

# **Klieranlage der Stadt Brühl**

## **Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen auf der Klieranlage Brühl**

### **Erläuterungsbericht**

Aufgestellt:  
Bad Honnef, im Dezember 2016  
Ingenieurbüro für Bauwesen  
Schmidt GmbH

.Ausfertigung

M.Sc. L. Kellner, Dr.-Ing. H. Schmidt

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeines und Veranlassung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Beschreibung des Betrachtungsraums .....	1
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1	Abwasserbelastung mit Mikroschadstoffen .....	5
2.1.1	Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften der Mikroschadstoffe .....	7
2.2	Gewässergüte .....	7
2.3	Auswertung der Betriebsdaten der Kläranlage Brühl.....	9
2.4	Messergebnisse des Screenings und Monitorings .....	13
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und der Technik .....</b>	<b>26</b>
3.1	Membranverfahren .....	26
3.2	Aktivkohle .....	28
3.3	Oxidation .....	34
3.3.1	Ozonung.....	34
3.3.2	Advanced Oxidation Process (AOP) .....	38
3.4	Verfahrenskombinationen.....	39
<b>4</b>	<b>Planung und Dimensionierung der Varianten der 4. Reinigungsstufe .....</b>	<b>40</b>
4.1	Variante 1a: Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration.....	42
4.2	Variante 1b: Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration.....	48
4.3	Variante 1c: Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration .....	57
4.4	Variante 2: Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern .....	64
4.5	Variante 3: Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration.....	70
<b>5</b>	<b>Verfahrensvergleich .....</b>	<b>79</b>
5.1	Betriebliche Gegenüberstellung .....	79
5.2	Gegenüberstellung der Elimination .....	79
5.3	Energetische Gegenüberstellung .....	90
5.4	Wirtschaftliche Gegenüberstellung .....	91
5.5	Gegenüberstellung des Flächenverbrauchs.....	93
5.6	Bewertung der Varianten .....	94
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>97</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Luftbild der Kläranlage Brühl [Quelle: Google Earth 2009].....	2
Abbildung 2:	Oberirdisches Einzugsgebiet des Palmersdorfer Bachs.....	3
Abbildung 3:	Gewässerstrukturkarte des Palmersdorfer Bachs (Quelle: ELWAS- WEB).....	4
Abbildung 4:	Darstellung der täglichen Zuflüsse zur Kläranlage Brühl der Jahre 2013 bis 2015 mit Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage- Intervallen.....	10
Abbildung 5:	CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung der Kläranlage Brühl .....	11
Abbildung 6:	CSB-Konzentration im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Brühl.....	11
Abbildung 7:	NO <sub>2</sub> -N-Konzentration im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Brühl.....	12
Abbildung 8:	P <sub>ges</sub> -Konzentration im Zulauf zur Belebung der Kläranlage Brühl.....	12
Abbildung 9:	P <sub>ges</sub> -Konzentration im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Brühl.....	13
Abbildung 10:	Aufteilung der Mikroschadstoffkonzentration im Ablauf der Nachklärung nach Kategorien, gesamt: 58,1 µg/l .....	21
Abbildung 11:	Aufteilung der Mikroschadstoffkonzentration im Ablauf Nachklärung, gesamt: 58,1 µg/l .....	22
Abbildung 12:	Schematische Darstellung des Trennverhaltens von Membranverfahren [Melin et al. 2007] .....	26
Abbildung 13:	Transmembrane Druckdifferenz und Trenngrenze verschiedener Filtrationsverfahren [Melin et al. 2007] .....	27
Abbildung 14:	Anlagenkonfiguration der Membranfiltration (oben links: Reihenschaltung, oben rechts: Parallelschaltung, unten links: Tannenbaumstruktur, unten rechts: interner Rezirkulationskreislauf „Feed and Bleed“) [Melin et al. 2007].....	28
Abbildung 15:	Schematische Darstellung der Adsorption [Kienle et al. 1980].....	29
Abbildung 16:	Verfahrenskonfigurationen von PAK-Adsorptionsstufen (oben: Kontaktbecken mit Sedimentation und Rezirkulation, mitte: Kontaktbecken mit Rückführung in die biologische Hauptstufe ohne Sedimentation, unten: PAK-Dosierung in Zulauf einer Filtrationsstufe) [Benstöm 2012] .....	30
Abbildung 17:	Verfahrenskonfiguration der GAK-Filtration (v.o.n.u: GAK-Filtration, abwärtsdurchströmt; GAK-Filtration, aufwärtsdurchströmt; GAK- Filtration im Druckfilter; GAK-Filtration, kontinuierlich gespült) [Benstöm 2012, nach Gujer 2007] .....	33
Abbildung 18:	Schema der Oxidationsprozesse mit Ozon [nach Hoigné et al. 1983] .....	35
Abbildung 19:	Ozonanlage mit Ozonherstellung aus Flüssigsauerstoff und nachgeschalteter Sandfiltration [Abegglen et al. 2012] .....	36
Abbildung 20:	Advanced Oxidation Process nach Vorfiltration mit nachgeschalteter biologisch aktiver Filtration (Sandfilter) [Abegglen et al. 2012].....	38

Abbildung 21:	Schema der Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration.....	42
Abbildung 22:	Schema der PAK-Dosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken mit Nutzung von zwei vorh. Nachklärbecken und Sandfiltration .....	48
Abbildung 23:	Schema der nachgeschalteten Kontaktbecken mit Lamellenklärer und Sandfiltration.....	57
Abbildung 24:	Schema der granulierten Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern .....	64
Abbildung 25:	Schemazeichnung der Ozonanlage .....	70
Abbildung 26:	Prognose der Eliminationsraten der Indikatorstoffe.....	81
Abbildung 27:	Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Elimination der Indikatorstoffe.....	82
Abbildung 28:	Prognose der Eliminationsraten der Hauptstoffe.....	83
Abbildung 29:	Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Elimination der Hauptstoffe .....	83
Abbildung 30:	Gegenüberstellung der Elimination und Bildung der betrachteten Verfahren .....	85
Abbildung 31:	Gegenüberstellung der Zu- und Ablaufkonzentration sowie der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe .....	86
Abbildung 32:	Gegenüberstellung des Energieverbrauchs .....	90
Abbildung 33:	Gegenüberstellung der Jahreskosten und abwasserspezifischen Kosten .....	92

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Indirekteinleiter im Einzugsgebiet der Kläranlage Brühl .....	3
Tabelle 2:	Mischungsverhältnisse des Palmersdorfer Bachs mit Abfluss der Kläranlage .....	6
Tabelle 3:	Trockenwettertage und Trockenwetterabfluss nach ATV-DVWK-A 198 .....	10
Tabelle 4:	Kategorien der gemessenen Mikroschadstoffe .....	14
Tabelle 5:	Gegenüberstellung der Zulaufkonzentration zur Kläranlage Brühl an Trockenwettertagen mit Messprogrammen anderer Kläranlagen [ng/l] .....	16
Tabelle 6:	Zu- und Ablaufkonzentration sowie Elimination des Trockenwetterscreenings.....	17
Tabelle 7:	Zusammenstellung der Messergebnisse des Trockenwetterscreenings.....	18
Tabelle 8:	Elimination der Östrogenaktivität gemessen als EEQ .....	18
Tabelle 9:	Zu- und Ablaufkonzentration des Trockenwetterscreenings, -monitorings und des Trockenwetterscreenings und -monitorings.....	20
Tabelle 10:	Elimination der Mikroschadstoffe in der Belebung .....	21

Tabelle 11:	Zu- und Ablaufkonzentration sowie Elimination des Regenwetterscreenings .....	23
Tabelle 12:	Zusammenstellung der Messergebnisse des Regenwetterscreenings .....	24
Tabelle 13:	Anlagenliste der PAK-Dosierung .....	32
Tabelle 14:	Anlagenliste der GAK-Filtration.....	34
Tabelle 15:	Anlagenliste von Ozonanlagen .....	37
Tabelle 16:	Anlagenliste der Verfahrenskombinationen.....	39
Tabelle 17:	Bemessungsparameter 4. Reinigungsstufe .....	40
Tabelle 18:	Fällmittel, PAK und Flockungshilfsmittel bei Variante 1a - PAK simultan, SF .....	43
Tabelle 19:	Auslegung Variante 1a - PAK simultan, SF.....	45
Tabelle 20:	Energieverbrauch bei der Variante 1a - PAK simultan, SF.....	46
Tabelle 21:	Kostenschätzung für die Variante 1a - PAK simultan, SF .....	47
Tabelle 22:	Fällmittel, PAK und Flockungshilfsmittel bei Variante 1b - PAK-KB, NK, SF.....	49
Tabelle 23:	Auslegung Variante 1b - PAK-KB, NK, SF .....	50
Tabelle 24:	Elimination konventioneller Abwasserparameter bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF.....	51
Tabelle 25:	Prognose der Elimination und Ablaufkonzentration der gemessenen Mikroschadstoffe bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF .....	53
Tabelle 26:	Gegenüberstellung der Bewertungskriterien bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF.....	54
Tabelle 27:	Energieverbrauch bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF .....	55
Tabelle 28:	Kostenschätzung für die Variante 1b - PAK-KB, NK, SF .....	56
Tabelle 29:	Auslegung Variante 1c - PAK-KB, LK, SF.....	59
Tabelle 30:	Energieverbrauch bei der Variante 1c - PAK-KB, LK, SF.....	60
Tabelle 31:	Kostenschätzung für die Variante 1c - PAK-KB, LK, SF.....	62
Tabelle 32:	Auslegung Variante 2 – GAK-Filtration .....	65
Tabelle 33:	Elimination konventioneller Abwasserparameter bei der Variante 2 – GAK-Filtration.....	66
Tabelle 34:	Prognose der Elimination und Ablaufkonzentration der gemessenen Mikroschadstoffe bei der Variante 2 – GAK-Filtration .....	67
Tabelle 35:	Gegenüberstellung der Bewertungskriterien bei der Variante 2 – GAK-Filtration .....	68
Tabelle 36:	Energieverbrauch bei der Variante 2 – GAK-Filtration .....	68
Tabelle 37:	Kostenschätzung für die Variante 2 – GAK-Filtration .....	69
Tabelle 38:	Auslegung Variante 3 - Ozonreaktor, SF .....	72
Tabelle 39:	Elimination konventioneller Abwasserparameter bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF .....	73

Tabelle 40:	Prognose der Elimination und Ablaufkonzentration der gemessenen Mikroschadstoffe bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF .....	74
Tabelle 41:	Gegenüberstellung der Bewertungskriterien bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF .....	75
Tabelle 42:	Versuchsergebnisse der Ozon-Transformationsprodukte .....	75
Tabelle 43:	Energieverbrauch bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF .....	76
Tabelle 44:	Kostenschätzung für die Variante 3 - Ozonreaktor, SF .....	77
Tabelle 45:	Gegenüberstellung der Prognose der AFS-Ablaufkonzentration und Elimination .....	80
Tabelle 46:	Gegenüberstellung der Prognose der CSB-Ablaufkonzentration und Elimination .....	80
Tabelle 47:	Gegenüberstellung der Prognose der Pges Ablaufkonzentration und Elimination .....	81
Tabelle 48:	Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Eliminationsrate der Indikatorstoffe.....	82
Tabelle 49:	Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Elimination der Hauptstoffe .....	84
Tabelle 50:	Zusammenstellung der Prognose der Elimination durch die vorgestellten nachgeschalteten Verfahren .....	87
Tabelle 51:	Zusammenstellung der Stoffeigenschaften der Vergleichsstoffe.....	87
Tabelle 52:	Gegenüberstellung der Elimination der nachgeschalteten Verfahren hinsichtlich der Vergleichsstoffe .....	87
Tabelle 53:	Gegenüberstellung der Ablaufkonzentrationen mit den Bewertungskriterien nach KomM NRW 2016.....	88
Tabelle 54:	Ablaufwerte der konventionellen Abwasserparameter und der Mikroschadstoffe .....	89
Tabelle 55:	Gegenüberstellung der Energieverbrauchswerte .....	91
Tabelle 56:	Gegenüberstellung der Investitionskosten, Betriebskosten und Jahreskosten .....	92
Tabelle 57:	Gegenüberstellung der Jahreskosten .....	93
Tabelle 58:	Flächenverbrauch der betrachteten Varianten .....	93
Tabelle 59:	Bewertungsmatrix der betrachteten Varianten .....	94
Tabelle 60:	Gegenüberstellung der Jahreskosten .....	96

## Formelverzeichnis

Formel 1:	Oxidation mit Ozon und Hydroxylradikalen [nach van Gunten 2003]: .....	35
-----------	--	----

## Anlagenverzeichnis

Anlage A:	Einflussfaktoren organischer Substanzen auf die Aktivkohleadsorption [Pöpel et al. 1988]
Anlage B:	Kostenschätzung Variante 1a – PAK simultan, SF
Anlage C:	Kostenschätzung Variante 1b – PAK-KB, NK, SF
Anlage D:	Kostenschätzung Variante 1c – PAK-KB, LK, SF
Anlage E:	Kostenschätzung Variante 2 – GAK-Filtration
Anlage F:	Kostenschätzung Variante 3 –Ozonreaktor, SF
Anlage G:	Messprogramm des Screenings und Monitorings
Anlage H:	IUTA – Analysenbericht Nr. F 16/397
Anlage I:	Lageplan Kläranlage Brühl - Kataster

## Zeichnungsverzeichnis

<u>Z.-Nr.</u>	<u>Bezeichnung</u>	<u>Maßstab</u>
2016-142-100	Übersichtskarte	1:25.000
2016-142-101	Lageplan Kläranlage - Bestand	1:500
2016-142-102	Variante 1a: Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration	1:200
2016-142-103	Variante 1b: Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration	1:200
2016-142-104	Variante 1c: Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration	1:200
2016-142-105	Variante 2: Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern	1:200
2016-142-106	Variante 3: Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration	1:200

## 1 Allgemeines und Veranlassung

Kläranlagen üben durch die Einleitung in Gewässer einen großen Einfluss auf die Gewässergüte aus. Die konventionelle Abwasserbehandlung umfasst die weitgehende Elimination von biologisch gut abbaubaren Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen, chemisch gut fällbaren Phosphorverbindungen und mittels Sedimentation und ggf. nachgeschaltete Sandfiltration gut abfiltrierbaren Stoffen.

Eine Vielzahl von Mikroschadstoffen wie Arzneimittel, Röntgenkontrastmittel, Reinigungschemikalien, Industriechemikalien und Pflanzenschutzmittel können in den Kläranlagen biologisch nicht abgebaut und mittels chemischer Fällung nicht oder nur zu einem geringen Anteil eliminiert werden. Diese Mikroschadstoffe gelangen zu einem großen Anteil meist unverändert und unbehandelt über die Abläufe der kommunalen Kläranlagen in die aquatische Umwelt. Mikroschadstoffe sind in Gewässern und im Abwasser nur im ng/l- bis µg/l-Bereich vorzufinden. Dennoch sind negative Folgen aufgrund der hormonellen Wirksamkeit, der Bioakkumulation und der Toxizität in der aquatischen Umwelt zu erkennen [Gawel et al. 2015].

Um die Güte der Gewässer und des Grundwassers zu erhalten und bei Erfordernis zu verbessern, ist langfristig die Reduzierung der Einleitung von Mikroschadstoffen aus Kläranlagen in die Gewässer erforderlich. Dazu bedarf es der Ertüchtigung vieler Kläranlagen im Hinblick auf die Elimination von persistenten, kanzerogenen, mutagenen und teratogenen Mikroschadstoffen organischen und anorganischen Charakters.

Derzeit ist die Einleitung von Mikroschadstoffen aus Kläranlagen in die Gewässer gesetzlich nicht geregelt.

Zur Feststellung der eingeleiteten Mikroschadstoffe aus der Kläranlage Brühl in den Palmersdorfer Bach und nachfolgend in den Rhein sowie zur Feststellung geeigneter Verfahren zur Elimination der Mikroschadstoffe in einer neu zu errichtenden 4. Reinigungsstufe hat die Stadt Brühl das Ingenieurbüro für Bauwesen Schmidt GmbH mit der Erstellung der vorliegenden Machbarkeitsstudie beauftragt.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wird die Belastungssituation der Kläranlage Brühl mit Mikroschadstoffen durch ein Screening und ein weiterführendes Monitoring entsprechend den Vorgaben des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW ermittelt [KomM NRW 2015]. Auf Grundlage der Ergebnisse des durchgeführten Screenings und Monitorings wird die voraussichtliche Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Brühl mittels PAK- und GAK-Adsorptionsverfahren und mittels Oxidation durch Ozon unter Berücksichtigung des Anlagenbestands und der vorhandenen Erweiterungsfläche untersucht und gegenübergestellt. Dabei werden die Eliminationsleistung, der Einfluss der Verfahren auf die konventionellen Abwasserparameter, die Wirtschaftlichkeit, der Betrieb und der Flächenverbrauch als Bewertungsparameter betrachtet.

### 1.1 Beschreibung des Betrachtungsraums

Die Kläranlage Brühl liegt etwa 1,2 km östlich der Stadt Brühl in der benachbarten Stadt Wesseling und wurde 1955 in Betrieb genommen. Die damalige Abwasserbehandlung umfasste eine Vorklärung und eine Nacheindickung. Im Jahr 1970 erfolgten neben der Erneuerung der Vorklärung die Inbetriebnahme der ersten biologischen Hauptstufe, die Errichtung

der beiden Faultürme zur anaeroben Schlammstabilisierung einschließlich der Schlammwässerung und des BHKW zur energetischen Nutzung des anfallenden Biogases. Der ausgefaulte Klärschlamm wird einer landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt. Im Jahr 1991 wurde die chemische Phosphorelimination mittels Fällung ergänzt. Die Simultanfällung des Phosphors erfolgt dabei durch Dosierung von  $\text{FeClSO}_4$  in den Rücklaufschlamm. In den Jahren 1995 bis 1998 erfolgten der Ausbau der biologischen Hauptstufe mit vorgeschalteter Denitrifikation und Nitrifikation und der Neubau von zwei Nachklärbecken. Die beiden alten Nachklärbecken wurden als Sicherheit in die Verfahrensführung eingebunden. Des Weiteren wurden die Vorklärung und die Gebläsestation der Belebung erneuert. Im Jahr 2011 erfolgte die Erneuerung der Kammerfilterpresse und 2014 wurde an der Ablaufmessstation ein Hochwasserpumpwerk errichtet. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Kläranlage Brühl im Luftbild.

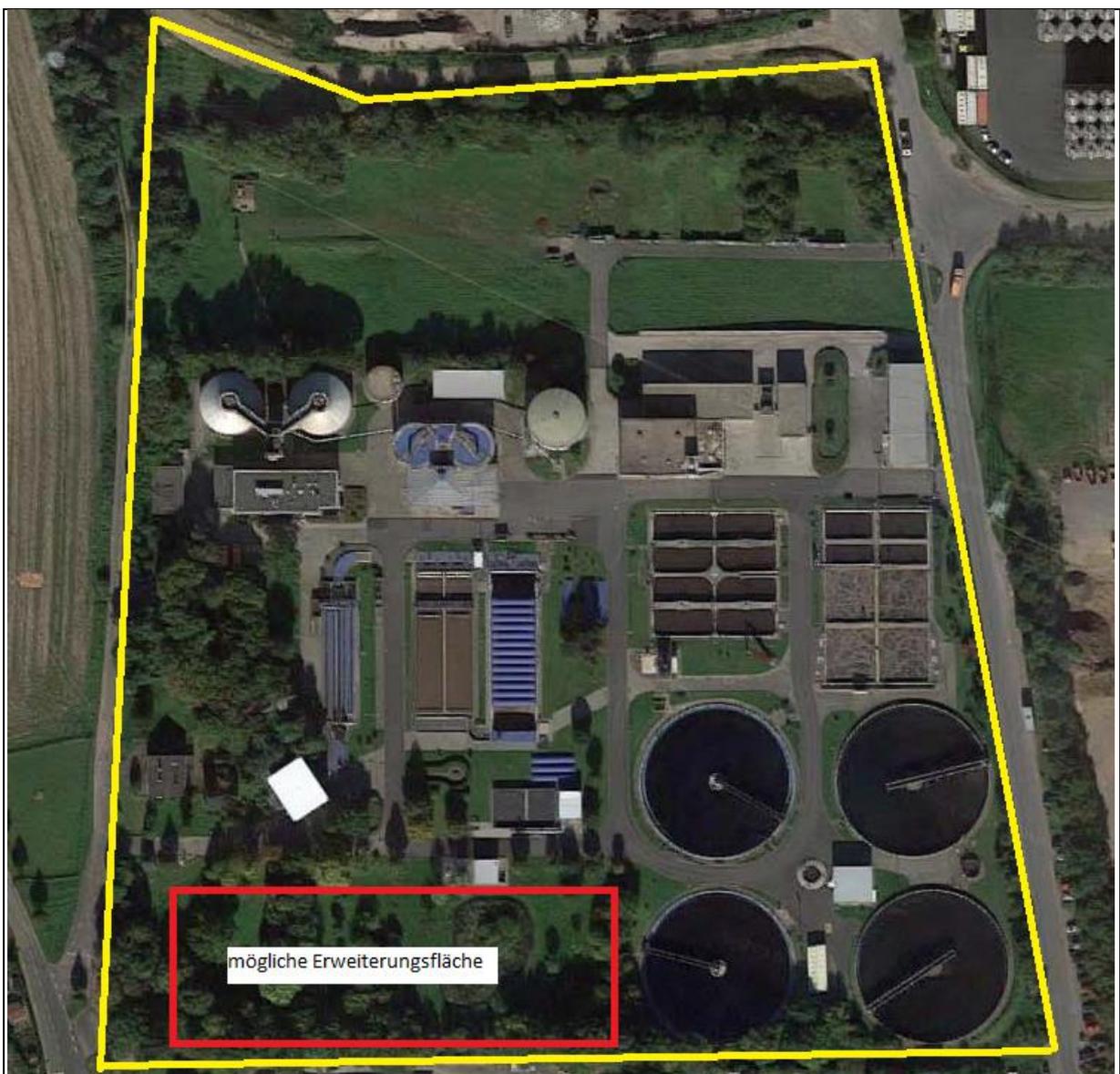


Abbildung 1: Luftbild der Kläranlage Brühl [Quelle: Google Earth 2009]

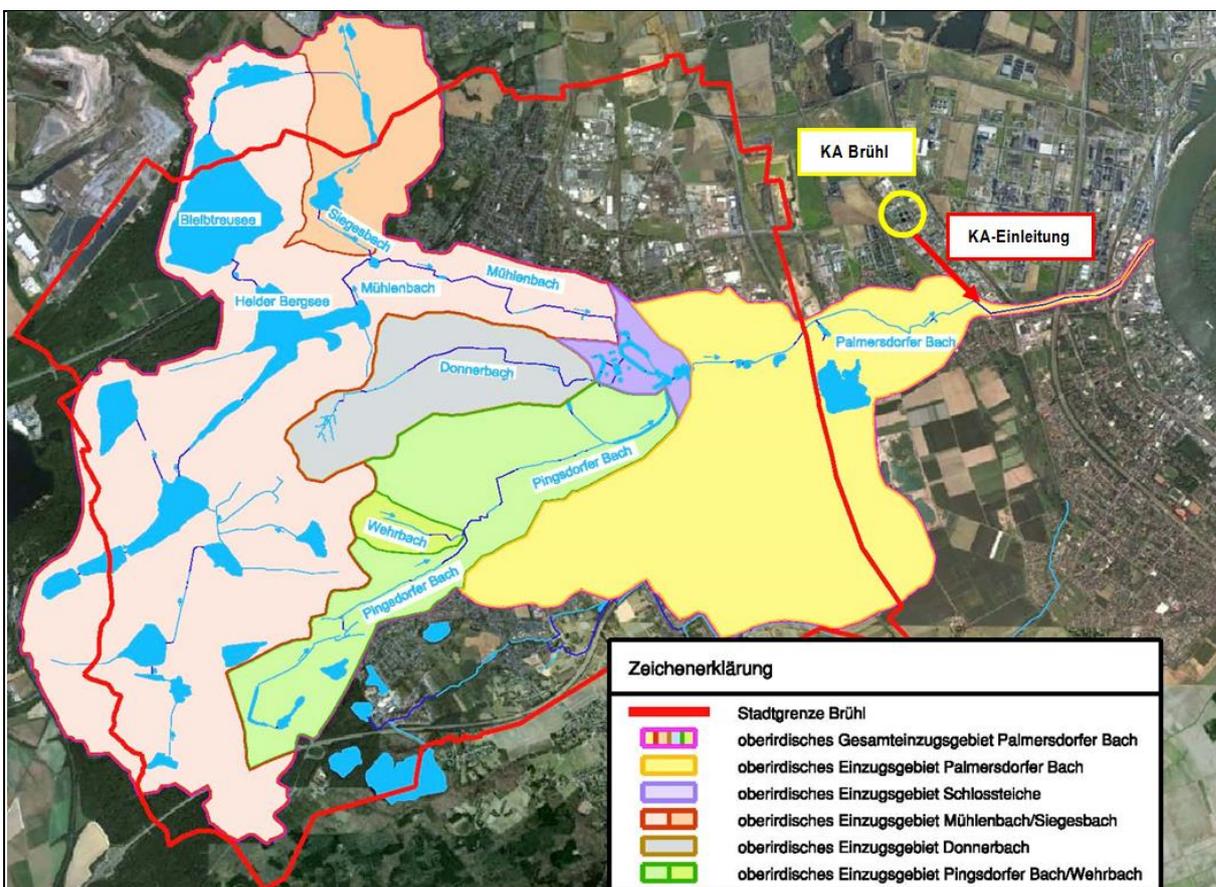
Die Ausbaugröße der Kläranlage Brühl beträgt 65.000 EW. An die Kläranlage Brühl sind derzeit 61.000 EW angeschlossen. Das auf der Kläranlage Brühl anfallende Abwasser ist geprägt durch häusliches Abwasser (ca. 45.000 E) und gewerbliches Abwasser. Zu den gewerblichen Indirekteinleitern mit nicht überwiegend häuslichem Abwasser gehören u.a. die

Eisenindustrie, ein Krankenhaus und eine Röntgenpraxis. Im Hinblick auf die Einleitung von Mikroschadstoffen in die Kanalisation sind ergänzend zu den Haushalten die in Tabelle 1 aufgeführten Indirekteinleiter zu nennen.

**Tabelle 1: Indirekteinleiter im Einzugsgebiet der Kläranlage Brühl**

Einleiter	Abwasserart	Jahresschmutzwassermenge [m³/a]	Bemerkungen
Marienhospital	Krankenhaus		208 Betten
Senioren-Wohnheim Brühl GmbH	Seniorenheim		
DOM GmbH	gewerblich	4.859	
Eisenwerke Brühl	gewerblich	116.606	
Mausier Werke	gewerblich		
Waggonwerk Brühl	gewerblich	41.801	

Die Einleitung des geklärten Abwassers erfolgt in den Palmersdorfer Bach, der unterhalb der Einleitungsstelle nach etwa 1,85 km bei Wesseling in den Rhein mündet. Der Palmersdorfer Bach beginnt mit dem Ablauf aus dem Großen Insel Weiher, der wie der Kleine Inselweiher, Weißweiher, Oberförsterweiher, Spiegelweiher und Mönchsweiher zum System der Brühler Schlossteiche gehört. Die Brühler Schlossteiche werden wiederum durch den Donnerbach, Mühlenbach und Pingsdorfer Bach gespeist, so dass diese 3 Gewässer die Oberläufe des Palmersdorfer Bachs bilden, siehe nachfolgende Abbildung 2.



**Abbildung 2: Oberirdisches Einzugsgebiet des Palmersdorfer Bachs**

Der Palmersdorfer Bach hat zwischen dem Ablauf aus dem Großen Inselweiher bis zur Mündung in den Rhein eine Fließlänge von rd. 4,76 km mit einem direkten oberirdischen Einzugsgebiet von rd. 8 km<sup>2</sup>. Das Gesamteinzugsgebiet des Palmersdorfer Bachs beträgt ca. 30,1 km<sup>2</sup> und umfasst dabei auch die oberirdischen Einzugsgebiete seiner drei Oberläufe Pingsdorfer Bach, Donnerbach und Mühlenbach sowie das oberirdische Einzugsgebiet der Schlossteiche, siehe obige Abbildung 2.

Im Einzugsgebiet des Palmersdorfer Bachs sind keine Wasserschutzgebiete vorhanden [Lange et al. 2012]. In dem Teilabschnitt zwischen der Stadt Brühl und der Mündung in den Rhein ist der Palmersdorfer Bach stark bis vollständig verändert, siehe Gewässerstruktur-  
gütekarte in der nachfolgenden Abbildung 3 [Lange et al. 2012, ELWAS-WEB 2016].

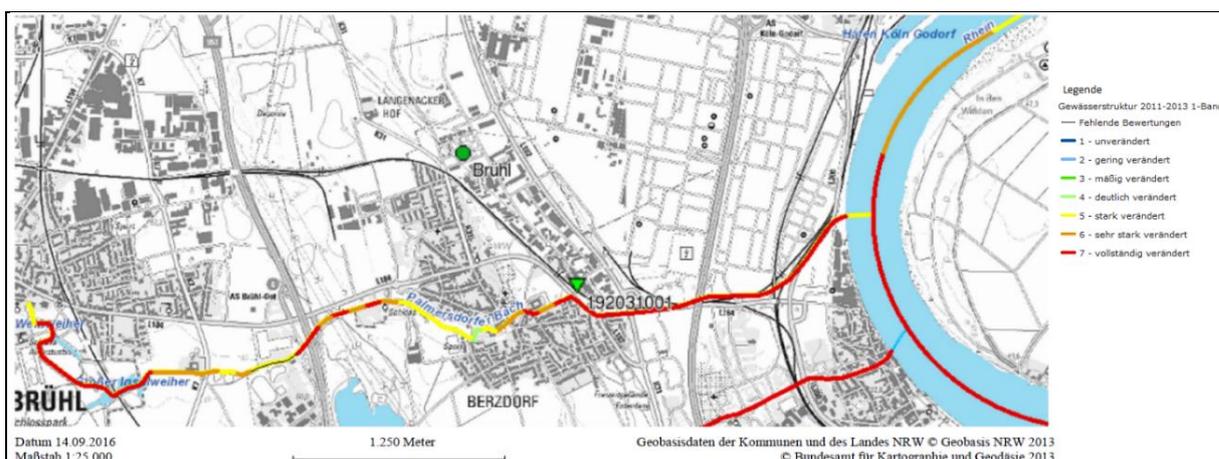


Abbildung 3: Gewässerstrukturkarte des Palmersdorfer Bachs (Quelle: ELWAS-WEB)

Ab Wesseling-Berzdorf (Brühler Straße) bis zur Mündung in den Rhein ist der Palmersdorfer Bach auf einem rd. 1,9 km langen Abschnitt durchgehend verrohrt. Die Einleitungsstelle der Kläranlage Brühl bei Bach-km 1,85 liegt somit am Beginn der Gewässerverrohrung.

Etwa acht Kilometer unterhalb der Mündung des Palmersdorfer Bachs in den Rhein ist die Brunnengalerie „Weißer Bogen“ des Versorgungsunternehmens RheinEnergie angeordnet. Das dort geförderte und im Wasserwerk Hochkirchen in Köln/Raderthal aufbereitete Uferfiltrat deckt zu 50% die Trinkwasserversorgung der Stadt Brühl [Stadtwerke Brühl, aufgerufen am 13.10.2016].

Die vorliegende Machbarkeitsstudie soll die Möglichkeiten und die Kosten zur Reduzierung der Einleitung von Mikroschadstoffen aus der Kläranlage Brühl in den Palmersdorfer Bach und in den Rhein aufzeigen.

## 2 Grundlagen

Das Kapitel 2 beinhaltet die Grundlagen zur Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Brühl. Dazu gehören:

- Abwasserbelastung
- Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften der Mikroschadstoffe der Spurenstoffe
- Definition der Gewässergüte
- Auswertung der Betriebsdaten der Kläranlage Brühl
- Auswertung der Messergebnisse des Screenings und Monitorings

### 2.1 Abwasserbelastung mit Mikroschadstoffen

Bei der Ermittlung der anthropogenen Einflüsse auf die Gewässer wird zwischen diffusen Quellen und Punktquellen unterschieden [Graw 2003].

Zu Punktquellen zählen Industriedirekteinleiter, Misch- bzw. Niederschlagswasserentlastungen und kommunale Kläranlagen. Industrielle Direkteinleiter lassen sich nach dem Charakter ihrer Produktion in organische und anorganische Industriebranchen<sup>1</sup> einteilen [Schwoerbel et al. 2013]. Die Kläranlage Brühl stellt eine Punktquelle in Bezug auf die Gewässerbelastung des Palmersdorfer Bachs dar.

Diffuse Oberflächengewässerbelastungen resultieren unter anderem durch Einträge von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Nährstoffe ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ) und Pestizide werden dabei in großem Umfang durch Abschwemmung in die Gewässer eingetragen [Graw 2003]. Der Anteil der Belastung der Binnengewässer in Folge von landwirtschaftlicher Düngung beläuft sich für Phosphorverbindungen im Bereich von 50% und für Stickstoffverbindungen im Bereich von 70%<sup>2</sup> an der Gesamtbelastung [Mohaupt et al. 2010]. Dabei ist eine große regionale Streuung zu erkennen [Behrendt et al. 2003]. Dies ist vom Umfang der Viehwirtschaft, der Düngemittelverwendung und der Topographie abhängig. Die in der Landwirtschaft verwendeten Dünger sind auf ihre Pflanzenverfügbarkeit ausgelegt und führen nach dem diffusen Eintrag in Gewässer zu vermehrtem Algen- und Wasserpflanzenwachstum [Graw 2003]. Dies kann in Folge von starkem Algenwachstum bei übermäßigem Eintrag von  $\text{PO}_4\text{-P}$  zur Trübung des Gewässers führen. Durch den Zersetzungsprozess nach dem Absterben der Algen steigt die Sauerstoffzehrung aufgrund des Abbauprozesses der Biomasse. Dadurch kann der gesamte Sauerstoff im Gewässer aufgebraucht werden [Kern 2014]. Danach kommt es zum Fischsterben und zum Absterben der übrigen Vegetation [Hosang 1998].

Bei Starkregenereignissen wird zum Schutz kommunaler Kläranlagen vor einer hydraulischen Überbelastung nicht geklärtes Abwasser über Mischwasserentlastungsanlagen direkt in die Gewässer abgeleitet. Die Organismen im Gewässer werden in hohem Maße durch die Abwasserinhaltsstoffe belastet [Graw 2003]. Mittels einer sachgemäßen Abwasserbehandlung sind nachteilige Folgen für die Gewässer wie Sauerstoffmangel, Geruchsbildung, Schlamm sedimentation, etc. zu vermeiden. Hohe Einleitungsfrachten der Abwasserinhalts-

<sup>1</sup> Zu Industriebranchen mit hauptsächlich organischem Abwasser zählen die Milchindustrie, die Alkoholindustrie und die Tierverarbeitung. Industriebranchen mit anorganischem Abwasser sind unter anderem die Metallindustrie, die chemische Industrie und die Galvanisierungsindustrie.

<sup>2</sup> Die Werte entstammen Messungen aus dem Zeitraum von 2003 bis 2005 [Mohaupt et al. 2010].

stoffe CSB, BSB<sub>5</sub> und NH<sub>4</sub>-N können leicht zu Sauerstoffmangel im Gewässer führen. Die Folgen der Emission von Phosphorverbindungen aus Kläranlagen sind denen aus diffusen Quellen gleich. Wird das Gewässer als Rohwasser für die Trinkwassergewinnung verwendet, ist u.a. die Keimbelastung des behandelten Abwassers zu überwachen. Der übergeordnete Indikatorparameter für die Bakterienbelastung ist das fäkalkoliforme Bakterium E. Coli [Hosang 1998].

Mikroschadstoffe gelangen durch Haushalte, Indirekteinleiter und Abschwemmungen von Flächen in die Kanalisation und folglich in kommunale Kläranlagen. Die Abbaubarkeit / chemische Fällbarkeit ist stark stoffabhängig. Je nach Eigenschaften der Mikroschadstoffe findet ein Abbau / eine chemische Fällung der Mikroschadstoffe nur in geringem Umfang statt. Somit gelangen große Anteile von Mikroschadstoffen bestimmter Stoffgruppen unbehandelt in die Gewässer. Durch den Eintrag in den Wasserkreislauf gelangen die Mikroschadstoffe z.T. in das Grundwasser und können im Rohwasser der Wasserversorgung auftreten. Dies trifft ebenfalls auf die Verwendung von Oberflächenwasser zur Trinkwasserversorgung zu [Cornel 2007].

Zur Beurteilung der Belastung des Palmersdorfer Bachs durch die Mikroschadstoffemissionen der Kläranlage Brühl sind in Tabelle 2 verschiedene Mischungsverhältnisse des Abflusses des Palmersdorfer Bachs mit den Abflüssen der Kläranlage Brühl zusammengestellt. Grundlage für den Abfluss des Palmersdorfer Bachs sind Messwerte aus dem hydrologischen Jahr 2000. Die Angaben der Abflüsse der Kläranlage Brühl basieren auf der Auswertung der Zulaufdaten der Jahre 2013 bis 2015 (siehe Kapitel 2.3).

**Tabelle 2: Mischungsverhältnisse des Palmersdorfer Bachs mit Abfluss der Kläranlage**

Abfluss Palmersdorfer Bach		Abfluss aus der Kläranlage Brühl in den Palmersdorfer Bach		Mischungsverhältnis
Niedrigster bekannter Abfluss NNQ	0 l/s	mittlerer täglicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,d,aM}$	83 l/s	1 : ∞
Mittlerer monatlicher Niedrigwasserabfluss MNQ(m) im Jahr 2000	24,3 l/s	mittlerer täglicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,d,aM}$	83 l/s	1 : 3,42
Mittlerer Abfluss MQ im Jahr 2000	57,2 l/s	mittlerer täglicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,d,aM}$	83 l/s	1 : 1,45
Mittlerer Abfluss MQ im Jahr 2000	57,2 l/s	Mischwasserabfluss im Jahresmittel $Q_{M,aM}$	114 l/s	1 : 2,00
größter Hochwasserabfluss im Jahr 2000	221,6 l/s	Mischwasserabfluss $Q_M$	540 l/s	1 : 2,44

Das Mischungsverhältnis des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses des Palmersdorfer Bachs MNQ(m) und des mittleren täglichen Trockenwetterabflusses  $Q_{T,d,aM}$  der Kläranlage beträgt 1:3,42, so dass ein sehr hoher Anteil an gereinigtem Abwasser im Palmersdorfer Bach vorliegt. Bei mittlerem Abfluss des Palmersdorfer Bachs MQ und Mischwasserabfluss der Kläranlage Brühl im Jahresmittel  $Q_{M,aM}$  liegt ein Mischungsverhältnis von 1:2 vor, so dass ebenfalls ein sehr hoher Anteil an gereinigtem Abwasser im Palmersdorfer Bach vorliegt.

### 2.1.1 Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften der Mikroschadstoffe

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie werden zur theoretischen Betrachtung der Elimination von Mikroschadstoffen die Parameter Verteilungskoeffizient  $K_{OW}$  bzw. Polarität sowie die Reaktionsgeschwindigkeit mit Ozon und Hydroxylradikalen betrachtet. Weitere relevante Parameter sind u.a. Wasserlöslichkeit, Persistenz, Sorption als Sorptionskoeffizient  $K_{OC}$ , Bioakkumulation und biologische Abbaubarkeit. Diese Parameter können zur Beurteilung der Stoffe hinsichtlich ihres Verhaltens in der aquatischen Umwelt sowie zur Beurteilung der Elimination in der Belebung und in nachgeschalteten Verfahren verwendet werden. Die Betrachtung des Einflusses der vorgestellten Parameter auf die Elimination in nachgeschalteten Behandlungsverfahren erfolgt anhand von drei Beispielstoffen in Kapitel 5.2.

Die Wasserlöslichkeit von Stoffen ist abhängig von deren Polarität. Polare organische Stoffe sind gut wasserlöslich (hydrophil). Unpolare organische Stoffe sind schlecht wasserlöslich (hydrophob) [Lewandowski et al. 1997].

Zur Beurteilung der Adsorption von Mikroschadstoffen an organischem Kohlenstoff (z.B. an Schlamm oder Aktivkohle) wird der Adsorptionskoeffizient  $K_{OC}$  verwendet. Der  $K_{OC}$ -Wert setzt die Konzentrationsverteilung von Mikroschadstoffen an organischem Kohlenstoff und in Wasser in Bezug zueinander [Carballa et al. 2005].

Ein weiterer wichtiger physikalischer Parameter zur Beschreibung des Adsorptionsverhaltens von Mikroschadstoffen ist der logarithmische Verteilungskoeffizient  $\log K_{OW}$ . Dabei wird das Verhältnis der maximal möglichen Löslichkeit von Stoffen in Octanol und Wasser gebildet [Carballa et al. 2005]. Octanol und Wasser sind untereinander nicht löslich und bilden ein Zweiphasensystem. Der Quotient ist ein Maß dafür, ob ein Stoff wasserlöslich (hydrophil) oder fettlöslich (lipophil) ist [Schwarzenbach et al. 2003]. Der  $\log K_{OW}$  ist zudem eine Größe zur Beurteilung der Passierbarkeit von Mikroschadstoffen durch die Zellmembran [Schwoerbel et al. 2013]. Hohe Verhältnisse größer 4,00 stehen für lipophile Stoffeigenschaften und somit auch für eine hohe Tendenz zur Bioakkumulation und Sorption an Schlämmen auf Kläranlagen. Mikroschadstoffe mit  $\log K_{OW}$ -Werten kleiner 2,50 weisen eine geringe Sorptionstendenz an Schlämmen auf. Im Bereich von 2,50 bis 4,00 liegt ein mittleres Sorptionspotential vor [Rogers 1996].

Die Beschreibung der Oxidation der Mikroschadstoffe mit Ozon und Hydroxylradikalen (OH) erfolgt durch die Geschwindigkeitskonstanten  $k_{O_3}$  und  $k_{OH}$ . Entsprechend der chemischen Struktur der Mikroschadstoffe erfolgt die Oxidation schneller, langsamer oder gar nicht. Ozon reagiert bevorzugt mit Kohlenstoffdoppelbindungen, phenolischen Verbindungen und Aminogruppen. Hydroxylradikale oxidieren die Abwasserinhaltsstoffe unspezifisch [Abegglen et al. 2012]. Stoffe mit einer Geschwindigkeitskonstante  $k_{O_3} < 1 \times 10^2$  und  $k_{OH} < 5 \times 10^9$  gelten als langsam oxidierbar. Eine genauere Beschreibung des Oxidationsvorgangs mit beiden Oxidationsmitteln ist Kapitel 3.3.1 enthalten.

## 2.2 Gewässergüte

Die Vorgaben zur Gewässergütebewertung der EU-Mitgliedstaaten sind in der EU-WRRL festgelegt und gelten für Grundwasserkörper und Oberflächenwasserkörper. Um ein ganzheitliches Bild des Zustands der Gewässer zu erhalten, werden die biologische Zusammensetzung, hydromorphologische Aspekte sowie der chemische Zustand betrachtet. Zur Be-

wertung der biologischen Zusammensetzung werden zoologische und botanische Parameter erhoben.

Der chemische Zustand setzt sich aus allgemeinen chemisch-physikalischen Parametern und den Umweltqualitätsnormen (UQN) der EU-WRRL, der Richtlinie über die Ableitung gefährlicher Stoffe in die Gewässer, der Richtlinie über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und der Nitratrichtlinie<sup>3</sup> zusammen [Arle et al. 2013]. Zur detaillierteren Bewertung von Oberflächenwasserkörpern werden diese nach Gewässerkategorie und Gewässertyp unterteilt. Zweck der Einteilung ist die genaue Bewertung der einzelnen Gewässerarten, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Für jeden Typ wird eine Referenz ermittelt und zugeordnet. Für Fließgewässer werden zur Bewertung der biologischen Zusammensetzung und deren Belastung Phytoplankton, Makrophyten, Makroinvertebraten und Fische untersucht. Des Weiteren erfolgt eine Analyse der hydromorphologischen Parameter Durchgängigkeit, Wasserhaushalt und Morphologie. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Gewässerüberwachung von Fließgewässern ist die Erhebung des chemischen Zustands. Dafür werden allgemeine physikalisch-chemische Parameter sowie die Einhaltung der UQN kontrolliert. Zu den allgemeinen physikalisch-chemischen Parametern zählen Temperatur, Sauerstoffhaushalt, Versauerung und Nährstoffbelastung. Aus den Ergebnissen der Erhebung der o.a. Parameter wird der Zustand jedes Oberflächenwasserkörpers bestimmt. Bei der Gewässergütebewertung von Oberflächenwasserkörpern ist zwischen natürlichen Oberflächenwasserkörpern sowie erheblich veränderten und künstlichen Oberflächenwasserkörpern zu unterscheiden. Die Bewertung von natürlichen Oberflächenwasserkörpern erfolgt durch den ökologischen Zustand. Im Rahmen der Ermittlung des ökologischen Zustands werden die biologischen und hydromorphologischen Aspekte sowie der chemische Zustand bestimmt. Der ökologische Zustand ist in fünf Klassen unterteilt<sup>4</sup>. Je nach Ausmaß des anthropogenen Einflusses und dem Unterschied zum Referenzgewässer kann der ökologische Zustand von „sehr gut“ bis „schlecht“ reichen. Bei der Betrachtung der biologischen Parameter entscheidet der ungünstigste Messwert die Festlegung des ökologischen Zustands. Ebenso kann die Überschreitung einer UQN zu einer Einstufung des chemischen Zustands als „nicht gut“ führen. Der chemische Zustand gilt nur bei der Einhaltung aller UQN als gut. Die Bewertung des Gewässerzustands als unbefriedigend oder schlecht basiert nur auf biologischen Parametern [Arle et al. 2013].

Zu erheblich veränderten Oberflächenwasserkörpern zählen bspw. aufgestaute Gewässer hinter Talsperren und ausgekieste Altarme. Die Gewässergüte dieser Gewässerart wird durch das ökologische Potential beschrieben. Das ökologische Potential ist in vier Klassen unterteilt<sup>5</sup>. Im Rahmen des ökologischen Potentials werden die gleichen Forderungen an biologische und chemische Parameter wie beim ökologischen Zustand erhoben, jedoch nur soweit die aktuelle Nutzung des Gewässers (bspw. Talsperre) gewährleistet bleibt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Verbesserung der Hydromorphologie. Referenz ist das höchste ökologische Potential, welches bei optimalen hydromorphologischen Gegebenheiten erreicht werden kann [Arle et al. 2013].

Ziel der Bewirtschaftung der Gewässer ist die Erreichung und Erhaltung eines guten Zustands. Dafür müssen alle Komponenten den Vorgaben entsprechen. Für natürliche Oberflächenwasserkörper liegt der gute Zustand vor, wenn der ökologische und chemische Zustand gut sind. Bei erheblich veränderten Oberflächenwasserkörpern müssen das ökologische Potential und der chemische Zustand gut sein, damit ein guter Zustand des Gewässers vorliegt [Arle et al. 2013].

<sup>3</sup> Richtlinie 91/676/EWG

<sup>4</sup> Sehr guter Zustand, guter Zustand, mäßiger Zustand, unbefriedigender Zustand, schlechter Zustand

<sup>5</sup> gut und besser, mäßig, unbefriedigend, schlecht

Der Palmersdorfer Bach ist im Bewirtschaftungsplan 2016-2021 für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas der Planungseinheit Rheingraben-Nord zugeteilt. In Nordrhein-Westfalen sind die relevanten Parameter der Gewässergüte nach Planungseinheiten in Planungseinheitenstreckbriefen zusammengestellt.

Der Palmersdorfer Bach ist entsprechend dem Bewirtschaftungsplan ein LAWA-Fließgewässertyp 18: Löss-lehmgeprägter Tieflandbach, welcher zeitweise trocken liegt und aufgrund der Teilverrohrung als erheblich veränderter Wasserkörper einzustufen ist [MKULNV NRW 2015]. Daher sind die Parameter des ökologischen Potentials anzuwenden. Ein gutes ökologisches Potential gemäß § 5 OGewV 2016 ist entsprechend dem Bewirtschaftungsplan 2016-2021 bis 2021 zu erzielen. Begründung für die Fristverlängerung bis 2021 zur Erreichung eines guten ökologischen Potentials über 2015 hinaus sind begrenzende Faktoren aus Marktmechanismen wie z.B. unzureichende Flächenverfügbarkeit, geringe Bereitschaft zur Flächenbereitstellung und unzureichende Personalressourcen [MKULNV NRW 2015]. Das ökologische Potential des Palmersdorfer Bachs ist im Bewirtschaftungsplan 2016-2021 als schlecht festgelegt. Folgende Qualitätskomponenten sind Grundlage für die Bewertung des ökologischen Potentials [MKULNV NRW 2015a]:

Makrozoobenthos, allgemeine Degradation	unbefriedigend
Makrozoobenthos gesamt	unbefriedigend
Fische	schlecht

Ein guter chemischer Zustand (ohne ubiquitäre Stoffe) gemäß Anlage 7 Oberflächengewässerverordnung (OGewV 2016) war bis 2015 zu erreichen. Der Palmersdorfer Bach weist laut Bewirtschaftungsplan 2016-2021 einen guten chemischen Zustand (ohne ubiquitäre Stoffe) auf. Dieser Zustand war schon im Rahmen des zweiten Monitoringzyklus 2009-2011 festgestellt worden. Für die zugehörigen Parameter Ammonium-Stickstoff,  $P_{ges}$  und Chlorid liegt ein sehr guter Zustand vor. Hinsichtlich der Nitratbelastung wird für den Palmersdorfer Bach ein guter Zustand angegeben [MKULNV NRW 2015]. Die Messstelle liegt vor der Einleitungsstelle der Kläranlage Brühl in den Palmersdorfer Bach.

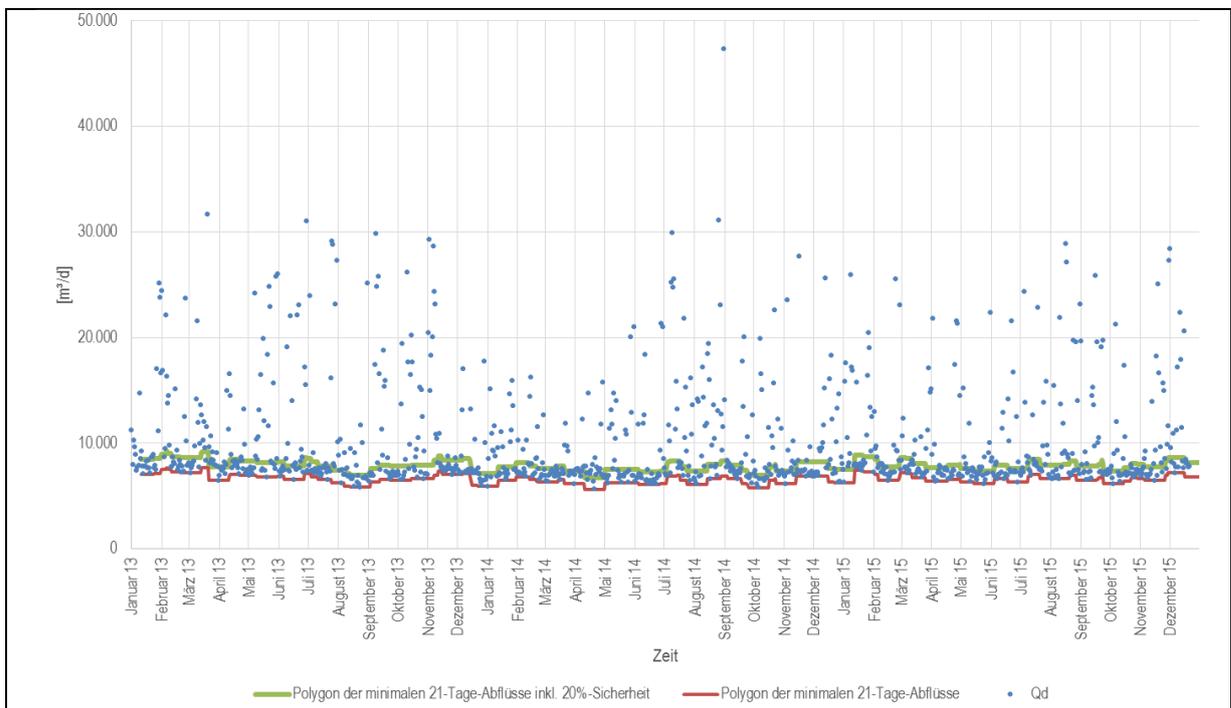
### 2.3 Auswertung der Betriebsdaten der Kläranlage Brühl

Im diesem Kapitels werden die Betriebsdaten der Jahre 2013 bis 2015 des Zulaufs zur Belebung (Ablauf Vorklärung) und des Ablaufs der Nachklärung der Kläranlage Brühl nach den Vorgaben des Arbeitsblatts ATV-DVWK-A 198 ausgewertet. Die Zulaufdaten liegen als 2-h-Werte vor, die Konzentrationswerte liegen als 24-h-Werte vor.

In Abbildung 4 sind der tägliche Zufluss zur Belebung der Kläranlage Brühl dargestellt. Bis auf ein lang andauerndes Starkregenereignis am 31.08.2014 mit einem Tageszufluss zur Kläranlage Brühl von ca. 47.000 m<sup>3</sup>/d liegt der Tageszufluss bei maximal rd. 31.500 m<sup>3</sup>/d. Die Jahresabwassermenge der letzten drei Jahre beträgt im Mittel 3.600.000 m<sup>3</sup>/a.

Die Bestimmung des Trockenwetterzuflusses kann mit Betrachtung des Wetterschlüssels oder alternativ mit dem Polygon der gleitenden 21-Tage-Werte inkl. eines Sicherheitsbeiwerts von 20% erfolgen. Der tägliche Trockenwetterabfluss auf Grundlage der gleitenden 21-Tage-Werte ist genauer, da der Wetterschlüssel kein objektiver Parameter ist.

Das Polygon der gleitenden 21-Tage-Werte ist ohne und mit einem Sicherheitsbeiwert von 20% in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4: Darstellung der täglichen Zuflüsse zur Kläranlage Brühl der Jahre 2013 bis 2015 mit Polygon der niedrigsten Abflüsse in 21-Tage-Intervallen**

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Auswertung der Trockenwettertage zusammengestellt. Es liegen 581 Trockenwettertage vor. Der Trockenwetterabfluss beträgt 7.187 m³/d.

**Tabelle 3: Trockenwettertage und Trockenwetterabfluss nach ATV-DVWK-A 198**

	Anzahl der Trockenwettertage [n]	mittlerer täglicher Trockenwetterabfluss $Q_{T,d,am}$ [m³/d]
gleitendes 21-Tage- Polygon inkl. 20% Sicherheitsbeiwert	581	7186,8

Die Belastung und Reinigungsleistung der biologischen Hauptstufe wird anhand des CSB im Zulauf zur Belebung und im Ablauf der Nachklärung betrachtet. In Abbildung 5 ist die CSB-Zulaufkonzentration zur Belebung und in Abbildung 6 ist die CSB-Ablaufkonzentration der Nachklärung dargestellt.

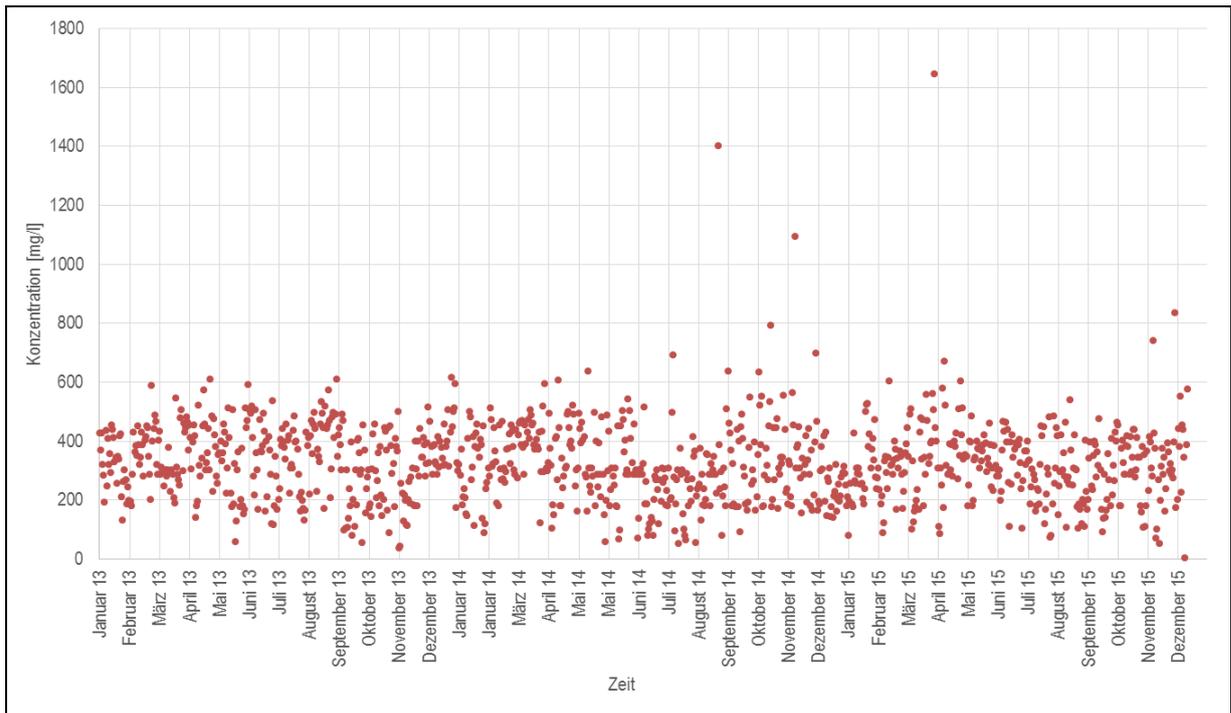


Abbildung 5: CSB-Konzentration im Zulauf zur Belebung der Kläranlage Brühl

Der CSB-Grenzwert im Ablauf der Nachklärung von 90 mg/l für die Größenklasse 4 wird über den gesamten Betrachtungszeitraum von drei Jahren eingehalten. Ebenfalls wird der Grenzwert von 64 mg/l entsprechend der Eigenerklärung der Kläranlage Brühl eingehalten. Der 85%-Perzentilwert der CSB-Fracht beträgt im Zulauf zur Belebung 4052 kg/d und im Ablauf der Belebung 401 kg/d. Der mittlere Abbaugrad über den gesamten Betrachtungszeitraum beträgt rd. 90%.

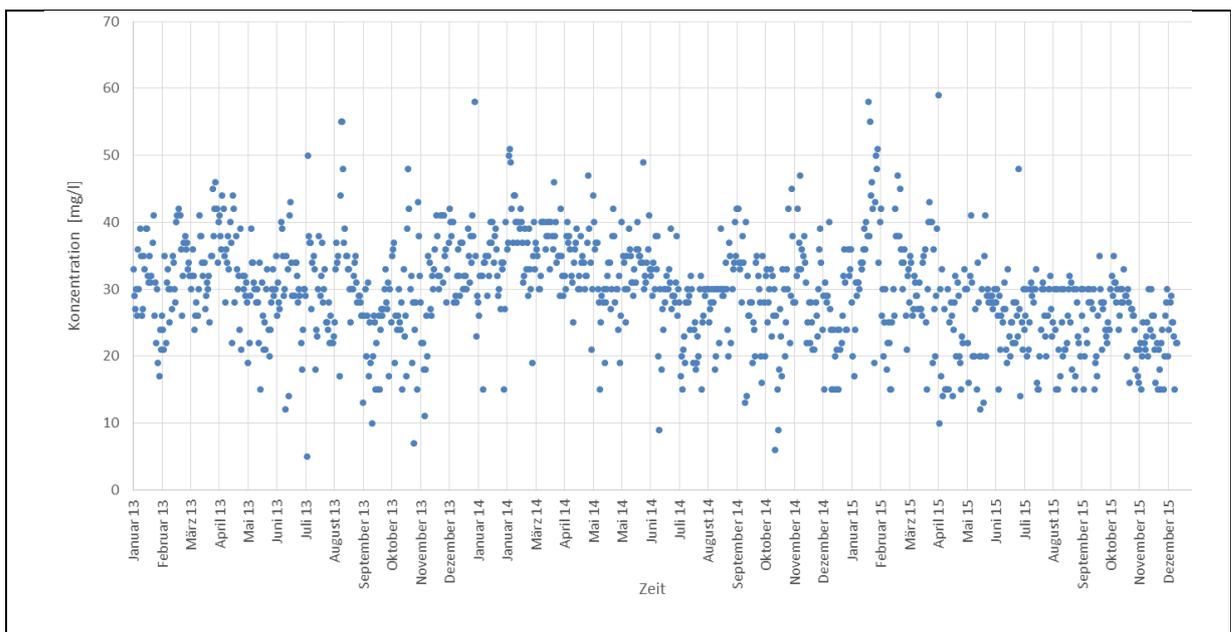


Abbildung 6: CSB-Konzentration im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Brühl

Die Nitrit-Konzentration ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) im Ablauf der Nachklärung (siehe Abbildung 7) wird betrachtet, um deren Einfluss auf die Ozonzehrung durch die chemische Oxidation von Nitrit

(NO<sub>2</sub>-N) zu Nitrat (NO<sub>3</sub>-N) deutlich zu machen. Bei der chemischen Oxidation von NO<sub>2</sub>-N werden 3,43 g O<sub>3</sub>/g NO<sub>2</sub>-N verbraucht [Abegglen et al 2012]. Der 85%-Perzentilwert der NO<sub>2</sub>-N-Konzentration beträgt 0,57 mg/l.

