

**Kurzfassung des Erläuterungsberichts zur Pilotstudie und
der Verlängerungsphase des Projektes:**

**„Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der
Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer
Spurenstoffe“**



Erläuterungsbericht der Stadt Hamminkeln
an die

Bezirksregierung
Düsseldorf



Ort, Datum

Bernd Romanski
Bürgermeister

Bernhard Payer
Vorstandsbereichsleiter



Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe

Projektbezeichnung: **Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe**

Antragssteller:



Stadt Hamminkeln
Brüner Str. 9
46499 Hamminkeln

Tel.: +49 2852 88 0
E-Mail: info@hamminkeln.de

Die Stadt Hamminkeln ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts. Sie wird vertreten durch den Bürgermeister
Bernd Romanski.

Projektbearbeitung:



USONiQ Technologies GmbH
Dorfstr. 59
8126 Zumikon
Schweiz

Wolf Neumann
Tel.: + 41799348456
E-Mail: wolf.neumann@USONiQ.com



Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)
Bliersheimer Str. 58-60
47229 Duisburg

Dr. rer. nat. Jochen Türk
Andrea Börgers
Tel.: 02065 418 179 oder 157
E-Mail: tuerk@iuta.de
boergers@iuta.de

Projektlaufzeit: 01.08.2020 - 31.12.2022



*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Pilotvorhabens wurde zur Untersuchung der innovativen USONiQ-Ozonung, basierend auf einer Ultraschallbehandlung und dem OptimiXer® als Gaseintragssystem, eine Pilotanlage (USO2020) im Ablauf der Nachklärung auf der ZKA Hamminkeln installiert. Während der Ultraschall Feststoff-Agglomerate auflöst und gleichzeitig zusätzliche Hydroxyl-Radikale erzeugt, ermöglicht der OptimiXer® einen effizienteren Ozoneintrag als konventionelle Eintragssysteme über Diffusoren oder Pumpe-Injektor-Systeme. Diese Kombination ermöglicht somit einen Inline-Prozess, der sich durch verringerte Reaktionszeiten sowie einen geringeren Bedarf an Ozon für vergleichbare Eliminationsleistungen auszeichnet. Der gesamte Prozess erfolgt im Gegensatz zur herkömmlichen Ozonung nicht in Reaktionsbecken, sondern in einem abgeschlossen, sehr kompakten Rohrreaktor.

Nach Inbetriebnahme und ersten Tests erfolgte beim großtechnischen Versuchsbetrieb mit der USO2020-Pilotanlage der Fa. USONiQ Technologies GmbH die Behandlung von etwa 10-20% des Kläranlagenablaufs. In einer abschließenden Versuchsphase konnte die Robustheit und deren einfache Bedienbarkeit im Dauerbetrieb mit dem Betriebspersonal der ZKA Hamminkeln erfolgreich demonstriert werden.

Die Bewertung der erweiterten Abwasserreinigung zur Spurenstoffelimination erfolgte entsprechend den Empfehlungen des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe NRW (KOM-M.NRW) anhand einer mittleren 80%igen Elimination von sechs Indikatorsubstanzen. Das Reinigungsziel wurde bereits ab einer spezifischen Ozondosis von 0,24 mg_{O3}/mg_{DOC} stabil erreicht. Die Elimination weiterer Spurenstoffe sowie der lokalen Farbstoffbelastung aus Einleitungen der Textilindustrie konnten ebenfalls erfolgreich gezeigt werden. Die Qualität der behandelten Abwässer entsprachen der EU-Badegewässerverordnung. Die Ergebnisse zur Desinfektionsleistung zeigen, dass das Projekt neben der Spurenstoffeliminierung eine wichtige Grundlage für Themen gelegt hat, deren Relevanz in Zukunft deutlich steigen wird (z. B. Legionellen, multiresistente Keime sowie weitere pandemiebedingter und gesundheitsrelevanter biologischen Belastungen).

Die Bildung von Transformationsprodukten und deren Entfernung in einer biologischen Nachbehandlung wurden umfangreich untersucht. Es konnten keine relevanten toxischen Effekte nachgewiesen werden. Am Beispiel des assimilierbaren organischen Kohlenstoffs und des Non-Target-Screenings konnte die Reduktion von Transformationsprodukten erfolgreich gezeigt werden. Die Gefahr einer Bromatbildung wurde am Abwasser der ZKA Hamminkeln sowohl mit hohen spezifischen Ozondosen als auch mit einer künstlich erzeugten hohen Bromidausgangskonzentrationen mittels der halbtechnischen Versuchsanlage USO4 untersucht. Beim Einsatz der USONiQ-Ozonung konnte keine relevante Bromatbildung festgestellt werden. Bei Vergleichsuntersuchungen im Labormaßstab (ohne Verwendung der USONiQ-Technologie) wurde jedoch eine relevante Bromatbildung festgestellt. Aus diesem Grund scheint die USONiQ-Technologie somit auch für Abwässer mit hohen Bromidkonzentrationen ein geeignetes oxidatives Verfahren zur gezielten Mikroschadstoffentfernung darzustellen. Eine Untersuchung ist im Bedarfsfall durch mobile Testanlagen auch vor Ort möglich.

Um eine Vergleichbarkeit zu den anderen NRW-Machbarkeitsstudien herstellen zu können und das USONiQ-Verfahren hierin zu integrieren, wurde die Datenbasis der KOM-M.NRW-Vorlage „Betriebsdaten und Kostenermittlung zur Mikroschadstoffelimination“ (2017) benutzt.

Dabei ergaben sich spezifische Abwasserbehandlungskosten von 0,09 €/m³ (davon Betriebskosten: 0,03 €/m³), die unter denen einer klassischen Ozonung für Kläranlagen unter 100.000 Einwohnerwerten lagen.



*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

2 Hintergrund

Organische Spurenstoffe sind aus dem täglichen Leben nicht wegzudenken und finden in vielen Bereichen Verwendung. Durch den Gebrauch von z. B. Haushaltschemikalien oder Pharmazeutika gelangen diese in kommunale Kläranlagen, in welchen diese Stoffe nicht oder nur unzureichend entfernt werden (Lei et al., 2023; Shukla and Ahammad, 2023; Su et al., 2021). Kommunale Kläranlagen nach dem heutigen Stand der Technik stellen somit Punktquellen für den Eintrag von organischen Spurenstoffen in Oberflächengewässer dar (Epelle et al., 2023; Hillenbrand et al., 2014; Kosek et al., 2020). Obwohl die Abwasserreinigung in Deutschland ein sehr hohes Niveau erreicht hat, verfehlen bislang über 80% der Oberflächengewässer die Umweltziele nach Artikel 4 der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).

Darüber hinaus stammen viele Kläranlagen aus den Baujahren 1970 bis 1990. Somit haben diese Anlagen ein Alter erreicht, in dem Reinvestitionen zum Erhalt und Anpassungen an die aktuellen Anforderungen geplant und perspektivisch angegangen werden müssen. Zur langfristigen Sicherung einer hohen Wasserqualität besteht grundsätzlich Handlungsbedarf zur Reduktion der Einträge von Spurenstoffen in Gewässer (BMU, 2022; Hillenbrand, T. et al., 2019; KOM-M.NRW, 2016; UBA, 2018).

