

Kläranlage Lippetal



Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal

1. Ausfertigung
November 2017

PFI Planungsgemeinschaft GmbH & Co. KG

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

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.....	14
2.1.4	Sonstige Verfahrensvarianten	19
2.2	Wesentliche Stoffeigenschaften.....	22
3.	Grundlagenermittlung	25
3.1	Derzeitige Verfahrenstechnik auf der Kläranlage Lippetal	25
3.2	Alleinstellungsmerkmale der Kläranlage Lippetal	26
3.3	Wassermengen.....	28
3.4	Kläranlagenbelastung	28
3.5	Ablaufwerte.....	30
3.6	Spurenstoffbelastung.....	31
3.6.1	Abwasseranteil im Vorfluter	31
3.6.2	Spurenstoffbelastung im Kläranlagenablauf	33
3.6.3	Spurenstoffbelastung im Vorfluter oberhalb und unterhalb der KA.....	34
4.	Variantenuntersuchung für die Kläranlage Lippetal.....	37
4.1	Hebewerk	37
4.2	Variante 1: Pulveraktivkohledosierung in das Belebungsbecken mit Filtration ..	38
4.2.1	Allgemeine Beschreibung	38

4.2.2	Variante 1a: PAK-Dosierung in das Belebungsbecken und Filtration mit komprimierbaren Filtermedien	40
4.2.3	Variante 1b: PAK-Dosierung in das Belebungsbecken und Tuchfiltration.....	41
4.2.4	Kostenaufstellung	43
4.3	Variante 2: Pulveraktivkohledosierung in ein Kontaktbecken mit Filtration	47
4.3.1	Allgemeine Beschreibung	47
4.3.2	Variante 2a: PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken und Filtration mit komprimierbaren Filtermedien	48
4.3.3	Variante 2b: PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken mit Tuchfiltration	49
4.3.4	Kostenaufstellung	50
4.4	Variante 3: Filtration mit granulierter Aktivkohle	54
4.4.1	Allgemeine Beschreibung	54
4.4.2	Kontinuierlich gespülter GAK-Filter	55
4.4.3	Kostenaufstellung	57
4.5	Variante 4: Ozondosierung	60
4.5.1	Allgemeine Beschreibung	60
4.5.2	Ozonreaktor	60
4.5.3	Ozonerzeugung	61
4.5.4	Reinsauerstoffversorgung	62
4.5.5	Variante 4a: Ozondosierung und Nachbehandlung mit kontinuierlich beschickter Sandfiltration	63
4.5.6	Variante 4b: Ozondosierung und Nachbehandlung im Schönungsteich	64
4.5.7	Kostenaufstellung	66
5.	Variantenvergleich	71
5.1	Bewertungskriterien.....	71
5.2	Wirtschaftlichkeitsvergleich	72
5.3	Förderprogramm Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II	76
5.4	Sensitivitätsanalysen	79

5.4.1	Betriebsmittelverbrauch	79
5.4.2	Betriebsmittelpreise	80
5.4.3	Strompreis	81
5.4.4	Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen	82
5.5	Vergleich der Verfahrensvarianten.....	83
6.	Zusammenfassung.....	85
7.	Literatur	87

ANHANG

Anhang 1	Bewertungsmatrix
-----------------	-------------------------

1. Veranlassung und Auftrag

Die Gemeinde Lippetal betreibt die zentrale Kläranlage Lippetal, die für die mechanisch-biologische Abwasserreinigung von 15.000 EW ausgelegt ist. Die Kläranlage wird mit simultan aerober Schlammstabilisierung betrieben. Das gereinigte Abwasser wird in die Lippe eingeleitet.

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 stärker in den Fokus der Öffentlichkeit. Von staatlicher Seite resultiert dies z.B. in Nordrhein-Westfalen in einer ausdrücklichen Empfehlung zum Ausbau kommunaler Kläranlagen zur Spurenstoffelimination. Das Land NRW fördert zudem die Durchführung von Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf Kläranlagen. Eine gesetzliche Grundlage, die die Betreiber von Kläranlagen zu Errichtung und Betrieb einer Spurenstoffelimination verpflichtet liegt bislang jedoch nicht vor.

Um eine mögliche Umsetzung, die Auswirkungen und Kosten einer Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal einschätzen zu können, wurde die PFI Planungsgemeinschaft von der Gemeinde Lippetal mit Schreiben vom 09.12.2016 mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal beauftragt. In der Studie sollen geeignete Verfahrenskonzepte zur weitergehenden Behandlung des kommunalen Abwassers entwickelt, einander gegenübergestellt und schließlich eine Vorzugslösung herausgearbeitet werden. Dazu werden Varianten zur Aktivkohle- und Ozonbehandlungen untersucht und hinsichtlich einer Reihe von Bewertungskriterien miteinander verglichen. Neben rein monetären Gesichtspunkten werden dabei auch qualitative Aspekte mit in die Bewertung einbezogen. Die derzeitige Situation der Kläranlage sowie die baulichen Gegebenheiten vor Ort werden bei der Entwicklung der Verfahrensvarianten und deren Beurteilung zusätzlich berücksichtigt.

Weiterhin werden die Spurenstoffbelastung im Zu- und Ablauf der Kläranlage Lippetal sowie in der Lippe als aufnehmendem Vorfluter analysiert und beurteilt.

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 Lippetal 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. [1]

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. [2]

Die Dosierung von PAK in einer kommunalen Kläranlage erfolgt entweder direkt in die biologische Stufe oder ein nachgeschaltetes Kontaktbecken in das biologisch gereinigte Abwasser. Bei der Dosierung in die Biologie ist mit einem erhöhten PAK-Einsatz zu rechnen, da die organische Hintergrundbelastung relativ hoch ist. Dennoch kann diese Verfahrensweise für kleine Anlagen interessant sein. Die Dosierung in das biologisch gereinigte Abwasser stellt einen möglichst effizienten Einsatz der PAK sicher. Zur Abscheidung der PAK aus dem Abwasser sollte eine Filtration des mit PAK versetzten Volumenstroms unbedingt erfolgen, um die feindispersen PAK-Anteile aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [2][3]

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

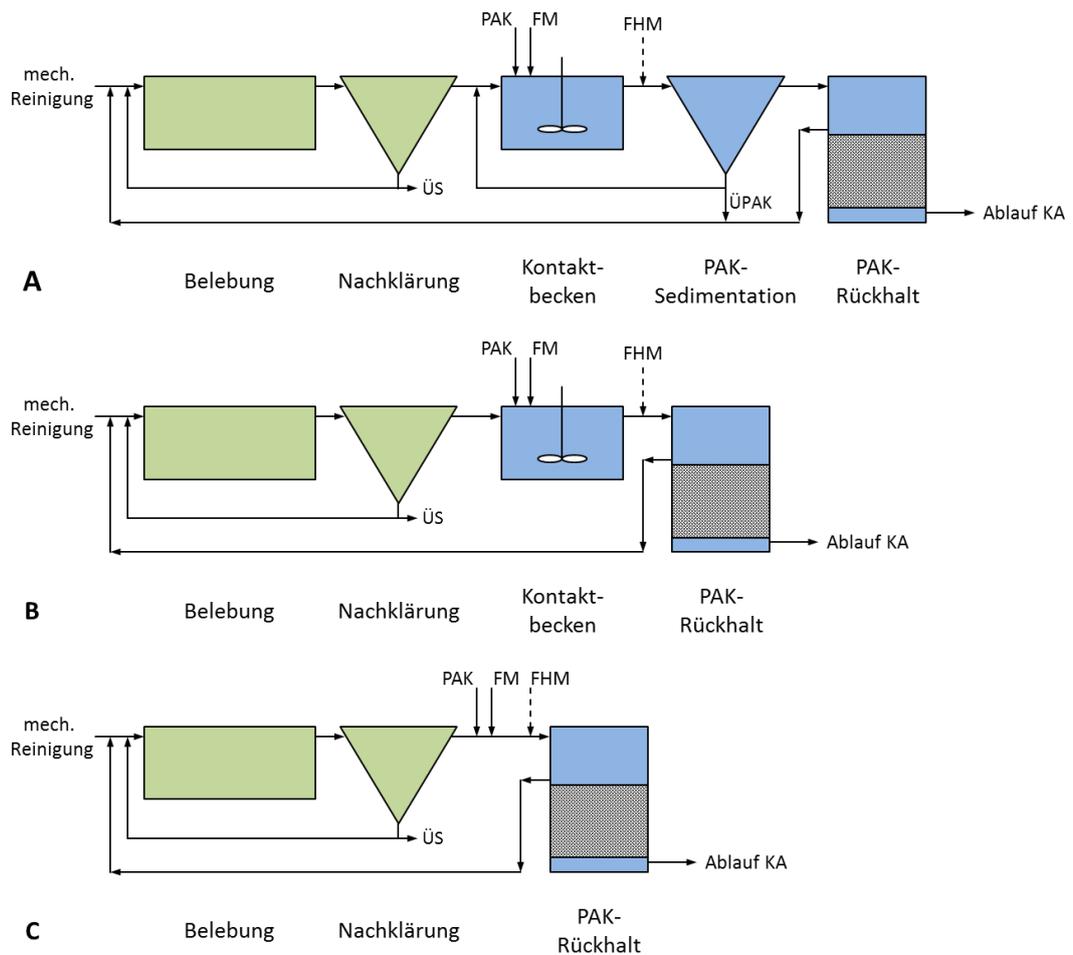


Abbildung 1: Mögliche Umsetzung einer Stufe zur PAK-Dosierung

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 der Biologie, einem separaten Kontaktbecken (A) oder im Überstand einer evtl. vorhandenen Flockungsfiltration geschehen. Bei Dosierung in ein separates Kontaktbecken kann im Ablauf des Kontaktbeckens zusätzlich eine Sedimentationseinheit angeordnet werden (B). Die abgesetzte PAK kann somit in den Kontaktreaktor zurückgeführt und die Aufenthaltszeit der PAK dadurch erhöht werden. Bei Vorhandensein einer Flockungsfiltration kann die PAK auch in den Filterüberstand dosiert werden (C). Dadurch verkürzt sich die Kontaktzeit von PAK und Abwasser. 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. [3]

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. [3]

Die Lagerung der angelieferten PAK erfolgt in einem Silo. 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 entsprechende Vorrichtungen regelmäßig Stickstoff in das PAK-Silo eingeblasen oder dieses gerüttelt werden. Im PAK-Silo ist eine Temperaturmessung zu installieren, um Glimmbrände 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 Kontaktraum gefördert wird. Die Dosierstation muss in Ex-Schutz-Ausführung installiert werden. [2][3]

Die PAK-Dosierung wird volumenproportional zum Zulauf in den Kontaktraum vorgeschlagen. Als Dosiervorrichtung wird eine gravimetrische Dosierung empfohlen, da diese ausreichend genau ist, um sowohl Über- als auch Unterdosierungen zu vermeiden [3]. 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. [2]

Die Auslegung eines separaten Kontaktbeckens für eine PAK-Anlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [3]. In Anwendungen 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 eine Flockungsfiltration bei ca. 12 Stunden und bei Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in den Kontaktraum bei 1 bis 2 Tagen [2]. Die „Anleitung zur Planung und

Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW schlägt eine minimale hydraulische Aufenthaltszeit im Kontaktraum von 30 Minuten vor. [3]

Wenn eine Sedimentationseinheit vorgesehen wird, wird für die Rückführung der abgetrennten Aktivkohle in den Kontaktraum 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 Rückführung der Überschuss-PAK (ÜPAK) in die Belebung und den anschließenden gemeinsamen Abzug mit dem Überschussschlamm (ÜS) wird die PAK mit dem Belebtschlamm vermischt. 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 Energierückgewinnung (Wärme oder evtl. Strom) beitragen. Insgesamt erhöht sich die Schlammmenge durch die ÜPAK um etwa 5 bis 10 %, was zu erhöhten Kosten bei der Schlammentsorgung führt. [2][3]

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 in biologisch gereinigtes Abwasser bei 10 bis 20 mg_{PAK}/l. Bei Dosierung der PAK in die Biologie erhöht sich die erforderliche Menge wesentlich. Hierzu werden aktuell Forschungsvorhaben durchgeführt, da zu diesem Verfahren kaum Erfahrungen vorliegen. [3] In jedem Fall sollten vor Umsetzung einer 4. Reinigungsstufe Versuche zu geeigneter Kohleart und Dosiermenge gemacht werden, um die besonderen Gegebenheiten einer Kläranlage richtig beurteilen zu können.

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 eine entsprechende Beständigkeit aufweisen. Bestehende Anlagenteile können entweder durch spezielle Beschichtungen verstärkt oder durch beständige Materialien wie V4A-Edelstahl, HDPE oder Beton ersetzt werden. [2]

Vorteile des PAK-Einsatzes

Ein Vorteil des Einsatzes von PAK zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass durch PAK ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen

aus dem Abwasser entfernt werden können. Dies führt zu einer signifikanten Verbesserung der Qualität des gereinigten Abwassers, was wiederum zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächengewässerqualität führen kann. [2]

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 Spurenstoffe 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. [2]

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 Schlammanfall 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. [2]

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	
+	Vollständige Entfernung durch Sorption	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um rd. 5%
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle	-	erhöhter Schlammanfall um rd. 5% - 10%
+	Entfernung von Farb- und Geruchsstoffen	-	hoher Primärenergiebedarf zur Herstellung (rd. 18 kg _{CO2} /kg _{PAK})
		-	abrasive- und korrosive Eigenschaften fördern Verschleiß
		-	höhere Schlammentsorgungskosten
		-	Landwirtschaftliche Verwertung des Schlammes nicht mehr möglich

Anlagen mit PAK-Verfahren im In- und Ausland

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, welches die Dosierung von PAK direkt in ein Belebungsbecken untersucht. [6][7]

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. Zur gezielten Elimination von Spurenstoffen werden auf den Kläranlagen Stockacher Aach, Kressbronn und Böblingen-Sindelfingen seit der 2. Jahreshälfte 2011 PAK-Anlagen für Volumenströme von 250 l/s, 265 l/s bzw.

1.000 l/s betrieben. Im Oktober 2013 wurde auf der Kläranlage Langwiese in Ravensburg eine PAK-Anlage für 1.100 l/s in Betrieb genommen. Auf der Kläranlage Mannheim ging im Jahr 2016 eine PAK-Anlage zur Behandlung von rd. 1.500 l/s in Betrieb, nachdem zuvor mehrjährige Betriebserfahrungen mit einer Teilstrom-Anlage für rd. 300 l/s gesammelt wurden. Die PAK-Anlage in Steinheule kann bereits jetzt einen maximalen Volumenstrom von 1.600 l/s behandeln und wird bis zum Jahr 2020 mit einer zweiten Straße ausgestattet. Alle Anlagen funktionieren nach dem sog. „Ulmer Verfahren“, bei welchem ein Kontaktreaktor mit nachgeschalteter Sedimentation und Filtration betrieben wird. [5]

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. Die Kläranlage Dülmen ist für 55.000 EW ausgelegt und seit 2016 mit einer PAK-Stufe zur Behandlung von max. 200 l/s ausgestattet. Auch hier wird nach dem „Ulmer Verfahren“ gearbeitet. [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 persistente Stoffe bereits seit Jahrzehnten erfolgreich durch GAK-Filtration entfernt. Auch in der Abwasserbehandlung sind GAK-Filter zur Spurenstoffelimination denkbar. [2]

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. GAK-Filter können als diskontinuierlich- oder kontinuierlich gespülte Filter eingesetzt werden. [3]

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

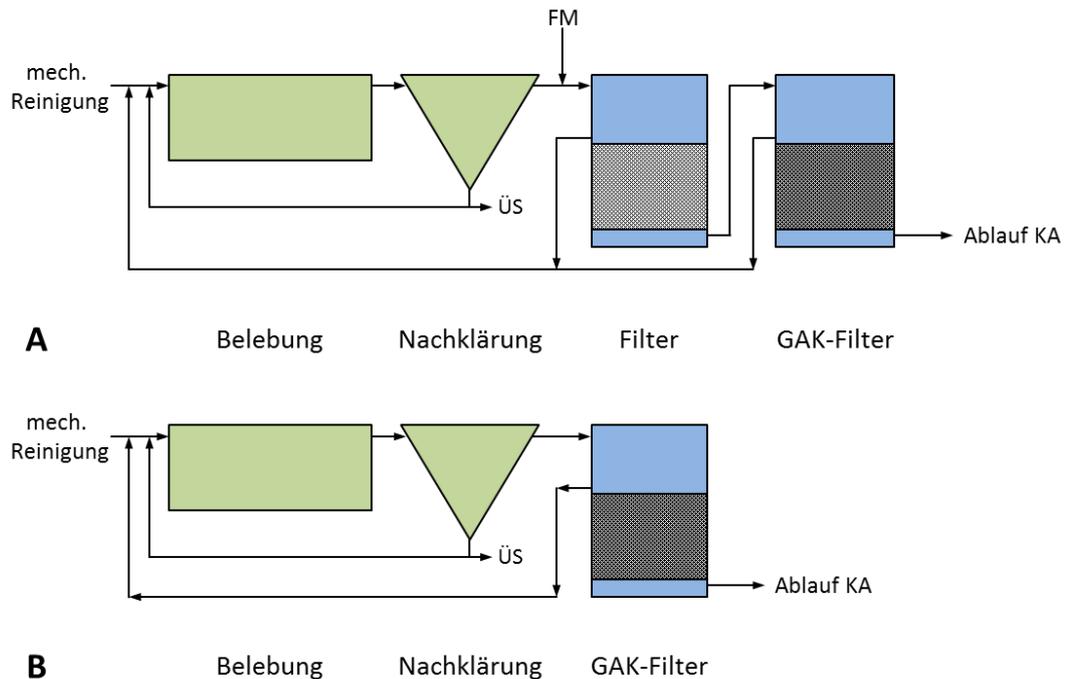


Abbildung 2: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer GAK-Filtration (A mit Vorfiltration und B direkt im Ablauf der Nachklärung)

Eine GAK-Filtration besteht im Wesentlichen aus parallel betriebenen GAK-Filtereinheiten sowie dem üblicherweise erforderlichen Hebewerk im Zulauf zur Filtration. [3]

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 granuliertes Aktivkohle eingebaut. Je nach Aktivkohleart ist der Rückspülvorgang anzupassen, um ein ausschwemmen der GAK zu verhindern. Da das Filtermaterial regelmäßig ausgetauscht werden muss, sollten in den Filterkammern spezielle Absaug- und Einfüllstutzen installiert werden. [2]

Die beladene, ausgebaute GAK kann mit geringen Verlusten von rd. 10 bis 20 % reaktiviert und anschließend wieder eingebaut werden. Die Reaktivierungsverluste müssen mit frischer GAK aufgefüllt werden [3]. Die Reaktivierung von GAK ist deutlich weniger energieaufwendig als die Herstellung frischer Aktivkohle, der Großteil der GAK-Verlustmenge kann als Pulveraktivkohle wieder in den Handel gelangen. [2][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. Gut geeignet ist hier eine UV-Absorbanzmessung bei 254 nm im Zulauf und im Ablauf der Reinigungsstufe. Über die Differenz der Absorbanz kann auf die Verringerung der Spurenstoffe rückgeschlossen werden. Zur Kontrolle und Kalibrierung der Messung sind noch Probenahmen zur Spurenstoffanalyse im Labor erforderlich. [2][4]

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 22.000 und 32.000 BV. [2][3]

Um derart hohe durchgesetzte Bettvolumina erreichen zu können, ist eine zuverlässig und gut funktionierende Nachklärung zwingend erforderlich. Auch die erforderliche Häufigkeit der Filterspülung hängt von der Funktion der Nachklärbecken ab. Je mehr AFS und damit auch CSB 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. Der Großteil der bei der Regeneration anfallenden Verlustmenge kann als PAK verwertet werden, was sich günstig auf die CO₂-Bilanz auswirkt. [2][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. [2]

Nachteile des GAK-Einsatzes

Ein Nachteil beim Einsatz von GAK-Filtern zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen ist, dass die erzielten Ergebnisse zu durchsetzbaren Bettvolumina und damit die Standzeit eines GAK-Filters aufgrund unterschiedlicher Abwasserzusammensetzungen und unterschiedlicher Wirkweisen der Aktivkohlesorten stark variieren. [2]

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	
+	Vollständige Entfernung durch Sorption	-	Unsicherheiten bei durchsetzbaren Bettvolumina
+	geringer baulicher- und energetischer Aufwand bei bestehenden Filtrationsanlagen	-	hoher Primärenergiebedarf zur Herstellung (rd. 18 kg _{CO2} /kg _{GAK} Frischkohle; rd. 9,3 kg _{CO2} /kg _{GAK} regenerierte Kohle)
+	Entfernung von Farb- und Geruchsstoffen		
+	nach Regeneration mit leichten Verlusten wiederverwendbar		
+	keine problematischen Produkte oder Abfälle		

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

Im Zeitraum von Januar 2011 bis Dezember 2013 wurde in mehreren Forschungsvorhaben auf dem Klärwerk Obere Lutter der Betrieb von bis zu drei umgerüsteten Biofor-Filterzellen mit Aktivkohle getestet. 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 bis zu 16.000 durchgesetzten Bettvolumina. Mittlerweile sind fünf der insgesamt zehn Biofor-Filterzellen umgerüstet und in Betrieb, sodass der Trockenwetterzufluss von 1.125 m³/h mit GAK behandelt werden kann. [8][9][10]

Im Juni 2011 wurde auf der Kläranlage Düren-Merken ein GAK-Filter zu Forschungszwecken in Betrieb genommen. In drei Betriebsphasen wurden drei un-

terschiedliche 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 halotechnische Versuche zum Betrieb einer GAK-Filtration mittels DynaSand®-Anlage durchgeführt. In drei Abschnitten wurden zunächst das hydraulische Verhalten der Filter und anschließend zwei unterschiedliche Aktivkohleprodukte auf ihre Eignung zur Spurenstoffelimination geprüft. Seit dem Jahr 2014 befindet sich die Aktivkohlefiltration auf der Zentralkläranlage Rietberg im laufenden Betrieb. Ein Austausch der Aktivkohle hatte nach Aussage des Betriebspersonals der Kläranlage Rietberg bis Herbst 2016 noch nicht stattgefunden, da die Eliminationskapazitäten noch nicht erschöpft waren. [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 während der Versuchszeit 7.000 BV durchgesetzt. [8][11]

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 (GAK) betrieben, die zweite wird als nachgeschaltete Filtration anteilmäßig mit dem Ablauf der Flockungsfiltration beschickt (nGAK). Die Standzeit der beiden Filterzellen belief sich auf 18.000 BV für die GAK Filterzelle und 21.000 BV für die nGAK Filterzelle. Die Eliminationsraten lagen dabei für etliche Stoffe noch über 60%. Nach Definition eines Abbruchkriteriums für eine mittlere 80%ige Eliminationsrate für 5 Leitparameter über den gesamten Klärprozess wurden für den GAK-Filter 22.712 BV und für den nGAK-Filter 31.247 BV bis zum Erreichen des Ziels ermittelt. [12]