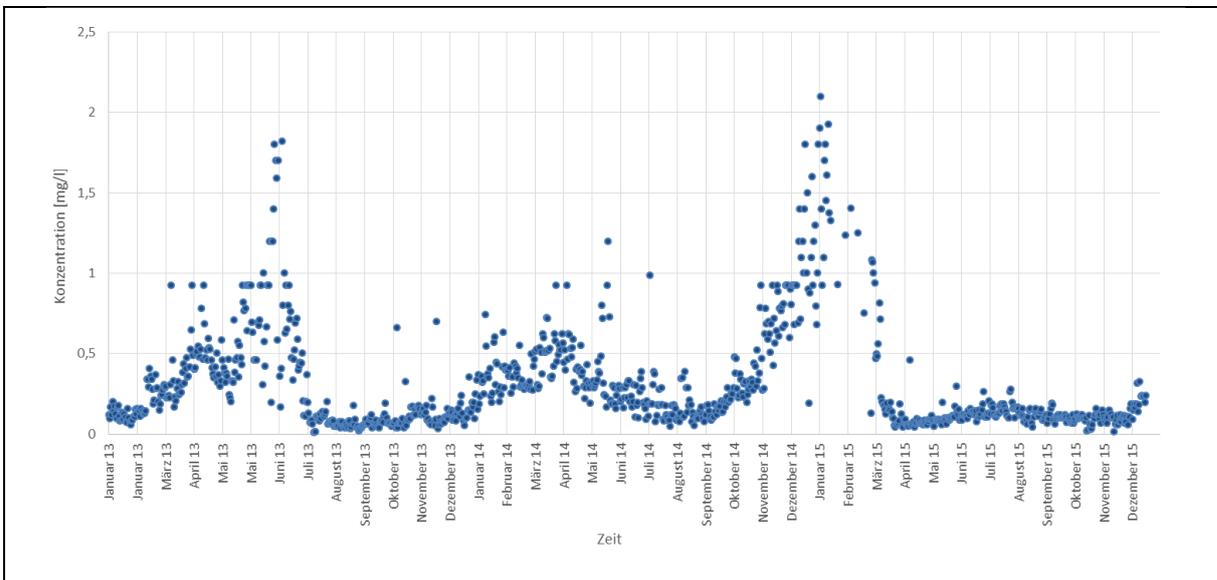


Abbildung 7: NO<sub>2</sub>-N-Konzentration im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Brühl

Des Weiteren wird die Phosphorkonzentration (P<sub>ges</sub>) im Zulauf zur Belebung und im Ablauf der Nachklärung betrachtet. In Abbildung 8 ist die P<sub>ges</sub>-Zulaufkonzentration zur Belebung dargestellt. Der 85%-Perzentilwert beträgt ca. 8,90 mg/l. Maximalwerte liegen im Bereich von 20 mg/l.

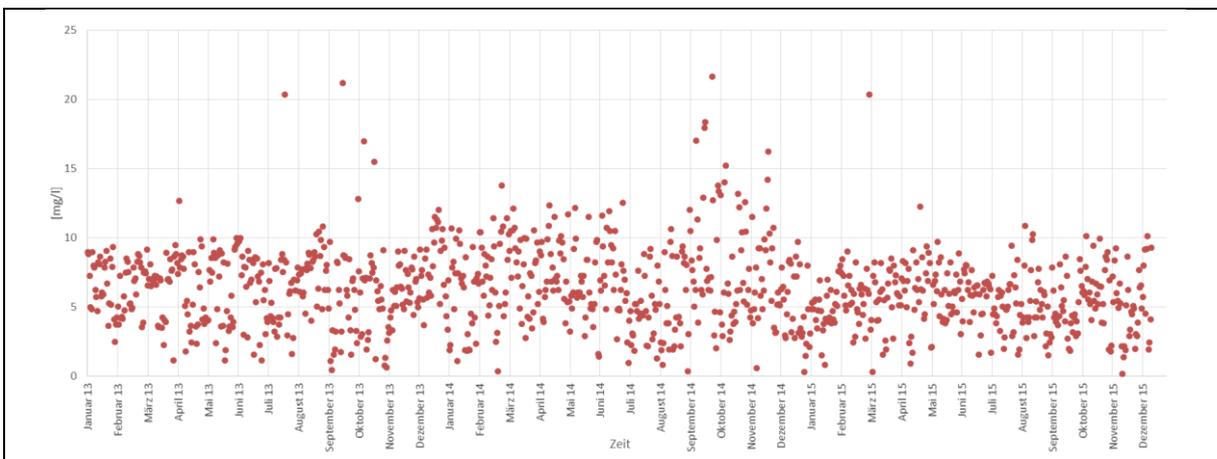


Abbildung 8: P<sub>ges</sub>-Konzentration im Zulauf zur Belebung der Kläranlage Brühl

In Abbildung 9 ist die P<sub>ges</sub>-Ablaufkonzentration der Nachklärung dargestellt. Der 85%-Perzentilwert beträgt ca. 0,90 mg/l.

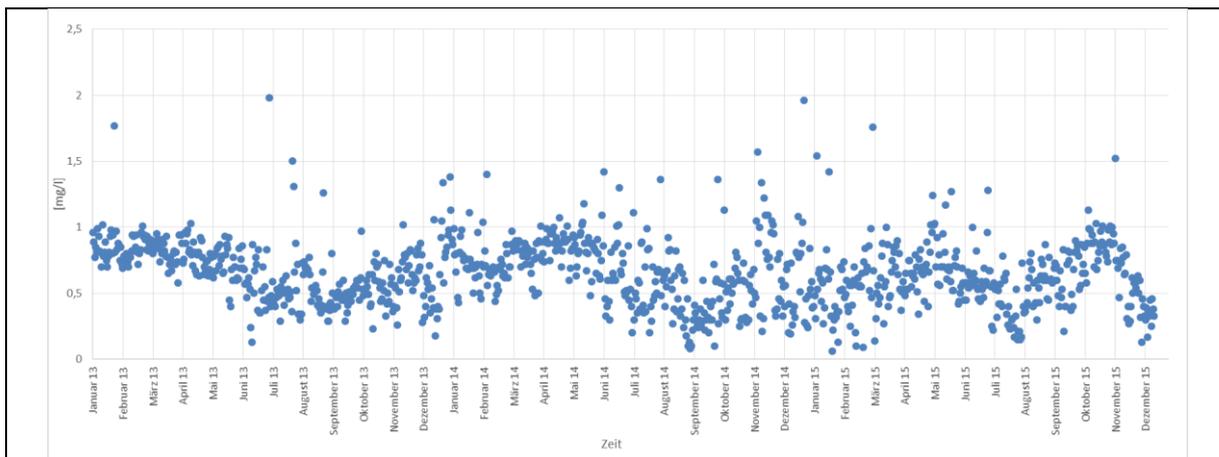


Abbildung 9:  $P_{\text{ges}}$ -Konzentration im Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Brühl

Der mittlere  $P_{\text{ges}}$ -Abbaugrad über den gesamten Betrachtungszeitraum beträgt rd. 89,4%.

## 2.4 Messergebnisse des Screenings und Monitorings

Die Ergebnisse des Screenings und Monitorings der Mikroschadstoffe im Zulauf zur Belebung und im Ablauf der Nachklärung werden entsprechend den Vorgaben des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW [KomM-NRW 2015, 2016] für Trockenwetter und Regenwetter vorgestellt, ausgewertet und diskutiert. Zusätzlich zu den Messungen der Mikroschadstoffe wurden Ozonzehrungsversuche sowie eine Untersuchung der Bildung von Bromat und Nitrosaminen durchgeführt. Die Ergebnisse der Bildung von Bromat und Nitrosaminen werden bei der Beschreibung des Ozonverfahrens in Kapitel 4.5 vorgestellt.

Für das Trockenwetter-Screening wurden an den beiden aufeinander folgenden Trockenwettertagen 19/20.09.2016 und 20/21.09.2016 jeweils 24-h-Mischproben im Zulauf zur Belebung und im Ablauf der Nachklärung genommen.

Für das Trockenwetter-Monitoring wurden an den fünf aufeinander folgenden Trockenwettertagen 25.09.2016 bis 30.09.2016 jeweils 24-h-Mischproben im Zulauf zur Belebung und im Ablauf der Nachklärung genommen.

Für das Regenwetterscreening wurden an den beiden aufeinander folgenden Tagen 24/25.10.2016 und 25/26.10.2016 jeweils 24-h-Mischproben im Zulauf zur Belebung und im Ablauf der Nachklärung genommen. Am ersten Messtag betrug die Zulaufmenge 24.646 m<sup>3</sup>/d. Am zweiten Messtag betrug die Zulaufmenge 7.028 m<sup>3</sup>/d. Die Daten des ersten Tages wurden aufgrund der Zulaufmenge von 24.646 m<sup>3</sup>/d für die Regenwetteranalyse weiter verwendet. Die Daten des zweiten Tages konnten aufgrund der geringen Zulaufmenge von 7.028 m<sup>3</sup>/d nicht für die Regenwetteranalyse weiter verwendet werden.

Die Anlage G beinhaltet das Messprogramm des Screenings und Monitorings. Die Anlage H beinhaltet den Analysebericht des Instituts IUTA vom 01.12.2016.

In der nachfolgenden Tabelle 4 wurden die auf der Kläranlage Brühl gemessenen Mikroschadstoffe den Kategorien Arzneimittel, Röntgenkontrastmittel, synthetische Süßstoffe, Korrosionsschutzmittel, Industriechemikalien, per- und polyfluorierte Chemikalien sowie

Biozide und Pflanzenschutzmittel zugeordnet. Die Stoffe des Monitorings sind gesondert gekennzeichnet.

**Tabelle 4: Kategorien der gemessenen Mikroschadstoffe**

Arzneimittel	Analgetika	S			Ibuprofen	
		S	M	H	I	Diclofenac
	Antibiotika	S	M		I	Sulfamethoxazol
		S	M		I	Clarithromycin
		S	M			Ciprofloxacin
	Betablocker	S	M			Sotalol
		S	M		I	Metoprolol
		S	M			Bisoprolol
	Blutdrucksenker	S	M			Losartan
		S	M	H		Valsartan
	Antiepileptika	S	M		I	Carbamazepin
		S				10, 11 Dihydrocarbamazepin
		S		H		Gabapentin
	Lipidsenker	S				Bezafibrate
	Antidiabetikum	S				Guanylhamstoff
Östrogene Aktivität	S					
Röntgenkontrastmittel	S		H		Amidotrizoesäure	
	S				Iomeprol	
	S				Iopamidol	
	S				Iohexol	
	S				Iopromid	
	S				Ioversol	
synthetische Süßstoff	S	M			Acesulfam K	
synthetische Duftstoffe	S				Galaxolid	
	S				Tonalid	
Korrosionsschutzmittel	S	M	H	I	1H-Benzotriazol	
	S		H		Σ 4,5-Methyl Benzotriazol	
Industriechemikalien	S				Melamin	
per- und polyfluorierte Chemikalien	S				PFBS	
	S	M			PFOS	
	S				PFBA	
	S	M			PFOA	
Biozide / Pflanzenschutzmittel	S				DEET	
	S	M			Terbutryn	
	S				Diuron	
	S				Mecoprop P	
	S				Isoproturon	

S: Screening M: Monitoring H: Hauptstoff I: Indikatorstoff

Zur Bewertung der Ablaufkonzentrationen hinsichtlich der Belastung der aquatischen Umwelt werden in den Kapiteln 4 und 5.2 die vom Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW festgelegten Bewertungskriterien verwendet. Dabei werden die Indikatorparameter gemäß Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW gesondert betrachtet. Die Indikatorparameter (I) gemäß Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW sind [KomM-NRW 2016]:

- 1H-Benzotriazol (S, M, H, I)
- Carbamazepin (S, M, I)
- Diclofenac (S, M, H, I)
- Metoprolol (S, M, I)
- Clarithromycin (S, M, I)
- Sulfamethoxazol (S, M, I)

S: Mikroschadstoff des Screenings, M: Mikroschadstoff des Monitorings, H: Hauptstoff, I: Indikatorstoff

Zur besseren Verständlichkeit wird an dieser Stelle der Auswertung der Messwerte vorgegriffen. Aus der Betrachtung der Messwerte aller Mikroschadstoffe im Ablauf der Nachklärung während des Trockenwetter screenings und –monitorings (siehe Abbildung 11) folgt, dass der Anteil der Stoffe

- Valsartan (S, M, H)
- Gabapentin (S, H)
- Diclofenac (I) (S, M, H, I)
- 1H-Benzotriazol (I) (S, M, H, I)
- Amidotrizoesäure (S, H)
- $\Sigma$  4,5-Methyl-Benzotriazol (S, M, H)

S: Mikroschadstoff des Screenings, M: Mikroschadstoff des Monitorings, I: Indikatorstoff, H: Hauptstoff

zusammen den Hauptanteil von rd. 74% ausmachen. Diese Stoffe werden im weiteren Verlauf dieses Berichts als Hauptstoffe (H) bezeichnet. Die beiden Mikroschadstoffe Diclofenac und 1H-Benzotriazol sind sowohl Indikatorparameter als auch Hauptstoff.

#### Vergleich mit anderen Messprogrammen

Um die Belastung des Abwassers der Kläranlage Brühl mit Spurenstoffen besser bewerten zu können, werden in Tabelle 5 die Mittelwerte der Zulaufkonzentration zur Kläranlage Brühl an Trockenwettertagen mit Messergebnissen anderer Kläranlagen verglichen.

**Tabelle 5: Gegenüberstellung der Zulaufkonzentration zur Kläranlage Brühl an Trockenwettertagen mit Messprogrammen anderer Kläranlagen [ng/l]**

Quelle	a	b	c	d	e	f	
Kläranlage	Brühl	Lausanne	Regensdorf	Basel	Münster-Geist	Mettingen	Bamtrup
Anzahl Messwerte	n=2 bis 7		n=5		n=2	(3 Tage)	n=5
Arzneimittel	Valsartan	31.714			6.900 ± 1900		
	Gabapentin	15.500	3.000-4.000		2.600 ± 700		
	Diclofenac	8.486		1451 ± 190	1.800 ± 500	4.300	2.500
	Ciprofloxacin	1.446	2.000-3.000			1.200	
	Metoprolol	1.286	320-800			2.500	2.200
	Clarithromycin	986	400-1.100	463 ± 208		1.100	54
	Sotalol	769	170-400				520
	Carbamazepin	766	200-360	523 ± 130	510 ± 170	270	460
	Sulfamethoxazol	526	90-420	338 ± 256	630 ± 180	990	50
	590						
Korrosionsschutzmittel	1H-Benzotriazol	11.029	7.000-10.000	10.367 ± 2.008	7.300 ± 1.800	12.500	7.400
	Amidotrizesäure	5.650	300-400	250 ± 466		10.400	1.600
Röntgenkontrastmittel	Iopromid	1.215	5.000-8.000		24.000 ± 9.000	205.000	740
	Ibuprofen	26.000				24.500	50
Korrosionsschutzmittel	Σ 4,5-Methyl Benzotriazol	5.300				1.650	
synthetische Süßstoffe	Acesulfam K	26.529			38.000 ± 10.000	20	430
Biozide / Pflanzenschutzmittel	Terbutryn	105	20-40	33 ± 17		350	50
180							

Bemerkungen: a: Margot et al. 2011 b: Abegglen et al. 2009 c: Fux et al. 2015 d: Maus et al. 2016 e: Varnhorn 2015 f: Wärmer et al. 2015  
: hohe Zulaufkonzentration

Im Zulauf zur Kläranlage Brühl ist die Konzentration an Arzneimitteln und Röntgenkontrastmitteln deutlich erhöht. Dies ist besonders bei Valsartan (Faktor 4,6), Gabapentin (Faktor 5,1), Diclofenac (Faktor 3,4), Clarithromycin (Faktor 1,6) und Amidotrizesäure (Faktor 2,18) festzustellen.

#### Auswertung des Trockenwetterscreenings am 19/20.09.2016 und 20/21.09.2016

Die gemessenen Konzentrationen der Mikroschadstoffe im Zulauf zur Belebung und im Ablauf der Nachklärung während des Screenings an Trockenwettertagen am 19/20.09.2016 und 20/21.09.2016 sowie die Anteile der Monitoringstoffe, Hauptstoffe und Indikatorstoffe sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die Konzentration der Stoffe 10,11 Dihydrocarbamazepin, Ibuprofen, Isoproturon, sowie das Röntgenkontrastmittel Ioversol ist im Ablauf der Nachklärung unterhalb der Bestimmungsgrenze des Flüssigchromatographen. Die Konzentration der Stoffe PFBS, Guanylharnstoff und Melamin nehmen an beiden Trockenwettermesstagen zwischen dem Zulauf zur Belebung und dem Ablauf der Nachklärung zu. Dies trifft ebenfalls für die Stoffe Diuron, Terbutryn, Amidotrizesäure, lomeprol, Iopamidol am 19/20.09.2016 und für Carbamazepin, Metoprolol, Sotalol sowie PFBA am 20/21.09.2016 zu.

**Tabelle 6: Zu- und Ablaufkonzentration sowie Elimination des Trockenwetterscreenings**

Probenamestelle			c <sub>zu</sub> Belebung	c <sub>ab</sub> NK	η Belebung	c <sub>zu</sub> Belebung	c <sub>ab</sub> NK	η Belebung
Probenahmedatum			19.-20.09.2016	19.-20.09.2016	19.-20.09.2016	20.-21.09.2016	20.-21.09.2016	20.-21.09.2016
Bezeichnung IUTA	Einheit		M 160920/06	M 160920/08	%	M 160921/19	M 160921/20	%
10,11 Dihydrocarbamazepin	ng/L	S	< 30	< 30	0,00	< 30	< 30	0,00
1H-Benzotriazol	ng/L	S M H I	14.000	4.500	67,86	16.000	4.900	69,38
Bezafibrate	ng/L	S	1.600	210	86,88	1.200	220	81,67
Bisoprolol	ng/L	S M	1.500	1.100	26,67	1.600	1.300	18,75
Carbamazepin	ng/L	S M I	700	600	14,29	580	590	-1,72
Ciprofloxacin	ng/L	S M	1.900	97	94,89	780	120	84,62
Clarithromycin	ng/L	S M I	530	170	67,92	340	230	32,35
DEET	ng/L	S	2.200	430	80,45	2.200	460	79,09
Diclofenac	ng/L	S M H I	6.500	4.600	29,23	5.500	5.000	9,09
Diuron	ng/L	S	42	99	-135,71	120	100	16,67
Ibuprofen	ng/L	S	26.000	< 10	99,97	26.000	< 10	99,97
Isoproturone	ng/L	S	< 30	< 30	0,00	< 30	< 30	0,00
Losartan	ng/L	S M	2.100	380	81,90	1.900	460	75,79
Mecoprop P	ng/L	S	210	42	80,00	150	53	64,67
Metoprolol	ng/L	S M I	1.400	1.100	21,43	1.200	1.400	-16,67
Sotalol	ng/L	S M	930	720	22,58	800	840	-5,00
Sulfamethoxazol	ng/L	S M I	490	290	40,82	490	300	38,78
Terbutryn	ng/L	S M	73	140	-91,78	360	140	61,11
Valsartan	ng/L	S M H	36.000	11.000	69,44	35.000	12.000	65,71
Σ 4,5-Methyl Benzotriazol	ng/L	S H	5.200	3.500	32,69	5.400	3.800	29,63
Acesulfam K	ng/L	S M	29.000	540	98,14	31.000	540	98,26
Amidotrizoessäure	ng/L	S H	3.700	4.400	-18,92	7.600	4.800	36,84
Iohexol	ng/L	S	5.300	360	93,21	2.600	790	69,62
Iomeprol	ng/L	S	300	580	-93,33	6.900	3.000	56,52
Iopamidol	ng/L	S	380	550	-44,74	7.200	2.900	59,72
Iopromide	ng/L	S	230	< 30	86,96	2.200	270	87,73
Ioversol	ng/L	S	< 30	< 30	0,00	< 30	< 30	0,00
PFBS	ng/L	S	47	150	-219,15	39	150	-284,62
PFOA	ng/L	S M	< 10	< 10	0,00	< 10	10	0,00
PFBA	ng/L	S	80	23	71,25	14	20	-42,86
PFOS	ng/L	S M	220	55	75,00	92	60	34,78
Gabapentin	ng/L	S H	16.000	10.000	37,50	15.000	11.000	26,67
Gunaylharnstoff	ng/L	S	190	1.100	-478,95	150	1.100	-633,33
Melamin	ng/L	S	890	1.600	-79,78	910	2.400	-163,74
Östrogene Aktivität	ngEEQ/L	S	18	0,082	99,54	15	0,066	99,56
Galaxolid	ng/L	S	582	700	-20,27	1.200	620	48,33
Tonalid	ng/L	S	110	78	29,09	180	75	58,33
<b>Sume Mikroschadstoffe</b>			<b>158.522</b>	<b>49.254</b>	<b>68,9</b>	<b>174.820</b>	<b>59.748</b>	<b>65,8</b>
<b>davon Monitoringstoffe</b>			<b>95.352</b>	<b>25.302</b>	<b>73,5</b>	<b>95.651</b>	<b>27.890</b>	<b>70,8</b>
<b>davon Hauptstoffe</b>			<b>81.400</b>	<b>38.000</b>	<b>53,3</b>	<b>84.500</b>	<b>41.500</b>	<b>50,9</b>
<b>davon Indikatorstoffe</b>			<b>23.620</b>	<b>11.260</b>	<b>52,3</b>	<b>24.110</b>	<b>12.420</b>	<b>48,5</b>

S: Screening M: Monitoring H: Hauptstoff I: Indikatorstoff

In Tabelle 7 sind für die Summe der gemessenen Mikroschadstoffe die Zu- und Ablaufkonzentrationen sowie die Elimination der Belebung während des Trockenwetterscreenings zusammengestellt. Zudem sind für die Monitoringstoffe, die Hauptstoffe und die Indikatorstoffen die Anteile an der Summe der gemessenen Mikroschadstoffe im Zu- und Ablauf der Belebung sowie deren jeweilige Elimination in der Biologie enthalten.

**Tabelle 7: Zusammenstellung der Messergebnisse des Trockenwetterscreenings**

	Einheit	19/20.09.2016	20/21.09.2016
Substanzen des TW-Screenings			
Summe $c_{zu}$ Belebung	ng/l	158.522	174.820
Summe $c_{ab}$ Nachklärung	ng/l	49.254	59.748
$\eta$ Belebung	%	68,9	65,8
davon Monitoringstoffe			
Summe $c_{zu}$ Belebung	ng/l	95.353	95.652
Summe $c_{zu}$ Belebung, anteilig	%	60,2	54,7
Summe $c_{ab}$ Nachklärung	ng/l	25.302	27.890
Summe $c_{ab}$ Nachklärung, anteilig	%	51,4	46,7
$\eta$ Belebung	%	73,5	70,8
davon Hauptstoffe			
Summe $c_{zu}$ Belebung	ng/l	81.400	84.500
Summe $c_{zu}$ Belebung, anteilig	%	51,3	48,3
Summe $c_{ab}$ Nachklärung	ng/l	38.000	41.500
Summe $c_{ab}$ Nachklärung, anteilig	%	77,2	69,5
$\eta$ Belebung	%	53,3	50,9
davon Indikatorstoffe			
Summe $c_{zu}$ Belebung	ng/l	23.620	24.110
Summe $c_{zu}$ Belebung, anteilig	%	14,9	13,8
Summe $c_{ab}$ Nachklärung	ng/l	11.260	12.420
Summe $c_{ab}$ Nachklärung, anteilig	%	22,9	20,8
$\eta$ Belebung	%	52,3	48,5

Der Anteil der Indikatorparameter an der Summe der gemessenen Mikroschadstoffe ist im Ablauf der Nachklärung mit 20,8% bis 22,9% im Vergleich zu dem Anteil der Hauptstoffe an der Summe der gemessenen Mikroschadstoffe mit 69,5% bis 77,2% gering. Die Elimination der Indikator- und Hauptstoffe in der Belebung liegt an beiden Tagen bei ca. 50%.

Die Messergebnisse der endokrinen Belastung des Abwassers und die Reinigungsleistung der Belebung gemessen anhand der Östrogenitätsmessung in der Einheit Estradiol-Equivalent (EEQ in [ng/l]) sind in Tabelle 8 enthalten.

**Tabelle 8: Elimination der Östrogenaktivität gemessen als EEQ**

	$c_{zu}$ Belebung	$c_{ab}$ Nachklärung	$\eta$ Belebung	Bewertungskriterium
Einheit	[ngEEQ/l]	[ngEEQ/l]	[%]	[ng/l]
19/20.09.2016	18	0,082	99,5	0,4
20/21.09.2016	15	0,066	99,6	0,4

Durch die Belebung wird ein Abbau der Östrogenaktivität von 99,50% erreicht, so dass von einer weiteren Untersuchung im Monitoring abgesehen wurde.

#### Auswertung des Trockenwetterscreenings- und Monitorings

Aus den vorhandenen Messwerten des Trockenwetterscreenings- und Monitorings wurden für den Zulauf in die Belebung und den Ablauf aus der Nachklärung für jeden Mikroschadstoff die Mittelwerte des Trockenwetterscreenings, die Mittelwerte des Trockenwettermonitorings und die Mittelwerte des Trockenwetterscreenings- und monitorings gebildet, um die Auswertung auf Grundlage der höchsten Datendichte durchzuführen.

Beim Trockenwetterscreening erfolgte die Mittelwertbildung aus jeweils 2 Messwerten.

Beim Trockenwettermonitoring erfolgte die Mittelwertbildung aus jeweils 5 Messwerten.

Bei der Zusammenfassung der Daten des Trockenwetterscreenings- und monitorings erfolgte die Mittelwertbildung für die Mikroschadstoffe des Trockenwetterscreenings, die im Monitoringmessprogramm enthalten sind, aus den 2 Messwerten des Trockenwetterscreenings und den 5 Messwerten des Trockenwettermonitorings. Für die Mikroschadstoffe des Trockenwetterscreenings, die nicht im Monitoringmessprogramm enthalten sind, erfolgte die Mittelwertbildung aus den 2 Messwerten des Trockenwetterscreenings.

Die Ergebnisse der Mittelwerte für das Trockenwetterscreening, das Trockenwettermonitoring und das Trockenwetterscreening- und monitoring sind für den Zulauf zur Belebung, den Ablauf der Nachklärung mit dem Eliminationsgrad für das Trockenwetterscreening- und monitoring in der Tabelle 9 zusammengestellt.

Für folgende Stoffe ist eine Zunahme der Konzentration zwischen Zulauf Belebung und Ablauf Nachklärung festzustellen:

- Melamin
- Metoprolol
- Guanylharnstoff
- Carbamazepin
- PFBS
- Diuron
- 10,11- Dihydrocarbamazepin
- Isoproturon
- Ioversol
- PFBA
- PFOA

**Tabelle 9: Zu- und Ablaufkonzentration des Trockenwetter screenings, -monitorings und des Trockenwetter screenings und -monitorings**

			Trockenwetter screening		Trockenwetter monitoring		Trockenwetter screening und -monitoring		
			Mittelwerte		Mittelwerte		Mittelwerte		
			c <sub>zu</sub> Belegung	c <sub>ab</sub> NK	c <sub>zu</sub> Belegung	c <sub>ab</sub> NK	c <sub>zu</sub> Belegung	c <sub>ab</sub> NK	η Belegung
			ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	%	
Arzneimittel	Valsartan	S M H	35.500	11.500	30.200	14.400	31.714	13.571	57,2
	Gabapentin	S H	15.500	10.500			15.500	10.500	32,3
	Diclofenac	S M H I	6.000	4.800	9.480	7.760	8.486	6.914	18,5
	Bisoprolol	S M	1.550	1.200	1.200	1.200	1.300	1.200	7,7
	Metoprolol	S M I	1.300	1.250	1.280	1.320	1.286	1.300	-1,1
	Guanylharzstoff	S	170	1.100			170	1.100	-547,1
	Sotalol	S M	865	780	730	728	769	743	3,3
	Carbamazepin	S M I	640	595	816	940	766	841	-9,9
	Losartan	S M	2.000	420	1.960	462	1.971	450	77,2
	Bezafibrate	S	1.400	215			1.400	215	84,6
	Ciprofloxacin	S M	1.340	109	1.488	119	1.446	116	92,0
	Sulfamethoxazol	S M I	490	295	540	370	526	349	33,7
	Clarithromycin	S M I	435	200	1.206	534	986	439	55,5
	10,11 Dihydrocarbamazepin	S	30	30			30	30	0,0
Ibuprofen	S	26.000	10			26.000	10	100,0	
Röntgenkontrastmittel	Amidotrizoensäure	S H	5.650	4.600			5.650	4.600	18,6
	Iomeprol	S	3.600	1.790			3.600	1.790	50,3
	Iopamidol	S	3.790	1.725			3.790	1.725	54,5
	Iohexol	S	3.950	575			3.950	575	85,4
	Iopromid	S	1.215	150			1.215	150	87,7
	Ioversol	S	30	30			30	30	0,0
synthetische Süßstoff	Acesulfam K	S M	30.000	540	25.140	368	26.529	417	98,4
synthetische Duftstoffe	Galaxolid	S	891	660			891	660	25,9
	Tonalid	S	145	77			145	77	47,2
Korrosionsschutzmittel	1H-Benzotriazol	S M H I	15.000	4.700	9.440	3.340	11.029	3.729	66,2
	Σ 4,5-Methyl Benzotriazol	S H	5.300	3.650			5.300	3.650	31,1
Industriechemikalien	Melamin	S	900	2.000			900	2.000	-122,2
per- und polyfluorierte Chemikalien	PFBS	S	43	150			43	150	-248,8
	PFOS	S M	156	58	108	70	122	66	45,6
	PFBA	S	47	22			47	22	54,3
	PFOA	S M	10	10	10	13	10	11	-5,7
Biozide / Pflanzenschutzmittel	DEET	S	2.200	445			2.200	445	79,8
	Terbutryn	S M	217	140	60	71	105	90	13,6
	Diuron	S	81	100			81	100	-22,8
	Mecoprop P	S	180	48			180	48	73,6
	Isoproturon	S	30	30			30	30	0,0
Östrogene Aktivität	S	17	0,074			17	0,074	100	
<b>Summe Mikroschadstoffe</b>			<b>166.671</b>	<b>54.501</b>	<b>83.658</b>	<b>31.694</b>	<b>158.211</b>	<b>58.141</b>	<b>63,3</b>
davon Monitoringstoffe			<b>95.503</b>	<b>26.596</b>	<b>83.658</b>	<b>31.694</b>	<b>87.042</b>	<b>30.236</b>	<b>65,3</b>
davon Hauptstoffe			<b>82.950</b>	<b>39.750</b>	<b>49.120</b>	<b>25.500</b>	<b>77.679</b>	<b>42.964</b>	<b>44,7</b>
davon Indikatorstoffe			<b>23.865</b>	<b>11.840</b>	<b>22.762</b>	<b>14.264</b>	<b>23.077</b>	<b>13.571</b>	<b>41,2</b>

S: Screening M: Monitoring H: Hauptstoff I: Indikatorstoff

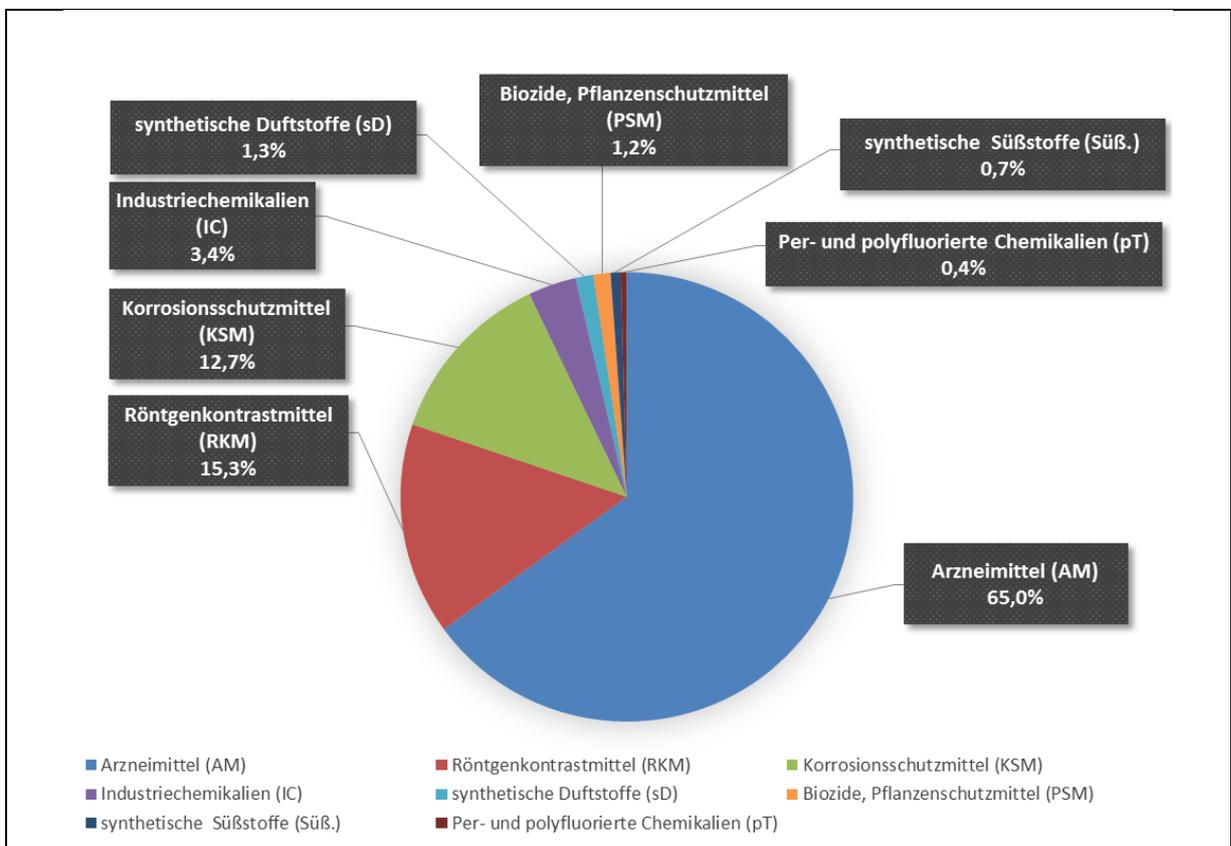
In Tabelle 10 sind die Summen der Mittelwerte der Konzentrationen des Trockenwetter screenings- und monitorings im Zulauf zur Belegung und im Ablauf der Nachklärung dargestellt. Die Summen aller gemessenen Mikroschadstoffe, der Monitoringstoffe, der Hauptstoffe und der Indikatorstoffe sind getrennt ausgewiesen.

**Tabelle 10: Elimination der Mikroschadstoffe in der Belegung**

	c <sub>zu</sub> Belegung ng/l	Anteil c <sub>zu</sub> Belegung %	Summe c <sub>ab</sub> NK ng/l	Anteil c <sub>ab</sub> NK %	η Belegung %
Summe Mikroschadstoffe	158.211	100,0	58.141	100,0	63,3
davon Monitoringstoffe	87.042	55,0	30.236	52,0	65,3
davon Hauptstoffe	77.679	49,1	42.964	73,9	44,7
davon Indikatorstoffe	23.077	14,6	13.571	23,3	41,2

In der Belegung wird eine Elimination aller Mikroschadstoffe von 63,2% erreicht. Die Hauptstoffe werden zu 44,7% und die Indikatorstoffe zu 41,2% in der Belegung eliminiert.

In der nachfolgenden Abbildung 10 ist die prozentuale Aufteilung der Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung auf Grundlage der Mittelwerte der Mikroschadstoffe für das Trockenwetterscreening und –monitoring nach Kategorien dargestellt.



**Abbildung 10: Aufteilung der Mikroschadstoffkonzentration im Ablauf der Nachklärung nach Kategorien, gesamt: 58,1 µg/l**

Im Ablauf der Nachklärung haben die Arzneimittel und Röntgenkontrastmittel einen Anteil von 80,3% an den insgesamt gemessenen Mikroschadstoffen.

Die prozentuale Aufteilung der Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung auf Grundlage der Mittelwerte der Mikroschadstoffe für das Trockenwetterscreening und –monitoring der gemessenen Mikroschadstoffe ist in Abbildung 11 dargestellt.

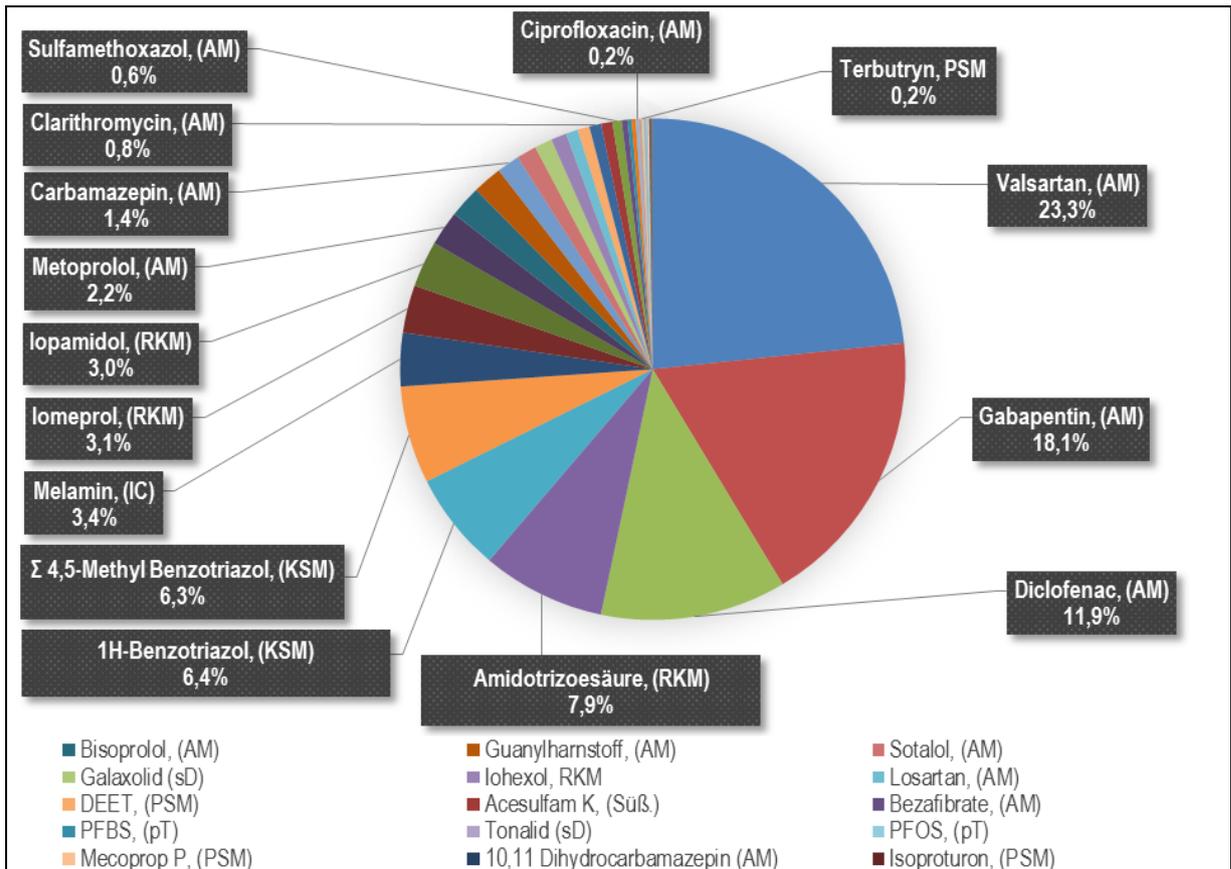


Abbildung 11: Aufteilung der Mikroschadstoffkonzentration im Ablauf Nachklärung, gesamt: 58,1 µg/l

Die 6 Hauptstoffe Valsartan, Gabapentin, Diclofenac, Amidotrizoesäure, 1H-Benzotriazol und Σ 4,5-Methyl-Benzotriazol haben einen Anteil von 73,9% an allen gemessenen Mikroschadstoffen im Ablauf der Nachklärung.

#### Auswertung des Regenwetterscreenings

Für das Regenwetterscreening wurde die 24h-Mischprobe vom 24./25.10.2016 ausgewertet. In Tabelle 11 sind die Konzentrationen der gemessenen Mikroschadstoffe und die Eliminationsraten in der Belebung dargestellt. Im Gegensatz zum Trockenwetterscreening liegt bei einer Vielzahl der gemessenen Mikroschadstoffe eine negative Eliminationsrate vor. Diese negativen Eliminationsraten sind überwiegend auf den mehrstündigen Weg des Abwassers vom Zulauf zur Belebung bis zum Ablauf der Nachklärung zurückzuführen, der bei der Messkampagne nicht berücksichtigt wurde.

**Tabelle 11: Zu- und Ablaufkonzentration sowie Elimination des Regenwetterscreenings**

Probennamestelle		c <sub>zu</sub> Belegung	c <sub>ab</sub> NK	η Belegung
Probenahmedatum		24.-25. 10.2016	24.-25. 10.2016	24.-25. 10.2016
Bezeichnung IUTA		[ng/l]	[ng/l]	%
10,11 Dihydrocarbamazepin	S	< 30	< 30	0,0
1H-Benzotriazol	S M H I	4.600	3.300	28,3
Bezafibrate	S	540	330	38,9
Bisoprolol	S M	510	680	-33,3
Carbamazepin	S M I	310	460	-48,4
Ciprofloxacin	S M	410	57	86,1
Clarithromycin	S M I	370	430	-16,2
DEET	S	590	390	33,9
Diclofenac	S M H I	3.100	3.600	-16,1
Diuron	S	68	55	19,1
Ibuprofen	S	14.000	< 10	99,9
Isoproturone	S	95	59	37,9
Losartan	S M	670	600	10,4
Mecoprop P	S	35	36	-2,9
Metoprolol	S M I	560	810	-44,6
Sotalol	S M	280	350	-25,0
Sulfamethoxazol	S M I	250	220	12,0
Terbutryn	S M	53	48	9,4
Valsartan	S M H	17.000	19.000	-11,8
Σ 4,5-Methyl Benzotriazol	S H	1.200	1.500	-25,0
Acesulfam K	S M	21.000	1.100	94,8
Amidotrizoensäure	S H	1.900	3.500	-84,2
Iohexol	S	3.300	1.200	63,6
Iomeprol	S	2.600	1.500	42,3
Iopamidol	S	2.700	1.600	40,7
Iopromide	S	53	34	35,8
Ioversol	S	< 30	< 30	0,0
PFBS	S	< 10	18	-80,0
PFOA	S M	< 10	10	0,0
PFBA	S	19	22	-15,8
PFOS	S M	32	80	-150,0
Gabapentin	S H	5.500	6.000	-9,1
Gunaylhamstoff	S	260	2.900	-1015,4
Melamin	S	230	1.200	-421,7
Östrogene Aktivität	S	0,210	0,018	91,4
Galaxolid	S	1.200	610	49,2
Tonalid	S	110	77	30,0
Sume Mikroschadstoffe		83.625	51.846	75,6
davon Monitoringstoffe		49.155	30.745	74,5
davon Hauptstoffe		33.300	36.900	-21,5
davon Indikatorstoffe		9.190	8.820	8,0

S: Screening M: Monitoring H: Hauptstoff I: Indikatorstoff

In Tabelle 12 sind die Summen der Konzentrationen der 24-h-Mischproben des Regenwetterscreenings im Zulauf zur Belegung und im Ablauf der Nachklärung für die gemessenen Mikroschadstoffe sowie für die Monitoringstoffe, Hauptstoffe und Indikatorstoffe zusammengestellt.

**Tabelle 12: Zusammenstellung der Messergebnisse des Regenwettercreenings**

	Einheit	24.-25. 10.2016
Durchfluss	[m³/d]	24.646
Substanzen des RW-Screenings		
Summe c <sub>zu</sub> Belebung	ng/l	83.625
Summe c <sub>ab</sub> Nachklärung	ng/l	51.846
η Belebung	%	38,0
davon Monitoringstoffe		
Summe c <sub>zu</sub> Belebung	ng/l	49.155
Summe c <sub>zu</sub> Belebung, anteilig	%	58,8
Summe c <sub>ab</sub> Nachklärung	ng/l	30.745
Summe c <sub>ab</sub> Nachklärung, anteilig	%	59,3
η Belebung	%	37,5
davon Hauptstoffe		
Summe c <sub>zu</sub> Belebung	ng/l	33.300
Summe c <sub>zu</sub> Belebung, anteilig	%	39,8
Summe c <sub>ab</sub> Nachklärung	ng/l	36.900
Summe c <sub>ab</sub> Nachklärung, anteilig	%	71,2
η Belebung	%	-10,8
davon Indikatorstoffe		
Summe c <sub>zu</sub> Belebung	ng/l	9.190
Summe c <sub>zu</sub> Belebung, anteilig	%	11,0
Summe c <sub>ab</sub> Nachklärung	ng/l	8.820
Summe c <sub>ab</sub> Nachklärung, anteilig	%	17,0
η Belebung	%	4,0

Die Konzentration der gemessenen Mikroschadstoffe im Ablauf der Nachklärung bei Regenwetter in Höhe von 51,846 µg/l liegt um 10,8% niedriger als bei Trockenwetter in Höhe von 58,140 µg/l. Die Verringerung der Summe der Konzentration der gemessenen Mikroschadstoffe im Ablauf der Nachklärung ist auf den Anteil an Regenwasser im Abwasser zurückzuführen.

### Zusammenfassung

Die Zulaufkonzentration der Mikroschadstoffe zur Belebung ist auf der Kläranlage Brühl im Vergleich mit den Ergebnissen auf den Kläranlagen Lausanne, Regensdorf, Basel, Münster-Geist, Mettingen und Barntrup sehr hoch, Valsartan (Faktor 4,6), Gabapentin (Faktor 5,1), Diclofenac (Faktor 3,4), Clarithromycin (Faktor 1,6) und Amidotrizoesäure (Faktor 2,18), siehe Tabelle 5.

Bei einer geschätzten mittleren Jahreskonzentration der im Zulauf zur Belebung beim Screening gemessenen Mikroschadstoffe von 125 µg/l berechnet sich die der Kläranlage Brühl zugeführte Jahresfracht zu:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Mikroschadstoffe}} &= 125 \text{ mg/m}^3 \times 3.600.000 \text{ m}^3/\text{a} / 1.000.000 \text{ mg/kg} \\
 &= \text{ca. } 450 \text{ kg/a}
 \end{aligned}$$

Bei einer geschätzten mittleren Jahreskonzentration der im Ablauf der Nachklärung beim Screening gemessenen Mikroschadstoffe von 55 µg/l berechnet sich die aus der Kläranlage Brühl in den Palmersdorfer Bach und in den Rhein eingeleitete Jahresfracht zu:

$$\begin{aligned} m_{\text{Mikroschadstoffe}} &= 55 \text{ mg/m}^3 \times 3.600.000 \text{ m}^3/\text{a} / 1.000.000 \text{ mg/kg} \\ &= \text{ca. } 200 \text{ kg/a} \end{aligned}$$

Der Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Brühl ist besonders mit den 6 Hauptstoffen Valsartan, Gabapentin, Diclofenac, 1H-Benzotriazol, Amidotrizoesäure und  $\Sigma$  4,5-Methyl-Benzotriazol belastet, deren Herkunft auf die Privathaushalte, das Krankenhaus, die Röntgenpraxis, Altenwohnheime und die Eisenindustrie zurückzuführen ist.

Um eine Reduzierung der Ablaufkonzentrationen / der Einleitungsfracht der Mikroschadstoffe in den Palmersdorfer Bach bzw. den Rhein entsprechend den Vorgaben des Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW zu erreichen, sind weitergehende Maßnahmen erforderlich.

### 3 Stand der Forschung und der Technik

Das Kapitel 3 beinhaltet die theoretischen Grundlagen und mögliche Verfahrensausführungen zur nachgeschalteten Elimination von Mikroschadstoffen auf Kläranlagen sowie einen Auszug von großtechnisch umgesetzten Verfahren zur Elimination von Mikroschadstoffen.

#### 3.1 Membranverfahren

##### Theorie

Eine Membran besteht aus semipermeablem Material, welches nicht für alle Inhaltsstoffe des Zulaufstroms (Feed) passierbar ist. In Abbildung 12 ist das Schema von Membranverfahren dargestellt. Der Feed wird durch die Membranfiltration in Permeat und Retentat aufgespaltet. Der benötigte Druck wird durch Pumpen erzeugt. Membranverfahren können nach Triebkraft, Trennmechanismus, Trenngrenze und Aggregatzustand des Feed unterteilt werden. Bei den Membranverfahren Mikrofiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose (RO) ist die Druckdifferenz die Triebkraft. Zu den Trennmechanismen zählen die Siebung, die Deckschichtfiltration, die Sorption und die Diffusion [Melin et al. 2007]. Die RO wird in dieser Machbarkeitsstudie aufgrund eines sehr hohen Energieverbrauchs und einer sehr aufwendigen Vorreinigung nicht betrachtet. Bei der RO liegt der Energieverbrauch bei ca. 0,63 kWh/m<sup>3</sup> ohne Berücksichtigung der Vorbehandlung und der Retentatbehandlung [Houtte et al. 2008].

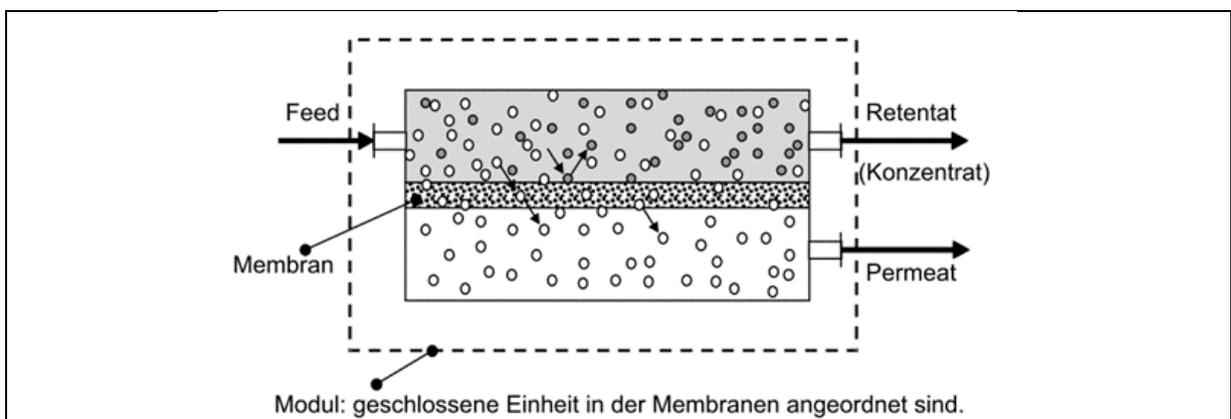


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Trennverhaltens von Membranverfahren [Melin et al. 2007]

Die Trenngrenze der Membranverfahren und die jeweilig benötigte transmembrane Druckdifferenz ist in Abbildung 13 dargestellt. Je geringer die Molekulargröße der zu entfernenden Abwasserinhaltsstoffe ist, desto niedriger ist die Trenngrenze und desto höher ist der benötigte Druck. Zusätzlich zu der Trenngrenze ist noch die Abtrennleistung hinsichtlich des Molekulargewichts [g/mol] zu betrachten. Während bei der MF und der UF die Abtrennung von AFS und Kolloiden durch Siebung und Deckschichtfiltration erfolgt, werden bei der NF aufgrund der niedrigen Trenngrenze von 0,01 µm bis 0,001 µm ebenfalls Moleküle mit einer Molekulargröße ab 200 g/mol abgetrennt [Melin et al. 2007].

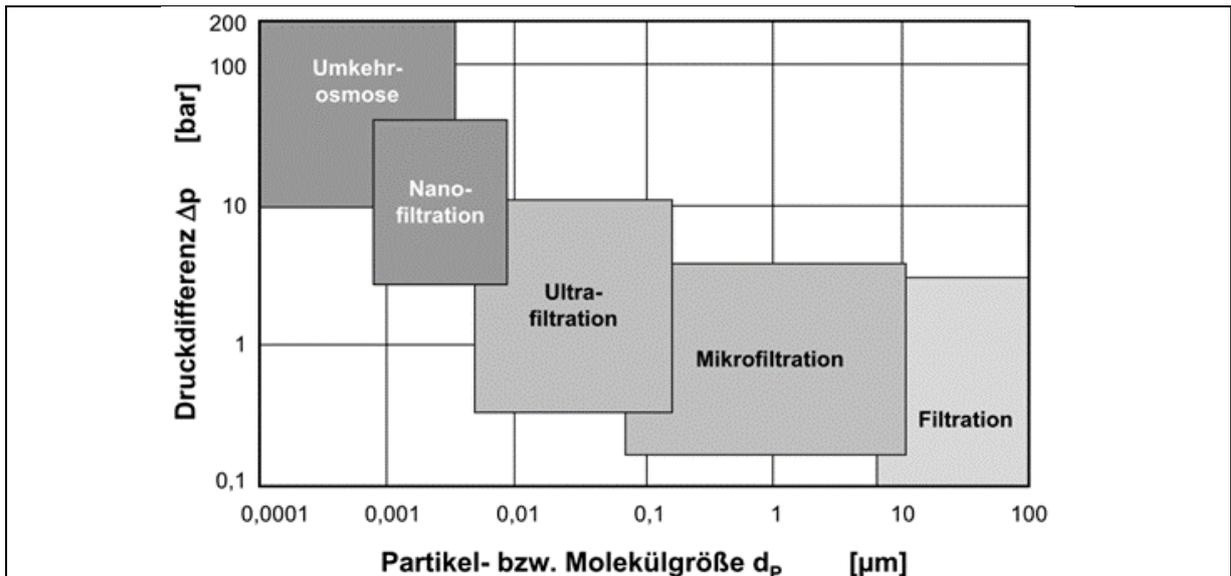


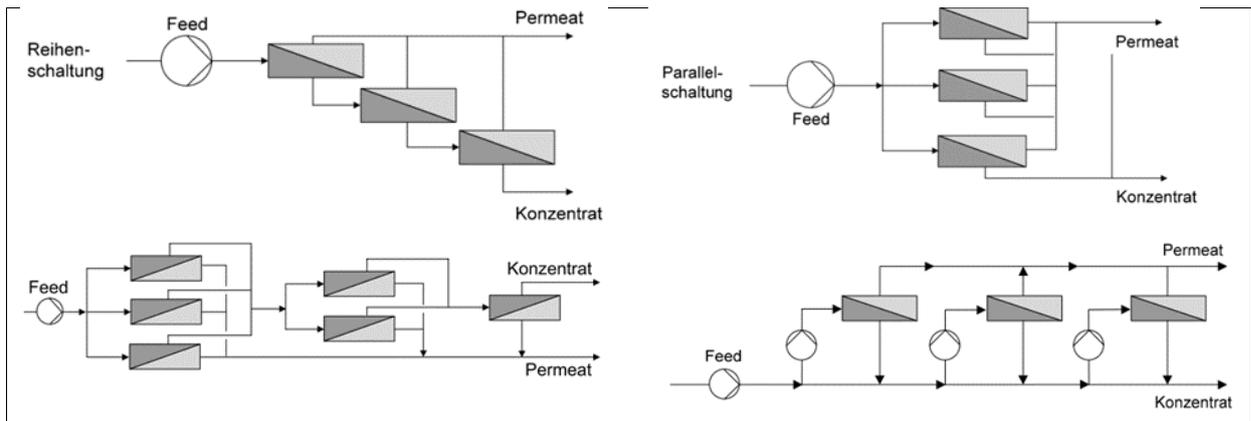
Abbildung 13: Transmembrane Druckdifferenz und Trenngrenze verschiedener Filtrationsverfahren [Melin et al. 2007]

Es wird zwischen Porenmembranen und dichten Membranen (Lösungs-Diffusions-Membranen) unterschieden. Membrane können polare oder unpolare Oberflächeneigenschaften aufweisen. Zur Beurteilung von Membranverfahren werden die Selektivität und der erreichbare Permeatfluss  $[\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  verwendet [Melin et al. 2007].

Die Mikrofiltration (MF) und die Ultrafiltration (UF) zählen zu den Membranfiltern mit Porenmembranen. Diese werden zur Feststoffabtrennung eingesetzt. Die dichte Membran der NF erreicht die Abtrennung von Molekülen mit Molekulargewicht größer 200 bis 300 g/mol sowie mehrwertiger Ionen [Melin et al. 2007]. Nach Pinnekamp et al. 2006 ist durch die NF eine Abtrennung von Abwasserinhaltsstoffen größer 200 g/mol möglich [Pinnekamp et al. 2006]. Die RO erfolgt über eine Lösungs-Diffusions-Membran, welche porenfrei ist. Annähernd alle gelösten Stoffe werden abgetrennt [Melin et al. 2007]. Mikroschadstoffe können erst mit dichten NF-Membranen gezielt abgetrennt werden [Sneyder et al. 2007]. Bei der MF und der UF ist die Trenngrenze mit größer  $0,01 \mu\text{m}$  zur Abtrennung der Moleküle nicht ausreichend [Melin et al. 2007].

#### Verfahrensvarianten der Membranfiltration

Die Anlagenkonfiguration der Membranverfahren kann in Reihenschaltung, Parallelschaltung, als Tannenbaumstruktur oder als Rezirkulationskreislauf (Feed and Bleed) erfolgen. In Abbildung 14 sind diese als Schema dargestellt. Die „Feed and Bleed“-Betriebsführung ist bei unregelmäßigem Feed-Strom vorzusehen. Liegt ein konstanter Feed-Strom vor, ist keine Rezirkulation vorzusehen [Melin et al. 2007].



**Abbildung 14: Anlagenkonfiguration der Membranfiltration (oben links: Reihenschaltung, oben rechts: Parallelschaltung, unten links: Tannenbaumstruktur, unten rechts: interner Rezykulationskreislauf „Feed and Bleed“) [Melin et al. 2007]**

Der Energiebedarf der NF liegt nach den Bemessungswerten der Modellrechnung von Ivashechkin 2006 im Bereich von  $0,36 \text{ kWh/m}^3$  bis  $0,37 \text{ kWh/m}^3$  [Ivashechkin 2006]. Eilers 2000 gibt einen abwasserspezifischen Energiebedarf von  $1,50 \text{ kWh/m}^3$  an [Eilers 2000]. Somit liegt der abwasserspezifische Energiebedarf der NF um den Faktor 2 bis 5 über dem abwasserspezifischen Energiebedarf der konventionellen Abwasserbehandlung<sup>6</sup>. Dabei sind noch nicht die Vorbehandlung durch z.B. eine MF und noch nicht die Konzentratbehandlung berücksichtigt. Aufgrund des hohen Energiebedarfs sind dichte Membranverfahren nicht zur wirtschaftlichen Entfernung von Mikroschadstoffen auf kommunalen Kläranlagen geeignet.

### 3.2 Aktivkohle

#### Theorie

Aktivkohle wird aus kohlenstoffhaltigen Rohstoffen durch thermische Aktivierung hergestellt. Sie zeichnet sich durch eine poröse Struktur mit Rissen und Spalten aus [Sontheimer et al. 1985] und wird nach der Korngröße eingeteilt. Pulveraktivkohle (PAK) muss laut EG-Verordnung 649/2008 zu mindestens 90-Massen-% aus Aktivkohlepartikeln kleiner  $0,50 \text{ mm}$  bestehen [EG-VO 649/2008]. Nach DIN EN 12903 müssen 95-Massen-% der Aktivkohlepartikel einen Korndurchmesser kleiner  $150 \mu\text{m}$  haben [DIN EN 12903 2009]. Granulierte Aktivkohle (GAK) weist einen Korngrößenbereich zwischen  $0,25 \text{ mm}$  und  $4,00 \text{ mm}$  auf. Der Korndurchmesser von Formkohle liegt im Bereich von  $0,50 \text{ mm}$  und  $1,50 \text{ mm}$  bei einer Länge von  $0,50 \text{ mm}$  bis  $4,00 \text{ mm}$  [DIN EN 12915-1 2009]. Das Porenvolumen wird mittels des Radius der Poren in die drei Kategorien Mikroporen ( $< 1 \text{ nm}$ ), Übergangsporen ( $1-25 \text{ nm}$ ) und Makroporen ( $> 25 \text{ nm}$ ) eingeteilt. Die innere Oberfläche wird in  $\text{m}^2/\text{g}$  angegeben und nach der BET-Methode bestimmt [Sontheimer et al. 1985]. Nach Herstellerangaben liegt die innere Oberfläche im Bereich von  $500 \text{ m}^2/\text{g}$  und  $1.500 \text{ m}^2/\text{g}$  [Metzger 2010]. Die aktiven Zentren der Aktivkohle bestehen aus ungesättigten Kohlenstoffatomen an der Grenze zur flüssigen Phase [Kienle et al. 1980]. Diese aktiven Zentren an der Oberfläche von Aktivkohle zeichnen sich zudem durch basische und saure Oberflächengruppen aus [Sontheimer et al. 1985]. Die adsorptive Anlagerung an das Adsorbens (Physisorption) ist in vier Schritte unterteilt (siehe Abbildung 15). Zunächst befinden sich die zu entfernenden Abwasserinhaltsstoffe (Adsorptive) in der freien turbulenten Strömung. Nach dem Übergang aus den turbulenten Strömungsverhältnissen in die laminare Grenzschicht diffundieren die Adsorptive näher an das Adsorbens. Anschließend erfolgt durch Filmdiffusion der Transport an adsorptive Zentren.

<sup>6</sup> Nach DWA 27. Leistungsvergleich liegt der abwasserspezifische Energiebedarf bei ca.  $0,40 \text{ kWh/m}^3$  [DWA 2015].