Zur Elimination dieser Spurenstoffe haben sich die Ozonung und die Adsorption an Aktivkohle als effizient und wirtschaftlich herausgestellt (Brückner, I. et al., 2018; Itzel et al., 2017; Tuerk et al., 2010). Aus Vorsorgegründen wird derzeit nach der oxidativen Behandlung von Abwasser eine biologische Nachbehandlung empfohlen (Böhler, M. et al., 2017; DWA, 2022, 2014; VSA, 2013).

3 Beschreibung des Projektes

Im Rahmen des Projektes wurde die innovative USONiQ-Technologie, bestehend aus einer Ozonung mit einer speziellen Ozoneinbringung (OptimiXer®) und Ultraschallbehandlung in den Ablauf der ZKA Hamminkeln integriert und hinsichtlich Eliminationsleistung, Anlageneffizienz, Bildung von Transformationsprodukten, Ozon- und Energieverbrauch sowie Wirtschaftlichkeit evaluiert. Dazu sollten die Versuche in Hamminkeln zur realitätsnahen Simulation an einer großtechnischen Anlage durchgeführt werden, um möglichst präzise Voraussagen über die Verfahrensvorteile im Vergleich zu herkömmlicher Ozonung machen zu können. Darüber hinaus wurden Versuche mit einer kleinen USONiQ-Versuchsanlage durchgeführt um z. B. die Entstehung des Transformationsproduktes Bromat bei hohen Konzentrationen von Bromid und hohen spezifischen Ozondosen zu bewerten.

Die Stadt Hamminkeln gehört zur Region Niederrhein und liegt im Einzugsgebiet der Issel als Grenzen überschreitendes Gewässer. Sie besteht aus 7 Ortsteilen mit einer Gesamtfläche von ca. 164 km². Am Standort zwischen Dingden und Loikum betreibt die Stadt eine Zentralkläranlage für die Abwässer der Ortsteile, die über Druckentwässerungsnetze unterschiedlicher Länge angeschlossen sind. Der maximale Mischwasserzufluss Q_M beträgt 250 L/s, die Jahresschmutzwassermenge beträgt 1.500.000 m³ und die Jahresgesamtabwassermenge (Schmutz- + Regenwasser) beträgt ca. 2.000.000 m³. Die Region ist geprägt durch einen relativ hohen Anteil an Industrie und Gewerbe bezogen auf die Kläranlagen-Gesamtkapazität.

Die ZKA Hamminkeln liegt mit einer Ausbaugröße von 48.500 EW im Bereich der Kläranlagengrößenklasse IV. Der Anteil der Abwassermenge der Kläranlage liegt bei > 1/3 des mittleren Niedrigwasserabflusses (MNQ) der Issel.

Die Beschickung der Kläranlage erfolgt nicht im freien Gefälle. Die Fortleitung aus den einzelnen Ortsteilen Hamminkeln, Ringenberg, Dingden, Mehrhoog, Wertherbruch und Loikum zur

*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

Zentralkläranlage erfolgt über Pumpstationen und Druckrohrleitungen. Dadurch kann auch im Trockenwetterfall bei gleichzeitigem Betrieb der Pumpstationen ein recht hoher Zufluss von $Q_{T.h.max} = 200 \text{ L/s}$ entstehen. Umgekehrt gibt es durch den Pumpenbetrieb aber auch gelegentlich mal einen Null-Zufluss. Das Mittel liegt zwischen 50 und 150 L/s.

Bei der USONiQ-Technologie handelt es sich um ein erweitertes Oxidationsverfahren (AOP – advanced oxidation process), welches auf der Abwasserbehandlung mittels Ultraschall (US) und Ozonung basiert. Die Besonderheiten des Kombinationssystems sind:

- Rohrreaktor bestehend aus
 - Ultraschallsegment zur Zerstörung der Feststoff-Agglomerate und erhöhter Erzeugung von Hydroxylradikalen.
 - Gaseintragungssystem über den patentierten OptimiXer®.
 - Weiteres Ultraschallsegment nach der Gaseinbringung
- Die Reaktormodule können je nach Auslegungsbedarf sowohl parallel als auch in Reihe angeordnet werden
- Das USONiQ-Verfahren findet vollkontrolliert im abgeschlossenen Raum (Rohrleitung) statt. Weitere Reaktions- oder Retentionsbecken sind nicht erforderlich.

Eine schematische Darstellung der USONiQ-Ozonung ist in Abbildung 1 zu finden.



Abbildung 1: Schematische Darstellung der USONiQ-Ozonung (Quelle: USONiQ).

3 Projektumfang

Im Rahmen des Projektes wurden zunächst die optimalen Betriebseinstellungen zur 80%igen Elimination der Spurenstoffe ermittelt. Darüber hinaus wurden mit den optimalen Betriebseinstellungen umfangreiche Versuche zur Bewertung der entstandenen Transformationsprodukte durchgeführt. Da nach aktuellem Stand der Technik derzeit eine biologische Nachbehandlung im Anschluss an eine Ozonung erfolgen soll, wurde ein Sandfilter installiert, um die Möglichkeiten der biologischen Nachbehandlung zu evaluieren. Darüber hinaus wurden die Desinfektionsleistung und die Leistungsfähigkeit zur Entfernung der Kolorierung des Abwassers untersucht.

Im Rahmen der Projektverlängerung wurden weitergehende Betrachtungen zur Sammlung von Betriebserfahrungen, wechselnde Witterungsbedingungen und Untersuchungen des Bromatbildungspotenzials auch bei hohen spezifischen Ozondosen und erhöhten Ausgangskonzentrationen der Vorläufersubstanz Bromid durchgeführt. Darüber hinaus erfolgte



*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

ein kontinuierlicher Regelbetrieb der Pilotanlage über einen Zeitraum von 4 Wochen am Stück durch das Personal der ZKA Hamminkeln.

Im Anschluss an alle Versuchsreihen erfolgte eine Bewertung der Ergebnisse und eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der USONiQ-Ozonung.

Die durchgeführten Analysen beinhalteten folgende Parameter: Basisparameter, organische Spurenstoffe, Transformationsprodukte und Biotests. Die Darstellung der Ergebnisse der organischen Spurenstoffe bezieht sich aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die vorgeschlagenen Indikatorparameter des KOM-M.NRW (KOM-M.NRW, 2016)

4 Wesentliche Ergebnisse

Die USONiQ-Ozonung ist in zwei 20 Fuß Containern untergebracht. In Container 1 befinden sich zwei redundant in Reihe geschaltete Rohrreaktoren (Rohrquerschnitt 300 mm) ausgestattet mit jeweils Ultraschall-Resonatoren, dem Ozoneintragssystem (OptimiXer®) und nochmals Ultraschall-Resonatoren. Zur Ozonerzeugung kam ein Ozongenerator der Marke Primozone (Löddeköpinge, Schweden) zum Einsatz, der samt Steuerung und Bedientableau ebenfalls in Container 1 verbaut ist.

