

Kurzbericht
zum Forschungsvorhaben
„Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen durch den Einsatz von
Verfahren mit UV-Behandlung“

„Mikrolight“
Phase 2 Ergänzung

Vergabenummer: 08/0581

Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen:
Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen
Reinigungsverfahren

gerichtet an das

**Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,
Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Aachen, den 30.08.2017
Bevollmächtigter Vertreter
der Arbeitsgemeinschaft und Projektleiter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp
Direktor des Instituts für
Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Veranlassung und Projektziele | 1 |
| 2 | Literaturrecherche | 3 |
| 3 | Material und Methoden | 5 |
| 3.1 | Pilotanlage | 5 |
| 3.2 | Versuchsprogramm | 5 |
| 3.2.1 | Ermittlung des Einflusses der Reaktionszeit | 5 |
| 3.2.2 | Ermittlung des Einflusses der Ozondosis | 6 |
| 3.2.3 | Vergleich der optimalen Einstellungen zur Spurenstoffelimination und zur Desinfektion | 7 |
| 4 | V Versuchsergebnisse | 9 |
| 4.1 | Einfluss der Reaktionszeit auf die Desinfektion | 9 |
| 4.2 | Einfluss der Ozondosis auf die Desinfektionsleistung | 10 |
| 4.3 | Untersuchung des erweiterten Keimspektrums | 12 |
| 4.4 | Desinfektionsleistung einer Ozonanlage zur Elimination von Spurenstoffen | 12 |
| 5 | Legionellen in kommunalen Kläranlagen | 16 |
| 5.1 | Untersuchungsumfang | 16 |
| 6 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 18 |
| 7 | Zusammenfassung | 21 |
| 8 | Literatur | 24 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Abbildung 1: | Einfluss der Reaktionszeit auf die Reduktion der gesamten coliformen Bakterien mit einer Ozondosis von 6 mg _{O₃} /l und Durchflusszeiten von 50 l/h bzw. 90 l/h (jeweils n = 3)..... | 9 |
| Abbildung 2: | Durchschnittliche Konzentration der gesamten coliformen Bakterien vor und nach der Ozonung (links) sowie die durchschnittliche errechnete log-Reduktion (rechts) für verschiedene Ozondosierungen und einer Aufenthaltszeit von 25 min (n = 3)..... | 10 |
| Abbildung 3: | Errechnete log-Reduktion der gesamten coliformen Bakterien der einzelnen Versuchsdurchführungen bezogen auf die spezifische Ozondosis und eine Aufenthaltszeit von 25 min..... | 11 |
| Abbildung 4: | Errechnete log-Reduktion der gesamten coliformen Bakterien der einzelnen Versuchsdurchführungen bezogen auf die relative SAK ₂₅₄ -Abnahme für eine Aufenthaltszeit von 25 min..... | 11 |
| Abbildung 5: | Mittlere Spurenstoffelimination (sowie Minimum und Maximum; dargestellt durch die Whisker) der untersuchten Substanzen infolge der Ozonung mit 4 mg _{O₃} /l und 6 mg _{O₃} /l Ozon..... | 13 |
| Abbildung 6: | Reduktion der untersuchten Keime für verschiedene Ozondosierungen und Abwässer zweier Kläranlagen..... | 14 |
| Abbildung 7: | Spezifische Kosten pro m ³ behandeltem Abwasser (links) und pro angeschlossenen Einwohnerwert (rechts) für die Ertüchtigung der KA Aachen-Soers mit einer Ozonung..... | 17 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|---|
| Tabelle 1: | Versuchseinstellung für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Reaktionszeit auf die Desinfektionsleistung der Ozonung | 6 |
| Tabelle 2: | Analysenumfang für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Reaktionszeit auf die Desinfektionsleistung einer Ozonung..... | 6 |
| Tabelle 3: | Versuchseinstellung für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Ozondosis auf die Desinfektionsleistung einer Ozonung | 7 |
| Tabelle 4: | Analysenumfang für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Ozondosierung auf die Desinfektionsleistung einer Ozonung | 7 |
| Tabelle 5: | Versuchseinstellung für die Untersuchungen zur Ozonung mit erweitertem Analysespektrum und simultane Spurenstoffelimination und Keimreduktion..... | 8 |
| Tabelle 6: | Analysenumfang für die Untersuchungen zur Ozonung mit erweitertem Analysespektrum und simultane Spurenstoffelimination und Keimreduktion..... | 8 |

1 Veranlassung und Projektziele

Die Ozonung zur Behandlung von Kläranlagenabläufen ist ein Verfahren, das derzeit für die Elimination organischer Spurenstoffe intensiv untersucht wird. Zahlreiche Projekte zur Eliminationsleistung und der Umsetzung der Ozonung wurden bereits mit Pilotanlagen und großtechnische Anlagen in Deutschland, der Schweiz und Österreich durchgeführt (z. B. ABEGGLEN et al., 2009; KREUZINGER UND SCHAAR, 2011; ARGE, 2014; JEKEL et al., 2016).

Die Ozonung wird im Bereich der Trinkwasseraufbereitung als Verfahren zur Desinfektion eingesetzt. Dementsprechend kann die Ozonung, neben der Spurenstoffelimination, grundsätzlich eine Desinfektion des Kläranlagenablaufs bewirken. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn der Vorfluter zu Freizeitziwecken oder zur Trinkwassergewinnung genutzt wird. Der Erfolg einer Abwasser ozonung zur Desinfektion der verschiedenen Mikroorganismen ist jedoch noch nicht abschließend geklärt. Zu den offenen Fragestellungen zählen unter anderem die notwendigen verfahrenstechnischen Einstellungen, die für eine weitreichende Keimreduktion mittels der Ozonung von Abwasser gewählt werden müssen.

Generell werden für die großtechnische Umsetzung der Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen zwei Verfahrenstechniken als besonders relevant angesehen: die Ozonung und die Behandlung mit Aktivkohle. Die zusätzliche Desinfektion neben der Spurenstoffelimination durch die Ozonung wird häufig als zusätzlicher positiver Aspekt für die Ozonung genannt. Die Keimreduktion durch den Einsatz von Ozon unter den Randbedingungen zur Spurenstoffelimination ist jedoch nicht ausreichend geklärt. Erste Untersuchungen zur Keimreduktion im Rahmen des Einsatzbereiches Spurenstoffelimination zeigen bereits für vergleichsweise geringe Ozondosierungen eine Reduktion der untersuchten Parameter an. So wurden beispielsweise an der Pilotanlage in Regensdorf Escherichia (E.) Coli durch die Behandlung von biologisch gereinigtem Abwasser mit einer spezifischen Ozondosis von $0,36 \text{ g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$ um 1,5 log-Stufen reduziert (ABEGGLEN et al., 2009). Innerhalb des Projektes Pilotox wurde mit einer spezifischen Ozondosis von $0,4 \text{ g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$ eine Reduktion der Konzentration an coliformen Bakterien von 2 log-Stufen festgestellt, wobei mit geringeren spezifischen Ozonkonzentrationen, wie z.B. $0,3 \text{ g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$, kein Effekt auf die coliformen Bakterien beobachtet werden konnte (BAHR et al., 2007).

Eine Dosis-Wirkungsbeziehung zur Keimreduktion mittels Ozon in kommunalem Abwasser wurde bisher noch nicht ausreichend erarbeitet. Das ist auf den häufig nicht feststellbaren Zusammenhang zwischen Bakterien- bzw. Virenreduktion und spezifischer Ozondosis zurückzuführen (ZIMMERMANN et al., 2011; GAMAGE et al., 2013). Auch die Auswertung von für die Ozonung relevanten und leicht zu messenden Parametern, wie dem SAK254 oder die Ozonkonzentration im Off-Gas, ergaben in den bislang durchgeführten vereinzelt Versuchen keine ausreichenden

Veranlassung und Projektziele

Korrelationen mit der Keimreduktion (GAMAGE et al., 2013; GERRITY et al., 2012). Insbesondere der SAK254 ist jedoch im Bereich der Spurenstoffelimination von besonderem Interesse, da er als Parameter zur Steuerung und Regelung der Ozondosis diskutiert wird (z.B. WITTMER et al., 2013; JEKEL et al., 2016).

Durch die innerhalb dieses Projekts geplanten Versuche wird ein hoher Erkenntnisgewinn in Bezug auf die dargestellten Fragen erwartet. Zudem sollen erste Einschätzungen für die optimale Betriebsweise einer Ozonung mit dem gleichzeitigen Ziel der Desinfektion und Spurenstoffelimination erhalten werden. Ziel des Projekts ist weiterhin die Auslegung und Ermittlung der Leistungsfähigkeit einer Ozonung zur gleichzeitigen Spurenstoff- und Keimreduktion in Abläufen kommunaler Kläranlagen. Dabei werden sowohl die Praxistauglichkeit als auch die Wirtschaftlichkeit einer entsprechend ausgelegten Ozonung betrachtet. Die entsprechenden Ergebnisse sollen anhand einer Pilotanlage und systematischer Versuchseinstellungen für eine kommunale Kläranlage ermittelt werden.

Als zusätzlicher Aspekt wird ein weiteres relevantes Bakterium, die Legionellen, betrachtet. Im Sommer 2013 kam es zur Verbreitung von Legionellen im Raum Warstein, welche das Thema erneut in den Fokus von Behörden und Bevölkerung rückte. Die Beprobungen weiterer Kläranlagen in NRW durch das LANUV ergaben, dass Legionellen bei der überwiegenden Anzahl der Proben nicht im Abwasser gefunden wurden. Eine zuverlässige Vorhersage der Wirkung von Ozon auf die Konzentration von Legionellen im Abwasser setzt jedoch ein regelmäßiges Auftreten dieser in einem Kläranlagenablauf voraus. Dementsprechend sind gezielte Versuche durch die Ozonung von kommunalem, Legionellen haltigem Abwasser nicht umsetzbar. Dennoch ist es von Interesse, an den betroffenen Anlagen Maßnahmen zu entwickeln, durch die das Risiko für Personal und Öffentlichkeit möglichst minimiert wird. Daher werden das Vorkommen und die Reaktion von Legionellen bei der Behandlung von Abwasser mit Ozon im Rahmen einer Literaturstudie untersucht.

Die prioritären Auslegungsparameter für eine Abwasserdesinfektion, welche durch die Versuche mit Abwasser einer kommunalen Kläranlage ermittelt werden sollen, sind die zu applizierende Ozonmenge und die Kontaktzeit. Die ermittelten Auslegungsgrößen werden dadurch überprüft, dass Abwasser einer weiteren Kläranlage behandelt wird und der Parameterumfang um weitere Keime aber auch Spurenstoffe und Ökotoxizitätstests erweitert wird. Anhand einer theoretischen Dimensionierung und anhand des notwendigen Energiebedarfs bei der ermittelten Dosiermenge, können die Kosten des Verfahrens berechnet werden. Dadurch kann ein Vergleich mit Verfahren zur alleinigen Spurenstoffelimination bzw. Desinfektion gezogen werden und ermittelt werden, ob eine zur simultanen Spurenstoff- und Keimelimination ausgelegte Ozonung wirtschaftlicher ist als eine Kombination entsprechender separater Verfahrensstufen.

