

Kläranlage Borken

4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie
Dezember 2014 | 1. Ausfertigung
Projektnummer 0132 067





Kläranlage Borken

4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen

Machbarkeitsstudie
Dezember 2014 | 1. Ausfertigung
Projektnummer 0132 067

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

Aufgestellt:
Bochum, im Dezember 2014
bie-stei-ka-ko/ga

Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

Gesamtinhaltsverzeichnis

I Textteil

- Erläuterungsbericht
- Anlagen

II Zeichnungen

Blatt	Titel	Maßstab	Verwaltungsnummer
1	Lageplan, Variante 1 PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle	1 : 250	030 006 01 00
2	Lageplan, Variante 3 nachgeschaltete GAK-Filter	1 : 250	030 006 02 00
3	Lageplan, Variante 4 Ozonung	1 : 250	030 006 03 00
4	Lageplan, Variante 5 Ozonung + Schönungsteich	1 : 250	030 006 04 00
5	Verfahrensschema, Variante 1 PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle	1: -	030 084 01 00
6	Verfahrensschema, Variante 2 PAK-Dosierung in den Filterüberstau	1: -	030 084 02 00
7	Verfahrensschema, Variante 3 nachgeschaltete GAK-Filter	1: -	030 084 03 00
8	Verfahrensschema, Variante 4 Ozonung	1: -	030 084 04 00
9	Verfahrensschema, Variante 5 Ozonung + Schönungsteich	1: -	030 084 05 00

Auftraggeber:

Stadt Borken
Im Piepershagen 17
46325 Borken

Telefon: 02861 939 0
Telefax: 02861 939 253

Projektleiter:

Herr Dipl.-Ing. Manfred Bessling

Telefon: 02861 91330
manfred.bessling@borken.de

Bearbeitung durch:

TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH
Universitätsstraße 74
44789 Bochum

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

Frau Dr.-Ing. Manja Steinke

Telefon: 0234 33305-24
m.steinke@tum-bochum.de

Herr Dr.-Ing. Jan Mauriz Kaub

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

Herr Dipl.-Ing. Norbert Biebersdorf

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

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Zugrunde liegende Unterlagen	2
3	Belastungsdaten Hydraulik	2
4	Reinigungsanforderungen	4
5	Anlagenbestand	4
5.1	Zulaufpumpwerk	4
5.2	Mechanische Reinigungsstufe	5
5.2.1	Regenüberlaufbecken (RÜB).....	5
5.2.2	Rechenanlage	5
5.2.3	Sandfang	5
5.2.4	Misch- und Ausgleichbecken	5
5.2.5	Vorklärung	6
5.2.6	Prozesswasserspeicherung	6
5.3	Biologische Reinigungsstufe.....	6
5.3.1	Zwischenpumpwerk	6
5.3.2	Bio-P-Becken.....	7
5.3.3	Belebungsbecken	7
5.3.4	Phosphatfällung.....	7
5.3.5	Nachklärung	7
5.4	Weitergehende Reinigung	8
5.4.1	Hebwerk zur Filtration	8
5.4.2	Abwasserfiltration	8
5.5	Mengenmess- und Probenahmestation	10
5.6	Schlammbehandlung	10
6	Spurenstoffe im Wasserkreislauf	11
6.1	Einleitung.....	11
6.2	Charakterisierung des Verhaltens von anthropogenen Spurenstoffen.....	11
7	Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen	12
7.1	Überblick	12
7.2	Adsorption	13

7.2.1	Grundlagen.....	13
7.2.2	Einsatz Aktivkohle in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination	18
7.2.2.1	Pulveraktivkohle	18
7.2.2.2	Granulierte Aktivkohle.....	20
7.3	Ozonung.....	21
7.3.1	Grundlagen.....	21
7.3.1.1	Einsatz und Wirkung von Ozon.....	21
7.3.1.2	Ozonanwendung.....	22
7.3.2	Einsatz von Ozon in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination	24
8	Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen.....	25
8.1	Beschickungsmenge.....	25
8.2	Verfahrensfestlegung.....	27
8.3	Randbedingungen	27
8.4	Varianten	28
8.4.1	Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle	28
8.4.1.1	Allgemein.....	28
8.4.1.2	Ausführung	29
8.4.2	Variante 2: PAK-Dosierung in den Filterüberstau.....	31
8.4.2.1	Allgemein.....	31
8.4.2.2	Ausführung	32
8.4.3	Variante 3: Nachgeschalte Filtration über granulierte Aktivkohle.....	33
8.4.3.1	Allgemeines	33
8.4.3.2	Ausführung	35
8.4.4	Variante 4: Ozonung.....	36
8.4.4.1	Allgemeines	36
8.4.4.2	Ausführung	37
8.4.5	Variante 5: Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich.....	39
8.4.5.1	Allgemeines	39
8.4.5.2	Ausführung	40
8.5	Ergebnisübersicht Varianten.....	42
9	Kosten	44
9.1	Allgemein.....	44

9.2	Investitionskosten	44
9.3	Betriebskosten	45
9.4	Jahreskosten	46
9.5	Sensitivitätsanalyse	48
10	Bewertung	49
11	Zusammenfassung	52
12	Literaturverzeichnis.....	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Investitionskosten für die Varianten 1 bis 5.....	44
Tabelle 2:	Betriebskosten für die Varianten 1 bis 5.....	46
Tabelle 3:	Jahreskosten für die Varianten 1 bis 5.....	47
Tabelle 4:	Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 5.....	50

Bildverzeichnis

Bild 1:	Volumenstrom Ablauf KA Borken (2010 bis 2012)	3
Bild 2:	Summenhäufigkeit der Ablaufmengen KA Borken (2010 bis 2012).....	3
Bild 3	Fließschema Abwasserbehandlungsstufen.....	4
Bild 4	Vereinfachtes Fließschema zum Betrieb der biologischen Stufe.....	6
Bild 5:	Schnitt Filterbehälter (Ausführungszeichnungen, 2001).....	9
Bild 6:	Filtrationsgebäude und Zulaufpumpwerk Filtration.....	10
Bild 7:	Fließschema Schlammbehandlung.....	10
Bild 8:	Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013)	13
Bild 9:	Grundbegriffe der Adsorption.....	14
Bild 10:	Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001)	14

Bild 11:	Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998)	15
Bild 12:	Adsorptionsverhalten zweier unterschiedlicher Stoffe im Festbettadsorber (DVGW W 239).....	16
Bild 13:	Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985)..	17
Bild 14:	Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert)	18
Bild 15:	Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert)	23
Bild 16:	Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensdorf (Abegglen u. a., 2009)	24
Bild 17:	Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft).....	26
Bild 18:	Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft).....	26
Bild 19:	Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination	27
Bild 20:	Lageplanausschnitt KA Borken mit Teilanfüllung Teich 1 (schraffiert).....	28
Bild 21:	Blockschema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle	29
Bild 22:	Zulaufschacht und Pumpensumpf des Schneckenhebewerkes der Filtration	30
Bild 23:	Lageplanausschnitt Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle.....	31
Bild 24:	Blockschema Variante 2: PAK-Dosierung.....	32
Bild 25:	Blockschema Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration.....	34
Bild 26:	Lageplanausschnitt Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration	36
Bild 27:	Blockschema Variante 4: Ozonung.....	37
Bild 28:	Lageplanausschnitt Variante 4: Ozonung	39
Bild 29:	Blockschema Variante 5: Ozonung + Schönungsteich.....	39
Bild 30:	Lageplanausschnitt Variante 5: Ozonung + Schönungsteich	41
Bild 31:	Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den Jahreskosten der Varianten	48

Teil B: Anlagen

Anlage 1: Auslegung Varianten 1 bis 5

Anlage 2: Investitionskosten Varianten 1 bis 5

Anlage 3: Betriebskosten Varianten 1 bis 5

Anlage 4: Jahreskosten Varianten 1 bis 5

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

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

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

Nicht zuletzt lassen die Aktivitäten im Umweltausschuss des Europäischen Parlaments mit der Aufnahme von erstmals drei Pharmaka-Wirkstoffen in die sogenannte „Watch-List“ darauf schließen, dass die 4. Reinigungsstufe zukünftig Pflicht werden könnte.

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

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

Die Stadt Borken hat die TUTTAHS & MEYER Ing.-GmbH beauftragt, für die Kläranlage Borken eine solche Studie auszuarbeiten.

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

Die Machbarkeitsstudie gliedert sich in folgende Punkte auf:

- Datenauswertung mit Ermittlung der für die Auslegung maßgeblichen Teilstrommenge;
- Auslegung der insgesamt 5 Verfahrenskombinationen;
- Darstellung der Varianten im Lageplan und im Verfahrensfliessbild (RI-Schema);
- Beschreibung und Bewertung der Verfahren;
- Wirtschaftliche Bewertung der Konzepte anhand der Jahreskosten; dazu werden die Investitionskosten und die Betriebskosten abgeschätzt;
- Zusammenfassung der Bewertung in einer Entscheidungsmatrix.

2 Zugrunde liegende Unterlagen

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

- Bedarfsplanung für die Kläranlage Borken, 2012, TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH,
- Betriebsanweisung für das Zentralklärwerk Borken, Stand 2012,
- Genehmigungsentwurf zur Erweiterung der Zentralkläranlage Borken, 1990, TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH,
- Änderungsanzeige für die Erweiterung des Zentralklärwertes Borken, 1980, TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft mbH,
- Auszug Betriebstagebuch Kläranlage Borken, Januar 2010 bis Dezember 2012.

3 Belastungsdaten Hydraulik

Die Bemessungswerte der Kläranlage Borken sind im Folgenden aufgeführt:

Trockenwetterzufluss	1.200 m ³ /h	ca. 333 l/s
Höchstwasserabfluss	2.400 m ³ /h (1.420 m ³ /0,5 h)	ca. 667 l/s

Die Jahresschmutzwassermenge gemäß dem Erlaubnisbescheid vom 20.04.2009 beträgt:

Jahresschmutzwassermenge	5.210.000 m ³ /a
--------------------------	-----------------------------

Für die Bemessung der vierten Reinigungsstufe, die entsprechend des gewählten Verfahrens vor der bestehenden oder nach der Raumfiltration eingebunden wird, sind die Ablaufmengen der Kläranlage entscheidend.

Bild 1 stellt die Ganglinie der Abwassermengen im Ablauf der Filtration als Stundenwerte dar. Die mittlere Ablaufmenge beträgt 706 m³/h. Maximal wurden 2.149 m³/h im Betrachtungszeitraum abgeleitet.

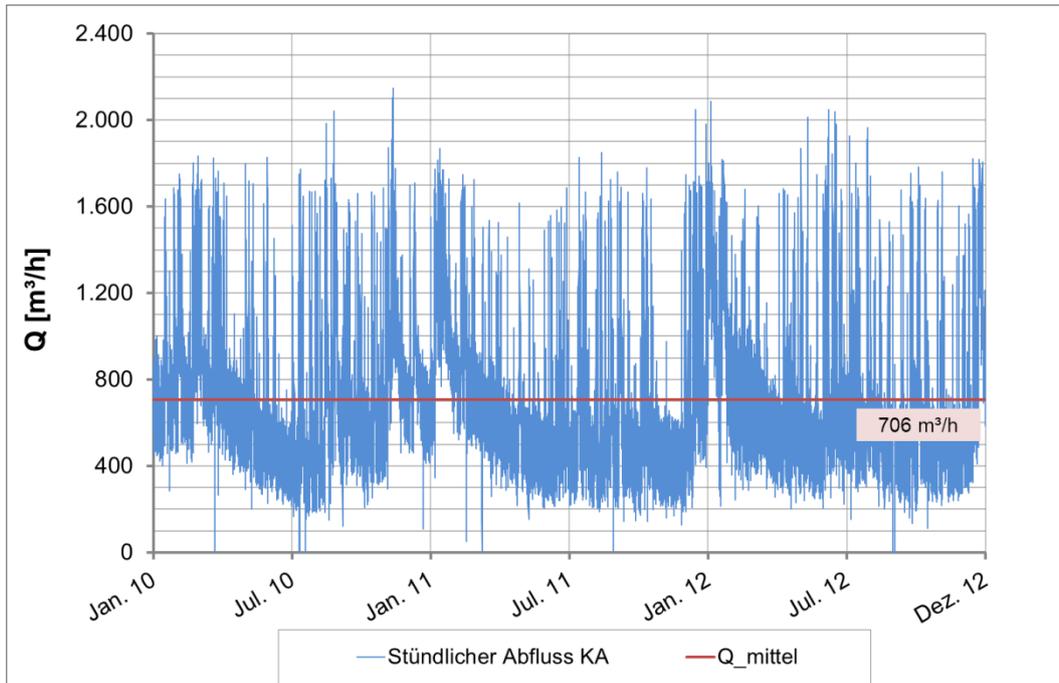


Bild 1: Volumenstrom Ablauf KA Borken (2010 bis 2012)

Die Summenhäufigkeit der Ablaufwassermengen zeigt **Bild 2**. 85 % der Werte liegen unter 1.040 m³/h. Das 99-Percentil beträgt 1.701 m³/h.

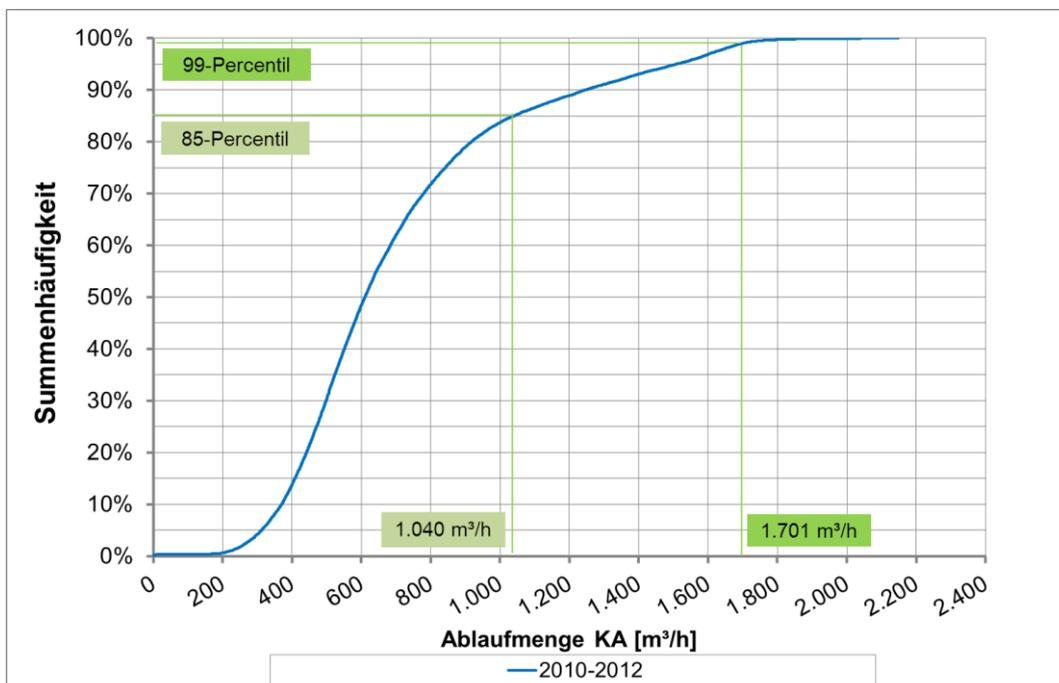


Bild 2: Summenhäufigkeit der Ablaufmengen KA Borken (2010 bis 2012)

4 Reinigungsanforderungen

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

Folgende Überwachungswerte sind einzuhalten:

Chemischer Sauerstoffbedarf	72 mg/l	
Biochemischer Sauerstoffbedarf	8 mg/l	
Ammoniumstickstoff	5 mg/l	($\geq 12\text{ °C}$)
Stickstoff, anorganisch	11 mg/l	($\geq 12\text{ °C}$)
Phosphor, gesamt	1 mg/l	

5 Anlagenbestand

Ein vereinfachtes Fließschema zu den Abwasserbehandlungsstufen auf der Kläranlage Borken stellt **Bild 3** dar. Die Beschickung der Kläranlage erfolgt über das Zulaufpumpwerk (Schneckenpumpwerk). Zur Entlastung ist ein Regenüberlaufbecken (Durchlaufbecken) im Nebenschluss angeordnet. Die Abwasservorbehandlung erfolgt mit einer Rechenanlage, einem belüfteten Langsandfang und einem Vorklärbecken. Nach dem Sandfang ist eine Entlastung zum Misch- und Ausgleichsbecken möglich. Die biologische Hauptstufe wird aus einem Bio-P-Becken und 2 Belebungsbecken (Parallelbetrieb) gebildet. Zur Abtrennung des Belebtschlammes sind 3 Nachklärbecken vorhanden. Eine weitergehende Abwasserbehandlung erfolgt mit einer Raumfiltration. Die Einleitung erfolgt in die Bocholter Aa. Zusätzlich zum vorhandenen Prozesswasserspeicher wird ein Rundbecken (vormals Denitrifikationsbecken) zur Speicherung der Prozesswässer und der angelieferten Abwässer der Fa. Garvert genutzt.

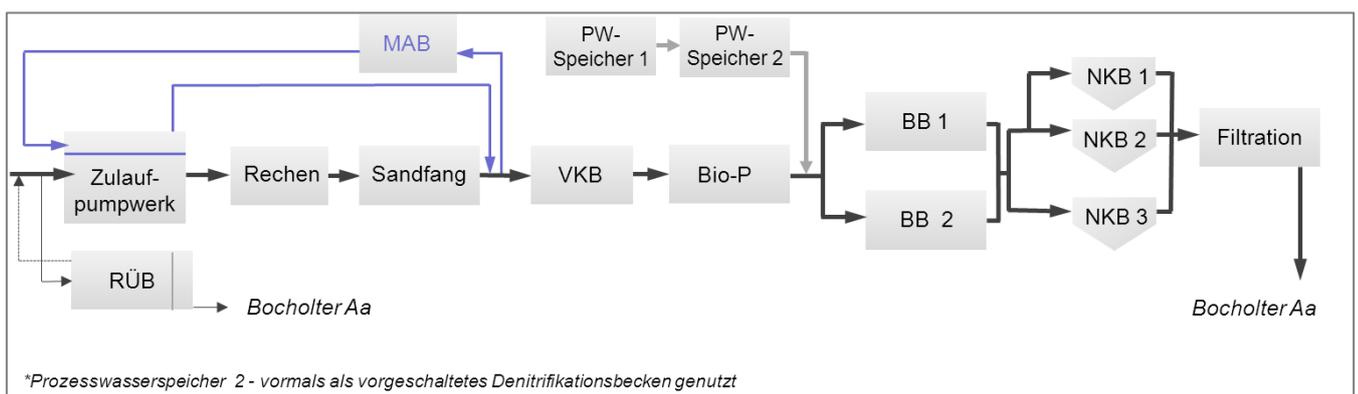


Bild 3 Fließschema Abwasserbehandlungsstufen

5.1 Zulaufpumpwerk

Zur hydraulischen Anhebung des anfallenden Abwassers auf das Wasserspiegelniveau der Kläranlage ist ein Abwasserhebewerk erforderlich, das als Schneckenpumpwerk ausgeführt wurde. Insgesamt sind im bestehenden Hebewerk sechs Schneckenpumpen installiert, die über 4 Pumpensümpfe

beschickt werden. Schnecke 5 dient der Entleerung des MAB und Schnecke 6 der Beschickung des RÜB.

Bestand: Anzahl Schnecken = 6 Stück

5.2 Mechanische Reinigungsstufe

Der Abwasserstrom durchfließt hinter dem Abwasserpumpwerk die mechanische Reinigungsstufe, bestehend aus Regenüberlaufbecken, Rechenanlage, Sandfang, Misch- und Ausgleichsbecken und Vorklärbecken. Zur Speicherung der Prozesswässer und der Abwässer der Fa. Garvert stehen zwei Speicher zur Verfügung.

5.2.1 Regenüberlaufbecken (RÜB)

Das Regenüberlaufbecken ist als Durchlaufbecken im Nebenschluss ausgebildet. Dem Becken ist ein Rechen mit einer Stabweite von 20 mm vorgeschaltet. Die weitergehende Schmutzstoffreduktion erfolgt durch Sedimentation im Regenüberlaufbecken. Das stärker verschmutzte Mischwasser wird über eine Drosselstrecke der Kläranlage zur Behandlung zugeleitet. Das schwächer belastete Regenwasser wird nach Einstau des nutzbaren Beckenvolumens über den Klärüberlauf in den Vorfluter eingeleitet.