Container 2 dient als „Versorgungseinheit“ der Testanlage und beinhaltet mehrere teilweise optionale Elemente wie Steuerung, Pumpe, Kühlung und einen Sauerstofferzeuger. Der Sauerstoffbedarf zur Ozonerzeugung wurde durch mit 300 bar gefüllten Flaschenbündel gedeckt. Neben der Kühlung für den Ozongenerator befindet sich in Container 2 eine Kreislumpumpe, die für Durchflussmengen bis 50 m³/h ausgelegt ist.

In beiden Containern sind Schutzeinrichtungen für das Austreten von Ozon oder Sauerstoff installiert. Diese bestehen aus redundanten Katalysatoren und Sensoren, die im Notfall eine geordnete Abschaltung der Pilotanlage, Alarmsignale und eine Durchlüftung initiieren.

Die Einbindung der USONiQ-Ozonung erfolgte im Ablauf der beiden Nachklärbecken hinter der Zusammenführung der Abwasserströme aus den beiden Straßen. Mittels einer Kreislumpumpe wurde ein Teilstrom der Pilotanlage zugeführt. Der Ablauf des in der USONiQ-Ozonung gereinigten Abwassers erfolgte über eine Freigefälleleitung in den Schönungsteich. Die nachfolgende schematische Darstellung (Abbildung 2) zeigt die Aufstellung der zwei Container zwischen Nachklärung und den Schönungsteichen.

Da in den Versuchen der Pilotstudie nur ein Teilstrom des Abwassers der ZKA Hamminkeln mittels USONiQ-Ozonung behandelt wurde, war die Installation einer auf die Teilmenge des behandelten Abwassers angepassten biologischen Nachbehandlung notwendig. Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein Sandfilter installiert. Dazu wurde neben der Testanlage ein Betonfundament gegossen.

Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe

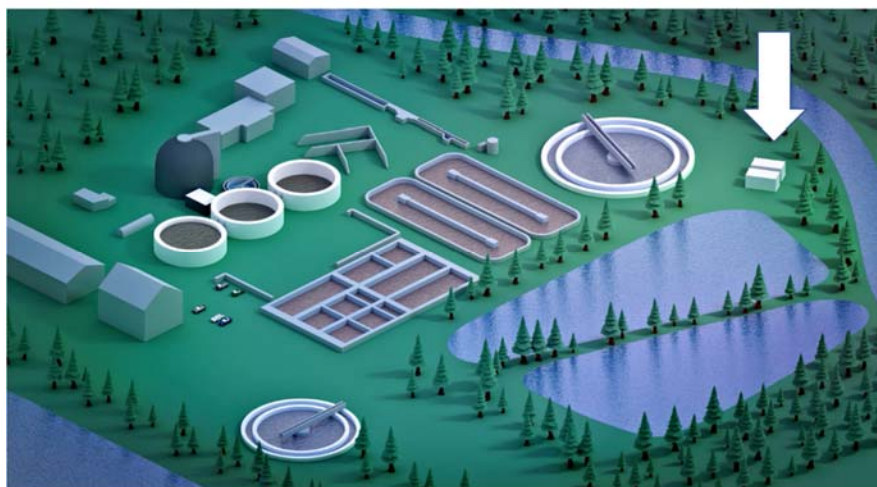


Abbildung 2: Schematische Darstellung der ZKA Hamminkeln mit USONiQ-Ozonung (weißer Pfeil) zwischen Nachklärung und den Schönungsteichen (Quelle: USONiQ).

Insgesamt wurden über den gesamten Versuchszeitraum 16 Probenahmeserien zu verschiedenen Zeiten und unter verschiedenen Zulauf- und Witterungsbedingungen durchgeführt. Anhand dieser Untersuchungen wurde die Median-Konzentration des Ablaufs der ZKA Hamminkeln ermittelt und mit Werten anderer Kläranlagenabläufe verglichen.

Tabelle 1: Vergleich der Median-Ablaufkonzentrationen der ZKA Hamminkeln mit Messwerten aus NRW.

	1H-Benzotriazol c / $\mu\text{g L}^{-1}$	Carbamazepin c / $\mu\text{g L}^{-1}$	Clarithromycin c / $\mu\text{g L}^{-1}$	Diclofenac c / $\mu\text{g L}^{-1}$	Metoprolol c / $\mu\text{g L}^{-1}$	Sulfamethoxazol c / $\mu\text{g L}^{-1}$
UQN nach D4-Liste (4. Zyklus)	10	0,50	0,10	0,05	8,6	0,60
EU UQN Werte (EU Proposal 2022)	-	2,5	0,13	0,04	-	-
Medianwerte Machbarkeitsstudien NRW	4,9	0,91	-	2,2	1,5	0,36
Medianwerte ZKA Hamminkeln (n=16)	2,7	0,44	0,10	3,6	0,79	0,54

Nach der Installation und Inbetriebnahme wurde die Leistungsfähigkeit der USONiQ-Ozonung bei unterschiedlichen Betriebsparametern in mehreren Versuchsreihen ermittelt. Dabei wurde die Ozondosis sukzessive erhöht. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde als Bezugsgröße die spezifische Ozondosis in mg Ozon pro mg DOC verwendet. Die Elimination der weiteren neben den angegebenen relevanten organischen Spurenstoffen durch die Kläranlage wurde im ersten Schritt nicht berücksichtigt.

Für die organischen Spurenstoffe konnten bei verschiedenen spezifischen Ozondosen unterschiedliche Eliminationsleistungen durch die USONiQ-Ozonung beobachtet werden. In der

*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

Regel wurden die leicht mit Ozon oxidierbaren Substanzen bereits bei spezifischen Ozondosen von 0,2 mg_{O3}/mg_{DOC} zu 80% aus dem Kläranlagenablauf eliminiert. Die schwer mit Ozon abbaubaren Substanzen können mit den verwendeten spezifischen Ozondosen von bis zu 0,5 mg_{O3}/mg_{DOC} noch nicht vollständig aus dem ZKA Ablauf eliminiert werden.

Da in NRW zur Bewertung der Eliminationsleistung die mittlere Elimination der 6 KOM.M.NRW Indikatorsubstanzen verwendet wird, wurden diese ebenfalls bei verschiedenen spezifischen Ozondosen berechnet. Die gemittelte Elimination der Indikatorsubstanzen 1H-Benzotriazol, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol ist in Abbildung 3 dargestellt.

