

Kläranlage Wesel

4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie
Mai 2014 | 1. Ausfertigung
Projektnummer 0675 009





Kläranlage Wesel

4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie
Mai 2014 | 1. Ausfertigung
Projektnummer 0675 009

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

Aufgestellt:
Bochum, im Mai 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 : 250	030 007 01 00
2	Lageplan, Variante 2 GAK-Filter	1 : 250	030 007 02 00
3	Lageplan, Variante 3 Ozonung mit Dynasandfilter	1 : 250	030 007 03 00
4	Lageplan, Variante 4 Ozonung mit GAK-Filter	1 : 250	030 007 04 00
5	Verfahrensschema, Variante 1 PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle	1: -	030 083 01 00
6	Verfahrensschema, Variante 1 GAK-Filter	1: -	030 033 02 00
7	Verfahrensschema, Variante 3 Ozonung mit Dynasandfilter	1: -	030 053 03 00
8	Verfahrensschema, Variante 4 Ozonung mit GAK-Filter	1: -	030 053 04 00

Auftraggeber:

Stadtwerke Wesel GmbH
Emmericher Str. 11-29
46485 Wesel

Telefon: 0281 9660 0
Telefax: 0281 65074

Projektleiter:

Herr Dipl.-Ing. Jens Kiel

Telefon: 0281 9660 253
jens.kiel@stadtwerke-wesel.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

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Zugrunde liegende Unterlagen	1
3	Belastungsdaten Hydraulik	2
4	Reinigungsanforderungen	3
5	Anlagenbestand	3
5.1	Kurzbeschreibung	3
6	Spurenstoffe im Wasserkreislauf	4
6.1	Einleitung.....	4
6.2	Charakterisierung des Verhaltens von anthropogenen Spurenstoffen.....	5
7	Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen	6
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
8	Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen	19
8.1	Beschickungsmenge	19
8.2	Verfahrensfestlegung	22
8.3	Randbedingungen	22
8.4	Varianten	23
8.4.1	Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle	23
8.4.1.1	Allgemein.....	23
8.4.1.2	Ausführung	24
8.4.2	Variante 2: Filtration über granulierte Aktivkohle.....	27

8.4.2.1	Allgemeines	27
8.4.2.2	Ausführung	28
8.4.3	Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter	30
8.4.3.1	Allgemeines	30
8.4.3.2	Ausführung	31
8.4.4	Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter	34
8.4.4.1	Allgemeines	34
8.4.4.2	Ausführung	35
8.5	Ergebnisübersicht Varianten	38
9	Kosten	40
9.1	Allgemein	40
9.2	Investitionskosten	40
9.3	Betriebskosten	40
9.4	Jahreskosten	42
9.5	Sensitivitätsanalyse	44
10	Bewertung	45
11	Zusammenfassung	47
	Literaturverzeichnis	50

Bildverzeichnis

Bild 1:	Volumenstrom Ablauf KA Wesel (2012 bis 2013)	2
Bild 2:	Panoramaansicht der KA Wesel	4
Bild 3:	Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013)	6
Bild 4:	Grundbegriffe der Adsorption	7
Bild 5:	Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001)	8
Bild 6:	Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998)	9
Bild 7:	Adsorptionsverhalten zweier unterschiedlicher Stoffe im Festbettadsorber (DVGW W 239)	10
Bild 8:	Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985)	11
Bild 9:	Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert)	11
Bild 10:	Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert)	16
Bild 11:	Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensdorf (Abegglen u. a. 2009)	18
Bild 12:	Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)	19
Bild 13:	Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)	19
Bild 14:	Beispielhaft grafische Darstellung Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung	20
Bild 15:	Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszufusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination	21
Bild 16:	Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszufusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination	22
Bild 17:	Spitzenausgleichsbecken (derzeitiger Zustand)	23
Bild 18:	Blockschema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle	24
Bild 19:	Schnitt eines Tuchfilters, Ausführungsbeispiel (Quelle: Mecana)	26
Bild 20:	Lageplanausschnitt Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle	27
Bild 21:	Blockschema Variante 2: GAK-Filtration	28

Bild 22:	Lageplanausschnitt Variante 2: GAK-Filtration	30
Bild 23:	Blockschema Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Filter	31
Bild 24:	Lageplanausschnitt Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter	33
Bild 25:	Dyna-Sandfilter: links: Prinzipdarstellung, rechts: Anordnung im Betonbecken (Quelle: Nordic-Water)	34
Bild 26:	Blockschema Variante 4: Ozonung mit BAK.....	35
Bild 27:	Lageplanausschnitt Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem BAK-Filter	37
Bild 28:	Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den Jahreskosten der Varianten	43

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 Unterausschuss 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 Stadtwerke Wesel haben die TUTTAHS & MEYER Ing.-GmbH beauftragt, für die Kläranlage Wesel eine solche Studie auszuarbeiten.

Mit der Studie soll eine Entscheidungsgrundlage geschaffen werden, um die Auswahl eines möglichen Verfahrens durch die Stadtwerke Wesel 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 im Lageplan und im Verfahrensfliessbild (RI-Schema);
- 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:

- Entwurf zur Sanierung der Kläranlage Wesel, 2003, AT Ingenieurbüro Zabel GmbH, Willich,
- Bestandslageplan Kläranlage Wesel, 2007, AT Ingenieurbüro Zabel GmbH, Willich,
- hydraulischer Längsschnitt Kläranlage Wesel, 2011, Ruhrverband,
- Stundenwerte Ablaufmessung KA Wesel vom August 2012 bis Juli 2013,
- Ablaufwerte KA Wesel für das Jahr 2012.

3 Belastungsdaten Hydraulik

Die Bemessungswerte der Kläranlage Wesel sind im Folgenden aufgeführt:

Trockenwetterzufluss	Q_M	=	1.000 m ³ /h	≈	278 l/s
Mischwasserabfluss	$Q_{T,2h,max}$	=	2.000 m ³ /h	≈	556 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 (Messwehr) als Stundenwerte für den Zeitraum August 2012 bis Juli 2013 dar. Die mittlere Ablaufmenge beträgt 680 m³/h. Maximal wurden 2.468 m³/h im Betrachtungszeitraum abgeleitet. An 18 h im Betrachtungszeitraum lag die Abflussmenge oberhalb von 2.000 m³/h.

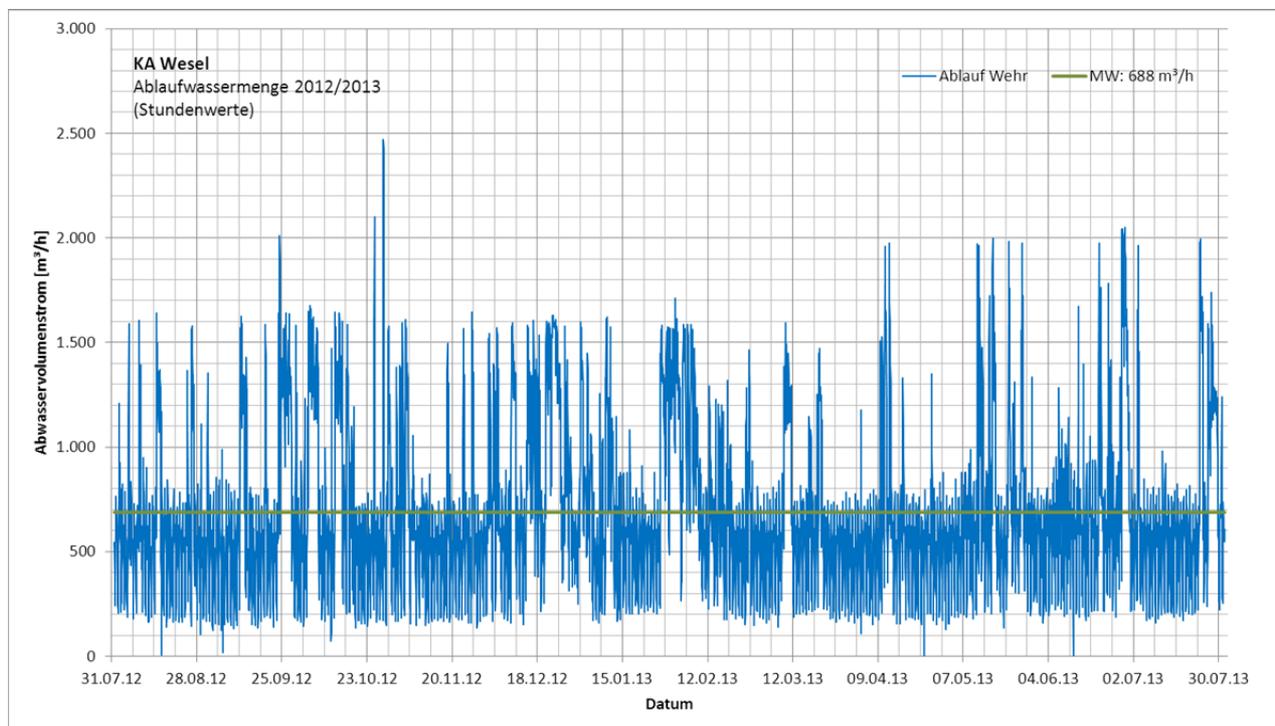


Bild 1: Volumenstrom Ablauf KA Wesel (2012 bis 2013)

4 Reinigungsanforderungen

Die Überwachungswerte für die Kläranlage Wesel sind für die Parameter CSB; Ammoniumstickstoff; Gesamt-Stickstoff, anorganisch und Gesamt-Phosphor festgelegt.

Folgende Überwachungswerte sind einzuhalten:

Chemischer Sauerstoffbedarf	65 mg/l
Biochemischer Sauerstoffbedarf	15 mg/l
Stickstoff, anorganisch	18 mg/l (≥ 12 °C)
Ammonium-Stickstoff	10 mg/l (≥ 12 °C)
Phosphor, gesamt	2 mg/l

5 Anlagenbestand

5.1 Kurzbeschreibung

Die Kläranlage Wesel weist eine Ausbaugröße von 98.000 EW auf. Der Vorfluter der Anlage ist der Rhein. 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 thermisch verwertet.

Die mechanische Stufe umfasst eine zweistraßige Rechenanlage mit einem ebenfalls zweistraßigen belüfteten Sandfang sowie der aus einem Rundbecken bestehenden Vorklärung.

Der Ablauf der Vorklärung wird in das Bio-P-Becken geleitet, dem ebenfalls der Rücklaufschlamm aus der Nachklärung zufließt.

Nach der biologischen P-Elimination wird das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch über das Zwischenpumpwerk auf das Niveau der Belebung gehoben. Diese besteht aus sechs Becken, die in zwei Straßen angeordnet sind. Jede Straße besteht aus einem unbelüfteten Becken (vorgeschaltete Denitrifikation) sowie zwei belüfteten Becken. Der Sauerstoffeintrag erfolgt über eine Druckbelüftung. Das Gesamtvolumen der Belebungsbecken umfasst 17.500 m³.

Der Ablauf der Belebung wird über ein Gerinne auf 10 längsdurchströmte Rechteckbecken verteilt. Jeweils zwei Becken sind zu einem Doppelbecken zusammengefasst, das über eine Räumbrücke gemeinsam beräumt wird. Der abgesetzte Belebtschlamm fließt im freien Gefälle in das Bio-P-Becken. Der Ablauf der Nachklärung wird in einem offenen Gerinne gefasst. Die Volumenstrommessung im Ablauf der Anlage wird über ein Messwehr in diesem Gerinne realisiert. Der Ablauf wird im freien Gefälle in den Rhein geleitet. Für den Hochwasserfall im Rhein steht ein Hochwasserpumpwerk zur Verfügung.

Ein ehemaliges Nachklärbecken (Doppelbecken) wurde zu einem Spitzenausgleichsbecken umgebaut. Dieses wird in dieser Form derzeit jedoch nicht betrieben.



Bild 2: Panoramaansicht der KA Wesel

Besondere Erkenntnisse im Hinblick auf die Einleitung von Spurenstoffen im Einzugsgebiet der Kläranlage liegen den Stadtwerken Wesel nicht vor. Es ist jedoch bekannt, dass über Krankenhäuser im Einzugsgebiet Röntgenkontrastmittel in das Abwasser eingetragen werden. Darauf deuteten erhöhte AOX-Gehalte hin, die im Rahmen von Indirekteinleiterkontrollen an den Einleitstellen der Krankenhäuser gemessen wurden.

Es ist vorgesehen, die Ausbaugröße der Kläranlage von 98.000 E auf 130.000 E zu erhöhen, wenn durch Ansiedlung von Gewerbebetrieben oder durch die Zunahme der Bevölkerung die Anlage höher belastet wird. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird dies in der hydraulischen Auslegung der 4. Reinigungsstufe berücksichtigt. Siehe hierzu **Kapitel 8.1**.

6 Spurenstoffe im Wasserkreislauf

6.1 Einleitung

Mit Spurenstoffe werden Substanzen bezeichnet, die im Konzentrationsbereich von 10^{-9} (ng/l) bis 10^{-6} g/l ($\mu\text{g/l}$) 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 Spurenstoffe 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.