Die Diffusion in den adsorptiven Zentren (Poren) wird als Porendiffusion, Knudsen-Diffusion und Oberflächendiffusion bezeichnet. Als letzter Schritt erfolgt in den Poren die eigentliche Adsorption an die aktiven Zentren. Die Physisorption ist abhängig von der Anziehung zwischen elektrisch geladenen Teilchen, der Anziehung zwischen Dipolen, der Anziehung zwischen Ionen und Dipolen und der wirkenden Kräfte zwischen ungeladenen Teilchen [Kienle et al. 1980]. Die Triebkraft der Adsorption ist der Konzentrationsgradient außerhalb und innerhalb der laminaren Grenzschicht und der daraus resultierenden Diffusion [Sontheimer et al. 1985].

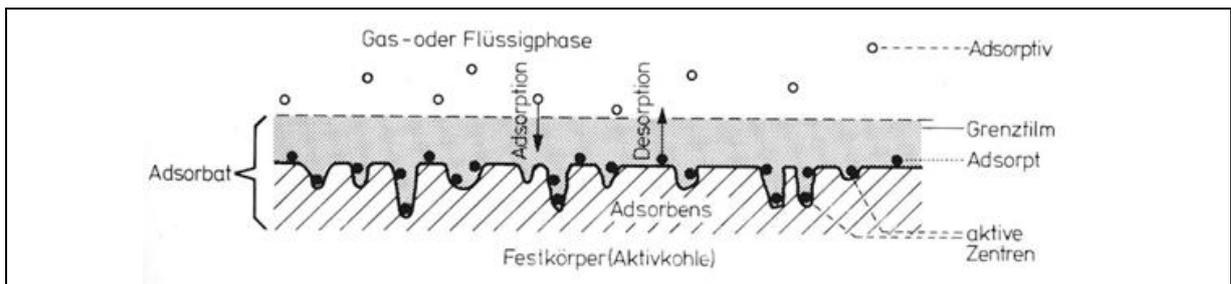


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Adsorption [Kienle et al. 1980]

Die Darstellung und Beschreibung der Erreichung dieses Zustands erfolgt durch Adsorptionsisothermen. Bei der Betrachtung der Beladungsfähigkeit und der Adsorptionsisotherme ist zwischen Einzelstoff- und Mehrstoffgemischen zu unterscheiden. Bei Mehrstoffgemischen stehen die verschiedenen Stoffe in Konkurrenz um die aktiven Zentren. Darüber hinaus können bereits adsorbierte Stoffe verdrängt werden [Sontheimer et al. 1985]. In der Anlage A sind die von Pöpel et al. 1988 zusammengestellten Parameter aufgeführt, die die Aktivkohleadsorption beeinflussen. Dazu gehören unter anderem die Molekularstruktur, das Molekulargewicht, die Löslichkeit, die Polarität und die Ionisation. Bei der Polarität ist anzumerken, dass aufgrund der unpolaren Oberflächeneigenschaften der Aktivkohle unpolare organische Abwasserinhaltsstoffe besser adsorbiert werden als polare Stoffe. Ebenso werden Moleküle mit geringem Molekulargewicht sowie schwer lösliche Stoffe gut adsorbiert. Polare Moleküle adsorbieren aufgrund deren guten Wasserlöslichkeit jedoch kaum.

#### Verfahrensvarianten der Pulveraktivkohledosierung

In Abbildung 16 sind verschiedene Verfahrensvarianten zur Elimination von Mikroschadstoffen mittels PAK nach [Benstöm 2012] dargestellt.

Bei der Dosierung von PAK in einem der biologischen Hauptstufe nachgeschalteten Kontaktbeckens mit Sedimentationsstufe wird im Zulauf zum Kontaktbecken Fällmittel zur Erhöhung des Abtrenngrades der PAK im nachfolgenden Sedimentationsbecken dosiert [Benstöm 2012]. Zusätzlich wird eine weitere Phosphorelimination erreicht [Metzger et al. 2008]. Nach dem Kontaktbecken erfolgt vor dem Sedimentationsbecken eine Dosierung von Flockungshilfsmitteln, um eine weitere Verbesserung der Sedimentation der PAK und der Fällprodukte sicherzustellen. Der sedimentierte Fällschlamm und PAK-Kohleschlamm werden in das Kontaktbecken rezirkuliert, um eine Mehrfachbeladung zu erreichen [Benstöm 2012]. Durch die Rückführung der PAK wird eine hohe Aufenthaltszeit im Gesamtsystem sowie eine hohe Kontaktzeit mit dem Abwasser erreicht [Benstöm 2012]. Es wird eine Dosierung von 10 mg PAK/l bis 20 mg PAK/l empfohlen [DWA 2015]. Die Kontaktzeit soll ca. 30 Minuten betragen [Kienle et al. 1980]. Die Aufenthaltszeit im Sedimentationsbecken liegt im Rahmen zwischen 2 bis 2,5 Stunden [Metzger et al. 2008]. Die Sedimentationsstufe kann als Rundbecken (z.B. Kläranlage Kressbronn) [Rölle et al. 2011], als längs durchströmtes Becken (z.B. Kläranlage Mannheim) [Alt et al. 2010] oder als Lamellenklärer (z.B. Kläranlage Stockacher Aach) [KomS BW 2014] ausgeführt werden.

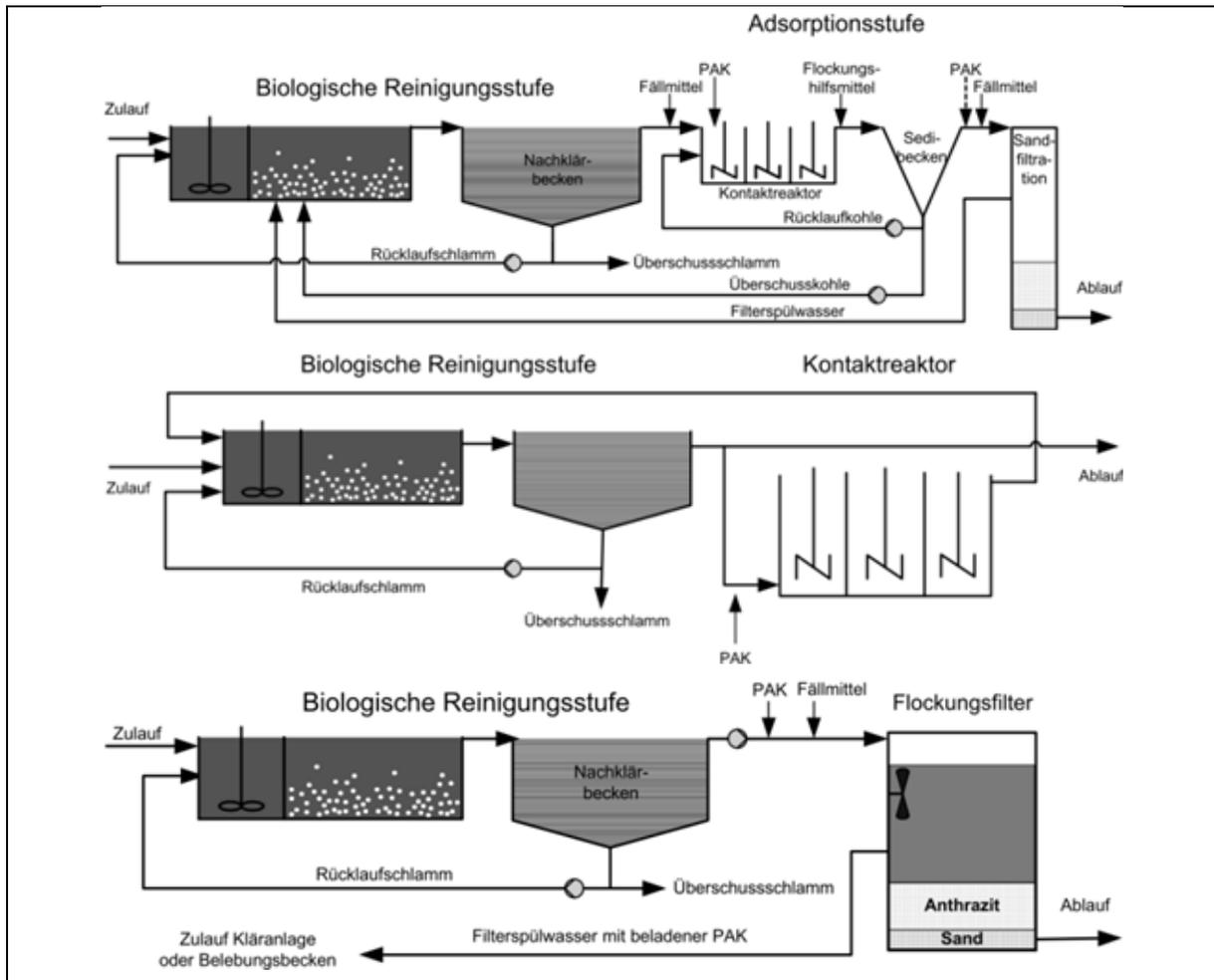


Abbildung 16: Verfahrenskonfigurationen von PAK-Adsorptionsstufen (oben: Kontaktbecken mit Sedimentation und Rezirkulation, mitte: Kontaktbecken mit Rückführung in die biologische Hauptstufe ohne Sedimentation, unten: PAK-Dosierung in Zulauf einer Filtrationsstufe) [Benstöm 2012]

Eine weitere Verfahrenskonfiguration ist die Beschickung eines Kontaktbeckens aus der biologischen Hauptstufe ohne nachgeschaltete Sedimentationsstufe mit direkter Rezirkulation des Ablaufs in die biologische Hauptstufe. Die PAK wird in der Nachklärung abgezogen. Da keine Rezirkulation der PAK stattfindet, ist die Aufenthaltszeit im Gesamtsystem gering. Die Nachklärung wird immer mit dem maximalen Bemessungszufluss beschickt. Übersteigt der Abwasserzufluss die Kapazitäten der Nachklärung, wird das PAK-Kontaktbecken nicht beschickt [Benstöm 2012]. Des Weiteren kann die PAK-Dosierung in den Überstau einer Flockungsfiltration erfolgen [Benstöm 2012].

Die Dosierung von PAK kann zudem direkt in die Belebung erfolgen. Jedoch ist aufgrund der hohen Konzentration des  $CSB_{gel}$ , bzw. des DOC sowie der hohen AFS-Konzentration eine schnelle Beladung der PAK festzustellen. Mikroschadstoffe werden somit nur in vermindertem Maße adsorbiert [Benstöm 2012].

#### Pilotanlagen und großtechnische Umsetzungen der Pulveraktivkohledosierung

In Tabelle 13 sind großtechnische PAK-Adsorptionsstufen auf Kläranlagen zusammengestellt.

Auf der **Kläranlage Barntrup** wurde ein PAK-Kontaktbecken mit einem Fuzzy-Filter als Ersatz für Sedimentation und Filtration für einen Teilstrom von 25% des zukünftigen Bemessungszufluss von 80 l/s untersucht [Wärmer et al. 2015]. Das Verfahren ist als Vorzugsvariante für den späteren Ausbau im Vollstrom vorgesehen [Gantner et al. 2014].

Die weiteren großtechnischen Anlagen unterscheiden sich durch die Anzahl der Kaskaden im Kontaktbecken<sup>7</sup>, der Ausführung der Sedimentation<sup>8</sup> oder der nachgeschalteten Filtration<sup>9</sup>.

Die Dosierung von PAK in den Filterüberstau der Flockungsfiltration wurde auf der **Kläranlage Kloten/Opfikon** untersucht [Böhler et al. 2009, 2011]. Ebenfalls erfolgte auf der Kläranlage **Wuppertal-Buchenhofen** ein Forschungsvorhaben zur Dosierung in den Filterüberstau. Dort wurde zum Vergleich der Elimination ein Referenzfilter ohne PAK-Dosierung betrachtet [Pinnekamp et al. 2012].

Auf der **Kläranlage Flos** in Wetzikon (CH) wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens die simultane Dosierung von PAK direkt in die Belebung<sup>10</sup> untersucht. Dabei erfolgte die PAK-Dosierung in die Nachbelüfterzone der zweiten Straße im Vollstrom. In die Nachbelüfterzone wurde ebenfalls Fällmittel und Flockungshilfsmittel dosiert. Die Reinigungsleistung hinsichtlich Mikroschadstoffe wurde bei Dosiermengen zwischen 11 bis 19 mg PAK/l untersucht [Frank et al. 2015]. In der Schweiz wird ein Eliminationsziel von 80% der Mikroschadstoffe Bezotriazol, Carbamazepin, Diclofenac, Mecoprop und Sulfamethoxazol [Frank et al. 2015] zwischen Zulauf Kläranlage und Ablauf 4. Stufe vorgegeben [GSchV (CH) 2016]. Dies wird mit der gewählten Dosierung erreicht.

<sup>7</sup> Es werden wahlweise 2er (Kläranlage Dülmen) oder 3er Kaskaden (Kläranlage Lahr) angewendet.

<sup>8</sup> Die Sedimentation kann als Rundbecken (Kläranlage Lahr), längs durchströmtes Rechteckbecken (Kläranlage Mannheim) oder Lamellenklärer (Kläranlage Stockacher Aach) ausgeführt werden.

<sup>9</sup> Die Filtration kann z.B. durch eine Raumfiltration (Kläranlage Dülmen) oder eine Tuchfiltration (Kläranlage Lahr) erfolgen.

<sup>10</sup> Die Belebung ist zweistraßig als alternierend/intermittierend ausgeführt. Daraus ergeben sich insgesamt vier Belebungsbecken-Nachklärung-Kombinationen.

**Tabelle 13: Anlagenliste der PAK-Dosierung**

Einheit	Ausbaugröße	Voll-/Teilstrom	PAK-Dosiermenge	t <sub>A,KB,min</sub>	t <sub>A,Sedi</sub>	q <sub>A,Sedimentation</sub>	Filtration
	Inbetriebnahme	QAds,max.					
	[EW]	[l/s]	[mg PAK/l]	[min]	[h]	[m³/(m²xh)]	
Barntrup (Plot) <sup>2</sup>	12.400 <sup>[h]</sup> 2014 <sup>[h]</sup>	Teil 20 <sup>[h]</sup>	10 – 20 <sup>[h]</sup>	20 <sup>[h]</sup>	-	-	Fuzzy-Filter mit max. 43 l/s <sup>[h]</sup>
Albstadt- Ebingen	125.000 <sup>[a]</sup> 1992 <sup>[a]</sup>	Voll <sup>[a]</sup> 980 <sup>[a]</sup>	14 – 28 <sup>[b]</sup>	78 <sup>[a]</sup>	0,6 <sup>[a]</sup>	6,7 <sup>[a]</sup>	Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Dülmen	55.000 <sup>[a]</sup> 2015 <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup> 200 <sup>[a]</sup>		22 <sup>[a]</sup>	k.A. <sup>[a]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Hechingen <sup>1</sup>	57.200 <sup>[a]</sup> 1999 <sup>[a]</sup>	Voll <sup>[a]</sup> 400 <sup>[a]</sup>		27 <sup>[a]</sup>	0,3 <sup>[a]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Kressbronn	24.000 <sup>[a]</sup> 2011 <sup>[d]</sup>	Voll <sup>[d]</sup> 265 <sup>[d]</sup>		35 <sup>[d]</sup>	2,6 <sup>[d]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Lahr	100.000 <sup>[e]</sup> 2015 <sup>[e]</sup>	Teil <sup>[e]</sup> 350 <sup>[e]</sup>		47 <sup>[e]</sup>	2,8 <sup>[e]</sup>		Tuchfiltration <sup>[e]</sup>
Laichingen <sup>1</sup>	35.000 <sup>[a]</sup> 2015 <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup> 100 <sup>[c]</sup>		45 <sup>[c]</sup>	2,0 <sup>[c]</sup>		Tuchfiltration <sup>[c]</sup>
Langwiese	184.000 <sup>[a]</sup> 2013 <sup>[a]</sup>	Voll <sup>[a]</sup> 1.100 <sup>[a]</sup>		57 <sup>[a]</sup>	2,1 <sup>[a]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Lautlingen <sup>1</sup>	36.000 <sup>[a]</sup> 1992 <sup>[a]</sup>	Voll <sup>[a]</sup> 225 <sup>[a]</sup>		27 <sup>[a]</sup>	0,4 <sup>[a]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Mannheim	725.000 <sup>[a]</sup> 2016 <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup> 1.500 <sup>[a]</sup>		41 <sup>[a]</sup>	2,2 <sup>[a]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Steinhäule	440.000 <sup>[a]</sup> 2014 <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup> 1.600 <sup>[f]</sup>		34 <sup>[f]</sup>	2,0 <sup>[f]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Sindelfingen	250.000 <sup>[a]</sup> 2011 <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup> 1.000 <sup>[a]</sup>		30 <sup>[a]</sup>	2,0 <sup>[a]</sup>		Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Stockacker Aach <sup>1</sup>	43.000 <sup>[a]</sup> 2011 <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup> 250 <sup>[g]</sup>		57 <sup>[g]</sup>	1,0 <sup>[g]</sup>	0,82 <sup>[g]</sup>	Sandfiltration <sup>[a]</sup>
Quellen:	[a]: Metzger et al. 2015		[c]: KomS BW 2016	[e]: KomS BW 2015a	[g]: KomS BW 2014a		
	[b]: Vogel et al. 2014		[d]: KomS BW 2014	[f]: KomS BW 2015b	[h]: Wärmer et al. 2015		
	[g]: KomS BW 2014a						
Bemerkungen:	1: mit Lamellenabscheider in der Sedimentation [ Metzger et al. 2015]			2: mit Fuzzy-Filter anstelle Sedimentation mit vorgeschaltetem Flokkulator zur FM- und FHM-Dosierung			
	KB: Kontaktbecken			Sedi: Sedimentation			

### Verfahrensvarianten granuliert Aktivkohle

Die GAK-Filtration kann im Auf- und im Abstrom erfolgen [Pöpel et al. 1988]. Dabei ist eine Ausführung in Druckkesselfiltern, in drucklosen offenen Betonfiltern und zudem in kontinuierlich gespülten Filtern möglich [Sontheimer et al. 1985].

In Abbildung 17 sind verschiedene Verfahrensvarianten zur Elimination von Mikroschadstoffen mittels GAK nach [Benstöm 2012] und [Gujer 2007] dargestellt.

Nach vollständiger Beladung der GAK kommt es zum Filterdurchbruch und die GAK ist auszutauschen und zu regenerieren. Als Bezugsgröße für die Beurteilung der Standzeit der GAK-Filter wird die Anzahl der durchflossenen Volumen der GAK (Bettvolumina) in der Einheit m<sup>3</sup> Abwasser / m<sup>3</sup> GAK verwendet. Ein Austausch der GAK ist nach ca. 3.000 bis 16.000 Bettvolumina notwendig [KomM NRW 2016].

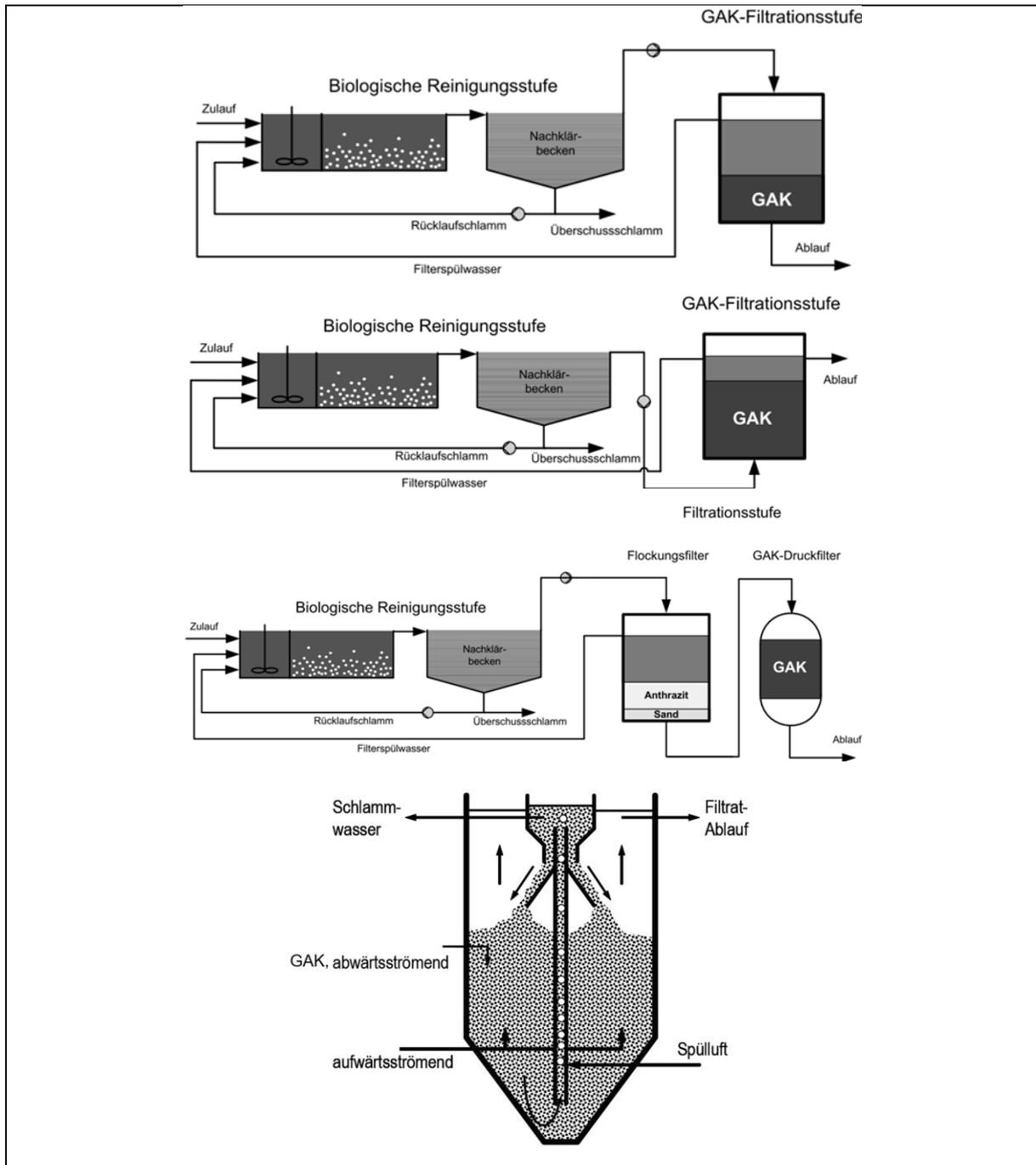


Abbildung 17: Verfahrenskonfiguration der GAK-Filtration (v.o.n.u: GAK-Filtration, abwärtsdurchströmt; GAK-Filtration, aufwärtsdurchströmt; GAK-Filtration im Druckfilter; GAK-Filtration, kontinuierlich gespült) [Benstöm 2012, nach Gujer 2007]

#### Pilotanlagen und großtechnische Umsetzungen von GAK-Filtrationsanlagen

In Tabelle 14 sind in Betrieb befindliche großtechnischen GAK-Adsorptionsstufen auf Kläranlagen zusammengestellt.

**Tabelle 14: Anlagenliste der GAK-Filtration**

Einheit	Ausbaugröße	Ausführung	Voll-/Teilstrom	$A_F^1$	min. EBCT <sup>3</sup>	Spülintervalle
	Inbetriebnahme	Fließrichtung	$Q_{Ads,max}$	$V_{F,max}^2$	Bettvolumen	Schichthöhe
	[EW]		[l/s]	[m <sup>2</sup> ]	[min]	[h]
				[m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> xh)]	[BV]	[m]
Düren-	310.000 <sup>[a]</sup>	Raumfilter <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup>	37,5 <sup>[a]</sup>	11 bzw. 14 <sup>[a]</sup>	21,6 bzw. 6 <sup>[a]</sup>
Merken	2011 <sup>[a]</sup>	Abstrom <sup>[a]</sup>	k.A.	k.A.		1,20 bzw. 1,50 <sup>[a]</sup>
Gütersloh	150.600 <sup>[b]</sup>	Biofor <sup>[b]</sup>	Teil <sup>[b]</sup>	84 <sup>[b]</sup>	33 bzw. 66 <sup>[b]</sup>	84 bzw. 168 <sup>[b]</sup>
	2015 <sup>[b]</sup>	Aufstrom <sup>[b]</sup>	116,67 <sup>[b]</sup>	5 bzw. 2,5 <sup>[b]</sup>		2,75 <sup>[b]</sup>
Harsewinkel	57.000 <sup>[c]</sup>	Druckkessel <sup>[c]</sup>	Teil <sup>[c]</sup>	7,1 <sup>[c]</sup>	40 <sup>[c]</sup>	168 <sup>[c]</sup>
	2014 <sup>[c]</sup>	Abstrom <sup>[c]</sup>	25 <sup>[c]</sup>	3,5 <sup>[c]</sup>		2,30 <sup>[c]</sup>
Obere Lutter	380.000 <sup>[d]</sup>	Biofor <sup>[d]</sup>	Teil <sup>[d]</sup>	40 (x 5) <sup>[d]</sup>	20 – 75 <sup>[e]</sup>	84 bzw. 168 <sup>[d]</sup>
	2011-2013 <sup>[d]</sup>	Aufstrom <sup>[d]</sup>	k.A.	2 – 8 <sup>[d]</sup>	8.000-16.000 <sup>[d]</sup>	2,5 <sup>[d]</sup>
Quellen:	[a]: Pinnekamp et al. 2012		[b]: Nahrstedt et al. 2016		[c]: Nahrstedt et al. 2015	
	[d]: Nahrstedt et al. 2014		[e]: Alt et al. 2013			
Bemerkungen:	1: Filterfläche		2: max. Filtergeschwindigkeit		3 max. Aufenthaltszeit	
	4: Bettvolumina					

Die AFS-Konzentration im Zulauf zur GAK-Stufe hat einen großen Einfluss auf die Spülintervalle, die EBCT<sup>11</sup> hat einen großen Einfluss auf die Reinigungsleistung.

Bei dem umgerüsteten Druckfilter auf der **Kläranlage Harsewinkel**, welcher aus dem Ablauf einer Flockungsfiltration beschickt wird, erfolgt wöchentlich eine Filterrückspülung [Nahrstedt et al. 2015]. Demgegenüber sind auf der **Kläranlage Düren-Merken** bei einer Beschickung direkt aus der Nachklärung Filterrückspülen innerhalb von 6 bis 21,6 Stunden erforderlich [Pinnekamp et al. 2012].

Auf der **Kläranlage Harsewinkel** und **Obere Lutter** werden bei einer EBCT von 20 bis 75 Minuten höhere Eliminationsraten erreicht als auf der **Kläranlage Düren-Merken** mit einer EBCT von 11 bis 14 Minuten.

### 3.3 Oxidation

Das Kap. 3.3 beinhaltet die beiden Oxidationsverfahren zur Elimination von Mikroschadstoffen mittels Ozon und mittels Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) mit den theoretischen Grundlagen, möglichen Verfahren und einem Überblick über die vorhandenen umgesetzten Pilotanlagen und großtechnische Anlagen.

#### 3.3.1 Ozonung

##### Theorie

Die Oxidation mit Ozon ist unterteilt in die direkte und die indirekte Oxidation. Bei der direkten Oxidation erfolgt eine Reaktion des Ozons mit organischen und anorganischen Abwas-

<sup>11</sup> Die EBCT (Empty Bed Contact Time), auch Leerbettkontaktzeit genannt beschreibt die Aufenthaltszeit des Abwassers im Filter.

serinhaltsstoffen. Diese Oxidation ist sehr selektiv [Hoigné et al. 1979] und betrifft vor allem Kohlenstoffdoppelbindungen, phenolische Bindungen und Aminogruppen. Durch die im Abwasser enthaltenen organischen Kohlenstoffverbindungen sowie Hydroxydionen (OH<sup>-</sup>) kommt es teilweise zum Zerfall von Ozon zu Hydroxylradikalen (·OH), welche im Gegensatz zu Ozon mit den Abwasserinhaltsstoffen unspezifisch reagieren [Abegglen et al. 2012]. Dieser Zerfall ist bei höherem pH-Wert schneller. Zudem agieren die gebildeten Radikale selbst als Auslöser des Ozonzerfalls [Hoigné et al. 1979]. In Abbildung 18 ist der Ablauf beider Oxidationsprozesse dargestellt.

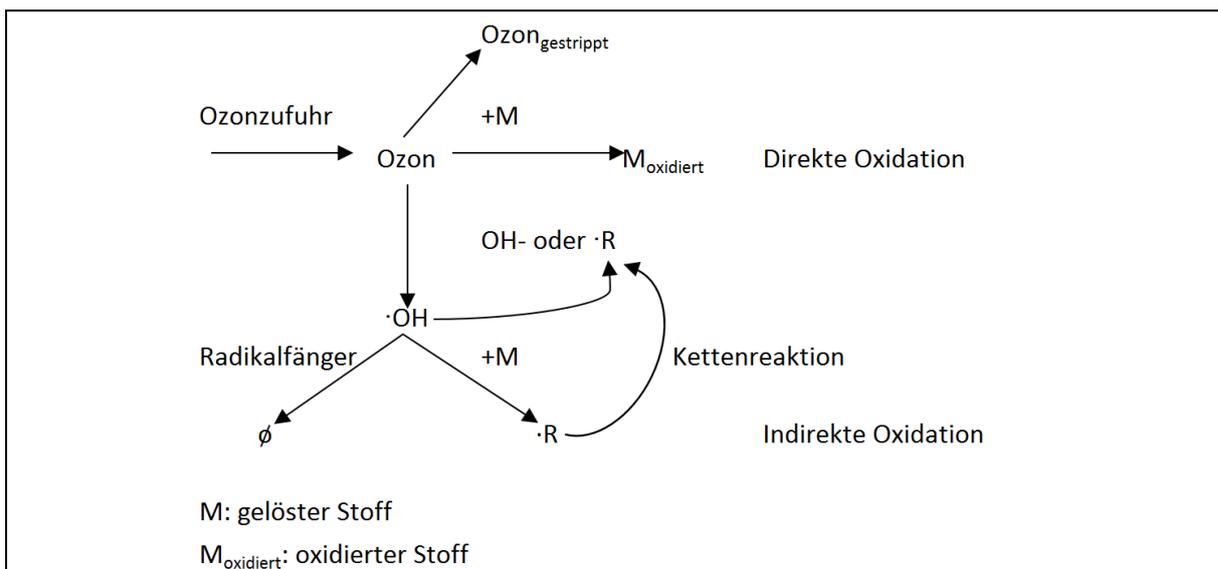


Abbildung 18: Schema der Oxidationsprozesse mit Ozon [nach Hoigné et al. 1983]

Die Beschreibung der Oxidation mit Ozon und Hydroxylradikalen erfolgt für Batch-Reaktoren und Pfropfenströmung gemäß der nachfolgenden Formel 1. Demnach ist die Oxidation mit Ozon und Hydroxylradikalen selektiv, da für jede Substanz individuelle Reaktionskonstanten gelten [van Gunten 2003].

**Formel 1: Oxidation mit Ozon und Hydroxylradikalen [nach van Gunten 2003]:**

$$-\frac{dS}{dt} = k_{O_3}[S][O_3] + k_{OH}[S][\cdot OH]$$

$$R_c = [\cdot OH]/[O_3]$$

$$\ln\left(\frac{[S]}{[S]_0}\right) = -(k_{O_3} + k_{OH} \cdot R_c) \cdot \int [O_3] dt$$

mit:	S:	Konzentration Inhaltsstoff	[mg/l]
	t:	Zeit	[s]
	k <sub>O<sub>3</sub></sub> :	Reaktionskonstante des Stoffs S mit Ozon	[1/(mg O <sub>3</sub> x s)]
	k <sub>OH</sub> :	Reaktionskonstante des Stoffs S mit ·OH	[1/(mg·OH x s)]
	[O <sub>3</sub> ]:	Ozonkonzentration	[mg O <sub>3</sub> /l]
	[·OH]:	OH-Radikalkonzentration	[mg ·OH/l]

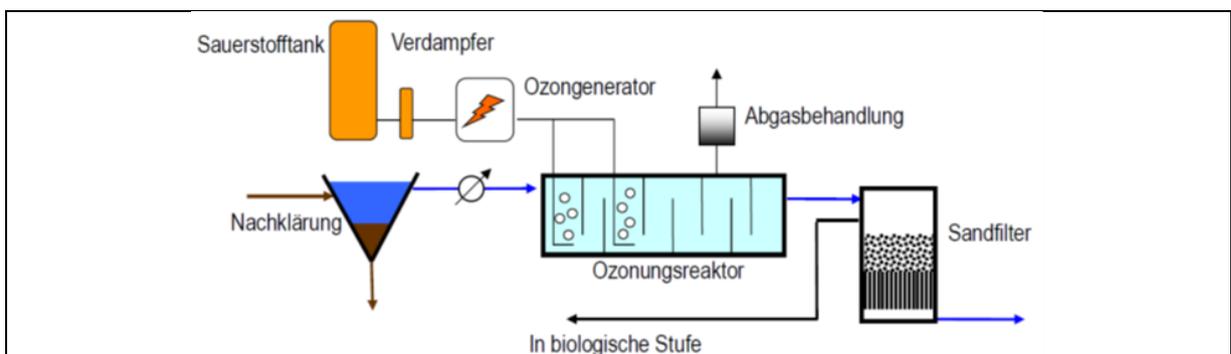
Weitere Parameter, welche die Oxidation beeinflussen, sind die Ozonkonzentration, die Exposition<sup>12</sup> mit Ozon und Hydroxylradikalen [van Gunten 2003], die DOC-Konzentration, die Bromidkonzentration und die Nitritkonzentration. Durch die Ozonung entstehen verschiedene, teilweise in ihrer Zusammensetzung und den Umweltfolgen unbekanntes Transformationsprodukte. Die gebildeten Transformationsprodukte aus den aufgespalteten Mikroschadstoffen sind teilweise biologisch abbaubar [Abegglen et al. 2012]. Der Abbau z.B. in einer Sandfiltration ermöglicht mutagene sowie ökotoxikologische Folgen für die aquatische Umwelt zu minimieren, bzw. auszuschließen. Entsprechend den Forschungsergebnissen von Bahr et al. 2007, Abegglen et al. 2009 und Kreuzinger et al. 2011 liegt im Vergleich zu Abwasser aus dem Ablauf der Belebung im Ablauf der Ozonanlage keine erhöhte mutagene, endokrine oder ökotoxikologische Belastung vor. Durch die Ozondosierung entstehen kanzerogene Nitrosamine. Gemäß der Messergebnisse der Kläranlage Regensdorf wird lediglich das Nitrosamine Nitrosodimethylamin (NDMA) durch die Ozonung signifikant gebildet. Durch die Sandfiltration ist eine Elimination von ca. 50% zu erwarten [Abegglen et al. 2009]. Das NDMA entsteht durch die Oxidation von N,N-Dimethylsulfamid (DMS). N,N-Dimethylsulfamid (DMS) ist ein mikrobielles Abbauprodukt des Fungizids Tolyfluamid. DMS selbst ist nicht kanzerogen [DWA 2014]. Weitere unerwünschte Nebenprodukte sind z.B. das kanzerogene, trinkwasserrelevante Bromat<sup>13</sup> und Nitrat (NO<sub>3</sub>-N).

Ozon hat einen positiven Einfluss auf die Keimbelastung des Abwassers. Auf der Kläranlage Regensdorf werden Keimreduktionen um den Faktor 10 bis 1.000 erreicht [Abegglen et al. 2009].

#### Verfahrensvarianten der Ozonung

In Abbildung 19 ist eine der Belebung nachgeschaltete Ozonanlage mit Ozonherstellung aus Flüssigsauerstoff dargestellt [Abegglen et al. 2012]:

Eine Produktion von Ozon aus Luftsauerstoff ist aufgrund der benötigten energieintensiven Lufttrocknung nicht geeignet. Ebenfalls nicht anwendbar auf Kläranlagen ist die Produktion von Ozon aus Luftsauerstoff mittels Pressurized-Swing-adsorption (PSA) und Vacuum-Swing-Adsorption (VSA), da beide Verfahren für die Herstellung eines konstanten Gasstroms konzipiert wurden und damit nicht geeignet sind, den stark schwankenden Ozonbedarf auf Kläranlagen abzudecken.



**Abbildung 19: Ozonanlage mit Ozonherstellung aus Flüssigsauerstoff und nachgeschalteter Sandfiltration [Abegglen et al. 2012]**

<sup>12</sup> Die Exposition mit Ozon ergibt sich aus dem Integral der Ozonkonzentration über die Reaktionszeit [van Gunten 2003].

<sup>13</sup> Bromat entsteht aus der Oxidation von Bromid (Br<sup>-</sup>). Der Grenzwert der TrinkwV für Bromat beträgt 10 µg/l [TrinkwV 2013].

Der Flüssigsauerstoff wird durch einen Verdampfer in den gasförmigen Zustand überführt und in den Ozongenerator geleitet, in dem mittels elektrischer Entladung Ozon erzeugt wird. Der Ozongenerator verbraucht sehr viel elektrische Energie, die bis zu 90% in Abwärme umgewandelt wird. Zur Abfuhr der Wärme sind Ozongeneratoren zu kühlen [Abegglen et al. 2012]. Bei der Ozonerzeugung aus Flüssigsauerstoff entstehen ca. 10 Massen-% Ozon bezogen auf den Flüssigsauerstoff [KomM NRW 2016]. Das Ozon kann mittels Diffusoren oder Injektoren in den Ozonreaktor eingetragen werden [Pinnekamp et al. 2011]. Diffusoren tragen das Ozon wie Blasenbelüfter ein [Abegglen et al. 2012], während Injektoren zuerst einen Teilstrom des Abwassers mit Ozon versetzen und diesen dann in den Ozonreaktor einleiten [KomM NRW 2016]. Der Ozonreaktor kann mit Umlenk- und Trennwänden in Kaskaden eingeteilt werden. Dabei sind zur Erhöhung der Ozonexposition die Diffusoren im Gegenstromprinzip anzuordnen [Abegglen et al. 2012]. Entsprechend den Forschungsergebnissen von Herbst et al. 2011 ist auf Grundlage von CFD-Modellierungen nur ein geringer Unterschied der Eintragungseffizienz bei Ausführung des Ozonreaktors ohne Dammbalken festzustellen [Herbst et al. 2011].

Es werden Ozonkonzentrationen von 5 mg O<sub>3</sub>/l bis 15 mg O<sub>3</sub>/l, bzw. von Ozondosen von 0,6 g O<sub>3</sub>/g DOC bis 0,8 g O<sub>3</sub>/g DOC empfohlen. Die Aufenthaltszeit soll zwischen 10 Minuten und 30 Minuten liegen. Um ein Abströmen des gesundheitsschädlichen Ozons in die Umgebungsluft zu vermeiden, ist der Ozonreaktor gasdicht auszuführen. Das anfallende Abgas ist einer Restozonvernichtung zuzuführen. Diese kann katalytisch [DWA 2015] oder thermisch erfolgen. Zur weitgehenden Elimination der bei der Ozonoxidation entstandenen Transformationsprodukte aus dem Abwasser ist dem Ozonreaktor eine biologisch aktive Nachbehandlung (z.B. Sandfilter) nachzuschalten [Abegglen et al. 2012].

### Pilotanlagen und großtechnische Umsetzungen von Ozonanlagen

Im Gegensatz zu Adsorptionsverfahren gibt es zu Ozonanlagen vergleichsweise wenig Pilotanlagen oder großtechnische Anlagen.

In Tabelle 15 ist eine Zusammenstellung von Pilotanlagen und großtechnischen Umsetzungen enthalten. Dabei unterscheiden sich die Anlagen durch das Eintragungssystem mit Injektoren oder Diffusoren, die minimale Aufenthaltszeit im Ozonreaktor bei Mischwasserzufluss sowie durch die festgelegte Ozondosis und -konzentration.

**Tabelle 15: Anlagenliste von Ozonanlagen**

	Ausbaugröße	Voll-/Teilstrom	Ausführung Ozonreaktor	Ozondosis	t <sub>A,Ozonreaktor,min</sub>	Nachbehandlung
	Inbetriebnahme	Q <sub>max</sub>	Eintragungssystem Ozon	Ozonkonzentration		
Einheit	[EW]	[l/s]		[mg O <sub>3</sub> /mg DOC]	[min]	
				[mg O <sub>3</sub> /l]		
Detmold	135.000 <sup>[a]</sup>	Teil <sup>[a]</sup>		1,15 - 1,53 <sup>[a]</sup>	10 – 20 <sup>[a]</sup>	-
	2014 <sup>[a]</sup>	0,02 <sup>[a]</sup>	Injektor <sup>[a]</sup>	5 – 15 <sup>[a]</sup>		
Regensdorf, CH	30.500 <sup>[b]</sup>			0,40 -0,88 <sup>[b]</sup>	2,50 <sup>[b]</sup>	Sandfiltration <sup>[b]</sup>
	2007 - 2008 <sup>[b]</sup>	250 <sup>[b]</sup>	Diffusor <sup>[b]</sup>	2 – 10 <sup>[b]</sup>		
Bad	13.000 <sup>[c]</sup>	Voll <sup>[c]</sup>	zw eistraßig <sup>[e]</sup>		13 <sup>[c]</sup>	Schönungsteich <sup>[c]</sup>
Sassendorf	2003 <sup>[c]</sup>	181 <sup>[c]</sup>	Diffusor <sup>[c]</sup>	5 – 15 <sup>[d]</sup>		
Duisburg- Vierlinden	30.000 <sup>[e]</sup>	Teil <sup>[e]</sup>	zw eistraßig <sup>[e]</sup>	0,40 – 1,00 <sup>[e]</sup>	30 <sup>[e]</sup>	Wirbelbett <sup>[e]</sup>
	2011 <sup>[e]</sup>	111 <sup>[e]</sup>	Diffusor oder Injektor <sup>[e]</sup>	2-9 <sup>[e]</sup>		
Quellen:	[a]: Meier et al. 2014		[c]: Metzger et al. 2015		[e]: Grünebaum et al. 2013	
	[b]: Abegglen et al. 2009		[d]: KomM NRW 2013a			

### 3.3.2 Advanced Oxidation Process (AOP)

#### Theorie

Der Begriff Advanced Oxidation Process (AOP) umfasst alle Verfahren, welche auf einer Oxidation mit Hydroxylradikalen basieren. Entscheidender Faktor für die Elimination der Abwasserinhaltsstoffe ist die Exposition mit Hydroxylradikalen. Wie bei der Ozonung ist eine Anlieferung des Reaktionsmittels nicht möglich, da die Hydroxylradikale nicht stabil sind und schnell zerfallen. Zur Erzeugung von Hydroxylradikalen können mehrere Verfahrenskombinationen verwendet werden. Dazu zählen u.a. Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) mit UV-Licht,  $H_2O_2$  mit  $Fe^{2+}$ ,  $H_2O_2$  mit  $Fe^{2+}$  und UV-Licht sowie UV-Licht und Titandioxid ( $TiO_2$ ). Bei den Verfahren mit UV-Licht ist eine geringe Trübung bzw. AFS-Konzentration Voraussetzung, um die Bildung von Hydroxylradikalen durch das UV-Licht nicht zu beeinträchtigen [Abegglen et al. 2012]. Ein großer Unterschied im Vergleich zur Ozonung ist, dass die verwendeten Oxidationsmittel z.B. durch UV-Licht aktiviert werden müssen. Zudem ist der Oxidationsmittelverbrauch im Vergleich zur Oxidation mit Ozon höher [DWA 2015]. Da die gebildeten Hydroxylradikale mit allen Abwasserinhaltsstoffen unspezifisch reagieren, liegt ein hoher Verbrauch an Energie für das UV-Licht und an  $H_2O_2$  vor [Abegglen et al. 2012].

#### Verfahrensvarianten der AOP

In Abbildung 20 ist beispielhaft das Schema eines AOP mit  $H_2O_2$  und UV-Licht mit vorheriger und nachgeschalteter Filtration dargestellt.

Um eine optimale Ausnutzung des UV-Lichts zur Radikalbildung zu ermöglichen und um Störstoffe für die Oxidation zu minimieren, ist eine Vorfiltration angeordnet. Nach der Vorfiltration wird  $H_2O_2$  als 30-40%ige wässrige Lösung dosiert. Anschließend erfolgt durch das UV-Licht die Erzeugung von Hydroxylradikalen. Nach der Oxidation ist eine biologisch aktive Filtration angeordnet, um die entstandenen Transformationsprodukte zu eliminieren [Abegglen et al. 2012].

Da keine Ergebnisse von Studien zu Pilotanlagen oder großtechnischen Umsetzungen in der Abwasserbehandlung vorliegen, werden die AOP an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

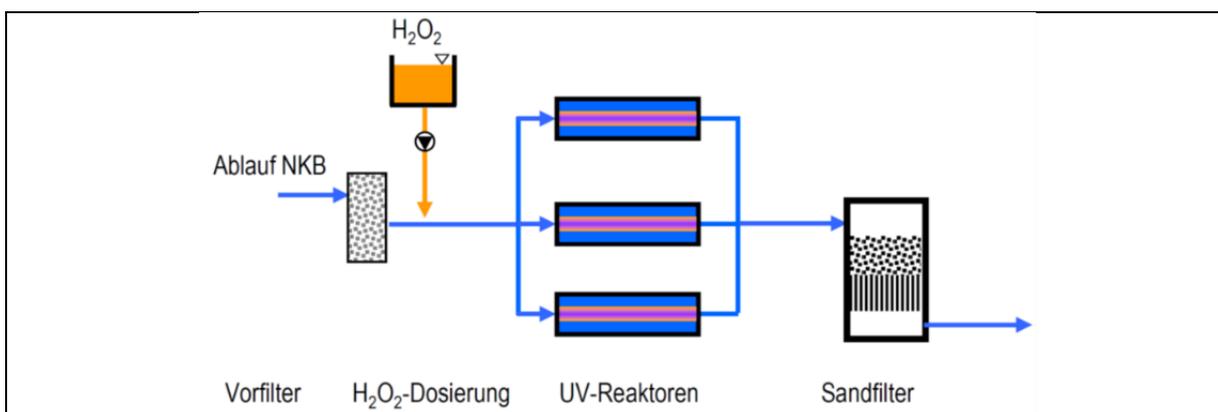


Abbildung 20: Advanced Oxidation Process nach Vorfiltration mit nachgeschalteter biologisch aktiver Filtration (Sandfilter) [Abegglen et al. 2012]

### 3.4 Verfahrenskombinationen

Zusätzlich zu den bereits vorgestellten Verfahren zur nachgeschalteten Entfernung von Mikroschadstoffen können diese in Reihe geschaltet, kombiniert umgesetzt werden. Dabei ist eine Kombination von Ozon-Adsorption sowie PAK-Adsorptionsstufe-(Membran-)Filtration möglich. Verschiedene Kombinationen mit einem Auszug der durchgeführten Forschungsvorhaben ist in Tabelle 16 enthalten.

**Tabelle 16: Anlagenliste der Verfahrenskombinationen**

Testanlage	Kombination	Quelle	Bemerkungen
Kläranlage Lausanne	Adsorption (PAK) →UF	Margot et al. 2011	- Pilotanlage mit 10 l/s - 10 - 20 mg PAK/l - $t_{A,Ads.min} = 30$ min
Kläranlage Birsfelden, CH	Adsorption (PAK) →UF	Löwenberg et al. 2013	- 17 mg PAK/l - $t_{A,Ads.min} = 0,5 - 2,3$ h
Kläranlage Schwerte	Ozonanlage → PAK	Grünebaum et al. 2013 KomM NRW 2013b	- Adsorption leitet in Belebung ein - 1 – 6 mg O <sub>3</sub> /l - $t_{A,O3,min} = 13$ min - 10 - 20 mg PAK/l - $t_{A,Ads.min} = 30$ min
Kläranlage Weißenburg	Ozonanlage → GAK	Universität der Bundeswehr München, 2014	- Pilotvorhaben als Grundlage für großtechnische Umsetzung - GAK-Filter ohne Regeneration → biol. aktive GAK
Kläranlage Wien	Ozonanlage → GAK	Kreuzinger et al. 2015	- Ozon-Pilotanlage mit max. 39 l/s - nachgeschalteter GAK- VersuchsfILTER mit 25 l/s

#### 4 Planung und Dimensionierung der Varianten der 4. Reinigungsstufe

Auf Grundlage der Literaturrecherche, Betrachtung der Theorie und Verfahrensvarianten der Membranverfahren, Adsorption und Oxidation sowie der örtlichen Gegebenheiten auf der Kläranlage Brühl werden folgende Verfahren untersucht:

##### Variante 1 Pulveraktivkohledosierung

- 1a Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration
- 1b Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration
- 1c Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration

##### Variante 2 Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern

##### Variante 3 Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration

Die 4. Reinigungsstufe wird entsprechend Abbildung 1 bzw. Zeichnung 2016-142-101 an der Ablaufmessstation angeordnet. Der vorhandene Teich wird zurückgebaut. Für die Inanspruchnahme der Fläche des Teichs und der Grünflächen wird eine landschaftspflegerische Begleitplanung im Rahmen der Genehmigungsplanung nach §57.2 LWG erstellt.

Auf Grundlage der Auswertung der Betriebsdaten der Kläranlage in Kapitel 2.3 werden die in Tabelle 17 zusammengestellten Bemessungsparameter zur Auslegung der Varianten der 4. Reinigungsstufe festgelegt. Um ein hohes Behandlungsvolumens bei gleichzeitiger Optimierung der Betriebskosten sicherzustellen, wird für alle Varianten der Elimination von Mikroschadstoffen ein zweistraßiger Ausbau gewählt.

**Tabelle 17: Bemessungsparameter 4. Reinigungsstufe**

Hydraulische Parameter			
Parameter	Abkürzung	Wert	Einheit
Mischwasserabfluss	$Q_M$	540	l/s
	$Q_{M,h}$	1.944	m <sup>3</sup> /h
tägliches Trockenwetterabfluss	$Q_T$	83,18	l/s
	$Q_{T,h}$	299,45	m <sup>3</sup> /h
	$Q_{T,d}$	7.186,80	m <sup>3</sup> /d
Jahresabwassermenge	JAM	3.600.000	m <sup>3</sup> /a
Abwasserparameter Ablauf Nachklärung			
Dissolved Organic Carbon	DOC	9,74	mg/l
Nitrit	NO <sub>2</sub> -N	0,57	mg/l

Zur Beschickung der betrachteten Varianten wird das vorhandene Hochwasserpumpwerk verwendet und der Pumpenschacht durch einen Vorschacht erweitert. Die erforderliche Hubhöhe beträgt 4,0 m. Die Wasserspiegellagen der neuen Verfahrensstufen PAK-Kontaktbecken, Ozon-Kontaktbecken, Sandfiltration, GAK-Filtration liegen hochwassersicher über der Hochwasserrückstauenebene des Palmersdorfer Bachs.

In Variante 1b (Kapitel 4.1) wird die Umnutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken untersucht, um durch die Nutzung vorhandener Bausubstanz die Investitionskosten zu minimieren.

Aufgrund der gegebenen Platzverhältnisse ist eine klassische Adsorptionsstufe mit PAK-Kontaktbecken und Sedimentationsbecken nicht umsetzbar. Mit einem gewählten Rücklaufverhältnis von 1 bei einem Bemessungszufluss von 540 l/s ist die benötigte Oberfläche der Sedimentation ausgeführt als Rundbecken zu groß. Daher erfolgt die PAK-Sedimentation in Variante 1c in einem zweistraßig ausgeführten Lamellenklärer.

### Kostenschätzung

Die Aufstellung der Kostenschätzung erfolgt anhand der Vorgaben der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und der Bezirksregierung Köln. Bezugszeitpunkt ist das Jahr 2016. Zur Vergleichbarkeit der Kosten der 4. Reinigungsstufe der Kläranlage Brühl mit anderen Machbarkeitsstudien sind in den Anhängen B - F zusätzlich die Kostenschätzungen für den Bezugszeitpunkt 2013 zusammengestellt.

Die Investitionskosten, die Reinvestitionskosten und die Betriebskosten werden mittels finanzmathematischer Faktoren in Jahreskosten umgerechnet. Alle Kosten werden als Bruttokosten angegeben. Der Betrachtungszeitraum beträgt 40 Jahre. Die Kosten für Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. werden mit 20% der Baukosten angesetzt. Der Zinssatz beträgt für die Erstinvestition und die Reinvestitionen 3%. Zu den Investitionskosten zählen:

### Investitionskosten

- Baukosten für
  - Ingenieurbauwerke
  - maschinelle Ausrüstung
  - elektrotechnische Ausrüstung
- Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. )

Die Kosten der Baustelleneinrichtung werden bei den Ingenieurbauwerken mit anteilig 10%, bei der maschinellen Ausrüstung mit 3% und bei der elektrotechnischen Ausrüstung mit 3% berechnet. Für die Ingenieurbauwerke sind in dem Nutzungszeitraum von 40 Jahren keine Reinvestitionen erforderlich. Nach 20 Jahren fallen Reinvestitionskosten in Höhe der ursprünglichen Investitionskosten für folgende Kostenpunkte an:

### Reinvestitionskosten

- Reinvestitionskosten maschinelle Ausrüstung
- Reinvestitionskosten elektrotechnische Ausrüstung

Die Berechnung der Betriebskosten erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Preissteigerungsraten für nachfolgende Kostenpunkte:

### Betriebskosten

- |                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| - Personal, Wartung, Instandhaltung | 0,50 % |
| - Energie/Strom                     | 3,00 % |
| - PAK, GAK, Flüssigsauerstoff       | 1,00 % |
| - Bautechnik, Nebenkosten           | 0,50 % |
| - Maschinenteknik                   | 0,25 % |

- Elektrotechnik 0,00 %
- Allgemein 1,00 %

Bei der Variante 1 – PAK und bei der Variante 2 – GAK werden die Kosten für Wartung und Instandhaltung anteilig zu den Baukosten für Ingenieurbauwerke mit 0,5%, für die maschinelle Ausrüstung mit 2% und für die elektrotechnische Ausrüstung mit 2% berechnet.

Bei der Variante 3 – Ozon werden die Kosten für Wartung und Instandhaltung anteilig zu den Baukosten für Ingenieurbauwerke mit 0,5%, für die maschinelle Ausrüstung mit 1% und für die elektrotechnische Ausrüstung mit 2% berechnet.

Die Berechnung der Energiekosten erfolgt entsprechend des aktuellen Vertrags der Kläranlage Brühl mit einem Preis von brutto 0,32 €/kWh.

#### 4.1 Variante 1a: Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration

##### Verfahrensführung

Bei Variante 1a - Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration sind folgende neue Anlagen zu errichten:

- PAK-Silo
- Ansatzbecken und Dosiersystem der PAK
- Vorschacht Pumpwerk
- Flockungshilfsmittelstation
- kontinuierlich gespülte Sandfiltration

Die Verfahrensführung ist in Abbildung 21 dargestellt.

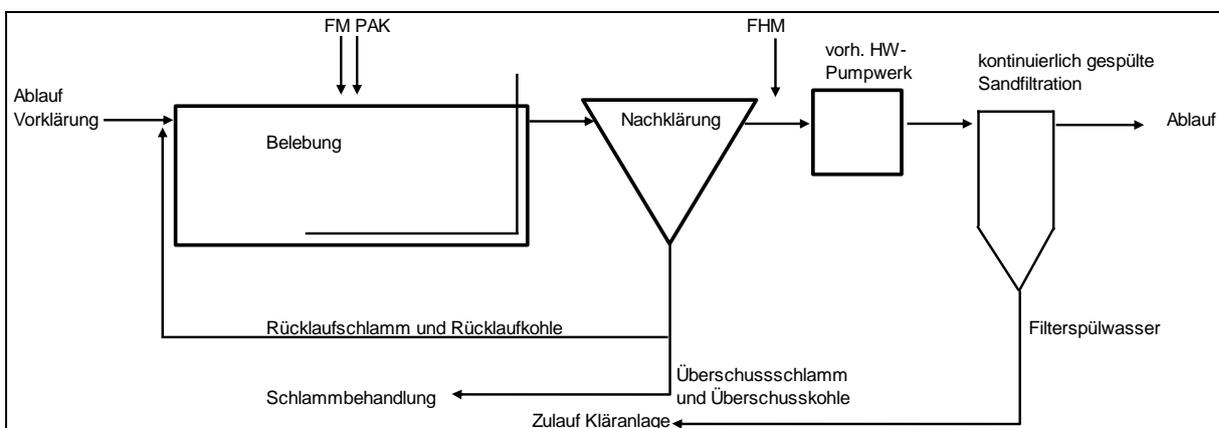


Abbildung 21: Schema der Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration

Zur Elimination der Mikroschadstoffe wird PAK in die vorhandenen Nitrifikationsbecken dosiert. Dort ist der BSB<sub>5</sub> weitgehend abgebaut. Die Hintergrundbelastungen, welche die PAK

zusetzen kann, sind im Vergleich zur PAK-Dosierung in die Denitrifikation geringer. Die PAK-Dosiermenge wird anhand der Ergebnisse zur Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Wetzikon (CH) [Frank et al. 2015] (siehe Kapitel 3.2) und den Ergebnissen des Screenings und Monitorings der Kläranlage Brühl (siehe Kapitel 2.4) auf 15 mg PAK/l festgelegt. Bei Umsetzung dieser Variante ist durch Messung der Mikroschadstoffkonzentration im Ablauf der Sandfiltration die PAK-Dosiermenge ggf. anzupassen. Um absetzbare PAK-Schlammflocken zu erzeugen, werden zusätzlich zur Fällmitteldosierung in den Rücklaufschlammstrom von der bestehenden Fällmittelstation neue Leitungen zur Nitrifikationszone verlegt. Die Fällmitteldosierung in die Nitrifikationszone wird bei der Dosierung in den Rücklaufschlammstrom berücksichtigt, so dass der Gesamtverbrauch an Fällmittel unverändert bleibt. Die PAK wird mit dem Rücklaufschlamm zurückgeführt, woraus eine Mehrfachbelastung der PAK erreicht wird. Die Überschussschleife wird mit dem Überschussschlamm aus dem System abgezogen. Da die PAK über den Schlammweg entsorgt wird, ist eine landwirtschaftliche Verwertung aufgrund der Desorption der adsorbierten Schadstoffe unzulässig [Abegglen et al. 2012]. Der Nachklärung wird zur Abtrennung der Feinkohle eine kontinuierlich gespülte Sandfiltration nachgeschaltet. Zur Verbesserung der Abtrennung der Feinkohle wird ein synthetisches Flockungshilfsmittel (Polymer) in die Zulaufleitung zur Sandfiltration dosiert. Das Filterspülwasser wird dem Zulauf der Kläranlage zugeleitet.

#### Dimensionierung der Anlagenteile

Das PAK-Silo mit einem Volumen von 40 m<sup>3</sup> wird südlich der Denitrifikation angeordnet und auf vier Lieferungen pro Jahr ausgelegt. Zufahrtswege zur Anlieferung der PAK sind bereits vorhanden. In einem neu zu errichtenden Betriebsraum neben dem PAK-Silo wird das PAK-Dosiersystem angeordnet. Die Herstellung der PAK-Suspension in einem Mischbecken erfolgt durch gravimetrische Dosierung mittels Schneckenförderer aus dem PAK-Silo. Die PAK-Suspension wird durch eine Wasserstrahlpumpe hergestellt und der Nitrifikationszone zugeleitet. Entsprechend dem Dosierzusammenhang von PAK zu Fällmittel in Kontaktbecken wird ein Verhältnis von 0,40 mg Fe/mg PAK<sup>14</sup> gewählt [Schwentner 2011]. In einem Betriebsraum östlich der Ablaufmessstation werden die Flockungshilfsmittelstation und die Maschinenteknik der kontinuierlich gespülten Sandfiltration angeordnet. In Tabelle 18 sind die Dosiermengen und der Jahresverbrauch von Fällmittel, PAK und Flockungshilfsmittel zusammengestellt.

**Tabelle 18: Fällmittel, PAK und Flockungshilfsmittel bei Variante 1a - PAK simultan, SF**

	Einheit	Fällmittel	PAK	Flockungshilfsmittel
Dosierung	[mg/l]	6	15	0,25
Jahresverbrauch	[t/a]	-	54	0,9

Die Sandfiltration mit einer maximalen Oberflächenbeschickung von 14 m/h besteht aus 30 Filtern mit einer Gesamtfilterfläche von 150 m<sup>2</sup>. Die Anordnung erfolgt südlich der Ablaufmessstation. Die Filter werden in 3 Filterstraßen zu je 10 Filtern nebeneinander angeordnet. Je nach Zulaufmenge werden die 3 Straßen beschickt oder außer Betrieb genommen.

In Tabelle 19 sind die Daten zur Verfahrensauslegung der Variante 1a zusammengestellt.

<sup>14</sup> Dieses Verhältnis wird anhand von nachgeschalteten Kontaktbecken [Schwentner 2011] gewählt und ist im Betrieb zu überprüfen.

### Betrieb und Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Die Dosierung von PAK und Fällmittel in die Nitrifikationszone wird proportional zur Zulaufmenge durch das vorhandene MID im Zulauf der Kläranlage gesteuert. Bei der Fällmitteldosierung ist zum einen auf die Phosphorelimination und zum anderen auf die Bildung eines absetzbaren PAK-Schlammes zu achten. Die Steuerung der Fällmitteldosierung in den Rücklaufschlammstrom zur Phosphorelimination erfolgt durch eine  $\text{PO}_4\text{-P}$ -Onlinemessung im Ablauf der Biologie. Die Fällmitteldosierung in die Nitrifikation von 6 mg Fe/l wird bei der Dosierung in den Rücklaufschlammstrom berücksichtigt, so dass in Summe kein Mehrverbrauch an Fällmittel anfällt. Die Steuerung der Dosierung des Flockungshilfsmittels in die Zuleitung zur Sandfiltration erfolgt über die Durchflussmessung des Pumpwerks. Die Beschickung der Sandfiltration wird durch Schieber in den Zulaufrippen gesteuert.