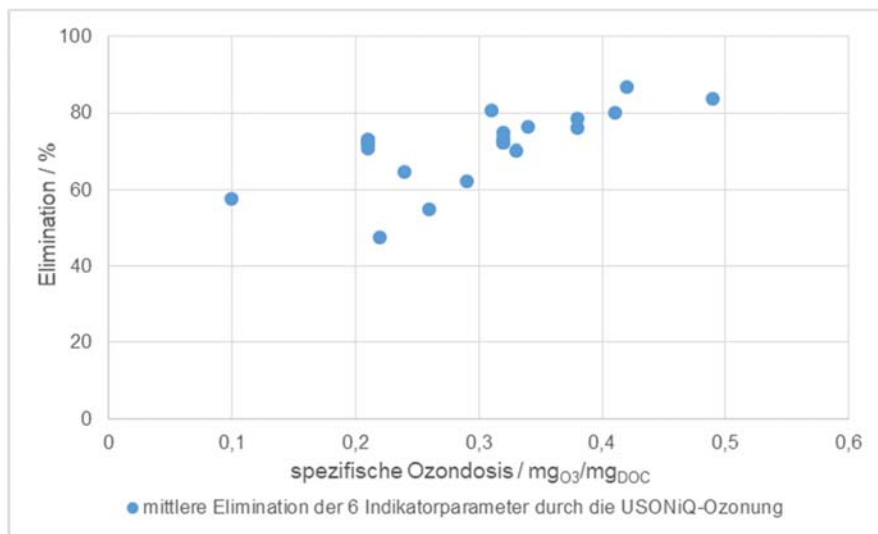


Abbildung 3: Mittlere Elimination der USONiQ-Ozonung für die 6 Indikatorsubstanzen ohne Berücksichtigung der Eliminationsleistung der vorgeschalteten Kläranlage.

Die Daten zeigen, dass die USONiQ-Ozonung allein bereits eine gute, von der spezifischen Ozondosis abhängige Leistungsfähigkeit im Hinblick auf die Elimination von organischen Spurenstoffen besitzt. Ohne Berücksichtigung der von den Wetter-Bedingungen abhängigen Eliminationsleistung der vorgeschalteten Kläranlage wird zwischen 0,3 und 0,4 mg_{O3}/mg_{DOC} ein 80%iger Reinigungseffekt bezogen auf die mittlere Elimination der Indikatorsubstanzen erreicht.

Ein weiteres Ziel war die Ermittlung der optimalen Betriebsparameter zur Sicherstellung einer Elimination von im Mittel 80% der Indikatorsubstanzen. Die geforderte Elimination bezieht sich dabei auf die Betrachtung des Zulaufs zur Kläranlage in Relation zum Ablauf der Kläranlage inkl. der weitergehenden Abwasserbehandlung. Die verwendeten Ozondosen lagen zwischen 2,9 - 5,9 mg_{O3}/L. Unter Einbeziehung des aktuellen DOC-Wertes ergab sich eine spezifische Ozondosis von 0,24 - 0,49 mg_{O3}/mg_{DOC}. Der Durchfluss durch die USONiQ-Ozonung lag bei 33,3 m³/h. In Abbildung 4 ist die mittlere Elimination der Indikatorsubstanzen bei verschiedenen spezifischen Ozondosen beispielhaft dargestellt.

Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe

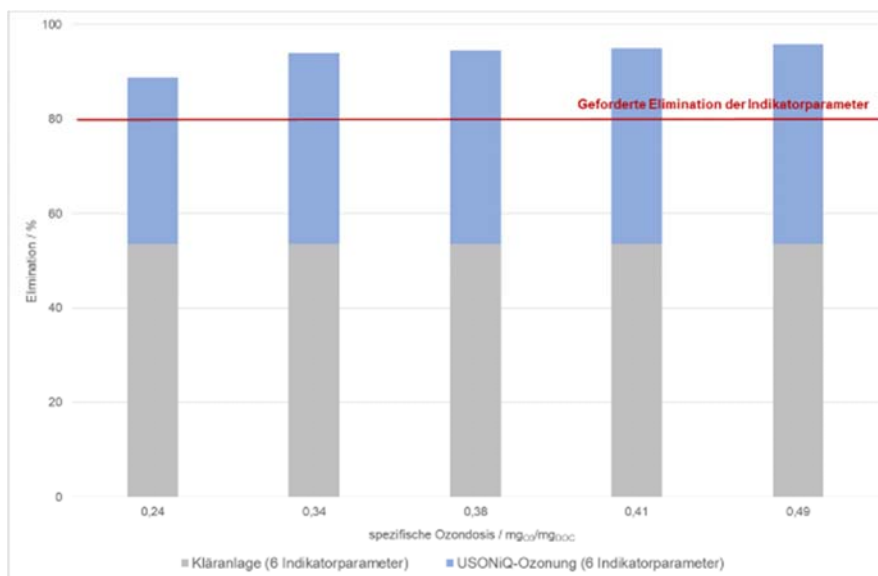


Abbildung 4: Mittelwerte der Elimination der 6 Indikatorsubstanzen über die Kläranlage und die Ozonung bei verschiedenen spezifischen Ozondosen.

Deutlich zu erkennen ist, dass die geforderte 80%ige mittlere Elimination der Indikatorsubstanzen schon bei niedrigen spezifischen Ozondosen von 0,24 mgO₃/mgDOC erreicht werden konnte.

Bei einer Ozonung werden die organischen Spurenstoffe sowie andere organische und anorganische Abwasserinhaltsstoffe durch Ozon und OH-Radikale oxidiert und somit abgebaut. Es entstehen dabei sogenannte Transformationsprodukte (TP). Diese TP (wie Aldehyde, Ketone oder organische Säuren) sind in der Regel polarer und leichter biologisch abbaubar und können zum Teil toxikologisch relevante Wirkungen aufweisen. Im Rahmen der Untersuchungen zu entstehenden Transformationsprodukten wurden spezifische Ozondosen zwischen 0,25 und 0,29 mgO₃/mgDOC betrachtet. Betrachtet wurden Algenhemmung, gentoxische Effekte, der assimilierbare organische Kohlenstoff und hormonelle Wirkungen. Es konnten keine relevanten toxischen Effekte nachgewiesen werden. Zur Bewertung der Wirksamkeit der biologischen Nachbehandlung mittels Sandfilter wurde über diese Untersuchungen hinaus ein Non-Target-Screening (NTS) durchgeführt. Am Beispiel des AOC und des NTS konnte die Reduktion der Transformationsprodukte durch die biologische Nachbehandlung erfolgreich gezeigt werden.