Neben den Anlagen in NRW wird seit September 2016 in Baden-Württemberg auf der Kläranlage Westerheim eine GAK-Anlage mit vorgeschalteter Sandfiltration betrieben. Die Anlage ist auf einen maximalen Volumenstrom von 22 l/s ausge-

legt. Während die Sandfilter kontinuierlich betrieben werden, können die zwei separaten GAK-Filterzellen abwechselnd beschickt werden, um die Standzeit und die Spülfrequenz zu erhöhen. [5]

2.1.3 Einsatz von Ozon

Durch Zugabe von Ozon in das Abwasser kann eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen oxidativ aus dem Abwasser entfernt werden. In der Trinkwasseraufbereitung wird die Ozonung seit Jahrzehnten eingesetzt, um das Wasser zu desinfizieren und von störenden Geruchs- und Geschmacksstoffen zu befreien. [2]

Eine Ozonanlage zur Mikroschadstoffentfernung wird auf einer Kläranlage der biologischen Stufe nachgeschaltet. Im Ablauf der Ozonung ist nach heutigem Kenntnisstand eine Nachbehandlung des Abwassers in einer biologisch aktiven Stufe erforderlich, um die Reaktionsprodukte der Oxidation aus dem gereinigten Abwasser zu entfernen. [3]

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. Die Wahl des Ozoneintragungssystems ist von der verfahrenstechnischen Einbindung auf der Kläranlage unabhängig. [2][3]

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

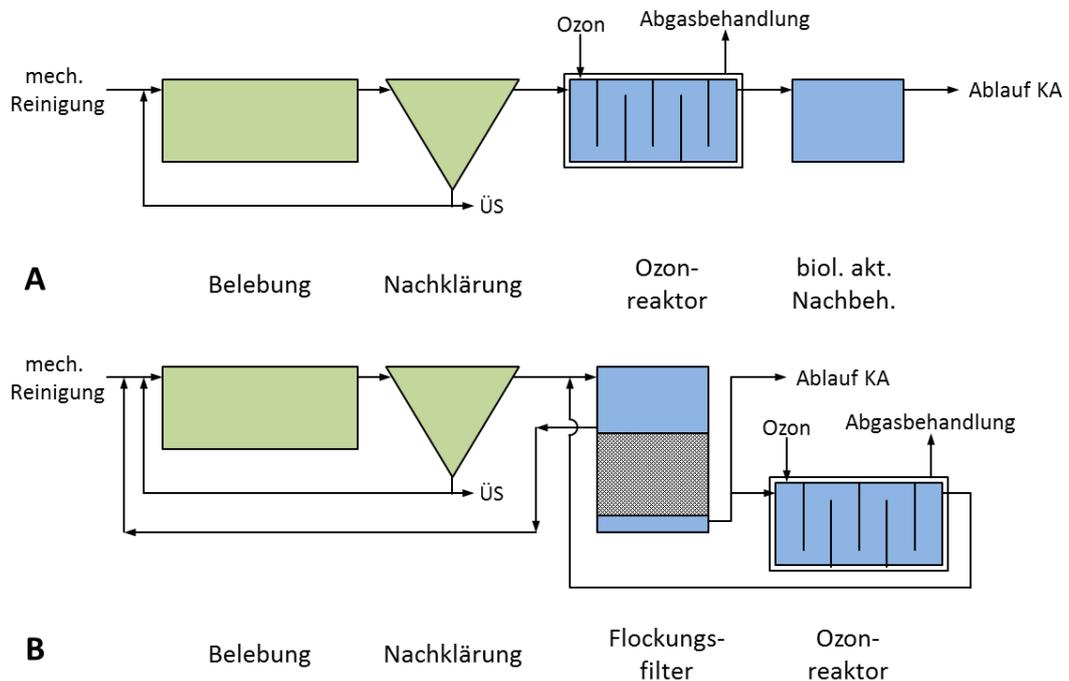


Abbildung 3: Verfahrenstechnische Varianten zur Einbindung einer Ozonanlage (Ozonreaktor A zwischen Nachklärung und biologisch aktiver Nachbehandlung und B im Teilstrom hinter der Flockungsfiltration mit Rückführung in die Filtration)

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. [2]

Ozon wird mit Hilfe von Ozongeneratoren auf der Kläranlage erzeugt. Als Betriebsmittel wird flüssiger Sauerstoff (LOX, *Liquid Oxygen*), komprimierte, getrocknete Luft oder vor Ort aus der Umgebungsluft erzeugter Sauerstoff aus einer PSA-Anlage (*Pressure Swing Adsorption*) verwendet. Auf kleineren kommunalen ARA kommt aus Gründen der Einfachheit und Wirtschaftlichkeit i.d.R. nur LOX in Frage [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. [3]

Als Nachbehandlung zur Elimination der Oxidationsprodukte aus dem gereinigten Abwasser können beispielsweise bereits vorhandene Filteranlagen oder Schönungsteiche in Frage kommen. Auch GAK-Filter mit zusätzlich adsorptiver Wirkung oder Wirbel- und Festbettreaktoren sind möglich. [3]

Die Steuerung des Ozoneintrags kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Als Steuer- bzw. Regelgrößen hat sich die Abnahme der UV-Absorbanz (SAK) in vielen Forschungsprojekten als eine vielversprechende Regelungsgröße herausgestellt. [2]

Die Auslegung des Kontaktreaktors einer Ozonanlage sollte mindestens auf den Trockenwetterzufluss als Bemessungsabfluss erfolgen [3]. Das Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW empfiehlt in seiner „Anleitung zur Auslegung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ eine Kontaktzeit von 15 bis 30 Minuten bei Trockenwetter. Bei schneller Ozonzehrung, abhängig von der speziellen Abwassermatrix, kann die Kontaktzeit auf bis zu 10 Minuten verkürzt werden. [3]

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 ($z_{\text{NO}_2\text{-N}}$) 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. [3]

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. [3]

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.

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. [2]

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. [2]

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. [2]

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. [2]

Darüber hinaus wirkt Ozon als starkes Oxidationsmittel und wandelt die Abwasserinhaltsstoffe um, ohne sie aus dem Abwasserstrom zu entfernen. Es erfolgt also keine Entfernung, sondern nur eine Umwandlung der Stoffe. Die Transformationsprodukte sind i.d.R. weniger problematisch, müssen allerdings aufgrund unbekannter Auswirkungen auf Gewässer biologisch aus dem Abwasser entfernt werden. [2]

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 %. [2]

In Tabelle 3 sind die Vor- und Nachteile einer Ozonanlage auf kommunalen Kläranlagen zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht der Vor- und Nachteile einer Ozonanlage

Vorteile		Nachteile	
+	keine Auswirkungen auf bestehende Reinigungsstufen	-	erhöhter Energieverbrauch der KA um rd. 10% -30%
+	zusätzlich Desinfektion des Abwassers	-	hoher Primärenergiebedarf zur Herstellung (rd. 11 kg _{CO2} /kg _{Ozon})
+	geringer Platzbedarf	-	umfangreiche MSR- und Sicherheitstechnik erforderlich
		-	erfordert evtl. höhere Anschlussleistung der KA
		-	Reaktionsprodukte unbekannt
		-	biologisch aktive Nachbehandlung erforderlich

Pilot- und Versuchsanlagen zur Ozonung im In- und Ausland

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 Anlage 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. Auf den Abwasserreinigungsanlagen Neugut in Dübendorf wird seit März 2014 eine Ozonanlage zur Behandlung von bis zu 660 l/s betrieben. Die Kläranlage Oberwynental in Reinach betreibt seit Herbst 2016 eine Ozonanlage für bis zu 425 l/s Zufluss. [2][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 den 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 zu 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 Spurenstoffe entfernt und in einer Aktivkohlefiltration nachbehandelt [14]. 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]. In Warburg befindet sich eine Ozonanlage mit Wirbelbettreaktor als biologische Nachbehandlung seit 2016 in Betrieb. Hier wird das Abwasser von rd. 70.000 EW behandelt. [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 befinden sich derzeit auf der Zentralkläranlage Detmold, der Kläranlage Aachen-Soers, der Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock und auf der Kläranlage Köln-Rodenkirchen weitere Anlagen zur Ozonung von biologisch vorgereinigtem Abwasser in der Umsetzung. [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 unge-

löste 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. [2]

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. [2]

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. [2]

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. [2]

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. [2]

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.), 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. In NRW haben sich sog. Indikatorsubstanzen herauskristallisiert, welche in ihren Eigenschaften und ihrer Eliminierbarkeit stellvertretend für ganze Gruppen von Spurenstoffen stehen. [3]

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 einige Spurenstoffe in kommunalen Kläranlagen zu eliminieren, 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 [2]. Daher wird Carbamazepin auch von Ozon gut eliminiert, während Benzotriazol nur mäßig gut und Diuron kaum eliminiert wird. [17]

Tabelle 4 fasst die im Ablauf der Kläranlage Lippetal untersuchten Spurenstoffe zusammen und stellt die entsprechenden Eliminationsleistungen in Abhängigkeit der eben beschriebenen Eigenschaften 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 4: Auswahl an untersuchten Spurenstoffen im Ablauf der Kläranlage Lippetal und ihr Eliminationspotential in verschiedenen Verfahrensstufen [17][19][20][22]

	Stoffname	CAS-Nr.	Elimination in biol. Stufe in KA	Adsorbierbarkeit an Aktivkohle	Eliminierbarkeit durch Ozon
Pharmaka	Carbamazepin	298-46-4	schlecht	gut	gut
	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			
	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
	Oxazepam	604-75-1		mittel ***	schlecht ***
	Sulfamethoxazol	723-46-6	mittel	schlecht	gut
	Diagnostika	Amidotrizoesäure	117-96-4		schlecht
Iomeprol		78649-41-9		schlecht	schlecht
Iopamidol		60166-93-0	schlecht **	schlecht	schlecht
Iopromid		73334-07-3		schlecht	schlecht
Pestizide	Glyphosat	1071-83-6			
	AMPA	1066-51-9			
	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

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 [17][20]. Der Anteil der gut eliminierbaren Spurenstoffe an der in Tabelle 4 aufgelisteten Spurenstoffe liegt sowohl für Aktivkohle als auch für Ozon bei rd. 23 %. In Bezug auf die mittelmäßig eliminierbaren Spurenstoffe weisen Ozon und Aktivkohle beide einen Anteil von rd. 32 % auf. 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 Spurenstoffe etwa in gleichem Maße geeignet sind.

Für die Auswahl des geeignetsten Verfahrens zur Erweiterung einer kommunalen Kläranlage 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.

3. Grundlagenermittlung

3.1 Derzeitige Verfahrenstechnik auf der Kläranlage Lippetal

Die Kläranlage Lippetal ist zur mechanisch-biologischen Abwasserreinigung für insgesamt rd. 15.000 EW ausgelegt. Über drei Hauptdruckrohrleitungen mit Schmutz- und Mischwasser wird die Kläranlage überwiegend mit häuslichem Abwasser beschickt.

Die mechanische Stufe besteht aus einem Rechen und einem Sandfang. Für den Rechen ist ein Notumlaufgerinne vorhanden. Das abgeschiedene Rechengut wird vom Rechen in eine Rechengut-Waschpresse abgeworfen. Dort wird das Rechengut gewaschen und über ein Pressrohr mit Absackvorrichtung in den Rechengut-Container gefördert.

Nach dem Rechen fließt das Abwasser in den belüfteten Langsandfang. Der Langsandfang ist mit Fettfangkammer ausgeführt. Weiterhin verfügt der Sandfang über ein Umgehungsgerinne. Die Sand- und Fetträumung erfolgt über eine entsprechende Räumbrücke. Zur Belüftung des Sandfanges wird ein im Außenbereich aufgestelltes Drehkolbengebläse betrieben. Das aus dem Sandfang abgezogene Sand-Wasser-Gemisch wird mit einer Pumpe am Ende der Sandablauf Rinne zum Sandklassierer im Rechengebäude gepumpt.

Nach der mechanischen Reinigung erfolgt die biologische Reinigung des Abwassers in zwei parallel betriebenen Belebungsbecken mit einem Gesamtvolumen von rd. 4.200 m³. Die Belebungsbecken sind als Rundbecken mit einem unbelüfteten Innenkreis und einem belüfteten Außenring ausgeführt. Abwasser und Rücklaufschlamm werden im Innenkreis der Becken zugegeben. Zur Umwälzung des inneren Beckenbereichs wird jeweils ein Rührwerk betrieben. Vom Innenkreis fließt das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch in den äußeren Ring. Im äußeren Ring wird das Abwasser zum Abbau der Schmutzstoffe intermittierend belüftet. Zudem wird im Außenring ein Rührwerk zur Umwälzung vorgehalten. Während der belüfteten Phasen im Außenring (Nitrifikation) werden Kohlenstoff (CSB, BSB₅), Ammonium (NH₄-N) und Phosphat (PO₄-P) abgebaut. Im Innenkreis und in den unbelüfteten Phasen des Außenrings (Denitrifikation) wird das Nitrat (NO₃-N) aus dem Abwasser entfernt. Zur weiteren Phosphatelimination wird zudem ein

Fällmittel auf Aluminiumbasis (Natriumaluminat) im Zulauf der Belebung zugegeben.

Aus den Belebungsbecken fließt das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch den beiden runden Nachklärbecken zu. Dort wird der Belebtschlamm vom gereinigten Abwasser getrennt. Das gereinigte Abwasser fließt dem Vorfluter, der Lippe, zu. Der abgesetzte Schlamm wird über zwei Schneckenpumpen (eine Pumpe je Nachklärbecken) als Rücklaufschlamm zurück in die Belebung gefördert. Ein Teil des Schlammes wird als Überschussschlamm (ÜS) abgezogen.

Die Stabilisierung des Schlammes erfolgt simultan aerob in den Belebungsbecken. Der abgezogene ÜS wird in den Eindicker gepumpt und dort mit Hilfe eines automatischen Trübwasserabzugs eingedickt. Der eingedickte Überschussschlamm wird anschließend zur Speicherung in das angrenzende Schlammsilo gefördert.

Abschließend wird der ÜS entsorgt. Dies erfolgt über drei verschiedene Entsorgungswege. Etwa ein Drittel der Klärschlammmenge wird als Nassschlamm in der Landwirtschaft verwertet, ein weiteres Drittel wird auf die zur Kläranlage gehörenden Klärschlammvererdungsbeete aufgebracht. Das letzte Drittel des ÜS wird über eine mobile Schlammentwässerung (Kammerfilterpressenanlage) entwässert und anschließend in der Verbrennung entsorgt.

3.2 Alleinstellungsmerkmale der Kläranlage Lippetal

Bei der Betrachtung einer weitergehenden Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination spielen die Gegebenheiten vor Ort eine besondere Rolle. Für die Kläranlage Lippetal ist folgendes herauszustellen:

- Auf der Kläranlage stehen wenige Flächen für den Neubau einer weiteren Verfahrensstufe zur Verfügung. Die bevorzugte Fläche befindet sich zwischen dem Nachklärbecken 2 und den Vererdungsbeeten.
- Es können weitere Flächen für eine neue Verfahrensstufe erworben werden.
- Eine Behandlungsstufe nach der Nachklärung (z.B. Schönungsteich, Filtration o.ä.) ist nicht vorhanden.

- Durch eine Optimierung der biologischen Stufe im Jahr 2015 weist der Ablauf eine geringe Hintergrundbelastung auf, was einen wirtschaftlichen Betriebsmitteleinsatz ermöglicht.

- Derzeit wird der entwässerte Schlamm der Kläranlage Lippetal teilweise landwirtschaftlich und teilweise thermisch entsorgt. Langfristig ist damit zu rechnen, dass trotz der neuen Klärschlammverordnung sowie der neuen Düngemittelverordnung (26.05.2017) eine landwirtschaftliche Verwertung des auf der Kläranlage Lippetal anfallenden Klärschlammes weiterhin möglich sein wird. Sollte zukünftig jedoch eine PAK-Dosierung stattfinden, wird dies nicht mehr möglich sein. Außerdem wird sich durch den Einsatz von PAK der Schlammanfall auf der KA erhöhen. Daher ist für alle PAK-Varianten eine vollständige thermische Entsorgung des gesamten anfallenden Klärschlammes mit entsprechend erhöhten Kosten vorzusehen. Gleichzeitig würden sich die thermischen Eigenschaften des Schlammes durch die PAK verbessern.

3.3 Wassermengen

Die Wassermengen, die der Kläranlage Lippetal täglich zur Behandlung zufließen, schwanken aufgrund der angeschlossenen Mischkanalisationen sehr stark (siehe Abbildung 4). Die gemessene Zulaufmenge liegt für die Jahre 2014 bis 2016 zwischen 23 m³/h und 507 m³/h. Die mittlere Zulaufmenge liegt bei rd. 139 m³/h. Der mittlere Trockenwetterzufluss Q_T liegt bei rd. 93 m³/h. Die laut aktueller Genehmigung maximal zu übernehmende Wassermenge Q_{max} beträgt rd. 570 m³/h.

Der maximale Trockenwetterzufluss $Q_{T,max}$ nach ATV-DVWK-A 198 errechnet sich zu rd. 172 m³/h. Dieser Wert ist relevant für die Auslegung der Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination [21]. Gleichzeitig wird angestrebt, rd. 90 % der Jahresabwassermenge in der Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination zu behandeln. Daher wird der Bemessungszufluss auf **210 m³/h**, entsprechend 5.040 m³/d, festgelegt, was einem Anteil von 90,5 % der Jahresabwassermenge entspricht.

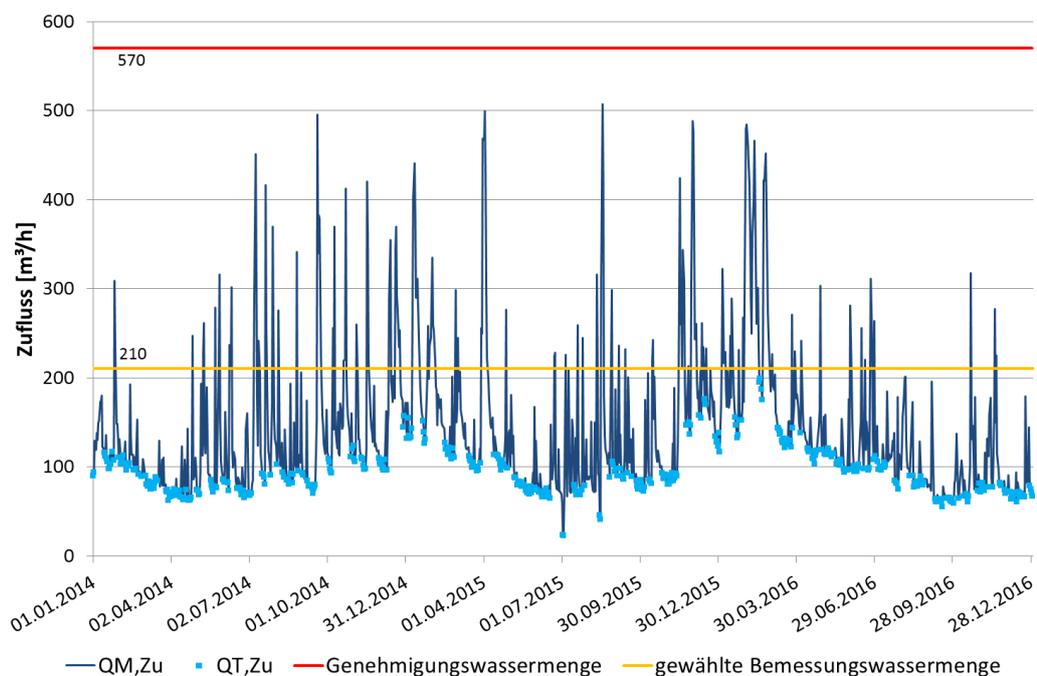


Abbildung 4: Misch- und Trockenwetterzufluss Kläranlage Lippetal (2013-2015)

3.4 Kläranlagenbelastung

Im Einzugsgebiet der Kläranlage Lippetal ist vorrangig eine Mischkanalisation vorhanden. Die Gemeinde Lippetal hat derzeit rd. 12.300 Einwohner.

Im Zuge der Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal wurden die Betriebsdaten aus den Jahren 2014-2016 herangezogen und ausgewertet.

Zur Ermittlung der Belastungen im Zulauf zur Kläranlage wurden die Frachten mit den üblichen in der Literatur angegebenen spezifischen Kennwerten zu Belastungen umgerechnet.

Tabelle 5: Spezifische Kennwerte zur Belastungsermittlung [g/(EW*d)]

	CSB	BSB₅	P_{ges}	NH₄-N	N_{ges}
Zulauf	120	60	1,8	7	11

Die Belastung aus der CSB-Fracht entspricht im Mittel etwa einem Anschlusswert von rd. 10.400 EW. Die Nährstoffparameter N_{ges} und P_{ges} liegen in einem Bereich von durchschnittlich ca. 12.800 EW (TNb) und 12.500 EW (P_{ges}). Abbildung 5 stellt die mittlere Belastung der Kläranlage dar.

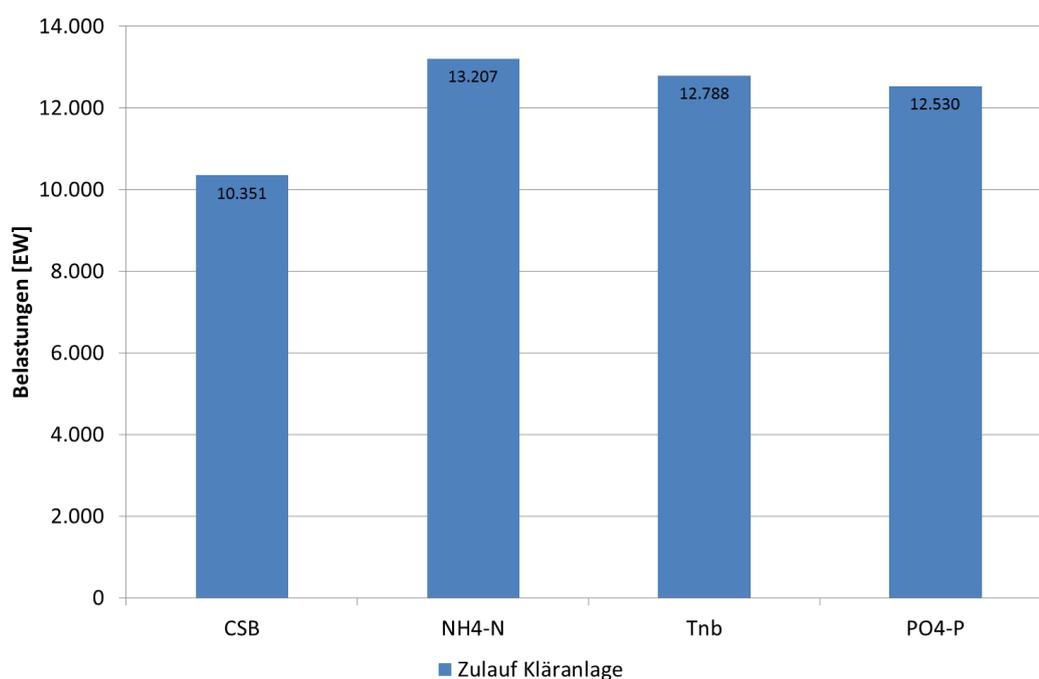


Abbildung 5: Mittlere Belastungen Zulauf Kläranlage und Ablauf Vorklärung Kläranlage Lippetal (2014-2016)

Die im Vergleich zu den anderen Nährstoffparametern recht geringe CSB Belastung ergibt sich wahrscheinlich durch Abbauprozesse, welche bereits im langen Kanalnetz im Zufluss zur Kläranlage stattfinden. Als Grundlage für die Ermittlung

der einwohnerspezifischen Kosten wird die mittlere Belastung im Zulauf zur Kläranlage von rd. **12.000 EW** als maßgebliche Belastung gewählt.