Bestand: $V = 4.500 \text{ m}^3$

5.2.2 Rechenanlage

Die Rechenanlage wurde 2009 erneuert und ist zweistraßig ausgeführt. Installiert sind Umlauf-Siebreen mit Lochweiten von 6 mm und 8 mm. Es sind eine Rechengutwäsche und -presse vorhanden. Das Rechengut wird in Rollcontainer abgeworfen. Die Wasch- und Abpresswässer werden in die Kläranlage zurückgeführt.

5.2.3 Sandfang

Zur Abtrennung von mitgeführtem Sand aus dem Abwasserstrom wird ein belüfteter 2-straßiger Langsandfang mit Fettfang eingesetzt. Der Sandfang wird mit einem Druckluftgebläse belüftet. Der abgeschiedene Sand wird gewaschen, klassiert und der Verwertung zugeführt.

Bestand: $V = 2 \times 110 \text{ m}^3$

5.2.4 Misch- und Ausgleichbecken

Das Misch- und Ausgleichbecken dient der Pufferung von Belastungsspitzen im Trockenwetterfall, sowie der Einleitung und Vergleichmäßigung der Schlammwässer.

Bestand: $V = 3.000 \text{ m}^3$

5.2.5 Vorklärung

Die Vorklärung dient der Feststoffreduktion mit der auch insbesondere die Reduzierung der organischen Belastung (X_{TS} , CSB, BSB_5) einhergeht. Das Vorklärbecken ist als Rundbecken ausgeführt und ist im Hauptstrom eingebunden.

Bestand: A = 530 m²
 V = 1.500 m³

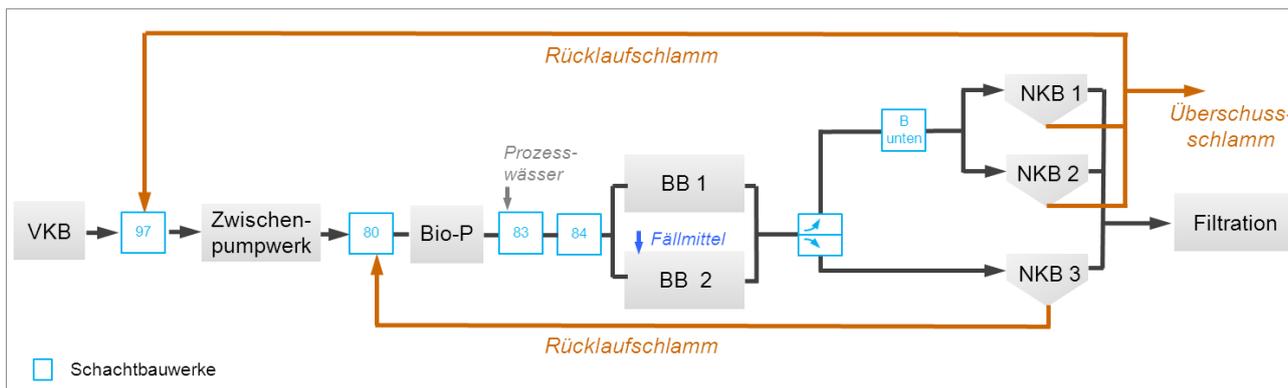
5.2.6 Prozesswasserspeicherung

Zur Speicherung der Prozesswasser aus der Überschussschlamm-Eindickung und der Faulschlamm-Entwässerung sowie der Abwässer der Fa. Garvert werden zwei Speicherbecken genutzt. Der Prozesswasserspeicher 2 wurde vormals als Denitrifikations-/Nitrifikationsbecken geplant. Das Becken ist mit einem Druckbelüftungssystem und Rührwerken ausgerüstet.

Bestand: PWS 1: V = 400 m³
 PWS 2: V = 4.577 m³

5.3 Biologische Reinigungsstufe

Ziele der biologischen Hauptstufe sind die Elimination des CSB (BSB_5), die Reduzierung der Stickstoffkonzentration (Nitri- und Denitrifikation) und die Senkung der Phosphorkonzentration (Bio-P, Simultanfällung). Das mechanisch vorbehandelte Abwasser wird über das Zwischenpumpwerk in das Bio-P-Becken gefördert. Das Abwasser wird im Anschluss auf die beiden Belebungsbecken aufgeteilt. Die Nachklärung besteht aus drei Becken. **Bild 4** stellt ein Fließschema zur derzeitigen Beschickung der biologischen Stufe sowie die Aufteilung auf die Nachklärbecken und die Schlammrückführung dar.



(nach Schachtbauwerk 84: Schacht 85 und Schacht B oben)

Bild 4 Vereinfachtes Fließschema zum Betrieb der biologischen Stufe

5.3.1 Zwischenpumpwerk

Das mechanisch vorbehandelte Abwasser wird über das Zwischenpumpwerk in das Bio-P-Becken eingeleitet. Es sind drei Tauchmotorpumpen zur Beschickung des Bio-P-Beckens vorhanden. Im

Pumpwerk sind räumlich getrennt von den Beschickungspumpen auch zwei Schlammwasserpumpen installiert.

Bestand: Förderleistung Beschickung Belebung
 $Q_{\max} = 3 \text{ Stück je } 1.080 \text{ m}^3/\text{h}$

5.3.2 Bio-P-Becken

Die biologische Phosphatelimination erfolgt im Hauptstromverfahren. Im Bio-P-Becken wird dabei unter anaeroben Verhältnissen Phosphat zurückgelöst. Anschließend erfolgt unter aeroben Bedingungen im Belebungsbecken eine vermehrte Phosphataufnahme.

Das Bio-P-Becken ist als Rundbecken mit den folgenden Abmessungen ausgeführt:

Bestand: D = 36 m
 V = 4.577 m³

5.3.3 Belebungsbecken

Die Belebungsanlage ist mit zwei Umlaufbecken ausgeführt, die als simultane Denitrifikation betrieben wird. Die Beschickung erfolgt parallel. Der Sauerstoffeintrag erfolgt über ein Druckbelüftungssystem. Die Belüftung ist in zwei Bahnen (Bahn I und III) jedes Umlaufbeckens flächig ausgeführt. Der Belüftungsbetrieb erfolgt intermittierend. In den Bahnen II und IV sind Rührwerke installiert, die ständig in Betrieb sind.

Bestand: V = 16.000 m³

5.3.4 Phosphatfällung

Zur Fällmittellagerung werden drei erdgelagerte Tanks genutzt. Die Fällmitteldosierung wird über die Messung der Abwassermenge und vom Phosphat im Ablauf der Belebung gesteuert. Als Fällmittel werden Eisen-II-Chlorid oder Eisen-III-Chlorid eingesetzt.

Bestand: 3 Tanks jeweils 15 m³

5.3.5 Nachklärung

Die Nachklärung besteht aus drei Rundbecken. Die Nachklärbecken 1 und 2 sind baugleich ausgeführt und wurden für $Q_m = 2 \times 516 \text{ m}^3/\text{h}$ bemessen. Das Nachklärbecken 3 wurde Anfang der 90er-Jahre gebaut und wurde für einen Zufluss von $Q_m = 1.368 \text{ m}^3/\text{h}$ bemessen.

Bestand: Nachklärbecken 1 und 2
 D = 30 m
 A = 1.410 m² (Summe NKB 1 und 2)
 t = 2,75 m
 V = 3.870 m³ (Summe NKB 1 und 2)

Nachklärbecken 3:

D	=	41 m
A	=	1.320 m ²
t	=	4,00 m
V	=	5.280 m ³

5.4 Weitergehende Reinigung

5.4.1 Hebewerk zur Filtration

Die Beschickung der Filtration erfolgt mit einem Schneckenhebewerk. Der Ablauf der Nachklärbecken fließt in eine Vorkammer des Pumpensumpfes. Insgesamt stehen vier Schneckenpumpen (Fa. Spaans Babcock) zur Verfügung. Die vier Pumpen besitzen Durchmesser von 1.100 mm und sind mit einer Neigung von 35° ausgeführt.

Bestand: 4 Schneckenpumpen
 Förderleistung jeweils 882 m³/h, Summe: 3.528 m³/h
 Förderhöhe: Sturzpunkt 42,80 m – Taspunkt 37,44 m = 5,36 m (Füllpunkt 38,20 m)

5.4.2 Abwasserfiltration

Zur weitergehenden Abwasserbehandlung ist der biologischen Hauptstufe eine abwärts durchströmte Filtrationsanlage nachgeschaltet. Die Filtration dient der Abtrennung von abfiltrierbaren Stoffen. Die ursprünglich installierten Einrichtungen zur Dosierung von Fäll- und Flockungsmitteln waren nicht erforderlich und wurden zurückgebaut.

Die Raumfiltration besteht aus 8 Kammern je 27 m² (4,5 m x 6,0 m) und besitzt folgenden Filteraufbau.

Obere Filterschicht aus Hydroanthrazit	1,4 m	Ø 1,6 - 2,5 mm
Untere Filterschicht aus Quarzsand	0,4 m	Ø 0,7 - 1,2 mm
Stützschiicht aus Kies	0,2 m	Ø 4 - 6 mm
Filterbetthöhe	2,0 m	
Filterüberstau	2,5 m	

Während der ca. 20-jährigen Betriebszeit der Filtration wurde abgängiges Filtermaterial aufgefüllt.

Die Filter werden durch eine Wasser-/Luftspülung regelmäßig regeneriert. Die Spülung wird in der Regel nach 2 Tagen (Sollwert PLS) ausgelöst. Bei höherer Feststoffbelastung sind die Standzeiten geringer. Das Spülprogramm wird dann durch die Überstausonde ausgelöst.

Die Rückspülung erfolgt nach einem Spülprogramm. Die wichtigsten Schritte bei der Rückspülung sind das Absenken des Wasserspiegels im Filter, die Reinigung des Filterkorns durch Luftspülung und die Wasserspülung zum Austragen des Abriebes. Der Zeitpunkt der Rückspülung richtet sich nach dem Filterwiderstand, der stark von der Beaufschlagung abhängig ist.

Bestand: GesamtfILTERfläche = 192 m²

Für den Filter ergeben sich damit folgende Filtergeschwindigkeiten:

Filtergeschwindigkeit ohne Rückspülbetrieb (8 Filter mit je 24 m²):

$$v_t = Q_t/A = 1.200 \text{ m}^3/\text{h} / (8 \cdot 24 \text{ m}^2) = 6,25 \text{ m/h}$$

$$v_m = Q_m/A = 2.400 \text{ m}^3/\text{h} / (8 \cdot 24 \text{ m}^2) = 12,5 \text{ m/h}$$

Filtergeschwindigkeit mit Rückspülbetrieb (7 Filter mit je 24 m²):

$$v_t = Q_t/A = 1.200 \text{ m}^3/\text{h} / (7 \cdot 24 \text{ m}^2) = 7,1 \text{ m/h}$$

$$v_m = Q_m/A = 2.400 \text{ m}^3/\text{h} / (7 \cdot 24 \text{ m}^2) = 14,3 \text{ m/h}$$

Die ermittelten Filtergeschwindigkeiten liegen unterhalb der Werte, die das ATV-Arbeitsblatt 203 für Filteranlagen mit v_t 7,5 m/h und v_m 15 m/h ausweist.

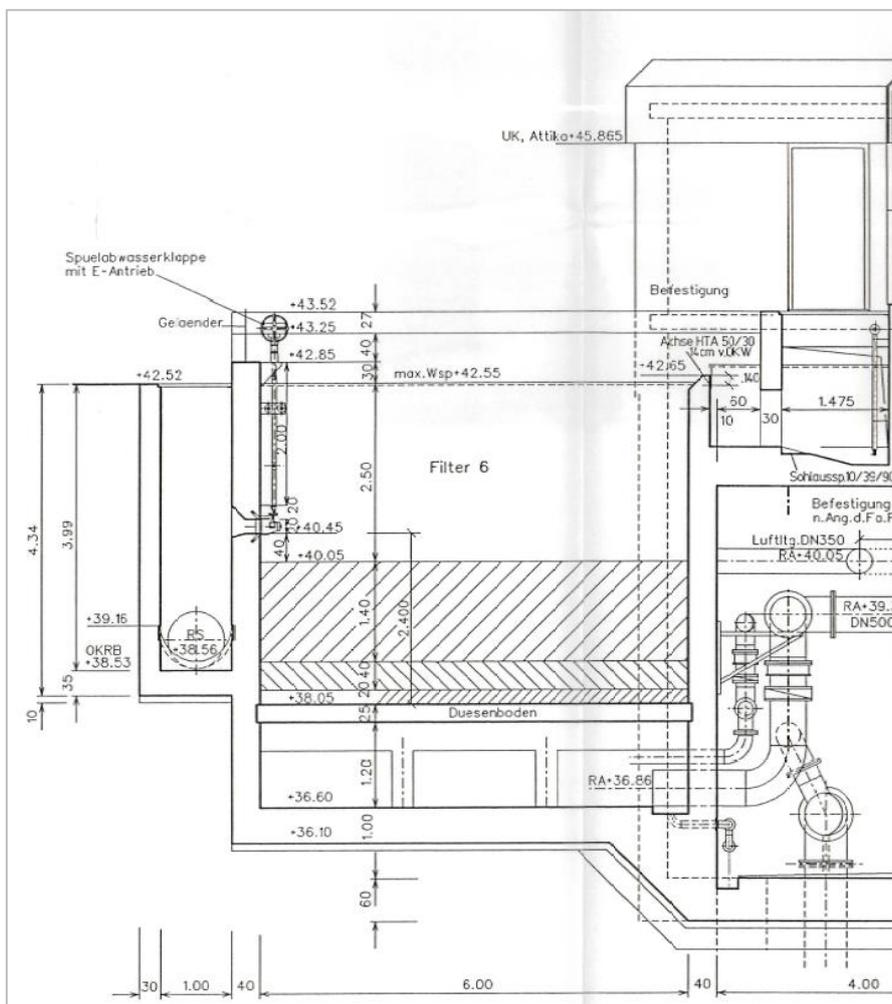


Bild 5: Schnitt Filterbehälter (Ausführungszeichnungen, 2001)



Bild 6: Filtrationsgebäude und Zulaufpumpwerk Filtration

Der Filtratspeicher besitzt ein Volumen von 200 m³.

Spülwasserpumpen 2 x 1.080 m³/h

Spülluftgebläse 2 x 865 m³/h

Schlammwasserpumpen 2 x 1.080 m³/h (Aufstellung im Zwischenpumpwerk)

5.5 Mengemess- und Probenahmestation

Hinter der Filtration vor der Bocholter Aa ist die Mengemess- und Probenahmestation der Kläranlage Borken eingerichtet. Die Messung der Abwassermenge erfolgt mittels MID. Das Bauwerk ist mit allen Einrichtungen für die amtliche, mengenproportionale Probeentnahme eingerichtet. Das gereinigte Abwasser fließt hinter dem Mengemess- und Probenahmeschacht über eine mit natürlichem Gefälle von 1 : 145 verlegte Rohrleitung DN 1000 der Bocholter Aa zu.

5.6 Schlammbehandlung

Die Verfahrensstufen zur Schlammbehandlung und Faulgasverwertung sind vereinfacht im folgenden Bild dargestellt. Der Primärschlamm und der eingedickte Überschussschlamm werden über einen Wärmetauscher in die Faulung gefördert. Die beiden Faulbehälter werden in Reihe beschickt. Der anaerob stabilisierte Faulschlamm wird statisch eingedickt und anschließend über eine Zentrifuge entwässert. Das in der Faulung produzierte Faulgas wird gespeichert und anschließend im BHKW und für die Heizung verwendet.

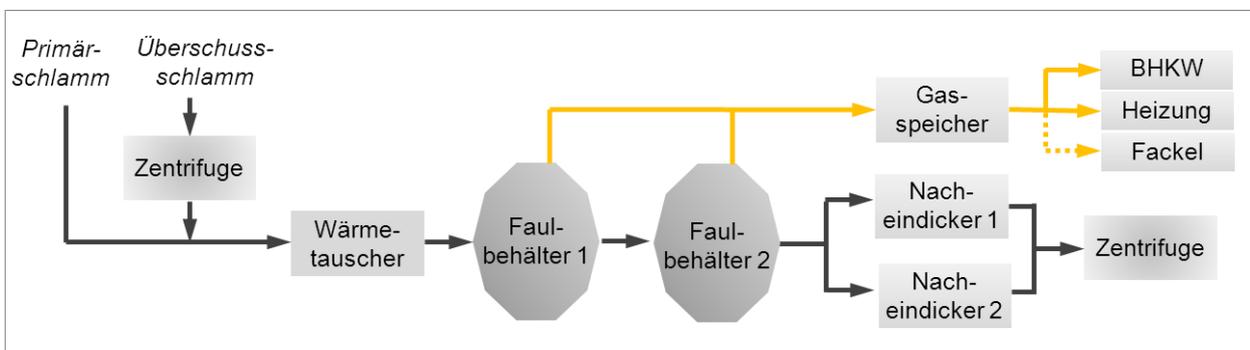


Bild 7: Fließschema Schlammbehandlung

6 Spurenstoffe im Wasserkreislauf

6.1 Einleitung

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

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

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

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

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

Kommunale Kläranlagen sind derzeit ausgelegt für die Kohlenstoff- und, in Abhängigkeit von der Größe, auch für die Nährstoffelimination. Auf gut ausgebauten Anlagen werden organische Spurenstoffe teilweise erheblich eliminiert, wenn auch zumeist nicht vollständig, wie umfangreiche Studien belegen (MUNLV 2004; Joss 2005). Die unterschiedlichen Reinigungsleistungen lassen sich aus der chemischen Struktur der einzelnen Stoffe begründen.

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

6.2 Charakterisierung des Verhaltens von anthropogenen Spurenstoffen

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

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

- Molekülaufbau und –struktur,
- Polarität/Hydrophobie,

- Sorptionsverhalten,
- Abbaubarkeit/Persistenz.