Die Bromatbildung kann die Anwendung einer Ozonung als Verfahrensoption einer erweiterten Abwasserbehandlung zur Spurenstoffelimination limitieren. Das Oekotoxzentrum der Schweiz hat für Bromat ein chronisches Qualitätskriterium für Oberflächengewässer (Umweltqualitätsnorm) von 50 µg/L abgeleitet. Gemäß TrinkwV (2001) gilt für Trinkwasser ein Bromatgrenzwert von 10 µg/L, der bei Gewinnung von Trinkwasser aus dem Vorfluter aus Vorsorgegründen häufig auch als Qualitätskriterium für Kläranlagenabläufe angewandt wird. Die Bildung des Transformationsproduktes Bromat spielte im Abwasser der ZKA Hamminkeln selbst bei hohen spezifischen Ozondosen keine Rolle. Zur Bewertung des Bromatbildungspotentials wurden weitere Versuche mit einer kleinen USONiQ-Versuchsanlage durchgeführt. Dazu wurde Bromid in steigenden Konzentrationen in der Versuchsanlage zudosiert und die spezifische Ozondosis stetig erhöht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe

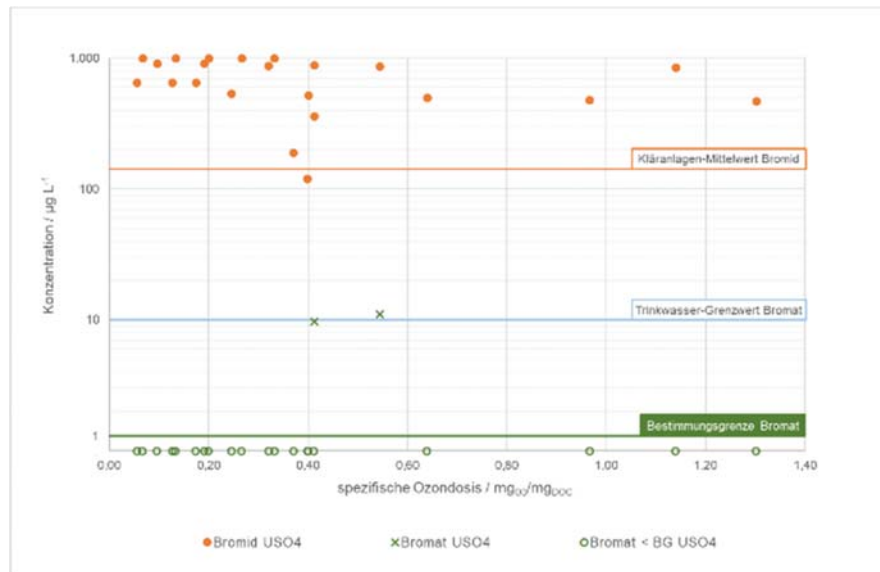


Abbildung 5: Bromatbildung in der Versuchsanlage USO4 der Firma USONiQ bei verschiedenen spezifischen Ozondosen und verschiedenen Ausgangskonzentrationen der Vorläufersubstanz Bromid (y-Achse ist logarithmisch dargestellt).

Anhand von Abbildung 5 war deutlich erkennbar, dass sowohl mit hohen spezifischen Ozondosen als auch bei hohen Bromidausgangskonzentrationen durch die USONiQ-Ozonung keine relevante Bromatbildung beobachtet wurde.

Die Untersuchungen zur Desinfektionsleistung ergaben, dass ab einer spezifischen Ozondosis von 0,33 $\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ für *E. coli* das Bewertungskriterium für eine "gute Qualität" für Binnengewässer erreicht werden konnte (RICHTLINIE 2006/7, 2006). Die Konzentration Intestinaler Enterokokken unterschreitet den Grenzwert ab einer Dosis von 0,24 $\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ (einige Werte liegen unter der Bestimmungsgrenze). Coliforme Bakterien wurden in ihrer Konzentration ebenfalls signifikant reduziert.

Das Abwasser der ZKA Hamminkeln ist durch die ansässige Textilindustrie teilweise stark beeinflusst. In der Regel ist im Ablauf der Kläranlage eine Färbung des Abwassers zu beobachten. Diese Verfärbungen treten unvorhersehbar auf und können vom Personal der Kläranlage bisher nur visuell detektiert werden. Meist handelt es sich um Schübe von kurzer Dauer mit extremen Verfärbungen.

Durch die USONiQ-Ozonung des Kläranlagenablaufs konnte die Kolorierung reduziert werden. In Abbildung 6 ist beispielhaft die Verfärbung über die Abwasserbehandlung der Kläranlage und die USONiQ-Ozonung dargestellt. Der stark gefärbte Zulauf der Kläranlage befindet sich dabei ganz links im Bild. Der Ablauf der Kläranlage, wesentlich schwächer gefärbt, befindet sich in der 2. Flasche von links. Durch die USONiQ-Ozonung bei unterschiedlichen spezifischen Ozondosen konnte die Färbung des Kläranlagenablaufs weiter signifikant reduziert werden.

*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*



Abbildung 6: Abnehmende Färbung einer Abwasserprobe vom Zulauf zur Biologie (linke Flasche) über den Ablauf der Kläranlage (2. Flasche von links) bis hin zum Ablauf der USONiQ-Ozonung (kleine Flaschen mit von links nach rechts steigender spezifischer Ozondosis).

In den abschließenden Untersuchungen konnte eine weitergehende Sammlung von Betriebserfahrungen in einer vier-wöchigen Betriebsphase durch das Personal der ZKA Hamminkeln durchgeführt werden. Dazu sind im ersten Schritt durch die Firma USONiQ verschiedene Schulungsunterlagen erarbeitet worden. Aufgrund des Schichtbetriebes auf der Zentralkläranlage Hamminkeln wurden zwei Gruppen von jeweils fünf Personen geschult. Die gesamte Schulung erstreckte sich über einen Zeitraum von sechs Tagen. Im Anschluss an die Schulung war das Personal der ZKA Hamminkeln in der Lage, die USONiQ-Ozonung komplett selbstständig zu betreiben. Ein Nachsteuerungsbedarf war im Rahmen der Versuchsphase nicht vorhanden.

Zur Revision der Betriebserfahrungen im Umgang mit der USONiQ-Ozonung wurde ein standardisierter Fragebogen für die beteiligten Kläranlagenmitarbeiter vorbereitet, der ausgefüllt und ausgewertet wurde. Die Mitarbeiter der Kläranlage bestätigten zusammenfassend das positive Bild der Pilotanlage im Hinblick auf die zu prüfenden Parameter. Es wurde ein durchgängig gutes bis sehr gutes Ergebnis erzielt. Die Anlage war weitgehend nach vorheriger Einweisung und Beschäftigung mit der Materie selbsterklärend und automatisiert. Besonders die flexible Software-Lösung, die in diesem Fall durch den Hersteller speziell an die örtlichen Gegebenheiten angepasst wurde, hat den störungsfreien Betrieb auch bei wechselnden Witterungsbedingungen sichergestellt. Es ist zu erwarten, dass solche spezifischen Anpassungen auch bei anderen Kläranlagen möglich sein werden.

Der in der ersten Projektphase durchgeführte Betrieb der Pilotanlage erfolgte entweder bei Trocken- oder bei Regenwetter. Im Rahmen der Projektverlängerung wurde darüber hinaus die Reaktionsfähigkeit der USONiQ-Ozonung im Fall von Mischwetter untersucht. Dazu wurde die Steuerung dynamisch an den Volumenstrom des Ablaufs der ZKA Hamminkeln angepasst.

In diesen Untersuchungen wurde die Eliminationsleistung der organischen Spurenstoffe bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe

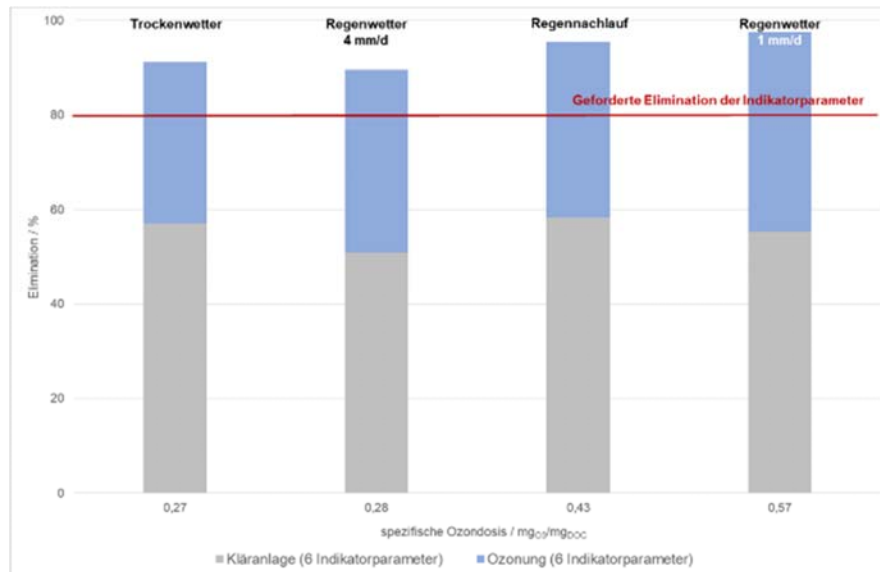


Abbildung 7: Mittelwerte der Elimination der 6 Indikatorsubstanzen über die Kläranlage und die dynamisch gesteuerte Ozonung im kontinuierlichen Betrieb bei verschiedenen spezifischen Ozondosen und verschiedenen Witterungsbedingungen.

Das Ziel der 80%igen Elimination der Indikatorsubstanzen konnte mit der dynamischen Anpassung der USONiQ-Ozonung auch bei verschiedenen Witterungsbedingungen sicher eingehalten werden. Die unterschiedlichen spezifischen Ozondosen ergaben sich durch Regenwetter bzw. Regennachlauf (erhöhte Abwassermenge) bei gleichbleibender Dosierung von Ozon und sinkenden DOC-Werten (Verdünnung durch Regenbeeinflussung).

Es ist zu vermuten, dass bei einem längerfristigen Betrieb die minimale betrachtete spezifische Ozondosis von 0,27 $\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ bei gleichzeitig sicherer Einhaltung der Eliminationsleistung weiter gesenkt werden kann.

Schwerpunkt der hier dargestellten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen war ein Vergleich der USONiQ-Ozonung mit bereits durchgeführten Studien zur herkömmlichen Ozonung, die für den Ozoneintrag Diffusoren und Pumpe-Injektions-Systemen sowie Reaktionsbecken einsetzen. Während des Pilotversuchs mit der großtechnischen USONiQ-Versuchsanlage USO2020 auf der Zentralkläranlage Hamminkeln wurden umfangreiche Messreihen zur Erhebung des Energieverbrauchs der einzelnen Komponenten durchgeführt. Hierbei wurde der Verbrauch an elektrischer Energie für folgende Verbraucherguppen separat erfasst:

- Ozonerzeugung,
- Ultraschall,
- Ozoneintrag (OptimiXer®),
- Steuerung.

Die Verhältnisse des Energiebedarfs der einzelnen Verbraucher ist für den Betrieb mit einem OptimiXer® in Abbildung 8 dargestellt.

Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe

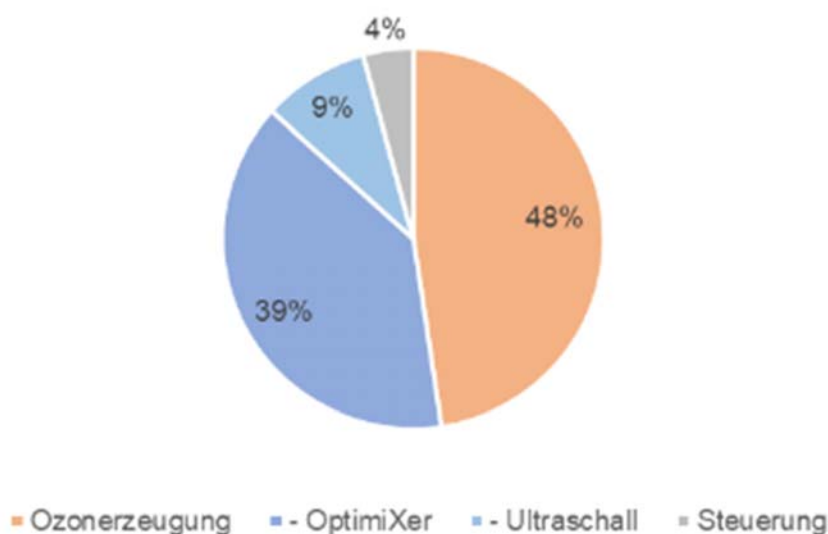


Abbildung 8: Verbraucheranteile der USONiQ-Ozonung bei einem Volumenstrom von 33 m³/h.

Die Kombination aus einer einfachen Gesamtsteuerung der USONiQ-Anlage, einer hohen Anlagen- und Arbeitssicherheit durch den geschlossenen Rohrreaktor und einer sehr hohen Ozoneintragseffizienz, ergibt ein technisch und wirtschaftlich tragfähiges Anlagenkonzept, welches sich durch einen geringen Personalaufwand auszeichnet. Letzterer kann zudem durch vorhandenes Kläranlagen-Personal bewältigt werden. Für die Personalkosten wurde ein Jahresbrutto in Höhe von 50.000 €/a verwendet. Für die Auslegungsgröße der ZKA Hamminkeln wurde ein Personalaufwand von 100 h/a kalkuliert.

Für den Ausbau der 4. Klärstufe auf der ZKA Hamminkeln sind bei einer Ausbaugröße von 55.000 EW in der Basisvariante mit dem USONiQ-Verfahren 10 parallel geschaltete Rohrreaktoren mit jeweils einem Optimixer® vorgesehen.