### Elimination

Der Einfluss der simultanen PAK-Dosierung auf die Elimination der konventionellen Abwasserparameter und Mikroschadstoffe kann nicht getrennt von der Elimination durch den biologischen Abbau angegeben werden. Bei simultaner PAK-Dosierung in die Belebung ist aufgrund der höheren Hintergrundbelastung im Vergleich zur PAK-Dosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken zur Erzielung der gleichen Elimination mehr PAK notwendig. Es wird angenommen, dass bei einer PAK-Dosierung von 15 mg/l in die Belebung die gleiche Elimination erreicht wird, wie bei einer Dosierung von 10 mg/l in nachgeschaltete Kontaktbecken (Variante 1b und 1c). Entsprechend der Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe in PAK-Kontaktbecken gemäß Tabelle 25 wird die Gesamtelimination der gemessenen Mikroschadstoffe bei der simultanen PAK-Dosierung mit rd. 84,4% geschätzt. Die Ablaufkonzentration beträgt rd. 25 µg/l. Aufgrund mangelnder Forschungsergebnisse zur simultanen PAK-Dosierung kann jedoch für die Einzelstoffe der gemessenen Mikroschadstoffe keine Prognose zur Elimination und Ablaufkonzentration für Variante 1a erstellt werden.

Tabelle 19: Auslegung Variante 1a - PAK simultan, SF

PAK-Silo			
Parameter	Kürzel	Wert	Einheit
PAK-Dosierung		15	mg PAK / l
Jahresabwassermenge	JAM	3.600.000	m <sup>3</sup> / a
jährl. PAK-Verbrauch		54	t / a
Schüttdichte PAK		0,35	t / m <sup>3</sup>
Lieferungen pro Jahr (gewählt)		4	
Liefermenge pro Lieferung		13,5	t / Lieferung
Liefervolumen pro Lieferung		38,57	m <sup>3</sup> / Lieferung
Silovolumen (gewählt)	V <sub>PAK-Silo</sub>	40	m <sup>3</sup>
Durchmesser PAK-Silo (gewählt)	D <sub>PAK-Silo</sub>	3	m
Höhe PAK-Silo	H <sub>PAK-Silo</sub>	5,7	m
Fläche PAK-Silo	A <sub>PAK-Silo</sub>	7,1	m <sup>2</sup>
Fällmitteldosierung in Nitrifikationszone			
Parameter	Kürzel	Wert	Einheit
Dosierverhältnis Fe / PAK		0,4	mg Fe / mg PAK
PAK-Dosierung		15	mg PAK / l
Fe-Dosierung		6	mg Fe / l
Jahresabwassermenge	JAM	3.600.000	m <sup>3</sup> / a
Fe-Tagesdosierung		59	kg Fe / d
Fe-Jahresdosierung		21,6	t Fe / a
FHM-Dosierung Zulauf Sandfiltration			
FHM-Dosierung (gewählt)		0,25	mg WS / l
FHM-Tagesdosierung		2,5	kg WS / d
FHM-Jahresdosierung		0,9	t WS / a
Sandfiltration			
Bemessungszufluss	Q <sub>Bem</sub> = Q <sub>M</sub>	540	l/s
Bemessungszufluss	Q <sub>M,h</sub>	1944	m <sup>3</sup> /h
Filterdurchmesser	d <sub>F</sub>	2,55	m
Filterfläche	A <sub>F</sub>	5,11	m <sup>2</sup>
max Oberflächenbeschickung	max q <sub>A</sub>	14	m/h bzw. m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> x h)
Filteranzahl	n <sub>Filter</sub> = Q <sub>M,h</sub> / (A <sub>F</sub> x max q <sub>A</sub> )	27,19	
Filteranzahl (gerundet)	n <sub>Filter</sub>	30,00	
Filterfläche	A <sub>F</sub>	153,21	m <sup>2</sup>
behandelbares Volumen	Q <sub>Beh</sub>	2144,96	m <sup>3</sup> /h
Filterbetthöhe	h <sub>Filterbett</sub>	2	m
Filterhöhe, gesamt	h <sub>Filter</sub>	5,95	m
Sandvolumen je Filter	V <sub>Sand</sub>	12,50	m <sup>3</sup>
Dichte Sand	Q <sub>Sand</sub>	1,5	t/m <sup>3</sup>
Sandmenge bei 2 m	m <sub>Sand</sub>	562,50	t
Breite Ingenieurbauwerk	B	16,3	m
Länge Ingenieurbauwerk	L	13	m
Fläche Ingenieurbauwerk	A	211,90	m <sup>2</sup>
Betriebsraum			
Breite Betriebsraum	B	6	m
Länge Betriebsraum	L	5,9	m
Fläche Betriebsraum	A	35,40	m <sup>2</sup>
sonstige Flächen			
Pflasterfläche		370	m <sup>2</sup>
Asphaltfläche		620	m <sup>2</sup>
Flächenverbrauch, gesamt	A <sub>ges</sub>	1244	m <sup>2</sup>

### Energieverbrauch

Der Energieverbrauch setzt sich aus dem Verbrauch folgender Aggregate zusammen:

- PAK-Treibwasserpumpe
- Pumpwerk
- Sandfiltration
- Kammerfilterpresse
- Kleinverbraucher (Fällmittelpumpe, Flockungshilfsmittelstation etc.)

Durch die PAK-Dosierung resultiert eine Erhöhung der zu entwässernden Schlammmenge um 7.125 m<sup>3</sup>/a. Der Mehrverbrauch der Kammerfilterpresse zur Entwässerung des Klärschlammes aufgrund der PAK-Dosierung beträgt 21.400 kWh/a. Der Gesamtenergiebedarf beträgt 185.400 kWh/a bzw. 0,052 kWh/m<sup>3</sup>. Die einzelnen Werte sind in Tabelle 20 aufgeführt.

**Tabelle 20: Energieverbrauch bei der Variante 1a - PAK simultan, SF**

Anlagenelement	Einheit	Verbrauch
PAK-Treibwasserpumpe	[kWh/a]	17.700
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,005
Pumpwerk	[kWh/a]	60.300
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,017
Sandfiltration	[kWh/a]	36.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,010
Kammerfilterpresse	[kWh/a]	21.400
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,006
Kleinverbraucher	[kWh/a]	50.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,014
Gesamtenergieverbrauch	[kWh/a]	<b>185.400</b>
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	<b>0,052</b>

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für die Variante 1a ist in Anlage B tabellarisch aufgeführt. In der Tabelle 21 ist eine Zusammenfassung der Kostenschätzung enthalten.

Zusammenfassend berechnen sich die Investitionskosten zu 2.983.628 €. Die Jahreskosten betragen 590.827 €/a. Der größte Kostenpunkt der Jahreskosten sind die Schlammensorgungskosten mit 225.386 €/a. Bei den Entsorgungskosten wurde für den Klärschlamm die Differenz der Kosten zwischen landwirtschaftlicher Verwertung und thermischer Verwertung von 41,65 €/t angesetzt. Für den neu anfallenden PAK-Kohleschlamm von ca. 170 t/a<sup>15</sup> gilt der volle Preis von 107,10 €/t. Für die Personalkosten wird aufgrund des geringen Betriebsaufwands anteilig eine 25%-Stelle veranschlagt. Die Kapitalkosten sind mit 138.118 €/a gering, da lediglich eine nachgeschaltete Sandfiltration zu errichten ist.

<sup>15</sup> Durch die Dosierung von PAK entstehen jährlich ca. 170 t PAK-Schlamm.

**Tabelle 21: Kostenschätzung für die Variante 1a - PAK simultan, SF**

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration					
Pos.	Kurztext	Ingenieur- bauwerk GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechn. Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>				
1.1	Baustelleneinrichtung	180.000,00	5.000,00	3.000,00	188.000,00
1.2	Dynasandfilter	1.175.250,00	117.500,00	58.750,00	1.351.500,00
1.3	Vorschacht Pumpwerk	81.750,00			81.750,00
1.4	Kanalbau	61.200,00			61.200,00
1.5	PAK-Silo und PAK-Suspensionsaufbereitung	100.830,00	75.000,00	37.500,00	213.330,00
1.6	Betriebsgebäude Sandfiltration	39.050,00	2.500,00	2.500,00	44.050,00
1.7	Betriebsgebäude PAK-Dosierung	25.745,00	2.500,00	2.500,00	30.745,00
1.8	Straßen- und Wegebau	118.800,00			118.800,00
	Baukosten, gesamt, netto	1.782.625,00	202.500,00	104.250,00	2.089.375,00
	Investitionskosten		netto [€]	Mw St [€]	brutto [€]
	Ingenieurbauwerke		1.782.625,00	338.698,75	2.121.323,75
	maschinelle Ausrüstung		202.500,00	38.475,00	240.975,00
	elektrotechnische Ausrüstung		104.250,00	19.807,50	124.057,50
	Baukosten, gesamt		2.089.375,00	396.981,25	2.486.356,25
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)		417.875,00	79.396,25	497.271,25
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>		2.507.250,00	476.377,50	2.983.627,50
<b>2</b>	<b>Betriebskosten</b>		netto [€]	Mw St [€]	brutto [€]
2.1	Energiekosten		50.076,48	9.514,53	59.591,01
2.2	Personalkosten		10.000,00	0,00	10.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten		15.048,13	2.859,14	17.907,27
2.4	PAK		114.000,00	21.660,00	135.660,00
2.5	FHM		3.500,00	665,00	4.165,00
2.6	Schlammförmung		189.400,00	35.986,00	225.386,00
=	<b>Betriebskosten</b>		<b>382.024,61</b>	<b>70.684,68</b>	<b>452.709,28</b>
<b>3</b>	<b>Reinvestitionskosten</b>				
		Investitionskosten		LAWA-	Reinvestitionskosten
		Bezugszeitpunkt		Faktoren	Bezugszeitpunkt
		Jahr 2016			Jahr 2016
		brutto [€]		$(1+r)^n / (1+i)^n$	brutto [€]
	Ingenieurbauwerke	2.121.323,75		0	0,00
	maschinelle Ausrüstung	240.975,00		0,58203	140.253,96
	elektrotechnische Ausrüstung	124.057,50		0,55368	68.687,63
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	497.271,25		0	0,00
<b>3</b>	<b>Reinvestitionskosten</b>	<b>2.983.627,50</b>			<b>208.941,59</b>
<b>4</b>	<b>Kapitalkosten</b>				
		In- und Reinvestitionen		LAWA-	Kapitalkosten
		Bezugszeitpunkt		Faktoren	Bezugszeitpunkt
		Jahr 2016			Jahr 2016
		brutto [€]		$i \cdot (1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$	brutto [€]
	Investitionskosten	2.983.627,50		0,04326	129.078,82
	Reinvestitionskosten	208.941,59		0,04326	9.039,31
<b>4</b>	<b>Kapitalkosten</b>				<b>138.118,13</b>
<b>5</b>	<b>Jahreskosten</b>				
				Bezugszeitpunkt	
				Jahr 2016	
				brutto	
	Betriebskosten			452.709,28	€/a
	Kapitalkosten			138.118,13	€/a
<b>5</b>	<b>Jahreskosten</b>			<b>590.827,41</b>	<b>€/a</b>
5	spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser	590.827,41 €/a /	3.600.000 m³/a =		0,164 €/m³
5	spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser	590.827,41 €/a /	2.500.000 m³/a =		0,236 €/m³
5	spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	590.827,41 €/a /	61.000 m³/a =		9,69 €/EW

## Zusammenfassung

Die simultane PAK-Dosierung in die Belebung ist ein leicht umzusetzendes Verfahren, welches außer einem PAK-Silo mit Ansetzbecken und Dosiersystem, einem Vorschacht für das Pumpwerk, einer Flockungshilfsmittelstation und einer kontinuierlich gespülten Sandfiltration keiner neuen Bautechnik bedarf. Der Flächenverbrauch ist mit ca. 1.244 m<sup>2</sup> gering. Die Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe wurde aufgrund mangelnder Forschungsergebnisse gemäß Variante 1b in Kapitel 4.1 angesetzt. Der Gesamtenergieverbrauch beträgt 185.400 kWh/a. Die Jahreskosten berechnen sich zu 590.827 €/a.

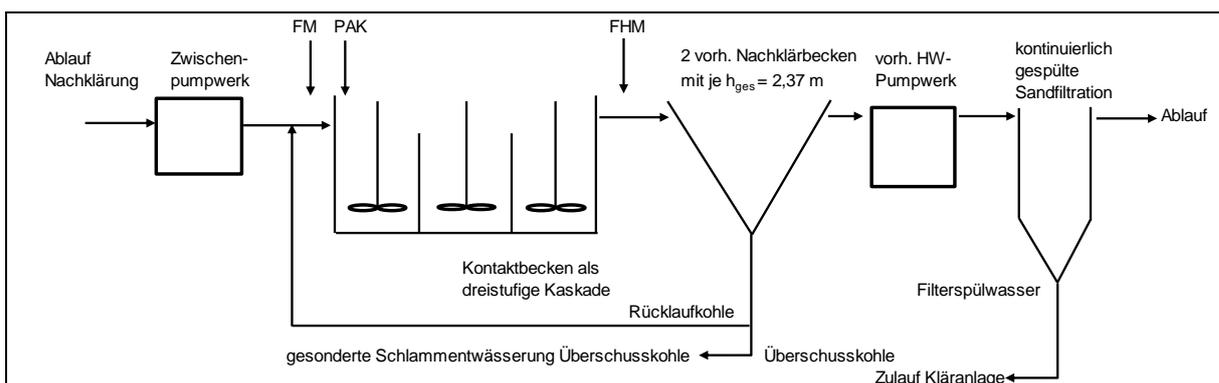
## 4.2 Variante 1b: Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration

### Verfahrensführung

Bei Variante 1b - Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration sind folgende Anlagenelemente zu errichten:

- Zwischenpumpwerk
- PAK-Silo
- Ansetzbecken und Dosiersystem der PAK
- Vorschacht Pumpwerk
- Kontaktbecken
- Flockungshilfsmittelstation
- Rücklaufschlammumpwerk
- Überschussschlammumpwerk
- Sandfiltration
- Zentrifuge

Die Verfahrensführung ist in Abbildung 22 dargestellt.



**Abbildung 22: Schema der PAK-Dosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken mit Nutzung von zwei vorh. Nachklärbecken und Sandfiltration**

Aufgrund der vorgesehenen Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken als Sedimentationsbecken für den PAK-Kohleschlamm ist die Errichtung eines Zwischenpumpwerks erforderlich. Entsprechend den Vorgaben des DWA Themenbands T3/2015 wird eine PAK-Dosiermenge von 10 mg/l gewählt. Zur Dosierung von Fällmittel in den Zulauf zu den Kontaktbecken werden Leitungen von der vorhandenen Fällmittelstation zu den Kontaktbecken verlegt. Die Dosierung von Fällmittel in den Zulauf der Kontaktbecken wird wie bei Variante 1a (Kapitel 4.1) mit der Dosierung zur Phosphorelimination in den Rücklaufschlammstrom

der Belebung abgeglichen, um eine optimale Ausnutzung des Fällmittels zu gewährleisten. Der Gesamtverbrauch an Fällmittel bleibt unverändert. Auf der Kläranlage Brühl sind zwei Nachklärbecken mit je einer  $h_{ges}$  von 2,37 m vorhanden. Bei einem Beckendurchmesser von 37 m beträgt die Oberfläche jedes der beiden Nachklärbecken 1.075 m<sup>2</sup>. Um die Nachklärbecken zur Abtrennung des PAK-Kohleschlammes zu verwenden, werden sie von der Belebung abgekoppelt und an die PAK-Kontaktbecken angeschlossen. Der Nachweis zur Abtrennung des PAK-Kohleschlammes in den beiden Nachklärbecken erfolgt gemäß DWA-A 131 [DWA 2016]. Zur Rückführung des abgesetzten PAK-Kohleschlammes aus den Nachklärbecken in die PAK-Kontaktbecken wird das vorhandene Rücklaufschlammumpwerk umgerüstet und mit neuen Pumpen ausgestattet. Das Rückführungsverhältnis wird mit 1 gewählt. Der tägliche Zuwachs an PAK- und Fällschlamm wird als Überschussschlamm aus dem System entfernt und einer gesonderten Schlammbehandlung mittels Zentrifuge zugeführt. Dadurch kann der Klärschlamm der Belebung weiterhin landwirtschaftlich verwertet werden.

Das adsorptiv gereinigte Abwasser wird hinter den Nachklärbecken zum vorhandenen Hochwasserpumpwerk abgeleitet und in die kontinuierlich gespülte Sandfiltration gepumpt, um die restliche Feinkohle aus dem Abwasser zu entfernen. Die Sandfiltration ist östlich der Ablaufmessstation angeordnet. Die Bemessungsdaten der Sandfiltration sind in Kapitel 4.1 enthalten. Das Filterspülwasser wird dem Zulauf der Kläranlage zugeleitet.

#### Dimensionierung der Anlagenteile

In einem neu zu errichtenden Betriebsgebäude südlich der Ablaufmessstation sind das Zwischenpumpwerk, das PAK-Dosiersystem, das Überschussschlammumpwerk, die Flockungshilfsmittelstation sowie die Zentrifuge zur Schlammmentwässerung angeordnet. Das PAK-Silo mit einem Volumen von 35 m<sup>3</sup> wird auf drei Lieferungen pro Jahr ausgelegt und westlich des Betriebsgebäudes angeordnet. Neue Zufahrtswege zur Anlieferung der PAK sind zu errichten. Die erforderliche Hubhöhe des Zwischenpumpwerks beträgt 1,5 m.

Die beiden neu zu errichtenden PAK-Kontaktbecken befinden sich nebeneinander östlich der Ablaufmessstation. Die PAK-Kontaktbecken sind durch je zwei Trennwände in je drei Kammern eingeteilt. In jeder Kammer ist ein Rührwerk angeordnet. Die Rührwerke sind für einen Energieeintrag von 6 W/m<sup>3</sup> ausgelegt. Die Dosierung von Fällmittel in den Zulauf der PAK-Kontaktbecken erfolgt wie bei Variante 1a (Kapitel 4.1) mit einem Verhältnis von 0,40 mg Fe/mg PAK [Schwentner 2011]. Die Dosiermenge berechnet sich zu 4 mg Fe/l. In den Zulauf der Nachklärung wird zur Verbesserung der Sedimentation und zur Erhöhung der TS-Konzentration 0,25 mg WS/l Polymer [Rölle et al. 2011] dosiert. In Tabelle 22 sind die Dosierung und der Jahresverbrauch von Fällmittel, PAK und Flockungshilfsmittel zusammengestellt.

**Tabelle 22: Fällmittel, PAK und Flockungshilfsmittel bei Variante 1b - PAK-KB, NK, SF**

	Einheit	Fällmittel	PAK	Flockungshilfsmittel
Dosierung	[mg/l]	4	10	0,25
Jahresverbrauch	[t/a]	-	36	0,9

Täglich fallen 0,27 t Überschussschlamm an. In der Kohleschlammmentwässerung mittels Zentrifuge wird ein TR von 35% erreicht, so dass jährlich ca. 100 t/a Kohleschlamm anfallen. Das Zentrat wird dem Zulauf der Kläranlage zugeleitet.

In der nachfolgenden Tabelle 23 sind die Daten zur Verfahrensauslegung der Variante 1b zusammengestellt.

Tabelle 23: Auslegung Variante 1b - PAK-KB, NK, SF

PAK-Silo				
Parameter	Kürzel	Wert	Einheit	
PAK-Dosierung		10	mg PAK / l	-DWA 2015
Jahresabwassermenge	JAM	3.600.000	m <sup>3</sup> / a	
jährl. PAK-Verbrauch		36	t / a	
Schüttdichte PAK		0,35	t / m <sup>3</sup>	
Lieferungen pro Jahr		3		
Liefermenge pro Lieferung		12	t / Lieferung	
Liefervolumen pro Lieferung		34,29	m <sup>3</sup> / Lieferung	
gewähltes Silovolumen	V <sub>PAK-Silo</sub>	35	m <sup>3</sup>	
Durchmesser PAK-Silo	D <sub>PAK-Silo</sub>	3	m	
Höhe PAK-Silo	H <sub>PAK-Silo</sub>	5	m	
Fläche PAK-Silo	A <sub>PAK-Silo</sub>	7,1	m <sup>2</sup>	
Fällmitteldosierung in Zulauf Kontaktbecken				
Parameter	Kürzel	Wert	Einheit	
Dosierverhältnis Fe / PAK		0,4	mg Fe / mg PAK	
PAK-Dosierung		10	mg PAK / l	- Frank et al. 2015
Fe-Dosierung		4	mg Fe / l	
Jahresabwassermenge	JAM	3.600.000	m <sup>3</sup> / a	
Fe-Jahresdosierung		14,4	t Fe / a	
Kontaktbecken - zweistraßig				
Anzahl Becken		2		
Aufenthaltszeit (gewählt)	t <sub>A, Kontakt, gewählt</sub>	0,5	h	-mindestens 0,5 h bei Q <sub>M</sub>
Rückführverhältnis (gewählt)	RF <sub>Kontakt, gewählt</sub>	1		
erforderliches Volumen	V <sub>Kontakt, erf</sub>	972	m <sup>3</sup>	je Straße
Tiefe (gewählt)	H <sub>Kontakt</sub>	5	m	
Fläche	A <sub>Kontakt, berechnet</sub>	194,4	m <sup>2</sup>	je Straße
Breite (gewählt)	B <sub>Kontakt</sub>	6	m	Innenmaß je Straße
Länge	L <sub>Kontakt</sub>	33	m	Innenmaß
Volumen	V <sub>Kontakt, gepl</sub>	990	m <sup>3</sup>	je Straße
Aufenthaltszeit, gepl	t <sub>A, Kontakt, gepl</sub>	0,51	h	
Breite Ingenieurbauwerk	B	13,2	m	
Länge Ingenieurbauwerk	L	36,9	m	inkl. Zu- und Ablaufrinne
Fläche Ingenieurbauwerk	A	487,08	m <sup>2</sup>	inkl. Zu- und Ablaufrinne
Nachweis Nachklärung (je h <sub>ges</sub> = 2,37 m) - D=37m - A <sub>ges</sub> = 2150,4 m <sup>2</sup>				
Schlammindex ISV (gewählt)	ISV	80	ml/g	
Trockensubstanz TS <sub>Kontakt</sub>	TS <sub>Kontakt</sub>	3	g/l	Annahme
Schlammvolumenbeschickung q <sub>SV</sub>	q <sub>SV</sub>	217	l/(m <sup>2</sup> x h)	Iteration über q <sub>A</sub> mit AS <sub>sed, erf.</sub>
Wirkungsgrad Schildräumer k	k	0,7		
Vergleichsschlammvolumen VSV	VSV=ISV x TS <sub>Kontakt</sub>	240	ml / l	
Oberflächenbeschickung q <sub>A</sub>	q <sub>A</sub> = q <sub>SV</sub> / VSV	0,90	m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> x h)	
erforderliche Fläche A <sub>Sed, erf.</sub>	A <sub>Sed, erf.</sub> = Q <sub>M</sub> / q <sub>A</sub>	2150,00	m <sup>2</sup>	
TS Rücklaufschlammes TS <sub>RS</sub>	TS <sub>RS</sub> = TS <sub>Kontakt</sub> x (1+RF)/RF	6	g/l	
TS Beckensohle TS <sub>BS</sub>	TS <sub>BS</sub> = TS <sub>RS</sub> /k	8,57	g/l	
erforderliche Eindickzeit t <sub>E</sub>	t <sub>E</sub> = (TS <sub>BS</sub> x ISV / 1000) <sup>3</sup>	0,32	h	
Klarwasserzone h1	h1	0,5	m	
Übergangs- und Pufferzone h23	h23 = q <sub>A</sub> x (1+RF) x ((500/(1000-VSV)+VSV/1100))	1,58	m	
Eindick- und Räumzone h4	h4 = TS <sub>Kontakt</sub> x q <sub>A</sub> x (1+RF) x t <sub>E</sub> /TS <sub>BS</sub>	0,20	m	
erf. Gesamthöhe h <sub>ges, erf.</sub>	h <sub>ges, erf.</sub> = h1+h23+h4	2,29	m	< 2,37 m → Nachweis erfüllt
FHM-Dosierung Zulauf Sandfiltration				
FHM-Dosierung		0,25	mg WS / l	FHM als Polymer-Granulat
FHM-Jahresdosierung		0,9	t WS / a	
Maschinenhalle				
Breite Betriebsraum	B	8,8	m	
Länge Betriebsraum	L	9,5	m	
Fläche Betriebsraum	A	83,60	m <sup>2</sup>	
sonstige Flächen				
Pflasterfläche		330	m <sup>2</sup>	
Asphaltfläche		560	m <sup>2</sup>	
Flächenverbrauch, gesamt	A <sub>ges</sub>	1589	m <sup>2</sup>	

### Betrieb und Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Die Dosierung von PAK und Fällmittel in die PAK-Kontaktbecken sowie von Flockungshilfsmittel in den Zulauf zur Nachklärung wird proportional zur Zulaufmenge mittels Durchflussmessung des Zwischenpumpwerks gesteuert. Der Zulauf zu den PAK-Kontaktbecken wird über eine Zulaufrinne mit einem Zulaufschieber je Becken gesteuert. Die Beschickung der Sandfiltration wird ebenfalls durch Schieber vor den jeweiligen Zulaufrinnen gesteuert. Die Fällmitteldosierung in den Zulauf der PAK-Kontaktbecken muss mit der Dosierung in die Belebung abgeglichen werden. Daher wird die Steuerung der Fällmitteldosierung in den Rücklaufschlammstrom der Belebung durch Berücksichtigung der Dosierung in die PAK-Kontaktbecken ergänzt.

### Elimination

Für die gemessenen Mikroschadstoffe und die konventionellen Abwasserparameter werden die Eliminationsraten und die Ablaufkonzentrationen auf Grundlage von Literaturwerten und Forschungsergebnissen anderer Anlagen berechnet. Dabei werden jeweils gerundete Mittelwerte der Eliminationswerte aus Literaturwerten und Forschungsergebnissen verwendet.

Die Literaturwerte und Forschungsergebnisse für PAK-Adsorptionsstufen basieren auf Dosiermengen von 10 bis 20 mg PAK/l, wobei der Großteil der Angaben für 10 mg PAK/l vorliegt.

Durch die Dosierung von PAK in die PAK-Kontaktbecken und die nachgeschaltete Sandfiltration zur Abtrennung der Feinkohle werden zusätzlich zu den Mikroschadstoffen auch die konventionellen Abwasserparameter AFS, CSB und  $P_{ges}$  eliminiert, während die Stickstoffverbindungen unverändert bleiben.

In Tabelle 24 sind die Prognosen der Elimination der konventionellen Abwasserparameter sowie die berechneten Ablaufkonzentration zusammengestellt. Die Prognosen erfolgen auf Grundlage der in den Jahren 2013 - 2015 gemessenen Ablaufwerte der Kläranlage Brühl entsprechend Kapitel 2.3 und Literaturwerten.

**Tabelle 24: Elimination konventioneller Abwasserparameter bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF**

PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration					
Parameter	$C_{zu, 4. Stufe}$ mg/l	$\eta_{i.M, 4. Stufe}$ %	$C_{ab}^a$ mg/l	Quelle $\eta_{4. Stufe}$	Bemerkungen
AFS	9	80	1,80	Barjenbruch 2007, Pinnekamp et al. 2012	nur durch Filtration
CSB <sub>max</sub>	59	50	29,50	Schwentner 2012	
CSB <sub>85%</sub>	37	50	18,50	Schwentner 2012	
NH <sub>4</sub> -N	4,99	0	4,99	Barjenbruch 2007	nur bei Belüftung im Sandfilter
N <sub>ges</sub>	9,6	0	9,60	Barjenbruch 2007	nur bei Belüftung im Sandfilter
P <sub>ges, max</sub>	1,98	70	0,59		
P <sub>ges, 85%</sub>	0,88	70	0,26	Schwentner 2012	nur durch FM-Dosierung und Filtration
Bemerkungen: a: $C_{ab} = (100 - \eta_{i.M, 4. Stufe}) / 100 \times C_{zu, max, 4. Stufe}$					

Die weitergehende Elimination von AFS und  $P_{ges}$  erfolgt durch die Fällmitteldosierung und die Sandfiltration [Barjenbruch 2007]. Hinsichtlich des CSB wird durch PAK nur der DOC adsor-

biert [Rößler et al. 2014]. Eine weitere Elimination des CSB findet in der Sandfiltration statt [Barjenbruch 2007].

Die Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe zwischen Zulauf Belebung und Ablauf der Sandfiltration und die Prognose der Ablaufkonzentrationen erfolgt anhand der Mittelwerte aller Messwerte während des Trockenwetterscreenings und -monitorings auf der Kläranlage Brühl und Literaturwerten sowie Forschungsergebnissen zur Elimination in PAK-Adsorptionsstufen.

In Tabelle 25 sind die Zulaufkonzentrationen, die Eliminationsraten und die berechneten Ablaufkonzentrationen der gemessenen Mikroschadstoffe zusammengestellt. Die Summen der gemessenen Mikroschadstoffe, der Monitoringstoffe, der Hauptstoffe und der Indikatorstoffe sind gesondert ausgewiesen.

Gabapentin, Melamin, DEET, Acesulfam K, Mecoprop P, Ioversol und PFOA werden durch PAK nur in geringem Umfang adsorbiert bzw. eliminiert.

Die Elimination aller gemessenen Mikroschadstoffe beträgt 84,4%. Die Ablaufkonzentration liegt bei 24,75 µg/l. Die Hauptstoffe werden zu 76,5% eliminiert. Die Vorgabe des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW zur Elimination der Indikatorstoffe von 80% wird mit 89,4% sicher eingehalten. Außer bei Sulfamethoxazol mit einer Eliminationsrate von 60,2% werden bei den Indikatorparametern Eliminationsraten größer 80% erreicht.

**Tabelle 25: Prognose der Elimination und Ablaufkonzentration der gemessenen Mikroschadstoffe bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF**

PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration								
Mikroschadstoffe, TW-Mittelwerte		$c_{zu, BB}$	$c_{zu, 4. Stufe}$	$\eta_{Belebung}^a$	$\eta_{LM, 4. Stufe}$	$c_{ab}^b$	$\eta_{ges}^c$	Quelle $\eta_{4. Stufe}$
		ng/l	ng/l	%	%	ng/l	%	
S M H	Valsartan	31.714	13.571	57,2	82,8	2341	92,6	Fux et al. 2015, Margot et al. 2011
S	Gabapentin	15.500	10.500	32,3	15,0	8925	42,4	Böhler et al. 2012, Metzger et al. 2012
S M H I	Diclofenac	8.486	6.914	18,5	85,0	1037	87,8	DWA 2015, Metzger 2010
S	Amidotrizoensäure	5.650	4.600	18,6	0	4600	18,6	DWA 2015, Metzger 2010
S M H I	1H-Benzotriazol	11.029	3.729	66,2	80,0	746	93,2	Böhler et al. 2012, Rößler et al. 2014
S	$\Sigma$ 4,5-Methyl Benzotriazol	5.300	3.650	31,1	83,5	602	88,6	Margot et al. 2011
S	Melamin	900	2.000	-122,2	10,0	1800	-100,0	IUTA
S	Iomeprol	3.600	1.790	50,3	70,0	537	85,1	DWA 2015, Metzger 2010
S	Iopamidol	3.790	1.725	54,5	70,0	518	86,3	DWA 2015, Metzger 2010
S M I	Metoprolol	1.286	1.300	-1,1	85,0	195	84,8	DWA 2015, Metzger 2010, Böhler et al. 2012
S M	Bisoprolol	1.300	1.200	7,7	65,0	420	67,7	IUTA
S	Guanylharstoff	170	1.100	-547,1	30,0	770	-352,9	IUTA
S M I	Carbamazepin	766	841	-9,9	85,0	126	83,5	DWA 2015, Metzger 2010, Böhler et al. 2012
S M	Sotalol	769	743	3,3	90,0	74	90,3	DWA 2015, Metzger 2010
S	Galaxolid	891	660	25,9	80,0	132	85,2	Metzger et al. 2012; Grünebaum et al. 2011
S	Iohexol	3.950	575	85,4	70,0	173	95,6	DWA 2015, Metzger 2010
S M	Losartan	1.971	450	77,2	50,0	225	88,6	Margot et al. 2011
S	DEET	2.200	445	79,8	15,0	378	82,8	IUTA
S M I	Clarithromycin	986	439	55,5	70,0	132	86,7	Böhler et al. 2012
S M	Acesulfam K	26.529	417	98,4	8,0	384	98,6	Metzger et al. 2012
S M I	Sulfamethoxazol	526	349	33,7	40,0	209	60,2	Rößler et al. 2014, Böhler et al. 2012
S	Bezafibrate	1.400	215	84,6	90,0	22	98,5	DWA 2015, Metzger 2010
S	PFBS	43	150	-248,8	35,0	98	-126,7	IUTA
S	Iopromide	1.215	150	87,7	70,0	45	96,3	DWA 2015, Metzger 2010
S M	Ciprofloxacin	1.446	116	92,0	85,0	17	98,8	IUTA
S	Diuron	81	100	-22,8	70,0	30	63,1	DWA 2015, Metzger 2010
S M	Terbutryn	105	90	13,6	85,0	14	87,0	Zwickenpflug et al. 2010
S	Tonalid	145	77	47,2	75,0	19	86,8	Metzger et al. 2012; Grünebaum et al. 2011
S M	PFOS	122	66	45,6	28,0	48	60,8	Metzger et al. 2012
S	Mecoprop P	180	48	73,6	3,0	46	74,4	Margot et al. 2011
S	10,11 Dihydrocarbamazepin	30	30	0,0	65,0	11	65,0	IUTA
S	Isoproturone	30	30	0,0	40,0	18	40,0	Margot et al. 2011
S	Ioversol	30	30	0,0	10,0	27	10,0	IUTA
S	PFBA	47	22	54,3	20,0	17	63,4	IUTA
S M	PFOA	10	11	-10,0	16,0	9	7,6	Metzger et al. 2012
S	Ibuprofen	26.000	10	100,0	70,0	3	100,0	DWA 2015, Metzger 2010
<b>Summe Mikroschadstoffe</b>		<b>158.194</b>	<b>58.141,1</b>	<b>63,2</b>	<b>57,4</b>	<b>24.746</b>	<b>84,4</b>	
<b>davon Monitoringstoffe</b>		<b>87.042</b>	<b>30.236</b>	<b>65,3</b>	<b>80,2</b>	<b>5.977</b>	<b>93,1</b>	
<b>davon Hauptstoffe</b>		<b>77.679</b>	<b>42.964</b>	<b>44,7</b>	<b>57,5</b>	<b>18.251</b>	<b>76,5</b>	
<b>davon Indikatorstoffe</b>		<b>23.077</b>	<b>13.571</b>	<b>41,2</b>	<b>82,0</b>	<b>2.445</b>	<b>89,4</b>	

Bemerkungen: a:  $\eta_{Belebung} = (1 - c_{zu, max, 4. Stufe} / c_{zu, max, BB}) \times 100$       b:  $c_{ab} = (100 - \eta_{LM, 4. Stufe}) / 100 \times c_{zu, max, 4. Stufe}$       c:  $\eta_{ges} = (1 - c_{ab} / c_{zu, max, BB}) \times 100$

S: Screening    M: Monitoring    H: Hauptstoff    I: Indikatorstoff

Die vom Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW vorgegebenen Bewertungskriterien werden nicht bei allen Mikroschadstoffen im Ablauf der Sandfiltration eingehalten. Dies trifft besonders für Valsartan, Gabapentin, Diclofenac und PFOS zu, siehe Tabelle 26. Die Ursache für die deutlichen Überschreitungen der Bewertungskriterien liegt in den im Vergleich mit anderen Kläranlagen sehr hohen Zulaufkonzentrationen, siehe Tabelle 5.

**Tabelle 26: Gegenüberstellung der Bewertungskriterien bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF**

Einheit ng/l	Bewertungskriterium	PAK-KB, NK, SF	Einheit ng/l	Bewertungskriterium	PAK-KB, NK, SF
Valsartan	100	2341,1	Sulfamethoxazol	600	209,1
Gabapentin	100	8925,0	Ciprofloxacin	36	17,4
Diclofenac	50	1037,1	Terbutryn	65	13,6
1H-Benzotriazol	10.000	745,7	PFOS	0,65	66,3
Metoprolol	7.300	195,0	Mecoprop P	100	46,1
Carbamazepin	500	126,2	Isoproturone	300	18,0
Losartan	100	225,0	Ibuprofen	10	3,0
Clarithromycin	100	131,6	PFOA	100	<10
Acesulfam K	100	383,8	Östrogene Aktivität (c <sub>ab</sub> NK)	0,4	0,082
Bemerkungen:		: Überschreitung Bewertungskriterium			

### Energieverbrauch

Entsprechend der Zusammenstellung des Energieverbrauchs für simultane PAK-Dosierung in Tabelle 20 gemäß Variante 1a sind bei der Variante 1b zusätzlich das Zwischenpumpwerk, die Rührwerke sowie die Schlammwässerung für den Kohleschlamm zu berücksichtigen.

In Tabelle 27 sind die Energieverbrauchswerte zusammengestellt. Da das Abwasser zweimal gehoben werden muss, beträgt bei dieser Variante der Energieverbrauch für die Abwasserförderung ca. 83.000 kWh/a bzw. 0,023 kWh/m<sup>3</sup>. Aufgrund des im Vergleich mit Variante 1a geringeren PAK-Bedarfs sinkt der Energieverbrauch der PAK-Dosierung auf ca. 17.700 kWh/a bzw. 0,005 kWh/m<sup>3</sup>. Der Energieverbrauch der sechs Rührwerke berechnet sich zu 105.000 kWh/a bzw. 0,029 kWh/m<sup>3</sup>. Der gesamte Energieverbrauch beträgt 312.600 kWh/a bzw. 0,087 kWh/m<sup>3</sup>.

**Tabelle 27: Energieverbrauch bei der Variante 1b - PAK-KB, NK, SF**

Anlagenelement	Einheit	Verbrauch
Zwischenpumpwerk	[kWh/a]	22.600
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,006
PAK-Treibwasserpumpe	[kWh/a]	17.700
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,005
Rührwerke	[kWh/a]	105.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,029
Überschussschlammumpwerk	[kWh/a]	3000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,001
Pumpwerk	[kWh/a]	60.300
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,017
Sandfiltration	[kWh/a]	36.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,010
Zentrifuge	[kWh/a]	18.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,005
Kleinverbraucher	[kWh/a]	50.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,014
Gesamtverbrauch	[kWh/a]	312.600
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,087

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für die Variante 1b erfolgt entsprechend der Vorgehensweise nach Kapitel 4 und ist in der Anlage C tabellarisch aufgeführt. In der Tabelle 28 ist eine Zusammenfassung der Kostenschätzung enthalten.

Zusammenfassend berechnen sich die Investitionskosten zu 6.949.226 €. Die Jahreskosten betragen 624.070 €/a. Der größte Kostenpunkt der Jahreskosten sind die Kapitalkosten mit 334.488 €/a bzw. 0,093 €/m<sup>3</sup>. Dies ist durch den großen Umfang der zu errichtenden Ingenieurbauwerke bestehend aus PAK-Kontaktbecken und Sandfiltration begründet. Danach folgen die Energiekosten mit 99.576 €/a. Die hohen Energiekosten resultieren aus den sechs Rührwerken in den PAK-Kontaktbecken. Da der PAK-Kohleschlamm nicht landwirtschaftlich verwertet werden darf, ist dieser thermisch zu entsorgen. Die Kosten der Schlamm Entsorgung berechnen sich bei einer zu entsorgenden Kohleschlammmenge von ca. 100 t/a<sup>16</sup> zu 10.710 €/a. Für die Personalkosten wird aufgrund des Betriebsaufwands mit Schlammwässerung des Kohleschlammes eine volle Stelle mit 40.000 €/a angesetzt.

<sup>16</sup> Durch die Dosierung von PAK entstehen in der Adsorptionsstufe jährlich ca. 100 t entwässerter Schlamm bei einem TR von 35%.

**Tabelle 28: Kostenschätzung für die Variante 1b - PAK-KB, NK, SF**

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration					
Pos.	Kurztext	Ingenieur- bauwerke netto [€]	maschinelle Ausrüstung netto [€]	eletrotechnische Ausrüstung netto [€]	Gesamtkosten netto [€]
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>				
1.1	Baustelleneinrichtung	356.000,00	22.000,00	11.000,00	389.000,00
1.2	PAK-Kontaktbecken	570.750,00	56.000,00	28.000,00	654.750,00
1.3	Umbau- und Ertüchtigungsmaßnahmen	550.000,00	150.000,00	75.000,00	775.000,00
1.4	Dynasandfilter	1.172.725,00	117.500,00	58.750,00	1.348.975,00
1.5	Vorschacht Pumpwerk	118.600,00			118.600,00
1.6	Kanalbau	443.750,00			443.750,00
1.7	PAK-Silo und PAK-Suspensionsaufbereitung	100.830,00	75.000,00	37.500,00	213.330,00
1.8	Betriebsgebäude mit RS- und ÜSS-Pumpwerk und Schlammwässerung	298.700,00	345.000,00	172.500,00	816.200,00
1.9	Straßen- und Wegebau	106.800,00			106.800,00
	<b>Baukosten, gesamt, netto</b>	<b>3.718.155,00</b>	<b>765.500,00</b>	<b>382.750,00</b>	<b>4.866.405,00</b>
	Investitionskosten		netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
	Ingenieurbauwerke		3.718.155,00	706.449,45	4.424.604,45
	maschinelle Ausrüstung		765.500,00	145.445,00	910.945,00
	eletrotechnische Ausrüstung		382.750,00	72.722,50	455.472,50
	<b>Baukosten, gesamt</b>		<b>4.866.405,00</b>	<b>924.616,95</b>	<b>5.791.021,95</b>
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)		973.281,00	184.923,39	1.158.204,39
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>		<b>5.839.686,00</b>	<b>1.109.540,34</b>	<b>6.949.226,34</b>
<b>2</b>	<b>Betriebskosten</b>		netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
2.1	Energiekosten		83.677,40	15.898,71	99.576,11
2.2	Personalkosten		40.000,00	0,00	40.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten		41.555,78	7.895,60	49.451,37
2.4	PAK		72.000,00	13.680,00	85.680,00
2.5	FHM		3.500,00	665,00	4.165,00
2.6	Schlammensorgung		9.000,00	1.710,00	10.710,00
<b>=</b>	<b>Betriebskosten</b>		<b>249.733,17</b>	<b>39.849,30</b>	<b>289.582,48</b>
<b>3</b>	<b>Reinvestitionskosten</b>		Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>n</sup> / (1 + i) <sup>n</sup>	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
	Ingenieurbauwerke		4.424.604,45	0	0,00
	maschinelle Ausrüstung		910.945,00	0,58203	530.194,59
	eletrotechnische Ausrüstung		455.472,50	0,55368	252.184,08
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)		1.158.204,39	0	0,00
<b>3</b>	<b>Reinvestitionskosten</b>		<b>6.949.226,34</b>		<b>782.378,67</b>
<b>4</b>	<b>Kapitalkosten</b>		In- und Reinvestitionen Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren i <sup>a</sup> (1+i) <sup>b</sup> /((1+i) <sup>b</sup> -1)	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
	Investitionskosten		6.949.226,34	0,04326	300.640,06
	Reinvestitionskosten		782.378,67	0,04326	33.847,56
<b>4</b>	<b>Kapitalkosten</b>				<b>334.487,62</b>
<b>5</b>	<b>Jahreskosten</b>			Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto	
	Betriebskosten			289.582,48	€/a
	Kapitalkosten			334.487,62	€/a
<b>5</b>	<b>Jahreskosten</b>			<b>624.070,10</b>	<b>€/a</b>
<b>5</b>	spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	624.070,10 €/a / 3.600.000 m <sup>3</sup> /a =			0,173 €/m <sup>3</sup>
<b>5</b>	spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Frischwasser	624.070,10 €/a / 2.500.000 m <sup>3</sup> /a =			0,250 €/m <sup>3</sup>
<b>5</b>	spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	624.070,10 €/a / 61.000 m <sup>3</sup> /a =			10,23 €/EW

## Zusammenfassung

Der Flächenverbrauch liegt bei 1.589 m<sup>2</sup>. Der Verbrauch an Betriebsmitteln ist bei PAK-Dosierung in Kontaktbecken aufgrund der geringeren Hintergrundbelastung mit gelösten und ungelösten Abwasserinhaltsstoffen im Vergleich zur simultanen PAK-Dosierung in die Belebung niedriger. Die Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe berechnet sich zu 84,4%. Die gemessenen Indikatorstoffe werden zu 89,4% eliminiert. Des Weiteren wird eine Reduzierung der Ablaufwerte der konventionellen Abwasserparameter AFS, CSB und P<sub>ges</sub> erreicht, siehe Tabelle 24. Der Gesamtenergieverbrauch beträgt 312.600 kWh/a. Im Vergleich mit der simultanen PAK-Dosierung in die Belebung gemäß Variante 1a ist bei der Varianten 1b der Aufwand für Bautechnik mit Kapitalkosten von 334.488 €/a höher. Durch die Verwendung der vorhandenen Nachklärbecken mit h<sub>ges</sub> = 2,37 m kann der Aufwand der Baukosten reduziert werden, da keine neue Sedimentationsstufe zu errichten ist. Die Jahreskosten berechnen sich zu 624.070 €/a.

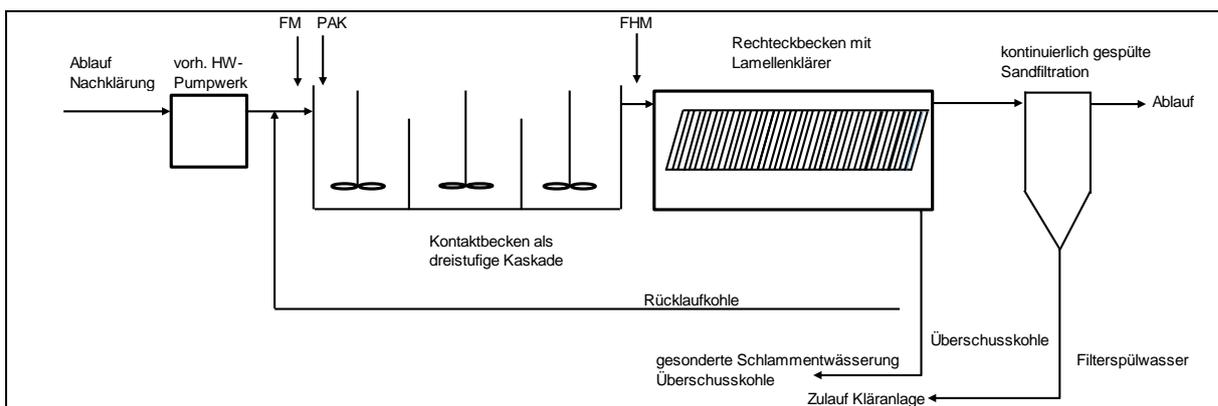
### 4.3 Variante 1c: Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration

#### Verfahrensführung

Bei Variante 1c: Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration sind folgende Anlagenelemente neu zu errichten:

- PAK-Silo
- Ansetzbecken und Dosiersystem der PAK
- PAK-Kontaktbecken
- Flockungshilfsmittelstation
- Lamellenklärer
- Rücklaufschlammumpwerk
- Überschussschlammumpwerk
- Sandfiltration
- Zentrifuge

Die Verfahrensführung ist in Abbildung 23 dargestellt.



**Abbildung 23: Schema der nachgeschalteten Kontaktbecken mit Lamellenklärer und Sandfiltration**

Die Verfahrensführung der Variante 1c entspricht mit Ausnahme der Sedimentation der Variante 1b. In Variante 1c ist die Sedimentation als Lamellenklärer ausgeführt, in der Varianten 1b ist die Sedimentation als Nachklärung ausgeführt, siehe Kapitel 4.2. Um die Anlagen zur Elimination der Mikroschadstoffe im Bereich der Ablaufmessstation anordnen zu können, muss die Sedimentation aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse als Lamellenklä-

rer ausgeführt werden. Der Flächenbedarf von Lamellenklärenern beträgt ca.  $\frac{1}{4}$  des Flächenbedarfs von Nachklärbecken.

Die Dosiermengen und -stellen der Betriebsmittel entsprechen der Variante 1b und sind in Tabelle 22 aufgeführt. Die Entwässerung des Kohleschlamms erfolgt gemäß Variante 1b mittels Zentrifuge.

#### Dimensionierung der Anlagenteile

Die Anordnung der PAK-Kontaktbecken erfolgt westlich der Ablaufmessstation. Entsprechend Variante 1b wird ein Betriebsgebäude südlich der Ablaufmessstation errichtet. Zur Rückführung des PAK-Schlamms aus den Lamellenklärenern zurück in die PAK-Kontaktbecken wird im Keller des Betriebsgebäudes das Rücklaufschlammumpwerk angeordnet. Das PAK-Silo wird neben den PAK-Kontaktbecken angeordnet. Neue Zufahrtswege zur Anlieferung der PAK sind zu errichten. Das adsorptiv gereinigte Abwasser wird hinter den Lamellenklärenern im Freispiegelgefälle in die kontinuierlich gespülte Sandfiltration abgeleitet, um die restliche Feinkohle aus dem Abwasser zu entfernen. Die Sandfiltration ist östlich der Ablaufmessstation angeordnet. Die Bemessungsdaten der Sandfiltration sind in Kapitel 4.1 enthalten. Das Filterspülwasser wird dem Zulauf der Kläranlage zugeleitet.

In der nachfolgenden Tabelle 29 sind die Daten zur Verfahrensauslegung der Variante 1c zusammengestellt.

Tabelle 29: Auslegung Variante 1c - PAK-KB, LK, SF

PAK-Silo				
Parameter	Kürzel	Wert	Einheit	
PAK-Dosierung		10	mg PAK / l	-DWA 2015
Jahresabwassermenge	JAM	3.600.000	m <sup>3</sup> / a	
jährl. PAK-Verbrauch		36	t / a	
Schüttdichte PAK		0,35	t / m <sup>3</sup>	
Lieferungen pro Jahr		3		
Liefermenge pro Lieferung		12	t / Lieferung	
Liefervolumen pro Lieferung		34,29	m <sup>3</sup> / Lieferung	
gewähltes Silovolumen	V <sub>PAK-Silo</sub>	35	m <sup>3</sup>	
Durchmesser PAK-Silo	D <sub>PAK-Silo</sub>	3	m	
Höhe PAK-Silo	H <sub>PAK-Silo</sub>	5	m	
Fläche PAK-Silo	A <sub>PAK-Silo</sub>	7,1	m <sup>2</sup>	
Fällmitteldosierung in Zulauf Kontaktbecken				
Parameter	Kürzel	Wert	Einheit	
Dosierverhältnis Fe / PAK		0,4	mg Fe / mg PAK	
PAK-Dosierung		10	mg PAK / l	- Frank et al. 2015
Fe-Dosierung		4	mg Fe / l	
Jahresabwassermenge	JAM	3.600.000	m <sup>3</sup> / a	
Fe-Jahresdosierung		14,4	t Fe / a	
Kontaktbecken - zweistraßig				
Anzahl Becken		2		
Aufenthaltszeit (gewählt)	t <sub>A, Kontakt, gewählt</sub>	0,5	h	-mindestens 0,5 h bei Q <sub>M</sub>
Rückführverhältnis (gewählt)	RF <sub>Kontakt, gewählt</sub>	1		- Vorgabe nach KomMNRW: 0,5 bis 1,0
erforderliches Volumen	V <sub>Kontakt, erf</sub>	972	m <sup>3</sup>	je Straße
Tiefe (gewählt)	H <sub>Kontakt</sub>	5	m	
Fläche	A <sub>Kontakt, berechnet</sub>	194,4	m <sup>2</sup>	je Straße
Breite (gewählt)	B <sub>Kontakt</sub>	6	m	Innenmaß je Straße
Länge	L <sub>Kontakt</sub>	33	m	Innenmaß
Volumen	V <sub>Kontakt, gepl</sub>	990	m <sup>3</sup>	je Straße
Aufenthaltszeit, gepl	t <sub>A, Kontakt, gepl</sub>	0,51	h	
Breite Ingenieurbauwerk	B	13,2	m	
Länge Ingenieurbauwerk	L	36,8	m	inkl. Zu.- und Ablaufrinne
Fläche Ingenieurbauwerk	A <sub>Kontakt, gepl</sub>	485,76	m <sup>2</sup>	inkl. Zu.- und Ablaufrinne
Lamellenklärer - zweistraßig				
Anzahl Becken		2		
Höhe Lamellenpakete		2,7	m	
Tiefe (gewählt)		4	m	
Breite	B <sub>Klärer</sub>	7,5	m	Innenmaß je Straße
Länge	L <sub>Klärer</sub>	25,3	m	Innenmaß je Straße
Volumen	V <sub>Klärer</sub>	759	m <sup>3</sup>	je Straße
Breite Ingenieurbauwerk	B	16,2	m	
Länge Ingenieurbauwerk	L	29,1	m	inkl. Zu.- und Ablaufrinne
Fläche Ingenieurbauwerk	A	471,42	m <sup>2</sup>	inkl. Zu.- und Ablaufrinne
FHM-Dosierung Zulauf Sandfiltration				
FHM-Dosierung		0,25	mg WS / l	FHM als Polymer-Granulat
FHM-Jahresdosierung		0,9	t WS / a	
Maschinenhalle				
Breite Betriebsraum	B	8,8	m	
Länge Betriebsraum	L	9,5	m	
Fläche Betriebsraum	A	83,60	m <sup>2</sup>	
sonstige Flächen				
Pflasterfläche		350	m <sup>2</sup>	
Asphaltfläche		480	m <sup>2</sup>	
Flächenverbrauch, gesamt A <sub>nes</sub>		2090	m <sup>2</sup>	

### Betrieb und Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Die Steuerung der Anlage zur Elimination der Mikroschadstoffe gemäß Variante 1c entspricht der Variante 1b, siehe Kapitel 4.2.

### Elimination

Die Eliminationsraten und die Ablaufkonzentrationen der Anlage zur Elimination der Mikroschadstoffe gemäß Variante 1c entspricht der Variante 1b, siehe Kapitel 4.2.

### Energieverbrauch

Die Energieverbrauchswerte der Variante 1c entsprechen den Energieverbrauchswerten der Variante 1b.

In Tabelle 30 sind die Energieverbrauchswerte zusammengestellt. Der jährliche Energieverbrauch beträgt 312.600 kWh/a bzw. 0,087 kWh/m<sup>3</sup>. Dieser Wert liegt im gleichen Bereich wie auf der Kläranlage Dülmen mit 55.000 EW und 363.000 kWh/a [Alt et al. 2015]<sup>17</sup>.

**Tabelle 30: Energieverbrauch bei der Variante 1c - PAK-KB, LK, SF**

Anlagenelement	Einheit	Verbrauch
Pumpwerk	[kWh/a]	60.300
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,017
PAK-Treibwasserpumpe	[kWh/a]	17.700
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,005
Rührwerke	[kWh/a]	105.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,029
Rücklaufschlammumpwerk	[kWh/a]	22.600
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,006
Überschussschlammumpwerk	[kWh/a]	3000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,001
Sandfiltration	[kWh/a]	36.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,010
Zentrifuge	[kWh/a]	18.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,005
Kleinverbraucher	[kWh/a]	50.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,014
Gesamtverbrauch	[kWh/a]	312.600
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,087

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für die Variante 1c erfolgt entsprechend der Vorgehensweise nach Kapitel 4 und ist in der Anlage D tabellarisch aufgeführt. In der Tabelle 31 ist eine Zusammenfassung der Kostenschätzung enthalten.

<sup>17</sup> Entsprechend dem Jahresabfluss auf der ABA Dülmen beträgt der abwasserspezifische Energieverbrauch 0,07 kWh/m<sup>3</sup> [Alt et al. 2015].

Zusammenfassend berechnen sich die Investitionskosten zu 7.347.374 €. Die Jahreskosten betragen 641.795 €/a. Der größte Kostenpunkt der Jahreskosten sind die Kapitalkosten mit 350.991 €/a bzw. 0,097 €/m<sup>3</sup>. Dies ist wie bei Variante 1b durch den großen Umfang der zu errichtenden Ingenieurbauwerke bestehend aus PAK-Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration begründet. Die Kapitalkosten sind aufgrund des zu errichtenden Lamellenklärers um rd. 17.000 €/a höher als bei Variante 1b. Danach folgen die Energiekosten mit 99.576 €/a. Die hohen Energiekosten resultieren aus den sechs Rührwerken in den PAK-Kontaktbecken. Da der PAK-Kohleschlamm nicht landwirtschaftlich verwertet werden darf, ist dieser thermisch zu entsorgen. Die Kosten der Schlammmentsorgung berechnen sich bei einer zu entsorgenden Kohleschlammmenge von ca. 100 t/a<sup>18</sup> zu 10.710 €/a. Für die Personalkosten wird aufgrund des Betriebsaufwands mit Schlammentwässerung des Kohleschlammes eine volle Stelle mit 40.000 €/a angesetzt.

<sup>18</sup> Durch die Dosierung von PAK entstehen in der Adsorptionsstufe jährlich ca. 100 t entwässerter Schlamm bei einem TR von 35%.

**Tabelle 31: Kostenschätzung für die Variante 1c - PAK-KB, LK, SF**

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration					
Pos.	Kurztext	Ingenieur- bauwerke netto [€]	maschinelle Ausrüstung netto [€]	elektrotechnische Ausrüstung netto [€]	Gesamtkosten netto [€]
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>				
1.1	Baustelleneinrichtung	383.000,00	21.000,00	10.000,00	414.000,00
1.2	PAK-Kontaktbecken	570.750,00	56.000,00	28.000,00	654.750,00
1.3	Lamellenklärer	1.182.500,00	130.000,00	65.000,00	1.377.500,00
1.4	Dynasandfilter	1.134.300,00	117.500,00	58.750,00	1.310.550,00
1.5	Vorschacht Pumpwerk	81.750,00			81.750,00
1.6	Kanalbau	276.000,00			276.000,00
1.7	PAK-Silo und PAK-Suspensionsaufbereitung	100.830,00	75.000,00	37.500,00	213.330,00
1.8	Betriebsgebäude mit RS- und ÜSS-Pumpwerk und Schlammntwässerung	192.740,00	350.000,00	175.000,00	717.740,00
1.9	Straßen- und Wegebau	99.600,00			99.600,00
	<b>Baukosten, gesamt, netto</b>	<b>4.021.470,00</b>	<b>749.500,00</b>	<b>374.250,00</b>	<b>5.145.220,00</b>
	Investitionskosten		netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
	Ingenieurbauwerke		4.021.470,00	764.079,30	4.785.549,30
	maschinelle Ausrüstung		749.500,00	142.405,00	891.905,00
	elektrotechnische Ausrüstung		374.250,00	71.107,50	445.357,50
	<b>Baukosten, gesamt</b>		<b>5.145.220,00</b>	<b>977.591,80</b>	<b>6.122.811,80</b>
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)		1.029.044,00	195.518,36	1.224.562,36
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>		<b>6.174.264,00</b>	<b>1.173.110,16</b>	<b>7.347.374,16</b>
<b>2</b>	<b>Betriebskosten</b>		netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
2.1	Energiekosten		83.677,40	15.898,71	99.576,11
2.2	Personalkosten		40.000,00	0,00	40.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten		42.582,35	8.090,65	50.673,00
2.4	PAK		72.000,00	13.680,00	85.680,00
2.5	FHM		3.500,00	665,00	4.165,00
2.6	Schlamm Entsorgung		9.000,00	1.710,00	10.710,00
<b>2</b>	<b>Betriebskosten</b>		<b>250.759,75</b>	<b>40.044,35</b>	<b>290.804,10</b>
<b>3</b>	<b>Reinvestitionskosten</b>				
		Investitionskosten		LAWA-	Reinvestitionskosten
		Bezugszeitpunkt		Faktoren	Bezugszeitpunkt
		Jahr 2016		(1 + r) <sup>n</sup> / (1 + i) <sup>n</sup>	Jahr 2016
		brutto [€]			brutto [€]
	Ingenieurbauwerke	4.785.549,30		0	0,00
	maschinelle Ausrüstung	891.905,00		0,58203	519.112,79
	elektrotechnische Ausrüstung	445.357,50		0,55368	246.583,65
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.224.562,36		0	0,00
<b>3</b>	<b>Reinvestitionskosten</b>	<b>7.347.374,16</b>			<b>765.696,44</b>
<b>4</b>	<b>Kapitalkosten</b>				
		In- und Reinvestitionen		LAWA-	Kapitalkosten
		Bezugszeitpunkt		Faktoren	Bezugszeitpunkt
		Jahr 2016		i <sup>n</sup> (1+i) <sup>n</sup> b / ((1+i) <sup>n</sup> b - 1)	Jahr 2016
		brutto [€]			brutto [€]
	Investitionskosten	7.347.374,16		0,04326	317.864,88
	Reinvestitionskosten	765.696,44		0,04326	33.125,85
<b>4</b>	<b>Kapitalkosten</b>				<b>350.990,73</b>
<b>5</b>	<b>Jahreskosten</b>			Bezugszeitpunkt	
				Jahr 2016	
				brutto	
	Betriebskosten			290.804,10	€/a
	Kapitalkosten			350.990,73	€/a
<b>5</b>	<b>Jahreskosten</b>			<b>641.794,83</b>	<b>€/a</b>
5	spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	641.794,83 €/a / 3.600.000 m <sup>3</sup> /a =		0,178	€/m <sup>3</sup>
5	spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Frischwasser	641.794,83 €/a / 2.500.000 m <sup>3</sup> /a =		0,257	€/m <sup>3</sup>
5	spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	641.794,83 €/a / 61.000 m <sup>3</sup> /a =		10,52	€/EW

### Zusammenfassung

Im Vergleich mit der simultanen PAK-Dosierung in die Belebung gemäß Variante 1a sind bei der Variante 1c der Aufwand für Bautechnik mit Kapitalkosten von 350.991 €/a und der Flächenverbrauch mit 2.090 m<sup>2</sup> hoch. Jedoch ist der Verbrauch an Betriebsmitteln niedriger. Die Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe berechnet sich bei der Variante 1c entsprechend der Variante 1b sich zu 84,4%. Die gemessenen Indikatorstoffe werden zu 89,4% eliminiert. Bei der Variante 1c wird eine Reduzierung der konventionellen Abwasserparameter AFS, CSB und P<sub>ges</sub> entsprechend der Variante 1b erreicht. Der Gesamtenergieverbrauch beträgt 312.600 kWh/a. Die Jahreskosten berechnen sich zu 641.795 €/a.

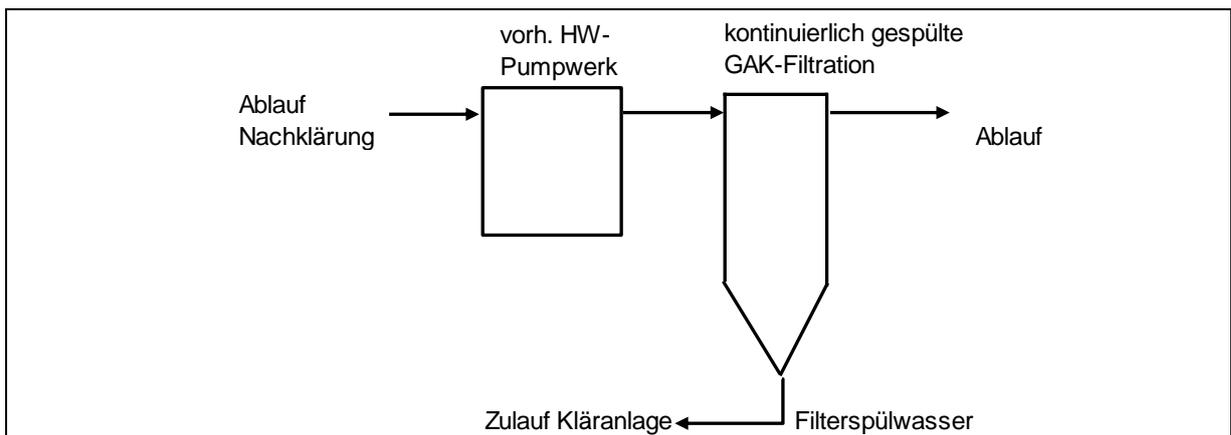
#### 4.4 Variante 2: Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern

##### Verfahrensführung

Bei Variante 2: Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern sind folgende Anlagenelemente neu zu errichten:

- GAK-Filtration

Die Verfahrensführung ist in Abbildung 24 dargestellt.



**Abbildung 24: Schema der granulierten Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern**

Die nachgeschaltete Filtration mit GAK in kontinuierlich gespülten Filtern ist ähnlich der bereits o.a. kontinuierlich gespülten Sandfiltration aufgebaut. Die GAK-Filtration besteht aus 60 kontinuierlich gespülten Filtern mit einer Filterfläche von 300 m<sup>2</sup>. Der Ablauf der Nachklärung wird mittels dem vorh. Pumpwerk in die GAK-Filtration gepumpt.

##### Dimensionierung der Anlagenteile

Die GAK-Filtration wird südlich der Ablaufmessstation angeordnet. In dem Betriebsraum östlich der Ablaufmessstation wird die Maschinenteknik der GAK-Filtration untergebracht. Die benötigten Zufahrtswege zur Befüllung und Austausch der GAK sind neu zu erstellen. Die maximale Oberflächenbeschickung der GAK-Filter beträgt 7 m/h, um eine ausreichende EBCT zu erreichen und ein Ausschwemmen der GAK aus dem GAK-Filter zu vermeiden. Bei  $Q_M$  wird eine minimale EBCT ca. 23 Minuten erreicht. Die Anordnung der GAK-Filtration erfolgt südlich der Ablaufmessstation. Die Filter werden in 6 Filterstraßen zu je 10 Filtern nebeneinander angeordnet. Je nach Zulaufmenge werden die Straßen beschickt oder außer Betrieb genommen.

In der nachfolgenden Tabelle 32 sind die Daten zur Verfahrensauslegung der Variante 2 zusammengestellt.

**Tabelle 32: Auslegung Variante 2 – GAK-Filtration**

GAK - Filtration		
Bemessungszufluss	$Q_{\text{Bem}} = Q_M$	540 l/s
Bemessungszufluss	$Q_{M,h}$	1944 m <sup>3</sup> /h
Filterdurchmesser	$d_F$	2,55 m
Filterfläche	$A_F$	5,11 m <sup>2</sup>
max Oberflächenbeschickung	$\max q_A$	7 m/h bzw. m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> x h)
Filteranzahl	$n_{\text{Filter}} = Q_{M,h} / (A_F \times \max q_A)$	54,38
Filteranzahl (gerundet)	$n_{\text{Filter}}$	60,00
Filterfläche	$A_F$	306,42 m <sup>2</sup>
behandelbares Volumen	$Q_{\text{Beh}}$	2144,96 m <sup>3</sup> /h
Filterbetthöhe	$h_{\text{Filterbett}}$	2 m
Filterhöhe, gesamt	$h_{\text{Filter}}$	5,95 m
GAK - Volumen je Filter	$V_{\text{GAK, Filter}}$	12,50 m <sup>3</sup>
Dichte GAK	$\rho_{\text{GAK}}$	0,5 t/m <sup>3</sup>
GAK - Menge bei 2 m	$m_{\text{GAK}}$	375,00 t
Leerbettkontaktzeit EBCT, min	$\text{EBCT} = V_{\text{GAK}} / Q_{M,h}$	23,15 min
Filtergeschwindigkeit $v_{\text{Filter}}$	$v_{\text{Filter}} = Q_{M,h} / A_F$	6,34 m/h
Breite Ingenieurbauwerk	B	33,4 m
Länge Ingenieurbauwerk	L	16 m
Fläche Ingenieurbauwerk	A	534,40 m <sup>2</sup>
Jahresverbrauch GAK		
durchsetzbare Bettvolumina BV (gewählt)	BV	8000,00 m <sup>3</sup> Abwasser / m <sup>3</sup> GAK
Jahresverbrauch GAK	$= \text{JAM} / \text{BV} \times \rho_{\text{GAK}}$	225,00 t/a
Maschinenhalle		
Breite Betriebsraum	B	6 m
Länge Betriebsraum	L	6 m
Fläche Betriebsraum	A	36,00 m <sup>2</sup>
sonstige Flächen		
Pflasterfläche		330 m <sup>2</sup>
Asphaltfläche		620 m <sup>2</sup>
Flächenverbrauch, gesamt	$A_{\text{ges}}$	1520 m <sup>2</sup>

### Betrieb und Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Der Abwasserzulauf zu den sechs Straßen der GAK-Filtration erfolgt jeweils über Zulaufschieber, die in Abhängigkeit der Durchflussmenge des Pumpwerks gesteuert werden. Um eine optimale Ausnutzung der GAK zu erreichen, werden die Filterstraßen bei Trockenwetter im Wechsel betrieben. Die maximale Anzahl an durchsetzbaren Bettvolumina wird mit 8.000 BV festgelegt. Zudem wird durch Online-Messung des DOC der Filterdurchbruch überwacht. Liegt ein Filterdurchbruch vor, oder werden 8.000 BV erreicht, wird die GAK durch regenerierte GAK ersetzt.

### Elimination

Bei der GAK-Filtration werden ebenfalls die konventionellen Parameter AFS und CSB eliminiert. Eine Phosphorelimination ist durch Fällmitteldosierung in den Filterzulauf möglich, jedoch nicht vorgesehen. Eine Zusammenstellung der zu erwartenden Elimination konventioneller Parameter ist Tabelle 33 enthalten. Wie bei PAK-Dosierung mit Sandfiltration wird bei

der GAK-Filtration der DOC durch Adsorption sowie der ungelöste CSB und AFS durch Filtration entfernt. Es werden Eliminationsraten von 80% für AFS und 50% für CSB erreicht.

**Tabelle 33: Elimination konventioneller Abwasserparameter bei der Variante 2 – GAK-Filtration**

GAK-Filtration					
Parameter	$C_{zu, 4. Stufe}$ [mg/l]	$\eta_{iM, 4. Stufe}$ [%]	$C_{ab}^a$ [mg/l]	Quelle $\eta_{i, Stufe}$	Bemerkungen
AFS	9	80	1,80	Pinnekamp et al. 2012	nur durch Filtration
CSB <sub>max</sub>	59	50	29,50	Nahrstedt et al. 2011, 2015 Pinnekamp et al. 2012	
CSB <sub>85%</sub>	37	50	18,50	Nahrstedt et al. 2011, 2015 Pinnekamp et al. 2012	
NH <sub>4</sub> -N	5	0	4,99	Nahrstedt et al. 2011	
N <sub>ges</sub>	10	0	9,60	Nahrstedt et al. 2011	
P <sub>ges, max</sub>	1,98	60	0,79	Nahrstedt et al. 2015 Pinnekamp et al. 2012	nur durch Filtration
P <sub>ges, 85%</sub>	0,88	60	0,35	Nahrstedt et al. 2015 Pinnekamp et al. 2012	nur durch Filtration
Bemerkungen: $a: C_{ab} = (100 - \eta_{iM, 4. Stufe}) / 100 \times C_{zu, max, 4. Stufe}$					

Die Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe zwischen Zulauf Belebung und Ablauf der GAK-Filtration und die Prognose der Ablaufkonzentrationen erfolgt anhand der Mittelwerte aller Messwerte während des Trockenwetterscreenings und -monitorings auf der Kläranlage Brühl und Literaturwerten sowie Forschungsergebnissen zur Elimination in GAK-Adsorptionsstufen mit 8.000 BV.

In Tabelle 34 sind die Zulaufkonzentrationen, die Eliminationsraten und die berechneten Ablaufkonzentrationen der gemessenen Mikroschadstoffe zusammengestellt. Die Summen der gemessenen Mikroschadstoffe, der Monitoringstoffe, der Hauptstoffe und der Indikatorstoffe sind gesondert ausgewiesen.

Durch die GAK-Filtration werden die Mikroschadstoffe Melamin, DEET, Acesulfam K und Ioversol nur zu weniger als 15% eliminiert.

Die Elimination aller gemessenen Mikroschadstoffe beträgt 84,2%. Die Ablaufkonzentration liegt bei 25 µg/l. Die Hauptstoffe werden zu 77,1% eliminiert. Die Vorgabe des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW zur Elimination der Indikatorstoffe von 80% wird mit 82,6% eingehalten. Jedoch werden von den sechs Indikatorstoffen nur Benzotriazol und Clarithromycin zu mehr als 80% eliminiert.

**Tabelle 34: Prognose der Elimination und Ablaufkonzentration der gemessenen Mikroschadstoffe bei der Variante 2 – GAK-Filtration**

Mikroschadstoffe, TW-Mittelwerte			GAK-Filtration						Quelle $\eta_{k, Stufe}$
			$c_{zu, BB}$	$c_{zu, 4. Stufe}$	$\eta_{Bebung}^a$	$\eta_{1-1M, 4. Stufe}$	max. BV	$c_{ab}^b$	
			ng/l	ng/l	%	%	BV	ng/l	%
S M H	Valsartan	31.714	13.571	57,2	80,0	ca. 8.000	2714,3	91,4	
S	Gabapentin	15.500	10.500	32,3	25,0	ca. 8.000	7875,0	49,2	Jekel et al. 2016
S M H I	Diclofenac	8.486	6.914	18,5	70,0	ca. 7.500	2074,3	75,6	Pinnekamp et al. 2012, Bornemann et al. 2015
S	Amidohydroxysäure	5.650	4.600	18,6	20,0	ca. 8.000	3680,0	34,9	Pinnekamp et al. 2012
S M H I	1H-Benzotriazol	11.029	3.729	66,2	80,0	ca. 8.000	745,7	93,2	Pinnekamp et al. 2012
S	$\Sigma$ 4,5-Methyl Benzotriazol	5.300	3.650	31,1	80,0	ca. 8.000	730,0	86,2	Nahrstedt et al. 2015
S	Melamin	900	2.000	-122,2	10,0		1800,0	-100,0	IUTA
S	lomeprol	3.600	1.790	50,3	50,0	ca. 5.500	895,0	75,1	Jekel et al. 2016
S	Iopamidol	3.790	1.725	54,5	60,0	ca. 3.500	690,0	81,8	Nahrstedt et al. 2015
S M I	Meloprolool	1.286	1.300	-1,1	70,0	ca. 7.500	390,0	69,7	Pinnekamp et al. 2012
S M	Bisoprolol	1.300	1.200	7,7	85,0	ca. 8.000	180,0	86,2	Nahrstedt et al. 2015
S	Guanylhamstoff	170	1.100	-547,1	30,0		770,0	-352,9	IUTA
S M I	Carbamazepin	766	841	-9,9	50,0	ca. 7.500	420,7	45,1	Pinnekamp et al. 2012
S M	Sotalol	769	743	3,3	95,0	ca. 8.000	37,1	95,2	Nahrstedt et al. 2015
S	Galaxolid	891	660	25,9	80,0		132,0	85,2	Metzger et al. 2012; Grünebaum et al. 2011; IUTA
S	Iohexol	3.950	575	85,4	40,0		345,0	91,3	Nahrstedt et al. 2016
S M	Losartan	1.971	450	77,2	85,0		67,5	96,6	IUTA
S	DEET	2.200	445	79,8	15,0		378,3	82,8	IUTA
S M I	Clarithromycin	986	439	55,5	70,0		131,6	86,7	IUTA
S M	Acesulfam K	26.529	417	98,4	10,0		375,4	98,6	IUTA
S M I	Sulfamethoxazol	526	349	33,7	30,0	ca. 3.000	244,0	53,6	Pinnekamp et al. 2012
S	Bezafibrate	1.400	215	84,6	85,0	-	32,3	97,7	Nahrstedt et al. 2011, 2015
S	PFBS	43	150	-248,8	35,0		97,5	-126,7	IUTA
S	Iopromide	1.215	150	87,7	95,0		7,5	99,4	Nahrstedt et al. 2015
S M	Ciprofloxacin	1.446	116	92,0	85,0		17,4	98,8	IUTA
S	Diuron	81	100	-22,8	60,0		39,8	50,9	IUTA
S M	Terbutylin	105	90	13,6	95,0	ca. 8.000	4,5	95,7	Nahrstedt et al. 2015
S	Tonalid	145	77	47,2	75,0		19,1	86,8	Metzger et al. 2012; Grünebaum et al. 2011; IUTA
S M	PFOS	122	66	45,6	35,0		43,1	64,6	IUTA
S	Mecoprop P	180	48	73,6	40,0	ca. 8.000	28,5	84,2	Böhler et al. 2013
S	10,11 Dihydrocarbamazepin	30	30	0,0	65,0		10,5	65,0	IUTA
S	Isoproturon	30	30	0,0	90,0		3,0	90,0	Nahrstedt et al. 2015
S	Ioversol	30	30	0,0	10,0		27,0	10,0	IUTA
S	PFBA	47	22	54,3	20,0		17,2	63,4	IUTA
S M	PFOA	10	11	-10,0	35,0		7,2	28,5	IUTA
S	Ibuprofen	26.000	10	100,0	95,0	ca. 8.000	0,5	100,0	Nahrstedt et al. 2015
<b>Summe Mikroschadstoffe</b>			<b>158.194</b>	<b>58.141</b>	<b>63,2</b>	<b>56,9</b>	<b>25.031</b>	<b>84,2</b>	
<b>davon Monitoringstoffe</b>			<b>87.042</b>	<b>30.236</b>	<b>65,3</b>	<b>75,4</b>	<b>7.453</b>	<b>91,4</b>	
<b>daon Hauptstoffe</b>			<b>77.679</b>	<b>42.964</b>	<b>44,7</b>	<b>58,5</b>	<b>17.819</b>	<b>77,1</b>	
<b>davon Indikatorstoffe</b>			<b>23.077</b>	<b>13.571</b>	<b>41,2</b>	<b>70,5</b>	<b>4.006</b>	<b>82,6</b>	

Bemerkungen: a:  $\eta_{Bebung} = (1 - c_{zu, max, 4. Stufe} / c_{zu, max, BB}) \times 100$       b:  $c_{ab} = (100 - \eta_{1-1M, 4. Stufe}) / 100 \times c_{zu, max, 4. Stufe}$       c:  $\eta_{ges} = (1 - c_{ab} / c_{zu, max, BB}) \times 100$   
S: Screening M: Monitoring H: Hauptstoff I: Indikatorstoff

In Tabelle 35 sind die Bewertungskriterien nach Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW den Ablaufkonzentrationen der GAK-Filtration gegenübergestellt. Wie bei der Elimination von Mikroschadstoffen mittels PAK gemäß den Varianten 1a, 1b und 1c wird das Bewertungskriterium auch bei der GAK-Filtration bei den gemessenen Mikroschadstoffen Valsartan, Gabapentin, Diclofenac und PFOS erheblich überschritten. Die Ursache für die erheblichen Überschreitungen der Bewertungskriterien liegt in den im Vergleich mit anderen Kläranlagen sehr hohen Zulaufkonzentrationen, siehe Tabelle 5.

**Tabelle 35: Gegenüberstellung der Bewertungskriterien bei der Variante 2 – GAK-Filtration**

Einheit ng/l	Bewertungskriterium	GAK-Filtration	Einheit ng/l	Bewertungskriterium	GAK-Filtration
Valsartan	100	2714,3	Sulfamethoxazol	600	244,0
Gabapentin	100	7875,0	Ciprofloxacin	36	17,4
Diclofenac	50	2074,3	Terbutryn	65	4,5
1H-Benzotriazol	10.000	745,7	PFOS	0,65	43,1
Metoprolol	7.300	390,0	Mecoprop P	100	28,5
Carbamazepin	500	420,7	Isoproturone	300	3,0
Losartan	100	67,5	Ibuprofen	10	0,5
Clarithromycin	100	131,6	PFOA	100	<10
Acesulfam K	100	375,4	Östrogene Aktivität (C <sub>ab</sub> NK)	0,4	0,1
Bemerkungen:		: Überschreitung Bewertungskriterium			

### Energieverbrauch

Der Energieverbrauch der GAK-Filtration wird mit 0,020 kWh/m<sup>3</sup> angesetzt. Durch die Verdoppelung der Filterfläche im Vergleich zur Sandfiltration ergibt sich der doppelte Energieverbrauch. Die geförderte Abwassermenge ist die gleiche wie bei der Sandfiltration. Unter Berücksichtigung von Kleinverbrauchern mit 50.000 kWh/a berechnet sich ein Gesamtenergieverbrauch von 152.300 kWh/a und ein abwasserspezifischer Verbrauch von 0,042 kWh/m<sup>3</sup>. Die einzelnen Energieverbrauchswerte sind Tabelle 36 enthalten.

**Tabelle 36: Energieverbrauch bei der Variante 2 – GAK-Filtration**

Anlagenelement	Einheit	Verbrauch
Pumpwerk	[kWh/a]	60.300
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,017
GAK-Filtration	[kWh/a]	72.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,020
Kleinverbraucher	[kWh/a]	20.000
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,006
Gesamtverbrauch	[kWh/a]	152.300
	[kWh/m <sup>3</sup> ]	0,042

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für die Variante 2 erfolgt entsprechend der Vorgehensweise nach Kapitel 4 und ist in der Anlage E tabellarisch aufgeführt. In der Tabelle 37 ist eine Zusammenfassung der Kostenschätzung enthalten.

Zusammenfassend berechnen sich die Investitionskosten zu 5.230.229 €. Die Jahreskosten betragen 852.979 €/a. Der größte Kostenpunkt der Jahreskosten sind die Kosten der GAK mit 535.500 €/a bzw. 0,149 €/m<sup>3</sup>. Bei einer mittleren Jahresabwassermenge von 3.600.000 m<sup>3</sup>/a und einer maximalen Anzahl von 8.000 durchgesetzten Bettvolumina liegt bei einem vorhandenen GAK-Volumen von 750 m<sup>3</sup> der jährliche Bedarf an zu regenerierender GAK bei ca. 225 t/a<sup>19</sup>. Danach folgen die Kapitalkosten mit 232.785 €/a bzw. 0,065 €/m<sup>3</sup>. Für

<sup>19</sup> Jährliche Regeneration von GAK = JAM/max. BV x q<sub>GAK</sub> = 3.600.000/8.000 x 0,5 = 225 t GAK/a

die Personalkosten wird aufgrund des geringen Betriebsaufwands eine 25%-Stelle mit 10.000 €/a angesetzt.

**Tabelle 37: Kostenschätzung für die Variante 2 – GAK-Filtration**

Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern				
Pos. Kurztex	Ingenieur- bauwerke netto [€]	maschinelle Ausrüstung netto [€]	eletrotechnische Ausrüstung netto [€]	Gesamtkosten netto [€]
<b>1 Investitionskosten</b>				
1.1 Baustelleneinrichtung	331.000,00	4.000,00	2.000,00	337.000,00
1.2 GAK-Dynasandfilter	2.839.200,00	140.000,00	70.000,00	3.049.200,00
1.3 Vorschacht Pumpwerk	81.750,00	0,00	0,00	81.750,00
1.4 Kanalbau	36.625,00	0,00	0,00	36.625,00
1.5 Betriebsgebäude	39.050,00	2.500,00	2.500,00	44.050,00
1.6 Straßen- und Wegebau	114.000,00	0,00	0,00	114.000,00
Baukosten, gesamt, netto	3.441.625,00	146.500,00	74.500,00	3.662.625,00
		netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
Ingenieurbauwerke		3.441.625,00	653.908,75	4.095.533,75
maschinelle Ausrüstung		146.500,00	27.835,00	174.335,00
elektrotechnische Ausrüstung		74.500,00	14.155,00	88.655,00
Baukosten, gesamt		3.662.625,00	695.898,75	4.358.523,75
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)		732.525,00	139.179,75	871.704,75
<b>1 Investitionskosten</b>		<b>4.395.150,00</b>	<b>835.078,50</b>	<b>5.230.228,50</b>
<b>2 Betriebskosten</b>				
		netto [€]	MwSt [€/a]	brutto [€/a]
2.1 =>B134		41.139,69	7.816,54	48.956,23
2.2 Personalkosten		10.000,00	0,00	10.000,00
2.3 Wartungs- und Instandhaltungskosten		21.628,13	4.109,34	25.737,47
2.4 GAK		450.000,00	85.500,00	535.500,00
<b>2 Betriebskosten</b>		<b>522.767,82</b>	<b>97.425,89</b>	<b>620.193,70</b>
<b>3 Reinvestitionskosten</b>				
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]		LAWA- Faktoren $(1+r)^n / (1+i)^n$	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
Ingenieurbauwerke	4.095.533,75		0	0,00
maschinelle Ausrüstung	174.335,00		0,58203	101.467,68
elektrotechnische Ausrüstung	88.655,00		0,55368	49.086,12
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	871.704,75		0	0,00
<b>3 Reinvestitionskosten</b>	<b>5.230.228,50</b>			<b>150.553,80</b>
<b>4 Kapitalkosten</b>				
	In- und Reinvestitionen Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]		LAWA- Faktoren $i \cdot (1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
Investitionskosten	5.230.228,50		0,04326	226.272,12
Reinvestitionskosten	150.553,80		0,04326	6.513,32
<b>4 Kapitalkosten</b>				<b>232.785,44</b>
<b>5 Jahreskosten</b>				
			Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto	
Betriebskosten			620.193,70	€/a
Kapitalkosten			232.785,44	€/a
<b>5 Jahreskosten</b>			<b>852.979,14</b>	<b>€/a</b>
5 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	852.979,14 €/a / 3.600.000 m <sup>3</sup> /a =		0,237	€/m <sup>3</sup>
5 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Frischwasser	852.979,14 €/a / 2.500.000 m <sup>3</sup> /a =		0,341	€/m <sup>3</sup>
5 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	852.979,14 €/a / 61.000 m <sup>3</sup> /a =		13,98	€/EW

Zusammenfassung

Die GAK-Filtration ist ein einfach umzusetzendes Verfahren. Das Abwasser wird nach einmaligem Heben adsorptiv behandelt und dann in den Palmersdorfer Bach eingeleitet. Der

Flächenverbrauch ist mit 1.520 m<sup>2</sup> niedrig. Die Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe berechnet sich zu 84,2%. Die gemessenen Indikatorstoffe werden zu 82,6% eliminiert. Durch die zusätzliche Filtration werden wie bei Variante 1 die Parameter AFS, CSB und P<sub>ges</sub> reduziert. Der Gesamtenergieverbrauch beträgt 152.300 kWh/a. Aufgrund der sehr hohen Kosten für die turnusmäßig zu erneuernde GAK ergeben sich sehr hohe Jahreskosten in Höhe von 852.979 €/a bzw. 0,24 €/m<sup>3</sup>.

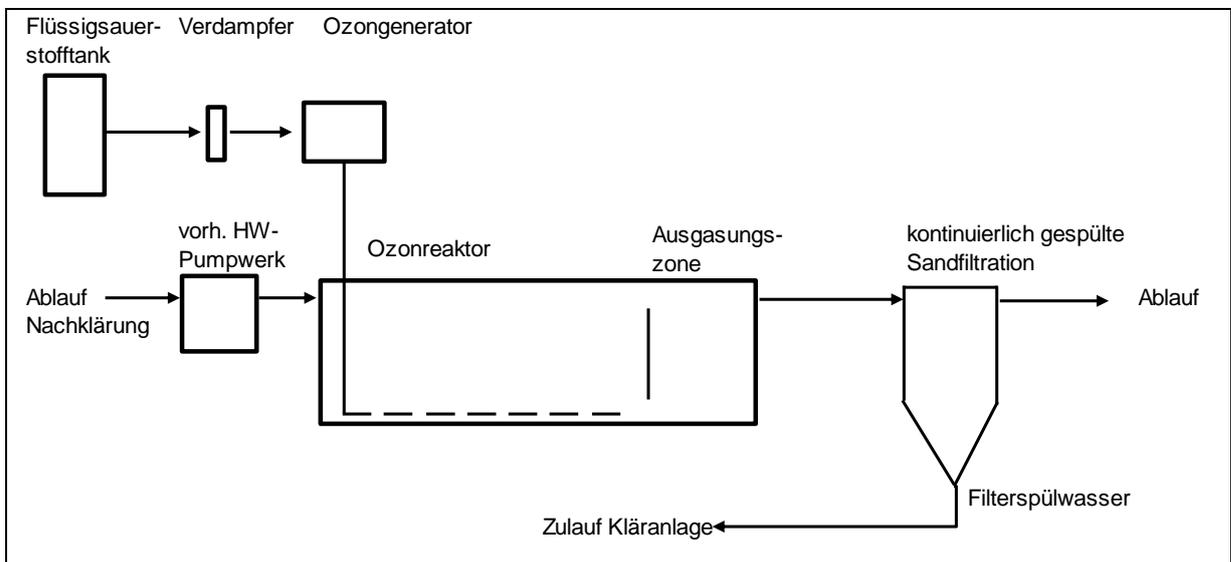
#### 4.5 Variante 3: Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration

##### Verfahrensbeschreibung

Bei Variante 3: Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration sind folgende Anlagenelemente neu zu errichten:

- Sauerstofftank
- Ozonerzeugung
- Ozonreaktor
- Restozonvernichter
- Sandfiltration

Die Verfahrensführung ist in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25: Schemazeichnung der Ozonanlage**

Das Ozon wird aus Flüssigsauerstoff hergestellt. Dafür wird der Flüssigsauerstoff zuerst in einem Verdampfer in den gasförmigen Aggregatzustand überführt. Durch stille elektrische Entladung wird aus Sauerstoff im Ozongenerator Ozon erzeugt und den Ozonreaktoren zugeleitet. Für die Erzeugung von 1 kg O<sub>3</sub> werden 10 kg O<sub>2</sub> benötigt.

Das Abwasser aus der Nachklärung wird dem zweistufigen Ozonreaktor zur Oxidation der Mikroschadstoffe zugeleitet. Der Ozoneintrag erfolgt über Keramik-Diffusoren. Die Keramik-Diffusoren werden über 75% der Fließstrecke der Reaktoren angeordnet. Danach wird eine

Trennwand angeordnet, um eine Optimierung der Ausgasung durch Beruhigung der Fließstrecke zu erreichen. Die Reaktoren werden als längsdurchströmte Rechteckbecken ausgeführt und zur Sicherstellung der Arbeitssicherheit und des Umweltschutzes gasdicht abgedeckt. Das Abgas der Reaktoren wird einer Restozonvernichtung zugeführt. Um die bei der Oxidation der Mikroschadstoffe entstehenden Transformationsprodukte weitgehend aus dem Abwasser zu entfernen, wird eine kontinuierlich gespülte Sandfiltration nachgeschaltet.

#### Dimensionierung der Anlagenteile

Der Flüssigsauerstofftank mit einem Volumen von 34 m<sup>3</sup> wird unter Berücksichtigung der vorhandenen Hochspannungsleitung und den Ex-Schutz-Vorgaben östlich der Ablaufmessstation angeordnet. Entsprechend den Vorgaben des Explosionsschutzes nach „Technische Regeln für Betriebssicherheit/Gefahrenstoffe für ortsfeste Druckanlagen“ ist um den Lagertank ein Abstand von 5 Meter zu offenen Kanälen, Kanaleinläufen, offenen Schächten, Luftansaugöffnungen, etc. einzuhalten. Ebenfalls sind an dem Lagertank Gaswarneinrichtungen zur Überwachung der Dichtigkeit und Umgebung anzuordnen [TRBS 3146, TRGS 726]. Der zweistraßige Ozonreaktor wird westlich der Ablaufmessstation angeordnet. Südlich der Ablaufmessstation wird die Halle zur Unterbringung der beiden Ozongeneratoren, der beiden Plattenwärmetauscher, der elektrotechnischen Ausrüstung, etc. errichtet.

Für die Berechnung des Bedarfs an Ozon bzw. Flüssigsauerstoff sind zwei Varianten möglich:

- Berechnung mit abwassermengenproportionaler Dosierung
- Berechnung mittels DOC- und NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen und der Zulaufmenge

Bei der Berechnung des Ozonbedarfs mit abwassermengenproportionaler Dosierung werden gemäß dem DWA Themenband T3/2015 Ozondosierungen von 5 mg O<sub>3</sub>/l bis 15 mg O<sub>3</sub>/l empfohlen [DWA 2015]. Mit einer angesetzten abwassermengenproportionalen Dosierung von 7 mg O<sub>3</sub>/l berechnet sich der jährliche Bedarf an Flüssigsauerstoff auf der Kläranlage Brühl zu ca. 260 t O<sub>2</sub>/a.

Bei der Berechnung des Ozonbedarfs mittels der DOC- und NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen und der Zulaufmenge wird für die Oxidation des DOC eine Ozondosis ( $z_{\text{spez}}$ ) von 0,80 kg O<sub>3</sub>/kg DOC [DWA 2015] und für die Oxidation von NO<sub>2</sub>-N eine Ozondosis von 3,43 g O<sub>3</sub>/g NO<sub>2</sub>-N angesetzt. Mit den 2h-Abflusswerten der DOC<sup>20</sup> und der NO<sub>2</sub>-N-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung der Jahre 2013 bis 2015 berechnet sich die benötigte Ozonmenge zu ca. 0,85 kg O<sub>3</sub>/h (5%-Perzentilwert) und 4,1 kg O<sub>3</sub>/h (85%-Perzentilwert). Bei einsetzendem Regenwetterzufluss steigt die benötigte Ozonmenge bis auf 7,5 kg O<sub>3</sub>/h (95%-Perzentilwert) bzw. bis zu 12,4 kg O<sub>3</sub>/h (99%-Perzentilwert) an.

Der Lagertank für den Flüssigsauerstoff wird für einen Jahresverbrauch von 260 t O<sub>2</sub>/a bemessen. Bei einem Tankvolumen von 34,1 m<sup>3</sup> sind jährlich 8 Lieferungen notwendig.

Die Maschinenteknik ist in einer neu zu errichtenden Maschinenhalle südlich der Ablaufmessstation angeordnet. Die Ozonreaktoren werden auf Q<sub>M</sub> bemessen. Das benötigte Beckenvolumen ergibt sich aus der durch das Institut IUTA ermittelten Dauer der Ozonzehnung von 20 Sekunden bei 5 mg O<sub>3</sub>/l und 150 Sekunden bei 10 mg O<sub>3</sub>/l sowie der gewählten minimalen hydraulischen Aufenthaltszeit von 15 Minuten. Das Gesamtvolumen der beiden

<sup>20</sup> Die DOC-Konzentration wird entsprechend der Messergebnisse von IUTA mit dem CSB:DOC-Verhältnis von 3,8:1 berechnet.

Ozonreaktoren berechnet sich zu  $V = Q_M \times t = 1.944 \text{ m}^3/\text{h} \times 0,25 \text{ h} = 486 \text{ m}^3$ . Bei der Festlegung der Abmessungen wird die Beckentiefe zur optimalen Ausnutzung des Ozons bei Eintrag über Diffusoren mit 7 Metern gewählt. Die den Ozonreaktoren nachgeschaltete Sandfiltration wird südlich der Ablaufmessstation angeordnet. Die Bemessungsdaten der Sandfiltration sind Kapitel 4.1 enthalten.

In Tabelle 38 sind die Daten zur Verfahrensauslegung der Variante 3 zusammengestellt.

**Tabelle 38: Auslegung Variante 3 - Ozonreaktor, SF**

Auslegung Flüssigsauerstofftank				
Ozondosis	$Z_{\text{spez}}$	0,70 - 0,90	mg O <sub>3</sub> / mg DOC	Abegglen et al. 2012
Ozondosis	$Z_{\text{spez}}$	0,60 - 0,80	mg O <sub>3</sub> / mg DOC	Barjenbruch et al. 2014 - KA 10/14
gewählte Ozondosis	$Z_{\text{DOC}}$	0,80	mg O <sub>3</sub> / mg DOC	CSB:DOC = 3,8:1 aus Messwerten IUTA
Ozonzehrung des NO <sub>2</sub> -N $Z_{\text{NO}_2\text{-N}}$	$Z_{\text{NO}_2\text{-N}}$	3,43	mg O <sub>3</sub> / mg NO <sub>2</sub> -N	85%-Wert
C <sub>O3</sub> -Konzentration, 5%	$C_{\text{O}_3}$	3,82	mg O <sub>3</sub> /l	5%-Wert
C <sub>O3</sub> -Konzentration, 85%	$C_{\text{O}_3}$	9,33	mg O <sub>3</sub> /l	85%-Wert
C <sub>O3</sub> -Konzentration, 99%	$C_{\text{O}_3}$	12,57	mg O <sub>3</sub> /l	99%-Wert
Produktionskapazität $B_{\text{O}_3,\text{min}}$	$B_{\text{O}_3,\text{min}}$	0,85	kg O <sub>3</sub> / h	5%-Wert
Produktionskapazität $B_{\text{O}_3,85\%}$	$B_{\text{O}_3,85}$	4,11	kg O <sub>3</sub> / h	85%Wert
Produktionskapazität $B_{\text{O}_3,\text{max}}$	$B_{\text{O}_3,\text{max}} = Q_M \times C_{\text{O}_3}$	12,44	kg O <sub>3</sub> / h	99%-Wert
jährlicher Sauerstoffverbrauch	$m_{\text{O}_2}$	258,59	t O <sub>2</sub> /a	Berechnung aus DOC und NO <sub>2</sub> -N
Kontinuierliche Dosierung (gewählt)		7,00	mg O <sub>2</sub> /l	
gepl. jährlicher Sauerstoffverbrauch	$m_{\text{O}_2}$	260,00	t O <sub>2</sub> /a	
Dichte Flüssigsauerstoff	$\rho_{\text{O}_2}$	1,141	t / m <sup>3</sup>	
erforderliches Tankvolumen $V_{\text{Sauerstofftank}}$	$V_{\text{Sauerstofftank}} = m_{\text{O}_3} / \rho_{\text{O}_3}$	227,87	m <sup>3</sup>	
Lieferungen pro Jahr		8		
Liefermenge pro Lieferung		32,50	t / Lieferung	
Liefervolumen pro Lieferung		28,48	m <sup>3</sup> / Lieferung	
Durchmesser Flüssigsauerstofftank	$D_{\text{Tank}}$	2,9	m	
Höhe Flüssigsauerstofftank	$H_{\text{Tank}}$	9,6	m	
Fläche Flüssigsauerstofftank	$A_{\text{Tank}}$	6,6	m <sup>2</sup>	
Volumen Flüssigsauerstofftank	$V_{\text{Tank}}$	34,1	m <sup>3</sup>	Herstellerangaben
Ozonreaktor - zweistraßig				
Anzahl Reaktoren		2		
Zeit bis zur vollständigen Ozonzehrung	$t_{\text{zehrung}}$	180	s	Messung Ozonzehrung durch IUTA
mittlere Aufenthaltszeit bei $Q_{\text{M,h}}$ (gewählt)	$t_{\text{A,QM,h}}$	0,25	h	DWA 2016. 15 bis 30 min
Volumen Ozonreaktor	$V_{\text{Ozonreaktor}} = Q_{\text{M,h}} \cdot t_{\text{A,QM,h}}$	243	m <sup>3</sup>	je Straße
Höhe Ozonreaktor (gewählt)	$H_{\text{Ozonreaktor}}$	7	m	
Fläche Ozonreaktor	$A_{\text{Ozonreaktor, berechnet}}$	34,71	m <sup>2</sup>	je Straße
Breite Ozonreaktor (gewählt)	$B_{\text{Ozonreaktor, gewählt}}$	3,00	m	Innenmaß je Straße
Länge Ozonreaktor	$L_{\text{Ozonreaktor, gepl}}$	12,4	m	Innenmaß
Fläche Ozonreaktor	$A_{\text{Ozonreaktor, gepl}}$	37,2	m <sup>2</sup>	je Straße
Breite Ingenieurbauwerk	$B$	8,7	m	
Länge Ingenieurbauwerk	$L$	17,7	m	
Fläche Ingenieurbauwerk	$A$	153,99	m <sup>2</sup>	
Maschinenhalle				
Breite Betriebsraum	$B$	9	m	
Länge Betriebsraum	$L$	14	m	
Fläche Betriebsraum	$A$	126,00	m <sup>2</sup>	
sonstige Flächen				
Pflasterfläche		410	m <sup>2</sup>	
Asphaltfläche		620	m <sup>2</sup>	
Flächenverbrauch, gesamt	$A_{\text{ges}}$	1556	m <sup>2</sup>	

### Betrieb und Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Die Steuerung der Dosierung von Ozon erfolgt über die Online-Messung von DOC und NO<sub>2</sub>-N im Zulauf der Ozonreaktoren sowie der Messung der Ozonkonzentrationen im Abgas. Die Messung im Abgas stellt sicher, dass es zu keiner Überdosierung kommt. Die Beschi-

ckung der beiden Ozonreaktoren sowie der Sandfiltration wird jeweils durch Schieber geregelt.

### Elimination

Bei der Oxidation mit Ozon mit nachgeschalteter Sandfiltration werden ebenfalls die konventionellen Parameter AFS und CSB eliminiert. Eine Phosphorelimination ist durch Fällmitteldosierung in den Filterzulauf möglich, jedoch nicht vorgesehen. Eine Zusammenstellung der zu erwartenden Elimination konventioneller Parameter ist in Tabelle 39 enthalten. Die CSB-Elimination beträgt 33% und die AFS-Elimination 80%. Durch die Oxidation mit Ozon werden die im Abwasser vorhandenen organische Stoffe (CSB) weiter aufgespalten und in der nachfolgenden Sandfiltration biologisch abgebaut. NO<sub>2</sub>-N wird oxidiert.

**Tabelle 39: Elimination konventioneller Abwasserparameter bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF**

Ozonreaktor mit Sandfiltration					
Parameter	C <sub>Zu, 4. Stufe</sub> mg/l	η <sub>iM, 4. Stufe</sub> %	C <sub>ab</sub> <sup>a</sup> mg/l	Quelle η <sub>4. Stufe</sub>	Bemerkungen
AFS	9	80	1,80	Barjenbruch 2007, Pinnekamp et al. 2012	nur durch Filtration
CSB <sub>max</sub>	59	33	39,53	Jekel et al. 2016	In Ozonreaktor nur Aufspaltung (Abegglen '12)
CSB <sub>85%</sub>	37	33	24,79	Jekel et al. 2016	
NH <sub>4</sub> -N	5	7,60	4,61	Meier et al. 2014	
NO <sub>2</sub> -N	0,57	58,9	0,23	Meier et al. 2014	
N <sub>ges</sub>	10	8,8	8,76	Meier et al. 2014	
P <sub>ges, max</sub>	1,98	33	1,33	Barjenbruch 2007	nur durch Filtration, keine Dosierung FM
P <sub>ges, 85%</sub>	0,88	33	0,59	Barjenbruch 2007	nur durch Filtration, keine Dosierung FM

Bemerkungen: a:  $C_{ab} = (100 - \eta_{iM, 4. Stufe}) / 100 \times C_{Zu, max, 4. Stufe}$

Die Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe und der Ablaufkonzentrationen ist in Tabelle 40 enthalten. Die Summen für die Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe, der Monitoringstoffe, der Hauptstoffe und der Indikatorstoffe sind getrennt ausgewiesen.

Für Ioversol und die per- und polyfluorierte Chemikalien PFBA und PFOA liegt lediglich eine Eliminationsrate von 10% vor. Die Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe beträgt 89,3%. Die Ablaufkonzentration liegt bei 16,9 µg/l. Die Hauptstoffe werden zu 85,8% eliminiert. Die Vorgabe des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW zur Elimination der Indikatorstoffe von 80% wird mit 92,4% sicher eingehalten.

**Tabelle 40: Prognose der Elimination und Ablaufkonzentration der gemessenen Mikroschadstoffe bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF**

Ozonreaktor mit Sandfiltration							
Mikroschadstoffe, TW-Mittelwerte	C <sub>zu, BB</sub>	C <sub>zu, 4. Stufe</sub>	η <sub>Belebung</sub> <sup>a</sup>	η <sub>LM, 4. Stufe</sub>	C <sub>ab</sub> <sup>b</sup>	η <sub>ges</sub> <sup>c</sup>	Quelle η, Stufe
	ng/l	ng/l	%	%	ng/l	%	
S M H Valsartan	31.714	13.571	57,2	82,5	2375	92,5	Fux et al. 2015, Margot et al. 2011
S H Gabapentin	15.500	10.500	32,3	80,0	2100	86,5	Fux et al. 2015, Margot et al. 2011
S M H I Diclofenac	8.486	6.914	18,5	95,0	346	95,9	DWA 2015, Kreuzinger et al. 2011, Abegglen et al. 2009
S H Amidotrizoesäure	5.650	4.600	18,6	0,0	4600	18,6	DWA 2015, Abegglen et al. 2009
S M H I 1H-Benzotriazol	11.029	3.729	66,2	70,0	1119	89,9	DWA 2015, Abegglen et al. 2009, Kreuzinger et al. 2011
S H Σ 4,5-Methyl Benzotriazol	5.300	3.650	31,1	87,0	475	91,0	Margot et al. 2011
S Melamin	900	2.000	-122,2	35,0	1300	-44,4	IUTA
S lomeprol	3.600	1.790	50,3	61,0	698	80,6	Fux et al. 2015, Margot et al. 2011
S Iopamidol	3.790	1.725	54,5	50,0	863	77,2	DWA 2015, Bahr et al. 2007, Abegglen et al. 2009: 15 %
S M I Metoprolol	1.286	1.300	-1,1	90,0	130	89,9	DWA 2015, Grünebaum et al. 2011
S M Bisoprolol	1.300	1.200	7,7	65,0	420	67,7	IUTA
S Guanilharnstoff	170	1.100	-547,1	30,0	770	-352,9	Kümmerer et al. 2011
S M I Carbamazepin	766	841	-9,9	90,0	84	89,0	DWA 2015, Kreuzinger et al. 2011
S M Sotalol	769	743	3,3	90,0	74	90,3	DWA 2015, Abegglen et al. 2009
S Galaxolid	891	660	25,9	70,0	198	77,8	Abegglen et al. 2009; Grünebaum et al. 2011
S Iohexol	3.950	575	85,4	20,0	460	88,4	Bahr et al. 2007, DWA 2015: Zunahme
S M Losartan	1.971	450	77,2	80,0	90	95,4	Margot et al. 2011
S DEET	2.200	445	79,8	65,0	156	92,9	IUTA
S M I Clarithromycin	986	439	55,5	90,0	44	95,6	Abegglen et al. 2009, Kreuzinger et al. 2011, Margot et al. 2013
S M Acesulfam K	26.529	417	98,4	85,0	63	99,8	IUTA
S M I Sulfamethoxazol	526	349	33,7	90,0	35	93,4	DWA 2015, Kreuzinger et al. 2011
S Bezafibrate	1.400	215	84,6	70,0	65	95,4	DWA 2015, Kreuzinger et al. 2011
S PFBS	43	150	-248,8	35,0	98	-126,7	IUTA
S Iopromide	1.215	150	87,7	25,0	112	90,8	Abegglen et al. 2009, DWA 2015: 0%
S M Ciprofloxacin	1.446	116	92,0	85,0	17	98,8	IUTA
S Diuron	81	100	-22,8	70,0	30	63,1	DWA 2015, Kreuzinger et al. 2011
S M Terbutryn	105	90	13,6	90,0	9	91,4	DWA 2015, Abegglen et al. 2009
S Tonalid	145	77	47,2	56,0	34	76,8	Grünebaum et al. 2011
S M PFOS	122	66	45,6	35,0	43	64,6	IUTA
S Mecoprop P	180	48	73,6	60,0	19	89,4	Abegglen et al. 2009, Margot et al. 2011
S 10,11 Dithy drocarbamazepin	30	30	0,0	90,0	3	90,0	DWA 2015, Abegglen et al. 2009
S Isoproturone	30	30	0,0	65,0	11	65,0	Abegglen et al. 2009, Margot et al. 2011
S Ioversol	30	30	0,0	10,0	27	10,0	IUTA
S PFBA	47	22	54,3	10,0	19	58,8	IUTA
S M PFOA	10	11	-10,0	10,0	10	1,0	IUTA
S Ibuprofen	26.000	10	100,0	25,0	8	100,0	DWA 2015, Abegglen et al. 2009, Kreuzinger et al. 2011
<b>Summe Mikroschadstoffe</b>	<b>158.194</b>	<b>58.141</b>	<b>63,2</b>	<b>70,9</b>	<b>16.901</b>	<b>89,3</b>	
<b>davon Monitoringstoffe</b>	<b>87.042</b>	<b>30.236</b>	<b>65,3</b>	<b>83,9</b>	<b>4.858</b>	<b>94,4</b>	
<b>davon Hauptstoffe</b>	<b>77.679</b>	<b>42.964</b>	<b>44,7</b>	<b>74,4</b>	<b>11.014</b>	<b>85,8</b>	
<b>davon Indikatorstoffe</b>	<b>23.077</b>	<b>13.571</b>	<b>41,2</b>	<b>87,1</b>	<b>1.757</b>	<b>92,4</b>	

Bemerkungen: a:  $\eta_{\text{Belebung}} = (1 - C_{\text{zu,max,4. Stufe}} / C_{\text{zu,max, BB}}) \times 100$       b:  $C_{\text{ab}} = (100 - \eta_{\text{LM, 4. Stufe}}) / 100 \times C_{\text{zu,max,4. Stufe}}$       c:  $\eta_{\text{ges}} = (1 - C_{\text{ab}} / C_{\text{zu,max, BB}}) \times 100$

S: Screening M: Monitoring H: Hauptstoff I: Indikatorstoff

In Tabelle 41 sind die Bewertungskriterien nach Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW den Ablaufkonzentrationen der Oxidation mit Ozon und nachgeschalteter Sandfiltration gegenübergestellt. Wie bei der Elimination von Mikroschadstoffen mittels PAK und GAK gemäß den Varianten 1a, 1b, 1c und 2 wird das Bewertungskriterium auch bei der Oxidation mit Ozon mit nachgeschalteter Sandfiltration bei den gemessenen Mikroschadstoffen Valsartan, Gabapentin, Diclofenac und PFOS erheblich überschritten. Jedoch können im Gegensatz zu den Adsorptionsverfahren die Bewertungskriterien von Losartan, Clarithromycin und Acesulfam eingehalten werden.

Die Ursache für die erheblichen Überschreitungen der Bewertungskriterien liegt in den im Vergleich mit anderen Kläranlagen sehr hohen Zulaufkonzentrationen, siehe Tabelle 5.

**Tabelle 41: Gegenüberstellung der Bewertungskriterien bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF**

Einheit: ng/l	Bewertungskriterium	Ozonreaktor mit Sandfiltration	Einheit: ng/l	Bewertungskriterium	Ozonreaktor mit Sandfiltration
Valsartan	100	2375,0	Sulfamethoxazol	600	34,9
Gabapentin	100	2100,0	Ciprofloxacin	36	17,4
Diclofenac	50	345,7	Terbutryn	65	9,0
1H-Benzotriazol	10.000	1118,6	PFOS	0,65	43,1
Metoprolol	7.300	130,0	Mecoprop P	100	19,0
Carbamazepin	500	84,1	Isoproturone	300	10,5
Losartan	100	90,0	Ibuprofen	10	7,5
Clarithromycin	100	43,9	PFOA	100	<10
Acesulfam K	100	62,6	Östrogene Aktivität (c <sub>ab</sub> NK)	0,4	0,1
Bemerkungen: : Überschreitung Bewertungskriterium					

Neben den konventionellen Abwasserparametern und Mikroschadstoffen sind bei Oxidationsverfahren zusätzlich die Transformationsprodukte Bromat und Nitrosamine relevant. Dafür wurden im Rahmen des Messprogramms der Mikroschadstoffe an Trockenwettertagen ebenfalls Versuche mit Ozon durchgeführt. Die Versuche zur Bildung von Bromat und Nitrosaminen wurden mit 5 mg O<sub>3</sub>/l und 10 mg O<sub>3</sub>/l durchgeführt. Bei 5 mg O<sub>3</sub>/l werden 8,8 µg/l Bromat gebildet und bei 10 mg O<sub>3</sub>/l werden 38 µg/l Bromat gebildet.

Bei der Oxidation des Abwassers mit 7 mg O<sub>3</sub>/l im Ozonreaktor werden ca. 21 µg/l Bromat gebildet. Das Ökozentrum der Schweiz empfiehlt ein chronisches Qualitätskriterium von 50 µg/l Bromat im Gewässer [Ökozentrum 2016]. Das schweizerische Qualitätskriterium von 50 µg/l Bromat wird jederzeit sicher eingehalten.

Aus den Versuchsergebnissen für Nitrosamine folgt, dass nur das Nitrosamin NDMA nach der Ozonung gemessen wird. Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse ist Tabelle 42 enthalten.

**Tabelle 42: Versuchsergebnisse der Ozon-Transformationsprodukte**

	Einheit	Ozondosierung: 5 mg O <sub>3</sub> /l	Ozondosierung: 10 mg O <sub>3</sub> /l
Mittelwert Bromat	µg/L	8,8	38
Mittelwert NDMA	µg/L	0,014	0,035

### Energieverbrauch

Der Gesamtenergieverbrauch setzt sich aus den Einzelverbräuchen für die Anlagenteile: Pumpwerk, Pumpwerk für Kühlwasser, Ozonanlage, Sandfiltration und Kleinverbraucher zusammen. Der Gesamtenergieverbrauch berechnet sich zu 494.500 kWh/a bzw. zu 0,137 kWh/m<sup>3</sup>. Die Ozonanlage hat mit einem Energieverbrauch von 330.000.kWh/a den größten Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Der berechnete Gesamtenergieverbrauch von 0,137 kWh/m<sup>3</sup> liegt im Bereich der Literaturangaben von 0,14 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,17 kWh/m<sup>3</sup> auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden bei einer Ozondosierung von 7 mg O<sub>3</sub>/l [Gredigk-Hoffmann et al. 2015]. Die einzelnen Energieverbrauchswerte sind in Tabelle 43 enthalten.

**Tabelle 43: Energieverbrauch bei der Variante 3 - Ozonreaktor, SF**

Anlagenelement	Einheit	Verbrauch
Pumpwerk	[kWh/a]	60.300
	[kWh/m³]	0,020
Pumpwerk Kühlwasser	[kWh/a]	18.200
	[kWh/m³]	0,005
Ozonanlage	[kWh/a]	330.000
	[kWh/m³]	0,092
Sandfiltration	[kWh/a]	36.000
	[kWh/m³]	0,010
Kleinverbraucher	[kWh/a]	50.000
	[kWh/m³]	0,014
Gesamtverbrauch	[kWh/a]	494.500
	[kWh/m³]	0,137

### Kostenschätzung

Die Kostenschätzung für die Variante 3 erfolgt entsprechend der Vorgehensweise nach Kapitel 4 und ist in der Anlage F tabellarisch aufgeführt. In der Tabelle 44 ist eine Zusammenfassung der Kostenschätzung enthalten.

Zusammenfassend berechnen sich die Investitionskosten zu 5.844.000 €. Die Jahreskosten betragen 574.722 €/a. Der größte Kostenpunkt der Jahreskosten sind die Kapitalkosten mit 296.433 €/a, bzw. 0,082 €/a. Dies ist durch den großen Umfang der zu errichtenden 7 m tiefen Ozonreaktoren, die Ozonanlage und die Sandfiltration begründet. Danach folgen die Energiekosten mit 158.898 €/a. Die jährlichen Betriebsmittelkosten für Flüssigsauerstoff berechnen sich zu:  $260 \text{ t}_{\text{O}_2}/\text{a} \times 200 \text{ €/t} \times 1,19 = 61.880 \text{ €/a}$ . Für die Personalkosten wird eine halbe Stelle mit 20.000 €/a angesetzt.

**Tabelle 44: Kostenschätzung für die Variante 3 - Ozonreaktor, SF**

Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration				
Pos. Kurztext	Ingenieur- bauwerke netto [€]	maschinelle Ausrüstung netto [€]	elektrotechnische Ausrüstung netto [€]	Gesamtkosten netto [€]
<b>1 Investitionskosten</b>				
1.1 Baustelleneinrichtung	256.000,00	32.000,00	10.000,00	298.000,00
1.2 Ozonkontaktbecken	481.000,00	62.000,00	31.000,00	574.000,00
1.3 Dynasandfilter	1.227.000,00	117.500,00	58.750,00	1.403.250,00
1.4 Vorschacht Pumpwerk	81.750,00			81.750,00
1.5 Kanalbau	333.250,00			333.250,00
1.6 Bodenplatte Sauerstofftank	9.820,00			9.820,00
1.7 Betriebsgebäude	106.700,00	2.500,00	2.500,00	111.700,00
1.8 Ozonanlage		890.051,52	267.015,46	1.157.066,97
1.9 Straßen- und Wegebau	123.600,00			123.600,00
Baukosten, gesamt, netto	2.619.120,00	1.104.051,52	369.265,46	4.092.436,97
		netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
Ingenieurbauwerke		2.619.120,00	497.632,80	3.116.752,80
maschinelle Ausrüstung		1.104.051,52	209.769,79	1.313.821,31
elektrotechnische Ausrüstung		369.265,46	70.160,44	439.425,89
Baukosten, gesamt		4.092.436,97	777.563,03	4.870.000,00
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)		818.487,39	155.512,61	974.000,00
<b>1 Investitionskosten</b>		<b>4.910.924,37</b>	<b>933.075,63</b>	<b>5.844.000,00</b>
<b>2 Betriebskosten</b>		netto [€/a]	MwSt [€/a]	brutto [€/a]
2.1 Energiekosten		133.527,94	25.370,31	158.898,25
2.2 Personalkosten		20.000,00	0,00	20.000,00
2.3 Wartungs- und Instandhaltungskosten		31.521,42	5.989,07	37.510,49
2.4 Flüssigsauerstoff		52.000,00	9.880,00	61.880,00
<b>2 Betriebskosten</b>		<b>237.049,36</b>	<b>41.239,38</b>	<b>278.288,74</b>
<b>3 Reinvestitionskosten</b>	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]		LAWA- Faktoren $(1+r)^n / (1+i)^n$	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
Ingenieurbauwerke	3.116.752,80		0	0,00
maschinelle Ausrüstung	1.313.821,31		0,58203	764.679,47
elektrotechnische Ausrüstung	439.425,89		0,55368	243.299,46
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	974.000,00		0	0,00
<b>3 Reinvestitionskosten</b>	<b>5.844.000,00</b>			<b>1.007.978,94</b>
<b>4 Kapitalkosten</b>	In- und Reinvestitionen Bezugszeitpunkt 2016 brutto [€]		LAWA- Faktoren $i \cdot (1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt 2016 brutto [€]
Investitionskosten	5.844.000,00		0,04326	252.825,34
Reinvestitionskosten	1.007.978,94		0,04326	43.607,57
<b>4 Kapitalkosten</b>				<b>296.432,90</b>
<b>5 Jahreskosten</b>			Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto	
Betriebskosten			278.288,74	€/a
Kapitalkosten			296.432,90	€/a
<b>5 Jahreskosten</b>			<b>574.721,64</b>	<b>€/a</b>
5 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser	574.721,64 €/a / 3.600.000 m³/a =			0,160 €/m³
5 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser	574.721,64 €/a / 2.500.000 m³/a =			0,230 €/m³
5 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	574.721,64 €/a / 61.000 m³/a =			9,42 €/EW

### Zusammenfassung

Der Flächenverbrauch bei Variante 3 liegt bei 1.556 m<sup>2</sup>. Bei der Variante 3 fallen im Gegensatz zu den PAK- und GAK-Verfahren der Varianten 1a, 1b, 1c und 2 keine Reststoffe an. Die Prognose der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe berechnet sich bei der Variante 3 zu 89,4% und liegt um ca. 5%-Punkte höher als bei den PAK- und GAK-Verfahren der Varianten 1a, 1b, 1c und 2. Die gemessenen Indikatorstoffe werden zu 92,4% eliminiert. Die Eliminationsraten der konventionellen Abwasserparameter betragen 80 % bei AFS, 33% bei CSB und 33% bei P<sub>ges</sub>. Bei der Oxidation des Abwassers mit 7 mg O<sub>3</sub>/l im Ozonreaktor werden ca. 21 µg/l Bromat gebildet. Das schweizerische Qualitätskriterium von 50 µg/l Bromat wird jederzeit sicher eingehalten. Der Gesamtenergieverbrauch beträgt 494.500 kWh/a. Die Jahreskosten berechnen sich zu 574.722 €/a bzw. zu 0,16 €/m<sup>3</sup>.

## 5 Verfahrensvergleich

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der in Kapitel 4 erarbeiteten Planung und Dimensionierung der 5 Varianten zur Elimination von Mikroschadstoffen gegenübergestellt, diskutiert und in einer Bewertungsmatrix bewertet. Das Verfahren mit der höchsten Bewertung wird als Vorzugsvariante für den Ausbau empfohlen.

### 5.1 Betriebliche Gegenüberstellung

#### Betrieb

Zur Betrachtung der vorgestellten Verfahren hinsichtlich des Betriebs wird der übergeordnete Parameter Anlagensteuerung betrachtet. Die Anlagensteuerung wird durch folgende Unterpunkte konkretisiert:

- Technisierungsgrad
- Robustheit
- Regelbarkeit/Steuerbarkeit
- Prozessstabilität

Der Technisierungsgrad wird durch den Aufwand der benötigten EMSR-Technik und des Steuerungsaufwands bewertet. Die Betrachtung der Robustheit erfolgt hinsichtlich der Anfälligkeit gegenüber Betriebsstörungen. Durch das Teilziel Regelbarkeit/Steuerbarkeit werden die Möglichkeit und der Umfang der Beeinflussung der Steuerungsparameter auf den Behandlungsprozess bewertet. Mit der Prozessstabilität wird die Kontinuität der Elimination der Verfahren bewertet.

In der Bewertungsmatrix in Tabelle 59 werden für den Technisierungsgrad, Robustheit, Regelbarkeit/ Steuerbarkeit und Prozessstabilität Punkte von 1 bis 5 vergeben. Hohe Punktwerte wurden jeweils für einen geringen Technisierungsgrad, große Robustheit, gute Regelbarkeit und große Prozessstabilität vergeben.

Die Regelbarkeit bei der Variante 2 - GAK-Filtration besteht lediglich in der Wahl des Zeitpunktes zum Austausch der GAK bzw. in der Wahl der Bettvolumina. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den Verfahren mit PAK-Dosierung und Oxidation mittels Ozon, bei denen PAK bzw. Ozon dem Prozess kontinuierlich zugeführt wird.

Aufgrund der erhöhten Hintergrundbelastung ist bei Variante 1a - PAK-Dosierung simultan in die Belebung eine geringere Prozessstabilität gegeben.

### 5.2 Gegenüberstellung der Elimination

Die Betrachtung der Elimination erfolgt für die konventionellen Abwasserparameter AFS, CSB, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N und P<sub>ges</sub> sowie die gemessenen Mikroschadstoffe. Auf Grundlage der Ergebnisse des Trockenwetterscreenings und -monitorings des Instituts IUTA und den Prognosen der zu erwartenden Elimination und Ablaufkonzentration wird die Elimination der betrachteten Varianten gegenübergestellt.