3.5 Ablaufwerte

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.

Abbildung 6 illustriert, dass die NO₂-N-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage teils starken Schwankungen unterlag. Seit Mitte 2015, dem Zeitraum der Optimierung der Belebungsanlage, haben sich die NO₂-N-Ablaufwerte jedoch vergleichsmäßig. Für die Bemessung der Spurenstoffelimination wird daher der Zeitraum nach der Optimierung betrachtet.

Die CSB-Konzentrationen lagen Mitte 2015 bis Ende 2016 im 85 %-Perzentil bei rd. 36,5 mg/l und die NO₂-N-Konzentrationen unterschritten an 85 % der beprobten Tage einen Wert von 0,17 mg/l.

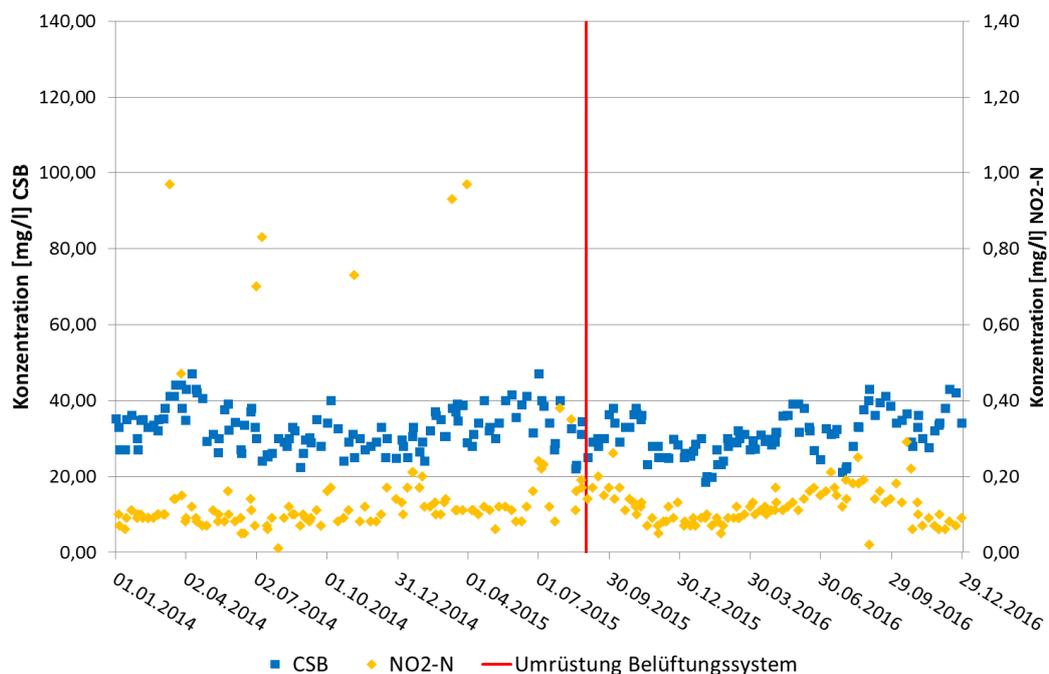


Abbildung 6: CSB- und NO₂-N-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage

Grundsätzlich wird für die nachfolgende Auslegung der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination vorausgesetzt, dass sowohl die Biologie als auch die Nachklärung gut funktionieren und die Hintergrundbelastung im Zulauf zur Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination daher dauerhaft gering ist.

Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei den Nachklärbecken angesichts der bestehenden Konstruktion des Einlaufbauwerkes noch ein nennenswertes Einsparpotenzial in Bezug auf die AFS-Ablaufkonzentrationen und damit gleichzeitig bei den CSB- und P_{ges} -Ablaufkonzentrationen erkennbar ist. Dieses Einsparpotenzial könnte z.B. durch den Einbau einer Strömungshaube um die Einlaufbauwerke ausgeschöpft werden.

3.6 Spurenstoffbelastung

Die Spurenstoffbelastung im Ablauf der Kläranlage wurde über drei 24-h-Mischproben Ende Januar 2017 ermittelt. Zusätzlich wurden Stichproben im Gewässer vor- und nach der Einleitungsstelle genommen. In Abbildung 7 ist der Flussverlauf der Lippe mit der Einleitungs- und den Messstellen dargestellt.



Abbildung 7: Flussverlauf mit Kläranlageeinleitung, Zufluss und Messstellen

Durch die OWL Umweltanalytik wurden diverse Spurenstoffe messtechnisch erfasst. Die analysierten Spurenstoffe entstammen den Bereichen der Pharmaka, Diagnostika, Pestizide und Industriechemikalien.

3.6.1 Abwasseranteil im Vorfluter

Bei der Ermittlung der Gewässerbelastung durch eine Kläranlage ist der Abwasseranteil im Gewässer ein wichtiger Indikator. In NRW wird ein Abwasseranteil

von mehr als einem Drittel des Niedrigwasserabflusses als kritisch erachtet [1]. Der mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) im Vorfluter der Kläranlage Lippetal am Pegel „Wehr Kesseler“ oberhalb der Kläranlageneinleitung beträgt rd. 6,41 m³/s entsprechend rd. 23.076 m³/h. Der Spitzenabfluss bei Trockenwetter der Kläranlage Lippetal beträgt rd. 0,048 m³/s, entsprechend rd. 172 m³/h. Aus dem Spitzenabfluss bei Trockenwetter resultiert bei mittlerem Niedrigwasserabfluss ein Abwasseranteil der KA Lippetal von 0,74 % im Gewässer.

Betrachtet man die täglichen Abflüsse der Kläranlage Lippetal sowie den zugehörigen täglichen Abfluss im Vorfluter am Pegel „Wehr Kesseler“, so ergibt sich für die Jahre 2014-2016 ein mittlerer Abwasseranteil der Kläranlage Lippetal im Gewässer von rd. 0,28 %. In Abbildung 8 sind die Abflüsse und der resultierende Abwasseranteil dargestellt.

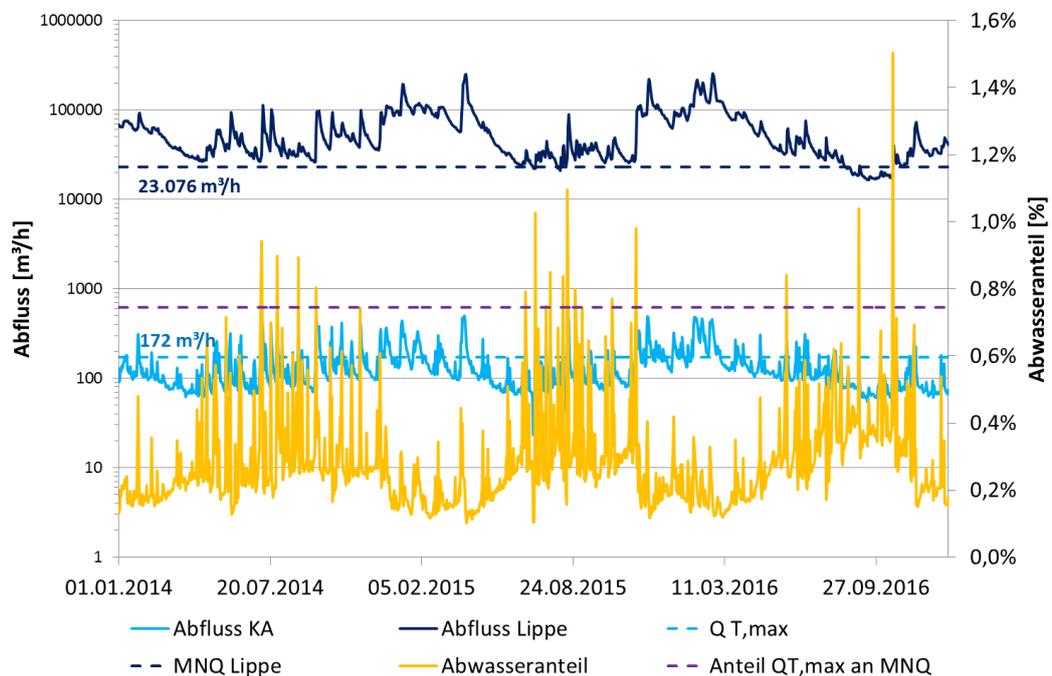


Abbildung 8: Abwasseranteil der Kläranlage Lippetal, bezogen auf den Pegel Wehr Kesseler (2014-2016)

Sowohl der Abwasseranteil bei Trockenwetter, als auch der mittlere Abwasseranteil der Kläranlage Lippetal im Gewässer liegen deutlich unter dem für das Gewässer als kritisch erachteten Wert. Somit sind die Auswirkungen der Abwassereinleitung der Kläranlage Lippetal in die Lippe als vergleichsweise gering einzustufen.

Der gesamte Abwasseranteil in der Lippe auf Höhe der Kläranlage Lippetal kann aus Mangel an Information über die Oberlieger jedoch weder ermittelt noch abgeschätzt werden. Dennoch kann die Aufrüstung der Kläranlage Lippetal um eine Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ein erster Schritt zur nachhaltigen Verbesserung der Gewässergüte in der Lippe sein.

3.6.2 Spurenstoffbelastung im Kläranlagenablauf

Die ermittelten Konzentrationen der meisten Spurenstoffe in den insgesamt drei Einzelproben sind untereinander gut vergleichbar. Die folgenden Untersuchungen wurden daher mit gemittelten Spurenstoffkonzentrationen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Spurenstoffanalysen im Ablauf der Kläranlage Lippetal sind in Abbildung 9 im Vergleich zu den Belastungswerten anderer Kläranlagenabläufe in NRW und der Schweiz dargestellt. Durch die Auswahl der gemessenen Spurenstoffe sind für 21 der 23 analysierten Spurenstoffe Vergleichswerte vorhanden.

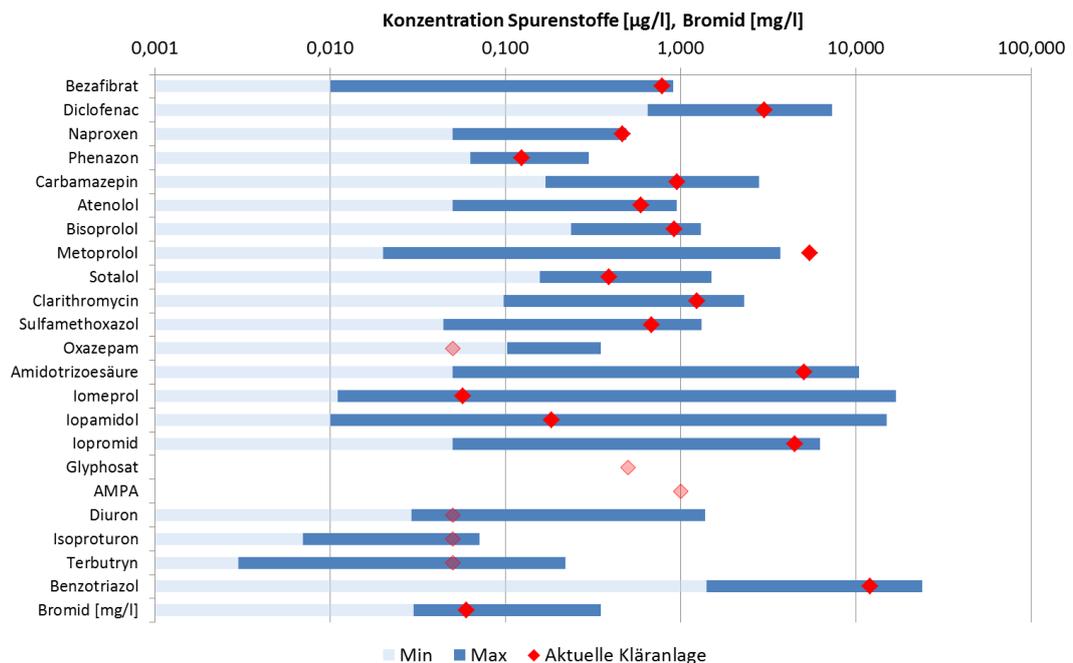


Abbildung 9: Spurenstoffe im Ablauf der Kläranlage Lippetal im Januar 2017 (drei 24-h Mischproben) im Vergleich zu anderen Anlagen in NRW und der Schweiz [22][23][24][25][26][27][28]

Die Übersicht in Abbildung 9 zeigt, dass die Konzentrationen der meisten Spurenstoffe zwar im Bereich der Vergleichsanlagen liegen. Jedoch ist auch zu erken-

nen, dass viele der Messwerte eher im oberen Bereich der Vergleichsanlagen einzuordnen sind. Für das Pestizid Glyphosat und dessen Reaktionsprodukt AMPA liegen keine Vergleichswerte vor. Insgesamt wurde für Oxazepam, Glyphosat, AMPA, Diuron, Isoproturon und Terbutryn die jeweilige Bestimmungsgrenze unterschritten. Diese sind in Abbildung 9 transparent dargestellt.

Im Hinblick auf eine mögliche Ozonbehandlung des Kläranlagenablaufes ist der Bromidkonzentration besondere Beachtung zu widmen. Durch die Ozonung kann Bromid zu kanzerogenem Bromat oxidiert werden. Für Bromid-Konzentrationen von unter 0,100 mg/l kann eine Ozondosis von bis zu 0,7 g_{O₃}/g_{DOC} angesetzt werden [3]. Bei der hier vorliegenden Konzentration von rd. 0,060 mg/l sind daher keine Einschränkungen für eine Ozonanlage zu erwarten. Sollte die Errichtung einer Ozonanlage auf der Kläranlage Lippetal in Betracht gezogen werden, werden weitere Untersuchungen der Bromit- und Bromat-Werte des Abwassers dringend empfohlen.

3.6.3 Spurenstoffbelastung im Vorfluter oberhalb und unterhalb der KA

Die tatsächliche Belastungssituation im Gewässer im Bereich der Kläranlage Lippetal wurde von OWL Umweltanalytik in Stichproben vor bzw. nach der Einleitungsstelle gemessen und analysiert. Die Entnahme erfolgte am Tag einer 24-h-Mischprobe, am 27.01.2017. Die Analyse erfolgte auf die gleichen 22 Spurenstoffe, wie in den aus dem KA-Ablauf entnommenen Mischproben. Lediglich die Bromidkonzentration wurde nicht erfasst.

Insgesamt liegen 11 der 22 analysierten Spurenstoffe nicht oberhalb ihrer Bestimmungsgrenze in der Lippe vor. Von den elf mengenmäßig erfassbaren Spurenstoffen liegen acht bereits vor der KA-Einleitung oberhalb des allgemeinen Vorsorgewertes vor. Bei zwei der im Oberlauf quantifizierbaren Spurenstoffe wird durch die KA-Einleitung eine Erhöhung festgestellt. Für neun andere Stoffe ist eine Verdünnung der Konzentration im Flussverlauf zu beobachten. Diese Verdünnung kann durch den Zufluss der Quabbe unterhalb der Kläranlageneinleitung begründet sein. Die Konzentration von Diclofenac überschreitet schon im Oberlauf der KA-Einleitung die vorgeschlagene Umweltqualitätsnorm (UQN) gemäß Ökotoxzentrum.

Die Erhöhung der Konzentrationen der anthropogenen Spurenstoffe in der Lippe durch die Kläranlage Lippetal, der allgemeine Vorsorgewert, sowie die vom Oekotoxzentrum vorgeschlagenen UQN werden in Abbildung 10 dargestellt.

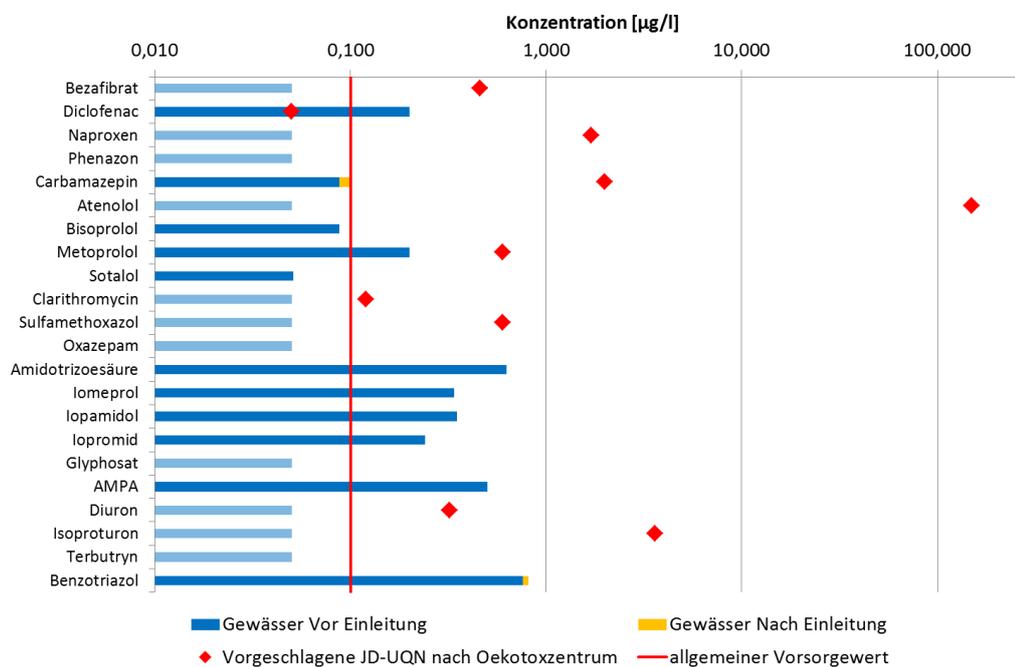


Abbildung 10: Erhöhung der Spurenstoffkonzentrationen im Vorfluter durch die Kläranlage Lippetal (Januar 2017), allgemeiner Vorsorgewert [30] und vorgeschlagene UQN nach Oekotoxzentrum [31]

Zwar ist zu erkennen, dass die Belastung durch Spurenstoffe in der Lippe verglichen mit dem allgemeinen Vorsorgewert in einigen Fällen geringer ausfällt, die Überschreitungen der messbaren Substanzen dafür umso stärker ausgeprägt sind. Durch die Kläranlageneinleitung werden die Konzentrationen von Carbamazepin und Benzotriazol noch weiter erhöht. Für die neun Stoffe, für die eine Verdünnung zwischen den Messpunkten festgestellt wird, ist davon auszugehen, dass sich die Konzentration zwischen der Kläranlageneinleitung und dem Zufluss der Quabbe trotzdem erhöht. Da die Wahl des Messpunktes nicht beliebig erfolgen kann, konnte die Spurenstoffsituation in diesem Flussabschnitt jedoch nicht mengenmäßig erfasst werden.

Der allgemeine Vorsorgewert bietet keine fundierte Grundlage für die Ableitung möglicher zukünftiger Auflagen zur Spurenstoffelimination, da er sich nicht aus stoffspezifischen Wirkschwellen ableitet. Außerdem ist aufgrund der sich ständig verbessernden Analysetechnik und immer neuen Erkenntnissen die Diskussion um

die Relevanz einzelner Stoffe und der passenden Grenzwerte noch nicht an ihr Ende gelangt. Fest steht allerdings, dass die Umsetzung einer Verfahrensstufe zur Spurenstoffelimination die Spurenstoffeinleitung durch die Kläranlage Lippetal nachhaltig reduzieren kann.

4. Variantenuntersuchung für die Kläranlage Lippetal

Für die Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal werden drei verfahrenstechnische Varianten in unterschiedlichen Ausführungen herausgearbeitet. Für alle Varianten ist die Errichtung eines Hebewerkes erforderlich.

4.1 Hebewerk

Da das hydraulische Gefälle zwischen der Nachklärung und dem Bemessungswasserstand in der Lippe rd. 0,85 m beträgt, wird zur Realisierung einer 4. Reinigungsstufe für alle nachfolgend beschriebenen Varianten ein Hebewerk benötigt. Das Hebewerk wird an den Sammelschacht der Nachklärbecken 2 angeschlossen. Hierfür wird eine PE-Rohrleitung DN 250 um das Nachklärbecken 2 herum geführt und auf der Freifläche neben dem Nachklärbecken 2 ein Hebewerk erstellt. Eine Darstellung der für die Umsetzung der Spurenstoffelimination gewählten Flächen wird in Abbildung 11 gezeigt.

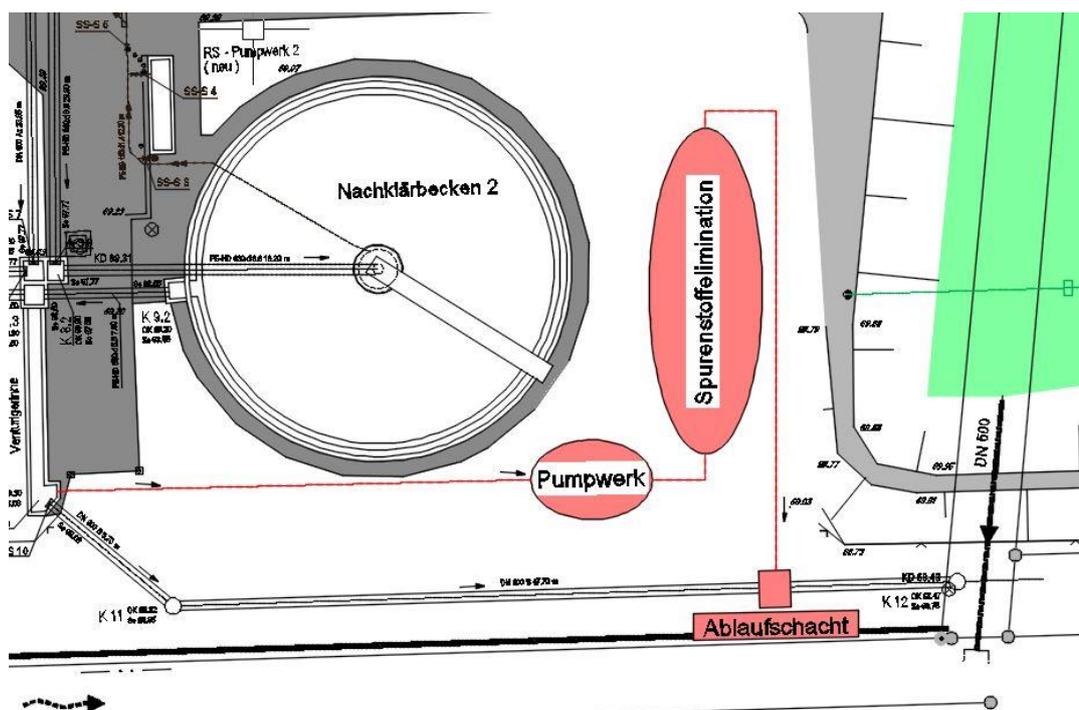


Abbildung 11: Darstellung der zu bebauenden Fläche im Lageplan

Da jede Variante andere hydraulische Eigenschaften aufweist, sind auch unterschiedliche Hebwerke vorgesehen. Für die Varianten 1b, 2b und 4b wird für eine Wasserspiegeldifferenz von rd. 0,90 m bis maximal 1,65 m eine wartungsarme

und energieeffiziente Rohrschneckenpumpe vorgesehen. Für Varianten 1a, 2a, 3 und 4a ist aufgrund der höheren Wasserspiegeldifferenz ein kostengünstiger Betrieb über Schneckenpumpen nicht mehr möglich, sodass hier Tauchmotorpumpen zum Einsatz kommen.

