

KA Schloß Holte-Stukenbrock



Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

1. Ausfertigung
September 2015

PFI Planungsgemeinschaft GbR

Dr.-Ing. Reiner Boll
Dr.-Ing. Richard Rohlfing
Prof. Dr.-Ing. Johannes Müller-Schaper

Alte Bahnhofstr. 56
44892 Bochum

Tel.: 0234 / 9 20 03 -0
Fax: 0234 / 9 20 03 -45

info@pfi.de
www.pfi.de

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Veranlassung und Auftrag.....	1
2.	Stand der Technik	3
2.1	Technische Verfahrensvarianten	3
2.1.1	Einsatz von Pulveraktivkohle	3
2.1.2	Einsatz von granulierter Aktivkohle	9
2.1.3	Einsatz von Ozon.....	15
2.1.4	Sonstige Verfahrensvarianten	22
2.2	Wesentliche Stoffeigenschaften.....	24
2.3	Alleinstellungsmerkmale der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	27
3.	Grundlagenermittlung	29
3.1	Kurzbeschreibung der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	29
3.2	Klärwerksbelastung	33
3.3	Spurenstoffbelastung.....	37
3.3.1	Abwasseranteil im Vorfluter	38
3.3.2	Spurenstoffbelastung im Kläranlagenablauf	39
3.3.3	Spurenstoffbelastung im Vorfluter unterhalb und oberhalb der KA	46
4.	Variantenuntersuchung für die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	49
4.1	Variante 1: Pulveraktivkohledosierung nach der Nachklärung	49
4.1.1	Dimensionierung	50
4.1.2	Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	51
4.1.3	Kostenaufstellung	53
4.2	Variante 2: Pulveraktivkohledosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration	58
4.2.1	Dimensionierung.....	59

4.2.2	Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	59
4.2.3	Kostenaufstellung	61
4.3	Variante 3: Pulveraktivkohledosierung in die Belebungsbecken.....	65
4.3.1	Dimensionierung.....	66
4.3.2	Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	66
4.3.3	Kostenaufstellung	68
4.4	Variante 4: Filtration mit granulierter Aktivkohle	73
4.4.1	Dimensionierung.....	74
4.4.2	Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	74
4.4.3	Kostenaufstellung	76
4.5	Variante 5: Ozondosierung nach der Nachklärung	81
4.5.1	Dimensionierung.....	81
4.5.2	Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock.....	82
4.5.3	Kostenaufstellung	84
5.	Variantenvergleich	97
5.1	Bewertungskriterien.....	97
5.2	Vergleich der Verfahrensvarianten und Vorzugsvariante.....	98
5.3	Sensitivitätsanalysen	104
5.3.1	Betriebsmittelverbrauch	105
5.3.2	Betriebsmittelpreise	106
5.3.3	Strompreis	107
5.3.4	Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen	108
6.	Zusammenfassung.....	110
7.	Literatur	113

ANHANG

Anhang 1 Bewertungsmatrix

1. Veranlassung und Auftrag

Die Stadt Schloß Holte-Stukenbrock betreibt die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock mit einer Ausbaugröße von 60.000 EW. Die Kläranlage wurde 1979 errichtet und bis 1992 umfangreich erweitert. Zur Abwasserreinigung stehen eine mechanische und eine biologische Reinigungsstufe zur Verfügung.

Seit einigen Jahren werden die Auswirkungen von Mikroschadstoffen, wie beispielsweise Arzneimittelrückständen, in den Gewässern intensiv untersucht. Bei diesen Mikroverunreinigungen, die auch Spurenstoffe genannt werden, handelt es sich um Stoffe, die in sehr geringen Konzentrationen im Bereich von wenigen µg/l bis zu ng/l in den Gewässern vorliegen. Da Kläranlagen einen Haupteintragspfad für eine Reihe von Spurenstoffen darstellen können, rückt eine weitergehende Abwasserbehandlung immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit. Von staatlicher Seite resultiert dies derzeit noch in einer ausdrücklichen Empfehlung zum Ausbau kommunaler Kläranlagen zur Spurenstoffelimination. Zukünftig wird der Ausbau von Kläranlagen zur Spurenstoffelimination auch im Rahmen der Neuerteilung und Anpassung von Erlaubnissen zur Einleitung von Stoffen in das Gewässer geregelt werden [1]. Als Rechtsgrundlage wird auf den seit Dezember 2015 behördenverbindlich geltenden Bewirtschaftungsplan NRW 2016-2021 in Kombination mit dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und dem Landeswassergesetz (LWG) verwiesen. Der freiwillige Bau einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination wird voraussichtlich bis Ende 2016 in NRW durch öffentliche Mittel gefördert.

Daher wurde die PFI Planungsgemeinschaft am 17.03.2015 mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock beauftragt. In der Studie sollen verschiedene Verfahrensvarianten zur weitergehenden Behandlung des kommunalen Abwassers gegenübergestellt und eine Vorzugsvariante herausgearbeitet werden. Dazu werden Varianten zur Aktivkohle- und Ozonbehandlungen untersucht und hinsichtlich einer Reihe von Bewertungskriterien miteinander verglichen. Neben rein monetären Gesichtspunkten spielen beim Variantenvergleich z.B. auch ökologische Aspekte und die Arbeitssicherheit eine Rolle. Die derzeitige Situation des Klärwerks sowie die baulichen Gegebenheiten vor Ort werden bei der Entwicklung der Verfahrensvarianten und deren Beurteilung zusätzlich berücksichtigt.

Zur Schaffung einer einheitlichen Wissensbasis wird zu Beginn der Studie der derzeitige Stand des Wissens zusammengefasst. Dabei wird vor allem auf die unterschiedlichen Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination und die wesentlichen Stoffeigenschaften der Mikroverunreinigungen eingegangen.

Die Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wird hiermit vorgelegt.

2. Stand der Technik

Organische Spurenstoffe werden auf unterschiedliche Wege in die Gewässer eingetragen. Einen wesentlichen Eintragspfad stellt der Ablauf einer Kläranlage dar. Zur Minimierung der Spurenstoffbelastung im Gewässer werden seit einigen Jahren verschiedene Technologien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) großtechnisch getestet. [2]

2.1 Technische Verfahrensvarianten

2.1.1 Einsatz von Pulveraktivkohle

Durch den Einsatz von Aktivkohle in pulverisierter Form kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen adsorptiv aus dem Abwasser entfernt werden. Neben der in der Trinkwasseraufbereitung bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzten Filtration mit granulierter Aktivkohle (GAK) ist in der Abwasserbehandlung zur Spurenstoffelimination auch die Verwendung von Pulveraktivkohle (PAK) von Bedeutung. [3]

Die Dosierung von PAK in einer kommunalen Kläranlage erfolgt entweder direkt in die biologische Stufe oder danach in das biologisch gereinigte Abwasser. Bei der Dosierung in die Biologie ist mit einem erhöhten PAK-Einsatz zu rechnen, da die organische Hintergrundbelastung, und somit die Konkurrenz der Spurenstoffe um die Sorptionsplätze der Aktivkohle, relativ hoch ist. Dennoch kann diese Verfahrensweise für kleine Anlagen interessant sein. Die Dosierung nach der biologischen Stufe stellt eine reduzierte organische Hintergrundbelastung und dadurch einen möglichst effizienten Einsatz der PAK sicher. Zur Abscheidung der PAK aus dem Abwasser stehen verschiedene Techniken zur Verfügung. Jedoch sollte eine Filtration des mit PAK versetzten Volumenstroms unabhängig von der vorhergehenden Abscheideeinheit unbedingt erfolgen, um die feindispersen PAK-Anteile aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [3][4]

Die verfahrenstechnische Einbindung der PAK-Dosierung auf bestehenden Anlagen kann je nach vorhandener Bausubstanz und Verfahrenstechnik unterschiedlich geschehen. In jedem Fall ist ein Kontaktraum erforderlich, der die Adsorption der Spurenstoffe an die Pulveraktivkohle ermöglicht. Dies kann in einem separaten Kontaktbecken oder im Überstand einer evtl. vorhandenen Flockungsfiltration

geschehen. Bei Dosierung von PAK in ein separates Kontaktbecken kann im Ablauf des Kontaktbeckens eine Sedimentationseinheit angeordnet werden, bevor das gereinigte Abwasser filtriert wird. Die abgesetzte PAK wird dann in den Kontaktreaktor zurückgeführt und die Aufenthaltszeit der PAK dadurch erhöht. Die Überschuss-PAK (ÜPAK) wird in die Biologie gegeben um die noch freien Kapazitäten der PAK im Belebungsbecken zu nutzen und die PAK anschließend in der Nachklärung abzuscheiden. Alternativ kann auf die Sedimentationseinheit verzichtet und die PAK direkt im Flockungsfilter abgeschieden werden. Dies führt zu einer geringeren Aufenthaltszeit der PAK im System. Anstelle eines separaten Kontaktbeckens kann die PAK auch in den Zulauf zur Flockungsfiltration dosiert werden. Dadurch verkürzt sich die Kontaktzeit von PAK und Abwasser weiter. Das Rückspülwasser der Filtereinheit wird bei allen verfahrenstechnischen Varianten in den Zulauf zur Vorklärung oder zur Belebung gegeben und anschließend mit dem Primärschlamm (PS) oder Überschussschlamm (ÜS) abgeschieden. Eine Zugabe von Fällmittel und gegebenenfalls Flockungshilfsmittel ist zur vollständigen Abscheidung der PAK erforderlich. Bei einer vorherigen Simultanfällung zur Phosphorelimination ist eine entsprechende Reduzierung der Fällmittelmenge möglich. [4]

Die möglichen Verfahrensvarianten zur Umsetzung einer PAK-Dosierung auf kommunalen Kläranlagen sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

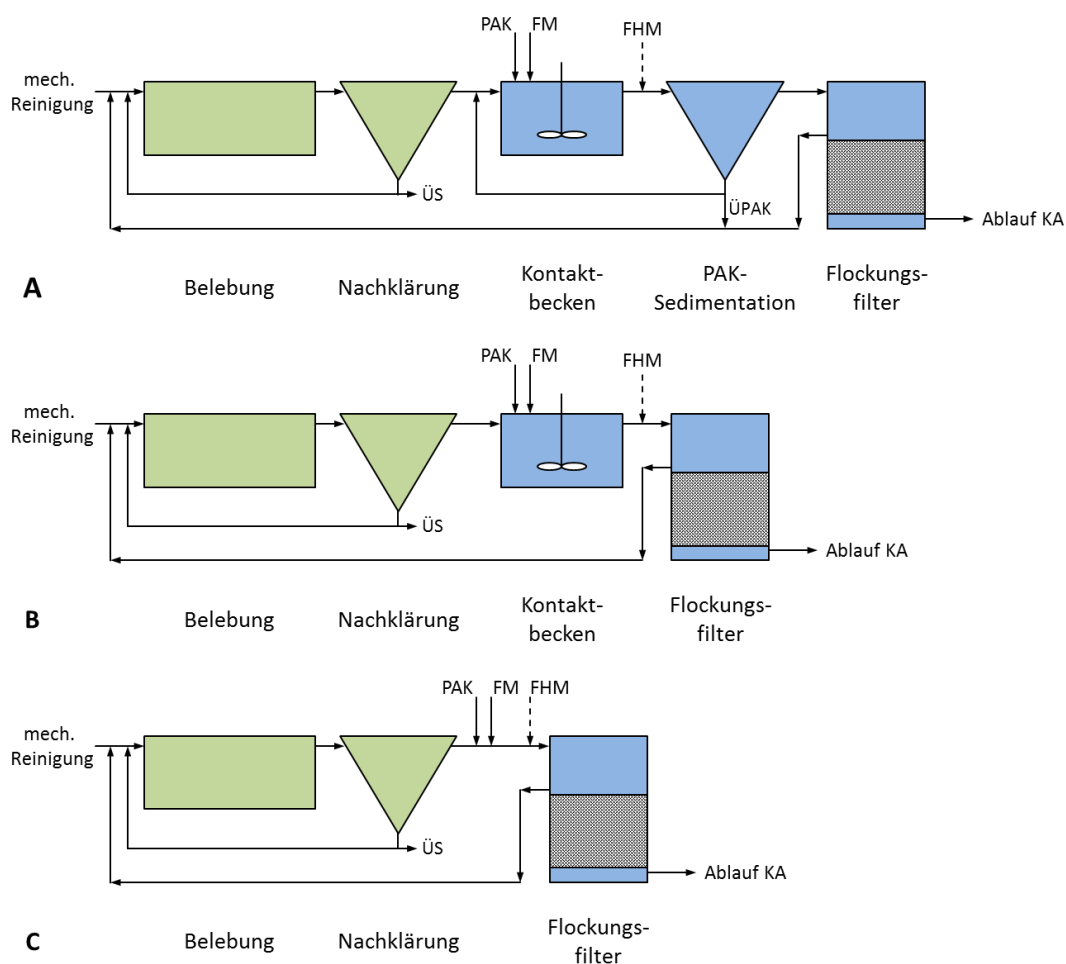


Abbildung 1: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer PAK-Anlage (Kontaktbecken nach der Nachklärung A mit Sedimentationseinheit, B ohne Sedimentationseinheit und C PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration)

Eine Verfahrensstufe zur Pulveraktivkohledosierung besteht im Wesentlichen aus einem PAK-Silo, einer Dosiervorrichtung für die PAK, einem Kontaktbecken, einer Stufe zum Rückhalt der PAK und der erforderlichen Mess-, Steuer-, Regelungs- und Sicherheitstechnik. [4]

Die Lagerung der angelieferten PAK erfolgt in einem Silo. Dieses muss verhältnismäßig groß dimensioniert sein, um die Expansion der PAK bei der Befüllung zu berücksichtigen. Generell besteht beim Befüllen des Silos oder der Lagerung der PAK die Gefahr von Staubexplosionen. Für den direkten Umgang mit PAK wird außerdem ein Atemschutz empfohlen. Um die gelagerte Aktivkohle aufzulockern und Verblockungen im unteren Silobereich zu vermeiden, muss über entspre-

chende Vorrichtungen regelmäßig Stickstoff in das PAK-Silo eingeblasen oder dieses gerüttelt werden. Im PAK-Silo ist eine Temperaturmessung zu installieren, um Glimmbrände im Silo zu erkennen. Außerhalb des PAK-Silos ist aus Gründen des Arbeitsschutzes eine O₂- und CO-Messung erforderlich. Direkt unterhalb des Silos wird die Dosieranlage installiert, von wo aus die vorbereitete Aktivkohle in den Zulauf zum Kontaktbecken oder zur Flockungsfiltration gefördert wird. Die Dosierstation muss in Ex-Schutz-Ausführung installiert werden. [3][4]

Die PAK-Dosierung wird volumenproportional zum Zulauf ins Kontaktbecken vorgeschlagen. Als Dosiervorrichtung wird eine gravimetrische Dosierung empfohlen, da diese ausreichend genau ist, um sowohl Über- als auch Unterdosierungen zu vermeiden [4]. Die PAK wird nach dem Abwiegen mittels Wasserstrahlpumpe in einen Wasserstrahl eingemischt und ins Abwasser dosiert. Die Steuerung der dosierten PAK-Menge kann entweder schrittweise anhand der aktuellen, meist stark schwankenden Zulaufmengen oder anhand eines durchschnittlichen Tagesganges erfolgen. [3]

Die Auslegung des Kontaktbeckens für eine PAK-Anlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [4]. In der Schweiz haben sich 20 Minuten für den Kontakt zwischen Aktivkohle und Abwasser als ausreichend erwiesen, wenn ein minimales Schlammalter gewährleistet wird. Dieses liegt bei der Dosierung in die Flockungsfiltration bei ca. 12 Stunden und bei Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in das Kontaktbecken bei 1 bis 2 Tagen [3]. Die „Anleitung zur Auslegung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW schlägt eine minimale hydraulische Aufenthaltszeit im Kontaktbecken von 30 Minuten vor. Im Falle einer Dosierung der PAK in den Zulauf zur Flockungsfiltration kann die minimale Kontaktzeit gegebenenfalls herabgesetzt werden. [4]

Wenn eine Sedimentationseinheit vorgesehen wird, wird für die Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in den Kontaktreaktor ein Rückführverhältnis von 0,5 bis 1,0 vorgeschlagen. Dadurch erhöht sich die Aufenthaltszeit der PAK im System und ihre Adsorptionskapazität wird weitgehender ausgenutzt. Durch die Rückführung der Überschuss-PAK in die Belebung und den anschließenden gemeinsamen Abzug mit dem Überschussschlamm (ÜS) wird die PAK mit dem Belebtschlamm vermischt. Eine gemeinsame Schlammbehandlung ist nach heutigen Erkenntnissen möglich, da keine Desorption der Spurenstoffe von der PAK beo-

bachtet wurde. PAK-haltiger Faulschlamm darf jedoch nicht landwirtschaftlich verwertet werden, da so die adsorbierten Mikroverunreinigungen wieder in die Umwelt gelangen würden. Daher ist eine Schlammverbrennung erforderlich. Hier kann die PAK durch ihren hohen Heizwert positiv zu einer möglichen Energie-rückgewinnung (Wärme oder evtl. Strom) beitragen. Insgesamt erhöht sich die Schlammmenge durch die ÜPAK um etwa 5 bis 10 %, was zu erhöhten Kosten bei der Schlamm Entsorgung führt. [3][4]

Die Dosiermenge der PAK hängt unter anderem von der Kohleart, dem Dosierort und einer ggf. vorgesehenen Rezirkulation der PAK ab. Üblicherweise liegt die dosierte Aktivkohlemenge bei 10 bis 20 mgPAK/l Abwasser. [4]

Für den Einsatz von PAK auf bestehenden kommunalen Kläranlagen sind die abrasiven und korrosiven Eigenschaften der Aktivkohle zu berücksichtigen. Alle mit der Aktivkohle in Kontakt stehenden Anlagenkomponenten müssen aus entsprechend beständigem Material gefertigt oder entsprechend beschichtet werden. Bestehende Anlagenteile können entweder durch spezielle Beschichtungen verstärkt oder durch beständige Materialien wie V4A-Edelstahl, HDPE oder Beton ersetzt werden. [3]

Für einen effizienten Einsatz der PAK zur Spurenstoffelimination ist eine weitgehende Vorreinigung des zu behandelnden Abwassers erforderlich. Je größer die organische Hintergrundbelastung im Zulauf zur PAK-Anlage ist, desto mehr PAK ist erforderlich, um die gleiche Spurenstoffelimination zu erzielen. Daher sind eine weitgehende biologische Reinigung und eine zuverlässig funktionierende Nachklärung die Grundvoraussetzung für den effizienten Betrieb einer PAK-Anlage. [4]

Vorteile des PAK-Einsatzes

Ein Vorteil des Einsatzes von PAK zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass durch PAK ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen sowie deren Effekte effizient aus dem Abwasser entfernt werden können. Dies führt zu einer signifikanten Verbesserung der Qualität des gereinigten Abwassers, was wiederum besonders bei Gewässern mit einem hohen Abwasseranteil zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengewässerqualität führen kann. [3]

In der Regel ist ein Verfahren zur Spurenstoffelimination mit PAK gut in eine bestehende Kläranlage zu integrieren. Es fallen keine problematischen Produkte oder Abfälle an, deren Entsorgungsweg ungeklärt wäre, und die eliminierten Spu-

renstoffe werden nicht nur inaktiviert bzw. transformiert, sondern durch Sorption gebunden und dadurch vollständig entfernt. Neben der effektiven Entfernung von Spurenstoffen aus dem Abwasser wird auch der DOC reduziert, das Abwasser wird entfärbt und verlässt die Kläranlage praktisch geruchslos. [3]

Nachteile des PAK-Einsatzes

Nachteilig wirkt sich der um ca. 5 % erhöhte Energiebedarf der Kläranlage aus. Darüber hinaus ist der Primärenergiebedarf zur Herstellung der PAK sehr hoch. Des Weiteren erhöht sich der Schlammfall einer Kläranlage durch den Einsatz von PAK um rd. 5 bis 10 %, was wiederum die Kosten für die Schlamm Entsorgung erhöht. Hier ist zusätzlich zu beachten, dass PAK-haltiger Schlamm nicht landwirtschaftlich verwertet werden darf, da dadurch die adsorbierten Spurenstoffe nicht aus der Umwelt entfernt werden. Außerdem wirkt PAK abrasiv und korrosiv, was im Falle einer Rückführung des mit PAK versetzten Abwassers in bestehende Anlagenteile zu einem rascheren Verschleiß führen kann. [3]

In Tabelle 1 sind die Vor- und Nachteile des PAK-Einsatzes auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Vor- und Nachteile einer PAK-Anlage

Vorteile		Nachteile	
+	eliminiert ein breites Spektrum von Spurenstoffen	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um etwa 5 %
+	gut in bestehende Anlagen integrierbar	-	hoher Primärenergiebedarf zur PAK-Produktion (CO ₂ -Bilanz rd. 3.400 t CO ₂ /a)
+	Sorption und dadurch vollständige Entfernung, statt Inaktivierung oder Transformation	-	rascher Verschleiß der Anlagenteile möglich durch abrasive und korrosive Eigenschaften der PAK
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle	-	erhöhter Schlammfall um rd. 5-10 %
+	Entfernung von Farbstoffen und Geruch	-	erhöhte Kosten für die Schlamm Entsorgung durch mehr Schlamm
		-	landwirtschaftliche Verwertung des Schlammes nicht möglich

Pilot- und Versuchsanlagen mit PAK-Verfahren im In- und Ausland

Für den Einsatz von PAK auf kommunalen ARA liegen aus Baden-Württemberg

bereits mehr als 20 Jahre Betriebserfahrungen vor. Auf drei Kläranlagen in Albstadt-Ebingen, Albstadt-Lautlingen und Hechingen werden seit 1992 und 1999 großtechnische PAK-Anlagen zur Entfärbung von maximal 225 l/s bis 980 l/s Abwasser betrieben. Darüber hinaus wird seit Juli 2010 in Mannheim ein Volumenstrom von 300 l/s im Teilstromverfahren mit PAK zur Spurenstoffelimination behandelt. Diese Anlage soll bis September 2015 um das Fünffache auf 1.500 l/s erweitert werden. Auf den Kläranlagen in Kressbronn, Stockacher Aach und Sindelfingen werden seit der 2. Jahreshälfte 2011 ebenfalls PAK-Anlagen für 250 l/s bzw. 1.000 l/s betrieben und im Oktober 2013 wurde auf der Kläranlage Langwiese in Ravensburg die derzeit größte PAK-Anlage in Deutschland für 1.100 l/s in Betrieb genommen. [5]

In der Schweiz wurden seit Januar 2008 bis Juni 2010 Versuche zur PAK-Dosierung im halbtechnischen Maßstab gefahren. In der Pilotanlage der Eawag wurden in drei Versuchsphasen die maßgeblichen Einflussfaktoren zur PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken mit nachgeschaltetem Tuchfilter zur Abtrennung der PAK untersucht. Im Herbst 2008 und Sommer 2010 wurde auf der Schweizer Kläranlage Kloten/Opfikon über vier bzw. neun Wochen die PAK-Dosierung in den Zulauf zu einer bestehenden Flockungsfiltration getestet. Auf der Kläranlage Vidy in Lausanne wurde im Jahr 2009 für ein Jahr eine PAK-Stufe mit Dosierung in ein Kontaktbecken und Abscheidung der PAK durch Ultrafiltration betrieben. Von März 2011 bis November 2012 wurden auf der ARA Birsfelden Versuche zur PAK-Dosierung mit anschließender Abtrennung mittels Ultrafiltration gefahren. Seit März 2012 läuft auf der Kläranlage Flos in Wetzikon ein weiteres Projekt, dass die Dosierung von PAK direkt in ein Belebungsbecken untersucht. [6][7]

In Nordrhein-Westfalen wurde im Februar 2011 die erste PAK-Anlage auf dem Klärwerk Buchenhofen in Betrieb genommen und seit dem zu Forschungszwecken betrieben. Die PAK wird dabei in den Zulauf einer von insgesamt 28 Filterkammern dosiert und direkt im Filterbett abgeschieden. Über das Jahr 2013 wurde auf einer halbtechnischen Versuchsanlage auf dem Klärwerk Düsseldorf Süd die PAK-Dosierung in die biologische Stufe erfolgreich untersucht. [8]

2.1.2 Einsatz von granulierter Aktivkohle

Durch den Einsatz von Aktivkohle in granulierter Form kann, ebenso wie durch den PAK-Einsatz, eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen adsorptiv aus dem Abwasser entfernt werden. In der Trinkwasseraufbereitung werden per-

sistente Stoffe bereits seit Jahrzehnten erfolgreich durch GAK-Filtration entfernt. Auch in der Abwasserbehandlung sind GAK-Filter zur Spurenstoffelimination denkbar. [3]

GAK-Filter werden der biologischen Reinigungsstufe nachgeschaltet. Sie können verfahrenstechnisch an die Stelle einer Flockungsfiltration treten und gewährleisten dadurch nicht nur eine Spurenstoffelimination, sondern auch einen Suspensarückhalt. Alternativ kann ein GAK-Filter einer Filtrationsstufe nachgeschaltet werden. Dadurch wäre der Feststoffanteil im Zulauf zum GAK-Filter nahezu Null und die Konkurrenz der organischen Hintergrundmatrix um die Adsorptionskapazität der Aktivkohle wäre minimiert. [4]

Abbildung 2 stellt die Einbindungsmöglichkeiten eines GAK-Filters auf einer kommunalen Kläranlage schematisch dar.

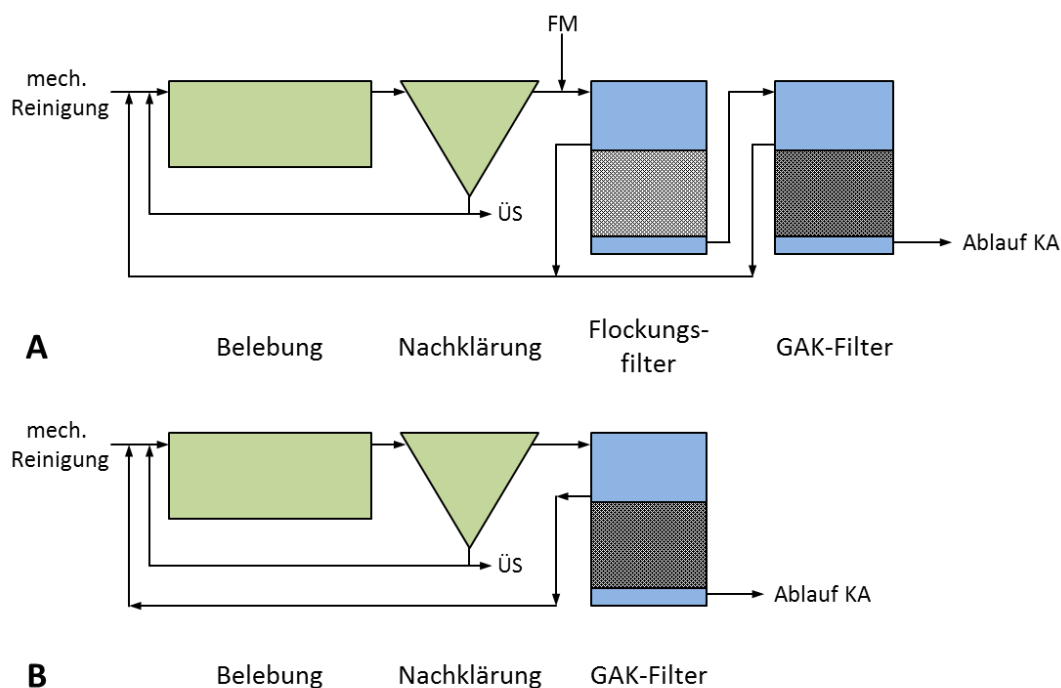


Abbildung 2: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer GAK-Filtration (A mit Vorfiltration und B direkt im Ablauf der Nachklärung)

Eine GAK-Filtration besteht im Wesentlichen aus den parallel betriebenen GAK-Filtereinheiten sowie dem üblicherweise erforderlichen Hebewerk im Zulauf zur

Filtration. Wenn eine Filtration dem GAK-Filter vorgeschaltet ist, macht dies gegebenenfalls eine erneute Hebung des Abwassers erforderlich. [4]

Ist eine Flockungsfiltration bereits vorhanden, so ist die Umrüstung einzelner Filterkammern zu GAK-Filtern i.d.R. ohne baulichen Aufwand möglich. Das vorhandene Filtermaterial wird ausgebaut und granuliert Aktivkohle eingebaut. Je nach Aktivkohleart ist der Rückspülvorgang anzupassen, um ein ausschwemmen der GAK zu verhindern. Da das Filtermaterial regelmäßig ausgetauscht werden muss, sollten die Filterkammern zugänglich sein. Der Austausch des Filtermaterials dauert je nach Größe der Filterkammer zwischen wenigen Stunden bei kleinen Filtern und 4 bis 6 Stunden bei Größeren. [3]

Die beladene, ausgebaute GAK kann mit geringen Verlusten von rd. 10 bis 15 % reaktiviert und anschließend wieder eingebaut werden. Die Reaktivierungsverluste müssen mit frischer GAK aufgefüllt werden [4]. Die Reaktivierung von GAK ist deutlich weniger energieaufwendig als die Herstellung frischer Aktivkohle. Jedoch liegen weder für die Herstellung noch für die Regeneration von Aktivkohle gesicherte Werte für den Energieverbrauch vor. Daher ist die Aufstellung der gesamten Energiebilanz für Aktivkohle mit Unsicherheiten verbunden. [3]

Der Mehraufwand für die Steuerung bzw. Regelung einer GAK-Filtration im Vergleich zu einer Flockungsfiltration ist sehr gering. Lediglich die Überwachung der Eliminationsleistung erfordert zusätzliche Messtechnik, für die jedoch noch keine geeigneten Parameter oder Messverfahren gefunden wurden. Zur Ermittlung des Austauschintervalls sind daher derzeit noch Probenahmen zur Spurenstoffanalyse im Labor erforderlich. [3]

Eine GAK-Filtration wird auf eine Leerbettkontaktzeit von 5 bis 30 Minuten und eine Filtergeschwindigkeit von 5 bis 15 m/h bemessen. Die Wirtschaftlichkeit von GAK-Filtern hängt wesentlich von der behandelten Wassermenge vor dem Austausch des Filtermaterials ab. Ausgedrückt wird dies in erzielbaren bzw. durchgesetzten Bettvolumina (BV). Die Erfahrungen aus Pilotversuchen belegen, dass mit einer passend gewählten Aktivkohle im Minimum zwischen 3.000 und 7.500 BV behandelt werden können. Das stoffspezifische Maximum liegt zwischen 15.000 und 30.000 BV. [3][4]

Um derart hohe durchgesetzte Bettvolumina erreichen zu können, ist eine zuverlässig und gut funktionierende Nachklärung zwingend erforderlich. Auch die erfor-

derliche Häufigkeit der Filterspülung hängt von der Funktion der Nachklärbecken ab. Je mehr AFS und damit auch CSB also aus der Nachklärung abtreibt, desto häufiger muss der GAK-Filter gespült und das Filterbett ausgetauscht werden. Entsprechend steigen auch die Betriebskosten.

