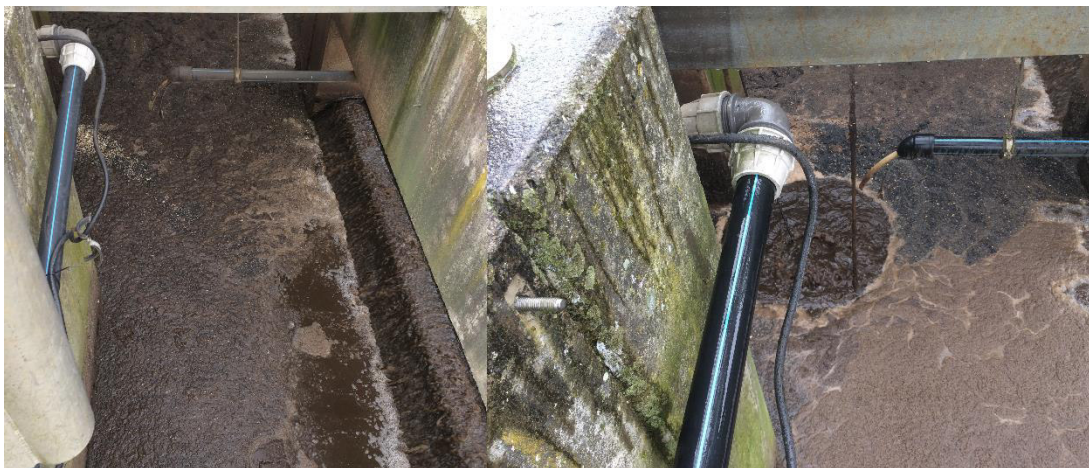
Danach wurden 3 Fällmittelbehälter (IBC) mit dem Fällmittel Eisen-III-Chloridsulfat bestellt und eine Membrankolbenpumpe als Dosiereinrichtung angeschlossen. Danach wurde eine Leitung von den Behältern zu einer vorhandenen Leitung - aus ehemaligen Versuchen - gelegt und verbunden. Die Dosierstelle für das dreiwertige Eisen wurde als Simultanfällung im Auslauf der Belebung angelegt.

Im zweiten Schritt wurde die Dosierpumpe ausgelitert, um die Einstellungen der Pumpe zu ermitteln, die diese benötigt, um Volumenströme mit der Dichte des Fällmittels zu fördern. Tabelle 19 führt die Einstellungen der Membrankolbenpumpe auf. Die Anzahl der Punkte beschreibt die Taktung des Kolbenstoßes und die prozentuale Angabe den Hub des Kolbens.

**Tabelle 19 Einstellungen der Dosierpumpe für die Fällung mit Eisen III Chloridsulfat [eigene Quelle: 2017]**

Eisen III Chloridsulfat Dosierung		
l/d	l/h	Einstellung
0	0	-
24	1	Punkt 1 auf 25%
48	2	Punkt 1 auf 48%
72	3	Punkt 1 auf 87%
96	4	Punkt 2 auf 40%
120	5	Punkt 2 auf 63%
144	6	Punkt 2 auf 90%
168	7	Punkt 3 auf 60%
192	8	Punkt 3 auf 80%

Da sich im Sammelbauwerk Schwimmschlamm bildet, welcher die Einbringung und Einmischung des Fällmittels hindert, musste eine Lösung gefunden werden. Eine tägliche Absaugung des Schwimmschlammes durch einen Saugwagen war der erste Lösungsansatz, welcher sich jedoch als schwer umsetzbar erwies. Der zweite Ansatz, die Kürzung der Dosierleitung, sodass der Fällmitteleintrag an der Überlaufkante geschieht, könnte zu wenig Einmischenergie erzeugen und ist laut Betreiber der Anlage nicht erwünscht.



**Abbildung 30 Vergleich des Einsatzes einer Pumpe zum Umwälzen der Schwimmschlammdecke [eigene Quellen: 2017]**

Als Variante zur Bekämpfung von Schwimmschlamm an der Dosierstelle wurde sich dafür entschieden, eine nassaufgestellte Pumpe in den Schacht zu hängen. Diese Pumpe wirbelt den Schwimmschlamm auf und ermöglicht dem Fällmittel einerseits den Kontakt zum Ablauf der Belebung und andererseits die Förderung der Einmischung durch das Umwälzen der Pumpe. Veranschaulicht wird dies in der Abbildung 30.

Der Versuchsbeginn war am 24.07.2017 um 10 Uhr, bei dem die Fällung mit Eisen-III-Chloridsulfat auf 2 l/h gesetzt worden ist und die Eisen-II-Fällung auf 25 l/h reduziert wurde. Da an den darauffolgenden Tagen eine Unwetterwarnung im Harzbereich und für die Holtemme ausgesprochen worden ist, wurde der geplante Ablauf der Dosiereinstellungen nicht eingehalten. Auch eine Beprobung wurde in dem Zeitraum auf das Möglichste beschränkt. Das Kläranlagenpersonal konnte dabei nach eigenem Ermessen handeln und die für den Versuch geplante Fällung dazu verwendet den Überwachungswert am Kläranlagenauslauf einzuhalten.



Aufgrund des zeitlichen Rahmens der Bachelorarbeit wurde das Ende der Beprobung auf den 18. August gesetzt. Das noch zur Verfügung stehende Fällmittel kann die Kläranlage als Versuchsweiterführung nutzen oder damit in Belastungssituationen reagieren.

Inhalt der Beprobung sind die typischen Auswertungen der Kläranlage in Bereichen des CSB, Gesamt-P, Ortho-P und Nitrat sowie die Sichttiefe in der Nachklärung und die absetzbaren Stoffe im Ablauf. Von den Parametern Gesamt-P und Ortho-P wurden täglich zwei qualifizierte Stichproben vom Zulauf in die Nachklärungen im Mittelbauwerk gezogen und beprobt.

Da die Zulaufsituation sehr außergewöhnlich war, kann nur schwer eine Aussage über die Zweipunktfällung im geplanten Betrieb getroffen werden. Die Kläranlage hatte in dem Versuchszeitraum enorme Durchflüsse von bis zu 75.000 m<sup>3</sup>/d zu bewältigen. Zusätzlich stieg der Pegel der Holtemme während des Versuches auf ein so hohes Maß, dass der Vorfluter in die Kläranlage drückte. Am Dienstag den 25. Juli ist ein anfänglicher Spülstoß des Kanalnetzes mit rund 55.000 m<sup>3</sup>/d und anschließender Verdünnung in den Zulaufparametern CSB und Phosphor zu erkennen. Die Verdünnung des Zulaufes blieb durch den Regennachlauf an den nachfolgenden Tagen erhalten. Am Freitag, den 11. August, ereignete sich eine weitere Zulaufspitze durch ein vergleichbar durchschnittliches Regenereignis.

Die Kläranlage verzeichnete in dem Versuchszeitraum einen leichten Abtrieb von absetzbaren Stoffen, welche sich jedoch nicht auf den Ablaufparameter CSB ausgewirkt haben. Allgemein ist der CSB während des Versuches stabil deutlich unterhalb des erforderlichen Überwachungswertes geblieben. Möglicherweise kann dies auf die gute Reinigungsleistung der Kläranlage, der Inbetriebnahme der zweiten Nachklärung und der Beschwerung des durch eine erhöhte Fällmittelzugabe erklärt werden.

Bei der Betrachtung des Parameters Gesamt-P sind die Zulaufkonzentrationen durch die Verdünnung geringer als im Regelfall, allerdings verbunden mit dem jeweiligen Zulauf zur Kläranlage errechnen sich anfangs große Frachten, die in die Kläranlage geleitet wurden. Im späteren Verlauf des Versuches reduzierte sich die Belastung der Phosphorfracht. Zu vernachlässigen ist nicht, dass die abnorme hydraulische Belastung das zweiwertige Eisen als Fällmittel aus dem System spülte. Um die Ablaufwerte zu sichern, wurde eine Erhöhung der Dosiermengen beider Fällmittel vorgenommen. Der Gesamt-P im Ablauf schwankte über den gesamten Verlauf des Versuches, dennoch wurde keine Überschreitung des Überwachungswertes verzeichnet.

Die Ortho-P Messungen der qualifizierten Stichprobe geben Aufschluss darüber, dass die Dosierung an Fällmittel durchaus erhöht hätte werden können. Da der Überwachungswert des Gesamt-P nicht überschritten wurde, wurde die Dosierung beibehalten. In der letzten Untersuchungswoche kann man erkennen, dass es anscheinend bei dem Ablauf zu Rücklösungen gekommen ist wenn man diesen mit den jeweils beiden qualifizierten Stichproben vergleicht.

Dadurch, dass sich ein Starkregenereignis in dem Versuchszeitraum ereignete, kann nur wenig Aussage über die geplante Dosierung getroffen werden. Dessen ungeachtet kann aber behauptet werden, dass ein weiteres Fällmittel mit schnelleren Reaktionseigenschaften dazu beigetragen hat, dass der Gesamt-P Überwachungswert eingehalten wurde und der Kläranlage somit Sicherheit verschaffen konnte.

Aufgrund der Tabellengröße ist ein Auszug in dem Anhang unter Tabelle 30 hinterlegt, die komplette Tabelle ist in digitaler Form der Arbeit beigelegt.

## 7 Ansatz zur Optimierung

### 7.1 Ausgangssituation

Zur Lieferung von Optimierungsansätzen muss die Ausgangssituation geschildert werden. Als Grundlage dienen die durchgeführten Versuche, die vorherrschenden Prozessabläufe und die Betriebsdaten der Kläranlage.

Betrachtet man die Ablaufwerte, so kann man erkennen, dass die Überwachungswerte eingehalten werden. In Bezug auf Phosphor ist sogar eine deutliche Unterschreitung mit Werten um die 0,6 mg/l festzustellen. Betrachtet man allerdings den Aufwand, um diesen Wert zu erreichen, so wird ersichtlich, dass ein Optimierungsbedarf besteht.

Die Fällung der Abwasserbehandlungsanlage ist händisch auf 30 l/h festgelegt und fördert kontinuierlich, abgesehen von Ausnahmen, den Volumenstrom. Es wird ein zweiwertiges Eisenchlorid angewendet, welches in den Rücklaufschlamm, als Simultanfällung dosiert wird. Geplant ist dabei die Anreicherung von zweiwertigem Eisen in dem Rücklaufschlamm. Anschließend wird der mit Fällmittel versetzte Rücklaufschlamm in der Belebung gut eingemischt. In der aeroben Zone wird das Fällmittel zu dreiwertigem Eisen umgewandelt und kann mit dem Phosphat reagieren.

Bedenkt man aber, dass nach der Dosierung des Fällmittels der Abzug des Überschussschlammes stattfindet, so ergibt sich, dass noch nicht oxidiertes Eisen aus dem aktiven Kreislauf entnommen wird und im Kreislauf der Schlammbehandlung wenige Chancen auf eine Reaktion mit Phosphat hat.

Um festzustellen, um welche Menge es sich handelt, wird das Verhältnis zwischen Rücklaufschlamm und Überschussschlamm, das circa 4 bis 5% entspricht, herangezogen. Ausgegangen von 5% und dem Fällmittelverbrauch eines Jahres, entspricht dies einem Volumen von 13,14 m<sup>3</sup>/a, welches wahrscheinlich nicht zur Fällung genutzt wird.

Dazu besteht die Möglichkeit, durch eingetragenen Sauerstoff von beispielsweise dem Anheben des Rücklaufschlammes oder dem Mischen mit frischem Zulaufwasser aus dem belüfteten Sandfang, eine frühzeitige Autoxidation des Fällmittels zu bewirken. Diese Gegebenheit sowie die Konstellation, dass die Umwandlung zu dreiwertigen Eisen und die Phosphataufnahme durch die Mikroorganismen in den gleichen Beckenabschnitten der Belebung ablaufen, kann die biologische P-Elimination mindern.

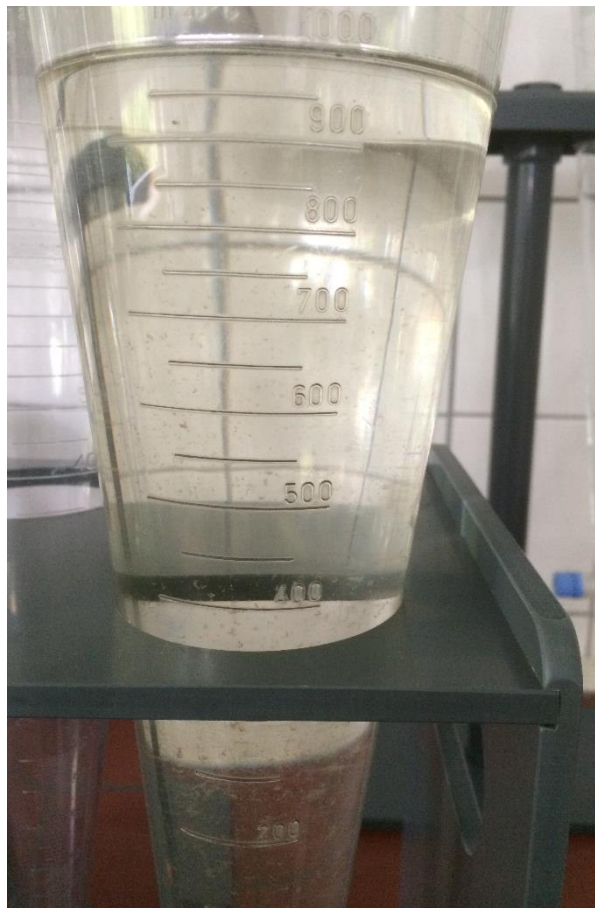
Ein weiterer Aspekt ist der, dass die Kläranlage Stressspitzen der Zulaufparameter durch eine zeitproportionale Probenahme nur eingeschränkt wahrnehmen kann. Im Falle einer Stoßbelastung, durch einer hydraulischen Spitze oder dem ablassen von nicht häuslichem Abwasser eines Indirekteinleiters mit großen Frachten, ist bisher die einzige Maßnahme die Dosierung der Fällung hoch zu halten. Werden trotzdem große Ablaufkonzentrationen durch die Labormessungen oder die Onlinemessung am Auslauf des Belebungsbeckens wahrgenommen, so besitzt die Kläranlage, begründet durch die händisch eingestellte Fällmitteldosierung, dem vorerst Reaktionsträgen Fe<sup>2+</sup> und dem Zeitverhalten der zu regelnden Strecke von Beginn der Messung bis zur Wirkung des Fällmittels, wenige Methoden, um schnell zu reagieren.