Das Schneckenpumpwerk besteht aus einem Sammelschacht mit Pumpensumpf, in welchen die Schneckenpumpen unter einem Aufstellwinkel von ca. 30° eintauchen, sowie einer Abwurfkammer, in die die Schnecken hineinfördern. Über die Wasserspiegeldifferenz zwischen Sammelschacht und Abwurfkammer wird die Länge der Schneckenpumpen bestimmt, welche maßgeblich für die Gebäudedimensionen ist. Die Abwurfkammer dient der Spurenstoffelimination als Vorlage.

Für die zwei Tauchmotorpumpen wird ein Sammelschacht vorgesehen, von wo aus die Pumpen direkt in den Zulauf des Filters mit kompressiblen Filtermedien (Varianten 1a, 2a), des kontinuierlich beschickten Filters (Variante 3), bzw. in den Steigschacht innerhalb des Ozonreaktors (Variante 4a) fördern.

Die Pumpen werden auf den Bemessungswasserzufluss von 210 m³/h ausgelegt. Der Bemessungswasserzufluss ist so gewählt, dass insgesamt rd. 90,5 % des gesamten Abwassers in der Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination behandelt werden können. Da die sogenannte 4. Reinigungsstufe somit im Bypass an den Kläranlagenablauf angebunden ist, kann sie bei Bedarf für Wartungsarbeiten stillgelegt werden.

Die Kosten für das Hebewerk, den Anschluss der 4. Reinigungsstufe mittels Freigefälleleitung, sowie die Energiekosten für die Förderung des Abwassers werden in jeder einzelnen Variante mitbetrachtet.

4.2 Variante 1: Pulveraktivkohledosierung in das Belebungsbecken mit Filtration

4.2.1 Allgemeine Beschreibung

Bei einer Spurenstoffelimination mit Pulveraktivkohle (PAK) kann die PAK in das Belebungsbecken dosiert werden. Hierbei wird die PAK mittels Feststoff-Wasserstrahlpumpe in einen Teilstrom des Zulaufs zu den Belebungsbecken dosiert. Die primäre Abscheidung der PAK aus dem Abwasser erfolgt in der Nachklärung, zusammen mit dem belebten Schlamm. So kann über die Schlamm-

rezirkulation die PAK im System gehalten und das Kohlealter erhöht werden. Zusätzlich zur Sedimentation in der Nachklärung ist in jedem Fall eine Filtration zur vollständigen Abscheidung der feindispersen PAK-Anteile erforderlich. Da die Aktivkohledosierung im Vollstrom der Kläranlage erfolgt, muss die Filtration auf den maximalen Mischwasserzufluss Q_{\max} von rd. 570 m³/h ausgelegt werden. Hierzu können verschiedene Filtrationstechniken genutzt werden, welche in den nachfolgenden Kapiteln separat betrachtet werden.

Eine PAK-Dosierung in die Belebungsbecken und die dafür erforderliche Filtration hätten einige direkte und indirekte Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen auf der Kläranlage Lippetal. Beim PAK-Einsatz ist ein um rd. 5 – 10 % erhöhter Schlammanfall zu beachten, der sowohl von den Schlammumpfen, als auch von der Schlammbehandlung bewältigt werden muss. Die landwirtschaftliche Verwertung des Schlammes ist in diesem Fall nicht mehr zulässig, sodass 100% des anfallenden Schlammes thermisch entsorgt werden müssten. Im Falle der Kläranlage Lippetal werden noch rd. 60% landwirtschaftlich oder landbaulich entsorgt, sodass sich die Entsorgungskosten erheblich erhöhen würden. Die Mehrkosten sind in den Kostenbetrachtungen mit berücksichtigt.

Durch die Filtration anfallendes Spülabwasser muss in eine vorgehende Stufe zurückgeführt werden. Bei einer Tuchfiltration (Variante 1b) muss mit rd. 12 m³/h Spülabwasser gerechnet werden, bei dem beispielhaft bemessenen FuzzyFilter (Variante 1a) mit rd. 15 m³/h. Dies entspricht einer hydraulischen Mehrbelastung für die Kläranlage von rd. 2,1 % (Variante 1b) bzw. 2,6% (Variante 1a).

Um die Filtration durchfließen zu können, muss das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung mittels Hebewerk angehoben werden. Hierfür wird je nach Filtrationsvariante ein entsprechendes Hebewerk (siehe Kapitel 4.1) in den Projektkosten berücksichtigt.

Die Überschuss-PAK wird direkt mit dem Überschussschlamm aus der Nachklärung abgezogen und der Schlammbehandlung zugeführt.

4.2.2 Variante 1a: PAK-Dosierung in das Belebungsbecken und Filtration mit komprimierbaren Filtermedien

Im Allgemeinen ist eine Filtration über einen Filter mit komprimierbaren Filtermedien möglich. Die Auslegung dieses Filters erfolgte am Beispiel des FuzzyFilters (FF) der Firma Bosman Watermanagement GmbH.

Zur Filtration des mit PAK behandelten Abwassers im Mischwasserlastfall sind rd. 5 m³ Filtervolumen erforderlich. Zum Anpassen des Porenraumes an die Partikelgröße kann dieses Volumen komprimiert werden. Die Filterspülung erfolgt intervallweise mit Spülwasser und Spülluft. Das Spülwasser wird dem Zulaufwasser entnommen, sodass keine separate Vorlage zur Spülung benötigt wird.

Die Filtration mit komprimierbaren Filtermedien kann z.B. mit je 2 FuzzyFiltern Typ 2 und je 3 FuzzyFiltern Typ 5 mit insgesamt rd. 7,9 m² Filterfläche umgesetzt werden. Diese müssen in einer Halle aufgestellt werden. Die Halle misst rd. 85 m². Um die passende Aufstellhöhe für die Filter zu gewährleisten, muss die Halle rd. 1,90 m tief gegründet. Ein Maschinenraum für die Niederspannungsunterverteilung (NSUV), sowie Aufstellplätze für die benötigten Spülluftgebläse sind in die Halle integriert. Ein Filter wird bei mittlerer Beschickung in einem Intervall von rd. 10 h gespült. Ein Spülvorgang dauert rd. 20 Minuten. Während des Spülvorgangs wird ein Filter mit einer hydraulischen Beschickung von 25 m³/(m²*h) betrieben.

Aus hydraulischen Verlusten der Rohrleitungen und des Filterbettes ergibt sich eine Förderhöhe für das Beschickungspumpwerk von rd. 5,15 m.

In Abbildung 12 wird der hydraulische Längsschnitt und in Abbildung 13 die Positionierung der notwendigen Bauteile auf dem Lageplan skizziert.

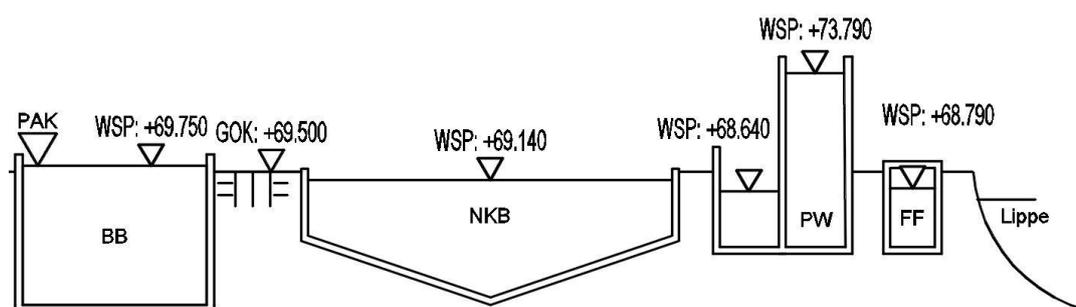


Abbildung 12: Hydraulischer Längsschnitt der Variante 1a

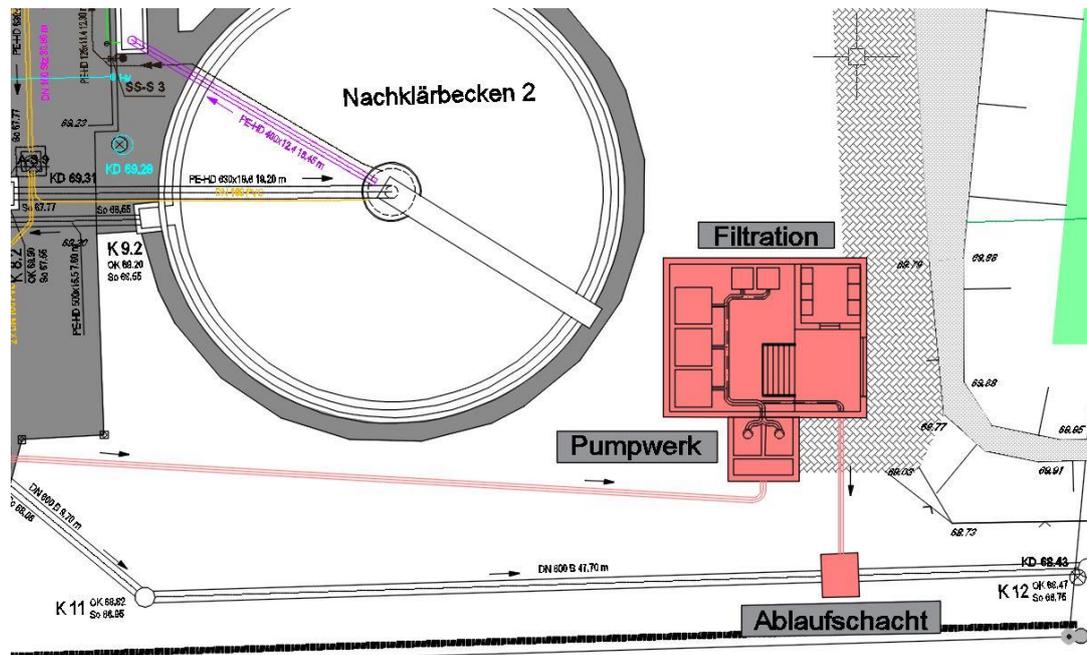


Abbildung 13: Anordnung der erforderlichen Bauteile für Variante 1a im Lageplan

4.2.3 Variante 1b: PAK-Dosierung in das Belebungsbecken und Tuchfiltration

Alternativ besteht die Möglichkeit, das Abwasser über eine Tuchfiltration (TF) von den feindispersen PAK-Bestandteilen zu trennen.

Die Auslegung der Tuchfiltration erfolgte am Beispiel eines SF 6/30 Tuchfilters der Firma Mecana Umwelttechnik. Hier werden zwei Scheibenfilter mit 6 Filterscheiben und einer Filterfläche von 5 m² je Scheibe installiert. Die gesamte Filterfläche beträgt somit rd. 60 m². Durch die vertikale Anordnung der Filterscheiben und die mit 10 m/h hohe Filtergeschwindigkeit lässt sich die Tuchfiltration so auf geringen Bauwerksmaßen realisieren. Da die Filterspülung direkt mit dem Filtrat als Spülwasser erfolgt, sind kein Spülwasserspeicher und kein Spülabwasserspeicher erforderlich. Die Filterspülung wird ausgelöst, wenn die Wasserspiegeldifferenz von Zulauf- zu Ablaufkammer 25 cm übersteigt. Es werden gleichzeitig 2 Filterscheiben mit einer Filterabsaugpumpe gespült. Im Becken abgesetzte PAK wird über eine Bodenschlamm- und Entleerungspumpe abgezogen. Die Filteranlage wird mit allen notwendigen technischen Einrichtungen geliefert und in ein neu zu erstellendes Becken integriert.

Das Bauwerk für die Tuchfiltration wird mit zwei Filterkammern ausgeführt. Die Filterkammern haben eine Grundfläche von je rd. 6,80 m². Die Außenmaße der

4.2.4 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 1 (PAK-Dosierung in Belebungsbecken) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal mit den Optionen der Nachbehandlung 1a und 1b wurden auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisfragen bei Herstellern/Lieferanten und Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines Gebäudes zur Filtration mit 5 FuzzyFilter-Einheiten (Variante 1a) oder Neubau einer Tuchfiltration mit 2 Filtereinheiten (Variante 1b)
- Neubau eines Pumpwerks mit erdverlegten Zulaufleitungen bis zur neuen Reinigungsstufe sowie Anschluss der neuen Reinigungsstufe an die vorhandene Ablaufleitung
- Neubau einer Rohrleitung für die Rückführung des Rückspülwassers aus den Filtern
- 1 Stück PAK-Silo einschl. Dosierstation, Dosierleitungen und Schaltanlage
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (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 in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung für Schlamm Entsorgung und Material von 2,0 % angesetzt. Die Kostensteigerungen für die Energiekosten werden mit 4,0 %, für Betriebsmittel mit 3,0 % und für Personal mit 2,5 % gewählt. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit noch nicht endgültig geklärten Zukunft bezüglich der Gesetzeslage wird ein Abschreibungszeitraum von 15 Jahren gewählt. Anschließend wird im

Zuge des Variantenvergleichs zusätzlich eine Betrachtung über 30 Jahre ange- stellt. Als Preis für die benötigte Energie wird ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt.

In Tabelle 6 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine Aktivkohledosierung in das Belebungsbecken mit anschließender Filtration über komprimierbare Filtermedien (Variante 1a) dargestellt.

Tabelle 6: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 1a: PAK in BB mit Filtration über komprimierbare Filtermedien

	Variante 1a	
	PAK-BB mit FuzzyFilter	
Herstellkosten	1.500.000	€ brutto
Energiekosten	6.800	€/a
Barwert Energiekosten	110.000	€ brutto
Betriebsmittel	37.000	€/a
Barwert Betriebsmittel	555.000	€ brutto
Spurenstoffanalytik	30.700	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	426.000	€ brutto
Wartungskosten	29.600	€/a
Barwert Wartungskosten	411.000	€ brutto
Personalkosten	52.000	€/a
Barwert Personalkosten	726.000	€ brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	106.300	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	1.476.000	€ brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-15.200	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-207.000	€ brutto
PKBW Kosten	4.997.000	€ brutto
mittlere Jahreskosten	418.600	€/a
spezifische Kosten		
je m ³ behandeltes Abwasser	0,38	€/m ³
je Einwohner und Jahr	34,88	€/(EW·a)

Der Projektkostenbarwert für Variante 1a über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die spezifischen Kosten sind in Tabelle 6 dargestellt. Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 1 rd. 8,74 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 446.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 1,1 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 12.000 EW zu 0,40 €/m³ bzw. 37,17 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 15 Betriebsjahren sind in diesen Kosten enthalten.

In Tabelle 7 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine Aktivkohledosierung in das Belebungsbecken mit anschließender Tuchfiltration (Variante 1b) dargestellt.

Tabelle 7: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 1b: PAK in BB mit Tuchfiltration

	Variante 1b	
	PAK-BB mit Tuchfiltration	
Herstellkosten	1.150.000	€ brutto
Energiekosten	1.300	€/a
Barwert Energiekosten	21.000	€ brutto
Betriebsmittel	37.000	€/a
Barwert Betriebsmittel	555.000	€ brutto
Spurenstoffanalytik	30.700	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	426.000	€ brutto
Wartungskosten	22.700	€/a
Barwert Wartungskosten	315.000	€ brutto
Personalkosten	52.000	€/a
Barwert Personalkosten	726.000	€ brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	106.300	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	1.476.000	€ brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-15.200	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-207.000	€ brutto
PKBW Kosten	4.462.000	€ brutto
mittlere Jahreskosten	373.800	€/a
spezifische Kosten		
je m ³ behandeltes Abwasser	0,34	€/m ³
je Einwohner und Jahr	31,15	€/(EW·a)

Der Projektkostenbarwert für Variante 1b über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die Spezifischen Kosten sind in Tabelle 7 dargestellt. Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 1 rd. 7,87 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 402.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 1,1 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 12.000 EW zu 0,36 €/m³ bzw.

33,48 €/ (EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 15 Betriebsjahren sind in diesen Kosten enthalten.

4.3 Variante 2: Pulveraktivkohledosierung in ein Kontaktbecken mit Filtration

4.3.1 Allgemeine Beschreibung

Bei einer Spurenstoffelimination mit Pulveraktivkohle (PAK) kann die PAK in ein Kontaktbecken dosiert werden, welches mit mechanisch-biologisch gereinigtem Abwasser beschickt wird. Die Abscheidung der PAK aus dem Abwasser erfolgt durch eine Filtration. Hierzu können verschiedene Filtrationstechniken genutzt werden, welche in den nachfolgenden Kapiteln separat betrachtet werden. Die Behandlung des Abwassers erfolgt hier im Teilstrom der Kläranlage von max. 210 m³/h.

Eine PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken (KB) und die dafür erforderliche Filtration hätten einige direkte und indirekte Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen auf der Kläranlage Lippetal. Diese sind analog zu Variante 1, PAK-Dosierung in das Belebungsbecken.

Durch die Filtration stellen sich andere Spülwassermengen ein, da nur ein Teilstrom der Kläranlage behandelt wird. Bei einer Tuchfiltration (Variante 2b) muss mit rd. 7,2 m³/h Spülabwasser gerechnet werden, bei dem beispielhaft bemessenen FuzzyFilter (Variante 2a) mit rd. 6,1 m³/h. Dies entspricht einer hydraulischen Mehrbelastung der Anlage von 1,3 % (Variante 2b) bzw. 1,1 % (Variante 2a) bezogen auf Q_{\max} .

Um die Spurenstoffelimination durchfließen zu können, muss das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung mittels Hebewerk angehoben werden. Hierfür wird je nach Filtrationsvariante ein entsprechendes Hebewerk (siehe Kapitel 4.1) in den Projektkosten berücksichtigt.

Die Überschuss-PAK wird direkt mit dem Überschussschlamm aus der Nachklärung abgezogen und der Schlammbehandlung zugeführt.

4.3.2 Variante 2a: PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken und Filtration mit komprimierbaren Filtermedien

Im Allgemeinen ist eine Filtration über einen Filter mit komprimierbaren Filtermedien möglich. Die Auslegung dieses Filters erfolgte am Beispiel des FuzzyFilters (FF) der Firma Bosman Watermanagement GmbH.

Die Filtration mit komprimierbaren Filtermedien kann z.B. mit 3 FuzzyFilter Typ 3 mit einer Filterfläche von insgesamt 3 m² umgesetzt werden. Diese müssen in einer Halle aufgestellt werden. Die Halle misst rd. 85 m² und wird rd. 1,90 m tief gegründet. Ein Maschinenraum für die Niederspannungsunterverteilung (NSUV), sowie Aufstellplätze für die benötigten Spülluftgebläse sind in die Halle integriert.

Aus hydraulischen Verlusten der Rohrleitungen und des Filterbettes, ergibt sich eine Förderhöhe für das Beschickungspumpwerk von rd. 5,65 m.

In Abbildung 16 wird der hydraulische Längsschnitt und in Abbildung 17 die Positionierung der notwendigen Bauteile auf dem Lageplan skizziert.

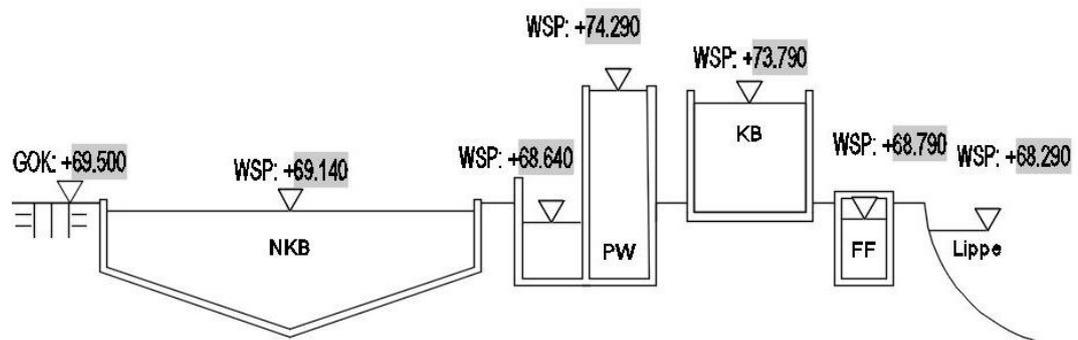


Abbildung 16: Hydraulischer Längsschnitt der Variante 2a

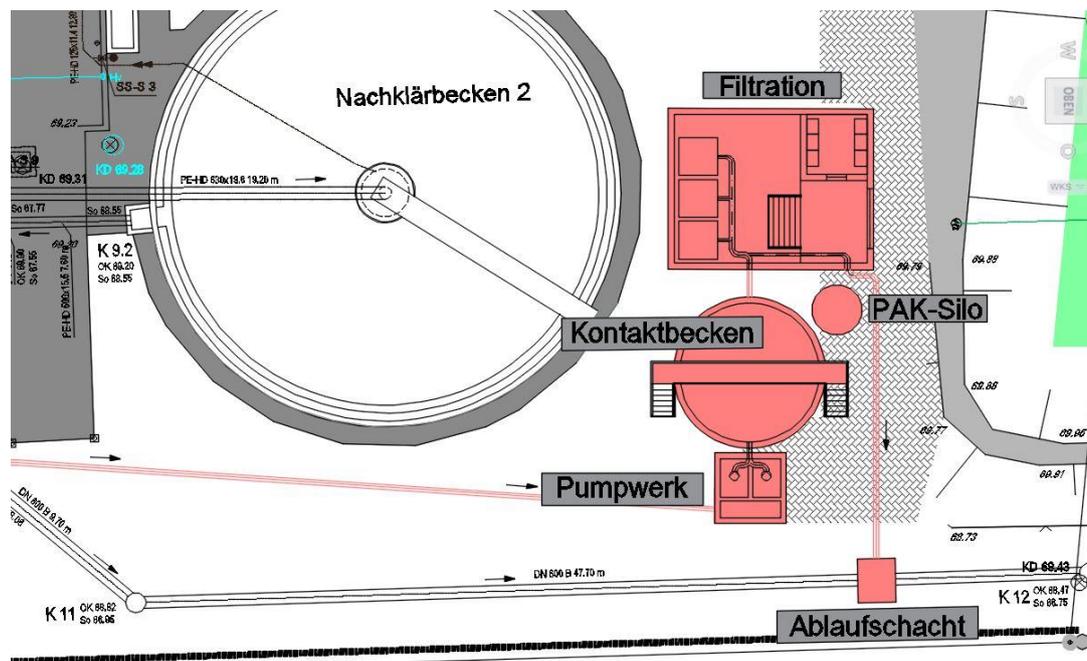


Abbildung 17: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 2a im Lageplan

4.3.3 Variante 2b: PAK-Dosierung in ein Kontaktbecken mit Tuchfiltration

Alternativ besteht die Möglichkeit, das Abwasser über eine Tuchfiltration von den feindispersen PAK-Bestandteilen zu trennen.