## Konventionelle Abwasserparameter

### AFS

AFS wird in der Sandfiltration zu 80% eliminiert [Barjenbruch 2007]. Bei der GAK-Filtration wird die gleiche Eliminationsrate erreicht [Pinnekamp et al. 2012]. Die Ablaufkonzentration beträgt bei allen nachgeschalteten Verfahren 1,8 mg/l. Die Zusammenstellung der Konzentrationen und Wirkungsgrade ist in Tabelle 45 enthalten.

**Tabelle 45: Gegenüberstellung der Prognose der AFS-Ablaufkonzentration und Elimination**

	C <sub>zu</sub> , Belebung	C <sub>zu</sub> , 4. Stufe	η i.M., 4. Stufe	C <sub>ab</sub>
PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration	61	9	80	1,8
GAK-Filtration	61	9	80	1,8
Ozonreaktor mit Sandfiltration	61	9	80	1,8

### CSB

Auf Grundlage der CSB-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung und Literaturwerten werden die maximale CSB-Ablaufkonzentration sowie der 85%-Perzentilwert im Ablauf hinter der 4. Stufe für die verschiedenen Verfahren berechnet. Für die PAK-Adsorptionsverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration und das GAK-Filtrationsverfahren ist eine Eliminationsrate von 50% zu erwarten, während bei der Oxidation mit Ozon mit nachgeschalteter Sandfiltration eine Eliminationsrate von 33% erreicht wird. Eine Zusammenstellung der Prognose der Ablaufkonzentrationen und der Eliminationsraten ist in Tabelle 46 zusammengestellt. Bei den PAK- und GAK-Filtrationsverfahren beträgt die maximale CSB-Ablaufkonzentration 29,5 mg/l, beim Ozonverfahren 39,5 mg/l.

**Tabelle 46: Gegenüberstellung der Prognose der CSB-Ablaufkonzentration und Elimination**

		C <sub>zu</sub> , Belebung	C <sub>zu</sub> , 4. Stufe	η i.M., 4. Stufe	C <sub>ab</sub>
PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration	CSB <sub>max</sub>	1.646	59,0	50	29,5
	CSB <sub>85%</sub>	449	37,0	50	18,5
GAK-Filtration	CSB <sub>max</sub>	1.646	59,0	50	29,5
	CSB <sub>85%</sub>	449	37,0	50	18,5
Ozonreaktor mit Sandfiltration	CSB <sub>max</sub>	1.646	59,0	33	39,5
	CSB <sub>85%</sub>	449	37,0	33	24,8

### P<sub>ges</sub>

Auf Grundlage des 85%-Perzentilwertes der P<sub>ges</sub>-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung und Literaturwerten für die Eliminationsraten in der 4. Stufe wird die P<sub>ges</sub>-Ablaufkonzentration im Ablauf hinter der 4. Stufe für die verschiedenen Verfahren berechnet.

Für die PAK-Adsorptionsverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration ist eine Eliminationsrate von 70%, für das GAK-Filtrationsverfahren eine Eliminationsrate von 60% und für das Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration eine Eliminationsrate von 33% zu erwarten.

ten. Eine Zusammenstellung der Prognose der Ablaufkonzentrationen und der Eliminationsraten ist in Tabelle 47 zusammengestellt.

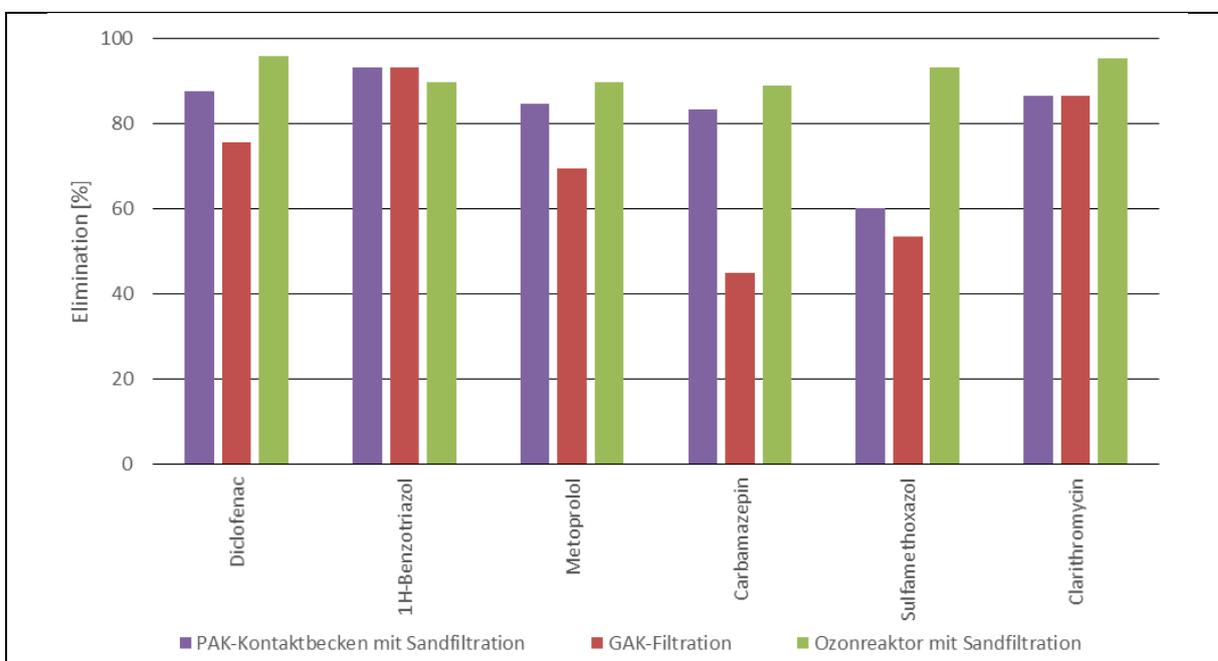
**Tabelle 47: Gegenüberstellung der Prognose der Pges Ablaufkonzentration und Elimination**

	Czu, Belegung (85%- Perzentilwert)	Czu, 4. Stufe	$\eta$ i.M, 4. Stufe	Cab
PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration	8,89	0,88	70	0,26
GAK-Filtration	8,89	0,88	60	0,35
Ozonreaktor mit Sandfiltration	8,89	0,88	33	0,59

### Elimination der Mikroschadstoffe

Der Vergleich der Elimination der Mikroschadstoffe erfolgt für die Mittelwerte des Trockenwitterscreenings und -monitorings für die Indikatorstoffe, die Hauptstoffe und alle gemessenen Mikroschadstoffe, siehe Kapitel 2.4. Grundlage sind die Ergebnisse aus Tabelle 25 für PAK, Tabelle 34 für GAK und Tabelle 40 für Ozon.

Die Prognose der Elimination der Indikatorstoffe sind für die untersuchten Verfahren in Abbildung 26 dargestellt. Die höchste Eliminationsrate wird beim Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration erreicht. Danach folgen die PAK-Adsorption mit nachgeschalteter Sandfiltration und die GAK-Filtration. Nur beim Ozonverfahren wird für jeden Einzelstoff eine Eliminationsrate größer 80% erreicht. Die GAK-Filtration weist besonders große Schwankungen bei den Eliminationsraten der Indikatorstoffe auf. Sulfamethoxazol wird aufgrund seiner polaren Stoffeigenschaften nur in geringem Maße durch die PAK-Adsorption und die GAK-Filtration eliminiert, siehe Tabelle 51.



**Abbildung 26: Prognose der Eliminationsraten der Indikatorstoffe**

In Abbildung 27 sind die Zu- und Ablaufkonzentration sowie die Prognose der Elimination der Indikatorstoffe einzeln und als Summe graphisch dargestellt. Die Vorgabe des Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW zur Elimination von 80% zwischen Zulauf Belegung und

Ablauf der 4. Stufe wird bei allen untersuchten Verfahren eingehalten. Beim Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration wird mit 1.757 ng/l die geringste Ablaufkonzentration erreicht. Danach folgen die PAK-Adsorption mit nachgeschalteter Sandfiltration mit 2.445 ng/l und die GAK-Filtration mit 4.006 ng/l. Damit liegt die Ablaufkonzentration der Indikatorstoffe beim Ozonverfahren um 56% unter der Ablaufkonzentration bei der GAK-Filtration und um 28% unter der Ablaufkonzentration bei der PAK-Adsorption.

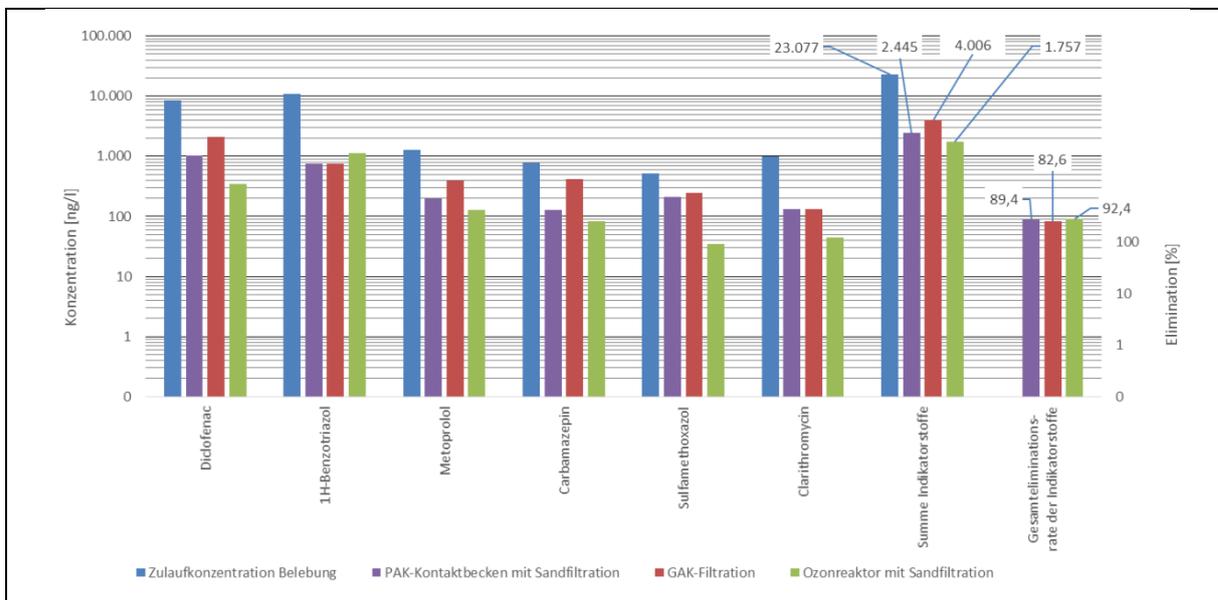


Abbildung 27: Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Elimination der Indikatorstoffe

In Tabelle 48 sind die Summe der Zulaufkonzentration sowie die Prognose der Ablaufkonzentration und der Gesamteliminationsrate der Indikatorstoffe für die untersuchten Verfahren zusammengestellt.

Tabelle 48: Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Eliminationsrate der Indikatorstoffe

	$c_{zu}$ Belegung ng/l	$c_{zu}$ 4. Stufe ng/l	$\eta$ Belegung %	$c_{ab}$ 4. Stufe ng/l	$\eta$ 4. Stufe %	$\eta_{ges}$ %
PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration	23.077	13.571	41,2	2.445	82,0	89,4
GAK-Filtration	23.077	13.571	41,2	4.006	70,5	82,6
Ozonreaktor mit Sandfiltration	23.077	13.571	41,2	1.757	87,1	92,4

Für die Hauptstoffe ist die Prognose der Eliminationsraten in Abbildung 28 zusammengestellt. Das Röntgenkontrastmittel Amidotrizoesäure wird von keinem der betrachteten Verfahren gezielt und ausreichend eliminiert. Die Eliminationsrate liegt unter 35%. Gabapentin, welches im Ablauf der Nachklärung einen Anteil von ca. 18% aufweist, wird nur durch das Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration zu mehr als 80% eliminiert. Bei der PAK-Adsorption mit nachgeschalteter Sandfiltration wird lediglich eine Elimination von 42% und bei der GAK-Filtration eine Elimination von 49% erreicht.

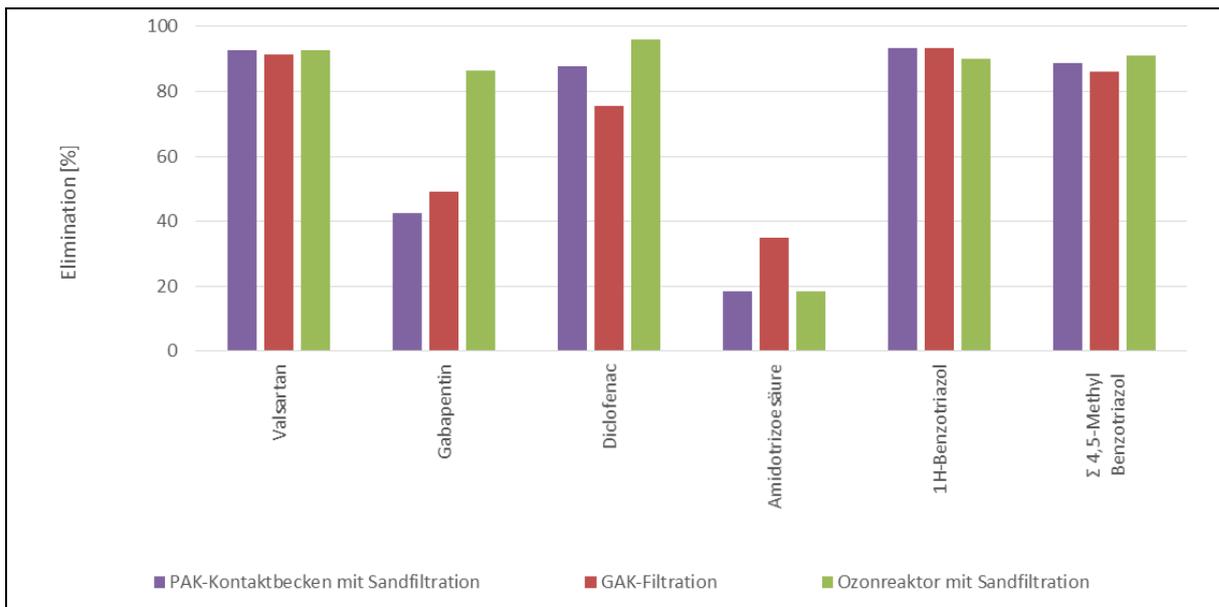


Abbildung 28: Prognose der Eliminationsraten der Hauptstoffe

In Abbildung 29 sind die Zu- und Ablaufkonzentration sowie die Prognose der Elimination der Hauptstoffe einzeln und als Summe graphisch dargestellt. Beim Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration wird mit 85,8 % die höchste Eliminationsrate und mit 11.014 ng/l die geringste Ablaufkonzentration erreicht. Danach folgen die GAK-Filtration mit einer Eliminationsrate von 77,1 % und einer Ablaufkonzentration von 17.819 ng/l sowie die PAK-Adsorption mit nachgeschalteter Sandfiltration mit einer Eliminationsrate von 76,5 % und einer Ablaufkonzentration von 18.251 ng/l. Damit liegt die Ablaufkonzentration der Indikatorstoffe beim Ozonverfahren um 40% unter der Ablaufkonzentration bei der PAK-Adsorption und um 38% unter der Ablaufkonzentration bei der GAK-Filtration.

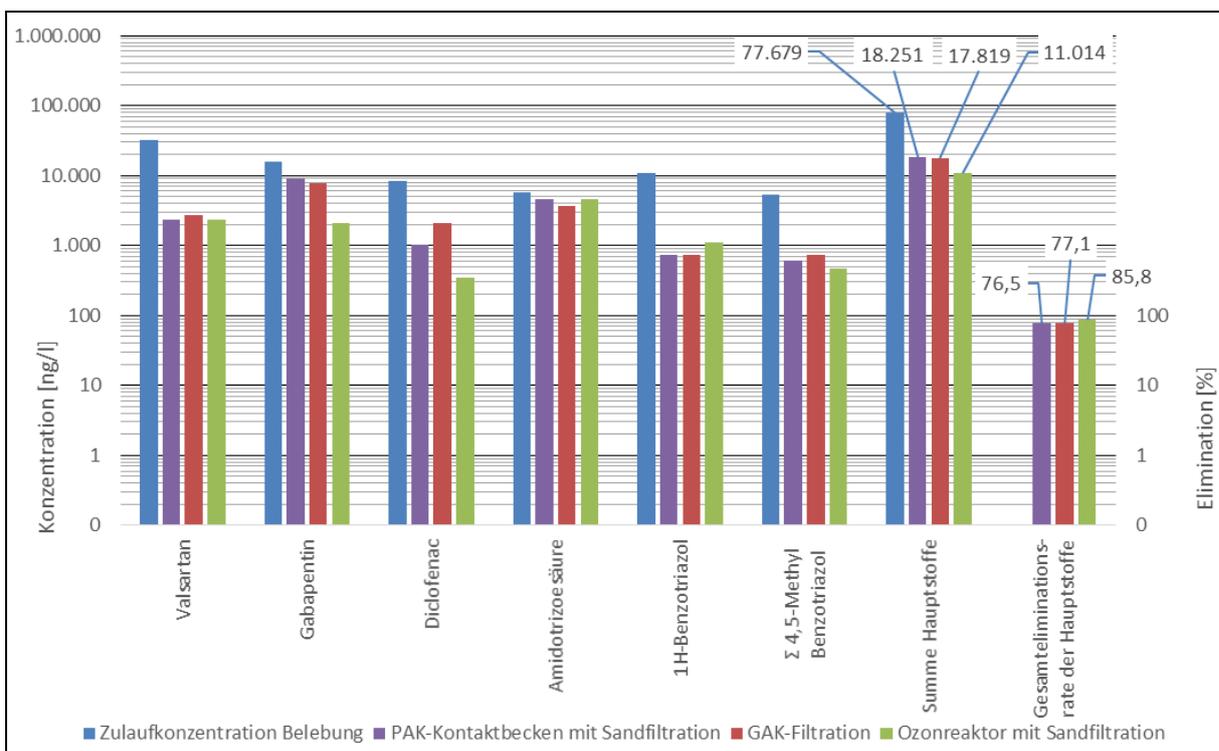


Abbildung 29: Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Elimination der Hauptstoffe

In Tabelle 49 sind die Summe der Zulaufkonzentration sowie die Prognose der Ablaufkonzentration und die Gesamteliminationsrate der Hauptstoffe für die untersuchten Verfahren zusammengestellt.

**Tabelle 49: Zu- und Ablaufkonzentration sowie Prognose der Elimination der Hauptstoffe**

	$c_{zu}$ Belebung ng/l	$c_{zu}$ 4. Stufe ng/l	$\eta$ Belebung %	$c_{ab}$ , 4. Stufe ng/l	$\eta$ 4. Stufe %	$\eta_{ges}$ %
PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration	77.679	42.964	44,7	18.251	57,5	76,5
GAK-Filtration	77.679	42.964	44,7	17.819	58,5	77,1
Ozonreaktor mit Sandfiltration	77.679	42.964	44,7	11.014	74,4	85,8

Für alle gemessenen Mikroschadstoffe ist die Prognose der Eliminationsraten in Abbildung 30 zusammengestellt. Für Iopamidol, Guanylharnstoff und Iopromid ist bei allen nachgeschalteten Verfahren zwischen Zulauf Belebung und Ablauf 4. Reinigungsstufe eine Zunahme der Konzentration festzustellen.

In Abbildung 31 sind die Zu- und Ablaufkonzentration sowie die Prognose der Elimination aller gemessenen Mikroschadstoffe einzeln und als Summe graphisch dargestellt. Beim Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration wird mit 89,3 % die höchste Eliminationsrate und mit 16.901 ng/l die geringste Ablaufkonzentration erreicht. Danach folgen die PAK-Adsorption mit nachgeschalteter Sandfiltration mit einer Eliminationsrate von 84,2 % und einer Ablaufkonzentration von 24.746 ng/l sowie die GAK-Filtration mit einer Eliminationsrate von 84,2 % und einer Ablaufkonzentration von 25.031 ng/l. Damit liegt die Ablaufkonzentration aller gemessenen Mikroschadstoffe beim Ozonverfahren um 32% unter der Ablaufkonzentration bei der GAK-Filtration und um 38% unter der Ablaufkonzentration bei der PAK-Adsorption.

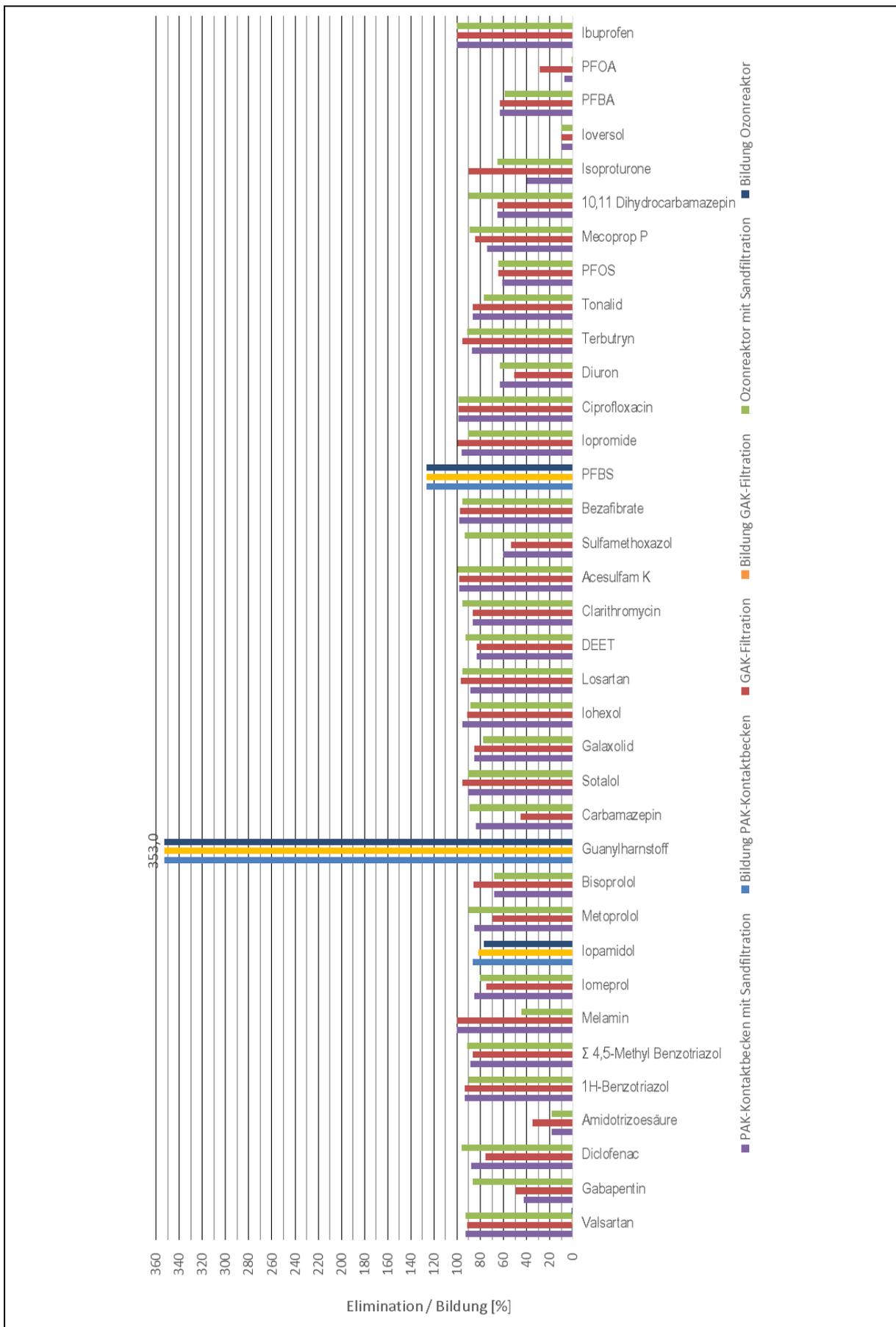


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Elimination und Bildung der betrachteten Verfahren

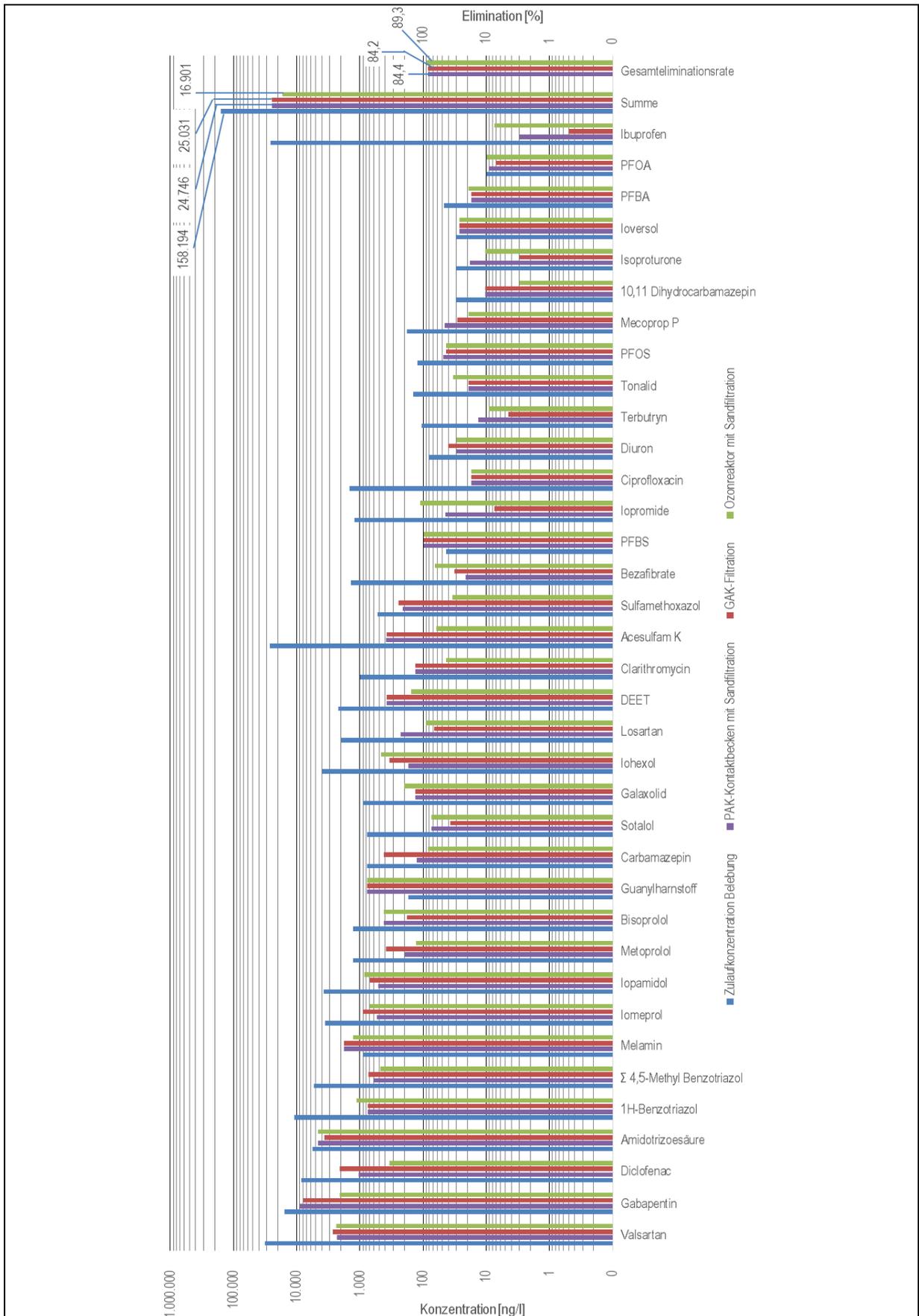


Abbildung 31: Gegenüberstellung der Zu- und Ablaufkonzentration sowie der Elimination der gemessenen Mikroschadstoffe

In Tabelle 50 sind die Summe der Zulaufkonzentration sowie die Prognose der Ablaufkonzentration und die Gesamteliminationsrate aller gemessenen Mikroschadstoffe für die untersuchten Verfahren zusammengestellt.

**Tabelle 50: Zusammenstellung der Prognose der Elimination durch die vorgestellten nachgeschalteten Verfahren**

	Summe $c_{zu}$ Belebung ng/l	Summe $c_{ab}$ Nachklärung ng/l	$\eta$ Belebung %	$c_{ab, ges}$ ng/l	$\eta$ 4. Stufe %	$\eta_{ges}$ %
PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration	158.194	58.141	63,2	24.746	57,4	84,4
GAK-Filtration	158.194	58.141	63,2	25.031	56,9	84,2
Ozonreaktor mit Sandfiltration	158.194	58.141	63,2	16.901	70,9	89,3

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Stoffeigenschaften (siehe Kapitel 2.1.1) auf die Elimination der verschiedenen nachgeschalteten Verfahren werden beispielhaft die Stoffe Diclofenac, Sulfamethoxazol und Iopromid betrachtet. Diclofenac wird als unpolarer und Sulfamethoxazol als polarer Referenzstoff gewählt. Iopromid wird als Referenzsubstanz für schlecht oxidierbare Stoffe gewählt. In Tabelle 51 sind der Verteilungskoeffizient  $k_{OW}$  sowie die Geschwindigkeitskonstanten der Oxidation  $k_{O_3}$  und  $k_{OH}$  zusammengestellt.

**Tabelle 51: Zusammenstellung der Stoffeigenschaften der Vergleichsstoffe**

	unpolarer Stoff: Diclofenac	polarer Stoff: Sulfamethoxazol	Schlecht oxidierbarer Stoff: Iopromid
log $k_{ow}$	4,51 <sup>[a]</sup>	0,89 <sup>[a]</sup>	-2,33 <sup>[b]</sup>
$k_{O_3}$ [L/(mol x s)]	1 x 10 <sup>6</sup> [c]	2,5 x 10 <sup>6</sup> [c]	< 0,8 [c]
$k_{OH}$ [L/(mol x s)]	7,5 x 10 <sup>9</sup> [c]	5,5 x 10 <sup>9</sup> [c]	3,3 x 10 <sup>9</sup> [c]
Bemerkungen:	[a]: Rippen 2015	[b]: Steger-Hartmann et al 1998	[c]: Zwiener 2006

Der Einfluss der Stoffeigenschaften auf die Elimination ist in Tabelle 52 dargestellt. Während Sulfamethoxazol kaum adsorbiert wird, kann aufgrund der chemischen Struktur durch die Oxidation eine Elimination von 90% erreicht werden. Als Gegenbeispiel wird das unpolare Iopromid durch Aktivkohle gut adsorbiert (> 70%) jedoch schlecht oxidiert (25%). Diclofenac wird aufgrund seiner Stoffeigenschaften sowohl gut adsorbiert als auch gut oxidiert.

**Tabelle 52: Gegenüberstellung der Elimination der nachgeschalteten Verfahren hinsichtlich der Vergleichsstoffe**

Einheit: [%]	unpolarer Stoff: Diclofenac	polarer Stoff: Sulfamethoxazol	Schlecht oxidierbarer Stoff: Iopromid
PAK-Kontaktbecken mit Sandfiltration	85	40	70
GAK-Filtration	70	30	95
Ozonreaktor mit Sandfiltration	95	90	25

Auf Grundlage der Messergebnisse des Trockenwetterscreenings und -monitorings wird in Tabelle 53 die Ablaufkonzentration der Mikroschadstoffe für die untersuchten Verfahren den Bewertungskriterien des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW gegenübergestellt.

## Das Bewertungskriterium der Stoffe

- Valsartan
- Gabapentin
- Diclofenac
- PFOS

wird bei den untersuchten Verfahren PAK-Adsorption mit nachgeschalteter Sandfiltration, GAK-Filtration und Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration nicht eingehalten. Die Bewertungskriterien der Stoffe Losartan, Clarithromycin und Acesulfam K werden bei der PAK-Adsorption ebenfalls nicht eingehalten. Bei der GAK-Filtration werden die Bewertungskriterien der Stoffe Clarithromycin und Acesulfam K ebenfalls nicht eingehalten.

**Tabelle 53: Gegenüberstellung der Ablaufkonzentrationen mit den Bewertungskriterien nach KomM NRW 2016**

Einheit ng/l	Bewertungskriterium	PAK-KB, NK, SF	GAK-Filtration	Ozonreaktor mit Sandfiltration
Valsartan	100	2341,1	2714,3	2375,0
Gabapentin	100	8925,0	7875,0	2100,0
Diclofenac	50	1037,1	2074,3	345,7
1H-Benzotriazol	10.000	745,7	745,7	1118,6
Metoprolol	7.300	195,0	390,0	130,0
Carbamazepin	500	126,2	420,7	84,1
Losartan	100	225,0	67,5	90,0
Clarithromycin	100	131,6	131,6	43,9
Acesulfam K	100	383,8	375,4	62,6
Sulfamethoxazol	600	209,1	244,0	34,9
Ciprofloxacin	36	17,4	17,4	17,4
Terbutryn	65	13,6	4,5	9,0
PFOS	0,65	66,3	43,1	43,1
Mecoprop P	100	46,1	28,5	19,0
Isoproturone	300	18,0	3,0	10,5
Ibuprofen	10	3,0	1	7,5
PFOA	100	<10	<10	<10
Östrogene Aktivität (c <sub>ab</sub> NK)	0,4	0,082	0,082	0,082
Bemerkungen:		: Überschreitung Bewertungskriterium		

## Zusammenfassung

Die Ablaufkonzentrationen der konventionellen Abwasserparameter AFS, CSB, P<sub>ges</sub> und N<sub>ges</sub> und die Ablaufkonzentration der Summe der Mikroschadstoffe sind in der Tabelle 54 für die untersuchten Verfahren zusammengestellt. Den Ergebnissen ist jeweils der Rang zugeordnet.

**Tabelle 54: Ablaufwerte der konventionellen Abwasserparameter und der Mikroschadstoffe**

	Einheit	PAK mit SF	GAK-Filtration	Ozon mit SF
<b>AFS</b>				
Konzentration	mg/l	1,80	1,80	1,80
Rang	-	1	1	1
<b>CSB<sub>85%</sub></b>				
Konzentration	mg/l	18,50	18,50	24,79
Rang	-	1	1	2
<b>N<sub>ges, 85%</sub></b>				
Konzentration	mg/l	9,60	9,60	8,76
Rang	-	2	2	1
<b>P<sub>ges, 85%</sub> C<sub>ab</sub></b>				
Konzentration	mg/l	0,26	0,35	0,59
Rang	-	1	2	3
<b>Summe Mikroschadstoffe</b>				
Konzentration bei TW	ng/l	24.746	25.031	16.901
Rang	-	2	3	1
<b>Summe Mikroschadstoffe</b>				
Konzentration, Jahresmittelwert geschätzt	ng/l	23.500	23.750	16.000
Rang	-	2	3	1
Fracht bei Jahresabwassermenge 3.600.000 m <sup>3</sup> /a	kg/a	85	86	58

Die höchste Elimination der Mikroschadstoffe wird beim Ozonverfahren mit nachgeschalteter Sandfiltration erreicht.

Auf Grundlage der berechneten Ablaufkonzentrationen bei Trockenwetter- und Regenwetterabfluss wurde die Ablaufkonzentration für die Summe der Mikroschadstoffe im Jahresmittel mit ca. 95% der Ablaufkonzentration bei Trockenwetter geschätzt und die zugehörige Ablauffracht berechnet. Die so ermittelte Jahresfracht der Summe der Mikroschadstoffe zum Palmersdorfer Bach liegt beim Ozonverfahren mit ca. 58 kg/a deutlich niedriger als bei der PAK-Adsorption mit ca. 85 kg/a und der GAK-Filtration mit ca. 86 kg/a. Gemäß Kap. 2.4 beträgt die Jahreszulauffracht der Summe der Mikroschadstoffe zur Kläranlage ca. 450 kg/a und die derzeitige Jahreseinleitungsfracht in den Palmersdorfer Bach ohne die 4. Reinigungsstufe ca. 200 kg/a. Mit dem Ozonverfahren kann die derzeitige Jahreseinleitungsfracht von ca. 200 kg/a auf ca. 58 kg/a reduziert werden.

Bei der Oxidation des Abwassers mit 7 mg O<sub>3</sub>/l im Ozonreaktor werden ca. 21 µg/l Bromat gebildet. Das Ökozentrum der Schweiz empfiehlt ein chronisches Qualitätskriterium von 50 µg/l Bromat im Gewässer [Ökozentrum 2016]. Das schweizerische Qualitätskriterium von 50 µg/l Bromat wird jederzeit sicher eingehalten.

### 5.3 Energetische Gegenüberstellung

Für die Gegenüberstellung des Energieverbrauchs der betrachteten Varianten werden die Energieverbrauchswerte von folgenden Anlagenelementen betrachtet:

- Pumpwerk
- Sandfiltration / GAK-Filtration
- Kleinverbraucher
- Zwischenpumpwerk
- PAK-Treibwasserpumpe
- Rührwerke
- Rücklaufschlammumpwerk
- Überschussschlammumpwerk
- Schlammbehandlung
- Ozonanlage
- Pumpwerk Kühlwasser (Ozonanlage)

Der Energieverbrauch des Pumpwerks ist für alle Varianten gleich. Die Sandfiltration hat einen Verbrauch von 36.000 kWh/a und die GAK-Filtration von 72.000 kWh/a. Der Energieverbrauch der GAK-Filtration ist aufgrund einer Filteranzahl von 60 mit 0,020 kWh/m<sup>3</sup> im Vergleich zur Sandfiltration mit 30 Filtern und 0,010 kWh/m<sup>3</sup> doppelt so hoch. Der Energieverbrauch der Kleinverbraucher wird bei Variante 2 mit 20.000 kWh/a angesetzt. Bei den anderen Varianten wird der Energieverbrauch aufgrund der höheren Anzahl an Kleinverbrauchern mit 50.000 kWh/a angesetzt. Bei Variante 1b ist aufgrund der topographischen Verhältnisse zusätzlich ein Zwischenpumpwerk zu berücksichtigen. In den Kontaktbecken bei Variante 1b und 1c sind zur Durchmischung 6 Rührwerke mit einer Leistung von insgesamt 12 kW vorgesehen. Die PAK-Überschussschle wird bei Variante 1a zusammen mit dem Überschussschlamm der Schlammbehandlung der Kläranlage Brühl zugeführt und mit der vorh. Kammerfilterpresse entwässert. Bei den Varianten 1b und 1c wird die PAK-Überschussschle gesondert mit einer neu zu beschaffenden Zentrifuge entwässert. In Abbildung 32 sind die Energieverbrauchswerte dargestellt.

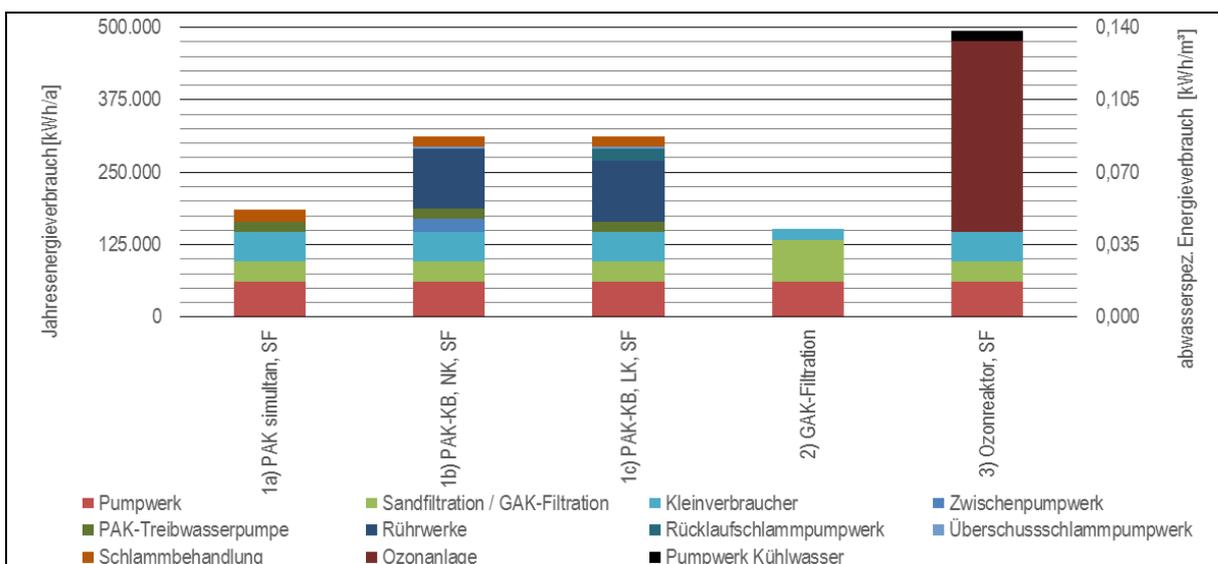


Abbildung 32: Gegenüberstellung des Energieverbrauchs

Die Variante 2 weist mit rd. 152.000 kWh/a den geringsten Energieverbrauch auf. Für Variante 1a mit 185.000 kWh/a sind zusätzlich zum Pumpwerk die Filtrationsstufe, die PAK-Treibwasserpumpe und die Schlammbehandlung mit Kammerfilterpresse zu berücksichtigen. Der Energieverbrauch der beiden Varianten 1b und 1c ist mit 312.600 kWh/a gleich groß.

Der höchste Energieverbrauch liegt bei Variante 3 mit 494.500 kWh/a vor. Die Ozonanlage zur Herstellung des Ozons verbraucht 330.000 kWh/a bzw. 11 kWh/kg O<sub>3</sub>.

In Tabelle 55 sind die einzelnen jährlichen und abwasserspezifischen Energieverbrauchs- werte je Aggregat und Verfahren zusammengestellt. Der Energiebedarf auf der Kläranlage Brühl steigt bei einem aktuellen Verbrauch von rd. 2.150.000 kWh/a zwischen 7,1% (Variante 2) und 23,0% (Variante 3). Der aktuelle einwohnerspezifische Energiebedarf beträgt ohne 4. Stufe im Mittel 35,25 kWh/(EW x a). Der Zuwachs des einwohnerspezifischen Jahresenergiebedarfs liegt zwischen 2,5 kWh/(EW x a) bei der Variante 2 und 8,1 kWh/(EW x a) bei der Variante 3.

Dem Energieverbrauch der untersuchten Verfahren ist ein Rang zugeordnet.

**Tabelle 55: Gegenüberstellung der Energieverbrauchswerte**

		1a) PAK simultan, SF	1b) PAK-KB, NK, S 1c) PAK-KB, LK, SF	2) GAK-Filtration	3) Ozonreaktor, SF
Pumpwerk	kWh/a	60.300	60.300	60.300	60.300
Sandfiltration / GAK-Filtration	kWh/a	36.000	36.000	36.000	72.000
Kleinverbraucher	kWh/a	50.000	50.000	50.000	20.000
Zwischenpumpwerk	kWh/a		22.600		
PAK-Treibwasserpumpe	kWh/a	17.700	17.700	17.700	
Rührwerke	kWh/a		105.000	105.000	
Rücklaufschlammumpwerk	kWh/a			22.600	
Überschussschlammumpwerk	kWh/a		3.000	3.000	
Schlammbehandlung	kWh/a	21.400	18.000	18.000	
Ozonanlage	kWh/a				330.000
Pumpwerk Kühlwasser	kWh/a				18.200
Jahresenergieverbrauch	kWh/a	185.400	312.600	312.600	152.300
Jahresenergieverbrauch / Abwassermenge	kWh/m <sup>3</sup>	0,052	0,087	0,087	0,042
Jahresenergieverbrauch / (Einwohner x Jahr)	kWh/(EW x a)	3,04	5,12	5,12	2,50
Anstieg Energiebedarf	%	8,62	14,54	14,54	7,08
Rang	-	2	3	3	1

Abwassermenge: 3.600.000 m<sup>3</sup>, Einwohnerwerte: 61.000 EW

## 5.4 Wirtschaftliche Gegenüberstellung

Die Gegenüberstellung der Kosten erfolgt anhand folgender Kostenpunkte:

- Investitionskosten
- Betriebskosten
- Reinvestitionskosten
- Kapitalkosten
- Jahreskosten
- abwasserspezifische Kosten

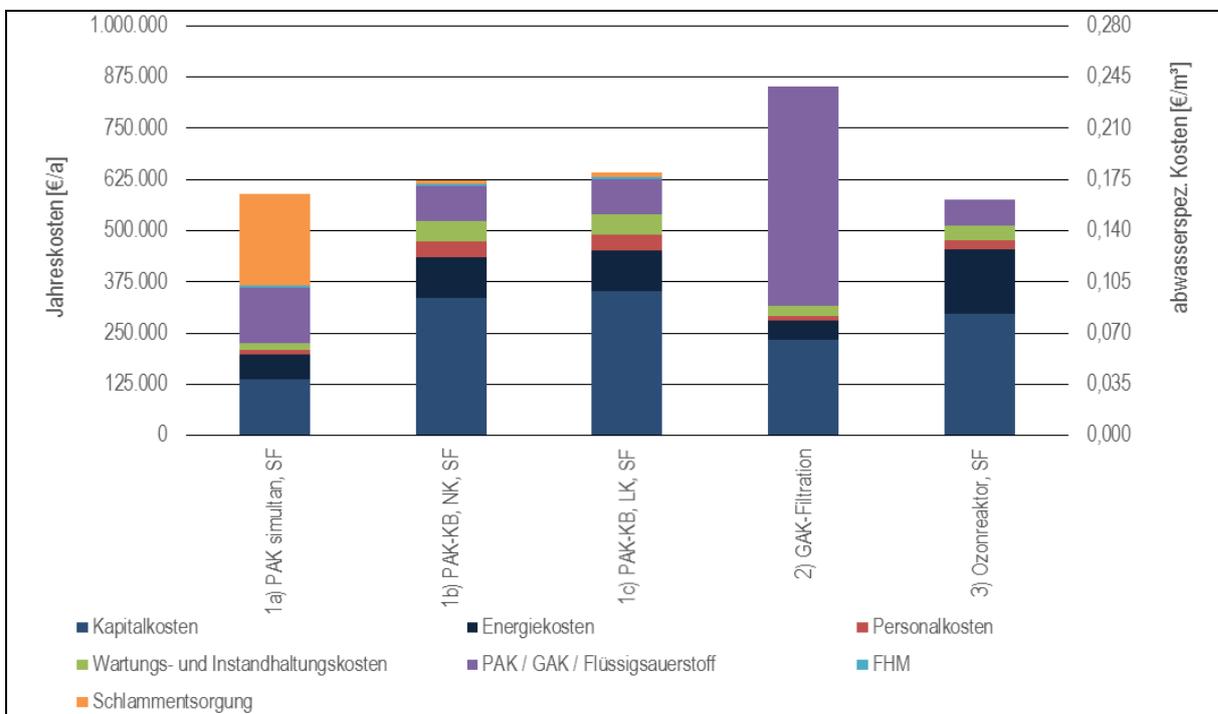
Die Kostenpunkte sind in der Tabelle 56 für die untersuchten Verfahren zusammengestellt. Der direkte Vergleich der Wirtschaftlichkeit erfolgt anhand der Jahreskosten.

**Tabelle 56: Gegenüberstellung der Investitionskosten, Betriebskosten und Jahreskosten**

	Einheit	1a) PAK simultan, SF	1b) PAK-KB, NK, SF	1c) PAK-KB, LK, SF	2) GAK-Filtration	3) Ozonreaktor, SF
Investitionskosten	€	2.983.628	6.949.226	7.347.374	5.230.229	5.844.000
Reinvestitionskosten masch. Ausr.	€	140.254	530.195	519.113	101.468	764.679
Reinvestitionskosten elektr. Ausr.	€	68.688	252.184	246.584	49.086	243.299
Kapitalkosten	€/a	138.118	334.488	350.991	232.785	296.433
Betriebskosten	€/a	452.709	289.582	290.804	620.194	278.289
Jahreskosten	€/a	590.827	624.070	641.795	852.979	574.722
abwasserspez. Kosten	€/m³	0,164	0,173	0,178	0,237	0,160
Rang	-	2	3	4	5	1

Der unterschiedliche Einfluss der Investitionskosten und Betriebskosten auf die Jahreskosten wird besonders bei Betrachtung der Varianten 1a und 3 ersichtlich. Bei Variante 1a sind die Investitionskosten niedrig aber die Betriebskosten hoch. Dies ist bei Variante 3 mit hohen Investitionskosten und geringen Betriebskosten umgekehrt. Dennoch sind die Projektkostenbarwerte und damit die Jahreskosten beider Varianten annähernd gleich.

Die Jahreskosten der untersuchten Varianten sind in Abbildung 33 getrennt nach den Anteilen Kapitalkosten und Betriebskosten bestehend aus Energiekosten, Personalkosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Betriebsmittelkosten (PAK, GAK, Flüssigsauerstoff), Flockungshilfsmittel (FHM) und Schlammensorgungskosten grafisch dargestellt. Die Kapitalkosten unterliegen aufgrund des unterschiedlichen Bedarfs an Ingenieurbauwerken, maschineller Ausrüstung und elektrotechnischer Ausrüstung großen Schwankungen von rd. 138.000 €/a bei Variante 1a bis rd. 351.000 €/a bei Variante 1c. Für Variante 1a ist lediglich eine Sandfiltration zu errichten. Demgegenüber sind für Variante 1c zwei Kontaktbecken, zwei Lamellenklärer und ebenfalls eine Sandfiltration erforderlich.



**Abbildung 33: Gegenüberstellung der Jahreskosten und abwasserspezifischen Kosten**

Bei den Varianten 1a und 2 beträgt der Anteil der Kapitalkosten an den Jahreskosten ca. 23% bis 27%. Bei den Varianten 1b, 1c und 3 liegt der Anteil der Kapitalkosten an den

Jahreskosten bei ca. 50%. Bei der Variante 1a machen die Entsorgungskosten den größten Anteil an den Jahreskosten aus. Durch die simultane PAK-Dosierung ist der gesamte Klärschlamm thermisch zu entsorgen. Dafür fallen Mehrkosten von rd. 225.500 €/a an.

In Tabelle 57 sind die einzelnen Kostenpunkte der Jahreskosten der Varianten aufgeführt. Die teuerste Variante ist Variante 2 mit Jahreskosten von rd. 850.000 €/a. Die hohen Jahreskosten resultieren aus den Betriebsmittelkosten für die turnusmäßige Erneuerung der GAK von 535.500 €/a. Durch die Nutzung der vorhandenen Nachklärbecken bei Variante 1b resultieren im Vergleich zu Variante 1c niedrigere Jahreskosten von rd. 18.000 €/a.

**Tabelle 57: Gegenüberstellung der Jahreskosten**

	Einheit	1a) PAK simultan, SF	1b) PAK-KB, NK, SF	1c) PAK-KB, LK, SF	2) GAK-Filtration	3) Ozonreaktor, SF
<b>Kapitalkosten</b>	€/a	138.118	334.488	350.991	232.785	296.433
<b>Betriebskosten</b>						
Energiekosten	€/a	59.591	99.576	99.576	48.956	158.898
Personalkosten	€/a	10.000	40.000	40.000	10.000	20.000
Wartungs- und Instandhaltungskosten	€/a	17.907	49.451	50.673	25.737	37.510
PAK / GAK / Flüssigsauerstoff	€/a	135.660	85.680	85.680	535.500	61.880
FHM	€/a	4.165	4.165	4.165		
Schlamm Entsorgung	€/a	225.386	10.710	10.710		
Betriebskosten, Zwischensumme	€/a	(452.709)	(289.582)	(290.804)	(620.194)	(278.289)
<b>Jahreskosten</b>	€/a	590.827	624.070	641.795	852.979	574.722
<b>Jahreskosten / Abwassermenge</b>	€/m <sup>3</sup>	0,164	0,173	0,178	0,237	0,160
<b>Jahreskosten / (Einwohner und Jahr)</b>	€/(EW x a)	9,69	10,23	10,52	13,98	9,42
<b>Rang</b>	-	2	3	4	5	1

Abwassermenge: 3.600.000 m<sup>3</sup>, Einwohnerwerte: 61.000 EW

Den Jahreskosten der untersuchten Verfahren ist jeweils ein Rang zugeordnet.

## 5.5 Gegenüberstellung des Flächenverbrauchs

In Tabelle 58 ist der Flächenverbrauch der Varianten zusammengestellt. Der geringste Flächenverbrauch ergibt sich bei Variante 1a mit 1.244 m<sup>2</sup>. Für Variante 1a ist lediglich eine Sandfiltration zu errichten. Der höchste Verbrauch von 2.090 m<sup>2</sup> verursacht Variante 1c aufgrund der benötigten Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration.

**Tabelle 58: Flächenverbrauch der betrachteten Varianten**

		1a) PAK simultan, SF	1b) PAK-KB, NK, SF	1c) PAK-KB, LK, SF	2) GAK-Filtration	3) Ozonreaktor, SF
Flächenverbrauch	[m <sup>2</sup> ]	1244	1589	2090	1520	1556
Rang	-	1	2	3	2	2

## 5.6 Bewertung der Varianten

Zur Bewertung der untersuchten Verfahren werden die Ergebnisse der vorliegenden Machbarkeitsstudie aus den Kap. 5.1 bis 5.5 in der Bewertungsmatrix in Tabelle 59 zusammengeführt.

Gemäß den Kap. 5.1 bis 5.5 umfassen die ausgewählten Bewertungsparameter die Anlagensteuerung, die Eliminationsleistung, den Flächenverbrauch und die Jahreskosten. Die Anlagensteuerung beinhaltet die Unterpunkte Technisierungsgrad, Robustheit, Regelbarkeit/Steuerbarkeit und Prozessstabilität. Die Eliminationsleistung beinhaltet die Unterpunkte Elimination konventioneller Abwasserparameter und Elimination von Mikroschadstoffen.

Den vor genannten Bewertungsparametern und Unterparametern wird eine Gewichtung von min. 5% bis max. 30% zugeordnet, so dass sich in der Summe 100% ergibt. Die höchsten Gewichtungen mit je 30 % werden der Eliminationsleistung und den Jahreskosten zugeordnet.

Für die untersuchten Verfahren werden für jeden Bewertungsparameter und Unterparameter Punkte von 1 bis 5 vergeben. 1 steht für eine niedrige Wertung, 5 steht für eine hohe Wertung. Durch Multiplikation der Gewichtung mit den vergebenen Punkten ergibt sich für jeden Bewertungsparameter und Unterparameter eine Wertung. Die Gesamtbewertungen für die untersuchten Varianten berechnen sich aus den Summen der Wertungen.

**Tabelle 59: Bewertungsmatrix der betrachteten Varianten**

		1a) PAK simultan, SF		1b) PAK-KB, NK, SF		1c) PAK-KB, LK, SF		2) GAK-Filtration		3) Ozonreaktor, SF		
		Gewichtung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung
Anlagensteuerung	Technisierungsgrad	5%	5	0,25	3	0,15	3	0,15	5	0,25	3	0,15
	Robustheit	5%	4	0,20	3	0,15	3	0,15	3	0,15	3	0,15
	Regelbarkeit/Steuerbarkeit	5%	2	0,10	3	0,15	3	0,15	2	0,10	4	0,20
	Prozessstabilität	5%	2	0,10	3	0,15	3	0,15	3	0,15	4	0,20
Eliminationsleistung	Elimination konventioneller Abwasserparameter	10%	3	0,30	3	0,30	3	0,30	4	0,40	2	0,20
	Elimination von Mikroschadstoffen	30%	3	0,90	3	0,90	3	0,90	3	0,90	4	1,20
Flächenverbrauch		10%	4	0,40	3	0,30	2	0,20	3	0,30	3	0,30
Jahreskosten		30%	4	1,20	3	0,90	3	0,90	1	0,30	4	1,20
Gesamtbewertung		100%	3,45		3,00		2,90		2,55		3,60	
Rang			2		3		4		5		1	

1 Punkt: geringe Wertung

5 Punkte: hohe Wertung

Vorzugsvariante ist Variante 3 – Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration mit einer Wertung von 3,60 Punkten.

Dahinter folgt die Variante 1a – PAK simultan in die Belegung mit nachgeschalteter Sandfiltration mit 3,45 Punkten. Die Varianten 1b – PAK in Kontaktbecken mit PAK-Sedimentation in den vorh. Nachklärbecken und nachgeschaltete Sandfiltration und Variante 1c – PAK in Kontaktbecken mit Lamellenklärer und nachgeschalteter Sandfiltration folgen mit einem deutlichen Abstand mit 3,00 bzw. 2,90 Punkten. Variante 2 folgt mit einem wiederum deutlichen Abstand mit 2,55 Punkten.

## 6 Zusammenfassung

Die Kläranlage Brühl leitet mit einer Ausbaugröße von 65.000 EW das geklärte Abwasser in den verrohrten Palmersdorfer Bach ein, der unterhalb der Einleitungsstelle nach rd. 1,9 km bei Wesseling in den Rhein mündet.

Zur Feststellung der eingeleiteten Mikroschadstoffe aus der Kläranlage Brühl in den Palmersdorfer Bach und nachfolgend in den Rhein sowie zur Feststellung geeigneter Verfahren zur Elimination der Mikroschadstoffe in einer neu zu errichtenden 4. Reinigungsstufe wurde die vorliegenden Machbarkeitsstudie erstellt.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde die Belastungssituation der Kläranlage Brühl mit Mikroschadstoffen durch ein Screening und ein weiterführendes Monitoring entsprechend den Vorgaben des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW ermittelt. Aus dem Vergleich der gemessenen Zulaufkonzentrationen mit Messergebnissen anderer Kläranlagen folgt, dass die Stoffe Valsartan, Gabapentin, Diclofenac, Clarithromycin und Amidotrizoesäure in vergleichsweise hoher Konzentration vorliegen. Die Jahreszulauffracht (Zulauf Belebung) der im Screening und Monitoring gemessenen Mikroschadstoffe zur Kläranlage beträgt ca. 450 kg/a, die derzeitige Jahreseinleitungsfracht in den Palmersdorfer Bach (Ablauf Nachklärung) beträgt ca. 200 kg/a. Die Auswertung der Messwerte der Trockenwettertage ergab, dass im Ablauf der Nachklärung der Anteil der Mikroschadstoffe

- Valsartan
- Gabapentin
- Diclofenac
- 1H-Benzotriazol
- Amidotrizoesäure
- $\Sigma$  4,5-Methyl-Benzotriazol

in Summe rd. 74% ausmacht.

Nachfolgende Verfahrensvarianten wurden in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten auf der Kläranlage Brühl untersucht:

### Variante 1 Pulveraktivkohledosierung

- 1a Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration
- 1b Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration
- 1c Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration

### Variante 2 Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern

### Variante 3 Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration

Für die untersuchten Varianten wurden die Dimensionierung der Anlagen durchgeführt sowie der Flächenverbrauch, der Umfang und die Kosten der erforderlichen baulichen Maßnahmen (Ingenieurbauwerke, maschinelle und elektrotechnische Ausrüstung) ermittelt.

Auf Grundlage der Messwerte des durchgeführten Screenings und Monitorings und veröffentlichten Eliminationsraten von bereits ausgeführten Anlagen und Pilotanlagen wurden jeweils die Ablaufkonzentrationen für die Mikroschadstoffe für die untersuchten Varianten auf der Kläranlage Brühl ermittelt.

Die ermittelte Jahresfracht der beim Screening und Monitoring gemessenen Mikroschadstoffe zum Palmersdorfer Bach liegt bei der Variante 3 - Ozon mit Sandfiltration im Ablauf der 4. Reinigungsstufe mit ca. 58 kg/a deutlich niedriger als bei den Varianten 1a, 1b und 1c - PAK-Adsorption mit ca. 85 kg/a und als bei der Variante 2 - GAK-Filtration mit ca. 86 kg/a. Dieser große Unterschied ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass der in großen Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage Brühl anfallende Mikroschadstoff Gabapentin eine sehr schlechte Adsorbierbarkeit an Aktivkohle, jedoch eine gute Oxidierbarkeit mittels Ozon aufweist.

Die Jahreszulauf fracht der Summe der Mikroschadstoffe zur Kläranlage beträgt ca. 450 kg/a und die derzeitige Jahreseinleitungsfracht in den Palmersdorfer Bach ohne die 4. Reinigungsstufe beträgt ca. 200 kg/a. Mit dem Ozonverfahren kann die derzeitige Jahreseinleitungsfracht von ca. 200 kg/a auf ca. 58 kg/a reduziert werden.

Die Jahreskosten wurden gemäß den LAWA-Richtlinien ermittelt. Zusammenfassend ergeben sich nachfolgenden Jahreskosten:

**Tabelle 60: Gegenüberstellung der Jahreskosten**

	Einheit	1a) PAK simultan, SF	1b) PAK-KB, NK, SF	1c) PAK-KB, LK, SF	2) GAK-Filtration	3) Ozonreaktor, SF
<b>Jahreskosten</b>	€/a	590.827	624.070	641.795	852.979	574.722
<b>Jahreskosten / Abwassermenge</b>	€/m³	0,164	0,173	0,178	0,237	0,160
<b>Jahreskosten / (Einwohner und Jahr)</b>	€/(EW x a)	9,69	10,23	10,52	13,98	9,42
<b>Rang</b>	-	2	3	4	5	1

Abwassermenge: 3.600.000 m³, Einwohnerwerte: 61.000 EW

Für die untersuchten Varianten wurde abschließend eine Bewertungsmatrix mit den Bewertungsparametern Anlagensteuerung, Eliminationsleistung, Flächenverbrauch und Jahreskosten erstellt. Die Anlagensteuerung beinhaltet die Unterpunkte Technisierungsgrad, Robustheit, Regelbarkeit/Steuerbarkeit und Prozessstabilität. Die Eliminationsleistung beinhaltet die Unterpunkte Elimination konventioneller Abwasserparameter und Elimination von Mikroschadstoffen. Das Ergebnis der Bewertungsmatrix stellt sich wie folgt dar:

Vorzugsvariante ist Variante 3 – Ozonreaktor mit nachgeschaltetem Sandfilter. Dahinter folgt die Variante 1a – PAK simultan in die Belebung mit nachgeschalteter Sandfiltration. Die Varianten 1b – PAK in Kontaktbecken mit PAK-Sedimentation in den vorh. Nachklärbecken und nachgeschalteter Sandfiltration und Variante 1c – PAK in Kontaktbecken mit Lamellenklärer und nachgeschalteter Sandfiltration folgen mit einem deutlichen Abstand. Variante 2 – GAK-Filtration folgt mit einem wiederum deutlichen Abstand.