Hemmend wirkt sich auch die schwankende hydraulische Belastung auf den Kläranlagenauslauf aus. Wie schon beschrieben, betreibt die Anlage im Normalfall eine Nachklärung. Kommt es zu einer hydraulischen Belastung durch zum Beispiel einem Starkregenereignis, wird mit 2 der 3 Nachklärungen gefahren.

Nach einer hydraulischen Spitze wird die Nachklärung, welche von dem Prozessweg getrennt wird, bis zur Klarwasserzone geleert. So wird vermieden, dass stehender abgesetzter Belebtschlamm in anaerobe Verhältnisse gelangt und sich in der Nachklärung Phosphat zurücklöst.

Im normalen Anlagenbetrieb finden leichte Rücklösungen statt, welche durch einen ausreichenden Sauerstoffgehalt - auch in Form von Nitrat - gehemmt werden.

Weiter fällt auf, dass obwohl der Ablauf der Kläranlage im Durchschnitt nur weniger als 0,2 ml/l absetzbare Stoffe im Imhofftrichter hinterlässt, eine Trübung zu erkennen ist (Abbildung 31). Geschuldet ist das den kolloidal gelösten Stoffen, die sich in der Ablaufprobe nicht absetzen, sondern in Schwebelage halten und den Gesamt-P erhöhen.



**Abbildung 31** Ablaufprobe im Imhofftrichter vom 03.08.2017 [eigene Quelle]

## 7.2 Optimierungskonzept

Da die Untersuchungen der Bachelorarbeit in einem kurzen Zeitraum durchgeführt wurden, muss angemerkt werden, dass für das Optimierungskonzept langfristige, über mehrere Jahreszeitenwechsel Versuche getestet werden sollten. Dadurch kann ein aussagekräftigeres Urteil gebildet werden.

Die zukünftigen Veränderungen der Überwachungswerte für den WAHB sind nicht eindeutig einzuschätzen. Dennoch kann die Optimierungsplanung auf beide Fallbeispiele angewendet werden. Fallbeispiel 1 wäre ein gleichbleibender Überwachungswert für den Gesamt-P Wert im Ablauf der Kläranlage. Fallbeispiel 2 wäre die Verschärfung des Überwachungswertes auf ein noch nicht abzuschätzendes Maß [Siehe Anhang]. Um eine Aussage in den nachfolgenden Punkten zu treffen, wird die Verschärfung auf den Wert 1,2 mg/l angenommen.

In dem Bereich der biologischen P-Elimination kann aufgrund der Anlagenführung der Belebung und dem durchgeführten Versuch behauptet werden, dass die Aufnahme von Phosphat in der Biomasse zu einem gewissen Teil funktioniert.

Beachtet man die leichten Rücklösungen in der Nachklärung, so ergeben sich zwei Lösungsansätze der Problematik.

1. Dosierung eines reaktiven Fällmittels vor der biologischen Stufe
2. Veränderung des Rücklaufschlammverhältnisses

Die biologische P-Elimination wird im Regelfall betrieben, um den Fällmittelbedarf zu senken. Deshalb entspricht es weniger dem Sinn von Anlagenbetreibern diese Kosteneinsparung zu einem gewissen Maß aufzuheben. Noch dazu werden durch den Fällmitteleinsatz vor der biologischen Reinigungsstufe Kohlenstoffverbindungen mit gefällt. Fragwürdig ist, ob diese der Biologie noch zur Verfügung stehen, wenn man keine Vorklärung besitzt. Dennoch ist der Ansatz eine Lösung für ungewollte Rücklösungen bei großen Aufenthaltszeiten in der Nachklärung.

Um Rücklösungen zu vermeiden, gilt es den abgesetzten Belebtschlamm von der Klarwasserzone zu trennen. Umgesetzt wird dieser Prozess anfangs mit der Sedimentation und schlussendlich mit der Förderung des Rücklaufschlammes zu anschließenden Anlagenteilen.

Dadurch werden die Mikroorganismen räumlich von dem Ablauf getrennt und die Rücklösungen finden hauptsächlich in der anaeroben Zone der Belebung statt. Mit dem Rücklaufschlammverhältnis kann dieser Prozess beeinflusst werden. Derzeit befindet sich das Verhältnis auf dem festen Wert 1. Angaben der Literatur nennen Verhältnisse von 1 bis 1,5. Dabei ist zu beachten, dass bei einer Erhöhung des Verhältnisses auf einen unregulierten Wert sich andere Parameter und Verhalten der Kläranlage einstellen. Ungeregelte oder gesteuerte Rücklaufschlammumpfen, die nicht in einer stabilen und eingefahrenen Beziehung zum Zulauf der Nachklärung und dessen Trockensubstanzgehalt stehen, können zu schwankenden TS-Gehalten der Belebung führen und auftriebende Schlammwolken in der Nachklärung hervorrufen. Daher wird angeraten den Rücklaufschlamm nicht linear zum Zulaufvolumenstrom zu steuern, sondern mit der Schlammspiegelmessung der Nachklärung oder einer Trockensubstanzmessung im Rücklaufschlamm das Verhältnis zu regeln.

Ein Aspekt ist das Verhalten mit Prozesswasser, das intern auf der Kläranlage anfällt. Die Förderung von hoch belasteten Prozesswässern, auch im Fall von geringen Mengen, sollte in Zeiten von geringen Belastungen durchgeführt werden. Dadurch können Spitzen der Zulaufparameter im Tagesgang abgeflacht und Werte im unteren Bereich angehoben werden. Somit können gleichbleibende Zulaufbedingung hergestellt werden.

Der deutlich markantere Optimierungsansatz schlägt sich in der Ertüchtigung der chemischen Phosphorelimination nieder. Die bestehende Dosierung und Dosierstelle besitzt allerdings auch Nachteile, die in den nächsten Punkten genannt werden.

- Reaktionsträge
- Stoßbelastungen können nur ineffektiv angefangen werden
- Beeinflussung der biologischen P-Elimination
- Möglichkeit des Austrags durch Überschussschlamm

Rückschlüsse aus dem Punkt 4.3.2 Messergebnisse sind folgende zwei Erkenntnisse, die gezogen werden können. Die Kläranlage Silstedt erreicht Ablaufwerte von 0,5 mg/l und niedriger für den Wert Phosphat. Diese Ablaufwerte resultieren aus partikulärem Phosphorverbindungen und Rücklösungen, die den Ablauf der Kläranlage passieren. Höhere Ablaufwerte werden durch eine zusätzliche Kombination mit Stoßbelastungen verursacht.

Hauptziel des Optimierungskonzeptes sollte sein, dass die bisher schon erreichten geringen Ablaufwerte mit einer hohen Sicherheit eingehalten werden und es zu keiner Überschreitung, auch bei gesenkten Überwachungswerten, kommt. Dabei wird der Entwurf einer Zwei-Punkt-Fällung vorgeschlagen.

Umgesetzt werden soll dieses Vorhaben durch die Verlegung der Dosierstelle mit einer neuen Tankanlage vom Rücklaufschlamm zum Auslauf des Sandfangs. Das eingesetzte zweiwertige Eisen wird als Grunddosierung beibehalten und durch die Belüftung im Sandfang aufoxidiert. Der Fällmittelhersteller spricht sich zu der Aufwertung des Eisens durch den Sandfang positiv aus und auch die DWA gibt an, dass durch einen belüfteten Sandfang dreiwertiges Eisen entstehen kann. Mitarbeiter der Kläranlage warfen den berechtigten Zweifel ein, ob eine Aufoxidierung am Ablauf des Sandfanges stattfindet. In diesem Punkt herrscht Klärungsbedarf und erfordert eine Versuchsreihe, um Auskunft darüber zu liefern. Dabei bleibt das Prinzip der Simultanfällung bestehen, allerdings kann ausgeschlossen werden, dass noch nicht reagiertes Eisen den Prozess durch den Überschussschlamm verlässt. Mitgefällte Kohlenstoffverbindungen bleiben dem System und der Umsetzungen von Nitrat bei der Denitrifikation, aber auch der biologischen P-Elimination erhalten. Die Einstellung der Grunddosierung kann, je nach Anlagenverhalten, bei der Bio-P mehr oder weniger Phosphat hinterlassen.





**Abbildung 32 Ablauf des belüfteten Sandfanges KA Silstedt [eigene Quelle: 2017]**

Die Fällmittelstation vor Ort soll einen Umbau durch eine neue Dosiertechnik und ein Automatisierungsprogramm zur geregelten Fällmitteldosierung erhalten. Zur Realisierung ergeben sich zwei Wege, einmal die Reinigung der bestehenden Tankanlage, um Kristallisationsreaktionen mit dem ferner verwendeten Produkt auszuschließen, zum anderen die Modernisierung der Anlage, die 1995 errichtet wurde.

Aufgrund des hohen Alters wurde Rücksprache mit dem technischen Überwachungsverein gehalten. Der alte Stand ist, dass die Zulassungsbehörde eine Gebrauchsdauer bei Kunststofftanks von 25 Jahren angibt. Nach der Spanne ist eine regelmäßige Prüfung im Abstand von 5 Jahren angeraten wurden und nach spätestens 35 Jahren sollte eine Außerbetriebnahme erfolgen. Die Standsicherheit, die durch den Alterungsprozess beeinträchtigt ist, gilt als Ursache für die Lebensdauer von Kunststofftanks [Dinkler: 2017].

Ein Institut für Kunststoffstoffverarbeitung widerlegte diese Angabe mit einigen Fakten. Eine Bewertung muss individuell entschieden werden, da der Anlagenzustand entscheidend ist. Angeraten wird die zuständige Versicherung zu kontaktieren und sich mit dieser zu beraten, damit eine gesicherte Aussage getroffen werden kann.

Eine schwerwiegende Ursache für die Ermüdung und die Alterung von Kunststoff ist jedoch die Einwirkung von UV-Strahlung. Demnach wurde die Annahme für die Weiterbearbeitung der Arbeit getroffen, dass die Kunststoffbehälter ausgetauscht werden müssen. Ein Austausch der Auffangwanne des Unterbaus der Anlage betreffend ist aber nicht erforderlich.

Die geplante Dosierstelle wird vom Rücklaufschlamm zum Ablauf der Belebung, als Simultanfällung, verlegt. Ein großes Problem der Dosierung am Ablauf der Belebung stellt der auftreibende Schlamm dar, auffallend in der Abbildung 30. Durch diesen Schlamm wird die

Einmischung in das Abwasser erschwert und führt zu einer Erhöhung der Dosiermenge durch den Beta-Faktor. Um diesen Faktor klein zu halten, bieten sich für die Dosierstelle zwei Möglichkeiten.

1. In den Belebtschlamm eintauchende Dosierleitung
2. Dosierleitungen an den Überfallausläufen der Belebung



**Abbildung 33 Ablauf der Belebung KA Silstedt [eigene Quelle: 2017]**

Die erste Möglichkeit beschreibt eine Dosierleitung, die unter die Schwimmschlammdecke bis in die Zulaufrohrleitung zum Verteilerbauwerk der Nachklärung gelegt wird. Dort herrschen turbulenterere Strömungsverhältnisse, als im Gerinne des Ablaufes der Belebung. Außerdem befindet sich zwischen der Belebung und dem Verteilerbauwerk ein Düker, welcher die Einmischung des Fällmittels begünstigt. Nachteil dieser Variante ist, dass keine optische Kontrolle des Personals über die Dosierung erfolgen kann. In diesem Fall wird daher angeraten ein Durchflussmessgerät einzubinden.

Bei der zweiten Möglichkeit werden die Überfallkanten des Belebungsbeckens zur Einmischung des Fällmittels verwendet. Für die Dosierstelle in Abbildung 33 sowie der Dosierung der Grundfällung in Abbildung 32 wird bei dieser Methode empfohlen die Leitung über den ganzen Fließquerschnitt, mit mehreren einzelnen Dosierpunkten, zu legen. In Abbildung 34 sieht man ein Musterbeispiel aus der Kläranlage Gerwisch mit mehreren Dosierpunkten in einer Leitung, um den gesamten Abwasserstrom zu erfassen.



**Abbildung 34** Musterbeispiel einer Dosierung [KA Gerwisch: 2017]

Die Produkte der Fällmittelanbieter unterscheiden sich in diversen Eigenschaften und Wirkungen auf die Kläranlage. Die Tabelle 20 zählt Auffälligkeiten und Beobachtungen bei Kläranlagen auf und weist Fällmittelprodukte der Lösung nach zu. Zur Einhaltung des angenommenen Überwachungswertes von 1,2 mg  $P_{ges}/l$  kann ein Eisenprodukt beibehalten werden. Durch die Zugabe des Fällmittels kurz vor der Nachklärung kann eine verbesserte Sedimentationsfähigkeit in der Nachklärung ausgelöst werden.

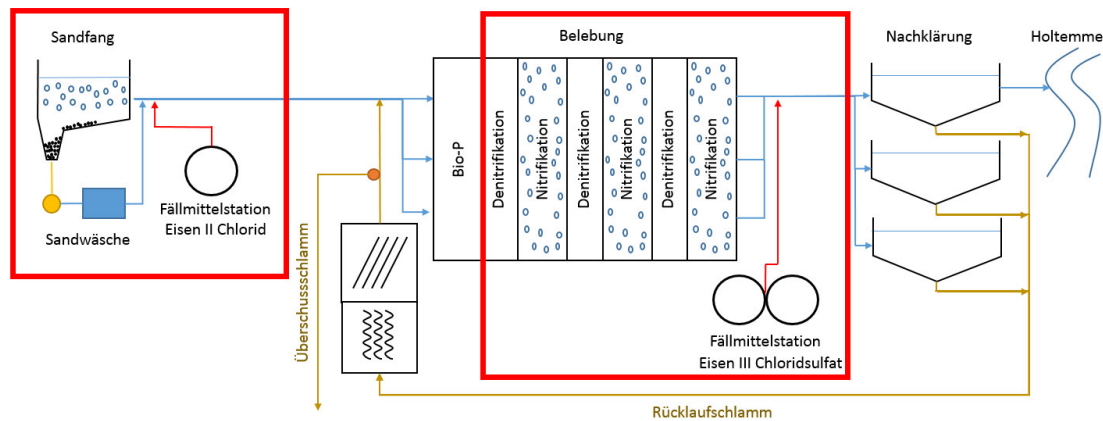
**Tabelle 20** Kläranlageneigenschaften und empfohlene Fällmittel [Scheer: 2017]

Phosphorelimination	
Kläranlage - Eigenschaften	Empfehlung Fällmittel
ohne Schlammprobleme	$FeCl_3$ (monomeres Produkt)
mit Schlammproblemen	$FeCl_3$ mit Zugabe von $Al^{3+}$
kein erhöhter $H_2S$ ; Fadenbakterien	$AlCl_3$ (monomeres Produkt)
Phosphatfällung mit Trübstoffelimination	PAC (polymeres Produkt)
zu starke Aufsalzung, weiches Wasser	$NaAlO_2$ (P-Eliminationswirkung deutlich geringer als mit $Fe^{3+}$ und $Al^{3+}$ )

In der Abbildung 35 ist ein Ausschnitt der Kläranlage Silstedt mit dem Optimierungskonzept der chemischen P-Elimination schemenhaft dargestellt.