Die Auslegung der Tuchfiltration erfolgte am Beispiel zweier SF 4/20 Tuchfilters der Firma Mecana Umweltechnik. Die gesamte Filterfläche beträgt rd. 40 m².

Das Bauwerk für die Tuchfiltration wird mit zwei Filterkammern ausgeführt. Eine Filterkammer hat eine Grundfläche von rd. 6,80 m². Die Außenmaße der Filtration betragen rd. 6,80 m Länge und rd. 6,00 m Breite. Außen am Bauwerk befinden sich eine Zulaufrinne und eine Sammelrinne für den Ablauf der Filterkammer. Für das bei der Filterspülung anfallende Spülwasser werden Rohrleitungen verlegt, welche das Rückspülwasser gesammelt in den Zulauf zur Belebung zurückführen.

Aus den vergleichsweise geringen hydraulischen Verlusten und der geringen Bauhöhe für die Tuchfiltration ergibt sich für Variante 2b eine Förderhöhe für das Beschickungspumpwerk von rd. 1,40 m.

In Abbildung 18 ist der hydraulische Längsschnitt, in Abbildung 19 die Anordnung der notwendigen Bauteile im Lageplan dargestellt.

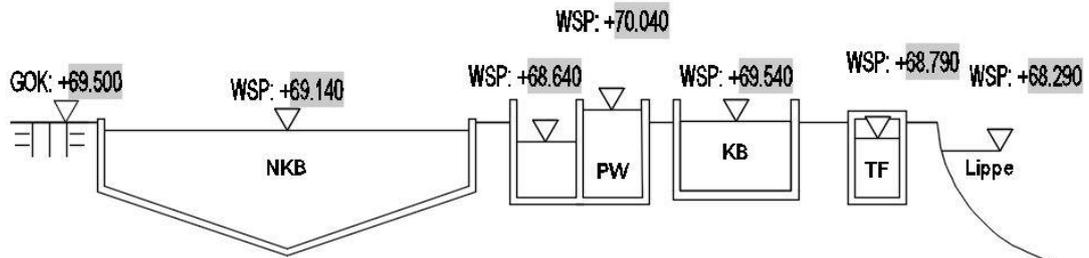


Abbildung 18: Hydraulischer Längsschnitt der Variante 2b

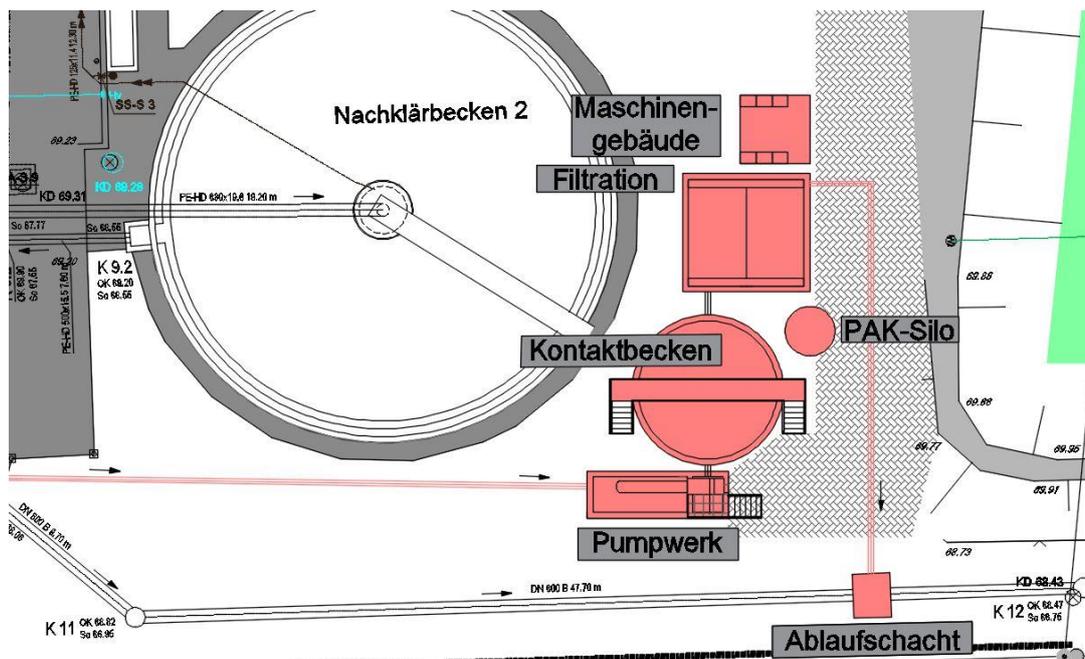


Abbildung 19: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 2b im Lageplan

4.3.4 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 2 (PAK-Dosierung in Kontaktbecken) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal mit den Optionen der Nachbehandlung 2a und 2b wurden auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten und Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines Kontaktbeckens inkl. Rührwerk und Bedienbrücke

- Neubau eines Gebäudes zur Filtration mit 3 FuzzyFilter-Einheiten (Variante 2a) oder Neubau einer Tuchfiltration mit 2 Filtereinheiten (Variante 2b)
- Neubau eines Pumpwerks mit erdverlegten Zulaufleitungen bis zur 4. Reinigungsstufe sowie Anschluss der neuen Reinigungsstufe an die vorhandene Ablaufleitung
- Neubau einer Rohrleitung für die Rückführung des Rückspülwassers aus den Filtern
- 1 Stück PAK-Silo einschl. Dosierstation, Dosierleitungen und Schaltanlage
- Errichtung einer neuen Niederspannungsunterverteilung (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 in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung für Schlamm Entsorgung und Material von 2,0 % angesetzt. Die Kostensteigerungen für die Energiekosten werden mit 4,0 %, für Betriebsmittel mit 3,0 % und für Personal mit 2,5 %. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit noch nicht endgültig geklärten 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 ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt.

In Tabelle 8 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine Aktivkohledosierung in ein Kontaktbecken mit anschließender Filtration mit komprimierbaren Filtermedien (Variante 2a) dargestellt.

Tabelle 8: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 2a: PAK in KB mit Filtration über komprimierbare Filtermedien

	Variante 2a	
	PAK-KB mit FuzzyFilter	
Herstellkosten	1.350.000	€ brutto
Energiekosten	11.000	€/a
Barwert Energiekosten	178.000	€ brutto
Betriebsmittel	16.900	€/a
Barwert Betriebsmittel	253.000	€ brutto
Spurenstoffanalytik	30.700	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	426.000	€ brutto
Wartungskosten	23.400	€/a
Barwert Wartungskosten	325.000	€ brutto
Personalkosten	65.000	€/a
Barwert Personalkosten	907.000	€ brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	106.300	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	1.476.000	€ brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-15.200	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-207.000	€ brutto
PKBW Kosten	4.708.000	€ brutto
mittlere Jahreskosten	394.400	€/a
spezifische Kosten		
je m ³ behandeltes Abwasser	0,36	€/m ³
je Einwohner und Jahr	32,87	€/(EW·a)

Der Projektkostenbarwert für Variante 2a über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die spezifischen Kosten sind in Tabelle 8 dargestellt. Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 1 rd. 8,13 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 415.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 1,1 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 12.000 EW zu 0,37 €/m³ bzw.

34,57 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 15 Betriebsjahren sind in diesen Kosten enthalten.

In Tabelle 9 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine Aktivkohledosierung in ein Kontaktbecken mit anschließender Tuchfiltration (Variante 2b) dargestellt.

Tabelle 9: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 2b: PAK in KB mit Tuchfiltration

	Variante 2b	
	PAK-KB mit Tuchfiltration	
Herstellkosten	1.250.000	€ brutto
Energiekosten	4.900	€/a
Barwert Energiekosten	79.000	€ brutto
Betriebsmittel	16.900	€/a
Barwert Betriebsmittel	253.000	€ brutto
Spurenstoffanalytik	30.700	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	426.000	€ brutto
Wartungskosten	23.100	€/a
Barwert Wartungskosten	321.000	€ brutto
Personalkosten	65.000	€/a
Barwert Personalkosten	907.000	€ brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	106.300	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	1.476.000	€ brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-15.200	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-207.000	€ brutto
PKBW Kosten	4.505.000	€ brutto
mittlere Jahreskosten	377.400	€/a
spezifische Kosten		
je m ³ behandeltes Abwasser	0,34	€/m ³
je Einwohner und Jahr	31,45	€/(EW·a)

Der Projektkostenbarwert für Variante 2b über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die Spezifischen Kosten sind in Tabelle 9 dargestellt. Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 1 rd. 7,83 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 400.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 1,1 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 12.000 EW zu 0,36 €/m³ bzw. 33,28 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 15 Betriebsjahren sind in diesen Kosten enthalten.

4.4 Variante 3: Filtration mit granulierter Aktivkohle

4.4.1 Allgemeine Beschreibung

Auf der Kläranlage Lippetal 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. Die Wahl fällt hierbei auf kontinuierlich beschickte Filtereinsätze. Im Vergleich zu herkömmlichen, diskontinuierlich gespülten GAK-Filter-Anlagen bieten die kontinuierlich gespülten Filter mehrere Vorteile. Vor allem bei kleinen Anlagen sind geringere Herstellkosten hervorzuheben. Eine Beschickung der Filter ist auch während der Filterspülung möglich. Darüber hinaus muss die Kläranlage durch die kontinuierliche Spülung keine hydraulischen Stoßbelastungen durch Spülwasser aufnehmen. Weiterhin werden keine Spülwasserpumpen benötigt. Stattdessen bedienen sich die kontinuierlich beschickten Filter einer integrierten Mammutpumpe zur Spülung des Filtermaterials. Durch die kontinuierliche Laufzeit sind auch keine Spitzen beim Strombedarf zu erwarten. Durch die erhöhte Spüldauer ist aber ein leichter Anstieg der Energiekosten im Vergleich zum herkömmlichen GAK-Filter zu erwarten. Diese werden allerdings durch den geringeren Personalaufwand und reduzierte Wartungskosten ausgeglichen. Weiterhin sind für eine kontinuierlich gespülte GAK-Filter-Anlage wesentlich weniger Antriebe und Messinstrumente nötig, was den Betriebs- und Instandhaltungsaufwand erheblich verringert.

In Abbildung 20 wird beispielhaft eine kontinuierlich gespülte Filteranlage des Typs DynaSand® der Firma Nordic Water GmbH dargestellt.

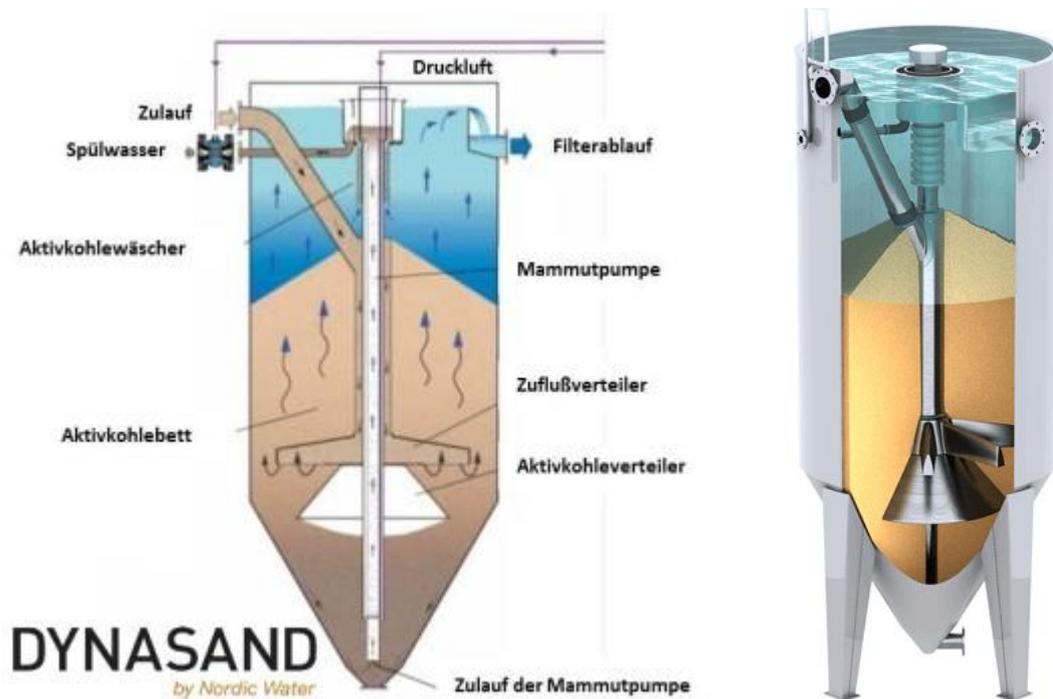


Abbildung 20: Kontinuierlich beschickter GAK-Filter des Typs DynaSand® der Firma Nordic Water GmbH [13]

Eine GAK-Filtration hätte geringe Auswirkungen auf den Betrieb der anderen Verfahrensstufen der Kläranlage Lippetal. Durch die Filtration anfallendes Spülabwasser muss in eine vorangehende Reinigungsstufe, wie z.B. in das Belebungsbecken, zurückgeführt werden.

4.4.2 Kontinuierlich gespülter GAK-Filter

Für die GAK-Filtration wird die Bemessungswassermenge von 210 m³/h angesetzt. Weiter wird eine Filtergeschwindigkeit bei Trockenwetter von maximal 7,5 m/h vorausgesetzt. Berücksichtigt man die Auslegungsempfehlungen des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW [3], und setzt eine Leerbettkontaktzeit von 30 Minuten an, errechnet sich das erforderliche GAK-Filtervolumen zu rd. 102 m³. Es werden Filterkammern mit einer Fläche von 5 m² und einer Filterbetthöhe von 2,75 m gewählt, sodass 8 Filterelemente benötigt werden. Daraus resultiert ein GAK-Volumen von insgesamt rd. 110 m³.

Es werden 14.000 durchsetzbare Bettvolumina bis zum Austausch der GAK angenommen, was für die angenommene behandelte Wassermenge einer Filterstandzeit von gut 16,7 Monaten entspricht. Als Grundlage für die Durchsetzung von 14.000 BV dienen die Betriebserfahrungen der Kläranlagen Obere Lutter (rd.

15.000 BV), Buchenhofen (> 15.000 BV) und Düren-Merken (rd. 9.000 BV bei im Mittel 20 bis 30 mg_{AFS}/l im Filterzulauf) [6]. Es werden Filterkammern mit je vier Filtereinsätzen zusammengeschlossen. Bei zwei Filterkammern wäre 1,5-mal im Jahr der Austausch des jeweils am stärksten beladenen Filterbettes erforderlich. In Summe würden so rd. 79 m³_{GAK}/a benötigt.

Bei einer GAK-Filtration ist mit rd. 12 m³/h Spülabwasser zu rechnen. Dies entspricht einer hydraulischen Mehrbelastung der Anlage von 2,1 % bezogen auf Q_{max}.

Für die Einbindung einer GAK-Filtration in die Kläranlage Lippetal wäre der Neubau einer der Nachklärung nachgeschalteten Filtration mit 2 Filterkammern mit je 4 Filtereinsätzen erforderlich. Zusätzlich wären ein Schaltraum und eine neue Niederspannungsunterverteilung erforderlich.

Um die Reinigungsstufe durchfließen zu können, muss das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung mittels Hebewerk angehoben werden. In Variante 3 ist eine Förderhöhe von rd. 3,40 m erforderlich.

In Abbildung 21 wird der hydraulische Längsschnitt und in Abbildung 22 die Positionierung der notwendigen Bauteile auf dem Lageplan skizziert.

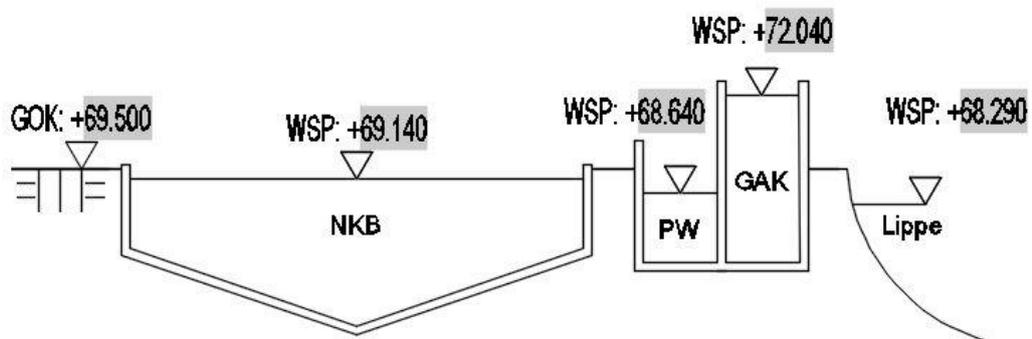


Abbildung 21: Hydraulischer Längsschnitt der GAK-Filtration

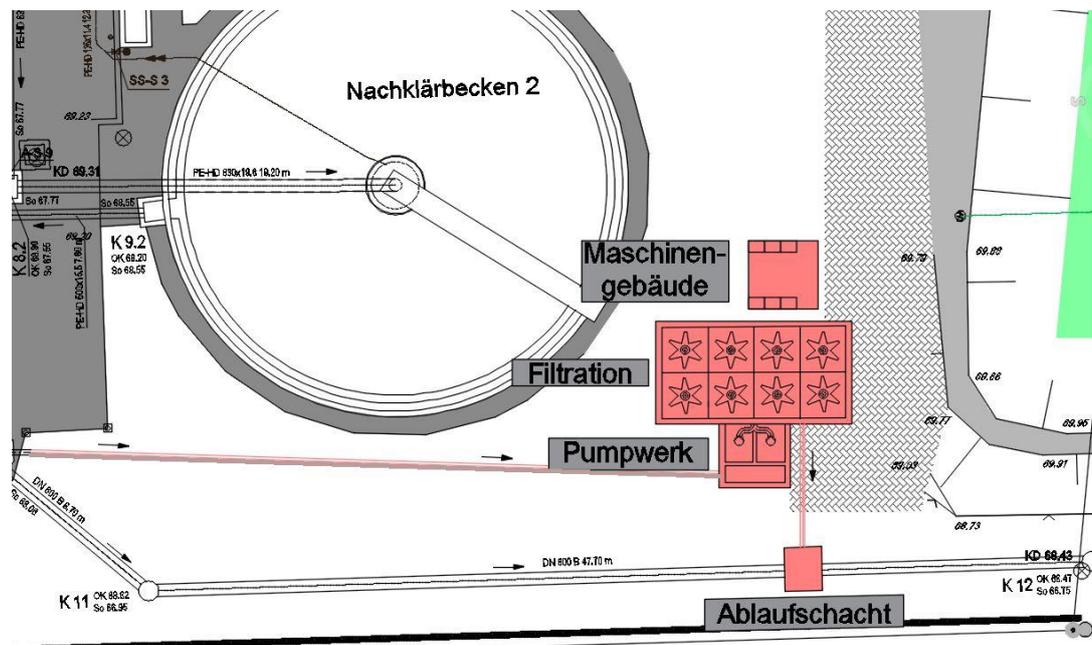


Abbildung 22: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 3 im Lageplan

4.4.3 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Variante 3 (GAK-Filtration) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten und Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines kontinuierlich beschickten Filters mit 2 Filterkammern mit insgesamt 8 Filtereinsätzen, einschl. Gebläse
- GAK-Filtermaterial als Erstausrüstung für 8 Filtereinsätze
- Neubau eines Pumpwerks mit erdverlegten Zulaufleitungen bis zur 4. Reinigungsstufe sowie Anschluss der neuen Reinigungsstufe an die vorhandene Ablaufleitung
- Neubau einer Rohrleitung für die Rückführung des Rückspülwassers aus den Filtern

- 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-Ablaufwerte in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung für Schlamm Entsorgung und Material von 2,0 % angesetzt. Die Kostensteigerungen für die Energiekosten werden mit 4,0 %, für Betriebsmittel mit 3,0 % und für Personal mit 2,5 %. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit noch nicht endgültig geklärten 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 ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt.

In Tabelle 10 sind der Projektkostenbarwert und die zugehörigen Jahreskosten für eine GAK-Filtration dargestellt.

Tabelle 10: Zusammenstellung des Projektkostenbarwert für Variante 3: GAK-Filtration

	Variante 3	
	kontinuierlich beschickter GAK-Filter	
Herstellkosten	990.000	€ brutto
Energiekosten	4.300	€/a
Barwert Energiekosten	70.000	€ brutto
Betriebsmittel	31.900	€/a
Barwert Betriebsmittel	478.000	€ brutto
Spurenstoffanalytik	30.700	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	426.000	€ brutto
Wartungskosten	17.400	€/a
Barwert Wartungskosten	242.000	€ brutto
Personalkosten	33.000	€/a
Barwert Personalkosten	460.000	€ brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	0	€ brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-13.200	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-180.000	€ brutto
PKBW Kosten	2.486.000	€ brutto
mittlere Jahreskosten	208.200	€/a
spezifische Kosten		
je m ³ behandeltes Abwasser	0,19	€/m ³
je Einwohner und Jahr	17,35	€/(EW·a)

Der Projektkostenbarwert für Variante 3 über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die spezifischen Kosten sind in Tabelle 10 dargestellt. Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 2 rd. 4,19 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 214.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 1,1 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 12.000 EW zu 0,19 €/m³ bzw. 17,82 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen sind in diesen Kosten enthalten.

4.5 Variante 4: Ozondosierung

4.5.1 Allgemeine Beschreibung

Auf der Kläranlage Lippetal ist auch der Einsatz von Ozon zur Spurenstoffelimination denkbar. Die erforderliche Nachbehandlung des mit Ozon behandelten Abwassers würde durch eine nachgeschaltete biologische Behandlung sichergestellt werden. Durch die Ozonbehandlung würde neben der Spurenstoffelimination auch eine Desinfektion des gereinigten Abwassers erfolgen.