2 Literaturrecherche

Abwässer kommunaler Kläranlagen enthalten generell Mikroorganismen, wie Bakterien, Viren und Protozoen. Viele Bakterien, darunter zählen auch *Escherichia (E.) coli* oder Intestinale Enterokokken, welche als Indikatorsubstanzen für die Badegewässerrichtlinie fungieren, liegen kontinuierlich im Abwasser vor (vgl. KISTEMANN et al., 2001; MANDILARA et al., 2006; GASSE, 2008; GROETTEKER, 2008; FRANCY et al., 2011). Andere Keime, wie z.B. Viren, werden dagegen vermehrt während vorliegender Epidemien im Abwasser vorgefunden (vgl. OTTOSSON et al., 2006; SIMMONS et al., 2011).

Die Abwasserverordnung sieht keine Grenzwerte für die Qualität der Einleitungen aus kommunalen Kläranlagen hinsichtlich pathogener Keime vor. Dennoch führen die Prozesse auf den Kläranlagen dazu, dass auch die Konzentrationen der Mikroorganismen im Abwasser reduziert werden (GROETTEKER et al., 2008). Im Allgemeinen werden die Mikroorganismen hauptsächlich während der biologischen Reinigung reduziert (LUCENA et al., 2004; MANDILARA et al., 2006; FONG et al., 2010). Der Einsatz einer nachgeschalteten Filterstufe führt zu einer erhöhten Reduktionsleistung der Kläranlagen (GASSE, 2009; KISTEMANN et al., 2009). Weiterführende Reinigungsstufen, wie z.B. die UV-Bestrahlung, die Chlorung oder die Ozonung werden gezielt zur Keimreduktion eingesetzt und können die Konzentration der Mikroorganismen im Ablauf der Kläranlage deutlich stärker reduzieren als die konventionelle Abwasserreinigung (DWA-M 205, 2013).

Die Ozonung ist ein oxidatives Abwasserreinigungsverfahren, bei dem ozonhaltige Luft, ozonhaltiger Sauerstoff oder ein hochkonzentrierter Ozon-Teilwasserstrom in das Abwasser eingetragen wird. Sie wird im Bereich der Abwasserbehandlung generell als Verfahren zur Spurenstoffelimination eingesetzt (ABEGGLEN et al., 2009; SCHAAR et al., 2013; ARGE, 2014). In der Trinkwasseraufbereitung wurde die Ozonung dagegen ursprünglich aufgrund ihrer desinfizierenden Wirkung eingesetzt. Der Wirkmechanismus der Desinfektion infolge der Ozonung ist bislang jedoch nicht vollständig bekannt, da eine Vielzahl von Reaktionen des Ozons mit den unterschiedlichen Zellbestandteilen der Mikroorganismen gemeinsam ablaufen. Es finden sowohl Reaktionen des Ozons mit Molekülen der Zellwand oder den Enzymen statt, als auch die Oxidation von Bestandteilen der DNA (PARASKEVA UND GRAHAM, 2002; VON SONNTAG UND VON GUNTEN, 2012). Die Reaktion von Ozon mit den Zellbestandteilen der Mikroorganismen erfolgt, analog zur Reaktion von Ozon mit weiteren Abwasserinhaltsstoffen, sowohl über die direkte Oxidation mit Ozon als auch über die indirekte Reaktion durch Hydroxylradikalen. Für die Reduktion der Mikroorganismen ist es wichtig, dass diese ausreichend geschädigt sind, damit keine Reparaturmechanismen der Zelle greifen können. (VON SONNTAG UND VON GUNTEN, 2012)

Literaturrecherche

Der Erfolg der Keimreduktion während der Ozonung ist stark von den jeweiligen Mikroorganismen und deren Resistenz gegenüber der Ozonung abhängig (VON SONNTAG UND VON GUNTEN, 2012). Die Konzentration der *E. coli* kann somit deutlich besser durch Ozon reduziert werden als die Konzentration der *C. perfringens* (PARASKEVA UND GRAHAM, 2002; TERNES et al., 2003). Eine Erhöhung der Ozondosis führt im Allgemeinen dazu, dass eine verbesserte Keimreduktion erreicht wird. Jedoch hängt die Reduktionsleistung der Ozonung ebenfalls von der Beschaffenheit des Abwassers und des Zehrungspotenzials des Abwassers ab (PARASKEVA UND GRAHAM, 2002). Ein steigender Feststoffgehalt und eine steigende organische Hintergrundbelastung des Abwassers wirken sich negativ auf die Desinfektionsleistung aus (US EPA 1999). Die Entfernung der Feststoffe aus dem Abwasser ist eine wichtige Voraussetzung für eine gute Desinfektionsleistung, da in den Feststoffen eingelagerte Mikroorganismen teilweise nicht durch das Ozon inaktiviert werden können (SCHUMACHER, 2006). Funktionelle, übertragbare Dosis-Wirkungsbeziehungen der Desinfektion von Abwasser mittels Ozon konnten bisher weder für Bakterien noch für Viren aufgestellt werden, da der Zusammenhang zwischen der spezifischen Ozondosis und der Bakterienreduktion oft nur schwach vorhanden ist (SAVOYE et al., 2001; ZIMMERMANN et al., 2011; GAMAGE et al., 2013). Die benötigten spezifischen Ozondosen werden, entsprechend dem Merkblatt der DWA „Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser“ (DWA-M 205, 2013), mit 0,5 bis 1 $\text{g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$ angegeben. Damit liegen die Vorschläge zur Dimensionierung einer Anlage zur Ozonung mit dem Ziel der Desinfektion nah an denen mit dem Ziel der Spurenstoffelimination.

Der Einfluss der Kontaktzeit auf die Effizienz der Keimreduktion ist als gering einzuschätzen. Versuche zur Reaktionszeit ergaben, dass die Desinfektion hauptsächlich innerhalb der ersten Minuten bzw. Sekunden erfolgt und eine Änderung dieser keinen Einfluss auf die Desinfektion hatte (FINCH UND SMITH, 1989; TYRRELL et al., 1995; SAVOYE et al., 2001; XU et al., 2002). Auch die Gegenwart von gelöstem Ozon im Reaktor führte in Untersuchungen von ABEGGLEN et al. (2009) zu keiner weiteren Verringerung der Keimbelastung. Diese Beobachtung lässt sich durch die Arbeiten von XU et al. (2002) erklären, die zeigen, dass die hauptsächliche Desinfektion im Rahmen der unmittelbaren Zehrung bzw. noch vor Erreichen einer Konzentration von freiem Ozon im Abwasser stattfindet. Im Merkblatt der DWA M 205 wird eine Mindestkontaktzeit von 5-10 Minuten genannt. Weitere ausgewerteten Literaturquellen sehen ebenfalls eine Kontaktzeit in Höhe der für die Spurenstoffelimination üblichen Kontaktzeit von 15 – 30 Minuten als ausreichend an.

3 Material und Methoden

3.1 Pilotanlage

Die Untersuchungen zur Desinfektion von Abwasser mittels Ozon wurden an einer Pilotanlage des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft auf dem Standort der Kläranlage Aachen Soers durchgeführt. Die Pilotanlage wurde mit Abwasser aus der Nachklärung der Kläranlage Aachen Soers oder der Kläranlage Essen-Süd beschickt.

Die eingesetzte Pilotanlage besteht aus zwei Glasreaktoren mit einem Innendurchmesser von jeweils 10 cm und einer gesamten Höhe von 150 cm. Insgesamt weisen beide Reaktoren ein gesamtes durchflossenes Volumen von 21 Liter auf. Das Abwasser wird dem ersten Reaktor (R1) über eine Schlauchpumpe mit einem Beschickungsvolumenstrom von 50 bzw. 90 l/h zugeführt. Im ersten Reaktor wird der ozonhaltige Sauerstoffstrom im Gegenstrom in das Abwasser eingetragen. Der Eintrag des ozonhaltigen Gases erfolgt über Diffusoren am Boden des ersten Reaktors, welche eine Porenweite von 160 μm aufweisen. Der zweite Reaktor (R2) dient als zusätzlicher Raum für die Reaktion der Abwasserinhaltsstoffe mit dem im Abwasser gelösten Ozon. Demzufolge findet im zweiten Reaktor kein weiterer Gaseintrag statt; das Abwasser durchfließt den Reaktor aufwärts. Entsprechend der erforderlichen Versuchseinstellungen wurde der Abwasservolumenstrom auf 50 l/h bzw. 90 l/h eingestellt. Der Gasvolumenstrom des ozonhaltigen Feed-Gases wurde fest auf 25 l/h eingestellt und eine Änderung der Ozondosierung über die Änderung der Ozonkonzentration im Feed-Gas gewährleistet. Die Proben für die Versuche wurden an den Stellen „Zulauf“, „Ablauf R1“ (begaster Reaktor) und „Ablauf R2“ (unbegaster Reaktor) entnommen.

3.2 Versuchsprogramm

3.2.1 Ermittlung des Einflusses der Reaktionszeit

Die benötigte Reaktionszeit bestimmt maßgeblich die Auslegung einer Anlage zur Ozonung von Abwasser. Daher wurde im Rahmen dieses Projekts zunächst der Einfluss der Verweilzeit auf die Desinfektionsleistung untersucht. Das Ziel dieser Untersuchungen war mit Hilfe der gewählten Indikatorkeime zu überprüfen, ob die Dimensionierung einer Ozonung im Bereich einer zur Spurenstoffelimination typischen hydraulischen Aufenthaltszeit von 15 – 25 min (Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe NRW, 2016) einen entscheidenden Einfluss auf die Desinfektionsleistung hat. Hierzu wurden Versuche mit gleicher Ozondosierung aber variierenden Verweilzeiten durchgeführt und die erreichte Desinfektionsleistung bestimmt. Zur Absicherung der Ergebnisse

Material und Methoden

wurden die Versuche insgesamt an drei Tagen mit Abwasser aus dem Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Aachen Soers durchgeführt. Die gewählte Ozondosis lag bei 6 mg_{O₃}/l und die Pilotanlage wurde mit 50 l/h (HRT = 25 min) bzw. 90 l/h (HRT = 15 min) beschickt. Die Einstellungen und die Probenahmestellen sind in Tabelle 1 dargestellt. Der Analyseumfang der Proben an den einzelnen Probenahmestellen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Versuchseinstellung für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Reaktionszeit auf die Desinfektionsleistung der Ozonung

| Einstellung | | Datum | 25.07.2016 | 27.07.2016 | 01.08.2016 |
|-----------------------------|--------------|-----------|------------|------------|------------|
| c(O ₃) = 6 mg/l | HRT = 25 min | Zulauf O3 | x | x | x |
| | | Ablauf R1 | x | x | x |
| | | Ablauf R2 | x | x | x |
| | HRT = 15 min | Zulauf O3 | x | x | x |
| | | Ablauf R1 | x | x | x |
| | | Ablauf R2 | x | x | x |

Tabelle 2: Analyseumfang für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Reaktionszeit auf die Desinfektionsleistung einer Ozonung

| | Zulauf O3 | Ablauf R1 | Ablauf R2 |
|---------------------|---|---|---|
| Keime | Gesamte KBE, coliforme Bakterien, <i>E. coli</i> , Clostridien | | |
| Chemische Parameter | DOC, CSB, SAK ₂₅₄ , Temperatur, pH, AFS, NO ₂ ⁻ -N | O ₃ – Konzentration im Abwasser, SAK ₂₅₄ , Temperatur, pH | O ₃ – Konzentration im Abwasser, SAK ₂₅₄ , Temperatur, pH |