Vorteile des GAK-Einsatzes

Die Vorteile von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination auf kommunalen ARA sind weitgehend identisch mit den Vorteilen der PAK-Anwendungen, die auf den Eigenschaften der Aktivkohle beruhen. Im Gegensatz zu PAK kann GAK jedoch mit leichten Verlusten regeneriert werden. Für die Regeneration wird deutlich weniger Energie benötigt, als für die Herstellung frischer Aktivkohle. Dadurch sinken auch die Betriebskosten beim Einsatz von regenerierter GAK. [3]

Die Energiekosten für den Einsatz von GAK-Filtern liegen etwa auf dem Niveau einer herkömmlichen Sandfiltration. Bei bereits vorhandenen Filtrationsanlagen sind sowohl der bauliche Aufwand zur Umrüstung auf GAK-Filter wie auch der Mehr-Energieverbrauch sehr gering. [3]

Nachteile des GAK-Einsatzes

Ein Nachteil beim Einsatz von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass der tatsächliche Energiebedarf zur Herstellung und Regenerierung der GAK mangels belastbarer Literaturwerte nicht sicher abgeschätzt werden kann. Auch die durchsetzbaren Bettvolumina und damit die Standzeit eines GAK-Filters konnte aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsanlagen noch nicht allgemeingültig übertragbar festgestellt werden. [3]

In Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile des Einsatzes von GAK-Filtern auf kommunalen Kläranlagen gegenübergestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Vor- und Nachteile von GAK-Filtern

Vorteile		Nachteile	
+	eliminiert ein breites Spektrum von Spurenstoffen	-	Energiebedarf für Herstellung und Regenerierung relativ unsicher
+	gut in bestehende Anlagen integrierbar	-	durchsetzbare Bettvolumina unsicher
+	Sorption und dadurch vollständige Entfernung, statt Inaktivierung oder Transformation		
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle		
+	Entfernung von Farbstoffen und Geruch		
+	nach Regeneration mit leichten Verlusten wiederverwendbar		
+	bei bestehender Filtration baulicher Aufwand und Mehr-Energieverbrauch sehr gering		

Pilot- und Versuchsanlagen mit GAK-Verfahren im In- und Ausland

Halb- und großtechnische Untersuchungen zum Einsatz von GAK zur Spurenstoffelimination in der Abwasserbehandlung wurden vielfach in Deutschland durchgeführt. [6]

Seit Januar 2011 wird auf dem Klärwerk Obere Lutter der Trockenwetterzufluss von 1.125 m³/h in drei umgerüsteten Kammern der vorhandenen Flockungsfiltration mit GAK behandelt. Mit einem mittleren CSB-Zulauf zur GAK-Filtration von rd. 48 mg/l konnte bei einer Filtergeschwindigkeit von 2 bis 8 m/h und einer Leerbettkontaktzeit von 75 bis 19 Minuten eine Standzeit des Filterbettes von rd. 9 Monaten erreicht werden. Dies entspricht fast 25.000 durchgesetzten Bettvolumina. [8][9]

Im Juni 2011 wurde ein GAK-Filter auf der Kläranlage Düren-Merken in Betrieb genommen. In drei Betriebsphasen wurden drei unterschiedliche Kohlearten bei einer Filtergeschwindigkeit von ca. 7 m/h und einer Leerbettkontaktzeit von rd. 11 bis 14 Minuten miteinander verglichen. Aufgrund des hohen Feststoffanteils von im Mittel rd. 20 bis 30 mgAFS/l im Zulauf zur Filtration konnten nur etwa

4.000 bis 7.000 Bettvolumina umgesetzt werden, bevor das GAK-Filterbett ausgetauscht werden musste. [8]

Auf der Zentralkläranlage Rietberg wurden ab Oktober 2012 bis April 2013 halbertechnische Versuche zum Betrieb einer GAK-Filtration mittels Dyna-Sand-Anlage durchgeführt. In drei Abschnitten wurden zunächst das hydraulische Verhalten der Filter und anschließend zwei unterschiedliche Aktivkohleprodukte auf ihre Eignung zur Spurenstoffelimination geprüft. Die CSB-Konzentration im Zulauf zu den Filtern betrug während der Versuche rd. 38 mg/l. Bei Filtergeschwindigkeiten von 3 bis 6 m/h und Leerbettkontaktzeiten von 0,6 bis 1,2 Stunden wurden während der Versuchsphasen 2 und 3 etwa 2.780 und 1.440 Bettvolumina behandelt. [8]

Im Januar 2013 wurden auf dem Klärwerk Gütersloh-Putzhagen zwei auf GAK umgerüstete Zellen einer BIOFOR-Filteranlage in Betrieb genommen. Bei einem mittleren CSB-Zulauf von rd. 37 mg/l, einer Filtergeschwindigkeit von 2 bis 10 m/h und einer Aufenthaltszeit von 11 bis 56 Minuten wurden die Filter zweimal pro Woche gespült. Es konnten 4.500 Bettvolumina durchgesetzt werden, bevor keine CSB-Elimination mehr stattfand. Insgesamt wurden 7.000 BV durchgesetzt. [8][10]

Darüber hinaus wurden im ersten Quartal 2013 auf dem Klärwerk Buchenhofen zwei GAK-Filterzellen in Betrieb genommen. Eine der beiden Filterzellen wird parallel zu den übrigen Flockungsfiltrationskammern betrieben, die zweite wird als nachgeschaltete Filtration anteilmäßig mit dem Ablauf der Flockungsfiltration beschickt. Die Standzeit der beiden Filterzellen betrug Ende 2014 bereits über ein Jahr, ohne dass die Spurenstoffelimination relevant nachgelassen hatte. Das Versuchsprojekt dauert derzeit noch an, sodass noch kein Abschlussbericht vorliegt. [11]

Neben den bereits umgesetzten Projekten zur Spurenstoffelimination mittels GAK-Filtration sind für eine Reihe von Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen bereits Machbarkeitsstudien durchgeführt worden. Für die Kläranlagen Dülken und Bad Oeynhausen beispielsweise wurde die GAK-Filtration als Vorzugsvariante herausgearbeitet, deren Umsetzung sich derzeit in der Planungsphase befindet. [8]

Neben den Versuchsanlagen in NRW wird seit Anfang 2012 in Baden-Württemberg der GAK-Einsatz speziell für kleine Kläranlagen erforscht. Im Rahmen eines Pilotprojektes wurde auf der Kläranlage Emmingen-Liptingen einer von drei vorhandenen Dyna-Sand-Filtern zur GAK-Filtration von maximal 20 l/s ent-

sprechend 72 m³/h umgerüstet. Darüber hinaus wurde für das Lehr- und Forschungsklärwerk der Universität Stuttgart bei Bösau im August 2014 eine GAK-Stufe zur Behandlung von 20 l/s entsprechend 72 m³/h geplant. [5][12]

2.1.3 Einsatz von Ozon

Durch Zugabe von Ozon in das Abwasser kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen sowie deren Wirkungen aus dem Abwasser oxidativ entfernt werden. In der Trinkwasseraufbereitung wird die Ozonung seit Jahrzehnten eingesetzt, um das Wasser zu desinfizieren und von störenden Geruchs- und Geschmacksstoffen zu befreien. In der Abwassertechnik wurden in den vergangenen Jahren in der Schweiz und in Deutschland auf einer Reihe von kommunalen ARA halb- und großtechnische Versuche erfolgreich durchgeführt. [3]

Eine Ozonanlage zur Mikroschadstoffentfernung wird auf einer Kläranlage der biologischen Stufe nachgeschaltet. Vor der Ozonanlage kann gegebenenfalls eine Filtereinheit angeordnet sein. Im Ablauf der Ozonung ist nach heutigem Kenntnisstand eine Nachbehandlung des Abwassers in einer biologisch aktiven Stufe erforderlich, um die Reaktionsprodukte der Ozonung aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [4]

Die verfahrenstechnische Einbindung einer Ozonanlage auf einer kommunalen Kläranlage hängt von den baulichen Gegebenheiten ab und kann dementsprechend auf unterschiedliche Weise erfolgen. Ist eine weitere, biologisch aktive Reinigungsstufe (z.B. Flockungsfiltration oder Schönungsteich) vorhanden, kann diese als Nachbehandlung für den mit Ozon behandelten Volumenstrom dienen. Entsprechend wird der Ozonreaktor zwischen der Nachklärung und der weiteren Reinigungsstufe im Voll- oder Teilstrom betrieben. Für eine möglichst geringe organische Hintergrundbelastung und dadurch einen geringen Ozonverbrauch kann der Ozonreaktor im Teilstromverfahren im Ablauf einer Flockungsfiltration angeordnet werden. Der mit Ozon behandelte Volumenstrom wird dabei in den Zulauf zur Flockungsfiltration zurückgegeben, um sowohl die Vorfiltration, wie auch die Nachreinigung über den Flockungsfilter zu gewährleisten. Ist weder ein Flockungsfilter noch ein Schönungsteich für die biologisch aktive Nachbehandlung vorhanden, so kann der mit Ozon behandelte Volumenstrom in die Biologie zurückgeführt werden. Da der zurückgeführte Volumenstrom Reste von Ozon enthalten kann, sollte bei vorgeschalteter Denitrifikation die Rückführung in die belüftete Zone erfolgen. Dies führt zu kaskadenähnlichen Verhältnissen im Belebungs-

becken, die zu berücksichtigen sind. Die Wahl des Ozoneintragssystems ist von der verfahrenstechnischen Einbindung auf der Kläranlage unabhängig. [3][4]

Abbildung 3 zeigt schematisch die Einbindungsmöglichkeiten einer Ozonanlage aus kommunalen Kläranlagen.

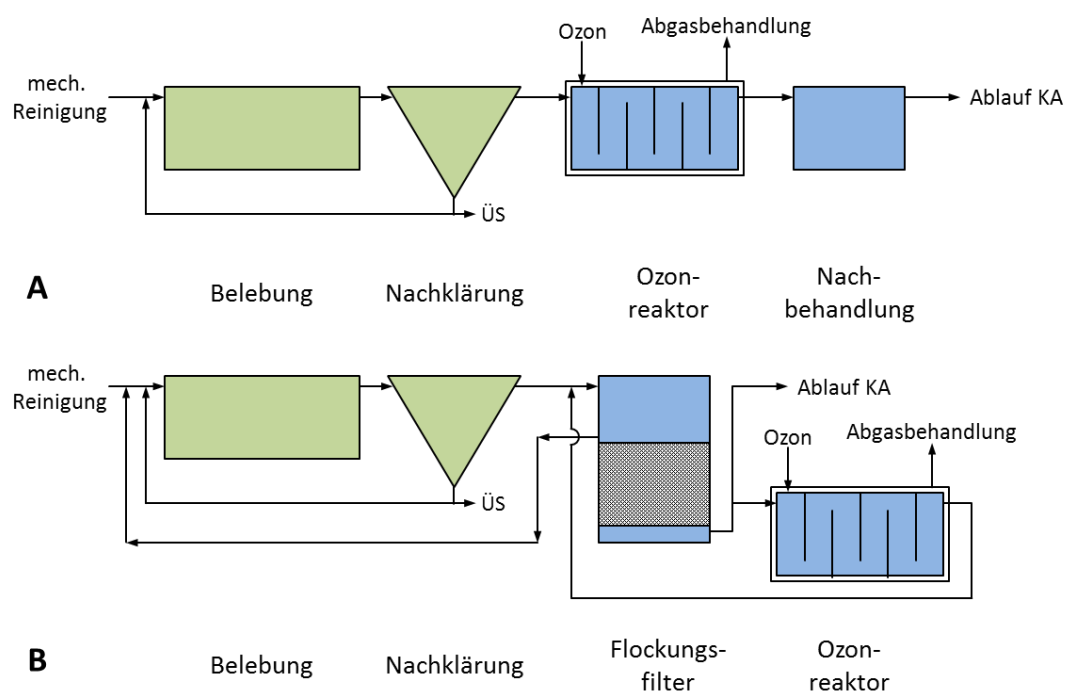


Abbildung 3: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer Ozonanlage (Ozonreaktor A zwischen Nachklärung und biologisch aktiver Nachbehandlung und B im Teilstrom hinter der Flockungsfiltration mit Rückführung in die Filtration)

Die Ozonanlage besteht im Wesentlichen aus einem Flüssigsauerstofftank bzw. der Sauerstoffproduktion, der Ozonerzeugung, dem Ozonreaktor, einem Restozonvernichter, der Nachbehandlung und der erforderlichen Mess-, Steuer-, Regelungs- und Sicherheitstechnik. [3]

Ozon wird mit Hilfe von Ozongeneratoren auf der Kläranlage erzeugt. Als Trägergas dient flüssiger Sauerstoff (LOX, *Liquid Oxygen*), komprimierte, getrocknete Luft oder vor Ort aus der Umgebungsluft erzeugter Sauerstoff aus einer PSA-Anlage (*Pressure Swing Adsorption*). Auf größeren kommunalen ARA kommt aus Gründen der Einfachheit und Wirtschaftlichkeit i.d.R. nur LOX in Frage [4]. Bei größeren Anlagen mit einem konstanten Gasstrom kann in Einzelfällen auch die Sauerstoffproduktion vor Ort mit einer PSA-Anlage wirtschaftlich sein [3]. Im

Ozongenerator werden rd. 10 M.-% des Sauerstoffes in Ozon umgewandelt. Über Diffusoren oder Injektionssysteme wird das ozonhaltige Gas in den Ozonreaktor eingebracht, wo es sich im Abwasser löst. Der Ozonreaktor muss luftdicht abgedeckt sein, um Ozonaustritte in die Umwelt zu verhindern. Der Gasraum über dem Ozonreaktor ist kontinuierlich abzusaugen und durch einen Restozonvernichter zu leiten. Aus Sicherheitsgründen ist der Ozongehalt in geschlossenen Betriebsräumen der Ozonanlage kontinuierlich zu messen. Diese Ozonmessung muss sowohl mit der Ozonanlage, als auch mit einem Alarmsystem gekoppelt sein, um das Betriebspersonal zu schützen. [4]

Als Nachbehandlung zur Elimination der Reaktionsprodukte aus dem gereinigten Abwasser können beispielsweise bereits vorhandene Filteranlagen oder Schöpfungsteiche in Frage kommen. Auch GAK-Filter mit zusätzlich adsorptiver Wirkung oder Wirbel- und Festbettreaktoren sind möglich. [4]

Die Steuerung des Ozoneintrags kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Als Steuer- bzw. Regelgrößen kommen die Zuflusswassermenge, die DOC-Fracht im Zulauf oder der Anteil gelösten Ozons im hinteren Reaktorteil in Frage. Außerdem ist die Abnahme der UV-Absorbanz (SAK) eine vielversprechende Regelungsgröße, für die bisher jedoch relativ wenige Erfahrungen vorliegen. [3]

Nachfolgend sind die Möglichkeiten der Steuerung/Regelung mit ihren Vor- und Nachteilen tabellarisch gegenüber gestellt.

Tabelle 3: Übersicht Steuer- und Regelungsgrößen für Ozonanlagen nach [3]

	Q	DOC	O ₃	SAK
Steuerung oder Regelung	Steuerung	Steuerung	Regelung	Regelung
Messgeräte	Q (Zulauf)	Q, DOC (Zulauf), evtl. NO ₂ (zu)	(Q), O ₃ (hinterer Reaktorteil)	(Q), SAK (Zulauf und Ablauf)
Aufwand/Kosten	Gering	Kalibrierung aufwendig	Kalibrierung aufwendig	noch nicht bekannt
Kontrolle Elimination	Nein	i.d.R. gut	Gut	Gut
Vorteile	Einfach	Einfache Aussage über Effektivität	Dosierung angepasst an Bedarf	Aussage über Effektivität, Dosierung an Bedarf angepasst, Einfache Messung
Nachteile	Keine Aussage über Effektivität Gefahr von Über-/Unterdosierung	Bei häufigen Nitritspitzen nicht geeignet, Dosierung nicht unbedingt nach Bedarf, Zuverlässigkeit der Messung	Wahl des Messortes entscheidend, Überdosierung bei tiefem Durchfluss	Wenig/keine Erfahrungen, Vortests notwendig

Die Auslegung des Kontaktreaktors einer Ozonanlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [4]. Die Erfahrungen mit Pilotanlagen in der Schweiz haben gezeigt, dass eine hydraulische Aufenthaltszeit von 20 Minuten bei Trockenwetter als Kontaktzeit für eine weitgehende Elimination von Spurenstoffen ausreicht. Bei Regenwetter sollte trotz einer verkürzten hydraulischen Aufenthaltszeit die Kontaktzeit noch etwa 5 bis 10 Minuten betragen [3]. Das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW empfiehlt in seiner „Anleitung zur Auslegung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ eine Kontaktzeit von 15 bis 30 Minuten bei Trockenwetter [4].

Die benötigte Ozondosis für die Elimination von Mikroverunreinigungen aus dem biologisch vorgereinigten Abwasser ergibt sich aus der DOC- und Nitrit-Konzentration im Zulauf zur Ozonanlage sowie der jeweiligen spezifischen Ozonzehrung. Für DOC (z_{DOC}) liegt diese zwischen 0,6 und 0,8 mgO₃/mgDOC und für Nitrit (z_{NO_2-N}) bei 3,43 mgO₃/mgNO₂-N. Über die Ozondosis kann mit dem Bemessungsabfluss die maximal erforderliche Kapazität der Ozonproduktion ermittelt werden. Analog wird über den minimalen Trockenwetterabfluss als 2h-Mittel die minimal notwendige Ozonerzeugung ermittelt. [4]

Die erforderliche Ozondosis hängt direkt von den Abwasserinhaltsstoffen und damit von der Reinigungsleistung der vorgeschalteten Stufen ab. Ein hoher Nitrit- oder DOC-Wert im Zulauf zur Ozonanlage erhöhen die erforderliche Ozondosis und damit die Kosten. Die Leistung der Belebung und der Nachklärung haben somit einen direkten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Ozonanlage. Daher ist eine weitgehende Nitrifikation im Belebungsbecken und eine zuverlässig funktionierende Nachklärung die Grundvoraussetzung für den effizienten Betrieb einer Ozonanlage. [4]

Vorteile der Ozonung

Ein Vorteil des Einsatzes von Ozon zur Spurenstoffelimination ist, dass dadurch ein breites Spektrum an Substanzen effektiv aus dem Abwasser entfernt werden kann. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass einige der durch Ozon gut entfernbaren Substanzen durch andere Verfahren, wie beispielsweise den Aktivkohleeinsatz, nur bedingt reduziert werden können. Als Beispiel dafür kann das Antibiotikum Sulfamethoxazol genannt werden, das gemäß Vorschlag des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW mit vier weiteren Spurenstoffen als Stellvertretersubstanz zur Überwachung der Eliminationsleistung herangezogen werden soll. [3]

Überdies ist eine Ozonanlage in der Regel gut in eine bestehende Abwasserreinigungsanlage integrierbar. Ihr Betrieb hat keine Auswirkungen auf die bestehenden Reinigungsstufen, sofern keine Rückführung von behandelten Volumenströmen vorgesehen wird. [3]

Darüber hinaus werden durch die desinfizierende Wirkung des Ozons pathogene Keime weitgehend eliminiert, wenn auch aufgrund der höheren Konzentrationen an Mikroorganismen und Feststoffen im Abwasser nicht so effektiv, wie in der Trinkwasseraufbereitung. [3]

Nachteile der Ozonung

Ein Nachteil des Einsatzes von Ozon auf Abwasserreinigungsanlagen ist die relativ energieintensive Ozonerzeugung. Diese muss vor Ort auf der Kläranlage geschehen, da Ozon aufgrund der Explosionsgefahr nicht in Druckflaschen abgefüllt werden kann. Das zur Ozonerzeugung notwendige Trägergas wird meist in Form von flüssigem Sauerstoff von externen Händlern auf die Kläranlage geliefert. Dies führt zu einer Abhängigkeit, die sich schlimmstenfalls negativ auf die Kosten oder die Betriebsbereitschaft der Ozonbehandlung auswirken kann. [3]

Außerdem muss das Betriebspersonal vor Ozonaustritten geschützt werden. Dies führt zu einer aufwendigen MSR- und Sicherheitstechnik, die eine Vielzahl von Sensoren sowohl im Abwasserstrom, wie auch in den Betriebsräumen der Ozonanlage erfassen muss. [3]

Darüber hinaus wirkt Ozon als starkes Oxidationsmittel und wandelt die Abwasserinhaltsstoffe um, ohne sie aus dem Abwasserstrom zu entfernen. Die Reaktionsprodukte der Ozonung sind i.d.R. weniger problematisch als die Ausgangssubstanzen, aber unbekannt und somit schwierig einzuschätzen. Eine Einschätzung der Toxizität wird auch dadurch erschwert, dass ihr Nachweis stark von der Sensitivität des verwendeten Testverfahrens abhängt. Um die Reaktionsprodukte wirkungsvoll aus dem Abwasserstrom zu entfernen, ist eine der Ozonung nachgeschaltete, biologisch aktive Reinigungsstufe erforderlich. [3]

Insgesamt erhöht sich der Energieverbrauch einer Kläranlage durch die Ozonung um 10 bis 30 %. Die Betriebskosten erhöhen sich dadurch auch insgesamt um etwa 10 bis 20 %. [3]

In Tabelle 4 sind die Vor- und Nachteile einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht der Vor- und Nachteile einer Ozonanlage

Vorteile		Nachteile	
+	eliminiert ein breites Spektrum von Spurenstoffen	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um etwa 10-30 %
+	gut in bestehende Anlagen integrierbar	-	Ozonerzeugung erfordert evtl. erhöhte Anschlussleistung
+	keine Auswirkungen auf andere Reinigungsstufen	-	Zukauf von flüssigem Sauerstoff erforderlich
+	zusätzlich Desinfektion des Abwassers	-	umfangreiche MSR- und Sicherheitstechnik erforderlich
+	geringerer Platzbedarf im Vergleich zu PAK	-	Reaktionsprodukte sind i.d.R. unbekannt
+	bessere CO2-Bilanz verglichen mit Aktivkohle	-	biologisch aktive Nachreinigung erforderlich

Pilot- und Versuchsanlagen zur Ozonung im In- und Ausland

In den vergangenen Jahren wurde die Spurenstoffentfernung mittels Ozon auf einer Reihe von Kläranlagen in Pilotversuchen großtechnisch erprobt.

In der Schweiz wurden auf den Kläranlagen in Regensdorf und Lausanne ab Mai 2007 bzw. April 2009 Ozonanlagen im Pilotversuch betrieben. Die Anlage in Regensdorf behandelte maximal 250 l/s (120 l/s bei Trockenwetter) über 18 Monate, während die in Lausanne einen Teilstrom von 60 l/s über 15 Monate reinigte. Durch den Betrieb dieser Anlagen konnten wertvolle Erkenntnisse über die Auslegung, den Betrieb und die Kosten von Ozonanlagen in der Abwassertechnik erlangt werden. [3][6]

In NRW wird seit Oktober 2009 auf der Kläranlage Bad Sassendorf eine Ozonanlage zur Behandlung von 300 bis 650 m³/h biologisch vorgereinigtem Abwasser betrieben. Eine Nachbehandlung erfolgt hier in vorhandenen Schönungsteichen. Seit Januar 2010 ist am Kreiskrankenhaus Waldbröl ein Membranbioreaktor mit nachgeschalteter Ozonanlage in Betrieb, die die Spurenstoffbelastung der Krankenhausabwässer vor der Zuleitung zur Kläranlage Brenzingen verringern sollen. Hier können maximal 32 m³/h behandelt werden. Darüber hinaus wurde im Oktober 2010 auf der Kläranlage Schwerte eine Ozonanlage zur Behandlung von maximal 886 m³/h in insgesamt 192 m³ Reaktorvolumen in Betrieb genommen, die in Kombination mit einer PAK-Behandlung betrieben werden kann. Wahlweise kann das mit Ozon behandelte Abwasser zur Nachbehandlung zuerst in die PAK-Stufe geleitet oder direkt in die biologische Stufe rezirkuliert werden [8]. Im Juli 2011 wurde eine weitere Kläranlage für Krankenhausabwässer in NRW fertig gestellt. Die fast 200 m³/d des Marienhospitals in Gelsenkirchen werden seit dem durch eine Membranfiltration vorgereinigt, mittels Ozon die Spurenstoffen entfernt und in einer Aktivkohlefiltration nachbehandelt [13]. Seit Oktober 2011 wird auf der Kläranlage Duisburg-Vierlinden eine zweistraßige Ozonanlage zur Behandlung des Trockenwetterzuflusses von 400 m³/h betrieben. Die beiden Straßen wurden mit unterschiedlichen Systemen zum Ozoneintrag in den Reaktor ausgerüstet, um diese beiden Systeme zu vergleichen. Zur Nachbehandlung des ozonierten Abwassers wird ein Wirbelbettreaktor betrieben [8].

Ende 2012 wurde in St. Pourcain-sur-Sioule, Frankreich, eine Anlage zur Spurenstoffelimination in Betrieb genommen. In Frankreich existiert derzeit keine gesetzliche Grundlage zur Spurenstoffelimination. Da jedoch der Neubau der gesamten Kläranlage St. Pourcain-sur-Sioule erforderlich wurde, entschied sich der Betreiber zukunftsorientiert für die Ausrüstung der neuen Kläranlage mit einer Ozonanlage zur Spurenstoffelimination. [6]

Neben den bereits umgesetzten großtechnischen Anlagen in NRW werden auf der Zentralkläranlage Detmold und auf der Kläranlage Köln-Rodenkirchen derzeit weitere Anlagen zur Ozonung von biologisch vorgereinigtem Abwasser vorbereitet. Auch darüber hinaus liegen Studien für eine Reihe von Kläranlagen vor, in denen verschiedene Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination miteinander verglichen wurden. Für die Zentralkläranlage Espelkamp und die Kläranlage Warburg wurde z.B. als Vorzugsvariante eine Ozonung herausgearbeitet. Auf den Kläranlagen Harsewinkel und Löhne sind aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sowohl eine Ozonanlage wie auch eine GAK-Filterstufe denkbar. [8]

2.1.4 Sonstige Verfahrensvarianten

Neben dem Einsatz von Aktivkohle und Ozon werden derzeit auch eine Reihe anderer Verfahrenstechniken auf ihre Eignung zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen im Labor- und halbtechnischen Maßstab getestet. Dazu gehören der Einsatz von dichten Membranen oder sogenannten *Advanced Oxidation Processes* (AOP). Darüber hinaus wird an weiteren physikalischen und oxidativen Verfahren zur Spurenstoffelimination geforscht.

Dichte Membranen

Zu den dichten Membranverfahren zählen die Nanofiltration und die Umkehrosmose. Bei beiden Verfahren wird das zu reinigende Abwasser unter hohem Druck (> 2 bar) durch die jeweilige Membran gepresst, wobei gelöste und ungelöste Stoffe zurückgehalten werden. Die Abscheidung erfolgt bei der Nanofiltration durch Größenausschluss und bei der Umkehrosmose durch Ladungseffekte. Daher wird letzteres Verfahren vorwiegend in der Meerwasserentsalzung und der Produktion von Reinstwasser eingesetzt, während beide Verfahren zur Behandlung von industriellen Prozessströmen und in der Trinkwasseraufbereitung verwendet werden. Eine sehr gute Vorreinigung des zu behandelnden Abwassers ist beim Einsatz von dichten Membranen unabdingbar, um die Membranen vor Belagbildung und Verstopfung zu schützen. [3]

Dichte Membranen können sowohl ein breites Spektrum von Spurenstoffen sowie Keime fast vollständig zurückhalten. Allerdings fallen bis zu 25 % des behandelten Volumenstroms als Konzentrat bzw. Retentat an, für dessen Weiterbehandlung oder Entsorgung es derzeit noch keine wirtschaftlichen Lösungen gibt. Außerdem sind der Energiebedarf und damit die Kosten verglichen mit einer Aktivkohle- oder

Ozonbehandlung deutlich erhöht. Daher kommen diese Verfahren derzeit für den Einsatz auf kommunalen Kläranlagen nicht oder nur in Einzelfällen in Frage. [3]

Advanced Oxidation Processes (AOP)

Unter AOP versteht man Verfahren, bei denen durch OH-Radikale organische Inhaltsstoffe oxidiert werden. OH-Radikale sind hoch reaktiv und reagieren daher mit fast allen Abwasserinhaltsstoffen. Doch wie beim Einsatz von Ozon werden die Spurenstoffe nicht aus dem Abwasser entfernt, sondern in oft unbekannte Reaktionsprodukte umgewandelt. Da OH-Radikale nicht gelagert werden können, müssen sie direkt im zu behandelnden Abwasser erzeugt werden. Dies kann zum Beispiel durch die UV-Bestrahlung von mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2) oder Titan-dioxid (TiO_2) versetztem Abwasser erfolgen. H_2O_2 kann auch durch Zugabe von Ozon oder Eisen-II zur OH-Radikalbildung animiert werden. Durch die unspezifische Reaktion der OH-Radikale mit allen Abwasserinhaltsstoffen ist für eine effiziente Spurenstoffelimination eine sehr gute Vorreinigung des Abwassers erforderlich. [3]

Trotz der unspezifischen Reaktion der OH-Radikale mit allen Abwasserinhaltsstoffen können in gut vorgereinigtem Abwasser viele Spurenstoffe weitgehend eliminiert werden. Jedoch liegen bisher nur wenige Untersuchungen zur (Öko)Toxizität des behandelten Abwassers vor. Außerdem sind der Energiebedarf und damit auch die Kosten für AOP deutlich höher als z.B. bei einer Ozonung. Daher kommen AOP für kommunales Abwasser kaum in Frage. Für industrielles Abwasser kann allenfalls eine Kombination von Ozon und H_2O_2 durch die verstärkte OH-Radikalbildung in Frage kommen, um besonders persistente Abwasserinhaltsstoffe zu eliminieren. [3]

Weitere Verfahren

Zur Spurenstoffelimination wurden auch nachgeschaltete biologische Verfahren sowie die Fällung/Flockung untersucht. Beide Verfahren werden jedoch bereits auf den meisten kommunalen ARA eingesetzt und bewirken erfahrungsgemäß keine ausreichende Spurenstoffelimination. Dagegen entfernen diverse untersuchte Adsorptionsmittel ebenso wie die UV-Bestrahlung einige Spurenstoffe sehr gut aus dem Abwasser. Hier fehlt jedoch die erforderliche Breitbandwirkung für einen effektiven Einsatz auf kommunalen Kläranlagen. Die Nanotechnologie und die Behandlung mit Ultraschall sind derzeit im Interesse der Forschung, jedoch fehlen hier noch Erfahrungen, die eine Aussage über das Potential dieser Verfahren

ermöglichen. Zuletzt besteht neben Ozon und OH-Radikalen auch die Möglichkeit der Oxidation mit Chlor bzw. Chlordioxid oder Ferrat. Chlor hat sich jedoch als ungeeignet für den Einsatz auf kommunalen ARA herausgestellt, da es keine Breitbandwirkung hat und durch die große erforderliche Menge eine relativ große Menge an problematischen Nebenprodukten erzeugt. Ferrat wurde dagegen erst vor kurzem für die Behandlung von Abwasser entdeckt. Das sechswertige Eisen reagiert ähnlich wie Ozon, aber weniger stark, mit bestimmten funktionellen Gruppen und wirkt desinfizierend, ebenfalls wie Ozon. Bei der Reaktion zerfällt Ferrat in dreiwertiges Eisen, dass auf vielen kommunalen Kläranlagen als Mittel für die chemische Phosphorfällung ins Abwasser dosiert wird. Dieses Verfahren ist sehr vielversprechend, jedoch wurde es erst im Labormaßstab getestet, sodass Aussagen über Effektivität oder Wirtschaftlichkeit noch nicht getroffen werden können. [3]

Im Folgenden werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit fast ausschließlich die verfahrenstechnischen Varianten mit PAK, GAK und Ozon näher betrachtet. Alle weiteren Verfahrensvarianten (z.B. dichte Membranen, AOP, etc.) sowie Verfahrenskombinationen von Ozon und Aktivkohle, so vielversprechend sie auch hinsichtlich ihrer Eliminationsleistungen sein mögen, binden entweder deutlich mehr Kapital oder bedürfen weiterer Forschungen, bevor sie großtechnisch für den Dauerbetrieb in Betracht kommen. Für einen weitgehenden Vergleich wird neben den einzelnen Verfahren mit PAK, GAK und Ozon lediglich die Verfahrenskombination von Ozon und GAK als zusätzliche Variante betrachtet.

2.2 Wesentliche Stoffeigenschaften

Die Vielfalt der organischen Verbindungen im Kläranlagenablauf und im Gewässer erfordert eine Auswahl von zu betrachtenden Stoffen. Diese muss vor dem Hintergrund der zu erwartenden Spurenstoffe aus dem speziellen Einzugsgebiet erfolgen. Im Falle der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Spurenstoffe in zwei unabhängig voneinander durchgeführten Spurenstoffanalysen in Anlehnung an in NRW etablierte Messreihen betrachtet.

Die Eliminationsleistungen mit den einzelnen Verfahren sind substanzspezifisch. Die Eigenschaften der Substanzen lassen Rückschlüsse auf das Verhalten des spezifischen Stoffes in den verschiedenen Verfahrensstufen zu. Für den biologischen Abbau ist vorrangig die biologische Verfügbarkeit von Bedeutung, d.h. die

Verwendung des Stoffes als Substrat. Sie bestimmt maßgeblich die Eliminationsleistung kommunaler Kläranlagen, die beispielsweise für Ibuprofen und Koffein in nitrifizierenden Systemen sehr gut ist, während z.B. Carbamazepin in herkömmlichen mechanisch-biologischen Kläranlagen kaum eliminiert wird. Ein weiterer Weg, über den einige Spurenstoffe in kommunalen Kläranlagen eliminiert werden, ist durch Sorption an belebten Schlamm. Für die Eliminationsleistung von Aktivkohle ist vor allem die Adsorptionsneigung der einzelnen Spurenstoffe maßgebend. Die Sorptionseigenschaften führen dazu, dass beispielsweise Carbamazepin und Benzotriazol sehr gut in Aktivkohleanlagen entfernt werden können, während EDTA nicht adsorbiert und somit in der Konzentration kaum verringert wird. Für die Ozonung ist vor allem die Struktur der einzelnen Stoffe von Bedeutung, da Ozon bevorzugt Kohlenstoffdoppelbindungen, phenolische Verbindungen und Aminogruppen angreift [3]. Daher wird Carbamazepin auch von Ozon gut eliminiert, während Benzotriazol nur mäßig gut und Diuron kaum eliminiert wird. [14]

Die Eliminationsleistungen unterschiedlicher Verfahren für bestimmte Stoffe sind ausschlaggebend dafür, welche Spurenstoffe über den Kläranlagenablauf in die aquatische Umwelt gelangen. Bei der Auswahl eines weitergehenden Reinigungsverfahrens sollte daher eine gute, an den Einzelfall angepasste Elimination für eine möglichst große Anzahl an Spurenstoffen angestrebt werden.

Tabelle 5 fasst die im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock untersuchten Spurenstoffe zusammen und stellt die entsprechenden Eliminationsleistungen der einzelnen Verfahren dar, soweit diese den Verfassern aus der Fachliteratur bekannt sind. Dabei bezieht sich die Einordnung der Eliminationsleistungen in die Kategorien „gut“, „mittel“ und „schlecht“ nicht direkt auf beobachtete Eliminationsraten der einzelnen Spurenstoffe in den Verfahrensstufen. Es soll lediglich ein Eindruck vermittelt und eine grobe Abschätzung der Leistungen der einzelnen Eliminationsverfahren ermöglicht werden.

Tabelle 5: Auswahl an untersuchten Spurenstoffen im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock und ihr Eliminationspotential in verschiedenen Verfahrensstufen [14][15][16][17]

	Stoffname	CAS-Nr.	Eilmination in biol. Stufe in KA	Adsorbierbarkeit an Aktivkohle	Eliminierbarkeit durch Ozon
Süß-Stoffe	Acesulfam	55589-62-3	schlecht	schlecht	mittel
	Sucralose	56038-13-2			
Pharmaka	Bezafibrat	41859-67-0	mittel	mittel ***	mittel
	Diclofenac	15307-86-5	schlecht *	gut	gut
	Naproxen	22204-53-1	mittel *	mittel ***	gut ***
	Phenazon	60-80-0			
	Carbamazepin	298-46-4	schlecht	gut	gut
	Atenolol	29122-68-7	mittel *	mittel ***	mittel
	Bisoprolol	66722-44-9			
	Metoprolol	37350-58-6	schlecht *	mittel **	mittel
	Sotalol	3930-20-9		mittel ***	mittel
	Clarithromycin	81103-11-9		gut ***	gut
	Sulfamethoxazol	723-46-6	mittel	schlecht	gut
	N4- Acetylsulfamethoxazol	21312-10-7		schlecht ***	mittel ***
	Oxazepam	604-75-1		mittel ***	schlecht ***
Diagnostika	Amidotrizoesäure	117-96-4		schlecht	schlecht
	lomeprol	78649-41-9		schlecht	schlecht
	Iopamidol	60166-93-0	schlecht **	schlecht	schlecht
	Iopromid	73334-07-3		schlecht	schlecht
Pestizide	Diuron	330-54-1	mittel *	mittel ***	schlecht
	Isoproturon	34123-59-6	schlecht **	schlecht **	mittel
	Terbutryn	886-50-0		gut **	mittel ***
Ind. Chem.	Benzotriazol	95-14-7	mittel	gut	mittel
	4-Methylbenzotriazol	29878-31-7		gut ***	mittel ***
	5-Methylbenzotriazol	136-85-6		gut ***	mittel ***
EDCs	17- α -Ethinylestradiol	57-63-6	gut *	gut **	gut
	17- β -Estradiol	50-28-2	gut *	gut **	gut
	Estron	53-16-7	gut *	gut ***	gut
	Bromid				

Eliminationsleistungen, soweit nicht anders angegeben, aus RiSKWa-Leitfaden "Indikatorsubstanzen" (2013)

* Quelle: Luo et al. 2014

** Quelle: Türk et al. 2013

*** Quelle: Margot et al. 2013

Grundsätzlich ist festzustellen, dass einige Spurenstoffe von beiden Verfahren (Aktivkohle und Ozon) etwa in gleichem Maße eliminiert werden, während beispielsweise das Antibiotikum Sulfamethoxazol von Aktivkohle schlecht, aber von Ozon gut eliminiert wird. Für Benzotriazol und Terbutryn dagegen verhält es sich anders herum. Röntgenkontrastmittel wie Amidotrizoesäure oder Iopamidol werden durch keines der beschriebenen Verfahren gut eliminiert, da sie für ihren Anwendungsbereich als weitgehend inert konzipiert wurden. Gleichzeitig werden sie von den Patienten in hohen Dosen (mg/l) eingenommen, ohne dass für sie dadurch eine Gesundheitsgefährdung bekannt ist. Diese Eigenschaften machen die Gruppe der Röntgenkontrastmittel zwar schwer aus dem Abwasser zu eliminieren, doch sie lassen auch vermuten, dass ihr negativer Einfluss auf die aquatische Umwelt begrenzt ist [14][16]. Der Anteil der gut eliminierbaren Spurenstoffe an der in Tabelle 5 aufgelisteten Spurenstoffe liegt für Aktivkohle bei rd. 40 % und für Ozon bei rd. 32 %. In Bezug auf die mittelmäßig eliminierbaren Spurenstoffe weist Ozon mit rd. 44 % einen höheren Anteil auf als Aktivkohle mit rd. 28 %. Gewichtet man die Anteile der gut, mittel und schlecht eliminierbaren Spurenstoffe für das jeweilige Verfahren, so wird deutlich, dass Aktivkohle und Ozon für die Elimination der hier betrachteten Spurenstoffen etwa in gleichem Maße geeignet sind.