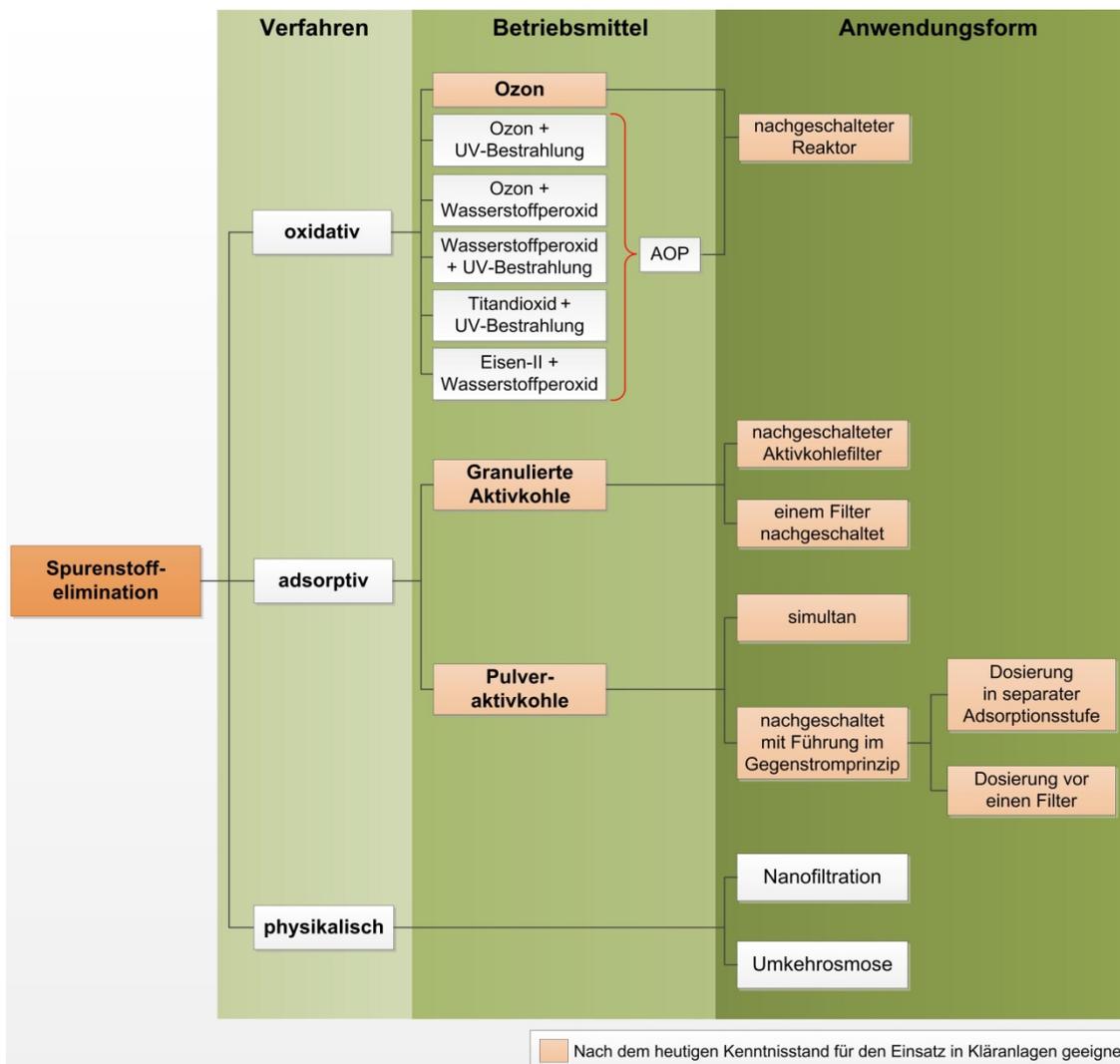


Bild 3: Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013)

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 Remobilisierung bereits fixierter Teilchen. Im **Bild 4** sind schematisch die Zusammenhänge dargestellt.

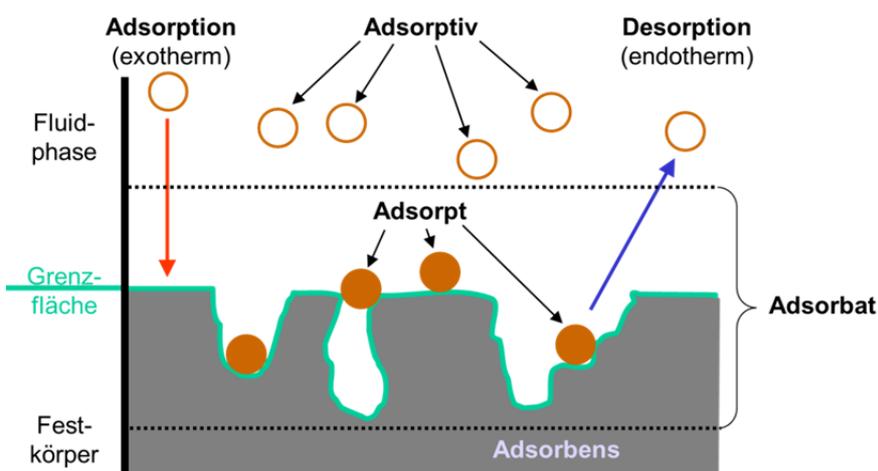


Bild 4: Grundbegriffe der Adsorption

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.

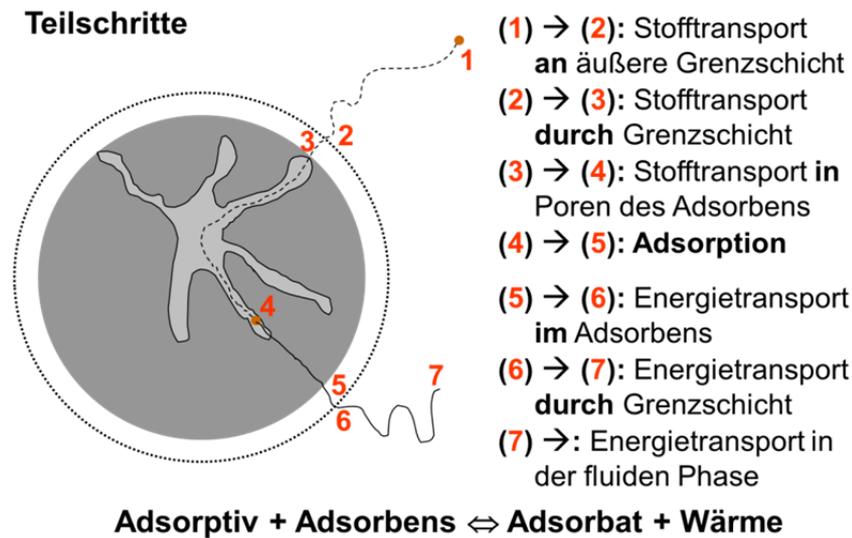


Bild 5: Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001)

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-NH₂) senken die Adsorbierbarkeit sehr stark
 - Sulfonsäure-Gruppe (R-SO₃H) senken meistens die Adsorbierbarkeit
 - Nitro-Gruppe (R-NO₂) 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).

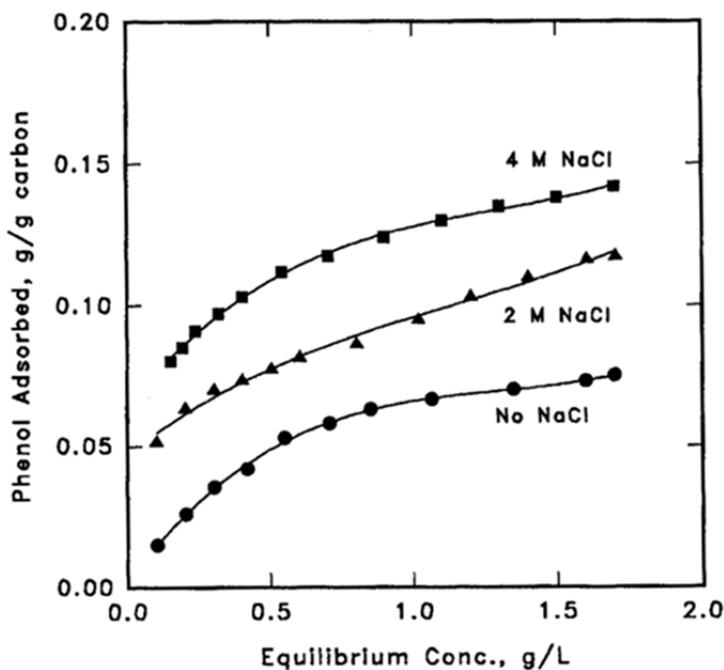


Bild 6: Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998)

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:

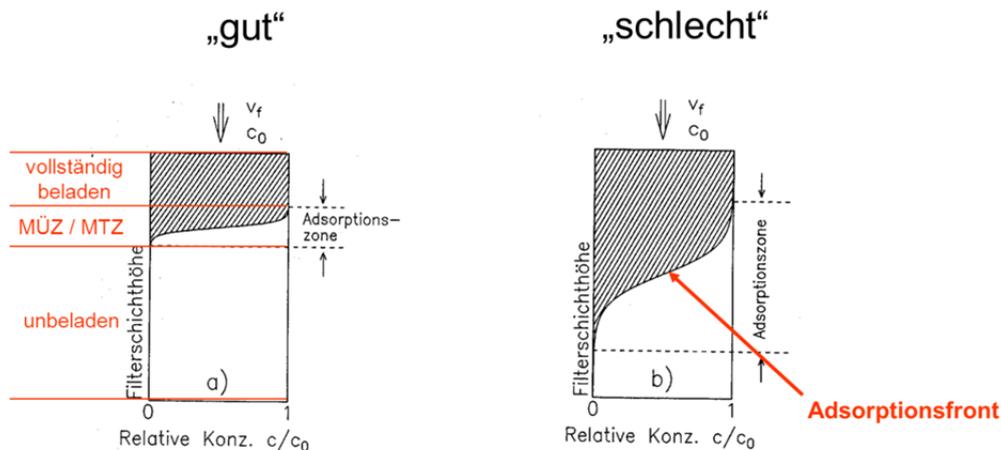
- Pulverkohlen (PAC = powdered activated carbon) weisen einen Durchmesser von weniger als 0,05 mm auf;
- Kornkohlen (GAC = granulated activated carbon) liegen im Durchmesser zwischen 0,5 und 4 mm.

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 7: 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.

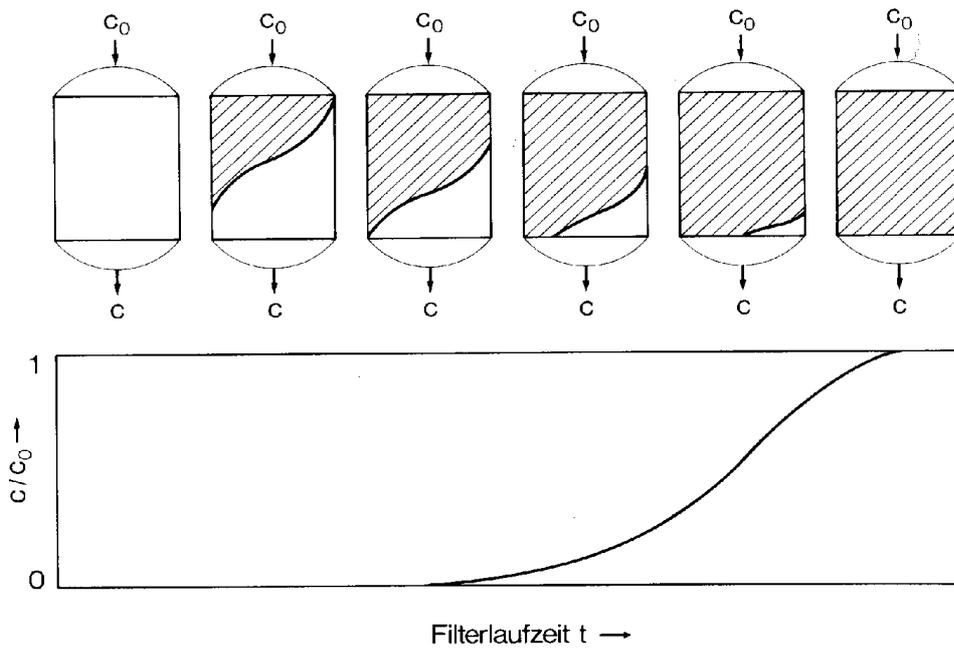


Bild 8: Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985)

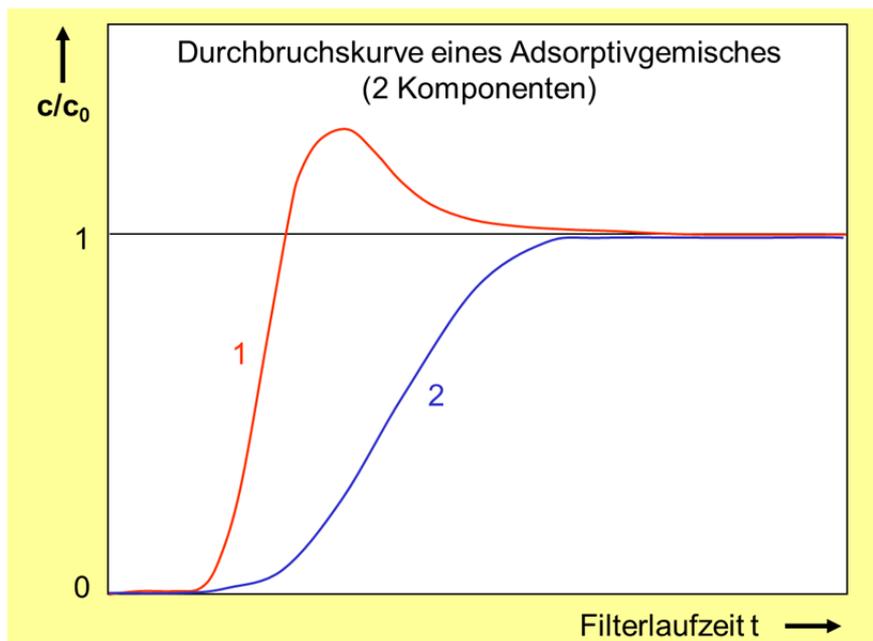


Bild 9: Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert)

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 (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/m³) hilfreich, um Filterdurchbruch zu verhindern.
- P_{ges}-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, Fenifibrinsäure, 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 Stützsicht 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.

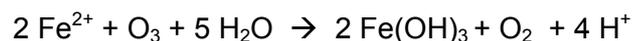
7.3 Ozonung

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 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 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 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.