Da die zweite Dosierstelle auf schwankende Phosphatwerte reagieren soll, wird die Pumpentechnik der Fällmittelstation in einem Automatisierungsprogramm eingebunden. Optimal wäre eine Phosphat-Messung im Verteilerbauwerk der Nachklärungen. Die Reaktionszeit über den Fließweg sollte ausreichen, um plausible Messergebnisse zu erhalten und die Dosierpumpen zu regeln. Eine Verknüpfung von dem Messwert und der Fördermenge der Pumpe in dem Prozessleitsystem sollte für die tägliche Kontrolle hergestellt werden.





**Abbildung 35 Fließschema mit Einbindung des Optimierungskonzeptes [eigene Quelle: 2017]**

Die Grunddosierung soll die Phosphatkonzentration von durchschnittlich 4,5 mg/l des Zulaufes – aus Tabelle 10 entnommen – abmildern. Dabei wird darauf geachtet, dass genügend Phosphor für die Mikroorganismen der Belebung zur Verfügung steht. Als zu fällendes gelöstes Phosphat werden knapp 2 mg/l angesetzt. Die Konzentration des Phosphors aus Tabelle 14 wird von 10,94 auf ca. 9 mg/l herabgesetzt. Dabei errechnet sich aus der Grundlage im Punkt 3.2.7 und dem  $\text{Fe}^{2+}$ -Produkt eine Dosiermenge von knapp 400 l/d. Angesetzt wurde ein  $\beta_{\text{Fäll}}$  Wert von 1,3. Die Begründung für diesen Wert rührt daher, dass das Verfahrensprinzip der Simultanfällung zugeordnet wird und Anhaltswerte von 1,2 aus der Literatur (Tabelle 5) hervorgehen, man aber konkurrierende Reaktionen erwartet. Einen genauer Faktor lässt sich allerdings nur durch den Betrieb der Anlage errechnen.

Für die Dosierstation des  $\text{Fe}^{3+}$ -Produktes wurde abzüglich des Phosphorbedarfs der Biologie für Zellaufbau, Denitrifikation und Bio-P eine zu fällende Massenkonzentration von 0,74 mg/l ermittelt. Dafür vorgesehen sind weniger als 140 l/d, um einen Ablaufwert von 0,5 mg P/l im Mittel einzuhalten. Die Dosiermenge ist mit einem  $\beta_{\text{Fäll}}$  Wert von 1,9 veranschlagt worden, wodurch eine Sicherheit gegeben wird. Durch die Regelung werden Dosiermengen zugegeben, die um den Erwartungswert von 150 l/d liegen. Bei Berechnungen mit dem angesetzten Stoßfaktor von 1,9 sollte die Pumpe eine maximal stündliche Dosierleistung von knapp 11 Litern fördern können, um Spitzen abzufangen.

Vergleicht man die aktuelle Situation des Verbrauches an Fällmittel mit dem geplanten Zustand, dann kann eine Fällmitteleinsparung von knapp 25 % erzielt werden.

Der Schlammanfall aus der chemischen Fällung wird ebenfalls reduziert. Zwar bleibt der Wirkstoff Eisen erhalten und wird mit 2,5 Gramm TS pro Gramm Eisen angegeben, allerdings mindern die unterschiedlichen Dichten und die Wirkstoffgehalte den Schlammanfall von knapp 210 kg TS/d auf rund 190 kg TS/d, was 12 % weniger Feststoff entspricht.

## 8 Bewertung der Optimierung

### 8.1 Monetäre Betrachtung

Bei der monetären Betrachtung gilt es die Investitionskosten und die laufenden Kosten im Vergleich zwischen dem derzeitigen Stand und der Optimierung der Anlage zu betrachten.

Für die Ermittlung der Investitionskosten wurden mehrere Anfragen an Anbieter des jeweiligen Fachgebietes gestellt. In der Tabelle 21 sind Kostenspannen nach Position aufgelistet. Die Kosten wurden unter anderem von Klärwerken ermittelt, wahrscheinlich sind Vergünstigungen der Anbieter im Preis enthalten. Für die Berechnung der gesamten Kosten wurde der ungünstigste Fall mit den Höchstpreisen angenommen.

**Tabelle 21 Ermittelte Investitionskosten für die Optimierung der chemischen P-Elimination  
[eigene Quelle: 2017]**

Investitionskosten				
Bereich	Leistung	Kosten [€]	Stück	Summe der Einzelposition
Dosierstation	Behälter	20.000	2	40.000,00 €
	Pumpen	2.500 bis 3.000	2	6.000,00 €
	Schaltschrank	6.000	1	6.000,00 €
	Erdbau/Leitungstechnik	30.000 bis 40.000	1	40.000,00 €
MSR-Technik	Phosphatmessung	11.000 bis 12.500	1	12.500,00 €
	Filtration	5.000 bis 7.500	1	7.500,00 €
	Controller	3.000	1	3.000,00 €
	Regler/Einbindung PLS	9.000	1	9.000,00 €
	Montage/Inbetriebnahme	3.000 bis 4.500	1	4.500,00 €
<b>Summe:</b>				<b>128.500,00 €</b>

Als Zeitraum zur Bestimmung der Betriebskosten wird ein Jahr angesetzt. Dabei wurden die Jahresschmutzwassermenge aus der wasserrechtlichen Erlaubnis von 4.200.000 m<sup>3</sup>/a und der mittlere Fällmittelverbrauch von 282,80 m<sup>3</sup>/a aus der Tabelle 13 zur Berechnung einzelner Positionen verwendet.

Eine wichtige Position ist die Abwasserabgabe, die nach dem AbwAG bestimmt worden ist. Die abgabepflichtigen Parameter sind CSB, N<sub>ges</sub> und P<sub>ges</sub> mit den jeweiligen Überwachungswerten aus Tabelle 25. Für die Berechnung der Abgabe ist für jeden Parameter ein Schädlichkeitsfaktor festgelegt worden (CSB: 50 kg/SE; N<sub>ges</sub>: 25 kg/SE; P<sub>ges</sub>: 3 kg/SE). Aus den errechneten Frachten mit Einbezug des Schädlichkeitsfaktors wird eine Schädlichkeit ermittelt.

- |                             |              |                |           |
|-----------------------------|--------------|----------------|-----------|
| ▪ CSB-Fracht:               | 210.000 kg/a | Schädlichkeit: | 4200 SE/a |
| ▪ N <sub>ges</sub> -Fracht: | 33.600 kg/a  | Schädlichkeit: | 1344 SE/a |
| ▪ P <sub>ges</sub> -Fracht: | 6.300 kg/a   | Schädlichkeit: | 2100 SE/a |

Durch die Verrechnung mit dem Abgabesatz für jede Schadeinheit von 35,79 € wird die Abgabe bestimmt. Dargestellt in der Tabelle 22.

**Tabelle 22 Errechnete Abwasserabgabe aus der gemittelten Jahresschmutzwassermenge [eigene Quelle: 2017]**

Parameter	Überwachungswert [mg/l]	Abgabe für eine Schadstoff [€/a]
CSB	50	150.318,00
Nges	8	48.101,76
Gesamt P	1,5	75.159,00
Summe:		273.578,76

Eine Ermäßigung von 50% nach §9 Abs. 5 AbwAG kann vorgenommen werden, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt werden. Aus dem Leitfaden zum Vollzug des Abwasserabgabengesetzes zitiert:

“Zunächst muss ein Überwachungswert nach § 4 Abs. 1 AbwAG bzw. ein erklärter Wert nach § 6 Abs. 1 AbwAG vorliegen, der den Anforderungen nach § 57 WHG, konkretisiert in der AbwV, entspricht. Des Weiteren müssen die Anforderungen nach § 57 WHG im Veranlagungsjahr auch bei der behördlichen Überwachung eingehalten sein.“ (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz).

Dies bezieht sich auch auf Sachsen-Anhalt und würde die Kosten auf 136.578,76 € reduzieren.

Bei der Abwasserabgabe im optimierten Zustand mit dem Überwachungswert  $P_{ges}$  von 1,2 mg/l ergibt sich bei analog durchgeführter Berechnung eine Summe von 129.273,48 €.

Für die Ganzheit sind die Nettokosten üblicher Fällmittel in der Tabelle 23, Stand 2017, aufgelistet. Große Faktoren für die Kosten der Fällmittel sind unter anderem die Transportwege und die gelieferten Menge des Fällmittels. Laut Scheer kann bei einer Abnahmemenge von 200 bis 300 t/a ein Netto Preis von 130 € pro Tonne für Eisen-III-Chlorid entstehen, bei Liefermengen von 1.300 t/a sinken die Kosten auf 100 € pro Tonne.

**Tabelle 23 Kosten der Fällmittel (Stand 2017) [Scheer: 2017]**

Fällmittel	Netto-Kosten	Wirksubstanz		Netto-Kosten/Wirksubstanz	pH (20°C)
FeCl <sub>3</sub>	100 €/t - 130 €/t	13,8 % Fe <sup>3+</sup>	2,5 mol/kg	0,040 €/mol - 0,052 €/mol	< 1
AlCl <sub>3</sub>	130 €/t	5,9 % Al <sup>3+</sup>	2,2 mol/kg	0,059 €/mol	< 1
PAC	180 €/t	9,0 % Al <sup>3+</sup>	3,3 mol /kg	0,055 €/mol	2
NaAlO <sub>2</sub>	130 €/t	10,0 % Al <sup>2+</sup>	3,7 mol /kg	0,049 €/mol	14

In der Tabelle 24 sind die laufenden Kosten zusammengestellt. Angesetzt für den Fällmittelverbrauch sind die festgesetzten 720 l/d sowie die Berechnungen des Fällmittelbedarfs der Zweipunktfällung aus dem Punkt 7.2. Dabei wurden die Preise der

Fällmittel von Eisen-II-Chlorid und Eisen-III-Chloridsulfat aus den Angaben des aktuellen Fällmittellieferanten verwendet.

Die Wartung und Instandsetzung der Dosierstation sind angenommen. Dabei wurde der Kostenaufwand aufgrund von zwei Dosierstationen auf das Doppelte geschätzt. Bei der Wartung der Analysen wird ein Aufschlag einem Drittel angenommen. Bei dem Optimierungskonzept kommt es zu einem höheren Verbrauch an Reinigungsmitteln und Chemikalien, jedoch können bei gleichzeitiger Wartung die Anfahrtkosten gering gehalten werden.

Für die Ermittlung der Kosten der Schlammbehandlung ohne Optimierung wurde das Budget zur Schlamm Entsorgung und zum Kauf des Flockungsmittels herangezogen. Aus dem Vergleich des Schlammanfalls ging hervor, dass im Jahr um die 12% weniger Schlamm aus der chemischen Fällung anfällt. Durch die Berechnung des Schlammanfalls aus den Dosiermengen und den Angaben aus Punkt 3.2.6 Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb konnte ein Verhältnis ermittelt werden. Der Schlamm aus der chemischen Fällung ist anteilig mit rund 1,5% an der entstehenden Schlammmenge vertreten. Somit fallen für die Behandlung und Entsorgung des Fällungsschlammes rund 4000 €/a an, die um 12% gesenkt werden.

**Tabelle 24 Laufende Kosten der Kläranlage Silstedt ohne und mit Optimierung [eigene Quelle: 2017]**

Laufende Kosten			
Kostenpunkt	Kosten [€/a]		Differenz [€/a]
	Ohne Optimierung	Mit Optimierung	
Abwasserabgabe	136.789,38 €	129.273,48 €	7.515,90 €
Fällmittelverbrauch	Eisen-II-Chlorid	41.407,28 €	23.004,04 €
	Eisen-III-Chloridsulfat	-	13.121,71 €
Wartung/Instandhaltung der Dosierstation	1.000,00 €	2.000,00 €	-1.000,00 €
Wartung der Analysen	3.000,00 €	4.000,00 €	-1.000,00 €
Kosten der Schlammbehandlung/-entsorgung	270.000,00 €	269.514,00 €	486,00 €
<b>Summe:</b>			<b>11.283,42 €</b>

Die Kosten oder Ersparnisse für den Energiebedarf sowie der des Personals sind auch relevant für die Betrachtung, jedoch sind diese für den aktuellen Moment nicht abschätzbar. Auch die Preise der Fällmittelanbieter ändern sich und können dabei nur zu jetzigen Zeit, als Richtwerte gesehen werden.

Um Optimierungen für Kläranlagen attraktiv zu machen, kann nach dem AbwAG § 10 Abs. 3 eine Rückverrechnung der Aufwendungen zur Erweiterung oder Errichtung mit der Abwasserabgabe vorgenommen werden.

Bedingungen dafür sind, dass eine Minderung der Fracht einer der bewerteten Schadstoffe und Schadstoffgruppen um mindestens 20% erfolgt und eine Minderung der Gesamtschadstofffracht beim Einleiten in das Gewässer erwartet wird.

Die Abwasserabgabe der letzten drei Jahre vor vorgesehener Inbetriebnahme der Anlage ist verrechnungsfähig und bei bereits gezahlter Abgabe herrscht ein Rückzahlungsanspruch. Bezogen auf die Kläranlage Silstedt können angenommener Weise 410.368 € verrechnet werden.

Dennoch muss beachtet werden, welche Aufwendungen verrechnungsfähig sind. Frau Schneider vom Fachdienst Wasser- und Bodenschutz präsentierte 2015 bei einer Kläranlagennachbarschaft einen Vortrag über die Abwasserabgabe.