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

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

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

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

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

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

7 Verfahren zur Elimination von Spurenstoffen

7.1 Überblick

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

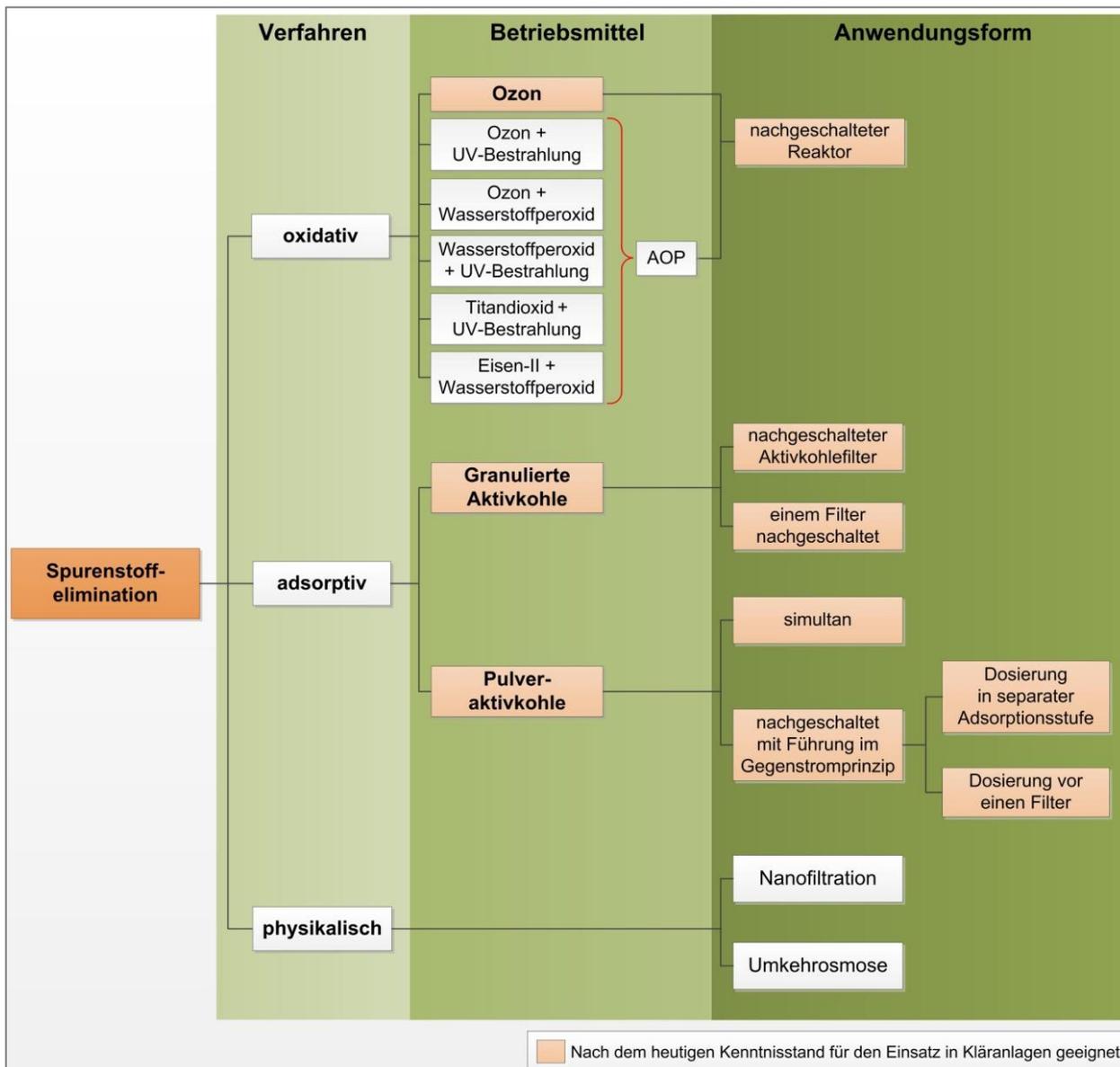


Bild 8: Verfahren zur Spurenstoffelimination (Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013)

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

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

7.2 Adsorption

7.2.1 Grundlagen

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

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

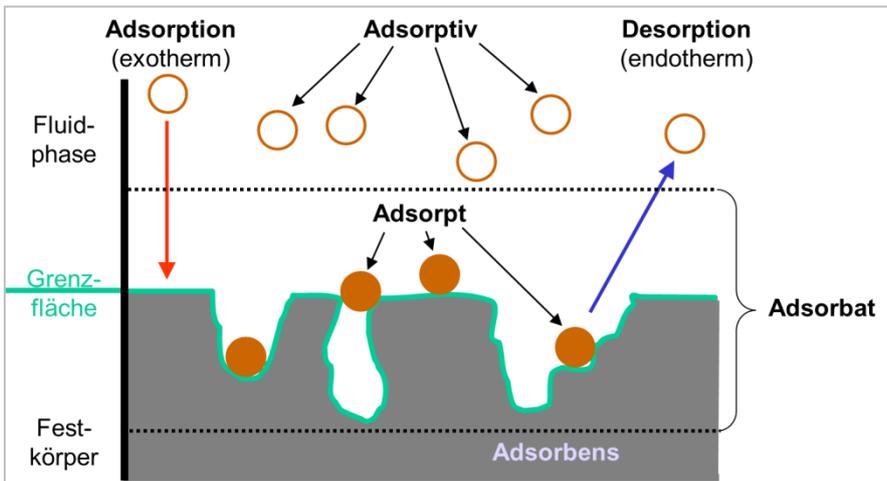


Bild 9: Grundbegriffe der Adsorption

Die Adsorption erfolgt in mehreren Teilschritten auch an der inneren Oberfläche des Adsorbens. Dies ist in nachstehender Abbildung dargestellt.

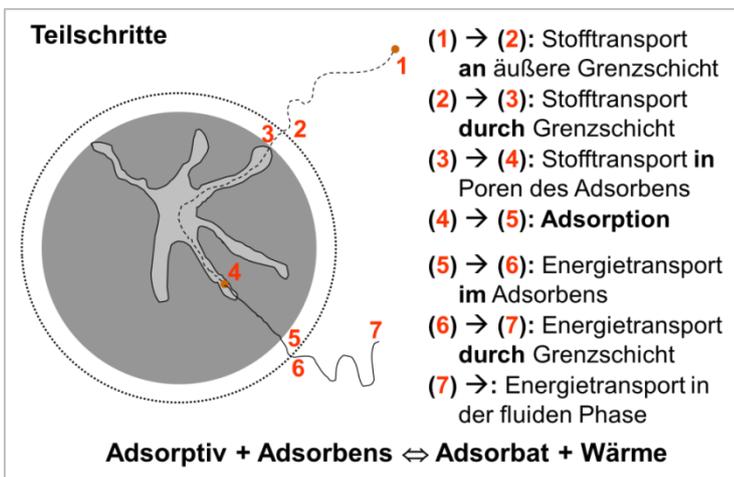


Bild 10: Teilschritte der Adsorption (Breitbach und Bathen, 2001)

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

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

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

- Steigende Unpolarität/Hydrophilität erhöht die Adsorbierbarkeit
- Funktionelle Gruppen
 - Hydroxyl-Gruppe (R-OH) senken die Adsorbierbarkeit
 - Amino-Gruppe (R-NH₂) senken die Adsorbierbarkeit sehr stark
 - Sulfonsäure-Gruppe (R-SO₃H) senken meistens die Adsorbierbarkeit
 - Nitro-Gruppe (R-NO₂) verbessern die Adsorbierbarkeit

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

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

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

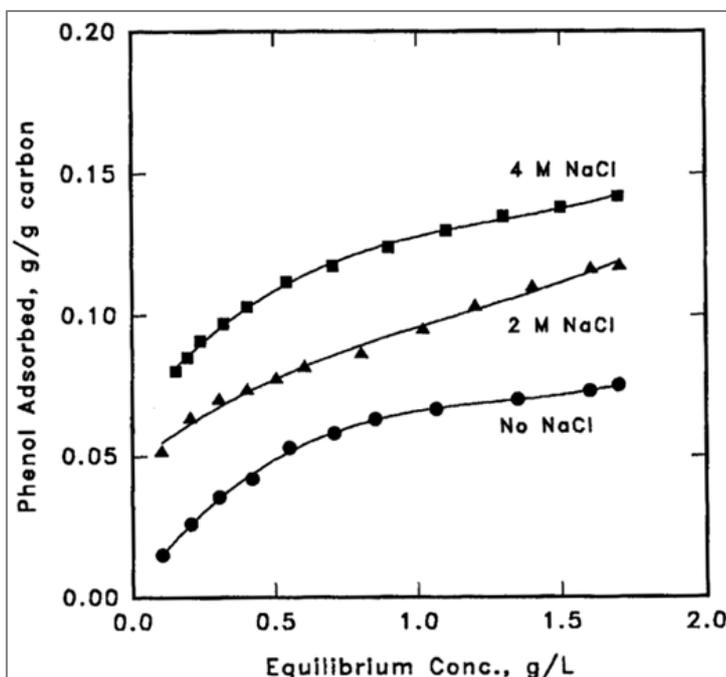


Bild 11: Isotherme Adsorption Phenol an Aktivkohle bei unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen (Cooney 1998)

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

Über die Betriebszeit verlagert sich die aktive Zone tiefer in die Schüttung des Kornkohlefilters, wie **Bild 13** zeigt. In darunterliegenden Graphen ist die Ablaufkonzentration über der Filterlaufzeit aufgetragen. Der Durchbruch des Adsorptivs erfolgt zu dem Zeitpunkt, an dem die Übergangszone den unteren Rand der Schüttung erreicht hat. Im Filter wird zu diesem Zeitpunkt ein Teil des Adsorptivs noch zurückgehalten.

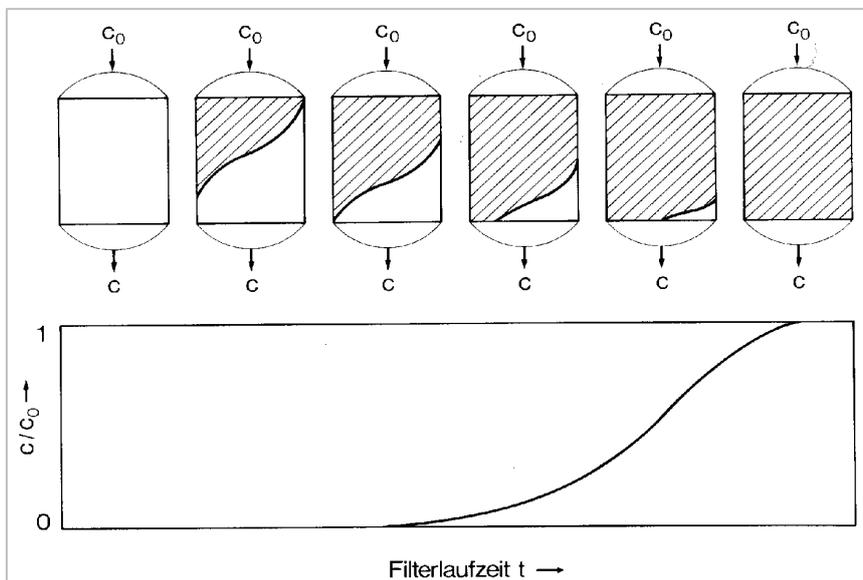


Bild 13: Verlagerung der Adsorptionszone über die Filterlaufzeit (Sontheimer u. a., 1985)

Bei der Adsorption von Mehrstoffgemischen konkurrieren, wie erwähnt, verschiedene Adsorptive um die Adsorptionsplätze auf dem Adsorbens. Dies kann dazu führen, dass ein schlecht adsorbierbarer Stoff, der rasch im Filterbett die Adsorptionsplätze belegt hat, von einem guten adsorbierbaren Stoff verdrängt wird. Infolgedessen kann die Konzentration des schlecht adsorbierbaren Stoffes im Ablauf des Filters größer sein als die Zulaufkonzentration. Im **Bild 14** ist der Zusammenhang dargestellt. Dieses Verhalten wird „Chromatografie-Effekt“ genannt.

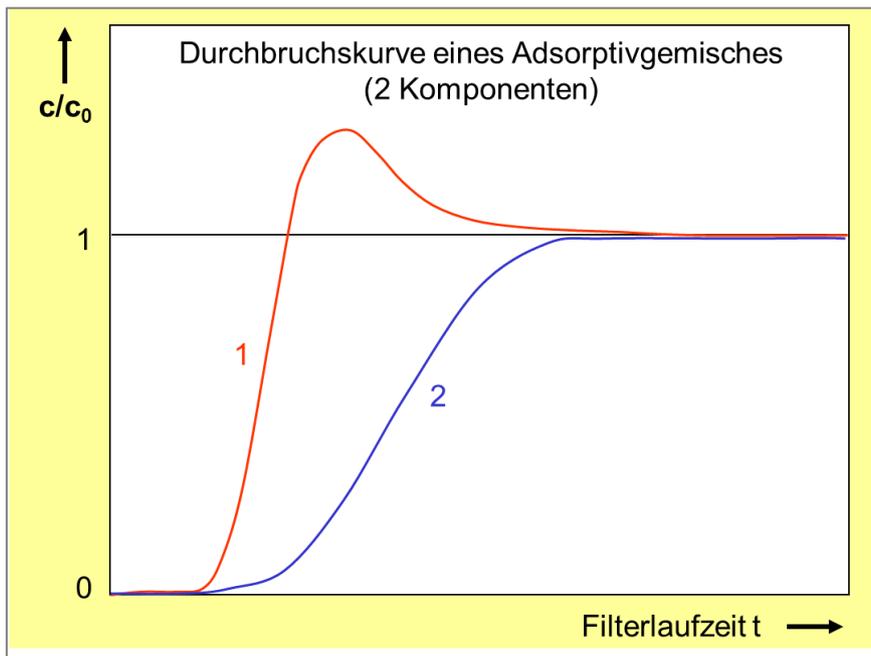


Bild 14: Durchbruchskurve eines Adsorptivgemisches (Worch 2004, modifiziert)

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

7.2.2 Einsatz Aktivkohle in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination

7.2.2.1 Pulveraktivkohle

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

Pulveraktivkohle in den Filterüberstau

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

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

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

- Favorisierte Dosiermenge PAK: 20 mg/l.
- Fällmitteldosierung ist erforderlich, da sonst rascher Durchbruch der Kohle durch den Filter.
- Optimierte Fällmitteldosierung (FeCl_3): 0,1...0,2 mg Fe/mg PAK.
Bei 20 mg PAK/l sind dies 2...4 mg Fe/l.
- Rückhaltung der PAK im Filterbett zu 96 %.
- Über die Rückspülung wurde die gesamte Kohle wieder aus dem Filter entfernt.
- Der Rückspülintervall des Filters lag bei einer Rückspülung in 24 d. Dies entsprach dem regulären Betrieb des Filters.
- Bei den beschriebenen Dosierungen scheint für den Standort Buchenhofen eine dauerhafte Unterschreitung des Schwellenwertes der Abwasserabgabe von 20 mg/l erreichbar.
- Eliminationsleistung im PAK-Filter für Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol ca. 80 %, bezogen auf Filterzulauf.
- Gesamtelimination im Klärwerk mit PAK-Filter für die Stoffe Sulfamethoxazol, Diclofenac oder Metoprolol zwischen 80 und 90 %.

- **Pulveraktivkohle mit Rückführung**

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

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

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

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

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

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

- optimierte PAK-Dosierung: 10 mg/l,
- Feststoffgehalt im Kontaktbecken: ca. 4 g TS/l,
- Einsatz von Fällmittel (Me-Salzen) und Flockungshilfsmittel ($0,3 \text{ g/m}^3$) hilfreich, um Filterdurchbruch zu verhindern,
- P_{ges} -Gehalte im Ablauf Filtration von 0,1 mg/l erreichbar, wenn nicht fällbarer P-Anteil gering,
- kein Mehrverbrauch von Fällmittel → Simultanfällung wird reduziert, erhöhte Dosierung in Adsorptionsstufe,
- Reduktion CSB-Konzentration um ca. 30 % gegenüber Ablauf Nachklärung,
- Eliminationsleistung Mikroschadstoffe in Adsorptionstufe Kläranlage Sindelfingen bei 10 mg PAK/l ca. 80 bis 95 % für Diclofenac, Naproxen, Fenibrinsäure, Carbamazepin, Metoprolol, Iohexol, Iomeprol, Iopromid.
- Stellenanteil Adsorptionsstufe ca. 0,65 MA/Monat.

7.2.2.2 Granulierte Aktivkohle

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Für CSB wurde eine mittlere Elimination von 45 % erzielt.

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

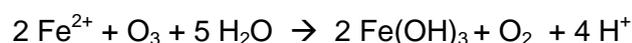
7.3 Ozonung

7.3.1 Grundlagen

7.3.1.1 Einsatz und Wirkung von Ozon

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Insgesamt oxidiert Ozon die meisten organischen Wasserinhaltsstoffe nicht bis zum CO_2 , sondern bewirkt eine Teiloxidation. Die Molekülgröße der Stoffe wird verringert. Ozon wirkt weiterhin bevorzugt auf Doppelbindungen in den Molekülen. Dies bedeutet, dass durch die Ozonbehandlung Zwischenprodukte gebildet werden, die beispielsweise wieder biologisch verfügbar sind. Der Ozonbehandlung in der Trinkwasseraufbereitung wird zumeist standardmäßig eine biologisch arbeitende Stufe nachgeschaltet (z. B. biologisch aktivierter Aktivkohlefilter), um die neugebildeten Stoffe abzubauen zu können.

Weiterhin ist die toxikologische Wirkung der gebildeten Transferprodukte zu beachten.

7.3.1.2 Ozonanwendung

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

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

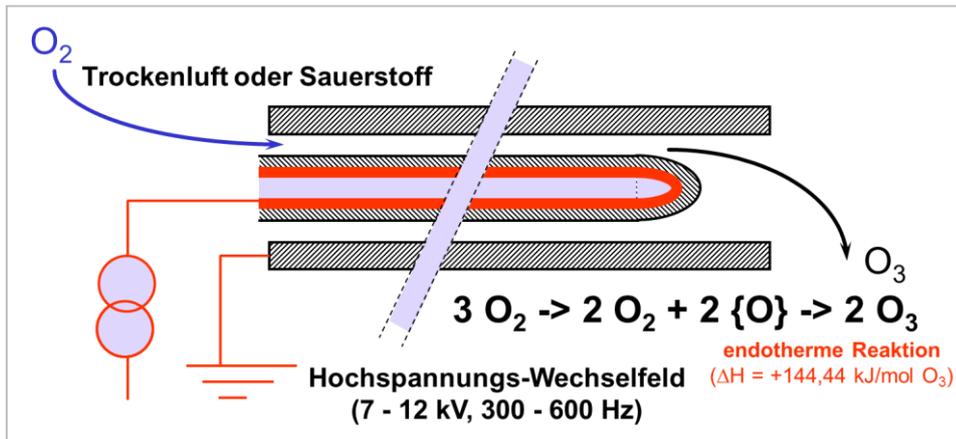


Bild 15: Schema Ozonerzeugung (Gujer 1999, modifiziert)

Die Reaktion selbst ist endotherm; es muss also Energie in Form von elektrischer Energie zum Ablauf der Reaktion von außen zugeführt werden. Theoretisch werden pro kg Ozon 0,836 kWh benötigt. In der Praxis kann dieser Wert aufgrund von Verlusten (rascher Zerfall) nicht erreicht werden. Moderne Ozonerzeuger benötigen ca. 8...10 kWh/kg O₃, wenn technischer Sauerstoff als Prozessgas eingesetzt wird.

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

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

Insgesamt addiert man nun den Energiebedarf von O₃-Erzeugung, Kühlung und Restozonvernichtung; so ergibt sich ein Bedarf an elektrischer Energie von 10...11 kWh/kg O₃.

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

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

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

Der Eintrag erfolgt in beiden Systemen in Behältern mit einem Wasserspiegel zwischen 5 und 6 m. Neben dem Eintrag erfolgt in diesen Kammern auch die Reaktion des Ozons mit den Wasserinhaltsstoffen. Die Aufenthaltszeit in den Kontakt-/Traktionsbehältern liegt zwischen 15 und 30 min. Einbauten in den Behältern, mit Ausnahme einer Tauchwand im Abflussbereich, ergeben keine Verbesse-

rungen (Herbst u. a., 2011). Der Ablauf aus dem Behälter wird, wie schon erwähnt, der Restozonbehandlung zugeführt.

7.3.2 Einsatz von Ozon in der Abwassertechnik zur Spurenstoffelimination

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

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

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

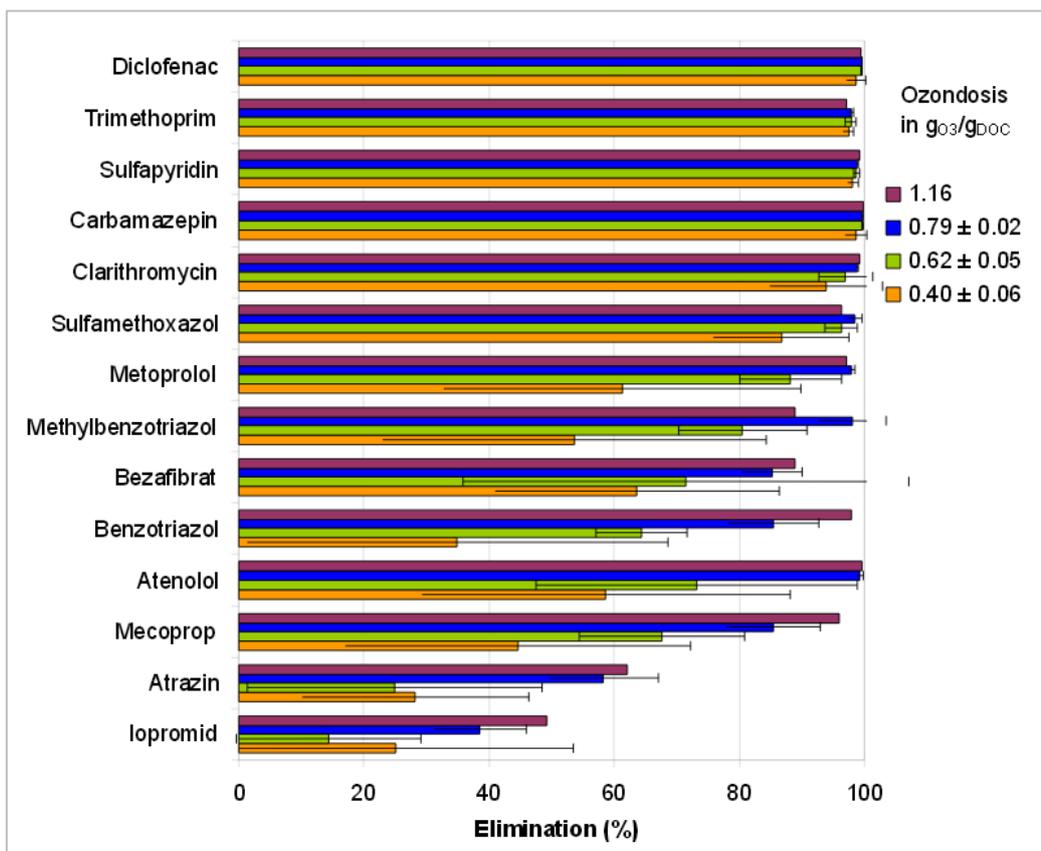


Bild 16: Ergebnisse Elimination Spurenstoffe ARA Regensdorf (Abegglen u. a., 2009)

In wirtschaftlicher und betrieblicher Hinsicht erwies sich in Regensdorf eine Ozondosis von 0,62 mg O₃/mg DOC als optimal. Aufgrund des geringen DOC-Gehaltes im Ablauf der Nachklärung ergab sich daraus eine Ozondosis von 3,1 mg/l. Bei einer Übertragung auf andere Standorte mit einem gegebenenfalls höheren DOC-Gehalt im Zulauf der Ozonstufe ist dies zu berücksichtigen.