3.2.2 Ermittlung des Einflusses der Ozondosis

Die eingesetzte Ozondosis ist die maßgebliche Einflussgröße bei der Desinfektion von Abwasser (JANEX ET AL., 2000). Innerhalb dieses Projekts wurden fünf unterschiedliche Ozondosierungen (2 mg_{O₃}/l, 4 mg_{O₃}/l, 6 mg_{O₃}/l, 8 mg_{O₃}/l und 10 mg_{O₃}/l) bei gleich bleibender hydraulischer Aufenthaltszeit getestet, um die Abhängigkeit des Desinfektionserfolgs von der Ozondosis zu ermitteln. Für die Versuche wurden die maximale hydraulische Aufenthaltszeit von 25 min bzw. ein Beschickungsvolumenstrom von 50 l/h eingestellt, um einen Austrag von im Abwasser gelöstem Ozon zu verhindern und damit die vollständige Reaktion von Ozon mit den verschiedenen Abwasserinhaltsstoffen auch bei maximaler Ozondosis zu ermöglichen. Jede Einstellung wurde insgesamt an drei Tagen durchgeführt, um Einflüsse der Abwasserzusammensetzung und Messunsicherheiten berücksichtigen zu können. Die Versuchseinstellungen dieser Untersuchungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Im Rahmen dieser Versuche wurde der Zulauf

zum ersten Reaktor und der Ablauf der Ozonung (R2) beprobt. Der Analyseumfang der hier vorgestellten Untersuchungen ist in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 3: Versuchseinstellung für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Ozondosis auf die Desinfektionsleistung einer Ozonung

| Ozondosis [mgO ₃ /l] | Versuchseinstellung (HRT = 25 min) | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 09.08.2016 | 17.08.2016 | 22.08.2016 | 24.08.2016 | 29.08.2016 | 31.08.2016 |
| 2 | x | | x | | x | |
| 4 | x | | | x | | x |
| 6 | x | | x | | | x |
| 8 | | x | | x | x | |
| 10 | | x | x | | x | |

Tabelle 4: Analysenumfang für die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Ozondosierung auf die Desinfektionsleistung einer Ozonung

| | Zulauf O3 | Ablauf R2 |
|---------------------|---|--|
| Keime | Gesamte KBE, coliforme Bakterien, E. coli, Clostridien | |
| Chemische Parameter | DOC, CSB, SAK ₂₅₄ , Temperatur, pH, AFS, NO ₂ ⁻ -N | O ₃ – Konzentration Abwasser, Temperatur, SAK ₂₅₄ , pH |

3.2.3 Vergleich der optimalen Einstellungen zur Spurenstoffelimination und zur Desinfektion

Innerhalb dieser Versuche fand ein Vergleich des Leistungserfolgs der Keimreduktion für die Einstellungen statt, die für die Spurenstoffelimination üblicherweise eingesetzt werden, und die Einstellungen, die innerhalb dieses Projekts für die Desinfektion ermittelt wurden. Somit sollte die optimale Betriebsweise einer Ozonung zur simultanen Elimination von Keimen und Spurenstoffen ermittelt werden.

Neben dem Abwasser der Kläranlage Aachen-Soers wurde das Abwasser der Kläranlage Essen-Süd zur Pilotanlage transportiert und behandelt. Für diese Versuche wurde eine hydraulische Aufenthaltszeit von 25 min bzw. ein Beschickungsvolumenstrom von 50 l/h gewählt, um dem eingetragenen Ozon genügend Reaktionszeit zu bieten. Die Versuche wurden je Einstellung und Kläranlage jeweils dreimal wiederholt, um die variierende Abwasserqualität zu berücksichtigen. Alle Versuchsdurchführungen und Einstellungen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Versuchseinstellung für die Untersuchungen zur Ozonung mit erweitertem Analysespektrum und simultane Spurenstoffelimination und Keimreduktion

| Ozondosis [mgO ₃ /l] | Versuchseinstellung (HRT = 25 min) | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|-----------------------|------------|------------|
| | Abwasser KA Aachen Soers | | | Abwasser KA Essen-Süd | | |
| | 30.05.2017 | 07.06.2017 | 21.06.2017 | 13.06.2017 | 20.06.2017 | 27.06.2017 |
| 4 | x | x | x | x | x | x |
| 6 | x | x | x | x | x | x |

Die optimalen Einstellungen für die Keimreduktion mittels Ozonung in kommunalen Abwässern, die in den bisher beschriebenen Versuchen ermittelt wurden, wurden innerhalb der folgenden Versuche mit einem erweiterten Analysenumfang, u.a. weitere Keimanalysen und Spurenstoffanalysen, überprüft. Die Entstehung von Transformationsprodukten während der Ozonung wurde bislang nicht ausreichend geklärt. Daher wurden bei diesen Untersuchungen ökotoxikologisch relevante Parameter sowie Bromat betrachtet. Die ökotoxikologische Biotestbatterie umfasste dabei verschiedene Trophiestufen, um eine mögliche Ökotoxizität erkennen zu können. Alle untersuchten Parameter sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Analysenumfang für die Untersuchungen zur Ozonung mit erweitertem Analysespektrum und simultane Spurenstoffelimination und Keimreduktion

| | Zulauf O3 | Ablauf R2 |
|-------------------------------|--|---|
| Keime | coliforme Bakterien, <i>E. coli</i> , Enterokokken, Clostridien | |
| Viren | Adenoviren, Polyomaviren, Enteroviren, Noroviren | |
| Chemische Parameter | DOC, CSB, SAK ₂₅₄ , Temperatur, pH, AFS, Bromid | O ₃ – Konzentration Abwasser, DOC, CSB, SAK ₂₅₄ , Temperatur, pH, AFS, Bromat |
| Spurenstoffe | Diclofenac, Metoprolol, Benzotriazol, Diazepam | |
| Ökotoxikologische Testsysteme | Daphnien-Immobilisationstest, Algen-Wachstumshemmtest, Leuchtbakterientest | |

4 Versuchsergebnisse

4.1 Einfluss der Reaktionszeit auf die Desinfektion

Die Untersuchungen zum Einfluss der Reaktionsdauer auf die Wirksamkeit der Ozonung ergaben, analog zu den Angaben aus der Literatur, dass die Keimreduktion für die betrachteten Bakterien nicht von den angewendeten Reaktionszeiten abhängig ist. Die Auswertung der Versuchsdaten für die Kolonie bildenden Einheiten (KBE), die coliformen Bakterien, *Escherichia coli* und *Clostridium perfringens* sind in der Langfassung des Berichtes verfügbar. Stellvertretend werden die Ergebnisse am Beispiel der coliformen Bakterien vorgestellt, da diese ein vergleichbares Verhalten wie *E. coli* aufweisen, jedoch in einer etwas höheren Konzentration im Abwasser vorkommen.

Die gesamten coliformen Bakterien lagen im Abwasser im Zulauf der Ozonanlage an den Versuchstagen mit Konzentrationen von $3,2 \cdot 10^2 - 1,7 \cdot 10^3$ KBE/ml vor (Abbildung 1). Durch die Ozonung wurden die Bakterienkonzentrationen so weit reduziert, dass im Ablauf (R2) maximal $1,2 \cdot 10^1$ KBE/ml gemessen werden konnten. Wie auch bei den übrigen Mikroorganismen konnte für die Reduktionsleistung keine signifikante Abhängigkeit von der Reaktionszeit festgestellt werden. Leichte Zunahmen oder Abnahmen vom Ablauf des ersten Reaktors zum Ablauf des zweiten Reaktors sind auf Messunsicherheiten zurückzuführen. Die mittlere log-Reduktion für die coliformen Bakterien lag bei den durchgeführten Versuchen bei 2,1 bzw. 2,4 für Beschickungsvolumenströme von 50 l/h bzw. 90 l/h.

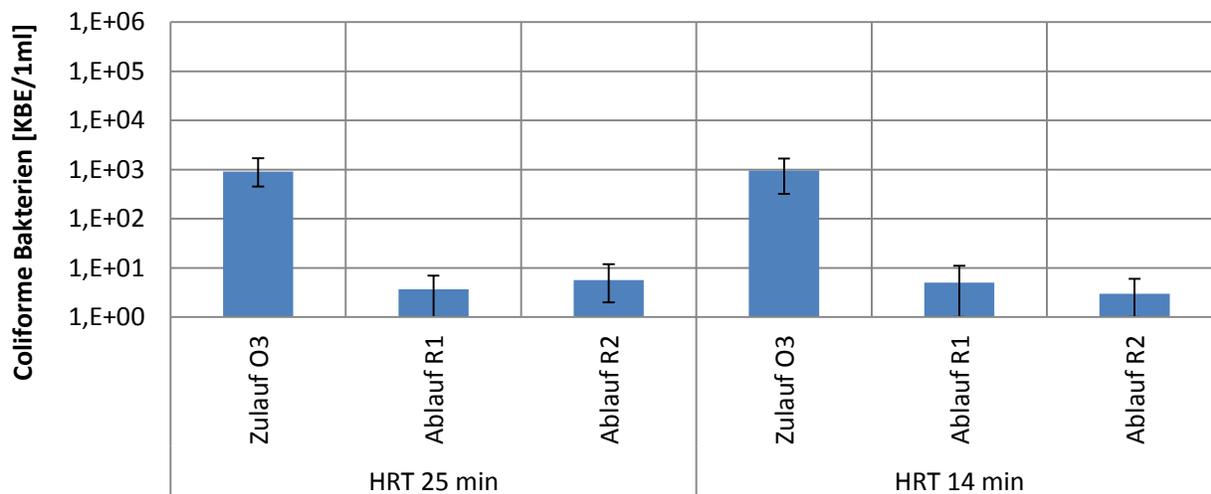


Abbildung 1: Einfluss der Reaktionszeit auf die Reduktion der gesamten coliformen Bakterien mit einer Ozondosis von $6 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ und Durchflusszeiten von 50 l/h bzw. 90 l/h (jeweils $n = 3$).

Aus den Beobachtungen zu den Untersuchungen des Einflusses der Reaktionszeit auf die Desinfektionsleistung kann sowohl im Vergleich der beiden untersuchten Reaktionszeiten, als auch

im Vergleich der beiden Probenahmestellen R1 und R2 für das verwendete Abwasser mit der genutzten Ozonanlage geschlossen werden, dass die Reaktionszeit während der Ozonung von Abwasser, sofern sie im Rahmen der hier untersuchten 15 – 25 Minuten Gesamtaufenthaltszeit liegt, keinen Einfluss auf die Desinfektionsleistung hat. Die spezifische Größe des Ozonreaktors hängt somit primär von der Zehrung des zu behandelnden Abwassers ab, da im Regelfall kein Rest-Ozon im Ablauf der Ozonung vorhanden sein sollte.