Demnach sind verrechnungsfähig:

- Eigenleistungen
- Investitionskosten zur Erstellung, zum Erwerb und zur Erneuerung von Anlagen
  - Grunderwerbskosten
  - Erschließungskosten
  - Kosten für Vorarbeiten
  - Baunebenkosten
  - Bauausführungskosten

Nicht verrechnungsfähig sind:

- Betriebskosten
  - Kosten für Unterhaltung, Wartung und den Betrieb von Anlagen und Geräten
  - Instandsetzung bestehender Anlagen
- Finanzierungskosten
  - Zinsen
  - Tilgungsleistung

Der Vergleich zwischen den verrechnungsfähigen 110.000 € und den Spielraum der Erstattung von mehr als 410.000 € bietet genügend Platz für weitere Investitionen, wie zum Beispiel die Kopplung der Rücklaufschlammumpen an eine Schlamm Spiegel- oder TS-Messung, die bei der Abschätzung außer Acht gelassen worden sind.

Da die bestehenden Tanks der Dosierung des zweiwertigen Eisens erneuert werden müssen und diese Kosten zur Instandsetzung bestehender Anlagen zählen, können diese Investitionen nicht mit der Abwasserabgabe verrechnet werden. Die 20.000 € für den Tausch der Fällmitteltanks fallen auf die Kläranlage zurück, sollten sich aber nach zwei Jahren mit den Einsparungen der laufenden Kosten amortisieren.

Von der monetären Betrachtungsseite lohnt sich eine Optimierung dieses Ausmaßes, einerseits durch die Verrechnung mit der Abwasserabgabe und andererseits durch die jährliche Einsparung der Betriebskosten.



## 8.2 Nicht Monetäre Betrachtung

Betrachtet man den Nutzen für die Anlage sprechen viele Punkte für die Optimierung. Ein gemessener Ablauf der Kläranlage mit Einbindung einer Fällmitteldosierung über eine Regelung bietet ein gesichertes Einhalten eines Betriebsmittelwert und des Überwachungswertes am Ablauf. Zusätzlich können Stoßbelastungen hydraulischer Sicht und große Parameterfrachten erfasst und abgefangen werden.

Durch die durchschnittliche Senkung des Fällmittelverbrauchs wird der Schlammanfall durch die chemische P-Elimination reduziert und betriebsinterne Prozesse wie die Schlammbehandlung und Entwässerung werden geschont. Die Folgen auf die Schnecken und metallischen Oberflächen des Rücklaufschlammhebewerkes, die stark von Korrosion betroffenen sind, werden gemildert. Bei den neuen Dosierpunkten besteht kein direkter Kontakt zwischen metallischen Gegenständen in den Fließgerinnen, dem Abwasser-Eisen-Gemisch und Sauerstoff.

Mit der Inbetriebnahme einer Zweipunktfällung kann der Betrieb der Anlage mit höherer Sicherheit bei Ausfall einer Station gefahren werden. Die Umstellung der Dosierstationen erfordern kürzere Leitungswege des Fällmittels, womit die Fehleranfälligkeit geringer ist und auch die Reparatur schneller durchgeführt werden kann.

Experimente für immer fortschreitende Optimierung der Anlage können mit einer höheren Sicherheit für den Anlagenbetrieb ausgeführt werden.

Die Installierung einer Zweipunktfällung wirkt vorbereitend auf zukünftige Überwachungsparameter, die eine vierte Reinigungsstufe erfordern.

Es existieren aber auch Gegenargumente, denn mit der Einführung einer Zweipunktfällung und den geforderten Analyse- und Regeltechniken ist ein höherer Aufwand für Wartung und Reinigung der Anlage an das Betriebspersonal gefordert.

Auch wird ein weiterer wassergefährdender Stoff auf der Kläranlage gelagert, bei dem das Personal eingewiesen werden muss und Arbeitssicherheitsmaßnahmen erforderlich sind.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Betriebsdaten, der Kommunikation mit dem Betriebspersonal und der Untersuchungen und Versuchen konnte die aktuelle Lage der Kläranlage aufgenommen werden. Mit diesem Kenntnisstand wurden viele Optimierungspunkte bezüglich der Phosphorelimination entwickelt und präsentiert.

Die Abwassereinigungsanlage Silstedt bewältigt das anfallende Abwasser mit guten Betriebsmittelwerten, dennoch gibt es Verbesserungen, um Betriebssicherheit zu gewährleisten, Kosten einzusparen und die Anlage auf zukünftige Ereignisse vorzubereiten. Die aktuelle chemische P-Elimination ist durchaus eine preiswerte Lösung für den Ablaufwert für Phosphor. Bei Stoßbelastungen kommt es allerdings zu Spitzenwerten, auf die nur schwer reagiert werden kann.

Durch das Konzept einer Zweipunktfällung mit einer Grunddosierung und einer geregelten Dosierung wird ein Ausgleich der Schwankungen des Ablaufwertes garantiert. Zusätzlich wird damit gerechnet, dass aufgrund von zwei Dosierstellen ein geringerer Fällmittelverbrauch erreicht werden kann. Die Grunddosierung wird mit dem zuverlässigen Eisen-II-Chlorid am Ablauf des Sandfangs und die geregelte Dosierung mit Eisen-III-Chloridsulfat am Ablauf der Belebung betrieben. Die zweite Fällmittelstation greift dabei auf den Online-Phosphatmesswert im Verteilerbauwerk zu den Nachklärungen zurück.

Verzichtet wurde auf Fällmittel auf Kalkbasis, da ihr effektiver Bereich in höheren pH-Werten liegt und derzeit keine Schwierigkeiten bei der Säurekapazität vorliegen. Aluminiumprodukte sind für die Trübstoffeliminierung gut geeignet und können den partikulären Phosphor senken und niedrige Grenzwerte einhalten. Für die Kläranlage Silstedt besteht zur jetzigen Zeit kein Grund auf die im Vergleich teureren Präparate zurückzugreifen.

Die biologische Phosphorelimination senkt den Bedarf an Fällmittel und soll daher weiter betrieben werden. Um eine Aussage über das Ausmaß zu treffen, ist eine langfristige Versuchsreihe erforderlich, bei der die aeroben und anaeroben Phasen der Belebung auf ihren Phosphatgehalt untersucht werden sollen. Danach kann man Abschätzen, mit welchem Grad die Bio-P funktioniert. In dem Teilgebiet der P-Elimination sind die leichten Rücklösungen in der Nachklärung aufzuführen. Ein Ansatz zur Verbesserung ist die Steuerung des Rücklaufschlammverhältnisses beziehungsweise dem Abzug über eine Schlammspiegelmessung oder eine Trockensubstanzmessung im Rücklaufschlamm. Durch die Trennung und Abzug der Biomasse von dem Klarwasser können die Rücklösungen vermindert werden.

Im Umgang mit prozessinternen Wässern konnten auch Verbesserungsvorschläge angemerkt werden. Diese oft geringen Mengen mit hoher Belastung werden im Verlauf der Arbeitswoche dem Zulauf zugeführt. Sinnvoll ist die Zugabe des Prozesswassers bei geringen Belastungszeiten. Hierbei werden Tagesspitzen abgeflacht und Tiefstwerte angehoben, sodass ein Volumenstrom mit kontinuierlich gleichbleibender Konzentration der Kläranlage zugeführt wird.

Die Eingriffe erfordern einen hohen baulichen und finanziellen Aufwand. Beachtet man die Methode der Rückverrechnung der Abwasserabgabe so kann der Großteil der Kosten abgedeckt werden. Die Optimierung hat auch Auswirkungen auf die Betriebskosten. Diese werden gesenkt und decken nach kurzer Zeit die Ausgaben, die nicht verrechnet werden konnten.

Auch für kommende Investitionen in Richtung anaerober Schlammstabilisierung ist die Zweipunkt-fällung praktikabel. Die geplante Grunddosierung fungiert hierbei als Vorfällung. Dabei wird der gefällte Phosphatschlamm in der Vorklärung abgezogen und verbleibt nach der Stabilisierung im ausgefaulten Schlamm. Der Vorteil ist, dass ausreagierte Phosphatschlamm nicht in die Belebung gelangt und im Kreis gefahren wird. Jedoch muss bei der Vorfällung das Verhältnis von Kohlenstoff und Phosphor beachtet werden. Da es zu einer vermehrten Sedimentation von Kohlenstoff durch die Fällung kommen kann.

Den Blick in die Zukunft gerichtet, arbeitet das Optimierungskonzept für die Kläranlage. Bedenkt man, dass sich einige Bundesländer über Spurenstoffentfernung mit einer Filterstufe im Ablauf unterhalten, dann wird mittelfristig gesehen das Land Sachsen-Anhalt mitziehen. Es ist jedoch noch nicht absehbar, welche Vorschriften vorgesehen sind.

Da eine Filtration geringe Phosphorwerte einhalten kann, ist dieses Verfahren eine Alternative zu der beschriebenen Optimierung. Anlagen mit einer Filterstufe erreichen Werte um die 0,3 mg/l Phosphor. Es ist anzunehmen, dass eine Verschärfung des Überwachungswertes in der Größenordnung unrealistisch ist. Aber auch bei dem Verfahren der Nachfällung sowie der Flockungfiltration wird mit Fällmittel gearbeitet. Daher ist die vorgeschlagene Zweipunkt-fällung ein Investitionsschritt in die richtige Richtung.

Unbestritten kommt es bei der Vorfällung zur Senkung des Kohlenstoffs im Zulauf der Belebung durch Fällungsreaktionen und Mitfällungsreaktionen und der Entnahme des Primärschlammes in der Vorklärung. Bei der Simultanfällung mit der Dosierstelle am Ablauf des Sandfangs werden dieselben Reaktionen hervorgerufen. Die gefällten Kohlenstoffverbindungen verbleiben dennoch in der Belebung, da kein Abzug erfolgt. Fraglich ist, ob die gefällten Kohlenstoffverbindungen für die Biologie greifbar sind oder ob diese Stoffe für Bakterien nicht nutzbar sind. Zur Klärung dieser Fragestellung bedarf es weiterer Forschung auf diesem Gebiet.

Abschließend muss gesagt werden, dass die Arbeitssicherheit und die Betriebsstabilität der Kläranlage an erster Stelle stehen. Außerdem kann die Optimierung der Phosphor-Elimination im Widerspruch zur Energieeffizienz stehen.

## Literaturverzeichnis

Ante, Angela, (1997): Reaktionstechnische Untersuchung und Simulation zur erhöhten biologischen Phosphatelimination aus kommunalen Abwässern. Aachen Shaker Verlag

Baumann, Peter, Dr., (1994): „Nachfällung mit Kalkhydrat“ oder „Biologische Phosphorentfernung“ – ein Vergleich. München: Oldenbourg Kommissionsverlag

Baumann, Peter, Dr., (Hrsg) (2003): Phosphatelimination aus Abwasser. München: Oldenbourg Industrieverlag

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg) (Februar 2013): Arbeitsblatt DWA-A 115 Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers. Hennef

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg) (Mai 2011): Arbeitsblatt DWA-A 202 Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Hennef

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg) (2011): Grundlagen für den Betrieb von Belebungsanlagen mit gezielter Stickstoff- und Phosphorelimination. Stuttgart

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg) (April 2012): Abwasserbeseitigung. Druckhaus Köthen

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Hrsg) (2015): Handbuch für Umwelttechnische Berufe Band 3 // Fachkraft für Abwassertechnik. Druckhaus Köthen

Gujer, Peter, Dr., (2007): Siedlungswasserwirtschaft. 3., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

Helmer, Christine Dr.-Ing.; (2003): Einfluss von Temperatur und Stoßbelastung auf Mikroflora der belebten Schlämme in P-P-Anlagen Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 89

Helmer, Christine Dr.-Ing.; Kunst, Sabine, Dr.-Ing., (1996): Grundlagen der vermehrten biologischen Phosphorelimination. (ATV), Bonn: JF.Carthaus GmbH & Co.

Hesse, Gerd; Seyfried, Carl F. (1989): Literaturstudie zur Phosphatelimination mit Schwerpunkt Fällungsreinigung. Hannover: Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik d. Univ (Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, 73).

Kermer, Klaus (1991): Physikalisch-chemische Verfahren. zur Wasser-, Abwasser-, Schlammbehandlung und Wertstoffrückgewinnung. Teil 1. 3., stark bearb. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen

Kunst Sabine (1991): Untersuchungen zur biologischen Phosphorelimination im Hinblick auf ihre abwassertechnische Nutzung. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 77

Schneider, Ralf (2011): Grundlagen für den Betrieb von Belebungsanlagen mit gezielter Stickstoff- und Phosphorelimination. 3. Aufl. Stuttgart: DWA Landesverb. Baden-Württemberg.

Schönberger, R. (1990): „Optimierung der biologischen Phosphorelimination bei der kommunalen Abwasserreinigung“. Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, TU München, Nr. 93

Teichfischer, Thomas (1994): Der Einfluß schwankender Abwasserzusammensetzungen auf die vermehrte biologische Phosphatelimination und Möglichkeiten zur Prozessstabilisierung. Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 57

Witt, Peter Christian, (1997): Untersuchung und Modellierungen der biologischen Phosphatelimination in Kläranlagen. München: Oldenbourg Industrieverlag

Dr. Dinkler, Hermann (2017): Lebensdauer von Kunststofftanks, VdTÜV, Online verfügbar unter [https://www.vdtuev.de/themen/anlagensicherheit/umgang\\_mit\\_wassergefaehrdenden\\_stoffen/lebensdauer-von-kunststofftanks](https://www.vdtuev.de/themen/anlagensicherheit/umgang_mit_wassergefaehrdenden_stoffen/lebensdauer-von-kunststofftanks), zuletzt geprüft am 01.08.2017.

Köhler GmbH (2015/16): Abwasserkatalog, Labor und Lehrmittel Vertrieb Koblenz, Online verfügbar unter [http://www.koehlerchemie.com/repository/koehler/files/infocenter/kataloge/katalog\\_klaeranlagen.pdf](http://www.koehlerchemie.com/repository/koehler/files/infocenter/kataloge/katalog_klaeranlagen.pdf), zuletzt geprüft am 30.07.2017.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2017): Abwasserabgabegesetz – Leitfaden zum Vollzug -, Online verfügbar unter <https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/57510>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.