Für die Auswahl des geeignetsten Verfahrens zur Erweiterung einer kommunalen ARA zur Spurenstoffelimination ist daher eine Einzelfallentscheidung erforderlich. In Abhängigkeit von der Belastungssituation im Ablauf der Kläranlage muss das Verfahren so ausgewählt werden, dass für die betrachtete Anlage die relevanten Spurenstoffe in ausreichendem Maße eliminiert werden.

2.3 Alleinstellungsmerkmale der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Bei der Entscheidung für oder gegen eine weitergehende Reinigungsstufe bzw. für das anzuwendende Verfahren spielen die Gegebenheiten vor Ort eine besondere Rolle. Für die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock ist folgendes herauszustellen:

- Auf der Kläranlage wird im Ablauf der Nachklärbecken ein Schönungsteich betrieben, der für eine Ozonanlage eine biologisch aktive Nachbehandlung sicherstellen würde.

- Eine Filtration ist auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock nicht vorhanden. Für eine PAK-Anwendung ist zur Abscheidung der feindispersen Anteile eine Filtration jedoch unumgänglich. Eine Flockungsfiltration auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock würde, neben der PAK-Abtrennung, zu einer Verringerung der P_{ges} -Ablaufwerte führen. Dadurch kann voraussichtlich eine Abgabebefreiung für den Parameter P_{ges} erzielt werden.
- Die vorhandenen Nachklärbecken sind im Zulaufbereich optimiert worden. Daher ist davon auszugehen, dass der Ablauf der NKB weitgehend feststofffrei ist und eine geringe organische Hintergrundbelastung aufweist. Somit ist die Voraussetzung für den effizienten Betrieb einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock gegeben.
- Auf der Kläranlage ist die für einen Neubau zur Verfügung stehende Fläche sehr begrenzt. Neben der Belebung I bietet jedoch eine freie Fläche ausreichend Raum für die Errichtung einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination. Durch die Position dieser Freifläche entlang der Ablaufleitung von den NKB zum Schönungsteich können für alle Verfahrensvarianten kurze Wege für die benötigten Rohrleitungen realisiert werden.
- Die vorhandene Schlammfäulung gewährleistet derzeit eine üppige Faulzeit von über 40 Tagen [18]. Ein erhöhter Schlammanfall von rd. 5 – 10 % bedingt durch eine PAK-Dosierung würde für die Schlammfäulung daher voraussichtlich kein Problem darstellen.
- Die vorhandene Schlammentwässerungsanlage (SEA) soll in 2016 mit neuen Zentrifugen ausgerüstet werden, sodass gegebenenfalls ein erhöhter Schlammanfall durch eine PAK-Dosierung bei der Kapazität der neuen SEA berücksichtigt werden kann.
- Derzeit wird der ausgefautete und entwässerte Schlamm der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock zu 100 % landwirtschaftlich entsorgt. Durch eine Pulveraktivkohlestufe auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wäre eine stoffliche Nutzung durch die spurenstoffbeladene Aktivkohle im Schlamm nicht mehr zulässig. Dadurch, und durch den erhöhten Schlammanfall durch die PAK-Dosierung, würden sich die Schlammentsorgungskosten erhöhen.

3. Grundlagenermittlung

3.1 Kurzbeschreibung der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock ist als Anlage zur biologischen Kohlenstoffelimination für insgesamt 60.000 Einwohnerwerte ausgelegt. Der Höchstwasserabfluss zum Vorfluter ist auf $560 \text{ m}^3/0,5 \text{ h}$ entsprechend $1.120 \text{ m}^3/\text{h}$ begrenzt.

Die gesamten Abwässer im Zulauf der Kläranlage werden durch ein Hebewerk mit einer Förderhöhe von etwa 3,0 m angehoben. Anschließend durchläuft das Abwasser die Anlage im Freigefälle. Eingesetzt werden insgesamt vier Schneckenpumpen. Zwei große Schneckenpumpen mit einer Förderleistung von 110 l/s (7,5 kW Motorleistung) und zwei kleine Schneckenpumpen mit 75 l/s Förderleistung (5,5 kW Motorleistung). In der Regel wird eine der beiden großen Schnecken als Grundlastschnecke betrieben. Die anderen Schneckenpumpen werden in Abhängigkeit des Füllstandes im Unterwasser zugeschaltet.

Die mechanische Reinigung besteht aus einer einstraßigen Rechenanlage, einem kombinierten Sand- und Fettfang und einem runden Vorklärbecken. Als Rechen wird ein Filterstufenrechen mit einer Spaltweite von 5 mm betrieben. Nach dem Rechen folgt ein belüfteter Langsandfang mit integrierter Fettfangkammer. Die Belüftung des Sandfangs erfolgt dauerhaft, die Räumung des Sandfangs kann über eine Zeit-Pausen-Steuerung eingestellt werden. Das Sand-Wasser-Gemisch wird mit einer Pumpe zum Sandklassierer und zur Sandwaschanlage gepumpt. Das anfallende Fett wird mit einer Pumpe zur Schlammbehandlung gefördert. Die runde Vorklärung besitzt ein Volumen von 750 m^3 . Als Räumer ist ein Schildräumer mit Laufradantrieb, Rinnenreinigung und Schwimmschlammabzug installiert.

Nach der Vorklärung fließt das Rohabwasser zur biologischen Reinigung in die beiden Belebungsbecken. Die beiden Belebungsbecken sind als Kombi-Becken mit innenliegender Nachklärung ausgeführt. Die Belebungsbecken haben ein Volumen von jeweils 2.790 m^3 bei einer Wassertiefe von ca. 3,80 m und werden intermittierend belüftet. Die Belüftung erfolgt über ein Druckbelüftungssystem mit Plattenbelüftern und Drehkolbengebläsen. In die Belebungsbecken wird neben dem Rohabwasser kontinuierlich das stickstoffhaltige Zentrat aus der Schlammwässerung zugegeben. Aus den Belebungsbecken fließt das biologisch gereinig-

te Abwasser in das jeweilige Nachklärbecken. Jedes Nachklärbecken wird mit einem umlaufenden Schildräumer mit Laufradantrieb geräumt.

Das gereinigte Abwasser aus den Nachklärbecken fließt anschließend in den Schönungsteich, indem sich restliche Feststoffe absetzen können. Aus dem Schönungsteich fließt das Wasser dem Vorfluter zu.

Der Schlamm, der sich in den Nachklärbecken abgesetzt hat, wird über zwei Rücklaufschlammumpen wieder zurück in die Belebungsbecken gefördert. Zur Rücklaufschlammförderung werden zwei frequenzgeregelter Tauchmotorpumpen eingesetzt. Der Überschussschlamm wird aus dem Rücklaufschlammstrom abgezogen und mit zwei Tauchmotorpumpen in den statischen Voreindicker gefördert.

Der Primärschlamm aus der Vorklämung und der Überschussschlamm aus der Belebung werden auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock zunächst gemeinsam in einen Voreindicker ($V = 280 \text{ m}^3$) gefördert. Im Voreindicker wird das Schlammgemisch statisch eingedickt. Die Eindickung erfolgt nach dem Prinzip der Durchlaufeindickung. Dabei wird die mittlere Feststoffkonzentration von etwa 1,1 % auf rd. 2,8 % erhöht.

Mit zwei Exzentrerschneckenpumpen wird der eingedickte Rohschlamm gleichmäßig über den Tag verteilt in die Schlammfaulung gefördert. Im Faulbehälter ($V = 2.887 \text{ m}^3$) wird der Rohschlamm bei einer mittleren Aufenthaltszeit von mehr als 40 Tagen ausgefault.

Zur Beheizung des Faulbehälters ist ein außenliegender Schlammwärmetauscher installiert. Der ausgefaulte Schlamm fließt nach dem Verdrängungsprinzip aus dem Faulbehälter ab und wird im Faulschlamm-speicher ($V = 840 \text{ m}^3$) zwischengespeichert. Trübwasser wird hier nicht mehr abgezogen. Zur Durchmischung des Faulschlamm-speichers ist ein Rührwerk installiert, dass nur betrieben wird, wenn Faulschlamm entwässert wird. Aus dem Faulschlamm-speicher wird der Schlamm abgezogen und werktäglich mit einer Zentrifuge entwässert. Der im Mittel auf etwa 24 % entwässerte Schlamm wird über ein Fördersystem mit drei Förderschnecken aus dem Gebäude gefördert. Der abgeworfene Schlamm wird anschließend zur Zwischenlagerung per Radlader unter ein Abdach transportiert.

Das bei der Entwässerung anfallende stark stickstoffhaltige Zentrat wird in einem Zentratspeicher ($V = 240 \text{ m}^3$) zwischengespeichert und über eine Dosierpumpe gleichmäßig der Belebung zugeführt.

Das in der Schlammfäulung anfallende Klärgas wird über zwei BHKW-Module mit einer elektrischen Leistung von je 50 kW verwertet.

Nachfolgend ist das Prinzipfließschema der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock graphisch dargestellt (Abbildung 4).

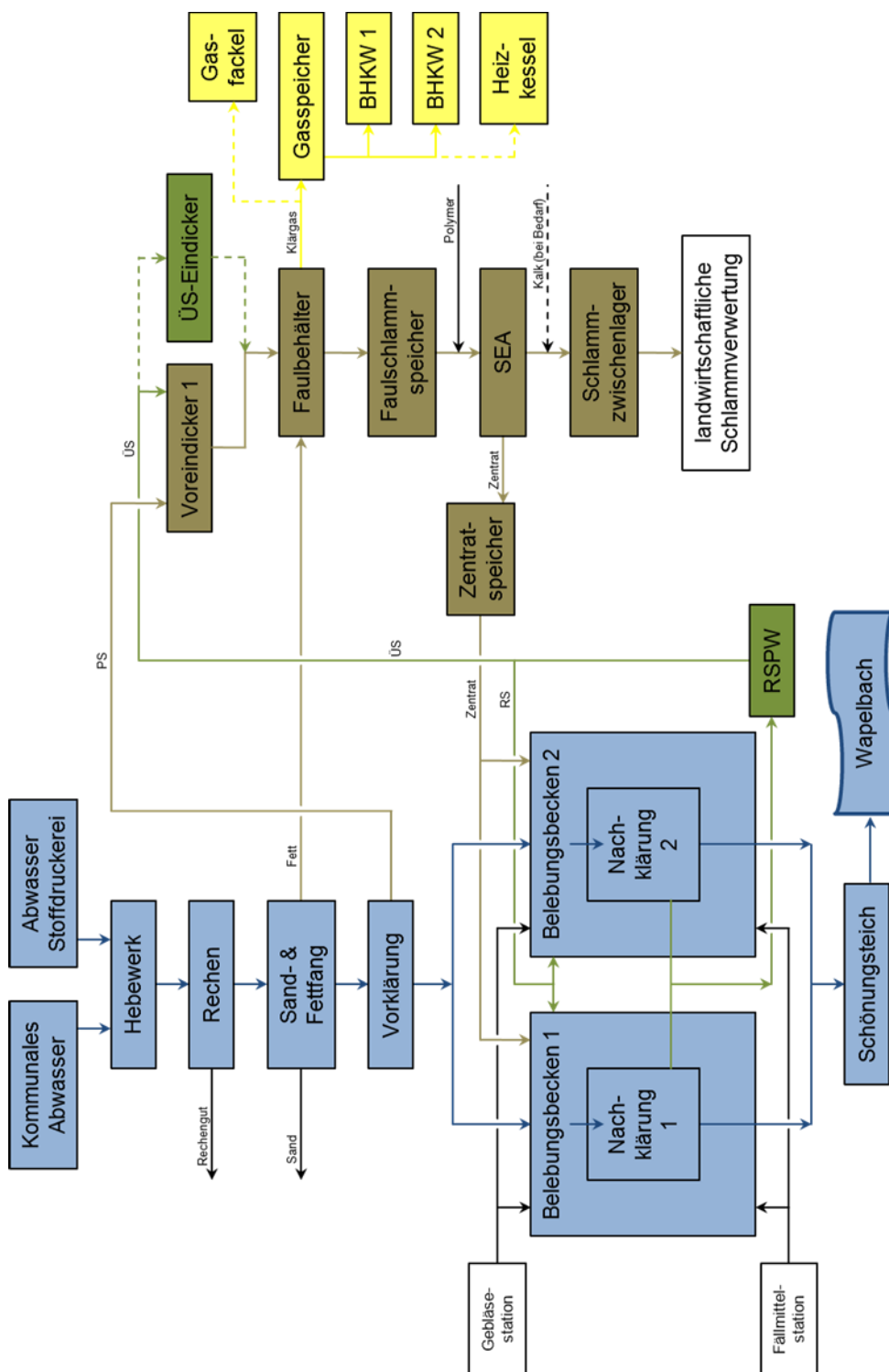


Abbildung 4: Prinzipfließbild der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

3.2 Klärwerksbelastung

Im Einzugsgebiet der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock ist vorrangig eine Trennkanalisation vorhanden. Ein Teil entwässert jedoch über ein Mischsystem. Die Stadt Schloß Holte-Stukenbrock hat derzeit rd. 26.100 Einwohner, davon sind etwa 85 % an die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock angeschlossen. Demnach werden die Abwässer von rd. 22.500 Einwohnern auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock gereinigt.

Hinzu kommt das industrielle Abwasser der Firma HOL-TEX GmbH. Die Firma HOL-TEX stellt Textilbedruckungen und Beschichtungen her und leitet Abwasser mit einer hohen Konzentration von gelöstem und zum Teil schwer abbaubarem CSB ein.

Zur Ermittlung der Zulaufbelastung und des Trockenwetterzuflusses der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden die Betriebsdaten aus den Jahren 2012-2014 herangezogen und ausgewertet. Bei der Auswertung werden die Betriebsdaten zur Zulaufbelastung und zum Schlammanfall ausgewertet und auf ihre Plausibilität untereinander geprüft.

Die Probenahmestelle zur Messung der Zulaufkonzentrationen befindet sich vor der Vorklärung. Die Beprobung erfolgt als zeitproportionale 24 h-Mischprobe. Die Analyse der Mischproben wird vom Betrieb der Kläranlage zweimal pro Woche an Werktagen durchgeführt. Parallel zur Zulaufbeprobung werden Proben im Ablauf der Vorklärung genommen und analysiert.

Das Trübwasser der Voreindickung wird in den Zulauf der Vorklärung eingeleitet und ist somit in Teilen in der Beprobung des „Ablauf Vorklärung“ enthalten. Das Zentrat aus der Schlammwässerung kann wahlweise direkt in die Belebungsbecken oder seit 2015 in den Zulauf zur Vorklärung eingeleitet werden. Dementsprechend ist das Zentrat in den Beprobungen der Jahre 2012 bis 2014 nicht enthalten. Das Zentrat wird jedoch separat etwa 12 mal pro Jahr analysiert.

Zur Ermittlung der Belastungen im Zulauf zur Kläranlage und im Ablauf der Vorklärung wurden die in Tabelle 6 dargestellten spezifischen Kennwerte verwendet.

Tabelle 6: Spezifische Kennwerte zur Belastungsermittlung [g/(EW*d)]

	CSB	BSB₅	P_{ges}	NH₄-N	N_{ges}
Zulauf	120	60	1,8	7	11
Ablauf VK	80	40	1,6	7	10

Im Mittel über alle Zulaufparameter wird die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock mit rd. 26.000 EW belastet. Die mittlere CSB-Zulaufbelastung liegt bei rd. 24.800 EW. Die Ammoniumbelastung im Zulauf zur Kläranlage und im Ablauf der Vorklärung ist mit rd. 30.000 EW im Vergleich zu den übrigen Werten leicht erhöht.

Für die verschiedenen Parameter wurde anhand der Betriebsdaten folgende durchschnittliche Zulaufbelastung in den Jahren 2012 bis 2014 ermittelt:

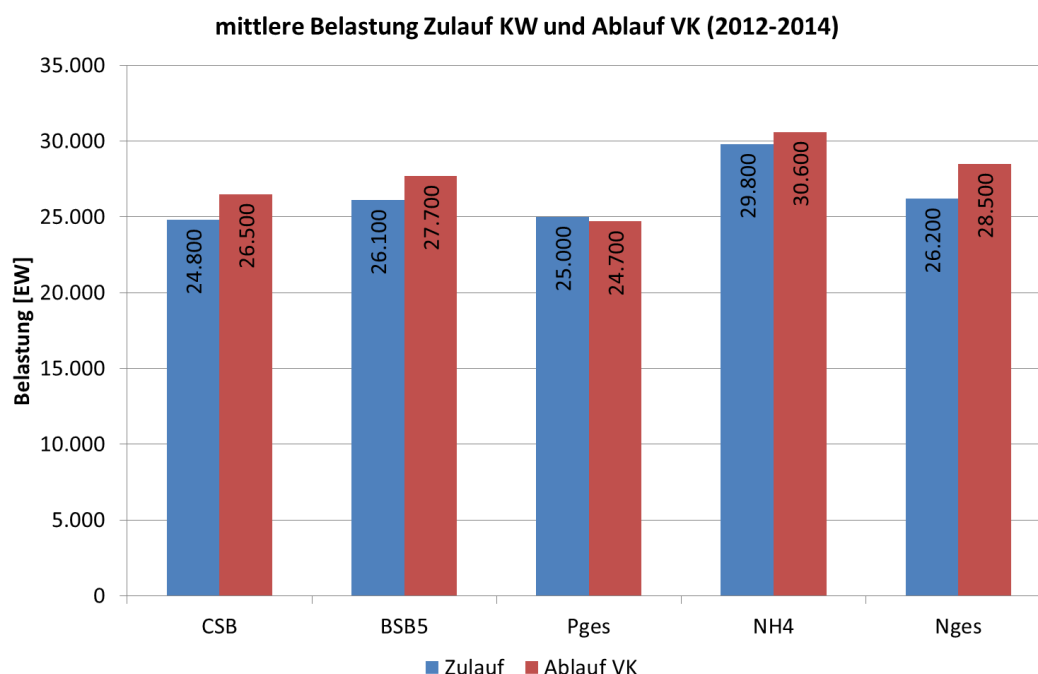


Abbildung 5: Mittlere Belastungen Zulauf und Ablauf Vorklärung Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock (2012-2014)

Die Schlamm Bilanz wird als Plausibilitätskontrolle der Zulaufbelastung ermittelt. Die RoS-Belastung liegt mit rd. 24.700 EW etwa auf demselben Niveau wie die CSB-Belastung im Zulauf des Klärwerks. Der ÜS-Anfall ist mit 27.000 EW leicht erhöht. Der vergleichsweise geringe Faulschlamm-Anfall von rd. 21.200 EW lässt auf einen erhöhten Abbaugrad in der Faulung schließen. Dies wird durch den

relativ hohen Klärgas-Anfall von rd. 29.500 EW bestätigt. Diese Erkenntnis steht im Einklang mit früheren Studien [18].

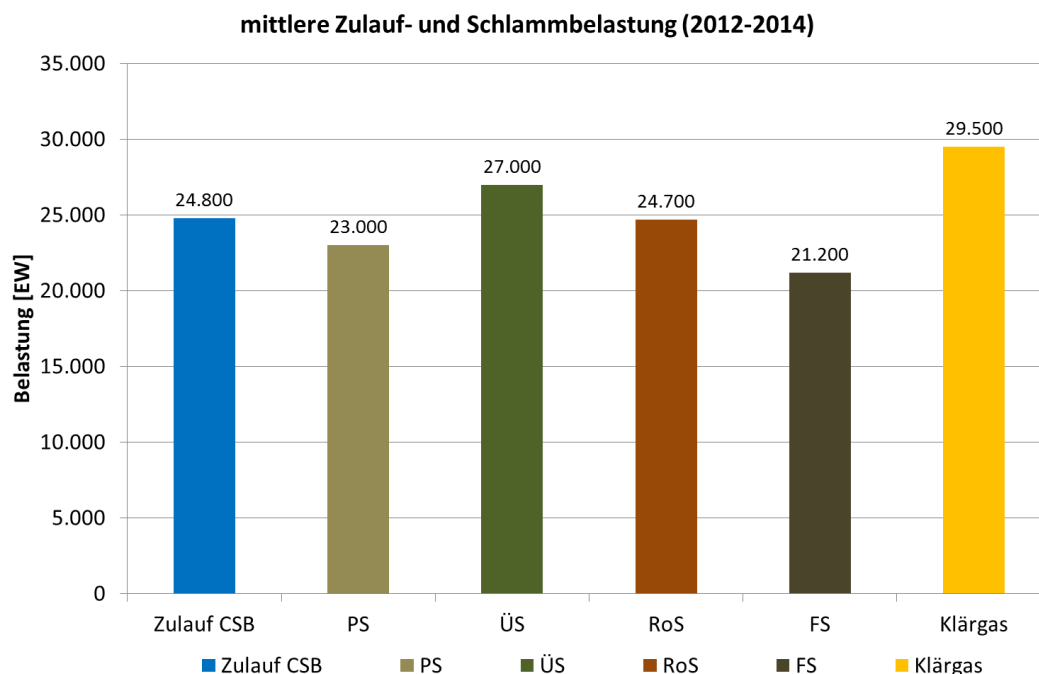


Abbildung 6: Mittlere Zulauf- und Schlammbelastung Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock (2012-2014)

Auf Grundlage der Betriebsdaten von 2012 bis 2014 konnten die Belastungen der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock im Zulauf, im Ablauf der Vorklärung und durch den Schlammfall ermittelt werden. Die ermittelten Belastungen sind in sich schlüssig, sodass auf dieser Grundlage die maßgebende Belastung der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock ermittelt werden kann.

Die mittlere BSB₅-Belastung im Zulauf von rd. **26.000 EW** wird als maßgebende Kläranlagenbelastung angenommen, da dies die übrigen Belastungswerte am besten abbildet.

Der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock fließen täglich im Mittel rd. 6.300 m³ Abwasser zu. An 85 % der Tage fließen nicht mehr als rd. 8.200 m³/d der Anlage zu. Insgesamt wurde im betrachteten Zeitraum von drei Jahren die genehmigte Abgabemenge von 1.120 m³/h entsprechend 26.880 m³/d ganztägig nicht erreicht. Jedoch kann diese Maximal-Belastung stundenweise durchaus auftreten. Der mittlere Trockenwetterzufluss zur Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock gemäß

ATV-DVWK-A 198 beträgt rd. 5.100 m³/d. Der Spitzenabfluss bei Trockenwetter gemäß ATV-DVWK-A 198 beträgt rd. 8.200 m³/d [20].

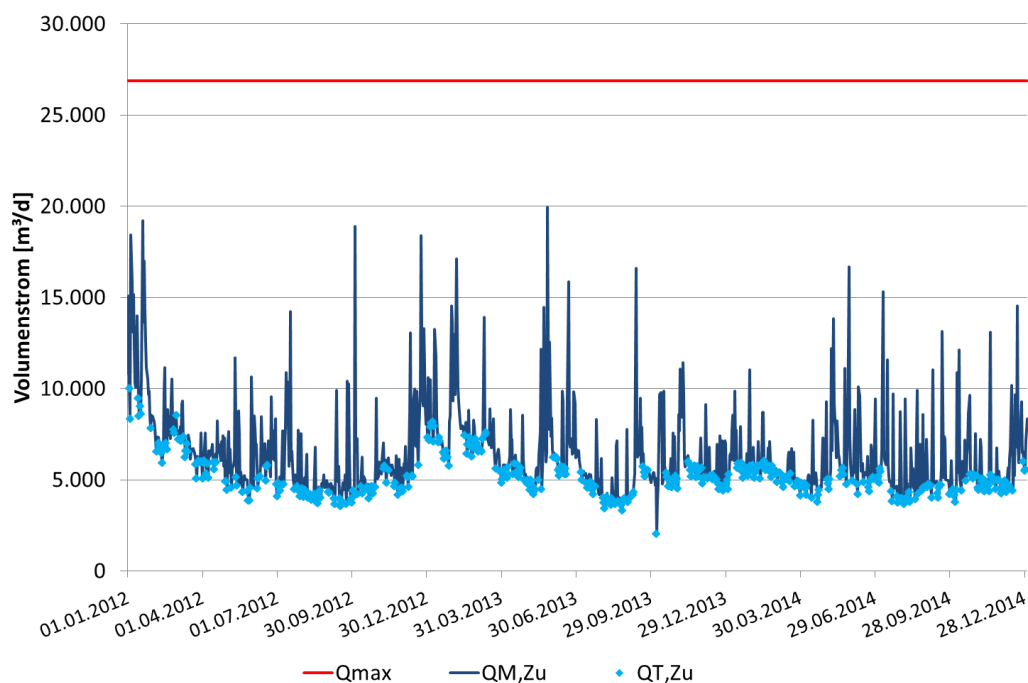


Abbildung 7: Misch- und Trockenwetterzufluss Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock (2012-2014)

Für die Bewertung der Umsetzbarkeit einer weitergehenden Spurenstoffelimination ist die Abwasserbeschaffenheit im Zulauf zur Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination relevant, also in diesem Fall der Ablauf der Nachklärung. Von besonderer Bedeutung sind dabei die CSB- bzw. DOC- und die NO₂-N-Konzentrationen. Es liegen keine DOC-Messwerte von der KA Schloß Holte-Stukenbrock vor, so dass für die folgende Auslegung der verschiedenen Verfahrensvarianten die DOC-Belastung aus der CSB-Belastung abgeschätzt werden muss. Für den Ablauf der Nachklärung liegen jedoch weder CSB- noch NO₂-N-Messwerte vor. Es wird für diese Studie davon ausgegangen, dass im Schönungsteich keine relevanten Prozesse zur Änderung der CSB- oder NO₂-N-Konzentration stattfinden. Daher werden die Ablaufwerte des Schönungsteiches zur Bemessung der Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination zugrunde gelegt.

Abbildung 8 illustriert, dass sowohl die CSB- wie auch die NO₂-N-Konzentrationen im Ablauf des Schönungsteiches seit Ende 2013 gesunken sind. Die maximale

CSB-Konzentration in 2014 lag bei 37 mg/l und die NO₂-N-Konzentrationen unterschritten an 85 % der beprobten Tage einen Wert von 0,18 mg/l.

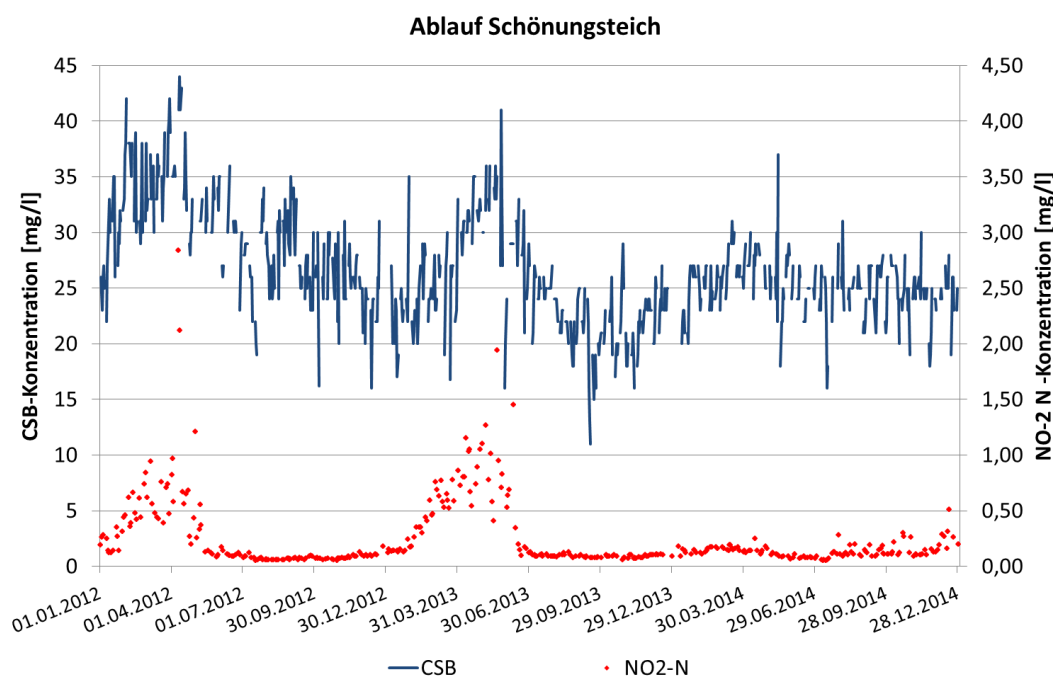


Abbildung 8: CSB- und NO₂-N-Konzentrationen im Ablauf Schönungsteich

Grundsätzlich wird für die nachfolgende Auslegung der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination vorausgesetzt, dass die Nachklärung ausreichend dimensioniert und optimiert ist, und daher gut funktioniert. Für diesen Fall ist die organische Hintergrundbelastung erfahrungsgemäß ausreichend gering, um eine nachgeschaltete vierte Reinigungsstufe effizient betreiben zu können.

3.3 Spurenstoffbelastung

Die Spurenstoffbelastung im Ablauf des Klärwerks wurde zunächst über eine volumenproportionale 48-h-Mischprobe von Ende Mai 2012 ermittelt. Durch die OWL Umweltanalytik GmbH wurden insgesamt 16 Spurenstoffe sowie die zugehörige Durchflussmenge während der Probenahme messtechnisch erfasst. Die analysierten Spurenstoffe entstammen den Bereichen der Pharmaka, Diagnostika, Industriechemikalien und Lebensmittelindustrien.

Im Mai 2015 wurde eine weitere Messreihe von OWL Umweltanalytik GmbH durchgeführt, bei der drei aufeinander folgende 24-h-Mischproben aus dem Ablauf der Kläranlage und jeweils eine Stichprobe aus dem Vorfluter oberhalb und unter-

halb der Kläranlageneinleitung analysiert wurden. In allen fünf Proben wurden 23 Spurenstoffe analysiert (Pharmaka, Diagnostika, Pestizide, Industriechemikalien und endokrin wirksame Substanzen (EDCs)) und im Ablauf der Kläranlage zusätzlich Bromid.

Weiter wurden zur Ermittlung der Gewässerbelastung Abflussdaten des Pegels Kaunitz von 2007 bis 2014 sowie Spurenstoffbelastungen von drei umliegenden Übersichtsmessstellen (GÜS-Messstellen Nr. 719500, 719912 und 719006) von 2007 bis 2013 vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) abgefragt und zur Verfügung gestellt.

3.3.1 Abwasseranteil im Vorfluter

Bei der Ermittlung der Gewässerbelastung durch eine Abwasserreinigungsanlage ist der Abwasseranteil im Gewässer ein wichtiger Indikator. In NRW wird ein Abwasseranteil von mehr als einem Drittel des Niedrigwasserabflusses als kritisch erachtet [2]. Der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) im Vorfluter der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock am Pegel unterhalb der Klärwerkseinleitung (Pegel Kaunitz) beträgt rd. $0,092 \text{ m}^3/\text{s}$ entsprechend rd. $7.900 \text{ m}^3/\text{d}$. Die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock leitet bei Trockenwetter im Mittel rd. $5.100 \text{ m}^3/\text{d}$ ein. Daraus lässt sich der Spitzenabfluss bei Trockenwetter zu rd. $343 \text{ m}^3/\text{h}$ entsprechend rd. $8.200 \text{ m}^3/\text{d}$ ermitteln. Aus diesem Spitzentrockenwetterabfluss resultiert ein Abwasseranteil von 100 % im Gewässer bei mittlerem Niedrigwasserabfluss. Für diesen Lastfall würden daher die Gewässergrenzwerte direkt als Ablaufgrenzwerte für den Kläranlagenablauf gelten.

Betrachtet man die täglichen Abflüsse der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock sowie den täglichen Abfluss im Vorfluter am Pegel Kaunitz, so ergibt sich für die Jahre 2012 bis 2014 wie in Abbildung 9 dargestellt ein mittlerer Abwasseranteil im Gewässer von rd. 34 %. Sowohl der Abwasseranteil bei Trockenwetter, wie auch der mittlere Abwasseranteil im Gewässer in den letzten vier Jahren liegen über dem für das Gewässer als kritisch erachteten Wert von rd. 33 % Abwasseranteil. Somit ist aus Sicht der umweltpolitischen Konzeption in Nordrhein-Westfalen das Gewässer Wapelbach am Pegel Kaunitz als kritisch mit Abwasser belastet einzustufen [2].