4.2 Einfluss der Ozondosis auf die Desinfektionsleistung

Der Einfluss der Ozondosis auf den Reduktionsgrad der untersuchten Mikroorganismen ist deutlich erkennbar. Im Zulauf der Ozonanlage lag die Konzentration der coliformen Bakterien während dieser Untersuchungen zwischen $5 \cdot 10^1$ und $4,4 \cdot 10^2$ KBE/ml (Abbildung 2). Für eine Ozondosis von $2 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ wurde eine sehr geringe Reduktion der Keimzahlen infolge der Ozonung festgestellt (durchschnittlich 0,25 log-Stufen). Eine Ozondosis von $4 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ zeigte dagegen mit einer durchschnittlichen Reduktion der Konzentration der coliformen Bakterien um 1,7 log-Stufen bereits einen deutlichen Einfluss auf die Keimbelastung im Abwasser. Ozondosierungen von $6 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ und höher führten dazu, dass keine coliformen Bakterien mehr im Ablauf der Ozonanlage nachgewiesen wurden. Für diese Einstellungen wurden log-Reduktionen von im Mittel mindestens 2,2 log-Stufen erreicht.

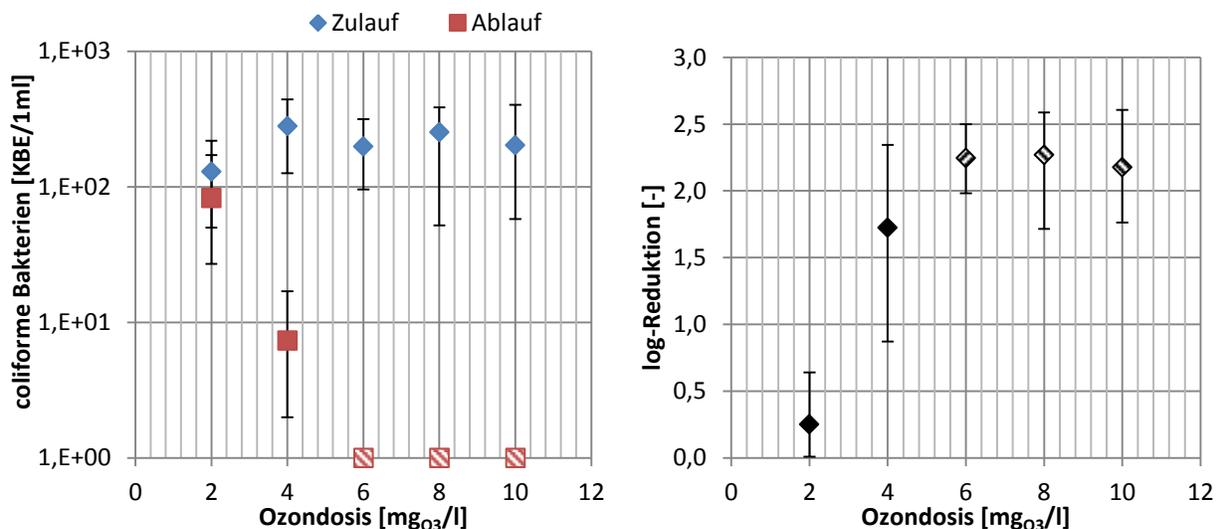


Abbildung 2: Durchschnittliche Konzentration der gesamten coliformen Bakterien vor und nach der Ozonung (links) sowie die durchschnittliche errechnete log-Reduktion (rechts) für verschiedene Ozondosierungen und einer Aufenthaltszeit von 25 min (n = 3). Eine gestrichelt gefüllte Markierung gibt an, dass die Konzentration im Ablauf der Ozonanlage unterhalb der Bestimmungsgrenze lag bzw. die daraus resultierende Mindestelimination.

Die Auftragung der log-Reduktion der coliformen Bakterien in Abhängigkeit der spezifischen Ozondosis (Abbildung 3) zeigt, teilweise große Differenzen zwischen verschiedenen ermittelten Reduktionsleistungen für vergleichbare spezifische Ozondosierungen. Für eine spezifische

Ozondosis von ca. 0,8 $\text{g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$ wurde die Konzentration der coliformen Bakterien, analog zu der Reduktion der Keime bei 4 $\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$, um 0,9 – 2,3 log-Stufen reduziert. Die Werte, für die eine konkrete log-Reduktion errechnet werden konnten, zeigen die Tendenz, dass eine Erhöhung der spezifischen Ozondosis mit einer höheren Reduktion der coliformen Bakterien einhergeht.

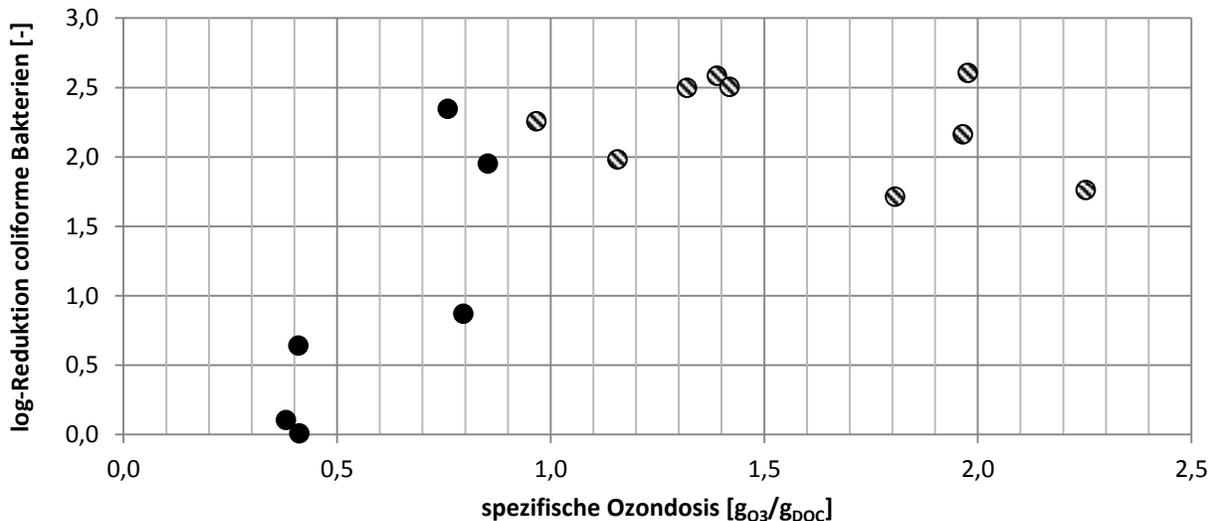


Abbildung 3: Errechnete log-Reduktion der gesamten coliformen Bakterien der einzelnen Versuchsdurchführungen bezogen auf die spezifische Ozondosis und eine Aufenthaltszeit von 25 min. Eine gestrichelt gefüllte Markierung gibt an, dass die Konzentration im Ablauf der Ozonanlage unterhalb der Bestimmungsgrenze lag bzw. die daraus resultierende Mindestelimination.

Im Gegensatz dazu besteht ein deutlicherer Zusammenhang zwischen der relativen Abnahme des SAK_{254} und der Reduktion der coliformen Bakterien. In Abbildung 4 sind die errechneten Reduktionen gegen den errechneten Delta SAK_{254} aufgetragen.

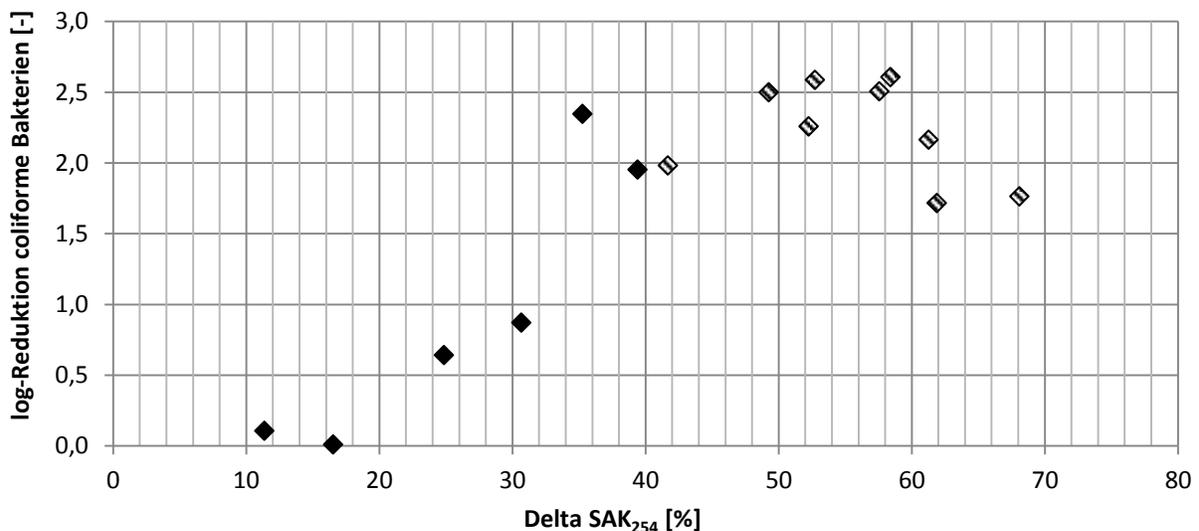


Abbildung 4: Errechnete log-Reduktion der gesamten coliformen Bakterien der einzelnen Versuchsdurchführungen bezogen auf die relative SAK_{254} -Abnahme für eine Aufenthaltszeit von 25 min. Eine gestrichelt gefüllte Markierung gibt an, dass die Konzentration im Ablauf der Ozonanlage unterhalb der Bestimmungsgrenze lag bzw. die daraus resultierende Mindestelimination

Für eine Zunahme des Delta SAK_{254} wurde auch eine Zunahme der log-Reduktion beobachtet. Da in nur sechs Versuchen eine Konzentration an coliformen Bakterien oberhalb der Bestimmungsgrenze im Ablauf der Ozonanlage vorlag, gilt diese Aussage ausschließlich für die entsprechenden Proben.

Die großen Unterschiede der Eliminationsraten, trotz identischer Versuchseinstellungen an den verschiedenen Tagen, lassen den Schluss zu, dass neben der Ozondosierung auch weitere Parameter wie die Abwasserqualität oder das Vorkommen der Bakterien, z. B. in Agglomeraten, die einen gewissen Schutz bieten, oder frei schwimmend einen Einfluss auf die Desinfektion haben, von Bedeutung sind.

4.3 Untersuchung des erweiterten Keimspektrums

Die Untersuchungen zur Reduktion weiterer Keime wurden sowohl mit Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Aachen Soers als auch mit Ablauf der Nachklärung der Kläranlage Essen-Süd durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchungen werden die Konzentrationen der coliformen Bakterien, der *E. coli*, der *Clostridien*, der Enterokokken sowie der untersuchten Viren erfasst und auf ihre Reduktionsgrade während der Ozonung ausgewertet. Bei Betrachtung des breiten Spektrums an Keimen fällt insgesamt auf, dass für beide Kläranlagen ähnliche Reduktionsgrade erzielt werden können. Unterschiede zwischen den Kläranlagen und auch den Mikroorganismen gibt es im Hinblick auf die Konzentrationen im Zulauf der Ozonanlage bzw. im Ablauf der jeweiligen Nachklärung. Die Konzentration der Enterokokken konnte für beide Ozondosen durch die Ozonung bis unter die Bestimmungsgrenze gesenkt werden. Mit Ausnahme der *Clostridien* führte eine Ozondosis von $6 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ bzw. eine spezifische Ozondosis von $0,7 \text{ g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$ auf beiden Kläranlagen zu einer Reduktion der Keime bis unter die Bestimmungsgrenze. An keinem der untersuchten Tage und der untersuchten Kläranlagen konnten Noro- oder Rotaviren im Abwasser gefunden werden. Für die Enteroviren und Adenoviren lag häufig eine Inhibition der Messung infolge von Abwasserinhaltsstoffen vor. Daher ist eine allgemeine Aussage zur Wirksamkeit der Ozonung hinsichtlich der Reduktion von Viren auf Grundlage dieser Ergebnisse nicht möglich.

