



Kläranlage Bad Oeynhausen  
Einsatz von Aktivkohle/  
alternative Verfahrenstechniken

Vorplanung

Erläuterungsbericht

Düsseldorf, Juli 2012



**Auftraggeber:**

Stadtwerke Bad Oeynhausen

---

Stadt Bad Oeynhausen: Gunnar Beermann

**Aufgestellt durch:**

Hydro-Ingenieure Planungsgesellschaft für Siedlungswasserwirtschaft mbH

Beratende Ingenieure

Stockkampstraße 10

40477 Düsseldorf

Düsseldorf, Juli 2012

4085\_00 /NG,CM

20120405\_Erläuterungsbericht\_Abgabe.docx

---

Geschäftsführer: Dipl.-Ing. Klaus Alt

Projektleiter: Dr.-Ing. Christian Mauer

## INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Veranlassung	1
1.2	Projektkurzbeschreibung	1
1.3	Aufgabenstellung	2
2	KURZBESCHREIBUNG DER BESTEHENDEN KLÄRANLAGE	4
2.1	Zustandsbeschreibung der Filtration	6
2.1.1	Filteraufbau und Filterspülung	6
2.1.2	Filterkammern	8
2.1.3	Filterablauf	12
2.1.4	E-MSR-Technik	12
3	STAND DER FORSCHUNG ZUM THEMA SPURENSTOFFE IM ABWASSER UND TRINKWASSER	13
3.1	Allgemeines	13
3.2	Physikalisch-chemische Stoffeigenschaften	14
3.3	Grundlagen der Aktivkohleadsorption	16
3.3.1	Grundbegriffe, Funktionsprinzip und Bemessungsparameter	16
3.3.2	Charakterisierung des Adsorptionsverhaltens	18
3.4	Grundlagen der Behandlung mit Ozon	20
3.4.1	Grundbegriffe und Funktionsprinzip	20
3.4.2	Grundlagen der chemischen Oxidation	21
3.4.3	Verfahrenstechnik und Apparative Ausführung der Ozonierung	23
3.5	Aktuelle Projekte bzw. Forschungsvorhaben	24
3.5.1	Überblick Aktivkohle	24
3.5.2	Einzelne Projektbeispiele Aktivkohle	25
3.5.3	Überblick Ozonierung	31
3.5.4	Einzelne Projektbeispiele Ozonierung	32
4	KURZBESCHREIBUNG DER LÖSUNGSMÖGLICHKEITEN	35
4.1	Allgemeines	35
4.2	Pulveraktivkohle	35
4.3	Granulierte Aktivkohle	35
4.4	Ozonierung	36
5	PLANUNGS- UND BEMESSUNGSGRUNDLAGEN	38
5.1	Planungsgrundlagen	38
5.2	Hydraulische Bemessungsgröße	39
6	PLANUNGSKONZEPTE ZUR SPURENSTOFFELIMINATION	42
6.1	Lösungsvariante 1: Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken	42
6.2	Lösungsvariante 2: Granulierte Aktivkohle in nachgeschalteten Druckkesseln (1-stufig)	45
6.3	Lösungsvariante 3: Ozonung	48

6.4	Lösungsvariante 4: Granulierte Aktivkohle – Nachgeschaltete Betonfilter im vorhandenen Filter (1-stufig)	51
7	PLANUNGSKONZEPT ZUR FILTERSANIERUNG	56
7.1	Filterkammern	56
7.1.1	Filteraufbau und Filterspülung	56
7.1.2	Düsenböden und Düsen	58
7.1.3	Zulauf	59
7.2	Pumpen und Armaturen	59
7.2.1	Zulaufpumpen	59
7.2.2	Regelarmaturen (Anhebung Filterüberstau)	60
7.3	Betonsanierung	60
7.4	Sonstige Ausbauarbeiten	60
8	KOSTENSCHÄTZUNG	61
8.1	Spurenstoffelimination	61
8.1.1	Investitionskosten	61
8.1.2	Betriebskosten	62
8.1.3	Jahreskosten	64
8.1.4	Sensitivitätsanalyse	65
8.2	Filtersanierung	67
8.2.1	Investitionskosten	67
9	BEWERTUNG DER PLANUNGSKONZEPTE ZUR SPURENSTOFFELIMINATION	68
10	WEITERE WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNGEN	72
11	ZUSAMMENFASSUNG	73

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Kläranlage Bad Oeynhausen (links)	1
Abbildung 2: Kläranlage Bad Oeynhausen (Teich) (rechts)	1
Abbildung 3: Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen (links)	4
Abbildung 4: Auslaufschacht und Auslaufbauwerk KA Bad Oeynhausen (rechts)	4
Abbildung 5: Filterhalle KA Bad Oeynhausen	5
Abbildung 6: Filteraufbau Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen	6
Abbildung 7: Filteraufbau und erforderliche Spülgeschwindigkeiten, Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen	8
Abbildung 8: Spülbild eines Filters zu Beginn der Luftspülung	9
Abbildung 9: Spülbild eines sanierten Filters zu Beginn der Luftspülung (Quelle: EVERS ENGINEERUNG)	10
Abbildung 10: Spülbild eines sanierten Filters bei der Entlüftung (Quelle: EVERS ENGINEERUNG)	10
Abbildung 11: Düsenboden von unten einschl. Luftpolsterrohrdüsen (Quelle: EVERS ENGINEERUNG)	10
Abbildung 12: Filterzelle mit Zulauf über seitliche Überfallkanten	11
Abbildung 13: Vertiefungen im Filterbett vor der Spülung (links)	12
Abbildung 14: Filterbett nach der Spülung (rechts)	12
Abbildung 15: Konzentrationen ausgewählter Mikroverunreinigungen (BEIER 2010)	13
Abbildung 16: Aktivkohlestruktur (BRENDDEL 1997, verändert nach MARCUS 2005)	16
Abbildung 17: Transportmechanismen bei der Aktivkohleadsorption (SONTHEIMER 1985)	19
Abbildung 18: Beladungsprofil Aktivkohlefilter (SONTHEIMER 1985, verändert)	20
Abbildung 19: Reaktionsmechanismen	22
Abbildung 20: Ozonisierung mit Teilstrom-Injektor-Prinzip	24

Abbildung 21: Activated carbon adsorbers: view of granular activated carbon contactors operated in parallel, used for the treatment of filtered secondary effluent (zitiert in Metcalf & Eddy, 4. Edition, Seite 1151)	26
Abbildung 22: Großbritannien – Kläranlage Swindon, Einsatz von granulierter Aktivkohle	27
Abbildung 23: Einsatz von Pulveraktivkohle – Mannheimer Verfahren	28
Abbildung 24: Anwendung der Pulveraktivkohle - Versuche auf der Kläranlage Kloten – Schweiz / Luftbild	28
Abbildung 25: Verbandsklärwerk Obere Lutter – Füllung der Filterzelle mit granulierter Aktivkohle	29
Abbildung 26: Mittlere Eliminationsraten mit GAK, kont. KA (10 m/h)	30
Abbildung 27: Ozonierung von gereinigtem Abwasser	31
Abbildung 28: Eliminationsleistung der Ozonierung (ABEGGLEN ET AL. 2009)	33
Abbildung 29: Kläranlage Bad Sassendorf – Ozonanlage mit Sauerstofftank	34
Abbildung 30: Auswertung Anteil der behandelten Abwassermenge an der	40
Abbildung 31: Auswertung Zulaufmengen, KA Bad Oeynhausen, 2009-2010	41
Abbildung 32: Schema Lösungsvariante 1 – Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken	42
Abbildung 33: Lösungsvariante 1- Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken	43
Abbildung 34: Schema Lösungsvariante 2 – GAK – Nachgeschaltete Druckkessel (1-stufig)	45
Abbildung 35: Lösungsvariante 2 – GAK – Nachgeschaltete Druckkessel (1-stufig)	47
Abbildung 36: Lösungsvariante 3 - Ozonung	50
Abbildung 37: Schema Lösungsvariante 4 – GAK – Nachgeschaltete Betonfilter im vorhandenen Filter (1-stufig)	52
Abbildung 38: Lösungsvariante 4 – GAK im vorhandenen Filter	53
Abbildung 39: Empfohlener Filteraufbau Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen	56
Abbildung 40: Empfohlene Filterspülgeschwindigkeiten Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen	57

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Spülprogramm Flockungsfilter KA Bad Oeynhausen	7
Tabelle 2: Ablaufmengen KA Bad Oeynhausen, 2009-2010	39
Tabelle 3: Empfohlenes Filterspülprogramm Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen	58
Tabelle 4: Investitionskosten in € der Varianten 1 bis 4	61
Tabelle 5: Betriebskosten in €/a der Varianten 1 bis 4	63
Tabelle 6: Jahreskosten in €/a der Varianten 1 bis 4	64
Tabelle 7: Bewertungsmatrix	69

## LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

### Plangrundlagen und projektbezogene Unterlagen:

- [1] Erläuterungsbericht Antrag zur Erneuerung der Wasserrechtlichen Erlaubnis der Kläranlage Bad Oeynhausen zum Einleiten von Abwasser in die Werre, Dipl.-Ing. Bernd Opiela, Unternehmensberatung für Umwelttechnik, Juli 2004
- [2] Abhilfe-/ 5. Änderungsbescheid zum Erlaubnisbescheid von 31.07.1990 in der Fassung des 4. Änderungsbescheides vom 20.11.2002 ausgestellt vom staatlichen Umwelt Amt und Arbeitsschutz OWL, November 2004
- [3] Systemskizze zur Erlaubnis
- [4] Erlaubnisbescheid zur Größenänderung, ausgestellt vom staatlichen Umwelt Amt und Arbeitsschutz OWL, Juni 2004
- [5] 2. Änderungsbescheid zur Genehmigung vom 04.12.1989 in der Fassung des 1. Änderungs-/ Nachtragsbescheides vom 20.07.1990, ausgestellt vom staatlichen Umwelt Amt und Arbeitsschutz OWL, November 2004
- [6] 1. Änderungsbescheid zum Erlaubnisbescheid vom 18.11.2004 für Einleitungen von Abwasseraus der KA Rehme der Stadt Bad Oeynhausen in die Worre, ausgestellt von der Bezirksregierung Detmold, März 2010
- [7] Labordaten: CSB- Werte ab 2007, Ortho-P- Werte 2010 - 2011, Jahresschmutzwassermengen 2009 und 2010
- [8] Abrechnungszeichnungen der Filtration Watek Kranz GmbH, 1991/ 1992
- [9] Lageplan KA Bad Oeynhausen, Ingenieurgesellschaft Dr. Knollmann mbH, Maßstab 1:250, 07.10.2011
- [10] Systemskizze Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen, Hansen und Klümpen Ingenieurbüro für Elektrotechnik, 20.09.2011
- [11] Blockfließbild Ka Bad Oeynhausen, September 2011
- [12] Lageplan KA Bad Oeynhausen, Hansen und Klümpen Ingenieurbüro für Elektrotechnik, Maßstab 1:250, 02.07.2007
- [13] Technischer Bericht Filterprüfung, Filterservice E- Görlich, 30.06.2011
- [14] Technische Stellungnahme: Ursachenklärung der massive Verlagerungen der Stüttschichten, Aufzeigen von Maßnahmen zur Beseitigung, EVERS Engineering, Dipl. Ing. (TU) Thomas Evers, 10.05.2007

- [15] Auswertung der Angebote „Betonarbeiten Kläranlage“, 18.04.2006
- [16] Filter 2 und 5: Kostenvergleich
- [17] Positions- und Bewehrungsplan 1/ 1a, Ingenieurbüro für Tragwerksplanung Altenkort, Maßstab 1:25/ 1:50, 11.12.2000
- [18] Statische Berechnung Deckenausschnitt in der Dachdecke im Filtrationsgebäude, IngenieurgemeinschaftHärtel Schiermeyer, September 2003
- [19] Statische Prüfung Sanierung einer Flockungsfiltration Anlage 1, Dr Ing. Horst G. Schultz, 22.12.2000
- [20] Statische Prüfung Sanierung einer Flockungsfiltration Anlage 2, Dr Ing. Horst G. Schultz, 16.02.2001
- [21] Statische Berechnung Einbau eines Laufkatzenkrans, Gruppe Ingenieurbau, Dezember 1998
- [22] Allgemeine technische Vorbemerkungen, Stadt Bad Oeynhausen, Abtlg. Tiefbau, 2005
- [23] Titel 1 Sanierung Filter 2, Vorbemerkungen zu den Titeln 1+2, Stadt Bad Oeynhausen Abtlg. Tiefbau, 2005
- [24] Titel 2 Sanierung Filter 5, Stadt Bad Oeynhausen Abtlg. Tiefbau, 2005
- [25] Filterdaten, Watek, 07.04.1994
- [26] Filterdüsen Anlage 7

Technische Regelwerke, Normen und gesetzliche Bestimmungen:

- [27] Abwasserabgabengesetz, BGBl. I S. 2585, 18.01.2005, Stand 31.07.2009

Veröffentlichungen und Fachliteratur:

- [28] ABEGGLEN, C.; ESCHER, B.; HOLLENDER, J.; SIEGRIST, H.; VON GUNTEN, U.; ZIMMERMANN, S.; HÄNER, A.; ORT, C.; SCHÄRER, M. (2012): Ozonung von gereinigtem Abwasser zur Elimination von organischen Spurenstoffen: Großtechnischer Pilotversuch Regensdorf (Schweiz). KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 02 (57): 155–160
- [29] ABEGGLEN, C.; ESCHER, B.; HOLLENDER, J.; KOEPKE, S.; ORT, C.; PETER, A.; SIEGRIST, H.; VON GUNTEN, U.; ZIMMERMANN, S.; KOCH,

- M.; NIEDERHAUSER, P.; SCHÄRER, M.; BRAUN, C.; GÄLLI, R.; JUNGHANS, M.; BROCKER, S.; MOSER, R.; RENSCH, D. (2009): Ozonung von gereinigtem Abwasser. Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf, Dübendorf, Schweiz.
- [30] BEIER (2010): Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwasser. In: Pinnekamp, J. (Hrsg.): Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser, Band 222, Aachen.
- [31] BLAC (2003): Bund/Länderausschuss für Chemikaliensicherheit. Arzneimittel in der Umwelt – Auswertung der Untersuchungsergebnisse. Bericht an die 61. Umweltministerkonferenz (UMK) am 19./20. November 2003, Hamburg.
- [32] BOLLER, M. (2007): Activated carbon adsorption. Process Engineering II – Description and design of physical, chemical and biological processes and process combinations in drinking and wastewater, Zürich, Schweiz.
- [33] BORNEMANN, C.; ERBE, V.; HACHENBERG, M.; KOLISCH, G.; OSTHOFF, T.; TAUDIEN, Y. (2012): Einsatz von Pulveraktivkohle in vorhandenen Flockungfiltrationsanlagen am Beispiel der Kläranlage Buchenhofen. Vortrag auf der 45. Essener Tagung 2012, 16. März 2012
- [34] CORNEL P. (2010): Eignung von Aktivkohle zur Abwasserbehandlung, in „Aktivkohle in der Abwasserreinigung – Vom Versuch zum technischen Maßstab“ Tagungsband Symposium Aktivkohle, 23./24.06.2010.
- [35] EAWAG (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser, Abschlussbericht, September 2010.
- [36] EILERS, L. (2001): Verfahrenskombination von Nanofiltration und Adsorption an Pulverkohle zur kontinuierlichen Abwasserreinigung. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- [37] ELTNER, A. (1998): Behandlung hoch belasteter Abwässer durch Aktivkohleadsorption und Aktivkohle / Nanofiltration – Verfahrensvergleich und Bewertung. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- [38] FENT, K. (2007): Ökotoxikologie. Georg Thieme Verlag, 3. Auflage, Stuttgart, ISBN: 978-3-13-109993-8.
- [39] HAIST-GULDE (2010): Pulveraktivkohlesorten – Qualitätskriterien und Produktauswahl, , in „Aktivkohle in der Abwasserreinigung – Vom Versuch

zum technischen Maßstab“ Tagungsband Symposium Aktivkohle, 23./24.06.2010.

- [40] HAUER, A. (2002): Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- [41] HEBERER, T. (2002): Occurrence, fate and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data. *Toxicology Letters* 131: 5–17.
- [42] HERBST, H.; KAUFMANN, M.; TÜRK, J.; LAUNER, M. (2011): Abwasserzomierung 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*
- [43] JAGEMANN, P.; LYKO, S.; HERBST, H.; TÜRK, J. (2012): Ergebnisse der großtechnischen Versuche zur Entfernung von Mikroverunreinigungen auf den Kläranlagen Bad Sassendorf und Duisburg-Vierlinden. Vortrag auf der 45. Essener Tagung 2012, 16. März 2012
- [44] JOSS, A.; ZABCZYNSKI, S.; GÖBEL, A.; HOFFMANN, B.; LÖFFLER, D.; MCARDELL, C. S.; TERNES, T. A.; THOMSEN, A.; SIEGRIST, H. (2006): Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research* 40: 1686–1696.
- [45] LANUV (Hrsg.) (2007): Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW. Eintrag von Arzneimitteln und deren Verhalten und Verbleib in der Umwelt – Literaturstudie. LANUV-Fachbericht 2, Recklinghausen.
- [46] LI, Q.; SNOEYINK, V.L.; MARINAS, B.J.; CAMPOS, D. (2003): Pore blockage effect of NOM on atrazine adsorption kinetics of PAC: the roles of PAC pore size distribution and NOM molecular weight. *Water Research*, 37, 4863-4872.
- [47] MARCUS, P. (2005): Entwicklung und Validierung eines Labor-Schnelltests zur Beurteilung der Adsorbierbarkeit von organischen Einzelstoffen an Aktivkohle. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.
- [48] MEYER H. (2008): Abwasserreinigung – Qua vadis?, in *GWF Wasser, Abwasser* 149 (2008) Nr. 4, 2008.

- [49] MUNLV (2004): Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landeswirtschaft und Verbraucherschutz NRW. Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen. Abschlussbericht. ISBN 3-9808617-6-7.
- [50] NAHRSTEDT, A.; BURBAUM, H.; ALT, K.; BARNSCHEIDT, I.; FRITZSCHE, J. (2012): Spurenstoffelimination mit granulierter Aktivkohle auf dem Klärwerk „Obere-Lutter“. Vortrag auf der 45. Essener Tagung 2012, 16. März 2012
- [51] NEUMANN, K.-D.; MERKEL, W.; SCHMIDT, T. C. (2011): Metabolitenbildung beim Einsatz von Ozon. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, AZ IV-7-042 600 001J, Vergabenummer 08/058.1
- [52] NÖTHER, T. (2009): Zur Ozonung von Spurenstoffen in mechanisch-biologisch gereinigten Abwässern. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Dortmund.
- [53] PINNEKAMP, J.; KROISS, H. (2009): Zusammenfassender Bericht zum Thema „Mikroschadstoffe in der aquatischen Umwelt“. Vortrag im Rahmen der 42. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, 18.-20.03.2009, Aachen.
- [54] PINNEKAMP et al.(2010): Elimination von Mikroschadstoffen – Stand der Wissenschaft, , in Tagungsband 43. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, 17. – 19.03.2010.
- [55] PÖPEL, H. J.; SCHMIDT-BREGAS, M.; WAGNER, M. (1988): Aktivkohleanwendung in der Abwasserreinigung I. KA – Korrespondenz Abwasser 03 (35): 247–255.
- [56] RÖLLE, SCHIRMEISTER (2010): Vorstellung aktueller Projekte zum Ausbau von kommunalen Klärwerken mit eine Adsorptionsstufe, , in „Aktivkohle in der Abwasserreinigung – Vom Versuch zum technischen Maßstab“ Tagungsband Symposium Aktivkohle, 23./24.06.2010.
- [57] SCHRADER, C. (2007): Membrantechnik, Ozonung und Aktivkohle zur Entfernung von Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser. In: Arzneimittel und Industriechemikalien – ein Abwasserproblem. 25. Bochumer Workshop. Band 54. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum.
- [58] SCHULTE-OEHLMANN, U.; OEHLMANN, J.; PÜTTMANN, W. (2007): Humanpharmakawirkstoffe in der Umwelt – Einträge, Vorkommen und der

- Versuch einer Bestandsaufnahme. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 19 (3): 168–179.
- [59] SCHUMACHER, J. (2006): Ozonung zur weitergehenden Aufbereitung kommunaler Kläranlagenabläufe. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- [60] SCHWARZENBACH, R. P.; GSCHWEND, P.; IMBODEN, D. M. (2003): Environmental organic chemistry. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 2. Auflage, ISBN: 0-471-35750-2.
- [61] SONTHEIMER, H.; FRICK, B.R.; FETTIG, J.; HÖRNER, G.; HUBELE, C.; ZIMMER, G. (1985): Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung. DGWW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- [62] TERNES, T. A.; HIRSCH, R. W. (2000): Occurrence and Behaviour of X-ray contrast media in sewage facilities and the aquatic environment. Environmental Science & Technology 34 (13): 2741–2748.
- [63] UNIVERSITÄT DORTMUND (2008): Einleitung und Elimination gefährlicher Stoffe in kommunalen Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, Phase III, Abschlussbericht, Kurzfassung, 27.03.2008.
- [64] VON GUNTEN, U. (2003): Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation. Water Research 37 (7): 1469–1487.
- [65] WICK, A.; FINK, G.; JOSS, A.; SIEGRIST, H.; TERNES, T. A. (2009): Fate of beta blockers and psycho-active drugs in conventional wastewater treatment. Water Research 43: 1060–1074.

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Veranlassung

Die Stadtwerke Bad Oeynhausen betreiben die Kläranlage Bad Oeynhausen (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2) mit einer derzeitigen Ausbaugröße von 80.000 EW, die aus einer mechanisch- biologischen Reinigungsstufe mit anschließender Flockungsfiltration besteht. Die Belebungsstufe mit einer mehrstraßigen, längsdurchströmten Nachklärung wird zur weitergehenden Stickstoffelimination betrieben und im Anschluss eine bestehende Flockungsfiltration aus dem Jahr 1995 betrieben.



Abbildung 1: Kläranlage Bad Oeynhausen (links)

Abbildung 2: Kläranlage Bad Oeynhausen (Teich) (rechts)

Die Stadtwerke Bad Oeynhausen streben eine weitergehende Abwasserreinigung durch den Einsatz von Aktivkohle auf der Kläranlage Bad Oeynhausen an. Die Hydro-Ingenieure GmbH wurde nach einem gemeinsamen Gespräch am 12.01.2011 am 13.04.2011 beauftragt, die Vorplanung für das Projekt „Einsatz von Aktivkohle/ Alternative Verfahrenstechniken“ zu erbringen.

### 1.2 Projektkurzbeschreibung

Für den Einsatz von Aktivkohle/ Alternative Verfahrenstechniken zur weitergehenden Abwasserreinigung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Gemäß Angebot der Hydro-Ingenieure GmbH vom 24.01.2011 sollen folgende Varianten untersucht werden:

- Umgestaltung der vorhandenen Flockungsfiltration unter Einsatz von neu einzubauender granulierter Aktivkohle (z.B. Umnutzung von zwei bestehenden Filterzellen)
- Umbau der vorhandenen Flockungsfiltrationsanlage unter Berücksichtigung einer möglichen Umnutzung der Klarwasservorlage bzw. des Spülabwasserbeckens
- Neubau einer GAK- Stufe (granulierte Aktivkohle) im Anschluss an die Flockungsfiltrationsanlage
- Zugabe von pulverisierter Aktivkohle in den Überstand der Flockungsfiltration

Ziel der Vorplanung ist die Bewertung der unterschiedlichen Lösungskonzepte im Hinblick auf die technische Machbarkeit, ihrer Wirtschaftlichkeit sowie eine Bewertung der Vor- und Nachteile einschließlich der nicht-monetären Aspekte. Andere denkbare Lösungsmöglichkeiten, wie z.B. eine Ozonierung, sollte mit in die Untersuchung einbezogen und kurz bewertet werden. Hierdurch wird eine Entscheidungsgrundlage geschaffen, die es den Stadtwerken Bad Oeynhausen ermöglicht, ein innovatives sowie unter dem Blickwinkel der Förderung von Seiten des Landes NRW wirtschaftlich vertretbares Konzept zur weitergehenden Abwasserreinigung mit Aktivkohle auf der Kläranlage Bad Oeynhausen umzusetzen.

Des Weiteren ist in der Vorplanung ein Sanierungskonzept für die vorhandene Flockungsfiltration zu entwickeln. Dies beinhaltet unter anderem der Austausch der Zulaufpumpen, der Ersatz der Absperrklappen im Auslauf durch Regelarmaturen und eine Sanierung der Bodenplatten etc.

### 1.3 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung für die vorliegende Vorplanung besteht im Einzelnen aus:

- 1 Grundlagenermittlung einschl. Auswertung der Wassermengen zur Dimensionierung der Verfahrenskomponenten.
- 2 Klärtechnische Berechnungen der Verfahrenskomponenten.
- 3 Zeichnerische Darstellung in Verfahrensschemata und Lageplanskizzen.
- 4 Bewertung der verschiedenen Möglichkeiten im Hinblick auf Vor- und Nachteile, insbesondere der nicht-monetären Aspekte, z. B. betrieblicher Risiken sowie zukünftiger Erweiterungsmöglichkeiten etc.
- 5 Überprüfung der technischen Machbarkeit.

- 6 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einschl. Abschätzung der Investitionskosten, der Betriebskosten sowie der Jahreskosten.
- 7 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse.

## 2 KURZBESCHREIBUNG DER BESTEHENDEN KLÄRANLAGE

Die Kläranlage Bad Oeynhausen liegt im Norden der Stadt Bad Oeynhausen zwischen der B 61 und der Werre. Sie ist auf 104.000 EW ausgelegt, wobei die im Rahmen eines Antrags zur Erneuerung der wasserrechtlichen Erlaubnis im Jahre 2004 ermittelte Auslastung bei ca. 63.000 EW lag und gemäß Änderungsbescheid die neue Ausbaugröße 78.500 EW beträgt. Der Vorfluter ist die nördlich des Klärwerks verlaufende Werre.

Die Kläranlage Bad Oeynhausen besteht aus einer mechanischen und biologischen Reinigungsstufe sowie einer Flockungsfiltration zur chemischen Phosphorelimination. Die mechanische Reinigungsstufe umfasst eine Rechenanlage, einen 1-straßigen Sandfang sowie eine 1-straßige Vorklärung. Die 2. Vorklärung wird als Regenbecken genutzt.