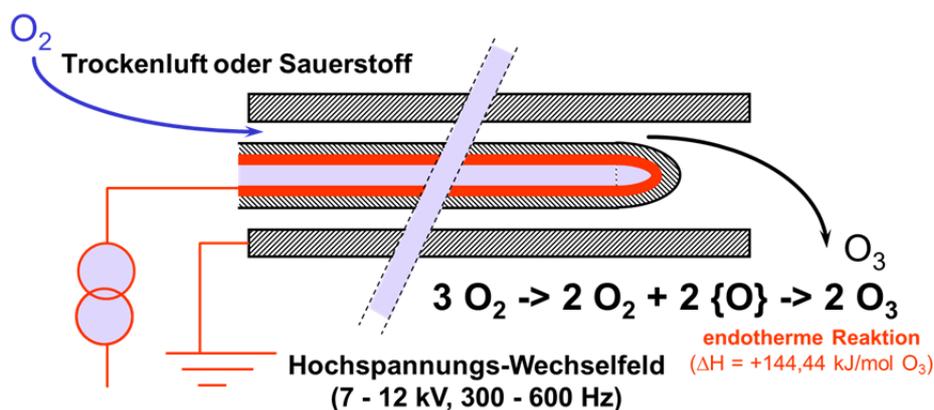


Bild 10: Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert)

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 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 O_3 -Erzeugung, Kühlung und Restozonvernichtung, so ergibt sich ein Bedarf an elektrischer Energie von 10...11 kWh/kg 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.

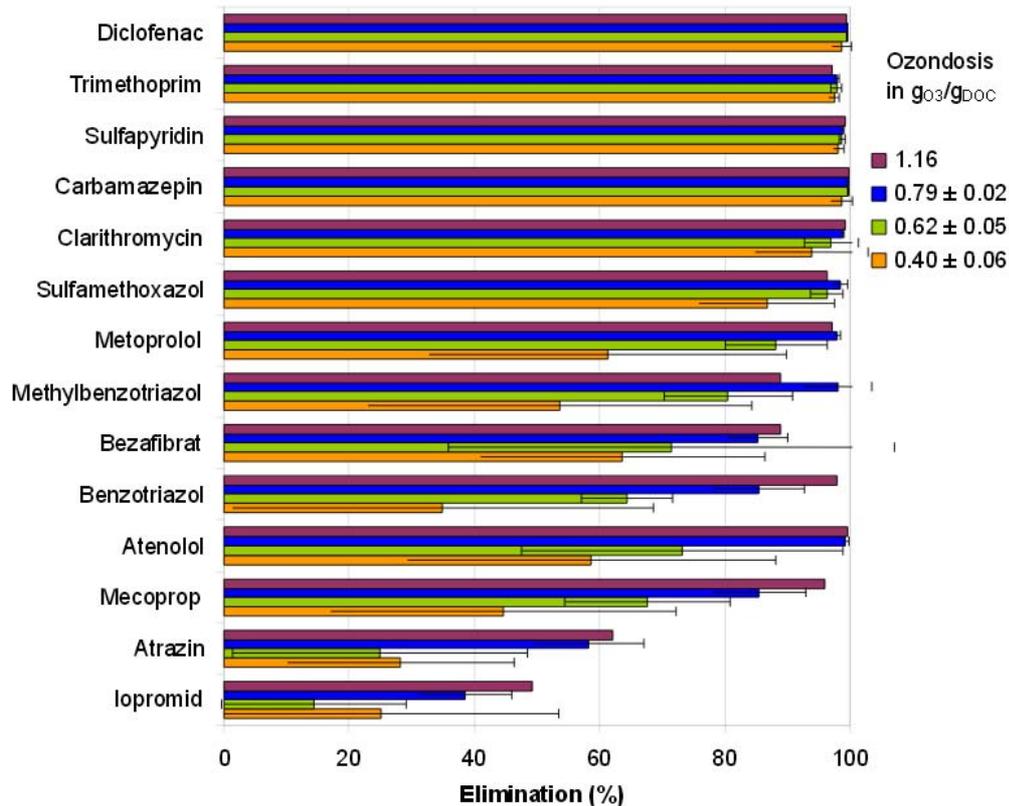


Bild 11: Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensdorf (Abegglen u. a. 2009)

In wirtschaftlicher und betrieblicher Hinsicht erwies sich in Regensdorf eine Ozondosis von 0,62 mg O₃/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 Regensdorf 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 Regensdorf. Zu berücksichtigen ist, dass der DOC im Ablauf der Nachklärung in Bad Sassendorf ebenfalls auf einem niedrigen Niveau liegt.

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 werden. 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

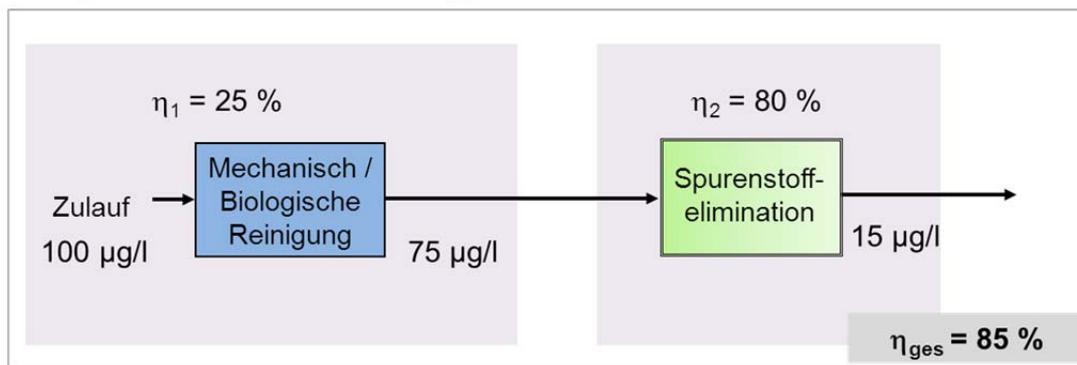


Bild 12: Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

Beispiel Teilstrombehandlung

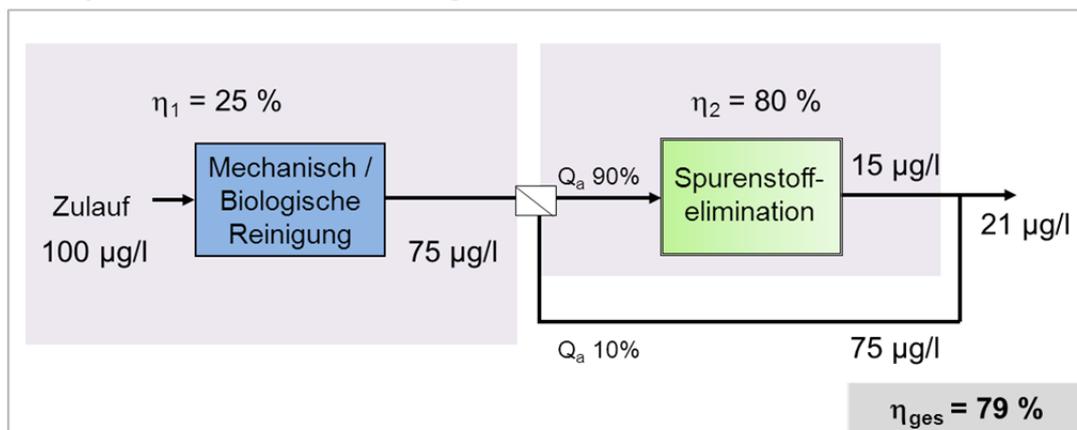


Bild 13: Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

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

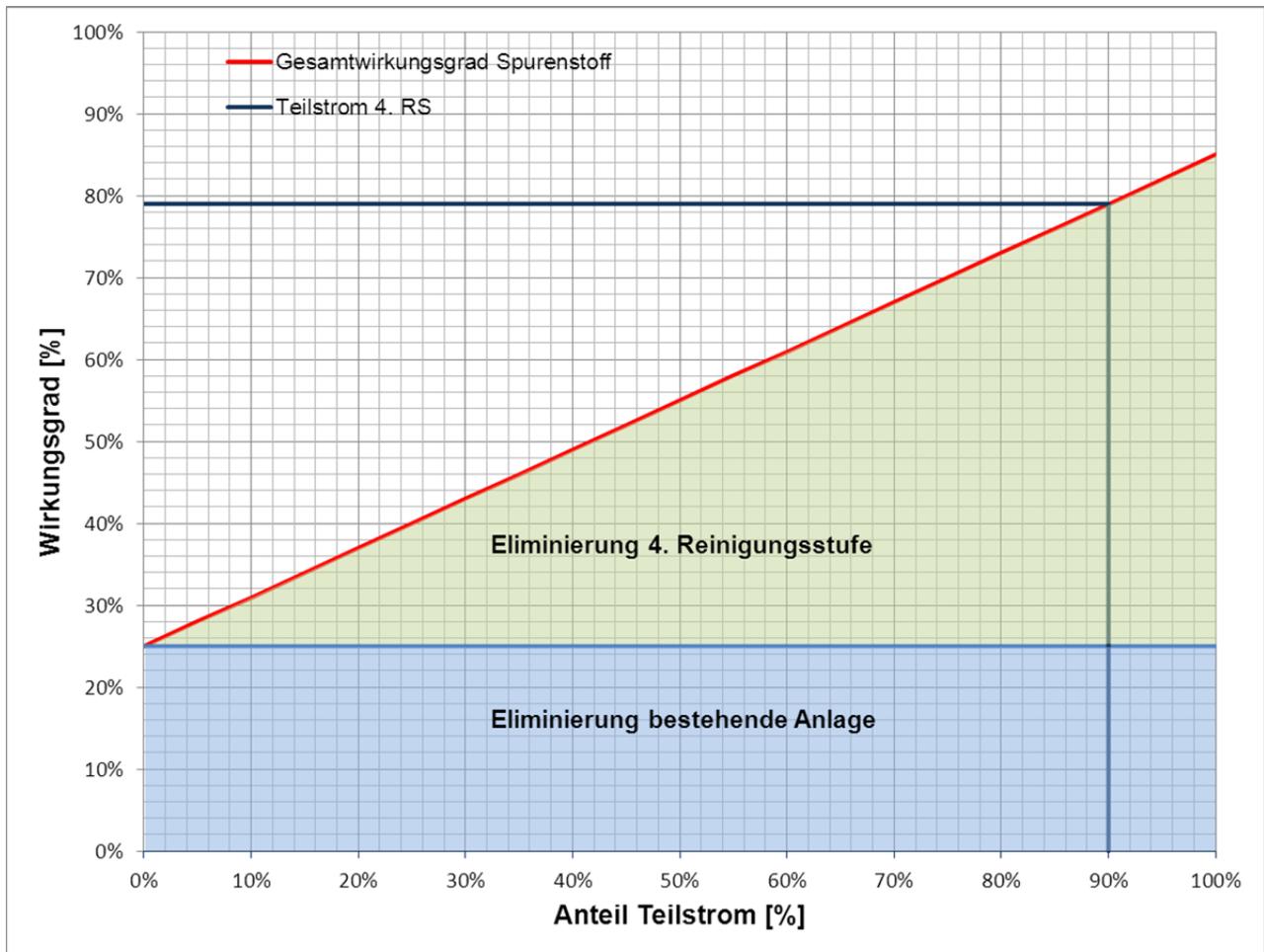


Bild 14: Beispielhaft grafische Darstellung Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung

Die Bemessung der 4. Reinigungsstufe erfolgt auf Basis der Ablaufwerte der Kläranlage Wesel für den Zeitraum August 2012 bis Juli 2013 (**Kapitel 3**).

Für eine Vollstrombehandlung müsste auf der Kläranlage Wesel eine Kapazität zur Behandlung von 2.000 m³/h vorgehalten werden. Die Auswertung der Abwassermengen zeigt jedoch deutlich, dass bereits Abwassermengen > 1.550 m³/h an weniger als 400 h überschritten werden.

Bild 15 stellt den Anteil der behandelten Abwassermenge [% der gesamten Abwassermenge] in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination dar. Wenn die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf 1.000 m³/h ausgelegt wird, werden 90 % der Jahresabwassermenge behandelt. Unter den gewählten Ansätzen kann somit eine Elimination von 79 % erreicht werden.

Die Verfahrensstufe kann so bei einer Behandlung von 90 % der Jahresabwassermenge im Vergleich zur Vollstrombehandlung um 50 % kleiner ausgeführt werden. Im Verhältnis der erreichbaren

Wirkungsgrade von 79 % oder 85 % wird die Teilstrombehandlung mit einem Volumenstrom von 1.000 m³/h als geeignet betrachtet.