4.4 Desinfektionsleistung einer Ozonanlage zur Elimination von Spurenstoffen

Ein zentrales Einsatzgebiet der Ozonung auf kommunalen Kläranlagen ist die Spurenstoffelimination (ARGE, 2014; SCHAAR et al., 2011; LEE et al., 2013). Die Analyse der **Spurenstoffe** im Rahmen dieses Projekts zeigt (Abbildung 5), dass erwartungsgemäß eine Ozondosis von $6 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ höhere Eliminationsleistungen zur Folge hat als eine Ozondosis von $4 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$. Bei Abwas-

ser der Kläranlage Aachen Soers wird tendenziell eine 15 bis 20 %-Punkte höhere Eliminationsleistung erreicht als mit Abwasser der Kläranlage Essen-Süd.

Im Abwasser der Kläranlage Aachen Soers wird mit einer spezifischen Ozondosierung von $0,7 \text{ g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$ eine quasi-vollständige Reduktion von Diclofenac, eine $> 90 \%$ -ige Reduktion von Metoprolol und eine ca. 75% -ige Reduktion von Benzotriazol erreicht. Im Gegensatz dazu liegen die Eliminationsgrade im Abwasser der Kläranlage Essen-Süd für Metoprolol und Benzotriazol bei derselben spezifischen Ozondosis bei ca. 75% bzw. 60% . Um im Abwasser der Kläranlage Essen-Süd eine vergleichbare Eliminationsleistung wie auf der Kläranlage Aachen Soers zu erreichen, müssten spezifische Ozondosierungen von $> 0,9 \text{ g}_{\text{O}_3}/\text{g}_{\text{DOC}}$ eingesetzt werden. Die beobachteten Eliminationsgrade liegen in Bereichen, die auch in der Literatur beschrieben werden (vgl. ANTONIOU et al., 2013; ALTMANN et al., 2014; ARGE, 2014)

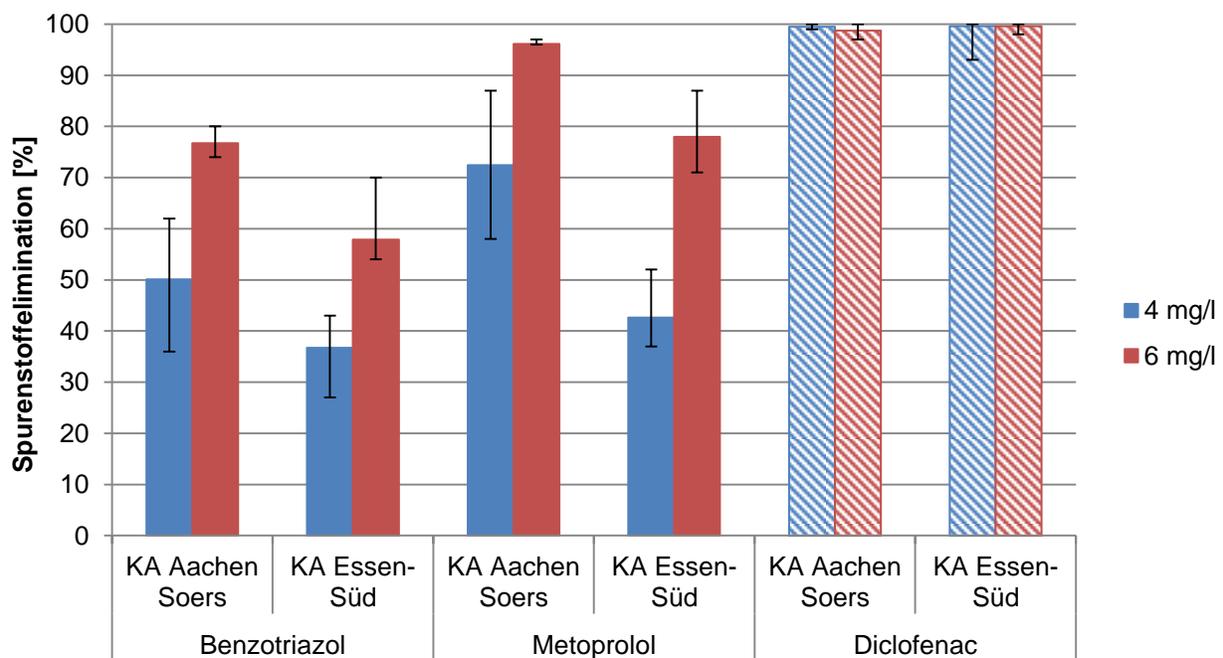


Abbildung 5: Mittlere Spurenstoffelimination (sowie Minimum und Maximum; dargestellt durch die Whisker) der untersuchten Substanzen infolge der Ozonung mit $4 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ und $6 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$ Ozon. Gestreifte Balken bedeuten, dass hier die Mindestelimination angegeben wird, da mindestens eine Ablaufkonzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze lag. (n = 3 je Balken)

Für die Abwässer beider Kläranlagen kann eine **Keimreduktion** für die Versuchseinstellungen mit dem Ziel der Spurenstoffelimination ($4 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$) bzw. der Desinfektion ($6 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{l}$) beobachtet werden. Die mittleren Keimreduktionen in den Abwässern beider Kläranlagen sind für die Bakterien in Abbildung 6 dargestellt und wurden zuvor bereits ausführlicher erläutert. Es fällt auf, dass die Reduktion der Bakterien auf der Kläranlage Essen-Süd für viele Parameter bis unter die Bestimmungsgrenze erfolgt. Für den Parameter Clostridien wurden ähnliche Ergebnisse für die Abwässer der Kläranlage Aachen Soers und Essen-Süd gefunden.

Versuchsergebnisse

Die für die Spurenstoffelimination eingesetzten Ozondosierungen, auf der KA Aachen Soers ca. 4 mg_{O₃}/l und auf der Kläranlage Essen-Süd 6 mg_{O₃}/l, führten zu einer Keimreduktion, wodurch die Konzentration für fast alle Bakterien im Ablauf der Ozonung unterhalb der Bestimmungsgrenze lag. Auf der Kläranlage Aachen Soers reichte die für die Spurenstoffelimination einzusetzende Dosis jedoch nicht aus, um die Mikroorganismen zuverlässig bis unter die Bestimmungsgrenze zu reduzieren, wohingegen die Ozondosis von 6 mg_{O₃}/l auf der KA Essen-Süd zu einer Reduktion aller Mikroorganismen, mit Ausnahme der Clostridien, bis unter die Bestimmungsgrenze führte.

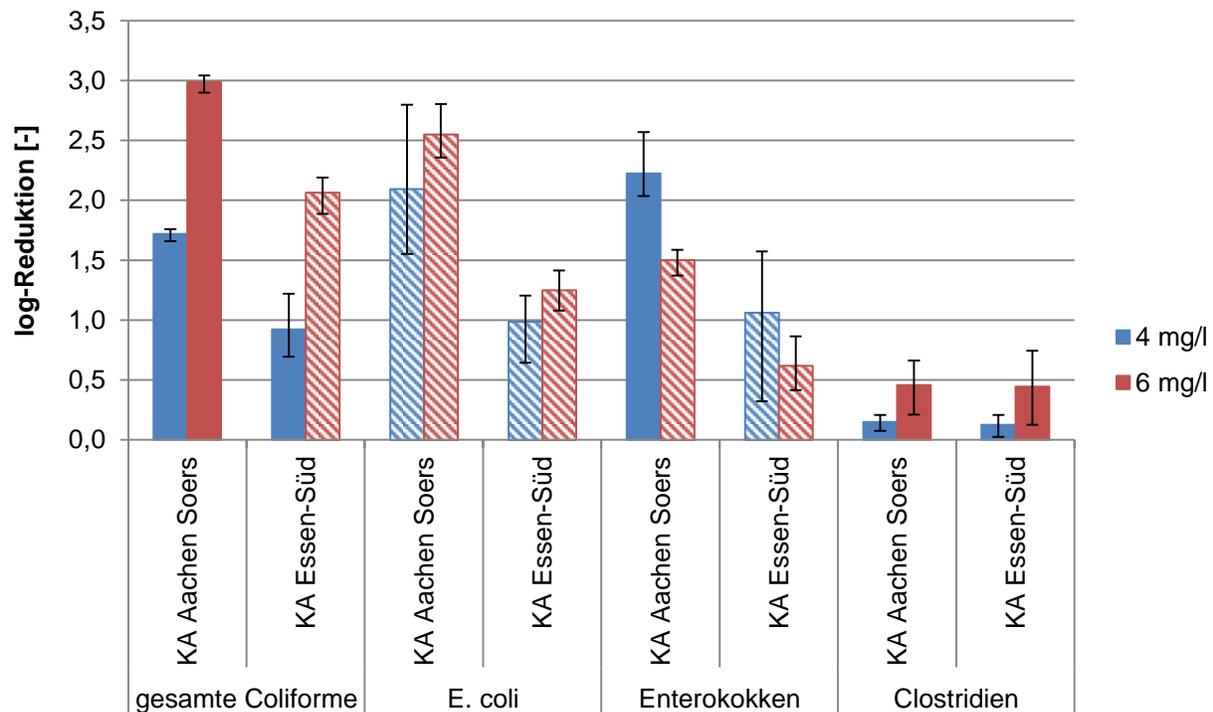


Abbildung 6: Reduktion der untersuchten Keime für verschiedene Ozondosierungen und Abwässer zweier Kläranlagen. Gestreifte Balken bedeuten, dass hier die Mindestelimination angegeben wird, da mindestens eine Ablaufkonzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze lag. (n = 3 je Balken)

Die Bromatbildung wurde für alle Proben der zuvor vorgestellten Untersuchungen zum Vergleich der Abwässer der Kläranlage Aachen Soers und Essen-Süd ermittelt. Für die Kläranlage Essen-Süd lag die Bromatkonzentration im Ablauf der Ozonanlage immer unterhalb der Bestimmungsgrenze. Auf der Kläranlage Aachen Soers wurde an einem Tag im Ablauf der Ozonung mit einer Ozondosis von 6 mg_{O₃}/l eine Bromat-Konzentration von 0,05 mg/l gemessen. An dem entsprechenden Tag lag eine spezifische Ozondosis von ca. 1 g_{O₃}/g_{DOC} vor, welche bereits in vergleichbaren Projekten an Pilotanlagen zur Bildung von Bromat geführt hatte (z. B. BAHN et al., 2007; SCHINDLER WILDHABER et al., 2015). Damit lässt sich für die eingesetzten Ozondosen und die getesteten Abwässer keine Restriktion hinsichtlich der Ozondosis durch eine zu hohe Bromatbil-

Versuchsergebnisse

Angabe geben. Die durchgeführten Ökotoxizitätstests zeigen für die ausgewählten Testorganismen keine negativen Effekte infolge der Ozonung an.