Das Belebungsbecken wird mit einer vorgeschalteten Denitrifikationsstufe betrieben. Es hat ein Gesamtvolumen von 15.400 m<sup>3</sup>. Das Abwasser-Schlammgemisch fließt zwölf rechteckigen Nachklärbecken zu, wo sich der Belebtschlamm sowie der Schlamm aus der Simultanfällung absetzen. Über ein Rücklaufschlammumpwerk wird der Rücklaufschlamm der biologischen Vorstufe wieder zugeführt. Der Überschussschlamm wird zur Schlammbehandlung gefördert.

Der Ablauf der Nachklärbecken fließt zur Flockungsfiltration (siehe Abbildung 3). Die Filtrationsanlage besteht aus insgesamt 8 Filtern mit einer Oberfläche von je ca. 37 m<sup>2</sup>.



Abbildung 3: Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen (links)

Abbildung 4: Auslaufschacht und Auslaufbauwerk KA Bad Oeynhausen (rechts)

Über Zulaufgerinne Ost und West wird das Wasser den Filtern zugeleitet. Die Filter werden abwärts durchströmt. Das Filterbett ist 3-schichtig aufgebaut. Die 1. Schicht besteht aus Anthrazit mit einer Korngröße von ca. 1,4 - 2,5 mm und einer Höhe von 0,9 m. Die 2. Schicht besteht ebenfalls aus Basalt mit einer Korngröße von ca. 1,0 - 1,6 mm und einer Höhe von 0,7 m. Die 3. Schicht ist die Stüttschicht mit einer Höhe von 0,5 m und einer Körnung von 4,5 – 8,0 mm. Das gefilterte Wasser fließt über die Ablaufleitung dem Filtratspeicher zu, von wo aus der Ablauf über den Auslaufschacht (siehe Abbildung 4) zum Auslaufbauwerk fließt.



Abbildung 5: Filterhalle KA Bad Oeynhausen

Die Filter werden über 2 Spülwasserpumpen und 2 Spülgebläse rückgespült. Die Spülwasserpumpen ziehen das Spülwasser aus dem Filtratspeicher, welches mit dem Ablauf der Filter beschickt wird. Das Spülabwasser gelangt in das Rückspülabwassersammelbecken, von wo es im freien Gefälle zum Zulaufpumpwerk fließt.

Die Fällmitteldosierstation für die Flockungsfiltration befindet sich im nördlichen Teil des Filtergebäudes. Der Fällmitteltank wird von der Fällmitteldosierstation für die Simultanfällung mit der Eisen(II)-sulfatlösung beschickt und das Fällmittel dann von hier aus in das Zulaufgerinne dosiert.

Die Schlammbehandlung auf der Kläranlage Bad Oeynhausen besteht aus einem Voreindicker, 2 Faulbehältern zur anaeroben Schlammstabilisierung, einem Nacheindicker und der Schlammentwässerung. Des Weiteren steht ein Schlammteich zur Verfügung. Die Entsorgung des entwässerten Schlammes erfolgt zu 100% in der Landwirtschaft.

## 2.1 Zustandsbeschreibung der Filtration

Die Flockungsfiltration auf der Kläranlage Bad Oeynhausen weist in mehreren Bereichen Optimierungs- bzw. Sanierungsbedarf auf, so dass im Rahmen einer Vor-Ort-Besichtigung am 25.22.2011 und anhand von durch die Stadtwerke Bad Oeynhausen beigestellten Unterlagen eine detaillierte Analyse des Zustands der Filtration durchgeführt wurde. Diese wird im Folgenden erläutert. Zulaufbereich Die 3 Zulaufpumpen wurden auf die maximale Wassermenge  $Q_{max} = 2.450 \text{ m}^3/\text{h}$  ausgelegt und verfügen über keinerlei Reserve. Die Rohrleitungen im Zulauf des Filters bestehen aus beschichteten Stahlleitungen. Regelmäßige Sichtprüfungen des Betriebs ergaben, dass die Leitungen und auch die Armaturen sich noch in einem guten Zustand befinden. Das IDM im Zulaufbereich ist ebenfalls noch in Ordnung. Der Fällmitteltank, der sich im oberen Geschoss des Zulaufpumpwerks befindet, ist sowohl für das momentan verwendete Eisen(II)-sulfat als auch für Eisen(III)-chlorid zugelassen und ist ebenso wie die Fällmitteldosierstation nicht sanierungsbedürftig.

### 2.1.1 Filteraufbau und Filterspülung

Der Filteraufbau der Flockungsfiltration ist in Abbildung 6 dargestellt.

Filterüberstau		~ 0,4 m
Anthrazit	1,4 – 2,5 mm	0,9 m
Basalt	1,0 – 1,6 mm	0,7 m
Stützschiicht	4,5 – 8,0 mm	0,5 m
Filterdüsenboden		0,2 – 0,25 m

Abbildung 6: Filteraufbau Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen

Der Filteraufbau entspricht nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. Nach heutigem Stand der Technik kann auf eine Stützsicht verzichtet werden. Außerdem ist der Filterüberstau mit ca. 0,4 m sehr knapp, insbesondere im Hinblick auf die Dosierung von Eisen(II)-sulfat als Fällmittel, welches noch aufoxidiert werden muss. Des Weiteren ergeben sich erhebliche Probleme mit dem Spülprogramm für einen solchen Filteraufbau, welche im Folgenden erläutert werden.

Die Filterspülung wird über die Durchflussmenge und den Öffnungsgrad der Ablaufklappen geregelt. Die Standzeit der Filter beträgt, je nach Zulaufbedingungen, 30 Stunden bis 7 Tage. Nach aktuellem Stand der Technik sollten Filter alle 24 h bis 48 h gespült werden. Gemäß Arbeitsbericht Abwasserfiltration der DWA (KA 3/1997) sollten Standzeiten von 48 h und nach Schröder (1998) von 72 h nicht überschritten werden.

Die Filter werden mit Luft und Wasser mit konstanter Spülgeschwindigkeit von etwa 61,3 m/h gespült. Das Spülprogramm der Flockungsfiltration kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 1: Spülprogramm Flockungsfilter KA Bad Oeynhausen

<b>Phase</b>	<b>Art der Spülung</b>	<b>Geschwindigkeit [m/h]</b>	<b>Dauer [min]</b>
1	Vorspülen (Wasser)	61,3	1,0
2	Luftspülung	61,3	2,0
3	Ruhe	-	1,5
4	Nachspülen (Wasser)	61,3	3,0

Die erforderliche Spülgeschwindigkeit für Anthrazit mit einer Körnung von 1,4 mm bis 2,5 mm beträgt gemäß ATV Arbeitsblatt A-203 55 m/h, um eine ausreichende Filterausdehnung um 20 – 30% zu erzielen. Die benötigte Spülgeschwindigkeit für Basalt mit einer Körnung von 1,0 mm bis 1,6 mm liegt bei 110 m/h. Um einen sauberen Mehrschichtfilteraufbau auch nach Rückspülung zu gewährleisten, sollte die Lockerungsgeschwindigkeit des oberliegenden Filtermaterials (hier Anthrazit) etwas kleiner oder gleich der des darunterliegenden Materials (hier Basalt) sein. Die Spülgeschwindigkeit in der Filtration auf der Kläranlage Bad Oeynhausen beträgt konstant etwa 61,3 m/h, d.h. sie liegt etwas über dem empfohlenen Wert für Anthrazit mit der vorhandenen Körnung und deutlich unter der empfohlenen Geschwindigkeit für Basalt. Nach Angaben eines Filterbauers (WABAG) ist die etwas höhere Spülgeschwindigkeit von 61,3 m/h im Vergleich zu einer benö-

tigten Spülgeschwindigkeit von 55 m/h für Anthrazit durchaus akzeptabel, jedoch für den Basalt deutlich zu gering, so dass es zu keiner ausreichenden Klassierung des Filtermaterials kommt.

Filterüberstau		
Anthrazit	1,4 – 2,5 mm	55 m/h
		<del>≠</del>
Basalt	1,0 – 1,6 mm	110 m/h
Stützschticht	4,5 – 8,0 mm	
Filterdüsenboden		
Spülgeschwindigkeit vorhandene Spülwasserpumpen		61 m/h

Abbildung 7: Filteraufbau und erforderliche Spülgeschwindigkeiten, Flockungfiltration KA Bad Oeynhausen

Die beiden Spülwasserpumpen haben eine maximale Fördermenge von 61,3 m/h und sind nicht regelbar. Sie sind nach Angaben des Betriebes nicht sanierungsbedürftig. Ebenso befinden sich die Spülwasserleitungen und die Armaturen noch in einem guten Zustand. Gleiches trifft auf die Spülluftgebläse und Spülluftleitungen zu. Der Beton im Rückspülabwassersammelbecken ist teilweise sanierungsbedürftig

### 2.1.2 Filterkammern

Aufgrund einer erhöhten Feststoffbelastung durch übermäßige Zugabe von Fäll- und Flockungshilfsmitteln kam es bei einigen Filtern zu einer Beschädigung der Düsenbodenplatten. Die hohe Feststofffracht führte zu einer Verstopfung der Filter, so dass sich einzelne Düsenbodenplatten beim Rückspülen gehoben haben und es zu einer Spaltbildung zwischen den Platten kam. Durch diese Spalten kam es zu Verlust von Filtermaterial. Eine Untersuchung der Firma EVERS ENGINEERING, Tecklenburg, aus dem Jahre 2007 zeigte auch ein unregelmä-

ßiges Spülbild bei den Filtern. Das Spülbild, gerade zu Beginn der Spülung, lässt deutlich die Ränder der einzelnen Düsenbodenplatten erkennen, da hier vermehrt Luft aufsteigt (siehe Abbildung 8).

Aufgrund dieser Problematik wurden 3 Filter bereits saniert; der Filter 7 im Jahr 2000 und die Filter 2 und 5 im Jahr 2005. Bei der Filtersanierung wurden die schachbrettartig angeordneten Düsenbodenplatten komplett durch 8 Platten, die über die gesamte Breite einer Filterkammer reichen, ersetzt. Die neuen Düsenbodenplatten sind mit einer Dicke von 25 cm 5 cm dicker als die alten Düsenplatte und wurden zudem durch 2 Betonbalken, die auf den Stirnseiten in den bestehenden Wänden verankert wurden, gegen Auftrieb gesichert. In diesem Zusammenhang wurden auch die Filterdüsen und das Filtermaterial ausgetauscht sowie eine Betonsanierung bis zur Oberkante des Filtermaterials durchgeführt.



Abbildung 8: Spülbild eines Filters zu Beginn der Luftspülung  
(Quelle: EVERS ENGINEERING)

Bei den sanierten Filtern scheint es zu einem unregelmäßigen Lufteintrag, insbesondere zu Beginn der Luftspülung zu kommen (in diesem Fall von rechts nach links, siehe Abbildung 9). Außerdem wird auf Abbildung 10 deutlich, dass einige Bereiche deutlich stärker durchströmt und entlüftet werden als andere. Es wurden Verlagerungen der Stüttschicht in den Filterkammern festgestellt.



Abbildung 9: Spülbild eines sanierten Filters zu Beginn der Luftspülu (Quelle: EVERS ENGINEERUNG)

Abbildung 10: Spülbild eines sanierten Filters bei der Entlüftu (Quelle: EVERS ENGINEERUNG)

Die Stadtwerke Bad Oeynhausen vermuten, dass eine mangelnde Verteilung der Spülluft unter den Düsenböden für diese Probleme verantwortlich ist. Die Spülluftleitung endet stumpf seitlich in der Stirnwand unterhalb des Düsenbodens. Es gibt keine Verteillleitungen. Unter dem Düsenboden (siehe Abbildung 11) scheint sich ein unregelmäßiges ein Luftpolster auszubilden und die Spülluft wird unkontrolliert in das Filterbett eingeblasen.



Abbildung 11: Düsenboden von unten einschl. Luftpolsterohrdüs (Quelle: EVERS ENGINEERUNG)

Sowohl bei den sanierten als auch bei den noch nicht sanierten Filtern entspricht die Anzahl der Filterdüsen mit ca. 45 – 46 Stück/m<sup>2</sup> nicht mehr dem heutigen Stand der Technik. Gemäß Arbeitsbericht Abwasserfiltration der DWA (KA 3/1997) sollten ca. 60 – 80 Düsen/ m<sup>2</sup> Filterboden installiert werden.

Eine weitere Problematik bei allen Filtern ist der Zulauf in die Filterkammern. Dieser erfolgt über 2 an den Längsseiten angeordnete Überfallkanten, die von der Stirnseite her beschickt werden. Das zufließende Wasser stürzt ca. 50 cm über die Überfallkante in die Filterkammer. Der Filterüberstau beträgt geschätzt etwa 40 cm.



Abbildung 12: Filterzelle mit Zulauf über seitliche Überfallkanten

Durch den hohen Absturz des Wassers und die geringe Höhe des Filterüberstaus kommt es zu Vertiefungen im Filtermaterial unterhalb der Zulaufbereiche (siehe Abbildung 13). Das Filtermaterial verlagert sich von dort in die Mitte der Filterkammer. Diese ungleichmäßige Verteilung des Filtermaterials kann zu leicht unterschiedlichen Filterwiderständen und einer ungleichmäßigen Durchströmung des Filterbetts führen, die jedoch keine Auswirkung auf die Ablaufwerte der Filtration zu haben scheint. Nach der Filterspülung ist das Filtermaterial wieder gleichmäßig verteilt (siehe Abbildung 14).

Es ist davon auszugehen, dass der Beton der bisher nicht sanierten Filterkammern sanierungsbedürftig ist.



Abbildung 13: Vertiefungen im Filterbett vor der Spülung (links)

Abbildung 14: Filterbett nach der Spülung (rechts)

### 2.1.3 Filterablauf

Die Überstauhöhe im Filter wird durch Absperrklappen in der Ablaufleitung geregelt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um Regelarmaturen, so dass keine genaue Regelung erfolgen kann. Die Ablaufleitung und sonstige Armaturen sind noch in einem guten Zustand. Ebenso wenig muss der Filtratspeicher saniert werden.

### 2.1.4 E-MSR-Technik

Die Messtechnik des Filters befindet sich noch in einem guten Zustand. Die Steuerungstechnik wurde zum Zeitpunkt der Besichtigung gerade erneuert.

### 3 STAND DER FORSCHUNG ZUM THEMA SPURENSTOFFE IM ABWASSER UND TRINKWASSER

#### 3.1 Allgemeines

Bislang konnten weit über 100 verschiedene Arzneimittelwirkstoffe teilweise in Konzentrationen oberhalb ökotoxikologischer Wirkschwellen in der Umwelt nachgewiesen werden. Hierzu existieren zahlreiche Studien und Übersichten (vgl. LANUV 2007, SCHULTE-OEHLMANN ET AL. 2007, MUNLV 2004, BLAC 2003, HEBERER 2002, TERNES UND HIRSCH 2000). Eine exemplarische und orientierende Zusammenstellung über die Spannweite gemessener Arzneimittelkonzentrationen in der aquatischen Umwelt ist in Abbildung 15 für Diclofenac (Analgetikum), Clarithromycin (Antibiotikum), Carbamazepin (Antiepileptikum) und Iopamidol (Röntgenkontrastmittel) dargestellt.

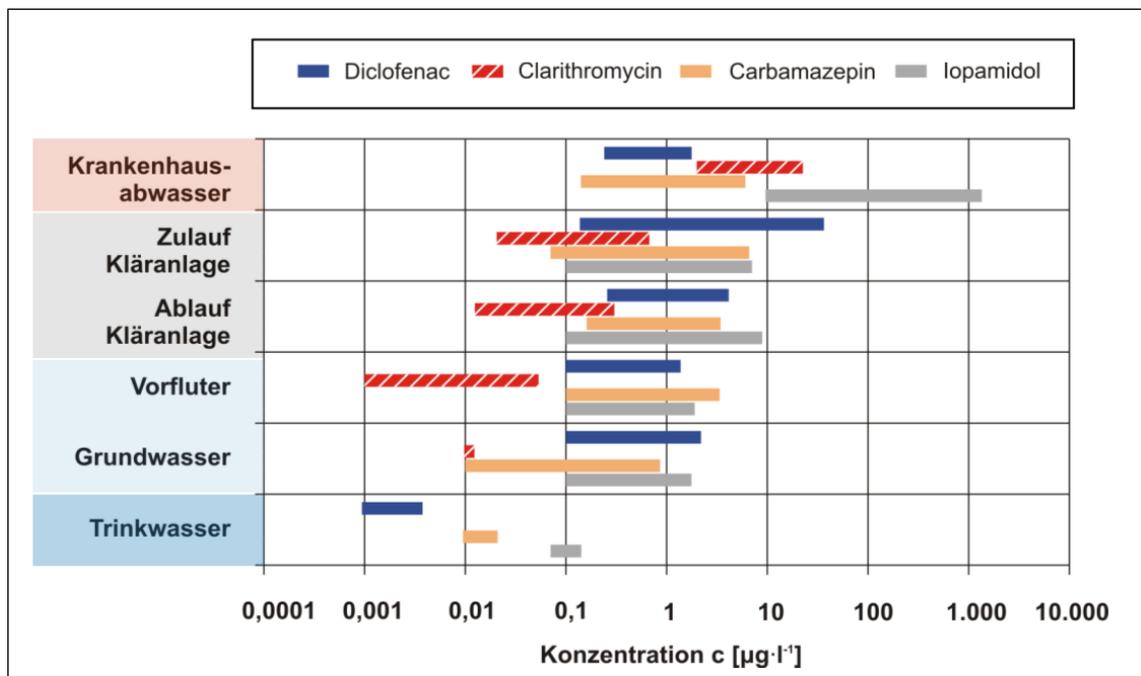


Abbildung 15: Konzentrationen ausgewählter Mikroverunreinigungen (BEIER 2010)

Im Anhang X der EU-Wasserrahmenrichtlinie ist eine Reihe von Substanzen aufgeführt, die als resistent, bioakkumulierend oder toxisch einzustufen sind. Bisher liegen die in Oberflächengewässern nachgewiesenen Konzentrationen noch in einem Bereich, der keine akute Gefahr für den Menschen darstellt; eine Beeinflussung von Gewässerorganismen, insbesondere durch Hormone, ist jedoch festzustellen.

Erreichbare Zielwerte zur Reduzierung des Eintrages in die Gewässer sind derzeit in der Diskussion. Die Kläranlagen stellen neben Industrie und Landwirtschaft einen bedeutenden Emittenten für Mikroverunreinigungen in die aquatische Umwelt dar und sind deshalb im Fokus für Reduzierungsmaßnahmen.

Aus Gründen des vorbeugenden Gesundheits- und Umweltschutzes ist es geboten, den Eintrag von Mikroverunreinigungen in die Umwelt zu begrenzen. Hierzu ist es notwendig, Maßnahmen zur Eintragsbegrenzung zu identifizieren, die technisch bzw. organisatorisch praktikabel und wirtschaftlich sind.

Bisherige Forschungsergebnisse zeigen, dass eine quantitative Elimination von Mikroverunreinigungen in vollbiologischen Kläranlagen mittels einer Ozonbehandlung oder einer Aktivkohleadsorption in Verbindung mit einer Filtration erzielt werden kann. Nachfolgend werden die grundlegenden Zusammenhänge für diese Verfahren erklärt.

### **3.2 Physikalisch-chemische Stoffeigenschaften**

Um die Verteilung und das Verhalten von Mikroverunreinigungen in der Umwelt und im Abwasserreinigungsprozess zu charakterisieren, sind insbesondere die physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften heranzuziehen. Hierzu zählen nach PINNEKAMP UND KROISS (2009) z.B. die Molekülstruktur, Polarität/ Hydrophobie, Sorptionsfähigkeit, Abbaubarkeit/Transformation bzw. Persistenz und Flüchtigkeit.

Mikroverunreinigungen verfügen über unterschiedlichste Molekulargewichte, -strukturen und funktionelle Gruppen, wodurch sie teilweise schwer biologisch abbaubar sind und eine hohe Persistenz in der Umwelt aufweisen. In der wässrigen Phase liegen z.B. Arzneimittel in ionisierter und nicht-ionisierter Form vor. Dies hat einen unmittelbaren Einfluss auf die chemisch-physikalische Reaktivität, Sorptionsfähigkeit und Bioverfügbarkeit eines Arzneimittelwirkstoffes.

Die Polarität kennzeichnet die Elektronenverteilung innerhalb einer Verbindung. Unpolare Verbindungen verfügen über eine nahezu gleichmäßige Elektronenaufteilung. Polare Verbindungen weisen aufgrund einer ungleichmäßigen Elektronenverteilung unterschiedliche Ladungsschwerpunkte auf, wodurch sogenannte Teil- oder Partialladungen ausgebildet werden. Das Wasser ist die bekannteste polare Verbindung. Polare Stoffe sind durch eine gute Wasserlöslichkeit gekennzeichnet.

Hydrophobie beschreibt die Eigenschaft von Molekülen oder Molekülgruppen, bevorzugt Wechselwirkungen mit anderen hydrophoben Gruppen einzugehen.

Diese Stoffe bedingen keine ausgeprägten Wechselwirkungen mit polaren Gruppen oder Molekülen und sind daher schlecht wasserlöslich. Als Maß für die Hydrophobie kann der Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient  $K_{OW}$  (engl.  $P_{OW}$ ) [-] herangezogen werden. Der  $K_{OW}$  ist der Quotient der Gleichgewichtskonzentrationen einer Chemikalie in einem Zweiphasensystem aus n-Oktanol und Wasser (SCHWARZENBACH ET AL. 2003).

Die Sorptionsfähigkeit/Sorption kennzeichnet die chemische oder physikalische Bindung von Substanzen an Feststoffe. Dabei sind die spezifischen Stoffeigenschaften wie z.B. das Molekulargewicht, die Molekülstruktur, funktionelle Gruppen im Molekül und die daraus resultierende Polarität sowie die Wasserlöslichkeit herauszustellen, da diese über die Verteilung einer Substanz zwischen der flüssigen und der festen Phase entscheiden. Ebenso bedeutsam sind die Eigenschaften der festen Phase wie z.B. belebter Schlamm oder Aktivkohle. Bei der Sorption werden zwei Sorptionsmechanismen, die Absorption und die Adsorption, differenziert. Die Absorption beschreibt das Eindringen von Molekülen in eine dreidimensionale Matrix (SCHWARZENBACH ET AL. 2003). Bei der Absorption kommt es zu hydrophoben Wechselwirkungen zwischen unpolaren Molekülen bzw. Gruppen innerhalb eines Moleküls und dem organischen Anteil innerhalb der festen Phase. Für die Absorption von Substanzen gilt grundsätzlich, je unpolarer eine Verbindung, desto besser ist die Absorption. Die Bindung von Molekülen an eine zweidimensionale Oberfläche wird als Adsorption bezeichnet (SCHWARZENBACH ET AL. 2003). Für die Adsorption sind elektrostatische Wechselwirkungen von positiv geladenen Gruppen innerhalb eines Moleküls und negativ geladenen Oberflächen der Biomasse bzw. Aktivkohle ursächlich.

Unter Abbau oder Umbau einer Substanz wird die strukturelle Veränderung von Chemikalien durch verschiedene Transformationsprozesse verstanden. Grundsätzlich lassen sich abiotische und biotische Transformationsprozesse differenzieren (FENT 2007). Bei den abiotischen Transformationsprozessen erfolgt der Ab- bzw. Umbau von Chemikalien mittels chemischer Reaktionen wie z.B. Hydrolyse oder Redoxreaktionen sowie physikalischer Reaktionen wie z.B. Photolyse. Bei biotischen Transformationsprozessen sind Ab- und Umbau der Substanzen auf enzymatisch gesteuerte Reaktionen zurückzuführen. In der aquatischen Umwelt handelt es sich meist um mikrobielle Umwandlungsprozesse. In der Abwasserreinigung werden abiotischen Prozessen im Vergleich zu biotischen Prozessen eine eher untergeordnete Rolle zugeschrieben. Der biologische Abbau erfolgt im Wesentlichen durch bakterielle Enzyme im belebten Schlamm. Es gibt eine Reihe von Studien, die die biologische Abbaubarkeit von Arzneimitteln und organischen Mikroverunreinigungen im Abwasserreinigungsprozess untersucht haben (vgl. WICK ET AL. 2009, JOSS ET AL. 2006).

### 3.3 Grundlagen der Aktivkohleadsorption

#### 3.3.1 Grundbegriffe, Funktionsprinzip und Bemessungsparameter

Die Adsorption von Arzneimitteln an Aktivkohle stellt ein physikalisch-chemisches Trennverfahren dar, bei dem zu eliminierende Abwasserinhaltsstoffe (Adsorptiv) an der Oberfläche der Aktivkohle (Adsorbens) angelagert werden. Die Abgabe sorbierter Moleküle vom Adsorbens wird als Desorption bezeichnet. Die Effizienz der Adsorption wird durch die physikochemischen Eigenschaften des Adsorptivs und Adsorbens bestimmt (MARCUS 2005). Aktivkohle besteht aus Graphitkristallen und wird überwiegend aus kohlenstoffhaltigen Rohstoffen wie z.B. Stein-, Holzkohle, Torf oder Nussschalen hergestellt. Durch den Prozess der Aktivierung werden flüchtige Rohstoffkomponenten abgebaut und es entstehen zahlreiche Poren, Risse und Spalten, die die Oberfläche der Aktivkohle vergrößern. Die Aktivierung erfolgt entweder chemisch durch Einsatz dehydratisierend wirkender Mittel wie z.B. Zinkchlorid oder, in der Wasseraufbereitung, vorwiegend unter Einbeziehung von Wasserdampf im Temperaturbereich von 800 bis 1.000 °C (EILERS 2001, BRENDEL 1997). Aktivkohle wird durch ein ausgeprägtes inneres Porensystem gekennzeichnet, dessen struktureller Aufbau Abbildung 16 verdeutlicht. Die Aufnahmekapazität einer Aktivkohle wird insbesondere durch die kleinen Mikroporen bestimmt, da diese den Hauptteil der inneren Oberfläche bilden. In Abhängigkeit des Aktivierungsgrades werden Kohlen in niedrig (500 bis 800  $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ), mittel (800 bis 1.200  $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ) und hoch aktivierte Bereiche (1.200 bis 1.500  $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ) gruppiert.

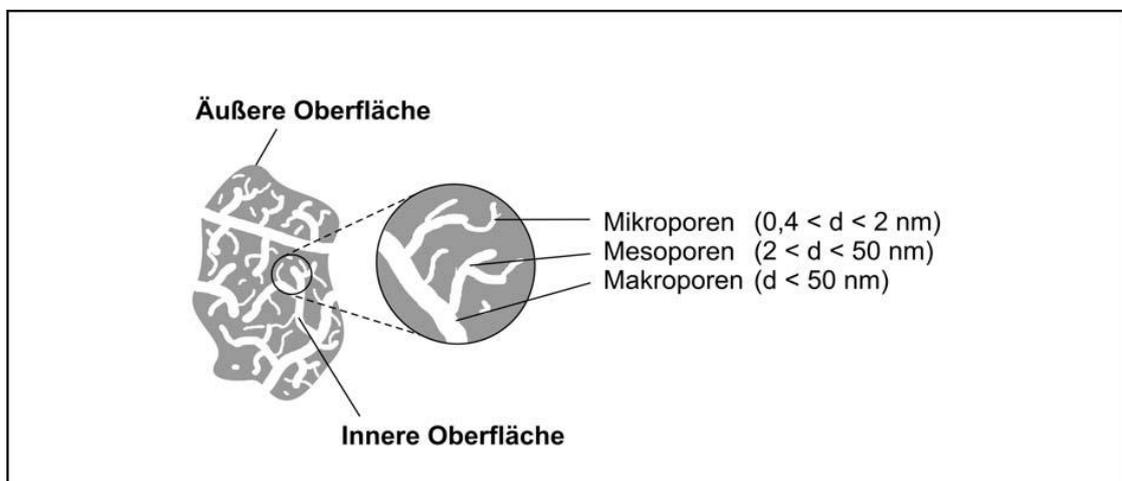


Abbildung 16: Aktivkohlestruktur (BRENDEL 1997, verändert nach MARCUS 2005)

Zudem kann Aktivkohle hinsichtlich ihres äußeren Erscheinungsbildes wie nachstehend aufgeführt gruppiert werden:

- Pulveraktivkohle (PAC), engl.: powdered activated carbon: Körnung < 0,045 mm
- Kornkohle und Granulierte Aktivkohle (GAC), engl.: granulated activated carbon: Körnung zwischen 0,5 und 4 mm sowie
- zylindrisch geformter Aktivkohle (Formkohle und Pellets): Größenbereich zwischen 0,4 bis 4 mm (EILERS 2001).

Das Funktionsprinzip der Aktivkohleadsorption basiert auf elektrostatischen Wechselwirkungen (van-der-Waals- und Coulombkräfte) zwischen den Adsorbatmolekülen und den Adsorbensatomen. Dipollose Moleküle, wie z.B. Benzol, werden an Aktivkohle adsorbiert, indem Dispersionskräfte entstehen, die aufgrund der zeitlich unbeständigen Ladungsverteilung im Adsorptivmolekül temporäre Dipole hervorgerufen und auch auf Nachbarmoleküle übergreifen können. Elektrostatische Wechselwirkungen bewirken im Vergleich zu Dispersionskräften eine stärkere Anziehung von Adsorptiven an der Aktivkohleoberfläche (MARCUS 2005, HAUER 2002). In der Abwasserreinigung werden sowohl Pulverkohlen als auch Kornkohlen eingesetzt. Die Bemessung technischer Aktivkohleapplikationen erfolgt auf Grundlage der zu behandelnden Abwassermatrix und des gewünschten Reinigungszieles. Mit der Dosierung von Pulverkohle in den Ablauf der Nachklärung und einer Errichtung von Aktivkohlefiltern mit granulierter Aktivkohle zur Ablaufbehandlung von Kläranlagen, stehen zwei grundsätzlich unterschiedliche verfahrenstechnische Ansätze zur Verfügung. Während Pulveraktivkohle in mg je Liter dem Abwasserstrom zudosiert wird, erfolgt die Bemessung von Aktivkohlefiltern auf Basis von Filterfläche, -volumen und Filtergeschwindigkeit.

Um die Resultate verschiedener Aktivkohlefilter miteinander zu vergleichen, werden folgende Parameter herangezogen (MARCUS 2005):

- spezifischer Durchbruch  $c/c_0$  [-]: Quotient aus Ablauf- und Zulaufkonzentration,
- durchgesetzte Bettvolumina BVT [-], abgeleitet aus dem engl.: Bed Volume Treated: Quotient aus durchgesetztem Wasservolumen und Filtervolumen sowie der
- spezifische Durchsatz  $V_{sp}$ . [ $m^3 \cdot kg^{-1}$ ]: Quotient aus durchgesetztem Wasservolumen und der eingewogenen Kohlemenge.

Dem praktischen Einsatz einer Aktivkohle gehen im Allgemeinen Laboruntersuchungen zur Feststellung der Adsorptionskapazität des Adsorbens voraus, die aber auch parallel zu weiteren Planungsschritten durchgeführt werden können.

### 3.3.2 Charakterisierung des Adsorptionsverhaltens

Das Adsorptionsverhalten kann durch Adsorptionsisotherme und auf Grundlage kinetischer Modelle beschrieben werden. Adsorptionsisotherme stellen eine Korrelation zwischen der Konzentration des Adsorptivs und der Beladung des Adsorbens im Gleichgewichtszustand dar. Für die Beschreibung des Adsorptionsgleichgewichtes stehen dabei verschiedene empirische und semiempirische Modelle zur Verfügung. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Anwendbarkeit und werden auf Ein-, Mehr- oder Vielstoffgemische bezogen (EILERS 2001). Zudem variieren die Modelle in der Parameteranzahl, die den Erkenntnissen aus Adsorptionsisothermen angepasst werden müssen (ELTNER 1998).

Adsorptionsgleichgewichte kennzeichnen die statische Beladungskapazität eines Adsorbens. Um Aktivkohleadsorber zu dimensionieren, sind zusätzlich Kenntnisse über die Adsorptionskinetik notwendig. Diese betrachten den zeitlichen Verlauf des Adsorptionsvorgangs, dem nach SONTHEIMER ET AL. (1985) folgende Transportprozesse zu Grunde liegen:

1. Transport des Adsorptiv-Moleküls durch die das Adsorbens umgebende wässrige Lösung an den Kornrand (bei Anströmung Konvektion bzw. in freier Lösung Diffusion)
2. Filmdiffusion (vgl. Abbildung 17, Nr. 1): Transport durch den das Adsorbens Korn umgebenden laminaren Grenzfilm,
3. Porendiffusion (vgl. Abbildung 17, Nr. 2): Transport des Adsorptiv-Moleküls innerhalb der Pore (Diffusion in der Porenflüssigkeit und/oder in adsorbiertem Zustand entlang der inneren Oberfläche) sowie
4. Oberflächendiffusion (vgl. Abbildung 17, Nr. 3): Adsorption des Adsorptiv-Moleküls an die freie Oberfläche des Adsorbens (am aktiven Zentrum).

Die Dicke der Grenzschicht  $\delta$  ist primär von der Geometrie des Adsorbens abhängig. Eine weitere Einflussgröße der Filmdiffusion stellt die Turbulenz im wässrigen Medium dar. Bei der Porendiffusion ist der Konzentrationsgradient entlang der Makroporen die treibende Kraft. Weisen Substanzen eine hohe Affinität zur Aktivkohleoberfläche auf, erfolgt die Diffusion an der Oberfläche langsam und führt zu einer hohen Adsorption (BOLLER 2007).

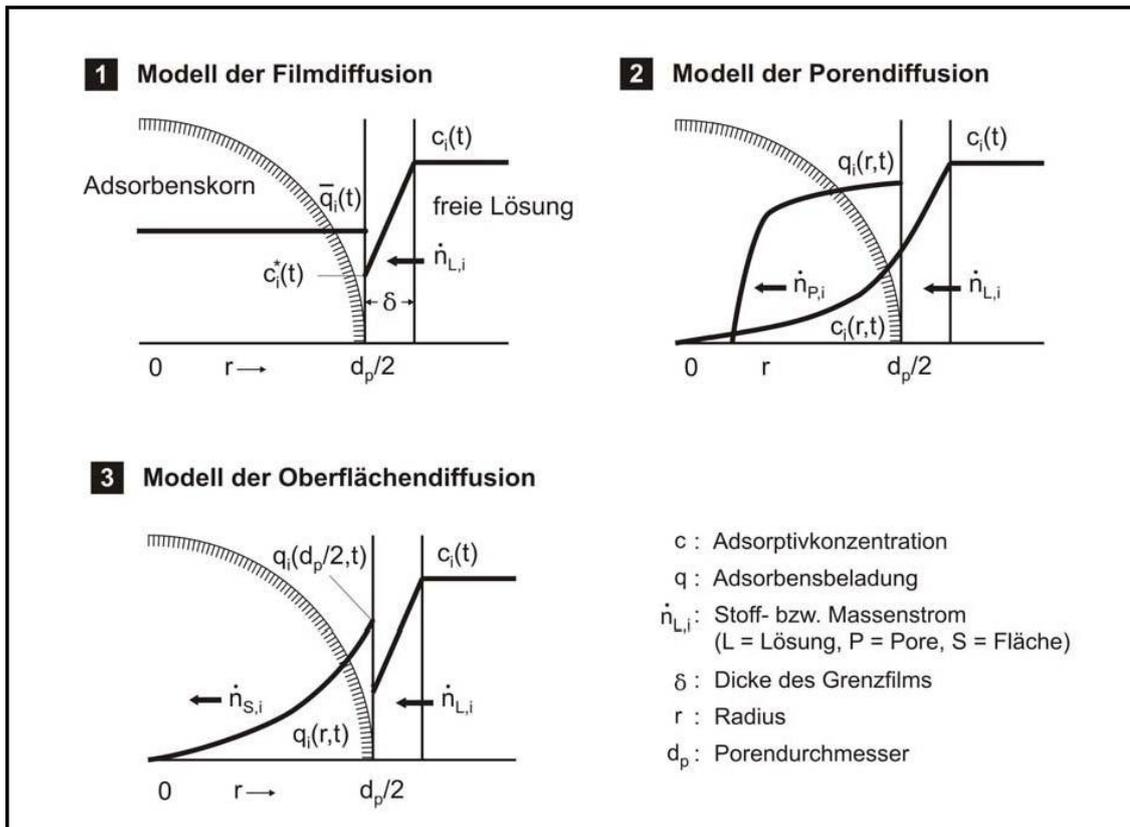


Abbildung 17: Transportmechanismen bei der Aktivkohleadsorption (SONTHEIMER 1985)

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Eigenschaften der Aktivkohle wie z.B. die Porenverteilung in Verbindung mit den Substanzeigenschaften und dem Konzentrationsgradienten den Adsorptionsvorgang maßgeblich beeinflussen. Weitere Einflussgrößen auf die Aktivkohleadsorption stellen z.B. Temperatur, pH-Wert, Molekularstruktur und -gewicht, Ionisation und Polarität dar (PÖPEL ET AL. 1988). Es gilt: Je höher die Temperatur, desto rascher die Adsorptionsgeschwindigkeit bzw. je kleiner die Temperatur, desto höher die Adsorptionskapazität. Mit steigendem pH-Wert adsorbieren bevorzugt Basen. In Aktivkohlefiltern nimmt die Konzentration des Adsorptivs in Fließrichtung ab. Mit zunehmender Filterbetthöhe stellen sich Beladungs- und Konzentrationsprofile ein (vgl. Abbildung 18), die sich mit der Filterlaufzeit entwickeln. Liegt am Ablauf des Filters ein Gleichgewicht zwischen der Adsorptivbeladung und der Zulaufkonzentration vor, beginnt die Substanz den Filter zu durchbrechen.

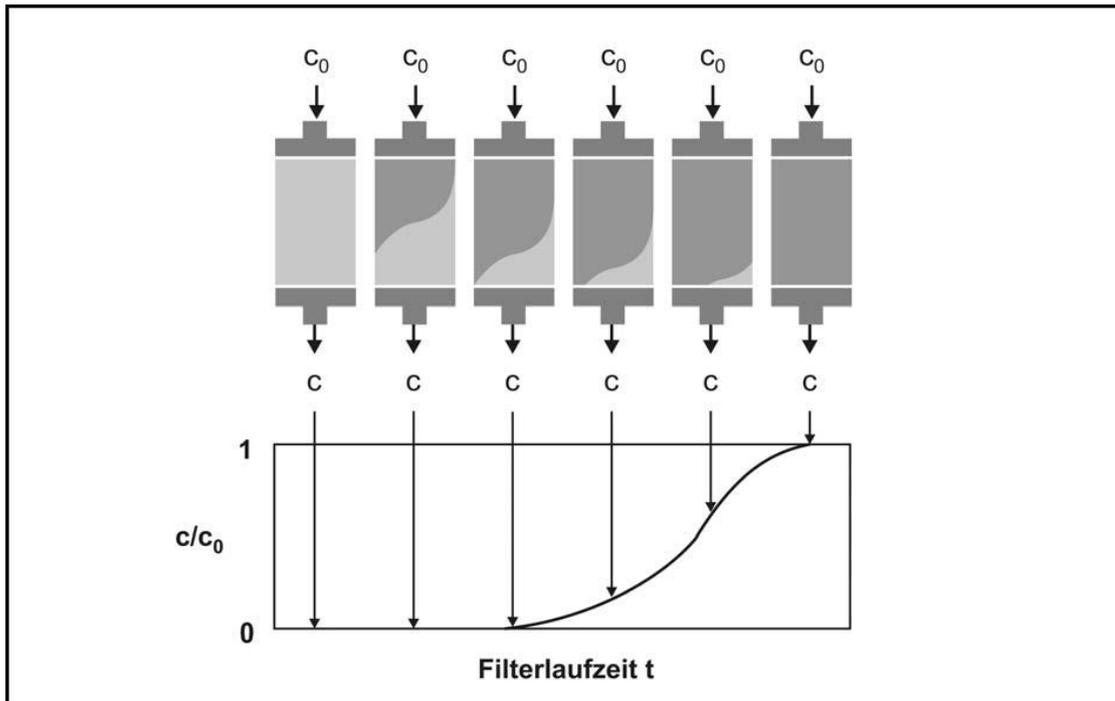


Abbildung 18: Beladungsprofil Aktivkohlefilter (SONTHEIMER 1985, verändert)

Die Beladung des Adsorbens mit dem Adsorptiv entspricht der Fläche, die zwischen der Durchbruchskurve und der Funktion  $c/c_0$  eingeschlossen wird. Da Abwasser ein Vielstoffgemisch ist, konkurrieren zahlreiche Adsorptive um freie aktive Zentren der Aktivkohle. Diese Konkurrenzadsorption ist sehr stark bei organischen Mikroverunreinigungen wie z.B. Arzneimitteln und natürlichen Wasserinhaltsstoffen, zu denen z.B. Huminstoffe zählen, ausgeprägt. Huminstoffe tragen zum Rückgang der Sorptionskapazität für organische Mikroverunreinigungen bei, da sich diese aufgrund ihrer Größe äußerst schwer aus den Poren der Aktivkohle verdrängen lassen (MARCUS 2005, LI ET AL. 2003).

### 3.4 Grundlagen der Behandlung mit Ozon

#### 3.4.1 Grundbegriffe und Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip der Ozonierung basiert auf einer starken Oxidation der im Wasser enthaltenen Substanzen mit Ozon. Gasförmiges Ozon wird mittels elektrischer Entladung aus Sauerstoffmolekülen erzeugt. Der Ozonzerfall ist von verschiedenen Parametern wie z.B. pH-Wert, Alkalinität, Temperatur und Konzentration verschiedenster Abwasserinhaltsstoffe abhängig. Ozon reagiert direkt und schnell mit diversen organischen und anorganischen Verbindungen, vorzugsweise bei hohem pH-Wert. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird dabei durch die Ozon- und Stoffkonzentrationen der im Abwasser enthaltenen Verbindungen und deren stoffspezifischen Geschwindigkeitskonstanten bestimmt.

Eine zusätzliche OH•-Radikalbildung kann auf drei verschiedenen Reaktionen basieren. Den Ausgangspunkt bilden Hydroxidionen (OH<sup>-</sup>), die den Ozonzerfall initiieren und eine Kettenreaktion bewirken (VON GUNTEN 2003). Dabei werden zunächst reaktive Radikale gebildet, die als Ozonid-Radikalanion zerfallen und ein OH•-Radikal und ein Hydroxidion bilden (SCHUMACHER 2006). Das OH•-Radikal reagiert mit Ozon und führt zum Ausgangspunkt der Radikalkette zurück. Die zweite relevante OH•-Radikalquelle bilden elektronenreiche Verbindungen, aus denen in Reaktion mit Ozon direkt OH•-Radikale hervorgehen (NÖTHE 2009). Als dritte OH•-Quelle kann H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dienen, das häufig als Reaktionsprodukt der direkten Ozonreaktion vorliegt. OH•-Radikale können jedoch auch durch anorganischen Kohlenstoff, wie z.B. Carbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), verbraucht werden und mit organischen Wasserinhaltsstoffen in Konkurrenz treten (SCHUMACHER 2006).

Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Ozonierung die Abwasserinhaltsstoffe vorwiegend in unbekannte Oxidationsprodukte transformiert und nicht vollständig mineralisiert werden, wobei die Oxidationsprodukte im Vergleich zu Ausgangssubstanzen in der Regel weniger schädlich sind (ABEGGLEN ET AL. 2009). Allerdings sind diese Transformationsprodukte sowie ihre möglicherweise (gen)toxischen Wirkungen derzeit noch Gegenstand der Forschung. Neueste Ergebnisse mit insgesamt 13 untersuchten wirkungsbasierten Testsystemen zeigen jedoch nur bei 2 Methoden negative Effekte nach einer Ozonierung. Diese konnten aber mit einem anschließendem Sandfilter wieder auf das Ausgangsniveau im Ablauf der Nachklärung reduziert werden, sodass in Summe durch die Kombination einer Ozonung mit einer anschließenden Sandfiltration keine negativen Effekte mit den 13 untersuchten, wirkungsbasierten Testsystemen festgestellt werden konnten (ABEGGLEN ET AL. 2010). Auch eine aktuelle Untersuchung aus Nordrhein-Westfalen kommt zu dem Ergebnis, dass es durch die Ozonierung in einzelnen Testsystemen zu einer leicht erhöhten Toxizität kommt. Eindeutige Rückschlüsse auf die ökologische Relevanz dieser leicht erhöhten Toxizität sind jedoch nicht möglich, da es durch die Ozonierung auch zu einer verringerten endokrinen Aktivität kommt, die wiederum möglicherweise zu ökologischen Vorteilen führt. Mögliche Nachbehandlungsverfahren sollen bei diesem Vorhaben in einer zweiten Projektphase untersucht werden (NEUMANN ET AL. 2011).

### 3.4.2 Grundlagen der chemischen Oxidation

Die chemische Oxidation ist - wie der Begriff selbst veranschaulicht - ein Oxidationsverfahren, das mit Hilfe chemischer Oxidationsmittel arbeitet. Unter Oxidation versteht man ganz allgemein den Entzug von Elektronen aus einzelnen Teilchen wie z.B. aus Atomen, Ionen oder Molekülen. Die Umkehrung der Reaktion, d.h. die Aufnahme von Elektronen wird als Reduktion bezeichnet.

Der Oxidationsvorgang von Ozon mit organischen Substanzen basiert auf zwei sich überlagernden Reaktionstypen (siehe Abbildung 19).

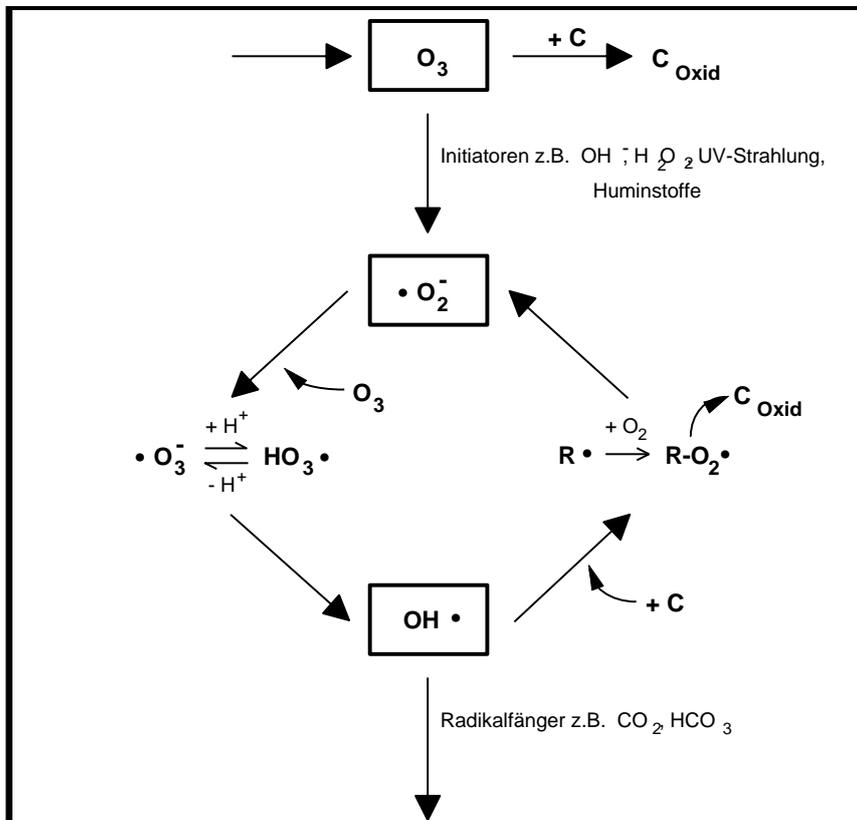


Abbildung 19: Reaktionsmechanismen

Die erste Reaktion ist die Reaktion des Ozonmoleküls mit den gelösten Substanzen. Diese direkte Reaktion ist äußerst selektiv, was an den steigenden Reaktionsgeschwindigkeiten des elektrophilen Ozons mit zunehmender Elektronendichte an der Doppelbindung und am aromatischen Ring oder entsprechend an den abnehmenden Reaktionsgeschwindigkeiten bei der Zunahme elektronenziehender Substituten zu erkennen ist. Die zweite Reaktion wird über OH-Radikale geführt, die beim Zerfall des Ozons entstehen. Diese OH-Radikale reagieren unselektiv in Millisekunden mit den Wasserinhaltsstoffen. Bei niedrigen pH-Werten überwiegt die erste, direkte Reaktion, während bei hohen pH-Werten fast ausschließlich die radikalische Reaktion abläuft.

Durch "Initiatoren" wie  $OH^-$ ,  $H_2O_2$ , UV-Strahlen oder gewisse organische Verbindungen (z.B. die im Abwasser vorkommenden Huminstoffe) werden  $O_2^-/HO_2^-$  Radikale gebildet; über Zwischenschritte entsteht das äußerst reaktive OH-Radikal. Die OH-Radikale reagieren mit den organischen Inhaltsstoffen ( $C$ ), wobei Peroxylradikale entstehen, die ihrerseits  $O_2^-/HO_2^-$  Radikale abspalten und den

Kreis damit schließen. Hohe Konzentrationen an "Radikalfängern" wie Carbonate/Hydrogencarbonate ( $\text{CO}_3/\text{HCO}_3$ ) oder Alkylverbindungen wirken auch hier hemmend auf die Reaktionsgeschwindigkeit, da sie die Kettenreaktion durch Verbrauch von OH-Radikalen unterbrechen können.

Bevor die Reaktion des Ozons mit den Wasserinhaltsstoffen erfolgen kann, muss es in die Wasserphase eingebracht werden. Sobald das Ozon in der Flüssigphase gelöst ist, kann die eigentliche Oxidation der Schadstoffe erfolgen. Geringe Ozonkonzentrationen in der Gasphase und schlechte Absorptionseigenschaften erschweren den Ozoneintrag.

Gleiches gilt für die Temperatureinstellung, die auf der einen Seite bei höheren Temperaturen eine niedrigere Ozonlöslichkeit zur Folge hat, zum anderen aber auch den Ozonzerfall und damit die Bildung von reaktionsfreudigem atomarem Sauerstoff fördert.

### 3.4.3 Verfahrenstechnik und Apparative Ausführung der Ozonierung

Die Chemische Oxidation ist in der Lage, oxidierbare Schadstoffe zu mineralisieren. Obwohl prinzipiell Ammoniak, Ammonium und Nitrit durch Ozon oxidierbar sind, ist diese Anwendung in der Abwasseraufbereitung nicht zu nutzen, da einerseits bei pH-Werten kleiner 7 keine Ammonium Oxidation mehr stattfindet und darüber hinaus durch die Oxidation Nitrat entsteht, das im Ablauf ebenso unerwünscht ist.

Damit bleibt die Aufgabe der Chemischen Oxidation in der Abwasserreinigung der Abbau von organischen Verbindungen und der Reduktion von Spurenstoffen. In der Trinkwasseraufbereitung kann Ozon zur Desinfektion, zur Entfärbung von huminstoffhaltigen Wässern und zur Zerstörung von Geruchs- und Geschmacksstoffen eingesetzt werden.

Da durch die Behandlung mit chemischen Oxidationsmitteln aus langkettigen, schwer abbaubaren Stoffen kurzkettige und leicht abbaubare Stoffe entstehen, bevor sie durch weitere Oxidationsmittelzugabe vollständig mineralisiert werden, kann es je nach Wasser sinnvoll sein, eine Aktivkohle-Adsorption nachzuschalten.

Eine mögliche Verfahrensvariante arbeitet mit dem Teilstrom-Injektor-Prinzip welches in Abbildung 20 dargestellt ist. Bei dem Ozonisierungsverfahren mit Kreislaufführung wird das aus reinem Sauerstoff erzeugte Ozon über einen Injektor (Wasserstrahlverdichter) in den Kreislaufstrom eingedüst und anschließend zusammen mit dem Roh-Abwasser in den Reaktor eingespeist. Zur besseren Löslichkeit des Ozons kann der Druck im Umlaufstrom angehoben werden.

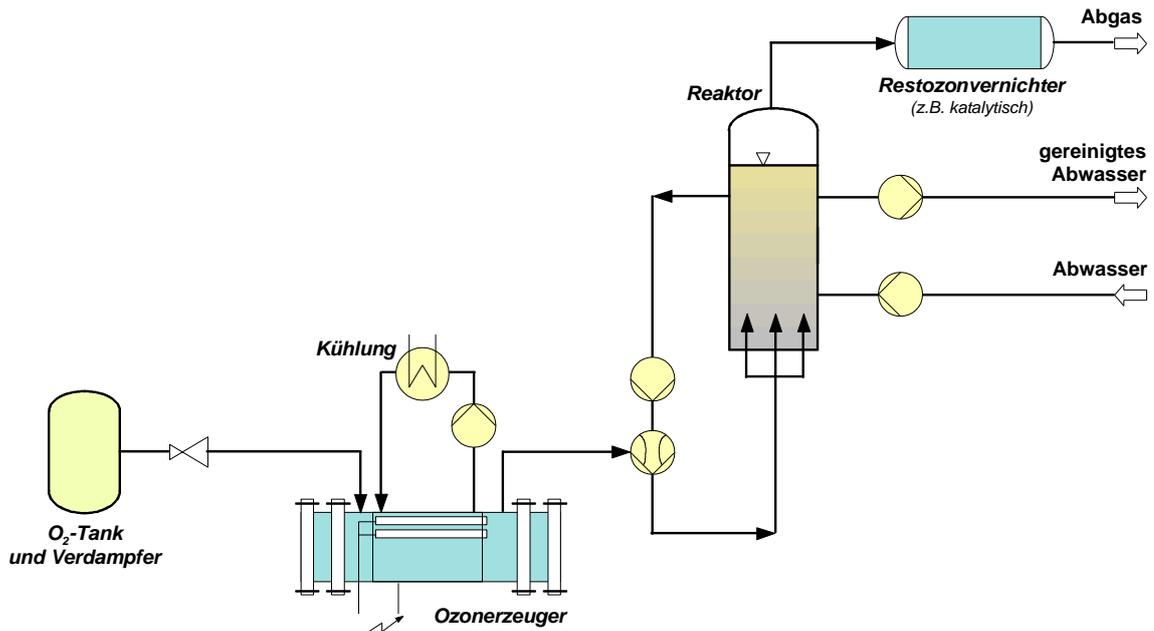


Abbildung 20: Ozonisierung mit Teilstrom-Injektor-Prinzip

Die Restozonumwandlung erfolgt über einen Metall-Mischoxid-Katalysator, bevor das Luftgemisch an die Umgebung abgegeben wird.

### 3.5 Aktuelle Projekte bzw. Forschungsvorhaben

#### 3.5.1 Überblick Aktivkohle

Die Behandlung durch Adsorption an Aktivkohle entspricht in der Trinkwasseraufbereitung sowie der Industrie- und Sickerwasserbehandlung dem Stand der Technik. In der Abwasserbehandlung wurden jedoch bisher nur wenige Erfahrungen mit dem Einsatz von Aktivkohle in Forschungs- und Pilotanlagen sowie einigen wenigen großtechnischen Anlagen gesammelt.

Nationale wie internationale Projekte sind im Weiteren übersichtlich zusammengefasst, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben:

- USA – z. B. Lake Tahoe sowie weitere Anlagen, zitiert in: Pinnekamp, Essener Tagung 2010 (S. – 28 / 13 –) sowie Metcalf & Eddy „Wastewater Engineering“ 4. Edition 2003.
- Großbritannien – Swindon Kläranlage von Thames Water, zitiert in: Norit Newspaper 2008 Nr. 2, sowie mündliche Auskunft von Herrn Stuart

Burnley, Thames Water, Einsatz von granulierter Aktivkohle im Ablauf einer Kläranlage.

- Holland – Einsatz einer granulierten Aktivkohleanlage im Ablauf der Kläranlage Horstermeer, Nähe Amsterdam, mündliche Auskunft von Freek Cramer, Witteveen & Bos und Stowa, 21.09.2010
- Schweiz – EAWAG, Kläranlage Kloten/Opfikon sowie halbtechnische Untersuchungen zum „Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser“ in MicroPoll-Projekt, GWA 7/2010 sowie Schlussbericht 09/2010.
- Kläranlage Mannheim – Einsatz von Pulveraktivkohle in vorgeschalteter Adsorptionsstufe, Planung der großtechnischen Umsetzung für 700.000 EW, Korrespondenz Abwasser, Dezember 2010 „Aktivkohle in der Abwasserreinigung – vom Versuch zum technischen Maßstab“, Symposium in Mannheim, Monitoring-Programm über 1 Jahr zum Nachweis der Reinigungsleistung verschiedenster Spurenstoffe.
- Verbandsklärwerk Obere Lutter, Einsatz von granulierter Aktivkohle in einem großtechnischen Versuch, Förderantrag beim Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Oktober 2010.
- Kläranlage Düren, WVER/ Buchenhofen, Wupperverband, Planung eines großtechnischen Versuchs mit Einsatz von granulierter Aktivkohle bzw. Pulveraktivkohle im Rahmen des NRW-Forschungsprojekts MIKROFLOCK ([www.micropollutants.net/Projekte/Mikroflock](http://www.micropollutants.net/Projekte/Mikroflock))

### 3.5.2 Einzelne Projektbeispiele Aktivkohle

Wie bereits gesagt, sind Aktivkohleanwendungen in der Trinkwasseraufbereitung, aber auch der Abwasserreinigung, seit vielen Jahren im Einsatz. International gesehen eine der ersten Anwendungsfälle ist in Lake Tahoe/USA sowie Windhoek/Namibia. Folgendes Bild macht augenscheinlich deutlich, dass der zugehörige Anlagenbau schon älteren Datums ist.

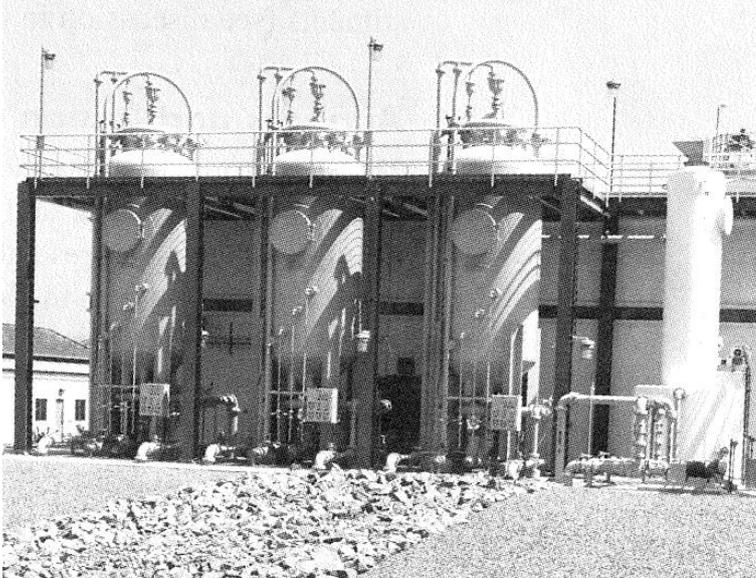


Abbildung 21: Activated carbon adsorbers: view of granular activated carbon contactors operated in parallel, used for the treatment of filtered secondary effluent (zitiert in Metcalf & Eddy, 4. Edition, Seite 1151)

Ausführliche Informationen zu verfahrenstechnischen Aspekten und insbesondere im Apparatebau sind in o. a. Literatur von Metcalf & Eddy, enthalten. Ebenfalls weist auf der Essener Tagung 2010 Prof. Pinnekamp darauf hin, dass die Anwendung in den USA bereits seit vielen Jahren in der kommunalen Abwasserreinigung im Einsatz ist.

### **Großbritannien – Kläranlage Swindon**

Nach Informationen von Thames Water, Stuart Burnley ist auf der Kläranlage Swindon bereits seit 3 Jahren im Rahmen eines Forschungsprojektes der Einsatz von granulierten Aktivkohleadsorbern realisiert worden. Insbesondere aus Gründen des weitergehenden Gewässerschutzes hinsichtlich Hormonstoffe etc. ist das Forschungsprojekt bzw. deren großtechnische Umsetzung von Thames Water initiiert worden und derzeit in einem Monitoring-Untersuchungsprogramm im Hinblick auf die Reinigungsleistung verschiedener Spurenstoffe eingebunden. Die granulierten Aktivkohlefilter mit einem Durchmesser von über 8 m sind mit dem zugehörigen Rohrleitungs- und Apparatebau oberirdisch aufgestellt und vor Ort gefertigt bzw. geschweißt worden. Nach ersten Informationen von Thames Water werden die Aktivkohle-Reaktoren mit einer Aufenthaltszeit von ca. 30 Minuten betrieben und erreichen eine Standzeit von ca. 16 Monaten.



Abbildung 22: Großbritannien – Kläranlage Swindon, Einsatz von granulierter Aktivkohle

#### **Holland – WWTP Horstermeer / Amsterdam**

Über den Kooperationspartner der Hydro-Ingenieure GmbH in Holland, Witteveen & Bos, wird derzeit die Planung von granulierter Aktivkohle auf der Kläranlage Horstermeer im Ablauf vorgesehen, um insbesondere Spurenstoffe sowie PAKs, Pestizide etc. zu eliminieren. Die bisherigen Überlegungen unter Beteiligung der Stowa, TU Delft, Norit und Witteveen & Bos, gehen anhand von labor-technischen Untersuchungen davon aus, in einem GAK-Reaktor ohne die Möglichkeit einer Rückspülung eine weitergehende Spurenstoffelimination zu erreichen. Eine großtechnische Umsetzung auf der Kläranlage Horstermeer ist im Jahre 2012 geplant.

#### **Deutschland - Kläranlage Mannheim (siehe weitere Anlagen in BaWü)**

Auf dem Aktivkohle-Symposium im Juni 2010, der Essener Tagung 2012 sowie in mehreren Veröffentlichungen (Alt/Mauritz) wurde die großtechnische Umsetzung einer vorgeschalteten Adsorptionsstufe mit Zugabe von Pulveraktivkohle vorgestellt. Bei erfolgreichem Betrieb des jetzigen Teilstromes von knapp 180.000 EW ist die Umsetzung des gesamten Wasserstroms der Kläranlage Mannheim (700.000 EW) geplant. Voraussetzung ist der erfolgreiche Nachweis eines Monitoring-Programmes, das derzeit gemeinsam mit der Hochschule Biberach, Prof. Kapp, von der Stadtentwässerung Mannheim vor dem Abschluss steht. Dabei steht neben dem Nachweis der Reinigungsleistung für die Parameter CSB, DOC und verschiedener Spurenstoffe u. a. die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der pulverisierten Aktivkohle im Vordergrund.

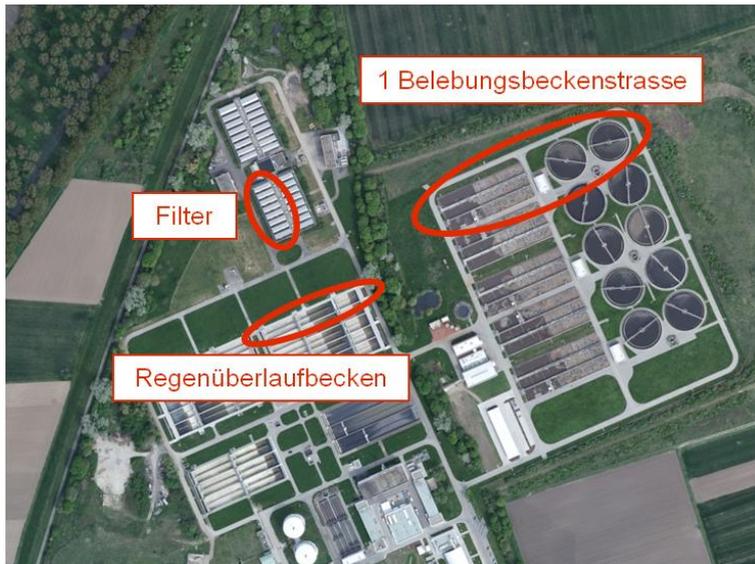


Abbildung 23: Einsatz von Pulveraktivkohle – Mannheimer Verfahren

### **Schweiz – EAWAG, Kläranlage Kloten/Opfikon**

Im Rahmen des MicroPoll-Projektes wird zurzeit auf der Kläranlage Kloten/Opfikon sowie in verschiedenen Pilotversuchen in Lausanne geprüft, inwieweit die Verfahrenstechnik der Pulveraktivkohle für den großtechnischen Maßstab geeignet und wirtschaftlich vertretbar ist. Nach gegenwärtigem Stand erweist sich die Verfahrenstechnik der Zugabe von Pulveraktivkohle über eine separate Einmischkammer in den Flockungsfiltrationsanlagen als interessante, wirtschaftlich vertretbare Lösung zur Spurenstoffelimination.



Abbildung 24: Anwendung der Pulveraktivkohle - Versuche auf der Kläranlage Kloten – Schweiz / Luftbild

### **Deutschland - Wasserverband Obere Lutter - Gütersloh**

Der Einsatz von granulierter Aktivkohle ist auf dem Verbandsklärwerk Obere Lutter im Rahmen eines Forschungsvorhabens des MKULNV des Landes NRW geplant. Seit dem 01.11.2010 ist eine Filterzelle mit einer Fläche von 40 m<sup>2</sup> zum Einsatz von granulierter Aktivkohle in Betrieb. Auf der 4-stufigen biologischen Reinigungsstufe des Verbandsklärwerks Obere Lutter ist vor ca. 10 Jahren aufgrund des hohen Anteils an Industrieabwasser im Anschluss an die AB-Anlage eine weitergehende Nitratelimination in einer Festbettfiltrationsstufe sowie eine anschließende Flockungsfiltration errichtet worden. Großtechnische Versuche finden in der bestehenden Flockungsfiltrationsanlage statt, um über 12 Monate eine weitergehende Spurenstoffelimination sowie eine Stabilisierung der CSB-Ablaufsituation zu gewährleisten.



Abbildung 25: Verbandsklärwerk Obere Lutter – Füllung der Filterzelle mit granulierter Aktivkohle

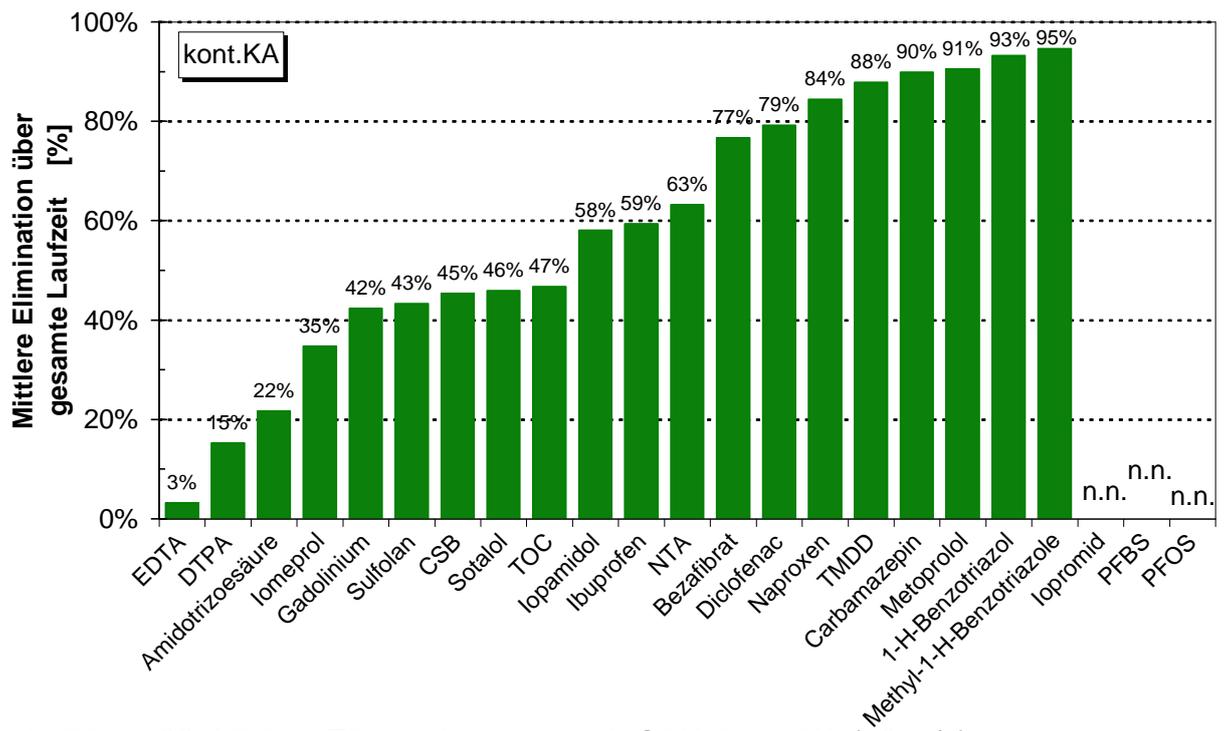


Abbildung 26: Mittlere Eliminationsraten mit GAK, kont. KA (10 m/h)

Auf der Essener Tagung 2012 werden die ersten Ergebnisse aus dem 12-monatigen Versuchsbetrieb (NAHRSTEDT ET AL. 2012) veröffentlicht. Der Versuchsbetrieb kann vor dem Hintergrund der relativ hohen CSB-Zulaufkonzentrationen im industriell geprägten Abwasser Obere Lutter als betrieblich gut durchführbar und wirtschaftlich erfolgreich bezeichnet werden.

Der Abwasserzweckverband Obere Lutter hat sich entschieden, eine Umrüstung von 3 bis 4 Filterzellen granulierte Kohle vorzunehmen, um zukünftig einen Teilstrom bei Bedarf über die Aktivkohleanlage führen zu können. Im Versuchsbetrieb zeigte sich, dass die erforderlichen Spülzyklen deutlich kleiner ausfallen, als ursprünglich erwartet und auch ein versuchsweise getesteter intermittierender Betrieb sich als für die Aufgabenstellung sinnvoll und wirtschaftlich interessant herausgestellt hat. Die erreichbaren Standzeiten bzw. Bettvolumen liegen bei 8.000 bis 10.000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> und erreichen CSB-Beladungszahlen von 300.000 bis 400.000 mg/kg CSB.

### Deutschland – Kläranlage Düren, WVER/Buchenhofen, Wupperverband im Rahmen des MIKROFLOCK-Forschungsprojektes NRW

Durch die Zugabe von Aktivkohle bei der Abwasserreinigung werden mit zwei verschiedenen Verfahrensansätzen auf den Kläranlagen Düren-Merken und Buchenhofen technische, betriebliche und wirtschaftliche Umsetzbarkeit untersucht sowie im technischen Maßstab erprobt. Eine Zugabe von Pulveraktivkohle

in den Flockungsraum der Filtration mit Kohleabscheidung in der vorhandenen Filteranlage ist auf der Anlage in Buchenhofen geplant, während in Düren der Austausch eines gesamten Filterbettes gegen granuliertem Kohle untersucht wird.

Nach dem ersten Jahr des großtechnischen Versuchs in Buchenhofen wird auf der Essener Tagung 2012 (BORNEMANN ET AL. 2012) berichtet, dass die Aktivkohle mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand eliminiert werden kann und auch betrieblich keine Beeinträchtigungen zu erwarten sind.

### 3.5.3 Überblick Ozonierung

Die Leistungsfähigkeit der Ozonierung von gereinigtem Abwasser wurde großtechnisch exemplarisch in Regensdorf und Wien überprüft. Aktuell finden sich Anwendungen im Realmaßstab in Schwerte, Bad Sassendorf und Duisburg. Die dabei fokussierten Verfahrenskombinationen sind in Abbildung 27 zusammengestellt.

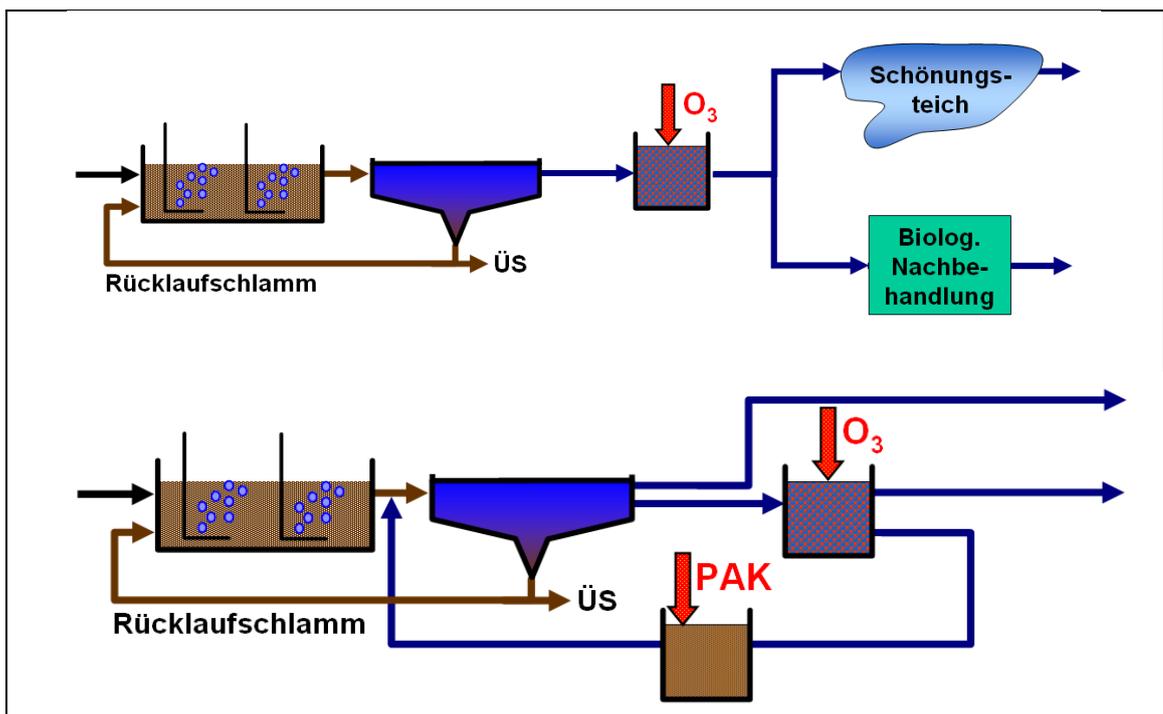


Abbildung 27: Ozonierung von gereinigtem Abwasser

Zudem findet die Ozonierung einem MBR nachgeschaltet in der separaten Krankenhausabwasserbehandlung Anwendung. In großtechnischen Anwendungen in Österreich und der Schweiz wurde die Eignung der Ozonierung für die Eliminierung von Mikroverunreinigungen in der kommunalen Abwasserreinigung bestätigt.

Hierfür existieren umfangreiche Berichterstattungen (vgl. ABEGGLEN ET AL. 2009).

Vor einer großtechnischen Umsetzung von Ozonierung auf Kläranlagen muss gesichert sein, dass keine Transformationsprodukte erzeugt werden, die eine vergleichbar kritischere Öko- bzw. Humantoxizität aufweisen, als die zu eliminierenden Substanzen. Daher werden in jüngsten Forschungsarbeiten zunehmend Metabolite und Transformationsprodukte identifiziert und bewertet. Hier besteht noch ein sehr großer Forschungsbedarf. Der aktuelle Forschungsbedarf wird gekennzeichnet durch:

- Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Ozonierung bei variierenden Zuflussbelastungen
- Ableitung von Empfehlungen hinsichtlich Bemessungs- und Betriebsparameter
- Festlegung von Steuer- und Regelstrategien sowie
- Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit sowie die öko- und humantoxikologische Bewertung von Transformationsprodukten

#### 3.5.4 Einzelne Projektbeispiele Ozonierung

##### **Schweiz - Kläranlage Regensdorf**

Zum Einsatz der Ozonierung auf der Kläranlage Regensdorf (30.500 EW) liegt ein umfangreicher Abschlussbericht vor (vgl. ABEGGLEN ET AL. 2009). In Regensdorf wurde der Ablauf einer kommunalen Kläranlage einer Ozonierung unterzogen, wobei das Ozon aus Flüssigsauerstoff erzeugt und ein Schlaufenreaktor mit Diffusoreintragssystem zum Ozoneintrag genutzt wurde. Der Kontaktreaktor wurde auf eine Aufenthaltszeit bei Trockenwetter von > 5 Minuten ausgelegt.

Die für eine signifikante Elimination notwendige Ozonkonzentration liegt zwischen 5 und 10 mg Ozon je Liter zu reinigendes Abwasser bzw. zwischen 0,7 und 1,0 g Ozon je g DOC. Da bei der Ozonierung unbekannte Transformationsprodukte gebildet werden, ist es zweckmäßig, eine zusätzliche Nachbehandlungseinheit im Ablauf der Ozonierung vorzusehen. Diese kann z.B. als biologisch aktiver Sandfilter oder als Schönungsteich ausgebildet sein, um eventuelle Toxizitäten und Restozon im Falle einer Überdosierung abzubauen. Beispielhaft ist in Abbildung 28) der Einfluss der Ozondosis auf die Elimination ausgewählter Mikroverunreinigungen dargestellt.

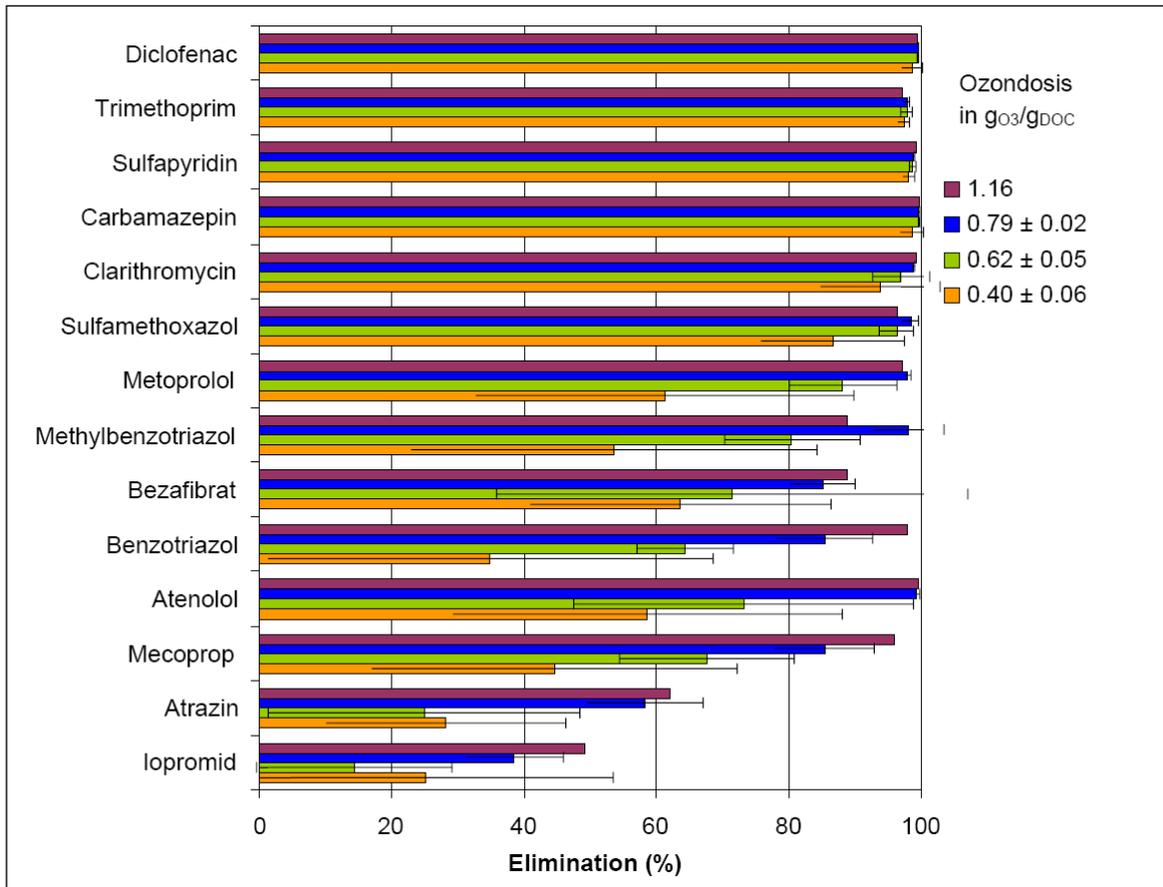


Abbildung 28: Eliminationsleistung der Ozonierung (ABEGGLEN ET AL. 2009)

### Deutschland – Kläranlage Bad Sassendorf

Das Einzugsgebiet der Kläranlage Bad Sassendorf (13.000 EW) weist einen hohen Altersdurchschnitt und eine überdurchschnittliche Anzahl an Klinikbetten pro Einwohnerwert auf. Die Kläranlage wurde daher mit einer Ozonierung für den Ablauf der Nachklärung ausgerüstet, die von der Hydro-Ingenieure GmbH geplant wurde. Die Anlage besteht aus einem zweistraßigen Schlaufenreaktor mit Diffusoreintragssystem. Die Ozonerzeugung erfolgt aus Flüssigsauerstoff. Zur Nachbehandlung steht ein Schönungsteich zur Verfügung. Der Regelbereich der Ozondosis beträgt 5 bis 20 mg/l. Die Reaktionszeit ca. 13 Minuten (JAGEMANN ET AL. 2012). Die gemessenen Eliminationsraten bestätigen die Ergebnisse aus der Schweiz.



Abbildung 29: Kläranlage Bad Sassendorf – Ozonanlage mit Sauerstofftank

### **Deutschland – Kläranlage Duisburg-Vierlinden**

Auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden werden im Rahmen eines vom MKULNV des Landes NRW geförderten Vorhaben in zwei parallelen Straßen der Ozoneintrag mittels Diffusor- und Injektoreintragssystem verglichen. In der mit dem Injektoreintragssystem ausgestatteten Straße besteht die Möglichkeit einer nachgeschalteten biologischen Behandlung im Wirbelbett. Die Reaktionszeit des Abwassers in beiden Straßen beträgt ca. 15 bis 20 Minuten bei einem maximalen Zufluss je Straße von 200 m<sup>3</sup>/h. Nach umfangreichen Simulationsstudien wurde auf die Anordnung von Leitwänden in den Reaktionsbecken verzichtet.

Zur Ozonerzeugung stehen zwei Ozongeneratoren mit einer Ozonerzeugungsleistung von ca. 2 kg/h zur Verfügung. Bezogen auf einen DOC im biologisch gereinigten Abwasser von 4 bis 8 mg/l kann die Ozondosis zwischen 0,4 und 1,2 g<sub>O<sub>3</sub></sub>/g<sub>DOC</sub> variiert werden. Erste Ergebnisse zeigen gute Betriebsergebnisse für beide Anlagen. Der spezifische Energieverbrauch liegt bei 0,09 bis 0,16 kWh/m<sup>3</sup> behandeltem Abwasser (HERBST ET AL. 2011).

## **4 KURZBESCHREIBUNG DER LÖSUNGSMÖGLICHKEITEN**

### **4.1 Allgemeines**

Wie bereits eingangs in der Aufgabenstellung erwähnt, gibt es verschiedene Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination. Im Weiteren wird ein erster Überblick über diese möglichen Verfahrenstechniken gegeben.

### **4.2 Pulveraktivkohle**

Pulveraktivkohle verfügt im Vergleich zu granulierter Aktivkohle über eine geringere Korngröße. Die PAK wird dem Abwasserstrom zudosiert und eingerührt und muss anschließend durch eine Separationsstufe wieder aus dem Abwasserstrom entfernt werden.

Die Variante des Baus separater Kontakt- und Absetzbecken wird bisher insbesondere in Baden-Württemberg für die weitergehende Abwasserreinigung favorisiert. In dieser Variante wird die Aktivkohle in das der Nachklärung nachgeschaltete Kontaktbecken dosiert, in dem eine Beladung der Kohle erfolgt. Im anschließenden Absetzbecken wird die PAK abgezogen und zum Zwecke einer Mehrfachbeladung in das Kontaktbecken rezirkuliert. Die Überschussskohle wird dem Kontaktbecken entzogen und dem Belebungsbecken zugeführt, wo sie zusätzlich beladen und dann über den Überschussschlamm abgezogen wird. Eine vorhandene Sandfiltration dient als zusätzliche Sicherheit zur gesicherten Entfernung der beladenen Aktivkohle aus dem geklärten Abwasser. Dieses Verfahren befindet sich derzeit, wie bereits beschrieben, auf der Kläranlage Mannheim und der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen in Betrieb, während es sich auf den Kläranlagen Kressbronn-Langenargen und Stockacher Aach im Bau befindet. Dieses Verfahren wird als Variante 1 „Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken“ in der vorliegenden Studie näher untersucht.

### **4.3 Granulierte Aktivkohle**

Granulierte Aktivkohle oder auch Kornkohle zeichnet sich durch eine größere Korngröße aus als pulverisierte Aktivkohle und wird als Filtermaterial zur Elimination von Spurenstoffen eingesetzt.

Bei den Aktivkohlefiltern wird die Kohle je nach Beschickungsrichtung der Filter von oben nach unten oder anders herum mit den Schadstoffen beladen. Es bildet sich eine Beladungsfront, die mit der Zeit durch den Filter wandert bis es zu einem Durchbruch kommt. Die Aktivkohle kann dann aus dem Filter entnommen

und regeneriert werden. Um die volle Beladungskapazität eines Filters ausnutzen zu können ohne das ein Durchbruch zu einem Konzentrationsanstieg im Ablauf führt, kann ein 2-stufiges Verfahren (2 hintereinander geschaltete Filter) gewählt werden.

Aktivkohlefilter können als druck- oder schwerkraftbetriebene Systeme gebaut werden. Mögliche Anwendungen in der Abwasserbehandlung sind die Umrüstung bereits bestehender Filteranlagen zu GAK-Filtern und der Bau von neuen Filtern, die einer bestehenden Filtration nachgeschaltet sind.

Die Möglichkeit der nachgeschalteten GAK-Filter hat den Vorteil, dass die komplette vorhandene Filtration als Sicherheitsstufe gegen einen möglichen Eintrag von Feststoffen aus der Nachklärung fungiert. Die nachgeschalteten Filter können wiederum als Druckfilter in Stahldruckkesseln oder als Schwerkraftfilter z.B. aus Beton umgesetzt werden. Bei der hier vorliegenden Planung wurden Stahldruckkessel gewählt. In der Variante 2 „Granulierte Aktivkohle in nachgeschalteten Druckkesseln (1-stufig)“ wird diese Verfahrensmöglichkeit weiter untersucht.

Alternativ kann ein vorhandener Raumfilter durch Austausch des Filtermaterials zu einem GAK-Filter umgerüstet werden. Dies wird in der Variante 4 „Umrüstung vorhandener Filterzellen mit granulierter Aktivkohle“ untersucht. Je nach Auslastung der Filtration können einige Filterzellen mit granulierter Aktivkohle befüllt werden und der Filtration in den restlichen Filterzellen nachgeschaltet betrieben werden.

Falls der vorhandene Filter nicht überausreichend Reserven verfügt, kann auch eine Kombination aus beiden Lösungsmöglichkeiten realisiert werden, d.h. ein paar der vorhandenen Filterzellen können zur nachgeschalteten GAK-Stufe umgerüstet werden und zusätzlich werden neue GAK-Filter gebaut, um die notwendige Oberfläche und Kontaktzeit zu erreichen.

#### **4.4 Ozonierung**

Für die Ozonierung wird die Ozonerzeugung aus Flüssigsauerstoff vorgesehen. Der Reaktionsbehälter wird zweistraßig ohne Leitwände geplant. Theoretisch kommen wie bereits beschrieben sowohl ein Eintrag über einen Injektor als auch über ein Diffusorsystem in Frage. Für die Kostenschätzung im Rahmen der Variantenuntersuchung wird zunächst von einem Injektorsystem ausgegangen.

Wie oben beschrieben entstehen bei der Behandlung von Abwassers mit Ozon zur Oxidation von Spurenstoffen Metabolite und Transformationsprodukten, deren öko- und humantoxikologische Wirkung bisher noch nicht ausreichend er-

forscht worden sind. Die oben genannten Forschungsprojekte befassen sich zurzeit mit dieser Fragestellung, welche geklärt werden sollte, bevor eine Ozonierung zur Spurenstoffelimination großtechnisch auf einer Kläranlage zur Anwendung kommt. Im Rahmen dieses Projektes wird vorgenannte Lösungsmöglichkeit (Variante 3) konzipiert und davon ausgegangen, dass die nachgeschaltete Filtration mögliche Metaboliten eliminiert. Die Ozonierung wird also der Filtration vorgeschaltet.

## 5 PLANUNGS- UND BEMESSUNGSGRUNDLAGEN

### 5.1 Planungsgrundlagen

Seitens der Stadt Bad Oeynhausen wurden für die Bearbeitung folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- Erläuterungsbericht Antrag zur Erneuerung der Wasserrechtlichen Erlaubnis der Kläranlage Bad Oeynhausen zum Einleiten von Abwasser in die Werre, Dipl.-Ing. Bernd Opiela, Unternehmensberatung für Umwelttechnik, Juli 2004
- Abhilfe-/ 5. Änderungsbescheid zum Erlaubnisbescheid von 31.07.1990 in der Fassung des 4. Änderungsbescheides vom 20.11.2002 ausgestellt vom staatlichen Umwelt Amt und Arbeitsschutz OWL, November 2004
- Systemskizze zur Erlaubnis
- Erlaubnisbescheid zur Größenänderung, ausgestellt vom staatlichen Umwelt Amt und Arbeitsschutz OWL, Juni 2004
- 2. Änderungsbescheid zur Genehmigung vom 04.12.1989 in der Fassung des 1. Änderungs-/ Nachtragsbescheides vom 20.07.1990, ausgestellt vom staatlichen Umwelt Amt und Arbeitsschutz OWL, November 2004
- 1. Änderungsbescheid zum Erlaubnisbescheid vom 18.11.2004 für Einleitungen von Abwasseraus der KA Rehme der Stadt Bad Oeynhausen in die Worre, ausgestellt von der Bezirksregierung Detmold, März 2010
- Labordaten: CSB- Werte ab 2007, Ortho-P- Werte 2010 - 2011, Jahresschmutzwassermengen 2009 und 2010
- Abrechnungszeichnungen der Filtration Watek Kranz GmbH, 1991 / 1992.
- Lageplan KA Bad Oeynhausen, Ingenieurgesellschaft Dr. Knollmann mbH, Maßstab 1:250, 07.10.2011
- Systemskizze Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen, Hansen und Klümpen Ingenieurbüro für Elektrotechnik, 20.09.2011
- Blockfließbild Ka Bad Oeynhausen, September 2011
- Lageplan KA Bad Oeynhausen, Hansen und Klümpen Ingenieurbüro für Elektrotechnik, Maßstab 1:250, 02.07.2007
- Technischer Bericht Filterprüfung, Filterservice E- Görlich, 30.06.2011
- Technische Stellungnahme: Ursachenklärung der massive Verlagerungen der Stüttschichten, Aufzeigen von Maßnahmen zur Beseitigung, EVERS Engineering, Dipl. Ing. (TU) Thomas Evers, 10.05.2007

- Auswertung der Angebote „Betonarbeiten Kläranlage“, 18.04.2006
- Filter 2 und 5: Kostenvergleich
- Positions- und Bewehrungsplan 1/ 1a, Ingenieurbüro für Tragwerksplanung Altenkort, Maßstab 1:25/ 1:50, 11.12.2000
- Statische Berechnung Deckenausschnitt in der Dachdecke im Filtrationsgebäude, IngenieurgemeinschaftHärtel Schiermeyer, September 2003
- Statische Prüfung Sanierung einer Flockungsfiltration Anlage 1, Dr Ing. Horst G. Schultz, 22.12.2000
- Statische Prüfung Sanierung einer Flockungsfiltration Anlage 2, Dr Ing. Horst G. Schultz, 16.02.2001
- Statische Berechnung Einbau eines Laufkatzenkrans, Gruppe Ingenieurbau, Dezember 1998
- Allgemeine technische Vorbemerkungen, Stadt Bad Oeynhausen, Abtlg. Tiefbau, 2005
- Titel 1 Sanierung Filter 2, Vorbemerkungen zu den Titeln 1+2, Stadt Bad Oeynhausen Abtlg. Tiefbau, 2005
- Titel 2 Sanierung Filter 5, Stadt Bad Oeynhausen Abtlg. Tiefbau, 2005
- Filterdaten, Watek, 07.04.1994
- Filterdüsen Anlage 7

## 5.2 Hydraulische Bemessungsgröße

Die Hydro-Ingenieure GmbH hat eine Auswertung der 2h-Ablaufwassermengen der Jahre 2009 bis 2010 durchgeführt. Hierbei wurden sowohl Ganglinien erstellt als auch Summenhäufigkeiten ermittelt. Der maximale Ablauf liegt bei 681 l/s und der 85 %-Wert bei 287 l/s (siehe Tabelle 2)

Tabelle 2: Ablaufmengen KA Bad Oeynhausen, 2009-2010

<b>Ablaufmenge (l/s)</b>	<b>RW + TW</b>
Mittelwert	193
85%-Wert	200
Maximum	671

Die Bemessungswassermenge für die Aktivkohlebehandlung wurde auf max. 200 l/s festgelegt. Der Zulauf zur Kläranlage Bad Oeynhausen unterschreitet an ca. 68% aller Tage eine maximale Menge von 200 l/s. Mit einem maximalen Zulauf von 200 l/s zur Spurenstoffelimination können im Mittel der Jahre 2010 und 2011 ca. 79% der anfallenden Abwassermenge im Zulauf des Klärwerks behandelt werden.

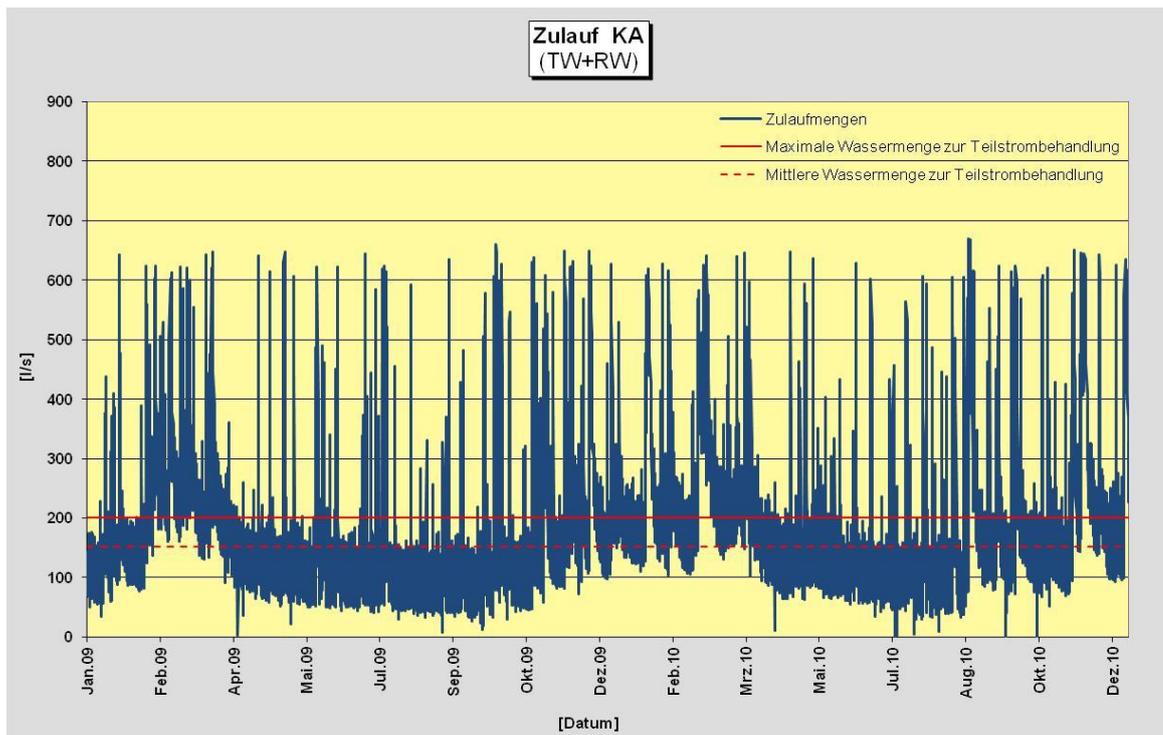


Abbildung 30: Auswertung Anteil der behandelten Abwassermenge an der Jahresschmutzwassermenge, KA Bad Oeynhausen 2009 - 2010

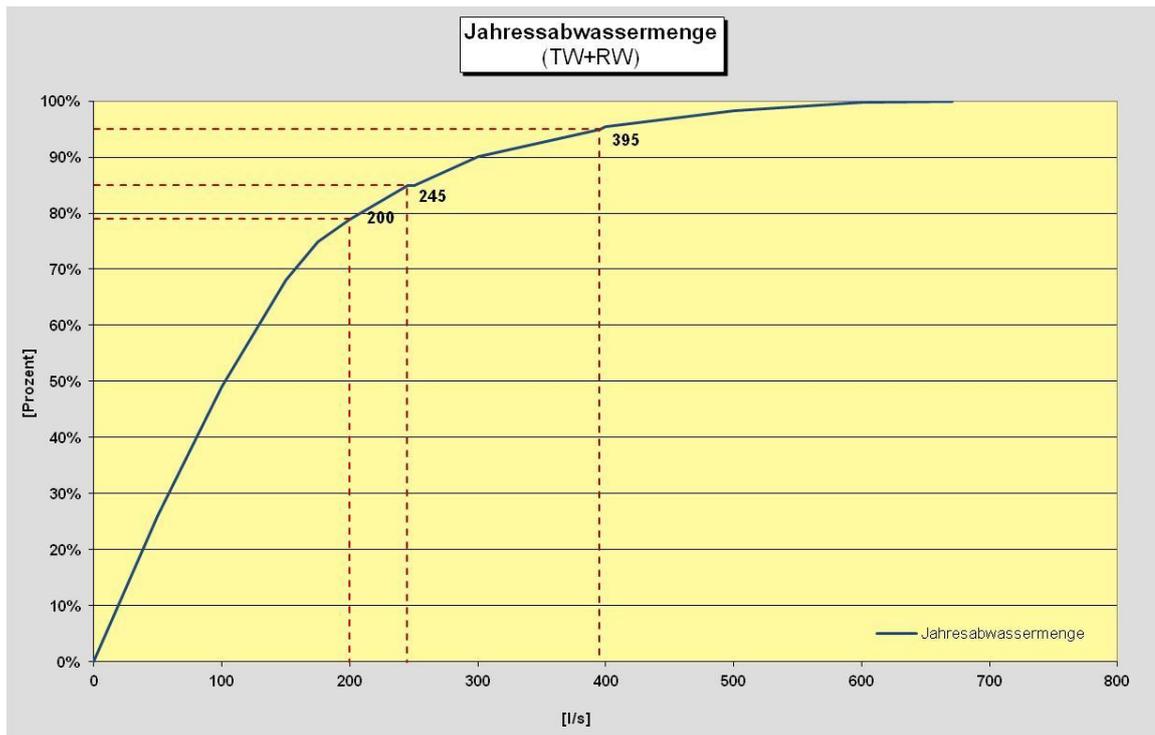


Abbildung 31: Auswertung Zulaufmengen, KA Bad Oeynhausen, 2009-2010

## 6 PLANUNGSKONZEPTE ZUR SPURENSTOFFELIMINATION

Im Folgenden werden die für die Kläranlage möglichen Varianten unter Berücksichtigung der vorhandenen baulichen und technischen Randbedingungen erläutert. Alle Konzepte sind in Lageplänen und Verfahrensschemata dargestellt.

- Lösungsvariante 1 – Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken
- Lösungsvariante 2 – Granulierte Aktivkohle in naachgeschalteten Druckkesseln (1-stufig)
- Lösungsvariante 3 – Ozonanlage
- Lösungsvariante 4 – Umrüstung vorhandener Filterzellen mit granulierter Aktivkohle

### 6.1 Lösungsvariante 1: Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken

Die Variante 1 umfasst die Zugabe von Pulveraktivkohle in einer vorgeschalteten Absorptionsstufe mit Abtrennung der Kohle in einem separaten Absetzbecken analog zum Verfahren auf der Kläranlage Mannheim (siehe Abbildung 32).

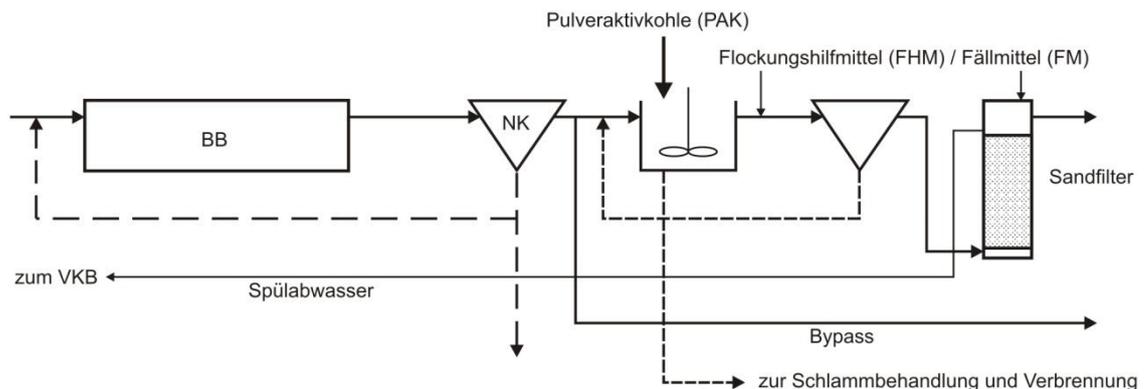


Abbildung 32: Schema Lösungsvariante 1 – Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken

Der Teilstrom für die Aktivkohlebehandlung von 200 l/s (siehe Kapitel 5.2) wird im Ablauf der Nachklärung abgetrennt. Bei einem Zulauf von bis zu 200 l/s fließt das gesamte Abwasser von der Nachklärung zur PAK-Anlage. Über eine Mengenummessung und einen Regelschieber im Mess- und Regelschacht wird sichergestellt, dass maximal 200 l/s der PAK-Anlage zufließen. Bei Regenwetter steigt der Wasserspiegel im Abschlagsbauwerk an und die Abwassermenge > 200 l/s wird über eine Überfallkante abgeschlagen. Sie fließt direkt in den Zulauf zur Flockungsfiltration.

Da auf der Kläranlage Bad Oeynhausen keine vorhandene Bausubstanz zur Nutzung als Kontakt- oder Absetzbecken zur Verfügung steht, werden bei Becken als Neubau auf der Grünfläche westlich der vorhandenen Flockungsfiltration geplant (siehe Abbildung 33).

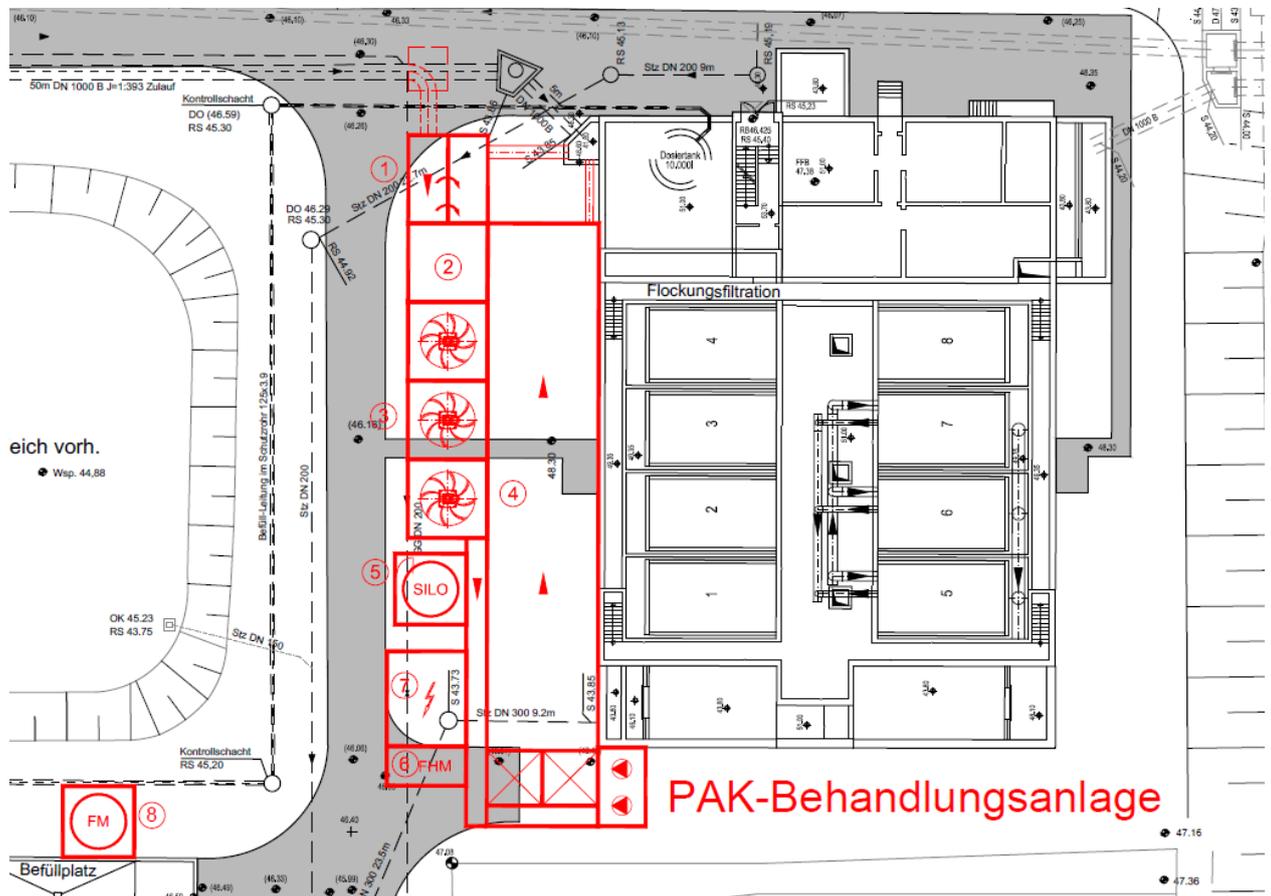


Abbildung 33: Lösungsvariante 1- Pulveraktivkohle mit Kontakt- und Absetzbecken

Das Kontaktbecken wird als 3-er-Kaskade mit einer Gesamtfläche von etwa 97 m<sup>2</sup> geplant. Mit einer Wassertiefe von 3,7 m ergibt sich ein Volumen von etwa 360 m<sup>3</sup>, so dass die Aufenthaltszeit im Mischbecken bei einem maximalen Zufluss von 200 l/s 30 Minuten beträgt. Jede Kaskade wird mit einem Rührwerk ausgestattet, um eine ausreichende Durchmischung zu gewährleisten.

Die Pulveraktivkohle wird in den Zulauf zum Kontaktbecken dosiert. Die PAK-Dosierstation wurde mit 5 - 20 mg/l angesetzt. Das PAK-Silo einschließlich Dosierstation wird ebenfalls auf der Grünfläche westlich der Filtration errichtet. Fäll- und Flockungshilfsmittel werden zwischen dem Kontakt- und Absetzbecken dosiert. Es wird empfohlen eine neue Fällmitteldosierstation, aus der Eisen(III)-

chlorid zum verbesserten Absetzen der Pulveraktivkohle dosiert wird, zu errichten. Diese ist neben der vorhandenen Dosierstation für die Simulatnfüllung geplant, so dass kein zusätzlicher Abfüllplatz gebaut werden muss. Für die FHM-Dosierung wird ein Container auf der Grünfläche neben der Filtration aufgestellt.

Das Absetzbecken wird aufgrund der beengten Platzverhältnisse aus längsdurchströmtes Rechteckbecken mit einer Länge von ca. 34 m gebaut. Bei einer Oberflächenbeschickung von 3 m/h, beträgt die erforderliche Tiefe 4,5 m. Es ergibt sich daraus ein Gesamtvolumen von etwa 1.080 m<sup>3</sup>. Die Aufenthaltszeit im Absetzbecken beträgt bei einem maximalen Zufluss von 200 l/s 1,5 Stunden. Der Ablauf des Absetzbeckens erfolgt über eine Überfallkante und fließt zur Flockungsfiltration.

Das Absetzbecken wird mit einem Räumer ausgestattet. Im Zulauf des Absetzbeckens werden Trichter ausgebildet, in die der Räumer die abgesetzte Kohle fördert. Von hier aus wird die Kohle über 2 Rezirkulationspumpen zurück in das Kontaktbecken gefördert. Das Rückführverhältnis beträgt maximal 70%. Die Überschusskohle wird über eine Pumpe aus dem Kontaktbecken in die Belebung gefördert. Die Kohle gelangt mit dem Überschussschlamm aus der Nachklärung zur Schlammbehandlung.

Es ist zu beachten, dass der behandelte Schlamm nicht wie zurzeit praktiziert in der Landwirtschaft entsorgt werden kann, sondern eine Verbrennung der gesamten Schlammmenge notwendig ist. Alternativ ist eine separate Schlammbehandlung für die Pulveraktivkohle möglich. Dies erfordert jedoch eine zusätzliche Schlammbehandlungsstraße und lässt den Vorteil einer weiteren Beladung der Kohle im Belebungsbecken ungenutzt.

Die wesentlichen verfahrenstechnischen Bemessungsgrundlagen werden im Weiteren kurz zusammengefasst:

- |                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| • Aufenthaltszeit in Kontaktreaktor   | 30 min.             |
| • Energieeintrag im Kontaktbecken     | 10 W/m <sup>3</sup> |
| • Aufenthaltszeit Sedimentationsstufe | < 1,5 h             |
| • PAK-Dosierung                       | 5 – 20 mg/l         |
| • Polymerdosierung                    | 0,15 – 0,30 mg/l    |
| • Fällmitteldosierung                 | 2 – 8 mg/l          |



heit erforderlich ist. In der Abwasserbehandlung ist, insbesondere aufgrund noch nicht vorhandener gesetzlicher Anforderungen, solch eine Sicherheit bisher nicht erforderlich. Da bei der 2. Betriebsweise die Standzeiten deutlich kürzer sind und dadurch die Betriebskosten stark ansteigen, wird empfohlen die 1. Betriebsweise zu verfolgen. Es besteht jedoch die Möglichkeit diese Variante zu einem späteren Zeitpunkt um eine 2. Stufe zu erweitern, falls gesetzliche Anforderungen dies notwendig machen sollten.

Der Teilstrom für die Behandlung in der GAK-Anlage wird über eine Leitung vom vorhandenen Auslaufschacht der Flockungsfiltration und einen Pumpenschacht mit 2 +1 Pumpen zu den GAK-Adsorbern gepumpt. Die GAK-Adsorber werden in einer neu zu errichtenden Halle (Leichtbauweise) auf der Südseite der Flockungsfiltration aufgestellt.

Der Ablauf erfolgt zum Auslaufbauwerk. Zum Spülen der Aktivkohle-Adsorber sind 1 + 1 Spülwasserpumpen mit einer maximalen Spülwassergeschwindigkeit von 25- 30 m/h und 1 + 1 Spülluftgebläse mit einer maximalen Spülluftgeschwindigkeit von 60 m/h vorgesehen. Im Ablauf der Filter ist eine Spülwasservorlage für die Spülwasserpumpen vorgesehen. Des Weiteren wird zur hydraulischen Vergleichmäßigung des Spülabwassers geplant. Von dort fließt das Spülabwasser zum Zulauf der Flockungsfiltration.

Die wesentlichen verfahrenstechnischen Bemessungsgrundlagen werden im Weiteren kurz zusammengefasst:

- |                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| • Verfahrenstechnik GAK-Filter | 1-stufig                |
| • 1. Stufe                     | 6 Reaktoren mit 4,1 m Ø |
| • Filterbetthöhe               | 2,50 m                  |
| • Aufenthaltszeit              | 10- 30 min              |

#### Mess-, Steuer-, Regeltechnik

Wie bereits erwähnt ist für den Betrieb in Druckreaktoren mit granulierter Aktivkohle in einer 1-stufigen Ausführung keine „merry-go-round“-Schaltung erforderlich. Eine weitgehende Automatisierung der Betriebs- bzw. evtl. Spülintervalle ist jedoch trotzdem notwendig. Hierfür sind grundsätzlich folgende technischen Einrichtungen zu berücksichtigen:

- Druckmessungen im Zu- und Einlauf der Filter (online)
- Volumenstrom pro Filter (online)

- Start- und Endzeit Filtrationsbetrieb
- Start- und Endzeit Filtrationszyklus bis Spülung
- Spülzeitpunkt und Spülparameter (Art, Dauer, Volumenströme)
- Druck Filterspülphasen

Im Rahmen der weiteren Planung ist auch für den Betrieb eines 1-stufigen Verfahrens zu entscheiden, welcher Leitparameter für die Ermittlung der Eliminationsleistung der Adsorber besonders geeignet ist. Beispielhaft ist an dieser Stelle eine SAK254-Sonde oder eine TOC-Online-Messung aufgeführt.

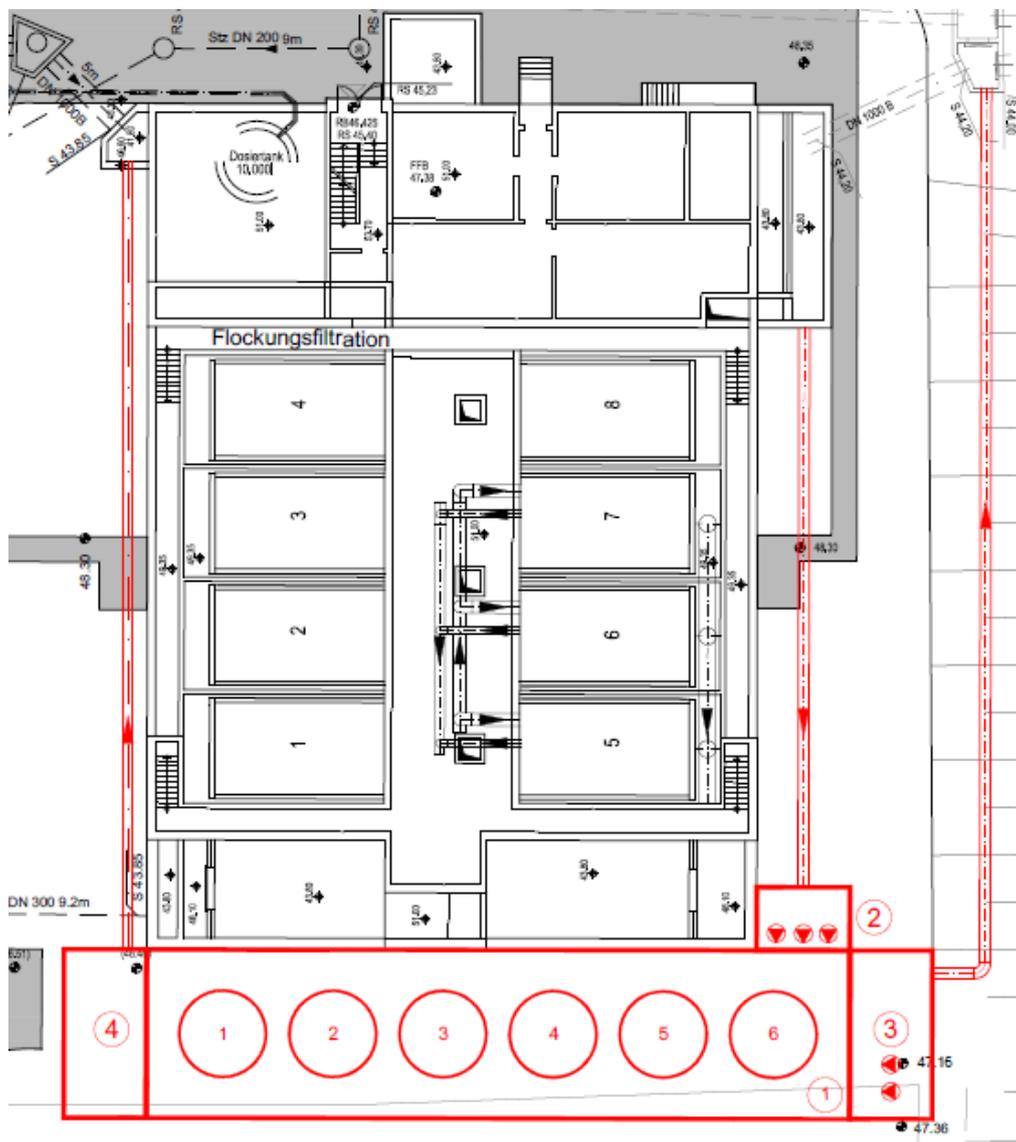


Abbildung 35: Lösungsvariante 2 – GAK – Nachgeschaltete Druckkessel (1-stufig)

### Betriebliche Aspekte

Die geplante Verfahrenskonzeption einer 1-stufigen GAK-Filtration weist im Hinblick auf eine weitergehende Entnahme von organischen Mikroschadstoffen deutlich geringere Betriebssicherheiten auf als ein 2-stufiges Verfahren. Es wird jedoch aus Kostengründen empfohlen die Adsorber trotz der 1-Stufigkeit bis zur kompletten Beladung zu betreiben und erst bei vollständigem Durchbruch das Filtermaterial herauszuholen und durch reaktiviertes Material zu ersetzen. Während des Wechsels des granulierten Aktivkohlematerials fällt der betroffene Filter komplett aus. Weitergehende Untersuchungen zur Feststellung des optimalen granulierten Aktivkohlematerials im Fall weitergehender Planung sind bei dieser Lösungskonzeption ebenfalls von besonderem Interesse.

Auch bei dieser 1-stufigen Lösungskonzeption dient die vorgeschaltete Flockungsfiltrationsanlage einer kontinuierlichen Elimination von Feststoffen und bzw. Phosphor, so dass sich hierdurch die nachgeschaltete GAK-Lösung auf das eigentliche Ziel der Spurenstoffelimination bzw. eine weitergehende Stabilisierung der DOC- bzw. CSB-Ablaufwerte konzentrieren kann. So sind optimale Voraussetzungen für einen hohen Reinigungserfolg durch möglichst wenig konkurrierende Beladungsaktivitäten verschiedener Stoffparameter infolge zu hoher Feststoffbelastung gegeben. Außerdem kann die erforderliche Spülung der GAK-Reaktoren voraussichtlich auf ein Minimum beschränkt werden, da sich das biologische Wachstum auf der Aktivkohle deutlich reduziert.

### **6.3 Lösungsvariante 3: Ozonung**

Bei der Variante 3 ist eine Ozonung des Ablaufs der Nachklärbecken vorgesehen. Abweichend von den anderen Varianten sollen die neuen Ozonungsreaktoren in Hochlage westlich der bestehenden Flockungsfiltrationsanlage errichtet werden. Der Ablauf der Nachklärung wird, wie bisher auch, dem Zulaufpumpensumpf der Flockungsfiltration zugeleitet. Die dort befindlichen Beschickungspumpen der Flockungsfiltration werden jedoch im Zuge des Umbaus durch 4 (3+1) neue Pumpen ersetzt. Die neuen Pumpen erhalten eine Verrohrung, mit der künftig nicht direkt die Flockungsfiltration, sondern zunächst ein 2-straßiger Ozonungsreaktor beschickt wird. Die Möglichkeit, über die neuen Pumpen direkt die Zulaufrinne der Flockungsfiltration zu beschicken, wird weiterhin beibehalten.

Die Auslegungswassermenge zur Bemessung der Ozonanlage wird analog zu den anderen Varianten mit 200 l/s gewählt. Abweichend davon wird die Anlage derart ausgestaltet, dass der Gesamtzulauf der Flockungsfiltrationsanlage durch die Ozonanlage geleitet wird. Bei Wassermengen, die die Bemessungswassermengen überschreiten, bedingt dies, dass die Ozonung mit niedrigeren Ozondo-

sierungen und kürzere Reaktionszeiten abläuft, dennoch wird eine Behandlung des Gesamtabwasserstroms möglich. Im Anschluss an das Durchfließen der Ozonierungsreaktoren wird das Abwasser dann zunächst über eine Rohrleitung dem Zulaufgerinne der Flockungsfiltration zugeleitet, die dann, wie bisher auch, durchflossen wird.

Die Auslegung der Ozonerzeugung erfolgt auf eine maximale Dosierung von 10 mg/l bei der Bemessungswassermenge von 200 l/s. Hieraus ergibt sich eine benötigte, maximale Dosiermenge von 7,2 kg/h. Zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird von einer mittleren Dosierrate von 8 mg<sub>O<sub>3</sub></sub>/l bei einem mittleren Abwasserzulauf zur Ozonanlage von 152 l/s ausgegangen. Hiermit ergibt sich eine mittlere Ozondosierung von 4,4 kg/h.

Die Ozonerzeugung nach dem Prinzip der stillen, elektrischen Entladung benötigt zur Herstellung von 1 kg Ozon ca. die 10-fache Menge Sauerstoff. Somit werden im Maximum ca. 72 kg/h Sauerstoff benötigt. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergibt sich die durchschnittlich benötigte Sauerstoffmenge zu 43,8 kg/h. Die Aufstellung des Ozonerzeugers soll im vorhandenen Filtergebäude im Raum oberhalb des Zulaufpumpensumpfs erfolgen. Der Tank für den Flüssigsauerstoff inklusive des zugehörigen Verdampfers wird außerhalb des Gebäudes auf der im Bereich der nord/westlichen Ecke der westlich der Flockungsfiltration gelegenen Grünfläche aufgestellt. Die Fläche rund um den Flüssigsauerstofftank muss entsprechend befestigt werden.

Für den Ozoneintrag kommen prinzipiell 2 Verfahrensweisen in Frage. Zum einen ist das ein Eintrag des ozonhaltigen Gases über Diffusoren direkt in den Ozonreaktor. Alternativ dazu kann ein Teilstrom aus dem Reaktor mit einer Pumpe abgezogen werden, der über einen Mischinjektor das ozonreiche Luftozongemisch ansaugt und anschließend in den Ozonreaktor eingetragen wird. Nach neuesten Erkenntnissen liefern beide Systeme bei einem vergleichbaren Energieverbrauch vergleichbare Eliminationsraten (HERBST ET AL. 2011). Für die Ausführung auf der Kläranlage Bad Oeynhausen wird Ozoneintrag über ein Injektorsystem vorgesehen. Dies bietet den Vorteil, dass bei einem im Filtrationsgebäude aufgestellten Ozonerzeuger und Injektor die Vermischung des Ozons mit dem Beschickungsvolumenstrom der Ozonreaktoren noch im Gebäude erfolgen kann und keine separate Ozonleitung aus dem Gebäude zu den neu zu errichtenden Reaktoren gelegt werden muss.

Gewählt wird eine Aufenthaltszeit im Ozonierungsreaktor von insgesamt 20 Minuten. Dabei wird das letzte Viertel der Ozonierungsreaktoren jedoch durch eine Leitwand vom Rest des Reaktors getrennt und als Ausgasungszone definiert, sodass eine Aufenthaltszeit im Reaktor von 15 Minuten verbleibt. Der

Ozonungsreaktor wird 2-straßig ausgeführt. Die lichten Abmessungen einer Straße inklusive Ausgasungszone betragen 7,6 x 3,5 x 4,5 m. Der Ablauf der Ozonungsreaktoren läuft über eine Leitung DN 1000 dem Zulaufgerinne der Flockungsfiltration im Freigefälle zu. Strömungstechnische Untersuchungen in anderen Vorhaben haben gezeigt, dass die Ausführung des Ozonreaktors als Schlaufenreaktor nicht erforderlich ist (HERBST ET AL. 2011). Auf entsprechende Einbauten wird aus diesem Grund verzichtet. Das Gesamtvolumen der beiden Reaktorstraßen inklusive Ausgasungszonen ergibt sich zu 240 m<sup>3</sup>, von denen  $\frac{3}{4}$  als Reaktionsraum und  $\frac{1}{4}$  als Ausgasungszone genutzt wird. Die Anordnung der neu geplanten Anlagenteile ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

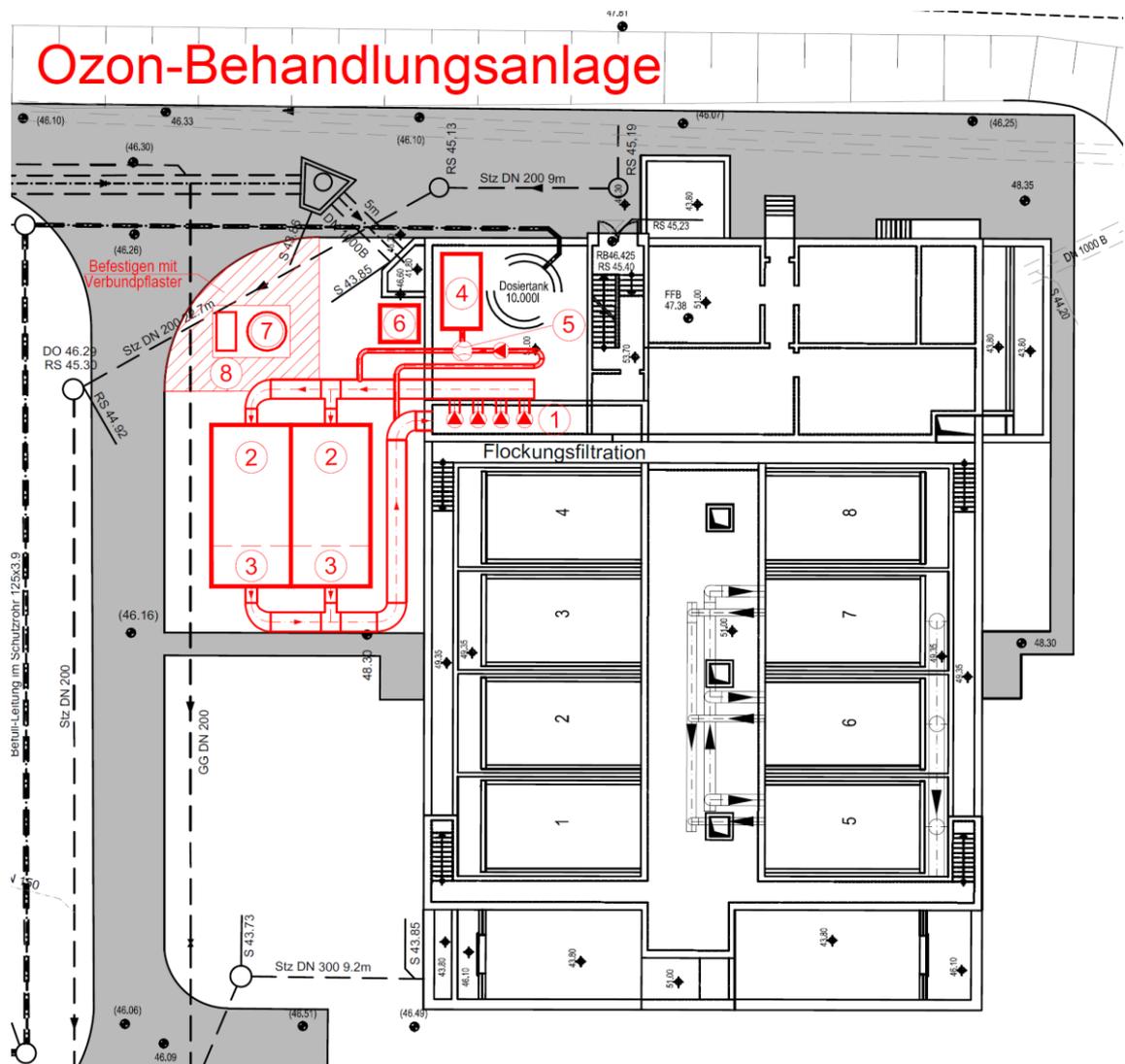


Abbildung 36: Lösungsvariante 3 - Ozonung

Für eine optimale Regelung des Ozoneintrags erfolgen im Zulauf der Anlage die Messung der Wassermenge und DOC-Konzentration online. Um eine Überdosierung zu vermeiden und eine Bilanzierung des Ozoneintrags vornehmen zu können, werden zudem die Ozonkonzentration im Gasstrom nach dem Ozonerzeuger in der Abluft der Reaktionsbehälter und in der Wasserphase im Ablauf des Ausgasungsbehälters gemessen. Die Abluft aus der Injektorstraße wird gezielt über einen Restozonvernichter behandelt, um eventuelle Restkonzentrationen vor Austritt in die Atmosphäre sicher zu eliminieren. Aus Gründen der Arbeitssicherheit werden im Raum zur Aufstellung des Ozonerzeugers die Ozon- und Sauerstoffkonzentrationen in der Raumluft gemessen. Bei Bedarf erfolgt eine optisch akustische Warnung bzw. eine Abschaltung der Anlagen.

Die wesentlichen verfahrenstechnischen Bemessungsgrundlagen werden nachfolgend kurz zusammengefasst:

- Aufenthaltszeit im Reaktionsbehälter (inkl. Ausgasungszone) 15 + 5 = 20 Min.
- Ozondosierung bezogen auf  $Q_{\text{Bem}}$  2 bis 10  $\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$
- Sauerstoffbedarf 10  $\text{g}_{\text{O}_2}/\text{g}_{\text{O}_3}$

Aufgrund der o. g. Problematik der Transformationsprodukte, wird die Ozonierung dem Filter vorgeschaltet. Wie oben dargestellt, können durch eine biologische Aktivität im Filter die möglicherweise negativen Auswirkungen einer Ozonierung wieder ausgeglichen werden (ABEGGLEN ET AL. 2010). Daher ist die Verfahrenskombination von Ozonierung und nachfolgender Filtration auch für den Einsatz auf der Kläranlage Bad Oeynhausen geeignet und hinsichtlich ihrer ökotoxikologischen Auswirkung als gleichwertig mit einer Adsorptionsstufe zu beurteilen. Durch die nachfolgende Sandfiltration, in der aufgrund des noch im Abwasser enthaltenen Sauerstoffs auch biologische Abbauprozesse ablaufen, werden zudem während der Oxidation entstehende biologisch abbaubare Verbindungen abgebaut.

#### 6.4 Lösungsvariante 4: Granulierte Aktivkohle – Nachgeschaltete Betonfilter im vorhandenen Filter (1-stufig)

Die Variante 4 untersucht eine weitergehende Abwasserreinigung durch das Einbringen granulierter Aktivkohle in einen Teil der vorhandenen Filter. Auch hier ist ein 1-stufiges Lösungskonzept vorgesehen (siehe Abbildung 37). Zur Umsetzung dieser Variante ist ein umfassender Umbau der vorhandenen Filtration notwendig.