Dr. Börnick, Hilmar (2005/06): Vorlesung Wasseranalytik, TU Dresden, Online verfügbar unter <http://docplayer.org/5391151-Vorlesung-wasseranalytik.html>, zuletzt geprüft am 13.07.2017.

Barjenbruch, Matthias, (2017): Seminarunterlagen: Weitergehende P-Elimination: Berlin

Jäger, Christian, (2017): Laboruntersuchungen mit der Feralco Deutschland GmbH am 20.04.2017: Nienburg/Weser

Scheer, Holger, (2017): Seminarunterlagen: Praxishinweise zur Betriebsoptimierung: Essen

Wiese, Jürgen, (2015): Vorlesungsunterlagen: Abwasserreinigung: Fulda

Wiese, Jürgen, (2015): Vorlesungsunterlagen: Schlammbehandlung: Fulda

Wiese, Jürgen, (2017): Vorlesungsunterlagen: Energieeffizienz Teil 3 Beispielkläranlage: Fulda

# Anhang

## 10 Wasserbehörde

Als maßgebenden Punkt zum Thema Grenzwerte war ein Gespräch mit einer Wasserbehörde unumgänglich, da diese zuständig sind für den Vollzug des Wasserhaushaltsgesetzes, der Wassergesetze der Länder und deren Rechtsverordnungen in Deutschland.

Bezüglich dieses Systems wird, laut Wassergesetz des Landes Sachsen-Anhalt im Abschnitt 2, eine Einteilung in drei Stufen vorgenommen. Diese teilen sich auf in:

- Oberste Wasserbehörde: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie in Magdeburg
- Obere Wasserbehörde: Landesverwaltungsamt in Halle an der Saale
- Untere Wasserbehörde: Landkreise und kreisfreie Städte

Hinsichtlich der Kläranlage Silstedt fällt der Zuständigkeitsbereich auf den Landkreis Harz, welcher seine untere Wasserbehörde bei der Friedrich-Ebert-Straße 42 in 38820 Halberstadt besetzt.

### 10.1 Aktuelle wasserrechtliche Erlaubnis

Zur Feststellung der Richtigkeit des behördlichen Verfahrens wurde anhand des Wasserhaushaltsgesetzes in umgekehrter Reihenfolge nachgeprüft, ob eine wasserrechtliche Erlaubnis zutrifft. Der Inhalt einer wasserrechtlichen Erlaubnis gewährt laut § 10 Absatz 1 des WHG „...die Befugnis [...] ein Gewässer zu einem bestimmten Zweck in einer nach Art und Maß bestimmten Weise zu benutzen.“ In § 8 Absatz 1 ist festgelegt, dass eine Benutzung eines Gewässers einer Erlaubnis oder Bewilligung bedarf. Als Benutzung eines Gewässers ist im Sinne des Gesetzes unter anderem das Einbringen und Einleiten von Stoffen in dieses beschrieben im § 9 Abs. 1 WHG.

Das Gesetz selbst zählt zu dem Anwendungsbereich § 2 WHG nach für oberirdische Gewässer. Dabei werden oberirdische Gewässer nach § 3 WHG der Begriffsbestimmungen angesprochen. Das sind jene Gewässer, welche ständig oder zeitweise in Betten fließendes, stehendes oder aus Quellen wild abfließendes Wasser führen.

Im Einzelfall des WAHB und der Holtemme, als Vorfluter trifft die Gesetzgebung zu. Die noch bestehende Wasserrechtliche Erlaubnis wurde damals am 08.10.2015 von Herrn Hohmann aus der unteren Wasserbehörde in Halberstadt erteilt. Darin sind folgende Überwachungswerte festgelegt.

**Tabelle 25 Grenzwerte der bestehenden wasserrechtlichen Erlaubnis der KA Silstedt [aus behördlichen Bescheid: 2015]**

CSB	BSB <sub>5</sub>	Gesamt N	NH <sub>4</sub> -N	Gesamt P
[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
50	8	8	3	1,5

Die Werte werden mit dem Probenahmeverfahren einer qualifizierten Stichprobe im Ablauf der Kläranlage ermittelt. Die Einleitmenge des Abwassers ist limitiert und unterscheidet sich im Trockenwetterabfluss und im Regenwetterabfluss.

- Trockenwetterabfluss:
  - 296 Liter/Sekunde;
  - 1.065 Kubikmeter/Stunde;
  - 16.000 Kubikmeter/Tag
- Regenwetterabfluss:
  - 890 Liter/Sekunde

Die Jahresschmutzwassermenge wurde auf 4.200.000 m<sup>3</sup>/a festgelegt.

Zusätzlich sind Kontrollen aufgrund der Eigenüberwachungsverordnung des Landes Sachsen-Anhalt durchzuführen.

Die wasserrechtliche Erlaubnis gemäß § 10 WHG für den WAHB der KA Silstedt ist dem Anhang beigelegt.

## **10.2 Zukünftige wasserrechtliche Erlaubnis**

Um das Ausmaß der Verschärfung des Überwachungswertes des Abwasserparameters Phosphor einzuschätzen, wurde ein Gespräch mit der zuständigen Wasserbehörde am 24.03.17 gesucht.

Einleitend zu dem Gespräch wurde ich von dem Technischen Leiter und Zweitprüfer der Bachelorarbeit Herrn Sterzik begleitet. Empfangen wurden wir durch den Sachgebietsleiter Herr Kundler und dem zuständigen technischen Sachbearbeiter Herr Klisch. Im Gespräch wurde die aktuelle Situation nochmal geschildert und besprochen. Danach folgte in der Konversation das Thema "Grenzwertverschärfung in der wasserrechtlichen Erlaubnis ab 01.01.2022".

Die Behörde erwähnte dabei zum einen ein Dokument des gewässerkundlichen Landesdienstes und zum anderen ein Gutachten von Herrn Uwe Halbach, der als Sachverständiger für Abwasserbeseitigung eine Plausibilitätsprüfung der Verschärfung von Überwachungswerten der Kläranlage Holtemme im März 2008 verfasst hatte.

Die Behörde stimmte damit überein, dass die Kläranlage Silstedt eine geringe Auswirkung auf die Holtemme besitzt und das Gebiet Silstedt, wie aus dem Gutachten hervor geht, in Abschnitten von Ackerflächen dominiert wird. Gleichwohl steht dem die Aussage des gewässerkundlichen Landesdienstes gegenüber. Dieser führte jeweils ca. 6 Messungen oberhalb (Messstelle 411070) und unterhalb (Messstelle 411071) der Einleitung der Kläranlage Silstedt sowohl 2013, als auch 2014 durch. 2013 ist angemerkt worden, dass die Belastungsdaten im Wesentlichen auf eine Stoßbelastung zurückzuführen sind. Dennoch

wurde bei der Parallelmessung 2014, wie in Tabelle 27 „Auszug aus dem Dokument des gewässerkundlichen Landesdienstes“ dargestellt, eine Erhöhung der Parameter festgestellt.

Schlussfolgernd wurde darin gesagt: „Eine nach dem Befristungszeitraum fortwährende und damit dauerhafte Nutzung der Holtemme wäre – basierend auf dem gegenwärtigen Kenntnisstand – aus gütewirtschaftlicher Sicht unter der Voraussetzung der Verminderung der ÜW-P<sub>ges</sub> möglich.“ (Stellungnahme des gewässerkundlichen Landesdienstes). Um eine Verbesserung der Gewässergüteklasse im wasserchemischen Gewässerzustand zu erzielen, sollte ein Richtwert in Höhe von 0,065 mg P<sub>ges</sub>/l erreicht werden.

Dennoch sind die ermittelten Werte des gewässerkundlichen Landesdienstes unvermittelte Werte, die auf einem mathematisch-theoretischen Ansatz beruhen und daher mit Vorsicht zu genießen sind.

**Tabelle 26 Auszug aus der Stellungnahme des gewässerkundlichen Landesdienstes [Auszug der unteren Wasserbehörde: 2015]**

Jahresmittelkonzentrationen / O <sub>2</sub> : Jahresminimum / pH: Jahresminimum bzw. –maximum Vgl. mit OW bzw. UQN*												
Parameter	O <sub>2</sub> - Min [mg/l]	ZS <sub>7</sub> [mg/l]	TOC [mg/l]	NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	NO <sub>2</sub> -N [mg/l]	NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	TIN [mg/l]	o-PO <sub>4</sub> P [mg/l]	P <sub>ges</sub> [mg/l]	Cl [mg/l]	pH <sub>min</sub>	pH <sub>max</sub>
OW / UQN*	7	5,2	7	0,3	–	11,3*	–	0,07	0,1	200	6,5	8,5
Messstelle	2013 n=6											
411070	9,7	2,2	5,7	0,01	0,01	1,78	1,80	0,02	0,04	40,1	7,5	8,5
411071	9,7	3,3	7,3	0,33	0,07	2,47	2,87	0,23	0,31	60,6	7,4	8,2
Messstelle	2014 n=5/6											
411070	8,4	2,1	5,3	0,01	0,006	1,3	1,34	0,015	0,04	29	7,4	8,6
411071	8,4	2,5	6,5	0,01	0,014	2,0	2,06	0,102	0,17	51	7,3	8,1

▲ OW / UQN nicht eingehalten

Zwei Gründe sind in dem Fall ausschlaggebend für den Verlauf der Bachelorarbeit. Zum einen der rechtliche Rahmen der Unteren Wasserbehörde sowie der fachlichen Stellungnahme des gewässerkundlichen Landesdienstes. Zum anderen die Gegebenheit, dass die Zeitspanne bis zur neuen wasserrechtlichen Erlaubnis noch relativ lang ist und derzeit sich auch andere Bundesländer, beispielsweise Hessen mit niedrigeren Grenzwerten auseinandersetzt. Aufgrund dessen sind zwei Optionen möglich, die die Kläranlage Silstedt ab 2022 erwarten könnte.

- Fallbeispiel 1: Gleiche Überwachungswerte für den neuen Bewilligungszeitraum
- Fallbeispiel 2: Verschärfte Überwachungswerte für den neuen Bewilligungszeitraum

Demzufolge wird für die Bearbeitung der Bachelorarbeit, hinsichtlich beider Fallbeispiele, ein allgemein greifendes Optimierungskonzept vorgeschlagen.



# 11 Betriebsdaten

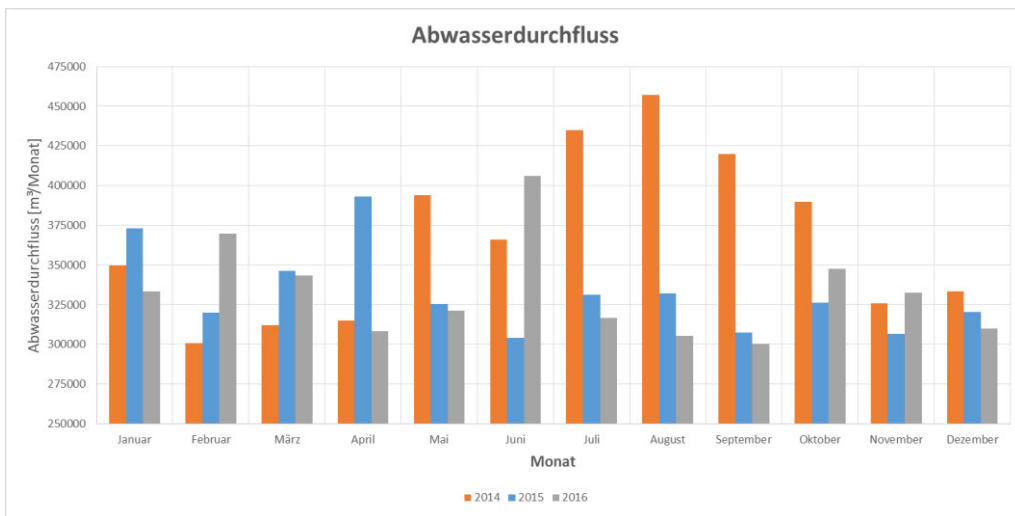


Abbildung 36 Abwasserdurchfluss der Monate Januar bis Dezember aus 2014 bis 2016 [Betriebstagebuch: 2017]

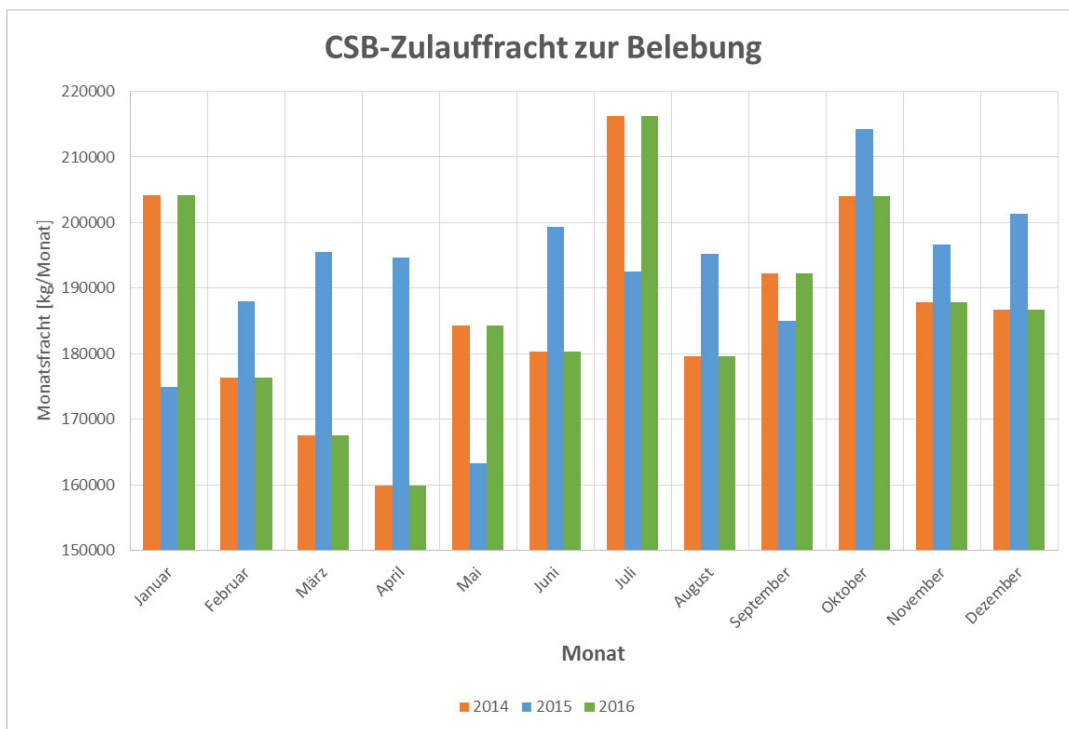


Abbildung 37 CSB Zulaufrecht zur Belebung der Monate Januar bis Dezember aus 2014 bis 2016 [Betriebstagebuch: 2017]