5 Legionellen in kommunalen Kläranlagen

5.1 Untersuchungsumfang

Legionellen treten hauptsächlich in aquatischen Umgebungen auf, vermehren sich in warmen Wässern sowie an warmen und feuchten Orten, wie z.B. Kühltürmen. Legionellen stellen eine Bakterienspezies dar, die sich an stark wechselnde Umweltbedingungen anpassen kann. Sie werden über Aerosole, die beim Versprühen des Wassers entstehen, verbreitet. Der Übertragungsweg zum Menschen basiert in der Regel auf der Benutzung von technischen Anlagen in denen Wasser versprüht wird, wie z.B. Kühltürme, Rückkühlwerke, Whirlpools, Duschen, Klimaanlage oder Kühltürmen.

In Deutschland wurden wenige Einzelfälle im Zusammenhang mit Kläranlagen und Infektionen infolge von Legionellen beschrieben. Die Ausbrüche mit Bezug zu Kläranlagen lassen sich in den meisten Fällen auf Industriekläranlagen aus dem Bereich der Papierherstellung, einer Raffinerie oder eines lebensmittelverarbeitenden Betriebs zurückführen (siehe z.B. GREGERSEN et al. 1999; NGUYEN et al. 2006; KUSNETSOV et al. 2010; SCHNEIDER et al. 2015). Als Faktoren für die Verbreitung der Legionellen durch Kläranlagen werden das Versprühen von legionellenhaltigem Abwasser bei der Belüftung oder aufgrund von Leckagen sowie die Nutzung von Kühltürmen zur Abkühlung des Abwassers vor der weiteren Behandlung genannt. (SCHNEIDER et al. 2015) Legionellen können in Kläranlagen insbesondere im Bereich der belüfteten Belebungsbecken und im belebten Schlamm nachgewiesen werden (KUSNETSOV et al., 2010).

Empfehlungen für technische Maßnahmenwerte im Ablauf einer Kläranlage entsprechend einer eingerichteten Expertenkommission Legionellen sind:

- < 1.000 KBE Legionellen/100 ml: Kein Handlungsbedarf.
- ≥ 1.000 bis < 10.000 KBE Legionellen/100 ml: Information der Betreiber und Nutzer sowie Bestimmung der Spezies und Serogruppe; es muss eine weitergehende Untersuchung der einzelnen Aufbereitungsstufen innerhalb der Kläranlage sowie der Zuflüsse zur Kläranlage durchgeführt werden.
- ≥ 10.000 KBE Legionellen/100 ml: Maßnahmen zur Minderung und Überprüfung der Konzentration im Gewässer, ggf. Entnahmeverbot.

Das Landesamt für Umwelt, Natur- und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW) führte in den vergangenen Jahren eine Messkampagne hinsichtlich der *Legionella* Konzentrationen in der Abwasserwirtschaft durch. Dabei wurde im Zeitraum von Januar 2015 bis Januar 2017 der Ablauf von 32 kommunalen Abwassereinigungsanlagen hinsichtlich ihrer *Legionella* Konzentrationen untersucht. Die Konzentration des Großteils der analysierten Proben liegt in einem Bereich

Legionellen in kommunalen Kläranlagen

von < 1.000 KBE/100 ml. Für vereinzelte Messergebnisse liegen die Konzentrationen des Parameters *Legionella* spp. in einem Konzentrationsbereich von > 10.000 KBE/100 ml bzw. sogar im Bereich von > 100.000 KBE/100 ml. In diesem Messwertebereich sind sofortige Maßnahmen zu treffen. Viele der analysierten Proben belegen zwar das Vorkommen von Legionellen in Kläranlagen, die gemessenen Konzentrationen erfordern jedoch in der Regel keine Maßnahmen (vgl. Expertenkommission Legionellen, 2015).

Im Bereich der Abwasserreinigung gibt es nur vereinzelte Untersuchungen zur Wirksamkeit von Ozon gegenüber Legionellen. Eine Vielzahl der Studien fand im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Kontrolle von Verunreinigungen in Kühlsystemen und wassertechnischen Anlagen der Hausinstallationen statt. Diese belegen die Reduktion der Legionellen-Konzentration infolge einer Ozonung in Trinkwasser oder destilliertem Wasser. (EDELSTEIN et al., 1982; POPE et al., 1984; DOMINGUE et al., 1988; JACANGELO et al., 2002). LI et al. (2017) führten eine kinetische Analyse zur Inaktivierung von Legionellen mittels Ozon in Abwasser durch. Die Ergebnisse ihrer Untersuchungen weisen auf eine Beziehung zwischen der Ozonkonzentration, der Keimkonzentration und dem CSB-Gehalt des Abwassers hin. Aktuelle Forschungsergebnisse lieferten in Deutschland insbesondere die Arbeiten rund um die Kläranlage Warstein. Die Eigenschaften von Ozon als Desinfektionsmittel legen die Vermutung nahe, dass Ozon effektiv zur Reduktion von Legionellen, möglichen Wirten und Biofilmen einsetzbar ist. Offene Fragestellungen für die Kontrolle von Legionellen in Abwasser sind jedoch insbesondere der Einfluss von Ozon auf die Parameter, die ein Überleben von Legionellen im Rahmen einer Desinfektion begünstigen. Hierzu zählen unter anderem assoziierte Mikroorganismen, die Legionellen Schutz bieten, wie z.B. Amöben, aber auch Biofilme, die Temperatur und organische Hintergrundbelastung.

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die wirtschaftliche Umsetzung eines Verfahrens im Vergleich zu Konkurrenzprozessen ist ausschlaggebend für seine Eignung als großtechnische Behandlungsmaßnahme in der Abwasserreinigung. Die aufzuwendenden Kosten setzen sich aus Investitions- und den Betriebskosten zusammen. In Anlehnung an vorangegangene Forschungsprojekte (ABEGGLEN UND SIEGRIST, 2012; TÜRK et al., 2013; ARGE, 2014) werden die hier ermittelten Ozondosierungen zur gleichzeitigen Elimination von Spurenstoffen und Keimen monetär bewertet. Die Betriebsdaten beziehen sich auf Literaturangaben und Kalkulationen der relevanten Kategorien der Investitions- und Betriebskosten.

Die folgenden Fälle sind Bestandteil der Betrachtungen und die Ergebnisse für eine Kläranlage sind in diesem Kurzbericht beispielhaft dargestellt:

- A) ohne Investitionsförderung; Ozondosis von 4 mg_{O₃}/l,
- B) ohne Investitionsförderung; Ozondosis von 6 mg_{O₃}/l; Vollstrombehandlung,
- C) mit Investitionsförderung; Ozondosis von 4 mg_{O₃}/l,
- D) mit Investitionsförderung; Ozondosis von 6 mg_{O₃}/l; Vollstrombehandlung.

Anhand der Betrachtungen der Varianten A bis D werden die Kosten der Ozonung zur Spurenstoffelimination (Varianten A und C) sowie der Ozonung zur gleichzeitigen Spurenstoffelimination und Desinfektion betrachtet (Varianten B und D). Für den Vergleich der Varianten werden die spezifischen Investitions- und Betriebskosten pro behandeltem Kubikmeter Abwasser und pro angeschlossene Einwohnerwerte betrachtet. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der Varianten A bis D für die Kläranlage Aachen-Soers.

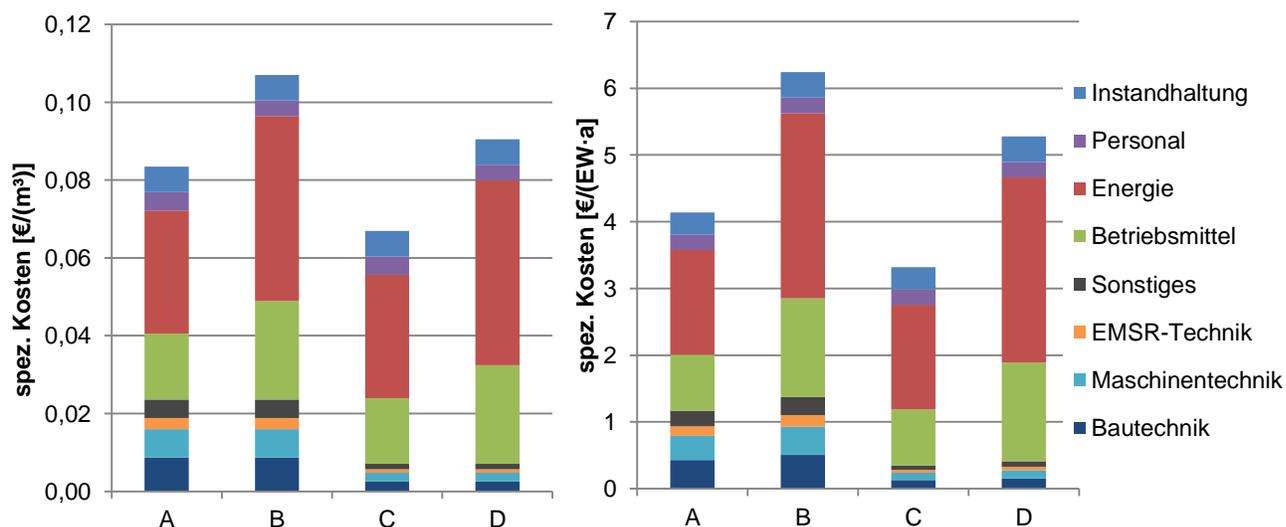


Abbildung 7: Spezifische Kosten pro m³ behandeltem Abwasser (links) und pro angeschlossenem Einwohnerwert (rechts) für die Ertüchtigung der KA Aachen-Soers mit einer Ozonung

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Eine erhöhte Dosierung beeinflusst die Kosten durch die eingesetzten Betriebsmittel und die erhöhten Energieverbräuche. Eine Vergrößerung des zu behandelnden Abwasservolumenstroms geht mit einer Erhöhung der Investitionskosten sowie der Betriebskosten einher. Für die reine Spurenstoffelimination ohne Investitionsförderung (Variante A) berechnen sich die Mehrkosten pro Kubikmeter Abwasser zu ca. 0,08 €/m³ und mit Investitionsförderung (Variante C) zu ca. 0,07 €/m³. Die Auslegung der Ozonung für Spurenstoffelimination und Desinfektion verursacht Mehrkosten von ca. 0,11 €/m³ ohne Investitionsförderung (Variante B) und ca. 0,09 €/m³ mit Investitionsförderung (Variante D). Daraus folgt eine Kostensteigerung gegenüber der alleinigen Spurenstoffelimination von ca. 0,025 €/m³. Der größte Einflussfaktor, der zu einer deutlichen Erhöhung der einwohnerspezifischen Kosten führt, ist die Erhöhung der Ozondosierung. Eine Änderung der des behandelten Volumenstroms hat dagegen einen deutlich geringeren Einfluss.