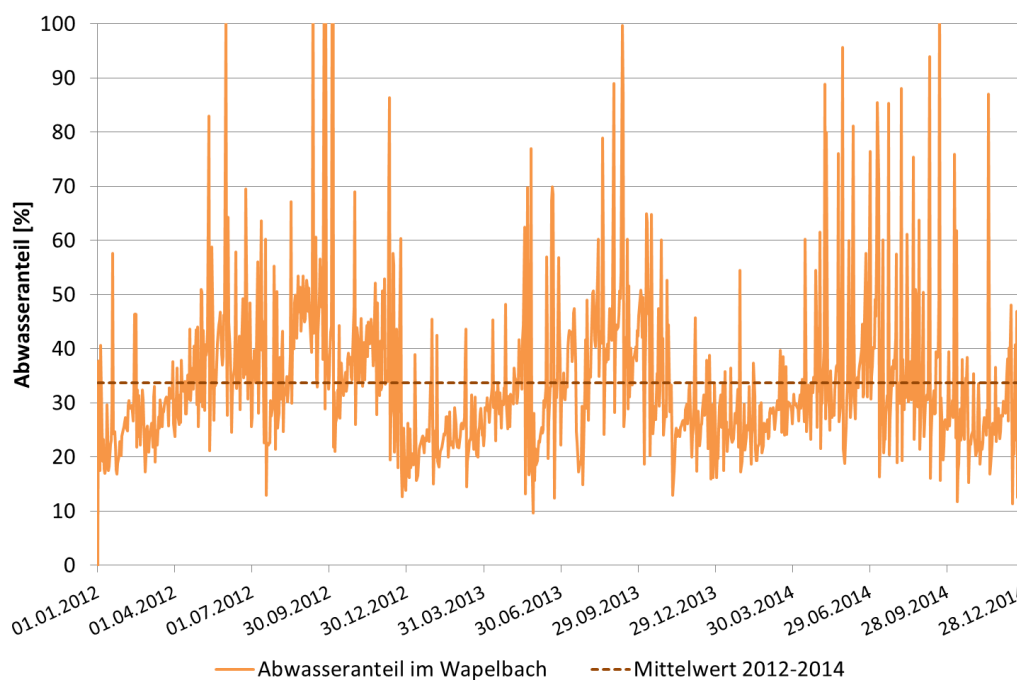


Abbildung 9: Abwasseranteil im Vorfluter Wapelbach am Pegel Kaunitz (2012-2014)

3.3.2 Spurenstoffbelastung im Kläranlagenablauf

Die Ergebnisse der Spurenstoffanalysen im Ablauf des Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 im Vergleich zu den Belastungswerten anderer Kläranlagenabläufe in NRW und der Schweiz dargestellt. Aufgrund der Bandbreite der Spurenstoffe wurden in den unterschiedlichen Messprogrammen unterschiedliche Spurenstoffe analysiert. Deshalb liegt nicht für alle in der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock analysierten Spurenstoffe ein Vergleichswert vor.

Die beiden Vergleiche zeigen, dass sowohl im Mai 2012 wie auch im Mai 2015 die Ablaufkonzentrationen der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock für die jeweils analysierten Spurenstoffe sehr gut mit den Ablaufkonzentrationen anderer Kläranlagen in NRW und der Schweiz vergleichbar sind. Lediglich die Konzentrationen der Industriechemikalie Benzotriazol und des Beta-Blockers Metoprolol liegen in beiden Untersuchungen am oberen Rand der Vergleichswerte, während nur der Betablocker Sotalol im Mai 2012 über den Vergleichswerten lag. Andere Spurenstoffe dagegen, wie beispielsweise Bisoprolol (Beta-Blocker), Oxazepam (Anxiolytikum) und Iomeprol (Röntgenkontrastmittel), waren im Mai 2015 in geringeren

Konzentrationen im Kläranlagenablauf von Schloß Holte-Stukenbrock enthalten, als in den Vergleichskläranlagen. Insgesamt scheint jedoch die Belastung des Kläranlagenablaufes durch Spurenstoffe in Schloß Holte-Stukenbrock in einem für NRW und der Schweiz üblichen Rahmen zu liegen.

Besondere Beachtung ist, im Hinblick auf eine mögliche Ozonbehandlung des Kläranlagenablaufes, der Bromidkonzentration zu widmen. Durch die Ozonung kann Bromid zu kanzerogenem Bromat oxidiert werden. Im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden zwischen 70 µg/l und 150 µg/l Bromid festgestellt. Untersuchungen an den Ozonanlagen in Bad Sassendorf und Duisburg-Vierlinden stellten jedoch fest, dass bei den vorliegenden Bromidkonzentrationen wenn überhaupt erst bei sehr hohen spez. Ozondosen ($\geq 0,8 \text{ mgO}_3/\text{mgDOC}$) problematische Bromat-Konzentrationen auftreten. Daher ist eine Ozonanlage auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock nicht von vorn herein ungeeignet, doch die Bromatbildung sollte im Falle einer Ozonung des Kläranlagenablaufes beobachtet werden.

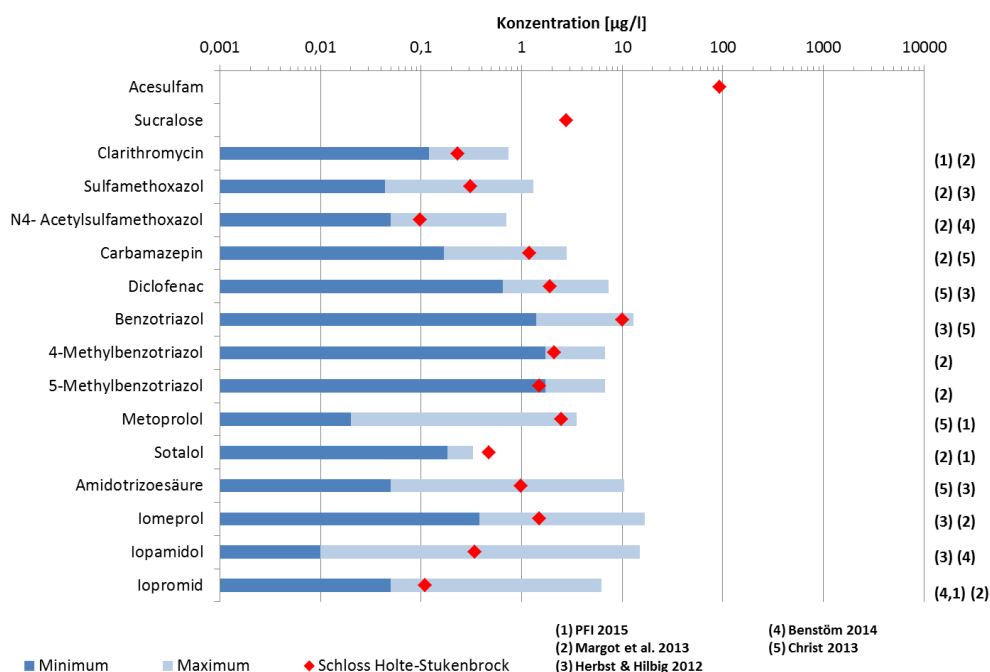


Abbildung 10: Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock im Mai 2012 (48-h-Mischprobe) im Vergleich zu anderen Anlagen in NRW und der Schweiz [21][17][22][23][24]

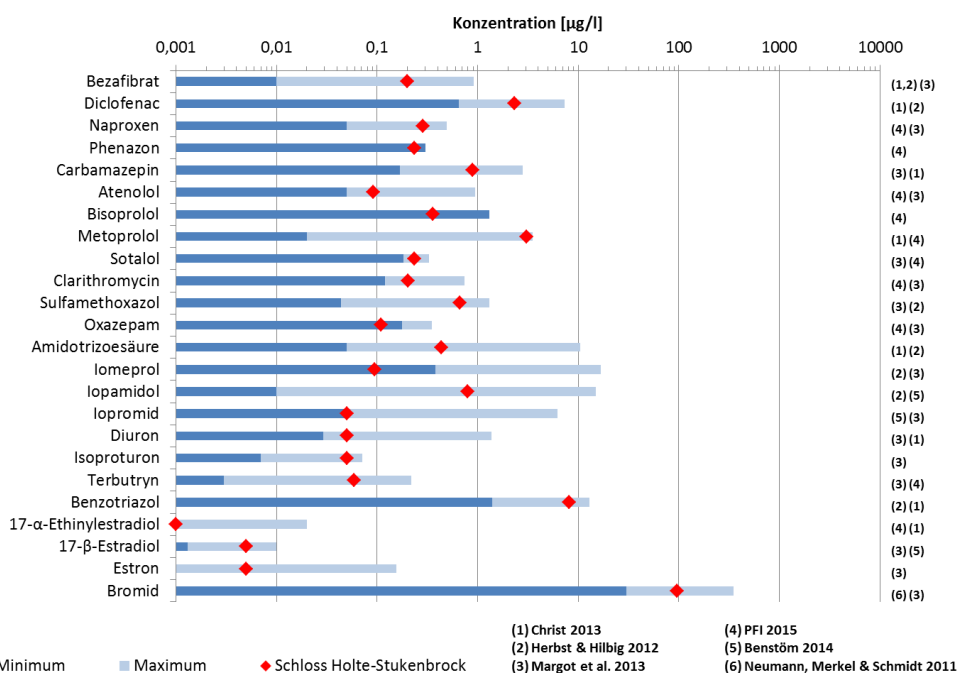


Abbildung 11: Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock im Mai 2015 (Mittelwert aus drei 24-h-Mischproben) im Vergleich zu anderen Anlagen in NRW und der Schweiz [24][22][17][21][23][25]

Die ermittelten Konzentrationen der meisten Spurenstoffe in den insgesamt vier Einzelproben sind untereinander gut vergleichbar. Nur die Konzentrationen der Diagnostika variieren stark. Dies liegt daran, dass Röntgenkontrastmittel nur sehr punktuell verwendet und innerhalb weniger Stunden nach der Einnahme vom Patienten zum größten Teil wieder ausgeschieden werden. Dadurch resultieren zwangsläufig starke Konzentrationsschwankungen im Ablauf von Kläranlagen. Da die Konzentrationsschwankungen der anderen analysierten Spurenstoffe eher gering sind, werden die folgenden Untersuchungen mit gemittelten Spurenstoffkonzentrationen durchgeführt.

Die im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock gemittelten Spurenstoffkonzentrationen und die aus der Klärwerkseinleitung resultierenden mittleren Spurenstoffkonzentrationen im Gewässer zu den Zeitpunkten der Probenahmen sind in Tabelle 7 dargestellt. Weiter sind die vorhandenen Gewässer-Grenzwerte, sogenannte Umweltqualitätsnormen (UQN), aus der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) [26] sowie die allgemeinen Vorsorgewerte, die derzeit in der Fachwelt für Spurenstoffe diskutiert werden [2], dargestellt. Darüber hinaus wur-

den vom Schweizerischen Zentrum für angewandte Oekotoxikologie (Oekotoxzentrum) Vorschläge für UQN erarbeitet [27], die ebenfalls mit dargestellt sind. Von den analysierten Mikroverunreinigungen existieren nur für zwei Herbizide (Diuron und Isoproturon) Umweltqualitätsnormen in der OGewV, die jedoch im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock nicht oberhalb ihrer Bestimmungsgrenze von 0,05 µg/l nachgewiesen werden konnten. Die durch die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock eingeleitete Fracht führte zu den jeweiligen Zeitpunkten der Probenahmen im Mittel bei insgesamt 17 der 29 analysierten Spurenstoffe zu einer Überschreitung des allgemeinen Vorsorgewertes im Gewässer. Neun der 17 Spurenstoffe, deren Vorsorgewerte durch die Klärwerkseinleitung im Gewässer überschritten werden, gehören zu den Pharmaka, drei weitere zu den Diagnostika und zwei zu den Süßstoffen. Die letzten drei Spurenstoffe mit einer Überschreitung gehören zu der Gruppe der Komplexbildner, die unter anderem als Korrosionsschutzmittel in Geschirrspül- und Frostschutzmitteln zum Einsatz kommen. Werden die vom Oekotoxzentrum vorgeschlagenen UQN zugrunde gelegt, so liegen für sechs Spurenstoffe Überschreitungen des chronischen Qualitätskriteriums vor und für das Antibiotikum Clarithromycin auch eine Überschreitung des akuten Qualitätskriteriums.

Tabelle 7: Gemittelte Spurenstoffkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock und resultierende Belastungen im Gewässer verglichen mit UQN, Vorschlägen für UQN und allgemeinen Vorsorgewerten [26][27][28]. Überschreitungen im Gewässer sind farblich markiert.

Stoffbezeichnung	Einheit	Konzentration im		UQN nach OGeW		UQN nach Oekotoxzentrum		allg. Vorsorgewert
		Ablauf	Gewässer	JD-UQN	ZHK-UQN	JD-UQN	ZHK-UQN	
Acesulfam	µg/l	93	59,413					0,1
Sucralose	µg/l	2,8	1,789					0,1
Bezafibrat	µg/l	0,2	0,1			0,46	76	0,1
Diclofenac	µg/l	2,225	1,188			0,05		0,1
Naproxen	µg/l	0,283	0,141			1,7	370	0,1
Phenazon	µg/l	0,233	0,116					0,1
Carbamazepin	µg/l	0,968	0,605			0,5	2550	0,1
Atenolol	µg/l	0,092	0,046			150	330	0,1
Bisoprolol	µg/l	0,36	0,179					0,1
Metoprolol	µg/l	2,925	1,562			64	76	0,1
Sotalol	µg/l	0,293	0,208					0,1
Clarithromycin	µg/l	0,21	0,124			0,06	0,11	0,1
Sulfamethoxazol	µg/l	0,578	0,265			0,6	2,7	0,1
N4-Acetylsulfamethoxazol	µg/l	0,097	0,062					0,1
Oxazepam	µg/l	0,11	0,055					0,1
Amidotrizoesäure	µg/l	0,573	0,422					0,1
lomeprol	µg/l	0,446	0,503					0,1
lopamidol	µg/l	0,685	0,308					0,1
lopromid	µg/l	<0,065	<0,048					0,1
Diuron	µg/l	<0,05	<0,025	0,2	1,8	0,02	0,06	0,1
Isoproturon	µg/l	<0,05	<0,025	0,3	1	0,32	1,2	0,1
Terbutryn	µg/l	<0,059	<0,029			0,065	0,34	0,1
Benzotriazol	µg/l	8,6	5,219			30	120	0,1
4-Methylbenzotriazol	µg/l	2,1	1,342					0,1
5-Methylbenzotriazol	µg/l	1,5	0,958					0,1
17-alpha-Ethinylestradiol	ng/l	<1	<0,498			0,037		100
17-beta-Estradiol	ng/l	<5	<2,489			0,4		100
Estron	ng/l	<5	<2,489			3,6		100
Bromid *	mg/l	0,097	0,048					0,01

*) Bromat-Grenzwert im Trinkwasser = 0,01 mg/l (TrinkwV) verwendet

Die Gegenüberstellung der resultierenden Konzentrationen im Gewässer mit den UQN, den vorgeschlagenen UQN und dem allgemeinen Vorsorgewert darf nicht als „die“ Belastungssituation des Vorfluters durch die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock verstanden werden. Vielmehr stellt sie eine Momentaufnahme als Mittelung der vier analysierten Ablaufproben dar. Unabhängig von ihrer Allgemein(un)gültigkeit zeigt sie deutlich, dass ohne gesetzlich festgelegte Grenzwerte

eine Bewertung von Kläranlageneinleitungen in die jeweiligen Vorfluter nicht abschließend erfolgen kann.

Sollte es in Zukunft eine gesetzliche Regelung geben, so kann diese grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen. Es können emissionsorientierte Grenzwerte für die Kläranlagenabläufe festgeschrieben werden, wie sie für die Standard-Parameter CSB, BSB₅, N_{ges} und P_{ges} existieren, oder immissionsorientierte Gewässergrenzwerte. Im ersten Fall lägen klare Ablaufgrenzwerte vor, deren Einhaltung im Ablauf der Kläranlage überprüft werden müsste. Im zweiten Fall wären die Ablaufgrenzwerte jeder Kläranlage individuell aus den Gewässergrenzwerten und den Abwasseranteilen im Gewässer zu ermitteln. Dies könnte für einen Bemessungslastfall wie beispielsweise den in NRW derzeit für die kritische Abwasserbelastung herangezogenen mittleren Niedrigwasserabfluss erfolgen oder stufenweise für mehrere Bemessungspunkte. Bei mittlerem Niedrigwasserabfluss führt der Vorfluter Wapelbach am Pegel Kaunitz zu 100 % das gereinigte Abwasser aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock, sodass zukünftige Gewässergrenzwerte für diesen Lastfall direkt im Kläranlagenablauf einzuhalten wären. Je geringer der Abwasseranteil im Vorfluter wäre, und je größer damit die Verdünnung, desto geringer könnten auch die Ablaufgrenzwerte für die einleitenden Kläranlagen ausfallen.

Beispielhaft werden im Folgenden die aus den mittleren Ablaufkonzentrationen in 2012 und 2015 resultierenden Gewässerbelastungen mit potentiellen zukünftigen Gewässergrenzwerten verglichen. Während der Probenahmen führte der Vorfluter am Pegel gut 50 % gereinigtes Abwasser aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock. Wäre der allgemeine Vorsorgewert von 0,1 µg/l als Gewässergrenzwert gültig gewesen, so wären an den Probenahmetagen am Pegel Kaunitz die in Abbildung 12 dargestellten Überschreitungen (gelb) festgestellt worden. Dagegen zeigt Abbildung 13 dieselbe Situation mit den vorgeschlagenen UQN des schweizerischen Oekotoxizentrums statt des allgemeinen Vorsorgewertes. Beide Vergleiche setzten einen spurenstofffreien Vorfluter oberhalb der Kläranlageneinleitung voraus.

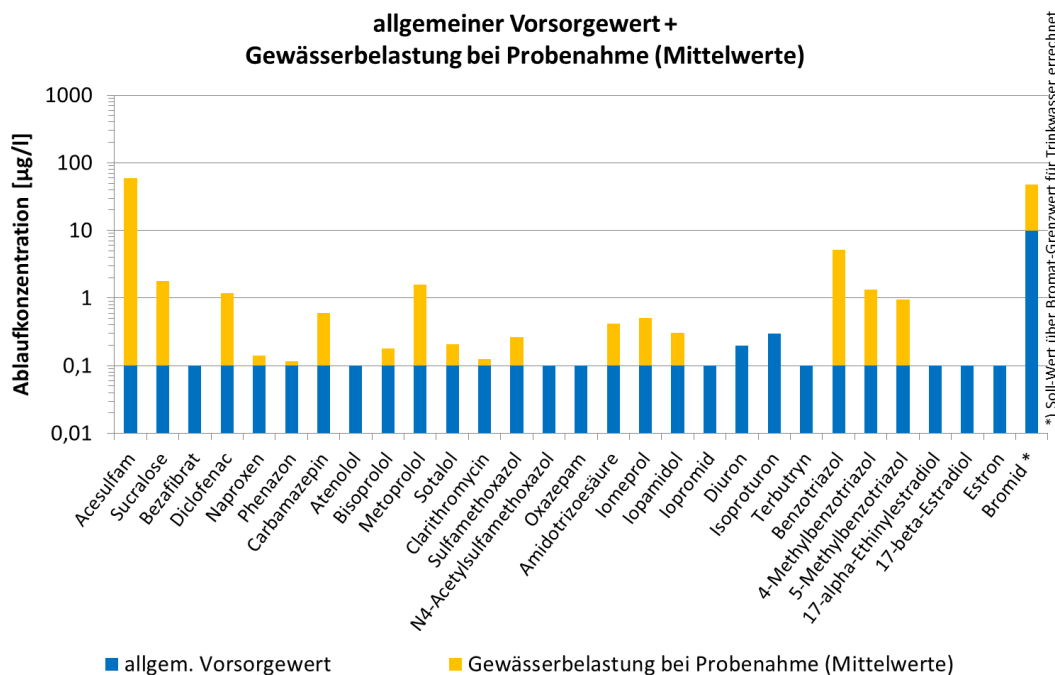


Abbildung 12: Resultierende Gewässerbelastung aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock bei gut 50 % Abwasseranteil im Vergleich zum allgemeinen Vorsorgewert von 0,1 µg/l

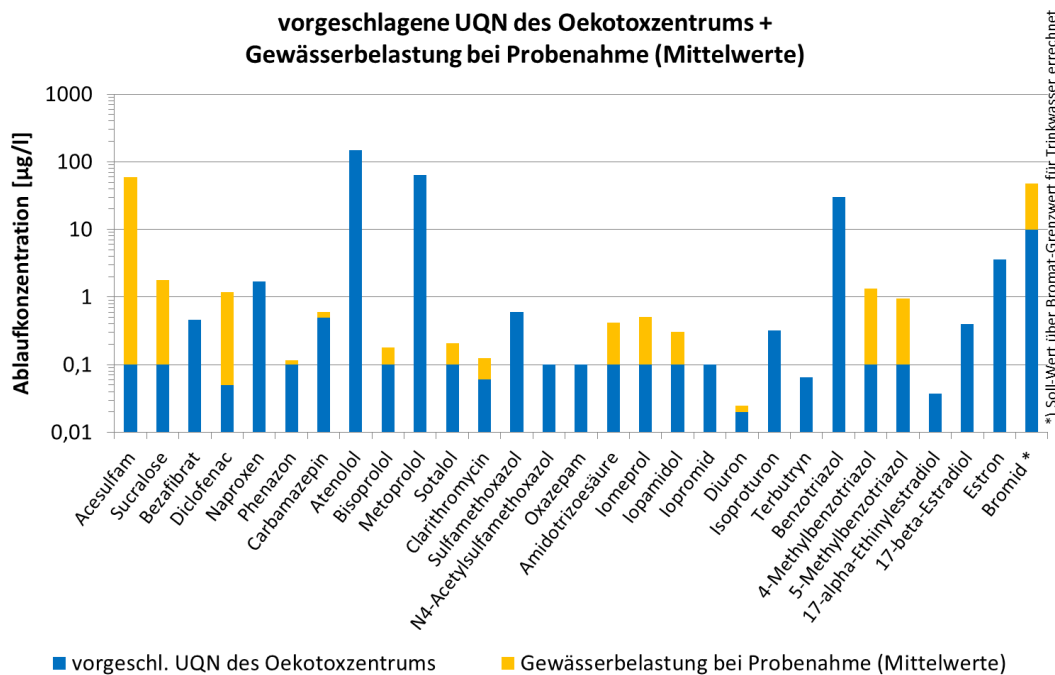


Abbildung 13: Resultierende Gewässerbelastung aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock bei gut 50 % Abwasseranteil im Vergleich zu vorgeschlagenen UQN des Oekotoxenzentrums (CH)

Diese beiden Beispiele zeigen ebenfalls auf, dass eine exakte Beurteilung der Einleitungssituation ohne definierte gesetzliche Grundlage und umfassende Analytik ungenau bleibt.

Das Kompetenzzentrum Mikroschadstoff.NRW hat am 20.03.2015 eine „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ veröffentlicht. Als Überwachungsparameter für eine Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination werden darin Metoprolol, Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol, 1H-Benzotriazol und Terbutryn vorgeschlagen. Sollte sich der allgemeine Vorsorgewert von 0,1 µg/l als Gewässergrenzwert durchsetzen, so würden bei mittlerem Niedrigwasserabfluss derzeit fünf von sechs Überwachungsparametern durch den Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock überschritten werden. Würden die vom Ökotoxzentrum vorgeschlagenen UQN als Gewässergrenzwerte festgelegt, so würden diese bei MNQ immer noch von Diclofenac und Carbamazepin überschritten, während für die anderen vier Parameter der Grenzwert unterschritten bzw. gerade eben eingehalten werden würde.

3.3.3 Spurenstoffbelastung im Vorfluter unterhalb und oberhalb der KA

Betrachtet man nun die in 2007 im Vorfluter unterhalb der Kläranlageneinleitung erhobenen Daten zu 44 Spurenstoffen, so werden lediglich für zwei dieser Stoffe überhaupt einzelne Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze festgestellt. Überschreitungen aktuell vorhandener Grenzwerte werden nicht festgestellt. Jedoch fällt auf, dass die Bestimmungsgrenze für den Parameter Parathion-ethyl über dem Grenzwert nach OGeV liegt. Dadurch ist für diesen Parameter keine Aussage über Überschreitung bzw. Einhaltung des Grenzwertes möglich. Bei den beiden quantifizierten Spurenstoffen handelt es sich zum einen um das Pflanzenschutzmittel Diuron und zum anderen um das Antiepileptikum Carbamazepin.

Diuron wurde nur in einer von vier Gewässerproben nachgewiesen und überschreitet die Qualitätskriterien aus der OGeV nicht. Im Ablauf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurde es nicht oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Daher scheint ein Diuron-Eintrag nicht in erster Linie auf die Kläranlageneinleitung zurückzuführen zu sein.

Carbamazepin dagegen wird ausschließlich als Humanpharmaka verwendet. Sein Eintrag in die Gewässer erfolgt daher zum allergrößten Teil über Kläranlagenein-

leitungen oder Mischwasserentlastungen. Unterhalb der Klärwerkseinleitung wurde es in allen vier Gewässerproben mit im Mittel rd. 0,153 µg/l quantifiziert, wobei seine Konzentration in drei von vier Gewässerproben oberhalb des allgemeinen Vorsorgewertes von 0,1 µg/l vorlag. Auch im Kläranlagenablauf liegen die analysierten Konzentrationen deutlich über dem allgemeinen Vorsorgewert.

Die vom LANUV zur Verfügung gestellten Daten weisen leider keinen zeitlichen Zusammenhang zwischen den Probenahmen oberhalb der Kläranlage (2010), unterhalb der Kläranlage (2007) und im unterhalb der Kläranlageneinleitung gelegenen Zulauf (2009, 2012) auf. Daher kann auf Grundlage dieser Daten kein Vergleich der Carbamazepin-Konzentrationen oberhalb und unterhalb der Kläranlageneinleitung angestellt werden.

Um die Vorbelastung des Vorfluters mit Spurenstoffen und den Einfluss der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock auf die Belastung des Vorfluters dennoch abschätzen zu können wurden von OWL Umweltanalytik GmbH im Zuge der Probenahmen im Ablauf der Kläranlage im Mai 2015 auch aus dem Vorfluter Proben entnommen und analysiert. Es wurde oberhalb und unterhalb der Kläranlageneinleitung jeweils eine Stichprobe entnommen und auf die gleichen 23 Spurenstoffe hin analysiert, wie die Mischproben aus dem Kläranlagenablauf. Auf eine Erfassung von Bromid im Gewässer wurde verzichtet, da diese Konzentration nur mit Hinblick auf eine Ozonbehandlung des analysierten Volumenstromes relevant ist.

Die in Frachten umgerechneten Analyseergebnisse der Stichproben aus dem Gewässer zeigen deutlich, dass der Großteil der Spurenstoffbelastung im Gewässer unterhalb der Kläranlageneinleitung aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock stammt. Tatsächlich wurde oberhalb der Kläranlageneinleitung nur Benzotriazol oberhalb seiner Bestimmungsgrenze nachgewiesen, während alle anderen analysierten Spurenstoffe nicht in quantifizierbaren Mengen vorlagen (siehe Abbildung 14). Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Vorfluter Wapelbach oberhalb der Kläranlageneinleitung nahezu unbelastet von Spurenstoffen ist.

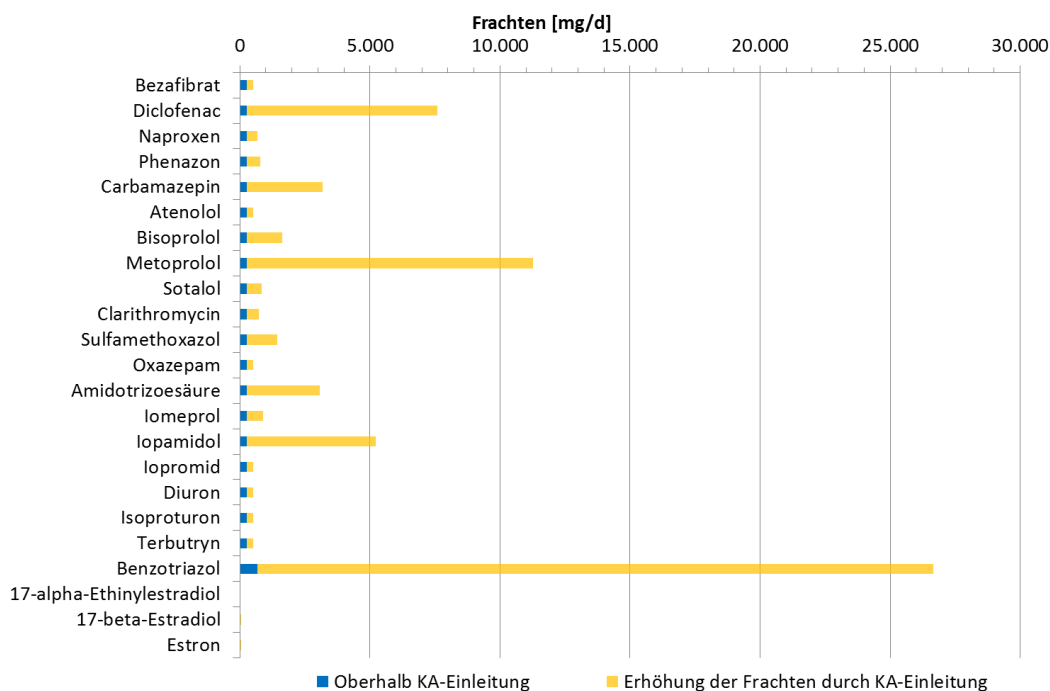


Abbildung 14: Anteil an Spurenstofffrachten im Vorfluter durch die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock (Mai 2015)

Unterhalb der Einleitung und vor der oben betrachteten Gewässermessstelle mündet der Rodenbach in den Wapelbach. Dadurch werden die aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock stammenden Spurenstoffkonzentrationen verdünnt. Am Beispiel von Carbamazepin zeigt sich diese Verdünnung trotz der zeitlichen Differenz zwischen den Probenahmen in der resultierenden Gewässerbelastung durch die KA-Einleitung von rd. 0,443 µg/l (2015) und der an der Gewässermessstelle festgestellten mittleren Konzentration von rd. 0,153 µg/l (2007). Aufgrund dieser Verdünnung liegt die mittlere Carbamazepin-Konzentration zwar unter der vom Oekotoxzentrum vorgeschlagenen UQN, jedoch immer noch über dem allgemeinen Vorsorgewert.

4. Variantenuntersuchung für die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Für die Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock werden sechs verfahrenstechnische Varianten herausgearbeitet. Fünf davon betrachten einzelne Verfahrenstechniken, während die sechste Variante die Kombination von Ozon und GAK betrachtet.

4.1 Variante 1: Pulveraktivkohledosierung nach der Nachklärung

Auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock kann eine Spurenstoffelimination durch Pulveraktivkohle (PAK) erfolgen. Diese kann in einem Kontaktbecken mit dem mechanisch-biologisch vorgereinigten Abwasser in Kontakt gebracht werden. Zur Abscheidung der feindispersen PAK-Anteile ist eine Filtration erforderlich. Hier wird eine konventionelle Flockungsfiltration vorgesehen, da diese zusätzlich die Verringerung der P_{ges} -Ablaufkonzentration ermöglicht.

Eine PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken im Ablauf der Nachklärung und die dafür erforderliche Flockungsfiltration hätten einige direkten und indirekten Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock. Beim PAK-Einsatz ist ein um rd. 5 – 10 % erhöhter Schlammanfall zu beachten, der sowohl von den Schlammumpfen, wie auch von der Schlammbehandlung bewältigt werden muss. Im Falle des Faulbehälters, der derzeit eine Faulzeit von über 40 Tagen gewährleistet, stellt der erhöhte Schlammanfall voraussichtlich keine Probleme dar. Die vorhandene Schlammwässerungsanlage (SEA) soll 2016 erneuert werden. Eine erhöhte Schlammbelastung durch PAK könnte entsprechend berücksichtigt werden, sodass auch hier weder Einschränkungen noch Mehraufwand für eine PAK-Anlage erwartet werden. Darüber hinaus würde die Rückführung des bei der Filterspülung anfallenden Schlammwassers in den Zulauf zur Biologie eine kurzzeitig erhöhte hydraulische Belastung für die Belebungsbecken und die Nachklärung bedeuten. An 85 % der Tage von 2012 bis 2014 hätte diese zusätzliche Belastung jedoch nicht zu einer Überschreitung der maximalen Wassermenge geführt. Außerdem ist das vorhandene hydraulische Gefälle zwischen der Nachklärung und dem Schönungsteich nicht ausreichend, um ein weiteres Becken ohne zusätzliches Pumpwerk zu integrieren. Daher ist die Installation eines zusätzlichen Hebewerkes mit entsprechendem zusätzlichem Energieverbrauch erforderlich.

4.1.1 Dimensionierung

Zur Hebung des mechanisch-biologisch vorgereinigten Abwasserstromes in die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ist ein Zulaufhebwerk erforderlich. Aufgrund seiner Langlebigkeit und Robustheit wird hierfür ein Schneckenpumpwerk vorgesehen. Das Pumpwerk wird auf den maximal genehmigten Mischwasserzufluss von rd. 1.120 m³/h ausgelegt.

Ein Kontaktbecken für die PAK-Behandlung des mechanisch-biologisch vorgereinigten Abwassers sollte auf den Trockenwetterzufluss im Spitzenlastfall von rd. 343 m³/h und eine Kontaktzeit von mindestens 30 Minuten ausgelegt werden. Würde eine Sedimentationseinheit dem Kontaktbecken nachgeschaltet und die abgesetzte PAK in den Kontaktreaktor zurückgeführt werden, müsste ein PAK-Rücklaufverhältnis (RV_{PAK}) zwischen 0,5 und 1,0 berücksichtigt werden. Da auf dem Klärwerk Schloß Holte-Stukenbrock kein ungenutztes, als Sedimentationseinheit geeignetes Bauwerk vorhanden ist, und auch der zur Verfügung stehende Platz begrenzt ist wird auf eine Sedimentationseinheit verzichtet. Auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock soll das Kontaktbecken für die PAK-Behandlung auf den Trockenwetterzufluss im Spitzenlastfall ausgelegt werden. Die Beckenabmessungen werden jedoch großzügig gestaltet, um auch für den Mischwasseranfall eine akzeptable Kontaktzeit zu erzielen. Es wird ein Kontaktbeckenvolumen von rd. 188 m³ gewählt. Daraus resultiert eine ausreichende Kontaktzeit von rd. 33 Minuten bei Spitzentrockenwetterzufluss und rd. 10 Minuten für den maximalen Mischwasserzufluss. Dieser maximale Zufluss trat jedoch in den Jahren 2012 bis 2014 nicht über einen gesamten Tag ein und für den an 85 % der Tage unterschrittenen Kläranlagenzufluss kann eine Kontaktzeit von rd. 33 Minuten sichergestellt werden. Daher wird die geringe Kontaktzeit bei maximalem Zufluss als ausreichend erachtet. Zur Realisierung des gewählten Beckenvolumens wird ein Umlaufbecken mit einer Wassertiefe von 4,0 m vorgesehen. Die gewählte Breite beträgt 4,8 m, wodurch eine erforderliche Gesamtlänge des Kontaktbeckens von rd. 10,80 m resultiert. Damit die PAK im Kontaktbecken nicht auf den Beckenboden absinkt werden Rührwerke im Kontaktbecken vorgesehen.

Auf jeden Fall ist eine Filtration nach dem Kontaktbecken anzuordnen, um die PAK vollständig aus dem Abwasserstrom zu entfernen. Hierfür wird eine Flockungs-Raumfiltration gemäß des Arbeitsblattes ATV-DVWK-A 203 vorgesehen [29]. Zur Filtration sowohl des mit PAK behandelten Abwassers im Trockenwetter-

und Mischwasserlastfall sind 8 Filtereinheiten (jeweils 3,0 m x 4,0 m = 12 m²) mit einer Gesamtfilterfläche von 96 m² ausreichend. Für den Betrieb der Flockungsfiltration sind zusätzlich ein Spülwasserspeicher (V = 70 m³) sowie ein Schlammwasserspeicher (V = 120 m³) erforderlich. Die Filterspülung wird alle 24 h vorgesehen oder wenn ein bestimmter Filtervordruck unterschritten wird. Das Spülwasser würde in das Verteilerbauwerk zwischen Vorklärung und Belebung gegeben, um die abfiltrierten Feststoffe in den NKB mit dem Überschussschlamm abzuführen.