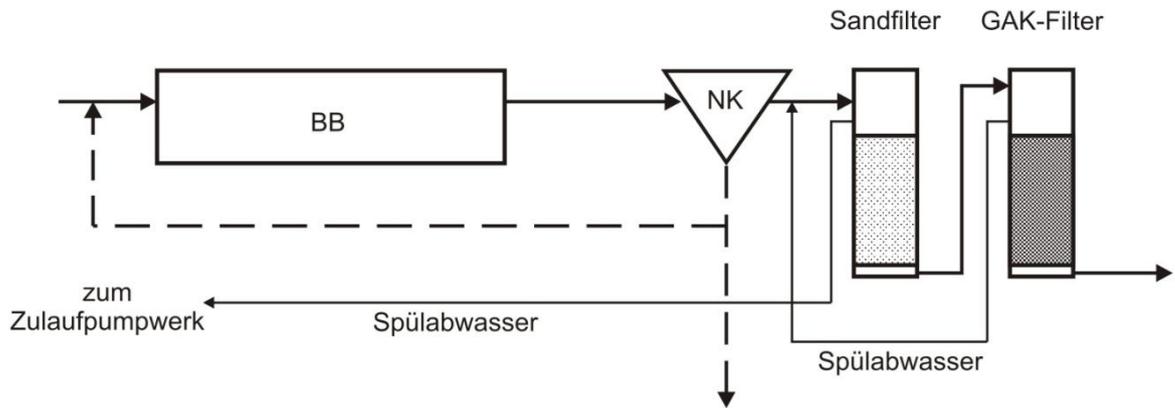


Abbildung 37: Schema Lösungsvariante 4 – GAK – Nachgeschaltete Betonfilter im vorhandenen Filter (1-stufig)

In Variante 4 ist es vorgesehen, dass das Abwasser zunächst 5 Filterzellen der Flockungsfiltration durchfließt, damit eine möglichst weitgehende Elimination von Feststoffen in der Flockungsfiltration eine hohe Reinigungsleistung der anschließend durchströmten GAK-Filter sicherstellen kann. Zudem dienen die ersten Filterzellen der Phosphorelimination.

Die Filtergeschwindigkeit für die 5 Filterzellen zur Flockungsfiltration beträgt bei maximalem Zufluss etwa 13,7 m/h und liegt somit unter der empfohlenen maximalen Filtergeschwindigkeit von 15 m/h. Unter Berücksichtigung eines in Spülung befindlichen Filters liegt die Filtergeschwindigkeit mit 17,2 m/h etwas über den Empfehlungen der ATV (ATV-A 203). Da durch die im Rahmen des Projektes empfohlene Filtersanierung die Leistungsfähigkeit der Flockungsfiltration deutlich erhöht wird, wird empfohlen zunächst in einem Versuch zu testen, ob bei dieser Geschwindigkeit die Leistungsfähigkeit des Filters ausreichend ist.

Der Ablauf der Flockungsfiltration fließt über eine Überfallkante vom Filtratspeicher in den Auslaufschacht. Neben dem Auslaufschacht auf der östlichen Seite der Filtration wird ein neuer Pumpenschacht gebaut, aus dem 2 + 1 Zulaufpumpen den Teilstrom von maximal 200 l/s in das Zulaufgerinne Ost fördern (siehe Abbildung 38). Dies wird hinter dem Zulauf zum ersten Filter auf der östlichen Seite durch eine Trennwand abgetrennt. Die anderen 3 Filter auf der östlichen Seite werden mit granulierter Aktivkohle mit einer Höhe von 2,15 m befüllt. Dadurch bleibt noch ausreichend Platz für eine Filterbettausdehnung bei Rückspülung, die nach den ersten Betriebsergebnissen der Kläranlage Gütersloh Obere Lutter ca. 15% betragen sollte.

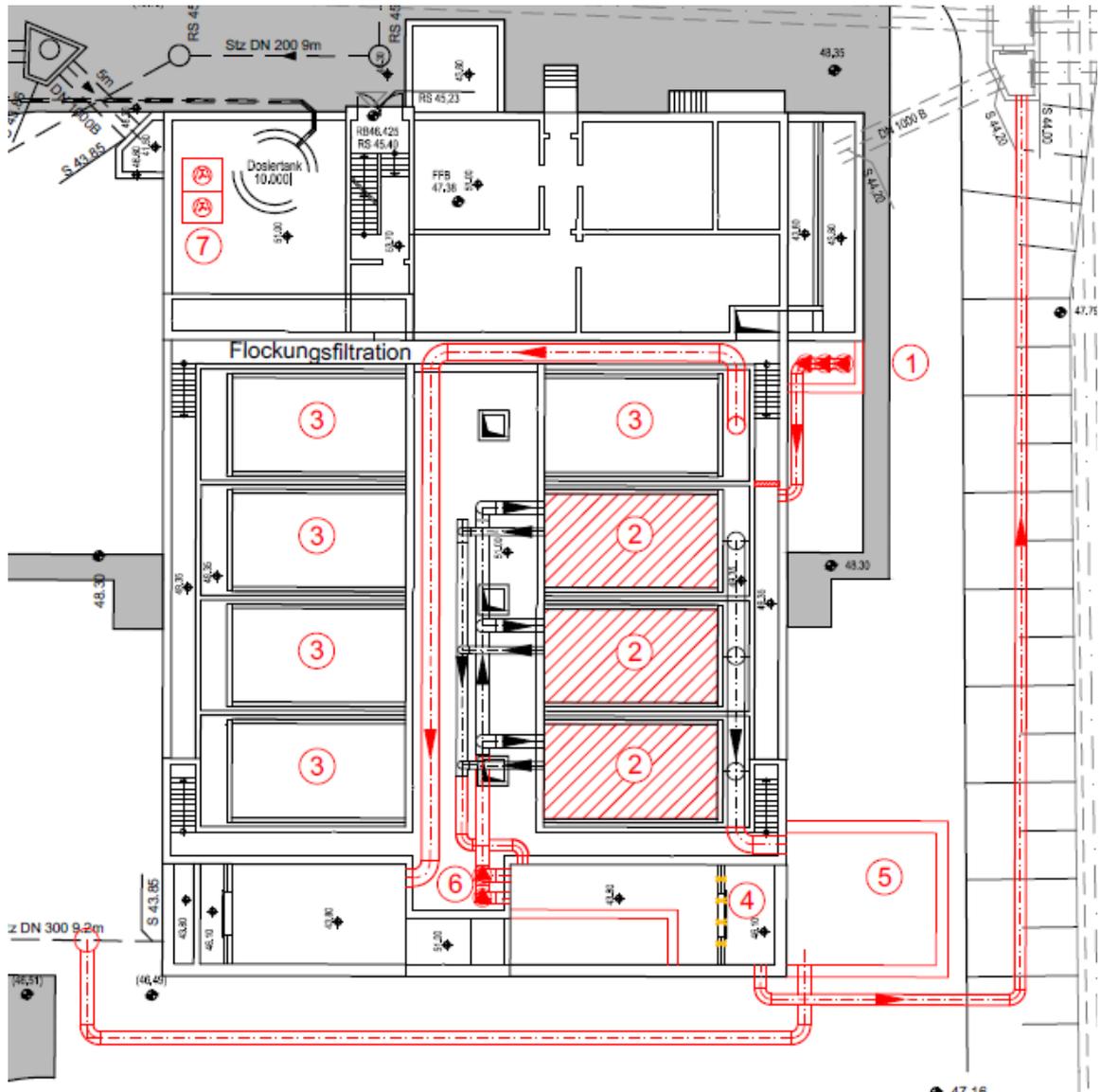


Abbildung 38: Lösungsvariante 4 – GAK im vorhandenen Filter

Die mittlere Filtergeschwindigkeit wurde mit 5 m/h angesetzt. Bei maximalem Zufluss von 200 l/s beträgt die Filtergeschwindigkeit unter Berücksichtigung eines in Spülung befindlichen Filters knapp 10 m/h. Es wird eine Kontaktzeit von 10 – 30 Minuten erreicht.

Der Zulauf zu den Filtern erfolgt über die vorhandenen Rohrleitungen und Rinnen. Die GAK-Filter werden abwärts durchströmt. Der Ablauf erfolgt ebenfalls über die vorhandenen Ablaufleitungen der einzelnen Filter. Die Ablaufsammeleiung wird hinter dem ersten Filter abgetrennt, so dass der Ablauf des ersten Filters, der als Sandfilter zur Flockungsfiltration betrieben wird, weiterhin zum vorhandenen Filtratspeicher erfolgt, während der Ablauf der GAK-Filter zum Filtratspeicher der GAK-Filter fließt.

Der Filtratspeicher der GAK-Filter wird durch Abtrennen eines Teils des vorhandenen Rückspülabwassersammelbeckens geschaffen. Im vorhandenen Rückspülabwassersammelbecken für die Flockungsfiltration besteht dann noch ausreichend Volumen für eine Filterspülung und einen Filterüberstand.

Aus dem Filtratspeicher ziehen 1 + 1 neue Spülwasserpumpen das Spülwasser für die Spülung der GAK-Filter. Nach den Ergebnissen des Forschungsprojektes Obere Lutter ist eine Spülwassergeschwindigkeit von 25 – 30 m/h erforderlich um eine Filterbettexpansion von etwa 15 % zu erzielen. Dies ist jedoch von der gewählten granulierten Aktivkohle abhängig und sollte im weiteren Verlauf der Planung durch Versuche ermittelt werden. Für die Spülung werden größtenteils die vorhandenen Leitungen genutzt. Des Weiteren werden die GAK-Filter mit Luft mit einer Geschwindigkeit von etwa 60 m/h gespült. Dafür werden 2 neue Gebläse benötigt, die über dem Zulaufpumpwerk aufgestellt werden können. Die Luftleitungen werden, so weit möglich, weiter verwendet.

Das Rückspülabwasser wird in einem neuen Rückspülabwassersammelbecken für die GAK-Filter gesammelt und fließt dann über eine neue Leitung und einen neuen Schacht mit dem Rückspülabwasser der Flockungsfiltration im freien Gefälle zum Zulaufpumpwerk 1. Der Ablauf der GAK-Filter erfolgt vom Filtratspeicher über eine neue Leitung zum Auslaufbauwerk.

Zusammengefasst lassen sich die wesentlichen Bemessungsergebnisse der klärtechnischen Berechnung des GAK-Filters wie folgt darstellen:

- Verfahrenstechnik GAK-Filter                      1-stufig
- Filterdimensionen                                      3 Filter mit 7,65 m x 4,8 m
- Festbetthöhe    2,15 m
- Aufenthaltszeit     13 - 20 min

Für die Verwendung einer geeigneten granulierten Aktivkohle wird nachfolgend ein Vorschlag aufgeführt, der im Rahmen der weiteren Planung überprüft und durch labortechnische Untersuchungen bestätigt werden sollte.

Beispielhaft wird folgendes vorgesehen:

- Granulierte Aktivkohle                              z. B. AquaSorb
- Material untere Stützsichten                      Kornfraktion 4 – 16 mm, Höhe 20 cm
- Material zweite Schicht                              Kornfraktion 0,5 – 2,4 mm, Höhe 2,3 m

- Dichte  $300 \text{ kg/m}^3$

#### Steuer- und Regeltechnik

Für den Betrieb der GAK-Filter und insbesondere der Filterspülung, ist die grundsätzliche Erfassung von Online-Daten notwendig. Beispielhaft sind nachfolgend verschiedene Betriebsparameter aufgeführt:

- Druck im Zu- und Einlauf Filter (online)
- Volumenstrom Filterzelle (online)
- Start- und Endzeit Filtrationsbetrieb
- Start- und Endzeit Filtrationszyklus bis Spülung
- Druck Filterspülphasen (online)
- Spülzeit Pumpenspülung Parameter (Art, Luft/Wasser, Dauer, Volumenstrom)

#### Betriebliche Aspekte

Ein abgestufter Filterschichtaufbau mit granulierter Aktivkohle ist beim Rückspülen erforderlich bzw. um ein Verstopfen der Filterdüsen zu vermeiden. Abhängig von der CSB- bzw. DOC-Zulaufkonzentration im Filterbetrieb wird die Beladung der Aktivkohle im laufenden Betrieb anwachsen und die Standzeit limitieren. Hierbei wird von entscheidender Bedeutung sein, welche Ziele der Spurenstoffelimination bei einem Betrieb des GAK-Filters gewählt werden bzw. für welche Parameter welche Reinigungsleistung angestrebt wird.

## 7 PLANUNGSKONZEPT ZUR FILTERSANIERUNG

Im Rahmen der Erweiterung der Kläranlage Bad Oeynhausen soll eine Sanierung der vorhandenen Flockungsfiltration durchgeführt werden. Basierend auf der Bestandsaufnahme, die in Kapitel 2.1 zusammengefasst ist, wird der im Folgenden beschriebene Sanierungsumfang festgelegt. Dieser umfasst im Wesentlichen die Sanierung der Filterkammern, der Austausch der Zulaufpumpen einschließlich Armaturen, der Ablaufklappen sowie Betonsanierung und sonstige Ausbauarbeiten.

### 7.1 Filterkammern

Die Filterkammern weisen hinsichtlich des Filteraufbaus und des Filterspülprogramms, der Düsenböden sowie der Zulaufverteilung Sanierungsbedarf auf.

#### 7.1.1 Filteraufbau und Filterspülung

Wie in Kapitel 2.1.1 erläutert, entspricht der Filteraufbau der vorhandenen Filterzellen nicht dem heutigen Stand der Technik. Beim bestehenden Filteraufbau ist es nicht möglich ein optimales, auf den Filteraufbau abgestimmtes Spülprogramm zu entwickeln, da die erforderlichen Spülgeschwindigkeiten nicht übereinstimmen. Daher wird empfohlen, den Filteraufbau dem heutigen Stand der Technik anzupassen und das gesamte Filtermaterial auszutauschen.

Der empfohlene Filteraufbau ist Abbildung 39 zu entnehmen.

Filterüberstau		~ 0,9 m
Anthrazit	1,4 – 2,5 mm	0,9 m
Quarz	0,7 – 1,2 mm	0,8 m
Filterdüsenboden		0,25 m

Abbildung 39: Empfohlener Filteraufbau Flockungsfiltration KA Bad Oeynhausen

Bei Verwendung entsprechend fein geschlitzter Düsen (siehe Kapitel 7.1.2) kann auf die Stützschiicht verzichtet werden. Als untere Filterschicht ist eine 0,8 m dicke Quarzschiicht mit einer Körnung von 0,7 – 1,2 mm und darauf eine Anthrazitschiicht von 0,9 m mit einer Körnung von 1,4 – 2,5 mm vorgesehen. Die beiden Filterschichten wurden so ausgewählt, dass die erforderlichen Spülgeschwindigkeiten mit je 55 m/h etwa gleich hoch sind (siehe Abbildung 40). Die vorhandenen Spülwasserpumpen liegen mit einer Leistung von 61 m/h zwar etwas über der empfohlenen Spülgeschwindigkeit, können aber weiter verwendet werden.

Filterüberstau		
Anthrazit	1,4 – 2,5 mm	55 m/h
		==
Quarz	0,7 – 1,2 mm	55 m/h
Filterdüsenboden		
Spülgeschwindigkeit vorhandene Spülwasserpumpen		61 m/h

Abbildung 40: Empfohlene Filterspülgeschwindigkeiten Flockungsfiltration KA B Oeynhausien

Es ist eine Anpassung des Spülprogramms an den heutigen Stand der Technik vorgesehen. Zum einen wird empfohlen, eine regelmäßiger Spülung, mindestens alle 48 h durchzuführen. Zum anderen wird eine kombinierte Luft-/ Wasserspülung empfohlen. Das empfohlene Spülprogramm ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Empfohlenes Filterspülprogramm Flockungsfiltration KA Bad Oeynhaus-  
sen

<b>Pha- se</b>	<b>Art der Spülung</b>	<b>Geschwindig- keit [m/h]</b>	<b>Dauer [min]</b>
1	Luftspülung	80,0	5,0
2	Kombinierte Luft-/ Wasserspülung	80,0 61,3	5,0
3	Wasserspülung	61,3	3,0

Die vorhandenen Spülluftgebläse können die Filter mit einer Geschwindigkeit von 61,3 m/h spülen. Diese Leistung ist für das neue Spülprogramm nicht mehr ausreichend, so dass ein Austausch der Spülluftgebläse vorzunehmen ist.

Durch den Austausch des kompletten Filtermaterials und das optimierte, auf den Filteraufbau angepasste Spülprogramm verbessert sich die Klassierung des Filtermaterials wesentlich. Es ist daher damit zu rechnen, dass es zu keinen weiteren Verlagerungen des Filtermaterials durch die Filterspülung kommt. Daher wird im Moment von einer Spülluftverteilung unterhalb der Düsenböden, wie sie z.B. die Firma EVERS ENGINEERING vorgeschlagen hat, abgesehen, da hier keine deutliche Verbesserung der Spülluftverteilung zu erwarten ist. Diese könnte aber mit relativ wenig Aufwand nachgerüstet werden.

#### 7.1.2 Düsenböden und Düsen

Aufgrund von einer erhöhten Feststoffbeladung sind Schädigungen an den Filterdüsenböden aufgetreten und es kommt zu Austritt von Filtermaterial. Aus diesem Grund wurden die Filterkammern 2, 5 und 7 bereits in den Jahren 2000 bzw. 2005 durch Austausch der Düsenböden und Sicherung derselben gegen Auftrieb durch 2 Betonbalken saniert. Im Rahmen der Filtersanierung sollen nun die Filter 1, 3, 4, 6 und 8 ebenfalls saniert werden.

Die vorhandenen Düsenbodenplatten werden durch 8 Platten, die über die gesamte Breite der Filterkammer reichen, ersetzt. Die Dicke der neuen Platten beträgt 25 cm. Die Platten werden durch 2 Betonbalken, die auf beiden Seiten der Filterkammer längs über die Düsenbodenplatten reichen und jeweils auf der Stirnseite mit der vorhandenen Wand verbunden werden, gegen Auftrieb gesichert.

Die Filterdüsen werden ebenfalls erneuert. Es werden Düsen mit einer geringeren Schlitzweite von 0,5 mm (z.B. KSH, Typ D-36x0,5) als die die vorhandenen Düsen (Schlitzweite 1,0 mm) vorgesehen, damit auf die Stüttschicht verzichtet werden kann. Dies bedeutet, dass die Filterdüsen aller Filter, auch der bereits sanierten Filter, ausgetauscht werden. Es wird weitergehend empfohlen (optional) die Anzahl der Düsen gemäß Empfehlung der DWA auf ca. 60 Düsen/ m<sup>2</sup> Filterböden zu erhöhen. Hierzu ist ein Austausch der bereits sanierten Filterdüsenböden der Filter 2, 5 und 7 zusätzlich erforderlich.

### 7.1.3 Zulauf

Die Vertiefungen im Filtermaterial unterhalb der Zulaufbereiche, die am Ende eines Filterzyklus deutlich zu erkennen sind, werden durch die Filterrückspülung ausgeglichen. Daher wird empfohlen das Filterspülprogramm dahingehend anzupassen, dass eine regelmäßigerere Filterspülung, gemäß Empfehlungen der DWA möglichst alle 24 h bis 48 h, erfolgt. Dies verhindert auch eine Verschlammlung des Filtermaterials und Verstopfungen der Düsen.

Des Weiteren wird empfohlen, den Wasserspiegel in den Filterkammern über ein neues Regelprogramm anzuheben, um den Filterüberstau zu erhöhen und den Impuls des überfallenden Wassers zu minimieren.

Da anhand der Filterablaufwerte zu erkennen ist, dass die geringfügig unterschiedlichen Filtermaterialhöhen keine wesentlichen Auswirkungen auf die Filterleistung haben, wird von einer konstruktiven Veränderung des Zulaufbereichs zunächst abgeraten. Der Einbau einer weiteren Zulaufrinne in der Mitte der Filterkammer ist aufgrund der nötigen Spannweite von ca. 8 m kostenaufwendig, könnte aber mithilfe von Trägern realisiert werden. Sollten die vorgenannten Maßnahmen zur Regelung und Optimierung des Spülprogramms nicht ausreichen, kann nachträglich eine Optimierung des Zulaufbereichs, z.B. durch den Einbau einer Art Prallwand unterhalb der Überfallkanten, erfolgen.

## 7.2 Pumpen und Armaturen

Bei den Pumpen und Armaturen der Filtration der Kläranlage Bad Oeynhausen besteht lediglich Sanierungsbedarf bei den Zulaufpumpen einschließlich der zugehörigen Armaturen sowie der Ablaufklappen.

### 7.2.1 Zulaufpumpen

Die Zulaufpumpen werden komplett einschließlich Rohrleitungen und Armaturen erneuert. Bei den vorhandenen Pumpen handelt es sich um 3 Tauchmotorpumpen der Firma KSB, die auf einen maximalen Zulauf von 2.450 m<sup>3</sup>/h ausgelegt

sind. Auf Wunsch des Betriebes wird zur einfacheren Wartung und Lagerhaltung als Fabrikat für die neuen Pumpen ebenfalls die Firma KSB festgelegt.

Der maximale Kläranlagenzulauf beträgt gemäß Entwurf 2.450 m<sup>3</sup>/h. Der bei der Grundlagenermittlung (2009 – 2010) ermittelte maximale Zulauf betrug 2.414 m<sup>3</sup>/h und liegt damit nur knapp unter dem Entwurf, so dass zur Auslegung der Pumpen der maximale Zulauf aus dem Entwurf genommen wird. Rechnet man zusätzlich etwa 10% Filterrückspülwasser hinzu, beträgt der Zulauf zur Floccungfiltration etwa 2.700 m<sup>3</sup>/h. Der mittlere Zulauf liegt laut Entwurf bei 1.143 m<sup>3</sup>/h, gemäß Grundlagenermittlung jedoch nur bei 696 m<sup>3</sup>/h.

Die Zulaufpumpen werden als 3 Pumpen + 1 Reservepumpe auf den maximalen Zulauf von 2.700 m<sup>3</sup>/h ausgelegt. 1 Pumpe wird mit Frequenzumrichter ausgestattet. Die Rohrleitungen werden als beschichtete Stahlleitungen, wie vorhanden, oder als Edelstahlleitungen mit Rückschlagklappen und Absperrklappen vorgesehen. Die vorhandenen Regelarmaturen werden nicht benötigt und daher nicht ersetzt.

#### 7.2.2 Regelarmaturen (Anhebung Filterüberstau)

Die Absperrklappen in den Ablaufleitungen der einzelnen Filter werden durch Regelarmaturen ersetzt, um eine bessere Regelung zu ermöglichen.

Das Regelprogramm der Filter wird angepasst, um den Wasserspiegel in den Filterkammern anzuheben.

### 7.3 Betonsanierung

Im Rahmen der Filtersanierung ist eine Betonsanierung der Filterkammern und des Rückspülabwassersammelbeckens vorgesehen.

Bei der Sanierung der Filterkammern 2, 5 und 7 wurde eine Betonsanierung bis zur Oberkante des Filtermaterials vorgenommen. Bei diesen Filtern wird eine Betonsanierung oberhalb des Filtermaterials und bei den restlichen Filtern eine Sanierung des Betons der kompletten Filterkammer durchgeführt.

Die Stirnseiten des Rückspülabwassersammelbeckens wurden bereits saniert, so dass hier nur eine Betonsanierung der Stirnseiten vorgesehen ist.

### 7.4 Sonstige Ausbauarbeiten

Im Zulaufpumpwerk sind Malerarbeiten vorgesehen. Weitere Ausbauarbeiten, wie z.B. Anarbeiten der Fliesen im Zulaufpumpwerk, werden pauschal angesetzt.

## 8 KOSTENSCHÄTZUNG

Es wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der 4 zu untersuchenden Varianten für die Spurenstoffelimination sowie eine Schätzung der Investitionskosten für die Filtersanierung durchgeführt. Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden sowohl die Investitionskosten als auch die Betriebskosten ermittelt und daraus die Jahreskosten errechnet. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

### 8.1 Spurenstoffelimination

#### 8.1.1 Investitionskosten

Basierend auf den klärtechnischen Berechnungen und den Lageplanskizzen wurden die Investitionskosten für die verschiedenen Lösungsvarianten geschätzt. Hierbei wurden Kosten für Bau-, Maschinen- sowie EMSR-Technik unterschieden. Die Kosten wurden anhand spezifischer Preise, basierend auf aktuellen Submissionsergebnissen sowie aktuellen Einheitspreisen ermittelt. Die Ergebnisse der Investitionskostenschätzung sind in Tabelle 4 unten zusammengefasst.

Tabelle 4: Investitionskosten in € der Varianten 1 bis 4

Kurztext	Variante 1 PAK mit Kontakt- und Absatzbecken	Variante 2 Nachgeschaltete Druckkessel	Variante 3 Ozonanlage	Variante 4 GAK im vorhandenen Filter
Bau	826.408	980.513	367.785	435.255
Maschinen	582.099	720.000	438.000	224.882
EMSR	355.000	425.000	150.000	165.000
<b>Summe netto</b>	<b>1.763.507</b>	<b>2.125.513</b>	<b>955.785</b>	<b>825.137</b>
<b>19 % MwSt.</b>	<b><u>335.066</u></b>	<b><u>403.847</u></b>	<b><u>181.599</u></b>	<b><u>156.776</u></b>
<b>Summe brutto</b>	<b>2.098.573</b>	<b>2.529.360</b>	<b>1.137.384</b>	<b>981.913</b>
<b>Prozente</b>	<b>100 %</b>	<b>121 %</b>	<b>54 %</b>	<b>47 %</b>

Die Investitionskosten für Variante 4 – GAK im vorhandenen Filter sind mit knapp 1,0 Mio. € brutto die niedrigsten für die 4 Varianten, gefolgt von Variante 3 – Ozonanlage mit ca. 1,1 Mio. €. Die Kosten für die Varianten 1 und 2 liegen mit knapp 2,1 und 2,5 Mio. € brutto deutlich höher.

### 8.1.2 Betriebskosten

Um eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchzuführen, werden Jahreskosten berechnet. Hierbei sind die Betriebskosten der verschiedenen Konzepte von besonderer Bedeutung.

Nachfolgende Randbedingungen wurden bei der Ermittlung der Betriebskosten zugrunde gelegt.

- Energiekosten                      0,18 €/kWh (brutto) = 0,1458 €/kWh (netto)
- Facharbeiter                        40.000 €/a
- Wartung/Versicherung            1 bzw. 2,5 % Investitionskosten

Für die Berechnung der Betriebskosten wurden die Kosten für Personal, Energie, Chemikalien, Schlammverbrennung sowie Wartung und Versicherungen ermittelt. Einsparungen in der Abwasserabgabe wurden bisher nicht berücksichtigt.

In die Ermittlung des Energiebedarfs wurden der Energiebedarf für Pumpen, Gebläse, Räumler, Rührwerke sowie die Ozonerzeugung eingerechnet. Die Kosten für Chemikalien beinhalten im Wesentlichen die Kosten für die Aktivkohle und Sauerstoff.

Als spezifischer Preis für die Pulveraktivkohle wurden 1.400 €/t angesetzt. Für die granulierten Aktivkohle wurde mit 900 €/t gerechnet. Dies entspricht dem Preis für reaktivierte granulierten Aktivkohle. Die Kosten für neue granulierten Aktivkohle liegen mit einem Preis von ca. 1.300 €/kg deutlich über dem Preis für regenerierte Aktivkohle. Bei der Berechnung der Investitionskosten wurden für die erste Füllung der granulierten Aktivkohlefilter die Kosten für neue Aktivkohle angesetzt. Die erforderlichen Mengen der PAK bzw. GAK wurden in der klärtechnischen Berechnung ermittelt. Zur Betriebskostenberechnung wurden die mittleren Dosieraten bzw. mittleren Standzeiten der Aktivkohlefilter angesetzt.

In Variante 1 werden zusätzlich Flockungshilfsmittel sowie Fällmittel benötigt. Die Kosten für die Flockungshilfsmittel sind mit 1.300 €/t angesetzt. Die jährlichen Kosten für Flockungshilfsmittel liegen jedoch weit unter den Kosten für die Aktivkohle und fallen kaum ins Gewicht. Die Kosten für Fällmittel sind in der Betriebskostenberechnung nicht angesetzt, da sich durch die Fällmitteldosierung die notwendige Dosierung in der Simultan- bzw. Nachfällung reduziert.

Für Variante 1 wurden die zusätzlichen Kosten für Schlammverbrennung bzw. -entsorgung durch die zusätzliche Schlammmenge durch die Pulveraktivkohle

ermittelt. Der spezifische Preis wurde mit 50 €/t berücksichtigt. Desweiteren ist es bei dem Einsatz von Pulveraktivkohle bei gemeinsamer Abtrennung der Kohle zusammen mit dem Primär- oder Überschussschlamm nicht mehr möglich, den entwässerten Schlamm in der Landwirtschaft zu entsorgen. Der gesamte Schlamm muss der Verbrennung zugeführt werden. Die Mehrkosten für diesen Entsorgungsweg sind auch unter dem Punkt Schlammentsorgung berücksichtigt.

Bei Variante 3 – Ozonanlage wurden Kosten in Höhe von 0,2 €/kg Sauerstoff angesetzt. Dies beinhaltet den Sauerstoff sowie die Tankmiete. Die erforderlichen Sauerstoffmengen wurden in der klärtechnischen Berechnung ermittelt.

In Tabelle 5 sind die Betriebskosten für die unterschiedlichen Varianten zusammengefasst.

Tabelle 5: Betriebskosten in €/a der Varianten 1 bis 4

Kurztext	Variante 1 PAK mit Kontakt- und Absetzbecken	Variante 2 Nachgeschaltete Druckkessel	Variante 3 Ozonanlage	Variante 4 GAK im vorhandenen Filter
Personal	10.000	10.000	7.500	10.000
Energie	15.650	27.311	95.937	31.292
Chemikalien	68.175	159.300	76.696	159.300
Schlammentsorgung	21.891	0	0	0
Wartung/ Versicherungen	31.692	38.430	18.378	14.100
Abwasserabgabe	0	0	0	0
<b>Summe netto</b>	<b>147.408</b>	<b>235.041</b>	<b>198.511</b>	<b>214.692</b>
<b>19 % MwSt.</b>	<b><u>28.007</u></b>	<b><u>44.658</u></b>	<b><u>37.717</u></b>	<b><u>40.791</u></b>
<b>Summe brutto</b>	<b>175.415</b>	<b>279.699</b>	<b>236.228</b>	<b>255.483</b>
<b>Prozente</b>	<b>100 %</b>	<b>159 %</b>	<b>135 %</b>	<b>146 %</b>

Die Betriebskosten der Variante 1 sind mit ca. 175.000 €/a die geringsten. Die Betriebskosten der Variante 3 liegen ca. 35 % über diesen Kosten, bei etwa 236.000 €/a gefolgt von Variante 4 mit Betriebskosten in Höhe von etwa 255.000

€/a (46 % höher). Die jährlichen Betriebskosten der Variante 2 sind mit ca. 280.000 €/a die höchsten (59 % teurer).

Die Betriebskosten setzen sich im Wesentlichen aus Energiekosten und Kosten für Chemikalien zusammen. Während bei den Aktivkohlevarianten (Varianten 1, 2 und 4) die höchsten Kosten bei den Chemikalien (Aktivkohle) auftreten, sind bei Variante 3 (Ozonanlage) die Energiekosten für die Ozonerzeugung der wesentliche Kostenfaktor. Der Verbrauch an Pulveraktivkohle (Variante 1) liegt deutlich unter dem der beiden GAK-Varianten (2 und 4), was zu deutlich geringeren Betriebskosten führt.

### 8.1.3 Jahreskosten

Die Jahreskosten wurden unter Berücksichtigung der nachfolgenden Randbedingungen ermittelt.

- Betrachtungszeitraum 40 Jahre,
- Nutzungsdauer Bau 40 Jahre,
- Nutzungsdauer Maschinenteknik 20 Jahre,
- Nutzungsdauer EMSR-Technik 10 Jahre,
- Kalkulatorischer Zinssatz 5 %.

Die Jahreskosten sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Jahreskosten in €/a der Varianten 1 bis 4

Kurztext	Variante 1 PAK mit Kontakt- und Absatzbecken	Variante 2 Nachgeschaltete Druckkessel	Variante 3 Ozonanlage	Variante 4 GAK im vorhandenen Filter
<b>Jahreskosten netto</b>	<b>288.2516</b>	<b>404.998</b>	<b>274.516</b>	<b>279.471</b>
<b>19 % MwSt.</b>	<b><u>54.768</u></b>	<b><u>76.950</u></b>	<b><u>52.158</u></b>	<b><u>53.099</u></b>
<b>Jahreskosten brutto</b>	<b>343.019</b>	<b>481.948</b>	<b>326.674</b>	<b>332.570</b>
<b>Prozente</b>	<b>100 %</b>	<b>141 %</b>	<b>95 %</b>	<b>97 %</b>

Anhand der Jahreskostenberechnung wird deutlich, dass sich die Varianten 1, 3 und 4 in den Kosten kaum unterscheiden. Sie liegen zwischen 330.000 und 340.000 €/a und somit im Bereich zwischen 95 und 100 %. Lediglich Variante 2

(GAK in nachgeschalteten Druckkesseln) ist mit ca. 480.000 €/a deutlich teurer als die anderen Varianten.

#### 8.1.4 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Jahreskostenbetrachtung gemäß LAWA zeigen nach Untersuchung der verschiedenen Lösungskonzepte kaum Unterschiede in den Kosten. Es ist jedoch zu erkennen, welche Parameter von ausschlaggebender Bedeutung für die Investitionskosten, Betriebskosten und auch die Gesamtkosten sind. Hierzu sind u. a. folgende Aspekte weitergehend zu betrachten bzw. zu analysieren:

- Energiekosten bzw. der spez. Preis von 18 Cent/kWh (brutto)
- Materialkosten der Pulveraktivkohle (€/t) bzw. der granulierten Aktivkohle (€/t) sowie des Sauerstoffs
- Analyse bzw. Prognose der Entwicklung der zukünftigen spezifischen Materialpreise
- Erforderliche Dosierrate der Pulveraktivkohle
- Standzeiten der GAK-Filter
- Erforderliche Dosierrate des Ozons

Bei Betrachtung der Energiekostensituation lässt sich konstatieren, dass sich die Kostenbarwerte im Hinblick auf höhere Energiekosten von z. B. 16 oder 18 Cent/kWh (netto) statt 14,6 Cent/kWh nur unwesentlich ändern. Lediglich Variante 3 (Ozonung), die sehr energieintensiv ist, verteuert sich bei höheren Energiekosten um ca. 27.000 € bei Energiepreisen von 18 Cent/kWh. Der Anteil der Energiekosten an den Jahreskosten beträgt für diese Variante ca. 35 %. Bei den anderen Varianten liegt er bei 5 – 11 %.

Eine hydraulische Energieoptimierung im Hinblick auf die planerischen Belange bzw. das berechnete Betreiberinteresse ist unabhängig von der Sensitivitätsbetrachtung im Rahmen der weiteren Detailplanung anzustreben.

Des Weiteren sind die Kosten für Chemikalien, insbesondere Aktivkohle und Sauerstoff für alle Lösungskonzepte von besonderer Bedeutung. Betrachtet man die anteiligen chemikalienspezifischen Betriebskosten, die 24 - 57 % ausmachen, wird die enorme Bedeutung und damit die besondere Abhängigkeit der Jahreskosten unter diesem Aspekt deutlich.

Den bisherigen Ansätzen liegen Richtpreisangebote und aktuelle Submissionsergebnisse von anderen Projekten, z.B. auf der Kläranlage Mannheim (PAK) und der Kläranlage Obere Lutter (GAK) zugrunde. Der Aktivkohlepreis für die granulierten Kohle wurde in Höhe von 1.300 €/t realistisch angesetzt. Auf dem Markt gibt es sowohl teurere als auch deutlich günstigere Ergebnisse. Vor diesem Hintergrund liegen, z. B. bei einem Ansatz von 1.450 €/t, d. h. einem um 11,5 % teureren spezifischen Materialpreis für die granulierten Aktivkohle, die Investitionskosten für die GAK-Varianten zwischen 0,5 % und 1,5 % höher, bei einem Ansatz von 1.000 €/t um 1 % bis 3 % günstiger. Ein geänderter Preis der reaktivierten granulierten Aktivkohle, z.B. eine Erhöhung von 900 €/t auf 1.110 €/t, hätte deutliche Auswirkungen auf die Betriebskosten, welche sich dadurch um ca. 15 bis 16,5 % erhöhen würden. Bei den Jahreskosten hätte dies eine Steigerung um bis zu 12,5 % zur Folge. Ebenso hätte ein geringerer Preis den umgekehrten Effekt.

Für die mittleren Betriebskosten der Zugabe anhand von pulverisierter Aktivkohle wird in Variante 1 von einem Ansatz von 5 bis 20 mg PAK/l bei einer durchschnittlichen Dosierrate von 10 mg/l ausgegangen. Die erforderliche Dosierrate hängt jedoch von den Eliminationszielen der unterschiedlichen Parameter ab. Sollte sich z.B. für die Variante 1 eine Erhöhung der mittleren Dosierrate von 10 mg/l auf 15 mg/l ergeben, so wäre hiermit eine Steigerung der Betriebskosten um 23,5 % zu verzeichnen. Bei den Jahreskosten würde der Unterschied ca. 12 % betragen.

Für die mittleren Betriebskosten Ozonung wird in Variante 3 eine mittlere Dosierrate von 8 mgO<sub>3</sub>/l angesetzt. Wie bei der Zugabe von Pulveraktivkohle hängt die erforderliche Dosierrate von der erwünschten Reinigungsleistung ab. Sollte sich eine Erhöhung der mittleren Dosierrate von 8 mg/l auf 10 mg/l ergeben, so wäre hiermit eine Steigerung der Betriebskosten um 9,5 % zu verzeichnen. Bei den Jahreskosten würde der Unterschied ca. 7 % betragen. Bei einer Reduzierung der Dosierrate auf 5 mg/l würden sich die Betriebskosten um ca. 14,5 % und die Jahreskosten um 11,5 % verringern.

Von entscheidender Bedeutung für die Gesamtbetrachtung ist neben dem spezifischen Materialpreis die Standzeit der GAK-Reaktoren. Gemäß der klärtechnischen Berechnung wird derzeit für die GAK-Varianten von einer Standzeit von 4 – 5 Monaten ausgegangen. Die Standzeit ist wesentlich davon abhängig, welche Stoffe zu welchem Grad eliminiert werden sollen. Bei einer Verlängerung der Standzeit z.B. auf ca. 9 Monate würden sich die Betriebskosten um 34,5 – 37,5 % und die Jahreskosten um 23,0 – 26,5 % reduzieren.

Vor dem Hintergrund des noch nicht klar definierten Reinigungszieles bzw. der noch fehlenden Antwort auf die Frage, auf welche Leitparameter sich eine weitergehende Spurenstoffelimination zu beziehen hat, kann eine Bewertung sich ändernder Standzeiten nur schwer vorgenommen. Von daher ist im Rahmen der weiteren Planung zu definieren, welche Variante grundsätzlich verfolgt werden soll und welche enthaltenen Kostenrisiken durch weitergehende Untersuchungen wie z. B. einen großtechnischen Versuch zu einer Kostensicherheit beitragen können.

## 8.2 Filtersanierung

### 8.2.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten für die Filtersanierung wurden anhand spezifischer Preise, basierend auf aktuellen Submissionsergebnissen und aktuellen Einheitspreisen sowie der festgestellten Kosten aus der bereits durchgeführten Filtersanierung auf der Kläranlage Bad Oeynhausen ermittelt.

Nach dem jetzigen Planungsstand ergeben sich die folgenden Investitionskosten:

Gesamt Investitionskosten netto ca.:	786.000 €
Zzgl. MwSt (zurzeit 19 %)	<u>149.000 €</u>
<b>Gesamt Investitionskosten brutto ca.:</b>	<b>935.000 €</b>

Bei Realisierung der optionalen Arbeiten (Erhöhung der Anzahl der Filterdüsen) ergeben sich die folgenden Investitionskosten:

Gesamt Investitionskosten netto ca.:	910.000 €
Zzgl. MwSt (zurzeit 19 %)	<u>173.000 €</u>
<b>Gesamt Investitionskosten brutto ca.:</b>	<b>1.083.000 €</b>

## 9 BEWERTUNG DER PLANUNGSKONZEPTE ZUR SPURENSTOFFELIMINATION

Abgesehen von den Kosten gibt es noch weitere Kriterien wie z.B. die Reinigungsleistung, die Entstehung und Auswirkungen von möglichen Transformationsprodukten oder den Betriebsaufwand, die die Auswahl der bevorzugten Verfahrensvariante beeinflussen. In Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Bad Oeynhausen wurde daher eine Bewertungsmatrix erarbeitet (siehe Tabelle 7), in der eine Bewertung anhand dieser Kriterien für die verschiedenen Varianten durchgeführt wurde. Die Kriterien sind prozentual gewichtet und die Varianten mit einer Punktzahl von 1 bis 5, wobei 1 die niedrigste und 5 die höchste Bewertung darstellt, bewertet.

Die Höhe der **Jahreskosten** wird als das wichtigste Kriterium gesehen und daher mit der höchsten Gewichtung (40%) eingestuft. Wie schon im Kapitel 8.1 erläutert, sind alle Varianten, abgesehen von Variante 2, ungefähr gleich einzustufen. Die beiden günstigsten Varianten (Varianten 3 und 4) erhalten mit 5 Punkten die höchste Punktzahl, knapp gefolgt von Variante 1 mit 4,5 Punkten. Variante 2 erhält eine deutlich niedrigere Punktzahl von mit 3,5 Punkten.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die **Reinigungsleistung** hinsichtlich der Spurenstoffelimination der verschiedenen Verfahren. Die Reinigungsleistung variiert für die unterschiedlichen Spurenstoffe. Zwischen den unterschiedlichen Verfahren sind jedoch keine wesentlichen Unterschiede in der Reinigungsleistung zu erkennen. Daher wurden alle 4 Varianten einheitlich mit 4 Punkten bewertet. Es ist lediglich zu erwähnen, dass die Varianten mit Aktivkohle noch weitergehend zur Entfernung von CSB beitragen. Dieser Vorteil ist bei der Ozonung nicht gegeben.

Ein in der Literatur und der Öffentlichkeit diskutiertes Kriterium sind die Entstehung und die Auswirkungen von Transformationsprodukten bei der Ozonung. Studien z.B. auf der Kläranlage Regensdorf in der Schweiz haben gezeigt, dass bei der Ozonung Transformationsprodukte entstehen, diese aber in einer anschließenden Filtration mit biologischer Aktivität weitestgehend wieder abgebaut werden. Es konnten keine negativen Auswirkungen auf das Ökosystem im Vorfluter nachgewiesen werden. Nichtsdestotrotz wurde aufgrund dieser Problematik Variante 3 bei diesem Kriterium mit 3 Punkten schlechter bewertet als die Varianten mit Aktivkohle (5 Punkte), bei denen keine Transformationsprodukte entstehen.

Tabelle 7: Bewertungsmatrix

Kriterium	Gewichtung (%)	Wertung							
		Variante 1: PAK mit Kontakt- und Absetzbecken		Variante 2: GAK in nachgeschalteten Druckkesseln		Variante 3: Ozonanlage		Variante 4: GAK im vorhandenen Filter	
		Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet	Punkte	gewichtet
Höhe der Jahrekosten	40	4,5	1,80	3,5	1,40	5	2,00	5	2,00
Reinigungsleistung Spurenstoffe	30	4	1,20	4	1,20	4	1,20	4	1,20
Transformationsprodukte	10	5	0,50	5	0,50	3	0,30	5	0,50
Planungssicherheit / Referenzen	5	5	0,25	2	0,10	5	0,25	3	0,15
Wartungsarbeiten / Betriebsaufwand	5	3	0,15	5	0,25	4	0,20	5	0,25
Redundanzen / Betriebssicherheit	5	5	0,25	5	0,25	3	0,15	4	0,20
Nachhaltigkeit / CO <sub>2</sub> -Emission	5	4	0,20	4	0,20	4	0,20	4	0,20
<b>Summe</b>	<b>100</b>	<b>30,5</b>	<b>4,35</b>	<b>28,5</b>	<b>3,90</b>	<b>28</b>	<b>4,30</b>	<b>30</b>	<b>4,50</b>

Im Bereich der **Planungssicherheit** bzw. der **Referenzen** der untersuchten Varianten im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung schneidet die Varianten 1 (PAK) und 3 (Ozonung) am besten ab. Hierzu gibt es bereits einige Referenzanlagen in Deutschland, wie z.B. die Kläranlage Mannheim (PAK) und der Kläranlage Bad Sassendorf (Ozonung). Die beiden Varianten werden mit der höchsten Punktzahl bewertet. Für die Nutzung vorhandener Filter als GAK-Filter (Variante 4) gibt es erste Betriebsergebnisse der Kläranlage Gütersloh Obere Lutter. Des Weiteren wurde der Filter der Kläranlage Düren mit granulierter Aktivkohle umgerüstet. Es liegen aber noch keine Ergebnisse vor. Daher wurde Variante 4 etwas schlechter bewertet. Für die nachgeschaltete GAK-Filter (Variante 2) gibt es bisher in Deutschland noch keine Referenzen. Es wird jedoch in Großbritannien eine Versuchsanlage mit nachgeschalteten GAK-Filtern zur Eliminierung von Hormonen und in Namibia wird eine Anlage mit einer 2-stufigen GAK-Filterstufe zur Aufbereitung von Trinkwasser aus geklärtem Abwasser betrieben. Die Aktivkohleabsorption in Druckkesseln ist bisher in der Abwasserreinigung noch nicht zur Anwendung gekommen, entspricht aber in der Trinkwasseraufbereitung dem Stand der Technik. Variante 2 wurde mit 2 Punkten am schlechtesten bewertet.

Der Aufwand für **Wartungsarbeiten / Betriebsaufwand** ist insbesondere aus betrieblicher Sicht ein weiteres wichtiges Kriterium. Der Wartungs- und Betriebsaufwand für die GAK-Varianten (Variante 2 und 4) wird als relativ gering eingeschätzt. Auch bei der Ozonanlage wird der Aufwand als gering eingeschätzt. Es besteht jedoch ein gewisser Aufwand dadurch, dass das Personal für die Handhabung von Sauerstoff speziell geschult werden muss. Deswegen wird Variante 3 mit 4 Punkten etwas schlechter bewertet. Aufgrund der aufwändigeren Dosiertechnik für die Pulveraktivkohle wird der Wartungs- und Betriebsaufwand für Variante 1 als am höchsten eingeschätzt und mit 3 Punkten bewertet.

**Betriebssicherheit / Redundanzen** sind ebenfalls ein wichtiges Kriterium. Sie wird für die Varianten 1 und 2 als am höchsten eingeschätzt. Obwohl bei Variante 1 die Spurenstoffelimination in einem 1-strassigen Verfahren erfolgt, ist aufgrund des robusten Verfahrens mit wenigen Betriebsausfällen zu rechnen. Variante 2 wird aufgrund der hohen Redundanz (6 Filter) mit der höchsten Punktzahl bewertet. Variante 4 – GAK im vorhandenen Filter wird etwas schlechter mit 4 Punkten bewertet, da nur 3 Filterzellen zur Verfügung stehen und auch in das bestehende Verfahren der Flockungsfiltration eingegriffen wird. Bei der Ozonanlage (Variante 3) steht nur 1 Ozongenerator zur Verfügung, so dass die Betriebssicherheit geringer eingeschätzt und mit 3 Punkten bewertet wird.

Die **Nachhaltigkeit (CO<sub>2</sub>-Emissionen)** der verschiedenen Verfahrenstechniken ist in letzter Zeit immer mehr in den Fokus des Interesses gerückt. Im Hinblick auf Verfahren zur Spurenstoffelimination gibt es bisher noch vergleichsweise we-

nige Erkenntnisse. Erste Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass der Primärenergieverbrauch bzw. der CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei der Aktivierung/ Reaktivierung der Aktivkohle und bei der Energiegewinnung für eine Ozonanlage in etwa gleich hoch sind. Daher werden alle 4 Varianten einheitlich mit 4 Punkten bewertet.

In **Summe** schneidet Variante 4 (GAK im vorhandenen Filter) in der Bewertung mit 4,5 Punkten am besten ab. Etwas geringer bewertet wurden die Varianten 1 (PAK mit Kontakt- und Absetzbecken) und Variante 3 (Ozonanlage) mit 4,35 bzw. 4,3 Punkten. Variante 2 (GAK in nachgeschalteten Druckkesseln) schneidet am schlechtesten ab, was insbesondere auf die hohen Kosten zurückzuführen ist.

In einer gemeinsamen Besprechung vom 24.02.2012 wurde festgehalten, dass von allen Gesprächsbeteiligten die Konzeption der Variante 4 „GAK im vorhandenen Filter“ favorisiert wird.

## 10 WEITERE WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNGEN

Nach der intensiven Diskussion der unterschiedlichen Lösungsansätze wird empfohlen weitere wissenschaftliche Fragestellungen in einem großtechnischen Versuch zu klären.

Im großtechnischen Versuch kann z.B. die Leistungsfähigkeit einer zum GAK-Filter umgerüsteten Filterzelle hinsichtlich unterschiedlicher Leitparameter bei unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten untersucht werden. Des Weiteren kann ein großtechnischer Versuch Aufschlüsse über die Standzeit der Kohle bzw. die durchgesetzten Bettvolumina bis zum Durchbruch geben. Der Untersuchungsumfang wird im Rahmen eines Fördermittelantrages weiter definiert.

Es wird weiterhin empfohlen die Sanierung einer Filterzelle gemäß des in dieser Vorplanung erarbeiteten Sanierungskonzeptes in den großtechnischen Versuch mit aufzunehmen. Bei Umrüstung von 3 Filterzellen zu GAK-Filtern wird die Filtergeschwindigkeit in den restlichen 5 Flockungfiltern auf bis zu 17 m/h unter Berücksichtigung eines sich in Spülung befindlichen Filters erhöht. Dies liegt über den Empfehlungen der ATV, die eine maximale Filtergeschwindigkeit von 15 m/h bei Regenwetter und einer Filterzelle in Spülung vorsieht. Der großtechnische Versuch soll Aufschluss darüber geben, ob die Filter nach den umfangreichen Sanierungsmaßnahmen mit solch einer Filtergeschwindigkeit betrieben werden können bzw. welche Auswirkungen die hohe Filtergeschwindigkeit auf die Ablaufwerte und den Filterbetrieb hat.

## 11 ZUSAMMENFASSUNG

Die Stadtwerke Bad Oeynhausen betreiben die Kläranlage Bad Oeynhausen mit einer Ausbaugröße von 80.000 EW. Anlässlich einer notwendigen Filtersanierung und der aktuellen Diskussionen über die Auswirkungen von Spurenstoffen auf die Gewässerökologie und die Möglichkeiten der Elimination dieser Spurenstoffe auf kommunalen Kläranlagen, haben die Stadtwerke Bad Oeynhausen die Hydro-Ingenieure GmbH beauftragt im Rahmen einer Vorplanung die Möglichkeiten des Baus Anlage zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Bad Oeynhausen zu untersuchen sowie ein Konzept für die Filtersanierung zu erarbeiten.

Es wurden die folgenden Verfahrensmöglichkeiten zur Spurenstoffelimination in die Vorplanung einbezogen:

- Variante 1 – PAK mit Kontakt- und Absetzbecken
- Variante 2 – GAK in nachgeschalteten Druckkesseln
- Variante 3 – Ozonanlage
- Variante 4 – GAK im vorhandenen Filter

Die unterschiedlichen Verfahrensvarianten wurden hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit untersucht, die Jahreskosten geschätzt und eine Bewertung anhand ausgewählter Kriterien vorgenommen.

Die Varianten liegen sowohl was die Kosten betrifft als auch nach Bewertung anhand von nicht-monetären Kriterien sehr nah beieinander. Variante 4 (GAK im vorhandenen Filter) schneidet bei der Bewertung am besten ab und liegt bei den Jahreskosten mit ca. 330.000 €/a (brutto) in der gleichen Größenordnung wie die Varianten 1 und 3. Lediglich die Variante 2 (GAK in nachgeschalteten Druckkesseln) scheidet aufgrund sehr hoher Kosten aus.

Es wird an dieser Stelle empfohlen das Lösungskonzept der Variante 4 (GAK im vorhandenen Filter) in einem großtechnischen Versuch, bei dem 1 Filterzelle zum GAK-Filter umgerüstet wird, weiter zu untersuchen.

Für die Filtersanierung wurde ein umfangreiches Konzept entwickelt. Aufgrund des ungünstigen Filteraufbaus wird der Austausch des gesamten Filtermaterials und der Filterdüsen empfohlen. Weitere Maßnahmen sind der Austausch der Zulaufpumpen und Ablaufklappen, Sanierung der Düsenböden von 5 Filterzellen, eine Anpassung des Spülprogramms einschließlich Austausch der Spülluftgeblä-

se etc. Optional wird auch die Erhöhung der Anzahl der Filterdüsen empfohlen, um die Filter besser bei hohen Filtergeschwindigkeiten betreiben zu können.

Da bei Umrüstung von 3 Filterzellen zu GAK-Filtern nur noch 5 Filterzellen für die Flockungsfiltration zur Verfügung stehen und sich die Filtergeschwindigkeiten in diesen 5 Zellen auf bis zu 17 m/h erhöhen, wird empfohlen auch die Filtersanierung in den großtechnischen Versuch mit aufzunehmen. Anhand eines sanierten Filters kann überprüft werden, welche Auswirkungen die hohe Filtergeschwindigkeit auf die Ablaufwerte und den Filterbetrieb hat.