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

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

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

8 Darstellung der untersuchten Verfahrenskombinationen

8.1 Beschickungsmenge

Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Auslegung der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination ist eine Betrachtung zur Teilstrombehandlung erforderlich. Ziel ist es, einen Grenzfluss zur 4. Reinigungsstufe zu bestimmen, sodass der Großteil der Jahresabwassermenge behandelt wird und die Auslegung der Anlage wirtschaftlich ist. Dazu ist eine Auswertung der Abwassermengen hinsichtlich der Häufigkeiten der Zuflussmengen zur 4. Reinigungsstufe erforderlich.

Ein Teil der Spurenstoffe wird bereits vom Zulauf bis zum Ablauf der biologischen Reinigungsstufe eliminiert. Für diesen Bereich können Eliminationsraten von 25 % angesetzt werden (Siegrist 2013). Durch die weitergehende Abwasserreinigung wird von einer zusätzlichen Eliminationsrate von 80 % ausgegangen. Unter diesen Rahmenbedingungen kann bei einer Vollstrombehandlung ein Gesamtwirkungsgrad von 85 % erreicht werden. Bei einer Teilstrombehandlung von 90 % der gesamten Abwassermenge können Eliminationsgrade von 79 % erzielt werden. Schematische Darstellungen dazu zeigen **Bild 17** und **Bild 18**.

Beispiel Vollstrombehandlung

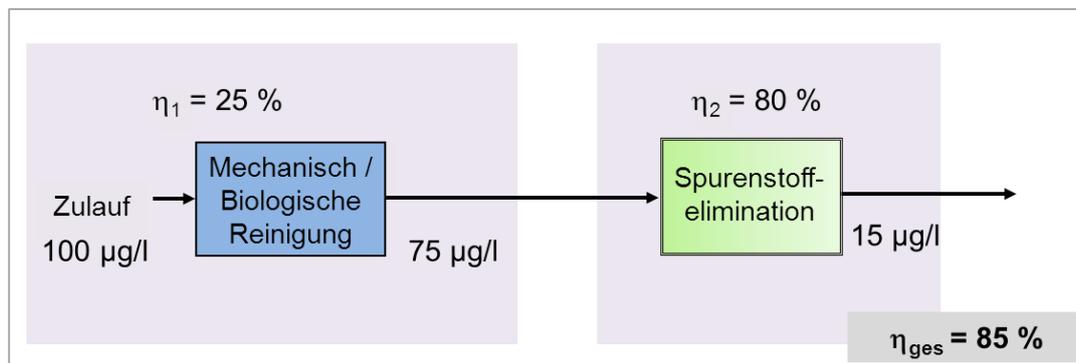


Bild 17: Wirkungsgrade bei Vollstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

Beispiel Teilstrombehandlung

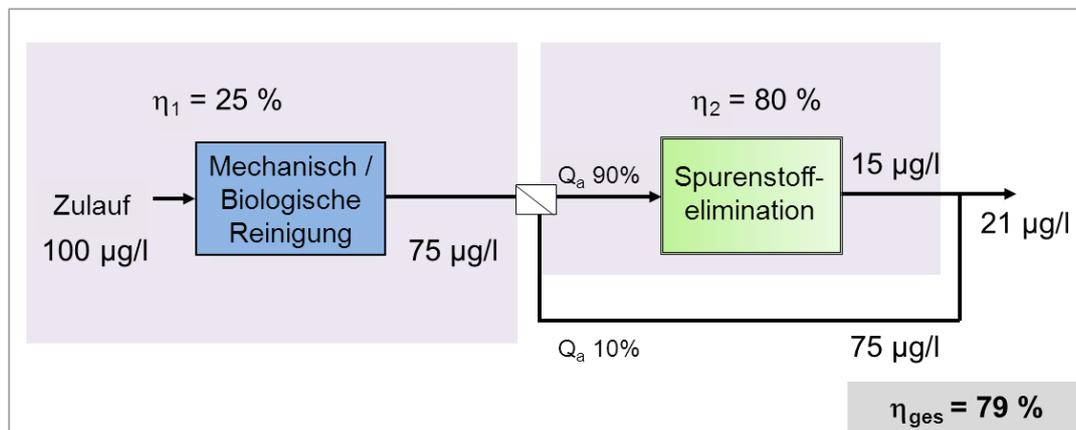


Bild 18: Wirkungsgrade bei Teilstrombehandlung (Konzentration beispielhaft)

Die Bemessung der 4. Reinigungsstufe erfolgt auf Basis der Werte aus der Ablaufmengenmessung der Kläranlage Borken für die Jahre 2010 bis 2012.

Für eine Vollstrombehandlung müsste auf der Kläranlage Borken eine Kapazität zur Behandlung von 2.400 m³/h vorgehalten werden. Die Auswertung der Abwassermengen zeigt jedoch deutlich, dass bereits Abwassermengen > 1.200 m³/h selten auftreten.

Bild 19 stellt den Anteil der behandelten Abwassermenge [% der gesamten Abwassermenge] in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination dar. Wenn die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf 930 m³/h ausgelegt wird, werden 90 % der Jahresabwassermenge behandelt. Unter den gewählten Ansätzen kann somit eine Elimination von 79 % erreicht werden. Die Verfahrensstufe kann so in hydraulischer Hinsicht bei einer Behandlung von 90 % der Jahresabwassermenge im Vergleich zur Vollstrombehandlung um 60 % kleiner ausgeführt werden. Im Verhältnis der erreichbaren Wirkungsgrade von 79 % oder 85 % wird die Teilstrombehandlung mit einem Volumenstrom von **930 m³/h** als geeignet betrachtet, sodass die Bemessung und der Verfahrenvergleich auf Grundlage dieser Bemessungswassermenge beruhen.

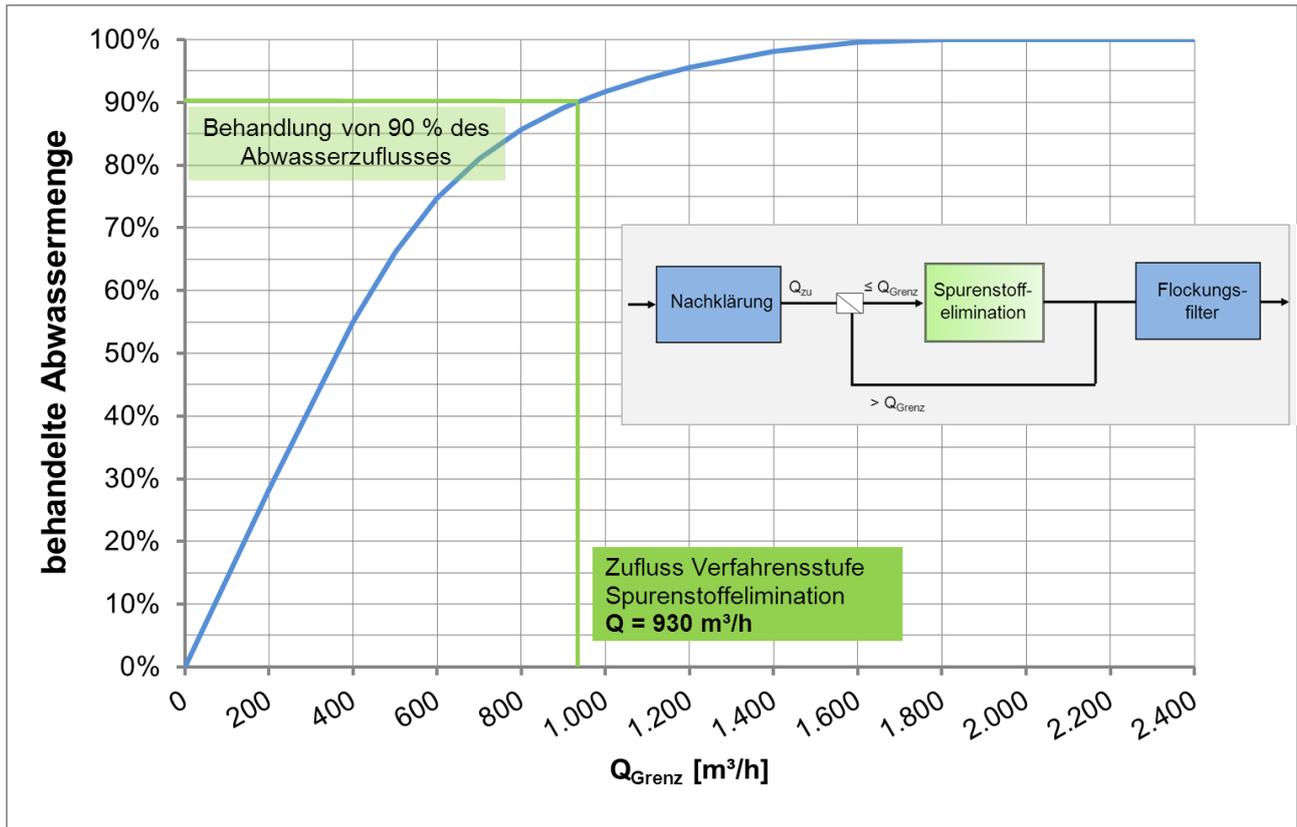


Bild 19: Behandelte Abwassermenge in Abhängigkeit des Bemessungszuflusses der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination

8.2 Verfahrensfestlegung

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie werden die folgenden fünf Verfahrenskombinationen untersucht:

1. **Pulverkohle mit Rücklaufkohleführung.** Abtrennung der PAK in einem Absetzbecken und in der nachgeschalteten vorhandenen Filtrationsstufe.
2. **Direkte Dosierung von Pulveraktivkohle.** Abtrennung der Kohle über die vorhandene Filtrationsstufe.
3. **Filtration über granulierten Aktivkohle.** Festbettadsorber werden der Filtrationsstufe nachgeschaltet.
4. **Ozonung.** Zulauf der Filtration wird mit Ozon behandelt. Nutzung Filtration als biologisch aktive Stufe.
5. **Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich.** Ablauf der Filtration wird mit Ozon behandelt. Der wieder im Abwasserweg einbezogene Schönungsteich ist als Nachbehandlungsstufe nachgeschaltet.

8.3 Randbedingungen

Aufgrund der vorhandenen Platzverhältnisse auf der Kläranlage Borken steht als Baufeld für die 4. Reinigungsstufe nur der vorhandene Teich auf dem Anlagengelände zur Verfügung. Dazu ist der

Teich 1 im nordöstlichen Bereich in Teilen zu verfüllen. Die Teichanlage ist derzeit nicht in den Reinigungsprozess der Kläranlage integriert. In Variante 5 wird dies vorgesehen.

In allen betrachteten Varianten – mit Ausnahme der Variante 2 - wird dazu eine Fläche etwa 5.000 m² verfüllt. Ein Teil der so gewonnenen Fläche steht für eine weitere Nutzung zur Verfügung. Es wird in der Kostenschätzung davon ausgegangen, dass die Teichsohle bei 37,45 m NN liegt und bis zu einer Geländehöhe von 40,0 m NN aufgefüllt wird. Des Weiteren wird eine Entschlammung des gesamten Teiches 1 in die Kosten aufgenommen.

In nachstehendem Bild ist der Lageplan der Kläranlage dargestellt. Der aufgefüllte Bereich ist schraffiert.

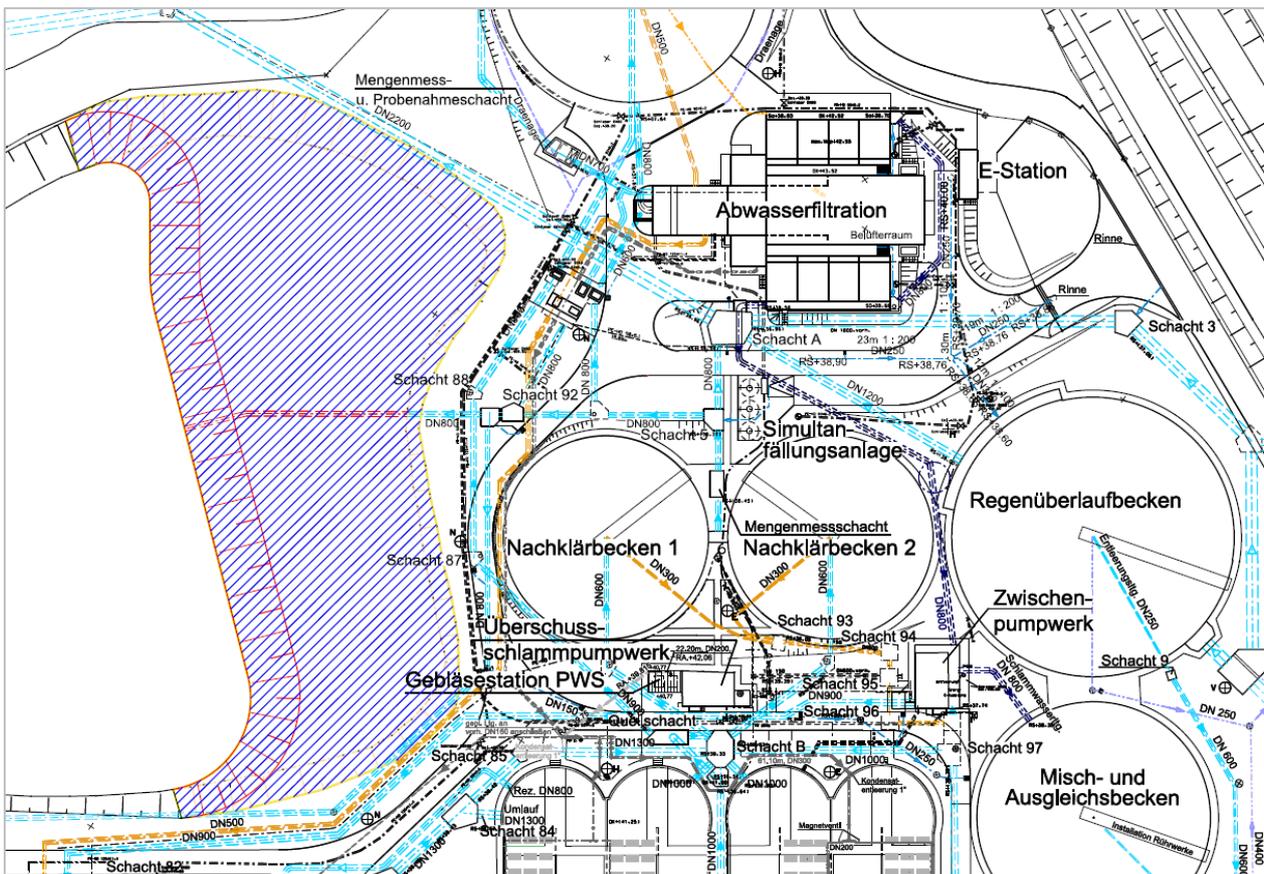


Bild 20: Lageplanausschnitt KA Borken mit Teilanfüllung Teich 1 (schraffiert)

8.4 Varianten

8.4.1 Variante 1: PAK mit Rücklaufkohle

8.4.1.1 Allgemein

Dieses Verfahren wurde, wie schon im **Kapitel 7.2.2.1** beschreiben, an einigen Standorten in Baden-Württemberg umgesetzt. Für die Rückführung der Kohle ist ein Absetzbecken notwendig. Die Rücklaufkohle wird zusammen mit der Frischkohle im Zulauf des Kontaktbeckens dem Teilstrom aus dem Ablauf der Nachklärung zugegeben. Im dem Absetzbecken vorgeschalteten Kontaktbecken erfolgt der eigentliche Adsorptionsvorgang. Der im Absetzbecken zurückgehaltene Kohleschlamm wird über

eine Pumpe als Rücklaufkohle wieder in den Zulauf des Kontaktbeckens zurückgefördert. Entsprechend der Frischkohledosierung wird ein Teil der rückgeführten Kohle als Überschussskohle aus dem System entnommen. Besonderer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Pulverkohle mehrfach mit dem Abwasser in Kontakt kommt, um die Beladungskapazität möglichst gut ausnützen zu können.

Für die Kläranlage Borken würde dies bedeuten, dass ein Kontakt- und ein Absetzbecken sowie ein Silo einschließlich der Dosiertechnik für die Pulverkohle erreicht werden müssen. Zudem müssen eine Flockungsmitteldosierstation neu errichtet und die bestehende Fällmittelstation erneuert werden.

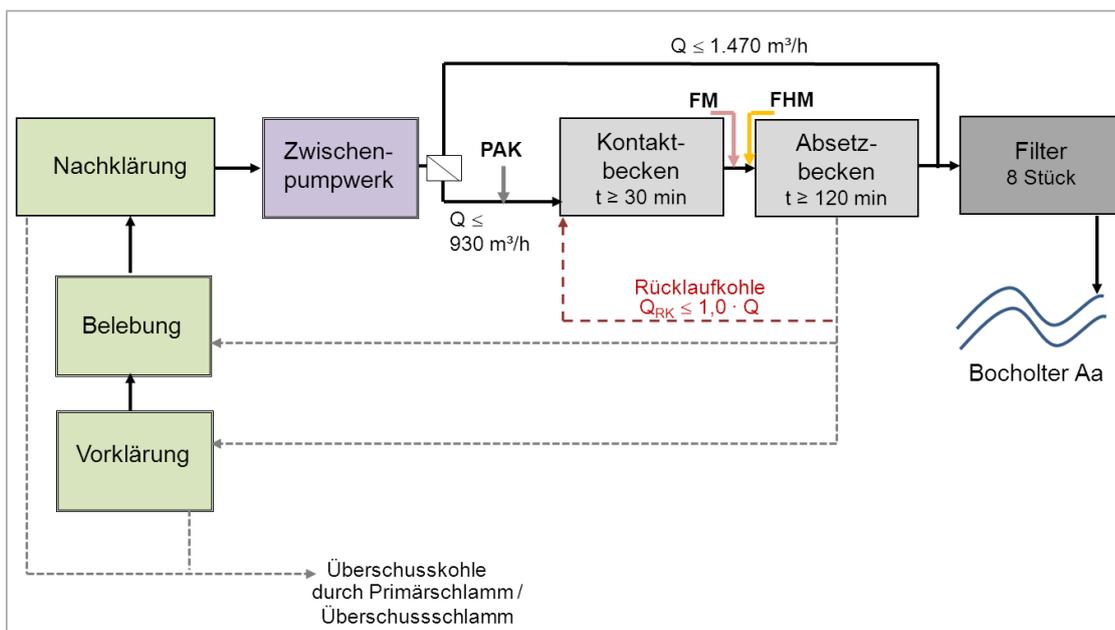


Bild 21: Blockscheema Variante 1: PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle

Erfahrungen aus Baden-Württemberg zeigen, dass die Suspensabelastung des Filters zurückgeht, da durch den Einsatz von Flockungs- und Flockungshilfsmittel ein Teil der Partikel schon im Absetzbecken abgetrennt wird und nicht auf die Filtration gelangt. Dies bedeutet eine Erhöhung der Betriebssicherheit der Anlage im Hinblick auf den Suspensarückhalt.

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

8.4.1.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellen **Blatt 1** und das Fließschema **Blatt 5** der Planunterlagen dar.

Beschickung

Die Beschickung der PAK-Stufe erfolgt über das Zulaufbauwerk der Schneckenpumpen der Filtration (**Bild 22**). In den Zulaufschacht fließen die Abläufe der Nachklärung 1/2 und der Nachklärung 3. Für

die Teilstromaufteilung zur 4. Reinigungsstufe mit $Q \leq 930 \text{ m}^3/\text{h}$ werden Tauchmotorpumpen ($n + 1$) eingesetzt.