Das PAK-Silo wird, unter Berücksichtigung der Expansion der PAK beim Befüllen des Silos, so ausgelegt, dass eine LKW-Ladung PAK eingelagert werden kann. Diese Vorgehensweise hat sich aufgrund der i.d.R. langen Lieferwege von PAK als zielführend erwiesen. Daraus resultiert eine Standard-Silogröße von 70 m³ Nutzraum. Das Silo muss in Ex-Schutz ausgeführt werden, da die Gefahr von Staubexplosionen besteht.

Die Dosierung der PAK sollte über eine gravimetrische Dosieranlage volumenproportional zum Zufluss des Kontaktbeckens erfolgen. In Abhängigkeit des aktuellen Zuflusses ist schrittweise eine dosierte PAK-Menge einzustellen.

4.1.2 Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock ist keine freie Beckenkapazität vorhanden. Daher ist der Neubau aller für die PAK-Dosierung benötigten Bauwerke erforderlich. Dies umfasst ein PAK-Silo inkl. PAK-Dosierstation, ein Hebewerk, ein Kontaktbecken für die Spurenstoffsorption an die PAK und eine Filtration zur Abtrennung der PAK aus dem gereinigten Abwasser.

Das Kontaktbecken wird als Umlaufbecken im Ablauf der Nachklärung errichtet. Das zur Hebung des Abwassers erforderliche Pumpwerk wird im Zulauf zum Kontaktbecken angeordnet. Direkt im Ablauf des Kontaktbeckens wird die Flockungsfiltration vorgesehen. Das Schneckenpumpwerk, das Kontaktbecken und die Flockungsfiltration werden auf der freien Grünfläche neben der Biologie I parallel zur Ablaufleitung von den Nachklärbecken zum Schönungsteich errichtet. Diese Anordnung stellt kurze Fließwege zwischen den Verfahrensstufen sicher. In diesen Gebäudekomplex werden ebenfalls ein Schaltraum und eine neue Niederspannungsunterverteilung (NSUV) integriert.

Das erforderliche PAK-Silo mit der gravimetrischen Dosierstation kann auf der Grünfläche neben dem Verteilerbauwerk zur Biologischen Stufe errichtet werden. Dieser Standort ist für die PAK-Lieferung mit einem LKW gut zugänglich. Darüber hinaus ermöglicht die Nähe zum geplanten Standort des Kontaktbeckens eine kurze Rohrleitungsführung.

Die Dosierung der PAK sollte zum Schutz der Schneckenpumpen nicht in den Pumpensumpf des Hebewerkes erfolgen. Da Aktivkohle abrasiv und korrosiv wirkt, sollte hier auf die gute Durchmischung durch ein Schneckenpumpwerk verzichtet werden. Die Dosierung der PAK sollte vielmehr direkt in den Zulauf zum Kontaktbecken erfolgen.

Die Umsetzung der Variante 1 ist in Abbildung 15 schematisch dargestellt.

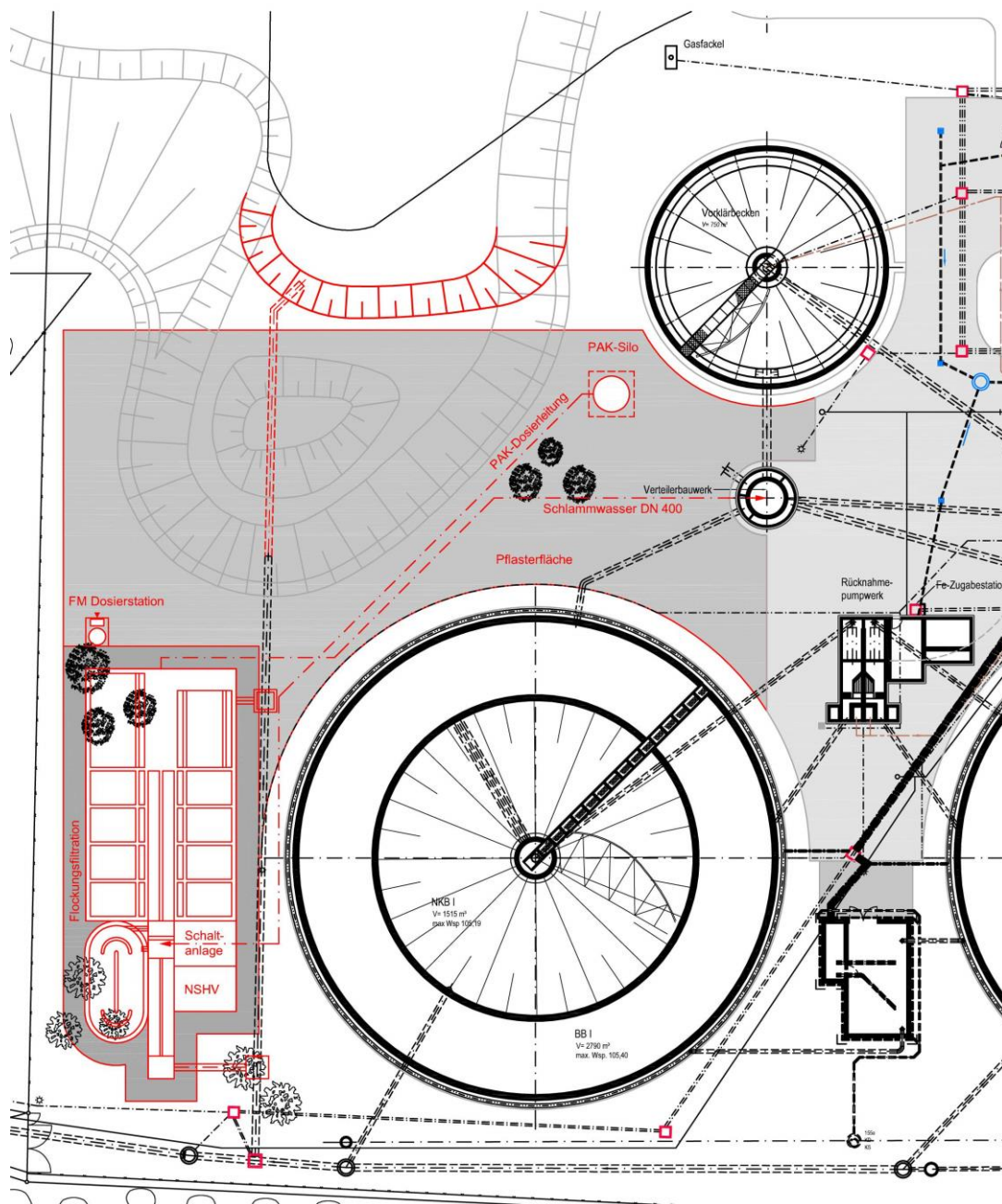


Abbildung 15: Umsetzung der Variante 1 auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

4.1.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 1 (PAK-Dosierung in Kontaktbecken) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden auf der Grundlage von vergleichbaren aktuel-

len Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau von Hebewerk, Kontaktbecken und Flockungsfiltration inkl. Fällmitteldosierstation
- Anschluss Zu-/Ablaufleitung an die Ablaufleitung von den Nachklärbecken zum Schönungsteich
- Errichtung eines Fundamentes für das PAK-Silo und die Dosierstation
- PAK-Silo einschl. Dosierstation und Schaltanlage
- Installation einer erdverlegten Dosierleitung vom PAK-Silo zum Kontaktbecken
- Verkleinerung des Schönungsteiches um rd. 1.000 m²
- Erstellung einer Rangierfläche für LKW
- Austausch des vorhandenen Trafo
- Errichtung einer neuen NSUV
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlamm Entsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB- und P_{ges} -Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % angesetzt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 30 Jahre angestellt. Als Preis für die

benötigte Energie wird der in der Energieanalyse verwendete Strompreis von 0,18 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 8 bis Tabelle 10 sind die Herstellungskosten für eine Aktivkohledosierung in ein Kontaktbecken nach der Nachklärung dargestellt. Tabelle 11 fasst die zugehörigen Barwerte und Jahreskosten zusammen.

Tabelle 8: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Bautechnik) für Variante 1: PAK in Kontaktbecken

Herstellungskosten Variante 1: PAK in Kontaktbecken nach NKB	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Bautechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	123.000	123.000
Wandbeton inkl. Bewehrung	700	m ³	800	560.000
Deckenbeton inkl. Bewehrung	100	m ³	600	60.000
Sohlbeton inkl. Bewehrung	200	m ³	400	80.000
Erdarbeiten	2.600	m ³	30	78.000
Verkleinerung Schönungsteich um 1.000 m ²	1	psch	40.000	40.000
Frostschutz Fundament Kontaktreaktor	1	psch	3.000	3.000
Frostschutz Fundament PAK-Silo	1	psch	1.200	1.200
Straßen und Wege	1.800	m ²	120	216.000
Oberflächenentwässerung	1	psch	4.000	4.000
Wanddurchdringungen für DN 600	5	Stck	1.600	8.000
Wanddurchdringungen für DN 500	18	Stck	1.500	27.000
Wanddurchdringungen für DN 400	2	Stck	1.400	2.800
Wanddurchdringungen für DN 250	8	Stck	1.000	8.000
Wanddurchdringungen für DN 200	9	Stck	1.000	9.000
Wasserhaltung	1	psch	20.000	20.000
Sonstiges	1	psch	112.000	112.000
Gesamt netto				1.352.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				297.440
Herstellkosten netto				1.649.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				313.310
Herstellkosten brutto, rd.				1.962.000

Tabelle 9: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Maschinentechnik) für Variante 1: PAK in Kontaktbecken

Herstellungskosten Variante 1: PAK in Kontaktbecken nach NKB	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Maschinentechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	56.000	56.000
PAK-Silo inkl. Dosierstation	1	Stck	200.000	200.000
Lieferung & Montage PAK-Silo inkl. Dosierstation	1	psch	40.000	40.000
Fällmitteldosierstation	1	psch	100.000	100.000
Schneckenpumpe, ø 1200 mm	2	Stck	37.000	74.000
Lieferung und Montage Schneckenpumpe	2	Stck	6.500	13.000
Spülwasserpumpe, 450 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Schlammwasserpumpe, 225 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Spülluftgebläse, 1.125 m³/h mit Schallhaube	3	Stck	12.000	36.000
Absperrklappe DN 100	3	Stck	500	1.500
Zu- und Abluft	1	psch	5.000	5.000
Rohrleitung DN 600	20	m	600	12.000
Rohrleitung DN 500	70	m	500	35.000
Rohrleitung DN 400	60	m	350	21.000
Rohrleitung DN 250	30	m	200	6.000
Rohrleitung DN 200	50	m	150	7.500
Plattenschieber 200x200mm, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 600, E-Antrieb	3	Stck	8.000	24.000
Schieber DN 500, E-Antrieb	24	Stck	5.000	120.000
Schieber DN 400, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 250, Regelantrieb, FU-geregelt	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 200, E-Antrieb	8	Stck	3.500	28.000
Formstücke DN 600	2	Stck	1.450	2.900
Formstücke DN 500	28	Stck	1.200	33.600
Formstücke DN 400	10	Stck	800	8.000
Formstücke DN 250	11	Stck	400	4.400
Formstücke DN 200	26	Stck	300	7.800
Rührwerke (Umwälzung Kontaktreaktor)	2	Stck	6.000	12.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	12.500	12.500
Sonstiges	1	psch	102.000	102.000
Gesamt netto				1.172.200
Baunebenkosten, 22 %, rd.				257.884
Herstellkosten netto				1.430.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				271.700
Herstellkosten brutto, rd.				1.702.000

Tabelle 10: Zusammenstellung der Herstellungskosten (E-MSR-Technik) für Variante 1: PAK in Kontaktbecken

Herstellungskosten Variante 1: PAK in Kontaktbecken nach NKB	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
E-MSR-Technik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	12.000	12.000
Füllstandsmessung, Radar	10	Stck	1.000	10.000
Trübungsmessung	1	Stck	4.000	4.000
Durchflussmengenmessung Ultraschall	1	Stck	6.000	6.000
Austausch Trafo	1	psch	15.000	15.000
Kabel Energieversorgung	1	psch	15.000	15.000
Neue Niederspannungsunterverteilung	1	psch	100.000	100.000
Verkabelung	1	psch	5.000	5.000
Blitzschutz und Potentialausgleich	1	psch	5.000	5.000
Automatisierungstechnik Flockungsfiltration	1	psch	20.000	20.000
Anpassung/Erweiterung PLS	1	psch	20.000	20.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	10.000	10.000
Allgemeine Leistungen	1	psch	21.000	21.000
Gesamt netto				243.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				53.460
Herstellkosten netto				296.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				56.240
Herstellkosten brutto, rd.				352.000

Durch den Einsatz von Pulveraktivkohle wäre eine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes nicht mehr zulässig. Derzeit werden 100 % des Klärschlammes aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock landwirtschaftlich verwertet. Die in Tabelle 11 aufgeführten Kosten für die Schlamm Entsorgung setzen sich zusammen aus rd. 1,2 Mio. € Mehrkosten für die thermische Entsorgung des Klärschlammes und rd. 193.000 € Entsorgungskosten für die erhöhte Überschussschlammmenge. Sollte sich in Zukunft die Gesetzeslage bezüglich der Klärschlamm Entsorgung dahingehend ändern, dass eine landwirtschaftliche Verwertung generell ausgeschlossen wird, so wären die Mehrkosten für die thermische Schlamm Entsorgung kostenneutral für diese Verfahrensvariante, da sie generell für das Klärwerk anfallen würden.

Tabelle 11: Projektkostenbarwert und Jahreskosten für Variante 1: PAK in Kontaktbecken

Variante 1: PAK in Kontaktbecken	Barwert	Jahreskosten
	€	€/a
Kosten		
Investitionskosten	4.017.000	337.000
zus. Kosten für		
Energie	598.000	43.000
Betriebsmittel	439.000	32.000
Schlamm Entsorgung	1.429.000	103.000
Spurenstoffanalyse	65.000	5.000
Wartung	906.000	65.000
Personal	583.000	42.000
Einsparungen		
Abwasserabgabe	580.000	42.000
Förderung NRW	2.812.000	236.000
Summe	4.645.000	349.000

Der Projektkostenbarwert für Variante 1 beträgt rd. 4,6 Mio. €. Dies entspricht jährlichen Kosten von rd. 349.000 €/a über 15 Jahre. Umgerechnet auf die mittlere jährliche Abwassermenge von rd. 2,3 Mio. m³/a ergeben sich somit spezifische Kosten von rd. 0,151 €/m³, oder rd. 13,42 €/(EW·a) bei einer mittleren Belastung von ca. 26.000 EW.

Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 1 rd. 8,9 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 375.000 €/a. Dies entspricht spezifischen Kosten von rd. 0,162 €/m³ oder 14,42 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

4.2 Variante 2: Pulveraktivkohledosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration

Da für den PAK-Einsatz auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock in jedem Fall eine Filtration erforderlich wird, kann die PAK-Dosierung zur Spurenstoffelimination direkt in den Zulauf zur vorgesehenen Flockungsfiltration erfolgen. Eine konventionelle Flockungsfiltration wird anderen Filtern vorgezogen, da sie zusätzlich die Verringerung der P_{ges}-Ablaufkonzentration ermöglicht.

Eine PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration würde den Betrieb eines zusätzlichen Kontaktbeckens erübrigen. Allerdings würden sich die Kontaktzeiten

zwischen PAK und Abwasser sowie die Verweilzeit der PAK im System verringern. Auswirkungen hätte diese Betriebsweise auf die geplante Flockungsfiltration selbst und durch den in Summe um 5 bis 10 % erhöhten Schlammanfall auf die Schlammbehandlung. Wie für Variante 1 bereits beschrieben werden durch den erhöhten Schlammanfall jedoch keine Probleme erwartet.

4.2.1 Dimensionierung

Durch die erforderliche Kontaktzeit von mindestens 20 bis 30 Minuten ergibt sich in Abhängigkeit vom Volumen des Filterüberstaus die Anzahl der erforderlichen Filtereinheiten. Im Spitzenlastfall bei Trockenwetter ($343 \text{ m}^3/\text{h}$) würden 8 Filterkammern mit jeweils 12 m^2 Oberfläche und 2,5 m Filterüberstau eine ausreichende Kontaktzeit von rd. 42 Minuten gewährleisten. Bei hydraulischer Spitzenlast ($1.120 \text{ m}^3/\text{h}$) läge die Kontaktzeit noch bei knapp 13 Minuten. Dieser Wert liegt zwar unter den angegebenen 20 Minuten, doch tritt dieser Lastfall äußerst selten ein (kein einziges Mal zwischen 2012 und 2014). Für den an 85% der Tage unterschrittenen Tageszufluss von rd. $343 \text{ m}^3/\text{h}$ wird eine Kontaktzeit von 42 Minuten sichergestellt, sodass die Kontaktzeit für den Spitzenlastfall als ausreichend betrachtet wird.

Für das PAK-Silo wird, wie in Variante 1 beschrieben, ein Silo von 70 m^3 Nutzraum vorgesehen. Auch die PAK-Dosierung wird, wie in Variante 1, volumenproportional zum Zulaufvolumenstrom mit einer gravimetrischen Dosiervorrichtung vorgesehen.

4.2.2 Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Die Anordnung der einzelnen Bauwerke für diese Verfahrensvariante wird so vorgesehen, wie in Variante 1 beschrieben. Das Kontaktbecken ist jedoch nicht erforderlich.

Ebenfalls wie bei Variante 1 sollte aus den gleichen Gründen die Dosierung der PAK nicht in den Pumpensumpf des Zulaufhebewerkes zur Flockungsfiltration erfolgen, sondern erst in das Verteilergerinne.

Das Spülintervall sollte bei einer PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration grundsätzlich dem Spülintervall einer konventionell betriebenen Flockungsfiltration angeglichen werden. Daher werden die Bedingungen für den Start einer Filterspülung so gewählt, wie in Variante 1 beschrieben. Durch das Spülintervall

von i.d.R. 24 h ergäbe sich eine ausreichende mittlere Verweilzeit der PAK von rd. 12 h. Die Zugabe des Schlammwassers in das Verteilerbauwerk zur Biologie erfolgt ebenfalls wie in Variante 1 beschrieben.

Die Umsetzung der Variante 2 ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt.

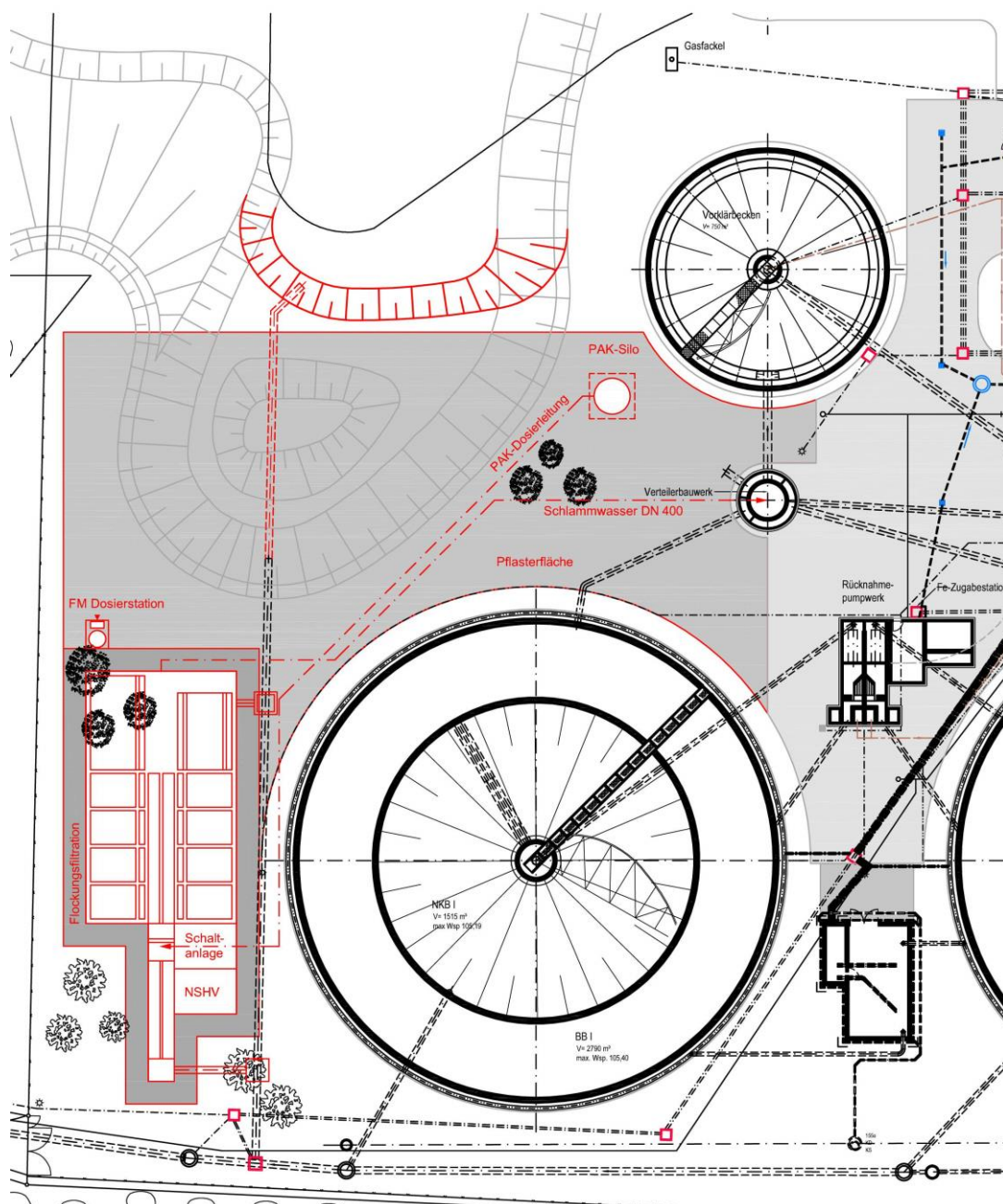


Abbildung 16: Umsetzung der Variante 2 auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

4.2.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 2 (PAK-Dosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau von Hebewerk und Flockungsfiltration inkl. Fällmitteldosierstation
- Anschluss Zu-/Ablaufleitung an die Ablaufleitung von den Nachklärbecken zum Schönungsteich
- Errichtung eines Fundamentes für das PAK-Silo und die Dosierstation
- PAK-Silo einschl. Dosierstation und Schaltanlage
- Installation einer erdverlegten Dosierleitung vom PAK-Silo zum Zulauf Flockungsfiltration
- Installation von jeweils einem Rührwerke in den Filterkammern der Flockungsfiltration
- Verkleinerung des Schönungsteiches um rd. 1.000 m²
- Erstellung einer Rangierfläche für LKW
- Austausch des vorhandenen Trafo
- Errichtung einer neuen NSUV
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlammentsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB- und P_{ges} -Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % angesetzt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird auch hier ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 30 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird der in der Energieanalyse verwendete Strompreis von 0,18 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 12 bis Tabelle 14 sind die Herstellungskosten für eine Aktivkohledosierung in den Zulauf zur Flockungsfiltration dargestellt. Tabelle 15 fasst die zugehörigen Barwerte und Jahreskosten zusammen.

Tabelle 12: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Bautechnik) für Variante 2: PAK in Zulauf Flockungsfiltration

Herstellungskosten Variante 2: PAK in Zulauf Flofi	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Bautechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	123.000	123.000
Wandbeton inkl. Bewehrung	700	m³	800	560.000
Deckenbeton inkl. Bewehrung	100	m³	600	60.000
Sohlbeton inkl. Bewehrung	200	m³	400	80.000
Erdarbeiten	2.500	m³	30	75.000
Verkleinerung Schönungsteich um 1.000 m²	1	psch	40.000	40.000
Frostschutz Fundament PAK-Silo	1	psch	1.200	1.200
Straßen und Wege	1.800	m²	120	216.000
Oberflächenentwässerung	1	psch	4.000	4.000
Wanddurchdringungen für DN 600	5	Stck	1.600	8.000
Wanddurchdringungen für DN 500	18	Stck	1.500	27.000
Wanddurchdringungen für DN 400	2	Stck	1.400	2.800
Wanddurchdringungen für DN 250	8	Stck	1.000	8.000
Wanddurchdringungen für DN 200	9	Stck	1.000	9.000
Wasserhaltung	1	psch	20.000	20.000
Sonstiges	1	psch	112.000	112.000
Gesamt netto				1.346.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				296.120
Herstellkosten netto				1.642.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				311.980
Herstellkosten brutto, rd.				1.954.000

Tabelle 13: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Maschinentechnik) für Variante 2: PAK in Zulauf Flockungsfiltration

Herstellungskosten Variante 2: PAK in Zulauf Flofi	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Maschinentechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	57.000	57.000
PAK-Silo inkl. Dosierstation	1	Stck	200.000	200.000
Lieferung & Montage PAK-Silo inkl. Dosierstation	1	psch	40.000	40.000
Fällmitteldosierstation	1	psch	100.000	100.000
Schneckenpumpe, ø 1200 mm	2	Stck	37.000	74.000
Lieferung und Montage Schneckenpumpe	2	Stck	6.500	13.000
Spülwasserpumpe, 450 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Schlammwasserpumpe, 225 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Spülluftgebläse, 1.125 m³/h mit Schallhaube	3	Stck	12.000	36.000
Absperrklappe DN 100	3	Stck	500	1.500
Zu- und Abluft	1	psch	5.000	5.000
Rohrleitung DN 600	20	m	600	12.000
Rohrleitung DN 500	70	m	500	35.000
Rohrleitung DN 400	60	m	350	21.000
Rohrleitung DN 250	30	m	200	6.000
Rohrleitung DN 200	50	m	150	7.500
Plattenschieber 200x200mm, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 600, E-Antrieb	3	Stck	8.000	24.000
Schieber DN 500, E-Antrieb	24	Stck	5.000	120.000
Schieber DN 400, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 250, Regelantrieb, FU-geregelt	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 200, E-Antrieb	8	Stck	3.500	28.000
Formstücke DN 600	2	Stck	1.450	2.900
Formstücke DN 500	28	Stck	1.200	33.600
Formstücke DN 400	10	Stck	800	8.000
Formstücke DN 250	11	Stck	400	4.400
Formstücke DN 200	26	Stck	300	7.800
Rührwerke (Umwälzung Filterüberstau)	8	Stck	4.000	32.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	12.500	12.500
Sonstiges	1	psch	104.000	104.000
Gesamt netto				1.195.200
Baunebenkosten, 22 %, rd.				262.944
Herstellkosten netto				1.458.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				277.020
Herstellkosten brutto, rd.				1.735.000

Tabelle 14: Zusammenstellung der Herstellungskosten (E-MSR-Technik) für Variante 2: PAK in Zulauf Flockungsfiltration

Herstellungskosten Variante 2: PAK in Zulauf Flofi	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
E-MSR-Technik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	12.000	12.000
Füllstandsmessung, Radar	10	Stck	1.000	10.000
Trübungsmessung	1	Stck	4.000	4.000
Durchflussmengenmessung Ultraschall	1	Stck	6.000	6.000
Austausch Trafo	1	psch	15.000	15.000
Kabel Energieversorgung	1	psch	15.000	15.000
Neue Niederspannungsunterverteilung	1	psch	100.000	100.000
Verkabelung	1	psch	5.000	5.000
Blitzschutz und Potentialausgleich	1	psch	5.000	5.000
Automatisierungstechnik Flockungsfiltration	1	psch	20.000	20.000
Anpassung/Erweiterung PLS	1	psch	20.000	20.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	10.000	10.000
Allgemeine Leistungen	1	psch	21.000	21.000
Gesamt netto				243.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				53.460
Herstellkosten netto				296.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				56.240
Herstellkosten brutto, rd.				352.000

Durch den Einsatz von Pulveraktivkohle wäre eine stoffliche Verwertung des Klärschlammes nicht mehr zulässig. Derzeit werden 100 % des Klärschlammes aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock stofflich verwertet. Die in Tabelle 15 aufgeführten Kosten für die Schlamm Entsorgung setzen sich zusammen aus rd. 1,2 Mio. € Mehrkosten für die thermische Entsorgung des Klärschlammes und rd. 193.000 € Entsorgungskosten für die erhöhte Überschussschlammmenge. Sollte sich in Zukunft die Gesetzeslage bezüglich der Klärschlamm Entsorgung dahingehend ändern, dass eine stoffliche Verwertung generell ausgeschlossen wird, so wären die Mehrkosten für die thermische Schlamm Entsorgung kostenneutral für diese Verfahrensvariante, da sie generell für das Klärwerk anfallen würden.

Tabelle 15: Projektkostenbarwert und Jahreskosten für Variante 2: PAK in Zulauf Flockungfiltration

Variante 2: PAK in Zulauf Flofi	Barwert	Jahreskosten
	€	€/a
Kosten		
Investitionskosten	4.042.000	339.000
zus. Kosten für		
Energie	598.000	43.000
Betriebsmittel	439.000	32.000
Schlamm Entsorgung	1.429.000	103.000
Spurenstoffanalyse	65.000	5.000
Wartung	918.000	66.000
Personal	583.000	42.000
Einsparungen		
Abwasserabgabe	580.000	42.000
Förderung NRW	2.829.000	237.000
Summe	4.665.000	351.000

Der Projektkostenbarwert für Variante 2 beträgt rd. 4,7 Mio. €. Dies entspricht jährlichen Kosten von rd. 351.000 €/a über 15 Jahre. Bezogen auf den mittleren jährlichen Abwasseranfall von rd. 2,3 Mio. m³/a ergeben sich somit spezifische Kosten von rd. 0,152 €/m³, oder rd. 13,50 €/(EW·a) bei einer mittleren Belastung von ca. 26.000 EW.

Der PKBW für Variante 2 über einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt rd. 8,9 Mio. € und die entsprechenden Jahreskosten belaufen sich auf rd. 377.000 €/a. Dies entspricht spezifischen Kosten von rd. 0,163 €/m³ oder 14,508 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

4.3 Variante 3: Pulveraktivkohledosierung in die Belebungsbecken

Um den Betrieb eines separaten Kontaktbeckens zu vermeiden und gleichzeitig eine lange Verweilzeit der PAK im System zu erreichen, kann die Dosierung von PAK auch in die biologische Stufe erfolgen. Allerdings ist erfahrungsgemäß aufgrund der erhöhten organischen Hintergrundbelastung im Belebungsbecken eine größere Menge an PAK erforderlich, als für die PAK-Dosierung in biologisch gereinigtes Abwasser. Für die Abtrennung der feindispersen PAK-Anteile ist auch für diese Verfahrensvariante die Errichtung einer Filtration inkl. Hebewerk erforder-

lich. Hier wird ebenfalls eine konventionelle Flockungsfiltration vorgesehen, da diese zusätzlich die Verringerung der P_{ges} -Ablaufkonzentration ermöglicht.

Auswirkungen hätte diese Betriebsweise durch den in Summe um 5 bis 10 % erhöhten Schlammfall vor allem auf die Schlammbehandlung. Der vorhandene Faulbehälter würde diesen erhöhten Schlammfall voraussichtlich aufnehmen können, und durch die geplante Erneuerung der Schlammentwässerung in 2016 werden auch hier keine Probleme durch den erhöhten Schlammfall erwartet.

4.3.1 Dimensionierung

Die PAK-Dosierung in den Zulauf zu den vorhandenen Belebungsbecken bedingt eine PAK-Verweilzeit gleich dem Belebtschlammalter. Dieses beträgt für Systeme zur Stickstoffelimination nach DWA-A 131 mindestens 8 Tage [19] und ist damit für die Spurenstoffelimination durch PAK ausreichend. Das vorhandene Belebungsbeckenvolumen von in Summe 5.580 m³ gewährleistet selbst für den maximalen Zufluss von rd. 1.120 m³/h noch eine sehr üppige Kontaktzeit von über 2 Stunden.

Die erforderliche Flockungsfiltration wird wie in Variante 1 beschrieben ausgelegt. Entsprechend werden 8 Filtereinheiten (jeweils 3,0 m x 4,0 m = 12 m²) mit einer GesamtfILTERfläche von 96 m² vorgesehen, zusätzlich ein Spülwasserspeicher ($V = 70 \text{ m}^3$) und ein Schlammwasserspeicher ($V = 120 \text{ m}^3$) für die Filterspülungen. Das Spülintervall und der Verbleib des Schlammwassers werden wie in Variante 1 beschrieben angesetzt.

Das PAK-Silo wird, wie in Variante 1 beschrieben, mit einem Nutzraum von 70 m³ vorgesehen. Auch die PAK-Dosierung wird, ebenfalls wie in Variante 1, volumenproportional zum Zulaufvolumenstrom mit einer gravimetrischen Dosiervorrichtung vorgesehen.

4.3.2 Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Die PAK-Dosierung kann in das Verteilerbauwerk zwischen der Vorklärung und den Belebungsbecken erfolgen. Das erforderliche PAK-Silo mit Dosierstation kann auf der Freifläche direkt neben dem Verteilerbauwerk zur Biologie errichtet werden. Dadurch ist die PAK-Lieferung durch einen LKW möglich und die Rohrleitungslängen sind minimiert.

Die Flockungsfiltration zur Abscheidung der feindispersen PAK-Anteile kann zusammen mit allen erforderlichen Bauwerken (Zulaufhebewerk, Fällmittelstation, NSUV), wie in Variante 1 beschrieben, auf der freien Fläche neben der Biologie I entlang der Ablaufleitung von den NKB zum Schönungsteich errichtet werden.

Die Umsetzung der Variante 3 ist in Abbildung 17 schematisch dargestellt.