## 7 Quellenverzeichnis

### Richtlinien, Gesetze, Verordnungen, Normen:

**Abwasserabgabengesetz** in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Januar 2005 (BGBl. I S. 114), das zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 2. September 2014 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist

**Abwasserverordnung** in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. September 2014 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist

**DIN EN 12903:** Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Pulver-Aktivkohle. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2009

**DIN EN 12915-1:** Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Granulierte Aktivkohle – Teil 1: Frische granulierte Aktivkohle. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2009

**Oberflächengewässerverordnung** vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373)

**Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)/Gefahrstoffe (TRGS) - Ortsfeste Druckanlagen für Gase (TRBS 3146/TRGS 726)** vom 14.04.2014. GMBI. Nr. 28/29 vom 03.06.2014 S. 606

**Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001)** in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die durch Artikel 4 Absatz 21 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist

**Verordnung (EG) Nr. 649/2008 des Rates vom 8. Juli 2008** zur Einführung eines endgültigen Antidumpingzolls auf die Einfuhren von Aktivkohle in Pulverform mit Ursprung in der Volksrepublik China, Amtsblatt der Europäischen Union vom 10.07.2008, Nr. L 181, S. 1

### **Bücher/Berichte/Publicationen:**

- Abegglen, C./** Escher, B./ Hollender, J./ Koepke, S./ Ort, C./ Peter, A./ Siegrist, H./ Gunten, U. von/ Zimmermann, S.: Ozonung von gereinigtem Abwasser - Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf. Dübendorf, 2009
- Abegglen, C./** Siegrist H. 2012: Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Bundesamt für Umwelt. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Umwelt-Wissen Nr. 1214
- Alt, Dipl.-Ing. K./** Mauritz, Dipl.-Ing. A.: Projekt zur Teilstrombehandlung mit Pulveraktivkohle im Klärwerk Mannheim. In: DWA-Tagungsband Aktivkohle in der Abwasserreinigung, Stuttgart, 2010
- Alt, Dipl.-Ing. K./** Mauer, Dr.-Ing. C./ Nahrstedt, Dr.-Ing. A./ Rohn, Dipl.-Ing. A.: Abschlussbericht des Abwasserverbandes „Obere Lutter“ auf Förderung des Forschungsvorhabens: Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk „Obere Lutter“ - Teil 2. Mülheim Ruhr/Düsseldorf/Gütersloh: MKULNV, 2013
- Alt, Dipl.-Ing. K./** Heuner, F./ Barnscheidt, I.: Energetische und wirtschaftliche Betrachtung der Spurenstoffelimination. In: wwt wasserwirtschaft-wassertechnik 2015, Nr. 3, S. 8-15
- Arle, J./** Blondzik, K./ Claussen, U./ Duffek, A./ Grimm, S./ Hilliges, F./ Hoffmann, A./ Leujak, W./ Mohaupt, V./ Naumann, S./ Pirntke, U./ Richter, S./ Schilling, P./ Schroeter-Kermani, C./ Ullrich, A./ Wellnitz, J./ Werner, S./ Wolter, R.: Wasserwirtschaft in Deutschland - Teil 2: Gewässergüte. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2013
- ATV-DVWK-A 198:** Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen“ Regelwerk ATV-DVWK, GFA, Hennef, April 2003
- Bahr, C./** Ernst, M./ Jekel, M./ Heinzmann, B./ Luck, F./ Ried, A.: PILOTOX - Pilotuntersuchungen zur kombinierten oxidativ biologischen Behandlung von Klärwerksabläufen für die Entfernung von organischen Spuren- und Wirkstoffen und zur Desinfektion. Berlin: Schriftenreihe Kompetenzzentrum Wasser Berlin Band 5, 2007
- Barjenbruch, M.:** Verfahren zur Abwasserfiltration – Grundlagen, Auslegung und Betriebserfahrungen. In: Chemie Ingenieur Technik 2007, 79, Nr. 11, S. 1861-1870
- Behrendt, Dr. H./** Bach, Dr. M./ Kunkel, Dr. R./ Opitz, Dipl. Phys. D./ Pagenkopf, Dr. Wolf-G./ Scholz, Dipl. Geogr. G./ Wendland, Dr. F.: Internationale Harmonisierung der Quantifizierung von Nährstoffeinträgen aus diffusen und punktuellen Quellen in die Oberflächengewässer Deutschlands. Berlin: Umweltbundesamt, 2003
- Benstöm, F./** Pinnekamp, J.: Übersicht über die verfahrenstechnischen Möglichkeiten der Anwendung von Aktivkohle auf kommunalen Kläranlagen. In: Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 16, 2012
- Böhler, M.,** Brocker, S., Kobler, S., Le Goaziou, Y., Moser, R., Rettby, R. und Rigault, M.: Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser mittels PAK in einem Actiflo®Carb und durch Ozon auf der ARA Schönau, Cham (GVRZ), Technologieförderungsprojekt des Bundesamtes für Umwelt (Bafu), Bern. Nidau: Alpha Umwelttechnik AG, 2012

- Böhler**, M., Wittmer, A., Heisele, A., Wohlhauser, A., Salhi, L., von Gunten, U., Mc Ardell, C., Longrée, P., Beck, P. und Siegrist, H.: Berichterstattung - Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der Ara Neugut. Bern: Bafu, 2013
- Bornemann**, C./ Alt, K./ Böhm, F./ Hachenberg, M./ Kolisch, G./ Nahrstedt, A./ Taudien, Y.: Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen "Filter AK+", Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), 2015
- Carballa**, M./ Francisco, O./ Lema, J. M.: Removal of cosmetic ingredients and pharmaceuticals in sewage primary treatment. In Water Research 39 (2005), S. 4790–4796
- Cornel**, Prof. Dr.-Ing. P.: Potenzielle Anforderungen an die Abwassereinigung der Zukunft. In: Wie sieht die Abwasserbehandlung der Zukunft aus? – vierte, fünfte, sechste Reinigungsstufe? (Schriftenreihe WAR 190). Darmstadt: Institut IWAR, 2007
- DWA**: Themen – Bedeutung von Transformationsprodukten für den Wasserkreislauf T4/2014. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2014
- DWA**: Themen - Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen T3/2015. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2015
- DWA**: Arbeitsblatt DWA- A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2016
- Fux**, C./ Kienle, C./ Joss, A./ Wittmer, A./ Frei, R.: Ausbau der ARA Basel mit 4. Reinigungsstufe. Pilotstudie: Elimination Mikroverunreinigungen und ökotoxikologische Wirkungen. In: Aqua & Gas, 95(7), 10-17.
- Gantner**, K./ Wärmer, F.: Einsatz der Fuzzy-Filter-Technik zur Spurenstoffentfernung auf Kläranlagen ohne bereits bestehende Filterstufe. In. Korrespondenz Abwasser, Abfall 2014, (61), Nr. 10, Seiten 908-920
- Gawel**, Prof. Dr. rer. pol. E./ Köck, Prof. Dr. iur. W./ Schindler, M.A. H./ Holländer, Prof. Dr.-Ing. R./ Lautenschläger, Dipl.-Ing. S. Schimpke, B.Sc. J./ Seim, B.Sc. S.: Mikroverunreinigungen und Abwasserabgabe. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2015
- Graw**, M.: Ökologische Bewertung von Fließgewässern. Bonn: Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. (VDG), 2003
- Gujer**, Prof. Dr. W.: Siedlungswasserwirtschaft. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- Gunten**, U. von: Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. In: Water Research 2003, Vol. 37, Seiten 1443-1467
- Gunten**, U. von: Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. In: Water Research 2003, Vol. 37, Seiten 1469-1487

- Herbst**, H./ Kaufman, M./ Türk, J./ Launer, M.: Abwasserozonierung Kläranlage Duisburg-Vierlinden – Auslegung – Bau – erste Betriebsergebnisse. In: Schriftenreihe SWW Karlsruhe, Band 141, 2011
- Hoigné**, J./ Bader, H.: Ozonation of water: Selectivity and rate of oxidation of solutes. In: Ozone: Science and engineering 1979, Vol. 1, Seiten 73-85
- Hoigné**, J./ Bader, H.: Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in Water –I. In: Water Research 1983, Vol. 17, Seiten 173-183
- Hosang**, W.: Abwassertechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1998
- Houtte**, E. Van/ Verbauwheide, J.: Torreele's water re-use facility enabled sustainable groundwater management in de Flemish dunes (Belgium). In: Water Practice & Technology, Vol. 3, No 2, 2008
- Ivashechkin**, P.: Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser. Aachen: Publikationsserver der RWTH Aachen University, 2006
- Jekel**, M./ Altmann, J./ Ruhl, A. S./ Sperlich, A./ Schaller, J./ Gnirß, R./ Miehe, U./ Stapf, M./ Remy, C./ Mutz, D.: Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2016
- Kern**, Dr. J.: Phosphor für die Landwirtschaft – Strategien für eine endliche Ressource. Potsdam-Bornim: Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam- Bornim e.V., 2014
- Kienle**, Dr. H. von / Bäder, Dr. E.: Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1980
- KomM-NRW**: Mikroschadstoffentfernung machbar? - Wesentliche Inhalte einer Machbarkeitsstudie für Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. Köln, 2015
- KomM-NRW** – (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination (2. Auflage). Köln, 2016
- Kreuzinger**, N./ Schaar, H./ Knasmüller, S./ Ferk, F./ Misik, M./ Sommer, R./ Schürhagl, R./ Grillitsch, B./ Altmann, D./ Möstl, E./ Bartl, C.: KomOzon - Technische Umsetzung und Implementierung einer Ozonungsstufe für nach dem Stand der Technik gereinigtes kommunales Abwasser - Heranführung an den Stand der Technik – Endbericht. Wien: Lebensministerium, 2011
- Kreuzinger**, N./ Haslinger, J./ Kornfeind, L./ Schaar, H./ Saracevic, E./ Winkelbauer, A.: KOMOZAK-Projekt: Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer mit Ozon sowie Aktivkohle für die Entfernung organischer Spurenstoffe – Schlussbericht. TU Wien, 2015.
- Kümmerer**, Prof. Dr. K./ Schuster, A./ Längin, A./ Happel, Dr. O./ Thoma, A./ Schneider, Dr. K./ Hassauer, Dr. M./ Gartiser, S./ Hafner, Dr. C.: Identifizierung und Bewertung ausgewählter Arzneimittel und ihrer Metaboliten (Ab- und Umbauprodukte) im Wasserkreislauf. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2011
- Lange**, F./ Scheurer, M./ Brauch, H.: Artificial sweeteners—a recently recognized class of emerging environmental contaminants: a review. Analytical and Bioanalytical Chemistry, Volume 403, Issue 9 , pp 2503-2518, 2012a

- Lewandowski**, Dipl.-Ing J./ Leitschuh, Dipl.-Ing S./ Koß, Dr. rer. nat. habil. V.: Schadstoffe im Boden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997
- Margot**, J./ Magnet, A./ Thonney, D./ Chèvre, N./ Alencastro, F. de/ Rossi, L.: Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne). Ed. Ville de Lausanne, 2011
- Margot**, J./ Kienle, C./ Magnet, A./ Weil, M./ Rossi, L./ Alencastro, L.F. de/ Abegglen, C/ Thonney, D./ Chèvre, N./ Schärer, M./ Barry, D. A.: Treatment of micropollutants in municipal wastewater: ozone or powdered activated carbon?. In: Science of the total environment 2013, Vol. 461-462, Seiten:480-498
- Melin**, Prof. Dr. T./ Rautenbach, Prof. Dr. R.: Membranverfahren-Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- Metzger**, Dipl.-Ing. S.: Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser. München: Oldenburger Industrieverlag, 2010
- Metzger**, Dr. S./ Rößler, Dipl.-Ing. A./ Türk, Dr. J./ Antakyali, Dr. D./ Schulz, M.Sc. J./ Wunderlin, Dr.P./ Meier, M.Sc. A.: Status quo der Erweiterung von Kläranlagen um eine Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination. In. Wasserwirtschaft Wassertechnik WWT 2015, (65) Sondernr., S. 14-19
- Mohaupt**, V./ Rechenberg, J./ Richter, S./ Schulz, D./ Wolter., R.: Gewässerschutz mit der Landwirtschaft. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2010
- Nahrstedt**, Dr.-Ing. A./ Alt, Dipl.-Ing. K./ Barnscheidt, Dipl.-Ing. I./ Fritzsche, Dipl.-Ing. J./ Sürder, T./ Burbaum, Dipl.-Ing. H./ Klak, A.: CSB- und Spurenstoffadsorption am Aktivkohlefestbett Abschlussbericht. Mulheim an der Ruhr 2011
- Nahrstedt**, Dr.-Ing. A./ Burbaum, Dipl.-Ing. H./ Mauer, Dr.-Ing. C./ Fritzsche, Dipl.-Ing. J./ Sürder, Dipl.-Ing. T.: Einsatz granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk „Obere Lutter“. In: Korrespondenz Abwasser 2014, 61. Jg., Nr 5, S. 426
- Nahrstedt**, Dr.-Ing. A./ Merkel, Dr.-Ing. W./ Schlösser, Dipl.-Ing. F./ Alt, Dipl.-Ing. K.: Großtechnische Versuche zur Elimination von Spurenstoffen auf der Kläranlage Harsewinkel. Harsewinkel: Stadt Harsewinkel, 2015
- Nahrstedt**, Dr.-Ing. A./ Alt, Dipl.-Ing. K./ Wu, Dr. X./ Schlösser, Dipl.-Ing. F./ Merten, Dipl.-Ing. M./ Müller, Dipl.-Ing. M./ Giskow, Dr.-Ing. R./ Sürder, T.: Mikroschadstoffelimination mittels granulierter Aktivkohle im Ablauf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen - Abschlussbericht. Gütersloh, 2016
- Pinnekamp**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. J./ Friedrich, Dr. rer. nat. H.: Membrantechnik für die Abwasserreinigung. Aachen: FiW Verlag, 2006
- Pinnekamp**, Prof. Dr.-Ing. J./ Keyzers, Dipl.-Ing. C./ Benstöm, Dipl.-Ing. F./ Malms, Dipl.-Ing. S./ Montag, Dr.-Ing. D.: Möglichkeiten zur Erweiterung bestehender Kläranlagen zur Spurenstoffelimination. In: Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 15, Aachen 2011

- Pinnekamp**, Univ.-Prof. Dr.-Ing. J./ Bornemann, Dipl.-Biol. C./ Hachenberg, M./ Jagemann, P./ Lyko, S./ Montag, D./ Benstöm, F./ Platz, C./ Wett, M./ Biebersdorf, N./ Kaub, M./ Kolisch, G./ Osthoff, T./ Taudien, Y./ Rolfs, T./ Stepkes H./ Yüce, S./ Herr, J.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle (MIKROFlock), 2012
- Pöpel**, H. J./ Schmidt-Bregas, M./ Wagner, M.: Aktivkohleanwendung in der Abwasserreinigung, Teil 1. In: Korrespondenz Abwasser 1988, 35. Jg., Nr. 3, S. 247-255
- Pöpel**, H. J./ Schmidt-Bregas, M./ Wagner, M.: Aktivkohleanwendung in der Abwasserreinigung, Teil 2. In: Korrespondenz Abwasser 1988, 35. Jg., Nr. 4, S. 377-379
- Rogers**, H. R.: Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges. In: The Science of the Total Environment, Volume 185, Number 1, 1996, S. 3-26
- Rößler**, A./ Metzger, S.: Spurenstoffvorkommen und –entnahmen in Kläranlagen mit Aktivkohleanwendung in Baden-Württemberg. In Korrespondenz Abwasser, Abfall 2014 (61) Nr. 5, S. 427 - 435
- Rölle**, R./ Kuch, B.: Die Aktivkohlebehandlungsstufe auf der Kläranlage Kressbronn. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall 2011, (58) Nr. 11, S. 1038-1049
- Röske**, Prof. Dr. I./ Uhlmann, Prof. Dr. D.: Biologie der Wasser-und Abwasserbehandlung. Stuttgart: Eugen Ulmer, 2005
- Schwarzenbach**, R. P./ Gschwend, P. M./ Imboden, D. M.: Environmental Organic Chemistry. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003
- Schwentner**, G.: Kosten und Wirtschaftlichkeit der Entfernung von Spurenstoffen mittels Aktivkohleadsorption – Erfahrungen aus der Praxis. In Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 208, Stuttgart 2011
- Schwoerbel**, J./ Brendelberger, H.: Einführung in die Limnologie. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013
- Sneyder**, S. A./ Adham, S./ Redding, A. M./annon, F. S./ DeCarolis, J./ Oppenheimer, J./ Wert, E. C./ Yoon, Y.: Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. In Desalination, Volume 202, Nr. 1–3, S. 156–181, 2007
- Sontheimer**, Prof. Dr. rer. nat. H./ Frick, Dr.-Ing. B. R./ Fettig, Dipl.-Ing./ Hörner, Dipl.-Ing.G./ Hubele, Dipl.-Ing. C./ Zimmer, Dipl.-Ing. G.: Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. Karlsruhe: Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, 1985
- Steger-Hartmann**, T./ Länge, R./ Schweinfurth, H.: Environmental Risk Assessment for the Widely Used Iodinated X-Ray Contrast Agent Iopromide (Ultravist). In: Ecotoxicology and Environmental Safety 42, 274-281, 1999
- Vogel**, H.-J./ Baur, S./ Tribskorn, R./ Rößler, A./ Metzger,S.: Die Kläranlage Albstadt-Ebingen: 20 Jahre Pulveraktivkohleeinsatz im Vollstrom. In: Korrespondenz Abwasser 2014, 61. Jg., Nr. 10, S. 902-907

**Wärmer**, Dipl.-Ing. F./ Finkemeyer, A./ Austermann-Haun, Prof. Dr.-Ing. U./ Meier, J. F./ Brandt, B.-J./ Gantner, Dr.-Ing. K./ Althaus, Dipl.-Wirt.-Ing. P.: Elimination von Mikroschadstoffen durch Pulver-Aktivkohle und anschließender Abtrennung der Feststoffe unter Einsatz des Fuzzy-Filters auf der Kläranlage Barntrup - Testphase 2014 "Betriebliche Aspekte" – Machbarkeitsstudie. Detmold: Bezirksregierung Detmold, 2015

**Zwickenpflug**, B./ Böhler, M./ Sterkele, B./ Joss, A./ Siegrist, H./ Traber, J./ Gujer, W./ Behl, M./ Dorusch, F./ Hollender, J./ Ternes, T./ Fink, G.: Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Abschlussbericht. Dübendorf: Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), 2010

**Zwiener**, C.: Verhalten von Arzneimittelrückständen bei der Trinkwasseraufbereitung. In: Heil-Lasten – Arzneimittelrückstände in Gewässern. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, S. 207-223

### Internetquellen:

- Böhler, M./ Joss, A./ Miladinovic, N./ Siegrist, H./ Sterkele, B.:** Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon - Zwischenbericht. Dübendorf: [https://www.micropoll.ch/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Dokumente/01\\_Berichte/02\\_Technische\\_Verfahren/03\\_Aktivkohle/2009\\_zwischenbericht\\_KlotenOpfikon.pdf](https://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/01_Berichte/02_Technische_Verfahren/03_Aktivkohle/2009_zwischenbericht_KlotenOpfikon.pdf), 2009, Stand: 12.10.2016
- Böhler, M./ Zwickenpflug, B./ Grassi, M./ Behl, M./ Neuenschwander, S./ Siegrist, H.:** Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Sandfiltration Kläranlage Kloten/Opfikon – Abschlussbericht. Dübendorf: [http://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/abwasser/Aktivkohle/abschlussbericht\\_aktivkohle.pdf](http://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/abwasser/Aktivkohle/abschlussbericht_aktivkohle.pdf), 2011, Stand: 12.10.2016
- Eilers, Dipl.-Ing. L.:** Verfahrenskombination von Nanofiltration und Adsorption an Pulverkohle zur kontinuierlichen Abwasserreinigung. Aachen: [http://publications.rwth-aachen.de/record/56382/files/01\\_027.pdf](http://publications.rwth-aachen.de/record/56382/files/01_027.pdf), 2000, Stand: 13.10.2016
- Frank, K./ Stoll, Prof. Dr. J.-M./ Arx, D. von:** Elimination von Mikroverunreinigungen in der ARA mit Pulveraktivkohle im Belebtschlammbecken. Rapperswil: [https://www.micropoll.ch/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Dokumente/01\\_Berichte/02\\_Technische\\_Verfahren/03\\_Aktivkohle/150218\\_Abschlussbericht\\_Mikro\\_Pak.pdf](https://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/01_Berichte/02_Technische_Verfahren/03_Aktivkohle/150218_Abschlussbericht_Mikro_Pak.pdf), 2015, Stand: 13.10.2016
- Grünebaum, Dr. T./ Börgers, A./ Fahlenkamp, H./ Gehring, T./ Haun, E./ Herbst, H./ Herr, J.:** Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich Abwasser zum Themenschwerpunkt Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren Vergabenummer 08-058/1 - Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen - Schlussbericht Phase 1. [http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Arzneimittelr\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Arzneimittelr_Abschlussbericht.pdf), 2011; Stand: 13.10.2016
- Grünebaum, Dr. T./ Stenzel, N./ Lutze, H./ Haun, E./ Wolter, Dr. S./ Lyko, Dr. S./ Keyzers, C./ Thöle, Dr. D.:** Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich Abwasser zum Themenschwerpunkt Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren Vergabenummer 08-058/1 - Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen - Abschlussbericht zur Phase 2. [https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx\\_mmkresearchprojects/Phase2\\_Abschlussbericht\\_2014.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/Phase2_Abschlussbericht_2014.pdf), 2013, Stand: 13.10.2016
- Gredigk-Hoffmann, Dipl.-Ing. S./ Genzowsky, Dipl.-Ing. K./ Miethig, M. Eng. S./ Mousel, Dipl.-Ing. D./ Krebber, Dr.-Ing. K./ Palmowski, Dr.-Ing. L.:** Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase II: [https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx\\_mmkresearchprojects/Envelos\\_II\\_Langbericht\\_FINAL.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/Envelos_II_Langbericht_FINAL.pdf), 2015, Stand: 20.09.2016
- IUTA:** E-Mail-Auskunft zur Elimination vereinzelter Mikroschadstoffe, 27.10.2016
- KomM-NRW:** Ozonung auf der Kläranlage Bad Sassendorf. [http://www.masterplan-wasser.nrw.de/fileadmin/user\\_upload/Tatenbank/Projektsteckbriefe\\_PDF/20131113\\_steckbrief\\_bad\\_sassendorf.pdf](http://www.masterplan-wasser.nrw.de/fileadmin/user_upload/Tatenbank/Projektsteckbriefe_PDF/20131113_steckbrief_bad_sassendorf.pdf), 2013a, Stand: 13.10.2016

- KomM-NRW:** Ozonung und Aktivkohleadsorption in der Kläranlage Schwerte.  
[http://www.masterplan-wasser.nrw.de/fileadmin/user\\_upload/Tatenbank/Projeksteckbriefe\\_PDF/20131113\\_steckbrief\\_schwerte.pdf](http://www.masterplan-wasser.nrw.de/fileadmin/user_upload/Tatenbank/Projeksteckbriefe_PDF/20131113_steckbrief_schwerte.pdf), 2013b, Stand: 13.10.2016
- KomS-BW** (Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg): Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage Kressbronn-Langenargen. [http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/28809%20Steckbrief\\_RZ\\_Kressbronn%282%29.pdf](http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/28809%20Steckbrief_RZ_Kressbronn%282%29.pdf), 2014, Stand: 13.10.2016
- KomS-BW:** Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage Stockacher Aach. [http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/28809%20Steckbrief\\_RZ\\_Stockacher%20Aach%283%29.pdf](http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/28809%20Steckbrief_RZ_Stockacher%20Aach%283%29.pdf), 2014a, Stand: 13.10.2016
- Koms-BW:** Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage Lahr. <http://www.koms-bw.de/klaeranlagen/steckbriefe/>, 2015a, Stand: 13.10.2016
- Koms-BW:** Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage Kläranlage Steinhäule. [http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/Steckbrief\\_Steinhaeule.pdf](http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/Steckbrief_Steinhaeule.pdf), 2015b, Stand: 13.10.2016
- Koms-BW:** Spurenstoffentnahme auf der Kläranlage Laichingen. [http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/files/Steckbrief\\_Laichingen.pdf](http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/files/Steckbrief_Laichingen.pdf), 2016, Stand: 13.10.2016
- Kuhlmann, B./ Skark, C./ Zullei-Seibert, N.:** Definition und Bewertung von trinkwasserrelevanten Chemikalien im Rahmen der REACH-Verordnung und Empfehlungen zum Screening nach potentiell kritischen Substanzen. Umweltbundesamtes, Umweltbundesamtes [http://www.reach-info.de/dokumente/Trinkwasserrelevanz-FKZ\\_363\\_01\\_241-Langfassung.pdf](http://www.reach-info.de/dokumente/Trinkwasserrelevanz-FKZ_363_01_241-Langfassung.pdf), 2010, Stand: 07.12.2015
- Lange, Dipl.-Geogr. B./ Nienkemper, Dipl.-Geogr. P./ Nienhaus, Dipl.-Geogr. I.:** Umsetzungsfahplan Palmersdorfer Bach Regionale Kooperation KOE49. [http://www.rheingraben-nord.nrw.de/img\\_auth.php/c/cf/RHE\\_1400\\_UFP\\_2012\\_KOE\\_49\\_PB\\_Bericht.pdf](http://www.rheingraben-nord.nrw.de/img_auth.php/c/cf/RHE_1400_UFP_2012_KOE_49_PB_Bericht.pdf), 2012, Stand 12.10.2016
- Löwenberg, Dipl. Wirt.-Ing. J./ Zenker, Dr. A./ Wintgens, Prof. Dr.-Ing. T.:** Optimierte Verfahrenskombination von Pulverkohle und Membranfiltration zur Entfernung von Mikroverunreinigungen. [https://www.micropoll.ch/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Dokumente/01Berichte/02\\_Technische\\_Verfahren/03\\_Aktivkohle/2013\\_AbschlussberichtAquapure.pdf](https://www.micropoll.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Dokumente/01Berichte/02_Technische_Verfahren/03_Aktivkohle/2013_AbschlussberichtAquapure.pdf), 2013, Stand: 13.10.2016
- Maus, Dipl.-Ing. (FH) C./ Ante, Dipl.-Ing. (FH) S.:** Machbarkeitsstudie zur Mikroschadstoffelimination auf der Kläranlage Münster-Geist. [https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx\\_mmkresearchprojects/160314\\_Studie\\_MS\\_Geist.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/160314_Studie_MS_Geist.pdf), 2016. Stand: 04.09.2016
- Metzger, S./ Kapp, H.:** Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen. Vortrag bei der VSA-Fachtagung am 28. Oktober 2008 in Regensburg/Zürich. VSA : [https://www.vsa.ch/index.php?id=90&type=0&jumpurl=fileadmin%2Fuser\\_upload%2FRedaktion%2FVerbandsberichte%2F2008\\_577-588%2F586\\_05\\_Metzger.pdf&juSecure=1&mimeType=application%2Fpdf&locationData=90%3Att\\_content%3A261&juHash=63ba2a329f9ff34a627f7eedcd6083666ff7905c](https://www.vsa.ch/index.php?id=90&type=0&jumpurl=fileadmin%2Fuser_upload%2FRedaktion%2FVerbandsberichte%2F2008_577-588%2F586_05_Metzger.pdf&juSecure=1&mimeType=application%2Fpdf&locationData=90%3Att_content%3A261&juHash=63ba2a329f9ff34a627f7eedcd6083666ff7905c), 2008. Stand : 29.11.2015

- Metzger**, Dr.-Ing. S./ Rößler, Dipl.-Ing. (FH) A./ Kapp, Prof. Dr.-Ing. H.: Erweiterung des Klärwerks Mannheim um eine Adsorptionsstufe zur Verbesserung der Abwasserreinigung – Spurenstoffbericht. Hochschule Biberach: [http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/Adsorptionsstufe\\_Spurenstoffbericht.pdf](http://www.koms-bw.de/pulsepro/data/img/uploads/Adsorptionsstufe_Spurenstoffbericht.pdf), 2012; Stand: 28.11.2015
- Meier**, Dipl.-Ing. J. F./ Austermann-Haun, Prof. Dr.-Ing. U./ Kuhlmann, Dipl.-Ing. S./ Alt, Dipl.-Ing. K.: Pilotprojekt zur Mikroschadstoffelimination mittels Ozonung auf der ZKA Detmold. [https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx\\_mmkresearchprojects/2014\\_12\\_03\\_Bericht\\_KA\\_Detmold-Ozon-FINAL.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/2014_12_03_Bericht_KA_Detmold-Ozon-FINAL.pdf) , 2014, Stand: 13.10.2016
- MKULNV NRW** - Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Düsseldorf: Bewirtschaftungsplan 2016-2021 für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas. [http://www.flussgebiete.nrw.de/img\\_auth.php/1/14/BWP-NRW\\_2016-2021\\_final.pdf](http://www.flussgebiete.nrw.de/img_auth.php/1/14/BWP-NRW_2016-2021_final.pdf), 2015, Stand: 24.01.2017
- MKULNV NRW** - Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Düsseldorf: Steckbriefe der Planungseinheiten in den nordrhein-westfälischen Anteilen von Rhein, Weser, Ems und Maas Bewirtschaftungsplan 2016-2021. [http://www.flussgebiete.nrw.de/img\\_auth.php/a/a5/PE-Stb\\_2016-2021\\_RheingrabenNord\\_final.pdf](http://www.flussgebiete.nrw.de/img_auth.php/a/a5/PE-Stb_2016-2021_RheingrabenNord_final.pdf). 2015a, Stand: 17.02.2017
- Ökozentrum** - Schweizerisches Zentrum für Angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL: Qualitätskriterienvorschläge Oekotoxzentrum. <http://www.oekotoxzentrum.ch/expertenservice/qualitaetskriterien/qualitaetskriterienvorschlaege-oekotoxzentrum>, 2016, Stand: 23.12.2016
- Rippen**, Dr. G.: Umweltchemikalien online. Landsberg am Lech: ecomed-Storck, 2015
- Stadtwerke Brühl**: BrühlWasser-Tarif, <http://www.stadtwerke-bruehl.de/energie/bruehlwasser/bruehlwasser-tarif/>, Stand: 13.10.2016
- Universität der Bundeswehr München**: Projekt "Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen" (Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe). München: [https://www.unibw.de/ifw/swa/forschung/aktuelle-forschungsvorhaben-1/pilotprojekt-4.-reinigungsstufe/at\\_download/file](https://www.unibw.de/ifw/swa/forschung/aktuelle-forschungsvorhaben-1/pilotprojekt-4.-reinigungsstufe/at_download/file), 2014, Stand: 13.10.2016
- Varnhorn**, J.: Machbarkeitsstudie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Mettingen. [https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx\\_mmkresearchprojects/2015-12-14\\_Studie\\_.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/2015-12-14_Studie_.pdf), 2015, Stand: 20.09.2016

# **Kläranlage der Stadt Brühl**

**Machbarkeitsstudie zur Elimination von  
Mikroschadstoffen  
auf der Kläranlage Brühl**

## **Anlage A**

**Einflussfaktoren organischer Substanzen auf die  
Aktivkohleadsorption [Pöpel et al. 1988]**

Einflussfaktor	Wirkungsweise
Molekularstruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Substanzen gleicher chemischer Natur werden bei geringer Verzweigung besser adsorbiert.</li> <li>– Aromatische (spez. zyklische Verbindungen) organische Verbindungen werden wesentlich besser adsorbiert als aliphatische (azyklische Verbindungen).</li> <li>– Art und Lage der funktionellen Gruppen; häufig hat ein Molekül sowohl unpolare als auch polare funktionelle Gruppen, so dass es sich an der AK-Oberfläche so orientiert, dass die unpolaren (hydrophoben, wasserabstoßenden) Gruppen zur AK, die polaren (hydrophilen, wasseranziehenden) Gruppen zur Lösung hin orientiert sind.</li> </ul>
Molekulargewicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mit abnehmendem Molekulargewicht steigt im Allgemeinen die Adsorptionsfähigkeit, da große Moleküle nicht in die Adsorptionsporen (Mikroporen) passen.</li> <li>– Bei sehr geringen Molekulargewichten bzw. –größen steigt allerdings auch die Löslichkeit (Hydrophilität). Dies beeinflusst die Adsorptionsmöglichkeit wiederum negativ.</li> </ul>
Löslichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mit abnehmender Löslichkeit steigt die Adsorptionsfähigkeit</li> </ul>
Polarität	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Polare Moleküle sind besser wasserlöslich als unpolare und damit schlechter adsorbierbar. Die meisten AK haben unpolare Oberflächen, wodurch die ebenfalls wenig oder unpolaren organischen Stoffe gut aus dem Wasser entfernt werden können.</li> </ul>
Ionisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Stark ionisierte Substanzen sind schlecht adsorbierbar, d. h. die Adsorptionsfähigkeit nimmt mit abnehmendem Dissoziationsgrad zu.</li> </ul>
pH-Wert	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bei niedrigem pH-Wert können bevorzugt Säuren (z.B. organische Säuren, Phenol) adsorbiert werden.</li> <li>– Bei hohem pH-Wert können bevorzugt Basen (z.B. Amine) adsorbiert werden.</li> </ul>
Temperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mit abnehmender Temperatur erhöht sich die Adsorptionskapazität.</li> <li>– Mit steigender Temperatur erhöht sich die Adsorptionsgeschwindigkeit</li> </ul>

# **Kläranlage der Stadt Brühl**

**Machbarkeitsstudie zur Elimination von  
Mikroschadstoffen  
auf der Kläranlage Brühl**

## **Anlage B**

**Kostenschätzung Variante 1a  
Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung  
und Sandfiltration**

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerk GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechn. Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>							
1.1	Baustelleneinrichtung				180.000,00	5.000,00	3.000,00	188.000,00
	BE Bauwerksarbeiten (ca. 10% der IB)	1	psch.	160.000,00	160.000,00			
	Baufeldfreimachung	1	psch.	20.000,00	20.000,00			
	BE Maschinelle Ausrüstung (ca. 3% der MA)	1	psch.	5.000,00		5.000,00		
	BE Elektrotechnische Ausrüstung (ca. 3% der EA)	1	psch.	3.000,00			3.000,00	
1.2	Dynasandfilter				1.175.250,00	117.500,00	58.750,00	1.351.500,00
	Erdaushub und Abfuhr	2500	m³	25,00	62.500,00			
	Baugrubenverbau	700	m²	180,00	126.000,00			
	Füllkies	800	m³	35,00	28.000,00			
	Dynasandfilter in Betonbauweise	30	St	27.000,00	810.000,00			
	Erstbefüllung mit Quarzsand	560	t	150,00	84.000,00			
	Stahlbeton Zu- und Ablaufrinnen	130	m³	325,00	42.250,00			
	Schalung Zu- und Ablaufrinne	250	m²	90,00	22.500,00			
	Kompressoranlage einschl. Verrohrung	1	St	95.000,00		95.000,00		
	Zulaufschieber, elektrisch	3	St	7.500,00		22.500,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	58.750,00			58.750,00	
1.3	Vorschacht Pumpwerk				81.750,00	0,00	0,00	81.750,00
	Erdaushub und Abfuhr	300	m³	25,00	7.500,00			
	Baugrubenverbau	175	m²	180,00	31.500,00			
	Füllkies	150	m³	35,00	5.250,00			
	Stahlbeton	60	m³	325,00	19.500,00			
	Schalung	120	m²	90,00	10.800,00			
	Schachtausrüstung	1	pschl.	7.200,00	7.200,00			
1.4	Kanalbau				61.200,00	0,00	0,00	61.200,00
	Erdaushub und Abfuhr	300	m³	25,00	7.500,00			
	Baugrubenverbau	300	m²	55,00	16.500,00			
	Füllkies	270	m³	35,00	9.450,00			
	Rohrleitung DN 600 PEHD	17	m	750,00	12.750,00			
	Rohrleitung DN 700 PEHD	15	m	1.000,00	15.000,00			
1.5	PAK-Silo und PAK-Suspensionsaufbereitung				100.830,00	75.000,00	37.500,00	213.330,00
	Erdaushub und Abfuhr	35	m³	25,00	875,00			
	Füllkies	13	m³	35,00	455,00			
	Stahlbeton	22	m³	325,00	7.150,00			
	Schalung	15	m²	90,00	1.350,00			
	PAK-Silo	1	St	75.000,00	75.000,00			
	PAK-Erstbefüllung in die vorh. Belebungsbecken	8	t	2.000,00	16.000,00			
	PAK-Suspensionsaufbereitung	1	pschl.	75.000,00		75.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	37.500,00			37.500,00	

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerk GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechn. Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
1.6	Betriebsgebäude Sandfiltration				39.050,00	2.500,00	2.500,00	44.050,00
	Erdaushub und Abfuhr	25	m³	25,00	625,00			
	Füllkies	10	m³	35,00	350,00			
	Stahlbeton	15	m³	325,00	4.875,00			
	Schalung	10	m²	90,00	900,00			
	Mauerwerk	60	m²	140,00	8.400,00			
	Stahldoppeltür	1	St	2.500,00	2.500,00			
	Fenster	2	St	750,00	1.500,00			
	Dach einschl. Dämmung	50	m²	350,00	17.500,00			
	Deckenunterschälung	30	m²	80,00	2.400,00			
	Wasserversorgung, Spülbecken	1	pschl.	2.500,00		2.500,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung	1	pschl.	2.500,00			2.500,00	
1.7	Betriebsgebäude PAK-Dosierung				25.745,00	2.500,00	2.500,00	30.745,00
	Erdaushub und Abfuhr	15	m³	25,00	375,00			
	Füllkies	10	m³	35,00	350,00			
	Stahlbeton	8	m³	325,00	2.600,00			
	Schalung	8	m²	90,00	720,00			
	Mauerwerk	50	m²	140,00	7.000,00			
	Stahltür	1	St	1.500,00	1.500,00			
	Fenster	2	St	750,00	1.500,00			
	Dach einschl. Dämmung	30	m²	350,00	10.500,00			
	Deckenunterschälung	15	m²	80,00	1.200,00			
	Wasserversorgung, Spülbecken	1	pschl.	2.500,00		2.500,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung	1	pschl.	2.500,00			2.500,00	
1.8	Straßen- und Wegebau				118.800,00	0,00	0,00	118.800,00
	Asphaltflächen	620	m²	120,00	74.400,00			
	Pflasterflächen	370	m²	120,00	44.400,00			
	Baukosten, gesamt, netto				1.782.625,00	202.500,00	104.250,00	2.089.375,00
	Investitionskosten					netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
	Ingenieurbauwerke					1.782.625,00	338.698,75	2.121.323,75
	maschinelle Ausrüstung					202.500,00	38.475,00	240.975,00
	elektrotechnische Ausrüstung					104.250,00	19.807,50	124.057,50
	Baukosten, gesamt					2.089.375,00	396.981,25	2.486.356,25
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)					417.875,00	79.396,25	497.271,25
	<b>Investitionskosten</b>					<b>2.507.250,00</b>	<b>476.377,50</b>	<b>2.983.627,50</b>

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration					
<b>2 Betriebskosten</b>					
2.3 Energiekosten					
2.1.1 Pumpwerk zum Heben des Abwassers					
	Jahresmenge		3.600.000	m <sup>3</sup>	
	mittlere Fördermenge	Q	114	l / s	
	Förderhöhe	H	4,00	m	
	Wirkungsgrad	$\eta$	0,65		
	Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	6,89	kW	
	Jahresenergiebedarf		60.369,23	kWh	
	Strompreis		0,27	€ / kWh	
	Energiekosten		16.299,69	€ / a	16.299,69
2.1.2 PAK-Treibwasserpumpe					
	mittlere Fördermenge	Q	3	l / s	
	Förderhöhe	H	55,00	m	
	Wirkungsgrad	$\eta$	0,80		
	Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	2,02	kW	
	Jahresenergiebedarf		17.724,22	kWh	
	Strompreis		0,27	€ / kWh	
	Energiekosten		4.785,54	€ / a	4.785,54
2.1.3 Kammerfilterpresse					
	PAK-Trockensubstanz		57	t	
	PAK-Konzentration im ÜSS		8	kg / m <sup>3</sup>	
	PAK-ÜSS-Schlamm		7.125	m <sup>3</sup>	
	spez. Energiebedarf		3	kWh / m <sup>3</sup>	
	Jahresenergiebedarf		21.375	kWh	
	Strompreis		0,27	€ / kWh	
	Energiekosten		5.771,25	€ / a	5.771,25
2.1.4 Sandfiltration					
	Jahresmenge		3.600.000	m <sup>3</sup>	
	spez. Energiebedarf		10	Wh / m <sup>3</sup>	
	Jahresenergiebedarf		36.000	kWh	
	Strompreis		0,27	€ / kWh	
	Energiekosten		9.720,00	€ / a	9.720,00
2.1.5 Kleinverbraucher, pauschal					
	Jahresenergiebedarf		50.000	kWh	
	Strompreis		0,27	€ / kWh	
	Energiekosten		13.500,00	€ / a	13.500,00
2.1 Energiekosten, netto					50.076,48
2.2 Personalkosten					
	Mitarbeiter	25%	von	40.000,00	10.000,00
2.2 Personalkosten					10.000,00
2.3 Wartungs- und Instandhaltungskosten					
	Ingenieurbauwerke, anteilig der Baukosten	0,5%	von	1.782.625,00	8.913,13
	maschinelle Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von	202.500,00	4.050,00
	elektrotechnische Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von	104.250,00	2.085,00
2.3 Wartungs- und Instandhaltungskosten, netto					15.048,13

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration					
2.4 PAK					
Abwassermenge		3.600.000	m <sup>3</sup>		
spez. PAK-Verbrauch		10	kg / m <sup>3</sup>		
Jahresmenge		57	t		
spez. Kosten		2.000,00	€ / t		
Jahreskosten		114.000,00	€ / a	114.000,00	
2.4 PAK, netto				114.000,00	
2.5 FHM					
		1,00	t		
spez. Kosten		3.500,00	€ / t		
Jahreskosten		3.500,00	€ / a	3.500,00	
2.5 FHM, netto				3.500,00	
2.6 Schlammensorgung					
Klärschlammensorgung					
Anteil aus Belebtschlamm		5.000	t / a		
spez. Zulage-Entsorgungskosten		35	€ / t		
Jahreskosten		175.000,00	€ / a	175.000,00	
Anteil aus PAK-Schlamm		160	t / a		
spez. Entsorgungskosten		90	€ / t		
Jahreskosten		14.400,00	€ / a	14.400,00	
2.6 Schlammensorgung, netto				189.400,00	
<b>2 Betriebskosten</b>					
			netto [€/a]	MwSt [€/a]	brutto [€/a]
2.1	Energiekosten		50.076,48	9.514,53	59.591,01
2.2	Personalkosten		10.000,00	0,00	10.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten		15.048,13	2.859,14	17.907,27
2.4	PAK		114.000,00	21.660,00	135.660,00
2.5	FHM		3.500,00	665,00	4.165,00
2.6	Schlammensorgung		189.400,00	35.986,00	225.386,00
<b>2 Betriebskosten</b>			<b>382.024,61</b>		<b>452.709,28</b>
<b>3 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt:</b>					
<b>Jahr 2016</b>					
Bezugsjahr der Kosten	K		2016		
Bezugszeitpunkt	X		2016	Berechnungen	
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a		X-K =	0
Zinsen	i	%	3,00		
Bezugszeitraum	b	a	40	LAWA - Faktoren	
Kapitalwiedergewinnungsfaktor				$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1) =$	0,04326
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40	keine Reinvestition	
AFA Maschinenteknik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n =$	0,58203
AFA Elektrotechnik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n =$	0,55368
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr					
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Energie	r	%	3,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung PAK	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung O2	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Maschinenteknik	r	%	0,25	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	1,00000

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration			
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>m</sup>	Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
3.1 Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	2.121.323,75	1,00000	2.121.323,75
maschinelle Ausrüstung	240.975,00	1,00000	240.975,00
elektrotechnische Ausrüstung	124.057,50	1,00000	124.057,50
Baukosten, gesamt	2.486.356,25		2.486.356,25
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	497.271,25	1,00000	497.271,25
3.1 Investitionskosten	2.983.627,50		2.983.627,50
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>m</sup> =	Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
3.2 Betriebskosten			
Energiekosten	59.591,01	1,00000	59.591,01
Personalkosten	10.000,00	1,00000	10.000,00
Wartungs- und Instandhaltungskosten	17.907,27	1,00000	17.907,27
PAK	135.660,00	1,00000	135.660,00
FHM	4.165,00	1,00000	4.165,00
Schlammentsorgung	225.386,00	1,00000	225.386,00
3.2 Betriebskosten	452.709,28		452.709,28
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>n</sup> / (1 + i) <sup>n</sup>	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
3.3 Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	2.121.323,75	0	0,00
maschinelle Ausrüstung	240.975,00	0,58203	140.253,96
elektrotechnische Ausrüstung	124.057,50	0,55368	68.687,63
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	497.271,25	0	0,00
3.3 Reinvestitionskosten	2.983.627,50		208.941,59
	In- und Reinvestitionen Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren i*(1+i) <sup>b</sup> /((1+i) <sup>b</sup> -1)	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
3.4 Kapitalkosten			
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	2.121.323,75	0,04326	91.773,51
maschinelle Ausrüstung	240.975,00	0,04326	10.425,15
elektrotechnische Ausrüstung	124.057,50	0,04326	5.367,02
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	497.271,25	0,04326	21.513,14
Investitionskosten	2.983.627,50	0,04326	129.078,82
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	140.253,96	0,04326	6.067,72
elektrotechnische Ausrüstung	68.687,63	0,04326	2.971,59
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Reinvestitionskosten	208.941,59	0,04326	9.039,31
3.4 Kapitalkosten			138.118,13

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration				Bezugszeitpunkt Jahr 2016		
3 Jahreskosten				brutto		
Betriebskosten				452.709,28 €/a		
Kapitalkosten				138.118,13 €/a		
<b>3 Jahreskosten</b>				<b>590.827,41 €/a</b>		
3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser	590.827,41 €/a /	3.600.000 m³/a =		0,164 €/m³		
3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser	590.827,41 €/a /	2.500.000 m³/a =		0,236 €/m³		
3 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	590.827,41 €/a /	61.000 EW =		9,69 €/EW		
<b>4 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt:</b>				<b>Jahr 2013</b>		
Bezugsjahr der Kosten	K	2016				
Bezugszeitpunkt	X	2013		Berechnungen		
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a	X-K =	-3		
Zinsen	i	%	3,00			
Bezugszeitraum	b	a	40	LAWA - Faktoren		
Kapitalwiedergewinnungsfaktor				$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	0,04326	
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40	keine Reinvestition		
AFA Maschinentechnik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n$	0,58203	
AFA Elektrotechnik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n$	0,55368	
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr						
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	0,98515	
Preissteigerung Energie	r	%	3,00	$(1+r)^m =$	0,91514	
Preissteigerung PAK	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	0,97059	
Preissteigerung O2	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	0,97059	
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	0,98515	
Preissteigerung Maschinentechnik	r	%	0,25	$(1+r)^m =$	0,99254	
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00	$(1+r)^m =$	1,00000	
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	0,97059	
				Bezugsjahr der Kosten	LAWA- Faktoren	Bezugszeitpunkt
				Jahr 2016		Jahr 2013
4.1 Investitionskosten				brutto	$(1+r)^m$	brutto
Ingenieurbauwerke				2.121.323,75	0,98515	2.089.819,46
maschinelle Ausrüstung				240.975,00	0,99254	239.176,69
elektrotechnische Ausrüstung				124.057,50	1,00000	124.057,50
Baukosten, gesamt				2.486.356,25		2.453.053,65
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)				497.271,25	0,98515	489.886,15
<b>4.1 Investitionskosten</b>				<b>2.983.627,50</b>		<b>2.942.939,80</b>
				Bezugsjahr der Kosten	LAWA- Faktoren	Bezugszeitpunkt
				Jahr 2016		Jahr 2013
4.2 Betriebskosten				brutto	$(1+r)^m =$	brutto
Energiekosten				59.591,01	0,91514	54.534,22
Personalkosten				10.000,00	0,98515	9.851,49
Wartungs- und Instandhaltungskosten				17.907,27	0,98515	17.641,32
PAK				135.660,00	0,97059	131.670,26
FHM				4.165,00	0,97059	4.042,51
Schlamm Entsorgung				225.386,00	0,97059	218.757,43
<b>4.2 Betriebskosten</b>				<b>452.709,28</b>		<b>436.497,23</b>

Pulveraktivkohledosierung simultan in die Belebung und Sandfiltration			
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto	LAWA- Faktoren $(1+r)^n / (1+i)^n$	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto
4.3 Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	2.089.819,46	0	0,00
maschinelle Ausrüstung	239.176,69	0,58203	139.207,29
elektrotechnische Ausrüstung	124.057,50	0,55368	68.687,63
Zwischensumme	2.453.053,65		207.894,92
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	489.886,15	0	0,00
4.3 Reinvestitionskosten	2.942.939,80		207.894,92
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto	LAWA- Faktoren $i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto
4.4 Kapitalkosten			
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	2.089.819,46	0,04326	90.410,56
maschinelle Ausrüstung	239.176,69	0,04326	10.347,35
elektrotechnische Ausrüstung	124.057,50	0,04326	5.367,02
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	489.886,15	0,04326	21.193,64
Zwischensumme	2.942.939,80		127.318,57
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	139.207,29	0,04326	6.022,44
elektrotechnische Ausrüstung	68.687,63	0,04326	2.971,59
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Zwischensumme	207.894,92		8.994,03
4.4 Kapitalkosten			136.312,60
4 Jahreskosten	Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto		
Betriebskosten	436.497,23 €/a		
Kapitalkosten	136.312,60 €/a		
4 Jahreskosten	572.809,83 €/a		
4 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser	572.809,83 €/a / 3.600.000 m³/a =		0,159 €/m³
4 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser	572.809,83 €/a / 2.500.000 m³/a =		0,23 €/m³
4 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	572.809,83 €/a / 61.000 EW =		9,39 €/EW

# **Kläranlage der Stadt Brühl**

**Machbarkeitsstudie zur Elimination von  
Mikroschadstoffen  
auf der Kläranlage Brühl**

## **Anlage C**

**Kostenschätzung Variante 1b  
Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete  
Kontaktbecken, Nutzung von zwei  
vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration**

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerk GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
<b>1</b>	<b>Investitionskosten</b>							
1.1	Baustelleneinrichtung				356.000,00	22.000,00	11.000,00	389.000,00
	BE Bauwerksarbeiten (ca. 10% der IB)	1	psch.	336.000,00	336.000,00			
	Baufeldfreimachung	1	psch.	20.000,00	20.000,00			
	BE Maschinelle Ausrüstung (ca. 3% der MA)	1	psch.	22.000,00		22.000,00		
	BE Elektrotechnische Ausrüstung (ca. 3% der EA)	1	psch.	11.000,00			11.000,00	
1.2	PAK-Kontaktbecken				570.750,00	56.000,00	28.000,00	654.750,00
	Erdaushub und Abfuhr	3800	m³	25,00	95.000,00			
	Baugrubenverbau	800	m²	180,00	144.000,00			
	Füllkies	900	m³	35,00	31.500,00			
	Stahlbeton	630	m³	325,00	204.750,00			
	Schalung	950	m²	90,00	85.500,00			
	Gitterrostabdeckungen, Leitern, etc.	1	pschl.	10.000,00	10.000,00			
	Zulaufschieber DN1000, elektrisch	2	St	10.000,00		20.000,00		
	Rührwerke	6	St	6.000,00		36.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	28.000,00			28.000,00	
1.3	Umbau- und Ertüchtigungsmaßnahmen				550.000,00	150.000,00	75.000,00	775.000,00
	Umbau Verteilerbauwerk	1	pschl.	150.000,00	150.000,00			
	Ertüchtigung Nachklärbecken	2	pschl.	200.000,00	400.000,00			
	Erneuerung Rücklaufschlammumpwerk	1	pschl.	150.000,00		150.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	75.000,00			75.000,00	
1.4	Dynasandfilter				1.172.725,00	117.500,00	58.750,00	1.348.975,00
	Erdaushub und Abfuhr	2500	m³	25,00	62.500,00			
	Baugrubenverbau	700	m²	180,00	126.000,00			
	Füllkies	800	m³	35,00	28.000,00			
	Dynasandfilter in Betonbauweise	30	St	27.000,00	810.000,00			
	Erstbefüllung mit Quarzsand	560	t	150,00	84.000,00			
	Stahlbeton Zu- und Ablaufrinnen	125	m³	325,00	40.625,00			
	Schalung Zu- und Ablaufrinne	240	m²	90,00	21.600,00			
	Kompressoranlage einschl. Verrohrung	1	St	95.000,00		95.000,00		
	Zulaufschieber, elektrisch	3	St	7.500,00		22.500,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	58.750,00			58.750,00	
1.5	Vorschacht Pumpwerk				118.600,00	0,00	0,00	118.600,00
	Erdaushub und Abfuhr	450	m³	25,00	11.250,00			
	Baugrubenverbau	250	m²	180,00	45.000,00			
	Füllkies	210	m³	35,00	7.350,00			
	Stahlbeton	90	m³	325,00	29.250,00			
	Schalung	175	m²	90,00	15.750,00			
	Schachtausrüstung	1	pschl.	10.000,00	10.000,00			
1.6	Kanalbau				443.750,00	0,00	0,00	443.750,00
	Erdaushub und Abfuhr	1900	m³	25,00	47.500,00			
	Baugrubenverbau	1900	m²	55,00	104.500,00			
	Füllkies	1750	m³	35,00	61.250,00			
	Rohrleitung DN 600 PEHD	68	m	750,00	51.000,00			
	Rohrleitung DN 700 PEHD	22	m	1.000,00	22.000,00			
	Rohrleitungen DN 1000 PEHD	95	m	1.500,00	142.500,00			
	Schächte DN1500	1	St	15.000,00	15.000,00			

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerk GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
1.7	PAK-Silo und PAK-Suspensionsaufbereitung				100.830,00	75.000,00	37.500,00	213.330,00
	Erdaushub und Abfuhr	35	m³	25,00	875,00			
	Füllkies	13	m³	35,00	455,00			
	Stahlbeton	22	m³	325,00	7.150,00			
	Schalung	15	m²	90,00	1.350,00			
	PAK-Silo	1	St	75.000,00	75.000,00			
	PAK-Erstbefüllung des Kontaktbeckens	8	t	2.000,00	16.000,00			
	PAK-Suspensionsaufbereitung	1	pschl.	75.000,00		75.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	37.500,00			37.500,00	
1.8	Betriebsgebäude mit RS- und ÜSS-Pumpwerk und Schlammwässerung				298.700,00	345.000,00	172.500,00	816.200,00
	Erdaushub und Abfuhr	1200	m³	25,00	30.000,00			
	Baugrubenverbau	380	m²	180,00	68.400,00			
	Füllkies	300	m³	35,00	10.500,00			
	Stahlbeton	220	m³	325,00	71.500,00			
	Schalung	420	m²	90,00	37.800,00			
	Mauerwerk	100	m²	140,00	14.000,00			
	Sektionaltor	1	St	8.000,00	8.000,00			
	Fenster	2	St	750,00	1.500,00			
	Dach einschl. Dämmung	140	m²	350,00	49.000,00			
	Deckenunterschalung	100	m²	80,00	8.000,00			
	Wasserversorgung, Spülbecken	1	pschl.	5.000,00		5.000,00		
	Zwischenpumpwerk	1	pschl.	150.000,00		150.000,00		
	Überschussschlammumpwerk	1	pschl.	25.000,00		25.000,00		
	Flockungsmittelstation	1	pschl.	25.000,00		25.000,00		
	Zentrifuge mit Verrohrungen	1	pschl.	120.000,00		120.000,00		
	Austragsförderer	1	pschl.	20.000,00		20.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	172.500,00			172.500,00	
1.9	Straßen- und Wegebau				106.800,00	0,00	0,00	106.800,00
	Asphaltflächen	560	m²	120,00	67.200,00			
	Pflasterflächen	330	m²	120,00	39.600,00			
Baukosten, gesamt, netto					3.718.155,00	765.500,00	382.750,00	4.866.405,00
Investitionskosten						netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
Ingenieurbauwerke						3.718.155,00	706.449,45	4.424.604,45
maschinelle Ausrüstung						765.500,00	145.445,00	910.945,00
elektrotechnische Ausrüstung						382.750,00	72.722,50	455.472,50
Baukosten, gesamt						4.866.405,00	924.616,95	5.791.021,95
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)						973.281,00	184.923,39	1.158.204,39
<b>Investitionskosten</b>						<b>5.839.686,00</b>	<b>1.109.540,34</b>	<b>6.949.226,34</b>

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration						
<b>2 Betriebskosten</b>						
2.1 Energiekosten						
2.1.1 Pumpwerk zum Heben des Abwassers						
Jahresmenge			3.600.000	m³		
mittlere Fördermenge	Q		114	l / s		
Förderhöhe	H		4,00	m		
Wirkungsgrad	η		0,65			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	6,89	kW		
Jahresenergiebedarf			60.369,23	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			16.299,69	€ / a		16.299,69
2.1.2 Zwischenpumpwerk						
Jahresmenge			3.600.000	m³		
mittlere Fördermenge	Q		114	l / s		
Förderhöhe	H		1,50	m		
Wirkungsgrad	η		0,65			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	2,58	kW		
Jahresenergiebedarf			22.638,46	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			6.112,38	€ / a		6.112,38
2.1.3 PAK-Treibwasserpumpe						
mittlere Fördermenge	Q		3	l / s		
Förderhöhe	H		55,00	m		
Wirkungsgrad	η		0,80			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	2,02	kW		
Jahresenergiebedarf			17.724,22	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			4.785,54	€ / a		4.785,54
2.1.4 Überschussschlammumpwerk						
Jahresmenge			4.500	m³		
mittlere Fördermenge	Q		2,8	l / s		
Förderhöhe	H		10,00	m		
Wirkungsgrad	η		0,80			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	0,34	kW		
Jahresenergiebedarf			3.007,75	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			812,09	€ / a		812,09
2.1.5 Zentrifuge						
PAK-Trockensubstanz			36	t		
PAK-Konzentration im ÜSS			8	kg / m³		
entwässerter PAK-Schlamm			100	t		
PAK-ÜSS-Schlamm			4.500	m³		
spez. Energiebedarf			4	kWh / m³		
Jahresenergiebedarf			18.000	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			4.860,00	€ / a		4.860,00
2.1.6 PAK-Kontaktbecken						
Beckenvolumen			1.944	m³		
spez. Energiebedarf			6	W / m³		
Energiebedarf			12	kW		
Jahresenergiebedarf			102.177	kWh/a		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			27.587,69	€ / a		27.587,69

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration						
2.1.7	Sandfiltration					
	Jahresmenge	3.600.000	m³			
	spez. Energiebedarf	10	Wh / m³			
	Jahresenergiebedarf	36.000	kWh			
	Strompreis	0,27	€ / kWh			
	Energiekosten	9.720,00	€ / a			9.720,00
2.1.8	Kleinverbraucher, pauschal					
	Jahresenergiebedarf	50.000	kWh			
	Strompreis	0,27	€ / kWh			
	Energiekosten	13.500,00	€ / a			13.500,00
2.1	Energiekosten, netto					83.677,40
2.2	Personalkosten					
	Mitarbeiter	100%	von	40.000,00	40.000,00	40.000,00
2.2	Personalkosten					40.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten					
	Ingenieurbauwerke, anteilig der Baukosten	0,5%	von	3.718.155,00		18.590,78
	maschinelle Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von	765.500,00		15.310,00
	elektrotechnische Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von	382.750,00		7.655,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten, netto					41.555,78
2.4	PAK					
	Abwassermenge	3.600.000	m³			
	spez. PAK-Verbrauch	10	kg / m³			
	Jahresmenge	36	t			
	spez. Kosten	2.000,00	€ / t			
	Jahreskosten	72.000,00	€ / a			72.000,00
2.4	PAK, netto					72.000,00
2.5	FHM					
	spez. Kosten	3.500,00	€ / t	1,00	t	
	Jahreskosten	3.500,00	€ / a			3.500,00
2.5	FHM, netto					3.500,00
2.6	Schlammensorgung					
	PAK-Schlamm					
	Schlammmenge	100	t / a			
	spez. Entsorgungskosten	90	€ / t			
	Jahreskosten	9.000,00	€ / a			9.000,00
2.6	Schlammensorgung					9.000,00
2	Betriebskosten					
						netto [€/a]
2.1	Energiekosten					83.677,40
2.2	Personalkosten					40.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten					41.555,78
2.4	PAK					72.000,00
2.5	FHM					3.500,00
2.6	Schlammensorgung					9.000,00
2	Betriebskosten					249.733,17
						MwSt [€/a]
						15.898,71
						0,00
						7.895,60
						13.680,00
						665,00
						1.710,00
						289.582,48
						brutto [€/a]
						99.576,11
						40.000,00
						49.451,37
						85.680,00
						4.165,00
						10.710,00
						289.582,48



Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration			
	In- und Reinvestitionen		Kapitalkosten
	Bezugszeitpunkt		Bezugszeitpunkt
	Jahr 2016		Jahr 2016
3.4 Kapitalkosten	brutto [€]		brutto [€]
	LAWA-Faktoren		
	$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$		
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	4.424.604,45	0,04326	191.418,91
maschinelle Ausrüstung	910.945,00	0,04326	39.409,65
elektrotechnische Ausrüstung	455.472,50	0,04326	19.704,82
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.158.204,39	0,04326	50.106,68
Investitionskosten	6.949.226,34	0,04326	300.640,06
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	530.194,59	0,04326	22.937,48
elektrotechnische Ausrüstung	252.184,08	0,04326	10.910,08
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Reinvestitionskosten	782.378,67	0,04326	33.847,56
<b>3.4 Kapitalkosten</b>			<b>334.487,62</b>
Bezugszeitpunkt			
Jahr 2016			
<b>3 Jahreskosten</b>	brutto		
Betriebskosten	289.582,48 €/a		
Kapitalkosten	334.487,62 €/a		
<b>3 Jahreskosten</b>	<b>624.070,10 €/a</b>		
<b>3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser</b>	<b>624.070,10 €/a / 3.600.000 m³/a =</b>		<b>0,173 €/m³</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser</b>	<b>624.070,10 €/a / 2.500.000 m³/a =</b>		<b>0,250 €/m³</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert</b>	<b>624.070,10 €/a / 61.000 EW =</b>		<b>10,23 €/EW</b>
<b>4 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt: Jahr 2013</b>			
Bezugsjahr der Kosten	K	2016	
Bezugszeitpunkt	X	2013	Berechnungen
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a	$X - K = -3$
Zinsen	i	%	3,00
Bezugszeitraum	b	a	40
Kapitalwiedergewinnungsfaktor			LAWA - Faktoren
			$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$ 0,04326
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40
AFA Maschinentechnik	n	a	20
AFA Elektrotechnik	n	a	20
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr			keine Reinvestition
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50 $(1+r)^m = 0,98515$
Preissteigerung Energie	r	%	3,00 $(1+r)^m = 0,91514$
Preissteigerung PAK	r	%	1,00 $(1+r)^m = 0,97059$
Preissteigerung O2	r	%	1,00 $(1+r)^m = 0,97059$
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50 $(1+r)^m = 0,98515$
Preissteigerung Maschinentechnik	r	%	0,25 $(1+r)^m = 0,99254$
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00 $(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00 $(1+r)^m = 0,97059$
		Bezugsjahr der Kosten	LAWA-Faktoren
		Jahr 2016	Jahr 2013
4.1 Investitionskosten		brutto	brutto
Ingenieurbauwerke	4.424.604,45	0,98515	4.358.893,58
maschinelle Ausrüstung	910.945,00	0,99254	904.146,93
elektrotechnische Ausrüstung	455.472,50	1,00000	455.472,50
Baukosten, gesamt	5.791.021,95		5.718.513,02
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.158.204,39	0,98515	1.141.003,62
Investitionskosten	6.949.226,34		6.859.516,63

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Nutzung von zwei vorhandenen Nachklärbecken und Sandfiltration			
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>n</sup> =	Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.2 Betriebskosten	brutto		brutto
Energiekosten	99.576,11	0,91514	91.126,24
Personalkosten	40.000,00	0,98515	39.405,95
Wartungs- und Instandhaltungskosten	49.451,37	0,98515	48.716,96
PAK	85.680,00	0,97059	83.160,16
FHM	4.165,00	0,97059	4.042,51
Schlammensorgung	10.710,00	0,97059	10.395,02
<b>4.2 Betriebskosten</b>	<b>289.582,48</b>		<b>276.846,84</b>
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>n</sup> / (1 + i) <sup>n</sup>	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.3 Reinvestitionskosten	brutto		brutto
Ingenieurbauwerke	4.358.893,58	0	0,00
maschinelle Ausrüstung	904.146,93	0,58203	526.237,93
elektrotechnische Ausrüstung	455.472,50	0,55368	252.184,08
Zwischensumme	5.718.513,02		778.422,01
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.141.003,62	0	0,00
<b>4.3 Reinvestitionskosten</b>	<b>6.859.516,63</b>		<b>778.422,01</b>
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013	LAWA- Faktoren i <sup>n</sup> (1+i) <sup>b</sup> /((1+i) <sup>b</sup> -1)	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.4 Kapitalkosten	brutto		brutto
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	4.358.893,58	0,04326	188.576,10
maschinelle Ausrüstung	904.146,93	0,04326	39.115,55
elektrotechnische Ausrüstung	455.472,50	0,04326	19.704,82
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.141.003,62	0,04326	49.362,53
Zwischensumme	6.859.516,63		296.759,00
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	526.237,93	0,04326	22.766,30
elektrotechnische Ausrüstung	252.184,08	0,04326	10.910,08
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Zwischensumme	778.422,01		33.676,39
<b>4.4 Kapitalkosten</b>			<b>330.435,39</b>
4 Jahreskosten	Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto		
Betriebskosten	276.846,84 €/a		
Kapitalkosten	330.435,39 €/a		
<b>4 Jahreskosten</b>	<b>607.282,23 €/a</b>		
4 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	607.282,23 €/a / 3.600.000 m <sup>3</sup> /a =		0,169 €/m <sup>3</sup>
4 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Frischwasser	607.282,23 €/a / 2.500.000 m <sup>3</sup> /a =		0,24 €/m <sup>3</sup>
4 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	607.282,23 €/a / 61.000 EW =		9,96 €/EW

# **Klieranlage der Stadt Brühl**

## **Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen auf der Klieranlage Brühl**

### **Anlage D**

#### **Kostenschätzung Variante 1c Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration**

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerke GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
<b>1 Investitionskosten</b>								
1.1	Baustelleneinrichtung				383.000,00	21.000,00	10.000,00	414.000,00
	BE Bauwerksarbeiten (ca. 10% der IB)	1	psch.	363.000,00	363.000,00			
	Baufeldfreimachung	1	psch.	20.000,00	20.000,00			
	BE Maschinelle Ausrüstung (ca. 3% der MA)	1	psch.	21.000,00		21.000,00		
	BE Elektrotechnische Ausrüstung (ca. 3% der EA)	1	psch.	10.000,00			10.000,00	
1.2	PAK-Kontaktbecken				570.750,00	56.000,00	28.000,00	654.750,00
	Erdaushub und Abfuhr	3800	m³	25,00	95.000,00			
	Baugrubenverbau	800	m²	180,00	144.000,00			
	Füllkies	900	m³	35,00	31.500,00			
	Stahlbeton	630	m³	325,00	204.750,00			
	Schalung	950	m²	90,00	85.500,00			
	Gitterrostabdeckungen, Leitern, etc.	1	pschl.	10.000,00	10.000,00			
	Zulaufschieber DN1000, elektrisch	2	St	10.000,00		20.000,00		
	Rührwerke	6	St	6.000,00		36.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	28.000,00			28.000,00	
1.3	Lamellenklärer				1.182.500,00	130.000,00	65.000,00	1.377.500,00
	Erdaushub und Abfuhr	3100	m³	25,00	77.500,00			
	Baugrubenverbau	700	m²	180,00	126.000,00			
	Füllkies	800	m³	35,00	28.000,00			
	Stahlbeton	680	m³	325,00	221.000,00			
	Schalung	800	m²	90,00	72.000,00			
	Lamellenpakete	24	St	27.000,00	648.000,00			
	Gitterrostabdeckungen, Leitern, etc.	1	pschl.	10.000,00	10.000,00			
	Zulaufschieber DN1000, elektrisch	2	St	10.000,00		20.000,00		
	Zickert-Bodenräumer	2	St	55.000,00		110.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	65.000,00			65.000,00	
1.4	Dynasandfilter				1.134.300,00	117.500,00	58.750,00	1.310.550,00
	Erdaushub und Abfuhr	2300	m³	25,00	57.500,00			
	Baugrubenverbau	650	m²	180,00	117.000,00			
	Füllkies	700	m³	35,00	24.500,00			
	Dynasandfilter in Betonbauweise	30	St	27.000,00	810.000,00			
	Erstbefüllung mit Quarzsand	560	t	150,00	84.000,00			
	Stahlbeton Zu- und Ablaufrinnen	80	m³	325,00	26.000,00			
	Schalung Zu- und Ablaufrinne	170	m²	90,00	15.300,00			
	Kompressoranlage einschl. Verrohrung	1	St	95.000,00		95.000,00		
	Zulaufschieber, elektrisch	3	St	7.500,00		22.500,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	58.750,00			58.750,00	
1.5	Vorschacht Pumpwerk				81.750,00	0,00	0,00	81.750,00
	Erdaushub und Abfuhr	300	m³	25,00	7.500,00			
	Baugrubenverbau	175	m²	180,00	31.500,00			
	Füllkies	150	m³	35,00	5.250,00			
	Stahlbeton	60	m³	325,00	19.500,00			
	Schalung	120	m²	90,00	10.800,00			
	Schachtausrüstung	1	pschl.	7.200,00	7.200,00			

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerke GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
1.6	Kanalbau				276.000,00	0,00	0,00	276.000,00
	Erdaushub und Abfuhr	950	m³	25,00	23.750,00			
	Baugrubenverbau	950	m²	55,00	52.250,00			
	Füllkies	850	m³	35,00	29.750,00			
	Rohrleitung DN 600 PEHD	7	m	750,00	5.250,00			
	Rohrleitung DN 700 PEHD	15	m	1.000,00	15.000,00			
	Rohrleitungen DN 1000 PEHD	70	m	1.500,00	105.000,00			
	Schächte DN1500	3	St	15.000,00	45.000,00			
1.7	PAK-Silo und PAK-Suspensionsaufbereitung				100.830,00	75.000,00	37.500,00	213.330,00
	Erdaushub und Abfuhr	35	m³	25,00	875,00			
	Füllkies	13	m³	35,00	455,00			
	Stahlbeton	22	m³	325,00	7.150,00			
	Schalung	15	m²	90,00	1.350,00			
	PAK-Silo	1	St	75.000,00	75.000,00			
	PAK-Erstbefüllung des Kontaktbeckens	8	t	2.000,00	16.000,00			
	PAK-Suspensionsaufbereitung	1	pschl.	75.000,00		75.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	37.500,00			37.500,00	
1.8	Betriebsgebäude mit RS- und ÜSS-Pumpwerk und Schlammwässerung				192.740,00	350.000,00	175.000,00	717.740,00
	Erdaushub und Abfuhr	650	m³	25,00	16.250,00			
	Baugrubenverbau	275	m²	180,00	49.500,00			
	Füllkies	200	m³	35,00	7.000,00			
	Stahlbeton	150	m³	325,00	48.750,00			
	Schalung	280	m²	90,00	25.200,00			
	Mauerwerk	70	m²	140,00	9.800,00			
	Stahldoppeltür	1	St	2.500,00	2.500,00			
	Fenster	2	St	750,00	1.500,00			
	Dach einschl. Dämmung	80	m²	350,00	28.000,00			
	Deckenunterverschalung	53	m²	80,00	4.240,00			
	Wasserversorgung, Spülbecken	1	pschl.	5.000,00		5.000,00		
	Rücklaufschlammumpwerk	1	pschl.	150.000,00		150.000,00		
	Überschussschlammumpwerk	1	pschl.	30.000,00		30.000,00		
	Flockungsmittelstation	1	pschl.	25.000,00		25.000,00		
	Zentrifuge mit Verrohrungen	1	pschl.	120.000,00		120.000,00		
	Austragsförderer	1	pschl.	20.000,00		20.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	175.000,00			175.000,00	
1.9	Straßen- und Wegebau				99.600,00	0,00	0,00	99.600,00
	Asphaltflächen	480	m²	120,00	57.600,00			
	Pflasterflächen	350	m²	120,00	42.000,00			
Baukosten, gesamt, netto					4.021.470,00	749.500,00	374.250,00	5.145.220,00
Investitionskosten						netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
Ingenieurbauwerke						4.021.470,00	764.079,30	4.785.549,30
maschinelle Ausrüstung						749.500,00	142.405,00	891.905,00
eletrotechnische Ausrüstung						374.250,00	71.107,50	445.357,50
Baukosten, gesamt						5.145.220,00	977.591,80	6.122.811,80
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)						1.029.044,00	195.518,36	1.224.562,36
<b>Investitionskosten</b>						<b>6.174.264,00</b>	<b>1.173.110,16</b>	<b>7.347.374,16</b>

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration						
<b>2 Betriebskosten</b>						
2.1 Energiekosten						
2.1.1 Pumpwerk zum Heben des Abwassers						
Jahresmenge			3.600.000	m <sup>3</sup>		
mittlere Fördermenge	Q		114	l / s		
Förderhöhe	H		4,00	m		
Wirkungsgrad	η		0,65			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	6,89	kW		
Jahresenergiebedarf			60.369,23	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			16.299,69	€ / a		16.299,69
2.1.2 PAK-Treibwasserpumpe						
mittlere Fördermenge	Q		3	l / s		
Förderhöhe	H		55,00	m		
Wirkungsgrad	η		0,80			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	2,02	kW		
Jahresenergiebedarf			17.724,22	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			4.785,54	€ / a		4.785,54
2.1.3 Rücklaufschlammumpwerk						
Jahresmenge			3.600.000	m <sup>3</sup>		
mittlere Fördermenge	Q		114	l / s		
Förderhöhe	H		1,50	m		
Wirkungsgrad	η		0,65			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	2,58	kW		
Jahresenergiebedarf			22.638,46	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			6.112,38	€ / a		6.112,38
2.1.4 Überschussschlammumpwerk						
Jahresmenge			4.500	m <sup>3</sup>		
mittlere Fördermenge	Q		2,8	l / s		
Förderhöhe	H		10,00	m		
Wirkungsgrad	η		0,80			
Energiebedarf	$P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	0,34	kW		
Jahresenergiebedarf			3.007,75	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			812,09	€ / a		812,09
2.1.5 Zentrifuge						
PAK-Trockensubstanz			36	t		
PAK-Konzentration im ÜSS			8	kg / m <sup>3</sup>		
entwässerter PAK-Schlamm			100	t		
PAK-ÜSS-Schlamm			4.500	m <sup>3</sup>		
spez. Energiebedarf			4	kWh / m <sup>3</sup>		
Jahresenergiebedarf			18.000	kWh		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			4.860,00	€ / a		4.860,00
2.1.6 PAK-Kontaktbecken						
Beckenvolumen			1.944	m <sup>3</sup>		
spez. Energiebedarf			6	W / m <sup>3</sup>		
Energiebedarf			12	kW		
Jahresenergiebedarf			102.177	kWh/a		
Strompreis			0,27	€ / kWh		
Energiekosten			27.587,69	€ / a		27.587,69

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration				
2.1.7	Sandfiltration			
	Jahresmenge	3.600.000	m³	
	spez. Energiebedarf	10	Wh / m³	
	Jahresenergiebedarf	36.000	kWh	
	Strompreis	0,27	€ / kWh	
	Energiekosten	9.720,00	€ / a	9.720,00
2.1.8	Kleinverbraucher, pauschal			
	Jahresenergiebedarf	50.000	kWh	
	Strompreis	0,27	€ / kWh	
	Energiekosten	13.500,00	€ / a	13.500,00
2.1	Energiekosten, netto			83.677,40
2.2	Personalkosten			
	Mitarbeiter	100%	von 40.000,00	40.000,00
2.2	Personalkosten			40.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten			
	Ingenieurbauwerke, anteilig der Baukosten	0,5%	von 4.021.470,00	20.107,35
	maschinelle Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von 749.500,00	14.990,00
	elektrotechnische Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von 374.250,00	7.485,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten, netto			42.582,35
2.4	PAK			
	Abwassermenge	3.600.000	m³	
	spez. PAK-Verbrauch	10	kg / m³	
	Jahresmenge	36	t	
	spez. Kosten	2.000,00	€ / t	
	Jahreskosten	72.000,00	€ / a	72.000,00
2.4	PAK, netto			72.000,00
2.5	FHM			
	spez. Kosten	1,00	t	
	Jahreskosten	3.500,00	€ / a	3.500,00
2.5	FHM, netto			3.500,00
2.6	Schlammensorgung			
	PAK-Schlamm			
	Schlammmenge	100	t / a	
	spez. Entsorgungskosten	90	€ / t	
	Jahreskosten	9.000,00	€ / a	9.000,00
2.6	Schlammensorgung, netto			9.000,00
2	Betriebskosten			
				netto [€/a]      MwSt [€/a]      brutto [€/a]
2.1	Energiekosten			83.677,40      15.898,71      99.576,11
2.2	Personalkosten			40.000,00      0,00      40.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten			42.582,35      8.090,65      50.673,00
2.4	PAK			72.000,00      13.680,00      85.680,00
2.5	FHM			3.500,00      665,00      4.165,00
2.6	Schlammensorgung			9.000,00      1.710,00      10.710,00
<b>2</b>	<b>Betriebskosten</b>			<b>250.759,75      40.044,35      290.804,10</b>

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration				
3 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt:				Jahr 2016
Bezugsjahr der Kosten	K		2016	
Bezugszeitpunkt	X		2016	Berechnungen
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a		X-K = 0
Zinsen	i	%	3,00	
Bezugszeitraum	b	a	40	LAWA - Faktoren
Kapitalwiedergewinnungsfaktor				$i \cdot (1+i)^b / ((1+i)^b - 1) = 0,04326$
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40	keine Reinvestition
AFA Maschinenteknik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n = 0,58203$
AFA Elektrotechnik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n = 0,55368$
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr				
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50	$(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung Energie	r	%	3,00	$(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung PAK	r	%	1,00	$(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung O2	r	%	1,00	$(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50	$(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung Maschinenteknik	r	%	0,25	$(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00	$(1+r)^m = 1,00000$
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00	$(1+r)^m = 1,00000$
			Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016	LAWA- Faktoren $(1+r)^m$
3.1 Investitionskosten			brutto [€]	Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
Ingenieurbauwerke			4.785.549,30	4.785.549,30
maschinelle Ausrüstung			891.905,00	891.905,00
elektrotechnische Ausrüstung			445.357,50	445.357,50
Baukosten, gesamt			6.122.811,80	6.122.811,80
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)			1.224.562,36	1.224.562,36
3.1 Investitionskosten			7.347.374,16	7.347.374,16
			Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016	LAWA- Faktoren $(1+r)^m =$
3.2 Betriebskosten			brutto [€]	Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
Energiekosten			99.576,11	99.576,11
Personalkosten			40.000,00	40.000,00
Wartungs- und Instandhaltungskosten			50.673,00	50.673,00
PAK			85.680,00	85.680,00
FHM			4.165,00	4.165,00
Schlamm Entsorgung			10.710,00	10.710,00
3.2 Betriebskosten			290.804,10	290.804,10
			Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016
3.3 Reinvestitionskosten			brutto [€]	brutto [€]
Ingenieurbauwerke			4.785.549,30	0,00
maschinelle Ausrüstung			891.905,00	519.112,79
elektrotechnische Ausrüstung			445.357,50	246.583,65
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)			1.224.562,36	0,00
3.3 Reinvestitionskosten			7.347.374,16	765.696,44

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration			
	In- und Reinvestitionen	LAWA-	Kapitalkosten
	Bezugszeitpunkt	Faktoren	Bezugszeitpunkt
3.4 Kapitalkosten	Jahr 2016		Jahr 2016
	brutto [€]	$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	brutto [€]
<b>Investitionskosten</b>			
Ingenieurbauwerke	4.785.549,30	0,04326	207.034,24
maschinelle Ausrüstung	891.905,00	0,04326	38.585,93
elektrotechnische Ausrüstung	445.357,50	0,04326	19.267,22
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.224.562,36	0,04326	52.977,48
<b>Investitionskosten</b>	<b>7.347.374,16</b>	<b>0,04326</b>	<b>317.864,88</b>
<b>Reinvestitionskosten</b>			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	519.112,79	0,04326	22.458,05
elektrotechnische Ausrüstung	246.583,65	0,04326	10.667,80
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
<b>Reinvestitionskosten</b>	<b>765.696,44</b>	<b>0,04326</b>	<b>33.125,85</b>
<b>3.4 Kapitalkosten</b>			<b>350.990,73</b>
<b>3 Jahreskosten</b>			
		Bezugszeitpunkt	
		Jahr 2016	
		brutto	
Betriebskosten			290.804,10 €/a
Kapitalkosten			350.990,73 €/a
<b>3 Jahreskosten</b>			<b>641.794,83 €/a</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser</b>	<b>641.794,83 €/a / 3.600.000 m³/a =</b>		<b>0,178 €/m³</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser</b>	<b>641.794,83 €/a / 2.500.000 m³/a =</b>		<b>0,257 €/m³</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert</b>	<b>641.794,83 €/a / 61.000 EW =</b>		<b>10,52 €/EW</b>
<b>4 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt: Jahr 2013</b>			
Bezugsjahr der Kosten	K	2016	
Bezugszeitpunkt	X	2013	Berechnungen
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a	X-K = -3
Zinsen	i	%	3,00
Bezugszeitraum	b	a	40
Kapitalwiedergewinnungsfaktor			$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$ 0,04326
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40 keine Reinvestition
AFA Maschinenteknik	n	a	20 $(1+r)^n / (1+i)^n$ 0,58203
AFA Elektrotechnik	n	a	20 $(1+r)^n / (1+i)^n$ 0,55368
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr			
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50 $(1+r)^m =$ 0,98515
Preissteigerung Energie	r	%	3,00 $(1+r)^m =$ 0,91514
Preissteigerung PAK	r	%	1,00 $(1+r)^m =$ 0,97059
Preissteigerung O2	r	%	1,00 $(1+r)^m =$ 0,97059
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50 $(1+r)^m =$ 0,98515
Preissteigerung Maschinenteknik	r	%	0,25 $(1+r)^m =$ 0,99254
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00 $(1+r)^m =$ 1,00000
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00 $(1+r)^m =$ 0,97059

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration			
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016	LAWA- Faktoren	Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.1 Investitionskosten	brutto	$(1 + r)^m$	brutto
Ingenieurbauwerke	4.785.549,30	0,98515	4.714.477,96
maschinelle Ausrüstung	891.905,00	0,99254	885.249,02
elektrotechnische Ausrüstung	445.357,50	1,00000	445.357,50
Baukosten, gesamt	6.122.811,80		6.045.084,48
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.224.562,36	0,98515	1.206.376,09
<b>Investitionskosten</b>	<b>7.347.374,16</b>		<b>7.251.460,57</b>
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016	LAWA- Faktoren	Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.2 Betriebskosten	brutto	$(1 + r)^m =$	brutto
Energiekosten	99.576,11	0,91514	91.126,24
Personalkosten	40.000,00	0,98515	39.405,95
Wartungs- und Instandhaltungskosten	50.673,00	0,98515	49.920,44
PAK	85.680,00	0,97059	83.160,16
FHM	4.165,00	0,97059	4.042,51
Schlammensorgung	10.710,00	0,97059	10.395,02
<b>4.2 Betriebskosten</b>	<b>290.804,10</b>		<b>278.050,33</b>
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013	LAWA- Faktoren	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.3 Reinvestitionskosten	brutto	$(1 + r)^n / (1 + i)^n$	brutto
Ingenieurbauwerke	4.714.477,96	0	0,00
maschinelle Ausrüstung	885.249,02	0,58203	515.238,83
elektrotechnische Ausrüstung	445.357,50	0,55368	246.583,65
Zwischensumme	6.045.084,48		761.822,48
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.206.376,09	0	0,00
<b>4.3 Reinvestitionskosten</b>	<b>7.251.460,57</b>		<b>761.822,48</b>

Pulveraktivkohledosierung in nachgeschaltete Kontaktbecken, Lamellenklärer und Sandfiltration			
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto	LAWA- Faktoren $i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto
<b>4.4 Kapitalkosten</b>			
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	4.714.477,96	0,04326	203.959,53
maschinelle Ausrüstung	885.249,02	0,04326	38.297,98
elektrotechnische Ausrüstung	445.357,50	0,04326	19.267,22
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	1.206.376,09	0,04326	52.190,70
Zwischensumme	7.251.460,57		313.715,43
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	515.238,83	0,04326	22.290,46
elektrotechnische Ausrüstung	246.583,65	0,04326	10.667,80
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Zwischensumme	761.822,48		32.958,25
<b>4.4 Kapitalkosten</b>			<b>346.673,68</b>
		Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto	
<b>4 Jahreskosten</b>			
Betriebskosten		278.050,33 €/a	
Kapitalkosten		346.673,68 €/a	
<b>4 Jahreskosten</b>		<b>624.724,00 €/a</b>	
4 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	624.724,00 €/a / 3.600.000 m <sup>3</sup> /a =		0,174 €/m <sup>3</sup>
4 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Frischwasser	624.724,00 €/a / 2.500.000 m <sup>3</sup> /a =		0,25 €/m <sup>3</sup>
4 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	624.724,00 €/a / 61.000 EW =		10,24 €/EW

# **Kläranlage der Stadt Brühl**

## **Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Brühl**

### **Anlage E**

#### **Kostenschätzung Variante 2 Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern**

Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerke GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	eletrotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
<b>1 Investitionskosten</b>								
1.1	Baustelleneinrichtung				331.000,00	4.000,00	2.000,00	337.000,00
	BE Bauwerksarbeiten (ca. 10% der IB)	1	psch.	311.000,00	311.000,00			
	Baufeldfreimachung	1	psch.	20.000,00	20.000,00			
	BE Maschinelle Ausrüstung (ca. 3% der MA)	1	psch.	4.000,00		4.000,00		
	BE Elektrotechnische Ausrüstung (ca. 3% der EA)	1	psch.	2.000,00			2.000,00	
1.2	GAK-Dynasandfilter				2.839.200,00	140.000,00	70.000,00	3.049.200,00
	Erdaushub und Abfuhr	5200	m³	25,00	130.000,00			
	Baugrubenverbau	1100	m²	180,00	198.000,00			
	Füllkies	1200	m³	35,00	42.000,00			
	Dynasandfilter in Betonbauweise	60	St	27.000,00	1.620.000,00			
	Erstbefüllung mit GAK	375	t	2.000,00	750.000,00			
	Stahlbeton Zu- und Ablaufrinnen	200	m³	325,00	65.000,00			
	Schalung Zu- und Ablaufrinne	380	m²	90,00	34.200,00			
	Kompressoranlage einschl. Verrohrung	1	St	95.000,00		95.000,00		
	Zulaufschieber, elektrisch	6	St	7.500,00		45.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	70.000,00			70.000,00	
1.3	Vorschacht Pumpwerk				81.750,00	0,00	0,00	81.750,00
	Erdaushub und Abfuhr	300	m³	25,00	7.500,00			
	Baugrubenverbau	175	m²	180,00	31.500,00			
	Füllkies	150	m³	35,00	5.250,00			
	Stahlbeton	60	m³	325,00	19.500,00			
	Schalung	120	m²	90,00	10.800,00			
	Schachtausrüstung	1	pschl.	7.200,00	7.200,00			
1.4	Kanalbau				36.625,00	0,00	0,00	36.625,00
	Erdaushub und Abfuhr	150	m³	25,00	3.750,00			
	Baugrubenverbau	150	m²	55,00	8.250,00			
	Füllkies	125	m³	35,00	4.375,00			
	Rohrleitung DN 600 PEHD	7	m	750,00	5.250,00			
	Rohrleitung DN 700 PEHD	15	m	1.000,00	15.000,00			
1.5	Betriebsgebäude				39.050,00	2.500,00	2.500,00	44.050,00
	Erdaushub und Abfuhr	25	m³	25,00	625,00			
	Füllkies	10	m³	35,00	350,00			
	Stahlbeton	15	m³	325,00	4.875,00			
	Schalung	10	m²	90,00	900,00			
	Mauerwerk	60	m²	140,00	8.400,00			
	Stahldoppeltür	1	St	2.500,00	2.500,00			
	Fenster	2	St	750,00	1.500,00			
	Dach einschl. Dämmung	50	m²	350,00	17.500,00			
	Deckenunterschalung	30	m²	80,00	2.400,00			
	Wasserversorgung, Spülbecken	1	pschl.	2.500,00		2.500,00		
	Beleuchtung, Gebäudeinstallation	1	pschl.	2.500,00			2.500,00	

Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerke GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	elektrotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
1.6	Straßen- und Wegebau				114.000,00	0,00	0,00	114.000,00
	Asphaltflächen	620	m²	120,00	74.400,00			
	Pflasterflächen	330	m²	120,00	39.600,00			
	Baukosten, gesamt, netto				3.441.625,00	146.500,00	74.500,00	3.662.625,00
	Investitionskosten					netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
	Ingenieurbauwerke					3.441.625,00	653.908,75	4.095.533,75
	maschinelle Ausrüstung					146.500,00	27.835,00	174.335,00
	elektrotechnische Ausrüstung					74.500,00	14.155,00	88.655,00
	Baukosten, gesamt					3.662.625,00	695.898,75	4.358.523,75
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)					732.525,00	139.179,75	871.704,75
	<b>Investitionskosten</b>					<b>4.395.150,00</b>	<b>835.078,50</b>	<b>5.230.228,50</b>
<b>2 Betriebskosten</b>								
2.1 Energiekosten								
2.1.1 Pumpwerk zum Heben des Abwassers								
	Jahresmenge			3.600.000	m³			
	mittlere Fördermenge	Q		114	l / s			
	Förderhöhe	H		4,00	m			
	Wirkungsgrad	η		0,65				
	Energiebedarf $P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P		6,89	kW			
	Jahresenergiebedarf			60.369,23	kWh			
	Strompreis			0,27	€ / kWh			
	Energiekosten			16.299,69	€ / a	16.299,69		
2.1.2 GAK-Filtration								
	Jahresmenge			3.600.000	m³			
	spez. Energiebedarf			20	Wh / m³			
	Jahresenergiebedarf			72.000	kWh			
	Strompreis			0,27	€ / kWh			
	Energiekosten			19.440,00	€ / a	19.440,00		
2.1.3 Kleinverbraucher, pauschal								
	Jahresenergiebedarf			20.000	kWh			
	Strompreis			0,27	€ / kWh			
	Energiekosten			5.400,00	€ / a	5.400,00		
2.1 Energiekosten, netto						41.139,69		
2.2 Personalkosten								
	Mitarbeiter	0,25	von	40.000,00	10.000,00	10.000,00		
2.2 Personalkosten						10.000,00		
2.3 Wartungs- und Instandhaltungskosten								
	Ingenieurbauwerke, anteilig der Baukosten	0,5%	von	3.441.625,00	17.208,13			
	maschinelle Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von	146.500,00	2.930,00			
	elektrotechnische Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von	74.500,00	1.490,00			
2.3 Wartungs- und Instandhaltungskosten, netto						21.628,13		

Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern				
2.4	GAK			
	Abwassermenge	3.600.000,00	m³	
	Anzahl Bettvolumina	8.000,00		
	GAK je Filterfüllung	375,00	t	
	GAK Schüttdichte	0,50	t / m³	
	GAK Volumen je Filterfüllung	750,00	m³	
	Abwassermenge je Filterfüllung	6.000.000,00	m³	
	Standzeit je Filterfüllung	1,67	a	
	Jahresmenge	225	t / a	
	spez. Kosten (Reaktivierung)	2.000,00	€ / t	
	Jahreskosten	450.000,00	€ / a	450.000,00
2.4	GAK, netto			450.000,00
2	Betriebskosten			
			netto [€/a]	MwSt [€/a]
2.1	Energiekosten		41.139,69	7.816,54
2.2	Personalkosten		10.000,00	0,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten		21.628,13	4.109,34
2.4	GAK		450.000,00	85.500,00
2	Betriebskosten		522.767,82	97.425,89
				620.193,70
3	Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt:			Jahr 2016
	Bezugsjahr der Kosten	K	2016	
	Bezugszeitpunkt	X	2016	Berechnungen
	Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a	$X - K =$ 0
	Zinsen	i	%	3,00
	Bezugszeitraum	b	a	40
	Kapitalwiedergewinnungsfaktor			LAWA - Faktoren
	AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1) =$ 0,04326
	AFA Maschinentechnik	n	a	keine Reinvestition
	AFA Elektrotechnik	n	a	$(1+r)^n / (1+i)^n =$ 0,58203
	Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr			$(1+r)^n / (1+i)^n =$ 0,55368
	Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50
	Preissteigerung Energie	r	%	3,00
	Preissteigerung PAK	r	%	1,00
	Preissteigerung O2	r	%	1,00
	Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50
	Preissteigerung Maschinentechnik	r	%	0,25
	Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00
	Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00
			Bezugsjahr der Kosten	LAWA- Faktoren
			Jahr 2016	Jahr 2016
3.1	Investitionskosten		brutto [€]	brutto [€]
	Ingenieurbauwerke		4.095.533,75	4.095.533,75
	maschinelle Ausrüstung		174.335,00	174.335,00
	elektrotechnische Ausrüstung		88.655,00	88.655,00
	Baukosten, gesamt		4.358.523,75	4.358.523,75
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)		871.704,75	871.704,75
3.1	Investitionskosten		5.230.228,50	5.230.228,50

Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern			
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>m</sup> =	Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
3.2 Betriebskosten			
Energiekosten	48.956,23	1,00000	48.956,23
Personalkosten	10.000,00	1,00000	10.000,00
Wartungs- und Instandhaltungskosten	25.737,47	1,00000	25.737,47
GAK	535.500,00	1,00000	535.500,00
<b>3.2 Betriebskosten</b>	<b>620.193,70</b>		<b>620.193,70</b>
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren (1 + r) <sup>n</sup> / (1 + i) <sup>n</sup>	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
3.3 Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	4.095.533,75	0	0,00
maschinelle Ausrüstung	174.335,00	0,58203	101.467,68
elektrotechnische Ausrüstung	88.655,00	0,55368	49.086,12
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	871.704,75	0	0,00
<b>3.3 Reinvestitionskosten</b>	<b>5.230.228,50</b>		<b>150.553,80</b>
	In- und Reinvestitionen Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]	LAWA- Faktoren $i \cdot (1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto [€]
3.4 Kapitalkosten			
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	4.095.533,75	0,04326	177.182,53
maschinelle Ausrüstung	174.335,00	0,04326	7.542,15
elektrotechnische Ausrüstung	88.655,00	0,04326	3.835,43
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	871.704,75	0,04326	37.712,02
Investitionskosten	5.230.228,50	0,04326	226.272,12
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	101.467,68	0,04326	4.389,73
elektrotechnische Ausrüstung	49.086,12	0,04326	2.123,58
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Reinvestitionskosten	150.553,80	0,04326	6.513,32
<b>3.4 Kapitalkosten</b>			<b>232.785,44</b>
			Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto
<b>3 Jahreskosten</b>			
Betriebskosten			620.193,70 €/a
Kapitalkosten			232.785,44 €/a
<b>3 Jahreskosten</b>			<b>852.979,14 €/a</b>
3 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	852.979,14 €/a / 3.600.000 m <sup>3</sup> /a =		0,237 €/m <sup>3</sup>
3 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Frischwasser	852.979,14 €/a / 2.500.000 m <sup>3</sup> /a =		0,341 €/m <sup>3</sup>
3 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	852.979,14 €/a / 61.000 EW =		13,98 €/EW

Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern					
4 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt:				Jahr 2013	
Bezugsjahr der Kosten	K		2016		
Bezugszeitpunkt	X		2013	Berechnungen	
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a		X-K =	-3
Zinsen	i	%	3,00		
Bezugszeitraum	b	a	40	LAWA - Faktoren	
Kapitalwiedergewinnungsfaktor				$i*(1+i)^b/((1+i)^b-1)$	0,04326
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40	keine Reinvestition	
AFA Maschinentechnik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n$	0,58203
AFA Elektrotechnik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n$	0,55368
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr					
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	0,98515
Preissteigerung Energie	r	%	3,00	$(1+r)^m =$	0,91514
Preissteigerung PAK	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	0,97059
Preissteigerung O2	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	0,97059
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	0,98515
Preissteigerung Maschinentechnik	r	%	0,25	$(1+r)^m =$	0,99254
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	0,97059
			Bezugsjahr der Kosten	LAWA-	Bezugszeitpunkt
			Jahr 2016	Faktoren	Jahr 2013
4.1 Investitionskosten			brutto	$(1+r)^m$	brutto
Ingenieurbauwerke			4.095.533,75	0,98515	4.034.709,99
maschinelle Ausrüstung			174.335,00	0,99254	173.034,00
elektrotechnische Ausrüstung			88.655,00	1,00000	88.655,00
Baukosten, gesamt			4.358.523,75		4.296.398,99
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)			871.704,75	0,98515	858.758,85
4.1 Investitionskosten			5.230.228,50		5.155.157,84
			Bezugsjahr der Kosten	LAWA-	Bezugszeitpunkt
			Jahr 2016	Faktoren	Jahr 2013
4.2 Betriebskosten			brutto	$(1+r)^m =$	brutto
Energiekosten			48.956,23	0,91514	44.801,89
Personalkosten			10.000,00	0,98515	9.851,49
Wartungs- und Instandhaltungskosten			25.737,47	0,98515	25.355,24
GAK			535.500,00	0,97059	519.751,02
4.2 Betriebskosten			620.193,70		599.759,64
			Investitionskosten	Reinvestitionskosten	
			Bezugszeitpunkt	Bezugszeitpunkt	
			Jahr 2013	Jahr 2013	
4.3 Reinvestitionskosten			brutto	$(1+r)^n / (1+i)^n$	brutto
Ingenieurbauwerke			4.034.709,99	0	0,00
maschinelle Ausrüstung			173.034,00	0,58203	100.710,46
elektrotechnische Ausrüstung			88.655,00	0,55368	49.086,12
Zwischensumme			4.296.398,99		149.796,58
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)			858.758,85	0	0,00
4.3 Reinvestitionskosten			5.155.157,84		149.796,58

Granulierte Aktivkohle in kontinuierlich gespülten Filtern			
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto	LAWA- Faktoren $i^*((1+i)^b)/((1+i)^b-1)$	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto
4.4 Kapitalkosten			
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	4.034.709,99	0,04326	174.551,15
maschinelle Ausrüstung	173.034,00	0,04326	7.485,86
elektrotechnische Ausrüstung	88.655,00	0,04326	3.835,43
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	858.758,85	0,04326	37.151,95
Zwischensumme	5.155.157,84		223.024,39
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	100.710,46	0,04326	4.356,97
elektrotechnische Ausrüstung	49.086,12	0,04326	2.123,58
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Zwischensumme	149.796,58		6.480,56
4.4 Kapitalkosten			229.504,94
		Bezugszeitpunkt Jahr 2013 brutto	
4 Jahreskosten			
Betriebskosten			599.759,64 €/a
Kapitalkosten			229.504,94 €/a
<b>4 Jahreskosten</b>			<b>829.264,58 €/a</b>
4 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser	829.264,58 €/a / 3.600.000 m <sup>3</sup> /a =		0,230 €/m <sup>3</sup>
4 spez. Jahreskosten je m <sup>3</sup> behandeltes Frischwasser	829.264,58 €/a / 2.500.000 m <sup>3</sup> /a =		0,33 €/m <sup>3</sup>
4 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	829.264,58 €/a / 61.000 EW =		13,59 €/EW

# **Kläranlage der Stadt Brühl**

## **Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Brühl**

### **Anlage F**

#### **Kostenschätzung Variante 3 Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration**

Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauwerke GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	elektrotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
<b>1 Investitionskosten</b>								
1.1	Baustelleneinrichtung				256.000,00	32.000,00	10.000,00	298.000,00
	BE Bauwerksarbeiten (ca. 10% der IB)	1	psch.	236.000,00	236.000,00			
	Baufeldfreimachung	1	psch.	20.000,00	20.000,00			
	BE Maschinelle Ausrüstung (ca. 3% der MA)	1	psch.	32.000,00		32.000,00		
	BE Elektrotechnische Ausrüstung (ca. 3% der EA)	1	psch.	10.000,00			10.000,00	
1.2	Ozonkontaktbecken				481.000,00	62.000,00	31.000,00	574.000,00
	Erdaushub und Abfuhr	2600	m³	25,00	65.000,00			
	Baugrubenverbau	700	m²	180,00	126.000,00			
	Füllkies	800	m³	35,00	28.000,00			
	Stahlbeton	500	m³	325,00	162.500,00			
	Schalung	950	m²	90,00	85.500,00			
	Montageabdeckungen	2	St	7.000,00	14.000,00			
	Zulaufschieber DN1000, elektrisch	2	St	10.000,00		20.000,00		
	Beckeninstallation	1	pschl.	20.000,00		20.000,00		
	Absperrschieber Ozonleitungen	2	St	4.000,00		8.000,00		
	Mengenmessungen Ozonleitungen	2	St	7.000,00		14.000,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	31.000,00			31.000,00	
1.3	Dynasandfilter				1.227.000,00	117.500,00	58.750,00	1.403.250,00
	Erdaushub und Abfuhr	2700	m³	25,00	67.500,00			
	Baugrubenverbau	800	m²	180,00	144.000,00			
	Füllkies	900	m³	35,00	31.500,00			
	Dynasandfilter in Betonbauweise	30	St	27.000,00	810.000,00			
	Erstbefüllung mit Quarzsand	560	t	150,00	84.000,00			
	Stahlbeton Zu- und Ablaufrippen	180	m³	325,00	58.500,00			
	Schalung Zu- und Ablaufrinne	350	m²	90,00	31.500,00			
	Kompressoranlage einschl. Verrohrung	1	St	95.000,00		95.000,00		
	Zulaufschieber, elektrisch	3	St	7.500,00		22.500,00		
	Elektrotechnische Ausrüstung (50% der MA)	1	pschl.	58.750,00			58.750,00	
1.4	Vorschacht Pumpwerk				81.750,00	0,00	0,00	81.750,00
	Erdaushub und Abfuhr	300	m³	25,00	7.500,00			
	Baugrubenverbau	175	m²	180,00	31.500,00			
	Füllkies	150	m³	35,00	5.250,00			
	Stahlbeton	60	m³	325,00	19.500,00			
	Schalung	120	m²	90,00	10.800,00			
	Schachtausrüstung	1	pschl.	7.200,00	7.200,00			
1.5	Kanalbau				333.250,00	0,00	0,00	333.250,00
	Erdaushub und Abfuhr	1200	m³	25,00	30.000,00			
	Baugrubenverbau	1200	m²	55,00	66.000,00			
	Füllkies	1100	m³	35,00	38.500,00			
	Rohrleitung DN 600 PEHD	5	m	750,00	3.750,00			
	Rohrleitung DN 700 PEHD	15	m	1.000,00	15.000,00			
	Rohrleitung DN 1000 PEHD	100	m	1.500,00	150.000,00			
	Schächte DN1500 PEHD	2	St	15.000,00	30.000,00			

Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration								
Pos.	Kurztext	Menge	Einh.	EP [€]	Ingenieur- bauerwerke GP [€]	maschinelle Ausrüstung GP [€]	elerotechnische Ausrüstung GP [€]	Gesamtkosten GP [€]
1.6	Bodenplatte Sauerstofftank				9.820,00	0,00	0,00	9.820,00
	Erdaushub und Abfuhr	36	m³	25,00	900,00			
	Füllkies	12	m³	35,00	420,00			
	Stahlbeton	22	m³	325,00	7.150,00			
	Schalung	15	m²	90,00	1.350,00			
1.7	Betriebsgebäude				106.700,00	2.500,00	2.500,00	111.700,00
	Erdaushub und Abfuhr	60	m³	25,00	1.500,00			
	Füllkies	10	m³	35,00	350,00			
	Stahlbeton	50	m³	325,00	16.250,00			
	Schalung	20	m²	90,00	1.800,00			
	Mauerwerk	100	m²	140,00	14.000,00			
	Sektionaltor	1	St	8.000,00	8.000,00			
	Stahltür	2	St	1.000,00	2.000,00			
	Fenster	2	St	750,00	1.500,00			
	Dach einschl. Dämmung	150	m²	350,00	52.500,00			
	Deckenunterschalung	110	m²	80,00	8.800,00			
	Wasserversorgung, Spülbecken	1	pschl.	2.500,00		2.500,00		
	Beleuchtung, Gebäudeinstallation	1	pschl.	2.500,00			2.500,00	
1.8	Ozonanlage				0,00	890.051,52	267.015,46	1.157.066,97
	Anlage	1	pschl.	850.000,00		850.000,00		
	Ozonerzeuger 8 hg/h	2	St					
	Wärmetauscher	2	St					
	Eintragssystem mit 26 Diffusoren	2	pschl.					
	Restozonvernichter	2	St					
	Raumluftüberwachung	1	St					
	Verrohrung	2	St					
	Armaturen	1	pschl.					
	Über- und Unterdrucksicherung	1	pschl.					
	Anlagensteuerung	2	St					
	Montage, Inbetriebnahme, Einweisung	1	pschl.					
	Pumpwerk für die WT inkl. Verrohrung	1	pschl.	40.051,52		40.051,52		
	Elektrotechnische Ausrüstung (30% der MA)	1	pschl.	267.015,46			267.015,46	
1.9	Straßen- und Wegebau				123.600,00	0,00	0,00	123.600,00
	Asphaltflächen	620	m²	120,00	74.400,00			
	Pflasterflächen	410	m²	120,00	49.200,00			
Baukosten, gesamt, netto					2.619.120,00	1.104.051,52	369.265,46	4.092.436,97
Investitionskosten						netto [€]	MwSt [€]	brutto [€]
Ingenieurbauerwerke						2.619.120,00	497.632,80	3.116.752,80
maschinelle Ausrüstung						1.104.051,52	209.769,79	1.313.821,31
elektrotechnische Ausrüstung						369.265,46	70.160,44	439.425,89
Baukosten, gesamt						4.092.436,97	777.563,03	4.870.000,00
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)						818.487,39	155.512,61	974.000,00
<b>Investitionskosten</b>						<b>4.910.924,37</b>	<b>933.075,63</b>	<b>5.844.000,00</b>

Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration				
<b>2 Betriebskosten</b>				
2.1 Energiekosten				
2.1.1	Pumpwerk zum Heben des Abwassers			
	Jahresmenge		3.600.000 m <sup>3</sup>	
	mittlere Fördermenge	Q	114 l / s	
	Förderhöhe	H	4,00 m	
	Wirkungsgrad	η	0,65	
	Energiebedarf $P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	6,89 kW	
	Jahresenergiebedarf		60.369,23 kWh	
	Strompreis		0,27 € / kWh	
	Energiekosten		16.299,69 € / a	16.299,69
2.1.2	Pumpwerk für Kühlwasser			
	mittlere Fördermenge	Q	2,5 l / s	
	Förderhöhe	H	55,00 m	
	Wirkungsgrad	η	0,65	
	Energiebedarf $P = \rho * g * Q * H / (1000 * \eta)$	P	2,08 kW	
	Jahresenergiebedarf		18.178,68 kWh	
	Strompreis		0,27 € / kWh	
	Energiekosten		4.908,24 € / a	4.908,24
2.1.3	Ozonanlage			
	Ozon		30 t / a	
	spez. Energiebedarf inkl. Verdampfer u. Restozonvernichter		11.000 kWh / t	
	Jahresenergiebedarf		330.000 kWh	
	Strompreis		0,27 € / kWh	
	Energiekosten		89.100,00 € / a	89.100,00
2.1.4	Sandfiltration			
	Jahresmenge		3.600.000 m <sup>3</sup>	
	spez. Energiebedarf		10 Wh / m <sup>3</sup>	
	Jahresenergiebedarf		36.000 kWh	
	Strompreis		0,27 € / kWh	
	Energiekosten		9.720,00 € / a	9.720,00
2.1.5	Kleinverbraucher, pauschal			
	Jahresenergiebedarf		50.000 kWh	
	Strompreis		0,27 € / kWh	
	Energiekosten		13.500,00 € / a	13.500,00
2.1	Energiekosten, netto			133.527,94
2.2	Personalkosten			
	Mitarbeiter	50%	von 40.000,00	20.000,00
2.2	Personalkosten			20.000,00
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten			
	Ingenieurbauwerke, anteilig der Baukosten	0,5%	von 2.619.120,00	13.095,60
	maschinelle Ausrüstung, anteilig der Baukosten	1,0%	von 1.104.051,52	11.040,52
	elektrotechnische Ausrüstung, anteilig der Baukosten	2,0%	von 369.265,46	7.385,31
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten, netto			31.521,42
2.4	Flüssigsauerstoff			
	Jahresmenge		260 t	
	spez. Kosten		200,00 € / t	
	Jahreskosten		52.000,00 € / a	52.000,00
2.4	Flüssigsauerstoff, netto			52.000,00

Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration					
2	Betriebskosten	netto [€/a]	MwSt [€/a]	brutto [€/a]	
2.1	Energiekosten	133.527,94	25.370,31	158.898,25	
2.2	Personalkosten	20.000,00	0,00	20.000,00	
2.3	Wartungs- und Instandhaltungskosten	31.521,42	5.989,07	37.510,49	
2.4	Flüssigsauerstoff	52.000,00	9.880,00	61.880,00	
<b>2</b>	<b>Betriebskosten</b>	<b>237.049,36</b>	<b>41.239,38</b>	<b>278.288,74</b>	
<b>3 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt: Jahr 2016</b>					
Bezugsjahr der Kosten	K	2016			
Bezugszeitpunkt	X	2016	Berechnungen		
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a	X-K =	0	
Zinsen	i	%	3,00		
Bezugszeitraum	b	a	40	LAWA - Faktoren	
Kapitalwiedergewinnungsfaktor			$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1) =$	0,04326	
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40	keine Reinvestition	
AFA Maschinenteknik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n =$	0,58203
AFA Elektrotechnik	n	a	20	$(1+r)^n / (1+i)^n =$	0,55368
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr					
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Energie	r	%	3,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung PAK	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung O2	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Maschinenteknik	r	%	0,25	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00	$(1+r)^m =$	1,00000
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00	$(1+r)^m =$	1,00000
		Bezugsjahr der Kosten	LAWA-	Bezugszeitpunkt	
		Jahr 2016	Faktoren	Jahr 2016	
3.1	Investitionskosten	brutto [€]	$(1+r)^m$	brutto [€]	
	Ingenieurbauwerke	3.116.752,80	1,00000	3.116.752,80	
	maschinelle Ausrüstung	1.313.821,31	1,00000	1.313.821,31	
	elektrotechnische Ausrüstung	439.425,89	1,00000	439.425,89	
	Baukosten, gesamt	4.870.000,00		4.870.000,00	
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	974.000,00	1,00000	974.000,00	
<b>3.1</b>	<b>Investitionskosten</b>	<b>5.844.000,00</b>		<b>5.844.000,00</b>	
		Bezugsjahr der Kosten	LAWA-	Bezugszeitpunkt	
		Jahr 2016	Faktoren	Jahr 2016	
3.2	Betriebskosten	brutto [€]	$(1+r)^m =$	brutto [€]	
	Energiekosten	158.898,25	1,00000	158.898,25	
	Personalkosten	20.000,00	1,00000	20.000,00	
	Wartungs- und Instandhaltungskosten	37.510,49	1,00000	37.510,49	
	Flüssigsauerstoff	61.880,00	1,00000	61.880,00	
<b>3.2</b>	<b>Betriebskosten</b>	<b>278.288,74</b>		<b>278.288,74</b>	
		Investitionskosten	Reinvestitionskosten		
		Bezugszeitpunkt	Bezugszeitpunkt		
		Jahr 2016	Jahr 2016		
3.3	Reinvestitionskosten	brutto [€]	$(1+r)^n / (1+i)^n$	brutto [€]	
	Ingenieurbauwerke	3.116.752,80	0	0,00	
	maschinelle Ausrüstung	1.313.821,31	0,58203	764.679,47	
	elektrotechnische Ausrüstung	439.425,89	0,55368	243.299,46	
	Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	974.000,00	0	0,00	
<b>3.3</b>	<b>Reinvestitionskosten</b>	<b>5.844.000,00</b>		<b>1.007.978,94</b>	

Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration			
	In- und Reinvestitionen	LAWA-	Kapitalkosten
	Bezugszeitpunkt	Faktoren	Bezugszeitpunkt
3.4 Kapitalkosten	Jahr 2016		Jahr 2016
	brutto [€]	$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$	brutto [€]
<b>Investitionskosten</b>			
Ingenieurbauwerke	3.116.752,80	0,04326	134.838,14
maschinelle Ausrüstung	1.313.821,31	0,04326	56.839,03
elektrotechnische Ausrüstung	439.425,89	0,04326	19.010,61
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	974.000,00	0,04326	42.137,56
<b>Investitionskosten</b>	<b>5.844.000,00</b>	<b>0,04326</b>	<b>252.825,34</b>
<b>Reinvestitionskosten</b>			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	764.679,47	0,04326	33.081,85
elektrotechnische Ausrüstung	243.299,46	0,04326	10.525,71
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
<b>Reinvestitionskosten</b>	<b>1.007.978,94</b>	<b>0,04326</b>	<b>43.607,57</b>
<b>3.4 Kapitalkosten</b>			<b>296.432,90</b>
<b>3 Jahreskosten</b>			
Betriebskosten		Bezugszeitpunkt Jahr 2016 brutto	278.288,74 €/a
Kapitalkosten			296.432,90 €/a
<b>3 Jahreskosten</b>			<b>574.721,64 €/a</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser</b>	<b>574.721,64 €/a / 3.600.000 m³/a =</b>		<b>0,160 €/m³</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser</b>	<b>574.721,64 €/a / 2.500.000 m³/a =</b>		<b>0,230 €/m³</b>
<b>3 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert</b>	<b>574.721,64 €/a / 61.000 EW =</b>		<b>9,42 €/EW</b>
<b>4 Investitionskosten, Betriebskosten, Reinvestitionskosten, Kapitalkosten, Jahreskosten für den Bezugszeitpunkt: Jahr 2013</b>			
Bezugsjahr der Kosten	K	2016	
Bezugszeitpunkt	X	2013	Berechnungen
Jahre von Bezugsjahr der Kosten zum Bezugszeitpunkt	m	a	X-K = -3
Zinsen	i	%	3,00
Bezugszeitraum	b	a	40
Kapitalwiedergewinnungsfaktor			$i^*(1+i)^b / ((1+i)^b - 1)$ 0,04326
AFA Ingenieurbauwerke, Nebenkosten	n	a	40 keine Reinvestition
AFA Maschinentechnik	n	a	20 $(1+r)^n / (1+i)^n$ 0,58203
AFA Elektrotechnik	n	a	20 $(1+r)^n / (1+i)^n$ 0,55368
Preisentwicklung bis zum Bezugsjahr			
Preissteigerung Personal, Wartung- und Instandhaltung	r	%	0,50 $(1+r)^m =$ 0,98515
Preissteigerung Energie	r	%	3,00 $(1+r)^m =$ 0,91514
Preissteigerung PAK	r	%	1,00 $(1+r)^m =$ 0,97059
Preissteigerung O2	r	%	1,00 $(1+r)^m =$ 0,97059
Preissteigerung Bautechnik, Nebenkosten	r	%	0,50 $(1+r)^m =$ 0,98515
Preissteigerung Maschinentechnik	r	%	0,25 $(1+r)^m =$ 0,99254
Preissteigerung Elektrotechnik	r	%	0,00 $(1+r)^m =$ 1,00000
Preissteigerung Allgemein	r	%	1,00 $(1+r)^m =$ 0,97059

Ozonreaktor mit nachgeschalteter Sandfiltration			
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016	LAWA-Faktoren (1 + r)^m	Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.1 Investitionskosten	brutto		brutto
Ingenieurbauwerke	3.116.752,80	0,98515	3.070.465,15
maschinelle Ausrüstung	1.313.821,31	0,99254	1.304.016,71
elektrotechnische Ausrüstung	439.425,89	1,00000	439.425,89
Baukosten, gesamt	4.870.000,00		4.813.907,76
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	974.000,00	0,98515	959.534,89
<b>4.1 Investitionskosten</b>	<b>5.844.000,00</b>		<b>5.773.442,65</b>
	Bezugsjahr der Kosten Jahr 2016	LAWA-Faktoren (1 + r)^m =	Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.2 Betriebskosten	brutto		brutto
Energiekosten	158.898,25	0,91514	145.414,40
Personalkosten	20.000,00	0,98515	19.702,98
Wartungs- und Instandhaltungskosten	37.510,49	0,98515	36.953,42
Flüssigsauerstoff	61.880,00	0,97059	60.060,12
<b>4.2 Betriebskosten</b>	<b>278.288,74</b>		<b>262.130,91</b>
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013	LAWA-Faktoren (1 + r)^n / (1 + i)^n	Reinvestitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.3 Reinvestitionskosten	brutto		brutto
Ingenieurbauwerke	3.070.465,15	0	0,00
maschinelle Ausrüstung	1.304.016,71	0,58203	758.972,93
elektrotechnische Ausrüstung	439.425,89	0,55368	243.299,46
Zwischensumme	4.813.907,76		1.002.272,40
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	959.534,89	0	0,00
<b>4.3 Reinvestitionskosten</b>	<b>5.773.442,65</b>		<b>1.002.272,40</b>
	Investitionskosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013	LAWA-Faktoren i*(1+i)^b)/((1+i)^b-1)	Kapitalkosten Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4.4 Kapitalkosten	brutto		brutto
Investitionskosten			
Ingenieurbauwerke	3.070.465,15	0,04326	132.835,62
maschinelle Ausrüstung	1.304.016,71	0,04326	56.414,86
elektrotechnische Ausrüstung	439.425,89	0,04326	19.010,61
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	959.534,89	0,04326	41.511,76
Zwischensumme	5.773.442,65		249.772,86
Reinvestitionskosten			
Ingenieurbauwerke	0,00	0,04326	0,00
maschinelle Ausrüstung	758.972,93	0,04326	32.834,97
elektrotechnische Ausrüstung	243.299,46	0,04326	10.525,71
Nebenkosten (Ingenieurhonorare, Prüfgebühren, etc. / 20% der Baukosten)	0,00	0,04326	0,00
Zwischensumme	1.002.272,40		43.360,69
<b>4.4 Kapitalkosten</b>			<b>293.133,54</b>
			Bezugszeitpunkt Jahr 2013
4 Jahreskosten			brutto
Betriebskosten			262.130,91 €/a
Kapitalkosten			293.133,54 €/a
<b>4 Jahreskosten</b>			<b>555.264,46 €/a</b>
4 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Abwasser	555.264,46 €/a / 3.600.000 m³/a =		0,154 €/m³
4 spez. Jahreskosten je m³ behandeltes Frischwasser	555.264,46 €/a / 2.500.000 m³/a =		0,22 €/m³
4 spez. Jahreskosten je Einwohnerwert	555.264,46 €/a / 61.000 EW =		9,10 €/EW

# **Kläranlage der Stadt Brühl**

## **Machbarkeitsstudie zur Elimination von Mikroschadstoffen auf der Kläranlage Brühl**

### **Anlage G**

#### **Messprogramm des Screenings und Monitorings**

Substanzgruppe	Parameter	Erweitertes Monitoring				Gesamt Volumen [L]	Anzahl Monitoring (TW)			Volumen [L]	
		Zulauf Biologie		Ablauf Kläranlage			Zulauf Biologie	Ablauf Kläranlage			
		RW	TW	RW	TW		TW	TW			
Standard Abwasserparameter	DOC	2	2	2	2	8	1	5	5	10	0,25
	CSB	2	2	2	2	8					
	AFS	2	2	2	2	8					
	Bromid	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Nitrit	2	2	2	2	8					
	SAK	2	2	2	2	8		5	5	10	
Arzneimittelwirkstoffe, Pestizide, Korrosionsschutzmittel	10,11-Dihydro-10,11-dihydroxycarbamazepin	2	2	2	2	8	1				0,75
	1H-Benzotriazol	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Bezafibrat	2	2	2	2	8					
	Bisoprolol	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Carbamazepin	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Ciprofloxacin	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Clarithromycin	2	2	2	2	8		5	5	10	
	DEET	2	2	2	2	8					
	Diclofenac	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Diuron	2	2	2	2	8					
	Ibuprofen	2	2	2	2	8					
	Isoproturon	2	2	2	2	8					
	Losartan	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Mecoprop P	2	2	2	2	8					
	Metoprolol	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Sotalol	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Sulfamethoxazol	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Terbutryn	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Valsartan	2	2	2	2	8		5	5	10	
	Σ 4, 5-Methyl-1H-benzotriazol	2	2	2	2	8					
Süßstoffe	Acesulfam K	2	2	2	2	8		5	5	10	
Röntgenkontrastmittel	Amidotrizoesäure	2	2	2	2	8					
	Iohexol	2	2	2	2	8					
	Iomeprol	2	2	2	2	8					
	Iopamidol	2	2	2	2	8					
	Iopromide	2	2	2	2	8					
	Ioversol	2	2	2	2	8					
Weitere Substanzen	Gabapentin	2	2	2	2	8					
	Guanylharnstoff	2	2	2	2	8					
	Melamin	2	2	2	2	8					
Profluorierte Substanzen	PFOA	2	2	2	2	8	1	5	5	10	
	PFBA	2	2	2	2	8					
	PFBS	2	2	2	2	8					
	PFOS	2	2	2	2	8		5	5	10	
Östrogene Aktivität	A-YES	2	2	2	2	8	1				
Moschusduftstoffe	Galaxolid	2	2	2	2	8	1				
	Tonalid	2	2	2	2	8					
Ozonzehrungsversuche	5 mg O3/L			2	2	4					
	10 mg O3/L			2	2	4					
	Bestimmung Bromat nach Ozonung			6	6						
	Bestimmung Nitrosamine nach Ozonung			6	6						
							13	TW			1
							5	RW			