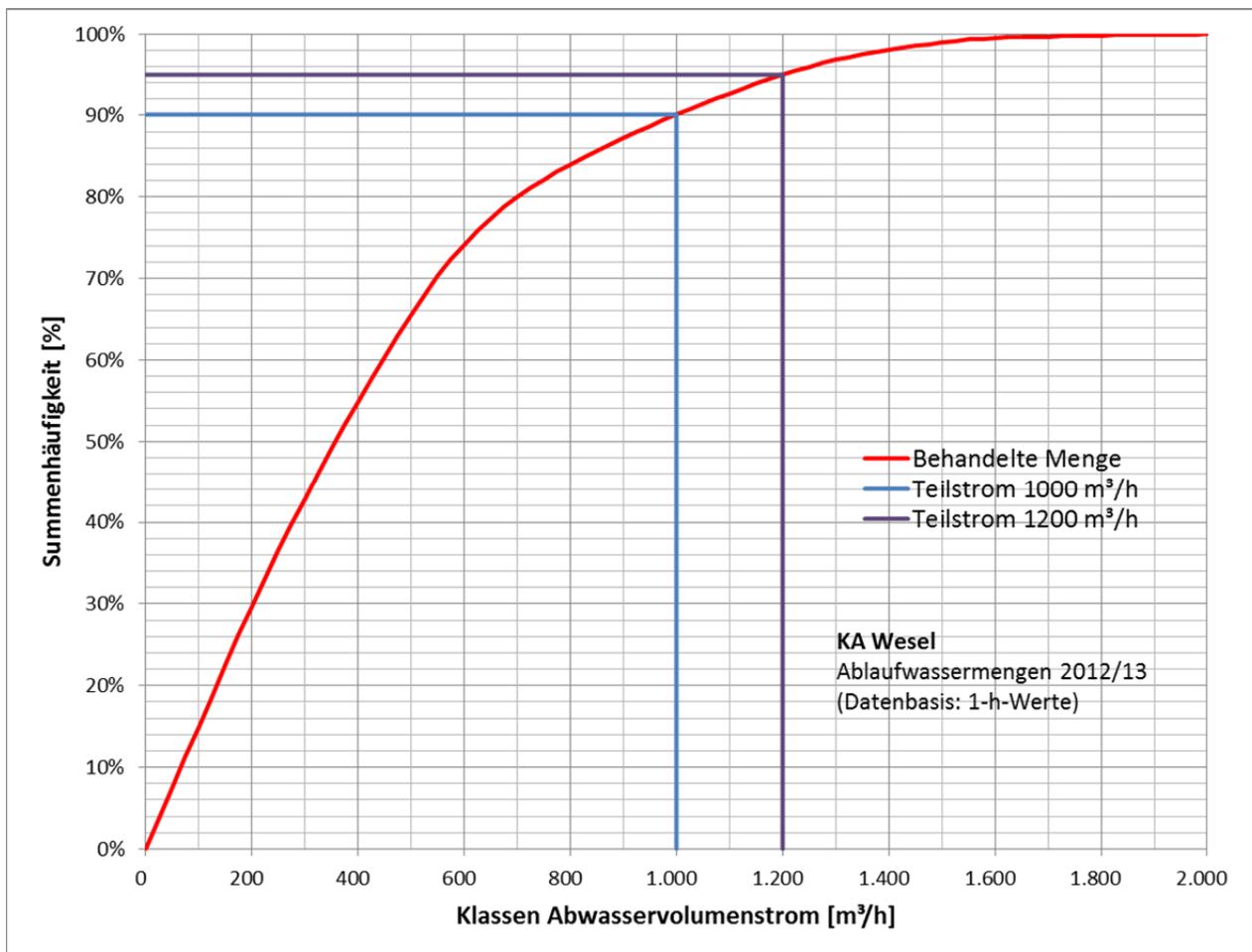


Bild 15: Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination

Bei einem Teilstrom von maximal 1.000 m³/h wird eine Abwassermenge von **5.269.025 m³/a** in der 4. Reinigungsstufe behandelt (Eigene Auswertung Stundenwerte 08/2012 bis 07/2013).

Um einen zukünftigen Zuwachs im Einzugsgebiet der Kläranlage zu berücksichtigen, wurde die 4. Reinigungsstufe auf einem 20 % größeren Volumenstrom ausgelegt. Für die Bemessung und Auslegung der Stufe wird ein Volumenstrom von **1.200 m³/h** angesetzt. Für die Berechnung der Betriebskosten wird die oben schon dargestellte Jahresmenge von 5.269.025 m³/a, die auf einem Teilstrom von maximal 1.000 m³/h beruht, genutzt.

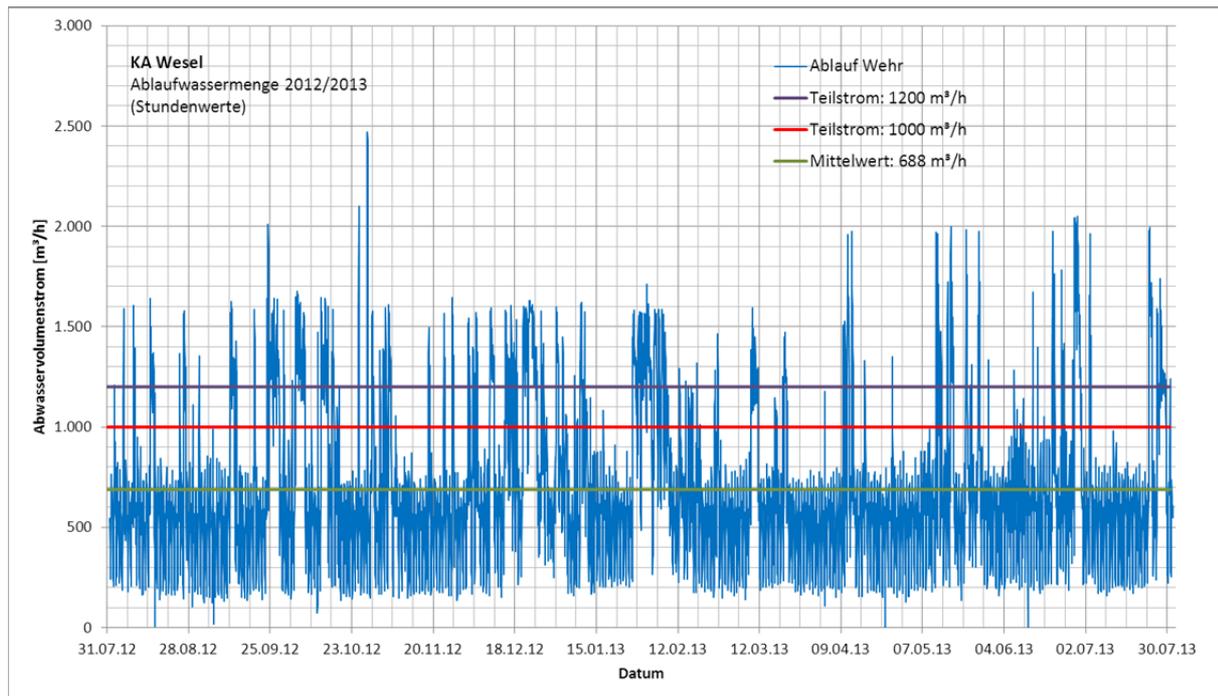


Bild 16: Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination

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 Sandfilter.** Ablauf der Nachklärung wird mit Ozon behandelt und anschließend über einen kontinuierlichen Sandfilter als biologisch aktive Stufe geführt
4. **Ozonung mit biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter.** Ablauf der Nachklärung wird mit Ozon behandelt und anschließend durch einen Festbettadsorber geleitet, der als biologisch aktive Stufe fungiert.

8.3 Randbedingungen

Die 4. Reinigungsstufe soll im nicht genutzten Spitzenausgleichsbecken untergebracht werden. Besonderer Vorteil dieses Standortes ist der direkte Zugang zum Ablauf der Anlage, der im Gerinne hinter dem Becken verläuft. So kann die 4. Reinigungsstufe ohne großen leitungstechnischen Aufwand gut in den Bestand integriert werden.

Das bestehende Becken weist Undichtigkeiten auf, sodass es nicht direkt genutzt werden kann. Es wird daher als Baugrube genutzt. In der Variantenbetrachtung sind daher alle massiv ausgeführten

Einbauten rein auf der bestehenden Sohle des Beckens begründet („Becken in Becken“-Konzept). Die bestehende Beckensohle wurde als Gründungsniveau angesetzt.

In nachstehendem Bild ist das Spitzenausgleichsbecken dargestellt.



Bild 17: Spitzenausgleichsbecken (derzeitiger Zustand)

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** beschreiben, an einigen Standorten in Baden-Württemberg umgesetzt. Für die Rückführung der Kohle ist ein Absetzbecken notwendig. Die Rücklaufkohle wird zusammen mit der Frischkohle in den Zulauf des Kontaktbeckens dem Ablauf der Nachklärung 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 zurückgeführt. 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 Wesel 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 Erweiterung der bestehenden Dosieranlage am Zwischenpumpwerk notwendig.

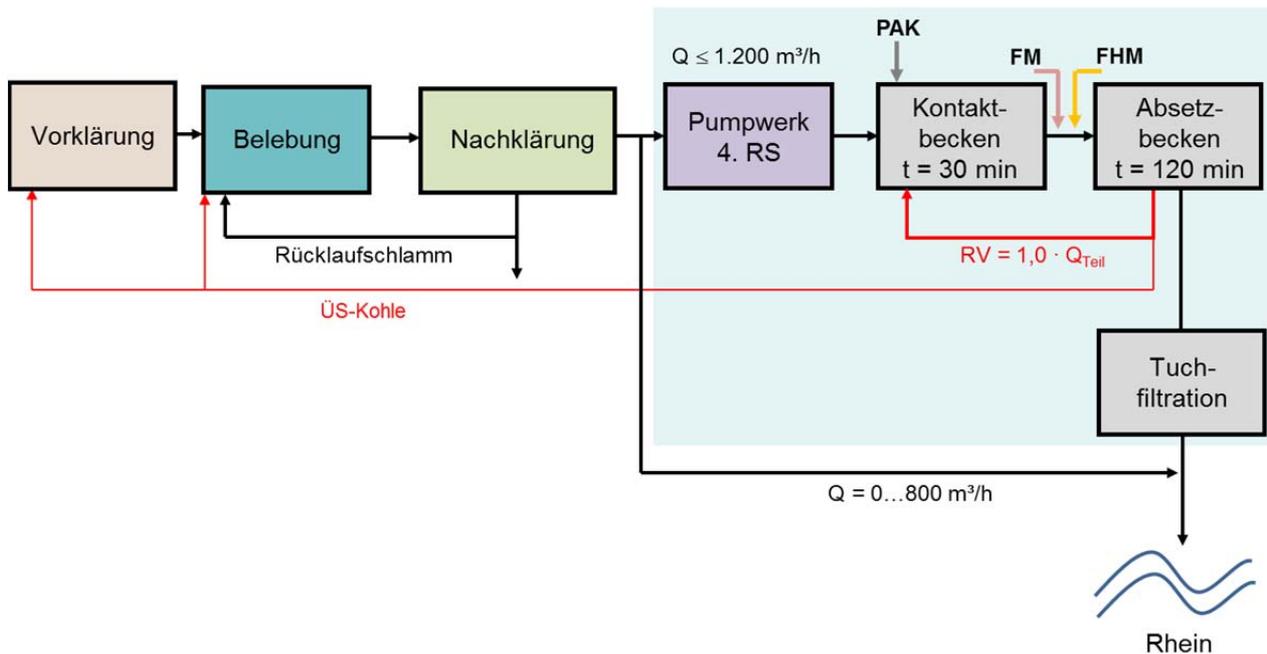


Bild 18: Blockschema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle

Diese Variante hat neben der Elimination der Spurenstoffe auch einen großen Einfluss auf die Parameter CSB, P_{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 1.200 m³/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 Schlammanfall 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** und das Fließschema **Blatt 5** der Planunterlagen dar. Die Variante ist zweistraßig aufgebaut. In jeder Beckenhälfte ist eine Straße, bestehend aus Kontakt- und Absetzbecken sowie Filtration, untergebracht. Des Weiteren sind im Baufeld des bestehenden Spitzenausgleichsbeckens noch das Beschickungspumpwerk, das PAK-Silo mit Dosiereinrichtung sowie die Bereitungsanlage für das Flockungshilfsmittel untergebracht.

Pumpwerk 4. Reinigungsstufe

Die Beschickung der PAK-Stufe erfolgt über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das direkt am Ablaufkanal der Kläranlage angeordnet ist. Die Vorlage wird direkt über eine Öffnung im Ablaufgerinne gespeist. Insgesamt stehen fünf drehzahlgeregelte Tauchmotorpumpen mit einem Volumenstrom von je 300 m³/h zur Verfügung. Diese Variante ist zweistraßig ausgeführt; daher werden jeder Straße zwei Pumpen zugeordnet. Die fünfte Pumpe dient als Reserve für beide Straßen.

Kontaktbecken

Das Kontaktbecken jeder Straße wird als quadratisches Becken mit einer Wasserspiegelhöhe von 3,3 m ausgeführt. Bei einer Innenkantenlänge von 10 m ergibt sich ein Volumen von 330 m³ je Straße. In der Summe liegt die Aufenthaltszeit bei maximalem Zufluss mit 33 min oberhalb der 30 min, die angesetzt wurden. Im nachfolgenden Absetzbecken beträgt die Aufenthaltszeit 120 min. Des Weiteren ist die Rücklaufkohleführung auf ein Rückführverhältnis von 1 ausgelegt. Insgesamt ist durch diese Maßnahmen sichergestellt, dass die Adsorptionskapazität der eingesetzten Kohle sehr gut genutzt werden kann.

Jedes Kontaktbecken ist mit einem Vertikalrührwerk ausgestattet.

Absetzbecken

Das Becken wird im vorderen Teil der jeweiligen Beckenhälfte angeordnet. Es wird in bestehende Becken mit den Schlammtrichtern hineingebaut (wie schon erwähnt: „Becken in Becken“-Prinzip). Das Becken ist analog zu den Nachklärbecken längsdurchströmt. Die Beckenbreite beträgt 10,3 m und die Länge 32,5 m. Die Randwassertiefe liegt bei 3,2 m. Je Sedimentationsbecken ergibt sich ein Volumen von 1.070 m³.

Für die Räumung des anfallenden Schlammes in die Abzugstrichter werden Bandräumer vorgesehen. Der in den Abzugstrichtern gesammelte Schlamm wird in einem Schacht von beiden Straßen zusammengeführt und mittels je einer Tauchmotorpumpe wieder in das Kontaktbecken der Straße zurückgeführt. Die Überschussschlamme wird ebenfalls aus diesem Schacht entnommen und der Vorklä- rung bzw. Belegung zur weiteren Beladung zugeführt.

Der Zulauf von den Kontaktbecken zum Absetzbecken wird jeweils über ein Gerinne realisiert, das an der Beckenlängswand angeordnet ist.

Tuchfiltration

Jedem Absetzbecken wird eine Filtrationsstufe zur Suspensa-Restentfernung nachgeschaltet. Es wird hier eine Tuchfiltration mit 18 Scheiben à 5 m² vorgesehen. Je Straße ergibt sich eine Filterfläche von 90 m². 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.

