DAHLEM

STADT HALLE (WESTFALEN)

STUDIE ZUR SPURENSTOFFELIMINATION AUF DER KLÄRANLAGE BRANDHEIDE

KURZBERICHT

Essen, im Oktober 2016

INHALTSVERZEICHNIS

1	**Vorbemerkungen**	**3**
1.1	Veranlassung	3
1.2	Angaben zur Kläranlage	4
2	**Abwasseranalyse**	**5**
3	**Varianten Kläranlage Halle-Brandheide**	**8**
3.1	Variante 1: PAK-Dosierung in Kontaktbecken	8
3.1.1	Verfahrensmerkmale	8
3.1.2	Bewertung	9
3.2	Variante 2: GAK-Filtration	10
3.2.1	Verfahrensmerkmale	10
3.2.2	Bewertung	12
3.3	Variante 3: Ozonierung	12
3.3.1	Verfahrensmerkmale	12
3.3.2	Bewertung	13
4	**Vergleich & Empfehlung**	**15**
4.1	Wirtschaftlicher Variantenvergleich	15
4.1.1	Investitionskosten	15
4.1.2	Betriebskosten	16
4.1.3	Kostenvergleichsrechnung	17
4.2	Technischer Variantenvergleich	18
4.3	Zusammenfassung und EMPFEHLUNG	19
4.3.1	Zusammenfassung	19
4.3.2	Empfehlung	20
5	**Literatur**	**21**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Fließbild der Kläranlage Halle-Brandheide	4
Abbildung 3.1:	Fleißbild der Variante 1 (PAK Verfahren)	9
Abbildung 3.2:	Fließbild der Variante 2 (GAK Filtration)	11
Abbildung 3.3:	Fleißbild der Variante 3 (Ozon Verfahren)	13

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Einordnung der Ergebnisse SMP 2015 auf der KA Halle-Brandheide anhand von Referenzwerten	6
Tabelle 2.2:	Vergleich gemessener Werte aus dem 3. Monitoringzyklus mit den Orientierungswerten zur Bewertung des chemischen Zustandes des Laibaches	7
Tabelle 4.1:	Vergleich Investitionskosten (netto, gerundet)	15
Tabelle 4.2:	Vergleich Betriebskosten (netto)	17
Tabelle 4.3:	Vergleich Kostenvergleichsrechnung (gerundet)	18
Tabelle 4.4:	Technischer Variantenvergleich	19

1 VORBEMERKUNGEN

1.1 VERANLASSUNG

Kommunales Abwasser enthält neben Feststoffen, Sauerstoff zehrenden Verbindungen und Nährstoffen eine große Anzahl organischer Spurenstoffe (Mikroschadstoffe). Laut Deutscher Bundestag „subsumiert der Begriff anthropogene Spurenstoffe verschiedene Stoffe mit Umweltrelevanz, die … neben den bereits bekannten prioritären Schadstoffen verstärkt als Mikroverunreinigungen in Kläranlagen und Fließgewässern nachgewiesen wurden. Es handelt sich hierbei vor allem um Humanarzneimittel- und Kosmetikrückstände, Waschmittelinhaltsstoffe, Rückstände von Pflanzenschutzmitteln und Dünger sowie Nanopartikel aller Art. Anthropogene Spurenstoffe gelangen vor allem über Abwässer in die Umwelt […].“ [1].

Mikroverunreinigungen können dabei bereits in sehr niedrigen Konzentrationen (ng/L bis µg/L) nachteilige Wirkungen auf die aquatischen Ökosysteme haben und / oder die Gewinnung von Trinkwasser aus dem Rohwasser negativ beeinflussen.

Bei der Planung und dem Betrieb kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen besteht bis zum derzeitigen Zeitpunkt (Stand 07/2016) jedoch noch keine verbindliche Vorgabe zur gezielten Elimination definierter organischer Mikroschadstoffe.

Resultierend aus den Anforderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie an den Zustand europäischer Oberflächengewässer sowie der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) könnte in Zukunft jedoch eine gezielte Elimination vom Gesetzgeber gefordert werden.

Vor diesem Hintergrund beauftragte die Stadt Halle (Westfalen) Dahlem Beratende Ingenieure, mit einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Halle-Brandheide.

Diese Studie wird hiermit vorgelegt.

1.2 ANGABEN ZUR KLÄRANLAGE

Die Kläranlage umfasst die folgenden Stufen:

- Mechanische Reinigungsstufe mit Feinrechen, belüftetem Sandfang
- Biologische Reinigungsstufe mit zwei Schreiber-Klärwerken, einem separatem Nachklärbecken und drei Schönungsteichen. Die Schreiber-Klärwerke beinhalten eine Vorklärung, eine Tropfkörperanlage zum Kohlenstoffabbau und zur Nitrifikation, eine Nachklärung und einem Kalt-Faulraum zur Schlammstabilisierung.
- Chemische Reinigungsstufe mit Phosphatfällung im Zulauf des Sandfangs

Die nachfolgende Abbildung 1.1 zeigt das Fließbild der Kläranlage Halle-Brandheide.

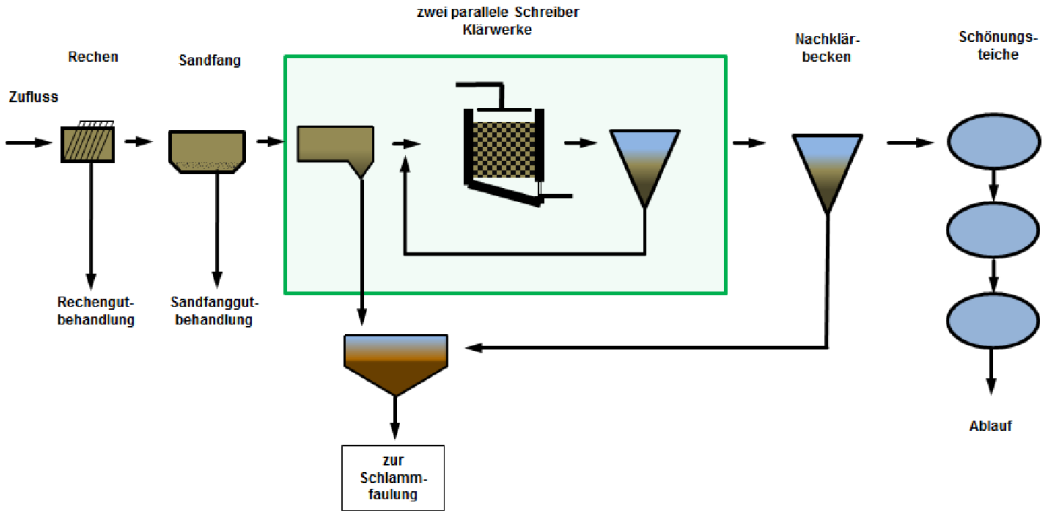

Abbildung 1.1: Fließbild der Kläranlage Halle-Brandheide

2 ABWASSERANALYSE

Im Rahmen eines Sondermessprogramms wurde der Ablauf der Kläranlage beprobt. Dies dient zur Bewertung der vorliegenden Mikroschadstoffe nach der biologischen Reinigung sowie zur Abschätzung weiterer Eliminationspotenziale durch zusätzliche Reinigungsschritte.