Die Ozonung wird in der Regel als Verfahren zur Spurenstoffelimination betrachtet und mit Aktivkohleverfahren verglichen. Im Rahmen von Machbarkeitsstudien wurden für verschiedene Kläranlagen die Kosten der Verfahren zur weitergehenden Abwasserreinigung abgeschätzt. Für die Ozonung zur Spurenstoffelimination ergeben sich spezifische Jahreskosten pro Kubikmeter behandelten Abwassers von ca. 0,08 bis 0,19 €/m³. Für die PAK-Filtration werden vergleichbare Kosten im Bereich von 0,09 bis 0,19 €/m³ und für die GAK Filtration im Bereich von 0,12 bis 0,17 €/m³ angegeben. Die Ozonung weist gegenüber dem Einsatz von Aktivkohle den Vorteil auf, dass neben der Spurenstoffelimination auch eine Keimreduktion erzielt werden kann. Zur Erfüllung der gleichen Zielstellung sind gegenüber einer entsprechend ausgelegten Ozonung beispielsweise Kombinationen der Aktivkohleverfahren und der UV-Bestrahlung notwendig. Im Gegensatz zu den Aktivkohleverfahren wird im Rahmen der UV-Bestrahlung eine Desinfektion erreicht. Kosten für die Keimreduktion mittels UV-Bestrahlung werden unter anderem im Merkblatt der DWA M 205 (2013) je nach Größe der Kläranlage zwischen 0,03 und 0,1 €/m³ für einen halbjährlichen und zwischen 0,02 und 0,06 €/m³ hochgerechnet auf einen ganzjährigen Betrieb angegeben (MÜLLER et al., 2009). Damit liegen die geschätzten Kosten der UV-Bestrahlung etwas unterhalb der Kosten der Verfahren für die Spurenstoffelimination. Im Einzelfall muss abgeschätzt werden, ob die Kosten eines weiteren Verfahrens, z.B. der UV-Bestrahlung zur Desinfektion günstiger sind, als die Umrüstung der Ozonung mit dem gleichzeitigen Ziel der Spurenstoffelimination und Desinfektion.

Bei Erfordernis einer weitergehenden Reinigungsstufe mit dem Ziel zur Desinfektion und/oder Spurenstoffelimination sind somit im Vorfeld orientierende Untersuchungen mit dem jeweiligen Abwasser durchzuführen und die Kosten entsprechend abzuschätzen. Bei der Ermittlung der notwendigen Ozondosis darf die Transformationsproduktbildung nicht außer Acht gelassen werden. Diese muss ebenfalls mit untersucht werden, da erhöhte Ozondosierungen nicht nur erhöh-

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

te Kosten, sondern auch eine erhöhte Bildung von Transformationsprodukten zur Folge haben kann (vgl. BÄHR et al. 2004).

7 Zusammenfassung

Die Ozonung wird derzeit zur Elimination von Spurenstoffen auf Kläranlagen erforscht und eingesetzt. In der Trinkwasseraufbereitung wird die Ozonung dagegen seit vielen Jahren erfolgreich zur Desinfektion von Trinkwasser eingesetzt. Demzufolge stellt sich die Frage, welche Desinfektionsleistung bzw. Keimreduktion infolge der Ozonung im Rahmen der Abwasserbehandlung zu erwarten ist bzw. welche Unterschiede die optimalen Betriebsbedingungen einer Ozonung mit dem Ziel der Spurenstoffelimination respektive dem Ziel der Keimreduktion aufweisen.

Bislang wurden Untersuchungen zur Keimreduktion durch die Ozonung von Abwasser vorrangig als Begleituntersuchungen zur Spurenstoffelimination durchgeführt (vgl. SCHAAR et al., 2011; ARGE, 2014; ABEGGLEN et al., 2009). Diese ergaben, dass eine Reduktion der Keime um ca. 1 bis 2 log-Stufen infolge der Spurenstoffelimination erfolgt; jedoch wurde keine Optimierung der Ozonung mit dem Ziel der Keimreduktion vorgenommen. Die Auswertung von Literaturdaten zeigt, dass eine Übertragung der Ergebnisse aus dem Trinkwasserbereich auf den Abwasserbereich nicht zielführend ist. Im Gegensatz zur Trinkwasseraufbereitung kann beispielsweise das Überwachungskonzept, das ct-Konzept, in der Abwasserreinigung nicht angewendet werden. Daher wurden in diesem Projekt Untersuchungen durchgeführt, die dazu dienen, optimale Einstellungen für die Ozonung von Abwasser mit dem Ziel der Keimreduktion sowie dem Ziel der simultanen Spurenstoffelimination und Keimreduktion zu ermitteln.

Innerhalb des Projekts wurden sowohl systematische Versuche zum Einfluss der Reaktionszeit als auch zum Einfluss der Ozondosis auf die Keimreduktion durchgeführt. Es lässt sich festhalten, dass die Reaktionszeit einen nur untergeordneten Einfluss hat. Für die hier gewählten Ozondosierungen und die Aufenthaltszeiten von ca. 7 min (nach der ersten Säule und einem Volumenstrom von 90 l/h) bis ca. 25 min (nach der zweiten Säule und einem Volumenstrom von 50 l/h) konnte keine Abhängigkeit der Keimreduktion von der Reaktionszeit festgestellt werden. Die maximale Keimreduktion wurde bereits nach 7 min erreicht. Gleichzeitig wurde beobachtet, dass das Vorliegen von freiem Ozon in geringen Konzentrationen keine weitere Keimreduktion hervorruft. Obwohl im Anschluss an den ersten Reaktor Ozon im Abwasser vorlag (bis zu 0,21 mg/l) wurde keine weitere Keimreduktion beobachtet. Diese Beobachtungen konnten auch durch Daten aus der Literatur bestätigt werden. Die notwendige Aufenthaltszeit hängt somit insbesondere vom Zehrungspotenzial des Abwassers ab, da der Austrag von im Abwasser gelösten Ozon in die Umwelt vermieden werden sollte, jedoch nicht von der notwendigen Zeit zur Reaktion von Mikroorganismen mit Ozon.

Zusammenfassung

Als weiterer Verfahrensparameter wurden Versuche zum Einfluss der Ozondosis angestellt. Hier zeigte sich, dass für alle untersuchten Bakterien ein Zusammenhang zwischen der Ozondosierung und der Reduktion der Keimkonzentration besteht. Eine Erhöhung der Ozondosis führt zu einer vermehrten Keimreduktion. Die Konzentrationen der coliformen Bakterien und der *E. coli* im Abwasser wurden mit Ozondosierungen ab 6 mg_{O₃}/l bis unter die Bestimmungsgrenze reduziert. Clostridien erwiesen sich als sehr persistente Bakterien, wenngleich eine klare Aussage bezüglich des Reduktionsgrades dadurch erschwert wurde, dass Clostridien bereits im Zulauf der Ozonung in sehr geringen Konzentrationen vorhanden waren.

Hinsichtlich der Keimreduktion konnten aufgrund teilweise starker Schwankungen der Eliminationsleistung an den verschiedenen Tagen keine funktionellen Dosis-Wirkungsbeziehungen aufgestellt werden. Durch den Bezug der Keimreduktion auf die spezifische Ozondosis oder die relative SAK₂₅₄-Abnahme (ΔSAK_{254}) wurde für beispielsweise *E. coli* und die coliformen Bakterien ein deutlich stärkerer Zusammenhang gefunden. Jedoch konnte innerhalb dieser Untersuchungen kein funktioneller Zusammenhang berechnet werden. Generell weist eine zunehmende spezifische Ozondosis bzw. ein zunehmender ΔSAK_{254} auf eine stärkere Keimreduktion hin. Die Analyse des Abwasser auf Viren zeigte, dass diese nicht oder nur sporadisch im Abwasser nachgewiesen werden konnten. Entsprechend ist eine allgemeine Aussage zur Wirksamkeit der Ozonung hinsichtlich der Reduktion von Viren nicht möglich. Das Vorkommen und Verhalten von Legionellen in Abwasser wurde mittels einer Literaturrecherche erfasst und Reduktionsergebnisse aus dem Trinkwasserbereich angebracht. Die Reduktion von Legionellen durch den Einsatz einer Ozonung im Bereich der Abwasserreinigung konnte jedoch mit diesen Ergebnissen innerhalb dieses Projekts nicht abgeschätzt werden.

Beim Vergleich der Ozonung mit dem Ziel der Desinfektion und dem Ziel der Spurenstoffelimination ist diesen Untersuchungen zufolge keine Anpassung der Reaktionszeit erforderlich. Jedoch sollte die Ozonung mit dem Ziel der Keimreduktion auf eine Vollstrombehandlung ausgelegt werden, wohingegen die Ozonung mit dem Ziel der Spurenstoffelimination häufig auf $Q_{T,max}$ oder eine Behandlung von 80 % der mittleren Jahreswassermenge ausgelegt wird. Dadurch ergeben sich Änderungen der Gesamtinvestitionen bzw. der spezifischen Invest-Kosten pro Einwohner(wert). Inwiefern eine Anpassung der Ozondosis für die Keimreduktion von Abwasser erfolgt, muss im Einzelfall anhand der jeweils relevanten Parameter festgestellt werden. Eine Erhöhung der Ozondosis hat einen Anstieg der Betriebsmittelkosten und der Energiekosten zur Folge, weshalb die Kosten stark von der notwendigen Ozondosis abhängen. Daher muss im Einzelfall geprüft werden, ob die Ozonung zur Desinfektion oder eine Verfahrenskombination aus einem separaten Verfahren zur Spurenstoffelimination und einem Verfahren zur Desinfektion wirtschaftlicher sind. Im Rahmen dieses Projekts wurden keine ökotoxikologischen Potenziale infolge kritischer Nebenprodukte im behandelten Abwasser gefunden. Bromat wurde einmalig mit

Zusammenfassung

einer Konzentration von 5 $\mu\text{g/l}$ im Ablauf der Ozonung nachgewiesen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass in Abhängigkeit der Abwasserzusammensetzung infolge einer für das Ziel der Keimreduktion erhöhten Ozondosis die Konzentration des gebildeten Bromats ansteigen kann und dies als limitierender Faktor, neben der Wirtschaftlichkeit, für eine Entscheidung des Verfahrens in Betracht gezogen werden muss.

8 Literatur

ABEGGLEN, C., ESCHER, B., HOLLENDER, J., KOEPKE, S., ORT, C., PETER, A., SIEGRIST, H., VON GUNTEN, U., ZIMMERMANN, S., KOCH, M., NIEDERHAUSER, P., SCHÄRER, M., BRAUN, C., GÄLLI, R., JUNGHANS, M., BROCKER, S., MOSER, R. UND RENSCH, D. (2009): Ozonung von gereinigtem Abwasser. Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf. Studie der Eawag im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU und des AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich.

ABEGGLEN C., SIEGRIST H. 2012 (Hrsg.) (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Hg. v. BUNDESAMT FÜR UMWELT. Bern (Umwelt-Wissen Nr. 1214).

ARGE (2014): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen. Abschlussbericht zur Phase 2 der "Arbeitsgemeinschaft Spurenstoffe NRW, Teilprojekt 6" (Arge)“, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV), Vergabenummer 08/0581.1.

ALTMANN, J.; RUHL, A.S., ZIETZSCHMANN, F., JEKEL, M. (2014): Direct comparison of ozonation and adsorption onto powdered activated carbon for micropollutant removal in advanced wastewater treatment. In: Water Research, Volume 55, S. 185 – 193.