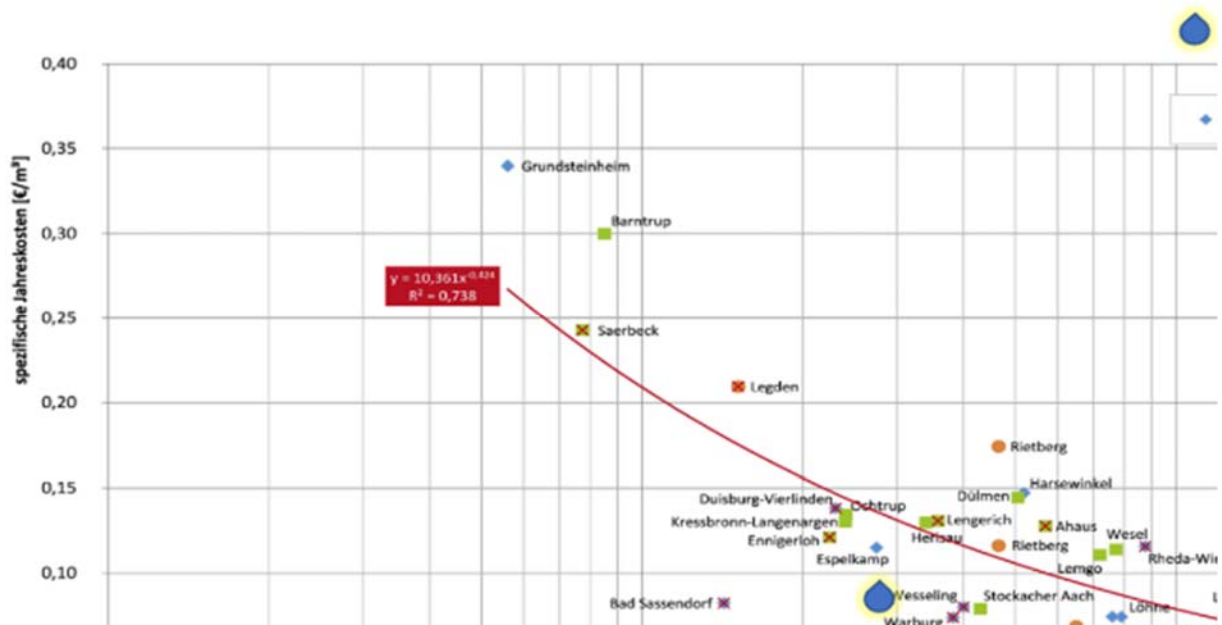
Unter Berücksichtigung der erheblichen Preissteigerungen der letzten Jahre wurden die Erstinvestitionskosten im Jahr 2022 ohne Berücksichtigung weiterer Optimierungen und Umbaumaßnahmen an der ZKA Hamminkeln mit ca. 3,1 Mio. € abgeschätzt.

Basierend auf der vergleichenden Berechnungsmethodik des KOM-M.NRW würde daher für eine Standardausführung der USONiQ-Anlage ein Gesamtinvestitionskostenanteil von 3,44 € pro EW (Basis 55.000 EW) pro Jahr entstehen.

Die spezifischen Jahreskosten für das behandelte Abwasser wurden mit der KOM-M.NRW-Vorlage „Betriebsdaten und Kostenermittlung zur Mikroschadstoffelimination“ (2017) ermittelt. Um eine Vergleichbarkeit zu den anderen NRW-Machbarkeitsstudien herstellen zu können und das USONiQ-Verfahren hierin zu integrieren, wurde die gleiche Datenbasis mit Energiekosten in Höhe von 0,15 €/kWh und Personalkosten in Höhe von 50.000 €/a aus dem Jahr 2017 verwendet.

Ohne Berücksichtigung der Optimierungspotentiale bei den Betriebskosten lagen die spezifischen Abwasserbehandlungskosten der USONiQ-Ozonung mit 0,09 €/m³ unter denen einer klassischen Ozonung für Kläranlagen unter 100.000 Einwohnerwerten (Abbildung 9).

Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe



4 Fazit

Im Rahmen dieser Pilotstudie konnte anhand von Versuchen mit einer kleinen Versuchsanlage (USO4) im Batchbetrieb und einer großtechnischen Versuchsanlage (USO2020) im Durchflussbetrieb belegt werden, dass die Kombination aus Ultraschall und Ozonung der Firma USONiQ ein geeignetes Verfahren zur Eliminierung von Spurenstoffen auf Kläranlagen ist.

Eine mittlere Eliminationsleistung von 80% für die sechs KOM-M.NRW Leitparameter konnte bereits bei relativ geringen spezifischen Ozondosen von 0,24 mg_{O₃}/mg_{DOC} erzielt werden.

Darüber hinaus konnte auf der ZKA Hamminkeln sowohl eine sehr gute Desinfektionsleistung als auch die Dekolorierung des durch Einleitungen aus der Textilindustrie beeinflussten Abwassers gezeigt werden.

Die Bromatbildung spielte im Abwasser der Zentralkläranlage Hamminkeln sowohl bei hohen spezifischen Ozondosen als auch bei Batch-Versuchen mit der USO4-Versuchsanlage bei zusätzlicher Bromidzugabe, keine relevante Rolle. Da die Bromatbildung allerdings spezifisch für jedes einzelne Abwasser, den Abwasserbehandlungsprozess und das verwendete Ozoneintragssystem ist, muss diese ebenso wie die Ozonzehrung für jedes Abwasser einzeln evaluiert werden. Mit der USO4-Versuchsanlage steht hierfür eine halbtechnische mobile Versuchsanlage zur Verfügung, mit der diese Evaluierung entweder vor Ort oder durch eine Anlieferung des Abwassers in 2 - 3 IBC-Containern durchgeführt werden kann.

In den ozonierten Abwässern der ZKA Hamminkeln konnten keine signifikanten toxikologischen Effekte nachgewiesen werden. Am Beispiel des AOC und des Non-Target-Screenings konnte die Reduktion von Transformationsprodukten in einer nachgeschalteten biologischen Reinigung mit dem eingesetzten Sandfilter erfolgreich gezeigt werden.



*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

Darüber hinaus bietet die modulare Bauweise durch den geringen Platzbedarf der USONiQ-Ozonung viele Vorteile gegenüber klassischen Ozonanlagen. Auf große Reaktions- und Abklingbecken kann verzichtet werden.

Die wesentlich höhere Desinfektionsleistung der USONiQ-Ozonung im Vergleich zur Standard-Ozonung zeigt sich an der Erreichung der EU-Badegewässerqualität nach der erweiterten Abwasserbehandlung. Ob spezifische Bakterien, Viren oder Keime wie Legionellen, SARS-CoV-2 oder Methicillin resistente Staphylokokken (MRSA, MRSE) hiermit reduziert werden können, muss in weitergehenden Untersuchungen geklärt werden. Dies könnte beispielsweise mit der USO4-Versuchsanlage durch Experimente bei Indirekteinleitern (z.B. an einem Krankenhaus) evaluiert werden.

Die Robustheit der großtechnischen USO2020-Versuchsanlage und deren einfache Bedienbarkeit konnte im Dauerbetrieb unter realistischen und teilweise anspruchsvollen Wetter-Bedingungen durch das Betriebspersonal der ZKA Hamminkeln erfolgreich gezeigt werden. Die vollautomatische USONiQ-Steuerung kann über mobile Endgeräte bedient werden und stellt bereits heute in Hinblick auf die zu erwartende weitere Digitalisierung von Kläranlagenprozessen und die Integration von inline-Sensoren aufgrund seiner Schnittstellen und Integrationsfähigkeit eine nicht unerhebliche Zukunftsperspektive dar. Eine Integration in das vorhandene Prozessleitsystem der Kläranlage ist prinzipiell möglich, jedoch abhängig vom jeweilig vorhandenen System. Die Versuchsanlage USO2020 erfüllt die Voraussetzungen.