Hierzu wurden bereits vorliegende Messreihen der Stadt Halle des Jahres 2014 verwendet sowie ein neues Messprogramm zur Erhebung von aktuellen Messwerten im Jahr 2015 durchgeführt.

Die im Messprogramm 2015 untersuchten Parameter berücksichtigen ausgewählte Leitparameter, die nach derzeitigem Stand eine besondere Relevanz für die Spurenstoffelimination besitzen. Das Messprogramm wurde in Abstimmung mit der zuständigen Behörde (Bez. Regierung Detmold) aufgestellt.

Die Auswahl der Leitparameter erfolgte unter Berücksichtigung von gesetzlichen Grundlagen, dem Stand der Forschung sowie wirtschaftlichen Abwägungen. Hierbei wurde auf Basis einer Auswertung zahlreicher Studien seitens Dahlem B.I., eine Häufigkeitsliste von untersuchten Stoffen innerhalb aktueller Studien aufgestellt und die derzeitige Lage der rechtlichen Gesetzmäßigkeiten analysiert.

Zusätzlich wurden Entwürfe zur Aktualisierung und Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen an die europaweiten Vorgaben durch die Umsetzung der WRRL analysiert. Nach umfassender Analyse der vorliegenden gesetzlichen Grundlagen, dem Stand der Forschung und den politischen Rahmenbedingungen konnten aus diesen Unterlagen die Relevanz bzw. der Handlungsbedarf für die diskutierten und zu überprüfenden Stoffe abgeleitet werden.

Als Leitparameter konnten demnach 10 Einzelstoffe aus den Stoffgruppen

- Arzneimittelrückstände
- Korrosionsschutzmittel
- Röntgenkontrastmittel

definiert werden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die analysierten Einzelstoffe mit deren zusammengefassten Ergebnissen des Sondermessprogrammes 2015 (SMP 2015) aufgeführt.

Tabelle 2.1: Einordnung der Ergebnisse SMP 2015 auf der KA Halle-Brandheide anhand von Referenzwerten

Stoffgruppe/ Einzelstoff	Einheit	Konzentrationen	Referenzwerte [2]
Arzneimittel- Rückstände		18.-20.08.2015	
Diclofenac	µg/l	0,52	2,5
Sotalol	µg/l	0,16	n.v.
Carbamazepin	µg/l	0,25	1,1
Sulfamethoxazol	µg/l	0,13	0,64
Metoprolol	µg/l	0,91	1,6
Clarithromycin	µg/l	0,25	n.v.
Industriechemikalien			
Benzotriazol	µg/l	2,5	3,4
Röntgenkontrastmittel			
Iomeprol	µg/l	20	1,7
Amidotrizoesäure	µg/l	5,75	2,5
Bromid	mg/l	**<0,1**	n.v.

Legende zur Einordnung der Messwerte gegenüber Referenzwerten.

- Grün: unauffälliger Messwert, keine Bedenken; Wert liegt im Bereich der Vergleichswerte bzw. darunter
- Orange: leicht erhöhter Messwert, dennoch keine Bedenken; Wert liegt im Bereich von ca. 50 % oberhalb des Vergleichswertes
- Rot: auffällig hoher Messwert, gesonderte Betrachtung erforderlich; Wert liegt > 50 % der Literaturvergleichswerte
- n.n.: „nicht nachweisbar“ Wert nicht einordbar, kein Referenzwert vorhanden bzw. Bestimmungsgröße nicht klein genug
- n.v.: „nicht vorhanden“ es liegt kein Referenzwert vor

Um den spezifischen Handlungsbedarf für Stoffgruppen/ Einzelstoffe abschätzen und die Notwendigkeit einer weiteren Reinigungsstufe für die Kläranlage Halle Brandheide belegen zu können, ist eine Verifikation der gemessenen Werte erforderlich. Diese erfolgt durch eine Einordnung der gemessenen Werte anhand von Referenzwerten in Tabelle 2.1.

Die Referenzwerte beziehen sich auf Kläranlagenabläufe ohne Einfluss einer Stufe zur Elimination von Spurenstoffen. Dabei wurden 205 Kläranlagenabläufe untersucht.

In der Tabelle 2.1 erfolgt damit eine Gegenüberstellung ausgewählter Messwerte der Kläranalage Brandheide mit den beschriebenen Referenzwerten.

Aus der Tabelle lässt sich entnehmen, dass die Konzentrationen der Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure und besonders Iomeprol im Ablauf des Teiches auf der Kläranlage oberhalb der Referenzwerte liegen. Insbesondere das Röntgenkontrastmittel Iomeprol liegt mit einer Konzentration von 20 µg/l ca.12 mal höher als der Referenzwert der Vergleichskläranlagen.

Zur Einschätzung der Gewässerbelastung durch die Einleitung von Spurenstoffen in den Vorfluter Laibach wurde die Bewertung der GÜS Messstelle 725213 unterhalb der Einleitungsstelle genommen. In der Tabelle 2.2 erfolgt die Darstellung der Orientierungswerte für die Einordnung des chemischen Zustandes des Gewässers in der WRRL und die gemessenen Werte aus dem 3. Monitoringzyklus unterhalb der Einlaufstelle.