Der Ablauf der 4. Reinigungsstufe wird über eine Rohrleitung direkt in das Verteilgerinne vor den einzelnen Filterkammern geleitet.



Bild 22: Zulaufschacht und Pumpensumpf des Schneckenhebewerkes der Filtration

Folgende Anlagenkomponenten sind für die Ausführung erforderlich.

Kontaktbecken und Absetzbecken

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

Das Absetzbecken wird mit einem Innendurchmesser von 26 m ($D_a = 26,80 \text{ m}$) ausgeführt. Das Becken wird mit einem Rundräumer ausgerüstet. Die Oberfläche beträgt 511 m^2 und das Volumen 2.045 m^3 . Die Beckentiefe ($h_{2/3}$) liegt bei 4,0 m.

Das Kontaktbecken wird mit einer Breite von 2,25 m umlaufend um das Absetzbecken ausgeführt. Das Volumen beträgt 821 m^3 .

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

PAK-Silo

Das Silo zur Lagerung der Aktivkohle mit einem Inhalt von 125 m^3 wird neben dem Absetzbecken erstellt. Die Dosierung der Frischkohle erfolgt in den Zulauf des Kontaktbeckens. Das Treibwasser (5 bis $7 \text{ m}^3/\text{h}$) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Betriebswassernetz entnommen.

Der Einsatz von Me-Salzen (Fäll- und Flockungsmittel) ist in jedem Fall notwendig, um einen Durchbruch der Kohle durch die Filter zu verhindern. In Wuppertal war die Dosierung von Flockungshilfsmitteln nicht notwendig. Die Filtration wird damit höher belastet. Dies kann zu einer Verkürzung der Rückspülintervalle führen. In den Versuchen in Wuppertal war eine tägliche Rückspülung weiterhin ausreichend. Hinsichtlich der Betriebssicherheit ist die höhere Feststoffbelastung der Filtration gegenüber den anderen Varianten als Nachteil anzusehen.

Setzt man die Auslegungskonzentration für Nachklärbecken nach ATV-DVWK-A 131 von 20 mg/l abfiltrierbare Stoffe (TS) im Ablauf an, so wird ab einer Tageswassermenge von 22.320 m³/d (930 m³/d) eine TS-Raumbeladung in den Mehrschichtfiltern von 2,6 kg TS/(m³·d) erreicht. Dieser Wert liegt im Bereich der Empfehlung von Meyer (1979) mit 2,0...3,0 kg TS/(m³·d). Bei einer Erhöhung der Dosiermenge auf 25 mg PAK/l und einer höheren Dosiermenge an Fällmitteln von 5 g/m³ liegt die TS-Raumbelastung bei 3,0 kg TS/(m³ · d) und damit im Grenzbereich der Bemessungsempfehlung. Höhere AFS-Gehalte (> 20 mg/l) führen zu einer Überschreitung der Bemessungsempfehlung.

In der Projektbesprechung am 22.10.2013 wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber abgestimmt, dass dieses Verfahrens für den Einsatz auf der Kläranlage Borken ungeeignet ist, da die Filtration zum Teil in bestimmten Zulaufsituationen derzeit schon mit hohen Feststofffrachten beaufschlagt wird.

Die PAK-Dosierung in den Überstau der Filtration wird jedoch in der Studie weiter betrachtet.

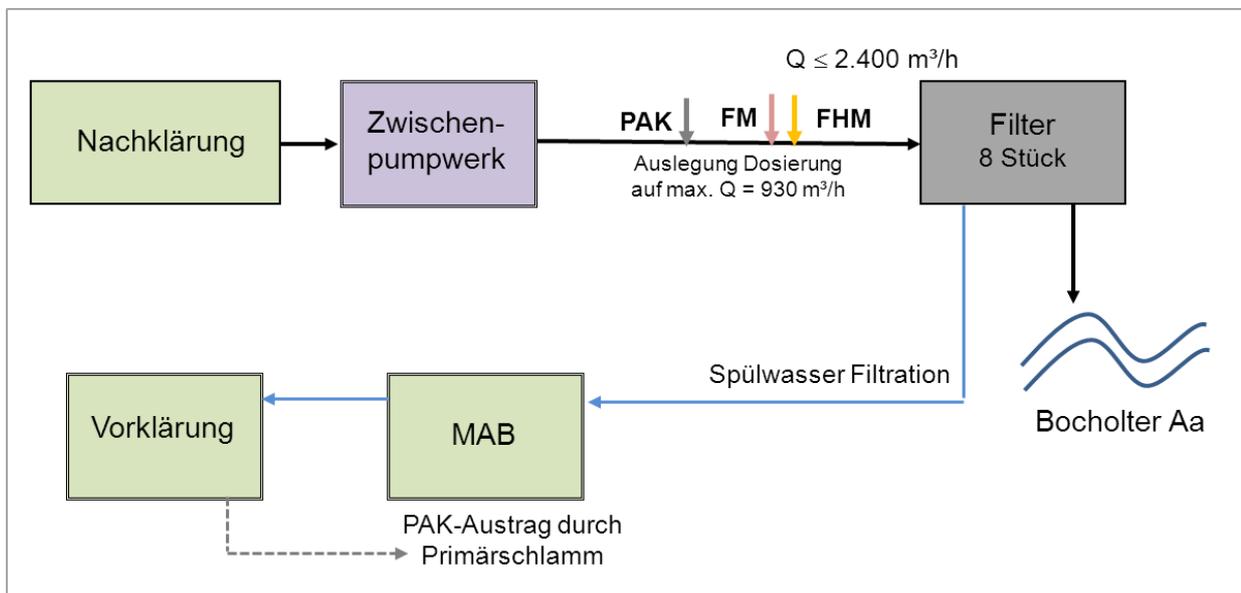


Bild 24: Blockschema Variante 2: PAK-Dosierung

8.4.2.2 Ausführung

Das Fließschema liegt als **Blatt 6** den Planunterlagen bei.

Folgende Anlagenkomponenten sind für die Ausführung erforderlich.

Beschickung

Die Beschickung erfolgt über das vorhandene Schneckenhebwerk der Filtration. Die Dosierung der Hilfsstoffe erfolgt zum Schutz des Pumpwerkes vor Abrasion durch die Aktivkohle nach der Förderung. Bei einer Abwassermenge > 930 m³/h erfolgt eine Begrenzung der Dosiermengen für PAK, FM und FHM.

Kontaktraum Filterüberstau

Der Filterüberstau dient als Kontaktraum. Bei einer Abwassermenge von 930 m³/h ergibt sich die folgende Kontaktzeit:

Überstauhöhe Filtration	2,0 m
Filterfläche je Zelle	27,0 m ²

Betrieb von 8 Filterzellen

Überstauvolumen (8 Zellen)	432 m ³
Aufenthaltszeit	28 min

Betrieb von 7 Filterzellen

Überstauvolumen	378 m ³
Aufenthaltszeit	24 min

Bei einer maximalen Abwassermenge von 2.400 m³/h beträgt die Kontaktzeit bei Betrieb der 8 Filterzellen ca. 11 Minuten.

PAK-Silo

Das PAK-Silo wurde mit einem Inhalt von 125 m³ errichtet. Das Treibwasser (5 bis 7 m³/h) für die PAK-Dosierung wird über eine gesonderte Pumpe aus dem Filtratwasserspeicher entnommen. Alternativ ist eine Entnahme aus dem Betriebswassernetz möglich.

Flockungs- und Flockungshilfsmittel

Als Flockungsmittel wird Eisen-III-Chlorid-Lösung vorgesehen. Derzeit erfolgt auf der Kläranlage Borken eine Simultanfällung mit Eisen-Chlorid-Lösung. Es wird eine Erneuerung der bestehenden Fällmittelstation vorgesehen, die dann für die Simultanfällung und die 4. Reinigungsstufe genutzt wird. Die Bereitungsanlage für das Flockungshilfsmittel wird neu errichtet.

8.4.3 Variante 3: Nachgeschaltete Filtration über granulierte Aktivkohle

8.4.3.1 Allgemeines

Die Aktivkohlefilter werden der bestehenden Filtration nachgeschaltet. Der Suspensarückhalt erfolgt damit in der Mehrschichtfiltration, und ein Teilstrom des partikelarmen Abwassers wird über die GAK-Filter geführt. Wie im **Kapitel 7.1.2.2** dargestellt, ist mit höheren Standzeiten der Kornkohle zu rechnen, wenn die Konkurrenz um die Adsorptionsplätze zwischen den Spurenstoffen und dem Rest-CSB minimiert wird. Im Mehrschichtfilter wird ein Teil des partikulär gebundenen CSB zurück-

gehalten. Die GAK-Filter dienen als „Polzeifilter“ für die Spurenstoffe. Nichtsdestotrotz bietet diese zweistufige Filtration besondere Sicherheit im Hinblick auf den Abschlag von Suspensa in den Vorfluter, wenn z. B. Schlamm aus der Nachklärung abtreibt.

Die Filterstufe wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

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

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Filter:	6 Stück
Betthöhe GAK:	2,5 m
Leerbettkontaktzeit (EBCT):	30 min
Filterfläche gesamt:	189 m ²

Die Stufe kann als Druckfiltration – zumeist in Filterkesseln aus Stahl – oder als offene Filtration realisiert werden. Für den Anwendungsfall wurde eine Ausführung als offener Rechteckfilter aus Beton gewählt, da so der Filterblock zusammen mit der benötigten Spülwasservorlage als ein Bauwerk realisiert werden kann. Jede Filterkammer weist eine Breite von 4,5 m und eine Länge von 7 m auf.

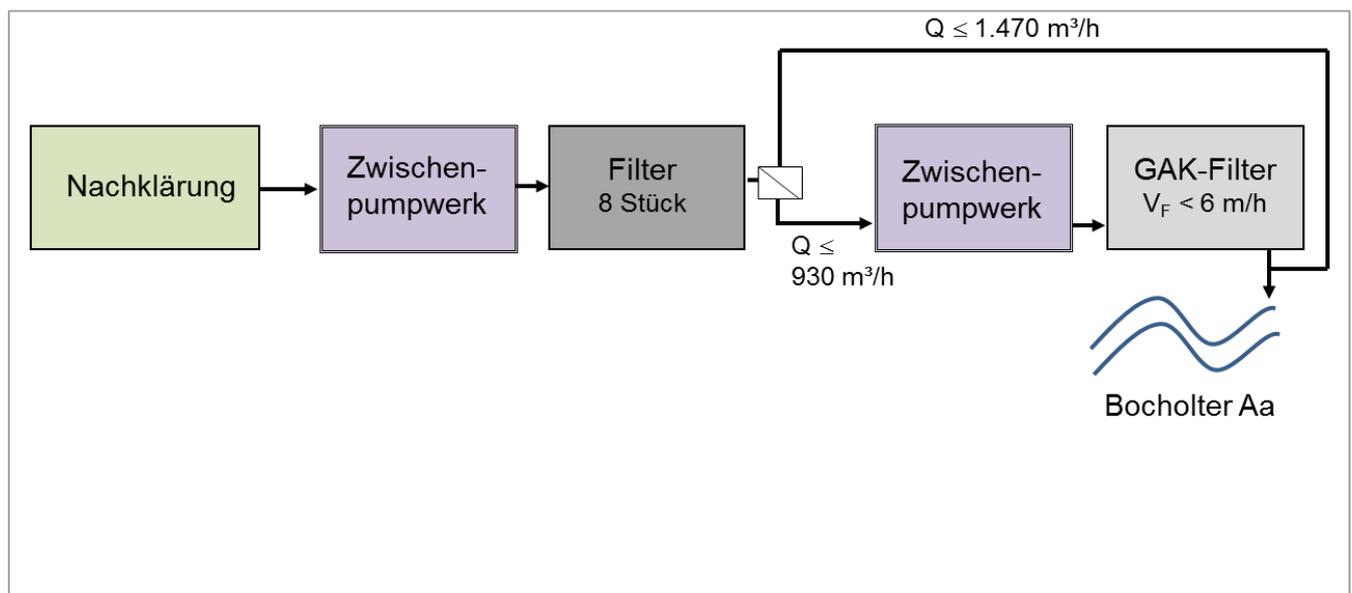


Bild 25: Blockschema Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration

Da die GAK-Filter in erster Linie als Adsorber arbeiten und mit partikelarmem Abwasser beaufschlagt werden, kann von einer täglichen Rückspülung abgesehen werden. Die Rückspülungen sollten bei Bedarf erfolgen. Die Rückspülgeschwindigkeiten sind geringer als bei Mehrschichtfiltern.

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

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

Die Filter werden für eine Durchlaufspülung ausgelegt. Die Spülwasserableitung erfolgt über eine Rinne. Das Spülwasser wird dann – wie das Spülabwasser der bestehenden Filtration – in das Misch- und Ausgleichsbecken geleitet.

Die Standzeit der granulierten Aktivkohle in den Filtern wird mit 10.000 Bettvolumina (BV) angesetzt. Durch die vorgeschaltete vorhandene Filtration erfolgt schon eine weitgehende Entfernung der Feinsuspensa aus dem Abwasser. In der GAK-Filtration ist – neben der adsorptiven Wirkung – jedoch auch eine weitere Entfernung von suspendiert gelösten Wasserinhaltsstoffen zu erwarten.

8.4.3.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 2** und das Fließschema **Blatt 7** der Planunterlagen dar. In einem Bauwerk sind ein Filterblock mit sechs Filterkammern, das Pumpwerk sowie der Spülabwasserspeicher und der Spülwasserspeicher mit der Verbindung zum Ablaufgerinne untergebracht.

Pumpwerk 4. Reinigungsstufe

Die Beschickung der GAK-Filtration erfolgt aus dem Ablauf der bestehenden Filtration. Dazu wird die bestehende Ablaufleitung der Filtration aufgetrennt und in die Pumpenvorlage der GAK-Filtration umgeleitet. Über zwei trocken aufgestellte Pumpen mit Drehzahlregelung wird aus der Pumpenvorlage die GAK-Filtration beschickt. Die Pumpen heben den Teilstrom auf das Niveau in der Zulauf Rinne der Filter. Wassermengen über 930 m³/h werden in die Ablaufleitung der GAK-Filtration abgeschlagen und fließen dem Ablaufschacht der Kläranlage zu.

Filterblock

Der Filterblock besteht aus sechs abwärtsdurchströmten offenen Filtern. Jede Filterkammer weist eine Fläche von 31,5 m² auf. Die Abmessungen einer Filterkammer liegen bei einer Breite von 4,50 m und einer Länge von 7 m.

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

Spülwasserspeicher

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

Einhausung E- und Aggregate-Raum

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

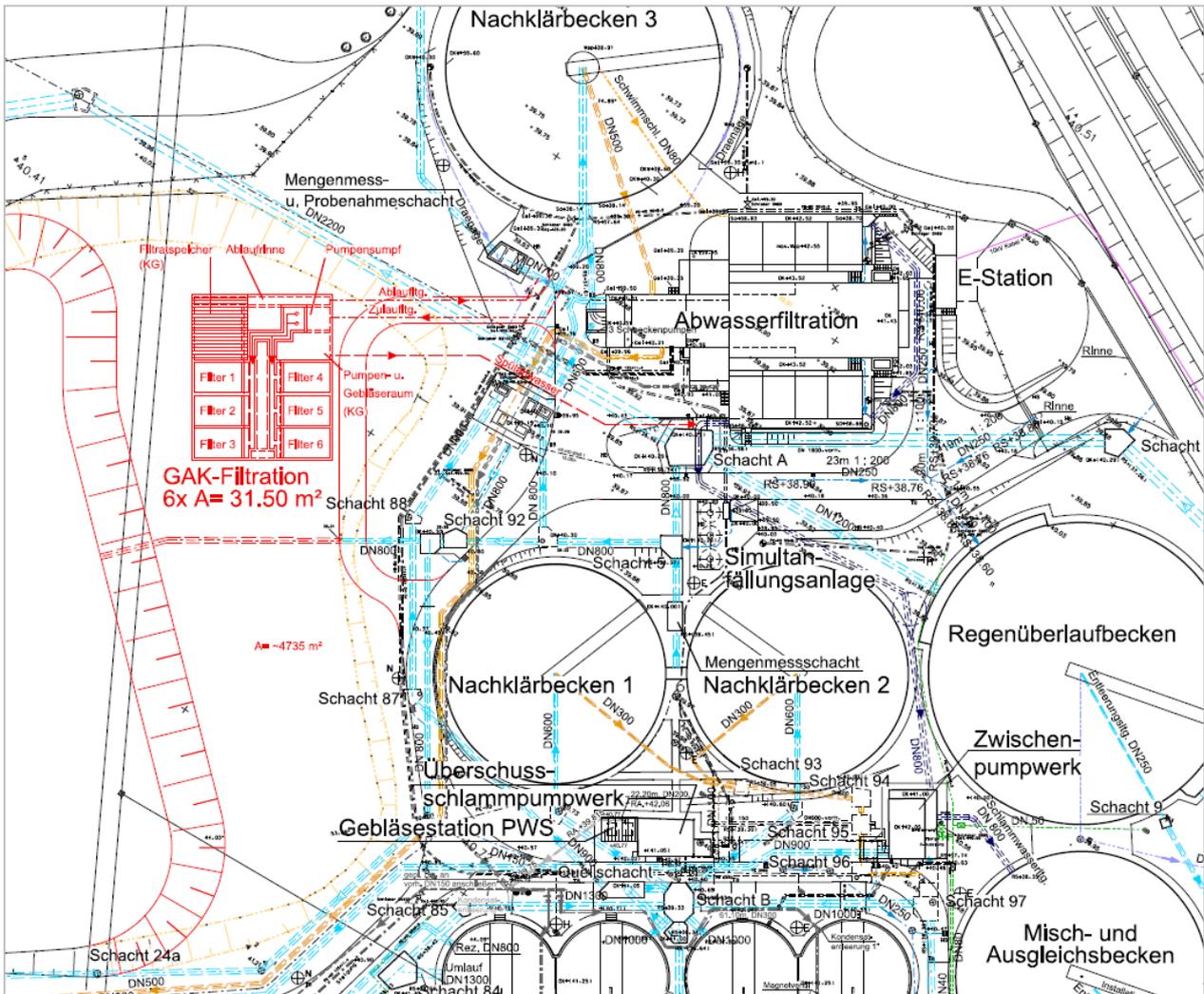


Bild 26: Lageplanausschnitt Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration

8.4.4 Variante 4: Ozonung

8.4.4.1 Allgemeines

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

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

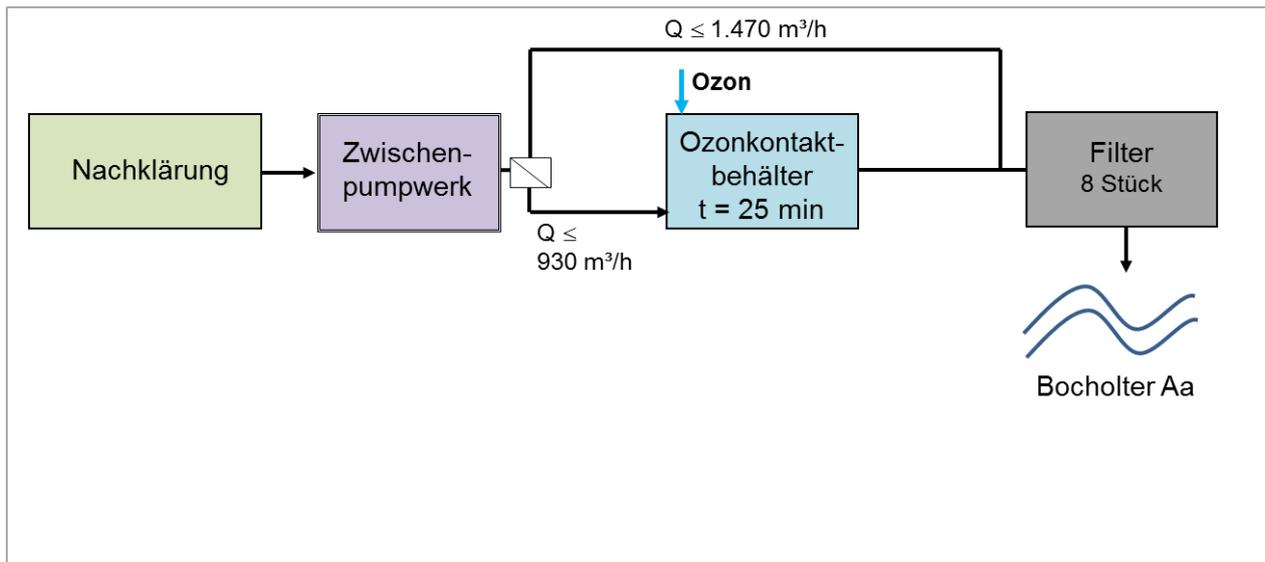


Bild 27: Blockschema Variante 4: Ozonung

Die Ozonung wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

Ozondosis: 2...10 g/m³

Kontaktzeit im Reaktionsbehälter: 10...30 min

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Kontaktbehälter: 2 Stück

Wassertiefe Kontaktbehälter: 6 m

Die Berechnung der mittleren Ozondosis wurde anhand der CSB-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung bestimmt. Im Mittel kann hier ein CSB-Wert von 37 mg/l (Betriebsdaten 2012) angesetzt werden (TOC im Mittel: 14,3 mg/l). Als Verhältnis CSB/DOC wird ein Wert von 3 : 1 angesetzt. Der Einfluss des partikulär gebundenen CSB wird hierbei nicht betrachtet. Damit ergibt sich eine berechnete DOC-Konzentration im Ablauf der Nachklärung von 12 mg/l. Die großtechnischen Versuche in Regensdorf (Abegglen u. a., 2009) kamen zu dem Ergebnis, dass eine Dosis von 0,62 mg O₃/mg DOC hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Wirkung ein Optimum darstellte. Dieser Wert wurde hier übernommen. Damit ergibt sich die mittlere Ozondosis zu:

$$c_{\text{O}_3, \text{a}} = 12 \text{ mg DOC / l} \cdot 0,62 \text{ mg O}_3/\text{mg DOC} = 7,44 \text{ mg O}_3/\text{l} \approx 7,5 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

8.4.4.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 3** und das Fließschema **Blatt 8** der Planunterlagen dar.

Die Anlagenteile gliedern sich in das zweistraßige Kontaktbecken sowie die Halle für Ozonerzeuger und Schaltanlage mit davor angeordneter Flüssig-Sauerstofftankanlage auf der angefüllten Fläche des Teiches.

Die Ozonung mit Ozonerzeuger und Kontaktbecken ist zweistraßig ausgeführt. Bei geringem Durchfluss (z. B. in der Nacht) kann eine Straße außer Betrieb genommen werden.

Pumpwerk 4. Reinigungsstufe

Die Beschickung der Ozonung erfolgt über das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe. Dieses wird als Schachtbauwerk neben dem Hebewerk der bestehenden Filtration errichtet. Über eine Rohrleitung wird das Pumpwerk an den Zulaufsumpf des bestehenden Schneckenhebewerks angebunden. Über zwei drehzahlgeregelte Tauchmotorpumpen wird dann die 4. Reinigungsstufe beschickt.

Kontaktbehälter

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

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

Die Restozonvernichtung erfolgt thermisch/katalytisch.

Die beiden Behälter werden über Rohrleitungen an das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe angebunden. Der Ablauf der Behälter wird über eine Rohrleitung in den Zulauf zur bestehenden Filtration geführt.

Ozonerzeugung

Die Ozonerzeuger weisen eine Leistung von 2 x 5.000 g/h auf. Als Prozessgas ist flüssiger Sauerstoff vorgesehen. Die Kühlung erfolgt über einen Nass/Nass-Wärmeüberträger, der ebenfalls im Container untergebracht ist. Das benötigte Kühlwasser im Sekundärkreislauf wird über zwei Pumpen (eine Reserve) aus dem Ablauf der Filtration bereitgestellt.

Die Erzeuger werden mit der zugehörigen Schaltanlage in einer Einhausung untergebracht. Die Sauerstoff-Tankanlage wird ebenfalls auf dem angefüllten Bereich angeordnet.

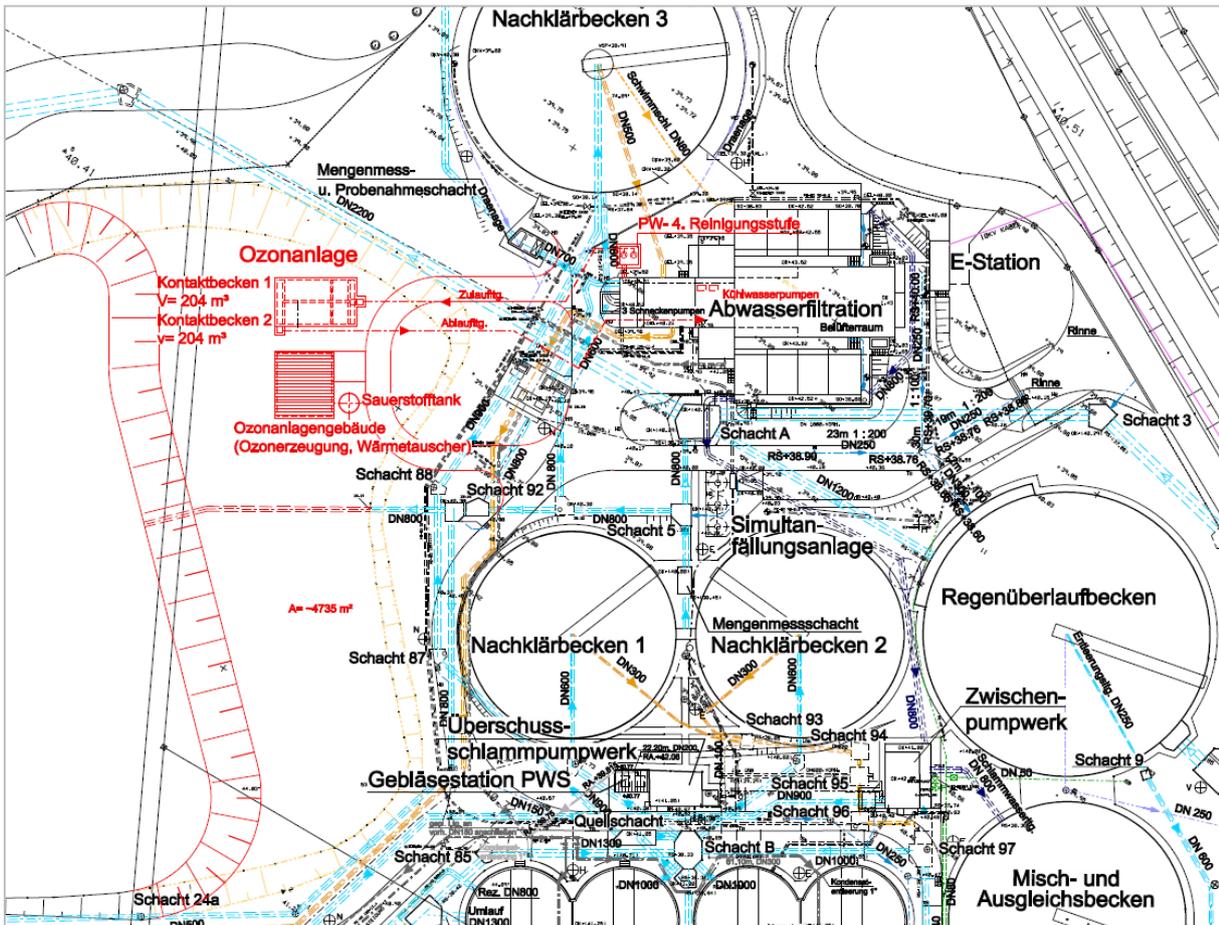


Bild 28: Lageplanausschnitt Variante 4: Ozonung

8.4.5 Variante 5: Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich

8.4.5.1 Allgemeines

Bei dieser Variante wird das Klarwasser aus der Filtration zunächst mit Ozon behandelt. Der Ablauf der Ozonung wird in den nachgeschalteten Schönungsteich zum Abbau eventuell toxikologisch bedenklicher Stoffe geführt.

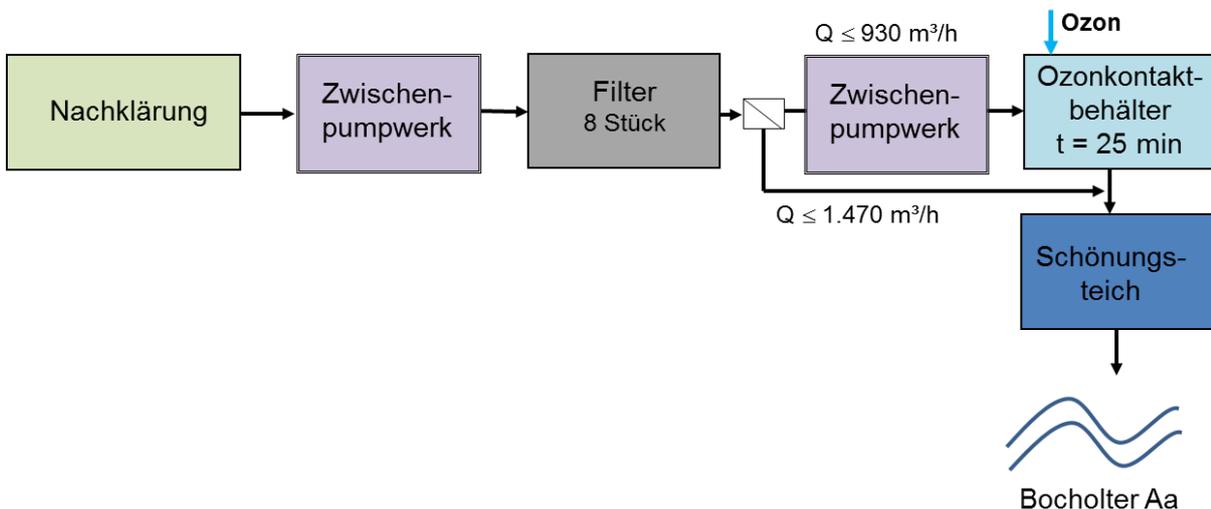


Bild 29: Blockschema Variante 5: Ozonung + Schönungsteich

Die Ozonung wird anhand folgender Bemessungsparameter ausgelegt:

Ozondosis: 2...10 g/m³

Kontaktzeit im Reaktionsbehälter: 10...30 min

Folgende Werte wurden gewählt:

Anzahl Kontaktbehälter: 2 Stück

Wassertiefe Kontaktbehälter: 6 m

Durch die optimierte Filtration ist mit einer Reduktion der Ozondosis zu rechnen. Für die Auslegung dieser Variante wird folgende Ozondosis angenommen:

$$c_{O_3,a} = 4,5 \text{ mg O}_3/\text{l}$$

8.4.5.2 Ausführung

Den Lageplan der Variante stellt **Blatt 4** und das Fließschema **Blatt 9** der Planunterlagen dar.

Die Anlagenteile gliedern sich in das zweistraßige Kontaktbecken sowie die Halle für Ozonerzeuger und Schaltanlage mit davor angeordneter Flüssig-Sauerstofftankanlage auf der angefüllten Fläche des Teiches.

Die Ozonung mit Ozonerzeuger und Kontaktbecken ist zweistraßig ausgeführt. Bei geringem Durchfluss (z. B. in der Nacht) kann eine Straße außer Betrieb genommen werden.

Pumpwerk 4. Reinigungsstufe

Die Beschickung der Ozonung erfolgt aus dem Ablauf der bestehenden Filtration. Dazu wird die bestehende Ablaufleitung der Filtration aufgetrennt und in die Pumpenvorlage der Ozonung umgeleitet. Über zwei trocken aufgestellte Pumpen mit Drehzahlregelung wird aus der Pumpenvorlage die Ozonung beschickt.

Kontaktbehälter

Die beiden Kontaktbehälterstraßen werden als Betonbauwerk erstellt. Die Behälter verfügen über keine Einbauten, außer einer unterströmten Tauchwand im letzten Drittel des Behälters. Dieser Bereich dient als Entspannungszone. Untersuchungen von Herbst u. a. (2011) zeigten, dass weitere Einbauten (Leitwände) die Effizienz nicht nachhaltig verbessern. Die Ausführung der Kontaktbehälter entspricht Variante 4.

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

Die beiden Behälter werden über Rohrleitungen an das Pumpwerk 4. Reinigungsstufe angebunden. Der Ablauf der Behälter wird über eine Rohrleitung in den Zulauf zur bestehenden Filtration geführt.

Ozonerzeugung

Die Ausführung der Ozonerzeugung ist identisch zu Variante 4. Die Ozonerzeuger weisen eine Leistung von 2 x 5.000 g/h auf. Als Prozessgas ist flüssiger Sauerstoff vorgesehen. Die Kühlung erfolgt über einen Nass/Nass-Wärmeüberträger, der ebenfalls im Container untergebracht ist. Das benötigte Kühlwasser im Sekundärkreislauf wird über zwei Pumpen (eine Reserve) aus dem Ablauf der Filtration bereitgestellt.

Die Erzeuger werden mit der zugehörigen Schaltanlage in einer Einhausung untergebracht. Die Sauerstoff-Tankanlage wird ebenfalls auf dem angefüllten Bereich angeordnet.

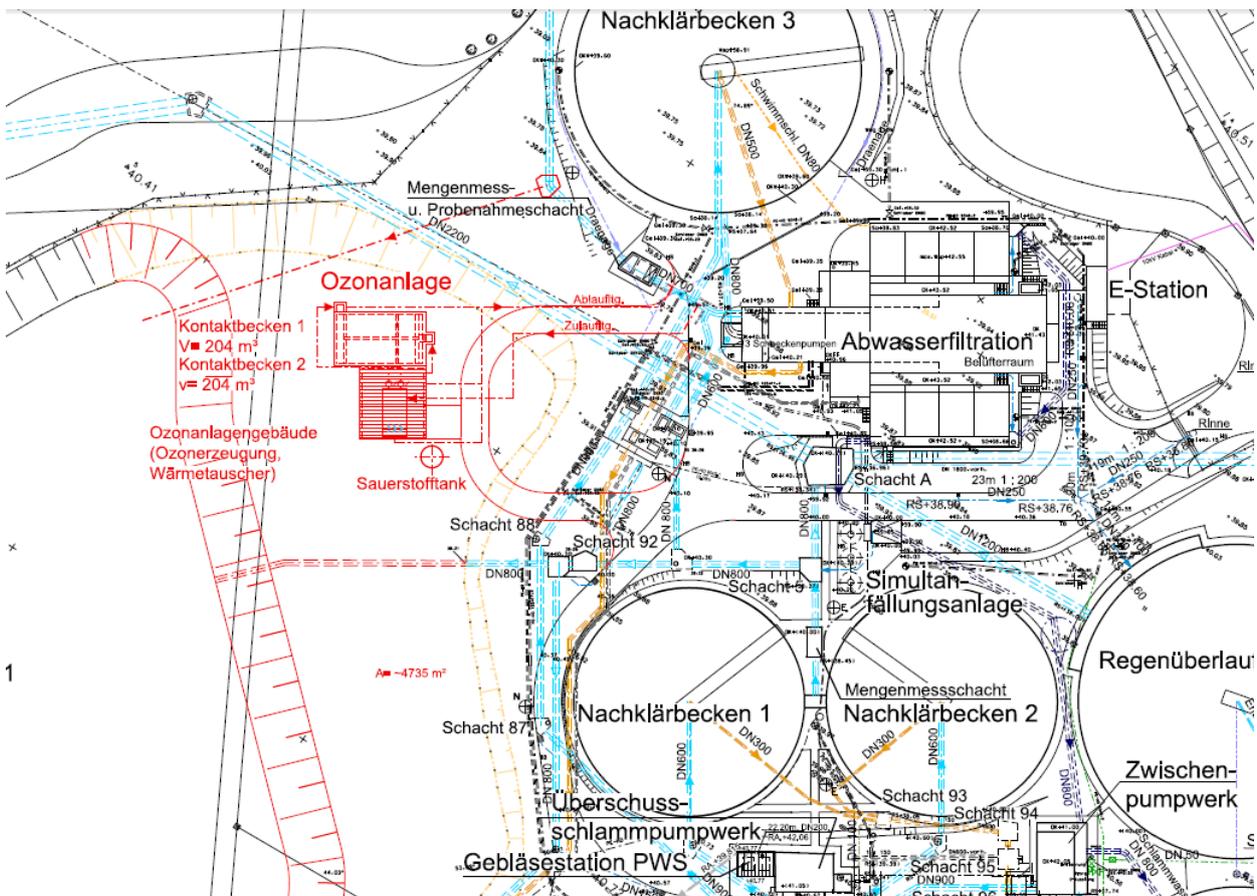
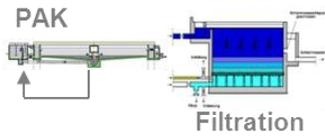
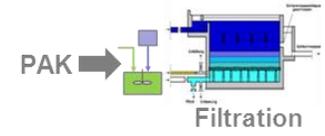
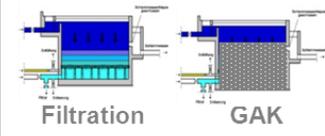
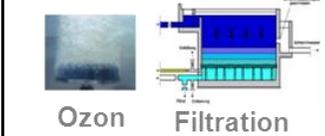
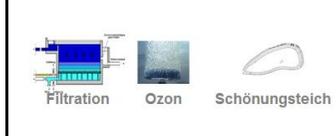


Bild 30: Lageplanausschnitt Variante 5: Ozonung + Schönungsteich

8.5 Ergebnisübersicht Varianten

	Variante 1 Pulverkohle mit Rücklaufkohle	Variante 2 PAK-Dosierung in Filterüberstau	Variante 3 Nachgeschaltete Filtration über granulierte Aktivkohle	Variante 4 Ozonung	Variante 5 Ozonung + Schönungs- teich
					
Anlagenkomponenten	<p>Kontaktbecken: als Umlaufbecken</p> <p>Absetzbecken: $D_i = 26\text{ m}$; $h_{2/3} = 4,0\text{ m}$, $A = 511\text{ m}^2$, $V = 2.045\text{ m}^3$</p> <p>PAK-Silo: $V = 125\text{ m}^3$</p> <p>Flockungsmittel Flockungshilfsmitteldosierung</p>	<p>Kontaktraum: Filterüberstau</p> <p>PAK-Silo: $V = 125\text{ m}^3$</p> <p>Flockungsmittel Flockungshilfsmitteldosierung</p>	<p>GAK-Filtration: 6 Filter, $B \times L = 4,5 \times 7,0\text{ m}$ $A = 189\text{ m}^2$, $H_{FB} = 2,5\text{ m}$, $V = 473\text{ m}^3$</p>	<p>Flüssigsauerstoff: Tankanlage und Verdampfer</p> <p>Ozonerzeuger: 10 kg O_3/h</p> <p>Reaktionsbehälter: 2 Straßen, je $L = 10,0$; $B = 3,4\text{ m}$; $V = 204\text{ m}^3$</p> <p>Nachbehandlung in vorhandener Filtration</p>	<p>Flüssigsauerstoff: Tankanlage, Verdampfer</p> <p>Ozonerzeuger: 10 kg O_3/h</p> <p>Reaktionsbehälter: 2 Straßen, je $L = 10,0$; $B = 3,4\text{ m}$; $V = 204\text{ m}^3$</p> <p>Nachbehandlung im Schönungs- teich (Wieder- inbetriebnahme)</p>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> keine Bildung von Reaktionsprodukten Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig verbesserter Suspensarrückhalt durch Absetzen (Entlastung Filtration) Mehrfachbeladung der PAK 	<ul style="list-style-type: none"> keine Bildung von Reaktionsprodukten Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig 	<ul style="list-style-type: none"> keine Bildung von Reaktionsprodukten Wirkungsweise der Stoffelimination eindeutig Kohle verbleibt im Filter 	<ul style="list-style-type: none"> kleine Bauwerke gut integrierbar in bestehende Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> kleine Bauwerke gut integrierbar in bestehende Anlagen niedrigere Ozondosis als V4 zu erwarten niedrigere Betriebskosten als V4 zu erwarten geringerer Energiebedarf als V4

	Variante 1 Pulverkohle mit Rücklaufkohle	Variante 2 PAK-Dosierung in Filterüberstau	Variante 3 Nachgeschaltete Filtration über granulierte Aktivkohle	Variante 4 Ozonung	Variante 5 Ozonung + Schönungs- teich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Klärschlamm-mengen (< Variante 2) 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Klärschlamm-mengen (> Variante 1) • steigende Rückbelas-tung (Filterspülung) • höhere Feststoffbeladung Filtration (Problem Flockenabtrieb NK) • zusätzliche Belastung der bestehenden Stufe (Filtration) 	<ul style="list-style-type: none"> • GAK Austausch 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktionsmechanis-men und -produkte sind teilweise unbekannt, • Wartung erfordert geschultes Personal oder externes Personal, • hohe Sicherheitsanfor-derungen an den Arbeitsschutz, da Ozon toxisch ist und als Reizstoff wirkt • hoher Energiebedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktionsmechanis-men und -produkte sind teilweise unbekannt, • Wartung erfordert geschultes Personal oder externes Personal, • hohe Sicherheitsanfor-derungen an den Arbeitsschutz, da Ozon toxisch ist und als Reizstoff wirkt

9 Kosten

9.1 Allgemein

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

9.2 Investitionskosten

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

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

Als Baunebenkosten wurden 20 % der Netto-Investitionssumme angesetzt.

Da alle Varianten von einer verbesserten Wirkung der bestehenden Mehrschichtfiltration profitieren, wurde die Optimierung der Filtration (Austausch Filtermaterial) in allen Varianten bei den Investitionskosten berücksichtigt.

In nachfolgender Tabelle sind die Kosten zusammengestellt:

Tabelle 1: Investitionskosten für die Varianten 1 bis 5

Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 PAK in Überstau	Variante 3 GAK-Filtration	Variante 4 Ozon	Variante 5 Ozon + Teich
1	Bautechnik	EUR	2.014.277,24	182.644,00	2.111.692,00	1.467.796,00	1.778.821,00
2	Maschinenteknik	EUR	1.371.778,53	1.164.030,00	1.225.623,00	1.147.020,00	1.136.520,00
3	EMSR-Technik	EUR	389.000,00	338.000,00	613.000,00	459.000,00	455.000,00
Summe Herstellungskosten, netto		EUR	3.775.055,77	1.684.674,00	3.950.315,00	3.073.816,00	3.370.341,00
Nebenkosten (Ing.-Honoare, Prüfgebühr, usw.)		EUR	755.011,15	336.934,80	790.063,00	614.763,20	674.068,20
Summe Baukosten, netto		EUR	4.530.066,92	2.021.608,80	4.740.378,00	3.688.579,20	4.044.409,20
Mehrwertsteuer		EUR	860.712,72	384.105,67	900.671,82	700.830,05	768.437,75
Summe Baukosten, brutto		EUR	5.390.779,64	2.405.714,47	5.641.049,82	4.389.409,25	4.812.846,95
Anteil			224%	100%	234%	182%	200%

Die Investitionskosten sind für Variante 2 (PAK-Dosierung in den Filterüberstau) mit Abstand am günstigsten. Gefolgt von der Variante 4 (Ozon) und 5 (Ozon mit nachgeschaltetem Schönungsteich).

Für alle Varianten ist ein sicherer Betrieb der bestehenden Filtration entscheidend. Daher wird jeweils eine Optimierung der Filtration in den Investitionskosten berücksichtigt.

In den PAK-Varianten (V1 und V2) ist zudem die Ertüchtigung der bestehenden Fällmitteldosierstation enthalten, da die Dosierung von Me-Salzen als Flockungsmittel für die Abtrennung der Pulverkohle aus dem Abwasser notwendig ist.

9.3 Betriebskosten

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

Strombezugskosten netto, Stand 2013:	0,184 EUR/kWh, netto (Brutto: 22,54 Cent/ kWh)
Sauerstoff inkl. Tankmiete:	0,25 EUR/kg, netto
Verbrennung Schlamm:	43,95 EUR/t Originalsubstanz Entwässerungsgrad: 24 % → $43,95/0,24 = 183$ EUR/MG TS, netto

Weitere Werte wurden wie folgt angenommen:

Personal:	40.000 EUR/(MA·a)
Pulveraktivkohle:	1.500 EUR/Mg, netto
Granulierte Aktivkohle:	1.300 EUR/Mg, netto
Entwässerungsgrad Schlamm:	24 % (Daten aus Bestandsanalyse KA Borken)
Entwässerungskosten Schlamm:	80 EUR/Mg TS, netto

Die Kosten für die Aktivkohlen entstammen aus aktuellen Ausschreibungsergebnissen (PAK) oder aus großtechnischen Betriebsversuchen (GAK). Derzeit sind Preise von 1.300 EUR/Mg, netto noch gängig. Eine Steigerung des Preises für Aktivkohle wird erwartet; daher wird für die Berechnung ein Preis von 1.500 EUR/Mg, netto angesetzt. Für die GAK wurde mit einer Schüttdichte von 400 kg/m³ gerechnet. Kohlen mit diesen Schüttdichten wurden auch bei den Versuchen in Düren (Bornemann u. a., 2012) eingesetzt. Bei den Versuchen im KW „Obere Lutter“ wurde eine Kohle auf Braunkohlenbasis mit einer Schüttdichte von 300 kg/m³ (Nahrstedt u. a., 2011) eingesetzt. Die Unterschiede in der Dichte haben erheblichen Einfluss auf die Verbrauchskosten. Bezogen auf das Volumen in anderen Projekten lagen die Kosten zwischen 450 und 500 EUR/m³ Frischkohle, netto. Schröder und Grömping (2013) geben Werte zwischen 425 und 550 EUR/m³, netto für Frischkohle an. Mit einem Preis von 515 EUR/m³ Kohle wird eine Kontrollrechnung durchgeführt.

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

Für die Varianten 1 und 2 ist die Dosierung von Flockungs- bzw. Fällmitteln (Me-Salzen) notwendig. In der Summe ist jedoch keine zusätzliche Menge notwendig, da die Dosierung der Fällmittel von der Belegung (Simultanfällung) in die Adsorptionsstufe verlagert wird. Insgesamt ergeben sich damit keine erhöhten Kosten für den Einsatz der Me-Salze gegenüber dem jetzigen Betrieb

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

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

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

Bei Variante 1 ist in jedem Fall der Einsatz von Flockungshilfsmitteln notwendig. Es wurden spezifische Kosten von 3.500 EUR/Mg Wirkstoff angesetzt. Bei Einsatzmengen von etwa 1,11 Mg/a ergeben sich daraus Verbrauchskosten von rund 3.900 EUR, netto. Weitere Werte sind der Betriebskostenberechnung in **Anlage 3** zu entnehmen.

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

Bautechnik:	1,0 % der Investitionskosten/a
Maschinentechnik:	4,0 % der Investitionskosten/a
EMSR-Technik:	2,0 % der Investitionskosten/a

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

Tabelle 2: Betriebskosten für die Varianten 1 bis 5

	Text	Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 PAK-Dosierung	Variante 3 GAK-Filtration	Variante 4 Ozonung	Variante 5 Ozonung + Teich
B	Betriebsgebundene Kosten EUR/a	125.352,70	90.177,17	118.882,21	103.686,51	106.818,81
C	Verbrauchsgebundene Kosten EUR/a	160.759,95	286.550,37	337.936,84	190.827,85	151.565,05
	Summe Betriebskosten, netto EUR/a	286.112,64	376.727,54	456.819,04	294.514,37	258.383,86
	Mehrwertsteuer: 19% EUR/a	54.361,40	71.578,23	86.795,62	55.957,73	49.092,93
	Summe Betriebskosten, brutto EUR/a	340.474,05	448.305,77	543.614,66	350.472,10	307.476,80
	Anteil	111%	146%	177%	114%	100%

Die niedrigsten Betriebskosten weist Variante 5 mit 307.000 EUR/a, brutto auf. Die Betriebskosten liegen für die Varianten 1 und 4 auf einem vergleichbaren Niveau von rd. 340.000...350.000 EUR/a, brutto. Bei ca. 450.000 EUR/a, brutto liegen die Betriebskosten von Variante 2 (PAK-Dosierung in den Filterüberstau). Variante 3 (GAK-Filtration) folgt mit einem deutlichen Abstand von ca. 200.000 EUR/a, brutto. Die Betriebskosten für die GAK-Filtration betragen rund 544.000 EUR/a, brutto.

9.4 Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden anhand folgender Annahmen berechnet:

Nutzungsdauer Bautechnik	30 a
Nutzungsdauer Maschinentechnik	15 a

Nutzungsdauer EMSR-Technik 10 a

Die angenommenen Nutzungsdauern entsprechen den Empfehlungen der KVR-Leitlinien. Die Nutzungsdauern sind direkt teilbar durch einen angenommenen Betrachtungszeitraum von 30 a. Damit ergibt sich eine einfache Vergleichbarkeit der so ermittelten Jahreskosten. Die Nutzungsdauern liegen etwas unterhalb bzw. entsprechen den Zeiträumen, die von der Stadt Borken angesetzt werden (BT: 35 a, MT: 20 a und EMSR-Technik: 10 a).

Der Nominalzinssatz der Stadt Borken beträgt derzeit 5,67 %. Der Realzinssatz ergibt sich unter Berücksichtigung der Inflationsrate zu:

$$i_r = (1 + i_n) / (1 + i_i) - 1$$

i_r - Realzinssatz

i_n - Nominalzinssatz

i_i - Inflationsrate

Die Inflationsrate der letzten 20 Jahre lag im Mittel bei ca. 2 % (DWA 2012). Unter Berücksichtigung des Nominalzinssatzes von 5,67 % und einer Inflationsrate von 2 % ergibt sich der Realzinssatz zu **3,6 %**. Dieser Wert steht in Übereinstimmung mit den KVR-Leitlinien (DWA 2012), die einen Standardwert von 3 % p.a. und eine Bandbreite von 2 bis 5 % p.a. ausweisen.

Zinssatz 3,6 % (Realzins)

Tabelle 3: Jahreskosten für die Varianten 1 bis 5

Pos.-Nr	Text		Variante 1 PAK m. Rücklaufk.	Variante 2 PAK-Dosierung	Variante 3 GAK-Filtration	Variante 4 Ozonung	Variante 5 Ozonung + Teich
A	Kapitalgebundene Kosten	EUR/a	333.430,46	183.227,02	357.013,77	283.893,63	302.759,83
B	Betriebsgebundene Kosten	EUR/a	125.352,70	90.177,17	118.882,21	103.686,51	106.818,81
C	Verbrauchsgebundene Kosten	EUR/a	160.759,95	286.550,37	337.936,84	190.827,85	151.565,05
Summe Jahreskosten, netto		EUR/a	619.543,10	559.954,56	813.832,81	578.408,00	561.143,69
Mehrwertsteuer: 19%		EUR/a	117.713,19	106.391,37	154.628,23	109.897,52	106.617,30
Summe Jahreskosten, brutto		EUR/a	737.256,29	666.345,93	968.461,04	688.305,52	667.760,99
Anteil			111%	100%	145%	103%	100%

Teilstrommenge (%)	m ³ /a	
		5.569.952

spez. Kosten, netto	EUR/m ³	0,11123	0,10053	0,14611	0,10384	0,10074
spez. Kosten, brutto	EUR/m³	0,13236	0,11963	0,17387	0,12357	0,11989

Die günstigsten Jahreskosten wurden für die Varianten 2 (PAK-Dosierung in Überstau) und 5 (Ozonung + Schönungsteich) mit ca. 666.000 bzw. 668.000 EUR/a, brutto ermittelt. Variante 4 (Ozon) liegt mit 688.000 EUR/a, brutto auf einem vergleichbaren Niveau. Für Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohlen) wurden Jahreskosten in Höhe von rund 737.000 EUR/a, brutto ermittelt. Variante 3 (GAK-Filtration) weist mit 968.000 EUR/a, brutto die höchsten Jahreskosten auf. Die errechneten spezifischen Behandlungskosten beziehen sich auf das im Teilstrom behandelte Abwasservolumen.

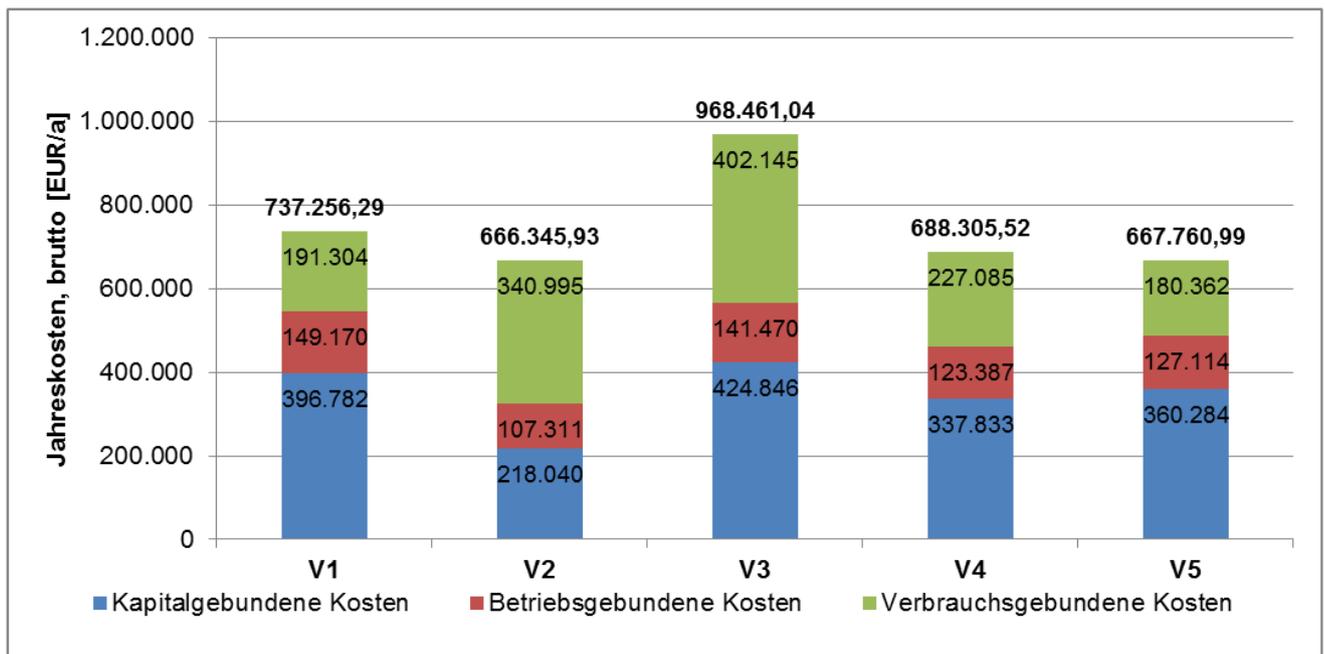


Bild 31: Anteile kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundene Kosten an den Jahreskosten der Varianten

Aus der im **Bild 31** dargestellten Aufteilung der Jahreskosten ist erkennbar, dass Variante 3 den höchsten Anteil an verbrauchsgebundenen wie auch an kapitalgebundenen Kosten aufweist. In beiden anderen Kostengruppen liegen die Varianten dichter beisammen.

9.5 Sensitivitätsanalyse

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

- Steigerung der Energiekosten (elektrisch) um 20 % auf 0,22 EUR/kWh, netto (0,26 EUR/kWh, brutto),
- Steigerung Bezugskosten für Aktivkohle (PAK bzw. GAK) und Flüssigsauerstoff um 10 %,
- Reduzierung Dosierung Pulverkohle und Ozon um 20 %,
- Erhöhung Filterstandzeit GAK Filter um 20 % (Bettvolumen).

Die Steigerung des Bezugspreises für elektrische Energie um 20 % führt auch bei den energieintensiven Varianten 4 und 5 (Ozonung) zu einer Steigerung der Betriebskosten von rund 6,4 % bzw. 7,2%. Bei den Aktivkohlevarianten liegen die Kostensteigerungen zwischen 6.700 EUR, brutto (V1) und 10.800 EUR, brutto (V3). Dies entspricht einer Steigerung von 2 % bei V1 und V3 bzw. von 1,5% bei V2.

Die Steigerung der Bezugskosten um 10 % für die Aktivkohlen und den Flüssigsauerstoff steigert die Betriebskosten der GAK-Filtration (Variante 3) um 35.000 EUR, brutto. Bei Variante 2 (PAK in Filterüberstau) ergibt sich eine Steigerung der Betriebskosten von 19.900 EUR, brutto. Die Preissteige-

zung hat bei den Varianten 1 (PAK mit Rücklaufkohle) und 4 (Ozonung) mit rund 10.000 EUR, brutto bzw. 11.600 EUR, brutto weniger Einfluss. Variante 5 weist mit einer Steigerung von 6.900 EUR, brutto die niedrigste Sensitivität auf. Bei den Betriebskosten ergibt sich so eine Steigerung von 6,3 % bei Variante 3 (GAK-Filtration), 4,4 % bei Variante 2, 2,9 % und 3,3% bei den Varianten 1 und 4 und 2,3% bei Variante 5. Bezieht man die Veränderung auf die Jahreskosten, so ergeben sich nachstehende Werte: 3,6 % bei Variante 3, 3 % bei Variante 2, rund 1,3 % bis 1,7 % bei den Varianten 1 und 4 und 1,0% bei Variante 5.

Die Verringerung der Dosiermengen um etwa 20 % hat erhebliche Einflüsse auf die Betriebskosten. Bei Variante 3 (GAK-Filtration) würden durch die Erhöhung der durchgesetzten Bettvolumina von 10.000 auf 12.000 die Betriebskosten um ca. 57.000 EUR, brutto (-10,6 %) sinken. Bei Variante 2 ergibt sich eine Verringerung der Betriebskosten um 61.200 EUR, brutto (-13,6%). Bei der Variante 1 (PAK) würden sich Einsparungen von rund 30.600 EUR, brutto (-9,0 %) ergeben, wenn die PAK-Dosierung von 10 mg/l auf 8 mg/l gesenkt würde. Die Reduzierung der Ozondosierung von 7,5 mg/l auf 6,0 mg/l verringert die Betriebskosten der Varianten 4 um rund 40.400 EUR, brutto (-11,5 %).

Es zeigt sich, dass besonders die Verringerung der Betriebsmittel großen Einfluss auf die Betriebskosten der Varianten hat. Bei Verfahren mit im Vergleich geringen Dosiermengen, insbesondere V1 (PAK mit Rücklaufkohle) aber auch die Ozonung (V4), ist die Auswirkung geringer. Die Varianten 3 (GAK-Filtration) und 4 (PAK-Dosierung in den Filterüberstau) zeigen eine sehr starke Abhängigkeit bei Veränderungen der durchgesetzten Bettvolumina bzw. Dosiermengen und bei Kostensteigerungen. Diese Verfahren weisen immer die höchsten Betriebskosten auf. Relativ stabil in Bezug auf die angenommenen Kostensteigerungen verhalten sich die Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) und Variante 5 (Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich).

Zu beachten ist, dass die genauen Einsatzmengen nicht exakt vorausgesagt werden können. Sie sind abhängig vom Reinigungsziel, aber auch beispielsweise von der CSB-Fraktion im Ablauf der Nachklärung. Insbesondere bei den Ozon-Varianten können Reduzierungen der Dosierungen erwartet werden.

10 Bewertung

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

Tabelle 4: Bewertungsmatrix für die Varianten 1 bis 5

Kriterium	Wichtung	Variante 1 PAK m. Rücklaufk.		Variante 2 PAK-Dosierung		Wertung Variante 3 GAK-Filtration		Variante 4 Ozonung		Variante 5 Ozonung + Teich	
		Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet
Jahreskosten	0,40	3	1,20	4	1,60	2	0,80	4	1,60	4	1,60
Reinigungsleistung P_{ges} /CSB (zusätz. Reduk.)	0,16	5	0,80	4	0,64	4	0,64	3	0,48	3	0,48
Bildung Nebenprodukte	0,06	5	0,30	5	0,30	5	0,30	4	0,24	4	0,24
Erfahrungen/Referenzen	0,06	5	0,30	3	0,18	4	0,24	4	0,24	4	0,24
Betriebs- und Wartungsaufwand	0,06	3	0,18	3	0,18	5	0,30	4	0,24	3	0,18
Betriebsicherheit	0,06	4	0,24	1	0,06	5	0,30	4	0,24	4	0,24
Sensitivität Kostensteigerungen	0,14	4	0,56	3	0,42	2	0,28	3	0,42	4	0,56
CO ₂ -Bilanz	0,06	4	0,24	3	0,18	2	0,12	4	0,24	5	0,30
Summe	1,00	33	3,82	26	(3,56)	29	2,98	30	3,70	31	3,84
Kommentar				Ungenügende Betriebsicherheit führt zur Ablehnung des Verfahrens							
Rangfolge		1		keine Einstufung		4		3		1	

Wertung nach Punkten
(steigende Punkte → bessere Wertung)

1 = ungenügend
5 = sehr gut

Die **Jahreskosten** werden mit einer Wichtung von 40 % als wichtigstes Entscheidungskriterium eingestuft. Wie schon im **Kapitel 9.4** dargelegt, sind die Jahreskosten bei Variante 2 (PAK-Dosierung in den Filterüberstau) und Variante 5 (Ozonung + Schönungsteich) am geringsten, gefolgt von Variante 4 (Ozonung) und Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle). Variante 3 (GAK-Filtration) hat mit Abstand die höchsten Jahreskosten. Die Varianten 2, 4 und 5 bekommen aufgrund der geringen Kosten vier Punkte, Variante 1 erhält drei Punkte. Variante 3 (GAK-Filtration) bekommt aufgrund der hohen Jahreskosten nur 2 Punkte.

Die **Reinigungsleistung P_{ges}** und **CSB** wird mit 16 % gewichtet. Sehr gute Ergebnisse hat hier die Variante 1 (PAK mit RLK) in Sindelfingen für P_{ges} erzielt. Gute Ergebnisse werden ebenfalls bei Variante 2 erwartet, die drei Punkte in diesem Kriterium erhält. Bei der Variante 3 kann von einer Reduktion des CSB (DOC) ausgegangen werden. Dies erfolgt in erster Linie durch Adsorption und wird mit vier Punkten bewertet. Bei den Varianten 4 und 5 ist kein großer Einfluss auf die P_{ges} -Konzentration zu erwarten. Daher werden für beide Variante drei Punkte vergeben. Allein Variante 1 erhält fünf Punkte in diesem Kriterium.

Die **Bildung von Transformationsprodukten** ist beim Einsatz von oxidativen Verfahren wie dem Ozon gegeben. In Versuchen wurde die Bildung bestätigt. Durch eine nachgeschaltete biologische Stufe können diese Produkte wieder abgebaut werden. Die Untersuchungen in Regensdorf zeigten, dass ein Sandfilter ausreicht. Auch in der Trinkwasseraufbereitung werden biologisch aktivierte Filter (z. B. GAK) der Ozonung aus diesem Grund nachgeschaltet. Dies ist in Borken mit der bestehenden Filtration und mit der Wiederinbetriebnahme des Schönungsteiches gegeben. Um der besonderen Bedeutung dieses Punktes Rechnung zu tragen, wurden die Ozonvarianten (V 4 und V5) hier mit vier Punkten bewertet und alle anderen Verfahren, bei denen keine Abbauprodukte entstehen können, mit fünf Punkten.

Für die vorgestellten Varianten ist die Situation hinsichtlich **Erfahrungen und Referenzen** unterschiedlich. Für die Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle), die bislang in Baden-Württemberg bevorzugt umgesetzt wurde, liegen derzeit schon sehr gute Erfahrungen vor. Derzeit sind Anlagen bis 1.100 l/s in Betrieb. Größere sind in Planung. Daher werden hier fünf Punkte vergeben. Für Variante 2 (PAK-Dosierung in Filterüberstau) liegen weniger Erfahrungen vor, sodass hier nur drei Punkte vergeben werden. Auch für die Ozonung liegen schon einige Erfahrungen aus Referenzanlagen vor (z. B. Regensdorf, Duisburg-Vierlingen, Bad Sassendorf). Insgesamt ist die Referenz- und Erfahrungslage jedoch geringer als bei der PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle. Daher werden vier Punkte vergeben.

Für die GAK-Filtration liegen Erfahrungen aus großtechnischen Versuchen vor. Deshalb werden an diese Variante ebenfalls 4 Punkte vergeben.

Der **Betriebs- und Wartungsaufwand** ist für den Betrieb der Kläranlage ein wichtiger Punkt. Hier wurde die GAK-Filtration (V 3) mit fünf Punkten am besten bewertet. Die Ozonung stellt aufgrund der Komplexität der Erzeugungsanlage schon einen besonderen Betriebspunkt auf der Kläranlage dar. Vier Punkte wurden an V4 vergeben, V5 bekommt 3 Punkte. Die Variante 1 (Pulveraktivkohledosierung) wurde mit drei Punkten schlechter eingestuft. Der Betriebsaufwand ist größer als bei der GAK-Filtration und der Ozonung. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Dosierung von Pulveraktivkohle mit hoher Genauigkeit und vertretbarem Betriebsaufwand erfolgen kann. Variante 2 (Pulveraktivkohledosierung in Filterüberstau) erhält ebenfalls 3 Punkte. Dies liegt insbesondere an der zusätzlichen Belastung der Filtration durch die Aktivkohle und dem damit verbundenen Betriebsaufwand.

Beim Punkt **Betriebssicherheit** wird das Verhalten des Verfahrens beim Ausfall eines Aggregates bewertet. Die Auswirkungen auf weitere Anlagenteile werden ebenfalls in die Beurteilung einbezogen. Die höchste Betriebssicherheit weist die GAK-Filtration auf. Die Anlage mit sechs Filterkammern ist sehr stabil zu betreiben. Weiterhin ist keine Dosierung erforderlich. Die Ozon-Varianten (V4 und V5) erhalten in diesem Kriterium aufgrund der 2-Straßigkeit und der kompakten Bauweise 4 Punkte. Mit vier Punkten wird auch Variante 1 bewertet. Aufgrund der verschiedenen Aggregate und Pumpen, die für die Dosierung von PAK, Me-Salzen und Flockungshilfsmittel sowie die Rücklaufkohleförderungen erforderlich sind, wird die Betriebssicherheit etwas schlechter als bei der GAK-Filtration bewertet. Bei Ausfall der PAK-Dosierung erfolgt weiterhin die Spurenstoffelimination, da durch den Rücklaufstrom der Zulauf weiterhin mit Aktivkohle behandelt wird. Bei Variante 2 wird die Filtration höher belastet. Dies kann zu einer Verkürzung der Rückspülintervalle führen und stellt ein hohes Risiko bezüglich der Betriebssicherheit dar. Daher wird hier nur 1 Punkt vergeben.

Die **Sensitivität** gegenüber Kostensteigerungen bei den Betriebsmitteln ist über die Laufzeit der Anlage zu betrachten, wie schon im **Kapitel 9.5** dargestellt. Hier zeigen Variante 1 (PAK mit Rückführung) und Variante 5 (Ozonung + Schönungsteich) die geringsten Einflüsse auf Kostensteigerungen. Sie werden daher mit vier Punkten bewertet. Im Mittelfeld liegen Variante 4 (Ozonung) und Variante 2 (PAK-Dosierung in den Überstau). Sie erhalten daher drei Punkte. Die GAK-Filtration (Variante 3) reagiert am empfindlichsten auf Kostensteigerungen. Daher werden hier zwei Punkte vergeben.

In letzter Zeit ist die **Nachhaltigkeit (CO₂-Emissionen)** von Verfahren gerade auch bei der 4. Reinigungsstufe immer stärker in den Fokus gerückt. Die Bewertung ist derzeit noch schwierig, da entsprechend weitreichende Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann noch keine eindeutige Bewertung abgegeben werden (Palmowski u. a., 2011). Die Aktivkohle-Varianten V2 und V3 wurden mit drei bzw. zwei Punkten bewertet. Durch die Rückführung der Aktivkohle ist die CO₂-Bilanz bei V1 etwas besser. Daher werden hier vier Punkte vergeben. Variante 4 (Ozonung) erhält ebenfalls vier Punkte. Durch den niedrigeren Stromverbrauch gegenüber V4 erhält V5 (Ozonung + Schönungsteich) fünf Punkte in diesem Kriterium.

Die ungenügende Betriebssicherheit bei V2 führt zur Ablehnung dieser Variante (keine Einstufung). In der **Summe** schneiden Variante 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) mit 3,82 Punkten und Variante 5 (Ozonung + Schönungsteich) mit 3,84 Punkten am besten ab. Gefolgt von Variante 4 (Ozonung) mit 3,70 Punkten. Variante 3 (GAK-Filtration) liegt mit 2,98 Punkten auf dem letzten Rang.

11 Zusammenfassung

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

- Variante 1: Pulverkohledosierung mit Rücklaufkohle,
- Variante 2: Pulverkohledosierung,
- Variante 3: Nachgeschaltete GAK-Filtration,
- Variante 4: Ozonung,
- Variante 5: Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich.

Die ausgewählten Varianten wurden auf ihre Umsetzbarkeit geprüft. Hierbei zeigte sich, dass die in Variante 2 (PAK-Dosierung in den Überstau der Filter) vorgesehene zusätzliche Abtrennung der Pulveraktivkohle, in manchen Belastungssituationen im derzeit schon stark beaufschlagten Filter, zu einer Überschreitung der empfohlenen Maximalbelastung des Filters mit abfiltrierbaren Stoffen führen kann. Das Verfahren wurde damit für die KA Borken als ungeeignet eingestuft.

Alle fünf Varianten wurden im Fließbild dargestellt. Für die V1, sowie V3-V5 wurden Lageplanausschnitte erstellt. Basierend auf den Abschätzungen der Betriebs- und Investitionskosten wurden für diese Varianten die Jahreskosten ermittelt. Die Bewertung der einzelnen Varianten erfolgte anhand einer Entscheidungsmatrix, in der neben den Jahreskosten noch weitere Kriterien berücksichtigt wurden. Maximal konnte eine Punktzahl von 5 Punkten erreicht werden.

Die höchste Punktzahl erreicht Variante 5 (Ozonung + Schönungsteich) mit 3,84 Punkten. Variante 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohle) kommt auf den zweiten Platz mit 3,82 Punkten. Die Variante 4 (Ozonung) liegt mit 3,7 Punkten auf dem dritten Platz. Variante 3 (GAK-Filtration) erhält die niedrigste Bewertung mit 2,98 Punkten.

Die geringsten Jahreskosten fallen bei den Varianten 2 (PAK-Dosierung in den Filterüberstau) mit 666.000 EUR, brutto und 5 (Ozonung + Schönungsteich) mit ca. 668.000 EUR, brutto an. Variante 4 (Ozonung) folgt mit 688.000 EUR, brutto. Bei Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) ergeben sich Jahreskosten in Höhe von 737.000 EUR, brutto. Die Variante 3 (GAK-Filtration) weist mit 969.000 EUR, brutto deutlich höhere Jahreskosten auf.

Mit Ausnahme der Variante 2 (PAK-Dosierung in den Überstau) steht aufgrund der bestehenden Flächensituation nur der bestehende Teich auf dem Anlagengelände als Bauplatz zur Verfügung. Dieser muss dazu in einem Teilbereich angeschüttet werden. In den Investitionskosten ist bei allen Varianten die Anfüllung (außer bei V2) berücksichtigt. Die Rohrleitungsführung zur Anbindung der 4. Reinigungsstufe an den Bestand ist bei allen Varianten aufgrund der Kreuzung der vorhandenen Rohrleitungstrassen aufwendig.

Variante 1 (PAK mit Rücklaufkohle) lag in der Bewertungsmatrix zusammen mit Variante 5 auf dem ersten Rang. Sie stellt das derzeit verbreitetste Verfahren zur Spurenstoffelimination dar (in Baden-Württemberg derzeit sieben Anlagen in Betrieb, weitere in Planung und Bau). Im Hinblick auf die Reduzierung weiterer Abwasserparameter hat es im Vergleich zu den anderen Verfahren die größte Wirkung. Die Ozonung mit nachgeschaltetem Schönungsteich (Variante 5) lag ebenfalls auf dem ersten Platz. Die Jahreskosten dieses Verfahrens sind stark von der angewandten Ozondosis abhängig. In der Berechnung wurde derzeit von einer gegenüber V4 niedrigen Dosis ausgegangen. Sollte sich diese Annahme bestätigen oder noch geringere Dosen möglich sein, so wird dieses Verfahren wirtschaftlich interessanter. Weitere Forschungsergebnisse hinsichtlich der Bildung von Transferprodukten sollten in die Entscheidungsfindung einfließen.

Die Ozonung (Variante 4) ist auf dem dritten Rang. Für dieses Verfahren spricht die hohe Betriebssicherheit. Die höhere Ozondosis als bei V5 führt zu den etwas höheren verbrauchsgebundenen Kosten. Diese Variante ist gegenüber Steigerungen des Strompreises sehr anfällig.

Die GAK-Filtration (Variante 3) ist aufgrund der hohen verbrauchsgebundenen Kosten und die hohe Empfindlichkeit gegenüber Kostensteigerungen auf dem vierten Rang. Für dieses Verfahren spricht analog zu Variante 4 die hohe Betriebssicherheit. Die relativ geringe prognostizierte Standzeit der Aktivkohle im Filter führt in diesem Fall zu den hohen Verbrauchskosten. Der Energiebedarf von Variante 3 ist von allen Variante am geringsten.

Die TUTTAHS & MEYER Ing.-GmbH empfiehlt für weitere Untersuchungen auf der Kläranlage Borken Variante 1 (PAK-Dosierung mit Rücklaufkohleführung) und Variante 5 (Ozonung + Schönungsteich) zu berücksichtigen.

12 Literaturverzeichnis

- [100] **Abegglen u. a., 2009**
Abegglen, C.; Escher, B.; Hollender, J.; Koepke, S.; Ort, C.; Peter, A.; Siegrist, H.; von Gunten, U.; Zimmermann, S.; Koch, M.; Niederhauser, P.; Schärer, M.; Braun, C.; Gälli, R.; Jung-hans, M.; Brocker, S.; Moser, R.; Rensch, D.: Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf; Studie der Eawag im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (CH), 2009, Download unter: www.eawag.ch/medien/bulletin/20090616/schlussbericht.pdf.
- [101] **ATV-A 203**
DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: ATV-Arbeitsblatt A 203/Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung, April 1995.
- [102] **Bornemann u. a., 2012**
Bornemann, C.; Hachenberg, M.; Kazner, C.; Herr, J.; Jagemann, P.; Lyko, S.; Benstöm, F.; Montag, D.; Platz, S.; Wett, M.; Kaub, J. M.; Kolisch, G.; Osthoff, T.; Rolfs, T.; Stepkes, H.: Teilprojekt 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2012.
- [103] **Breitbach u. Bathen 2001**
Breitbach, Marc; Bathen, Dieter: Adsorptionstechnik. 1. Auflage. Springer-Verlag, 2001. – ISBN 9783540419082.
- [104] **Cooney 1998**
Cooney, D. O.: Adsorption Design for Wastewater Treatment. 1. Auflage. CRC, 1998. – ISBN 9781566703338
- [105] **DVGW W 239**
DVGW W 239 (A) März 2011. Entfernung organischer Stoffe bei der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle.
- [106] **DWA 2008**
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.): Anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf – Arzneistoffe. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 5/2008 (DWA-Themen). – ISBN 9783940173744.
- [107] **DWA 2012**
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (HVR-Leitlinien). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 07/2012, 8. überarbeitete Auflage. – ISBN 9783941897557.

- [108] **Grünebaum u. a., 2012**
Grünebaum, T.; Herbst, H.; Keyzers, C.; Lyko, S.; Türk, J.: Mikroschadstoffelimination mit Ozon: Beispiele für Kläranlagen; Vortrag auf dem 2. Fachsymposium Mikroschadstoffe. NRW 2012; Elimination von Mikroschadstoffen, Keimen und Bakterien in kommunalen Kläranlagen am 21.06.2012 in Düsseldorf.
- [109] **Gujer 1999**
Gujer, Willi: Siedlungswasserwirtschaft. 1. Auflage. Springer-Verlag, 1999.
- [110] **Herbst u. a., 2011**
Herbst, H.; Kaufmann, M.; Türk, J.; Launer, M.: Abwasserzonierung Kläranlage Duisburg-Vierlinden – Auslegung – Bau – erste Betriebsergebnisse. In Innovation und Flexibilität – Systemoptimierung und Systemerweiterung; Tagungsband der 25. Karlsruher Flockungstage 2011, Schriftenreihe SWW (Bd. 141), Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe, ISBN 978-3-9813069-4-1.
- [111] **Joss u. a., 2005**
Joss, Adriano; Keller, Elvira; Alder, Alfredo C.; Göbel, Anke; McArdell, Christa S.; Ternes, Thomas; Siegrist, Hansruedi: Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. In: Water Res 39 (2005), Sep, Nr. 14, S. 3139–3152.
- [112] **Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW 2013**
http://www.koms-bw.de, Abruf: 01.09.2013
- [113] **Kümmel u. Worch 1990**
Kümmel, R.; Worch, E.: Adsorption aus wäßrigen Lösungen. 1. Auflage. VEB Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1990.
- [114] **Meyer 1979**
MEYER, Hermann: Untersuchung zur weitergehenden Reinigung biologisch gereinigten Abwassers – Die praktische Anwendung der Abwasserfiltration und ihre Bedeutung in der Abwassertechnologie; Schriftenreihe GWA, Bd. 35, 1979.
- [115] **Meyer 2008**
MEYER, Hermann: Abwasserreinigung – Qua vadis?, in GWF Wasser, Abwasser, 149, Nr. 4, 2008.
- [116] **MUNLV 2004**
MUNLV NRW: Untersuchung zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen. 2004 – Forschungsbericht.
- [117] **Nahrstedt u. a., 2011**
Nahrstedt, A.; Alt, K.; Barnscheidt, I.; Fritzsche, J.; Sürder, T.; Burbaum, H.; Klak, A.: CSB- und Spurenstoffelimination am Aktivkohlefestbettfilter. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011.

- [118] **Palmowski u. a., 2011**
Palmowski, L.; Veltmann, K.; Mousel, D.; Mauer, C.; Simsheuser, C.; Schmitz, U.; Eckers, S.; Jagemann, P.; Thöle, D.; Riße, H.; Gredugk-Hoffmann: Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase I. Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011.
- [119] **Pinnekamp u. a., 2010**
Pinnekamp, Johannes; Keyers, Christoph; Montag, David; Veltmann, Karin: Elimination von Mikroschadstoffen – Stand der Wissenschaft. In: Gewässerschutz – Wasser – Abwasser (GWA) 220 (2010), S. 28/1 – 28/21.
- [120] **Schröder und Grömping 2013**
Schröder, Karl-Heinz; Grömping, Markus: Einsatz von Aktivkohle auf der Kläranlage Gütersloh-Putzhagen, Vortrag auf dem DWA-Praxisseminar „Strategien zur Spurenstoffelimination auf Kläranlagen“ am 2. Juli 2013 in Gütersloh, Juli 2013.
- [121] **Schwentner u. a., 2013a**
Schwentner, G; Kremp, W.; Mauritz, A; Hein, A.; Metzger, S; Rössler, A.: Kosten in der weitergehenden Abwasserreinigung mit PAK – Teil 1, in Wasserwirtschaft – Wassertechnik (wwt), 63, Nr. 4, 2013.
- [122] **Schwentner u. a., 2013b**
Schwentner, G; Kremp, W.; Mauritz, A; Hein, A; Metzger, S; Rössler, A.: Kosten in der weitergehenden Abwasserreinigung mit PAK – Teil 2, in Wasserwirtschaft – Wassertechnik (wwt), 63, Nr. 5, 2013.
- [123] **Siegrist 2013**
H.-R. Siegrist: Energieverbrauch für die weitergehende Spurenstoffelimination – Maßnahmen zur Reduktion, in: Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 65, 31. Bochumer Workshop, Klimaschutz und Energiewende – Welchen Beitrag liefert der Abwasserrektor, 2013
- [124] **Sontheimer u. a., 1985**
Sontheimer, H.; Frick, B.; Fettig, J.; Hörner, G.; Hubele, C.; Zimmer, G.: Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. DVGW Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH), 1985.
- [125] **Ternes u. a., 2003**
Ternes, T. A.; Stüber, J.; Herrmann, N.; McDowell, D.; Ried, A.; Kampmann, M.; Teiser, B.: Ozonation: A tool for removal of pharmaceuticals contrast media and musk fragrances from wastewater?, Water Research, 37, 1976 – 1982, 2003.
- [126] **Worch 1997**
Worch, E.: Wasser- und Wasserinhaltsstoffe – eine Einführung in die Hydrochemie. Teubner-Verlag, Stuttgart-Leipzig, 205 S, 1997.

[127] **Worch 2004**

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

Anlagen

**Anlage 1:
Auslegung
Varianten 1 bis 5**

**Anlage 2:
Investitionskosten
Varianten 1 bis 5**

**Anlage 3:
Betriebskosten
Varianten 1 bis 5**

**Anlage 4:
Jahreskosten
Varianten 1 bis 5**