Für die Umsetzung einer Ozonanlage sind mehrere Anlagenteile erforderlich. In einem Ozongenerator wird mittels hochfrequenter Mittelspannung aus Flüssigsauerstoff (LOX) Ozon erzeugt. Die Auslegung eines solchen Ozongenerators mit allen erforderlichen Anlagenteilen erfolgte durch die Firma Xylem Water Solutions. Über Tellerbelüfter wird das Ozon in einem Ozonreaktor mit dem Abwasser in Kontakt gebracht. Der für die Ozonerzeugung benötigte Sauerstoff wird in einem Flüssigsauerstofftank gelagert.

Der Betrieb einer Ozonanlage hätte je nach Nachbehandlungsvariante Auswirkungen auf den Betrieb der bestehenden Reinigungsstufen der Kläranlage Lippetal. So ist bei der biologischen Nachbehandlung des ozonierten Abwassers ggf. mit Spülabwasser zu rechnen, welches in eine vorhergehende Reinigungsstufe zurückgeführt werden muss.

Um die Reinigungsstufe durchfließen zu können, muss das Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung mittels Hebewerk angehoben werden.

4.5.2 Ozonreaktor

Für die Berechnung des erforderlichen Volumens des Ozonreaktors ($V_{\text{Ozonreaktor}}$) wird eine Bemessungswassermenge (Q_{Bem}) von rd. 203 m³/h und eine Kontaktzeit (t_{Kontakt}) von 15 Minuten angesetzt. Dadurch ergibt sich, bei Einbeziehung eines Faktors zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Durchströmung, ein erforderliches Reaktorvolumen von rd. 145 m³ [3].

$$V_{\text{Ozonreaktor}} = Q_{\text{Bem}} \cdot t_{\text{Kontakt}} \cdot \text{Faktor} = 203 \cdot \frac{15}{60} \cdot \frac{1}{0,35} = 145 \text{ m}^3$$

Beim Ozoneintrag sollte die Wassertiefe 5-7 m betragen, um einen möglichst weitgehenden Übergang des Ozongases in die Wasserphase zu ermöglichen.

Der Ozonreaktor wird als komplett geschlossenes Betonbecken mit 6,00 m Wassertiefe und 2,50 m Beckenbreite errichtet. Über die Gesamtbeckenlänge von rd. 10,00 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 können 6 Dom-Diffusoren (Keramik-Tellerbelüfter) am Reaktorboden installiert werden, über die der Ozon eintrag erfolgt.

4.5.3 Ozonerzeugung

Die erforderliche Ozondosis (C_{O_3}) wird sowohl für die Bemessung der Anlagenteile als auch für den mittleren Ozonbedarf ermittelt. Für die Bemessung werden die 85 %-Perzentile der aus der CSB-Konzentration ($C_{CSB} = 36,5 \text{ mg/l}$) errechneten DOC-Konzentration ($C_{DOC} = 12,3 \text{ mg/l}$) und der Nitrit-Konzentration ($C_{NO_2-N} = 0,17 \text{ mg/l}$) im Ablauf der Nachklärung verwendet. Für den mittleren Ozonbedarf werden die entsprechenden Mittelwerte für den DOC ($C_{DOC} = 10,4 \text{ mg/l}$) und der Nitrit-Konzentration ($C_{NO_2-N} = 0,12 \text{ mg/l}$) gewählt. Die spezifische Ozonzehrung für DOC ($z_{DOC} = 0,6 \text{ mgO}_3/\text{mg}_{DOC}$) und für NO_2-N ($z_{NO_2-N} = 3,43 \text{ mgO}_3/\text{mg}_{NO_2-N}$) wurden anhand gängiger Literaturwerte gewählt. [3]

$$C_{O_3,max} = z_{DOC} \cdot C_{DOC} + z_{NO_2-N} \cdot C_{NO_2-N} = 0,6 \cdot 12,3 + 3,43 \cdot 0,17 = 8,0 \frac{\text{mgO}_3}{\text{l}}$$

$$C_{O_3,Mittel} = z_{DOC} \cdot C_{DOC} + z_{NO_2-N} \cdot C_{NO_2-N} = 0,6 \cdot 10,4 + 3,43 \cdot 0,12 = 6,7 \frac{\text{mgO}_3}{\text{l}}$$

Für die Bemessungswassermenge resultiert eine maximal erforderliche Ozonproduktionskapazität von rd. $1.680 \text{ gO}_3/\text{h}$. Da die Ozonreaktoren eine untere Grenze der Produktionskapazität haben, muss bei einem minimalen Trockenwetterzufluss von rd. $23 \text{ m}^3/\text{h}$ eine minimale Ozonproduktionskapazität von rd. $153 \text{ gO}_3/\text{h}$ sichergestellt werden. Der mittlere Ozonbedarf beträgt voraussichtlich rd. $840 \text{ gO}_3/\text{h}$.

$$B_{O_3,max} = Q_{Bem} \cdot C_{O_3,max} = 203 \cdot 8,0 = \text{rd. } 1.680 \frac{\text{gO}_3}{\text{h}}$$

$$B_{O_3,mittel} = Q_{Beh} \cdot C_{O_3,Bem} = 125 \cdot 6,7 = \text{rd. } 840 \frac{\text{gO}_3}{\text{h}}$$

$$B_{O_3,min} = Q_{T,2h,min} \cdot C_{O_3} = 23 \cdot 6,7 = rd. 153 \frac{gO_3}{h}$$

Die erforderlichen Ozonmengen können beispielsweise durch den Ozongenerator SMOevo 410 der Marke Wedeco (Firma Xylem, max. 1.750 g_{O₃}/h Ozonproduktionskapazität) bereitgestellt werden. Die Aufstellung des Ozongenerators sowie aller zusätzlich benötigter Anlagenkomponenten wie Kühler und Schaltanlage ist seitens Wedeco in einem kompakten Container vorgesehen.

In Abbildung 23 wird beispielhaft eine Ozongeneratoreinheit und die zugehörige Technik dargestellt.



Abbildung 23: Ozongenerator und zugehörige Schalt- und Steuerschranke (Quelle: Wedeco – Xylem)

4.5.4 Reinsauerstoffversorgung

Der Ozongenerator wird mit Reinsauerstoff als Betriebsmittel versorgt. Zur Bereitstellung des reinen Sauerstoffs stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Eine Möglichkeit ist der Betrieb eines Flüssigsauerstoff-Tanks und die Anlieferung des Flüssigsauerstoffes (LOX) per LKW. Diese Variante zur Sauerstoffbereitstellung

lung wird in dieser Studie berücksichtigt, da dies erfahrungsgemäß für kommunale Kläranlagen die wirtschaftlichste Variante ist.

Hierfür wird ein Tank mit Nutzvolumen von 34.000 l LOX vorgesehen. Der Tank kann in direkter Nähe zur Ozonerzeugungseinheit positioniert werden. Es ist lediglich ein Sicherheitsradius von 5,00 m im Abstand von der Behälterwand zu umliegenden Bauwerken einzuhalten.

4.5.5 Variante 4a: Ozondosierung und Nachbehandlung mit kontinuierlich beschickter Sandfiltration

Für die biologische Nachbehandlung des ozonierten Abwassers kann eine Filtration analog zu Variante 3 mit 2 Filterkammern und je 4 Filtereinsätzen mit insgesamt 40 m² Filterfläche angeordnet werden. Anstelle der GAK wird herkömmliches Filtermaterial verwendet. Die Auslegung des kontinuierlich beschickten Sandfilters erfolgt analog zu Variante 3.

In Abbildung 24 wird der hydraulische Längsschnitt und in Abbildung 25 die Positionierung der notwendigen Bauteile auf dem Lageplan skizziert.

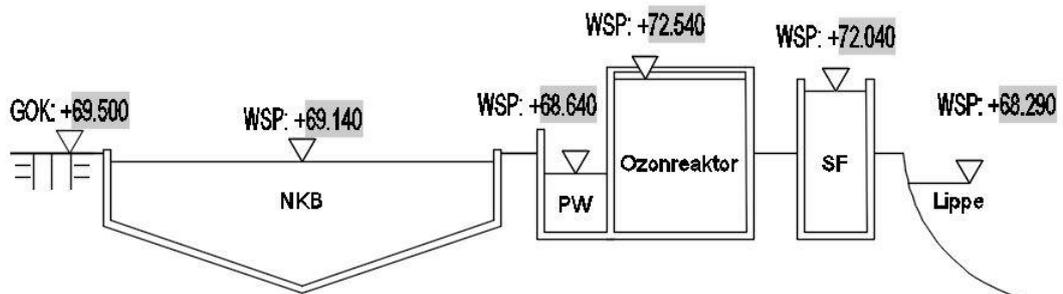


Abbildung 24: Hydraulischer Längsschnitt der Ozonierung mit Sandfiltration

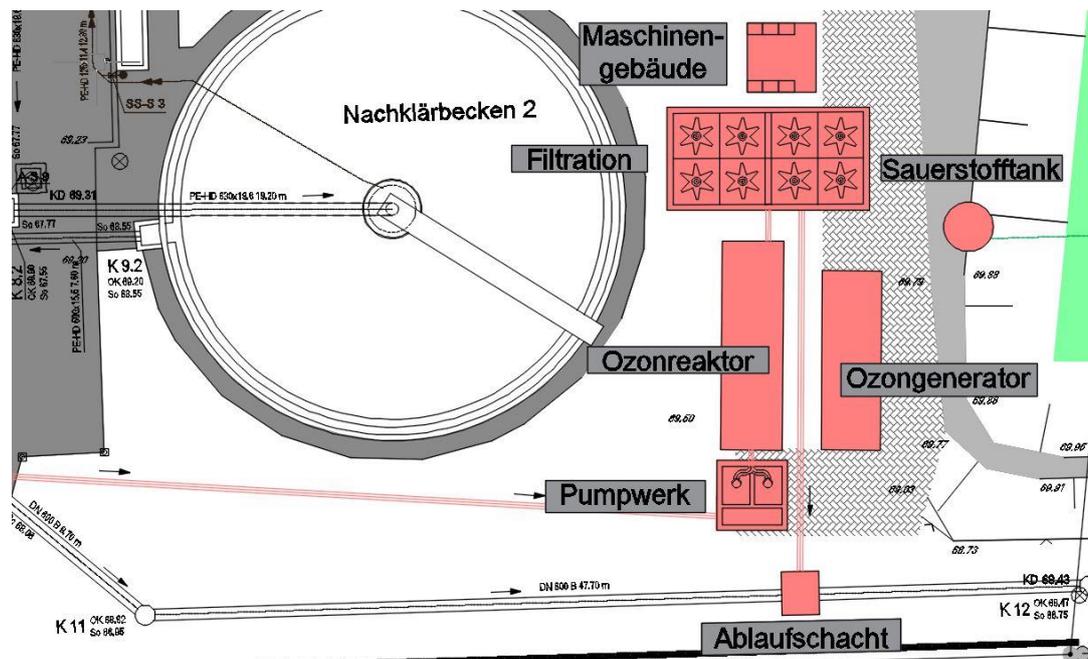


Abbildung 25: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 4a im Lageplan

4.5.6 Variante 4b: Ozondosierung und Nachbehandlung im Schönungsteich

Gegenüber der Nachbehandlung mit einem Sandfilter, kommt auch die biologische Nachbehandlung des ozonierten Abwassers durch einen Schönungsteich in Betracht.

Der Vorteil eines Schönungsteiches liegt in den sehr geringen Betriebskosten und der biologischen Aktivität. Transformationsprodukte aus der Ozonierung werden in der heranwachsenden Biomasse abgebaut und können mit dem entstehenden Schlamm abgezogen werden. Der Schlamm wird in festgelegten Intervallen abgepumpt und verwertet.

Die Auslegung eines Schönungsteiches erfolgt nach DWA A-201 [32]. Demnach wird das benötigte Volumen des Schönungsteiches anhand einer Durchflusszeit von 24-48h bemessen. Die Tiefe soll 1-2 Meter betragen. Für den beim biologischen Abbau entstehenden Schlamm muss ein zusätzliches Reservevolumen in Abhängigkeit der Räumintervalle festgelegt werden.

Bezogen auf die Bemessungswassermenge von 203 m³/h ergibt sich bei einer Aufenthaltszeit von 24h ein erforderliches Volumen von rd. 4.900 m³.

$$V_{Bem} = 203 \frac{m^3}{h} * 24 h = rd. 4.900 m^3$$

Das Reservevolumen für die Schlammproduktion wird anhand der spezifischen Schlammproduktion in Schönungsteichen von 5 l/(EW*a) und einem Räumungsintervall von 15 Jahren zu rd. 900 m³ errechnet.

$$V_{Schlamm} = 5 \frac{l}{EW * a} * 12.000 EW * 15a * \frac{1 m^3}{1000 l} = 900 m^3$$

Das benötigte Gesamtvolumen des Schönungsteiches beträgt somit 5.800 m³.

Es wird empfohlen die Sohle des Schönungsteiches zu einem Punkt hin geneigt auszuführen, um dort den Schlamm zu sammeln und räumen zu können. Die Wassertiefe wird daher von 1 Meter bis 2 Meter abfallen. Daraus ergibt sich ein Flächenbedarf für den Abwasserteich von rd. 3.900 m².

$$A = 5.800 m^3 * \frac{(1 m + 2 m)}{2} = rd. 3.900 m^2$$

Gewählt wird eine quadratische Fläche mit rd. 65 Metern Seitenlänge. Um Totbereiche und Kurzschlussströmungen im Teich zu vermeiden, werden 2 Strömungsleitwände eingebaut, um den Teich in 3 längere Segmente zu unterteilen und so eine Pfropfenströmung zu erzeugen.

In Abbildung 26 wird der hydraulische Längsschnitt und in Abbildung 27 die Positionierung der notwendigen Bauteile auf dem Lageplan skizziert.

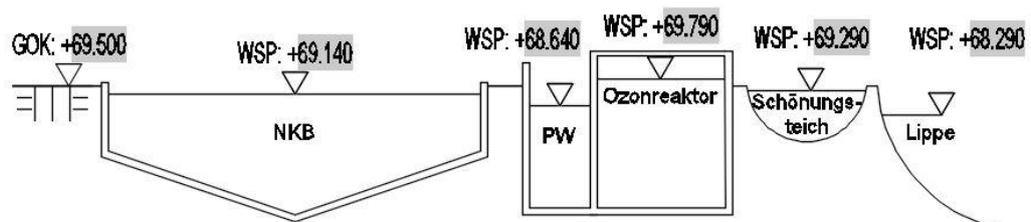


Abbildung 26: Hydraulischer Längsschnitt der Ozonierung mit Schönungsteich

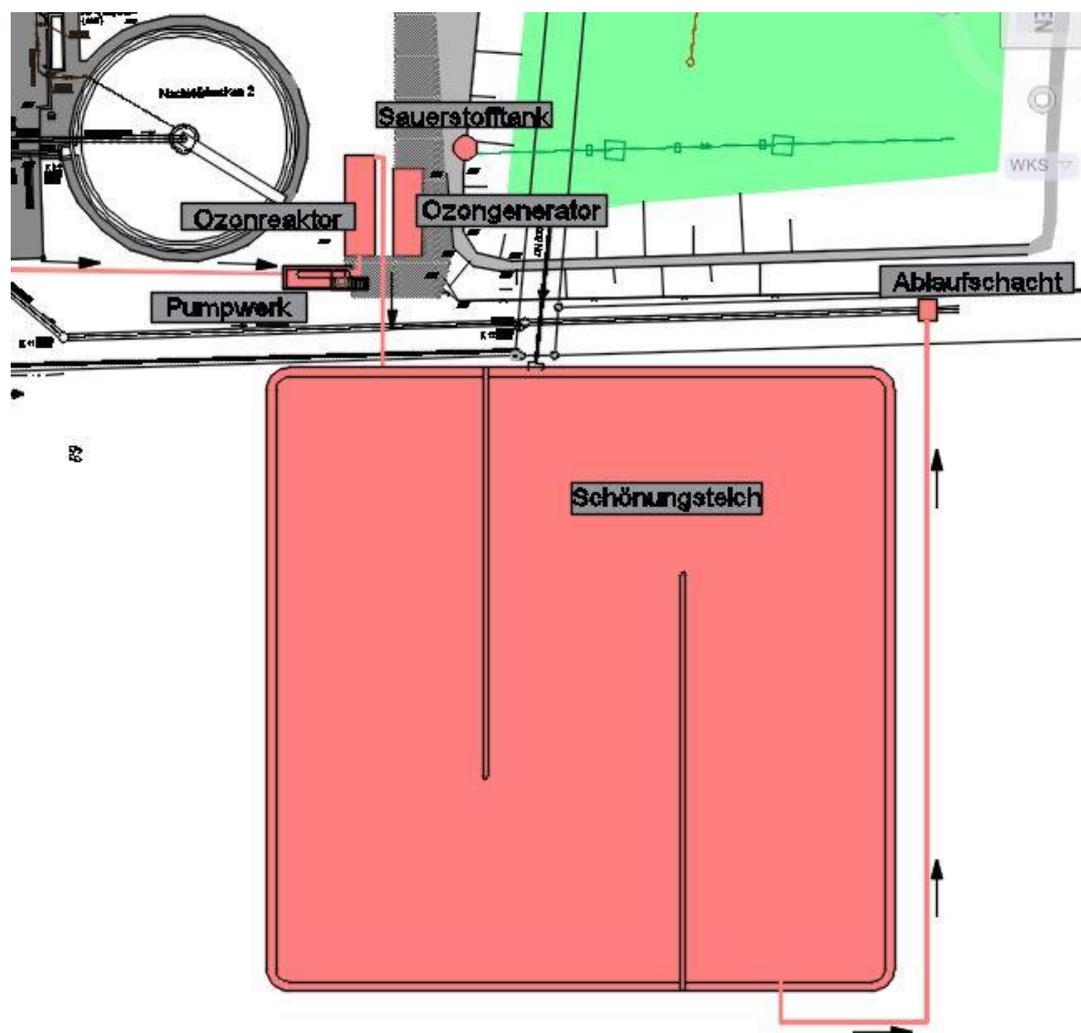


Abbildung 27: Anordnung der erforderlichen Bauwerke für Variante 4b im Lageplan

4.5.7 Kostenaufstellung

Die Kosten für die Umsetzung und den Betrieb der beschriebenen Varianten 4a (Ozondosierung und Nachbehandlung mit kontinuierlich beschickter Sandfiltration) und 4b (Ozondosierung und Nachbehandlung im Schönungsteich) zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal wurden ebenfalls auf der Grundlage von vergleichbaren aktuellen Angebotspreisen, vorliegenden Preisanfragen bei Herstellern/Lieferanten und Werten aus der aktuellen Fachliteratur aufgestellt.

Bei der Ermittlung der Herstellungskosten wurde Folgendes mit berücksichtigt:

- Neubau eines Ozonreaktors

- Errichtung eines Fundamentes für den Flüssigsauerstofftank
- Ozongenerator einschl. Dosiervorrichtung und Sauerstofftank
- Neubau eines Filtrationsgebäudes mit 2 Filterkammern (Variante 4a) oder Neubau eines Schönungsteiches (Variante 4b)
- Neubau eines Pumpwerks mit erdverlegten Zulaufleitungen bis zur 4. Reinigungsstufe sowie Anschluss der neuen Reinigungsstufe an die vorhandene Ablaufleitung
- Neubau einer Rohrleitung für die Rückführung des Rückspülwassers aus den Filtern (Variante 4a)
- 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 in der Gesamtkalkulation mit berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Projektkostenbarwertes (PKBW) und der Jahreskosten wurden ein Zinssatz von 3,0 % und eine Kostensteigerung für Schlamm Entsorgung und Material von 2,0 % angesetzt. Die Kostensteigerungen für die Energiekosten werden mit 4,0 %, für Betriebsmittel mit 3,0 % und für Personal mit 2,5 %. Aufgrund der neuen Techniken, den relativ geringen Betriebserfahrungen für großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination aus dem Abwasser und der derzeit noch nicht endgültig geklärten 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 ein Strompreis von 0,21 €/kWh angesetzt.

In Tabelle 11 sind der Projektkostenbarwert und die dazugehörigen Jahreskosten für eine Ozondosierung und Nachbehandlung mit kontinuierlich beschickter Sandfiltration (Variante 4a) dargestellt.

Tabelle 11: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 4a: Ozonung mit anschließender kontinuierlich beschickter Sandfiltration

	Variante 4a	
	Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	
Herstellkosten	1.900.000	€ brutto
Energiekosten	20.500	€/a
Barwert Energiekosten	333.000	€ brutto
Betriebsmittel	15.300	€/a
Barwert Betriebsmittel	229.000	€ brutto
Spurenstoffanalytik	31.800	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	442.000	€ brutto
Wartungskosten	35.600	€/a
Barwert Wartungskosten	494.000	€ brutto
Personalkosten	65.000	€/a
Barwert Personalkosten	907.000	€ brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	0	€ brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-15.200	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-207.000	€ brutto
PKBW Kosten	4.098.000	€ brutto
mittlere Jahreskosten	343.300	€/a
spezifische Kosten		
je m ³ behandeltes Abwasser	0,31	€/m ³
je Einwohner und Jahr	28,61	€/(EW·a)

Für einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 4a rd. 6,914 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 353.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 1,1 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 12.000 EW zu 0,32 €/m³ oder 29,39 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 15 Betriebsjahren sind in diesen Kosten enthalten.

In Tabelle 12 sind der Projektkostenbarwert und die dazugehörigen Jahreskosten für eine Ozondosierung und Nachbehandlung im Schönungsteich (Variante 4b) dargestellt.

Tabelle 12: Zusammenstellung des Projektkostenbarwerts für Variante 4b: Ozondosierung und Nachbehandlung im Schönungsteich

	Variante 4b	
	Ozonung mit Schönungsteich	
Herstellkosten	1.860.000	€ brutto
Energiekosten	16.800	€/a
Barwert Energiekosten	272.000	€ brutto
Betriebsmittel	15.000	€/a
Barwert Betriebsmittel	225.000	€ brutto
Spurenstoffanalytik	31.800	€/a
Barwert Spurenstoffanalytik	442.000	€ brutto
Wartungskosten	29.900	€/a
Barwert Wartungskosten	415.000	€ brutto
Personalkosten	46.000	€/a
Barwert Personalkosten	642.000	€ brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	0	€/a
Barwert Schlamm Entsorgung	0	€ brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-12.100	€/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-165.000	€ brutto
PKBW Kosten	3.691.000	€ brutto
mittlere Jahreskosten	309.200	€/a
spezifische Kosten		
je m ³ behandeltes Abwasser	0,28	€/m ³
je Einwohner und Jahr	25,77	€/(EW·a)

Der Projektkostenbarwert für Variante 4b über 15 Jahre und die dazugehörigen Jahreskosten sowie die spezifischen Kosten sind in Tabelle 12 dargestellt. Für

einen Zeitraum von 30 Jahren beträgt der PKBW für Variante 4b rd. 5,835 Mio. € mit den entsprechenden Jahreskosten von rd. 298.000 €/a. Die spezifischen Kosten berechnen sich bei einer mittleren jährliche Abwassermenge von rd. 1,1 Mio. m³/a und einer mittleren Belastung von ca. 12.000 EW zu rd. 0,27 €/m³ oder 24,81 €/(EW·a). Erforderliche Reinvestitionen nach 15 Betriebsjahren 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 Lippetal 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 RiS-KWa-Leitfadens „Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser“ getroffen. [33] Die vom RiSKWa-Leitfaden vorgeschlagene Liste von Kriterien wurde angepasst. 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: 30 %
3. Bewertungskriterien zur Ökologie: 20 %

Tabelle 13 zeigt die gewählten Bewertungskriterien und ihre detaillierte Gewichtung.