Tabelle 2.2: Vergleich gemessener Werte aus dem 3. Monitoringzyklus mit den Orientierungswerten zur Bewertung des chemischen Zustandes des Laibaches

Stoffgruppe/ Einzelstoff	Einheit	Ökotox. Qualitätskriterium Orientierungswerte [3]	Messstelle unterhalb der KA 24.02.14	Messstelle unterhalb der KA 04.03.15
Arzneimittel- Rückstände				
Diclofenac	µg/l	0,1	0,47	0,25
Sotalol	µg/l	0,1	0,1	0,046
Carbamazepin	µg/l	0,5	0,26	0,092
Sulfamethoxazol	µg/l	0,15	0,12	0,076
Metoprolol	µg/l	7,3	0,33	0,23
Clarithromycin	µg/l	0,02	0,15	0,12
Industriechemikalien				
Benzotriazol	µg/l	10	n.v.	n.v.
Röntgenkontrastmittel				
Iomeprol	µg/l	0,1	7,4	4,2
Amidotrizoesäure	µg/l	0,1	3,7	0,78
Bromid	mg/l	**<0,1**	n.v.	n.v.

	sehr gut	MW<=0,1•OW
	gut	0,1<MW<=OW
	mäßig	OW<MW<=2•OW
	unbefriedigend	2•OW<MW<=10•OW
	schlecht	MW>10•OW
	keine Aussage	

Die Probenahme am 24.02.2014 erfolgte an einem Trockenwettertag, wohingegen die Probenahme am 04.03.2015 an einem Regenwettertag erfolgte. Man erkennt eine höhere Spurenstoffkonzentration an dem Trockenwettertag, da dort ein höherer Abwasseranteil aus der Kläranlage vorherrscht. An dem Regenwettertag wird das Abwasser aus der Kläranlage durch das Regenwasser verdünnt. Die erhöhten Konzentrationen der gemessenen Röntgenkotrastmittel lassen sich auf die Kläranlage zurückführen. Dort wurden auch erhöhte Konzentrationen im Ablauf gefunden. Erfahrungsgemäß haben Krankenhäuser einen erhöhten Ausstoß an Röntgenkontrastmitteln. Ein Großteil wird jedoch aufgrund ambulanter Behandlungen durch das häusliche Abwasser abgeführt.

Der Laibach ist kurz hinter der Quelle bei Halle ein leistungsschwacher Vorfluter. Punkteinleitungen, wie die des Abwassers aus der Kläranlage, sind als kritisch zu betrachten. Im Trockenwetterfall kann der Abwasseranteil einen Großteil des im Laibach geführten Wassers ausmachen.

3 VARIANTEN KLÄRANLAGE HALLE-BRANDHEIDE

3.1 VARIANTE 1: PAK-DOSIERUNG IN KONTAKTBECKEN

3.1.1 Verfahrensmerkmale

Die Variante 1 umfasst die Zugabe von Pulveraktivkohle in einer vorgeschalteten Absorptionsstufe mit Abtrennung der Kohle in einem separaten Absetzbecken.

Der Teilstrom zur Aktivkohlebehandlung von 198 m³/h wird im Ablauf der Nachklärung abgetrennt.

Bei Regenwetter wird die Abwassermenge > 198 m³/h abgeschlagen. Sie fließt direkt in den Vorfluter.

Das neue Zulaufpumpwerk wird als funktionales Stahlbetonbauwerk mit Rohrschachtpumpen vorgesehen. Das gehobene Abwasser fließt anschließend den Kontaktbecken zu. Im Zulaufbereich der Kontaktbecken erfolgen die durchflussabhängige Zugabe der Pulveraktivkohle sowie die Zugabe der Rücklaufkohle aus dem Absetzbecken.

Das Kontaktbecken wird zweistraßig ausgeführt. Die Beckengeometrie ermöglicht eine Propfenströmung zur zielorientierten Anpassung der Dosierstellen.

Die Kontaktbecken werden zusätzlich mit Rührwerken ausgestattet, um eine ausreichende Durchmischung zu gewährleisten.

Der Absetzvorgang des Abwasser-Kohle-Gemisches in den nachfolgenden Sedimentationsbecken wird durch die Zugabe von Flockungsmittel (Metall-Salze) und Flockungshilfsmittel (Polymere) unterstützt.

Die Aktivkohledosierung erfolgt aus einem Silo mit nachgeschalteter Dosieranlage, in welcher die trocken gelagerte Aktivkohle mit Wasser versetzt und als Suspension dosiert wird. Die Dosieranlage der PAK-Zugabe ist direkt unterhalb des Silos angeordnet.

Durch eine Treibstrahlpumpe wird das Aktivkohle-Wasser-Gemisch zur Dosierstelle gefördert. Zum Anmaischen der Aktivkohle sowie für den Betrieb der Treibstrahlpumpe wird Abwasser aus dem Ablauf der Filtration verwendet.

Das Silo hat ein Nutz,volumen von 5 m³. Um Verklumpungen im Silo zu vermeiden, wird in regelmäßigen Abständen Druckluft zur Auflockerung der Aktivkohle eingeblasen.

Die Pulveraktivkohle wird in den Zulauf zum Kontaktbecken dosiert. Das PAK-Silo einschließlich Dosierstation wird ebenfalls auf der Grünfläche westlich der Filtration errichtet. Fäll- und Flockungshilfsmittel werden zwischen dem Kontakt- und Absetzbecken dosiert.

Die Absetzbecken werden als Rundbecken mit Umlaufräumer ausgeführt. Der Ablauf des Absetzbeckens erfolgt über eine Überfallkante und fließt zur Flockungsfiltration.

Die abgesetzte Kohle wird über 2 Rezirkulationspumpen zurück in das Kontaktbecken gefördert. Das Rückführverhältnis beträgt maximal 70 %. Die Überschusskohle wird über eine Pumpe aus dem Kontaktbecken in die Belebung gefördert.

Zur Sicherstellung einer unabhängigen Auswahl des Fällmittels der bereits vorhandenen P-Elimination, wird im unmittelbaren Bereich der 4. Reinigungsstufe eine zusätzliche

Fällmittel Lager- und Dosierstation vorgesehen. Analog hierzu wird in einem neuen Hochbauteil eine Lager- und Ansetzanlage für Flockungshilfsmittel vorgesehen.

Damit trotz Absetzbecken keine beladene Aktivkohle in den Schönungsteich gelangt, werden kontinuierlich gespülte Sandfilter als letzter Schutzstufe hinter den Absetzbecken angeordnet.

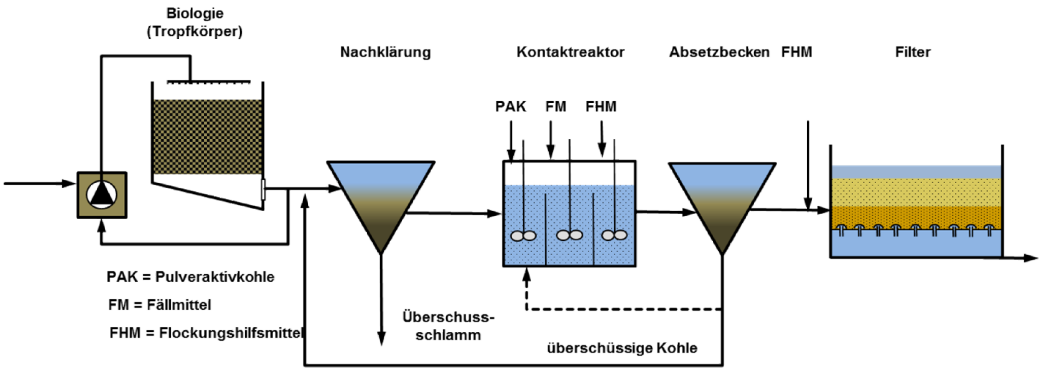

Abbildung 3.1: Fleißbild der Variante 1 (PAK Verfahren)

3.1.2 Bewertung

Im Fall der Umsetzung der Variante 1 sind die folgenden Punkte im Hinblick auf den Betrieb einer Mikroschadstoffelimination mittels PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken zu beachten:

- schnelle und effektive Adsorptionskinetik durch geringe Partikeldurchmesser
- Verfahren ist auch saisonal variabel einsetzbar, indem die Dosierung gesteigert oder abgemindert wird.
- Die Variante erfordert trotz geringer Maschinentechnik aufwändige und wartungsintensive Mess- und Regeltechnik.
- Minimierung der Betriebskosten durch Anpassung der Dosiermenge an Rohwasserbeschaffenheit und Ablaufziele möglich
- Umsetzung erfordert den Bau von zusätzlichem Beckenvolumen
- Anders als bei der Ozonierung findet hier eine Entnahme von Mikroschadstoffen aus dem Abwasserstrom statt.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass der Kohleschlamm einer Verbrennung zugeführt werden muss. Die Integration der Überschusskohle in den Schlammkreislauf ist möglich, erfordert jedoch eine thermische Verwertung der gesamten Schlammmenge. Alternativ ist eine separate Schlammbehandlung für die Pulveraktivkohle möglich. Dies erfordert eine zusätzliche Schlammbehandlungsstraße und lässt den Vorteil einer weiteren Beladung der Kohle im Belebungsbecken ungenutzt.

3.2 VARIANTE 2: GAK-FILTRATION

3.2.1 Verfahrensmerkmale

GAK wird nach der biologischen Stufe eingesetzt, d. h. das Abwasser durchströmt einen Raumfilter, der mit granulierter Aktivkohle gefüllt ist. Aufgrund der Restverschmutzung im Ablauf der biologischen Reinigung entwickelt sich auf den Kornoberflächen ein Biofilm.

Aktivkohlefilter werden mit einer Kontaktzeit (EBCT = empty bed contact time) von 5–30 Minuten und einer Filtergeschwindigkeit von 5–15 m/h ausgelegt [4]. Die Filterbetthöhe bewegt sich in der Größenordnung von 2 – 4 m. Ein wirtschaftlicher Vorteil der granulierten Aktivkohle liegt in der Möglichkeit, diese begrenzt zu regenerieren und so weniger neue Kohle zu benötigen.

Da selbst gut gereinigtes Abwasser noch 5−15 mg TSS/l (total suspendid solids/Liter) enthält, wird eine Vorfiltration und/oder bzw. eine erhöhte Rückspülung empfohlen, um Verstopfungen zu vermeiden [5].

Erhöhte Feststoffgehalte im Filterzulauf führen zu teilweise deutlich reduzierten Filtrationsintervallen von bis zu 6 h. Hierdurch sind viele Filteranlagen hydraulisch nicht mehr zu betreiben. Auf der einen Seite sind reine Wasserspülungen zur Filterregeneration nicht ausreichend. Auf der anderen Seite sind Luftspülungen zu minimieren um Abrasion zu vermeiden.

Die Filtrationswirkung der GAK Filtration bleibt auch bei relativ hohen AFS (abfiltrierbare Stoffe) von 20 – 30 mg/l bis zur Bestimmungsgrenze von ca. 3 – 4 mg/l erhalten [6].

Die gelösten Stoffe sorbieren im Filter einerseits an die Aktivkohleoberflächen, können aber auch biologisch abgebaut werden. Feststoffe werden im Filterbett ebenfalls zu einem großen Teil zurückgehalten. Bei der Beladung der Aktivkohle kommt es zu Konkurrenzsituationen zwischen verschiedenen Stoffen im Ablauf der Kläranlage.

Dies führt dazu, dass unproblematische Stoffe mit hoher Adsorbierbarkeit zur schnellen Belegung der Aktivkohle führen und diese nicht mehr zur Adsorbtion von Mikroschadstoffen zur Verfügung steht. Der Vorgang kann man nur begrenzt, durch selektiv wirksame Kornkohle entgegen wirken.

Ist die Standzeit zu gering, wird das Kosten-Nutzen-Verhältnis ungünstig. Es wird von einem wirtschaftlichen Betrieb Bettvolumina > 12.500 BTV bzw. Standzeiten > 12 Monaten ausgegangen.

Über die Standzeit, d. h. die Zeit, bis das Filtermaterial beladen ist und ausgetauscht werden muss, ist bisher wenig bekannt, hierzu sind Betriebserfahrungen nötig.

Es bestehen Abhängigkeiten zwischen Standzeit, Aktivkohle, Hintergrundverschmutzung, Konkurrenzreaktionen, Filtergeschwindigkeiten sowie weiteren Faktoren, welche im Rahmen dieser Studie nur ungenügend abgeschätzt werden können um einen belastbare Wirtschaftlichkeitsvergleich durchführen zu können.

Da die Standzeiten linear in die Betriebskosten der Variante eingehen, werden nachfolgend zwei Alternativen betrachtet, um den wirtschaftlichen Rahmen der Variante GAK-Filtration einzugrenzen.

Neubau GAK-Filtration

Hierbei wird der Neubau einer nachgeschalteten GAK-Filtration hinter den bestehenden Schönungsteich betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass Behandlung eines Teilstromes nach dem Schönungsteich eine geringere Feststofffracht aufweist, als der Ablauf der Nachklärung.

Da die Standzeiten ohne umfangreiche Voruntersuchungen nicht klar abschätzbar sind werden zwei Varianten betrachtet. Hierbei wird eine günstige, mit einer ungünstigen Standzeit verglichen.

1. Variante a: Standzeit Aktivkohle = 6 Monate
2. Variante b: Standzeit Aktivkohle = 12 Monate

Das erforderliche Filterbettvolumen ist in beiden Varianten gleich, da die Filtergeschwindigkeiten identisch sind.

Es ergeben sich unterschiedliche Betriebs- und Jahreskosten aufgrund der Standzeiten der Aktivkohle.

Beide Alternativen sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

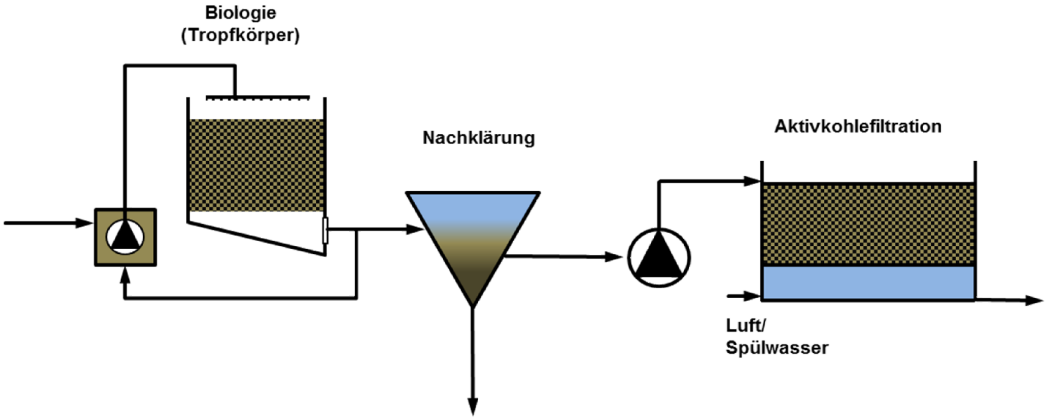

Abbildung 3.2: Fließbild der Variante 2 (GAK Filtration)

3.2.2 Bewertung

Im Fall der Umsetzung der Variante 2 sind die folgenden Punkte im Hinblick auf den Betrieb einer Mikroschadstoffelimination zu beachten:

- Schwächere Adsorptionskinetik durch größere Partikeldurchmesser
- Variante erfordert trotz geringer Maschinentechnik aufwändige und wartungsintensive Mess- und Regeltechnik.
- Keine Minimierung der Betriebskosten durch Anpassung der Dosiermenge an Rohwasserbeschaffenheit und Ablaufziele möglich.
- Anders als bei der Ozonierung findet hier eine Entnahme von Mikroschadstoffen aus dem Abwasserstrom statt.
- Eingesetzte Kohle kann bis zu einem gewissen Grad regeneriert werden (Anlagen zur Kohleregeneration sind jedoch wenig verbreitet)

Die Kostensicherheit ist vorab sehr gering, da die entscheidende Frage, wann das Filtermaterial beladen ist und infolgedessen ausgetauscht werden muss, ohne Versuche nicht beantwortet werden kann.

3.3 VARIANTE 3: OZONIERUNG

3.3.1 Verfahrensmerkmale

Bei der Variante 3 wird eine Ozonierung des Ablaufs der Nachklärbecken betrachtet. Zur Mikroschadstoffelimination mittels Ozonierung sind folgende Anlagenkomponenten erforderlich:

- Beschickungspumpwerk
- Ozon-Kontaktbecken mit Entgasungszone
- Sauerstofftank
- Ozonerzeugungsanlagen einschl. Notkühlung
- Ozondosieranlage
- Restozonentfernung

Der Ablauf der Nachklärung wird, wie bisher auch, dem neuen Zulaufpumpwerk der neuen Stufe zugeleitet. Es besteht die Möglichkeit, die Stufe zukünftig zu umfahren.

Die Auslegungswassermenge zur Bemessung der Ozonanlage wird analog zu den anderen Varianten mit 198 m^3/h gewählt.

Für den Ozoneintrag kommen prinzipiell 2 Verfahrensweisen in Frage. Der Eintrag des ozonhaltigen Gases über Diffusoren direkt in den Ozonreaktor liefert vergleichbare Ergebnisse zu einer Ozonzugabe über einen Mischinjektor, bei der das ozonreiche Luft-Ozon-Gemisch dem Zulauf des Ozonreaktors zugeführt wird. Ein Ozoneintrag über ein Injektorsystem wird vorwiegend bei kleineren Anlagen vorgesehen.

Der Ozonerzeuger stellt Ozon aus Sauerstoff nach dem Prinzip der stillen elektrischen Entladung her. Das erforderliche Einsatzgas Sauerstoff bzw. getrocknete Luft wird am Eingang des Ozonerzeugers mittels eines Druckminderers auf den Gasbetriebsdruck des Ozonerzeugers reduziert.

Die Aufstellung des Ozonerzeugers wird im neuen Betriebsgebäude im unmittelbaren Bereich des Ozonreaktors vorgesehen. Der Tank für den Flüssigsauerstoff inklusive des zugehörigen Verdampfers wird außerhalb des Gebäudes aufgestellt. Die Fläche rund um den Flüssigsauerstofftank muss entsprechend befestigt werden und für Schwerverkehr zugängig sein. Eine Nutzung von getrockneter Luft bzw. die Gewinnung von Reinsauerstoff mittels Druckwechsel-Adsorption (PSA) liegt bei Invest- und Betriebskosten deutlich oberhalb (> Faktor 2) der vorgeschlagenen Nutzung von Liefersauerstoff.

Die Kontaktbecken sind luftdicht abgedeckt, so dass, das im Bereich oberhalb des Wasserspiegels ansammelndes Ozon erfasst und über den Restozonentferner abgeleitet werden. Eine automatische Mess- und Regeltechnik überwacht indirekt den Behandlungserfolg über die kontinuierliche SAK Messung (Spektraler Absorptionskoeffizient Messung) und die Messung des überschüssigen Ozons im Abgas und regelt die Ozonerzeugung und -verteilung entsprechend dem aktuellen Bedarf.

Zusätzlich sind Plattenwärmetauscher zur Entkopplung des Ozonerzeugers vorgesehen, um den Ozonerzeuger indirekt mit dem behandelten Abwasser zu kühlen.

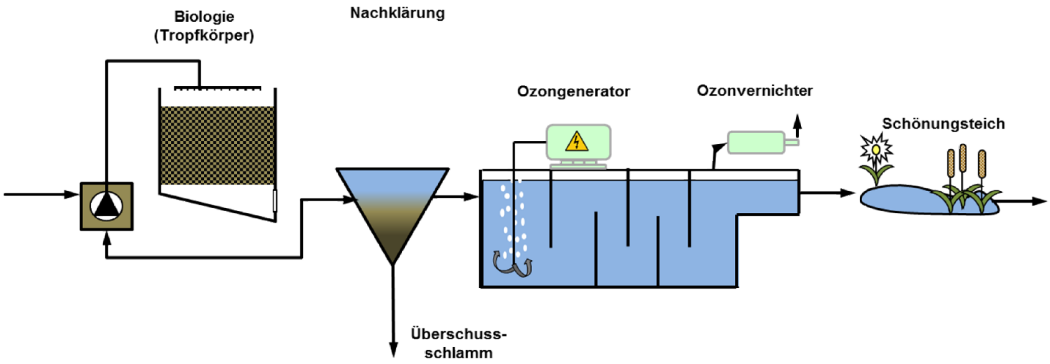

Abbildung 3.3: Fleißbild der Variante 3 (Ozon Verfahren)

3.3.2 Bewertung

Im Fall der Umsetzung der Variante 3 sind die folgenden Punkte im Hinblick auf den Betrieb einer Mikroschadstoffelimination zu beachten:

- Große Bandbreite an Stoffen eliminierbar jedoch keinerlei Eliminationsleistung auf spezifische adsorbierbare Stoffe (z.B. PFT, PFOS u.ä.).
- Hoher zusätzlicher Energieaufwand erforderlich
- Verfahren ist auch saisonal variabel einsetzbar, indem die Dosierung gesteigert oder abgemindert wird.

- Die Variante erfordert durch anspruchsvolle Maschinentechnik aufwändige und wartungsintensive Mess- und Regeltechnik.
- Minimierung der Betriebskosten durch Anpassung der Dosiermenge an Rohwasserbeschaffenheit und Ablaufziele möglich.
- Umsetzung erfordert den Bau von zusätzlichem Beckenvolumen, jedoch geringer als bei PAK-Dosierung
- Anders als bei der Adsorption findet keine Entfernung von Stoffen aus dem Abwasserstrom sondern lediglich eine Stofftransformation statt.
- Öko- und humantoxikologische Auswirkungen von entstehenden Metaboliten und Transformationsprodukten, sind bisher noch nicht abschließend erforscht (nachgeschaltete Filtration empfohlen)
- Keine erhöhte Schlammmenge bzw. andere Entsorgungsprodukte
- mindestens teilweise Hygienisierung des Abwassers

4 VERGLEICH & EMPFEHLUNG

4.1 WIRTSCHAFTLICHER VARIANTENVERGLEICH

Die nachfolgend dargestellten Kosten sind ausschließlich Nettokosten und werden in Investitionskosten, Betriebskosten und Jahreskosten unterschieden.

4.1.1 Investitionskosten

Die Vorabschätzung der Kosten wurde anhand von Kostenvergleichswerten (z.B. €/m³ Kontaktbecken) sowie der Auswertung von Investitionskosten bereits realisierter Anlagen durchgeführt [7].

Investitionskosten sind die zur Erstellung, zum Erwerb oder zur Erneuerung von Anlagen erforderlichen einmalig anfallenden Kosten. Diese setzten sich wie folgt zusammen:

- Kosten für die Bautechnik
- Kosten für die Maschinentechnik
- Kosten für EMSR-Technik (Elektro-Mess-Steuerungs-Regelungs-Technik)

Hieraus ergeben sich die folgenden Investitionskosten für die entsprechenden Varianten.

Tabelle 4.1: Vergleich Investitionskosten (netto, gerundet)

Investitionen	**Variante 1** PAK-Dosierung	**Variante 2** GAK-Filtration	**Variante 3** Ozonierung
Bautechnik [€]	725.000	530.000	252.000
Maschinentechnik [€]	751.000	99.000	410.000
EMSR Technik [€]	501.000	66.000	273.000
Baunebenkosten [€]	347.000	122.000	164.000
Gesamtkosten netto[€]	**2.324.000**	**817.000**	**1.099.000**
+ 19% MwSt. [€]	441.560	155.230	208.810
Gesamtkosten brutto [€]	**2.765.560**	**972.230**	**1.307.810**

4.1.2 Betriebskosten

Für einen Vergleich der Varianten spielen bei einer weitergehenden Behandlungsstufe neben den Investitionskosten die Betriebskosten für Aktivkohleverbrauch, Ozonverbrauch und Stromverbrauch eine wesentliche Rolle.

Die Betriebskosten sind somit in der Betriebsphase regel- oder unregelmäßig wiederkehrende Aufwendungen. diese sind aufgeschlüsselt nach [7]:

- Personalkosten
- Energiekosten
- Wartungskosten / Unterhaltskosten
- Betriebsmittelkosten (z.B. O_2, Aktivkohle, Schlammentsorgung, Fällungs- und Flockungshilfsmittel)

Für die Ermittlung der Betriebskosten wurden weiterhin folgende Einzelkosten berücksichtigt:

- elektrische Energie (zu 0,2429 €/kWh)
- Personalkosten (60 h/Monat und 50.000 €/(Personen*a))
- Wartung/ Unterhalt als prozentualer Ansatz der Investitionskosten:
  - Baukosten mit 0,5%,
  - Maschinentechnik mit 1,5%,
  - Elektrotechnik mit 1%
- Betriebsmitteleinsatz:
  - Sauerstoff: 0,14 €/kgO_2, 10 mg O_3/l
  - PAK: 1.550 €/Mg, 10 mg PAK/l
  - GAK: 1.700 €/Mg (regenerierte Kohle)
    1.100 €/Mg (frische Kohle zur Erstbefüllung)
- Flockungshilfsmittel: 1.300 €/Mg
- Fällmittel: 130 €/Mg

Der Betrieb einer weitergehenden Stufe erfordert spezielle Fachkenntnisse. Insgesamt ist von einem gesteigerten Personalaufwand auszugehen.

Die Energiekosten ergeben sich aus dem Stromverbrauch für Pumpen, Rührwerke und der Ozonerzeugung. Die Berechnung erfolgte für eine mittlere Belastung der Anlagen.

Hieraus ergeben sich die folgenden Betriebskosten für die entsprechenden Varianten, welche in Tabelle 4.2 dargestellt sind.

Tabelle 4.2: Vergleich Betriebskosten (netto)

Investitionen	**Variante 1** PAK-Dosierung	**Variante 2a** GAK-Filtration Standzeit 6 Monate	**Variante 2b** GAK-Filtration Standzeit 12 Monate	**Variante 3** Ozonierung
Wartung & Instandhaltung [€/a]	20.000	5.000	5.000	10.000
Verbrauchsstoffe [€/a]	15.000	40.000	20.000	5.000
Energiebedarf [€/a]	12.000	8.000	8.000	12.000
Entsorgung [€/a]	16.000	15.000	7.000	0
Personalkosten [€/a]	20.000	27.000	27.000	27.000
Gesamtkosten [€/a]	**83.000**	**95.000**	**67.000**	**54.000**

4.1.3 Kostenvergleichsrechnung

Für eine eindeutige Einordnung und eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Varianten im Vergleich ist eine Kostengegenüberstellung notwendig. Diese wird anhand einer dynamischen Kostenvergleichsrechnung nach [8] durchgeführt und dient als Hilfe bei der Entscheidungsfindung.

Das Ergebnis des Kostenvergleichs ist demnach unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Gesichtspunkte ein Vorschlag für die anstehende Entscheidungsfindung. Zur Durchführung der KVR werden die „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen“ (KVR- Leitlinien) angewendet.

Zu Beginn der KVR sind zunächst feste zeitliche Bezugspunkte zu setzen. Hierzu zählen das Basisjahr (aktuelle Zeitpunkt), der Bezugszeitpunkt (meist Inbetriebnahme/ Nutzungsbeginn) und der Untersuchungszeitraum, demnach die Nutzungsdauer.

Für die Erweiterung der Kläranlage Halle-Brandheide wird als Bezugszeitpunkt ein beliebiger Zeitpunkt der Inbetriebnahme mit dem 01.01.2014 gewählt. Die Nutzungsdauer und damit der Betrachtungszeitraum von 30 Jahren werden vorgegeben.

Der Umfang der notwenigen Instandsetzungsmaßnahmen wird entsprechend so gewählt, dass auch die vorhandenen Anlagenteile diese Nutzungsdauer voraussichtlich erreichen. Die Investitionszeitpunkte werden realistisch mit Maßgabe eines möglichst späten Zeitpunktes gewählt. Sie müssen vor Nutzungsbeginn liegen und werden in diesem Fall auf das Jahr 2014 gelegt, da sich die ausgewiesenen Kosten auf den Kostenstand 2013 beziehen (s.o.).

Als langfristiger Realzins (inflationsbereinigt) wird i = 3,0 % gewählt. Von einer Preissteigerung wird ausgehend von den aktuellen Marktpreisen nicht ausgegangen wodurch r_{IK} und r_{IKR} mit 0 % p.a. festgelegt wird.

Tabelle 4.3: Vergleich Kostenvergleichsrechnung (gerundet)

Summe der Jahreskosten aus:	**Variante 1** PAK-Dosierung	**Variante 2a** GAK-Filtration Standzeit 6 Monate	**Variante 2b** GAK-Filtration Standzeit 12 Monate	**Variante 3** Ozonierung
Investitionen [€/a]	119.000	42.000	42.000	56.000
Re- Investitionen [€/a]	68.000	9.000	9.000	37.000
laufenden Kosten [€/a]	139.000	175.000	112.000	75.000
Jahreskosten [€/a]	**326.000**	**226.000**	**163.000**	**168.000**

Bewertung:

Aus der Kostenvergleichsrechnung gehen die Varianten 2b (GAK) und 3 (Ozonierung) als wirtschaftlich vorteilhaftesten Varianten hervor.

Hierbei ist bei der Bewertung der GAK Filtration zu berücksichtigen, dass Variante 2b einen optimistischen Ansatz darstellt. Ein realistischer Ansatz zur Bewertung einer GAK-Filtration erfordert wissenschaftlich betreute Vorversuche.

4.2 TECHNISCHER VARIANTENVERGLEICH

Die vier ausgewählten Varianten werden im technischen Variantenvergleich mit einer Nutzwertanalyse untersucht und bewertet. Dabei handelt es sich eine Methode, die den Nutzwert verschiedener Entscheidungsalternativen im Vergleich zueinander liefert. Das Ergebnis der Analyse liefert für jede der Varianten eine Zahl, die den Nutzwert darstellt. Die „beste“ Lösung erhält dabei, im Vergleich zu den anderen Varianten, den höchsten Nutzwert.

Sie ist besonders gut geeignet, wenn „weiche“ oder „technische“- also in Geldwert oder Zahlen nicht darstellbare – Kriterien vorliegen, anhand derer zwischen verschiedenen Alternativen eine Entscheidung gefällt werden muss.

Da für die Wahl der Vorzugsvariante letztlich aber das Zusammenführen von monetären und nicht-monetären Bewertungskriterien notwendig ist, wurden auch die Ergebnisse aus der KVR in der Nutzwert-Analyse bewertet. Die Ergebnisse der KVR (monetäre Bewertungskriterien) wurden dabei in dimensionslose Kennwerte (Nutzenpunkte) übertragen.

Die Ziele werden, ihrer Hierarchie folgend gewichtet, da nicht alle Ziele gleich wichtig für das Gesamtziel sind. Die Summe aller Gewichte muss 100 ergeben, damit 100% Gesamtnutzen vorhanden ist.

Die einzelnen Bewertungskriterien erhalten Punkte hinsichtlich ihrer Zielerreichungsgrade. Die Verteilung erfolgt ganzzahlig mit einer Skala von 0 bis 1, wobei 0 das Versagen hinsichtlich des entsprechenden Zieles und 1 dessen vollständige Erfüllung bedeutet.

In der Tabelle 4.4 ist das Ergebnis der durchgeführten Nutzwert-Analyse dargestellt.

Tabelle 4.4: Technischer Variantenvergleich

		Variante 1		Variante 2a		Variante 2b		Variante 3	
		PAK Dosierung		GAK Filtration 6 M.		GAK Filtration 12 M.		Ozonbehandlung	
Kriterium	**Gewichtung**	**Punkte**	**Nutzwert**	**Punkte**	**Nutzwert**	**Punkte**	**Nutzwert**	**Punkte**	**Nutzwert**
Jahreskosten	40%	0,50	0,20	0,72	0,29	1,00	0,40	0,97	0,39
Reinigungsleitung: Breitbandwirkung	10%	0,8	0,08	0,7	0,07	0,7	0,07	0,8	0,08
Reinigungsleistung: Adsorbierbare Stoffe (z.B. PFT)	10%	0,8	0,08	0,7	0,07	0,7	0,07	0,0	0,00
Reinigungsleitung: Desinfektion	10%	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,8	0,08
Betriebssicherheit/ Prozessstabilität	10%	0,8	0,08	0,5	0,05	0,5	0,05	0,8	0,08
Planungssicherheit / Referenzen	10%	0,8	0,08	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05
Wartungs/ Betriebsaufwand	5%	0,8	0,04	0,6	0,03	0,6	0,03	0,5	0,03
Erweiterbarkeit	5%	0,5	0,03	0,8	0,04	0,8	0,04	0,9	0,05
Summe	100%		**0,59**		**0,60**		**0,71**		**0,75**
Ranking			**4**		**3**		**2**		**1**

Im Ergebnis der Kosten-Nutzwert-Analyse ist erkennbar, dass die Varianten 2b und 3 mit einem Nutzwert von 0,76 bzw. 0,71 als Vorzugsvarianten hervortreten. Die Variante zur PAK-Filtration ergibt einen deutlich niedrigeren Nutzwert.

4.3 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNG

4.3.1 Zusammenfassung

Die derzeit diskutierten Verfahren zur Elimination von Mikroschadstoffen im Ablauf von Kläranlagen befinden sich an der Schwelle zwischen Versuchsanlagen in halbtechnischen Maßstab und Pilotanlagen im großtechnischen Maßstab.

Sowohl die Verwendung von Ozon als auch eine Adsorption an Aktivkohle ist auf kommunalen Kläranlagen noch nicht weit verbreitet. Insgesamt ist jedoch in den letzten Jahren eine stärkere Umsetzung von Behandlungsanlagen auf der Basis von Aktivkohleadsorption zu beobachten.

Bundesweit besteht vor dem Hintergrund eines verbesserten Gewässerschutzes der Trend zur Förderung von Leuchtturmprojekten zur Elimination von Mikroschadstoffen im Ablauf von Kläranlagen. Diese Innovationsprogramme konzentrieren sich verstärkt auf die Förderung von Investitionen zur Installation weitergehender Reinigungsstufen.

Es ist zu erwarten, dass hier vorrangig Kläranlagen der folgenden Kategorie betrachtet werden:

- Kläranlagen größer 10.000 EW
- Kläranlagen mit Einleitung oberhalb TW-Gewinnungsanlagen
- Kläranlagen mit leistungsschwachen Vorflutern

Derzeit bestehen jedoch noch keine klar definierten Reinigungsziele bzw. eine Eingrenzung von Leitparameter, welche Voraussetzung für eine konkrete Auswahl eines Verfahrens zur weitergehenden Spurenstoffelimination sind.

Hier ist auf Parameter zu verweisen, welche in Bezug auf die Varianten Ausschlusskriterien darstellen können.

Dies wird insbesondere bei der Ozonierung deutlich, welche eine technisch und wirtschaftlich interessante Option darstellt, jedoch trotz weitgehender Reinigungsleistung (Arzneimittel, Desinfektion) zur Elimination einiger, gut adsorbierbarer Stoffe (z.B. PFT) ungeeignet ist.

Die im Ablauf der Kläranlage Halle Brandheide gemessenen Mikroschadstoffe Iomeprol und Amidotrizoesäure können nur teilweise durch eine Ozonierung eliminiert werden, jedoch besser als bei einer granulierten Aktivkohlebehandlung.

Daher ist im Rahmen der weiteren Planung zu definieren, welche Varianten grundsätzlich verfolgt werden soll und welche enthaltenen Kostenrisiken durch weitergehende Untersuchungen zu einer Kostensicherheit beitragen können.

Hierzu ist eine Vorgabe von Zielparametern von behördlicher Seite erforderlich. Vor einer Installation von großtechnischen Anlagen werden zunächst halbtechnische Versuche empfohlen.

4.3.2 Empfehlung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für den Ausbau einer Kläranlage um eine Stufe zur Mikroschadstoffelimination zurzeit noch keine gesetzlich vorgeschriebenen Ablaufgrenzwerte oder Eliminationsraten bestehen und der Ausbau auf freiwilliger Basis erfolgt.

Eine Verifizierung der gemessenen Konzentrationen kann durch ein mehrmonatiges Messprogramm erfolgen.

Bei einer Vorgabe von Zielparametern von behördlicher Seite aufgrund der Gewässersituation, könnte ein kurzfristiger Ausbau erforderlich werden.

Die Machbarkeit einer Mikroschadstoffelimination ist gegeben. Die durchgeführte Betrachtung zeigt, dass auf Grundlage der monetären und nicht monetären Bewertung Variante 3 (Ozonierung) Vorteile aufzeigt und bei weiteren Planungen bevorzugt berücksichtigt werden sollte.

Aufgrund der selektiven Eliminationsleistung der Verfahren (Bsp. Ozonierung - PFT) ist es erforderlich, eine großtechnische Umsetzung auf Basis zuvor definierter Eliminationsziele (z.B. Röntgenkontraststoffe, Arzneimittel, o.ä.) zu planen.

Für weitere Planungsschritte wird seitens Dahlem Beratende Ingenieure an dieser Stelle empfohlen, die entwickelten Varianten in einer weiteren Bearbeitungsphase durch wissenschaftlich betreute Vorversuche vertieft zu betrachten.

5 LITERATUR

[1] „Deutscher Bundestag (2012): Antwort der Bundesregierung auf Kleine Anfrage der Abgeordneten Dorothea Steiner et al. und der Fraktion BÜNDNIS90/ Die Grünen- Drucksache 17/10914, Berlin, - Anthropogene Spurenstoffe in der Umwelt

[2] Zusammenstellung von Kläranlagenablaufwerten aus 205 Kläranlagen ohne 4. Reinigungsstufe in NRW, Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2015

[3] Quellen der Orientierungswerte aus der Tabelle D-4: Bewertungsgrundlagen für den zweiten Monitoringzyklus der WRRL

- LAWA: Entwicklung von Umweltqualitätsnormen zum Schutz aquatischer Biota in Oberflächengewässern für flussgebietsspezifische Stoffe, 2004
- LAWA: Entwicklung von Qualitätsnormen zum Schutz aquatischer Biota in Oberflächengewässern für flussgebietsspezifische Stoffe (II), 2007
- LAWA: Entwicklung von Umweltqualitätsnormen für Schadstoffe des Anhanges VIII WRRL, 2010
- EU Draft EQS: 13th Meeting of the working group E on chemical aspects Identification of new priority substances, 2011
- Vorschläge OGewV: 24 Stoffdatenblätter zum Referentenentwurf Kabinettsbeschluss, 2011

[4] Metcalf & Eddy: Wastewater Engineering – Treatment and Reuse; Tchobanglous, G. Burton, F. Stensel, H. Metcalf & Eddy Inc., McGraw Hill, Boston, 2003

[5] Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser: Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU Bern, 2012

[6] Abschlussbericht MIKROFlock: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2012

[7] Mertsch et al. (2013): Kosten der Elimination von Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlage“, GWA, Band 232, Tagungsband zur 46. Essener Tagung, Hrsg. Pinnekamp, Aachen 2013

[8] "Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen, 8. überarbeitete Auflage "; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Juli 2012