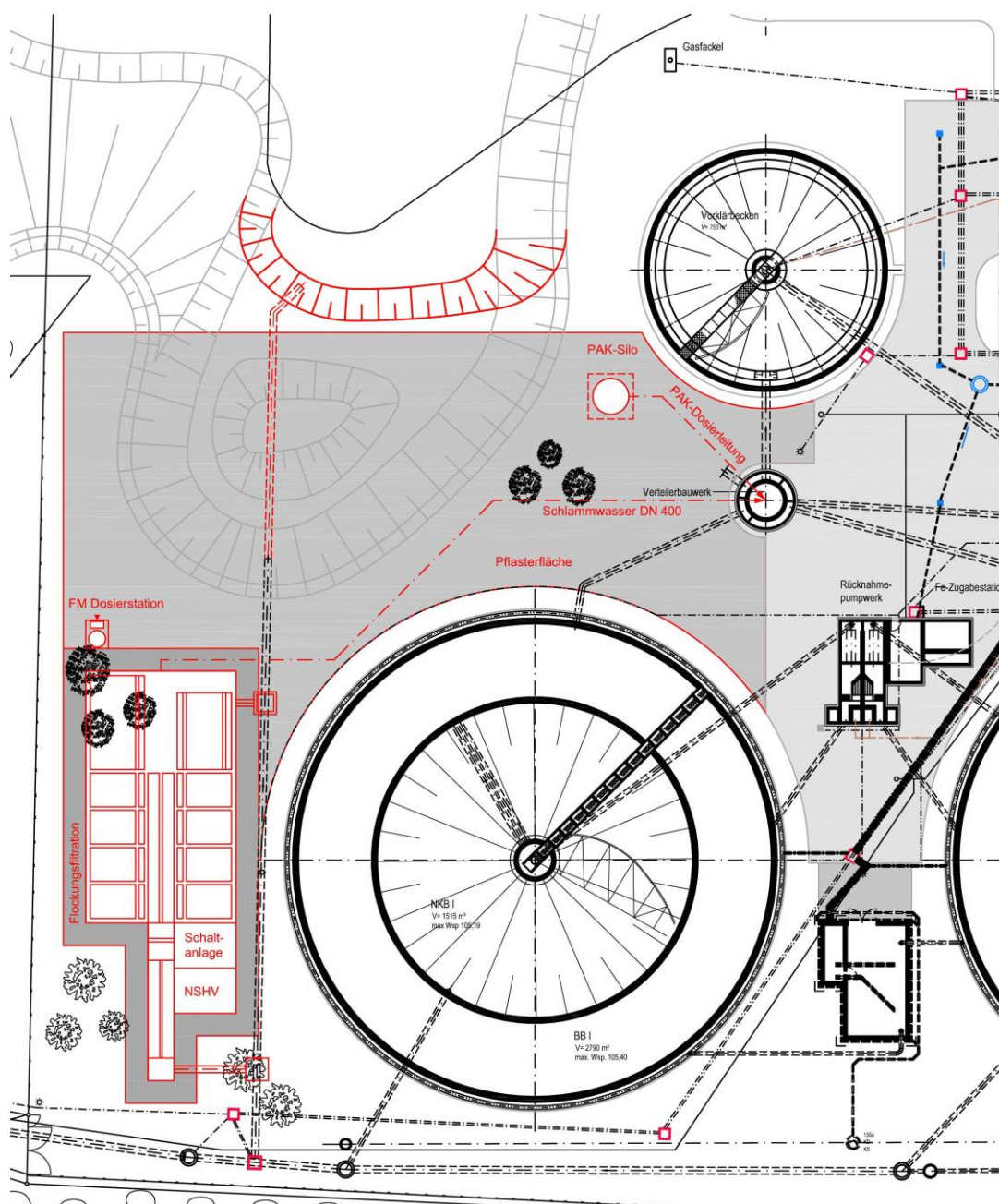


Abbildung 17: Umsetzung der Variante 3 auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

4.3.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 3 (PAK-Dosierung in Belebungsbecken) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden wie die zuvor schon beschriebenen Vari-

anten ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau von Hebewerk und Flockungsfiltration inkl. Fällmitteldosierstation
- Anschluss Zu-/Ablaufleitung an die Ablaufleitung von den Nachklärbecken zum Schönungsteich
- Errichtung eines Fundamentes für das PAK-Silo und die Dosierstation
- PAK-Silo einschl. Dosierstation und Schaltanlage
- Installation einer erdverlegten Dosierleitung vom PAK-Silo zum Verteilerbauwerk Biologie
- Verkleinerung des Schönungsteiches um rd. 1.000 m²
- Erstellung einer Rangierfläche für LKW
- Austausch des vorhandenen Trafo
- Errichtung einer neuen NSUV
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden auch hier die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlammentsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden ebenfalls zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB- und P_{ges} -Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % angesetzt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich

eine Betrachtung über 30 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird der in der Energieanalyse verwendete Strompreis von 0,18 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 16 bis Tabelle 18 sind die Herstellungskosten für eine PAK-Dosierung in die Belebung dargestellt. Tabelle 19 fasst die zugehörigen Barwerte und Jahreskosten zusammen.

Tabelle 16: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Bautechnik) für Variante 3: PAK in Belebung

Herstellungskosten Variante 3: PAK in Belebungsbecken	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Bautechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	123.000	123.000
Wandbeton inkl. Bewehrung	700	m ³	800	560.000
Deckenbeton inkl. Bewehrung	100	m ³	600	60.000
Sohlbeton inkl. Bewehrung	207	m ³	400	82.800
Erdarbeiten	2.500	m ³	30	75.000
Verkleinerung Schönungsteich um 1.000 m ³	1	psch	40.000	40.000
Frostschutz Fundament PAK-Silo	1	psch	1.200	1.200
Straßen und Wege	1.800	m ²	120	216.000
Oberflächenentwässerung	1	psch	4.000	4.000
Wanddurchdringungen für DN 600	5	Stck	1.600	8.000
Wanddurchdringungen für DN 500	18	Stck	1.500	27.000
Wanddurchdringungen für DN 400	2	Stck	1.400	2.800
Wanddurchdringungen für DN 250	8	Stck	1.000	8.000
Wanddurchdringungen für DN 200	9	Stck	1.000	9.000
Wasserhaltung	1	psch	20.000	20.000
Sonstiges	1	psch	112.000	112.000
Gesamt netto				1.348.800
Baunebenkosten, 22 %, rd.				296.736
Herstellkosten netto				1.646.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				312.740
Herstellkosten brutto, rd.				1.959.000

Tabelle 17: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Maschinentechnik) für Variante 3: PAK in Belebung

Herstellungskosten Variante 3: PAK in Belebungsbecken	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Maschinentechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	56.000	56.000
PAK-Silo inkl. Dosierstation	1	Stck	200.000	200.000
Lieferung & Montage PAK-Silo inkl. Dosierstation	1	psch	40.000	40.000
Fällmitteldosierstation	1	psch	100.000	100.000
Schneckenpumpe, ø 1200 mm	2	Stck	37.000	74.000
Lieferung und Montage Schneckenpumpe	2	Stck	6.500	13.000
Spülwasserpumpe, 450 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Schlammwasserpumpe, 225 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Spülluftgebläse, 1.125 m³/h mit Schallhaube	3	Stck	12.000	36.000
Absperrklappe DN 100	3	Stck	500	1.500
Zu- und Abluft	1	psch	5.000	5.000
Rohrleitung DN 600	20	m	600	12.000
Rohrleitung DN 500	70	m	500	35.000
Rohrleitung DN 400	60	m	350	21.000
Rohrleitung DN 250	30	m	200	6.000
Rohrleitung DN 200	50	m	150	7.500
Plattenschieber 200x200mm, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 600, E-Antrieb	3	Stck	8.000	24.000
Schieber DN 500, E-Antrieb	24	Stck	5.000	120.000
Schieber DN 400, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 250, Regelantrieb, FU-geregelt	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 200, E-Antrieb	8	Stck	3.500	28.000
Formstücke DN 600	2	Stck	1.450	2.900
Formstücke DN 500	28	Stck	1.200	33.600
Formstücke DN 400	10	Stck	800	8.000
Formstücke DN 250	11	Stck	400	4.400
Formstücke DN 200	26	Stck	300	7.800
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	12.500	12.500
Sonstiges	1	psch	101.000	101.000
Gesamt netto				1.159.200
Baunebenkosten, 22 %, rd.				255.024
Herstellkosten netto				1.414.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				268.660
Herstellkosten brutto, rd.				1.683.000

Tabelle 18: Zusammenstellung der Herstellungskosten (E-MSR-Technik) für Variante 3: PAK in Belebung

Herstellungskosten Variante 3: PAK in Belebungsbecken	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
E-MSR-Technik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	11.000	11.000
Füllstandsmessung, Radar	10	Stck	1.000	10.000
Trübungsmessung	1	Stck	4.000	4.000
Austausch Trafo	1	psch	15.000	15.000
Kabel Energieversorgung	1	psch	15.000	15.000
Neue Niederspannungsunterverteilung	1	psch	100.000	80.000
Verkabelung	1	psch	5.000	5.000
Blitzschutz und Potentialausgleich	1	psch	5.000	5.000
Automatisierungstechnik Flockungsfiltration	1	psch	20.000	20.000
Anpassung/Erweiterung PLS	1	psch	20.000	20.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	10.000	10.000
Allgemeine Leistungen	1	psch	19.000	19.000
Gesamt netto				214.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				47.080
Herstellkosten netto				261.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				49.590
Herstellkosten brutto, rd.				311.000

Durch den Einsatz von Pulveraktivkohle wäre eine stoffliche Verwertung des Klärschlammes nicht mehr zulässig. Derzeit werden 100 % des Klärschlammes aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock stofflich verwertet. Die in Tabelle 19 aufgeführten Kosten für die Schlamm Entsorgung setzen sich zusammen aus rd. 1,2 Mio. € Mehrkosten für die thermische Entsorgung des Klärschlammes und rd. 193.000 € Entsorgungskosten für die erhöhte Überschussschlammmenge. Sollte sich in Zukunft die Gesetzeslage bezüglich der Klärschlamm Entsorgung dahingehend ändern, dass eine stoffliche Verwertung generell ausgeschlossen wird, so wären die Mehrkosten für die thermische Schlamm Entsorgung kostenneutral für diese Verfahrensvariante, da sie generell für das Klärwerk anfallen würden.

**Tabelle 19: Projektkostenbarwert und Jahreskosten für Variante 3: PAK in Beleb-
 ung**

Variante 3 PAK in Beleb- ung	Barwert	Jahreskosten
	€	€/a
Kosten		
Investitionskosten	3.952.000	331.000
zus. Kosten für		
Energie	598.000	43.000
Betriebsmittel	644.000	46.000
Schlamm Entsorgung	1.429.000	103.000
Spurenstoffanalyse	65.000	5.000
Wartung	891.000	64.000
Personal	583.000	42.000
Einsparungen		
Abwasserabgabe	580.000	42.000
Förderung NRW	2.766.000	232.000
Summe	4.816.000	360.000

Der Projektkostenbarwert für Variante 3 beträgt rd. 4,8 Mio. €. Dies entspricht jährlichen Kosten von rd. 360.000 €/a über 15 Jahre. In dieser Variante wird der gesamte Zulauf zum Klärwerk behandelt, sodass für die Ermittlung der spezifischen Kosten ein Abwasservolumen angesetzt wird. Bezogen auf den mittleren jährlichen Abwasseranfall von rd. 2,3 Mio. m³/a ergeben sich somit spezifische Kosten von rd. 0,156 €/m³, oder rd. 13,85 €/(EW·a) bei einer mittleren Belastung von ca. 26.000 EW.

Für Variante 3 beträgt der PKBW über einen Zeitraum von 30 Jahren rd. 9,2 Mio. €. Die entsprechenden Jahreskosten belaufen sich auf rd. 384.000 €/a. Dies entspricht spezifischen Kosten von rd. 0,166 €/m³ oder 14,77 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

4.4 Variante 4: Filtration mit granulierter Aktivkohle

Auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock kommt grundsätzlich auch die Abwasserfiltration mit granulierter Aktivkohle in Frage. Da auf der Kläranlage keine Filtration vorhanden ist erfordert diese Verfahrensvariante zur Spurenstoffelimination den Neubau eines Raumfilters. Hier wird eine konventionelle Flockungsfiltration vorgesehen, da diese zusätzlich die Verringerung der P_{ges}-Ablaufkonzentration ermöglicht.

4.4.1 Dimensionierung

Für die GAK-Filtration wird der Spitzenzufluss bei Trockenwetter von rd. 343 m³/h als Bemessungszufluss angesetzt. Weiter wird eine Filtergeschwindigkeit bei Trockenwetter von maximal 5 m/h vorausgesetzt. Berücksichtigt man diese Vorgaben und beachtet weiterhin die Bemessungsgrundlagen für Raumfilter nach ATV-DVWK-A 203 [29] so ergibt sich bei einer gewählten Fläche je Filtereinheit von 12 m² (3,0 m x 4,0 m) eine erforderliche Anzahl von 8 Filterkammern. Diese Anzahl an Filterkammern würde selbst bei Spülung einer einzelnen Einheit für die Behandlung des Trockenwetterspitzenzuflusses eine ausreichende Leerbettkontaktzeit von 29 Minuten bei einer Filtergeschwindigkeit von rd. 4,0 m/h gewährleisten. Für den maximalen genehmigten Mischwasserzufluss von 1.120 m³/h würde so eine Filtergeschwindigkeit von rd. 13 m/h erreicht werden. Die Leerbettkontaktzeit läge dann immer noch bei ausreichenden 9 Minuten.

Das Filterbett der GAK-Filter sollte gemäß den Empfehlungen aus der Schweiz mit einer Schichtstärke von 2 m angesetzt werden. Der Filterüberstau wird auf 2,5 m festgesetzt, was für Raumfilter nach ATV-DVWK-A 203 ausreichend ist [29]. Für die erforderlichen 8 Filtereinheiten ergäbe sich dadurch ein erforderliches Aktivkohlevolumen von 192 m³_{GAK}. Es werden 10.000 durchsetzbare Bettvolumina bis zum Austausch der GAK angenommen, was für den Spitzenzufluss bei Trockenwetter einer Filterstandzeit von gut 7,5 Monaten entspricht. Als Grundlage für die Ableitung von 10.000 BV dienen die Betriebserfahrungen der Kläranlagen Obere Lutter (rd. 25.000 BV), Buchenhofen (> 15.000 BV) und Düren-Merken (rd. 9.000 BV bei im Mittel 20 bis 30 mgAFS/l im Filterzulauf). Bei 8 Filterkammern wäre 12- bis 13-mal im Jahr der Austausch des jeweils am stärksten beladenen Filterbettes erforderlich. In Summe würden so rd. 300 m³_{GAK}/a benötigt, was bei einem Mischwasseranfall von rd. 2,3 Mio. m³/a einem GAK-Einsatz von rd. 0,130 l_{GAK}/m³ Abwasser entspricht.

4.4.2 Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Für die Einbindung einer GAK-Filtration in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wäre der Neubau einer der Nachklärung nachgeschalteten Flockungsfiltration mit 8 Filterkammern, einem Spülwasserspeicher und einem Schlammwasserspeicher erforderlich. Zusätzlich wären ein Schaltraum und eine neue Niederspannungsunterverteilung erforderlich. Der bauliche Unterschied zu sonstigen Flockungsfiltrationen besteht lediglich in einer Vorrichtung zum Ausbau

der Aktivkohle mittels Saugwagen aus den einzelnen Kammern sowie einer weiteren Vorrichtung zur Befüllung jeder einzelnen Filterkammer mit frischer Aktivkohle. Für den Austausch der Filterbetten werden außerdem die einzelnen GAK-Filterkammern durch entsprechende Straßenführungen für einen Tanklastwagen zugänglich gemacht.

Die Umsetzung der Variante 4 ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt.

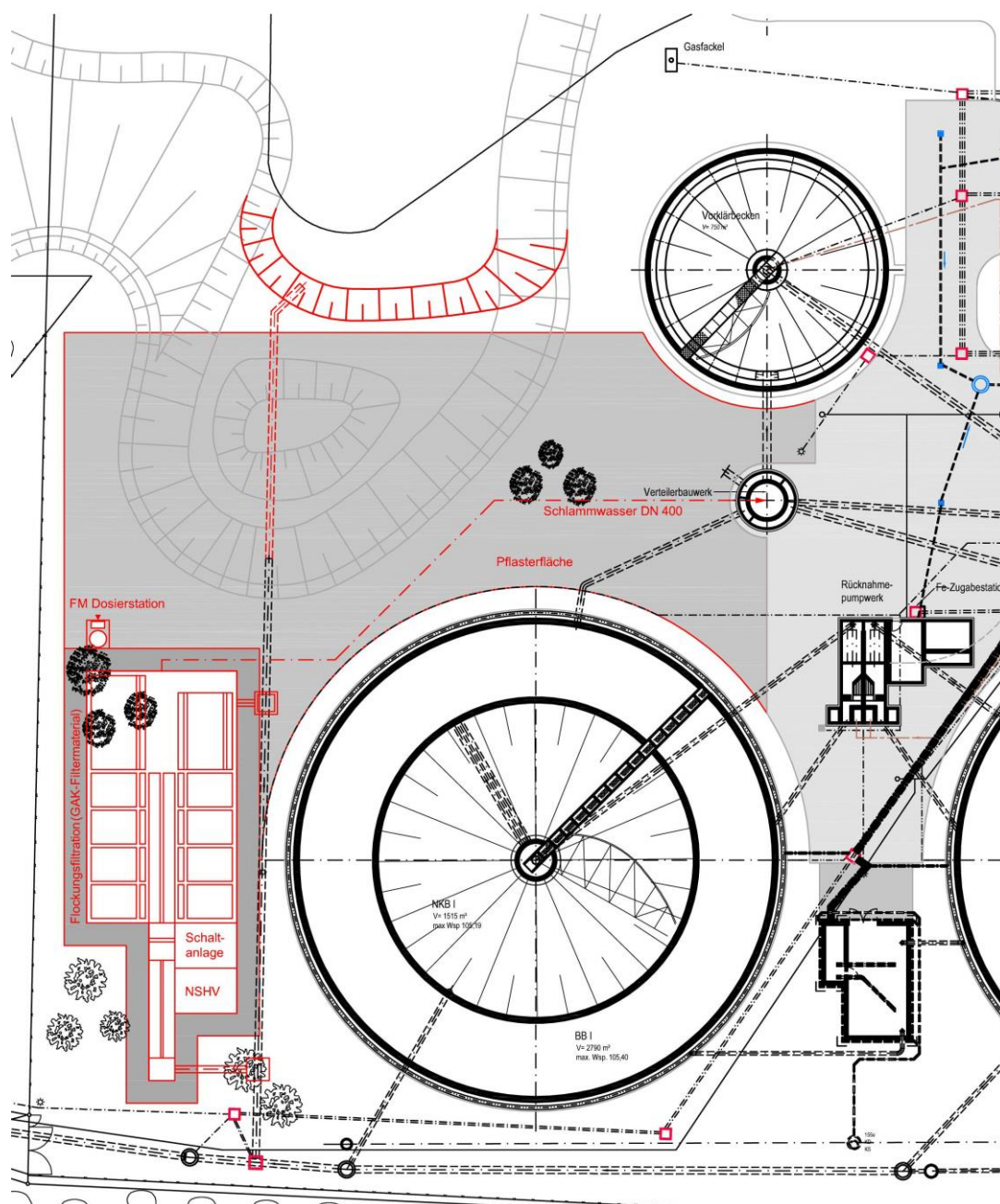


Abbildung 18: Umsetzung der Variante 4 auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

4.4.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 4 (GAK-Filtration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen

Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurden folgende Aspekte integriert:

- Neubau einer Flockungsfiltration inkl. Fällmitteldosierstation und erforderlichem Zulaufhebewerk
- GAK-Filtermaterial als Erstausrüstung für 8 Filterkammern
- Anschluss Zu-/Ablaufleitung an die Ablaufleitung von den Nachklärbecken zum Schönungsteich
- Verkleinerung des Schönungsteiches um rd. 1.000 m²
- Erstellung einer Rangierfläche für LKW
- Austausch des vorhandenen Trafo
- Errichtung einer neuen NSUV
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden ebenfalls die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlamm Entsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden zu erwartende Einsparungen durch verringerte CSB- und P_{ges} -Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % angesetzt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit nicht verbindlichen Gesetzeslage wird ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 30 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird der in der Energieanalyse verwendete Strompreis von 0,18 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 20 bis Tabelle 22 sind die Herstellungskosten für eine GAK-Filtration dargestellt. Tabelle 23 fasst die zugehörigen Barwerte und Jahreskosten zusammen.

Tabelle 20: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Bautechnik) für Variante 4: GAK-Filtration

Herstellungskosten Variante 4: GAK-Filtration	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Bautechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	132.000	132.000
Wandbeton inkl. Bewehrung	700	m ³	800	560.000
Deckenbeton inkl. Bewehrung	100	m ³	600	60.000
Sohlbeton inkl. Bewehrung	200	m ³	400	80.000
Erdarbeiten	2.400	m ³	30	72.000
Verkleinerung Schönungsteich um 1.000 m ³	1	psch	40.000	40.000
Straßen und Wege	1.800	m ²	120	216.000
Oberflächenentwässerung	1	psch	4.000	4.000
Wanddurchdringungen für DN 600	5	Stck	1.600	8.000
Wanddurchdringungen für DN 500	18	Stck	1.500	27.000
Wanddurchdringungen für DN 400	2	Stck	1.400	2.800
Wanddurchdringungen für DN 250	8	Stck	1.000	8.000
Wanddurchdringungen für DN 200	9	Stck	1.000	9.000
Wasserhaltung	1	psch	20.000	20.000
GAK-Filtermaterial	192	m ³	450	86.400
Sonstiges	1	psch	120.000	120.000
Gesamt netto				1.445.200
Baunebenkosten, 22 %, rd.				317.944
Herstellkosten netto				1.763.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				334.970
Herstellkosten brutto, rd.				2.098.000

Tabelle 21: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Maschinentechnik) für Variante 4: GAK-Filtration

Herstellungskosten Variante 4: GAK-Filtration	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Maschinentechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	38.000	38.000
Fällmitteldosierstation	1	psch	100.000	100.000
Schneckenpumpe, ø 1200 mm	2	Stck	37.000	74.000
Lieferung und Montage Schneckenpumpe	2	Stck	6.500	13.000
Spülwasserpumpe, 450 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Schlammwasserpumpe, 225 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Spülluftgebläse, 1.125 m³/h mit Schallhaube	3	Stck	12.000	36.000
Absperrklappe DN 100	3	Stck	500	1.500
Zu- und Abluft	1	psch	5.000	5.000
Rohrleitung DN 600	20	m	600	12.000
Rohrleitung DN 500	70	m	500	35.000
Rohrleitung DN 400	60	m	350	21.000
Rohrleitung DN 250	30	m	200	6.000
Rohrleitung DN 200	50	m	150	7.500
Plattenschieber 200x200mm, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 600, E-Antrieb	3	Stck	8.000	24.000
Schieber DN 500, E-Antrieb	24	Stck	5.000	120.000
Schieber DN 400, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 250, Regelantrieb, FU-geregelt	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 200, E-Antrieb	8	Stck	3.500	28.000
Formstücke DN 600	2	Stck	1.450	2.900
Formstücke DN 500	28	Stck	1.200	33.600
Formstücke DN 400	10	Stck	800	8.000
Formstücke DN 250	11	Stck	400	4.400
Formstücke DN 200	26	Stck	300	7.800
Wandeinbaurohr DN 150	8	Stck	750	6.000
Wandeinbaurohr DN 100	8	Stck	750	6.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	12.500	12.500
Sonstiges	1	psch	68.000	68.000
Gesamt netto				799.700
Baunebenkosten, 22 %, rd.				175.934
Herstellkosten netto				976.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				185.440
Herstellkosten brutto, rd.				1.161.000

Tabelle 22: Zusammenstellung der Herstellungskosten (E-MSR-Technik) für Variante 4: GAK-Filtration

Herstellungskosten Variante 4: GAK-Filtration	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
E-MSR-Technik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	11.000	11.000
Füllstandsmessung, Radar	10	Stck	1.000	10.000
Austausch Trafo	1	psch	15.000	15.000
Kabel Energieversorgung	1	psch	15.000	15.000
Neue Niederspannungsunterverteilung	1	psch	100.000	100.000
Verkabelung	1	psch	5.000	5.000
Blitzschutz und Potentialausgleich	1	psch	5.000	5.000
Automatisierungstechnik Flockungsfiltration	1	psch	20.000	20.000
Anpassung/Erweiterung PLS	1	psch	20.000	20.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	10.000	10.000
Allgemeine Leistungen	1	psch	20.000	20.000
Gesamt netto				231.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				50.820
Herstellkosten netto				282.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				53.580
Herstellkosten brutto, rd.				336.000

Tabelle 23: Projektkostenbarwert und Jahreskosten für Variante 4: GAK-Filtration

Variante 4: GAK-Filtration	Barwert	Jahreskosten
	€	€/a
Kosten		
Investitionskosten	3.595.000	301.000
zus. Kosten für		
Energie	545.000	39.000
Betriebsmittel	1.449.000	104.000
Schlamm Entsorgung	0	0
Spurenstoffanalyse	65.000	5.000
Wartung	630.000	45.000
Personal	519.000	37.000
Einsparungen		
Abwasserabgabe	580.000	42.000
Förderung NRW	2.517.000	211.000
Summe	3.706.000	278.000

Der Projektkostenbarwert für Variante 4 beträgt rd. 3,7 Mio. €. Dies entspricht jährlichen Kosten von rd. 278.000 €/a über 15 Jahre. In dieser Variante wird der

gesamte Zulauf zum Klärwerk behandelt, sodass für die Ermittlung der spezifischen Kosten ein Abwasservolumen angesetzt wird. Bezogen auf den mittleren Abwasseranfall von rd. 2,3 Mio. m³/a ergeben sich somit spezifische Kosten von rd. 0,120 €/m³, oder rd. 10,69 €/(EW·a) bei einer mittleren Belastung von ca. 26.000 EW.

Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 4 rd. 6,9 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 290.000 €/a. Dies entspricht spezifischen Kosten von rd. 0,125 €/m³ oder 11,15 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

4.5 Variante 5: Ozondosierung nach der Nachklärung

Auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock ist auch der Einsatz von Ozon zur Spurenstoffelimination denkbar. Der Ozonreaktor könnte zwischen der Nachklärung und dem Schönungsteich angeordnet werden. Die erforderliche Nachbehandlung des mit Ozon behandelten Abwassers würde durch den nachgeschalteten Schönungsteich sichergestellt werden. Durch die Ozonbehandlung würde neben der Spurenstoffelimination auch eine Desinfektion des gereinigten Abwassers erfolgen.

Der Betrieb einer Ozonanlage zwischen Nachklärung und Schönungsteich hätte keine Auswirkungen auf den Betrieb der bestehenden Reinigungsstufen der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock. Jedoch ist das vorhandene hydraulische Gefälle zwischen der Nachklärung und dem Schönungsteich nicht ausreichend, um ein weiteres Becken ohne zusätzliches Pumpwerk integrieren zu können. Daher wird im Zulauf zum Ozonreaktor ein Pumpwerk zur Hebung des zu behandelnden Volumenstroms vorgesehen.

4.5.1 Dimensionierung

Für die Berechnung des erforderlichen Volumens des Ozonreaktors ($V_{\text{Ozonreaktor}}$) wird eine Bemessungswassermenge (Q_{Bem}) entsprechend dem Spitzenzufluss bei Trockenwetter von rd. 343 m³/h und einer Kontaktzeit (t_{Kontakt}) von 15 Minuten angesetzt. Dadurch ergibt sich, bei Einbeziehung eines Faktors zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Durchströmung, ein erforderliches Reaktorvolumen von rd. 250 m³ [4].

$$V_{\text{Ozonreaktor}} = \frac{Q_{\text{Bem}} \cdot t_{\text{Kontakt}}}{0,35} = \frac{343 \cdot \frac{15}{60}}{0,35} = 245 \text{ m}^3 \quad (\text{Gl. 1})$$

Um auch im Regenwetterfall eine ausreichende Kontaktzeit von mindestens 5 Minuten zu gewährleisten, wird ein Reaktorvolumen von 300 m³ gewählt. Es wird eine Wassertiefe von 7 m gewählt, um den effizienten Ozoneintrag über am Reaktorboden installierte Diffusoren zu ermöglichen.

Die erforderliche Ozondosis (C_{O_3}) liegt für eine abgeschätzte DOC-Konzentration (C_{DOC}) von rd. 10 mg/l im Ablauf der Nachklärung und einer Nitrit-Konzentration ($C_{\text{NO}_2\text{-N}}$) von rd. 0,24 mg/l bei rd. 8,2 mgO₃/l Abwasser.

$$C_{O_3} = z_{\text{DOC}} \cdot C_{\text{DOC}} + z_{\text{NO}_2\text{-N}} \cdot C_{\text{NO}_2\text{-N}} = 0,7 \cdot 10 + 3,43 \cdot 0,24 = 8,2 \frac{\text{mgO}_3}{\text{l}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Für die Bemessungswassermenge resultiert eine maximal erforderliche Ozonproduktionskapazität von rd. 2.800 gO₃/h und bei einem minimalen Trockenwetterzufluss von rd. 85 m³/h eine minimale Ozonproduktionskapazität von rd. 700 gO₃/h.

$$B_{O_3, \text{max}} = Q_{\text{Bem}} \cdot C_{O_3} = 343 \cdot 8,2 = \text{rd. } 2.800 \frac{\text{gO}_3}{\text{h}} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$B_{O_3, \text{min}} = Q_{T, 2h, \text{min}} \cdot C_{O_3} = 85 \cdot 8,2 = \text{rd. } 700 \frac{\text{gO}_3}{\text{h}} \quad (\text{Gl. 4})$$

4.5.2 Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock sind keine ungenutzten Beckenkapazitäten oder Bauwerke vorhanden. Daher ist der Neubau des erforderlichen Kontaktreaktors sowie der Ozonerzeugung erforderlich.

Der Ozonreaktor wird als komplett geschlossenes Betonbecken mit 7,00 m Wassertiefe und 4,00 m Beckenbreite auf die freie Fläche neben der Biologie I errichtet. Über die Gesamtbeckenlänge von rd. 10,80 m werden insgesamt fünf vertikale Strömungsleitwände über die gesamte Beckenbreite vorgesehen, um eine pfpfenartige Strömung im Reaktor zu erzeugen und dadurch Kurzschlussströmungen zu vermeiden. In den ersten beiden abwärts durchströmten Abteilen des Ozonreaktors werden Diffusoren am Reaktorboden installiert, über die der Ozoneintrag erfolgt.

Die Aufstellung des Ozongenerators sowie aller zusätzlich benötigter Anlagenkomponenten wie Kühler und Schaltanlage ist in einem Container vorgesehen.

Dieser sowie der benötigte Flüssigsauerstofftank können direkt neben dem Ozonreaktor aufgestellt werden. Es ist lediglich ein Sicherheitsabstand von 5 m um den Sauerstofftank zu beachten. Die Anfahrbarkeit durch einen 40-Tonner für die Belieferung mit Sauerstoff muss durch die Herstellung entsprechende Verkehrsflächen sichergestellt werden. Durch die Positionierung des Sauerstofftanks direkt neben dem Ozonreaktor und der Ozonerzeugung werden kurze Wege für die erforderlichen Rohrleitungen ermöglicht.

Für die elektrotechnische Einbindung einer Ozonanlage wird eine neue Niederspannungsunterverteilung vorgesehen.

Die Umsetzung der Variante 5 ist in Abbildung 19 schematisch dargestellt.

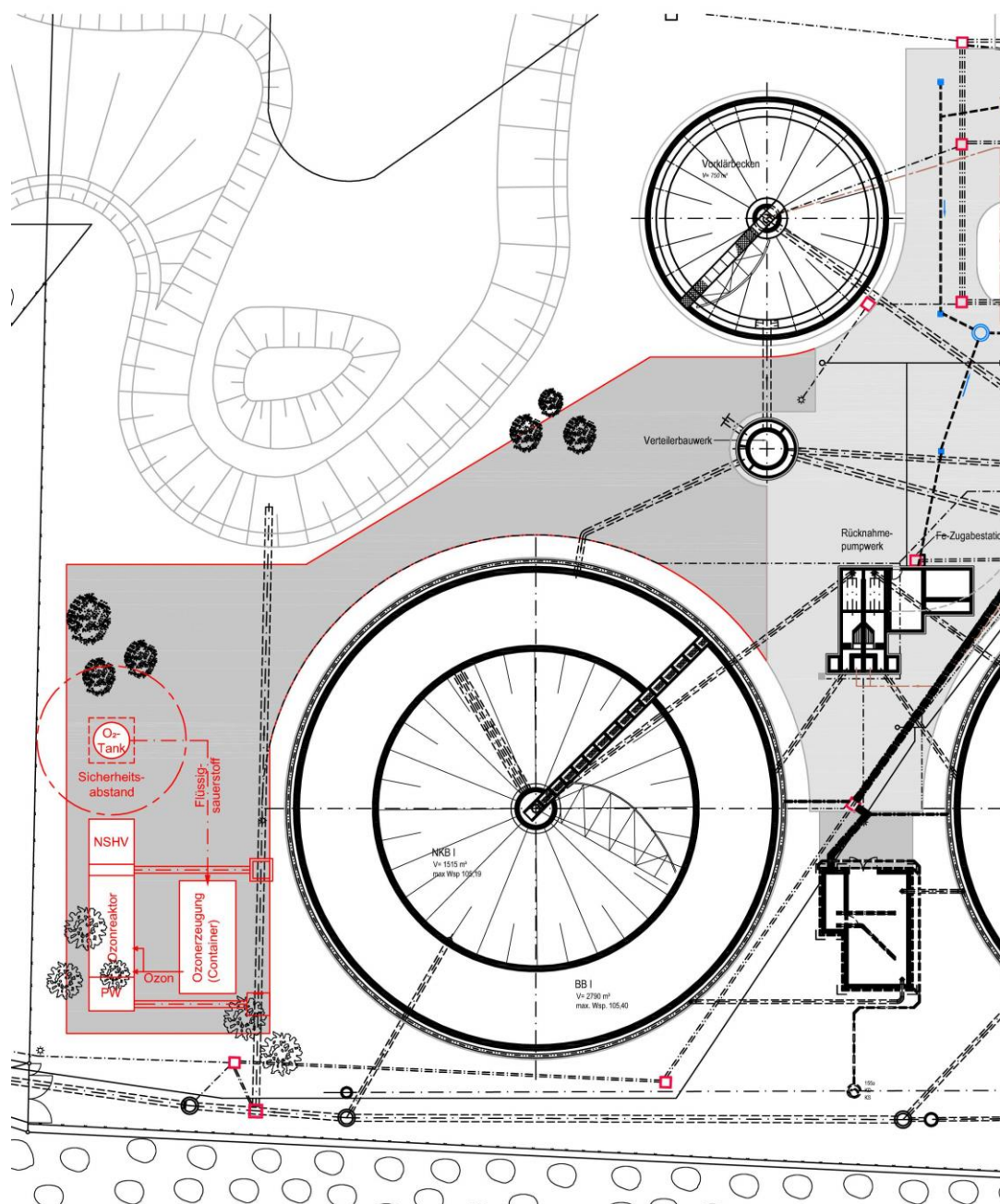


Abbildung 19: Umsetzung der Variante 5 auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

4.5.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 5 (Ozonung nach der Nachklärung) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichba-

ren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines Ozonreaktors auf der Freifläche neben der Biologie I
- Anschluss Zu-/Ablaufleitung an die Ablaufleitung von den Nachklärbecken zum Schönungsteich
- Errichtung eines Fundamentes für die Ozonerzeugung (Container) und den Flüssigsauerstofftank
- Ozongenerator einschl. Dosiervorrichtung als „Containerlösung“
- Installation einer erdverlegten Dosierleitung vom Ozongenerator zum Ozonreaktor
- Erstellung einer Verkehrsfläche für LKW
- Errichtung einer neuen NSUV
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden auch hier die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlammentsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden, ebenfalls wie bei den vorher beschriebenen Varianten, die zu erwartende Einsparung durch verringerte CSB-Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % berücksichtigt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Gesetzeslage wird ein Abschreibungszeitraum von lediglich 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 30 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird der in der Energieanalyse verwendete Strompreis von 0,18 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 24 bis Tabelle 26 sind die Herstellungskosten für eine Ozonung nach der Nachklärung dargestellt. Tabelle 27 fasst die zugehörigen Barwerte und Jahreskosten zusammen.

