



# Kläranlage Höxter

## 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie  
Juni 2014 | 1. Ausfertigung  
Projektnummer 1299 001





# Kläranlage Höxter 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie  
Juni 2014 | 1. Ausfertigung  
Projektnummer 1299 001

Bearbeitet durch:  
Dr.-Ing. Jan Mauriz Kaub  
Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

Aufgestellt:  
Bochum, im Juni 2014  
bie-ka-ko

Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

## Gesamtinhaltsverzeichnis

### I Textteil

- Erläuterungsbericht
- Anlagen

### II Zeichnungen

Blatt	Titel	Maßstab	Verwaltungsnummer
1	Lageplan, Variante 1 PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle	1 : 1 000	030 007 01 00
2	Lageplan, Variante 2 GAK-Filter	1 : 1 000	030 007 02 00
3	Lageplan, Variante 3 Ozonung mit Nachbehandlung im Teich	1 : 1 000	030 007 03 00
4	Lageplan, Variante 4a Langsamfiltration und Ozonung	1 : 1 000	030 007 04 00
5	Lageplan, Variante 4b Langsamfiltration	1 : 1 000	030 007 04 00

**Auftraggeber:**

Stadtentwässerung Höxter GmbH  
Corveyer Allee 21  
37671 Höxter

Telefon: 05271 69996 0  
Telefax: 05271 6907 13

**Projektleiter:**

Herr Uwe Dierkes

Telefon: 05271 69996 60  
dierkes@seh-hoexter.de

Frau Dipl.-Biol. Ingrid Gerard  
(Gelsenwasser AG)

Telefon: 0209 708 1971  
ingrid.gerard@gelsenwasser.de

**Bearbeitung durch:**

TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH  
Universitätsstraße 74  
44789 Bochum

Telefon: 0234 33305-0  
Telefax: 0234 33305-11  
info@tum-bochum.de

Herr Dr.-Ing. Jan Mauriz Kaub

Telefon: 0234 33305-36  
jm.kaub@tum-bochum.de

Herr Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

Telefon: 0234 33305-54  
n.biebersdorf@tum-bochum.de

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Aufgabenstellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zugrunde liegende Unterlagen</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Belastungsdaten Hydraulik</b> .....	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Reinigungsanforderungen</b> .....	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Anlagenbestand</b> .....	<b>3</b>
5.1	Kurzbeschreibung .....	3
<b>6</b>	<b>Spurenstoffe im Wasserkreislauf</b> .....	<b>4</b>
6.1	Einleitung.....	4
6.2	Charakterisierung des Verhaltens von anthropogenen Spurenstoffen.....	5
<b>7</b>	<b>Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen</b> .....	<b>6</b>
7.1	Überblick .....	6
7.2	Adsorption .....	7
7.2.1	Grundlagen.....	7
7.2.2	Einsatz Aktivkohle in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination.....	12
7.2.2.1	Pulveraktivkohle .....	12
7.2.2.2	Granulierte Aktivkohle .....	13
7.3	Ozonung .....	15
7.3.1	Grundlagen.....	15
7.3.1.1	Einsatz und Wirkung von Ozon .....	15
7.3.1.2	Ozonanwendung .....	16
7.3.2	Einsatz von Ozon in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination.....	17
7.4	Langsamfilter .....	19
7.4.1	Grundlagen.....	19
7.4.2	Einsatz von Langsamfiltern in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination.....	20
<b>8</b>	<b>Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen</b> .....	<b>20</b>
8.1	Beschickungsmenge .....	20
8.2	Verfahrensfestlegung .....	24
8.3	Randbedingungen .....	24
8.4	Varianten .....	25
8.4.1	Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle.....	25

8.4.1.1	Allgemein.....	25
8.4.1.2	Ausführung .....	27
8.4.2	Variante 2: Filtration über granulierte Aktivkohle.....	29
8.4.2.1	Allgemeines .....	29
8.4.2.2	Ausführung .....	31
8.4.3	Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter .....	32
8.4.3.1	Allgemeines .....	32
8.4.3.2	Ausführung .....	33
8.4.4	Variante 4: Langsamfiltration.....	35
8.4.4.1	Allgemeines .....	35
8.4.4.2	Ausführung .....	37
8.5	Ergebnisübersicht Varianten .....	40
<b>9</b>	<b>Kosten .....</b>	<b>42</b>
9.1	Allgemein.....	42
9.2	Investitionskosten .....	42
9.3	Betriebskosten.....	42
9.4	Jahreskosten .....	45
9.5	Sensitivitätsanalyse .....	46
<b>10</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>47</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>50</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>52</b>

**Bildverzeichnis**

Bild 1:	Volumenstrom Ablauf KA Höxter (12/2010 bis 12/2013) .....	3
Bild 2:	Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013) .....	6
Bild 3:	Grundbegriffe der Adsorption .....	7
Bild 4:	Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001) .....	8
Bild 5:	Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998) .....	9
Bild 6:	Adsorptionsverhalten zweier unterschiedlicher Stoffe im Festbettadsorber (DVGW W 239) .....	10
Bild 7:	Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985) .	11
Bild 8:	Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert) .....	11
Bild 9:	Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert) .....	16
Bild 10:	Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensdorf (Abegglen u. a. 2009).....	18
Bild 11:	Aufbau Langsamfilter .....	19
Bild 12:	Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft).....	21
Bild 13:	Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft).....	21
Bild 14:	Beispielhafte grafische Darstellung der Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung ..	22
Bild 15:	Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination .....	23
Bild 16:	Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination .....	24
Bild 17:	Luftaufnahme der KA Höxter mit Katastergrenzen (Quelle: Stadt Höxter).....	25
Bild 18:	Systemskizze Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle.....	26
Bild 19:	Schnitt eines Tuchfilters, Ausführungsbeispiel (Quelle: Mecana) .....	28
Bild 20:	Lageplanausschnitt Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle.....	29
Bild 21:	Systemskizze Variante 2: GAK-Filtration .....	30
Bild 22:	Lageplanausschnitt Variante 2: GAK-Filtration .....	32

Bild 23:	Systemskizze Variante 3: Ozonung .....	33
Bild 24:	Lageplanausschnitt Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich..	35
Bild 25:	Systemskizze Variante 4a: Langsamfilter mit nachgeschalteter Ozonung .....	36
Bild 26:	Systemskizze Variante 4b: Langsamfilter .....	37
Bild 27:	Lageplanausschnitt Variante 4a: Langsamfilter mit nachgeschalteter Ozonung.....	38
Bild 28:	Lageplanausschnitt Variante 4b: Langsamfilter .....	39
Bild 29:	Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den Jahreskosten der Varianten .....	46

## **Teil B: Anlagen**

Anlage 1: Auslegung Varianten 1 bis 4

Anlage 2: Investitionskosten Varianten 1 bis 4

Anlage 3: Betriebskosten Varianten 1 bis 4

Anlage 4: Jahreskosten

## 1 **Veranlassung und Aufgabenstellung**

Die Ertüchtigung von kommunalen Kläranlagen im Hinblick auf die Elimination von anthropogenen Spurenstoffen wird derzeit in der Fachwelt diskutiert.

Diese 4. Reinigungsstufe ist in der Bundesrepublik, insbesondere in Baden-Württemberg und auf einigen Anlagen in Nordrhein-Westfalen bereits in Betrieb. In der Schweiz wird eine landesweite Einführung vorbereitet.

Nicht zuletzt lassen die Aktivitäten im Umweltausschuss des Europäischen Parlaments mit der Aufnahme von erstmals drei Pharmaka-Wirkstoffen in die Liste der prioritären Stoffe nach der Wasser-Rahmenrichtlinie vom November 2012 darauf schließen, dass die 4. Reinigungsstufe zukünftig Pflicht werden könnte.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Verfahrenskombinationen auch im großtechnischen Maßstab untersucht. So stehen verschiedene Konzepte zur Elimination der genannten Stoffe zur Verfügung.

Um die Realisierbarkeit dieser Verfahren auf den Kläranlagen konkret zu untersuchen, fördert das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Machbarkeitsstudien.

Die Stadtentwässerung Höxter haben die TUTTAHS & MEYER Ing.-GmbH beauftragt, für die Kläranlage Höxter eine solche Studie auszuarbeiten.

Mit der Studie soll eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, um die Auswahl eines möglichen Verfahrens durch die Stadtentwässerung zu unterstützen. Neben den technischen Aspekten werden auch die Wirtschaftlichkeit und weitere Punkte, wie z. B. die Nachhaltigkeit, bewertet.

Die Machbarkeitsstudie gliedert sich in folgende Punkte auf:

- Datenauswertung mit Ermittlung der für die Auslegung maßgeblichen Teilstrommenge;
- Auslegung der insgesamt vier Verfahrenskombinationen;
- Darstellung der Varianten in einer Systemskizze und im Lageplan;
- Beschreibung und Bewertung der Verfahren;
- wirtschaftliche Bewertung der Konzepte anhand der Jahreskosten; dazu werden die Investitionskosten und die Betriebskosten abgeschätzt;
- Zusammenfassung der Bewertung in einer Entscheidungsmatrix.

## 2 Zugrunde liegende Unterlagen

Die Grundlage der vorliegenden Planung bilden im Wesentlichen die folgenden Unterlagen:

- Zentralkläranlage Höxter – Entwurf zur kurzfristigen Erweiterung, 05/1994, Stadt Höxter,
- Auszug aus der Dienst- und Betriebsanweisung der Zentralkläranlage Höxter, undatiert, Stadtentwässerung Höxter,
- Projektdatenblatt zur Umrüstung der Ablaufmessung auf der Kläranlage Höxter, 02/2009, Axel Zangenberg GmbH & Co. KG,
- Dokumentation Simulationsstudie, 09/2013, Gelsenwasser AG,
- Lageplan Kläranlage Höxter, 05/2007, Stadt Höxter,
- Bauwerkszeichnungen der Belebungs- und Nachklärbecken,
- Katasterplan Kläranlage Höxter, 11/2013, Stadt Höxter,
- 15-min-Werte der Ablaufmessung KA Höxter von 2010 bis 2013.

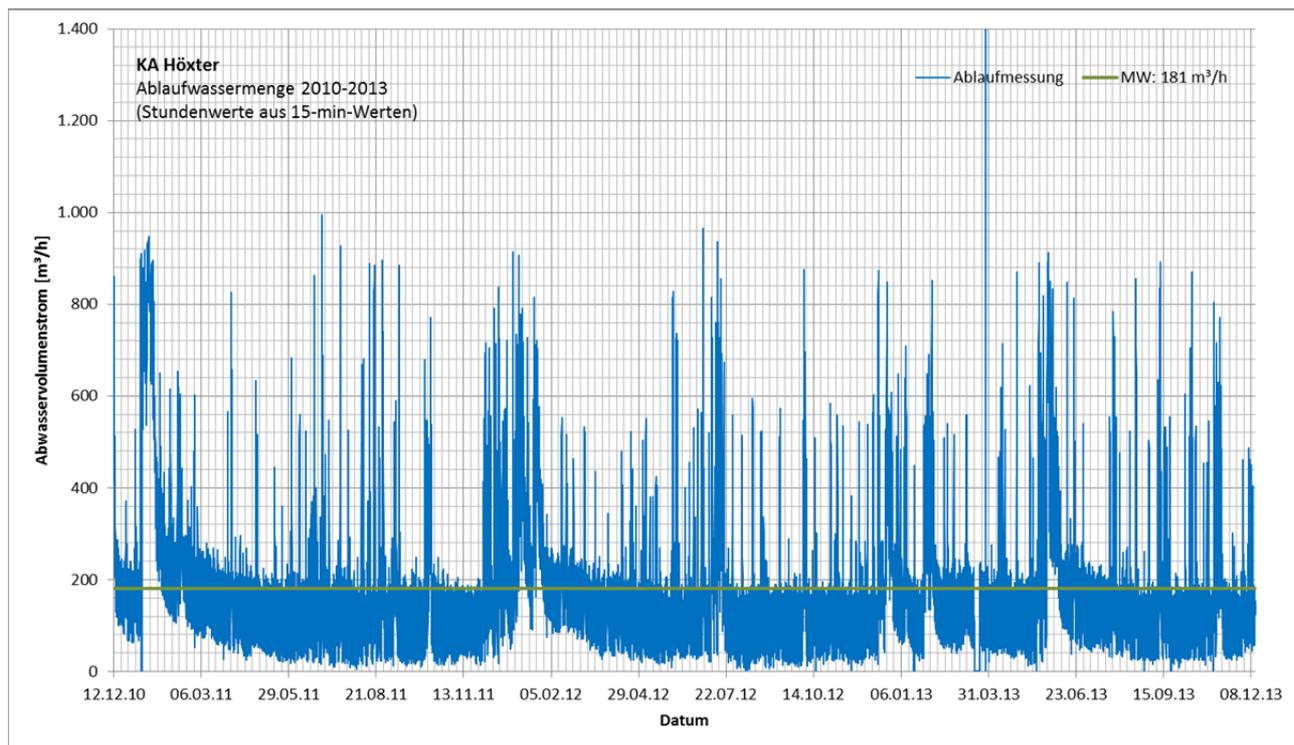
## 3 Belastungsdaten Hydraulik

Die Bemessungswerte der Kläranlage Höxter nach dem Entwurf aus dem Jahr 1994 sind im Folgenden aufgeführt:

Trockenwetterzufluss	$Q_{T,2h,max}$	=	734 m <sup>3</sup> /h	≈	204 l/s
Mischwasserabfluss	$Q_M$	=	1.244 m <sup>3</sup> /h	≈	346 l/s

Die hydraulische Auslegung der 4. Reinigungsstufe, die nach der Nachklärung in den Reinigungsprozess eingebunden wird, basiert auf den Ablaufmengen der Kläranlage.

**Bild 1** stellt die Ganglinie der Abwassermengen im Ablauf der Anlage (MID-Messung) als Stundenwerte für den Zeitraum Dezember 2010 bis Dezember 2013 dar. Die Stundenwerte wurden aus den bereitgestellten 15-min-Werten gebildet. Die mittlere Ablaufmenge beträgt 181 m<sup>3</sup>/h. Maximal wurden 1.784 m<sup>3</sup>/h im Betrachtungszeitraum abgeleitet. An 42 Stunden im Betrachtungszeitraum (12.12.2010, 01:00 Uhr – 12.12.2013, 00:00 Uhr = 26.304 h mit Messwerten) lag die Abflussmenge oberhalb von 900 m<sup>3</sup>/h.



**Bild 1: Volumenstrom Ablauf KA Höxter (12/2010 bis 12/2013)**

## 4 Reinigungsanforderungen

Folgende Überwachungswerte sind gemäß dem Erlaubnisbescheid der Bezirksregierung Detmold vom 26.07.2007 für die Kläranlage Höxter festgelegt:

Chemischer Sauerstoffbedarf	50 mg/l
Biochemischer Sauerstoffbedarf	15 mg/l
Ammonium-Stickstoff	5 mg/l ( $\geq 12\text{ °C}$ )
Stickstoff, anorganisch	18 mg/l ( $\geq 12\text{ °C}$ )
Phosphor, gesamt	2 mg/l

## 5 Anlagenbestand

### 5.1 Kurzbeschreibung

Die Kläranlage Höxter weist eine Ausbaugröße von 30.000  $\text{EW}_{\text{CSB120}}$  auf. Der Vorfluter der Anlage ist die Weser. Die Anlage gliedert sich in eine mechanische und eine biologische Reinigungsstufe. Der anfallende Schlamm wird anaerob in einer mesophilen Faulung stabilisiert. Der entwässerte Schlamm aus der Schlammbehandlung wird landwirtschaftlich verwertet. Zur Behandlung der Prozesswässer aus der Schlammbehandlung vor Einleitung in den Hauptstrom verfügt die Kläranlage Höxter über eine Prozesswasserbehandlungsanlage (BABE-Prozess).

Die mechanische Stufe umfasst nach dem Zulaufhebewerk die Rechenanlage (Lochsiebreechen, 6 mm) sowie den belüfteten Sandfang sowie die zweistraßig ausgebaute Vorklärung (Rechteckbecken).

Der Ablauf der Vorklärung wird auf die zweistraßige biologische Reinigungsstufe im Verhältnis 26%/74% aufgeteilt. Die erste Straße ist als Rechteckbecken mit einem Volumen von 974 m<sup>3</sup> ausgeführt, die als Umlaufbecken mit intermittierender Belüftung betrieben wird. Die Nachklärbecken dieser Straße bestehen aus längsdurchströmte Rechteckbecken, die mit Kettenräumern ausgerüstet sind. Der Ablauf der Straße wird über ein Pumpwerk vor dem Ablaufschacht angehoben.

Der Zulauf der zweiten Straße wird über ein Schneckenhebewerk zunächst angehoben. Das Belebungsbecken II ist als Rundbecken mit 2.866 m<sup>3</sup> Inhalt ausgeführt. Es wird ebenfalls intermittierend belüftet. Das Nachklärbecken II ist als horizontal durchflossenes Rundbecken ausgeführt.

Der Rückschlamm beider Straßen wird über getrennte Schneckenpumpwerke wieder in die jeweiligen Belebungsbecken zurückgefördert.

Der Ablauf beider Straßen wird über das Mengemessbauwerk (ehemaliges Venturi-Gerinne, jetzt Messung über MID) in die Schönungsmessung geleitet. Der Vorfluter der Anlage ist die Weser. Die amtliche Probenahmestelle stellt das Mengemessbauwerk dar. Die Probenahme erfolgt also vor dem Teich.

## **6 Spurenstoffe im Wasserkreislauf**

### **6.1 Einleitung**

Mit Spurenstoffe werden Substanzen bezeichnet, die im Konzentrationsbereich von 10<sup>-9</sup> (ng/l) bis 10<sup>-6</sup> g/l (µg/l) in der aquatischen Umwelt zu finden sind.

Nach der Definition der DWA sind anthropogene Spurenstoffe organische Schadstoffe, wie Humanpharmaka, Industriechemikalien, Körperpflegemittel, Waschmittelinhaltsstoffe, Nahrungsmittelzusatzstoffe, Additive in der Abwasser- und Klärschlammbehandlung, Veterinärpharmaka, Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel sowie Futterzusatzstoffe (DWA 2008).

Andere Bezeichnungen für die genannten Substanzen sind z. B. Mikroverunreinigungen und Mikro-schadstoffe.

Die human- und ökotoxikologische Wirkung eines Teils dieser Stoffe ist abschließend geklärt. Hierzu werden gegenwärtig Untersuchungen durchgeführt. Eine direkte Gefährdung für den Menschen besteht in der Regel nicht, jedoch wurden schon Wirkungen von einzelnen Spurenstoffen auf aquatische Lebewesen festgestellt. Im Sinne des Vorsorge- und Minimierungsprinzips sollte daher der Eintrag dieser Stoffe in den Wasserkreislauf minimiert werden.

Eine Hauptemissionsquelle für den Eintrag von Humanpharmaka als eine Teilgruppe stellen kommunale Kläranlagen dar.

Kommunale Kläranlagen sind derzeit ausgelegt für die Kohlenstoff- und, in Abhängigkeit von der Größe, auch für die Nährstoffelimination. Auf gut ausgebauten Anlagen werden organische Spuren-

stoffe teilweise erheblich eliminiert, wenn auch zumeist nicht vollständig, wie umfangreiche Studien belegen (MUNLV 2004; Joss 2005). Die unterschiedlichen Reinigungsleistungen lassen sich aus der chemischen Struktur der einzelnen Stoffe begründen.

Zur Verbesserung der Reinigungsleistung von Kläranlagen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die momentan auch noch Gegenstand der Forschung sind. Erste Anlagen wurden großtechnisch umgesetzt. Im weiteren Verlauf der Studie werden insgesamt vier Verfahren vorgestellt. Zu allen Verfahren liegen Ergebnisse von großtechnischen Anlagen oder zumindest Versuchen im großtechnischen Maßstab vor.

## 6.2 Charakterisierung des Verhaltens von anthropogenen Spurenstoffen

Die anthropogenen Spurenstoffe lassen sich, bedingt durch ihre physiko-chemischen Eigenschaften, keiner Stoffgruppe zuordnen. Daraus folgt auch, dass sich – wie schon gesagt – Unterschiede hinsichtlich der Elimination bei verschiedenen Stoffen ergeben.

Folgende Eigenschaften der Stoffe sind zur Beurteilung ihres Eliminationsverhaltens von besonderer Wichtigkeit:

- Molekülaufbau und –struktur,
- Polarität/Hydrophobie,
- Sorptionsverhalten,
- Abbaubarkeit/Persistenz.

Der Molekülaufbau kennzeichnet entscheidend das Verhalten des Stoffes. Die Bindungsformen der Atome bzw. Molekülgruppen zueinander beispielsweise beeinflussen die Abbaubarkeit und die Reaktionseigenschaften des Stoffes.

Polarität bezeichnet in der Chemie unterschiedliche Ladungsschwerpunkte innerhalb eines Moleküls. Dieses ist somit gegenüber seiner Umgebung nicht mehr elektrisch neutral. Polare Stoffe weisen eine bessere Wasserlöslichkeit auf. Unpolare Stoffe sind schlechter wasserlöslich; sie werden auch als hydrophob bezeichnet. In wässrigen Lösungen liegen die Spurenstoffe mitunter in dissoziierter Form vor. Dies bedeutet, dass das Molekül eine Ladung angenommen hat. Zu beachten ist, dass diese Ladung pH-Wert-abhängig sein kann.

Als Modellmaß für die Polarität kann der n-Octanol-Wasserverteilungskoeffizient  $K_{OW}$  herangezogen werden. Dieser beschreibt die Verteilung einer Chemikalie zwischen organischer und wässriger Phase (Worch 1997).

Unter Sorption werden als Sammelbegriff Wechselwirkungen an Grenzflächen zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Phasen verstanden, die zu einer Anreicherung eines Stoffes führen. Bei der Absorption erfolgt die Anreicherung des Stoffes innerhalb der Phase, wie z. B. bei der Lösung von Gasen in Flüssigkeiten.

Persistenz bezeichnet die Beständigkeit von Stoffen gegenüber biologischen und chemischen Abbau- und Transformationsprozessen. Als persistent werden Substanzen eingestuft, die nicht oder nur sehr langsam abgebaut werden (Worch 1997).

Aufgrund ihres ursprünglichen Einsatzes sind Spurenstoffe relativ persistent in der aquatischen Umwelt. So soll z. B. Röntgenkontrastmittel im menschlichen Körper keine Reaktion eingehen. Diese Persistenz beeinflusst jedoch auch die Elimination der Stoffe in der Umwelt bzw. in technischen Reinigungsprozessen.

## 7 Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen

### 7.1 Überblick

Die nachfolgende Grafik gibt einen schematischen Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen.

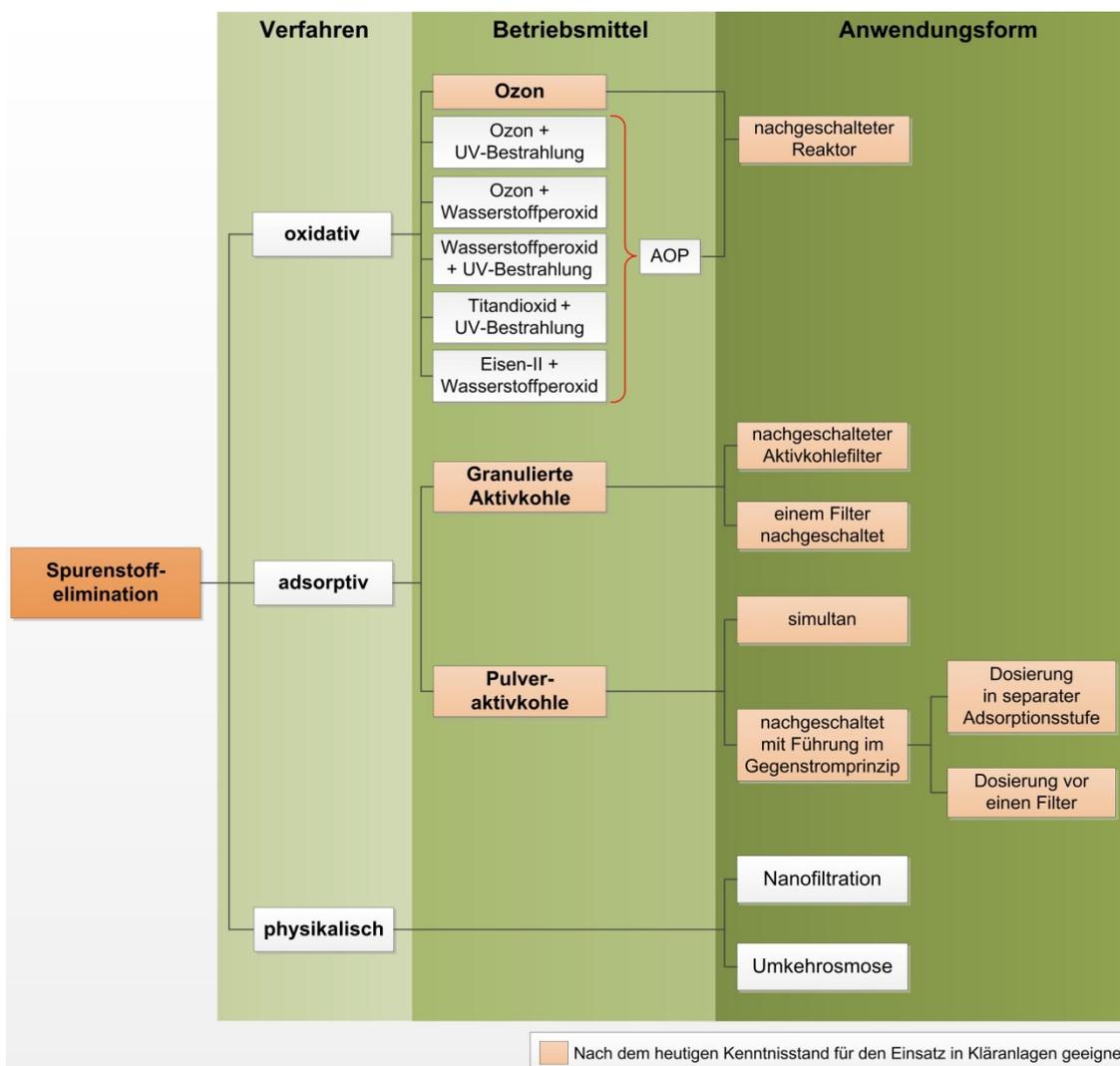


Bild 2: Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013)

Für die Kläranlage Wesel werden die Anwendung von Ozon, Granulierter Aktivkohle und Pulveraktivkohle untersucht (**Kapitel 8**).

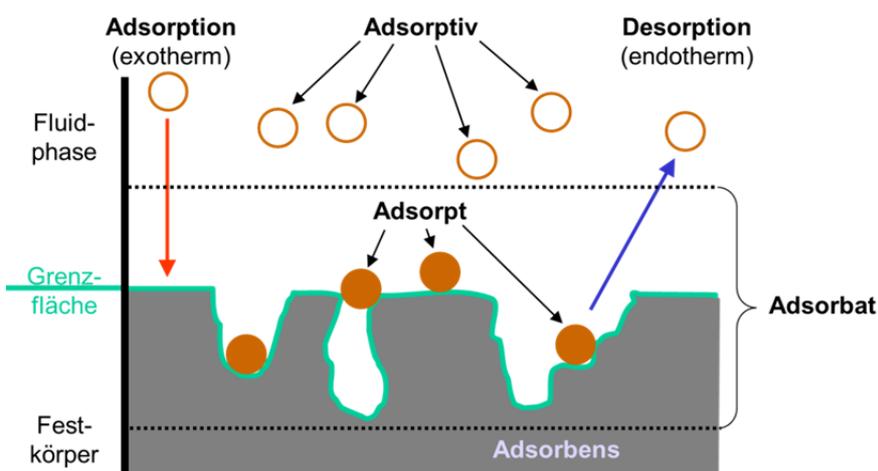
Die Grundlagen und Möglichkeiten der adsorptiven und oxidativen Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

## 7.2 Adsorption

### 7.2.1 Grundlagen

Unter Adsorption wird die Anreicherung von Stoffen an der Oberfläche von Flüssigkeiten und besonders Festkörpern verstanden. Sie erfolgt durch die Wechselwirkung der aktiven, energiereichen Zentren einer Grenzfläche mit den Atomen, Molekülen oder Ionen einer benachbarten Phase (Kümmel und Worch 1990).

Die adsorptionsaktive Phase, an der die Anreicherung erfolgt, wird als Adsorbens bezeichnet. An diesem lagern sich das Adsorptiv, also die Teilchen des zu adsorbierenden Stoffes an. Desorption bezeichnet die Re-Mobilisierung bereits fixierter Teilchen. Im **Bild 4** sind schematisch die Zusammenhänge dargestellt.

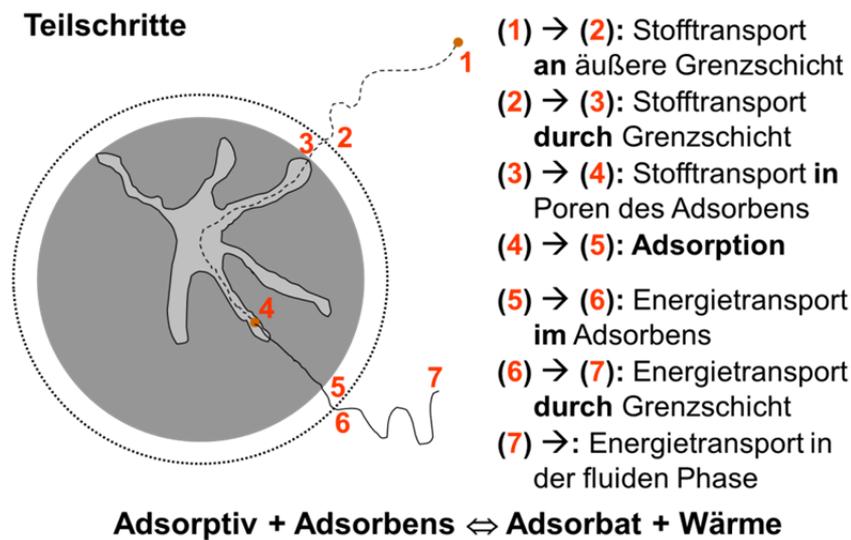


**Bild 3: Grundbegriffe der Adsorption**

Die Adsorption erfolgt in mehreren Teilschritten auch an der inneren Oberfläche des Adsorbens. Dies ist im **Bild 5** dargestellt.

In Abhängigkeit von der Stärke der Bindung des Adsorptivs an das Adsorbens wird zwischen Physisorption und Chemisorption unterschieden. Die physikalische Sorption ist vor allem auf Van-Deer-Waalsche-Wechselwirkungen zurückzuführen. Der chemischen Sorption liegen chemische Reaktionen zwischen dem Adsorbens und dem Adsorptiv zugrunde (Kümmel u. Worch 1990).

Bei der Adsorption aus Flüssigkeiten überwiegt die Physisorption mit den relativ kleinen Bindungskräften. Die Physisorption ist reversibel; damit ist eine Reaktivierung des Adsorbens (Aktivkohle) möglich und gegebenenfalls wirtschaftlich.



**Bild 4: Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001)**

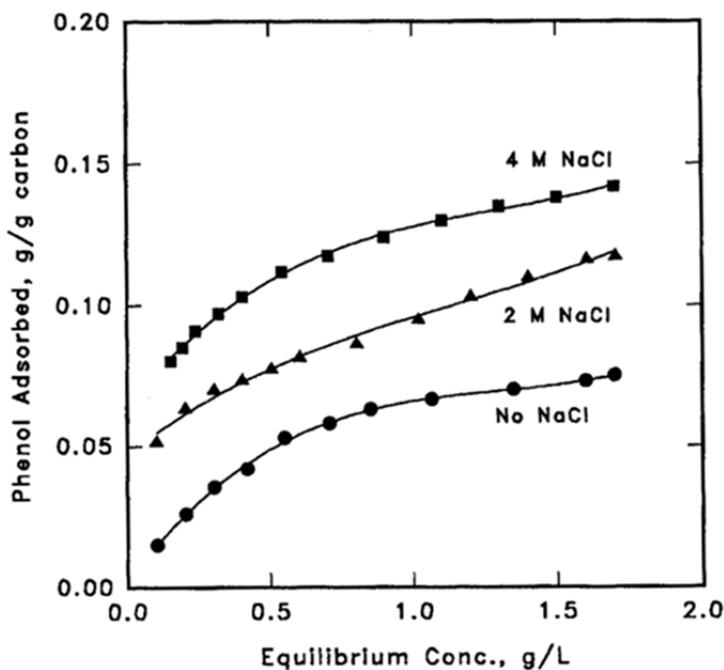
Folgende Eigenschaften des Adsorptivs können nach Cooney (1998) die Physisorption beeinflussen:

- Steigende Unpolarität/Hydrophilität erhöht die Adsorbierbarkeit
- Funktionelle Gruppen
  - Hydroxyl-Gruppe (R-OH) senken die Adsorbierbarkeit
  - Amino-Gruppe (R-NH<sub>2</sub>) senken die Adsorbierbarkeit sehr stark
  - Sulfonsäure-Gruppe (R-SO<sub>3</sub>H) senken meistens die Adsorbierbarkeit
  - Nitro-Gruppe (R-NO<sub>2</sub>) verbessern die Adsorbierbarkeit

Aus dem pH-Wert des Fluids können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Kleiner pH-Wert führt zu einer höheren Adsorbierbarkeit acider Stoffe.
- Ein hoher pH-Wert in der Lösung führt zur besseren Adsorbierbarkeit von basischen Stoffen.

Die Anwesenheit von anorganischen Salzen im Fluid führt zur einer höheren Beladung des Adsorbens (Aktivkohle). In der nachfolgenden Grafik, **Bild 6**, ist die Adsorption von Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen Konzentrationen von NaCl in der fluiden Phase dargestellt. Durch die Salzionen werden die gleichsinnig geladenen Gruppen des Adsorpt (Phenol) neutralisiert und eine höhere Packungsdichte auf dem Adsorbens erreicht (Cooney 1998).



**Bild 5: Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998)**

Beim Abwasser handelt es sich um ein Mehrphasensystem. Dies bedeutet, dass die verschiedenen Adsorptive im Wasser um die Adsorptionsplätze auf dem Adsorbens konkurrieren. Dies beeinflusst die Adsorbierbarkeit der einzelnen Stoffe.

Zur Entfernung organischer Spurenstoffe wird in der Wassertechnik Aktivkohle eingesetzt, die aus Holz, Kohlen und ähnlichen Stoffen durch Aktivierung bei hohen Temperaturen und Luftabschluss, zum Teil unter Einsatz von Säuren (chemische Aktivierung), hergestellt werden. Durch die Aktivierung erhalten die Kohlen eine innere Oberfläche von  $800 \dots 1.200 \text{ m}^2/\text{g} \approx 1 \text{ km}^2/\text{kg}$ , an der die Adsorption erfolgt. Die äußere Oberfläche wird durch den Partikeldurchmesser bestimmt.

Hinsichtlich der Korngröße werden die Kohlen in zwei Gruppen eingeteilt:

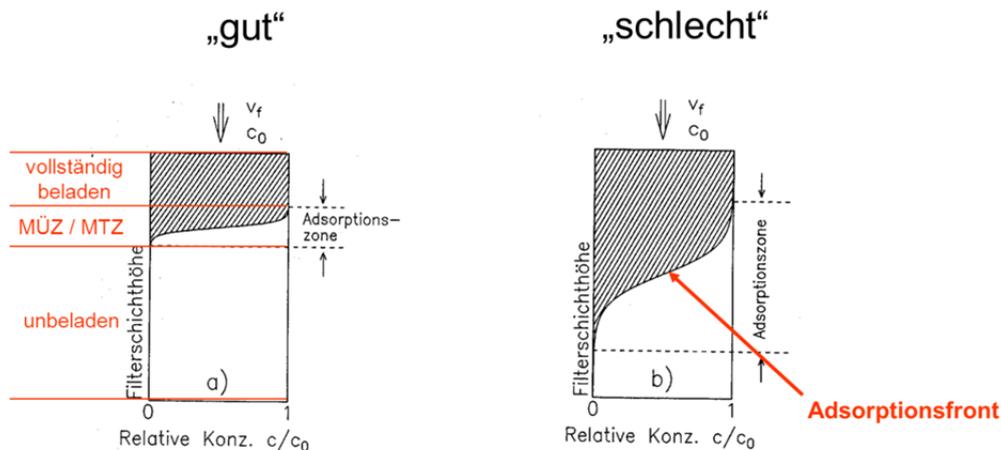
- Pulverkohlen (PAC = powdered activated carbon) weisen einen Durchmesser von weniger als 0,05 mm auf;
- Kornkohlen (GAC = granulated activated carbon) liegen im Durchmesser zwischen 0,5 und 4 mm.

Des Weiteren wird noch Formkohle angeboten. Diese weist eine zylindrische Form auf und liegt im gleichen Größenbereich wie die Kornkohlen.

Die beiden beschriebenen Kohlenarten werden in verschiedenen Reaktortypen eingesetzt – die Pulverkohle in einem Rührreaktor und die Kornkohle in einem Festbettreaktor (Filter).

Dadurch ergibt sich eine andere Kinetik. Beim Rührreaktor stellt sich eine Gleichgewichtsbeladung zwischen der Konzentration des Adsorptivs im Fluid und am Adsorbens ein. Über die Zeit nähert sich diese der maximalen Gleichgewichtsbeladung an.

Beim Einsatz der Kornkohle im Filter erfolgt die Adsorption über die Betttiefe in der sogenannten Adsorptionszone. Im **Bild 7** ist dies für zwei unterschiedlich adsorbierbare Stoffe dargestellt.



MÜZ = Massenübergangszone

MTZ = Mass Transfer Zone

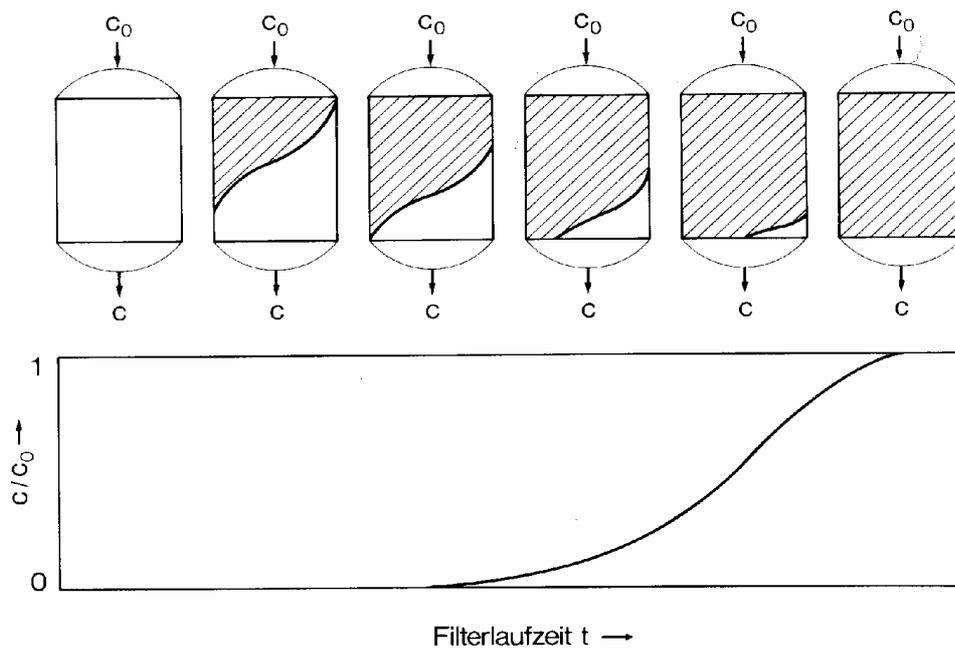
**Bild 6: Adsorptionsverhalten zweier unterschiedlicher Stoffe im Festbettadsorber (DVGW W 239)**

Zu erkennen ist, dass der gut adsorbierbare Stoff eine deutlich kürzere Übergangszone aufweist, in der das Adsorptiv bis auf die Konzentration von nahezu Null zurückgehalten wird. Beim schlechter adsorbierbaren Stoff ist die Zone größer; der Stoff bricht also früher durch.

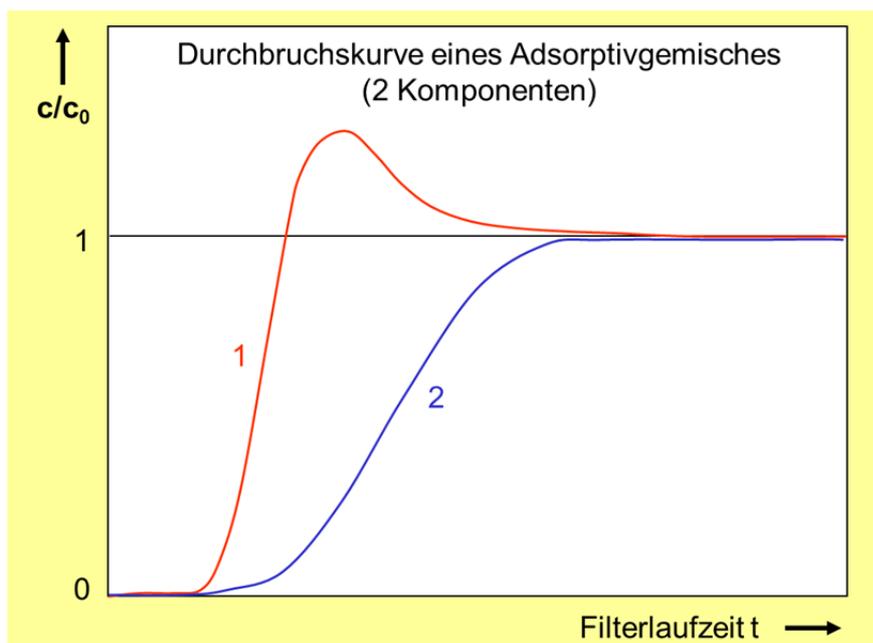
Über die Betriebszeit verlagert sich die aktive Zone tiefer in die Schüttung des Kornkohlefilters, wie **Bild 8** zeigt. In darunterliegenden Graphen ist die Ablaufkonzentration über der Filterlaufzeit aufgetragen. Der Durchbruch des Adsorptivs erfolgt zu dem Zeitpunkt, an dem die Übergangszone den unteren Rand der Schüttung erreicht hat. Im Filter wird zu diesem Zeitpunkt ein Teil des Adsorptivs noch zurückgehalten.

Bei der Adsorption von Mehrstoffgemischen konkurrieren, wie erwähnt, verschiedene Adsorptive um die Adsorptionsplätze auf dem Adsorbens. Dies kann dazu führen, dass ein schlecht adsorbierbarer Stoff, der rasch im Filterbett die Adsorptionsplätze belegt hat, von einem guten adsorbierbaren Stoff verdrängt wird.

Infolgedessen kann die Konzentration des schlecht adsorbierbaren Stoffes im Ablauf des Filters größer sein als die Zulaufkonzentration. Im **Bild 9** ist der Zusammenhang dargestellt. Dieses Verhalten wird „Chromatografie-Effekt“ genannt.



**Bild 7: Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985)**



**Bild 8: Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert)**

Zu beachten ist, dass bei mehreren Kohlenfiltern mit versetzten Laufzeiten (unterschiedlichen Beladungszuständen) der Verschnitt aller Abläufe eine bessere Qualität hat, als der Ablauf des schlechtesten (beladensten) Filters ist.

## 7.2.2 Einsatz Aktivkohle in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination

### 7.2.2.1 Pulveraktivkohle

Für die Spurenstoffelimination mittels Pulveraktivkohle als Stufe zwischen Nachklärung und Filtration liegen derzeit großtechnische Erfahrungen zu zwei Verfahren vor.

#### 1. Pulveraktivkohle in den Filterüberstau

Bei dem ersten Verfahren wird die Pulverkohle direkt in den Ablauf der Nachklärung vor der Filtration dosiert. Als Kontaktraum zwischen Kohle und Abwasser dient der Filterüberstau. Über die Filterlaufzeit reichert sich die Kohle im Filter und in der Schüttung an. Hier kann weiterhin eine Adsorption erfolgen. Bei der Rückspülung der Filter wird die beladene Kohle aus dem Filterbett entfernt. Über das Schlammwasser wird diese in den Zulauf der Kläranlage geführt. Dort kann eine weitere Beladung auf einem höheren Konzentrationsniveau erfolgen. In der Vorklärung wird die Kohle abgetrennt und mit dem Primärschlamm der Schlammbehandlung zugeführt.

Dieses Verfahren wurde von Meyer (2008) vorgeschlagen. Auf dem Klärwerk Wuppertal-Buchenhofen wurde für einen großtechnischen Versuch eine Filterkammer ( $A = 60 \text{ m}^2$ ) umgerüstet. Innerhalb eines Forschungsprojektes wurde der Betrieb dieser Kammer mit Pulveraktivkohledosierung über 1,5 a begleitet.

Die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst. Weitere Angaben sind dem Abschlussbericht (Bornemann u. a., 2012) zu entnehmen.

- Favorisierte Dosiermenge PAK: 20 mg/l.
- Fällmitteldosierung ist erforderlich, da sonst rascher Durchbruch der Kohle durch den Filter.
- Optimierte Fällmitteldosierung ( $\text{FeCl}_3$ ): 0,1...0,2 mg Fe/mg PAK.  
Bei 20 mg PAK/l sind dies 2...4 mg Fe/l.
- Rückhaltung der PAK im Filterbett zu 96 %.
- Über die Rückspülung wurde die gesamte Kohle wieder aus dem Filter entfernt.
- Das Rückspülintervall des Filters lag bei einer Rückspülung in 24 d. Dies entsprach dem regulären Betrieb des Filters.
- Bei den beschriebenen Dosierungen scheint für den Standort Buchenhofen eine dauerhafte Unterschreitung des Schwellenwertes der Abwasserabgabe von 20 mg/l erreichbar.
- Eliminationsleistung im PAK-Filter für Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol ca. 80 %, bezogen auf Filterzulauf.
- Gesamtelimination im Klärwerk mit PAK-Filter für die Stoffe Sulfamethoxazol, Diclofenac oder Metoprolol zwischen 80 und 90 %.

#### 2. Pulveraktivkohle mit Rückführung

Ein weiteres Verfahren stellt der Einsatz von Pulveraktivkohle in Verbindung mit einer Rückführung der Kohle dar.

Grundgedanke des Verfahrens ist die Zugabe von frischer Pulveraktivkohle (PAK) in biologisch gereinigtes Abwasser, wobei zur besseren Ausnutzung der Adsorptionskapazität der Kohle diese innerhalb der Stufe als Rücklauf im Kreislauf gefahren wird und so mehrmals mit frischem Abwasser in Kontakt kommt. Ein Teil der beladenen Kohle wird als Überschussskohle aus dem System entfernt und durch Frischkohle ersetzt. Die aus der Adsorptionsstufe abgezogene beladene Kohle kann zur weiteren Ausnutzung der Restadsorptionskapazität in die biologische Stufe rückgeführt werden. Alternativ kann sie über die Schlammbehandlung aus dem System ausgeschleust werden.

Für die eigentliche Adsorption ist ein Kontaktbecken mit einer Aufenthaltszeit von insgesamt 30 min vorgesehen. Die Abtrennung der Pulverkohle aus dem Abwasser erfolgt unter Einsatz von Flockungs- und Flockungshilfsmittel in der nachgeschalteten Sedimentation.

Restsuspensa und Kohlepartikel, die nicht in der Sedimentation der Adsorptionsstufe aus dem Wasser entfernt wurden, werden in der nachfolgenden Filtration zurückgehalten.

Dieses Verfahren wurde in Baden-Württemberg schon mehrfach umgesetzt. Als Beispiel sind folgende Kläranlagen zu nennen: Mannheim, Kressbronn-Langenargen, Stockacher Aach sowie Böblingen-Sindelfingen. Weitere Anlagen, wie Ravensburg oder Karlsruhe und Stuttgart, befinden sich im Bau bzw. in der Planung.

Die Ergebnisse aus dem Betrieb der großtechnischen Anlagen in Mannheim und Sindelfingen wurden von Schwentner u. a. (2013) veröffentlicht. Die wichtigsten Punkte werden hier wiedergegeben:

- optimierte PAK-Dosierung: 10 mg/l.
- Feststoffgehalt im Kontaktbecken: ca. 4 g TS/l.
- Einsatz von Fällmittel (Me-Salzen) und Flockungshilfsmittel (0,3 g/m<sup>3</sup>) hilfreich, um Filterdurchbruch zu verhindern.
- P<sub>ges</sub>-Gehalte im Ablauf Filtration von 0,1 mg/l erreichbar, wenn nicht fällbarer P-Anteil gering.
- kein Mehrverbrauch von Fällmittel → Simultanfällung wird reduziert, erhöhte Dosierung in Adsorptionsstufe.
- Reduktion CSB-Konzentration um ca. 30 % gegenüber Ablauf Nachklärung.
- Eliminationsleistung Mikroschadstoffe in Adsorptionstufe Kläranlage Sindelfingen größer 70 % bei 10 mg PAK/l für Bezafirbat, Diclofenac, Naproxen, Fenibrinsäure, Carbamazepin, Metoprolol, Iohexol, Iomeprol, Iopromid. Die Entnahme liegt bei ca. 10 % für das Antibiotikum Sulfamethoxazol.
- Stellenanteil Adsorptionsstufe ca. 0,65 MA/Monat.

### 7.2.2.2 Granulierte Aktivkohle

Der Einsatz von granulierter Aktivkohle in Festbettfiltern wurde in großtechnischen Versuchen in Nordrhein-Westfalen auf der Kläranlage Düren und der Kläranlage Obere Lutter untersucht.

In Düren wurde in einer vorhandenen Filterkammer die bestehende Schüttung (Zweischichtfilter) gegen granuliert Aktivkohle (GAK) ausgetauscht. Innerhalb eines Forschungsprojektes wurden zwei GAK-Füllungen untersucht (Bornemann u. a., 2012).

Die erste Kohle wies mit 1,4 bis 2,5 mm eine Körnung auf, die der oberen Schicht des ursprünglichen Zweischichtfilters entsprach. Die Füllhöhe betrug 1,2 m. Zusätzlich verblieben 0,4 m des alten Filtermaterials als untere Schicht im Filter. Die zweite GAK hatte mit 0,5 bis 2,5 mm eine feinere Körnung. Die Füllhöhe betrug 1,5 m. Das alte Filtermaterial wurde bis auf die Stüttschicht beräumt.

Die Filterkammer wurde analog zu den restlichen Filtern mit der regulären Filtergeschwindigkeit betrieben. Diese unterliegt der normalen Dynamik des Filterzulaufs.

Bei einer Elimination von rund 78 % können für die **erste GAK** folgende ausgetauschte Bettvolumina (BV) angesetzt werden:

Carbamazepin:	500 BV
Diclofenac:	900 BV
Metoprolol:	5.700 BV

Bei der **zweiten Aktivkohle** mit der feineren Körnung wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Carbamazepin:	2.500 BV
Diclofenac:	4.000 BV
Metoprolol:	4.600 BV

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass sich die Rückspülintervalle bei der zweiten Aktivkohle auf 6 h reduzierten. Bei der ersten Kohle unterschied sich die Rückspülhäufigkeit nicht von den restlichen Filtern.

Auf der Kläranlage „Obere Lutter“ wurde eine Filterkammer der bestehenden Filtration mit GAK ausgerüstet (Nahrstedt u. a. 2011). Der Filtration vorgeschaltet ist eine Festbett-denitrifikation. Die Schütthöhe betrug 2,5 m bei einer Filtergeschwindigkeit von 2 m/h. Dies entspricht einer Leerbettkontaktzeit (EBCT) von 75 min. Über eine Laufzeit von ca. 9.000 BV konnten sehr gute Eliminationsgrade für viele Spurenstoffe erzielt werden. Parallel dazu wurden Untersuchungen mit Versuchssäulen durchgeführt, die mit einer Filtergeschwindigkeit von 10 m/h durchflossen wurden. Die EBCT lag damit bei 15 min. Über eine Betriebszeit von etwa 9.000 Bettvolumina konnten für eine Auswahl von Spurenstoffen folgende mittlere Eliminationsgrade erreicht werden:

Ibuprofen:	59 %
Bezafibrat:	77 %
Diclofenac:	79 %
Carbamazepin:	90 %
Metoprolol:	91 %

Für CSB wurde eine mittlere Elimination von 45 % erzielt.

Hinsichtlich der erzielbaren Eliminationsgrade und Standzeiten der Filter wurden mit den nachgeschalteten GAK-Filtern (nach Festbettdenitrifikation) in der Kläranlage „Obere Lutter“ bessere Ergebnisse als mit dem Austausch des Filtermaterials in der bestehenden Filtration, wie in Düren, erzielt.

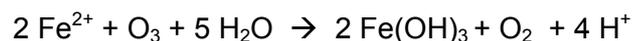
## 7.3 Ozonung

### 7.3.1 Grundlagen

#### 7.3.1.1 Einsatz und Wirkung von Ozon

Ozon wird als starkes Oxidationsmittel in der Wassertechnik schon lange genutzt. Hier ist z. B. die Trink- und Schwimmbadwasseraufbereitung zu nennen. Ozon wurde auch in der Abwasserreinigung eingesetzt, um Abwässer mit einem hohen Anteil schwer abbaubarer CSB-Verbindungen zu behandeln. Als Beispiel kann hier die Kläranlage Ochtrup genannt werden.

Ozon wirkt als Oxidationsmittel entweder durch Transfer eines Sauerstoffatoms oder rein durch Aufnahme von Elektronen des Oxidationspartners. Bei der Oxidation wird es selbst reduziert. Im folgenden Beispiel ist dies an der Oxidation von zweiwertigem zu dreiwertigem Eisen durch Ozon dargestellt:



Das  $\text{Fe}^{2+}$ -Ion gibt ein weiteres Elektron ab und ist dann dreifach positiv geladen. Das Ozon transferiert ein Sauerstoffatom zum sich bildenden dreiwertigen Eisenhydroxid.

Im Vergleich zu molekularem Sauerstoff ist Ozon als Oxidationsmittel mit einem Redoxpotenzial von 1,24 Volt gegenüber 0,401 Volt (bezogen auf pH 14) deutlich stärker.

Ozon oxidiert Nitrit sehr rasch bis zum Nitrat. Dabei werden je g Nitritstickstoff stöchiometrisch 3,43 g Ozon benötigt. Es geht keine Reaktion mit Ammonium ein.

Die Reaktionswege des Ozons sind sehr unterschiedlich. Damit ist die Wirkung des Ozons komplex.

Zum einen kann Ozon direkt mit den anorganischen und organischen Wasserinhaltsstoffen reagieren; indirekt erfolgt die Reaktion über Hydroxid-Radikale ( $\text{OH}\cdot$ ). Je nach Milieubedingung überwiegt eine der beiden Reaktionsweisen. Im Wasser mit neutralem pH-Wert, geringer DOC-Hintergrundbelastung und niedrigen Temperaturen dominiert die direkte Reaktion. Bei höheren pH-Werten und DOC-Konzentrationen erfolgt die Reaktion zumeist über den indirekten Weg.

Die Bildung der genannten Radikale erfolgt beispielsweise über die Anwesenheit bestimmter Wasserinhaltsstoffe, wie Huminstoffe. Die  $\text{OH}$ -Radikale reagieren sehr schnell, jedoch auch sehr unspezifisch. Zudem können sie durch sogenannte Radikalfänger (Scavenger) reduziert werden. Als Fänger können Karbonationen (Härtebildner), Huminstoffe, aber auch Ortho-Phosphat wirken. Die Radikale reagieren jedoch auch mit Wasserinhaltsstoffen, die allein mit dem Ozon nicht reagiert hätten.

Bei dem sogenannten AOP (Advanced Oxidation Process) wird die Bildung von Radikalen künstlich unterstützt. Beim Peroxon-Verfahren durch die Dosierung von Wasserstoffperoxid als zweites Oxidationsmittel oder durch eine UV-Bestrahlung parallel zur Ozondosierung.

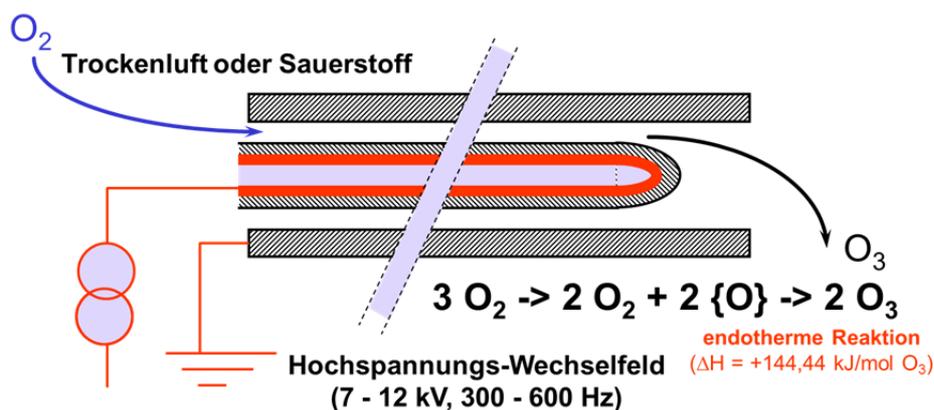
Insgesamt oxidiert Ozon die meisten organischen Wasserinhaltsstoffe nicht bis zum  $\text{CO}_2$ , sondern bewirkt eine Teiloxidation. Die Molekülgröße der Stoffe wird verringert. Ozon wirkt weiterhin bevorzugt auf Doppelbindungen in den Molekülen. Dies bedeutet, dass durch die Ozonbehandlung Zwischenprodukte gebildet werden, die beispielsweise wieder biologisch verfügbar sind. Der Ozonbehandlung in der Trinkwasseraufbereitung wird zumeist standardmäßig eine biologisch arbeitende Stufe nachgeschaltet (z. B. biologisch aktivierter Aktivkohlefilter), um die neu gebildeten Stoffe abzubauen zu können.

Weiterhin ist die toxikologische Wirkung der gebildeten Transferprodukte zu beachten.

### 7.3.1.2 Ozonanwendung

Ozon ist aufgrund seiner hohen Reaktivität selbst sehr instabil. Es wird daher in der Regel am Ort der Anwendung hergestellt.

Dies erfolgt über die stille elektrische Entladung aus Sauerstoff bzw. sauerstoffhaltigem Gas (Luft) in einem Hochspannungs-Wechselfeld. In nachstehender Grafik ist dies schematisch dargestellt.



**Bild 9:** Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert)

Die Reaktion selbst ist endotherm; es muss also Energie in Form von elektrischer Energie zum Ablauf der Reaktion von außen zugeführt werden. Theoretisch werden pro kg Ozon 0,836 kWh benötigt. In der Praxis kann dieser Wert aufgrund von Verlusten (rascher Zerfall) nicht erreicht werden. Moderne Ozonerzeuger benötigen ca. 8...10 kWh/kg  $\text{O}_3$ , wenn technischer Sauerstoff als Prozessgas eingesetzt wird.

Die Verluste treten in Form von Wärme auf, die abgeführt werden muss. Dies bedeutet, dass der Ozonerzeuger gekühlt werden muss. Dazu sind wiederum Energieaufwendungen notwendig.

Aufgrund der gesundheitsschädlichen Wirkung des Ozons muss die Abluft aus den Reaktionsbecken vor Abgabe in die Umgebung behandelt werden. Zur sogenannten Restozonvernichtung stehen thermisch/katalytische oder thermische Verfahren zur Verfügung.

Insgesamt addiert man den Energiebedarf von  $\text{O}_3$ -Erzeugung, Kühlung und Restozonvernichtung; so ergibt sich ein Bedarf an elektrischer Energie von 10...11 kWh/kg  $\text{O}_3$ .

Für den Eintrag des Ozons werden im Abwasserbereich heute zwei Verfahren vorwiegend genutzt.

1. **Eintrag über Diffusoren.** Das ozonhaltige Gas wird über Domdiffusoren aus Keramik in das Abwasser eingetragen.
2. **Eintrag über Injektoren.** Ein Teilstrom des zu behandelnden Abwassers wird über Injektoren mit dem ozonhaltigen Gas versetzt. Dieser ozonhaltige Teilstrom wird nachfolgend mit dem Hauptstrom vermischt.

Für den Eintrag über Injektoren ist ein weiterer Pumpenkreislauf notwendig. Aufgrund der nur geringen Ozoneinträge für die Spurenstoffelimination stellt für diesen Anwendungsfall der Eintrag über Diffusoren das bevorzugte Eintragungssystem dar.

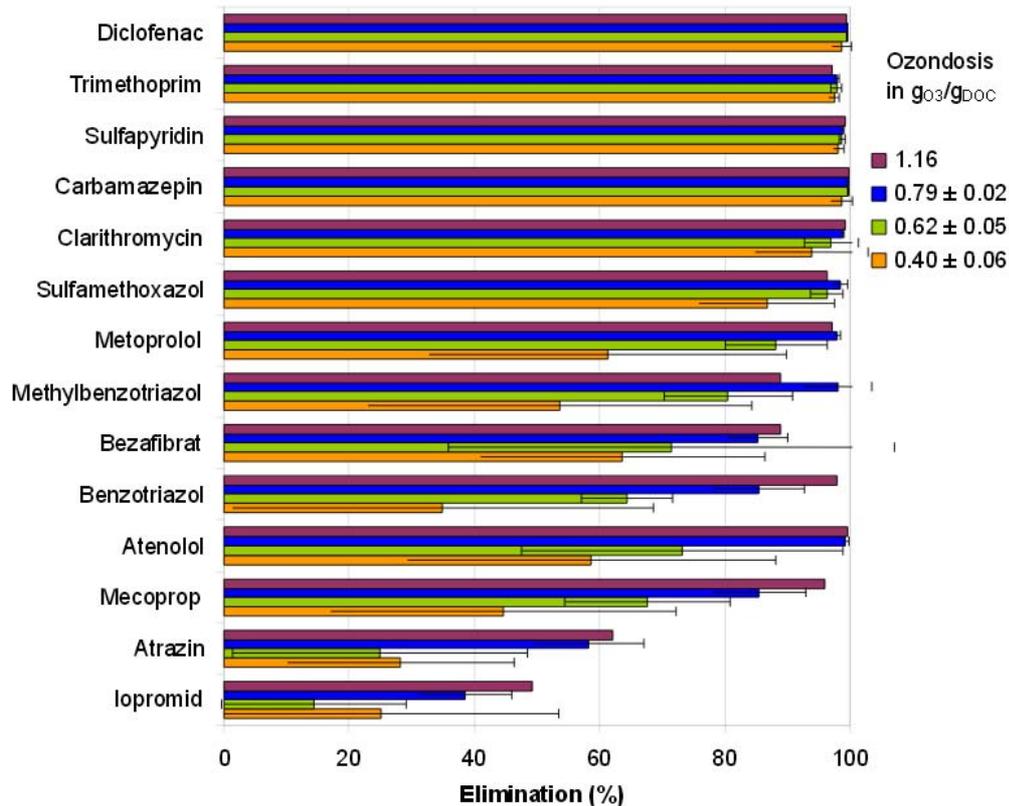
Der Eintrag erfolgt in beiden Systemen in Behältern mit einem Wasserspiegel zwischen 5 und 6 m. Neben dem Eintrag erfolgt in diesen Kammern auch die Reaktion des Ozons mit den Wasserinhaltsstoffen. Die Aufenthaltszeit in den Kontakt-/Traktionsbehältern liegt zwischen 15 und 30 min. Einbauten in den Behältern, mit Ausnahme einer Tauchwand im Abflussbereich, ergeben keine Verbesserungen (Herbst u. a., 2011). Der Ablauf aus dem Behälter wird, wie schon erwähnt, der Restozonbehandlung zugeführt.

### 7.3.2 Einsatz von Ozon in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination

Zum Einsatz von Ozon in der 4. Reinigungsstufe gibt es verschiedene Untersuchungen auch im großtechnischen Maßstab.

Ternes u. a. (2003) führten Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab mit dem Ablauf der Kläranlage Braunschweig durch. Bei einer Ozondosis von 10 mg/l wurden von den 23 untersuchten Arzneimittelwirkstoffen alle bis unter die Nachweisgrenze eliminiert. Eine weitgehende Wirkung war jedoch auch schon bei einer Dosierung von 5 mg/l zu beobachten. Eliminationsgrade von über 80 % konnten bei den drei Röntgenkontrastmitteln Iopamidol, Iomeprol und Iopromid erst bei Dosierung von 15 mg/l erreicht werden. Der DOC des Kläranlagenablaufs betrug 23 mg/l; der pH-Wert lag bei 7,2. Die Kontaktzeit des Ozons lag bei 9 min.

Auf der Kläranlage Regensdorf (30.000 EW) in der Schweiz wurden im technischen Maßstab Untersuchungen durchgeführt (Abegglen u. a. 2009). Der Ablauf aus der Nachklärung der Anlage wurde mit Ozon behandelt. Dem Ozon nachgeschaltet war die (bestehende) Filtrationsanlage. Der DOC im Ablauf der Nachklärung lag mit ca. 5 mg/l auf einem niedrigen Niveau. In der Grafik, **Bild 11**, sind die erzielten Eliminationsgrade dargestellt.



**Bild 10: Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensburg (Abegglen u. a. 2009)**

In wirtschaftlicher und betrieblicher Hinsicht erwies sich in Regensburg eine Ozondosis von 0,62 mg O<sub>3</sub>/mg DOC als optimal. Aufgrund des geringen DOC im Ablauf der Nachklärung ergab sich daraus eine Ozondosis von 3,1 mg/l. Bei einer Übertragung auf andere Standorte mit einem gegebenenfalls höheren DOC-Gehalt im Zulauf der Ozonstufe ist dies zu berücksichtigen.

Innerhalb des Projektes wurden auch die Bildung von Transferprodukten und ihre Umweltrelevanz untersucht. Es zeigte sich, dass der Ablauf der Ozonung ein erhöhtes ökotoxikologisches Potenzial aufwies. Durch den nachgeschalteten Sandfilter wurde dieses wieder reduziert. Die Bildung von stabilen und toxikologisch relevanten Reaktionsprodukten konnte nicht festgestellt werden. In Regensburg handelte es sich um einen Dynasandfilter, der mit einer Filtergeschwindigkeit von 14,4 m/h im Trockenwetterfall betrieben wurde. Bei einer Filterbetttiefe von 1 m ergibt dies eine Aufenthaltszeit von ca. 4 min.

In Nordrhein-Westfalen wurden die kommunalen Kläranlagen Bad Sassendorf, Schwerte und Duisburg-Vierlinden mit einer Ozonstufe ausgerüstet. Bei den Kläranlagen Bad Sassendorf und Vierlinden wird der Ablauf ozoniert. Die Ergebnisse beider Anlagen entsprechen sich (Grünebaum u. a., 2012).

Die notwendigen Ozondosen, die in Duisburg-Vierlinden und Bad Sassendorf zur Eliminierung notwendig waren, bewegen sich auf dem Niveau der Werte von Regensburg. Zu berücksichtigen ist, dass der DOC im Ablauf der Nachklärung in Bad Sassendorf ebenfalls auf einem niedrigen Niveau liegt.

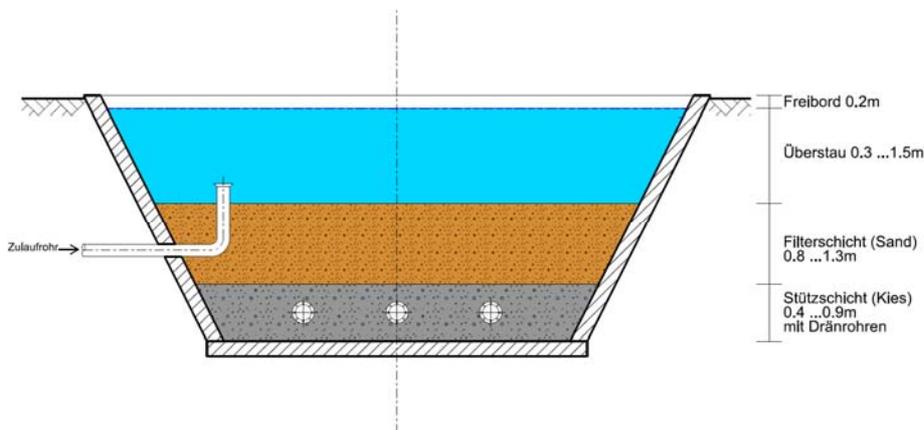
## 7.4 Langsamfilter

### 7.4.1 Grundlagen

Langsamfilter stellen eines der ältesten Aufbereitungsverfahren für Wasser dar. In Deutschland werden sie beispielsweise in der Trinkwasseraufbereitung zur Behandlung von Oberflächenwässern gegebenenfalls auch in Kombination mit einer Grundwasseranreicherung eingesetzt. In der Abwasserbehandlung werden sie in der Bundesrepublik bis auf wenige Ausnahmen nicht eingesetzt.

Langsamfilter verfügen über eine komplexe Wirkung. Neben der rein physikalisch wirkenden Abtrennung von suspendierten Partikeln aus dem Wasser (Filter) sind dies auch chemische und vor allem biologische Abbauprozesse.

Den prinzipiellen Aufbau eines Langsamfilters zeigt die nachfolgende Abbildung.



**Bild 11: Aufbau Langsamfilter**

Der Betrieb der Langsamfilter ist durch eine geringe Filtergeschwindigkeit gekennzeichnet, die im Bereich  $m/d$  liegt. Bei Schnellfilter bewegt sich diese im Bereich  $m/h$ . Der beschriebene Partikelrückhalt erfolgt in erster Linie durch eine Oberflächenfiltration. Dadurch bildet sich an der Filteroberfläche eine Schicht in  $cm$ -Stärke aus, die als Schmutzdecke bezeichnet wird. Die adsorptive Wirkung des Filters erfolgt über die Filtertiefe (Raumwirkung).

Die Besonderheit des Langsamfilters stellt die biologische Wirkung des Filters dar, die sich sowohl auf die Schmutzdecke als auch auf den Filterraum bezieht. Diese führt zu einer deutlichen Reduzierung der organischen Belastung durch biologischen Abbau sowie zu einer deutlichen Reduzierung der Keimbelastung. Weiterhin können die Filter durch Nitrifikation von Ammonium genutzt werden, wenn im Zulauf ausreichende Sauerstoffverhältnisse im Wasser eingestellt werden (Kaskade).

Da die Filter in der Regel über keine Rückspülmöglichkeit verfügen, ist in festgelegten Intervallen (3...24 Monaten) ein sogenanntes Abschälen der Schmutzdecke notwendig. Dabei wird mechanisch neben der genannten Decke auch die oberste Sandschicht abgehoben. Nach etwa fünf- bis achtmaligem Abschälen ist ein Neuaufbau der Filterschicht notwendig. Der abgeschälte Sand kann gegebenenfalls wiederverwendet werden. Hinsichtlich der Intervalle liegen für den Abwasserbereich keine gesicherten Daten vor.

Über ein Dränagesystem wird das gereinigte Wasser gefasst und aus dem Filter abgeführt. Der Abstand der Dränrohre untereinander beträgt 0,5...2,0 m. Die Fließgeschwindigkeit in den Leitungen sollte etwa 0,6 m/s betragen.

Über die Entsorgung der Schmutzdecke beim Einsatz von Langsamfiltern in der Abwassertechnik liegen keine Erfahrungen vor. Gegebenenfalls ist eine Weiterbehandlung in der Schlammbehandlung möglich.

#### **7.4.2 Einsatz von Langsamfiltern in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination**

Über die Eliminationsleistung der Langsamfilter im Hinblick auf Spurenstoffe sind verschiedene Ergebnisse, in erster Linie aus der Nutzung der Filter in der Trinkwasseraufbereitung bekannt. Wobei keine abschließende Bewertung möglich ist.

Untersuchungen von Preuß u.a. (2001) an Testfiltersystemen, die im Aufbau Langsamfiltern entsprechen, zeigten eine gute Eliminierung (60 bis 80 %) von Bezafibrat, Diclofenac und Ibuprofen, eine mittlere Eliminierung (20 bis 40 %) beim Stoff Gemfibrozil sowie eine geringe Eliminierung (20 bis 40 %) von Carbamezepin. Weiterhin wurde berichtet, dass die Filter eine Einarbeitungszeit von bis zu fünf Tagen – bei Carbamazepin 17 d -- benötigen bis die biologische Mitwirkung die volle Leistungsfähigkeit erreicht hat.

Es ist davon auszugehen, dass die Langsamfiltration bei einigen Stoffen eine sehr weitgehende Elimination ermöglicht, während bei anderen Stoffen die Reinigung nur im mittleren Bereich liegt, sodass noch ein weiterer Aufbereitungsschritt notwendig wird. Dies könnte z. B. die Ozonung sein. Da das Abwasser weitgehend partikelfrei ist und auch die gelösten organischen Inhaltsstoffe reduziert wurden, ist hier eine deutlich reduzierte Ozondosis zu erwarten.

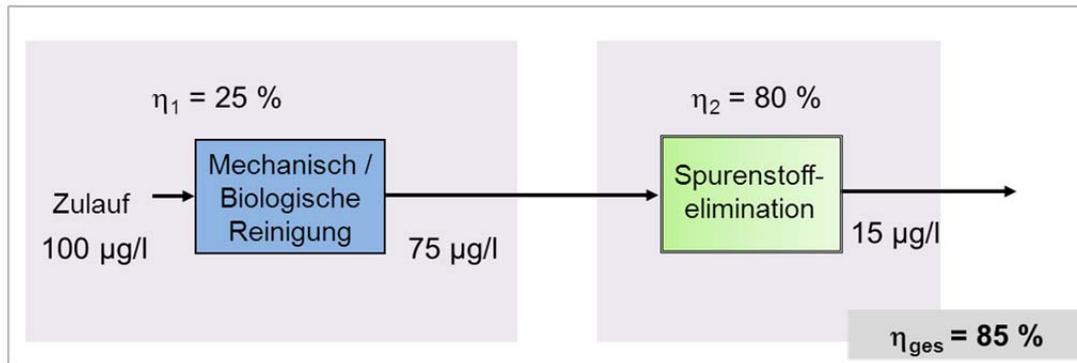
### **8 Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen**

#### **8.1 Beschickungsmenge**

Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Auslegung der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination ist eine Betrachtung zur Teilstrombehandlung erforderlich. Der Teilstrom wird so gewählt, dass ein Großteil der jährlichen Abflusssituationen darüber abgedeckt wird. Zudem muss sichergestellt sein, dass eine ausreichende Spurenstoffelimination in der Gesamtanlage (bestehende Anlage + 4. Reinigungsstufe) erfolgt.

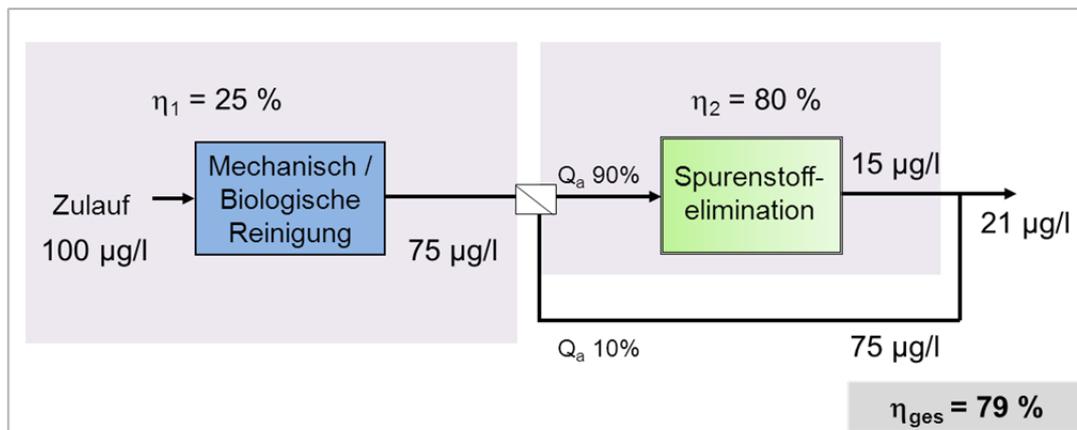
Im Folgenden wird dies am Beispiel des Arzneimittels Diclofenac dargestellt. Für diesen Stoff kann in der bestehenden mechanisch/biologischen Reinigungsstufe ein Eliminationsgrad von 25 % angesetzt werden (Siegrist 2013, Bsp. Diclofenac). In der weitergehenden Abwasserreinigung wird von einer zusätzlichen Eliminationsrate von 80 % in dieser Reinigungsstufe ausgegangen. Unter diesen Rahmenbedingungen kann bei einer Vollstrombehandlung ein Gesamtwirkungsgrad von 85 % erreicht werden. Bei einer Teilstrombehandlung von 90 % der gesamten Abwassermenge können Eliminationsarten von 79 % erzielt werden. Schematische Darstellungen dazu siehe **Bild 12** und **Bild 13**.

### Beispiel Vollstrombehandlung



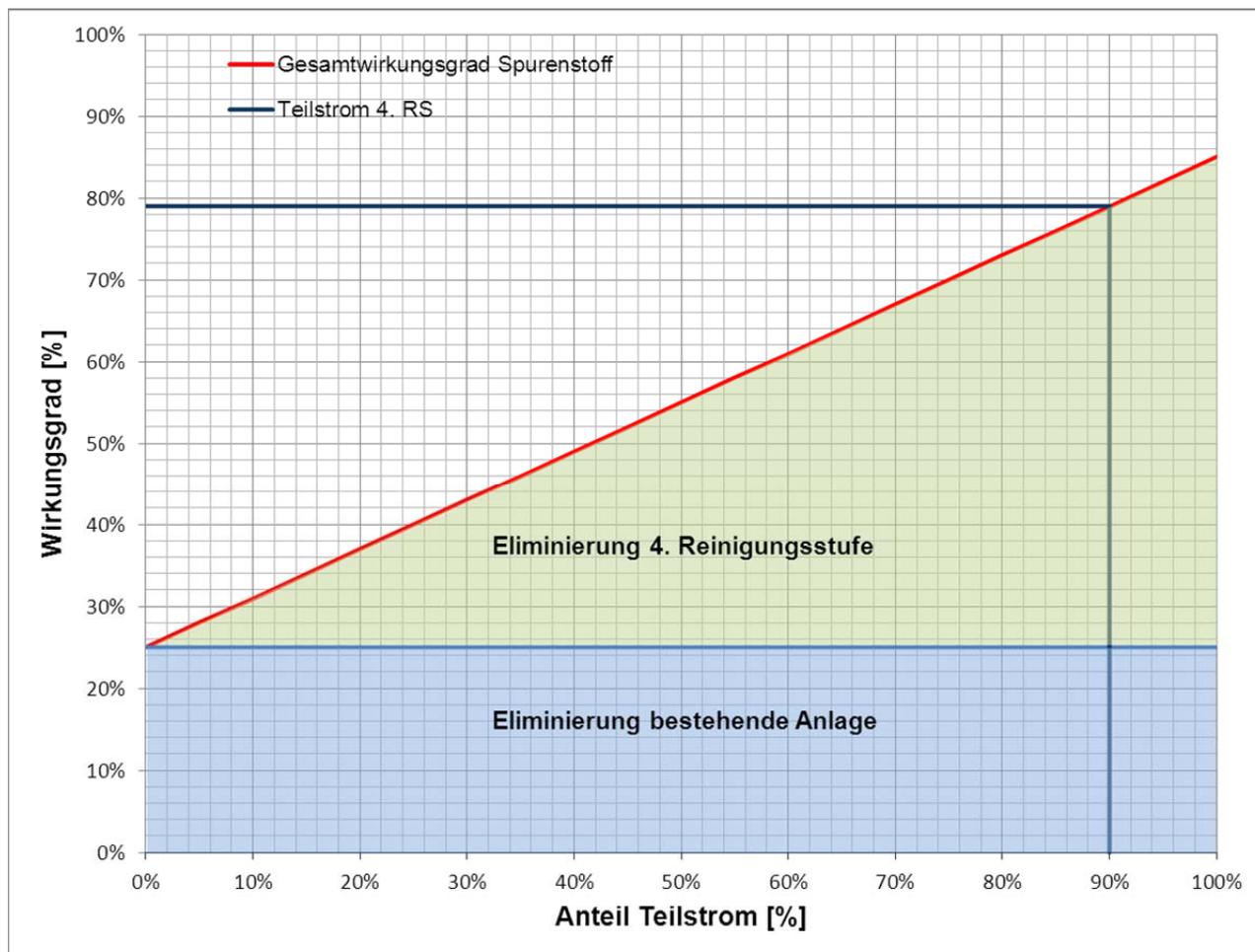
**Bild 12:** Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

### Beispiel Teilstrombehandlung



**Bild 13:** Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

Stellt man den Zusammenhang zwischen den Anteilen Teilstrombehandlung und Eliminationsgrad unter den oben genannten Annahmen grafisch dar, so ergibt sich der im **Bild 14** gezeigte Zusammenhang.



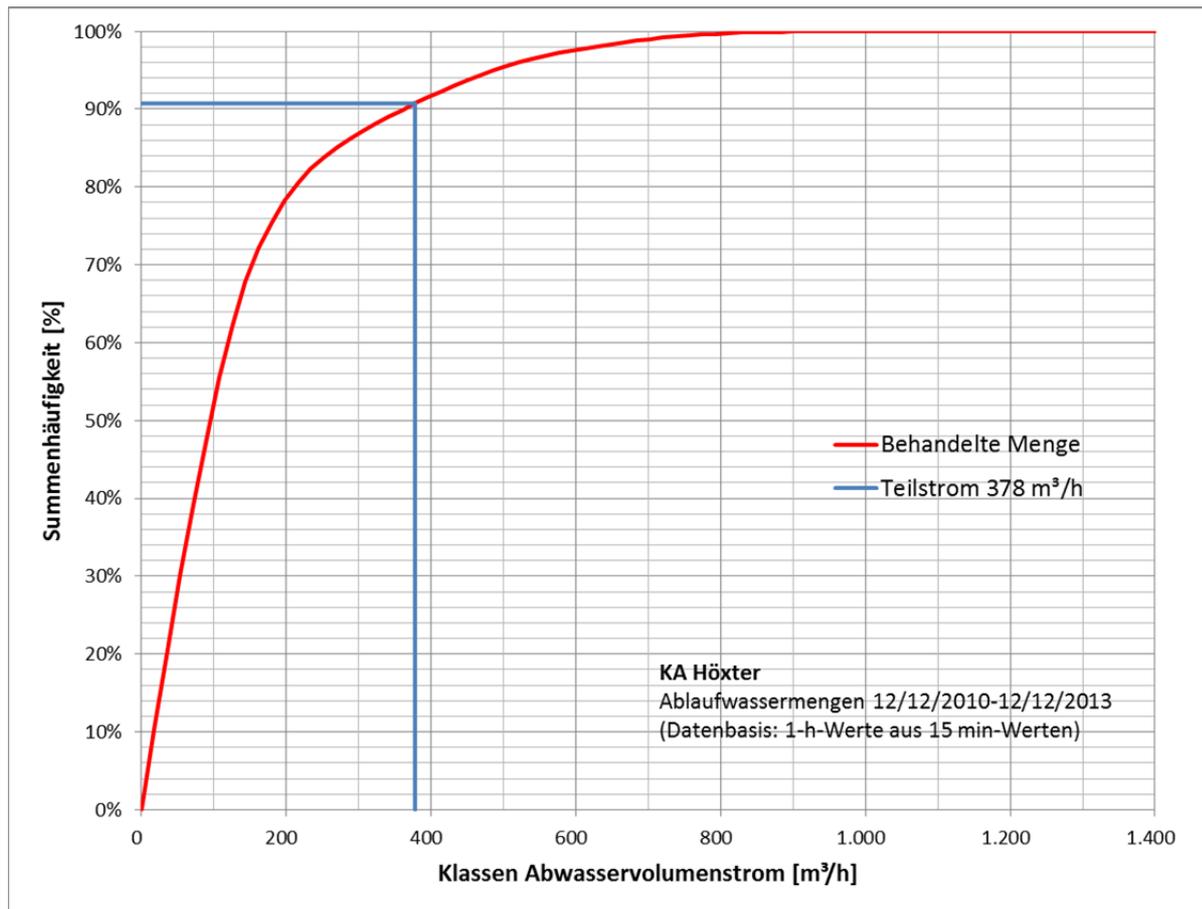
**Bild 14:** Beispielhafte grafische Darstellung der Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung

Die Bemessung der 4. Reinigungsstufe erfolgt auf Basis der Ablaufwerte der Kläranlage Höxter für den Zeitraum Dezember 2010 bis Dezember 2013 (**Kapitel 3**).

Für eine Vollstrombehandlung müsste auf der Kläranlage Höxter eine Kapazität zur Behandlung von 1.670 m<sup>3</sup>/h vorgehalten werden. Die Auswertung der Abwassermengen zeigt jedoch deutlich, dass bereits Abwassermengen > 810 m<sup>3</sup>/h an weniger als 2,4 % Stunden im betrachteten Zeitraum überschritten werden.

**Bild 5** stellt die Summenhäufigkeit der einzelnen Teilstrommengen dar. Wenn die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf 378 m<sup>3</sup>/h ausgelegt wird, werden 90,74 % der Jahresabwassermenge behandelt. Unter den gewählten Ansätzen kann somit eine Elimination von 79 % erreicht werden.

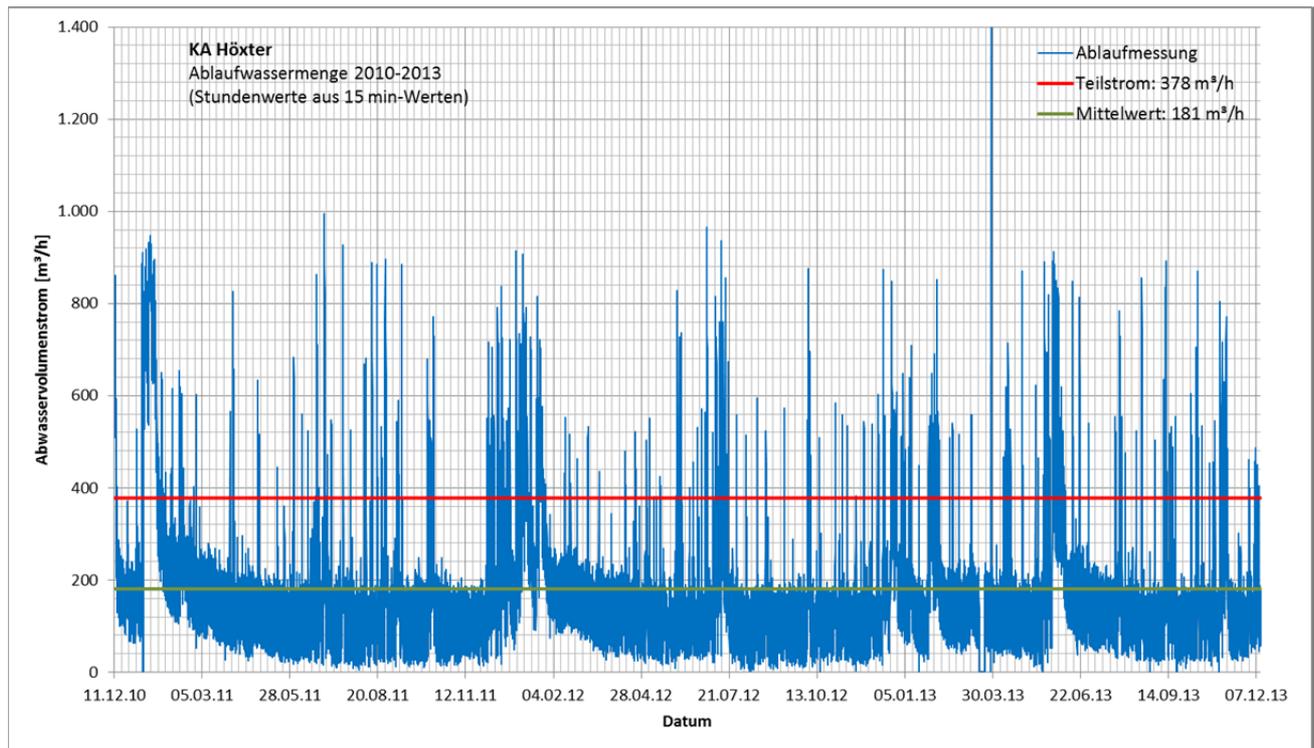
Die Verfahrensstufe kann so bei einer Behandlung von 90,74 % der Jahresabwassermenge im Vergleich zur Vollstrombehandlung um 70 % kleiner ausgeführt werden. Im Verhältnis der erreichbaren Wirkungsgrade von 79 % oder 85 % wird die Teilstrombehandlung mit einem Volumenstrom von **378 m<sup>3</sup>/h** als geeignet betrachtet, sodass die Bemessung und der Verfahrenvergleich auf Grundlage dieser Bemessungswassermenge beruhen.



**Bild 15: Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination**

Bei einem Teilstrom von maximal 378 m<sup>3</sup>/h würde eine Abwassermenge von rund **1.361.716 m<sup>3</sup>/a** in der vierten Reinigungsstufe behandelt.

Die berechnete Gesamtabwassermenge nach dieser Auswertung beträgt 1.492.084,03 m<sup>3</sup>/a. Die Mengen beziehen sich auf die eigene Auswertung der Stundenwerte von 12/2010 bis 12/2013.



**Bild 16: Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination**

## 8.2 Verfahrensfestlegung

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie werden die folgenden vier Verfahrenskombinationen untersucht:

1. **Pulverkohle mit Rücklaufkohleführung.** Abtrennung der PAK in einem Absetzbecken und in der nachgeschalteten Tuchfiltration.
2. **Filtration über granulierten Aktivkohle.** Festbettadsorber werden der bestehenden Anlage nachgeschaltet
3. **Ozonung mit Nachbehandlung im vorhandenen Schönungsteich.** Ablauf der Nachklärung wird mit Ozon behandelt und anschließend in den vorhandenen Schönungsteich geleitet, der als biologisch aktive Stufe fungiert
4. **Langsamfilter** Ablauf der Nachklärung wird über einen Langsamfilter als Erdbecken geführt. Die Variante wird als Teilvariante a) mit einer nachgeschalteten Ozonung sowie als Teilvariante b) ohne diese betrachtet.

## 8.3 Randbedingungen

Für die 4. Reinigungsstufe steht die Erweiterungsfläche nördlich und westlich um die bestehende Anlage zur Verfügung.

Für die Erweiterung der bestehenden Belebungsstufe wird der Bereich westlich der bestehenden Anlage vorgesehen. Daher werden die Anlagen für die 4. Reinigungsstufe westlich des Schönungsteiches angeordnet.

In allen untersuchten Varianten wird das bestehende Mengenmessbauwerk durch einen Neubau ersetzt, da sich dadurch auch Vorteile in hydraulischer Hinsicht in der Einbindung der 4. Reinigungsstufe in den Anlagenbestand ergeben.

In nachstehendem Bild ist die KA Höxter im Luftbild dargestellt.



**Bild 17: Luftaufnahme der KA Höxter mit Katastergrenzen (Quelle: Stadt Höxter)**

## 8.4 Varianten

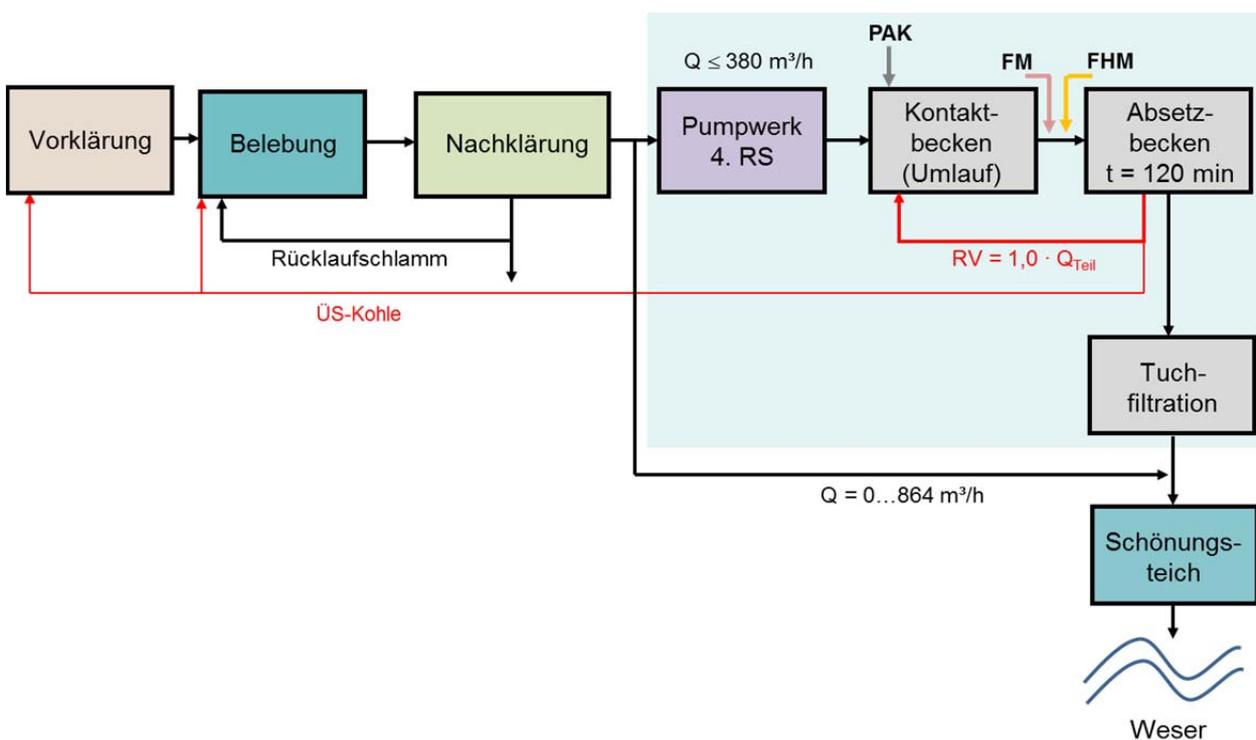
### 8.4.1 Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle

#### 8.4.1.1 Allgemein

Dieses Verfahren wurde, wie schon im **Kapitel 7.1.2.1** beschrieben, an einigen Standorten in Baden-Württemberg umgesetzt. Für die Rückführung der Kohle ist ein Absetzbecken notwendig. Die Rücklaufkohle wird zusammen mit der Frischkohle im Zulauf des Kontaktbeckens dem Ablauf der Nach-

klärung zugegeben. In dem Absetzbecken vorgeschalteten Kontaktbecken erfolgt der eigentliche Adsorptionsvorgang. Der im Absetzbecken zurückgehaltene Kohleschlamm wird über eine Pumpe als Rücklaufkohle wieder in den Zulauf des Kontaktbeckens zurückgefördert. Entsprechend der Frischkohledosierung wird ein Teil der rückgeführten Kohle als Überschussskohle aus dem System entnommen. Besonderer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Pulverkohle mehrfach mit dem Abwasser in Kontakt kommt, um die Beladungskapazität möglichst gut ausnützen zu können.

Für die Kläranlage Höxter würde dies bedeuten, dass ein Kontakt- und ein Absetzbecken sowie eine Filtration gebaut werden müssen. Weiterhin ist ein Silo einschließlich der Dosiertechnik für die Pulveraktivkohle notwendig. Für die Dosierung des ME-Salzes (Fe(III)-Chlorid) als Flockungsmittel ist die Erneuerung der bestehenden Dosieranlage notwendig. Insgesamt muss die Fällmitteldosierung auf der Kläranlage von zweiwertigem Eisen (Grünsalz) auf ein dreiwertiges Eisenprodukt umgestellt werden. Hintergrund ist, dass die notwendige Oxidation des zweiwertigen Produktes im Zulauf des Absetzbeckens der PAK-Stufe nicht sichergestellt werden kann. Die Umstellung bringt zudem Vorteile in der Belebung, da das Fällmittel sofort wirksam ist. Die spezifischen Kosten für dreiwertige Fällmittel liegen jedoch höher als bei Grünsalz, dafür ist die Handhabung auf der Kläranlage einfacher (kein Anlösen).



**Bild 18: Systemskizze Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle**

Diese Variante hat neben der Elimination der Spurenstoffe auch einen großen Einfluss auf die Parameter  $CSB$ ,  $P_{\text{ges}}$  und abfiltrierbare Stoffe im Teilstrom. Insgesamt ist davon auszugehen, dass auch bei diesen Parametern deutlich geringere Ablaufwerte zu erwarten sind. Zu beachten ist, dass jeweils immer nur ein Teilstrom von maximal  $380 \text{ m}^3/\text{h}$  behandelt wird.

Ein Mehrverbrauch an Fällmittel (Me-Salzen) gegenüber dem Ausgangszustand konnte beispielsweise in Böblingen-Sindelfingen nicht festgestellt werden, da die Dosierung der Simultanfällung reduziert werden konnte. Die Dosierung hat sich also in die 4. Reinigungsstufe verlagert.

Bei dieser Variante erhöht sich der Schlammfall der Kläranlage. Nach Erfahrungen von bereits in Baden-Württemberg realisierten Anlagen setzt sich der in dieser Stufe anfallende Schlamm zu jeweils einem Drittel aus Aktivkohle, Organik und anorganischen Fällprodukten zusammen.

#### **8.4.1.2 Ausführung**

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 1** der Planunterlagen dar.

##### **Pumpwerk 4. Reinigungsstufe**

Die Beschickung der PAK-Stufe erfolgt über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das in die bestehende Ablaufleitung vor dem Mengemessbauwerk angeordnet wird. Über ein Wehr wird ein Mindestwasserstand im Schacht als Pumpenvorlage für die beiden Tauchmotorpumpen eingestellt. Der Volumenstrom, der oberhalb der maximalen Teilstrommenge liegt und somit von den Pumpen nicht gehoben wird, fließt über das Wehr zum Mengemessbauwerk ab. Die Ablaufleitung von der 4. Reinigungsstufe wird ablaufseitig in das Pumpwerk eingebunden.

##### **Kontaktbecken und Absetzbecken**

Für die Sedimentationsstufe ist ein horizontal durchströmtes Absetzbecken (Rundbecken) vorgesehen. Das Kontaktbecken wird als umlaufendes Gerinne um das Sedimentationsbecken angeordnet.

Das Absetzbecken wird mit einem Innendurchmesser von 17 m ( $D_a = 17,80$  m) ausgeführt. Das Becken wird mit einem Rundräumer ausgerüstet. Die Oberfläche beträgt 217 m<sup>2</sup> und das Volumen 869 m<sup>3</sup>. Die Beckentiefe ( $h_{2/3}$ ) liegt bei 4,0 m.

Das Kontaktbecken wird mit einer Breite von 2,25 m umlaufend um das Absetzbecken ausgeführt. Das Volumen beträgt 567 m<sup>3</sup>.

An der Beckenperipherie wird die Rücklaufkohlepumpe (Schneckenpumpwerk) angeordnet. Diese fördert die Rücklaufkohle wieder in den Zulauf vor dem Kontaktbehälter zurück. Die Überschussskohle wird über eine weitere Pumpe aus dem Schacht entnommen und zur Vorklärung (oder zur Belebung) geleitet.

##### **PAK-Silo**

Das Silo zur Lagerung der Aktivkohle mit einem Inhalt von 50 m<sup>3</sup> wird neben dem Absetzbecken erstellt. Die Dosierung der Frischkohle erfolgt in den Zulauf des Kontaktbeckens. Das Treibwasser (5 bis 7 m<sup>3</sup>/h) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Betriebswassernetz bzw. dem Ablauf des Tuchfilters entnommen.

## Flockungs- und Flockungshilfsmittel

Als Flockungsmittel wird ein dreiwertiges Eisen-Produkt (z. B. Eisen-III-Chlorid-Lösung) vorgesehen. Dazu ist, wie schon im **Kapitel 8.4.1.1** beschrieben, eine Umstellung der Fällmitteldosierung auf der KA Hörter von zweiwertiges auf dreiwertiges Eisen notwendig.

Es wird eine Erneuerung der bestehenden Fällmittelstation inklusive Tank und Abfüllplatz vorgesehen, die dann für die Simultanfällung und die 4. Reinigungsstufe genutzt wird.

Die Bereitungsanlage für das Flockungshilfsmittel wird in einer Einhausung neben dem Kombibecken untergebracht. Hier kann auch die E-Verteilung der 4. Reinigungsstufe aufgestellt werden.

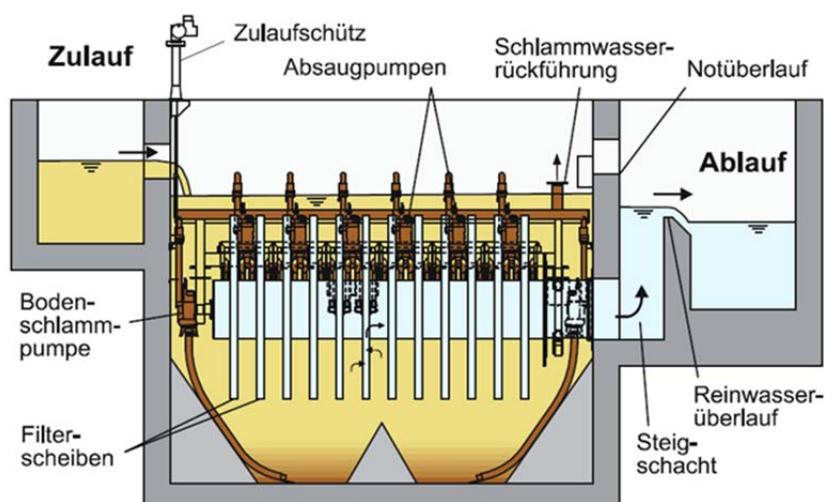
## Tuchfiltration

Dem Absetzbecken wird die Tuchfiltration zur Suspensa-Restentfernung nachgeschaltet.

Es wird hier eine zweistraßige Tuchfiltration mit je 6 Scheiben à 5 m<sup>2</sup> vorgesehen. Je Straße ergibt sich eine Filterfläche von 30 m<sup>2</sup>. Durch die zweistraßige Ausführung ist es möglich, eine Straße bei Wartungsarbeiten außer Betrieb zu nehmen und die 4. Reinigungsstufe noch mit vollem Durchsatz betreiben zu können. Gegebenenfalls ist hier in der weiteren Planung noch eine Optimierung der Auslegung möglich, die zu geringeren Investitionskosten für die Filtrationsstufe führt.

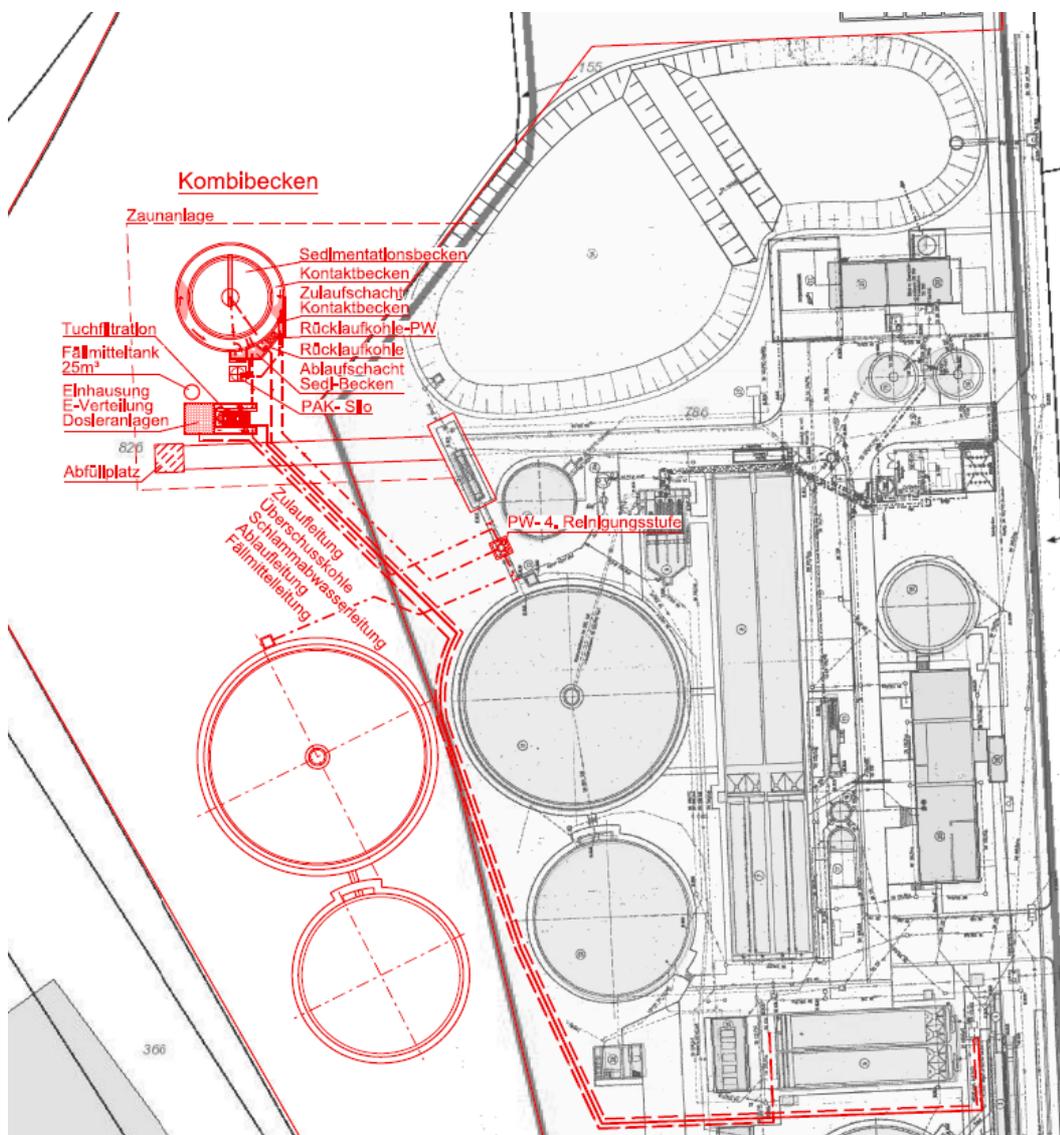
Die Tuchfiltration wurde in Bezug auf die Abtrennung von Aktivkohle in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht. Derzeit wird auf der Kläranlage Lahr die erste Anlage im technischen Maßstab umgesetzt. Vorteile der Tuchfiltration sind der geringe Platzbedarf und die geringen Energiekosten im Betrieb (Rückspülung und hydraulische Verluste) gegenüber Raumfiltern. Zu beachten ist, dass die Filtertücher in regelmäßigen Abständen (ca. 5 a) erneuert und jährlich einer Intensiv-Reinigung unterzogen werden müssen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Tuchfilter im Schnitt.



**Bild 19: Schnitt eines Tuchfilters, Ausführungsbeispiel (Quelle: Mecana)**

Der Ablauf der Tuchfilter wird über eine Rohrleitung in den Ablauf der Kläranlage nach dem Pumpwerk 4. Reinigungsstufe zurückgeführt.



**Bild 20:** Lageplanausschnitt Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle

## 8.4.2 Variante 2: Filtration über granulierte Aktivkohle

### 8.4.2.1 Allgemeines

Der ausgewählte Teilstrom (Ablauf Nachklärung) von maximal 380 m<sup>3</sup>/h wird über Aktivkohlefilter geführt.

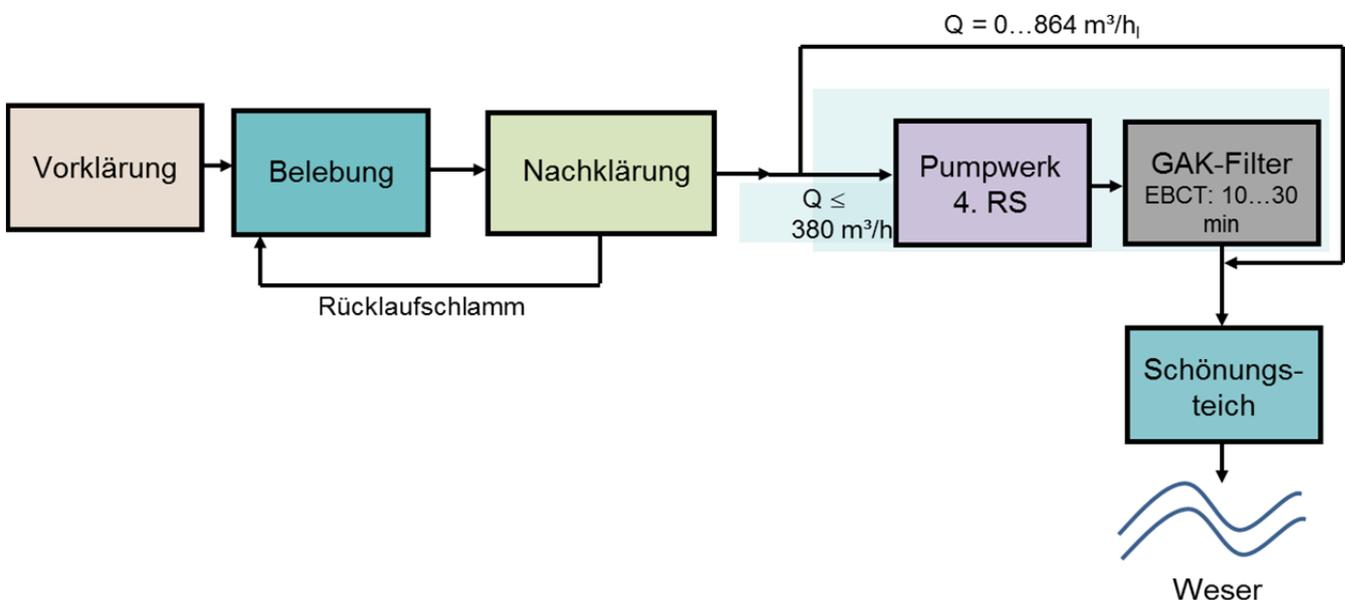
Die Filterstufe wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

Leerbettkontaktzeit (EBCT):	10...30 min
Filtergeschwindigkeit:	5...20 min
Betthöhe GAK:	1,5...3 m

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Filter:	4 Stück
Betthöhe GAK:	2,5 m
Leerbettkontaktzeit (EBCT):	30 min
Filterfläche gesamt:	78 m <sup>2</sup>

Die Stufe kann als Druckfiltration – zumeist in Filterkesseln aus Stahl – oder als offene Filtration realisiert werden. Für den Anwendungsfall wurde eine Ausführung als offener Rechteckfilter aus Beton gewählt, da so der Filterblock zusammen mit der benötigten Spülwasservorlage als ein Bauwerk im bestehenden Becken realisiert werden kann.



**Bild 21: Systemskizze Variante 2: GAK-Filtration**

Zu beachten ist, dass die Aktivkohlefilter neben der adsorptiven Wirkung auch Suspensa zurückhalten. Daher wird von einer täglichen Spülung der Filter ausgegangen.

Die Rückspülgeschwindigkeiten sind geringer als bei Mehrschichtfiltern.

Sontheimer u. a. (1985) nennen folgende Werte:

Spülluftgeschwindigkeit:	25...35 m/h
Spülwassergeschwindigkeit:	60...80 m/h

Die Filter werden für eine Durchlaufspülung ausgelegt. Die Spülwasserableitung erfolgt über eine Rinne.

Die Standzeit der granulierten Aktivkohle in den Filtern wird mit 8.000 Bettvolumina (BV) angesetzt. Dieser Wert ist vergleichsweise günstig für das Verfahren gewählt, wenn man bedenkt, dass die Ad-

sorption der Spurenstoffe in Konkurrenz zur Restorganik erfolgt, die noch im Ablauf der Nachklärung enthalten ist.

#### **8.4.2.2 Ausführung**

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 2** der Planunterlagen dar.

##### **Pumpwerk 4. Reinigungsstufe**

Die Beschickung der GAK-Filtration erfolgt – wie auch bei Variante 1 – über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das in die bestehende Ablaufleitung vor dem Mengemessbauwerk angeordnet wird. Über ein Wehr wird ein Mindestwasserstand im Schacht als Pumpenvorlage für die beiden Tauchmotorpumpen eingestellt. Der Volumenstrom, der oberhalb der maximalen Teilstrommenge liegt und von den Pumpen somit nicht gehoben wird, fließt zum Mengemessbauwerk ab. Die Ablaufleitung von der 4. Reinigungsstufe wird ablaufseitig in das Pumpwerk eingebunden.

##### **Filterblock**

Der Filterblock besteht aus vier abwärtsdurchströmten offenen Filtern. Jede Filterkammer weist eine Fläche von 31,5 m<sup>2</sup> auf. Die Abmessungen einer Filterkammer liegen bei einer Breite von 3,00 m und einer Länge von 6,5 m.

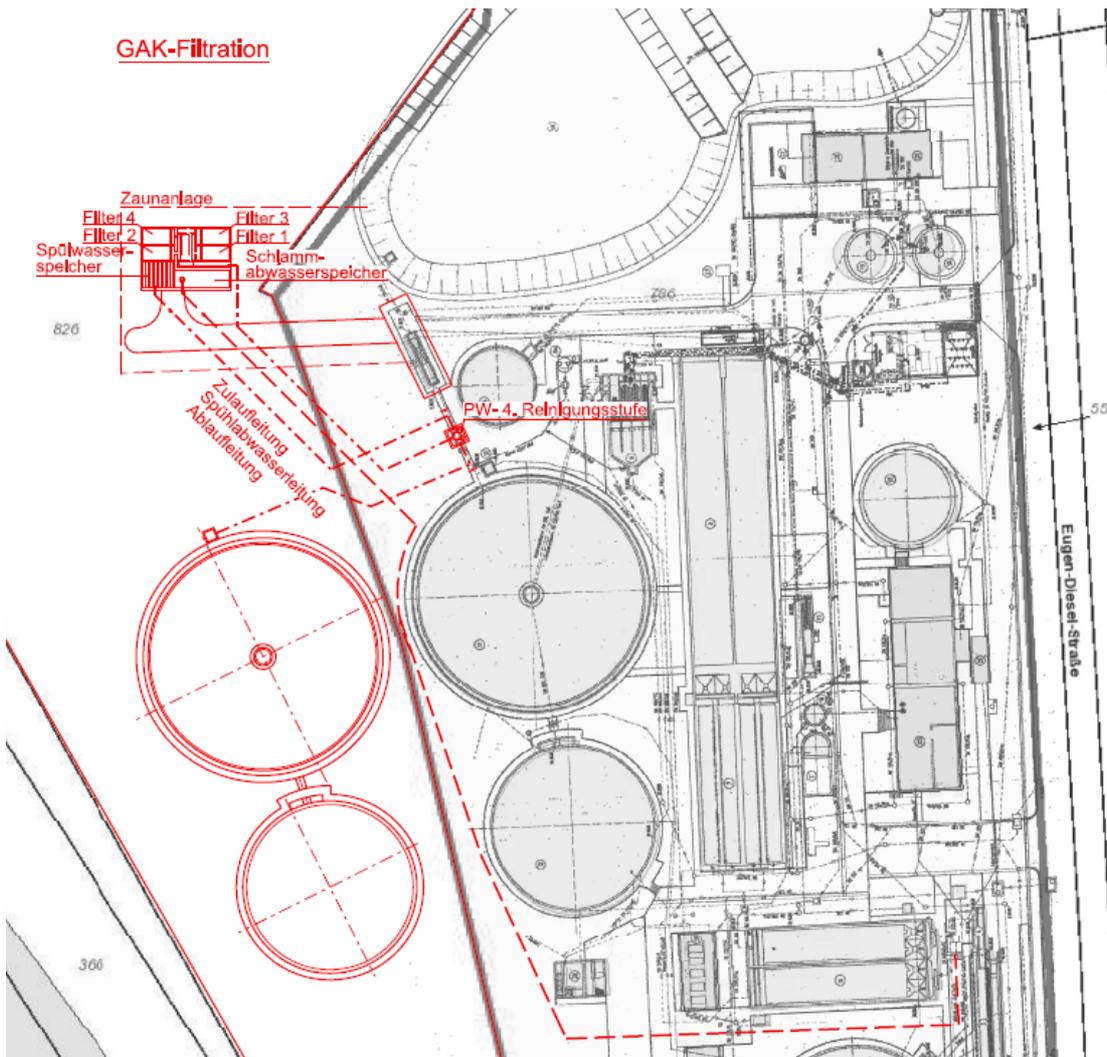
Der Zulauf zu den vier Filtern erfolgt aus einer offenen Gerinne. Über mit Schiebern versehene Öffnungen im Gerinne fließt das Wasser in die Filterkammern. Die Gleichverteilung des Zulaufs auf alle in Betrieb befindliche Filterkammern wird über die Schwellen an der Stirnseite der Filter realisiert.

##### **Spülwasserspeicher**

Das Filtrat der Adsorptionsstufe wird in einer Spülwasservorlage gespeichert. Der Überlauf des Spülwasserspeichers wird über eine Rohrleitung zum Ablaufschacht der Kläranlage zurückgeführt. Für die Rückspülung der Filter steht eine Rückspülpumpe zur Verfügung.

##### **Einhausung Elektro- und Aggregate-Raum**

Der Bereich oberhalb des Filtratwasserspeichers wird eingehaust, um das Spülluftgebläse sowie die Schaltanlage aufzunehmen.



**Bild 22: Lageplanausschnitt Variante 2: GAK-Filtration**

### 8.4.3 Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter

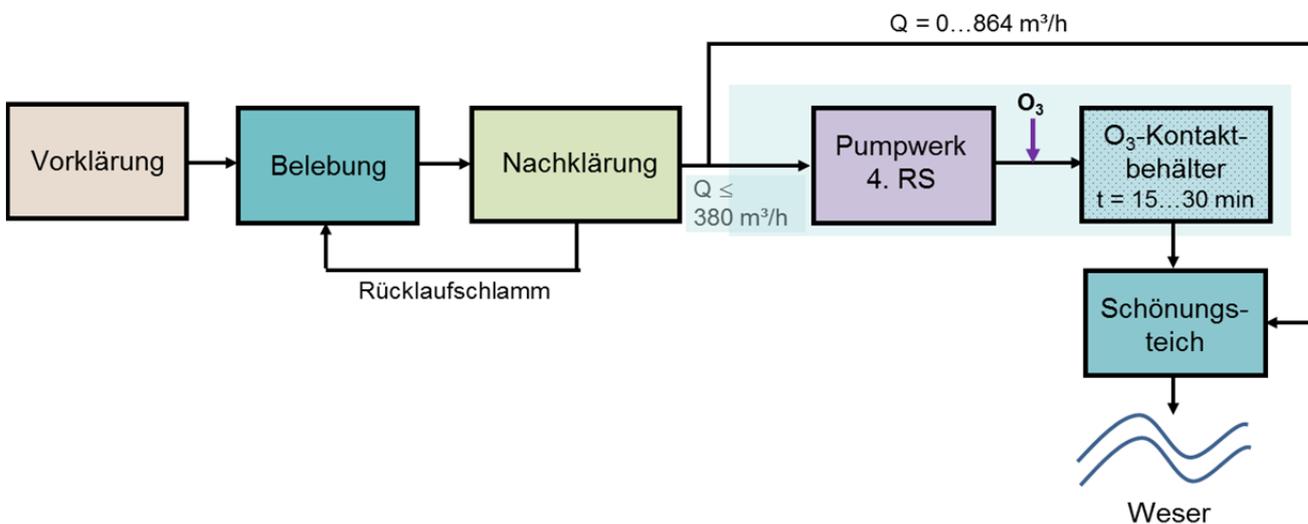
#### 8.4.3.1 Allgemeines

Neben der Entfernung der Spurenstoffe auf adsorptivem Wege ist die Oxidation der Stoffe eine andere Möglichkeit zur Elimination. Hier bietet sich der Einsatz von Ozon als starkes Oxidationsmittel an.

Zu berücksichtigen ist, dass durch den Einsatz von Ozon Oxidationsprodukte gebildet werden können, die toxisch sind. Daher wird empfohlen, eine biologisch arbeitende Stufe der Ozonung nachzuschalten. Dies kann eine Filtration sein, wie Abbecken u. a. (2009) in einem großtechnischen Versuch auf der ARA Regensdorf nachweisen konnte. Im Filter erfolgt der Abbau eventuell toxikologisch bedenklicher Stoffe auf biologischem Wege. Dieses Vorgehen ist bei der Trinkwasseraufbereitung seit Jahren Standard (Beispiel: Düsseldorfer Verfahren). Die Ozonung wird daher vor der bestehenden Filtration angeordnet. Im konkreten Fall wird der Ozonung ein kontinuierlich gespülter Sandfilter nachgeschaltet.

Die Ozonung wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

Ozondosis: 2...10 g/m<sup>3</sup>  
 Kontaktzeit im Reaktionsbehälter: 10...30 min



**Bild 23: Systemskizze Variante 3: Ozonung**

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Kontaktbehälter: 2 Stück  
 Wassertiefe Kontaktbehälter: 6 m

Die Berechnung der mittleren Ozondosis wurde anhand der CSB-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung bestimmt. Im Mittel kann hier ein CSB-Wert von 30 mg/l (ZAK-Studie) angesetzt werden. Als Verhältnis CSB/DOC wird ein Wert von 3 : 1 angesetzt.

Der Einfluss des partikulär gebundenen CSB wird hierbei nicht betrachtet. Damit ergibt sich eine berechnete DOC-Konzentration im Ablauf der Nachklärung von 10 mg/l. Die großtechnischen Versuche in Regensdorf (Abegglen u. a. 2009) kamen zu dem Ergebnis, dass eine Dosis von 0,62 mg O<sub>3</sub>/mg DOC hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Wirkung ein Optimum darstellte. Dieser Wert wurde hier übernommen. Damit ergibt sich die mittlere Ozondosis zu:

$$c_{O_3,a} = 10 \text{ mg DOC / l} \cdot 0,62 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC} = 6,20 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

Um eine gewisse Sicherheit gegenüber weiteren Einflüssen zu berücksichtigen, wird in der weiteren Auslegung eine mittlere Ozondosis angesetzt von:

$$c_{O_3,a} = 7,00 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

### 8.4.3.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 3** der Planunterlagen dar.

Die Anlagenteile gliedern sich in das Anlagengebäude, das die Ozonerzeugung mit den Nebenaggregaten sowie die Schaltanlage aufnimmt, sowie dem Ozon-Kontaktbehälter. Vor dem Gebäude ist

die Tankanlage für den benötigten Flüssigsauerstoff angeordnet. Die Ozonung mit Ozonerzeuger und Kontaktbecken ist in einigen Anlagenteilen zweistraßig ausgeführt. Bei geringem Durchfluss (z. B. in der Nacht) kann eine Straße außer Betrieb genommen werden.

#### **Pumpwerk 4. Reinigungsstufe**

Die Beschickung der Ozonung erfolgt – wie auch bei Variante 1 – über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das in die bestehende Ablaufleitung vor dem Mengennessbauwerk angeordnet wird. Über ein Wehr wird ein Mindestwasserstand im Schacht als Pumpenvorlage für die beiden Tauchmotorpumpen eingestellt. Der Volumenstrom, der oberhalb der maximalen Teilstrommenge liegt und von den Pumpen somit nicht gehoben wird, fließt zum Mengennessbauwerk ab. Die Ablaufleitung von der 4. Reinigungsstufe wird ablaufseitig in das Pumpwerk eingebunden.

#### **Kontaktbehälter**

Die beiden Kontaktbehälterstraßen werden als Betonbauwerk im Becken angeordnet. Die Behälter verfügen über keine Einbauten, außer einer unterströmten Tauchwand im letzten Drittel des Behälters. Dieser Bereich dient als Entspannungszone. Untersuchungen von Herbst u. a. (2011) zeigten, dass weitere Einbauten (Leitwände) die Effizienz nicht nachhaltig verbessern.

Der Ozoneintrag kann über eine Teilstrombegasung mit Injektoren erfolgen, oder über Diffusoren direkt in das Abwasser. Im konkreten Fall wird der Eintrag über Diffusoren gewählt, da er verfahrenstechnisch einfacher zu realisieren ist (kein weiterer Kreislauf mit Pumpe).

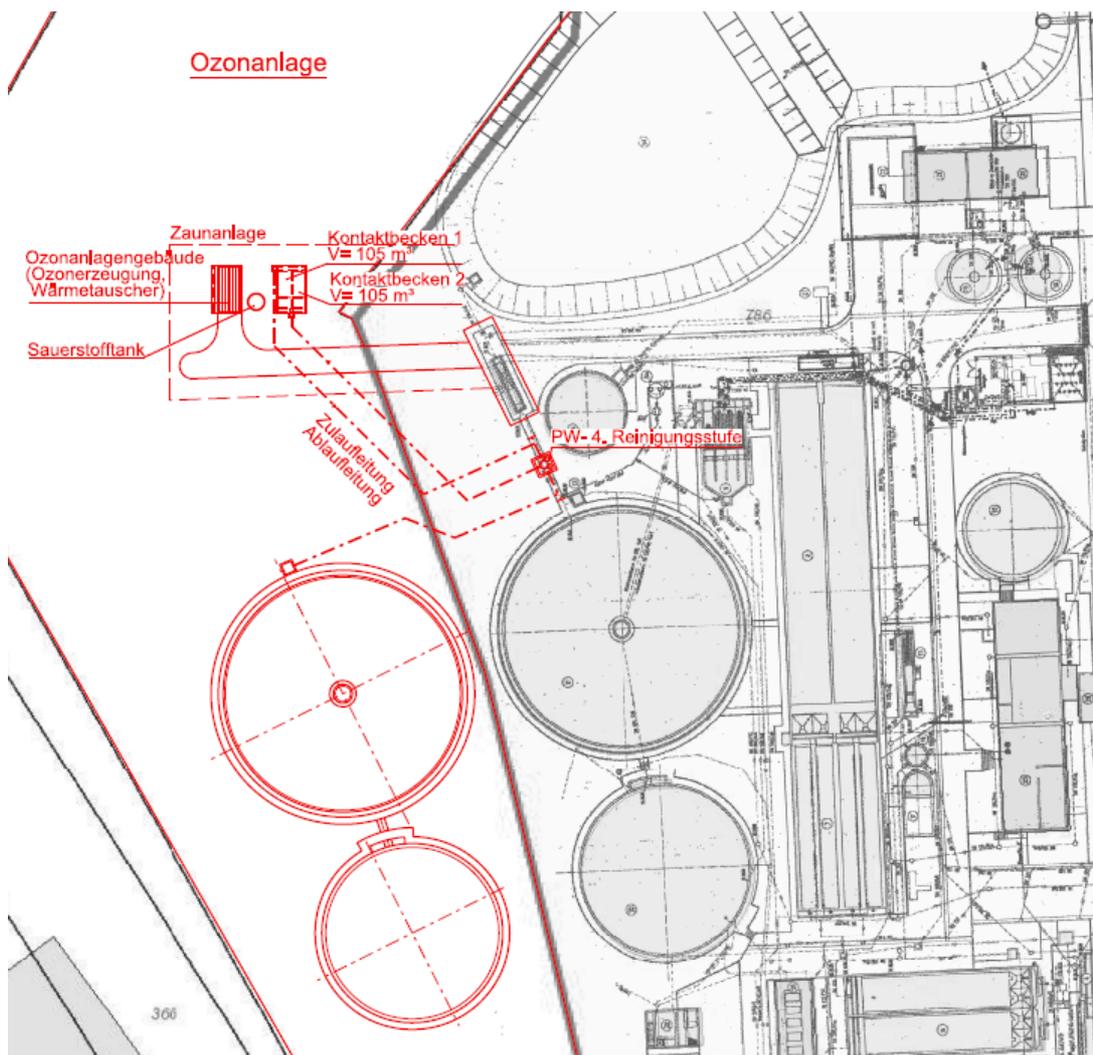
Die Restozonvernichtung erfolgt thermisch/katalytisch.

Die beiden Behälter werden über Rohrleitungen an das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe angebunden. Der Ablauf der Ozonung wird dorthin wieder zurückgeführt

#### **Ozonerzeugung**

Die Ozonerzeuger weisen eine Leistung von 2 x 1.900 g/h auf. Als Prozessgas ist flüssiger Sauerstoff vorgesehen. Die Kühlung erfolgt über einen Nass/Nass-Wärmeübertrager, der ebenfalls im Container untergebracht ist. Das benötigte Kühlwasser im Sekundärkreislauf wird über zwei Pumpen (eine Reserve) aus dem Ablauf der Filtration bereitgestellt.

Die Erzeuger werden mit der zugehörigen Schaltanlage im Anlagengebäude untergebracht. Die Sauerstoff-Tankanlage wird davor angeordnet.



**Bild 24:** Lageplanausschnitt Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich

### Schönungsteich

Der bestehende Teich fungiert als biologisch arbeitende Stufe zum Abbau von eventuell durch die Ozonung gebildeten toxikologisch bedenklichen Verbindungen. Dies bedeutet, beim Betrieb der Ozonung muss der Teich immer durchflossen werden.

## 8.4.4 Variante 4: Langsamfiltration

### 8.4.4.1 Allgemeines

Dieses Verfahren stellt unter den untersuchten Varianten eine Besonderheit dar, da es auf natürlichen Prozessen beruht. Im Vergleich zu den rein technischen Verfahren ist es jedoch deutlich flächenintensiver.

Die Variante wird in zwei Teilvarianten untergliedert.

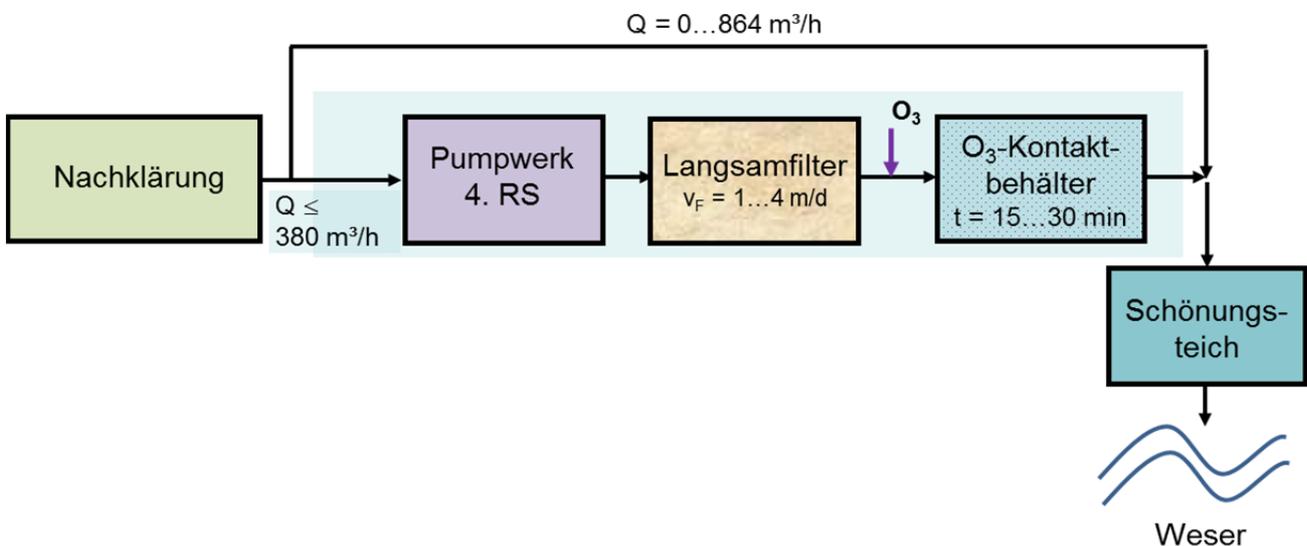
In **Variante 4a** wird der Langsamfilter mit der Ozonung kombiniert. In der Literatur – siehe auch **Kapitel 7.4** – wird berichtet, dass die Langsamfiltration zum Teil sehr gute Reinigungsergebnisse im

Hinblick auf die Spurenstoffe erzielt, jedoch erreicht sie nicht durchgängig die Wirkungsgrade der technischen Verfahren, bzw. die Wirkung lässt sich durch geänderte Dosierung bei der PAK- oder Ozon-Variante nicht an den Bedarf anpassen. Aus diesem Grund wird in dieser Variante die Langsamfiltration mit der Ozonung kombiniert. Durch den nachgeschalteten Einsatz von Ozon können die verbleibenden Spurenstoffe gezielt eliminiert werden.

Die Ozoneinsatzmengen dürften durch die weitgehende Vorbehandlung (auch Partikelentfernung) deutlich reduziert werden. Für die Betriebskostenabschätzung wird von einer Dosierung von 3,5 mg/l, anstelle von 7,0 mg/l bei Variante 3 ausgegangen.

Die Auslegung der Ozonung und der Kontaktbehälter folgt ansonsten Variante 3.

In nachfolgender Systemskizze ist die Variante 4a dargestellt:



**Bild 25: Systemskizze Variante 4a: Langsamfilter mit nachgeschalteter Ozonung**

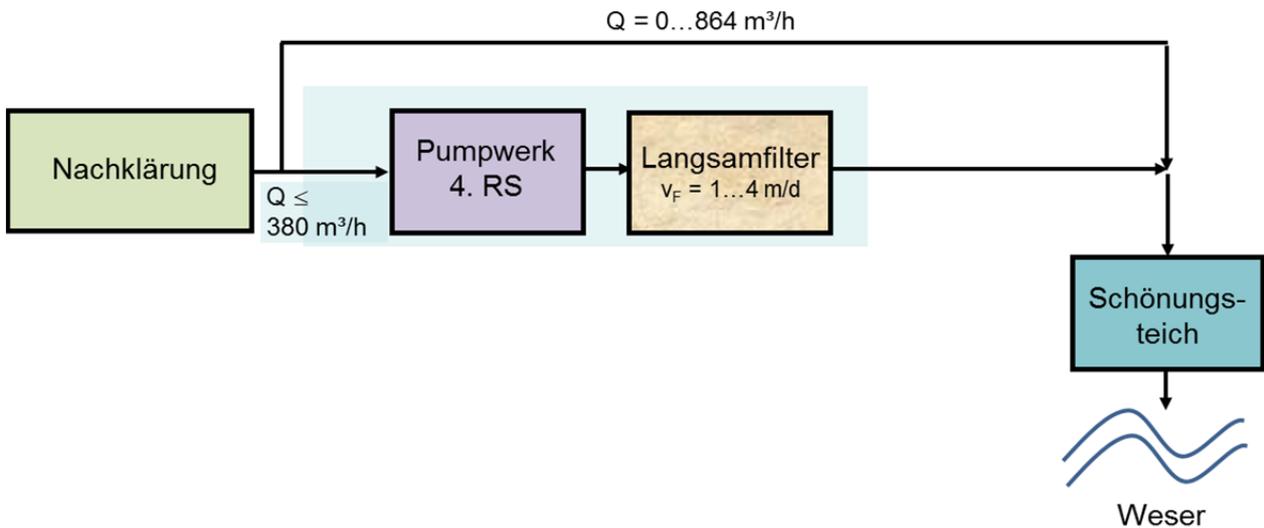
In **Variante 4b** entfällt die Ozonung. Dadurch reduzieren sich die Invest- und Betriebskosten, jedoch ist die Reinigungsleistung nicht auf dem Niveau der anderen Varianten.

Zu beachten ist, dass die oberste Schicht des Filters mit der darauf gebildeten Schmutzdecke in regelmäßigen Abständen entfernt werden muss, um die hydraulische Leistungsfähigkeit des Filters wiederherzustellen. Hierzu liegen für die Anwendung des Langsamfilters im Abwasserbereich keine gesicherten Kosten vor. In der Betriebskostenabschätzung werden 30 EUR/m<sup>2</sup>, netto für dieses sogenannte Abschälen angesetzt. Darin enthalten ist auch der Neuaufbau der Filterschicht nach fünf- bis achtmaligem Abschälen sowie die Entsorgung der anfallenden Reststoffe.

Über die Behandlung der anfallenden Reststoffe liegen für den Abwasserbereich keine belastbaren Daten vor. Es ist davon auszugehen, dass der abgeschälte Sand nach Reinigung und Aufbereitung wieder eingebaut werden kann.

Im Rahmen der Betriebskostenaufstellung wurde ein einmaliges Abschälen des Filters pro Jahr angesetzt.

Nachfolgende Systemskizze zeigt Variante 4b:



**Bild 26: Systemskizze Variante 4b: Langsamfilter**

#### 8.4.4.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 4** der Planunterlagen dar.

##### **Pumpwerk 4. Reinigungsstufe**

Die Beschickung der beiden Langsamfilter erfolgt – wie auch bei Variante 1 – über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das in die bestehende Ablaufleitung vor dem Mengemessbauwerk angeordnet wird. Über ein Wehr wird ein Mindestwasserstand im Schacht als Pumpenvorlage für die beiden Tauchmotorpumpen eingestellt. Der Volumenstrom, der oberhalb der maximalen Teilstrommenge liegt, der von den Pumpen somit nicht gehoben wird, fließt zum Mengemessbauwerk ab. Die Ablaufleitung von der 4. Reinigungsstufe wird ablaufseitig in das Pumpwerk eingebunden.

##### **Langsamfilter**

Der Langsamfilter wird als foliengedichtetes Erdbecken mit einer Nutzfläche von jeweils 1.000 m<sup>2</sup> ausgeführt. Die Böschungsneigung beträgt 2 : 1. Die Filtersichthöhe beträgt 1,0 m mit einem Überstau von 1,1 m. Das Filtrat wird über Dränrohre in der Stützsicht gefasst. Über einen Ablauf der Filter wird ein ausreichender Einstau des Filters sichergestellt.

Über Rohrleitungen wird das Abwasser vom Pumpwerk 4. Reinigungsstufe zu einem Verteilerbauwerk geführt. Über Schwellen erfolgt hier die Gleichverteilung des Volumenstroms auf die beiden Filter.

##### **Kontaktbehälter (nur Variante 4a)**

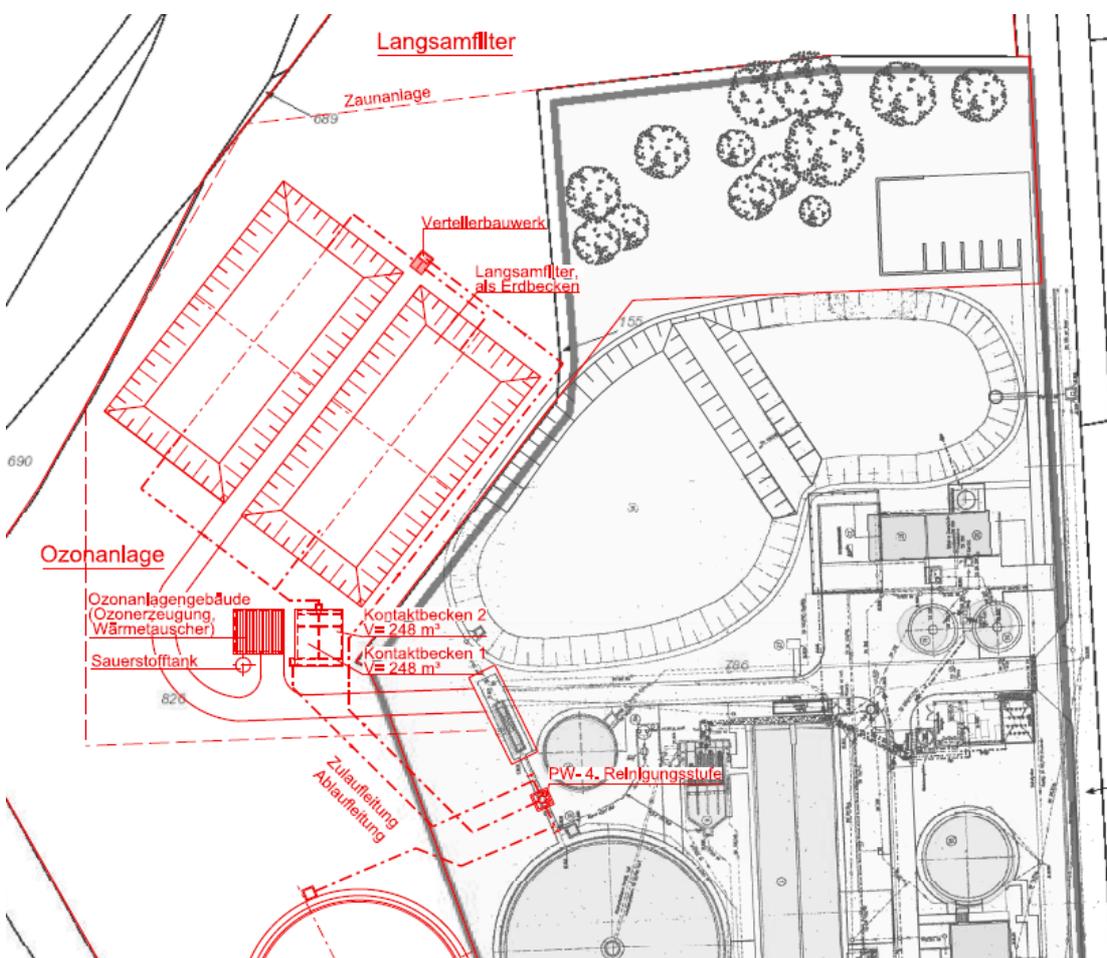
Die beiden Kontaktbehälterstraßen werden als Betonbauwerk ausgeführt. Die Anordnung und der Aufbau entspricht Variante 3.

Die Restozonvernichtung erfolgt wiederum thermisch/katalytisch.

Die beiden Behälter werden über Rohrleitungen an den Ablauf der beiden Langsamfilter angebunden. Der Ablauf der Behälter wird über eine Rohrleitung in den Ablauf der Kläranlage zurückgeführt.

### Ozonerzeugung (nur Variante 4a)

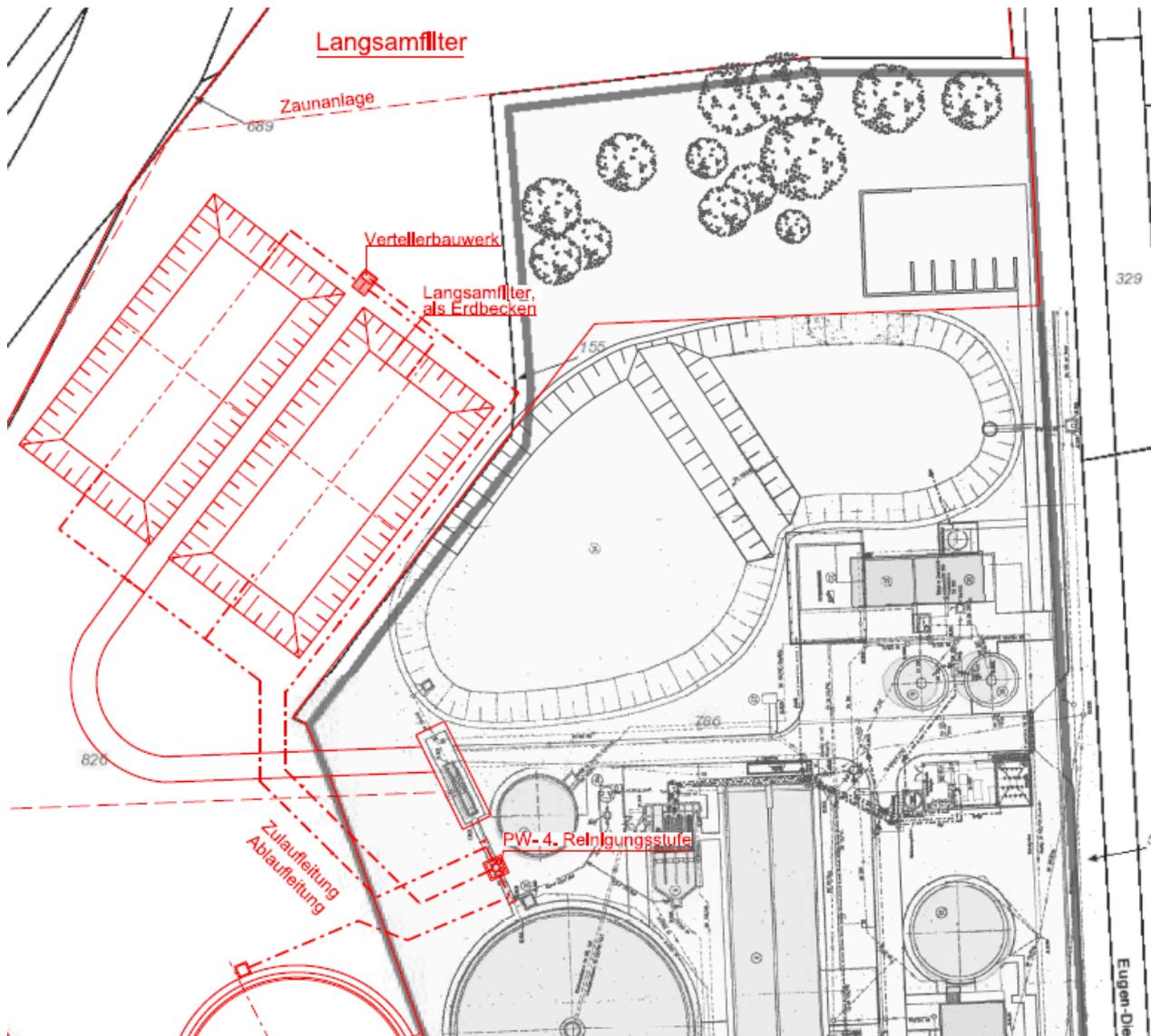
Die Ozonerzeuger weisen ebenfalls eine Leistung von 2 x 1.900 g/h auf. So ist auch Spurenstoffelimination ohne Betrieb der Langsamfilter im vollen Umfang möglich. Die sonstige Ausführung entspricht Variante 3.



**Bild 27:** Lageplanausschnitt Variante 4a: Langsamfilter mit nachgeschalteter Ozonung

### Schönungsteich

Der bestehende Teich ist bei Variante 4a als biologisch arbeitende Stufe zum Abbau von eventuell durch die Ozonung gebildeten toxikologisch bedenklichen Verbindungen Bestandteil der Reinigungsstufe. Dies bedeutet, beim Betrieb der Ozonung muss der Teich immer durchflossen werden.



**Bild 28:** Lageplanausschnitt Variante 4b: Langsamfilter

### 8.5 Ergebnisübersicht Varianten

	Variante 1 PAK mit Rücklaufkohle	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozonung + Teich	Variante 4a LSF + Ozonung	Variante 4b Langsamfiltration
Anlagenkomponenten					
	<p><b>Kontaktbecken:</b>  <math>t_A = 30 \text{ min}</math>, <math>V = 567 \text{ m}^3</math></p> <p><b>Absetzbecken:</b>  <math>D_i = 17 \text{ m}</math>, <math>h_{2/3} = 4 \text{ m}</math>  <math>A_{\text{ges}} = 217 \text{ m}^2</math>, <math>V_{\text{ges}} = 869 \text{ m}^3</math></p> <p><b>Tuchfiltration (zweistraßig):</b>  <math>A_{F,\text{ges}} = 60 \text{ m}^2</math></p> <p><b>PAK-Silo:</b>  <math>V = 50 \text{ m}^3</math></p>	<p><b>GAK-Filtration:</b>                      4 Filter  <math>A = 78 \text{ m}^2</math>, <math>H_{FB} = 2,5 \text{ m}</math>,  <math>V = 195 \text{ m}^3</math></p>	<p><b>Flüssigsauerstoff:</b>                      Tankanlage und Verdampfer</p> <p><b>Ozonerzeuger:</b>                      2 x 1.900 g O<sub>3</sub>/h</p> <p><b>Reaktionsbehälter:</b>                      2 Straßen,                      je L = 7 m; B = 2,5 m;  <math>V = 105 \text{ m}^3</math></p>	<p><b>Langsamfilter:</b>                      2 Filter                      je L = 50 m; B = 20 m;  <math>A = 1000 \text{ m}^2</math>  <math>h_{\text{Filter, ges}} = 3 \text{ m}</math></p> <p><b>Flüssigsauerstoff:</b>                      Tankanlage und Verdampfer</p> <p><b>Ozonerzeuger:</b>                      2 x 1.900 g O<sub>3</sub>/h</p> <p><b>Reaktionsbehälter:</b>                      2 Straßen,                      je L = 7 m; B = 2,5 m;  <math>V = 105 \text{ m}^3</math></p>	<p><b>Langsamfilter:</b>                      2 Filter                      je L = 50 m; B = 20 m;  <math>A = 1000 \text{ m}^2</math>  <math>h_{\text{Filter, ges}} = 3 \text{ m}</math></p>

	<b>Variante 1</b> <b>PAK mit Rücklaufkohle</b>	<b>Variante 2</b> <b>GAK-Filtration</b>	<b>Variante 3</b> <b>Ozonung + Teich</b>	<b>Variante 4a</b> <b>LSF + Ozonung</b>	<b>Variante 4b</b> <b>Langsamfiltration</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Bildung von Reaktionsprodukten</li> <li>Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig</li> <li>Sehr guter Suspensarückhalt im AB und durch Filtration</li> <li>Sehr gute Reduzierung <math>P_{ges}</math> und CSB</li> <li>Mehrfachbeladung der PAK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Bildung von Reaktionsprodukten</li> <li>Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig</li> <li>Sicherer und einfacher Betrieb</li> <li>Suspensarückhalt durch Filtration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>geringer Platzbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>geringerer Ozonbedarf durch Vorreinigung in LSF</li> <li>sehr gute Wirkung bei CSB und Suspensa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>einfache Technik</li> <li>geringer Energiebedarf</li> <li>sehr gute Wirkung bei CSB und Suspensa</li> <li>Sicherer und einfacher Betrieb</li> <li>keine Bildung von Reaktionsprodukten</li> <li>kein Einsatz von Betriebsstoffen</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>höhere Schlammanfall als bei den anderen Varianten</li> <li>Betreuungsintensiv, da Dosierung von PAK, FHM und FM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GAK-Austausch</li> <li>Hoher Kohlebedarf in Vergleich zu anderen Varianten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Wirkung auf CSB und <math>P_{ges}</math></li> <li>höherer Energiebedarf</li> <li>hohe Sicherheitsanforderungen an den Arbeitsschutz, da Ozon toxisch und als Reizstoff wirkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>flächenintensiv</li> <li>regelmäßige Reinigung erforderlich (abschälen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>flächenintensiv</li> <li>regelmäßige Reinigung erforderlich (abschälen)</li> <li>geringere Elimination der Spurenstoffe</li> </ul>

## 9 Kosten

### 9.1 Allgemein

Die Wirtschaftlichkeit der vier betrachteten Varianten wird anhand der Investitions- und Betriebskostenschätzung ermittelt. Anhand der Jahreskosten werden dann die Varianten verglichen. In einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss einzelner Kostengruppen und der betrieblichen Einstellungen auf die Jahreskosten betrachtet.

### 9.2 Investitionskosten

Anhand der Bemessungen und der Auslegung sowie der zeichnerischen Darstellung der Varianten wurden für die betrachteten Lösungen die Investitionskosten, unterteilt in die Kostengruppen Bau-, Maschinen- und EMSR-Technik, ermittelt. Die genaue Zusammenstellung enthält **Anlage 1**.

Grundlage der eingesetzten Preise waren aktuelle Ausschreibungsergebnisse in vergleichbaren Projekten sowie Richtpreisangebote von Herstellern.

Als Baunebenkosten wurden 20 % der Netto-Investitionssumme angesetzt.

In nachfolgender Tabelle sind die Kosten zusammengestellt:

**Tabelle 1: Investitionskosten für die Varianten 1 bis 4**

Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozon + Teich	Variante 4a Langsamfilter + O <sub>3</sub>	Variante 4b Langsamfilter
1	Bautechnik	EUR	792.297,00	646.785,00	425.872,00	1.865.160,00	1.649.846,00
2	Maschinentchnik	EUR	851.051,94	427.799,40	616.350,00	635.250,00	77.700,00
3	EMSR-Technik	EUR	266.000,00	265.000,00	317.000,00	326.000,00	63.000,00
<b>Summe Herstellungskosten, netto</b>		<b>EUR</b>	<b>1.909.348,94</b>	<b>1.339.584,40</b>	<b>1.359.222,00</b>	<b>2.826.410,00</b>	<b>1.790.546,00</b>
Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühren, usw.)		EUR	381.869,79	267.916,88	271.844,40	565.282,00	358.109,20
<b>Summe Baukosten, netto</b>		<b>EUR</b>	<b>2.291.218,73</b>	<b>1.607.501,28</b>	<b>1.631.066,40</b>	<b>3.391.692,00</b>	<b>2.148.655,20</b>
Mehrwertsteuer		EUR	362.776,30	254.521,04	258.252,18	537.017,90	340.203,74
<b>Summe Baukosten, brutto</b>		<b>EUR</b>	<b>2.653.995,03</b>	<b>1.862.022,32</b>	<b>1.889.318,58</b>	<b>3.928.709,90</b>	<b>2.488.858,94</b>
<b>Anteil</b>			<b>143%</b>	<b>100%</b>	<b>101%</b>	<b>211%</b>	<b>134%</b>

Die Investitionskosten sind für Variante 3 (Ozon + Teich) und 2 (GAK-Filtration) am günstigsten. Gefolgt von den Varianten 4b (Langsamfilter) und Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle). Die Variante 4a (Langsamfilter + Ozonung) erfordert die höchsten Investitionskosten. Dies ist damit zu erklären, dass diese Variante eine Kombination aus den Varianten 3 und 4a darstellt.

### 9.3 Betriebskosten

Für die Berechnung der Betriebskosten wurden folgende Werte mit dem Auftraggeber abgestimmt:

Strombezugskosten	0,1766 EUR/kWh, netto
Entsorgungskosten Schlamm (landwirtschaftliche Verwertung)	31,30 EUR/Mg Schlamm (Originalsubstanz) Entwässerungsgrad: 22 % (Annahme) → 31,30/0,22 = 142 EUR/MG TS, netto
Kosten Branntkalk	69,90 EUR/Mg, netto

Kosten Grünsalz ( $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 28,40 EUR/Mg, netto

Weitere Werte wurden wie folgt angenommen:

Personal	40.000 EUR/(MA·a)
Pulveraktivkohle	1.500 EUR/Mg, netto
Granulierte Aktivkohle	1.300 EUR/Mg, netto
Sauerstoff inkl. Tankmiete	0,25 EUR/kg, netto
Entwässerungskosten Schlamm	80 EUR/Mg TS, netto
Entsorgungskosten Schlamm (thermische Verwertung)	50, EUR/Mg Schlamm (Originalsubstanz) Entwässerungsgrad: 22 % (Annahme) → $50/0,22 = 227$ EUR/MG TS, netto

Die Kosten für die Aktivkohlen entstammen aus aktuellen Ausschreibungsergebnissen (PAK) oder aus großtechnischen Betriebsversuchen (GAK). Derzeit sind Preise von 1.300 EUR/Mg, netto noch gängig. Eine Steigerung des Preises für Aktivkohle wird erwartet. Daher wird für die Berechnung ein Preis von 1.500 EUR/Mg, netto angesetzt. Für die GAK wurde mit einer Schüttdichte von  $400 \text{ kg/m}^3$  gerechnet. Kohlen mit diesen Schüttdichten wurden auch bei den Versuchen in Düren (Bornemann u. a. 2012) eingesetzt. Bei den Versuchen im KW „Obere Lutter“ wurde eine Kohle auf Braunkohlenbasis mit einer Schüttdichte von  $300 \text{ kg/m}^3$  (Nahrstedt u. a. 2011) eingesetzt. Die Unterschiede in der Dichte haben erheblichen Einfluss auf die Verbrauchskosten. Bezogen auf das Volumen in anderen Projekten lagen die Kosten zwischen 450 und 500 EUR/ $\text{m}^3$  Frischkohle, netto. Schröder und Grömping (2013) geben Werte zwischen 425 und 550 EUR/ $\text{m}^3$ , netto für Frischkohle an. Mit einem Preis von  $515 \text{ EUR/m}^3$  Kohle wird eine Kontrollrechnung durchgeführt.

Für alle verbrauchsgebundenen Kosten wurden die mittleren Verbrauchsmengen aus der Bemessung und Auslegung der Varianten in **Anlage 1** herangezogen.

Für die Variante 1 ist die Dosierung von Flockungs- bzw. Fällmitteln (Me-Salzen) notwendig. Auf der KA Höxter wird als Fällmittel Grünsalz eingesetzt. Die daraus hergestellte Lösung enthält zweiwertige Fe-Ionen, die in der Belüftungsphase der Belebung zum wirksamen dreiwertigen Eisen oxidiert werden. Da die vollständige Oxidation der zweiwertigen Eisenlösung bei Dosierung als Flockungsmittel in den Zulauf der Adsorptionsstufe (Kontaktbecken) nicht sichergestellt ist, muss als Flockungsmittel direkt ein dreiwertiges Produkt (z. B.  $\text{FeCl}_3$ ) eingesetzt werden.

In den Betriebskosten wird die für die Adsorptionsstufe notwendige Flockungsmittelmenge als dreiwertiges Fe-Produkt angesetzt. Da diese Menge auch für die P-Fällung wirksam ist, verringert sich die Einsatzmenge an Grünsalz. Für die Berechnung der Mehrkosten wird daher die Differenz des spezifischen Bezugspreises von Grünsalz und Eisen(III)-Chlorid eingesetzt.

Wie die Anlage in Sindelfingen zeigt, ist bei Variante 1 mit einem Mehranfall an Schlamm zu rechnen. Zum einen ist dies die dosierte Pulverkohle. Zum anderen ist dies Schlamm, der aus den zusätzlich gefällten Stoffen (Phosphor, CSB, u. Ä.) gebildet wird. Hierfür wurde für die Betriebskostenermittlung folgender Ansatz gewählt. Der Schlamm setzt sich zu einem Drittel aus der PAK und zu 2/3 aus Organika (CSB, AFS) und Fällprodukten zusammen.

Neben den Entsorgungskosten des Schlammes fallen im Rahmen der Schlammbehandlung noch die Entwässerungskosten auf der Kläranlage an. Diese wurden mit 80 EUR/Mg TS, netto berücksichtigt.

Derzeit wird der auf der KA Höxter anfallende Schlamm landwirtschaftlich verwertet. Bei Einsatz von PAK (Variante 1) ist dieser Entsorgungsweg nicht mehr möglich. Der kohleenthaltene Schlamm muss verbrannt werden. Dies bedeutet, bei Umsetzung von Variante 1 Mehrkosten für die Schlamm Entsorgung. In den Betriebskosten wurden als Mehrkosten dazu die Differenz der Entsorgungspreise zwischen landwirtschaftlicher und thermischer Verwertung angesetzt und mit der abgerechneten Schlammmenge des Jahres 2013 multipliziert. Als Minderkosten wurde der Entfall der Kalkung gegengerechnet. Zu beachten ist, dass seitens des Gesetzgebers geplant ist, die landwirtschaftliche Verwertung nicht mehr zu erlauben.

Bei Variante 1 ist in jedem Fall der Einsatz von Flockungshilfsmitteln notwendig. Es wurden spezifische Kosten von 3.500 EUR/Mg Wirkstoff angesetzt. Bei Einsatzmengen von etwa 1,05 Mg/a ergeben sich daraus Verbrauchskosten von rund 3.700 EUR, netto.

In den beiden Teilvarianten 4 a und b wurde für das Abschälen der obersten Filterschicht ein Einheitspreis von 30 EUR/m<sup>2</sup>, netto angesetzt. Eine interne Abfrage bei Gelsenwasser kam zu ähnlichen Kosten für das Abschälen von Langsamfiltern in der Trinkwasseraufbereitung, der Wert kann daher als realistisch eingestuft werden.

Weitere Werte sind der Betriebskostenberechnung in **Anlage 3** zu entnehmen.

Für Wartung und Instandhaltung wurden folgende Prozentsätze der Netto-Investitionskosten angesetzt:

Bautechnik:	1,0 % der Investitionskosten/a
Maschinenteknik:	4,0 % der Investitionskosten/a
E-/MSR-Technik:	2,0 % der Investitionskosten/a

Die ermittelten Kosten sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten Personal- und Wartungs-/Instandhaltungskosten. Die verbrauchsgebundenen Kosten setzen sich aus den Energie-, den Chemikalien- und den Schlamm entwässerungs- sowie Schlamm entsorgungskosten zusammen.

**Tabelle 2: Betriebskosten für die Varianten 1 bis 4**

	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozonung + Teich	Variante 4a LSF + Ozonung	Variante 4b Langsamfiltration
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	80.742,06	54.655,79	62.303,26	84.697,92	45.039,75
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	76.366,16	97.931,54	44.743,25	87.771,39	63.727,43
	<b>Summe Betriebskosten, netto</b>	<b>EUR/a</b>	<b>157.108,22</b>	<b>152.587,33</b>	<b>107.046,52</b>	<b>172.469,31</b>	<b>108.767,18</b>
	Mehrwertsteuer: 19%	EUR/a	29.850,56	28.991,59	20.338,84	32.769,17	20.665,76
	<b>Summe Betriebskosten, brutto</b>	<b>EUR/a</b>	<b>186.958,78</b>	<b>181.578,93</b>	<b>127.385,36</b>	<b>205.238,48</b>	<b>129.432,94</b>
	<b>Anteil</b>		<b>147%</b>	<b>143%</b>	<b>100%</b>	<b>161%</b>	<b>102%</b>

Die Betriebskosten liegen für die Varianten 3 und 4b auf einem vergleichbaren Niveau von rund 127.000...129.000 EUR/a, brutto. Es folgen Variante 2 und 1 mit 182.000...187.000 EUR/a, brutto.

Die Betriebskosten für die Kombination aus Langsamfiltration und Ozonung (V4a) sind mit ca. 205.000 EUR/a, brutto am höchsten.

## 9.4 Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden anhand folgender Vorgaben berechnet:

Betrachtungszeitraum	30 a
Nutzungsdauer Bautechnik	30 a
Nutzungsdauer Maschinenteknik	15 a
Nutzungsdauer E-/MSR-Technik	10 a
Realzinssatz	3 %

Die Nutzungsdauern lehnen sich an die Vorgaben der Landesarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) an. Der nominale Zinssatz von 3 % p. a. ist seit 1986 ein Standardwert, der sich auf einer Abstimmung des Bundes und der Länder zur Beurteilung von technischen Infrastrukturmaßnahmen gründet. Er kann auf Projekte in der Siedlungswasserwirtschaft übertragen werden.

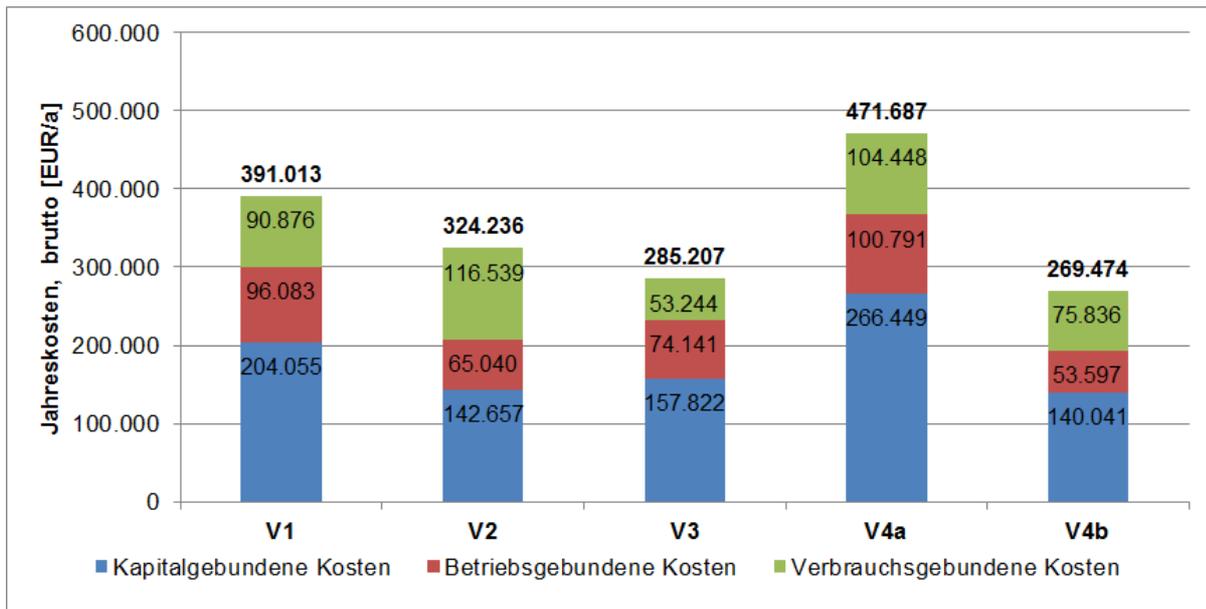
**Tabelle 3: Jahreskosten und spezifische Kosten für die Varianten 1 bis 4**

Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozonung + Teich	Variante 4a LSF + Ozonung	Variante 4b Langsamfiltration
A	Kapitalgebundene Kosten	EUR/a	171.474,52	119.879,84	132.623,13	223.906,74	117.681,73
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	80.742,06	54.655,79	62.303,26	84.697,92	45.039,75
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	76.366,16	97.931,54	44.743,25	87.771,39	63.727,43
<b>Summe Jahreskosten, netto</b>		<b>EUR/a</b>	<b>328.582,74</b>	<b>272.467,18</b>	<b>239.669,65</b>	<b>396.376,04</b>	<b>226.448,90</b>
Mehrwertsteuer: 19%		EUR/a	62.430,72	51.768,76	45.537,23	75.311,45	43.025,29
<b>Summe Jahreskosten, brutto</b>		<b>EUR/a</b>	<b>391.013,46</b>	<b>324.235,94</b>	<b>285.206,88</b>	<b>471.687,49</b>	<b>269.474,20</b>
<b>Anteil</b>			<b>137%</b>	<b>114%</b>	<b>100%</b>	<b>165%</b>	<b>100%</b>

spez. Kosten, netto	EUR/m <sup>3</sup>	0,24130	0,20009	0,17601	0,29109	0,16630
spez. Kosten, brutto	EUR/m <sup>3</sup>	0,28715	0,23811	0,20945	0,34639	0,19789

Die günstigsten Jahreskosten ergeben sich bei Variante 4b (Langsamfiltration) und 3 (Ozonung mit Teich) mit ca. 269.000 bis 285.000 EUR/a, brutto, die auch schon die niedrigsten Betriebskosten aufwiesen. Die Variante 2 (GAK-Filtration) folgt mit 324.000 EUR/a, brutto. Die Jahreskosten der Variante 1 (PAK) liegen mit 391.000 EUR/a, brutto auf dem vierten Rang. An letzter Stelle liegt die Variante 4a mit 471.000 EUR/a, brutto.

Die errechneten spezifischen Behandlungskosten beziehen sich auf das im Teilstrom behandelte Abwasservolumen.



**Bild 29: Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den Jahreskosten der Varianten**

Aus der im **Bild 28** dargestellten Aufteilung der Jahreskosten ist erkennbar, dass Variante 2 den höchsten Anteil an verbrauchsgebundenen Kosten aufweist.

## 9.5 Sensitivitätsanalyse

Die Einflüsse von geänderten Verbrauchsmengen und deren spezifischen Kosten auf die Betriebs- und damit Jahreskosten wurden untersucht. Hierbei sind die entscheidenden Parameter herauszuarbeiten und zu bewerten. Folgende Punkte werden betrachtet:

- Steigerung der Energiekosten (elektrisch) um 20 % auf 0,212 EUR/kWh, netto (0,252 EUR/kWh, brutto),
- Steigerung Bezugskosten für Aktivkohle (PAK bzw. GAK) und Flüssigsauerstoff um 10 %,
- Erhöhung der Kosten für das Abschälen des Langsamfilters um 10%,
- Reduzierung Dosierung Pulverkohle und Ozon um 20 %,
- Erhöhung Filterstandzeit GAK Filter um 20 % (Bettvolumen),
- Verlängerung der Standzeit der Langsamfilter um 20 % von 12 auf 14,4 Monate.

Die Steigerung des Bezugspreises für elektrische Energie um 20 % führt bei der energieintensiven Variante 3 (Ozonung) zu einer Steigerung der Betriebskosten von rund 4,2 % bzw. 5.300 EUR/a, brutto. Die Variante 1 (PAK) und 4a (Langsamfiltration mit Ozonung) folgen mit rund 2,1 %. Da bei Variante 4a mit geringerer Ozonkonzentration als bei V3 gearbeitet wird, ist diese Variante weniger sensitiv gegenüber Energiekostensteigerungen. Variante 4b (Langsamfiltration) zeigt die geringste Beeinflussung. In diesem Verfahren wird elektrische Energie nur zur Beschickung der Filter aufgewendet.

Die Steigerung der Bezugskosten um 10 % für die Aktivkohlen und den Flüssigsauerstoff sowie das Abschälen des Langsamfilters steigert die Betriebskosten der GAK-Filtration um 10.500 EUR, brutto (5,8 %). Auch bei den beiden Langsamfiltervarianten (V4a und b) steigen die Betriebskosten mit 7.140 bzw. 8.500 EUR/a, brutto relativ stark. Hier zeigt sich der Einfluss der großen Flächen, die von der Preissteigerung des Abschälens betroffen sind. Die Abhängigkeit von der Preissteigerung bei den Bezugstoffen ist bei Variante 1 (PAK) und 3 (Ozonung) am geringsten ausgeprägt.

Die Veränderung der Dosiermengen bzw. die Standzeiten des Filtermaterials um etwa 20 % haben erhebliche Einflüsse auf die Betriebskosten. Im Besonderen sind hier die Langsamfiltrationsvarianten (V4a und V4b) zu nennen. So führt eine Verlängerung des Abschälintervalls von 12 auf 14,4 Monate zu einer Reduzierung der Betriebskosten von rund 22.000 EUR/a, brutto (V4b) bzw. 26.000 EUR/a, brutto (V4a). Bei Variante V4a wird auch die Ozon-Konzentration vermindert. Bei Variante 2 (GAK-Filtration) würden durch die Erhöhung der durchgesetzten Bettvolumina von 8.000 auf 9.600 die Betriebskosten um ca. 17.500 EUR/a, brutto (-9,7 %) sinken. Die Reduzierung der Ozondosierung von 7 mg/l auf 5,8 mg/l verringert die Betriebskosten der Varianten 3 um rund 9.000 EUR/a, brutto (-7,1 %). Bei der Variante 1 (PAK) würden sich Einsparungen von rund 7.900 EUR/a, brutto (-4,2 %) ergeben.

Es zeigt sich, dass besonders die Verringerung der Betriebsmittel großen Einfluss auf die Betriebskosten der Varianten hat. Bei Verfahren mit im Vergleich geringen Dosiermengen (PAK mit Rücklaufkohle) sowie dem Ozon-Verfahren (V3) ist die Auswirkung geringer. Sehr stark werden die Langsamfiltrationsvarianten beeinflusst; dies ist der großen Fläche geschuldet, die in die Berechnung eingeht. Die Variante 3 (GAK-Filtration) zeigt eine sehr starke Abhängigkeit bei Veränderungen der durchgesetzten Bettvolumina und bei Kostensteigerungen. Relativ stabil in Bezug auf die angenommenen Kostensteigerungen verhält sich die Ozonung (V3), obwohl sie den höchsten Energieverbrauch aufweist. Die geringste Abhängigkeit zeigt Variante 1 (PAK).

Zu beachten ist, dass die genauen Einsatzmengen nicht exakt vorausgesagt werden können. Sie sind abhängig vom Reinigungsziel, aber auch beispielsweise von der CSB-Fraktion im Ablauf der Nachklärung. Insbesondere bei den Varianten 2 bis 4 ist eine stabil arbeitende Nachklärung Grundlage für einen wirtschaftlichen Betrieb der vierten Reinigungsstufe.

## 10 Bewertung

Neben den Kosten sind noch weitere Kriterien, wie Reinigungsleistung, Betriebssicherheit, Bildung von Abbauprodukten, Betriebs- und Wartungsaufwand, Sensitivität bei Kostensteigerungen, für die Bewertung der Varianten wichtig. In der nachfolgenden Bewertungsmatrix wurden diese Kriterien zusammengestellt und gewichtet. Die Variante mit der jeweils höchsten Punktzahl ist als Vorzugsvariante anzusehen.

Die Gewichtung der einzelnen Kriterien wurde mit der Stadtentwässerung Höxter abgestimmt.

**Tabelle 4: Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 4**

Kriterium	Wichtung	Wertung									
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4a		Variante 4b	
		PAK m. Rücklaufk. Punkte	gewichtet	GAK-Filtration Punkte	gewichtet	Ozonung + Teich Punkte	gewichtet	Langsamfilt. + Ozonung Punkte	gewichtet	Langsamfiltration Punkte	gewichtet
Jahreskosten	0,32	3	0,96	4	1,28	5	1,6	2	0,64	5	1,6
Reinigungsleistung Spurenstoffe	0,24	5	1,2	5	1,2	5	1,2	5	1,2	3	0,72
Reinigungsleistung $P_{ges}$ /CSB (zusätz. Reduk.)	0,16	5	0,8	3	0,48	2	0,32	5	0,8	5	0,8
Bildung Nebenprodukte	0,04	5	0,2	5	0,2	4	0,16	4	0,16	5	0,2
Erfahrungen/Referenzen	0,04	5	0,2	4	0,16	4	0,16	2	0,08	2	0,08
Betriebsicherheit	0,08	4	0,32	5	0,4	4	0,32	5	0,4	5	0,4
Sensitivität Kostensteigerungen	0,08	4	0,32	2	0,16	3	0,24	2	0,16	3	0,24
CO <sub>2</sub> -Bilanz	0,04	4	0,16	4	0,16	4	0,16	5	0,2	5	0,2
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>	<b>35</b>	<b>4,16</b>	<b>32</b>	<b>4,04</b>	<b>31</b>	<b>4,16</b>	<b>30</b>	<b>3,64</b>	<b>33</b>	<b>4,24</b>

Wertung nach Punkten  
(steigende Punkte → bessere Wertung)

1 = ungenügend  
5 = sehr gut

Die **Jahreskosten** werden mit einer Wichtung von 32 % als wichtigstes Entscheidungskriterium eingestuft. Wie schon im **Kapitel 9.4** dargelegt, sind die Jahreskosten bei Variante 3 (Ozonung + Teich) und 4b am geringsten, bei den Varianten 2 (GAK-Filtration) und 4 (Ozonung + BAK) am teuersten. Die Varianten 1 und 3 bekommen aufgrund der geringen Kosten vier Punkte und die Varianten 3 und 4 zwei Punkte.

Die **Reinigungsleistung Spurenstoffe** wurde in Höxter mit 24 % gewichtet. Im Rahmen der Studie werden die untersuchten Varianten nach Literaturangaben ausgelegt und auch die eingesetzten Betriebsstoffe festgelegt, sodass eine vergleichbare Reinigungsleistung in Bezug auf wichtige Spurenstoffe erzielt wird. Daher erhalten alle Varianten hier die gleiche (hohe) Punktzahl. Eine Ausnahme stellt das Verfahren 4b (Langsamfiltration) dar. Die Reinigungsleistung in Bezug auf Spurenstoffe wird in der Literatur sehr unterschiedlich bewertet (siehe Auch **Kapitel 7.4.2**). Des Weiteren ist die Leitungsfähigkeit dieses Verfahrens in Bezug auf die untersuchten Stoffe nur schwer zu steigern. Bei den anderen Varianten kann durch eine Erhöhung der Dosierung (PAK, Ozon) bzw. Verkürzen der Filterstandzeit (GAK-Filtration) die Eliminierung in Bezug auf ausgewählte Stoffe erhöht werden. Daher erhält die Langsamfiltration (V4b) hier nur eine neutrale Bewertung. Nach weiteren Untersuchungen kann die Einstufung verbessert werden. Das Kombinationsverfahren aus Langsamfiltration und Ozonung (V4a) wird hier besser bewertet, da über die Ozonung die Eliminationsleistung gesteigert werden kann.

Die **Reinigungsleistung  $P_{ges}$  und CSB** wurde mit 16 % gewichtet. Sehr gute Ergebnisse haben hier die Variante 1 (PAK mit RLK) in Sindelfingen für  $P_{ges}$ , aber auch CSB und AFS erzielt. Bei den Langsamfiltrationsvarianten (V4a und b) wird eine sehr gute Reinigungsleistung in Bezug auf den CSB erwartet, die neben physikalischen besonders auf biologischen Prozessen basiert. Diese Varianten erhalten fünf Punkte. Bei der GAK-Filtration wird eine Reduktion des CSB und der abfiltrierbaren Stoffe durch Adsorption (gelöster CSB) sowie durch die Filtrationswirkung (AFS) angesetzt. Diese Variante wird daher mit drei Punkten bewertet. Bei Variante 3 (Ozonung) ist kein nennenswerter Effekt zu erwarten. Daher werden zwei Punkte vergeben.

Die **Bildung von Transformationsprodukten** ist beim Einsatz von oxidativen Verfahren wie dem Ozon gegeben. In Versuchen wurde die Bildung bestätigt. Durch eine nachgeschaltete biologische Stufe können diese Produkte wieder abgebaut werden. Die Untersuchungen in Regensdorf zeigten, dass ein Sandfilter ausreicht. Auch in der Trinkwasseraufbereitung werden biologisch aktivierte Filter (z. B. GAK) der Ozonung aus diesem Grund nachgeschaltet. Dies erfolgt auch in der vierten vorge-

stellten Variante. Um der besonderen Bedeutung dieses Punktes Rechnung zu tragen, wurden die Ozonvarianten (V3 und 4a) hier mit vier Punkten bewertet und alle anderen Verfahren, bei denen keine Abbauprodukte entstehen können, mit fünf Punkten.

Für die vorgestellten Varianten ist die Situation hinsichtlich **Erfahrungen und Referenzen** unterschiedlich. Für die Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle), die bislang in Baden-Württemberg bevorzugt umgesetzt wurde, liegen derzeit schon sehr gute Erfahrungen vor. Derzeit sind Anlagen bis 1.100 l/s in Betrieb. Größere sind in Planung. Daher werden hier fünf Punkte vergeben. Auch für die Ozonung liegen schon einige Erfahrungen aus Referenzanlagen vor (z. B. Regensburg, Duisburg-Vierlingen, Bad Sassendorf). Insgesamt ist die Referenz- und Erfahrungslage jedoch geringer als bei der PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle. Daher werden vier Punkte vergeben. Für die GAK-Filtration liegen Erfahrungen aus großtechnischen Versuchen vor. Deshalb werden an diese Variante ebenfalls 4 Punkte vergeben. Für die Kombination Langsamfiltration und Ozon (V4a) sowie Langsamfiltration (V4b) liegen bislang keine Erfahrungen im technischen Maßstab in der Abwasserbehandlung vor. Dies führt zu einer Bewertung mit zwei Punkten.

Beim Punkt **Betriebssicherheit** wird das Verhalten des Verfahrens beim Ausfall eines Aggregates bewertet, auch inwieweit durch redundante Anlagenteile ein Weiterbetrieb und die Einhaltung der Reinigungsziele möglich sind. Die Auswirkungen auf weitere Anlagenteile werden in die Beurteilung einbezogen. Die höchste Betriebssicherheit weisen die GAK-Filtration (V2) und die beiden Langsamfiltrationsvarianten (V4a/b) auf, da die Betriebsfähigkeit im Wesentlichen nur vom Beschickungspumpwerk abhängig ist. Weiterhin ist keine Dosierung erforderlich. Mit vier Punkten wird Variante 1 bewertet. Aufgrund der verschiedenen Aggregate und Pumpen, die für die Dosierung von PAK, Me-Salzen und Flockungshilfsmittel sowie die Rücklaufkohleförderungen erforderlich sind, wird die Betriebssicherheit etwas schlechter als bei der GAK-Filtration bewertet. Bei Ausfall der PAK-Dosierung erfolgt weiterhin die Spurenstoffelimination, da durch den Rücklaufstrom der Zulauf weiterhin mit Aktivkohle behandelt wird. Die Variante 3 (Ozonung) wird ebenfalls mit vier Punkten bewertet.

Die **Sensitivität** gegenüber Kostensteigerungen bei den Betriebsmitteln ist über die Laufzeit der Anlage zu betrachten, wie schon im **Kapitel 9.5** dargestellt. Hier zeigt die Variante 1 (PAK mit Rückführung) die geringsten Einflüsse auf Kostensteigerungen. Sie wird daher mit vier Punkten bewertet. Die Ozon-Variante (V3) und die Langsamfiltration (V4b) folgen. Sie erhalten ebenfalls drei Punkte. Die GAK-Filtration (Variante 2) sowie die Kombination aus Langsamfiltration und Ozonung (V4a) reagieren am empfindlichsten auf Kostensteigerungen. Daher werden hier zwei Punkte vergeben.

In letzter Zeit ist die **Nachhaltigkeit (CO<sub>2</sub>-Emissionen)** von Verfahren gerade auch bei der 4. Reinigungsstufe immer stärker in den Fokus gerückt. Die Bewertung ist derzeit noch schwierig, da entsprechend weitreichende Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann noch keine eindeutige Bewertung abgegeben werden (Palmowski u. a. 2011). Vor diesem Hintergrund werden alle technischen Verfahren mit vier Punkten bewertet. Die beiden Langsamfiltrationsvarianten (V4a/b) erhalten 5 Punkte, da für diese Filtrationsverfahren keine Betriebsstoffe benötigt werden.

In der **Summe** schneidet die Variante 4b (Langsamfiltration) mit 4,24 Punkten am besten ab. Es folgen auf Rang 2 die Varianten 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) und 3 (Ozonung + Teich) mit jeweils 4,16 Punkten. Die Variante 2 (GAK-Filtration) nimmt den dritten Platz mit 4,04 Punkten ein. Die Variante 4a (Langsamfiltration + Ozonung) liegt mit 3,64 Punkten auf dem letzten Rang.

## 11 Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie zur Ertüchtigung und Erweiterung der Kläranlage Höxter in Bezug auf die Elimination von anthropogenen Spurenstoffen (4. Reinigungsstufe) wurden folgende vier Verfahrensvarianten (mit zwei Untervarianten) untersucht, die mit dem Auftraggeber abgestimmt wurden:

- Variante 1: Pulverkohledosierung mit Rücklaufkohle,
- Variante 2: GAK-Filtration,
- Variante 3: Ozonung mit Nachbehandlung im vorhandenen Schönungsteich,
- Variante 4: Langsamfiltration mit den Untervarianten
  - a) Langsamfiltration mit Ozonung und Nachbehandlung im vorhandenen Teich
  - b) Langsamfiltration ohne Nachbehandlung.

Die ausgewählten Varianten wurden auf ihre Umsetzbarkeit geprüft und zeichnerisch in Lageplanausschnitten sowie in einer Systemskizze dargestellt. Basierend auf den Abschätzungen der Betriebs- und Investitionskosten wurden die Jahreskosten ermittelt. Die Bewertung der einzelnen Varianten erfolgte anhand einer Entscheidungsmatrix, in der neben den Jahreskosten noch weitere Kriterien berücksichtigt wurden. Die Matrix wurde gemeinsam mit der Stadtentwässerung Höxter festgelegt. Maximal konnte eine Punktzahl von 5 Punkten erreicht werden.

Die höchste Punktzahl erreichte die Variante 4b (Langsamfiltration) mit 4,24 Punkten. Die Varianten 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleföhrung) und 3 (Ozonung + Teich) folgen mit jeweils 4,16 Punkten. Variante 2 (GAK-Filtration) erreicht mit 4,04 Punkten den dritten Platz. Die Variante 4a (Langsamfiltration + Ozonung) liegt mit 3,64 auf dem letzten Rang.

Zu beachten ist, dass die Variante 4b (Langsamfiltration) hinsichtlich der Spurenstoffelimination geringere Eliminationsgrade erwarten lässt. Dies wurde in der Bewertung entsprechend berücksichtigt. Alle anderen Verfahren wurden so ausgelegt, dass eine vergleichbar (hohe) Elimination zu erwarten ist.

Bei den Jahreskosten liegen Variante 4b (Langsamfiltration) und 3 (Ozonung) mit 269.500 EUR/a, brutto bzw. 285.200 EUR/a, brutto vorn. Es folgen Variante 2 (GAK-Filtration) mit 324.200 EUR/a, brutto und Variante 1 (PAK-Dosierung) mit 391.000 EUR/a, brutto. Die höchsten Jahreskosten wurden für Variante 4a (Langsamfiltration + Ozonung) mit 471.700 EUR/a, brutto ausgewiesen.

Alle Verfahren können gut auf der KA Höxter umgesetzt werden. Der zur Verfügung stehende Bauplatz um das Kläranlagengelände ist auch für die flächenintensiven Langsamfiltrationsvarianten ausreichend. Die 4. Reinigungsstufe kann ohne aufwendige Rohrleitungsföhrung an den Bestand angeschlossen werden.

Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) liegt in der Bewertungsmatrix neben V3 auf dem zweiten Rang. Sie stellt das derzeit verbreitetste Verfahren zur Spurenstoffelimination dar (in Baden-Württemberg derzeit 7 Anlagen in Betrieb, weitere in Planung und Bau).

Die GAK-Filtration (Variante 2) erreicht den dritten Rang. Für dieses Verfahren spricht die hohe Betriebssicherheit. Die relativ geringe prognostizierte Standzeit der Aktivkohle im Filter föhrt zu den hohen Verbrauchskosten. Die GAK-Filtration ist daher gegenüber Kostensteigerungen am anfälligsten.

Die Ozonung mit Sandfilter (Variante 3) lag in der Bewertungsmatrix – wie V1 – auf dem zweiten Platz. Dieses Verfahren kommt entgegen, dass der vorhandene Schönungsteich als nachgeschaltete biologisch aktive Stufe genutzt werden kann. In der Berechnung wurde derzeit von einer vergleichsweise hohen Ozondosierung ausgegangen. Sollte sich zeigen, dass diese reduziert werden kann, so wird dieses Verfahren wirtschaftlich noch interessanter. Bedingung ist eine sehr gut arbeitende Nachklärung. Die weiteren Forschungsergebnisse hinsichtlich der Bildung von Transferprodukten sollten in die Entscheidungsfindung einfließen.

Die Langsamfiltration (V4b) erreicht in der Bewertung den Rang 1. Die Jahreskosten sind gemeinsam mit der Ozonung (V3) die niedrigsten in diesem Vergleich. Hinsichtlich der zu erwartenden Reinigungsleistung bei den Spurenstoffen wird sie schlechter eingestuft; zudem kann die Leistungsfähigkeit nicht wie bei den anderen Varianten durch eine Erhöhung der Dosierung bzw. Verringerung der Filterstandzeit beeinflusst werden. Dafür sind auch keine weiteren Betriebsstoffe notwendig. Bei den Betriebskosten zeigt sich jedoch, dass die großen Betriebsflächen stark kostenbeeinflussend sind. Insgesamt stellt diese Variante ein sehr interessantes Verfahren dar, da im Bereich der KA Höxter die benötigten Flächen zur Verfügung stehen.

Die Kombination Langsamfiltration und Ozonung (Variante 4a) ist hinsichtlich der Reinigungsleistung in Bezug auf die Spurenstoffe sowie weiterer Abwasserparameter als sehr gut einzustufen. Durch die vorgeschaltete Filtration sind niedrige Ozondosen zu erwarten. Jedoch liegen derzeit noch keine validierten Erfahrungen im Abwasserbereich zu diesem Verfahren vor, sodass die Bewertung hier nur einen vorläufigen Charakter haben kann. Hinsichtlich der Investitionskosten ist nachteilig, dass zwei Stufen (Langsamfilter und Ozonung) gebaut werden müssen.

Für die Stadtentwässerung Höxter ist aufgrund der vorhandenen Situation auf der Kläranlage Höxter (Erweiterungsflächen) weiterhin auch ein flächenintensives Verfahren (Retentionsbodenfilter, Langsamfilter u.ä.) interessant, wenn dieses hinsichtlich der Reinigungsleistung sowie den Investitions- und Betriebskosten mit technischeren Verfahren vergleichbar ist. Die Entwicklung in diesem Bereich steht noch am Anfang und wird von der Stadtentwässerung Höxter weiter verfolgt.

Aufgrund der vorhandenen Anlagentechnik sollten sich nach derzeitigem Kenntnisstand die weiteren Untersuchungen in Höxter auf die Varianten 4b (Langsamfiltration), 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) und 3 (Ozonung mit Nachbehandlung im vorhandenen Schönungsteich) konzentrieren.

## Literaturverzeichnis

### **Abegglen u. a. 2009**

*Abegglen, C.; Escher, B.; Hollender, J.; Koepke, S.; Ort, C.; Peter, A.; Siegrist, H.; von Gunten, U.; Zimmermann, S.; Koch, M.; Niederhauser, P.; Schärer, M.; Braun, C.; Gälli, R.; Junghans, M.; Brocker, S.; Moser, R.; Rensch, D.:* Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf; Studie der Eawag im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (CH), 2009, Download unter: [www.eawag.ch/medien/bulletin/20090616/schlussbericht.pdf](http://www.eawag.ch/medien/bulletin/20090616/schlussbericht.pdf).

### **ATV-A 203**

*DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.:* ATV-Arbeitsblatt A 203/Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung, April 1995.

### **Bornemann u. a. 2012**

*Bornemann, C.; Hachenberg, M.; Kazner, C.; Herr, J.; Jagemann, P.; Lyko, S.; Benstöm, F.; Montag, D.; Platz, S.; Wett, M.; Kaub, J. M.; Kolisch, G.; Osthoff, T.; Rolfs, T.; Stepkes, H.:* Teilprojekt 5: Er-tüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2012.

### **Breitbach u. Bathen 2001**

*Breitbach, Marc; Bathen, Dieter:* Adsorptionstechnik. 1. Auflage. Springer-Verlag, 2001. – ISBN 9783540419082.

### **Cooney 1998**

*Cooney, D. O.:* Adsorption Design for Wastewater Treatment. 1. Auflage. CRC, 1998. – ISBN 9781566703338

### **DVGW W 239**

DVGW W 239 (A) März 2011. Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle.

### **DWA 2008**

*Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.):* Anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf – Arzneistoffe. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 5/2008 (DWA-Themen). – ISBN 9783940173744.

### **Grünebaum u. a. 2012**

*Grünebaum, T.; Herbst, H.; Keysers, C.; Lyko, S.; Türk, J.:* Mikroschadstoffelimination mit Ozon: Beispiele für Kläranlagen; Vortrag auf dem 2. Fachsymposium Mikroschadstoffe. NRW 2012; Elimination von Mikroschadstoffen, Keimen und Bakterien in kommunalen Kläranlagen am 21.06.2012 in Düsseldorf.

### **Gujer 1999**

*Gujer, Willi:* Siedlungswasserwirtschaft. 1. Auflage. Springer-Verlag, 1999.

**Herbst u. a. 2011**

*Herbst, H.; Kaufmann, M.; Türk, J.; Launer, M.:* Abwasserzonierung Kläranlage Duisburg-Vierlinden – Auslegung – Bau – erste Betriebsergebnisse. In Innovation und Flexibilität – Systemoptimierung und Systemerweiterung; Tagungsband der 25. Karlsruher Flockungstage 2011, Schriftenreihe SWW (Bd. 141), Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe, ISBN 978-3-9813069-4-1.

**Joss u. a. 2005**

*Joss, Adriano; Keller, Elvira; Alder, Alfredo C.; Göbel, Anke; McArdell, Christa S.; Ternes, Thomas; Siegrist, Hansruedi:* Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. In: Water Res 39 (2005), Sep, Nr. 14, S. 3139–3152.

**Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013**

<http://www.koms-bw.de>, Abruf: 01.09.2013

**Kümmel u. Worch 1990**

*Kümmel, R.; Worch, E.:* Adsorption aus wässrigen Lösungen. 1. Auflage. VEB Dt. Verl. für Grundstoff-industrie, 1990.

**Meyer 1979**

*Meyer, Hermann:* Untersuchung zur weitergehenden Reinigung biologisch gereinigten Abwassers – Die praktische Anwendung der Abwasserfiltration und ihre Bedeutung in der Abwassertechnologie; Schriftenreihe GWA, Bd. 35, 1979.

**Meyer 2008**

*Meyer, Hermann:* Abwasserreinigung – Qua vadis?, in GWF Wasser, Abwasser, 149, Nr. 4, 2008.

**MUNLV 2004**

*MUNLV NRW:* Untersuchung zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen. 2004 – Forschungsbericht.

**Nahrstedt u. a. 2011**

*Nahrstedt, A.; Alt, K.; Barnscheidt, I.; Fritzsche, J.; Sürder, T.; Burbaum, H.; Klak, A.:* CSB- und Spurenstoffelimination am Aktivkohlefestbettfilter. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011.

**Palmowski u. a. 2011**

*Palmowski, L.; Veltmann, K.; Mousel, D.; Mauer, C.; Simsheuser, C.; Schmitz, U.; Eckers, S.; Jagemann, P.; Thöle, D.; Riße, H.; Gredugk-Hoffmann:* Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase I. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011.

**Pinnekamp u. a. 2010**

*Pinnekamp, Johannes; Keyers, Christoph; Montag, David; Veltmann, Karin:* Elimination von Mikro-schadstoffen – Stand der Wissenschaft. In: Gewässerschutz – Wasser – Abwasser (GWA) 220 (2010), S. 28/1 – 28/21.

**Preuß u.a. 2001**

*Preuß, G., Willme, U. and Zullei-Seibert, N.:* Verhalten ausgewählter Arzneimittel bei der künstlichen Grundwasseranreicherung – Eliminierung und Effekte auf die mikrobielle Besiedlung. *Acta hydrochim. hydrobiol.*, 29, Nr. 5, (2001), S. 269–277.

**Schröder und Grömping 2013**

*Schröder, Karl-Heinz; Grömping, Markus:* Einsatz von Aktivkohle auf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen, Vortrag auf dem DWA-Praxisseminar „Strategien zur Spurenstoffelimination auf Kläranlagen“ am 2. Juli 2013 in Gütersloh, Juli 2013.

**Schwentner u. a. 2013a**

*Schwentner, G; Kremp, W.; Mauritz, A; Hein, A.; Metzger, S; Rössler, A.:* Kosten in der weitergehenden Abwasserreinigung mit PAK – Teil 1, in *Wasserwirtschaft – Wassertechnik (wwt)*, 63, Nr. 4, 2013.

**Schwentner u. a. 2013b**

*Schwentner, G; Kremp, W.; Mauritz, A; Hein, A; Metzger, S; Rössler, A.:* Kosten in der weitergehenden Abwasserreinigung mit PAK – Teil 2, in *Wasserwirtschaft – Wassertechnik (wwt)*, 63, Nr. 5, 2013.

**Siegrist 2013**

*Siegrist, H.-R.:* *Energieverbrauch für die weitergehende Spurenstoffelimination – Maßnahmen zur Reduktion*, in: *Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum*, Band 65, 31. Bochumer Workshop, Klimaschutz und Energiewende – Welchen Beitrag liefert der Abwassersektor?, 2013

**Sontheimer u. a. 1985**

Sontheimer, H.; Frick, B.; Fettig, J.; Hörner, G.; Hubele, C.; Zimmer, G.: Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. DVGW Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH), 1985.

**Ternes u. a. 2003**

*Ternes, T. A.; Stüber, J.; Herrmann, N.; McDowell, D.; Ried, A.; Kampmann, M.; Teiser, B.:* Ozonation: A tool for removal of pharmaceuticals contrast media and musk fragrances from wastewater?, *Water Research*, 37, 1976 – 1982, 2003.

**Worch 1997**

*Worch, E.:* *Wasser- und Wasserinhaltsstoffe – eine Einführung in die Hydrochemie*. Teubner-Verlag, Stuttgart-Leipzig, 205 S, 1997.

**Worch 2004**

*Worch, E.:* Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Dresden, 2004.