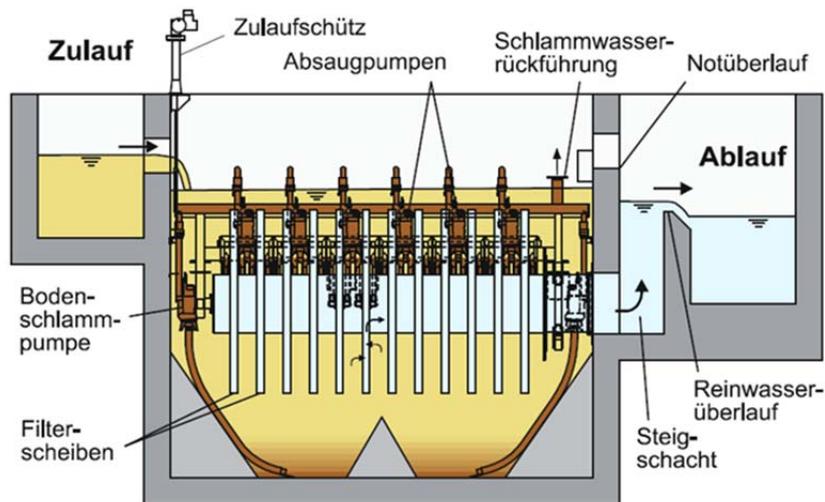


Bild 19: Schnitt eines Tuchfilters, Ausführungsbeispiel (Quelle: Mecana)

Der Ablauf der Tuchfilter wird über ein Gerinne wieder in das Ablaufgerinne der Kläranlage zurückgeführt.

PAK-Silo

Das Silo zur Lagerung der Aktivkohle mit einem Inhalt von 125 m³ wird im hinteren Bereich der rechten Beckenhälfte angeordnet. Das Silo verfügt über zwei Dosiergeräte. Jede Straße verfügt so über eine eigene Pak-Dosierung. Das Treibwasser (5 bis 7 m³/h je Dosiergerät) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Filtrat der 4. Reinigungsstufe entnommen.

Flockungs- und Flockungshilfsmittel

Als Flockungsmittel wird die Dosierung von FeCl₃ vorgesehen. Das Fällmittel wird der bestehenden Anlage auf der Kläranlage entnommen. Die bestehende Dosieranlage am Zwischenpumpwerk wird dazu erweitert. Da in der Summe mit keiner steigenden Fällmittelmenge gerechnet wird, ist eine Erweiterung der Tankkapazität nicht notwendig.

Die Bereitungsanlage für das Flockungshilfsmittel wird im Bereich des PAK-Silos errichtet und mit einer Einhausung versehen.

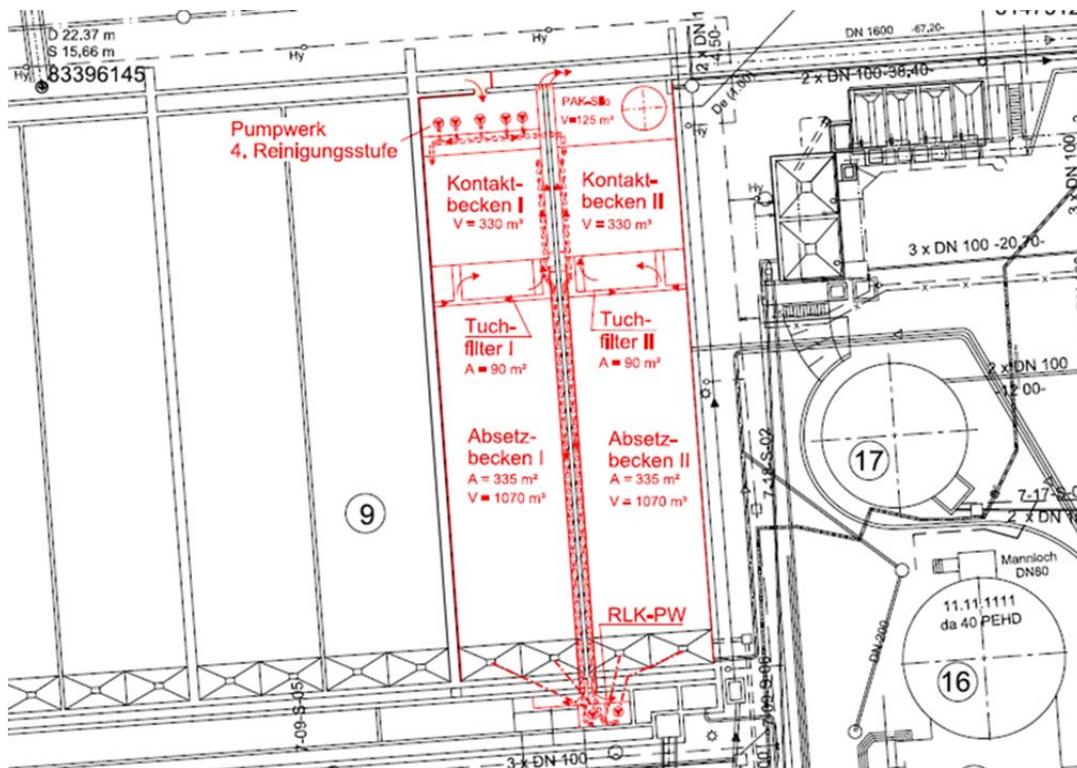


Bild 20: Lageplanausschnitt Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle

8.4.2 Variante 2: Filtration über granulierte Aktivkohle

8.4.2.1 Allgemeines

Der ausgewählte Teilstrom (Ablauf Nachklärung) von maximal 1.200 m³/h wird über Aktivkohlefilter geführt.

Die Filterstufe wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

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

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Filter:	6 Stück
Bethöhe GAK:	2,5 m
Leerbettkontaktzeit (EBCT):	30 min
Filterfläche gesamt:	240 m ²

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.

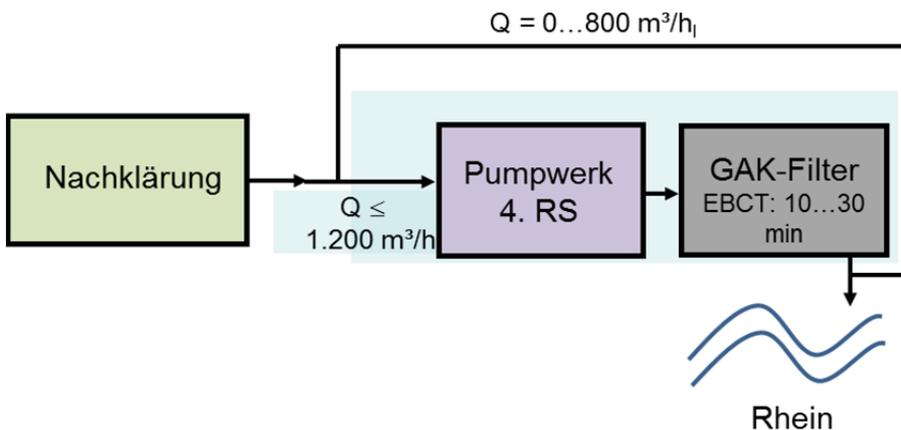


Bild 21: Blockschema Variante 2: GAK-Filtration

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 Adsorption 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** und das Fließschema **Blatt 6** der Planunterlagen dar. Ein Filterblock mit sechs Filterkammern, der die komplette Breite des bestehenden Doppelbeckens einnimmt, wird in das Spitzenausgleichsbecken eingesetzt. Im hinteren Bereich sind das Pumpwerk sowie der Spülabwasserspeicher und der Spülwasserspeicher mit der Verbindung zum Ablaufgerinne untergebracht. Der Bereich des Beckens vor dem Filterblock wird für die 4. Reinigungsstufe nicht benötigt und wird verfüllt.

Pumpwerk 4. Reinigungsstufe

Die Beschickung der Aktivkohlefiltration erfolgt – wie auch bei den vorhergehenden Varianten – über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das direkt am Ablaufkanal der Kläranlage angeordnet ist. Die Vorlage wird direkt über eine Öffnung im Ablaufgerinne gespeist. Insgesamt stehen fünf drehzahlge-regelte Pumpen mit einem Volumenstrom von je 300 m³/h zur Verfügung. Eine Pumpe ist als Reserve vorgesehen. Die Pumpen heben den Teilstrom auf das Niveau in der Zulaufrinne der Filter.

Filterblock

Der Filterblock besteht aus sechs abwärtsdurchströmten offenen Filtern. Jede Filterkammer weist eine Fläche von 40 m² auf. Die Abmessungen einer Filterkammer liegen bei einer Breite von 5,0 m und einer Länge von 8 m.

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

Spülwasserspeicher

Das Filtrat der Adsorptionsstufe wird in einer Spülwasservorlage mit 200 m³ Inhalt gespeichert. Der Überlauf des Spülwasserspeichers wird wieder in das Ablaufgerinne der Kläranlage zurückgeführt. Für die Rückspülung der Filter stehen zwei Rückspülpumpen zur Verfügung.

Spülabwasserspeicher

Das bei der anfallenden Rückspülung anfallende Spülabwasser wird zwischengespeichert und über eine Pumpe dosiert dem Zulauf der Kläranlage zugeführt.

Abdachung Aggregate-Raum

Der Raum zwischen Pumpwerk 4. Reinigungsstufe und Filterblock nimmt die trocken aufgestellten Pumpen, das Spülluftgebläse sowie die Schaltanlage auf. Der Raum wird mit einem Dach als Witterungsschutz versehen.

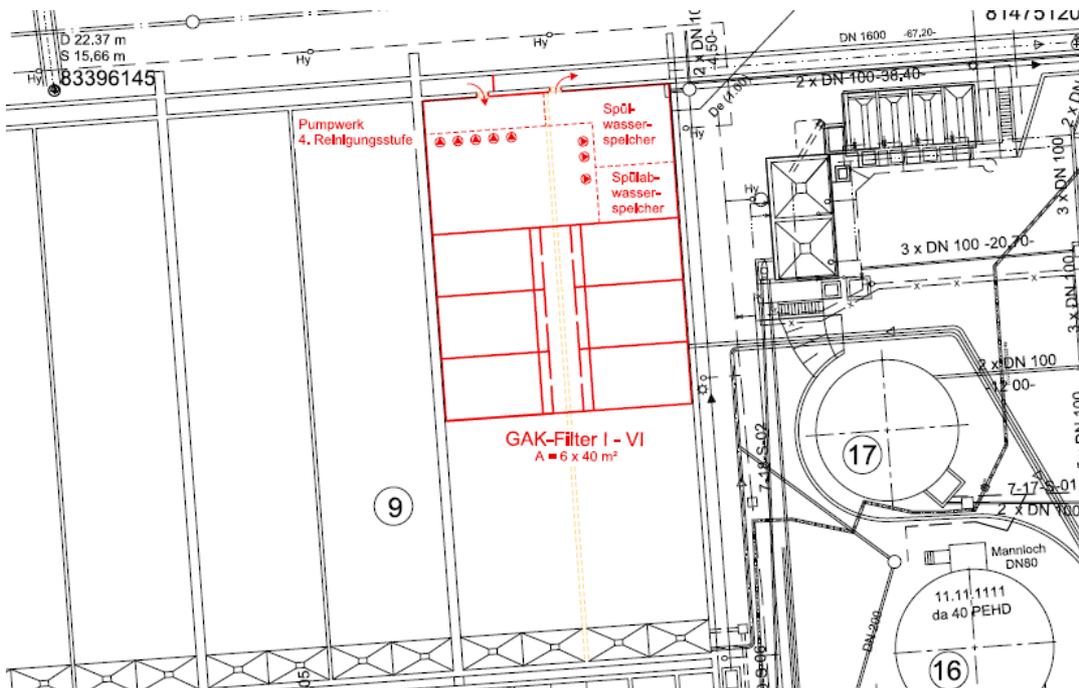


Bild 22: Lageplanausschnitt Variante 2: GAK-Filtration

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/m³

Kontaktzeit im Reaktionsbehälter: 10...30 min

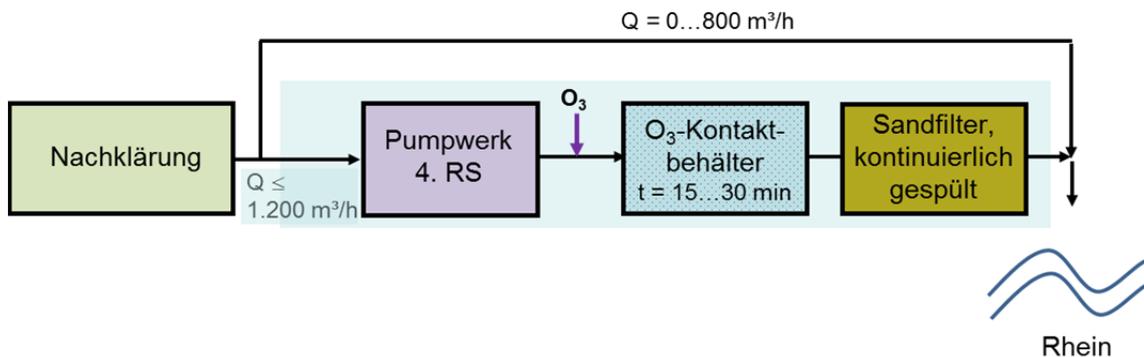


Bild 23: Blockschema Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Filter

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 24,3 mg/l (Betriebsdaten 2012) 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 8,1 mg/l. Die großtechnischen Versuche in Regensdorf (Abegglen u. a. 2009) kamen zu dem Ergebnis, dass eine Dosis von 0,62 mg O₃/mg DOC hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Wirkung ein Optimum darstellte. Dieser Wert wurde hier übernommen. Damit ergibt sich die mittlere Ozondosis zu:

$$c_{O_3,a} = 8,1 \text{ mg DOC / l} \cdot 0,62 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC} = 5,02 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

Um eine gewisse Sicherheit gegenüber weiteren Einflüssen zu berücksichtigen wird in der weiteren Auslegung eine mittleren 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** und das Fließschema **Blatt 7** der Planunterlagen dar. Die gesamte Stufe wird in der linken Beckenhälfte des Spitzenausgleichsbeckens untergebracht. So kann die rechte Seite bei Bedarf wieder als Ausgleichsbecken genutzt werden.

Die Anlagenteile gliedern sich von hinten (Ablaufseite) nach vorne in Pumpwerk, Sandfilter, Ozon-Kontaktbecken sowie Ozonanlage und Flüssig-Sauerstoffanlage im aufgefüllten vorderen Beckenbereich.

Die Ozonung mit Ozonerzeuger und Kontaktbecken ist 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 über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das direkt am Ablaufkanal der Kläranlage angeordnet ist. Die Vorlage wird direkt über eine Öffnung im Ablaufgerinne gespeist. Insgesamt stehen fünf drehzahlgeregelte Tauchmotorpumpen mit einem Volumenstrom von je 300 m³/h zur Verfügung. Diese Variante ist – ähnlich Variante 2 – zweistraßig ausgeführt; daher werden jeder Straße (Kontaktbecken) zwei Pumpen zugeordnet. Die fünfte Pumpe dient als Reserve für beide Straßen.

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 getrennt über Rohrleitungen an das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe angebunden. Der Ablauf der Behälter wird über ein Gerinne in die anschließende Filtration geführt.

Ozonerzeugung

Die Ozonerzeuger weisen eine Leistung von 2 x 6.000 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 in Containern untergebracht. Die Sauerstoff-Tankanlage wird ebenfalls auf dem angefüllten Bereich angeordnet.

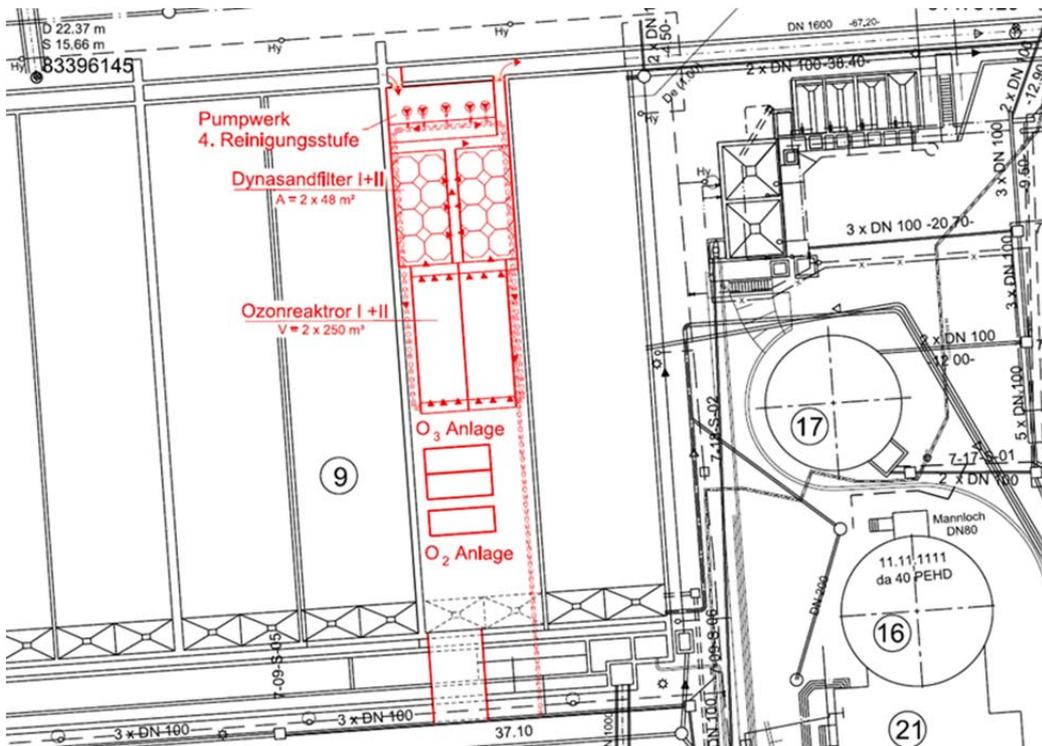


Bild 24: Lageplanausschnitt Variante 3: Ozonung mit nachgeschaltetem Sandfilter

Sandfilter (kontinuierlich gespült)

Als Nachreaktor wird ein kontinuierlich arbeitender Sandfilter (Dyna-Sandfilter) eingesetzt. Das Sandbett im Filter wird von unten nach oben durchströmt. Die im Abwasser enthaltene Suspensa werden im Sand zurückgehalten. Über eine Mammutpumpe wird der verunreinigte Sand aus dem Filterbett von unten nach oben transportiert. In einem Sandwäscher wird dieser Sand mit Filtrat gereinigt. Der gereinigte Sand fällt auf das Filterbett zurück. Das anfallende Schlammwasser aus dem Sandwäscher fließt über den Waschwasserablauf ab. Für den Betrieb der Mammutpumpe ist eine Druckluftversorgung (Kompressor) notwendig. Rückspülpumpen werden nicht benötigt. Siehe **Bild 25**.

Es sind insgesamt 16 Filter aufgeteilt auf zwei Straßen vorgesehen. Jeder Filter weist eine Filterfläche von 6 m² auf, sodass sich eine GesamtfILTERfläche von 96 m² ergibt.

Jeweils 8 Filter werden in ein Betonbecken eingebaut. Der Zulauf auf die einzelnen Filterstraßen erfolgt über Gerinne. Jede Straße kann über ein Schütz abgeschiebert werden.

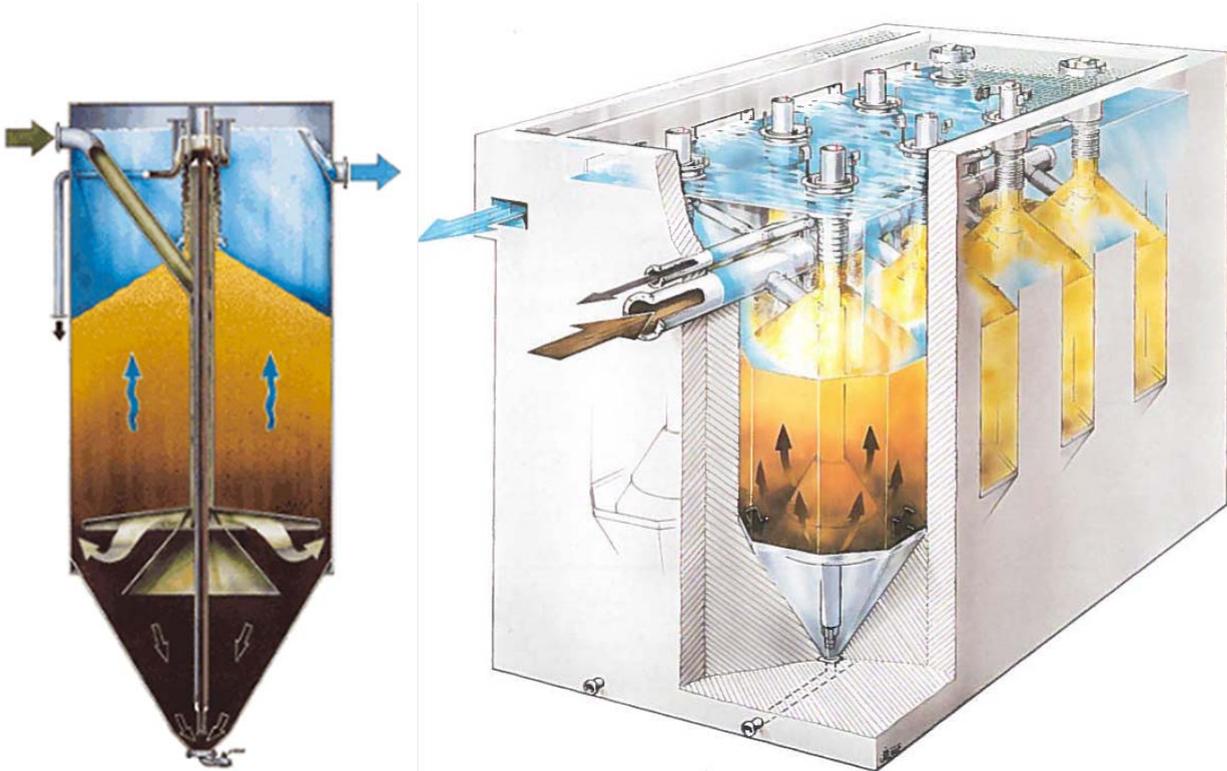


Bild 25: Dyna-Sandfilter: links: Prinzipdarstellung, rechts: Anordnung im Betonbecken (Quelle: Nordic-Water)

8.4.4 Variante 4: Ozonung mit nachgeschaltetem biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter

8.4.4.1 Allgemeines

Dieses Verfahren ist eine Kombination der Varianten 2 (GAK-Filtration) und 3 (Ozonung). Das Abwasser wird zunächst mit Ozon behandelt und anschließend über einen Aktivkohlefilter geführt. Im Unterschied zur reinen GAK-Filtration verbleibt das Filtermaterial sehr lange im Filter. In der Berechnung wird von einer Standzeit von 5 a ausgegangen. Ziel ist es, dass im Filter neben der Adsorption vor allem ein biologischer Abbau stattfindet. Neben den Spurenstoffen sollen auch biologisch abbaubare Rest-Organika (BDOC) hier eliminiert werden. In der Trinkwasseraufbereitung findet dieses Verfahrenskonzept seit den 1970er-Jahren schon Anwendung. In diesem Zusammenhang wird von einem biologisch aktivierten Aktivkohlefilter (BAK) gesprochen.

Im nachfolgenden Blockschema ist das Verfahren dargestellt:

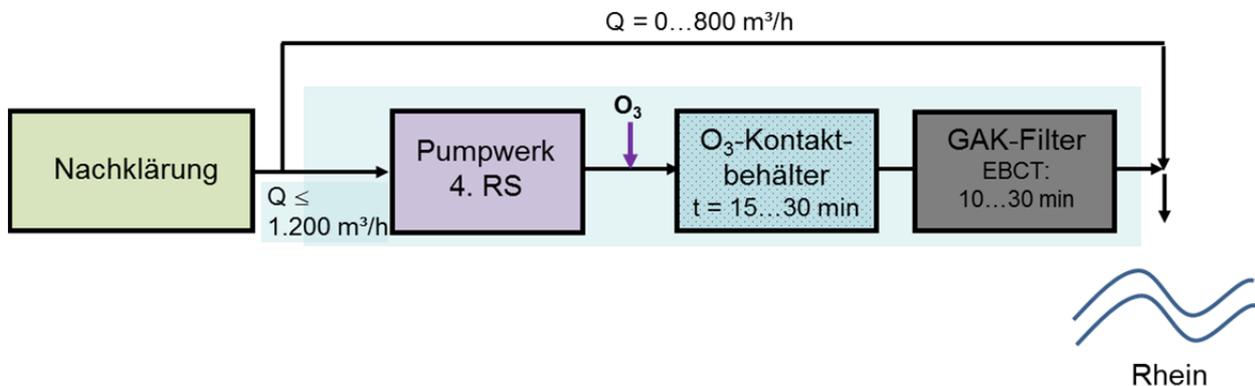


Bild 26: Blockschema Variante 4: Ozonung mit BAK

Die Auslegung der Ozonung und der Kontaktbehälter folgt Variante 3.

Die mittlere Ozondosis wurde analog zur Variante 3 gewählt. Es ist davon auszugehen, dass hier noch eine deutliche Optimierung erfolgen kann. Jedoch liegen hierzu noch keine belastbaren Ergebnisse vor.

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

Die GAK-Filtration entspricht in ihrer Auslegung der Variante 2:

8.4.4.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 4** und das Fließschema **Blatt 8** der Planunterlagen dar. Die Ausführung entspricht der Variante 2 (GAK-Filtration), jedoch werden zwischen dem Filterblock und dem Aggregate-Raum die beiden Kontaktbehälter für die Ozonung platziert. Die Ozonanlage wird über dem Aggregate-Raum platziert.

Die Ozonung mit Ozonerzeuger und Kontaktbecken ist wieder 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 über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe, das direkt am Ablaufkanal der Kläranlage angeordnet ist. Die Vorlage wird direkt über eine Öffnung im Ablaufgerinne gespeist. Insgesamt stehen fünf drehzahlregelte Pumpen mit einem Volumenstrom von je 300 m³/h zur Verfügung. Diese Variante ist – ähnlich Variante 3 – zweistraßig ausgeführt; daher werden jeder Straße (Kontaktbecken) zwei Pumpen zugeordnet. Die fünfte Pumpe dient als Reserve für beide Straßen. Der jeweilige Teilstrom wird über Rohrleitungen in den Zulauf der beiden Kontaktbehälter gefördert.

Kontaktbehälter

Die beiden Kontaktbehälterstraßen werden als Betonbauwerk ausgeführt. Gegenüber der Variante 3 sind sie um 90° gedreht. Der sonstige Aufbau entspricht Variante 3.

Die Restozonvernichtung erfolgt wiederum thermisch/katalytisch.

Die beiden Behälter werden getrennt über Rohrleitungen an das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe angebunden. Der Ablauf der Behälter wird über ein Gerinne in die anschließende Filtration geführt.

Ozonerzeugung

Die Ozonerzeuger weisen ebenfalls eine Leistung von 2 x 6.000 g/h auf. Die sonstige Ausführung entspricht Variante 3.

Die Erzeuger werden mit der zugehörigen Schaltanlage in Containern über dem Aggregate-Raum angeordnet. Die Sauerstoff-Tankanlage wird hier auch angeordnet.

Filterblock

Der Filterblock besteht aus sechs abwärtsdurchströmten offenen Filtern. Jede Filterkammer weist eine Fläche von 40 m² auf. Die Abmessungen einer Filterkammer liegen bei einer Breite von 5,0 m und einer Länge von 8 m.

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

Die Ausführung entspricht der Variante 2.

Spülwasserspeicher

Das Filtrat der Adsorptionsstufe wird in einer Spülwasservorlage mit 200 m³ Inhalt gespeichert. Der Überlauf des Spülwasserspeichers wird wieder in das Ablaufgerinne der Kläranlage zurückgeführt. Für die Rückspülung der Filter stehen zwei Rückspülpumpen zur Verfügung.

Spülabwasserspeicher

Das bei der anfallenden Rückspülung anfallende Spülabwasser wird zwischengespeichert und über eine Pumpe dosiert dem Zulauf der Kläranlage zugeführt.

Abdachung Aggregate-Raum

Im Gegensatz zur Variante 2 wird der Aggregate-Raum mit einer Betondecke versehen, auf der die Ozon- sowie die Flüssigsauerstoff-Tankanlage angeordnet werden.

Der darunterliegende Raum zwischen Pumpwerk 4. Reinigungsstufe und Filterblock nimmt – wie bei Variante 2 – die trocken aufgestellten Pumpen, das Spülluftgebläse sowie die Schaltanlage auf.

8.5 Ergebnisübersicht Varianten

	Variante 1 Pulverkohle mit Rücklaufkohle	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozon mit nachges. Filtration	Variante 4 Ozonung + BAK-Filtration
Anlagenkomponenten				
	<p>PW 4. RS $Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Kontaktbecken (2-straßig): 1 Stück je Straße: $t_A = 30 \text{ min}$, jeweils 330 m^3</p> <p>Absetzbecken(2-straßig): 1 Stück je Straße: $l_i=32,5 \text{ m}$ $b_i=10,3 \text{ m}$ $h_{Rand}=3,2 \text{ m}$; $A_{ges} = 670 \text{ m}^2$, $V_{ges} = 2.144 \text{ m}^3$</p> <p>Tuchfiltration (2-straßig): 1 Stück je Straße: $A_{F,ges} = 180 \text{ m}^2$</p> <p>PAK-Silo: $V = 125 \text{ m}^3$</p> <p>Flockungsmittel Flockungshilfsmitteldosierung</p>	<p>PW 4. RS $Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>GAK-Filtration: 6 Filter, $B \times L = 5,0 \times 8,0 \text{ m}$ $A = 240 \text{ m}^2$, $H_{FB} = 2,5 \text{ m}$, $V = 600 \text{ m}^3$</p>	<p>PW 4. RS $Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Flüssigsauerstoff: Tankanlage und Verdampfer</p> <p>Ozonerezeuger: $12 \text{ kg O}_3/\text{h}$</p> <p>Reaktionsbehälter: 2 Straßen, je $L = 11,0$; $B = 3,8 \text{ m}$; $V = 251 \text{ m}^3$</p> <p>Sand-Filtration (kont. gespült): 2 Straßen je 8 Filter mit $A_F = 6 \text{ m}^2$ $A_{F,ges} = 96 \text{ m}^2$</p>	<p>PW 4. RS $Q = 1.200 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Flüssigsauerstoff: Tankanlage und Verdampfer</p> <p>Ozonerezeuger: $12 \text{ kg O}_3/\text{h}$</p> <p>Reaktionsbehälter: 2 Straßen, je $L = 11,0$; $B = 3,8 \text{ m}$; $V = 251 \text{ m}^3$</p> <p>GAK-Filtration: 6 Filter, $B \times L = 5,0 \times 8,0 \text{ m}$ $A = 240 \text{ m}^2$, $H_{FB} = 2,5 \text{ m}$, $V = 600 \text{ m}^3$</p>

	Variante 1 Pulverkohle mit Rücklaufkohle	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozon mit nachges. Filtration	Variante 4 Ozonung + BAK-Filtration
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> keine Bildung von Reaktionsprodukten Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig sehr guter Suspensarückhalt im AB und durch Filtration sehr gute Reduzierung P_{ges} und CSB Mehrfachbeladung der PAK 	<ul style="list-style-type: none"> keine Bildung von Reaktionsprodukten Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig sicherer und einfacher Betrieb Suspensarückhalt durch Filtration 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr gut in Baufeld integrierbar Suspensarückhalt durch Filtration Optimierungspotential bei Ozondosis zu erwarten 	<ul style="list-style-type: none"> Komplexe Wirkung → Forschungsbedarf Suspensarückhalt durch Filtration minimierte Bildung von Reaktionsprodukten biologische Mitwirkung im GAK-Filter → biologisch aktivierter GAK-Filter = BAK Optimierungspotenzial bei Ozondosis gegenüber V3 möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> höherer Schlammanfall als bei den anderen Varianten betreuungsintensiv, da Dosierung von PAK, FHM und FM 	<ul style="list-style-type: none"> GAK-Austausch Hoher Kohlebedarf im Vergleich zu anderen Varianten 	<ul style="list-style-type: none"> Reaktionsmechanismen und -produkte sind teilweise unbekannt Wartung erfordert geschultes Personal oder externes Personal hohe Sicherheitsanforderungen an den Arbeitsschutz, da Ozon toxisch ist und als Reizstoff wirkt hoher Energiebedarf 	<ul style="list-style-type: none"> derzeit noch keine breite Referenzbasis vorhanden Investitionskosten hoch, da Bau von 2 Stufen (Ozonung + GAK-Filtration)

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 mit Sandfilter	Variante 4 Ozon mit BAK
1	Bautechnik	EUR	1.167.353,00	911.022,20	758.659,00	1.237.821,20
2	Maschinenteknik	EUR	1.464.561,00	1.018.668,00	1.277.934,00	1.735.398,00
3	EMSR-Technik	EUR	431.000,00	510.000,00	512.000,00	868.000,00
Summe Herstellungskosten, netto		EUR	3.062.914,00	2.439.690,20	2.548.593,00	3.841.219,20
Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.)		EUR	612.582,80	487.938,04	509.718,60	768.243,84
Summe Baukosten, netto		EUR	3.675.496,80	2.927.628,24	3.058.311,60	4.609.463,04
Mehrwertsteuer		EUR	581.953,66	463.541,14	484.232,67	729.831,65
Summe Baukosten, brutto		EUR	4.257.450,46	3.391.169,38	3.542.544,27	5.339.294,69
Anteil			126%	100%	104%	157%

Die Investitionskosten sind für Variante 2 (GAK-Filtration) am günstigsten. Gefolgt von der Variante 3 (Ozonung mit Sandfiltration). Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) nimmt den dritten Rang ein. Am teuersten ist Variante 4 (Ozon mit biologisch aktiviertem Filter). Dies ist damit zu erklären, dass diese Variante eine Kombination aus den Varianten 2 und 3 darstellt.

9.3 Betriebskosten

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

Strombezugskosten 0,1583 EUR/kWh, netto
 Verbrennung Schlamm 43,25 EUR/Mg Schlamm (Originalsubstanz)
 Entwässerungsgrad: 22 %
 → 43,25/0,22 = 197 EUR/MG TS, 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

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 kg/m³ 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 kg/m³ (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/m³ Frischkohle, netto. Schröder und Grömping (2013) geben Werte zwischen 425 und 550 EUR/m³, netto für Frischkohle an. Mit einem Preis von 515 EUR/m³ 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. In der Summe ist jedoch keine zusätzliche Menge notwendig, da die Dosierung der Fällmittel von der Belebung (Simultanfällung) in die Adsorptionsstufe verlagert wird. Insgesamt ergeben sich damit keine erhöhten Kosten für den Einsatz von Me-Salzen als Fäll- und Flockungsmittel. Wie die Anlage in Sinfeldingen zeigt, ist 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.

Bei den Varianten 2 bis 4 ist durch die Filtration mit einem erhöhten Rückhalt an abfiltrierbaren Stoffen zu rechnen, die wiederum den Schlammanfall auf der Anlage erhöhen. Für die Kostenberechnung wurde ein zusätzlicher Rückhalt von 5 mg AFS/l behandeltem Abwasser in Ansatz gebracht.

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.

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/a, netto.

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
Maschinentechnik:	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 Schlammmentwässerungs- 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 + SF	Variante 4 Ozonung + BAK
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	134.651,16	112.068,33	122.732,74	158.984,96
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	171.324,32	384.819,22	200.315,99	227.864,06
Summe Betriebskosten, netto		EUR/a	305.975,49	496.887,55	323.048,73	386.849,02
	Mehrwertsteuer: 19%	EUR/a	58.135,34	94.408,64	61.379,26	73.501,31
Summe Betriebskosten, brutto		EUR/a	364.110,83	591.296,19	384.427,99	460.350,34
Anteil			100%	162%	106%	126%

Die Betriebskosten liegen für die Varianten 1 und 3 auf einem vergleichbaren Niveau von rund 364.000...384.000 EUR/a, brutto. Es folgt Variante 4 mit 460.000 EUR/a, brutto. Die Betriebskosten für die GAK-Filtration sind mit ca. 591.000 EUR/a, brutto am höchsten.

9.4 Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden anhand folgender Vorgaben berechnet:

Betrachtungszeitraum	30 a
Nutzungsdauer Bautechnik	30 a
Nutzungsdauer Maschinentechnik	15 a
Nutzungsdauer E-/MSR-Technik	15 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

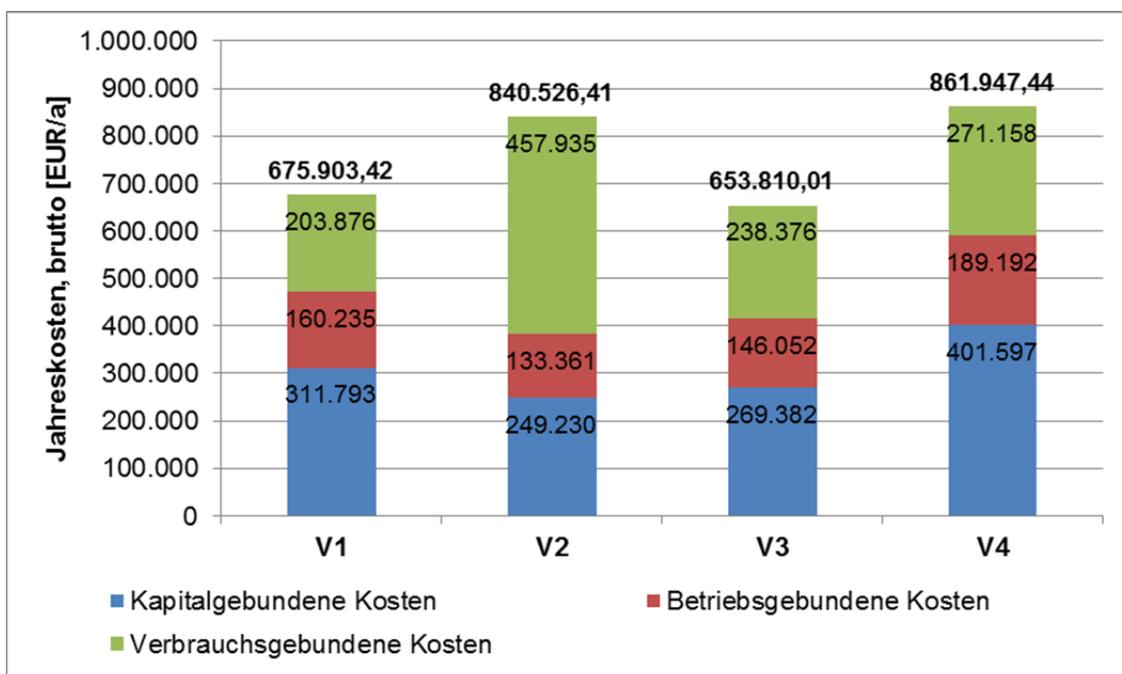
Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 GAK-Filtration	Variante 3 Ozonung + SF	Variante 4 Ozonung + BAK
A	Kapitalgebundene Kosten	EUR/a	262.010,58	209.437,16	226.371,44	337.476,56
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	134.651,16	112.068,33	122.732,74	158.984,96
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	171.324,32	384.819,22	200.315,99	227.864,06
Summe Jahreskosten, netto		EUR/a	567.986,07	706.324,72	549.420,18	724.325,58
Mehrwertsteuer: 19%		EUR/a	107.917,35	134.201,70	104.389,83	137.621,86
Summe Jahreskosten, brutto		EUR/a	675.903,42	840.526,41	653.810,01	861.947,44
Anteil			103%	129%	100%	132%

Abwassermenge (100%)	m³/a	5.848.275
Teilstrommenge (90%)	m³/a	5.269.026

spez. Kosten, netto	EUR/m³	0,10780	0,13405	0,10427	0,13747
spez. Kosten, brutto	EUR/m³	0,12828	0,15952	0,12409	0,16359

Die günstigsten Jahreskosten wurden für die Variante 1 (PAK) und Variante 3 (Ozonung mit Sandfilter) mit ca. 654.000 bis 676.000 EUR/a, brutto ermittelt. Die Varianten 2 (GAK-Filtration) und 4 (Ozonung mit BAK) liegen mit 833.000 EUR/a, brutto bzw. 852.000 EUR/a, brutto auf einem vergleichbaren Niveau.

Die errechneten spezifischen Behandlungskosten beziehen sich auf das im Teilstrom behandelte Abwasservolumen. Zusätzlich ist in der Tabelle neben der Jahresteilstrom noch Gesamtmenge (100%) angegeben. Die Mengen beruhen auf der in Kapitel 8.1 beschriebenen Auswertung der Mengemessung im Ablauf der Kläranlage.

**Bild 28: 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 0,19 EUR/kWh, netto (0,23 EUR/kWh, brutto),
- Steigerung Bezugskosten für Aktivkohle (PAK bzw. GAK) und Flüssigsauerstoff um 10 %,
- Reduzierung Dosierung Pulverkohle und Ozon um 20 %,
- Erhöhung Filterstandzeit GAK Filter um 20 % (Bettvolumen).

Die Steigerung des Bezugspreises für elektrische Energie um 20 % führt auch bei den energieintensiven Varianten 3 und 4 (Ozonung) zu einer Steigerung der Betriebskosten von rund 6,6 bzw. 4,9 % bzw. 22.600 EUR/a, brutto bis 25.400 EUR/a, brutto. Bei den Aktivkohlevarianten liegen die Kostensteigerungen zwischen 8.300 EUR/a, brutto und 10.500 EUR/a, brutto. Dies entspricht einer Steigerung von 1,4 % (V2) bzw. 2,8 % (V1). Bei Variante 3 (GAK) ist die Steigerung mit 8.300 EUR/a, brutto am geringsten. Bezogen auf die Jahreskosten beträgt die Steigerung 1,0 % bis 1,6 % bei den Varianten 1 und 2 bzw. 2,6 % und 3,9 % bei den Varianten 3 und 4 (Ozonung).

Die Steigerung der Bezugskosten um 10 % für die Aktivkohlen und den Flüssigsauerstoff steigert die Betriebskosten der GAK-Filtration um 40.800 EUR/a, brutto. Die Preissteigerung hat bei den Varianten 1 (PAK mit Rücklaufkohle) und 3 (Ozonung mit Sandfilter) mit rund 10.000 EUR/a, brutto weniger Einfluss. Variante 4 (Ozon + BAK) liegt mit 15.000 EUR/a, brutto etwas darüber. Bei den Betriebskosten ergibt sich so eine Steigerung von 6,9 % bei Variante 2 (GAK-Filtration) sowie 2,6 % bis 3,2 % bei den Varianten 1, 3 und 4. Bezieht man die Veränderung auf die Jahreskosten, so ergeben sich nachstehende Werte: 4,8 % bei Variante 2 sowie rund 1,6 % bei den Varianten 1, 3 und 4.

Die Veränderung der Dosiermengen um etwa 20 % hat erhebliche Einflüsse auf die Betriebskosten. Bei Variante 3 (GAK-Filtration) würden durch die Erhöhung der durchgesetzten Bettvolumina von 8.000 auf 9.600 die Betriebskosten um ca. 68.000 EUR/a, brutto (-11,5 %) sinken. Bei der Variante 1 (PAK) würden sich Einsparungen von rund 29.400 EUR/a, brutto (-8,1 %) ergeben. Die Reduzierung der Ozondosierung von 7 mg/l auf 5,8 mg/l verringert die Betriebskosten der Varianten 3 und 4 um rund 33.600 EUR/a, brutto (-7,4 bis -8,7 %).

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 den Ozon-Verfahren ist die Auswirkung geringer. Die Variante 3 (GAK-Filtration) zeigt eine sehr starke Abhängigkeit bei Veränderungen der durchgesetzten Bettvolumina und bei Kostensteigerungen. Dieses Verfahren weist immer die höchsten Betriebskosten auf. Relativ stabil in Bezug auf die angenommenen Kostensteigerungen verhält sich die Ozonung, obwohl sie den höchsten Energieverbrauch aufweist.

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 Ozon-Varianten können Reduzierung der Dosierungen erwartet werden.

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.

Tabelle 4: Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 4

Kriterium	Wichtung	Wertung							
		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		PAK m. Rücklaufk. Punkte	gewichtet	GAK-Filtration Punkte	gewichtet	Ozonung + Sandfilter Punkte	gewichtet	Ozonung + BAK Punkte	gewichtet
Jahreskosten	0,40	4	1,6	2	0,8	4	1,6	2	0,8
Reinigungsleistung P_{ges} /CSB (zusätz. Reduk.)	0,16	5	0,8	4	0,64	3	0,48	4	0,64
Bildung Nebenprodukte	0,06	5	0,3	5	0,3	4	0,24	4	0,24
Erfahrungen/Referenzen	0,06	5	0,3	4	0,24	4	0,24	3	0,18
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,06	3	0,18	5	0,3	4	0,24	4	0,24
Betriebssicherheit	0,06	4	0,24	5	0,3	4	0,24	4	0,24
Sensitivität Kostensteigerungen	0,14	3	0,42	2	0,28	3	0,42	3	0,42
CO ₂ -Bilanz	0,06	4	0,24	4	0,24	4	0,24	4	0,24
Summe	1,00	33	4,08	31	3,10	30	3,70	28	3,00

Wertung nach Punkten
(steigende Punkte → bessere Wertung)

1 = ungenügend
5 = sehr gut

Die **Jahreskosten** werden mit einer Wichtung von 40 % als wichtigstes Entscheidungskriterium eingestuft. Wie schon im **Kapitel 9.4** dargelegt, sind die Jahreskosten bei Variante 1 (PAK-Dosierung) und 3 (Ozonung + Sandfilter) 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 P_{ges}** und **CSB** wurde in Wesel mit 16 % gewichtet. Sehr gute Ergebnisse hat hier die Variante 1 (PAK mit RLK) in Sindelfingen für P_{ges} erzielt. Bei den Varianten 2 und 4 wird eine Reduktion des CSB (DOC) erwartet. Bei der GAK-Filtration in erster Linie durch Adsorption und bei Variante 4 durch die biologische Wirkung des Aktivkohlefilters. Beide Varianten erhalten hier vier Punkte. Bei Variante 3 (Ozonung mit Sandfilter) sind die zu erwartenden Effekte geringer. Daher werden drei Punkte vergeben.

Bei den Varianten 2 bis 4 ist kein großer Einfluss auf die P_{ges} -Konzentration zu erwarten. Daher erhält allein Variante 1 fünf Punkte in diesem Kriterium.

Die Reinigungsleistung in Bezug auf die Spurenstoffe wird für alle Varianten gleich eingestuft, daher wird sie als Kriterium hier nicht herangezogen. Der Einsatz der Betriebsmittel wurde so gewählt, dass alle Varianten eine vergleichbare Elimination erzielen.

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 Regensburg 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 vorgestellten Variante. Um der besonderen Bedeutung dieses Punktes Rechnung zu tragen, wurde die Ozonvarianten (V3 und 4) 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 1.000 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 Ozon mit nachgeschaltetem Aktivkohlefilter liegen bislang keine Erfahrungen im technischen Maßstab in der Abwasserbehandlung vor. Dies führt zu einer Bewertung mit drei Punkten.

Der **Betriebs- und Wartungsaufwand** ist für den Betrieb der Kläranlage ein wichtiger Punkt. Hier wurde die GAK-Filtration mit fünf Punkten am besten bewertet. Vier Punkte wurden an die Varianten 3 und 4 vergeben. Die Ozonung stellt aufgrund der Komplexität der Erzeugungsanlage schon einen besonderen Betriebspunkt auf der Kläranlage dar. Die Variante 1 (Pulveraktivkohledosierung) wurde mit drei Punkten schlechter eingestuft. Der Betriebsaufwand ist größer als bei der GAK-Filtration und der Ozonung. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Dosierung von Pulveraktivkohle mit hoher Genauigkeit und vertretbarem Betriebsaufwand erfolgen kann.

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 ist. Die Auswirkungen auf weitere Anlagenteile werden in die Beurteilung einbezogen. Die höchste Betriebssicherheit weist die GAK-Filtration auf. Die Anlage mit sechs Filterkammern ist sehr stabil zu betreiben. 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. Des Weiteren ist die Stufe komplett zweistraßig ausgeführt, was die Betriebssicherheit erhöht. Die Varianten 3 und 4 (Ozonung) werden ebenfalls mit vier Punkten bewertet. Die Ozonung ist in diesen Varianten auch zweistraßig ausgeführt.

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 drei Punkten bewertet. Die Ozonung-Varianten folgen. Sie erhalten ebenfalls drei Punkte. Die GAK-Filtration (Variante 2) reagiert am empfindlichsten auf Kostensteigerungen. Daher werden hier zwei Punkte vergeben.

In letzter Zeit ist die **Nachhaltigkeit (CO₂-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 Verfahren mit vier Punkten bewertet.

In der **Summe** schneidet Variante 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) mit 4,08 Punkten am besten ab. Gefolgt von Variante 3 (Ozonung mit Sandfilter) mit 3,70 Punkten. Die Variante 2 (GAK-Filtration) und Variante 4 (Ozonung mit BAK-Filtration) liegen 3,08 Punkte bzw. 3,00 Punkte auf einem vergleichbaren Niveau.

11 Zusammenfassung

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

Variante 1: Pulverkohledosierung mit Rücklaufkohle,

Variante 2: GAK-Filtration,

Variante 3: Ozonung mit Sandfilter,

Variante 4: Ozonung mit biologisch aktiviertem GAK-Filter (BAK).

Die ausgewählten Varianten wurden auf ihre Umsetzbarkeit geprüft und zeichnerisch in Lageplanausschnitten sowie in einem Fließbild 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. Maximal konnte eine Punktzahl von 5 Punkten erreicht werden.

Die höchste Punktzahl erreicht Variante 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle) mit 4,08 Punkten; die Ozonung mit Sandfilter (Variante 2) kommt auf den zweiten Platz, mit 3,70 Punkten. Die Varianten 3 (GAK-Filtration) und 4 (Ozonung mit BAK) liegen mit 3,10 bzw. 3,00 Punkten auf dem dritten bzw. vierten Platz.

Bei den Jahreskosten liegt Variante 3 (Ozonung + Sandfilter) mit 654.000 EUR/a, brutto vorn. Aufgrund der geringen verbrauchsgebundenen Kosten folgt Variante 1 (PAK-Dosierung) dicht mit 676.000 EUR/a, brutto. Die Varianten 2 (GAK-Filtration) und 4 (Ozon + BAK) liegen mit 841.000 EUR/a, brutto bzw. 862.000 EUR/a, brutto etwa auf einem vergleichbaren Niveau.

Allen Verfahren können gut auf der KA Wesel umgesetzt werden. Der zur Verfügung stehende Bauplatz im ehemaligen Spitzenausgleichsbecken ist ausreichend. Bei Variante 3 kann eine Beckenhälfte sogar als Ausgleichsbecken wieder hergerichtet werden. Durch den direkten Zugang vom Baufeld zum Ablauf der Kläranlage kann die 4. Reinigungsstufe ohne aufwendige Rohrleitungsführung an den Bestand angebunden werden. Bei allen Varianten ist eine Filtration vorgesehen, die auch im Teilstrom suspendiert gelöste Abwasserinhaltsstoffe reduziert. Damit ist eine leichte Erhöhung der Schlammmenge bei allen Verfahren zu erwarten.

Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) lag in der Bewertungsmatrix auf dem ersten Rang. Sie stellt das derzeit verbreitetste Verfahren zur Spurenstoffelimination dar (in Baden-Württemberg derzeit sieben Anlagen in Betrieb, weitere in Planung und Bau). Das Verfahren nimmt den kompletten zur Verfügung stehenden Bauplatz auf der KA Wesel ein.

Neben der Pulverkohle wird in diesem Verfahren noch Flockungs- und Flockungshilfsmittel dosiert. Auf der einen Seite führt dies zu einem erhöhten Betriebsaufwand; auf der anderen Seite kann damit auch direkt auf eine Veränderung der Rohwasserbeschaffenheit bzw. der Ablaufziele reagiert werden. Die Erfahrungen aus Baden-Württemberg zeigen, dass ein sehr sicherer Betrieb möglich ist.

Durch die Rückführung der Aktivkohle ist eine sehr gute Nutzung der Adsorptionskapazität der Kohle gegeben. Dadurch reduziert sich insgesamt der benötigte Kohlebedarf. Das Verfahren reagiert damit auf Preisschwankungen bei der Aktivkohle weniger sensitiv.

Das Verfahren führt neben der Spurenstoffelimination noch zu einer deutlichen Reduzierung bei den Parametern CSB und P_{ges} . Gegenüber den anderen Verfahren ist der Einfluss hier höher zu bewerten.

Bei der PAK-Dosierung ist der zusätzliche Schlammanfall im Vergleich zu den anderen Verfahren erhöht. Der Schlamm enthält neben der Kohle noch Fällprodukte und Organik.

Der Energiebedarf liegt im Vergleich zu den Ozonverfahren auf einem unteren Niveau.

Die Ozonung mit Sandfilter (Variante 3) lag in der Bewertungsmatrix auf dem zweiten Platz. Die Jahreskosten dieses Verfahrens sind stark von der angewandten Ozondosis abhängig. In der Berechnung wurde derzeit von einer vergleichsweise hohen Dosis ausgegangen. Sollte sich zeigen, dass diese reduziert werden kann, so wird dieses Verfahren wirtschaftlich interessant. Die weiteren Forschungsergebnisse hinsichtlich der Bildung von Transferprodukten sollten in die Entscheidungsfindung einfließen. Der Einsatz von Ozon bedingt einen hohen Energiebedarf auf der Kläranlage für die Erzeugung des Ozons. Damit reagieren die Ozonvarianten generell sensitiver auf Kostensteigerungen beim Strombezug.

Die GAK-Filtration (Variante 2) ist aufgrund der hohen verbrauchsgebundenen Kosten auf dem dritten Rang. Für dieses Verfahren spricht die hohe Betriebssicherheit. Die relativ geringe prognostizierte Standzeit der Aktivkohle im Filter führt zu den hohen Verbrauchskosten. Die GAK-Filtration ist gegenüber Kostensteigerungen bei den Verbrauchsmaterialien am anfälligsten. Der Energiebedarf liegt, wie auch bei Variante 1, auf einem niedrigen Niveau.

Die Kombination Ozonung mit biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter (Variante 4) ist technisch sehr interessant. Jedoch liegen derzeit noch keine validierten Erfahrungen im Abwasserbereich zu diesem Verfahren vor, sodass die Eliminationsleistungen nur unzureichend eingeschätzt werden können. Hinsichtlich der Investitionskosten ist nachteilig, dass in Wesel zwei Stufen (Ozonung und GAK-Filtration) gebaut werden müssen. Dieses Verfahren bietet jedoch noch ein großes Entwicklungspotenzial, das durch Forschungsprojekte begleitet werden sollte.

Bei den Varianten 2 (GAK-Filtration) und 4 (Ozonung + BAK-Filtration) ist grundsätzlich neben dem beschriebenen Einsatz von Frischkohlen bzw. reaktivierten Kohlen auch der Einsatz von vorbeladenen Kohlen aus der Trinkwasseraufbereitung möglich. Das Konzentrationsniveau der Spurenstoffe ist in der Trinkwasseraufbereitung i. d. R. niedriger als im Abwasserbereich, sodass diese Kohlen in der vierten Reinigungsstufe weiterbeladen werden könnten. Die Eignung sollte vor dem Einsatz in jedem

Fall durch Versuche bzw. eine Pilotierung untersucht werden. In Abhängigkeit von den erreichbaren Standzeiten dieser Kohlen ist dann die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes zu bewerten.

Aufgrund der vorhandenen Anlagentechnik sollten sich die weiteren Untersuchungen in Wesel auf die Varianten 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) und 2 (Ozonung mit Sandfilter) 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.

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.: Abwasserozonierung 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.

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.