Tabelle 24: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Bautechnik) für Variante 5: Ozonung nach der Nachklärung

Herstellungskosten Variante 5: Ozonung nach der Nachklärung	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Bautechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	75.000	75.000
Wandbeton inkl. Bewehrung	300	m ³	800	240.000
Deckenbeton inkl. Bewehrung	100	m ³	600	60.000
Sohlbeton inkl. Bewehrung	100	m ³	400	40.000
Erdarbeiten	1.100	m ³	30	33.000
Baugrubenverbau	400	m ²	250	100.000
Frostschutz Fundament Container & O ₂ -Tank	1	psch	3.600	3.600
Straßen und Wege	1.200	m ²	120	144.000
Oberflächenentwässerung	1	psch	4.000	4.000
Wanddurchdringungen für DN 600	4	Stck	1.600	6.400
Wasserhaltung	1	psch	50.000	50.000
Sonstiges	1	psch	69.000	69.000
Gesamt netto				825.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				181.500
Herstellkosten netto				1.007.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				191.330
Herstellkosten brutto, rd.				1.198.000

Tabelle 25: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Maschinentechnik) für Variante 5: Ozonung nach der Nachklärung

Herstellungskosten Variante 5: Ozonung nach der Nachklärung	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Maschinentechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	23.000	23.000
Ozonanlage inkl. Dosiervorrichtung (Container)	1	Stck	300.000	300.000
Transportkosten Container	1	psch	2.000	2.000
Zulaufpumpe, 225 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Schieber DN 600, E-Antrieb	3	Stck	8.000	24.000
Rohrleitung DN 600	20	m	600	12.000
Rohrleitung DN 80, Edelstahl	20	m	120	2.400
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	12.500	12.500
Sonstiges	1	psch	41.000	41.000
Gesamt netto				467.900
Baunebenkosten, 22 %, rd.				102.938
Herstellkosten netto				571.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				108.490
Herstellkosten brutto, rd.				679.000

Tabelle 26: Zusammenstellung der Herstellungskosten (E-MSR-Technik) für Variante 5: Ozonung nach der Nachklärung

Herstellungskosten Variante 5: Ozonung nach der Nachklärung	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
E-MSR-Technik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	9.000	9.000
Durchflussmengenmessung Ultraschall	1	Stck	6.000	6.000
DOC-Onlinemessung	1	Stck	50.000	50.000
Kabel Energieversorgung	1	psch	15.000	15.000
Neue Niederspannungsunterverteilung	1	psch	50.000	50.000
Verkabelung	1	psch	5.000	5.000
Blitzschutz und Potentialausgleich	1	psch	3.000	3.000
Anpassung/Erweiterung PLS	1	psch	20.000	20.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	8.000	8.000
Allgemeine Leistungen	1	psch	16.000	16.000
Gesamt netto				182.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				40.040
Herstellkosten netto				222.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				42.180
Herstellkosten brutto, rd.				264.000

Tabelle 27: Projektkostenbarwert und Jahreskosten für Variante 5: Ozonung nach der Nachklärung

Variante 5 Ozonung nach NKB	Barwert	Jahreskosten
	€	€/a
Kosten		
Investitionskosten	2.141.000	179.000
zus. Kosten für		
Energie	545.000	39.000
Betriebsmittel	314.000	23.000
Schlamm Entsorgung	0	0
Spurenstoffanalyse	65.000	5.000
Wartung	385.000	28.000
Personal	389.000	28.000
Einsparungen		
Abwasserabgabe	580.000	42.000
Förderung NRW	1.499.000	126.000
Summe	1.760.000	134.000

Der Projektkostenbarwert für Variante 5 beträgt rd. 1,8 Mio. €. Dies entspricht jährlichen Kosten von rd. 134.000 €/a über 15 Jahre. Bezogen auf den mittleren jährlichen Abwasseranfall von rd. 2,3 Mio. €/a ergeben sich somit spezifische Kosten von rd. 0,058 €/m³, oder rd. 5,15 €/(EW·a) bei einer mittleren Belastung von ca. 26.000 EW.

Der PKBW beträgt für einen Zeitraum von 30 Jahren für Variante 5 rd. 3,3 Mio. € und entsprechend die Jahreskosten rd. 145.000 €/a. Dies entspricht spezifischen Kosten von rd. 0,063 €/m³ oder 5,58 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

4.6 Variante 6: Ozondosierung mit anschließender GAK-Filtration

Neben den bereits beschriebenen verfahrenstechnischen Varianten ist grundsätzlich die Kombination von Ozon und Aktivkohle denkbar. Daher wird hier als ein mögliches Verfahren die Ozonung mit anschließender GAK-Filtration betrachtet. Dabei wirkt die GAK-Filtration als biologisch aktive Nachbehandlung für die Ozonung mit zusätzlich adsorptiver Wirkung. Dadurch kann eine effektive Spurenstoffelimination im Ozonreaktor und eine anschließende Entfernung von Reaktionsprodukten und weiteren Spurenstoffen in der GAK-Filtration erreicht werden.

Zusätzlich werden die positiven Nebeneffekte der Ozonung (Desinfektion) und der Aktivkohle (Entfärbung) gemeinsam ausgenutzt.

Der Betrieb einer kombinierten Stufe zur Spurenstoffelimination zwischen Nachklärung und Schönungsteich hätte durch das anfallende Spülwasser die in Variante 4 beschriebenen Auswirkungen auf den Betrieb der bestehenden Reinigungsstufen der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock. Außerdem ist das vorhandene hydraulische Gefälle zwischen der Nachklärung und dem Schönungsteich nicht ausreichend, um auch nur ein einziges weiteres Becken ohne zusätzliches Pumpwerk integrieren zu können. Daher wird im Zulauf zum Ozonreaktor ein Pumpwerk zur Hebung des zu behandelnden Volumenstroms vorgesehen.

4.6.1 Dimensionierung

Die Dimensionierung der einzelnen Bauwerke erfolgt für die Ozonung wie in Variante 5 und für die GAK-Filtration wie in Variante 4 beschrieben. Der Ozonreaktor bedarf dementsprechend eines Volumens von rd. 250 m³ und die Flockungsfiltration zur Aufnahme der granulierten Aktivkohle erfordert insgesamt 8 Filterkammern mit jeweils 12 m² Filterfläche.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die erforderliche Ozondosis im Vergleich zu Variante 5 nicht ändert. Die Standzeit der Aktivkohlefilter wird mit 30.000 BV jedoch deutlich länger angesetzt, da zum einen die Spurenstoffbelastung im Zulauf zur GAK-Filtration verringert ist und zum anderen eine biologische Wirkung nur bei längeren Standzeiten erreicht wird. Dies bedeutet bei maximalem Trockenwetterzufluss eine Standzeit von über drei Jahren und eine erforderliche Anzahl von Filteraustauschen von zwei bis drei Mal pro Jahr. Dadurch wird pro Jahr nur der Austausch von im Mittel rd. 59 m³ GAK erforderlich, was bei rd. 2,3 Mio. m³/a an Abwasser einen spezifischen Kohlebedarf von rd. 0,03 l_{GAK}/m³ Abwasser bedeutet.

4.6.2 Einbindung in die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Die Einbindung der Verfahrenskombination von Ozonung und GAK-Filtration kann ähnlich erfolgen, wie in den Varianten 4 und 5 beschrieben. Es ist lediglich eine größere Fläche des Schönungsteiches erforderlich, um sowohl die erforderlichen Bauwerke für die Ozonung als auch die Flockungsfiltration zuzüglich eines LKW-Wendeplatzes auf der freien Fläche neben der Biologie I errichten zu können. Die

Bauwerksbeschreibungen entsprechen dabei im Wesentlichen denen der Varianten 4 und 5. Auch die Voraussetzungen für die Positionierung der einzelnen Komponenten entsprechen den in Variante 4 und 5 beschriebenen Bedingungen.

Die Umsetzung der Variante 6 ist in Abbildung 20 schematisch dargestellt.

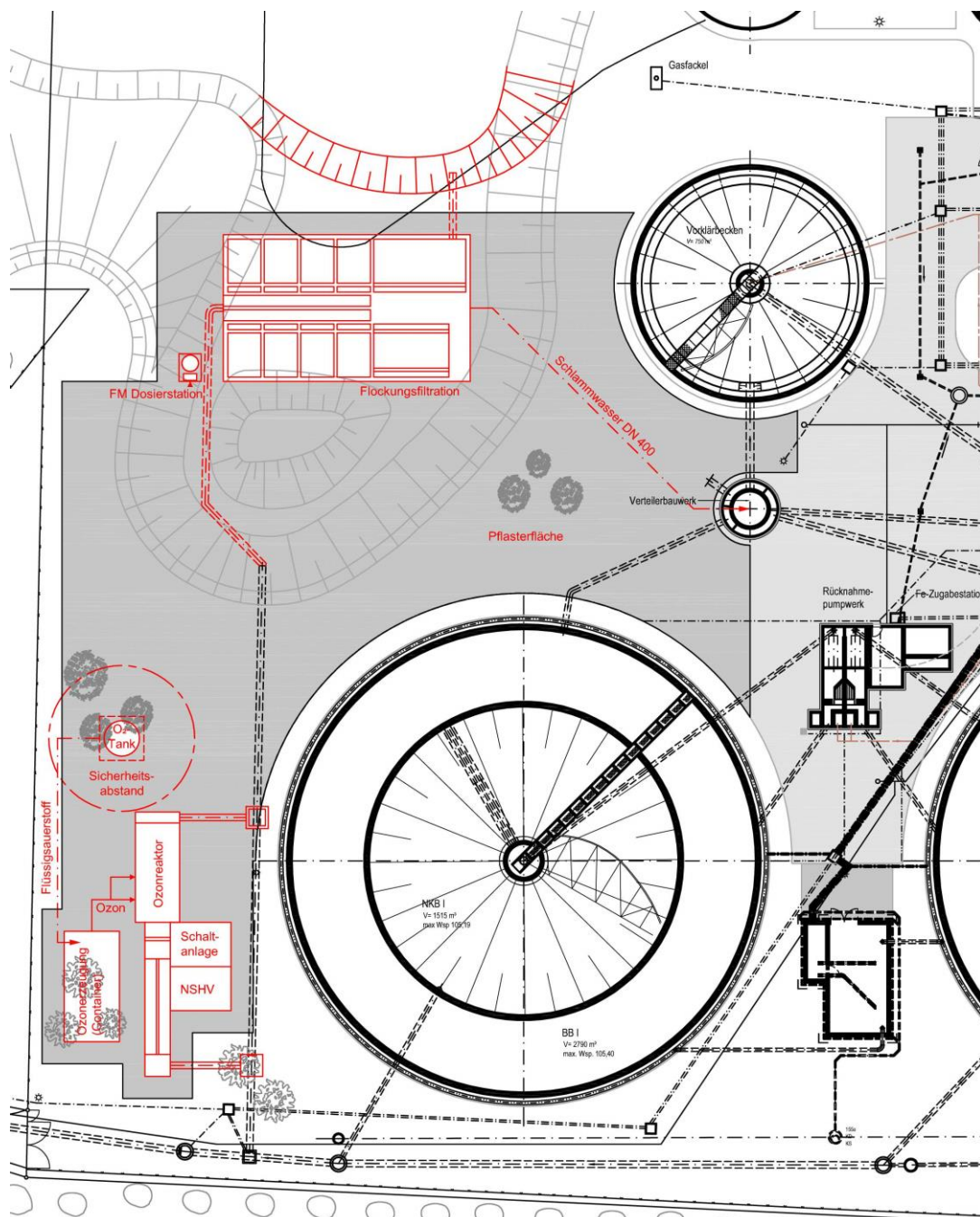


Abbildung 20: Umsetzung der Variante 6 auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

4.6.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 6 (Ozonung mit anschließender GAK-Filtration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock wurden, wie die zuvor beschriebenen Varianten, auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten oder Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines Ozonreaktors auf der Freifläche neben der Biologie I
- Neubau einer Flockungsfiltration inkl. Fällmitteldosierstation und erforderlichem Zulaufhebewerk
- GAK-Filtermaterial als Erstausrüstung für 8 Filterkammern
- Anschluss Zu-/Ablaufleitung an die Ablaufleitung von den Nachklärbecken zum Schönungsteich sowie deren Verlängerung
- Verkleinerung des Schönungsteiches um rd. 2.000 m²
- Erstellung einer Verkehrs-/Rangierfläche für LKW
- Errichtung eines Fundamentes für die Ozonerzeugung (Container) und den Flüssigsauerstofftank
- Ozongenerator einschl. Dosiervorrichtung als „Containerlösung“
- Installation einer erdverlegten Dosierleitung vom Ozongenerator zum Ozonreaktor
- Austausch des vorhandenen Trafo
- Errichtung einer neuen NSUV
- Anpassung bzw. Erweiterung des PLS

Bei den Betriebskosten wurden auch hier die anfallenden Kosten für Energie, Betriebsmittel, Schlamm Entsorgung, Spurenstoffanalyse, Wartung und Personal

mit berücksichtigt. Darüber hinaus wurden, ebenfalls wie bei den vorher beschriebenen Varianten, die zu erwartende Einsparung durch verringerte CSB-Ablaufwerte, sowie die Einsparungen durch die öffentlichen Fördergelder in Höhe von 70 % der Netto-Herstellungskosten in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung von 2,0 % berücksichtigt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit ungeklärten Gesetzeslage wird zunächst ein Abschreibungszeitraum von lediglich 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 30 Jahre angestellt. Als Preis für die benötigte Energie wird der in der Energieanalyse verwendete Strompreis von 0,18 €/kWh angesetzt [18].

In Tabelle 28 bis Tabelle 30 sind die Herstellungskosten für eine Ozonung mit anschließender GAK-Filtration dargestellt. Tabelle 31 fasst die zugehörigen Barwerte und Jahreskosten zusammen.

Tabelle 28: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Bautechnik) für Variante 6: Ozonung und GAK-Filtration

Herstellungskosten Variante 6: Ozonung und GAK-Filtration	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Bautechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	186.000	186.000
Wandbeton inkl. Bewehrung	900	m ³	800	720.000
Deckenbeton inkl. Bewehrung	200	m ³	600	120.000
Sohlbeton inkl. Bewehrung	200	m ³	400	80.000
Erdarbeiten	3.500	m ³	30	105.000
Baugrubenverbau	400	m ²	250	100.000
Frostschutz Fundament Container & O ₂ -Tank	1	psch	3.600	3.600
Verkleinerung Schönungsteich um 2.000 m ³	1	psch	80.000	80.000
Straßen und Wege	2.300	m ²	120	276.000
Oberflächenentwässerung	1	psch	4.000	4.000
Wanddurchdringungen für DN 600	9	Stck	1.600	14.400
Wanddurchdringungen für DN 500	18	Stck	1.500	27.000
Wanddurchdringungen für DN 400	2	Stck	1.400	2.800
Wanddurchdringungen für DN 250	8	Stck	1.000	8.000
Wanddurchdringungen für DN 200	9	Stck	1.000	9.000
Wasserhaltung	1	psch	50.000	50.000
GAK-Filtermaterial	192	m ³	450	86.400
Sonstiges	1	psch	169.000	169.000
Gesamt netto				2.041.200
Baunebenkosten, 22 %, rd.				449.064
Herstellkosten netto				2.490.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				473.100
Herstellkosten brutto, rd.				2.963.000

Tabelle 29: Zusammenstellung der Herstellungskosten (Maschinentechnik) für Variante 6: Ozonung und GAK-Filtration

Herstellungskosten Variante 6: Ozonung und GAK-Filtration	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
Maschinentechnik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	61.000	61.000
Ozonanlage inkl. Dosiervorrichtung (Container)	1	Stck	300.000	300.000
Transportkosten Container	1	psch	2.000	2.000
Fällmitteldosierstation	1	psch	100.000	100.000
Schneckenpumpe, ø 1200 mm	2	Stck	37.000	74.000
Lieferung und Montage Schneckenpumpe	2	Stck	6.500	13.000
Spülwasserpumpe, 450 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Schlammwasserpumpe, 225 m³/h, FU-geregelt	3	Stck	17.000	51.000
Spülluftgebläse, 1.125 m³/h mit Schallhaube	3	Stck	12.000	36.000
Absperrklappe DN 100	3	Stck	500	1.500
Zu- und Abluft	1	psch	5.000	5.000
Rohrleitung DN 600	40	m	600	24.000
Rohrleitung DN 500	70	m	500	35.000
Rohrleitung DN 400	60	m	350	21.000
Rohrleitung DN 250	30	m	200	6.000
Rohrleitung DN 200	50	m	150	7.500
Rohrleitung DN 80, Edelstahl	20	m	120	2.400
Plattenschieber 200x200mm, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 600, E-Antrieb	4	Stck	8.000	32.000
Schieber DN 500, E-Antrieb	24	Stck	5.000	120.000
Schieber DN 400, E-Antrieb	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 250, Regelantrieb, FU-geregelt	8	Stck	4.500	36.000
Schieber DN 200, E-Antrieb	8	Stck	3.500	28.000
Formstücke DN 600	2	Stck	1.450	2.900
Formstücke DN 500	28	Stck	1.200	33.600
Formstücke DN 400	10	Stck	800	8.000
Formstücke DN 250	11	Stck	400	4.400
Formstücke DN 200	26	Stck	300	7.800
Wandeinbaurohr DN 150	8	Stck	750	6.000
Wandeinbaurohr DN 100	8	Stck	750	6.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	12.500	12.500
Sonstiges	1	psch	110.000	110.000
Gesamt netto				1.147.100
Baunebenkosten, 22 %, rd.				252.362
Herstellkosten netto				1.399.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				265.810
Herstellkosten brutto, rd.				1.665.000

Tabelle 30: Zusammenstellung der Herstellungskosten (E-MSR-Technik) für Variante 6: Ozonung und GAK-Filtration

Herstellungskosten Variante 6: Ozonung und GAK-Filtration	Menge		Kosten [€]	
	Anzahl	Einheit	EP	GP
E-MSR-Technik				
Baustelleneinrichtung	1	psch	16.000	16.000
Durchflussmengenmessung Ultraschall	1	Stck	6.000	6.000
DOC-Onlinemessung	1	Stck	50.000	50.000
Füllstandsmessung, Radar	10	Stck	1.000	10.000
Austausch Trafo	1	psch	15.000	15.000
Kabel Energieversorgung	1	psch	15.000	15.000
Neue Niederspannungsunterverteilung	1	psch	120.000	120.000
Verkabelung	1	psch	8.000	8.000
Blitzschutz und Potentialausgleich	1	psch	8.000	8.000
Automatisierungstechnik Flockungsfiltration	1	psch	20.000	20.000
Anpassung/Erweiterung PLS	1	psch	20.000	20.000
Werkstatt- und Montageplanung, Dokumentation	1	psch	12.000	12.000
Allgemeine Leistungen	1	psch	29.000	29.000
Gesamt netto				329.000
Baunebenkosten, 22 %, rd.				72.380
Herstellkosten netto				401.000
Mehrwertsteuer, 19 %, rd.				76.190
Herstellkosten brutto, rd.				477.000

Tabelle 31: Projektkostenbarwert und Jahreskosten für Variante 6: Ozonung und GAK-Filtration

Variante 6: Ozonung und GAK	Barwert	Jahreskosten
	€	€/a
Kosten		
Investitionskosten	5.106.000	428.000
zus. Kosten für		
Energie	915.000	66.000
Betriebsmittel	800.000	58.000
Schlamm Entsorgung	0	0
Spurenstoffanalyse	65.000	5.000
Wartung	898.000	65.000
Personal	886.000	64.000
Einsparungen		
Abwasserabgabe	580.000	42.000
Förderung NRW	3.574.000	299.000
Summe	4.516.000	345.000

Der Projektkostenbarwert für Variante 6 beträgt rd. 4,5 Mio. €. Dies entspricht jährlichen Kosten von rd. 345.000 €/a über 15 Jahre. Bezogen auf den mittleren jährlichen Abwasseranfall von rd. 2,3 Mio. €/a ergeben sich somit spezifische Kosten von rd. 0,149 €/m³, oder rd. 13,27 €/(EW·a) bei einer mittleren Belastung von ca. 26.000 EW.

Der PKBW beträgt für einen Zeitraum von 30 Jahren für Variante 6 rd. 8,4 Mio. € und entsprechend die Jahreskosten rd. 362.000 €/a. Dies entspricht spezifischen Kosten von rd. 0,156 €/m³ oder 13,92 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

5. Variantenvergleich

5.1 Bewertungskriterien

Bei der Bewertung der vorgestellten Verfahrensvarianten zur Umsetzung einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock kommt eine Reihe von Kriterien zum Tragen. Dazu zählen nicht nur ökonomische Gesichtspunkte, sondern auch Aspekte der Ökologie, des Ressourcenverbrauchs, des Arbeitsaufwandes und der Arbeitssicherheit. Die Auswahl der Kriterien für die Bewertung der einzelnen Verfahrensvarianten wurde auf der Grundlage des RiSKWa-Leitfadens „Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser“ getroffen. Diese Publikation befindet sich derzeit in der Vorbereitung zur Veröffentlichung [30]. Die vom RiSKWa-Leitfaden vorgeschlagene Liste von Kriterien wurde angepasst und es wurden weitere Kriterien hinzugefügt, um den Aspekt der Arbeitssicherheit und der Planungssicherheit zu berücksichtigen. Die Bewertungskriterien sind in Hauptpunkten zusammengefasst, deren Gewichtung sich aus der Summe der Gewichtungen der einzelnen Kriterien ergibt. Die Gewichtungen verteilen sich wie folgt:

1. Bewertungskriterien zur Ökonomie: 50 %
2. Bewertungskriterien zu betrieblichen Aspekten: 15 %
3. Bewertungskriterien zur Ökologie: 26 %
4. Bewertungskriterien zur Planungssicherheit: 9 %

Tabelle 32 zeigt die gewählten Bewertungskriterien und ihre detaillierte Gewichtung.

Tabelle 32: Liste der gewählten Bewertungskriterien und Gewichtungen

1. Ökonomie	50,00%
Projektkostenbarwert	25,00%
Investitionskosten	15,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	10,00%
2. Betriebliche Aspekte	15,00%
Steuerung / Regelung	5,00%
Arbeitssicherheit	5,00%
Betriebssicherheit / Redundanzen	5,00%
3. Ökologie	26,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%
CO ₂ -Belastung	8,00%
Reststoffanfall	8,00%
4. Planungssicherheit	9,00%
Klärschlamm Entsorgung	3,00%
Verschärfung Pges-Grenzwerte	3,00%
Mikroplastik	3,00%

Eine Reihe der gewählten Kriterien kann durch errechnete Zahlenwerte (z.B. Kosten, Energieverbräuche, Betriebsmittelverbräuche) ausgedrückt und entsprechend bewertet werden. Die Variante, die das Kriterium am besten erfüllt, erhält die gesamte dem Kriterium zugeschriebene prozentuale Gewichtung. Die Variante mit der schlechtesten Kriterienerfüllung erhält 0 %. Die übrigen Varianten erhalten entsprechend ihrer Rangfolge und ihrem Abstand zum Optimum Anteile an der prozentualen Gewichtung des Kriteriums. Für die Kriterien, die nicht in Zahlenwerten ausgedrückt werden können, wird manuelle eine Abwägung und Gewichtung vorgenommen. Die Variante, die in der Summe über alle Kriterien die höchste prozentuale Gewichtung erreicht, ist die vorzuziehende Variante.

5.2 Vergleich der Verfahrensvarianten und Vorzugsvariante

Vergleicht man die vorgestellten Verfahrensvarianten vor einem rein monetären Hintergrund (Projektkostenbarwert bzw. Jahreskosten), ergibt sich das in Tabelle 33 dargestellte Bild. Variante 5 (Ozonung) steht damit auf Platz 1 und erfordert

nicht einmal einen halb so großen Kostenaufwand wie die auf Platz 2 stehende Variante 4 (GAK-Filtration).

Durch eine Änderung der Vorschriften zur Klärschlamm Entsorgung, durch die rd. 1,2 Mio. € nicht mehr den PAK-Varianten (Varianten 1 bis 3) angerechnet werden könnten, würde sich die Rangfolge der Verfahrensvarianten nach monetärer Betrachtung leicht ändern. Variante 5 (Ozonung) läge weiterhin auf Rang 1, wäre jedoch rd. 52 % günstiger als Variante 1 (PAK in Kontaktbecken nach der Nachklärung), die ohne die Kosten für die thermische Schlamm Entsorgung auf Rang 2 vorrutschen würde.

Für die Umsetzung der Varianten 1 bis 4 und 6 ist der Neubau und Betrieb einer von der Spurenstoffelimination unabhängigen Verfahrensstufe, einer Flockungsfiltration, erforderlich. Von den in Tabelle 33 aufgeführten Projektkostenbarwerten entfallen knapp 4,5 Mio. € oder rd. 363.000 €/a allein auf den Bau und Betrieb der Flockungsfiltration. Das entspricht spezifischen Kosten von rd. 0,157 €/m³ Abwasser oder rd. 13,97 €/(EW·a). Dabei werden die Investitionskosten einer Flockungsfiltration nicht in gleicher Weise gefördert wie die Investitionskosten für die Spurenstoffelimination. Würden sich die P_{ges} -Ablaufgrenzwerte verschärfen (z.B. auf 0,3 mg/l), wären diese voraussichtlich nur durch den Betrieb einer Flockungsfiltration einzuhalten. In solch einem Fall müssten die Kosten für die Flockungsfiltration unabhängig von den Kosten für die Spurenstoffelimination betrachtet werden. Dadurch würden sich die Projektkostenbarwerte der Varianten 1 bis 4 und 6 auf deutlich unter 1 Mio. € verringern, während die Kosten für die Ozonanlage unverändert blieben. In diesem Fall wäre Variante 4 (GAK-Filtration) für die Spurenstoffelimination auf Rang 1 und Variante 5 (Ozonung) auf Rang 6.

Eine Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen in den genannten Punkten ist derzeit jedoch keineswegs konkret absehbar. Daher werden sowohl die Kosten für die Klärschlamm Entsorgung als auch für die Flockungsfiltration im folgenden Variantenvergleich vollständig den jeweiligen Varianten zugerechnet.

Tabelle 33: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock über 15 Jahre

Kostenvergleich über 15 Jahre	Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: PAK in BB	Variante 4: GAK	Variante 5: Ozon	Variante 6: Ozon+GAK
Herstellungskosten (brutto), davon	4.017.000 €	4.042.000 €	3.952.000 €	3.595.000 €	2.141.000 €	5.106.000 €
Bautechnik (netto)	1.352.000 €	1.346.000 €	1.348.800 €	1.445.200 €	825.000 €	2.041.200 €
Maschinentechnik (netto)	1.172.200 €	1.195.200 €	1.159.200 €	799.700 €	467.900 €	1.147.100 €
E-MSR-Technik (netto)	243.000 €	243.000 €	214.000 €	231.000 €	182.000 €	329.000 €
Betriebskosten, davon	4.020.000 €	4.032.000 €	4.210.000 €	3.208.000 €	1.698.000 €	3.564.000 €
Energie	598.000 €	598.000 €	598.000 €	545.000 €	545.000 €	915.000 €
Betriebsmittel	439.000 €	439.000 €	644.000 €	1.449.000 €	314.000 €	800.000 €
Schlamm Entsorgung	1.429.000 €	1.429.000 €	1.429.000 €	0 €	0 €	0 €
Spurenstoffanalyse	65.000 €	65.000 €	65.000 €	65.000 €	65.000 €	65.000 €
Wartung	906.000 €	918.000 €	891.000 €	630.000 €	385.000 €	898.000 €
Personal	583.000 €	583.000 €	583.000 €	519.000 €	389.000 €	886.000 €
Einsparungen, davon	3.392.000 €	3.409.000 €	3.346.000 €	3.097.000 €	2.079.000 €	4.154.000 €
Abwasserabgabe	580.000 €	580.000 €	580.000 €	580.000 €	580.000 €	580.000 €
Förderung NRW	2.812.000 €	2.829.000 €	2.766.000 €	2.517.000 €	1.499.000 €	3.574.000 €
Projektkostenbarwert [€]	4.645.000	4.665.000	4.816.000	3.706.000	1.760.000	4.516.000
Jahreskosten [€/a]	349.000	351.000	360.000	278.000	134.000	345.000
spez. Kosten [€/m³]	0,151	0,152	0,156	0,120	0,058	0,149
spez. Kosten [€/(EW·a)]	13,42	13,50	13,85	10,69	5,15	13,27
Rangfolge nach PKBW	4	5	6	2	1	3

In diesen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind aufgrund der neuen Verfahrenstechniken die Projektkostenbarwerte aller Varianten vollständig mit einem Abschreibungszeitraum von 15 Jahren berechnet worden. Für die Bautechnik ist jedoch ein Abschreibungszeitraum von 30 Jahren üblich. Würde man die PKBW über 30 Jahre berechnen und die entsprechenden Reinvestitionskosten nach 15 Jahren für Maschinen- und E-MSR-Technik berücksichtigen, so würde sich an der Rangfolge der Varianten nichts ändern (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock über 30 Jahre

Kostenvergleich über 30 Jahre	Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: PAK in BB	Variante 4: GAK	Variante 5: Ozon	Variante 6: Ozon+GAK
Herstellungskosten (brutto), davon	5.288.000 €	5.334.000 €	5.184.000 €	4.508.000 €	2.746.000 €	6.433.000 €
Bautechnik (netto)	1.352.000 €	1.346.000 €	1.348.800 €	1.445.200 €	825.000 €	2.041.200 €
Maschinentechnik (netto)	1.172.200 €	1.195.200 €	1.159.200 €	799.700 €	467.900 €	1.147.100 €
E-MSR-Technik (netto)	243.000 €	243.000 €	214.000 €	231.000 €	182.000 €	329.000 €
Betriebskosten, davon	7.494.000 €	7.517.000 €	7.846.000 €	5.980.000 €	3.165.000 €	6.643.000 €
Energie	1.114.000 €	1.114.000 €	1.114.000 €	1.015.000 €	1.016.000 €	1.705.000 €
Betriebsmittel	819.000 €	819.000 €	1.200.000 €	2.702.000 €	584.000 €	1.491.000 €
Schlamm Entsorgung	2.663.000 €	2.663.000 €	2.663.000 €	0 €	0 €	0 €
Spurenstoffanalyse	122.000 €	122.000 €	122.000 €	122.000 €	122.000 €	122.000 €
Wartung	1.689.000 €	1.712.000 €	1.660.000 €	1.174.000 €	718.000 €	1.674.000 €
Personal	1.087.000 €	1.087.000 €	1.087.000 €	967.000 €	725.000 €	1.651.000 €
Einsparungen, davon	3.893.000 €	3.910.000 €	3.847.000 €	3.598.000 €	2.580.000 €	4.655.000 €
Abwasserabgabe	1.081.000 €	1.081.000 €	1.081.000 €	1.081.000 €	1.081.000 €	1.081.000 €
Förderung NRW	2.812.000 €	2.829.000 €	2.766.000 €	2.517.000 €	1.499.000 €	3.574.000 €
Projektkostenbarwert [€]	8.889.000	8.941.000	9.183.000	6.890.000	3.331.000	8.421.000
Jahreskosten [€/a]	375.000	377.000	384.000	290.000	145.000	362.000
spez. Kosten [€/m³]	0,162	0,163	0,166	0,125	0,063	0,156
spez. Kosten [€/(EW·a)]	14,42	14,50	14,77	11,15	5,58	13,92
Rangfolge nach PKBW	4	5	6	2	1	3

In den oben dargestellten Kosten ist eine Förderung der brutto-Herstellungskosten um 70 % durch das Land NRW berücksichtigt. Lässt man diese Förderung unberücksichtigt, verändert sich die Rangfolge der Varianten im Mittelfeld leicht. Jede einzelne Variante wird zwischen rd. 1,5 Mio. € und rd. 3,6 Mio. € teurer. Die Veränderung der Kosten ohne die Berücksichtigung der NRW-Förderung sind in Tabelle 35 für einen Zeitraum von 15 Jahren und in Tabelle 36 über 30 Jahre dargestellt.

Tabelle 35: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock über 15 Jahre ohne Berücksichtigung der NRW-Förderung

Kostenvergleich (15 Jahre) ohne NRW-Förderung	Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: PAK in BB	Variante 4: GAK	Variante 5: Ozon	Variante 6: Ozon+GAK
NRW-Förderung [€]	2.812.000	2.829.000	2.766.000	2.517.000	1.499.000	3.574.000
PKBW ohne NRW-Förderung [€]	7.457.000	7.494.000	7.582.000	6.223.000	3.259.000	8.090.000
Jahreskosten ohne Förderung [€/a]	585.000	588.000	592.000	489.000	260.000	644.000
spez. Kosten [€/m³]	0,253	0,254	0,256	0,211	0,112	0,278
spez. Kosten [€/(EW·a)]	22,50	22,62	22,77	18,81	10,00	24,77
Rangfolge ohne NRW-Förderung	3	4	5	2	1	6

Tabelle 36: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock über 30 Jahre ohne Berücksichtigung der NRW-Förderung

Kostenvergleich (30 Jahre) ohne NRW-Förderung	Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: PAK in BB	Variante 4: GAK	Variante 5: Ozon	Variante 6: Ozon+GAK
NRW-Förderung [€]	2.812.000	2.829.000	2.766.000	2.517.000	1.499.000	3.574.000
PKBW ohne NRW-Förderung [€]	11.701.000	11.770.000	11.949.000	9.407.000	4.830.000	11.995.000
Jahreskosten ohne Förderung [€/a]	518.000	521.000	525.000	418.000	221.000	544.000
spez. Kosten [€/m ³]	0,224	0,225	0,227	0,181	0,095	0,235
spez. Kosten [€/(EW-a)]	19,92	20,04	20,19	16,08	8,50	20,92
Rangfolge ohne NRW-Förderung	3	4	5	2	1	6

Der Vergleich der spezifischen Kosten aller Verfahrensvarianten zu anderen Projekten in NRW und der Schweiz ist in Abbildung 21 dargestellt. Der Vergleich beinhaltet alle Kosten mit Ausnahme der Spurenstoffanalytik, da diese in den unterschiedlichen Projekten zum Teil sehr stark variiert. Einsparungen aus Abgabenbefreiung oder NRW-Förderung wurden für den Vergleich ebenfalls nicht berücksichtigt. Die abgeschätzten spezifischen Kosten liegen für die Ozonvariante 5 über der Kostenfunktion aus der Schweiz. Im Vergleich zu Projekten in NRW sind die Kosten für eine Ozonanlage auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock im mittleren Bereich einzuordnen. Die abgeschätzten spez. Kosten für die PAK-Varianten 1 bis 3 liegen deutlich über der Kostenfunktion aus Baden-Württemberg (BW) und der Schweiz. Auch im Vergleich zu PAK-Projekte in NRW sind die abgeschätzten spez. Kosten für eine PAK-Behandlung auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock hoch. Für diese Abweichung ist vermutlich der erforderliche Neubau einer Flockungsfiltration verantwortlich, da die meisten Anlagen, auf denen PAK-Projekte umgesetzt wurden, nach Wissen des Verfassers bereits über eine Filtration verfügten. Für GAK-Anlagen liegt noch keine Kostenfunktion vor. Die für Schloß Holte-Stukenbrock abgeschätzten spez. Kosten für eine GAK-Filtration scheinen jedoch ebenfalls höher auszufallen als die spez. Kosten auf anderen Anlagen in NRW. Auch dies könnte in dem erforderlichen Neubau einer Flockungsfiltration begründet liegen. Die Kombination von Ozon und GAK auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock liegt erwartungsgemäß oberhalb der spezifischen Kosten für die einzelnen Verfahren. Vergleichswerte aus NRW, BW oder der Schweiz liegen derzeit für diese Verfahrenskombination nicht vor.