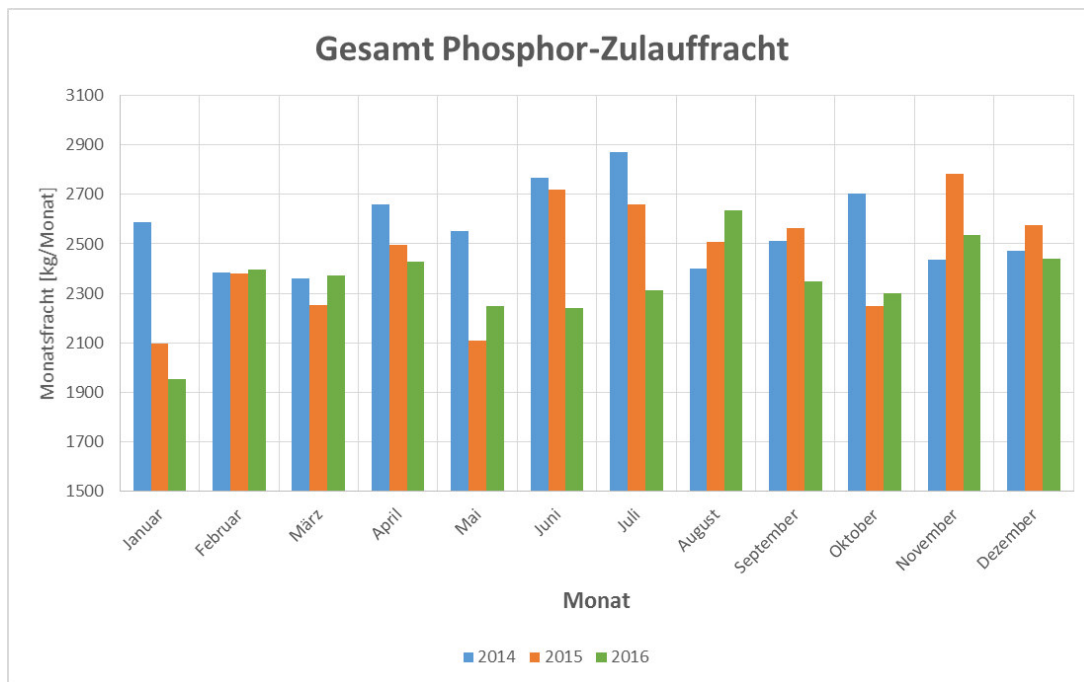


Abbildung 38 Gesamt Phosphorfracht der Monate Januar bis Dezember aus 2014 bis 2016 [Betriebstagebuch: 2017]

## 12 Versuchsdaten

Tabelle 27 Auslitern der Fällmitteldosierung für 29 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017]

Datum	Volumen ml	Zeit s	Umrechnung		Sollwert Liter/Stunde	Abweichung vom Mittelwert
			L/s	L/h		
30.03.2017	1000	124	0,00806	29,03	29	1,59
	1000	128	0,00781	28,13		
	1000	128	0,00781	28,13		
	1000	126	0,00794	28,57		
	1000	125	0,00800	28,80		
	1000	126	0,00794	28,57		
Mittelwerte der Berechnung			0,00793	28,54		

Tabelle 28 Auslitern der Fällmitteldosierung für 28 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017]

Datum	Volumen ml	Zeit s	Umrechnung		Sollwert Liter/Stunde	Abweichung vom Mittelwert
			L/s	L/h		
30.03.2017	1000	128	0,00781	28,13	28	1,33
	1000	134	0,00746	26,87		
	1000	130	0,00769	27,69		
	1000	128	0,00781	28,13		
	1000	132	0,00758	27,27		
	1000	130	0,00769	27,69		
Mittelwerte der Berechnung			0,00767	27,63		

Tabelle 29 Auslitern der Fällmitteldosierung für 27 Liter pro Stunde [eigene Quelle: 2017]

Datum	Volumen ml	Zeit s	Umrechnung		Sollwert Liter/Stunde	Abweichung vom Mittelwert
			L/s	L/h		
22.03.2017	1000	134	0,00746	26,87	27	1,31
	1000	130	0,00769	27,69		
	1000	139	0,00719	25,90		
	1000	134	0,00746	26,87		
	1000	136	0,00735	26,47		
	1000	138	0,00725	26,09		
Mittelwerte der Berechnung			0,00740	26,65		

# 13 Produktblatt Eisen-II-Chlorid



**KRONOS**  
ecochem®

Technische Information 1.05B

## **KRONOFLOC** Eisen-II-chlorid-Lösung

Zugelassenes Fällungsmittel zur  
**Schwefelwasserstoff-Elimination aus Biogas**  
nach Düngemittelverordnung

Formel	FeCl <sub>2</sub>
Lieferform	grüne, ca. 20%ige Lösung

<b>Wirksubstanz</b>	<b>87 g Fe/kg <math>\Delta</math> (1,56 mol/kg)</b>
---------------------	---

Typische Zusammensetzung	Eisen (Fe <sup>2+</sup> )	8,7	%
	Calcium (Ca)	2,8	%
	Mangan (Mn)	1,4	%
	Magnesium (Mg)	0,6	%
	Salzsäure (HCl)	0,3	%
	Unlösliches	< 0,003	%

Spurengehalte	As	< 0,1 mg/kg*	Pb	7 mg/kg
	Cd	< 0,1 mg/kg*	Sb	< 0,1 mg/kg*
	Cr	3 mg/kg	Se	< 0,1 mg/kg*
	Cr <sup>VI</sup>	< 0,01 mg/kg	Tl	< 0,2 mg/kg*
	Cu	0,3 mg/kg	Zn	8 mg/kg
	Hg	< 0,01 mg/kg*	AOX	< 2 mg/kg*
	Ni	< 8 mg/kg	PFT	< 0,01 mg/kg*

\* Nachweisgrenze

Dichte	1,365 g/cm <sup>3</sup>
--------	-------------------------

Anlieferung	los in gummiertem Tankfahrzeug; abgefüllt in Kunststoffcontainern oder -kannen
-------------	--

KRONOFLOC

Gefrierpunkt	ab ca. -15 °C beginnende Kristallisation* * Durch Zusatz von Wasser kann die Kristallisation verhindert werden, so dass für den Winterbetrieb keine Einschränkungen bestehen.
pH-Wert	<1
Anwendungs- konzentration	unverdünnt in Lieferform oder bis max. 1:10 mit Wasser verdünnt
Empfohlene Werkstoffe	alle gängigen Kunststoffe mit Ausnahme von Polyamid
Lagerung	Der Lagertank sollte einmal jährlich gespült werden
Sicherheit	Vor Gebrauch des Produktes bitte die Hinweise im Sicherheitsdatenblatt beachten.

KRONOFLOC



Diese Ausführungen sollen dem Verbraucher Hinweise und Anregungen geben; sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sind unverbindlich. Gesetzliche Bestimmungen, auch hinsichtlich etwaiger Schutzrechte Dritter, müssen in jedem Fall beachtet werden.

**KRONOS INTERNATIONAL, Inc.**  
**KRONOS ecochem**  
 Peschstr. 5 · D-51373 Leverkusen  
 Telefon +49 214 356-0 · Telefax +49 214 44117  
 E-Mail: kronos.ecochem@kronoswww.com  
 www.kronosecochem.com

© KRONOS 2011

DS2242D/811D



## FERRIFLOC

### Eisen-III-chloridsulfat-Lösung

#### Fällungs- und Flockungsmittel zur

- Phosphatelimination
- Blähschlamm bekämpfung
- Entlastungsflockung
- Schwefelwasserstoffelimination
- Trink- und Brauchwasseraufbereitung
- Kühlturmzusatzwasseraufbereitung
- Schlammkonditionierung
- Industrieabwasserreinigung

Formel	FeClSO <sub>4</sub>
Lieferform	dunkelbraune, ca. 41%ige Lösung
Europa-Norm	EN 891 (DIN 19602)

**Wirksubstanz 123 g Fe/kg  $\triangleq$  2,20 mol/kg**

Typische Zusammensetzung	Eisen (Fe <sup>3+</sup> )	12,3 %
	Eisen (Fe <sup>2+</sup> )	0,07 %
	Unlösliches	< 0,005 %

Spurengehalte	As < 0,1 mg/kg*	Pb < 1 mg/kg
	Cd < 0,1 mg/kg*	Sb < 0,1 mg/kg*
	Cr 4 mg/kg	Se < 0,1 mg/kg*
	Cu 0,5 mg/kg	Zn 45 mg/kg
	Hg < 0,01mg/kg*	AOX 8 mg/kg*
	Ni 29 mg/kg	

\* Nachweisgrenze

Dichte 1,52 g/cm<sup>3</sup>

Anlieferung lose in gummiertem Tankfahrzeug  
oder abgefüllt in Kunststoffcontainern  
oder -kannen

FERRIFLOC



pH-Wert	<1
Verbrauch an Säurekapazität ( $K_{S4,3}$ )	0,44 mmol/100 mg
Anwendungskonzentration	unverdünnt in Lieferform oder bis max. 1:30 mit Wasser verdünnt
Gefrierpunkt	<p>ab ca. <math>-10^{\circ}\text{C}</math> starke Zunahme der Viskosität*  ab ca. <math>-15^{\circ}\text{C}</math> beginnende Kristallisation*</p> <p>* Durch gezielte Verdünnung mit Wasser kann sowohl die Viskosität gesenkt als auch die Kristallisation verhindert werden, so dass für den Winterbetrieb keine Einschränkungen bestehen.  Tabellen für die Eigenverdünnung (Vorlage von Wasser in den Lagertank) sind auf Anfrage erhältlich.  Unter dem Stichwort „Winterware“ ist eine verdünnte (modifizierte) Qualität mit 10 % Eisen (Dichte: 1,4 g/cm<sup>3</sup>) auch direkt ab Werk lieferbar.  Bei geringen Durchsatzmengen und langen Lagerzeiten sollte ganzjährig mit verdünntem Produkt gearbeitet werden.</p>
Lagerung	Bei $\leq 5$ TKW-Anlieferungen FERRIFLOC pro Jahr wird eine Wasservorlage in den Lagertank von 5-10% oder 1-2m <sup>3</sup> pro Anlieferung empfohlen. Unabhängig davon sollte der Lagertank jährlich gespült werden.
Empfohlene Werkstoffe	alle gängigen Kunststoffe mit Ausnahme von Polyamid
Sicherheit	Vor Gebrauch des Produktes bitte die Hinweise im Sicherheitsdatenblatt beachten.

Diese Ausführungen sollen dem Verbraucher Hinweise und Anregungen geben; sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sind unverbindlich. Gesetzliche Bestimmungen, auch hinsichtlich etwaiger Schutzrechte Dritter, müssen in jedem Fall beachtet werden.

**KRONOS INTERNATIONAL, Inc.**  
**KRONOS** ecochem  
Peschstr. 5 · D-51373 Leverkusen  
Telefon +49 214 356-0 · Telefax +49 214 44117  
E-Mail: kronos.ecochem@kronosww.com  
www.kronosecochem.com

© KRONOS 2011

DG2248D/811D



# 15 KA Wernigerode Screening Feralco



## Wasser- und Abwasserverband Holtemme-Bode Kläranlage Silstedt

Laboruntersuchung mit der  
Feralco Deutschland GmbH  
am 20.04.2017



### Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage .....	2
2. Anforderungen und Zielsetzungen der Untersuchung .....	2
3. Vorgehen .....	3
4. Darstellung der Ergebnisse .....	6
4.1 Phosphatfällleistung bei verschiedenen Dosierungen .....	6
4.2 Interpretation der Ergebnisse .....	7
4.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	7
5. Schlussfolgerungen und Vorschlag für das weitere Vorgehen .....	8
6. Dank .....	8



1 von 8

Feralco Deutschland GmbH, Gr. Drakenburger Str. 93 – 97, DE - 31582 Nienburg/Weser  
Telephone: +49 (0) 50 21/ 98 84 70, Fax: +49 (0) 50 21/ 98 84 81, info.de@feralco.com, www.feralco.de



## 1. Ausgangslage

Auf der Kläranlage Silstedt wird zur P-Fällung eine Eisen-(II)-Chlorid-Lösung der Firma Kronos eingesetzt. Im Rahmen einer Bachelorarbeit und in Hinblick auf zukünftig strengere Phosphatgrenzwerte soll im Labor untersucht werden, inwieweit eine Optimierung der P-Fällung möglich ist.

Am 20. April 2017 wurden daher Laborversuche auf der KA Silstedt mit drei Fällmitteln auf Basis Eisen und Aluminium der Firma Feralco durchgeführt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit in Bezug auf ihre Eigenschaften bei der Phosphatfällung mit einem weiteren Produkt der Firma Kronos (Ferriflock Eisen-(III)-Chloridsulfat) verglichen. Der direkte Vergleich mit Eisen-(II)-Chlorid ist im Labor nur schwer möglich, da es zur P-Fällung aufoxidiert werden muss. Die getesteten Aluminium-Eisen Mischprodukte haben zusätzlich eine Wirkung auf die Fädigkeit (*Microthrix parvicella*), was im Labor jedoch nicht untersucht werden kann.

Ziel der Versuche war es ein Produkt zu finden, welches besonders in Hinblick auf die zukünftig strengeren Grenzwerte für Phosphat effizient ist.