Eine detaillierte Anlagenplanung und Kostenrechnung war nicht Bestandteil dieses Pilotprojektes. Dies muss im Rahmen der weiteren Anlagenplanung unter Berücksichtigung der aktuellen Bau-, Energie- und Personalkosten erfolgen. Auch die Standortauswahl und Detailplanung zum Umbau und der Erweiterung der Zentralkläranlage Hamminkeln zu einer zukunftssicheren und energieautarken Kläranlage, z.B. durch Einsatz einer Photovoltaikanlage, konnten nicht in die Kostenabschätzungen einbezogen werden.

Zur Vergleichbarkeit der Kosten für eine USONiQ-Ozonung mit anderen Verfahren zur gezielten Elimination von Spurenstoffen wurde auf Basis von Referenzdaten aus dem Jahr 2017 mit 117 Machbarkeitsstudien des KOM-M-NRW berechnet, dass die spezifischen Abwasserbehandlungskosten der USONiQ-Ozonung bei 0,09 €/m³ behandeltem Abwasser lagen. Dabei entfielen 0,06 €/m³ auf die anteiligen Investitions- und 0,03 €/m³ auf die Betriebskosten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Gesamtkosten der USONiQ-Ozonung schon jetzt ohne Ausschöpfung weiterer technischer Optimierungspotentiale für Kläranlagengrößen bis 100.000 EW unter denen einer klassische Ozonung liegen. Nicht eingerechnet sind Investitions-Vorteile durch die Modularität bzw. Nachrüstungsmöglichkeit des Systems, sollte in der Zukunft Erweiterungsbedarf auf Seiten der Kläranlage entstehen.

Ein zusätzlicher, immer wichtiger werdender Umweltaspekt von Ressourceneinsparungen durch Water-Reuse, der auf der ZKA Hamminkeln durch die Nutzung eines Teilstroms aus der 4. Klärstufe für Brauchwasser erfolgen kann konnte bei den Kostenabschätzungen noch nicht berücksichtigt werden.

Für Kläranlagenbetreiber im Allgemeinen stellt die Möglichkeit der Untersuchung unter lokalen Bedingungen durch die vorhanden Testanlagen eine wichtige Planungshilfe dar, insbesondere auch um Vorsorge bei einem Bromatbildungspotenzial betreiben zu können.



*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONIQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

5 Literatur

BMU, 2022. Nationale Wasserstrategie – Entwurf vom 25.11.2022.

Böhler, M., Blunski, M., Czekalski, N., Fleiner, J., Kienle, C., Langer, M., McArdell, C.S., Teichler, R., Siegrist, H., 2017. Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung - ReTREAT (Abschlussbericht für das Bundesamt für Umwelt (Bafu) im Rahmen eines Projektes der Technologieförderung). Dübendorf.

Brückner, I., Klaer, K., Schiwy, S., Kirchner, K., Hammers-Wirtz, M., Müller, Y., Shuliakovich, A., Claßen, S., Stepkes, H., Grunau, T., Dolny, R., Gebhardt, W., Gschwendtner, R., Wendt, L., Montag, D., Könemann, S., Hollert, H., Agler-Rosenbaum, M., Reichert, J., Pinnekamp, J., 2018. Demonstrationsvorhaben Ozonung des Abwassers auf der Kläranlage Aachen-Soers (bschlussbericht der Phase 1 des Forschungsvorhabens, gerichtet an das MULNV NRW). Düren.

DWA, 2022. Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, verfahrenstechnische Aspekte und offene Fragen. DWA-Themen T2/2022, 81.

Epelle, E.I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., Okolie, J.A., Mackay, W., Rateb, M., Yaseen, M., 2023. Ozone application in different industries: A review of recent developments. Chem. Eng. J. 454, 140188. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140188>

Hillenbrand, T., Tettenborn, F., Menger-Krug, E., Marscheider-Weidemann, F., Fuchs, S., Toshovski, S., Kittlaus, S., Metzger, S., Tjoeng, I., Wermter, P., Kersting, M., Abegglen, C., 2014. Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer (Texte No. TEXTE 85/2014). Umweltbundesamt, Dessau.

Hillenbrand, T., Tettenborn, F., Bloser, M., 2019. Ergebnisrapport – Ergebnisse der Phase 2 des Stakeholder-Diologs "Spurenstoffstrategie des Bundes" zur Umsetzung von Maßnahmen für die Reduktion von Spurenstoffeinträgen in die Gewässer (Ergebnisrapport). BMU/UBA Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit/Dessau: Umweltbundesamt.

Itzel, F., Gehrmann, L., Bielak, H., Ebersbach, P., Boergers, A., Herbst, H., Maus, C., Simon, A., Dopp, E., Hammers-Wirtz, M., Schmidt, T.C., Tuerk, J., 2017. Investigation of full-scale ozonation at a municipal wastewater treatment plant using a toxicity-based evaluation concept. J. Toxicol. Environ. Health A 80, 1242–1258. <https://doi.org/10.1080/15287394.2017.1369663>

KOM-M.NRW, 2016. Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. ed. ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, Köln.

Kosek, K., Luczkiewicz, A., Fudala-Książek, S., Jankowska, K., Szopińska, M., Svahn, O., Tränckner, J., Kaiser, A., Langas, V., Björklund, E., 2020. Implementation of advanced micropollutants removal technologies in wastewater treatment plants (WWTPs) - Examples and challenges based on selected EU countries. Environ. Sci. Policy 112, 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.011>

Lei, Y., Wagner, T., Rijnaarts, H., De Wilde, V., Langenhoff, A., 2023. The removal of micropollutants from treated effluent by batch-operated pilot-scale constructed wetlands. Water Res. 230, 119494. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119494>



*Kurzfassung des Erläuterungsberichts: Halbtechnischer Einsatz der USONiQ-Ozonung
auf der Kläranlage Hamminkeln zur Elimination organischer Spurenstoffe*

RICHTLINIE 2006/7, 2006

- Shukla, R., Ahammad, S.Z., 2023. Performance assessment of a modified trickling filter and conventional activated sludge process along with tertiary treatment in removing emerging pollutants from urban sewage. *Sci. Total Environ.* 858, 159833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159833>
- Su, D., Ben, W., Strobel, B.W., Qiang, Z., 2021. Impacts of wastewater treatment plant upgrades on the distribution and risks of pharmaceuticals in receiving rivers. *J. Hazard. Mater.* 406, 124331. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124331>
- Tuerk, J., Sayder, B., Boergers, A., Vitz, H., Kiffmeyer, T.K., Kabasci, S., 2010. Efficiency, costs and benefits of AOPs for removal of pharmaceuticals from the water cycle. *Water Sci. Technol.* 61, 985–993. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.004>
- VSA, 2013. Reaktionsprodukte der Ozonung