ANTONIOU, M. G., HEY, G., RODRÍGUEZ VEGA, S., SPILIOPOULOU, A., FICK, J., TYSKLIND, M. ET AL. (2013): Required ozone doses for removing pharmaceuticals from wastewater effluents. Science of The Total Environment. 456-457, S. 42–49. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.03.072.

BAHR, C., ERNST, M., JEKEL, M., HEINZMANN, B. UND RIED, F., LUCK, A. (2007): Pilotuntersuchungen zur kombinierten oxidativ-biologischen Behandlung von Klärwerksabläufen für die Entfernung von organischen Spuren- und Wirkstoffen und zur Desinfektion - PILOTOX. Berlin: Schriftenreihe Kompetenzzentrum Wasser Berlin Band 5.

DOMINGUE, E. L., TUNDALL, R. L., MAYBERRY, W. R., PANCORBO, O. C. (1988): Effects of three oxidizing biocides on Legionella pneumophila Serogroup 1. Appl. Environ. Microbiol., 54:3:741-747.

DWA-M 205 (2013): Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef.

EDELSTEIN, P., WHITTAKER, R., KREILING, R., HOWELL, C. (1982): Efficacy of ozone in eradication of *Legionella pneumophila* from hospital plumbing fixtures. *Appl. Environ. Microbiol.*, 44:6:1330-1334.

EU-Richtlinie 2006/7/EG: RICHTLINIE 2006/7/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Februar 2006 über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG.

EXPERTENKOMMISSION LEGIONELLEN (2015): Bericht der Expertenkommission Legionellen. Edited by MKULNV NRW - Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz NRW. Düsseldorf.

FINCH, G. R., UND SMITH, D. (1990): Evaluation of Empirical Process Design Relationships for Ozone Disinfection of Water and Wastewater. *Ozone Science and Engineering* (12), S. 157–175, Zugriff am: 17.02.2015.

FONG, T.-T., PHANIKUMAR, M. S., XAGORARAKI, I., ROSE, J. B. (2010): Quantitative Detection of Human Adenoviruses in Wastewater and Combined Sewer Overflows Influencing a Michigan River. *Applied and Environmental Microbiology*. 76 (3), S. 715–723. DOI: 10.1128/AEM.01316-09.

FRANCY, D. S., STELZER, E. A., BUSHON, R. N., BRADY, A. M., WILLISTON, A. G., RIDDELL, K. R. ET AL. (2012): Comparative effectiveness of membrane bioreactors, conventional secondary treatment, and chlorine and UV disinfection to remove microorganisms from municipal wastewaters. *Water Research*. 46 (13), S. 4164–4178. DOI: 10.1016/j.watres.2012.04.044.

GAMAGE S., GERRITY, D., PISARENKO, A.N., WERT, E.C., SNYDER, A.S. (2013): Evaluation of Process Control Alternatives for the Inactivation of *Escherichia Coli*, MS2 Bacteriophage, and *Bacillus subtilis* Spores during Wastewater Ozonation. *Ozone Science and Engineering* (35), S. 501–513, Zugriff am: 02.01.2015.

GASSE, J. (2009): Quantifizierung der Emissionen aus Abwasseranlagen und deren Auswirkungen auf die hygienische Qualität von Fließgewässern. Dissertation Stuttgart.

GERRITY, D., GAMAGE, S., JONES, D., KORSHIN, G. V., LEE, Y., PISARENKO, A. ET AL. (2012): Development of surrogate correlation models to predict trace organic contaminant oxidation and microbial inactivation during ozonation. *Water Research*. 46 (19), S. 6257–6272. DOI: 10.1016/j.watres.2012.08.037.

GROETTKER, M.; HOLZAPFEL, I.; KRAUSE, N. UND STRESIUS, I. (2008): Verbesserung und Sicherstellung der Badegewässerqualität im Kreis Rendsburg-Eckernförde. INTERREG IIIA. Lübeck.

JACANGELO, J. G., PATANIA, N. L., TRUSELL, R. R. (2002): Inactivation of waterborne emerging pathogens by selected disinfectants. American Water Works Association (AWWWA, Denver, USA).

JANEX, M.L.; SAVOYE, P.; ROUSTAN, M.; DO-QUANG, Z.; LAINÉ, J.M; LAZAROVA, V. (2000): Wastewater Disinfection by Ozone: Influence of Water Quality and Kinetics Modeling. *Ozone: Science & Engineering*, 22(2), 113-121.

JEKEL, M., ALTMANN, J., RUHL, A., S., SPERLICH, A., SCHALLER, J., GNIRSS, R., MIEHE, U., STAPF, M., REMY, C., MUTZ, D. (2016): Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken. Abschlussbericht. Projektnummer: 11325UEPII/2.

KISTEMANN, T., KOCH, C., HERBST, S., RECHENBURG, A., EXNER, M. (2001): Untersuchungen zur mikrobiellen Fließgewässerbelastung durch Kläranlagen am Beispiel der Swist („Swist I“). Abschlussbericht, MUNLV NRW.

KOMPETENZZENTRUM MIKROSCHADSTOFFE.NRW (2016): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. 2. überarbeitete Auflage.

KUSNETSOV, J., NEUVONEN, L. K., KORPIO, T., ULDUM, S. A., MENTULA, S., PUTUS, T., TRAN MINH, N. N., MARTIMO, K. P. (2010): Two Legionnaires' disease cases associated with industrial waste water treatment plants: a case report. *BMC Infect Dis*, 10 343.

LEE, Y., GERRITY, D., LEE, M., BOGEAT, A. E., SALHI, E., GAMAGE, S. ET AL. (2013): Prediction of Micropollutant Elimination during Ozonation of Municipal Wastewater Effluents: Use of Kinetic and Water Specific Information. *Environmental Science & Technology*. 47 (11), S. 5872–5881. DOI: 10.1021/es400781r.

LI, J., LI, K., ZHOU, Y., LI, X., TAO, T. (2017): Kinetic analysis of Legionella inactivation using ozone in wastewater, *Chemosphere* 168, 630-637.

LUCENA, F., DURAN, A. E., MORON, A., CALDERON, E., CAMPOS, C., GANTZER, C. ET AL. (2004): Reduction of bacterial indicators and bacteriophages infecting faecal bacteria in primary and secondary wastewater treatments. *Journal of Applied Microbiology*. 97 (5), S. 1069–1076. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2004.02397.x.

MANDILARA, G. D., SMETI, E. M., MAVRIDOU, A. T., LAMBIRI, M. P., VATOPOULOS, A. C., RIGAS, F. P. (2006): Correlation between bacterial indicators and bacteriophages in sewage and sludge. *FEMS Microbiology Letters*. 263 (1), S. 119–126. DOI: 10.1111/j.1574-6968.2006.00414.x.

MKULNV NRW (2017): Fachinformationssystem ELWAS - Elektronischen wasserwirtschaftlichen Verbundsystems für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW. Überwachungsergebnisse nach § 120 Landeswassergesetz (LWG). Edited by MKULNV NRW - Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz NRW. Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW). Düsseldorf. Available online at <http://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.jsf>, checked on 17/07/2017.

NGUYEN, T. M., ILEF, D., JARRAUD, S., ROULI, L., CAMPESE, C., CHE, D., HAEGHEBAERT, S., GANIAYRE, F., MARCEL, F., ETIENNE, J., DESENCLOS, J. C. (2006): A community-wide outbreak of legionnaires disease linked to industrial cooling towers – how far can contaminated aerosols spread? *J Infect Dis.* 193 (1), 102-111.

PARASKEVA, P., GRAHAM, N. J. D. (2002): Ozonation of municipal wastewater effluents. *Water Environmental Research*, 76(6), 569-581.

POPE, D. H., EICHLER, L. W., COATES, T. F., KRAMER, J. F., SORACCO, R. J. (1984): The Effect of Ozone on *Legionella pneumophila* and Other Bacterial Populations in Cooling Towers, *Current Microbiology*, Vol. 10, 89-94.

SAVOYE, P., JANEX, M. L., LAZAROVA, V. (2001): Wastewater disinfection by low-pressure UV and ozone: a design approach based on water quality. *Water Science & Technology* (43.10), S. 163–171, Zugriff am: 04.03.2015.

SCHAAR, H., KREUZINGER, N., KNASMÜLLER, S., FERK, F., MIŠIK, M., SOMMER, R., SCHÜRHAGL, R., GRILLITSCH, B., ALTMANN, D., MÖSTL, E., BARTEL, C. (2011): Endbericht zum Forschungsvorhaben "KomOzon - Technische Umsetzung und Implementierung einer Ozonungsstufe für nach dem Stand der Technik gereinigtes kommunales Abwasser. Heranführung an den Stand der Technik.". Herausgegeben vom Lebensministerium, Projektnummer A601819.

SCHAAR, H., SOMMER, R., SCHÜRHAGEL, R., YILLIA, P. AND KREUZINGER, N. (2013): Microorganism inactivation by an ozonation step optimized for micropollutant removal from tertiary effluent. *Water Science & Technology* (68.2), S. 311–318, Zugriff am: 17.02.2015.

SCHNEIDER, K., NOGUERIA, R., ROSENWINKEL, K.-H. (2015): Legionellenbelastung im Abwasser - Vorkommen und Maßnahmen zur Reduzierung, 48. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, 15.04. – 17.04.2015, Aachen.

SCHUMACHER, J. (2006): Ozonung zur weitergehenden Aufbereitung kommunaler Kläranlagenabläufe. Dissertation. Technische Universität Berlin.

SIMMONS, F. J., KUO, D. H.-W., XAGORARAKI, I. (2011): Removal of human enteric viruses by a full-scale membrane bioreactor during municipal wastewater processing. *Water Research*. 45 (9), S. 2739–2750. DOI: 10.1016/j.watres.2011.02.001.

TERNES T.A., STUBER J., HERRMANN J., MCDOWELL D., RIED A., KAMPMANN M., TEISER B. (2003): Ozonation: a tool for removal of pharmaceuticals, contrast media and musk fragrances from wastewater? *Water Research* 37, 1976–1982.

TYRRELL, S., RIPPEY, S.R. AND WATKINS, W.D. (1995): Inactivation of bacterial and viral indicators in secondary sewage effluents, using chlorine and ozone. *Water Research*. 29 (11), S. 2483–2490. DOI: 10.1016/0043-1354(95)00103-R.

U.S. Environmental Protection Agency (1999): *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual*, USEPA, Office of Water, Washington DC, USA.

VON SONNTAG, C., VON GUNTEN, U. (2012): *Chemistry of ozone in water and wastewater treatment*. IWA publishing. London, New York.

XU, P., JANEX, M.-L., SAVOYE, P., COCKX, A., LAZAROVA, V. (2002): Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research*. 36 (4), S. 1043–1055. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00298-6.

ZIMMERMANN, S. G., WITTENWILER, M., HOLLENDER, J., KRAUSS, M., ORT, C., SIEGRIST, H., GUNTEN, U. v. (2011): Kinetic assessment and modeling of an ozonation step for full-scale municipal wastewater treatment: Micropollutant oxidation, by-product formation and disinfection. *Water Research*. 45 (2), S. 605–617. DOI: 10.1016/j.watres.2010.07.080.