## 2. Anforderungen und Zielsetzungen der Untersuchung

1. Die Ablaufgrenzwerte müssen zuverlässig eingehalten werden.
2. Es soll gegenüber dem Einsatz des bisher verwendeten Fällmittels unter Betrachtung aller relevanten Parameter ein wirtschaftlicher bzw. verfahrenstechnischer Vorteil entstehen.
3. Das neue Fällmittel muss mit der gegebenen Anlagensituation verträglich sein.
4. Die Bildung von Fadenbakterien soll zuverlässig unterbunden werden.
5. Das Fällmittel darf nicht zu einer Verschlechterung der Schlammkonditionierung führen.
6. Das neue Produkt darf nicht zu einer Verschlechterung der Schwermetallgehalte im Klärschlamm führen
7. Der H<sub>2</sub>S Gehalt im Klärgas muss konstant auf einem niedrigen Niveau bleiben



2 von 8

Feralco Deutschland GmbH, Gr. Drakenburger Str. 93 – 97, DE - 31582 Nienburg/Weser  
Telephone: +49 (0) 50 21/ 98 84 70, Fax: +49 (0) 50 21/ 98 84 81, [Info.de@feralco.com](mailto:Info.de@feralco.com), [www.feralco.de](http://www.feralco.de)





### 3. Vorgehen

Für die Untersuchung bei der Kläranlage Silstedt wurden drei Produkte der Firma Feralco in Gegenüberstellung mit dem Produkt *Ferriflock* der Firma Kronos auf ihre Effizienz bei der Phosphatfällung in Form von Jar Versuchen getestet. Insgesamt gab es vier Serien mit 3 verschiedenen Dosiermengen der Fällmittel von 30, 60 und 90 µl/l. Für alle Serien wurde die gleiche Stichprobe unbehandelten Rohwassers dem Zulauf der Belebung entnommen.

Die Produkte wurden mithilfe eines elektronisch gesteuerten Flokkulators in das Abwasser eingerührt. Zunächst wurde eine kurze Schnellrührphase von 30 Sekunden eingestellt, dann erfolgte eine 10-minütige Langsamrührphase mit einer anschließenden 30-minütigen Sedimentation. An allen Rührstellen wurde diese Verfahrensweise exakt eingehalten.

Für die Ermittlung der PO<sub>4</sub>-P Konzentrationen nach dem Fällprozess, wurde dem Überstand der abgesetzten Proben mit einer Spritze eine Menge von etwa 30 ml entnommen und durch einen Spritzenfilter gedrückt. Die Werte für PO<sub>4</sub>-P wurden aus diesen Proben bestimmt.



Abbildung 1: Versuchsaufbau Jar – Test, 6 x 1Liter Probe , Zugabe der Fällmittel in 3 Mengenabstufungen je Produkt



Abbildung 2: Sedimentierte Proben nach der Behandlung mit FERRAPAC 1625 bei Dosierungen von 30, 60 und 90 µl/l v.l.n.r



Abbildung 3: Sedimentierte Proben nach der Behandlung mit Eisen-(III)-Chlorid bei Dosierungen von 30, 60 und 90 µl/l v.l.n.r



Abbildung 4: Sedimentierte Proben nach der Behandlung mit FERRAPLUS bei Dosierungen von 30, 60 und 90 µl/l.v.l.n.r



Abbildung 5: Sedimentierte Proben nach der Behandlung mit FERRIFLOC bei Dosierungen von 30, 60 und 90 µl/l.v.l.n.r



## 5. Schlussfolgerungen und Vorschlag für das weitere Vorgehen

Auf Grundlage der Laborversuche bietet sich ein Betriebsversuch mit Eisen-(III)-Chlorid zur Phosphatfällung an.

Die hier vorgeschlagenen Produkte funktionieren auf vielen Kläranlagen nachweislich sehr gut bei der P-Fällung. Die getesteten Aluminium-Eisen Mischprodukte haben zudem auch eine sehr gute Wirkung gegen Fadenbakterien der Art *Microthrix parvicella* und halten so dauerhaft den Schlammindex niedrig und verhindern das Aufkommen von Schwimmschlamm.

## 6. Dank

Wir bedanken uns bei allen Beteiligten für die Bereitstellung des Labors, der tatkräftigen Hilfe von Herrn Weber und dem uns entgegengebrachten Vertrauen.

Feralco Deutschland GmbH

Nienburg, den 05. Mai 2017

Dipl.-Ing. (FH) Christian Jaeger  
Vertrieb Wasserchemie

8 von 8

Feralco Deutschland GmbH, Gr. Drakenburger Str. 93 - 97, DE - 31582 Nienburg/Weser  
Telephone: +49 (0) 50 21/ 98 84 70, Fax: +49 (0) 50 21/ 98 84 81, info.de@feralco.com, www.feralco.de



## 16 Fadenbakterienuntersuchung



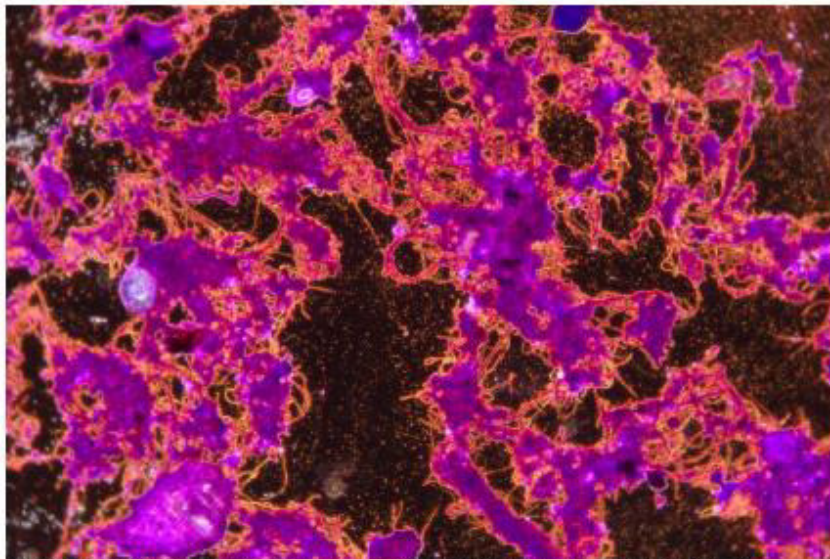
### Auswertungsbericht der Fadenbakterienuntersuchung

Zur Belebtschlammprobe vom

20. April 2017

---

Wasser- und Abwasserverband Holtemme - Bode  
Kläranlage Silstedt



Kristallviolett färbung, Vergrößerung 100 – fach: ISV Fädigkeit Stufe 3 - 4

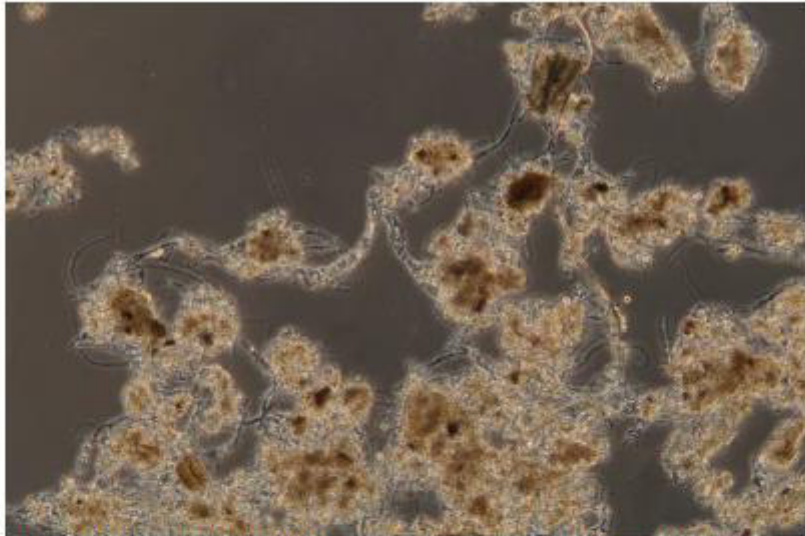


Abb. 1 Lebendpräparat, Vergrößerung 100 – fach: mittelgroße, überwiegend kompakte Flocken, mäßige Vernetzung mit Fadenbakterien

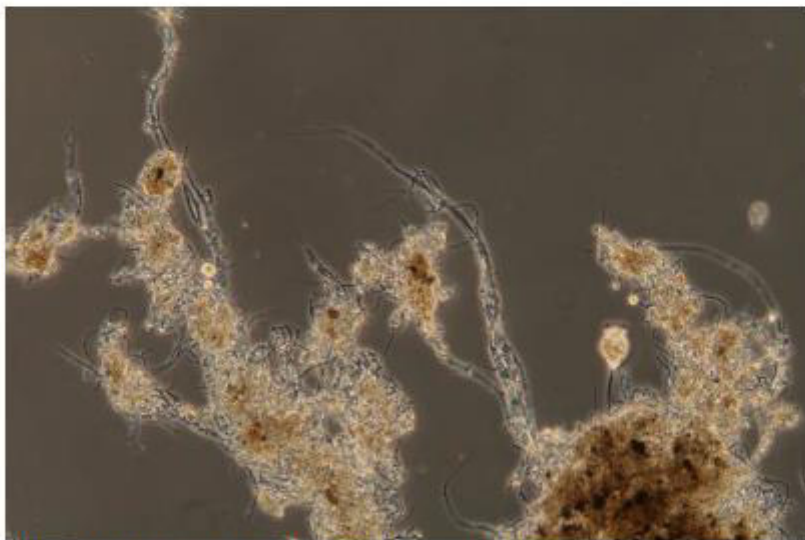


Abb. 2 Lebendpräparat, Vergrößerung 100 – fach

**Fadenbakterien:** Häufigkeit (0 bis 4):

Chloroflexi (Typ 1851, 0041/0675)	1
Typ 0092 (nachweisbar)	0
Microthrix parvicella	2
Nicht bestimmt	1

<b>ISV-Fädigkeit (0 bis 7):</b>	3 - 4
---------------------------------	-------

Name: Microthrix parvicella					
Dominanz: dominant Schlammtyp: BB			Datum Probenahme: 20.04.2017 Häufigkeit: Stufe 2 (Stufen 0 – 4)		
Verzweigung	fehlt	X	Gram-Färbung	positiv	X
	unechte			negativ rot	
Beweglichkeit	echte		Fadendurchmesser	< 1,0 Mikron	X
	S-Granula	keine		1,0 - 2,2 Mikron	
Querwand	vorhanden		Aufwuchs	> 2,5 Mikron	
	vorhanden nach S-Test			wesentlich	
Fadenform	deutlich sichtbar		Einschnürungen	fehlend/gering	
	nicht/kaum sichtbar			deutlich sichtbar	
Neisser-Färbung	gerade		Zellform	scheibenförmig	
	gebogen	X		kugelig	
	gekrümmt	X		stäbchenförmig	
Scheide	Granula positiv	X	Scheide	quadratisch	
	graublau positiv			rechteckig	
Biologie			Gegenmaßnahmen		
B <sub>75</sub> 0,05 – 0,10 kg BSB <sub>5</sub> / (kg TS * d), Temperatur 10 – 15 °C optimal, langkettige Fettsäuren im Zulauf, Ammonium als Stickstoffquelle			leicht erhöhte Häufigkeit, jedoch relativ kurz derzeit und daher muss aktuell nicht behandelt werden		



### Bildnachweis

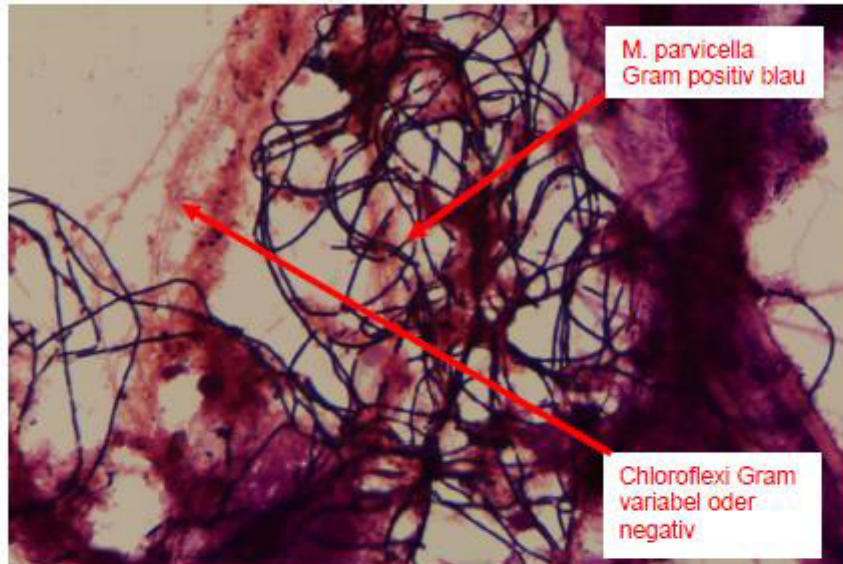


Abb. 3 Gram - Färbung, Vergrößerung 1000 – fach: Microthrix parvicella und Chloroflexi (Fäden mit Aufwuchs)



Abb. 4 Gram - Färbung, Vergrößerung 1000 – fach: Chloroflexi Fadenbakterien (hier Typ 1851) mit Aufwuchs

Christian Jaeger - Feralco Deutschland GmbH



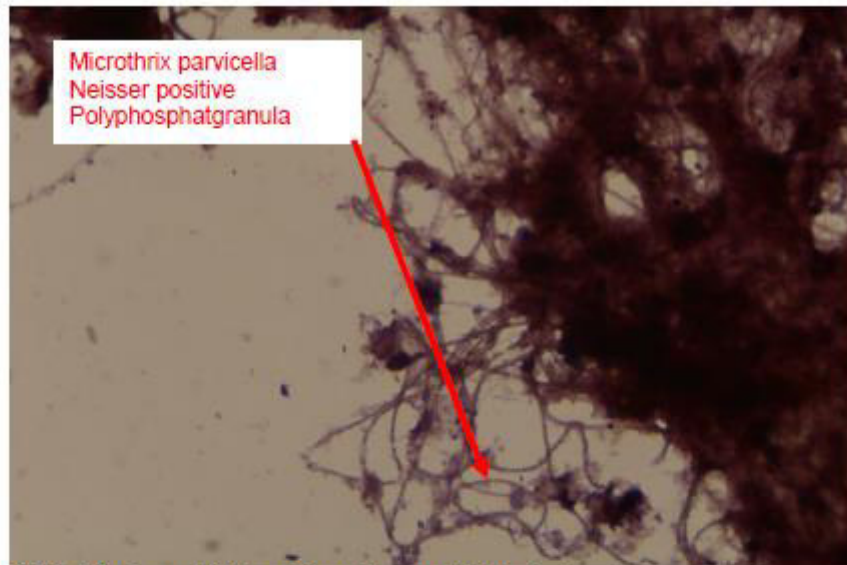


Abb. 5 Neisser - Färbung, Vergrößerung 1000 – fach

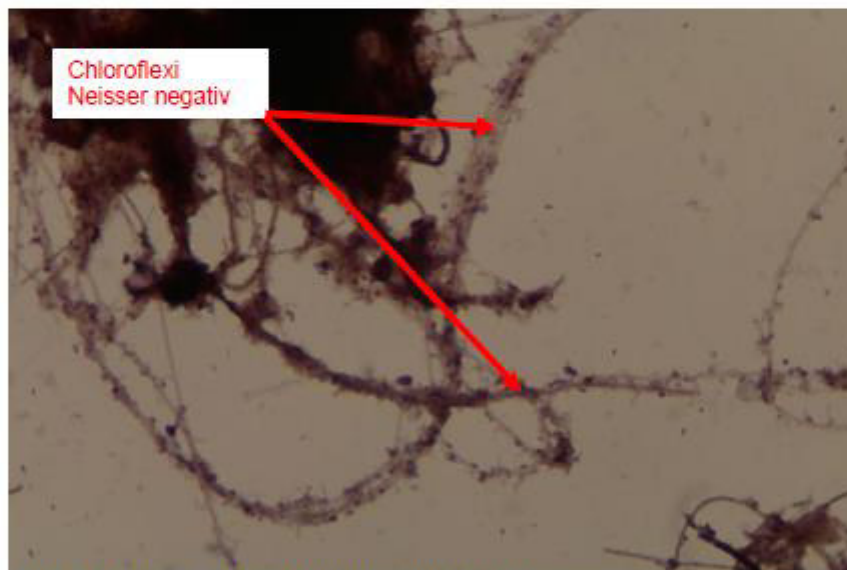


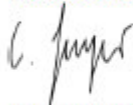
Abb. 6 Neisser - Färbung, Vergrößerung 1000 – fach

**Schlussfolgerung:**

Die untersuchte Belebtschlammprobe zeigt eine indexrelevante Fädigkeit der Stufe 3 - 4 an. Die Flockenstruktur ist insgesamt gut, die Flocken sind mittelgroß mit kompakten Kernen. Zu beobachten ist eine mäßige Vernetzung der Flocken mit Fadenbakterien (im Wesentlichen bedingt durch Chloroflexi und *Microthrix parvicella*). Der Schlamm ist artenreich besiedelt mit Anzeigern für eine gute Sauerstoffversorgung (*Aspidisca cicada* und *Vorticella convallaria*).

Was die Fädigkeit angeht, ließe sich mit Zugabe eines geeigneten Eisen-Aluminium Mischproduktes eine Reduzierung bei *Microthrix parvicella* und damit auch beim Schlammindeks erzielen. Eine entsprechende Umstellung ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht erforderlich. Ein niedriger Schlammindeks kann die Ablaufwerte beim Betrieb von nur einer Nachklärung ggf. verbessern (höhere Sichttiefe bei hydraulischer Belastung).

**Feralco Deutschland GmbH**



Dipl.-Ing (FH) Christian Jaeger

**Vertrieb Wasserchemie**

# 17 Großtechnischer Versuch

Tabelle 30 Betriebsauswertung der Kläranlage zum großtechnischen Versuch [eigene Quelle]

Wochentag		Dosierung Eisen II	Dosierung Eisen III	Zulauf Durchfluss	Sichttiefe Nachklärung	Ablauf KA 2h Mischprobe	CSB			Gesamt-P				Ortho-Phosphat				
		l/h	l/h	m³/d	m	Absetzbare Stoffe	Zulauf KA	Zulauf Belebung	Ablauf KA	Zulauf KA	Zulauf Belebung	Qualifizierte Stichprobe		Ablauf KA	Zulauf Belebung	Qualifizierte Stichprobe		Ablauf KA
							24h Mischprobe	2h Mischprobe	24h Mischprobe	8 Uhr	13 Uhr	2h Mischprobe	24h Mischprobe	8 Uhr	13 Uhr	2h Mischprobe		
24. Jul	Montag	25,00	2,00	20461	1,50	0,20	-	504	30,9	-	7,70	-	2,90	0,47	3,52	-	0,217	0,117
25. Jul	Dienstag	25,00	2,00	55037	1,50	0,20	440	467	33,6	5,86	6,32	-	-	0,95	2,87	-	-	0,654
26. Jul	Mittwoch	25,00	2,00	75076	1,40	< 0,20	165	-	25,1	2,28	-	-	-	0,45	-	-	-	-
27. Jul	Donnerstag	35,00	2,00	-	-	-	157	181	21,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28. Jul	Freitag	30,00	2,00	36327	2,40	< 0,20	262	355	25,3	2,43	2,62	-	-	0,87	-	-	-	-
29. Jul	Samstag	30,00	4,00	28326														
30. Jul	Sonntag	30,00	4,00	24314														
31. Jul	Montag	30,00	4,00	22732	2,10	< 0,20	246	314	28,1	3,57	4,30	-	-	1,33	-	0,970	0,988	0,922
01. Aug	Dienstag	30,00	4,00	24191	2,00	< 0,20	332	363	24,2	4,05	4,95	-	-	1,05	1,980	0,717	0,678	0,727
02. Aug	Mittwoch	40,00	4,00	20502	2,00													
03. Aug	Donnerstag	40,00	4,00	19932	2,00	0,40	325	477	30,3					1,22	2,160	0,378	0,409	0,706
04. Aug	Freitag	40,00	4,00	18066	2,00	0,20	351	481	27,5	5,23	6,07			0,87	2,330	0,466		0,517
05. Aug	Samstag	40,00	4,00	17572														
06. Aug	Sonntag	40,00	4,00	15140														
07. Aug	Montag	40,00	4,00	15716	2,00	0,20	432	594	26,6	6,50	6,54	0,89	1,24	1,17	2,650	0,732	0,732	0,805
08. Aug	Dienstag	40,00	4,00	16132	2,00	0,40	422	456	29,7	6,54	7,78	0,85	0,83	1,33	2,530	0,624	0,491	0,745
09. Aug	Mittwoch	40,00	4,00	15423	2,00	0,40	448	617	30,1	7,14	11,20	0,55	0,51	0,85	2,550	0,379	0,290	0,447
10. Aug	Donnerstag	35,00	4,00	16198	2,00	0,20	497	515	31,7	6,94	8,06	0,55	0,69	0,78	2,690	0,359	0,260	0,309
11. Aug	Freitag	35,00	4,00	27233														
12. Aug	Samstag	35,00	4,00	21340														
13. Aug	Sonntag	35,00	4,00	18236														
14. Aug	Montag	35,00	4,00	17729	2,00	0,50	383	305	22,9	4,98	4,56	0,72	0,75	0,89	2,189	0,641	0,618	0,702
15. Aug	Dienstag	35,00	4,00	17401	2,00	0,50	417	400	31,2	5,21	5,99	0,55	0,45	1,15	2,110	0,461	0,366	0,743
16. Aug	Mittwoch	35,00	4,00	17004	2,00	< 0,20	449	469	28,2	6,63	7,33	0,31	0,27	0,61	1,940	0,198	0,237	0,254
17. Aug	Donnerstag	35,00	4,00	16415	2,00	0,50	451	485	29,3	6,50	6,26	0,30	0,19	0,57	2,090	0,153	0,084	0,239
18. Aug	Freitag	30,00	4,00	19307	2,00	0,50	446	481	25,6	6,58	7,43	0,20	0,12	0,38	2,310	0,093	0,042	0,161

# 18 Auszüge TÜV

INSTITUT FÜR KUNSTSTOFFVERARBEITUNG - RWTH Aachen - 52074 Aachen - Germany

KOK 17-043

Institut für Wärme und Oeltechnik e.V.  
Technischer Leiter  
Herr Dipl.-Ing. oec. Lambert Lucks  
Süderstraße 73 a  
20097 Hamburg  
Deutschland

EINGEGANGEN  
17. Mai 2017  
Erl...

Institutsleiter  
Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung  
Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

Sellener Weg 201, 52074 Aachen, Germany  
Telefon: +49 (0) 241 80-33805 (Zentrale)  
Telefax: +49 (0) 241 80-92262  
E-Mail: zentrale@iv.rwth-aachen.de  
www.iv-aachen.de

Deutsche Bank Aachen  
BLZ / Bank Code 390 700 20  
Kto.-Nr. / A/c No 2 185 143  
BIC (Swift-Code): DEUTDE33  
IBAN: DE32 3907 0320 0218 3143 00

USt-IdNr. / VAT-ID-No. DE 121 689 882

Unser Zeichen / Our ref.

rd

Ansprechpartner / Name

Dr. rer. nat. Rainer Dahmann

Telefon / Telephone

0241 / 80 - 25928

Datum / Date

E-Mail/E-mail

Träger des Instituts:  
Vereinigung zur Förderung des Instituts  
für Kunststoffverarbeitung in Industrie und  
Handwerk an der RWTH Aachen e.V.

• Vorstandsvorsitzender:  
Dr.-Ing. Herbert Müller  
Vorstandsvorsitzender Surteco SE,  
Butenweeren

• 1. stellv. Vorsitzender:  
Dr.-Ing. Werner Feldtkorn  
Geschäftsführung Dr. Feldtkorn AG  
Kreuzlingen, Schweiz

• 2. stellv. Vorsitzender:  
Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg  
Rektor der RWTH Aachen, Aachen

• Dr.-Ing. Martin Giersbeck  
Vice President – Corporate Research  
Plastics Engineering  
Robert Bosch GmbH, Remmingen

• Dr. Gulsacad Güllük  
Vice President  
New Markets and Products  
BASF SE, Ludwigshafen

• Dr.-Ing. E.h. Herbert Kraibühler  
vormals Geschäftsführer Technik  
Aberg GmbH & Co. KG, Loßburg

• Dieter Philipp  
Präsident der Handwerkskammer Aachen, Aachen

• Dipl.-Volkswirt Bernd Reiffenhäuser  
CEO Reiffenhäuser GmbH & Co. KG  
Maschinenfabrik, Troisdorf

• Dr. Joachim Simon  
Senior Vice President Business Unit  
Polycarbonates Global Innovations  
Covestro Deutschland AG, Leverkusen

• Geschäftsführer:  
Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

 Mitglied

Ihr Schreiben vom 02. Mai 2017

Unsere Auftragsnummer: 273807

Stellungnahme PE-Tanks

Sehr geehrter Herr Lucks,

vielen Dank für Ihr Schreiben vom 02. Mai 2017.

Ihren Ausführungen entnehme ich, dass die DVS-Richtlinien 2205 zur Lebensdauerbegrenzung von PE-Tanks auf 30 Jahre herangezogen werden, da ein Nachweis der Standsicherheit nicht erbracht werden könne. Offenbar wird das Absinken des Kriechmoduls als begrenzend interpretiert.

Hierzu nehme ich wie folgt Stellung:

- Der Geltungsbereich DVS 2205-1 bezieht sich auf Hinweise für „Verarbeiter von Halbfabrikaten“, adressiert also den Behälterbau. PE-Tanks sind nach meiner Kenntnis typischerweise blasgeformt. Bei der Fertigung von blasgeformten Behälter gibt es keine Halbfabrikate. PE-Tanks entziehen sich daher diesem Geltungsbereich. Die Ableitung einer Lebensdauer für PE-Tanks ist allein aus diesem Grunde nicht schlüssig.
- Die Norm liefert Kriterien zur Auslegung auf eine Produktlebensdauer, nicht jedoch zur Festlegung von Kriterien eines Lebensdauerendes. Darin ist ein enormer Unterschied zu sehen, weil bei der Auslegung auf eine geforderte Lebensdauer verschiedenste Unwägbarkeiten derart berücksichtigt werden müssen, dass die Eigenschaften, hier insbesondere die Werkstoffeigenschaften, auch am Ende der beabsichtigten Lebensdauer noch garantiert ausreichend erhalten sind. Die tatsächliche Lebensdauer hängt aber stark von der individuellen Produktgeschichte ab und wird sicher nicht für alle PE-Tanks nach 25 Jahren identisch sein.

- Nach Ihren Erfahrungen zeigt sich die Alterung von PE-Tanks relativ langfristig und gutmütig durch Verformung. Dies kann ich insofern nachvollziehen, als dass Heizöle eher einen weichmachenden Effekt auf PE haben. Ein unstetiges sprödes Versagen ohne vorhergehende Verformung ist aus diesem Grunde und unter Beachtung der Beanspruchungskollektive von PE-Tanks grundsätzlich nicht zu erwarten.
- Seit vielen Jahren führen wir Untersuchungen an PE-Tanks durch. Unter anderem werden dabei mechanische Kennwerte erfasst. Als Beispiel (FA 271240) kann ein amtlich für Heizöl und Dieselloil zugelassener PE-Tank, Baujahr 1972, aufgeführt werden, der nach 37 Betriebsjahren im Bodenbereich einen E-Modul von  $E = 652 \pm 74$  MPa aufweist. Der E-Modul liegt damit nach 37 Jahren Einsatz in der gleichen Größenordnung wie die Werte in Tabelle 2 der DVS 2205-1 – ungeachtet dessen, ob dies überhaupt ein Auslegungskriterium gewesen ist. Dieses Beispiel kann nicht zur Generalisierung dienen, zeigt aber dass eine pauschale Begrenzung der Lebensdauer fahrlässig ist.

Zu guter Letzt möchte ich erwähnen, dass seit den 1960er Jahren erdverlegte PE-Rohre das Gasversorgungsnetz prägen. Diesen Rohren war von den Herstellern bei der Fertigung pauschal eine Lebensdauer von 50 Jahren zugesagt worden. Dies führte im Jahre 2010 nicht etwa dazu, dass das komplette PE-Rohrnetz ersetzt wurde, sondern sinnvollerweise zu einer erneuten Bewertung des realen Zustandes durch repräsentative Untersuchungen. Man hat festgestellt, dass diese Rohre kaum einer Ermüdung oder Alterung unterlegen waren und schätze daher fundiert die Restlebensdauer im Jahr 2010 auf weitere 50 Jahre. Dadurch konnte ein erheblicher volkswirtschaftlicher Schaden abgewendet werden, ohne Sicherheitsrisiken einzugehen.

Ein Lebensdauerende allein anhand der Auslegungskriterien zu definieren, ist aus meiner Sicht abwegig. Hierzu bedarf es der individuellen Zustandsbewertung der Produkte. Dazu stehe ich Ihnen gerne unterstützend zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen



Dr. rer. nat. R. Dahlmann  
- Leiter KAP -