Tabelle 13: Liste der gewählten Bewertungskriterien und Gewichtungen

Bewertungsmatrix	Gewichtung
1. Ökonomie	50,00%
Projektkostenbarwert	35,00%
Investitionskosten	10,00%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%
Arbeitssicherheit	10,00%
3. Ökologie	20,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%
CO ₂ -Belastung	5,00%
Reststoffanfall	5,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%

Eine Reihe der gewählten Kriterien kann durch errechnete Zahlenwerte (z.B. Kosten, Energieverbräuche, Betriebsmittelverbräuche) ausgedrückt und entsprechend bewertet werden. Die Variante, die das Kriterium dabei am besten erfüllt, erhält die gesamte dem Kriterium zugeschriebene prozentuale Gewichtung. Die Varianten, deren Kriterienerfüllung die der Besten Variante um 200% über- bzw. unterschreitet erhält 0 %. Die übrigen Varianten erhalten linear interpolierte Anteile an der prozentualen Gewichtung des Kriteriums. Für die Kriterien, die nicht in Zahlenwerten ausgedrückt werden können, wird manuell 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 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Der Wirtschaftlichkeitsvergleich erfolgt auf Grundlage der in den vorherigen Kapiteln ermittelten Investitions-, Reinvestitions- und Betriebskosten. Da die tatsächlichen Kosten für eine Spurenstoffelimination im wesentlichen Maße vom Bedarf an Aktivkohle bzw. Ozon abhängig sind, wird an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass der Verbrauch dieser Betriebsmittel derzeit für die Kläranlage Lippetal nur anhand von Literaturangaben und Erfahrungswerten abgeschätzt werden kann. Versuche zum Betriebsmittelverbrauch mit dem biologisch vorgereinigten

Abwasser der Kläranlage Lippetal wurden bislang weder im Labormaßstab noch im großtechnischen Maßstab durchgeführt. Aufgrund der vergleichsweise gut funktionierenden biologischen Stufe werden niedrige Betriebsmittelverbräuche angesetzt. Nachfolgend werden die gewählten Betriebsmittelverbräuche dargestellt:

Tabelle 14: gewählter Betriebsmittelverbrauch Varianten 1 - 4

		Betriebsmittel- verbrauch gemäß Literatur	Betriebsmittel- verbrauch gewählt	Begründung
V1a	PAK	10 - 20 mg/l	20 mg/l	höhere Hintergrundbelastung in den Belebungsbecken, daher erhöhter Betriebsmittel Einsatz
V1b	PAK	10 - 20 mg/l	20 mg/l	höhere Hintergrundbelastung in den Belebungsbecken, daher erhöhter Betriebsmittel Einsatz
V2a	PAK	10 - 20 mg/l	10 mg/l	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz
V2b	PAK	10 - 20 mg/l	10 mg/l	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz
V3	GAK	7.000 - 25.000 BV	14.000 BV	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz
V4a	Ozon	0,6 - 0,8 mgO ₃ /mgDOC	0,6 mgO₃/mgDOC	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz
V4b	Ozon	0,6 - 0,8 mgO ₃ /mgDOC	0,6 mgO₃/mgDOC	passable Nachklärung, daher niedriger Betriebsmitteleinsatz

Wegen der möglichen Abweichungen im Betriebsmittelverbrauch wird an dieser Stelle auch auf die nachfolgenden Sensitivitätsanalysen zum Betriebsmittelverbrauch (siehe Kapitel 5.4.1) verwiesen.

Vergleicht man die vorgestellten Verfahrensvarianten mit den gewählten Ansätzen zum Betriebsmittelverbrauch vor einem rein monetären Hintergrund (Projektkostenbarwert bzw. Jahreskosten), ergibt sich das in Tabelle 15 dargestellte Bild.

Tabelle 15: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal über 15 Jahre

	Variante 1a PAK-BB mit FuzzyFilter	Variante 1b PAK-BB mit Tuchfiltration	Variante 2a PAK-KB mit FuzzyFilter	Variante 2b PAK-KB mit Tuchfiltration	Variante 3 kontinuierlich beschickter GAK-Filter	Variante 4a Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	Variante 4b Ozonung mit Schönungsteich
Herstellkosten	1.500.000	1.150.000	1.350.000	1.250.000	990.000	1.900.000	1.860.000 € brutto
Energiekosten	6.800	1.300	11.000	4.900	4.300	20.500	16.800 €/a
Barwert Energiekosten	110.000	21.000	178.000	79.000	70.000	333.000	272.000 € brutto
Betriebsmittel	37.000	37.000	16.900	16.900	31.900	15.300	15.000 €/a
Barwert Betriebsmittel	555.000	555.000	253.000	253.000	478.000	229.000	225.000 € brutto
Spurenstoffanalytik	30.700	30.700	30.700	30.700	30.700	31.800	31.800 €/a
Barwert Spurenstoffanalytik	426.000	426.000	426.000	426.000	426.000	442.000	442.000 € brutto
Wartungskosten	29.600	22.700	23.400	23.100	17.400	35.600	29.900 €/a
Barwert Wartungskosten	411.000	315.000	325.000	321.000	242.000	494.000	415.000 € brutto
Personalkosten	52.000	52.000	65.000	65.000	33.000	65.000	46.000 €/a
Barwert Personalkosten	726.000	726.000	907.000	907.000	460.000	907.000	642.000 € brutto
Mehrkosten Schlammmentsorgung	106.300	106.300	106.300	106.300	0	0	0 €/a
Barwert Schlammmentsorgung	1.476.000	1.476.000	1.476.000	1.476.000	0	0	0 € brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-15.200	-15.200	-15.200	-15.200	-13.200	-15.200	-12.100 €/a
Barwert Einsparung Abwasserabgabe	-207.000	-207.000	-207.000	-207.000	-180.000	-207.000	-165.000 € brutto
PKBW Kosten	4.997.000	4.462.000	4.708.000	4.505.000	2.486.000	4.098.000	3.691.000 € brutto
mittlere Jahreskosten	418.600	373.800	394.400	377.400	208.200	343.300	309.200 €/a
Rang nach PKBW	7	4	6	5	1	3	2
spezifische Kosten							
je m ³ behandeltes Abwasser	0,38	0,34	0,36	0,34	0,19	0,31	0,28 €/m ³
je Einwohner und Jahr	34,88	31,15	32,87	31,45	17,35	28,61	25,77 €/(EW·a)

Variante 3: kontinuierlich beschickte GAK-Filtration liegt wirtschaftlich gesehen auf Rang 1 mit einem PKBW von rd. 2,5 Mio. € und entsprechenden Jahreskosten von rd. 208.000 €/a. Mit großem Abstand folgt Variante 4b: Ozonbehandlung mit Schönungsteich auf Rang 2 mit einem PKBW von rd. 3,7 Mio. € und den entsprechenden Jahreskosten von rd. 310.000 €/a.

In diesen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind aufgrund der neuen Verfahrenstechniken die Projektkostenbarwerte aller Varianten vollständig mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahren berechnet worden. Während die Nutzungsdauer für maschinen- und elektrotechnische Ausrüstung etwa 15 Jahre beträgt, kann für die bautechnischen Anlagenteile erfahrungsgemäß eine Nutzungsdauer von 30 Jahren angesetzt werden. Würde man den PKBW über 30 Jahre berechnen und die entsprechenden Reinvestitionskosten nach 15 Jahren für Maschinen- und E-MSR-Technik berücksichtigen, so würden sich an der Rangfolge der Varianten Änderungen ergeben. Es ist zu beobachten, dass die Betriebskosten in einer Betrachtung über 30 Jahre ein größeres Gewicht an dem PKBW erhalten. So sind Varianten mit geringeren Betriebskosten über lange Sicht wirtschaftlicher. Weiterhin ist Variante 3 (GAK) auf Rang 1, sowie Variante 4b (Ozon + Teich) auf Rang 2 anzusiedeln. Variante 2b (PAK in KB + Tuchfilter) würde von Rang 4 auf Rang 5 absteigen, Variante 4a (Ozon + Sandfilter) würde auf Rang 3 bleiben. Die Varianten 1a (PAK in BB mit FuzzyFilter) und 2a (PAK in KB mit FuzzyFilter) würden aufgrund hoher Energiekosten weiterhin die letzten Ränge 6 und 7 belegen. Variante 1b (PAK in BB mit Tuchfilter) befindet sich aufgrund hoher Betriebsmittelkosten auf Rang 4. (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal über 30 Jahre

	Variante 1a PAK-BB mit FuzzyFilter	Variante 1b PAK-BB mit Tuchfiltration	Variante 2a PAK-KB mit FuzzyFilter	Variante 2b PAK-KB mit Tuchfiltration	Variante 3 kontinuierlich beschickter GAK-Filter	Variante 4a Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	Variante 4b Ozonung mit Schönungsteich
Herstellkosten	1.500.000	1.150.000	1.350.000	1.250.000	990.000	1.900.000	1.860.000
Reinvestitionen (IKR) nach 15 Jahren							
nach n Jahren	730.000	560.000	520.000	540.000	390.000	840.000	630.000
Barwert Reinvestitionen	15	15	15	15	15	15	15
Barwert Reinvestitionen	630.000	484.000	449.000	467.000	337.000	726.000	544.000
Energiekosten							
Barwert Energiekosten	6.800	1.300	11.000	4.900	4.300	20.500	16.800
Barwert Energiekosten	238.000	45.000	385.000	171.000	150.000	717.000	587.000
Betriebsmittel							
Barwert Betriebsmittel	37.000	37.000	16.900	16.900	31.900	15.300	15.000
Barwert Betriebsmittel	1.108.000	1.108.000	506.000	506.000	956.000	458.000	449.000
Spurenstoffanalytik							
Barwert Spurenstoffanalytik	30.700	30.700	30.700	30.700	30.700	31.800	31.800
Barwert Spurenstoffanalytik	795.000	795.000	795.000	795.000	795.000	823.000	823.000
Wartungskosten							
Barwert Wartungskosten	29.600	22.700	23.400	23.100	17.400	35.600	29.900
Barwert Wartungskosten	766.000	588.000	606.000	598.000	450.000	921.000	774.000
Personalkosten							
Diskontinierungsfaktor (DFAKRP)	52.000	52.000	65.000	65.000	33.000	65.000	46.000
Barwert Personalkosten	25.8818	25.8818	25.8818	25.8818	25.8818	25.8818	25.8818
Barwert Personalkosten	1.346.000	1.346.000	1.682.000	1.682.000	854.000	1.682.000	1.191.000
Mehrkosten Schlammabgabe							
Barwert Schlammabgabe	106.300	106.300	106.300	106.300	0	0	0
Barwert Schlammabgabe	2.751.000	2.751.000	2.751.000	2.751.000	0	0	0
Einsparung Abwasserabgabe							
Barwert Abwasserabgabe	-15.200	-15.200	-15.200	-15.200	-13.200	-12.100	-15.200
Barwert Abwasserabgabe	-393.000	-393.000	-393.000	-393.000	-342.000	-313.000	-393.000
PKBW Kosten							
Barwert PKBW Kosten	8.741.000	7.874.000	8.131.000	7.827.000	4.190.000	6.914.000	5.835.000
Barwert PKBW Kosten	446.000	401.700	414.800	399.300	213.800	352.700	297.700
Rang nach PKBW	7	5	6	4	1	3	2
spezifische Kosten							
je m ³ behandeltes Abwasser	0,40	0,36	0,37	0,36	0,19	0,32	0,27
je Einwohner und Jahr	37,17	33,48	34,57	33,28	17,82	29,39	24,81

5.3 Förderprogramm Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II

Die NRW-Bank gewährt derzeit im Zuge des Förderprogramms „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II (ResA II)“ Zuwendungen für die Umsetzung

von fortschrittlichen Reinigungsverfahren. Dabei werden Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination durch Ozon- oder Aktivkohleanlagen, UV-Verfahren oder anderer fortschrittlicher Technologien mit vergleichbarer Reinigungsleistung mit einer Zuwendung in Höhe von 70% der Herstellkosten in den Antragsjahren 2017, 2018 und 2019 bezuschusst. Ab dem Antragsjahr 2020 ist eine Förderung in Höhe von 50% der Herstellkosten möglich. Förderfähig sind dabei die Anlagen selbst, einschließlich der dazugehörigen betrieblichen Einrichtungen und notwendige Ausgaben für die Ausrüstung und den Einbau der mit der Technologie verbundenen Ausrüstungsgegenstände und Investitionen. [34] Daher wäre eine optionale Optimierung der Einlaufbauwerke der Nachklärbecken ebenso förderfähig. Die Kosten hierfür würden sich auf etwa 130.000 € brutto einschl. Baunebenkosten belaufen, wovon ein Anteil von rd. 90.000 € durch die Förderung übernommen werden könnten. Mit der Optimierung der Einlaufbauwerke könnte der Betriebsmittelverbrauch der Varianten um rd. 5-10 % verringert werden, was die Betriebskosten der einzelnen Varianten verringern würde.

Erweitert man den Wirtschaftlichkeitsvergleich über 15 Jahre um die Förderung durch das „ResA II Förderpaket“, ergibt sich das in Tabelle 17 dargestellte Bild.

Variante 3: kontinuierlich beschickte GAK-Filtration liegt wirtschaftlich gesehen weiterhin auf Rang 1 mit einem PKBW von rd. 1,8 Mio. € und entsprechenden Jahreskosten von rd. 150.000 €/a. Mit großem Abstand folgt Variante 4b: Ozonbehandlung mit Schönungsteich auf Rang 2 mit einem PKBW von rd. 2,4 Mio. € und den entsprechenden Jahreskosten von rd. 203.000 €/a.

Würde man den PKBW über 30 Jahre berechnen und die entsprechende Förderung mitbetrachten, so würden sich an der Rangfolge der Varianten keine Änderungen ergeben. Variante 3: kontinuierlich beschickte GAK-Filtration liegt weiterhin auf Rang 1 mit einem PKBW von rd. 3,5 Mio. € und entsprechenden Jahreskosten von rd. 178.000 €/a. Variante 4b: Ozonbehandlung mit Schönungsteich folgt auf Rang 2 mit einem PKBW von rd. 4,6 Mio. € und den entsprechenden Jahreskosten von rd. 233.000 €/a.

Tabelle 17: Kostenvergleich der Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal über 15 Jahre unter Berücksichtigung der Förderung durch das „ResA II Förderpaket“ der NRW-Bank

	Variante 1a PAK-BB mit FuzzyFilter	Variante 1b PAK-BB mit Tuchfiltration	Variante 2a PAK-KB mit FuzzyFilter	Variante 2b PAK-KB mit Tuchfiltration	Variante 3 kontinuierlich beschickter GAK- Filter	Variante 4a Ozonung mit kont. besch. Sandfilter	Variante 4b Ozonung mit Schönungsteich
Herstellkosten	1.500.000	1.150.000	1.350.000	1.250.000	990.000	1.900.000	1.860.000 € brutto
Förderung RESA II bis Ende 2018	-1.050.000	-805.000	-945.000	-875.000	-693.000	-1.330.000	-1.267.142 € brutto
Energiekosten	6.800	1.300	11.000	4.900	4.300	20.500	16.800 €/a
Bauwert Energiekosten	110.000	21.000	178.000	79.000	70.000	333.000	272.000 € brutto
Betriebsmittel	37.000	37.000	16.900	16.900	31.900	15.300	15.000 €/a
Bauwert Betriebsmittel	555.000	555.000	253.000	253.000	478.000	229.000	225.000 € brutto
Spurenstoffanalytik	30.700	30.700	30.700	30.700	30.700	31.800	31.800 €/a
Bauwert Spurenstoffanalytik	426.000	426.000	426.000	426.000	426.000	442.000	442.000 € brutto
Wartungskosten	29.600	22.700	23.400	23.100	17.400	35.600	29.900 €/a
Bauwert Wartungskosten	411.000	315.000	325.000	321.000	242.000	494.000	415.000 € brutto
Personalkosten	52.000	52.000	65.000	65.000	33.000	65.000	46.000 €/a
Bauwert Personalkosten	726.000	726.000	907.000	907.000	460.000	907.000	642.000 € brutto
Mehrkosten Schlamm Entsorgung	106.300	106.300	106.300	106.300	0	0	0 €/a
Bauwert Personalkosten	1.476.000	1.476.000	1.476.000	1.476.000	0	0	0 € brutto
Einsparung Abwasserabgabe	-15.200	-15.200	-15.200	-15.200	-13.200	-15.200	-12.100 €/a
Bauwert Einsparung Abwasserabgabe	-207.000	-207.000	-207.000	-207.000	-180.000	-207.000	-165.000 € brutto
PKBW Kosten	3.947.000	3.657.000	3.763.000	3.630.000	1.793.000	2.768.000	2.423.858 € brutto
mittlere Jahreskosten	330.600	306.300	315.200	304.100	150.200	231.900	203.000 €/a
Rang nach PKBW	7	5	6	4	1	3	2
spezifische Kosten							
je m³ behandeltes Abwasser	0,30	0,28	0,28	0,27	0,14	0,21	0,18 €/m³
je Einwohner und Jahr	27,55	25,53	26,27	25,34	12,52	19,33	16,92 €/(EW·a)

5.4 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.

5.4.1 Betriebsmittelverbrauch

Für den Betriebsmittelverbrauch wurden entsprechend der Fachliteratur Annahmen getroffen. Es wurde in der Sensitivitätsanalyse eine PAK-Dosis zwischen 15 g/m^3 und 25 g/m^3 für Variante 1 und eine PAK-Dosis von 10 g/m^3 bis 20 g/m^3 für Variante 2 betrachtet. Die Bemessung der Verfahrensvarianten erfolgte mit 20 gPAK/m^3 für Varianten 1a und 1b sowie mit 10 gPAK/m^3 für Varianten 2a und 2b. Für die GAK-Filtration (Variante 3) wurden 14.000 BV für die Bemessung angenommen. Die Sensitivitätsanalyse erfolgte für 7.000 BV bis 25.000 BV . Der Ozonverbrauch wurde für die Sensitivitätsanalyse zwischen $4,1 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ und $9,3 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ (entsprechend 18 bis 43 mgCSB/l im Zulauf zum Ozonreaktor) variiert. Die Bemessung erfolgte für Varianten 4a und 4b mit $8,0 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ entsprechend $36,5 \text{ mgCSB/l}$.

Bezüglich des Betriebsmitteleinsatzes zeigt sich, dass die Ozon-Varianten (Varianten 4a und 4b) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagieren (siehe Abbildung 28). Die Differenz der Jahreskosten für die Ozon-Varianten 4a und 4b beträgt rd. 92.000 €/a (etwa von -11% bis $+19 \%$ der angesetzten Kosten). Für Variante 3 (GAK-Filtration) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 57.300 €/a (etwa von -9% bis $+20 \%$ der angesetzten Kosten). Für die PAK-Varianten 1a und 1b beträgt die Kostendifferenz rd. 23.000 €/a (etwa von -3% bis $+3 \%$ für V1a und V1b) und für die PAK-Varianten 2a und 2b können die Kosten über 21.000 €/a variieren (etwa von 0% bis $+5 \%$ der angesetzten Kosten).

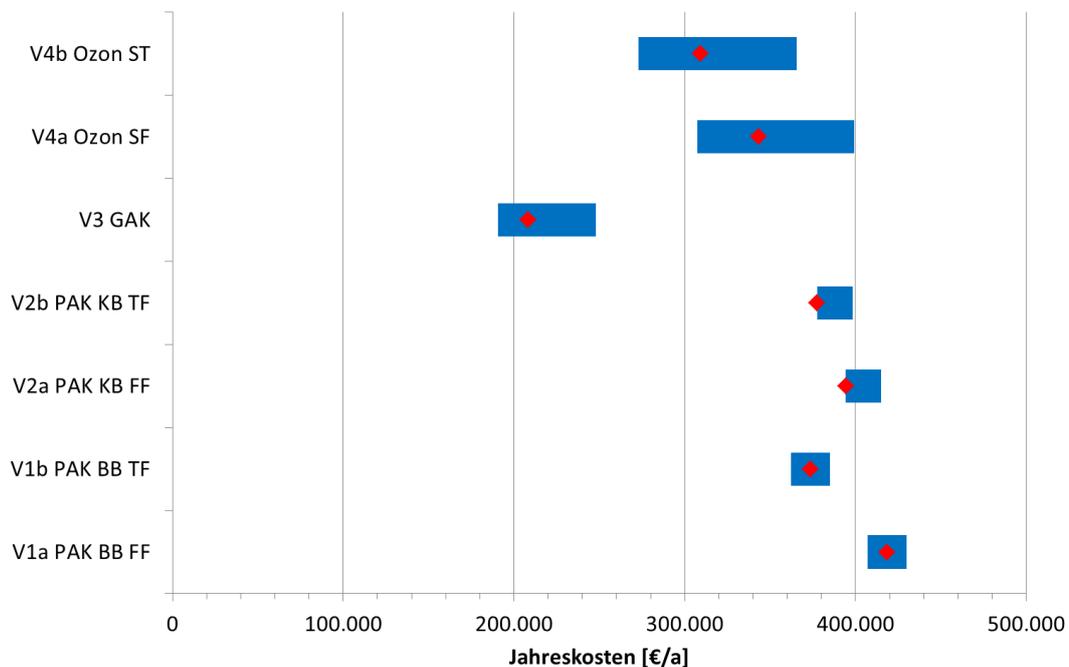


Abbildung 28: Sensitivität Betriebsmittelverbrauch Kläranlage Lippetal (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

5.4.2 Betriebsmittelpreise

Die Preise für die Betriebsmittel entstammen für PAK und GAK ebenfalls der Fachliteratur. Der angesetzte LOX-Preis entspricht einer Herstellerangabe von Dezember 2016. Für den Bezug von PAK wurde ein Preis von 1,50 €/kg_{PAK} angesetzt. Für GAK wurden 1,10 €/kg_{GAK} zugrunde gelegt und flüssiger Sauerstoff wurde mit 0,20 €/l_{LOX} 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 zeigt sich, dass die PAK-Varianten (Variante 1a und 1b) am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen reagiert (siehe Abbildung 29). Die Jahreskosten für die GAK-Filtration können je nach Betriebsmittelpreis über 6.500 €/a variieren (etwa von ±1,6 % der angesetzten Kosten). Für Variante 4a (Ozon und Sandfilter) und 4b (Ozon und Teich) belaufen sich die Änderungen der Jahreskosten auf bis zu 3.800 €/a (etwa von ± 0,5% der angesetzten Kosten). Für die PAK-Varianten 1a und 1b beträgt die Kostendifferenz rd. 9.100 €/a (etwa von ± 1,1 %) und für die

PAK-Varianten 2a und 2b rd. 4.200 €/a (etwa von $\pm 0,5$ % der angesetzten Kosten).

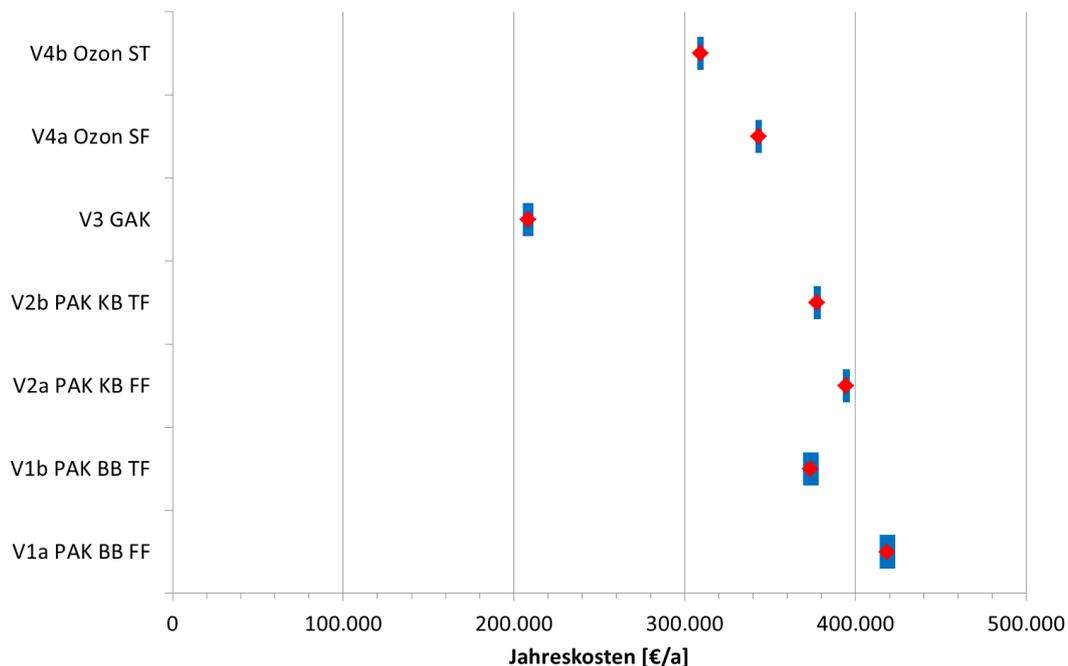


Abbildung 29: Sensitivität Betriebsmittelpreise Kläranlage Lippetal (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

5.4.3 Strompreis

Der für die Berechnung gewählte Strompreis liegt bei 0,21 €/kWh. Auf Änderungen des Strompreises um ± 10 % reagieren erwartungsgemäß die Ozonvarianten (Variante 4a, 4b) sensibler, als die Aktivkohle-Varianten (Varianten 1a, 1b, 2a, 2b, 3). Die Jahreskosten für die Variante 1a verändern sich um rd. 1.800 €/a (etwa $\pm 0,2$ %), für Variante 1b um rd. 400 €/a (etwa $\pm 0,05$ %). Die Ozon-Varianten 4a und 4b dagegen benötigen relativ viel Energie für die Ozongeneration und die entsprechende Sicherheitstechnik. Eine Strompreisänderung bewirkt hier eine Kostenänderung von rd. 5.700 €/a (etwa $\pm 0,8$ %) bei Variante 4a und rd. 4.500 €/a (etwa $\pm 0,7$ %) bei Variante 4b. Bei Variante 3 ändern sich die Energiekosten durch eine Strompreisänderung um rd. 1.000 €/a (etwa $\pm 0,24$ % der jeweils angesetzten Kosten). Die PAK-Varianten 2 unterliegen einer Änderung des Jahreskosten von rd. 3.000 €/a (etwa $\pm 0,35$ %) für Variante 2a und rd. 1.400 €/a (etwa $\pm 0,2$ %) bei Variante 2b. Die Sensitivitäten der Varianten gegenüber der Strompreisänderung sind in Abbildung 30 dargestellt.

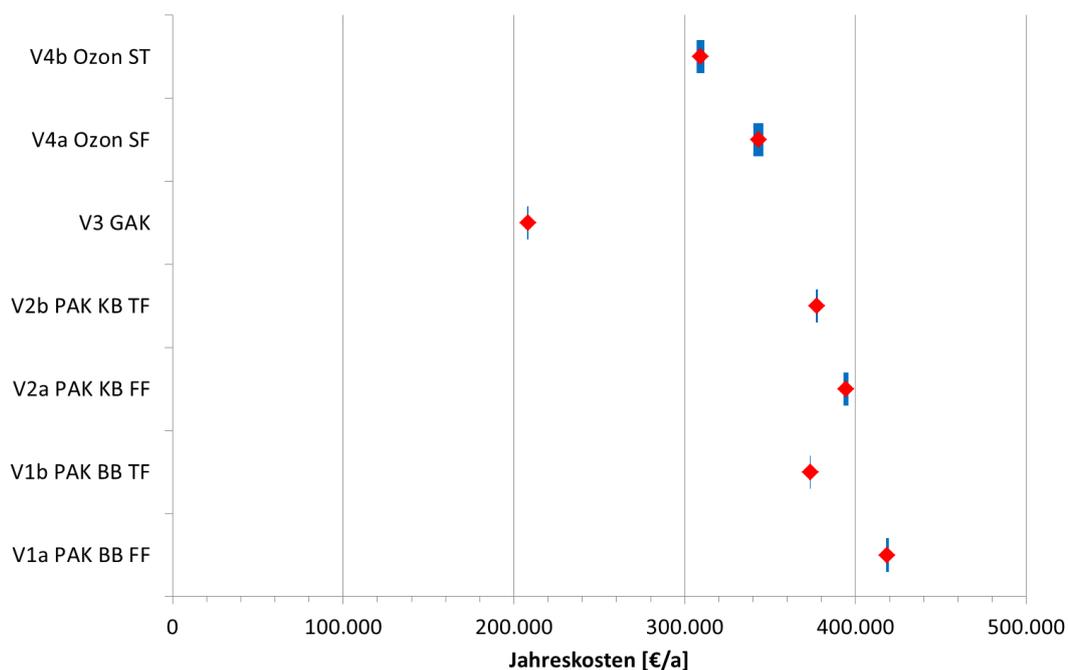


Abbildung 30: Sensitivität Strompreis \pm 10 % Kläranlage Lippetal (Jahreskostenbereich der jeweiligen Variante als blauer Balken, die Auslegung als rote Raute)

5.4.4 Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen

In Tabelle 18 werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zusammengefasst. Ähnlich wie in der Bewertungsmatrix beim Variantenvergleich wird ein Punktesystem zur Bewertung genutzt. Ein Punkt steht für keine Sensitivität und fünf Punkte stehen für eine sehr starke Sensitivität. Die Gewichtungen für die drei unterschiedlichen Sensitivitätsanalysen sind angegeben. Die gewichtete Bewertung zeigt auf, dass Varianten 3 (GAK) und 1b (PAK in BB mit FuzzyFilter) insgesamt am sensibelsten auf Abweichungen von den getroffenen Annahmen und errechneten Werten reagieren. Alle anderen Varianten reagieren geringfügig weniger empfindlich auf Abweichungen. Die geringste Sensitivität zeigen die PAK-Varianten 2a und 2b mit einer Bewertung von 3,05 auf.

Trotz einer hohen Sensitivität der Variante 3 liegt diese jedoch auch im ungünstigsten Fall monetär noch vor den anderen Varianten.

Tabelle 18: Zusammenfassung Sensitivitätsanalysen

	Betriebsmittel-einsatz		Betriebsmittel-kosten		Strompreis		Bewertung
Gewichtung	60,00%		25,00%		15,00%		
Variante 1a- PAK-BB mit FuzzyFilter	stark sensibel	4	mäßig sensibel	3	nicht sensibel	1	3,30
Variante 1b- PAK-BB mit Tuchfiltration	sehr stark sensibel	5	mäßig sensibel	3	nicht sensibel	1	3,90
Variante 2a- PAK-KB mit FuzzyFilter	stark sensibel	4	wenig sensibel	2	nicht sensibel	1	3,05
Variante 2b- PAK-KB mit Tuchfiltration	stark sensibel	4	wenig sensibel	2	nicht sensibel	1	3,05
Variante 3- kontinuierlich beschickter GAK-Filter	sehr stark sensibel	5	mäßig sensibel	3	nicht sensibel	1	3,90
Variante 4a- Ozonung mit kont.besch. Sandfilter	sehr stark sensibel	5	wenig sensibel	2	wenig sensibel	2	3,80
Variante 4b- Ozonung mit Schönungsteich	sehr stark sensibel	5	wenig sensibel	2	wenig sensibel	2	3,80

5.5 Vergleich der Verfahrensvarianten

Werden die monetären und nicht-monetäre Kriterien wie z.B. Ökologie, Ressourcenverbrauch, Kostenrisiken, Arbeitsaufwand und Arbeitssicherheit in den Variantenvergleich mit einbezogen, so ergibt sich das in Tabelle 19 zusammengefasste Ergebnis. Die detaillierte Bewertungsmatrix ist in Anhang 1 beigelegt.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3	Variante 4a	Variante 4b
1. Ökonomie	50,00%	4,80%	15,58%	10,12%	13,97%	46,40%	13,10%	19,23%
Projektkostenbarwert	35,00%	0,00%	7,18%	3,72%	6,57%	35,00%	12,30%	18,03%
Herstellkosten	10,00%	4,80%	8,40%	6,40%	7,40%	10,00%	0,80%	1,20%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,40%	0,00%	0,00%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%	6,00%	25,40%	12,10%	24,90%	25,20%	15,30%	22,00%
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	0,00%	19,40%	6,10%	18,90%	17,20%	13,30%	20,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	6,00%	6,00%	6,00%	6,00%	8,00%	2,00%	2,00%
3. Ökologie	20,00%	11,00%	11,00%	14,50%	15,40%	16,10%	18,00%	18,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%
CO2-Belastung	5,00%	0,00%	0,00%	3,50%	4,40%	3,60%	5,00%	5,00%
Reststoffanfall	5,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	3,50%	4,00%	4,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%	21,80%	51,98%	36,72%	54,27%	87,70%	46,40%	59,23%
Rangfolge		7	4	6	3	1	5	2

Die Bewertung der unterschiedlichen Kriterien über Gewichtungen führt dazu, dass die Variante 3 (GAK) mit rd. 28 %-Punkten Vorsprung auf Rang 1 steht. Rang 2 erhält Variante 4b: Ozonung mit Schönungsteich mit rd. 4 %-Punkten Abstand zu Rang 3 (Variante 2b: PAK in KB mit Tuchfilter). Durch die unterschied-

lichen Vor- und Nachteile von Aktivkohle und Ozon erzielt keine der sieben Varianten eine vollständige Kriterienerfüllung (maximal 87,70 % für Variante 3).

Würde man die Förderung durch das „ResA II Förderpaket“ in der Bewertungsmatrix mitbetrachten, würden sich geringfügige Änderungen ergeben. Variante 3 (GAK) würde weiterhin mit einer Kriterienerfüllung von 87,70 % auf Rang 1 liegen, während Variante 4b (Ozonung mit Schönungsteich) mit rd. 63,90 % auf Rang 2 abschließen würde. Die Bewertungsmatrix unter Berücksichtigung der Förderung ist in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal unter Berücksichtigung der Förderung durch das „ResA II Förderpaket“

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3	Variante 4a	Variante 4b
1. Ökonomie	50,00%	4,80%	8,40%	6,40%	7,40%	46,40%	16,77%	23,89%
Projektkostenbarwert	35,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	35,00%	15,97%	22,69%
Herstellkosten	10,00%	4,80%	8,40%	6,40%	7,40%	10,00%	0,80%	1,20%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,40%	0,00%	0,00%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%	6,00%	25,40%	12,10%	24,90%	25,20%	15,30%	22,00%
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	0,00%	19,40%	6,10%	18,90%	17,20%	13,30%	20,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	6,00%	6,00%	6,00%	6,00%	8,00%	2,00%	2,00%
3. Ökologie	20,00%	11,00%	11,00%	14,50%	15,40%	16,10%	18,00%	18,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%
CO2-Belastung	5,00%	0,00%	0,00%	3,50%	4,40%	3,60%	5,00%	5,00%
Reststoffanfall	5,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	3,50%	4,00%	4,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%	21,80%	44,80%	33,00%	47,70%	87,70%	50,07%	63,89%
Rangfolge	0,00%	7	5	6	4	1	3	2

6. Zusammenfassung

Die Gemeinde Lippetal betreibt die Kläranlage Lippetal mit einer Ausbaugröße von 15.000 EW als zentrale Hauptkläranlage der Gemeinde Lippetal. Das mechanisch-biologisch gereinigte Abwasser wird in den Vorfluter, die Lippe, eingeleitet.

Die PFI Planungsgemeinschaft wurde mit der Erstellung einer Studie zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal beauftragt. Dabei wurden die vorhandenen Daten zur IST-Situation der Kläranlage und des Vorfluters Lippe ausgewertet, neue Daten zur Spurenstoffbelastung des Kläranlagenablaufes und des Vorfluters durch entsprechende Analysen erhoben und ebenfalls ausgewertet, sowie sieben Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination für die Kläranlage Lippetal entwickelt, bewertet und miteinander verglichen.

Der Anteil des Kläranlagenablaufes am Gesamtablauf der Lippe bei mittlerem Niedrigwasserabfluss liegt bei rd. 0,74 %. Die gesamte Belastung der Lippe durch Abwasser kann im Rahmen der Studie jedoch weder bestimmt noch abgeschätzt werden. Die Auswertung der Spurenstoffanalysen ergab, dass die aus der Kläranlage Lippetal abfließenden Spurenstoffkonzentrationen teilweise den allgemeinen Vorsorgewert von 0,1 µg/l überschreiten. Weiterhin zeigt die Auswertung der Spurenstoffanalysen, dass der Vorfluter oberhalb der Kläranlageneinleitung bereits durch Spurenstoffe belastet ist. Diese Belastung wird durch die Kläranlage Lippetal für insgesamt zwei der betrachteten Spurenstoffe messbar erhöht. Für insgesamt neun der untersuchten Spurenstoffe nimmt die Konzentration ab. Dies ist vermutlich auf Messungenauigkeiten und/oder weitere Zuflüssen zwischen der Kläranlageneinleitung und der Messstelle zurückzuführen. Insgesamt betrachtet ist der Einfluss der Einleitung durch die Kläranlage Lippetal auf die Spurenstoffkonzentration in der Lippe als vergleichsweise gering einzuordnen.

Aus den durchgeführten Untersuchungen lässt sich eine Vorzugslösung für eine entsprechende Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal ableiten. Bei rein monetärer Betrachtung stellt die Variante 3 (kontinuierlich beschickte GAK-Filtration) mit einem Projektkostenbarwert über 15 Jahre von rd. 2,5 Mio. € die kostengünstigste Lösung dar. Die Investitionssumme für diese Variante beläuft sich auf rd. 990.000 €, die spezifischen Jahreskosten betragen rd. 17,53 €/(EW*a) bzw. 0,19 € je m³ behandeltes Abwasser. Werden auch nicht-monetäre Aspekte der Ökologie, des Ressourcenverbrauchs, des Arbeitsaufwandes oder der Arbeitssicherheit mit einbezogen, steht Variante 3 (kontinuierlich beschickte GAK-

Filtration) weiterhin mit rd. 87,70 % Kriterienerfüllung an erster Stelle, gefolgt von Variante 4b (Ozonung mit Schönungsteich) mit rd. 59,23 % (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Zusammenfassung der Bewertungsmatrix für die Verfahrensvarianten zur Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Lippetal

Bewertungsmatrix	Gewichtung	Variante 1a	Variante 1b	Variante 2a	Variante 2b	Variante 3	Variante 4a	Variante 4b
1. Ökonomie	50,00%	4,80%	15,58%	10,12%	13,97%	46,40%	13,10%	19,23%
Projektkostenbarwert	35,00%	0,00%	7,18%	3,72%	6,57%	35,00%	12,30%	18,03%
Herstellkosten	10,00%	4,80%	8,40%	6,40%	7,40%	10,00%	0,80%	1,20%
Kostensicherheit / Sensitivitäten	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,40%	0,00%	0,00%
2. Betriebliche Aspekte	30,00%	6,00%	25,40%	12,10%	24,90%	25,20%	15,30%	22,00%
Betriebs- und Wartungsaufwand	20,00%	0,00%	19,40%	6,10%	18,90%	17,20%	13,30%	20,00%
Arbeitssicherheit	10,00%	6,00%	6,00%	6,00%	6,00%	8,00%	2,00%	2,00%
3. Ökologie	20,00%	11,00%	11,00%	14,50%	15,40%	16,10%	18,00%	18,00%
Elimination von Verunreinigungen	10,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%
CO ₂ -Belastung	5,00%	0,00%	0,00%	3,50%	4,40%	3,60%	5,00%	5,00%
Reststoffanfall	5,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	3,50%	4,00%	4,00%
Summe gewichteter Anteile	100,00%	21,80%	51,98%	36,72%	54,27%	87,70%	46,40%	59,23%
Rangfolge		7	4	6	3	1	5	2

Berücksichtigt man die Förderung durch das „ResA II Förderpaket“ von 70% der Herstellkosten, würde sich die Variante 3 (kontinuierlich beschickte GAK-Filtration) mit auf einen Projektkostenbarwert über 15 Jahre von rd. 1,8 Mio. € um rd. 0,7 Mio. € reduzieren. Die spezifischen Jahreskosten würden sich auf rd. 12,52 €/(EW*a) bzw. 0,14 € je m³ behandeltes Abwasser belaufen.

Abschließend danken wir dem Betriebspersonal der Kläranlage Lippetal und der Gemeinde Lippetal für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Aufgestellt:

Bochum im November 2017

Dr.-Ing. Reiner Boll

7. Literatur

- [1] Mertsch, V. (2014): Mikroschadstoffe aus kommunalem Abwasser - Konzeption Nordrhein-Westfalen
- [2] Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser - Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen
- [3] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (2016): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination
- [4] Wunderlin, P. (2017): Konzepte zur Überwachung der Reinigungsleistung von weitergehenden Verfahren zur Spurenstoffelimination, eingesehen am 21.07.2017: www.micropoll.ch
- [5] Internetauftritt und Projektsteckbriefe des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg, eingesehen bzw. heruntergeladen am 17.02.2015, aktualisiert am 20.01.2017: 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, aktualisiert am 14.12.2016:
www.masterplan-wasser.nrw.de
- [9] Internetauftritt Abwasserverband Obere Lutter:
<http://www.mikroverunreinigungen.de/obere-lutter/>
- [10] Internetauftritt Abwasserverband Obere Lutter, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „CSB- und Spurenstoffadsorption im Aktivkohle Festbett – Teil 2“, heruntergeladen am 02.05.2016:

<https://www.mikroverunreinigungen.de/wp-content/uploads/2014/10/KurzB-2014-September-final.pdf>

- [11] Präsentation Firma Hydro-Ingenieure, heruntergeladen am 04.03.2015:
http://hydro-ingenieure.de/wp-content/uploads/2014/06/6_20140521_Groemping.pdf
- [12] Kurzbericht zum Forschungsvorhaben Technische Erprobung des Aktivkohleeinsatzes zur Elimination von Spurenstoffen in Verbindung mit vorhandenen Filteranlagen FilterAK vom Oktober 2015, eingesehen am 10.08.2016
- [13] Internetauftritt Firma Nordic Water GmbH, eingesehen am 04.03.2015:
<http://www.spurenstoffelimination.de/index.php/referenzen#klaerwerk-emmingen-liptingen-d>
- [14] MKULNV NRW (2012): Abschlussbericht des zum Forschungsvorhaben „Ertüchtigung Kommunaler Kläranlagen durch den Einsatz der Membrantechnik“ („MIKROMEM“)
- [15] Internetauftritt WAZ, abgerufen am 05.02.2015:
<http://www.derwesten.de/staedte/gelsenkirchen/klaeranlage-im-gelsenkirchener-marienhospital-fertiggestellt-id4915508.html>
- [16] Pinnekamp, J. et al. (2009): Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membrantechnik und weitergehende Behandlungsverfahren – Pilotprojekt Kreiskrankenhaus Waldbröhl
- [17] RiSKWa (2013): Leitfaden Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf
- [18] Pinnekamp, J. (2016): Stellungnahme zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in der Belebungsstufe
- [19] 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
- [20] Türk, J.; Nafu, I.; Lyko, S.; Wermter, P.; Palm, N.; Reinders, M.; ... Hassani, V. (20013): Volkswirtschaftlicher Nutzen der Ertüchtigung kommunaler Klär-

anlagen zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Arzneimitteln, Industriechemikalien, bakteriologisch relevanten Keimen und Viren (TP 9)

- [21] ATV-DVWK-A 198 (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen
- [22] 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?
- [23] PFI Planungsgemeinschaft GbR (2015): Studie zur Spurenstoffelimination auf dem Klärwerk Bielefeld-Brake
- [24] PFI Planungsgemeinschaft GbR (2015): Studie zur Spurenstoffelimination auf dem Kläranlage Schloß Holte-Stukenbrock
- [25] PFI Planungsgemeinschaft GmbH (2016): Studie zur Spurenstoffelimination auf dem Kläranlage Vlotho
- [26] Herbst, H.; Hilbig, R. (2012): Einbindung einer Anlage zur Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle in die Abwasserfiltration der Kläranlage Neuss Ost – Machbarkeitsstudie
- [27] 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)
- [28] Christ, O.; Mitsdoerffer, R. (2013): Weitergehende Reduzierung von Mikroverunreinigungen auf der Kläranlage Espelkamp – Studie
- [29] Neumann, K.-D.; Merkel, W.; Schmidt, T. C. (2011): Metabolitenbildung beim Einsatz von Ozon – Schlussbericht
- [30] Oberflächengewässerverordnung - OGewV (2011): Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer

- [31] Oekotoxzentrum (2013): Vorschläge für akute und chronische Qualitätskriterien für ausgewählte schweizrelevante Substanzen. Heruntergeladen von www.oekotoxzentrum.ch am 11.12.2014

- [32] ATV-DVWK-A 201 (2005): Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen

- [33] RiSKWa (2015): Leitfaden „Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser“

- [34] Bezirksregierung Düsseldorf (2017): Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen für eine „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II“ RESA (II). Heruntergeladen von <https://www.brd.nrw.de/umweltschutz/abwasser/pdf/RESA-II.pdf> am 29.09.2017