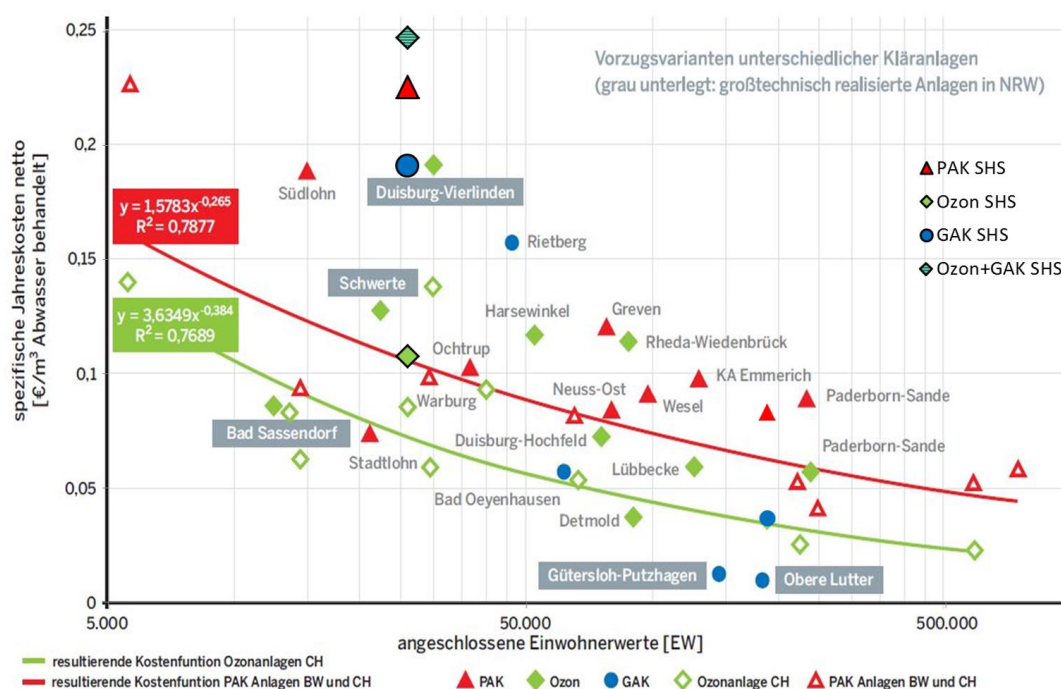


Abbildung 21: Vergleich der spezifischen Kosten zu Projekten in NRW, Baden-Württemberg und der Schweiz (Verfahrensvarianten für Schloß Holte-Stukenbrock schwarz umrandet dargestellt). Abbildung aus [4]

Werden nicht-monetäre Kriterien wie z.B. Ökologie, Ressourcenverbrauch, Kostenrisiken, Arbeitsaufwand und Arbeitssicherheit in den Variantenvergleich mit einbezogen, so ergibt sich das in Tabelle 37 zusammengefasste Ergebnis. Die detaillierte Bewertungsmatrix ist in Anhang 1 beigefügt.

Tabelle 37: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Zusammenfassung Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1: PAK	Variante 2: PAK in FF	Variante 3: PAK in BB	Variante 4: GAK	Variante 5: Ozon	Variante 6: Ozon+GAK
1. Ökonomie	50,00%	16,91%	16,62%	15,84%	21,72%	48,00%	7,45%
Projektkostenbarwert	25,00%	1,40%	1,24%	0,00%	9,08%	25,00%	2,45%
Investitionskosten	15,00%	5,51%	5,38%	5,84%	7,64%	15,00%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	5,00%	8,00%	5,00%
2. Betriebliche Aspekte	15,00%	5,00%	6,50%	6,50%	13,00%	4,00%	9,00%
Steuerung / Regelung	5,00%	2,50%	2,50%	2,50%	3,00%	4,00%	5,00%
Arbeitssicherheit	5,00%	2,50%	2,50%	2,50%	5,00%	0,00%	0,00%
Betriebssicherheit / Redundanzen	5,00%	0,00%	1,50%	1,50%	5,00%	0,00%	4,00%
3. Ökologie	26,00%	12,76%	12,76%	10,58%	13,10%	23,50%	20,66%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	9,00%
CO2-Belastung	8,00%	5,26%	5,26%	3,08%	0,00%	8,00%	4,66%
Reststoffanfall	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,60%	8,00%	7,00%
4. Planungssicherheit	9,00%	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%	9,00%
Einhaltung mögl. Spurenstoff-Grenzwerte	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4,00%	5,00%
Verschärfung Pges-Grenzwerte	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%
Mikroplastik	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%	38,67%	39,88%	36,91%	51,82%	79,50%	46,11%
Rangfolge		5	4	6	2	1	3

Die Bewertung der unterschiedlichen Kriterien über Gewichtungen führt dazu, dass die Variante 5 (Ozonung) mit rd. 28 %-Punkten Vorsprung auf Rang 1 steht. Rang 2 erhält Variante 4 (GAK-Filtration) mit rd. 6 %-Punkten Abstand zu Rang 3 (Variante 6: Ozonung mit anschließender GAK-Filtration). Mit Blick auf die derzeit unsichere Gesetzeslage bezüglich der Spurenstoffelimination bestünden aufgrund der geringsten Herstellungskosten bei der Umsetzung der Variante 5 (Ozonung) die geringsten Risiken. Im Bedarfsfall könnte auch eine Aktivkohlebehandlung der Ozonung im Nachhinein nachgeschaltet werden (entsprechend Variante 6). Durch die unterschiedlichen Vor- und Nachteile von Aktivkohle und Ozon bzw. durch die hohen Investitionskosten der Verfahrenskombination erzielt keine der sechs Varianten eine vollständige Kriterienerfüllung (maximal 79,5 % für Variante 5).

5.3 Sensitivitätsanalysen

Die Kosten für Betriebsmittel (PAK, GAK oder LOX) und Energie sind abhängig von dem aktuellen Betriebsmittelverbrauch und den jeweiligen Bezugspreisen. Um die Auswirkungen von abweichenden Mengen oder Preisen auf die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten abschätzen zu können, wurden für den Betriebsmittelverbrauch, die Betriebsmittelpreise und den Strompreis Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

5.3.1 Betriebsmittelverbrauch

Für den Betriebsmittelverbrauch wurden entsprechend der Fachliteratur Annahmen getroffen. Es wurde in der Sensitivitätsanalyse eine PAK-Dosis zwischen 10 g/m^3 und 20 g/m^3 betrachtet. Die Bemessung der Verfahrensvarianten erfolgte mit 10 gPAK/m^3 für Variante 1 und 2 und 15 gPAK/m^3 für Variante 3. Für die GAK-Filtration (Variante 4) wurden 10.000 BV für die Bemessung angenommen. Die Sensitivitätsanalyse erfolgte für 3.000 BV bis 30.000 BV. Der Ozonverbrauch wurde für die Sensitivitätsanalyse zwischen $5,6 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ und $18,5 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ (entsprechend 20 bis 75 mgCSB/l im Zulauf zum Ozonreaktor) variiert. Die Bemessung erfolgte für $8,2 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ entsprechend 31 mgCSB/l. Für Variante 6 wurden sowohl der Ozonverbrauch als auch die behandelten Bettvolumina in den bereits genannten Grenzen betrachtet. Die Auslegung erfolgte bezüglich des Ozonverbrauches analog zu Variante 5, während die Bemessung der Variante 6 mit 30.000 durchgesetzten Bettvolumina erfolgte.

Bezüglich des Betriebsmitteleinsatzes zeigt sich, dass die GAK-Varianten (Variante 4 und 6) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagiert (siehe Abbildung 22). Die Jahreskosten für die GAK-Filtration können je nach durchgesetzten Bettvolumina über 319.000 €/a variieren (etwa von - 25 % bis + 90 % der angesetzten Kosten). Für Variante 6 (Ozon und GAK-Filtration) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 385.000 €/a (etwa von - 4,1% bis + 108 % der angesetzten Kosten). Für die PAK-Varianten 1, 2 und 3 beträgt die Kostendifferenz rd. 30.000 €/a (etwa von ± 0 % bis + 8,6 % für V1 und V2 und etwa $\pm 4,2$ % für V3 der jeweils angesetzten Kosten) und für die Ozon-Variante 5 rd. 66.000 €/a (etwa von - 9,7 % bis + 40 % der angesetzten Kosten). Anhand der vorliegenden Erfahrungen aus früheren und aktuell laufenden großtechnischen Versuchen zur GAK-Filtration besteht Grund zu der Annahme, dass mit einer gut funktionierenden Nachklärung die Annahme von 10.000 BV für die GAK-Filtration (Variante 4) mindestens realistisch, wenn nicht sogar als pessimistisch einzuordnen ist.

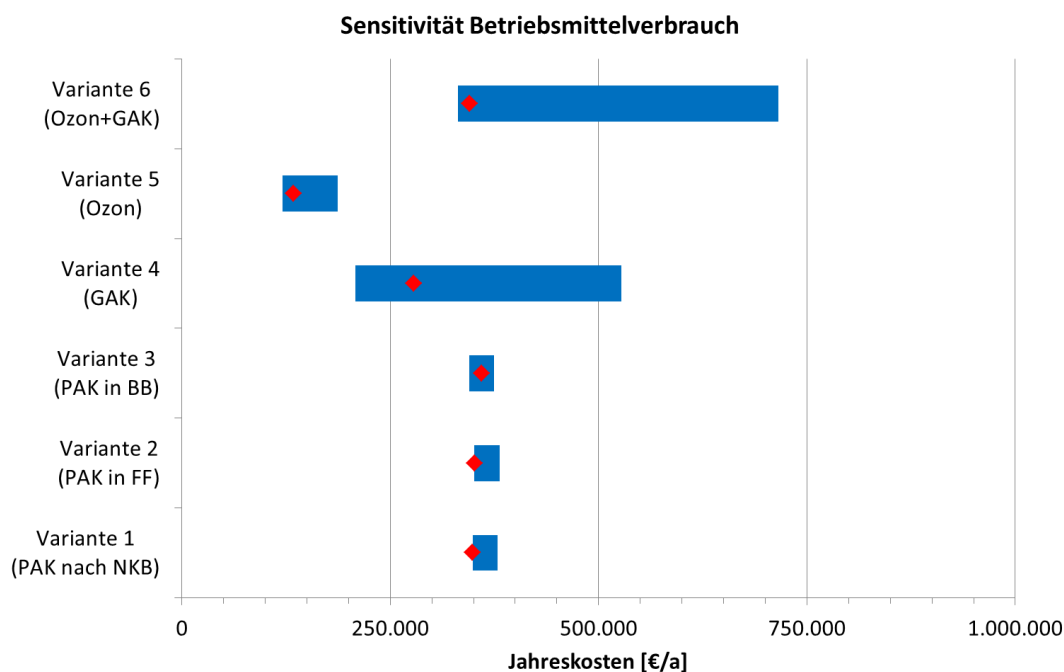


Abbildung 22: Sensitivität Betriebsmittelverbrauch Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

5.3.2 Betriebsmittelpreise

Die Preise für die Betriebsmittel entstammen für PAK und GAK ebenfalls der Fachliteratur. Der angesetzte LOX-Preis entspricht einer Herstellerangabe von Anfang 2015. Für den Bezug von PAK wurde ein Preis von 1,50 €/kgPAK angesetzt. Für GAK wurden 450 €/m³GAK zugrunde gelegt und flüssiger Sauerstoff wurde mit 0,12 €/lLOX angesetzt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden die angesetzten Preise für die Betriebsmittel jeweils um 10 % nach oben und unten variiert.

Bezüglich der Bezugspreise für die Betriebsmittel reagiert ebenfalls die GAK-Variante 4 und 6 am sensibelsten. Die PAK-Varianten 1 bis 3 und vor allem die Ozon-Variante 5 reagieren deutlich weniger sensibel auf Änderungen des Betriebsmittelpreises (siehe Abbildung 23). Die mögliche Änderung der Jahreskosten beträgt für die PAK-Varianten 1 und 2 rd. 5.000 €/a (etwa – 0,9 % bis + 0,6 % der jeweils angesetzten Kosten), für die PAK-Variante 3 (PAK in Biologie) rd. 8.000 €/a (etwa ± 1,1 %), für die GAK-Variante 4 rd. 16.000 €/a (etwa ± 2,9 %) und für die Ozon-Variante 5 rd. 3.000 €/a (etwa – 1,5 % bis + 0,8 %). Für die

Kombinationsvariante 6 (Ozon + GAK) liegt die Änderung der Jahreskosten bei rd. 11.000 €/a (etwa – 2,0 % bis + 1,2 % der jeweils angesetzten Kosten). Damit ist die Sensibilität bezüglich der Betriebsmittelpreise insgesamt deutlich geringer als die Sensibilität bezüglich des Betriebsmittelverbrauches.

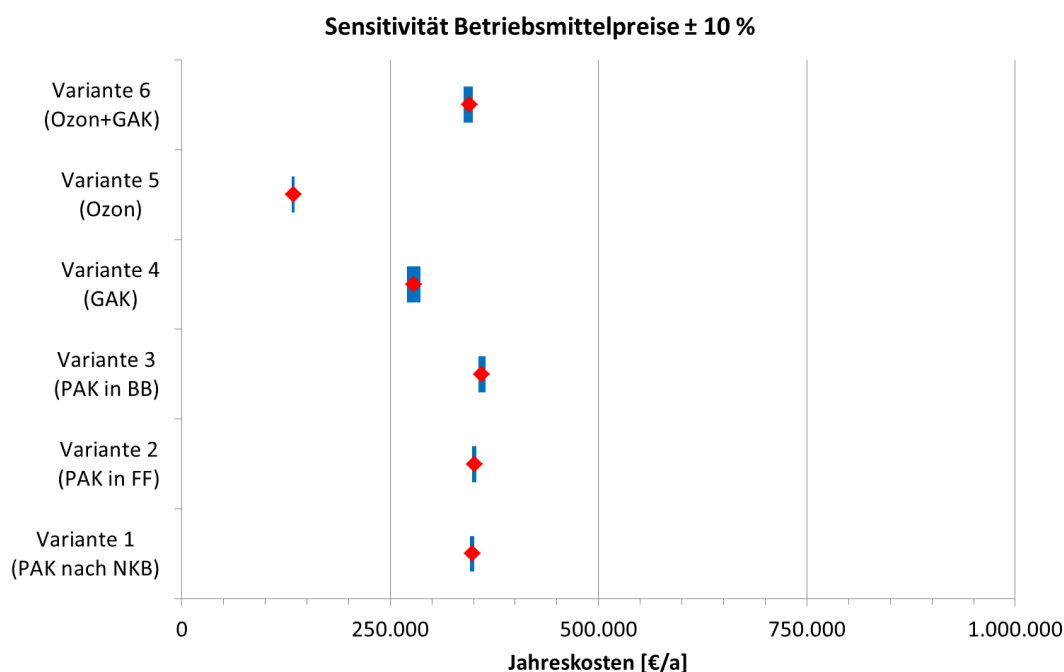


Abbildung 23: Sensitivität Betriebsmittelpreise $\pm 10\%$ Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

5.3.3 Strompreis

Der für die Berechnung gewählte Strompreis entspricht dem in der Energetischen Feinanalyse aus dem Jahr 2013 zugrunde gelegten Strompreis von 0,18 €/kWh [18]. Auf Änderungen des Strompreises um $\pm 10\%$ reagiert erwartungsgemäß die Verfahrenskombination (Variante 6) sensibler, als die Aktivkohle-Varianten (Varianten 1 bis 4) und die Ozonvariante (Variante 5). Die Jahreskosten für die Varianten 1 bis 4 verändern sich nur um rd. 8.000 €/a (etwa $\pm 1,1\%$ für Variante 1 bis 3 und etwa $\pm 1,4\%$ für Variante 4 der jeweils angesetzten Kosten) entsprechend dem Energiebedarf der Flockungsfiltration, des Hebewerkes und den geringen Menge für die PAK-Dosierung. Die Ozon-Variante 5 dagegen benötigt relativ viel Energie für die Ozongeneration und die entsprechende Sicherheitstechnik, sowie vergleichsweise dazu geringe Mengen für das erforderliche Hebewerk. Eine

Strompreisänderung bewirkt auch hier eine Kostenänderung von rd. 8.000 €/a (etwa $\pm 3,0\%$). Die Variante 6 erfordert einen Energieeinsatz sowohl für die Flockungsfiltration und das Hebewerk als auch für die Ozonerzeugung. Durch die in Summe höhere Anzahl an Verbrauchern ändern sich die Energiekosten der Variante 6 durch eine Strompreisänderung um rd. 13.000 €/a (etwa $-2,0\%$ bis $+1,7\%$ der jeweils angesetzten Kosten).

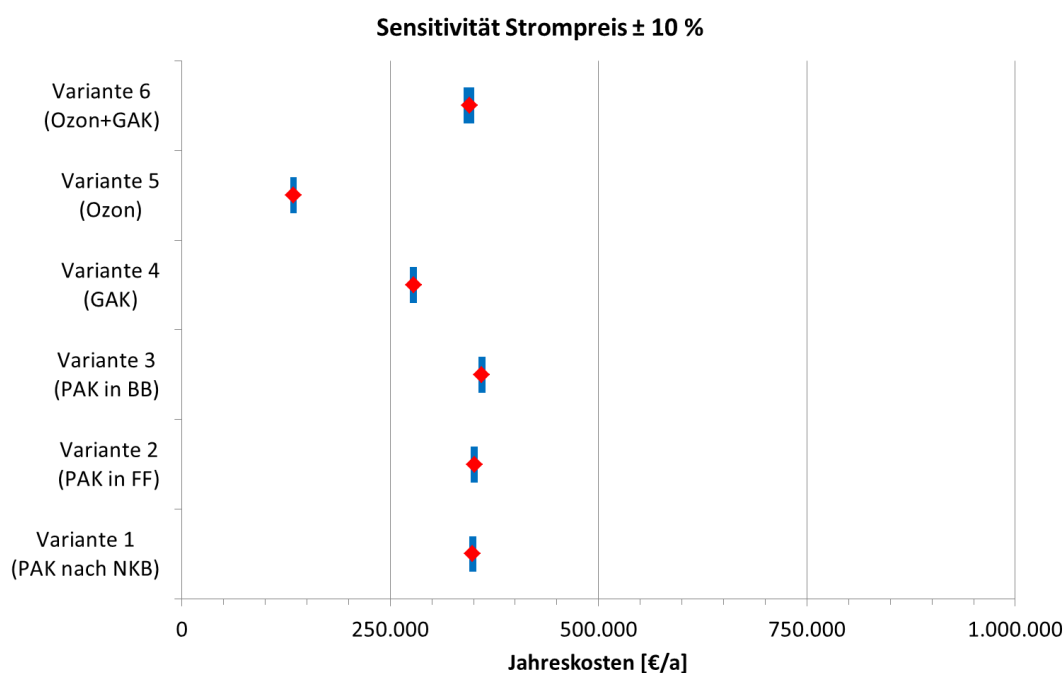


Abbildung 24: Sensitivität Strompreis $\pm 10\%$ Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

5.3.4 Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen

In Tabelle 38 werden die Ergebnisse der Sensibilitätsanalysen zusammengefasst. Ähnlich wie in der Bewertungsmatrix beim Variantenvergleich wurde ein Punktesystem zur Bewertung genutzt. Ein Punkt steht für keine bis kaum Sensibilität und fünf Punkte stehen für eine sehr starke Sensibilität. Die Gewichtungen für die drei unterschiedlichen Sensitivitätsanalysen sind angegeben. Die gewichtete Bewertung zeigt auf, dass Variante 6 (Ozon + GAK) insgesamt am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen und errechneten Werten reagiert. Variante 4 (GAK-Filtration) reagiert nur geringfügig weniger empfindlich auf Abweichungen. Dies liegt vor Allem in der großen Sensibilität der GAK gegenüber

dem Betriebsmittelverbrauch begründet. Variante 5 (Ozonung) reagiert ebenfalls relativ sensibel auf Änderungen des Betriebsmittelverbrauches und ist daher insgesamt ebenfalls sensibler als die PAK-Varianten.

Tabelle 38: Zusammenfassung Sensibilitätsanalysen

	Betriebsmittel-einsatz		Betriebsmittel-kosten		Strompreis		Bewertung
Gewichtung	60,00%		25,00%		15,00%		
Variante 1 (PAK)	mäßig sensibel	3	kaum sensibel	1	kaum sensibel	1	2,2
Variante 2 (PAK in FF)	mäßig sensibel	3	kaum sensibel	1	kaum sensibel	1	2,2
Variante 3 (PAK in BB)	mäßig sensibel	3	kaum sensibel	1	kaum sensibel	1	2,2
Variante 4 (GAK)	sehr stark sensibel	5	wenig sensibel	2	kaum sensibel	1	3,7
Variante 5 (Ozon)	stark sensibel	4	kaum sensibel	1	kaum sensibel	1	2,8
Variante 6 (Ozon+GAK)	sehr stark sensibel	5	wenig sensibel	2	wenig sensibel	2	3,8

Auch unter Veränderung der Randbedingungen bleibt die Ozonung nach der Nachklärung (Variante 5) über 15 Jahre gerechnet mit Abstand die kostengünstigste Verfahrensvariante zur Umsetzung einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock. Und obwohl die Variante 5 nicht die geringste Sensibilität aufweist, liegt sie im Gesamtvergleich der Bewertungsmatrix dennoch deutlich vor der zweitplatzierten Variante 4 (GAK-Filtration). Somit ist die Ozonung nach der Nachklärung (Variante 5) als Vorzugsvariante für die Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock zu betrachten.

6. Zusammenfassung

Die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock liegt nur wenige Kilometer unterhalb der Quelle seines Vorfluters, dem Wapelbach. Da viele Spurenstoffe erfahrungsgemäß hauptsächlich über Kläranlagenabläufe und Mischwasserentlastungen in die Gewässer gelangen, erweist sich die Belastung des Vorfluters durch die Kläranlage kurz unterhalb der Quelle als besonders Gewässerrelevant.

Daher wurde die PFI Planungsgemeinschaft mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock beauftragt. Dabei wurden die vorhandenen Daten zur IST-Situation der Kläranlage und des Vorfluters Wapelbach ausgewertet, die Spurenstoffbelastung vor allem des Kläranlagenablaufes durch entsprechende Analysen untersucht und ausgewertet, sowie sechs Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination für die Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock entwickelt und verglichen.

Die Auswertung der Spurenstoffdaten ergab, dass der Vorfluter oberhalb der Kläranlageneinleitung kaum bis gar nicht durch Spurenstoffe belastet ist. Die unterhalb der Kläranlageneinleitung festgestellten Spurenstoffbelastungen stammen nahezu vollständig aus der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock. Durch die relativ geringe Verdünnung der Spurenstoffeinleitungen im Gewässer ergibt sich direkt unterhalb der Kläranlageneinleitung eine relativ hohe Spurenstoffbelastung. Im weiteren Verlauf des Vorfluters erfolgt jedoch vor der Gewässermessstelle eine weitere Verdünnung durch den Zufluss des Rodenbaches in den Wapelbach. Die tatsächliche Gewässerbelastung ist vom Abwasseranteil im Vorfluter abhängig. Bei mittlerem Niedrigwasserabfluss führt der Wapelbach am Pegel Kaunitz ausschließlich gereinigtes Abwasser, sodass keine Verdünnung des Kläranlagenablaufes erfolgt. In den Jahren 2012 bis 2014 betrug der Abwasseranteil am Pegel Kaunitz jedoch im Mittel rd. 34 %, sodass eine nicht unwesentliche Verdünnung schon vor dem Zufluss des Rodenbaches in den Wapelbach erfolgte. Dennoch ist der Wapelbach am Pegel Kaunitz insgesamt als kritisch mit Abwasser belastet einzustufen. Da es für die Errichtung oder den Betrieb von Anlagen zur Spurenstoffelimination derzeit keine verbindliche rechtliche Grundlage gibt, ist eine Entscheidung für den Bau einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination im Wesentlichen mit einem vorsorgenden Gewässerschutz zu begründen.

Für den Fall einer Entscheidung zum Bau einer Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock konnte eine Vorzugsvariante herausgearbeitet und eine Empfehlung hieraus getätigt werden. Bei rein monetärer Betrachtung steht die Variante 5 (Ozondosierung nach der Nachklärung) mit einem Projektkostenbarwert von rd. 1,8 Mio. € an erster Stelle, gefolgt von Variante 4 (GAK-Filtration) mit einem PKBW von rd. 3,7 Mio. €. Werden auch nicht-monetäre Aspekte der Ökologie, des Ressourcenverbrauchs, des Arbeitsaufwandes oder der Arbeitssicherheit mit einbezogen, bleibt diese Reihenfolge unverändert. Variante 5 (Ozondosierung nach der Nachklärung) liegt weiterhin mit rd. 79,50 % Kriterienerfüllung vor Variante 4 (GAK-Filtration) mit rd. 51,82 % (siehe Tabelle 39).

Tabelle 39: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock

Zusammenfassung Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1:	Variante 2:	Variante 3:	Variante 4:	Variante 5:	Variante 6:
		PAK	PAK in FF	PAK in BB	GAK	Ozon	Ozon+GAK
1. Ökonomie	50,00%	16,91%	16,62%	15,84%	21,72%	48,00%	7,45%
Projektkostenbarwert	25,00%	1,40%	1,24%	0,00%	9,08%	25,00%	2,45%
Investitionskosten	15,00%	5,51%	5,38%	5,84%	7,64%	15,00%	0,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	5,00%	8,00%	5,00%
2. Betriebliche Aspekte	15,00%	5,00%	6,50%	6,50%	13,00%	4,00%	9,00%
Steuerung / Regelung	5,00%	2,50%	2,50%	2,50%	3,00%	4,00%	5,00%
Arbeitssicherheit	5,00%	2,50%	2,50%	2,50%	5,00%	0,00%	0,00%
Betriebssicherheit / Redundanzen	5,00%	0,00%	1,50%	1,50%	5,00%	0,00%	4,00%
3. Ökologie	26,00%	12,76%	12,76%	10,58%	13,10%	23,50%	20,66%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	9,00%
CO2-Belastung	8,00%	5,26%	5,26%	3,08%	0,00%	8,00%	4,66%
Reststoffanfall	8,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,60%	8,00%	7,00%
4. Planungssicherheit	9,00%	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%	4,00%	9,00%
Einhaltung mögl. Spurenstoff-Grenzwerte	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	4,00%	5,00%
Verschärfung Pges-Grenzwerte	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	3,00%	0,00%	3,00%
Mikroplastik	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	0,00%	1,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%	38,67%	39,88%	36,91%	51,82%	79,50%	46,11%
Rangfolge		5	4	6	2	1	3

Die Sensitivitätsanalysen bezüglich des Betriebsmittelverbrauchs, der Betriebsmittelpreise und des Strompreises ergaben, dass die Jahreskosten aller Varianten am sensibelsten auf Änderungen des Betriebsmittelverbrauches reagieren. Die größte Sensitivität insgesamt wies Variante 6 (Ozon + GAK) auf, dicht gefolgt von Variante 4 (GAK-Filtration). Jedoch legen die Betriebserfahrungen der aktuellen großtechnischen Versuche zur GAK-Filtration nahe, dass die durchgesetzten Bettvolumina der GAK-Filter, und damit der Betriebsmittelverbrauch der Variante 4, positiver ausfallen, als die für die Bemessung angenommenen BV.

Dennoch erscheint zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock insgesamt die Umsetzung der Variante 5 (Ozonung nach der Nachklärung) als zweckmäßig.

Die Herstellkosten für die Vorzugsvariante 5 (Ozonung nach der Nachklärung) werden mit rd. 2,1 Mio. € brutto inkl. Baunebenkosten abgeschätzt. Für die Errichtung einer solchen Anlage gewährt das Land NRW derzeit noch einen Zuschuss von 70 % zu den Gesamt-Herstellkosten, entsprechend rd. 1,5 Mio. €. Weiterhin sind Einsparungen bei der Abwasserabgabe möglich. Somit berechnet sich der Projektkostenbarwert für die Errichtung einer Ozonanlage zur Spurenstoffelimination sowie deren Betrieb über 15 Jahre zu rd. 1,8 Mio. €. Dies entspricht Jahreskosten von rd. 134.000 €/a. Die spezifischen Kosten bezogen auf die jährliche Abwassermenge liegen bei rd. 0,058 €/m³ oder, bezogen auf die angeschlossenen Einwohnerwerte, bei rd. 5,15 €/(EW·a).

Bleibt die Förderung der Investitionskosten durch das Land NRW unberücksichtigt, so ist für Variante 5 (Ozonung) mit einem PKBW von rd. 3,3 Mio. € entsprechend rd. 260.000 €/a über 15 Jahre zu rechnen. Die spezifischen Kosten belaufen sich dann auf rd. 0,112 €/m³ oder rd. 10,00 €/(EW·a).

Abschließend danken wir dem Land Nordrhein-Westfalen und der Bezirksregierung Detmold für die Förderung der Studie sowie der Stadt Schloß Holte-Stukenbrock und dem Klärwerkspersonal für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Aufgestellt:

Bochum im September 2015

Dr.-Ing. Reiner Boll

7. Literatur

- [1] Mitteilung der Bezirksregierung Detmold vom 29.04.2016
- [2] Mertsch, V. (2014): Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser - Konzeption Nordrhein-Westfalen
- [3] Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen
- [4] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2015): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination
- [5] Internetauftritt und Projektsteckbriefe des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg, eingesehen bzw. heruntergeladen am 17.02.2015: www.koms-bw.de
- [6] Projektsteckbriefe aus der Rubrik „Anlagen/Projekte“ des Internetauftritts des Verbandes Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), heruntergeladen am 17.02.2015: www.micropoll.ch
- [7] Internetauftritt Institute für Umwelt- und Verfahrenstechnik der Hochschule für Technik Rapperswil, eingesehen am 03.03.2015: <http://www.umtec.ch/>
- [8] Projektsteckbriefe aus der „Tatenbank“ des Internetauftritts des Kompetenzzentrums Mikroschadstoff.NRW, heruntergeladen am 03.02.2015: www.masterplan-wasser.nrw.de
- [9] Internetauftritt Abwasserverband Obere Lutter: <http://www.mikroverunreinigungen.de/obere-lutter/>
- [10] Präsentation Firma Hydro-Ingenieure, heruntergeladen am 04.03.2015: http://hydro-ingenieure.de/wp-content/uploads/2014/06/6_20140521_Groemping.pdf
- [11] Mündliche Auskunft von Frau Hachenberg (Wupperverband) bei der Besichtigung der Versuchsanlage am 16.12.2014

- [12] Internetauftritt Firma Nordic Water GmbH, eingesehen am 04.03.2015:
<http://www.spurenstoffelimination.de/index.php/referenzen#klaerwerk-emmingen-liptingen-d>
- [13] Internetauftritt WAZ, abgerufen am 05.02.2015:
<http://www.derwesten.de/staedte/gelsenkirchen/klaeranlage-im-gelsenkirchener-marienhospital-fertiggestellt-id4915508.html>
- [14] RiSKWa (2013): Leitfaden Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf
- [15] Luo, X.; Guo, W.; Ngo, H. H.; Nghiem, L. D.; Hai, F. I.; Zhang, J.; Liang, S.; Wang, X. C. (2014): A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment
- [16] Türk, J.; Nafu, I.; Lyko, S.; Wermter, P.; Palm, N.; Reinders, M.; ... Hassani, V. (2013): Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9)
- [17] Margot, J.; Kienle, C.; Magnet, A.; Weil, M.; Rossi, L.; de Alencastro, L. F.; Abegglen, C.; Thonney, D.; Chèvre, N.; Schärer, M.; Barry, D. A. (2013): Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon?
- [18] PFI (2013): Energetische Feinanalyse Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock
- [19] DWA A 131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen
- [20] ATV-DVWK-A 198 (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen
- [21] PFI Planungsgemeinschaft GbR (2015): Studie zur Spurenstoffelimination auf dem Klärwerk Bielefeld-Brake
- [22] Herbst, H.; Hilbig, R. (2013): Einbindung einer Anlage zur Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle in die Abwasserfiltration der Kläranlage Neuss Ost – Machbarkeitsstudie

- [23] Benstöm, F.; Stepkes, H.; Rolfs, T.; Montag, D.; Pinnekamp, J. (2014): Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV)
- [24] Christ, O.; Mitsdoerffer, R. (2013): Weitergehende Reduzierung von Mikroverunreinigungen auf der Kläranlage Espelkamp – Studie
- [25] Neumann, K.-D.; Merkel, W.; Schmidt, T. C. (2011): Metabolitenbildung beim Einsatz von Ozon – Schlussbericht
- [26] Oberflächengewässerverordnung - OGewV (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer
- [27] Oekotoxzentrum (2013): Vorschläge für akute und chronische Qualitätskriterien für ausgewählte schweizrelevante Substanzen. Heruntergeladen von www.oekotoxzentrum.ch am 11.12.2014
- [28] Trinkwasserverordnung – TrinkwV (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch
- [29] ATV-DVWK-A 203 (1995): Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung
- [30] RiSKWa (in Vorbereitung zur Veröffentlichung): Leitfaden Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser“