

USONiQ Technologies GmbH

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)



Abschlussbericht

Spurenstoffentfernung an Punktquellen im ländlichen Raum – Pilotanwendung der USONiQ-Ozonung zur Behandlung von Krankenhausabwässern (SEKUSO)

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
unter dem DBU-Aktenzeichen 38920/01-23



Verfasser:

USONiQ Technologies GmbH:

Wolf Neumann, Dr. Alexander Moker, Simon Kotzbauer

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA):

Andrea Börgers, Damian Schomers

Schwerte, den 14.11.2025

Das diesem Abschlussbericht zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der **Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)** unter dem DBU-Aktenzeichen 38920/01-23 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Bezug über:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)
An der Bornau 2
49090 Osnabrück

Download:

www.dbu.de/

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Verzeichnis der Abkürzungen	6
1. Zusammenfassung.....	8
2. Einleitung	9
2.1 Spurenstoffe und deren Eintrag in die Umwelt	9
2.2 Gesetzliche Regelungen.....	10
2.3 Eingesetzte Verfahren zur Reduzierung von Spurenstoffeinträgen	10
2.4 Dezentrale Abwasserbehandlung mittels Kleinkläranlagen	11
2.6 Im Rahmen des Projektes eingesetzte Technologie.....	11
3. Zielsetzung des Forschungsvorhabens	12
4. Darstellung der Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden	13
4.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte	13
4.2 Verwendete Analysemethoden	13
5. Ergebnisse und Diskussion.....	15
5.1 Substanzauswahl und Methodenentwicklung (AP 1).....	15
5.2 Untersuchung der biologischen Abwasserbehandlung am Kohlberghaus (AP 2) ...	18
5.3 Vorbereitung, Installation und Aufbau der USONiQ-Pilotanlage USO4 am Kohlberghaus (AP 3)	20
5.4 Untersuchungen zum Spurenstoffabbau mittels der USONiQ-Technologie (AP 4) ..	23
5.5 Bewertung der Umweltentlastung und Vorplanung eines Abwasserbehandlungskonzeptes zur Spurenstoffelimination bei dezentralen Kleinkläranlagen (AP 5)	33
5.6 Öffentlichkeitsarbeit und Berichtserstellung (AP 6).....	37
6. Fazit	38
7. Literatur	39
8. Anhang.....	43
Anhang 1: Analysenergebnisse und Versuchseinstellungen.....	43
Anhang 2: Kostenabschätzung	57
Anhang 3: Planung verschiedener Anlagenkonzepte der USONiQ-Ozonung	58

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines USONIQ-Reaktionsmoduls aus 2 Ultraschalleinheiten (US) und einem Ozoneintragsmodul.....	11
Abbildung 2: Zeitplan des DBU Forschungsprojektes „SEKUSO“.....	13
Abbildung 3: Einbettung der USONiQ-Ozonung in die bestehende Struktur der Abwasserbehandlung des Kohlberghauses mit den Probenahmestellen A: Zulauf SBR, B: Ablauf SBR/Zulauf USONiQ-Ozonung und C: Ablauf USONiQ-Ozonung1.....	20
Abbildung 4: Blick in den 20' Seecontainer mit eingebauter Testanlage USO4 und Sauerstoffversorgung.....	21
Abbildung 5: Schematische Darstellung des Batch-Betriebs der USONiQ-Ozonung.....	22
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Inline-Betriebs der USONiQ-Ozonung.....	22
Abbildung 7: Anlieferung (a) und Aufstellort mit und effektiv verfügbarer Arbeitsfläche für die Versuche zur Ozonung des Ablaufs des SBR am Kohlberghaus.....	23
Abbildung 8: a) Probenahme am Zulaufschacht des SBR mit b) Proben vom Überstand des Zulaufs und des Ablaufs des SBR.....	23
Abbildung 9: Beispielhafte Eliminationsleistung der USONiQ-Ozonung bei verschiedenen spezifischen Ozondosen ($\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$) für 2 Spurenstoffe und 2 Psychopharmaka.....	26
Abbildung 10: Mittlere Elimination der Spurenstoffe und der Psychopharmaka über das Gesamtsystem mit Anteil SBR und Ozonung.....	27
Abbildung 11: Detektierte Features in den verschiedenen Proben vor Ozonung (pinker Balken) und nach Zugabe von $10 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{L}$ (grauer Balken und nach einer Stunde grüner Balken) bzw. $8 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{L}$ (blauer Balken und nach einer Stunde oranger Balken). Der Blank ist als lila Balken dargestellt.....	29
Abbildung 12: Ergebnisse der Fold-Chance-Anaölysen.....	29
Abbildung 13: Eliminationsleistungen durch MBR (grüne Balken) und USONiQ-Ozonung (blaue Balken) im Inline-Betrieb des Ablaufs des Marienhospitals in Gelsenkirchen bei verschiedenen spezifischen Ozondosen mit mittlerer Gesamtelimination (rote Balken).....	31
Abbildung 14: Gesamtelimination (aus MBR und USONiQ-Ozonung) der RKM im Batch-Betrieb-Betrieb bei verschiedenen spezifischen Ozondosen aus dem Abwasser des Marienhospitals in Gelsenkirchen.....	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendete Analysenmethoden mit den entsprechenden Normen.	14
Tabelle 2:	Eingesetzte Arzneimittelmengen und hieraus berechnete ($PEC_{max.}$) für das Kohlberghaus im Jahr 2021 mit einem Gesamtabwasservolumen von 5.147 m ³ /a.....	15
Tabelle 3:	Auflistung der Wirkstoffe (mit Abkürzung) mit CAS-Nummer und molarer Masse zur Entwicklung der LC-MS/MS Analysenmethode.	16
Tabelle 4:	Parameter der Ionenquelle und des Massenspektrometers.	17
Tabelle 5:	Ergebnisse der Validierung der LC-MS/MS Analysenmethode zur Analyse von Psychopharmaka in der Matrix Abwasser.	17
Tabelle 6:	Ablaufwerte des SBR des Kohlberghauses.....	18
Tabelle 7:	Mittelwerte mit Schwankungsbreite der Spurenstoffe in Zu- und Ablauf des SBR am Kohlberghaus mit Eliminationsleistung durch die biologische Behandlung.	19
Tabelle 8:	Durchgeführte Testreihen nach Inbetriebnahme der USONiQ-Ozonung.	25
Tabelle 9:	Anzahl an Enterokokken, E. Coli und Coliformen pro mL in Zulauf und Ablauf zur Ozonung bei verschiedenen Ozondosen.....	30
Tabelle 10:	Mittlere Ablaufkonzentrationen des SBR des Kohlberghauses, berechnete Fracht und Beurteilungswerte der untersuchten Spurenstoffe.	34
Tabelle 11:	Resultierende Jahresfrachten des Eintrags von Spurenstoffen und Psychopharmaka in die Umwelt vor und nach Implementierung einer USONiQ-Ozonung bei einer spezifischen Ozondosis von 1.1 mg _{O₃} /mg _{DOC}	35

Verzeichnis der Abkürzungen

Σ 4 + 5	Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol
AB	Arbeitsbereich
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
Ami	Amisulprid
AOP	Advanced Oxidation Processes
AP	Arbeitspakete
AP	Arbeitspaket
Benzo	1H-Benzotriazol
BG	Bestimmungsgrenze
BW	Beurteilungswert
Cande	Candesartan
Carba	Carbamazepin
Cita	Citalopram
Clari	Clarithromycin
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DesLevo	N-desmethylevomepromazin
Dia	Diazepam
Diclo	Diclofenac
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff
ESI	Electrospray-Ionisation
EW	Einwohnergleichwerten
Flu	Flupentixol
Gaba	Gabapentin
HRMS	Hochauflösende Massenspektrometrie
Hydro	Hydrochlorothiazid
HydroCarba	Hydroxycarbamazepin
Irbe	Irbesartan
IS	interner Standard
KARL	EU Kommunalabwasserrichtlinie
LC	Flüssigchromatographie
Levo	Levomepromazin
Mel	Melperon
Meto	Metoprolol
MS/MS	Tandem-Massenspektrometrie
m/z	Masse-zu-Ladungsverhältnis
NDBA	N-Nitrosodibutylamine
NDEA	N-Nitrosodiethylamine
NDIPLA	N-Nitroso-di-iso-propylamine
NDMA	N-Nitrosodimethylamine
NDPA	N-Nitrosodi-n-propylamine
NMEA	N-Nitrosomethylethylamine
NMOR	N-Nitrosomorpholine
NorQue	Norquetiapin

NorSer	Norsertralin
NPIP	N-Nitrosopiperidine
NPYR	N-Nitrosopyrrolidine
NTS	Non-Target Screening
NWG	Nachweisgrenze
O ₃	Ozon
Oxa	Oxazepam
PEC _{max}	berechnete maximale Umweltkonzentration unter der Annahme, dass die Substanzen nicht metabolisiert und nicht biologisch abgebaut werden
PI	Precursor-Ion
PNEC	Predicted No Effect Concentration (vorhergesagte Konzentration eines Stoffes in der Umwelt, bei der keine schädlichen Wirkungen auf Organismen zu erwarten sind)
Q1	Qualifier
Q2	Quantifier
Que	Quetiapin
Ret	Retentionszeit
SAK ₂₅₄	Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm
SBR	Sequencing-Batch-Reaktor
Ser	Sertralin
SMX	Sulfamethoxazol
SPE	Festphasenextraktion
TNb	Gesamt-Stickstoff
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
US	Ultraschall
Venla	Venlafaxin
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

1. Zusammenfassung

Das DBU-geförderte Forschungsvorhaben SEKUSO (Aktenzeichen 38920/01-23) untersuchte die Wirksamkeit einer neuartigen Kombination aus Ultraschall und Ozonung (USONiQ-Ozonung) zur Entfernung von pharmakologisch aktiven Spurenstoffen in dezentral behandelten Abwässern einer psychiatrischen Pflegeeinrichtung (Kohlberghaus Altena). Ziel war es, den Eintrag von Arzneimittelnrückständen in Boden und Grundwasser durch Verrieselung zu minimieren und eine praxisnahe, skalierbare Lösung für ländliche Punktquellen zu entwickeln.

In Deutschland erfolgt die Behandlung von Krankenhausabwässern bislang überwiegend zentral in kommunalen Kläranlagen. Diese sind jedoch nicht spezifisch auf die Entfernung von Spurenstoffen wie Psychopharmaka, Antibiotika oder Röntgenkontrastmittel ausgelegt. Auch in Kleinkläranlagen werden diese Spurenstoffe nicht ausreichend eliminiert. Untersuchungen zeigten, dass insbesondere Krankenhausabwässer hohe Konzentrationen dieser Stoffe aufweisen und damit ein erhebliches ökotoxikologisches Risiko darstellen. Abgeschlossene Forschungsprojekte (z. B. PILLS, noPILLS, Waldbröl, Herlev-Hospital) bestätigten, dass eine gezielte Behandlung direkt an der Quelle (Punktquelle) die Stoffelimination deutlich verbessern kann.

Am Kohlberghaus, einer Pflegeeinrichtung ohne Kanalanschluss im Naturschutzgebiet Homert, wurde eine USONiQ-Pilotanlage (USO4) nachgeschaltet an die bestehende SBR-Kleinkläranlage installiert. Das USONiQ-Verfahren kombiniert Ultraschallresonatoren und eine patentierte Gaseinbringung (OptimiXer®) in einem geschlossenen Rohrreaktor und erreicht dadurch eine intensive Oxidation ohne zusätzlichen Reaktionsraum.

Im Betrieb zeigte sich, dass bereits ab einer spezifischen Ozondosis von 0,26 mg_{O₃}/mg_{DOC} Eliminationsraten von > 80 % für die gemäß EU-Kommunalabwasserrichtlinie (KARL) relevanten Substanzen erzielt wurden. Auch Psychopharmaka konnten effizient abgebaut und bakterielle Keime (> 99 %) sicher inaktiviert und so eine „ausgezeichnete Badegewässerqualität“ erreicht werden. Darüber hinaus konnte auch bei hohen Ozondosen keine relevante Bromatbildung festgestellt werden. Der Energieverbrauch lag bei ca. 0,56 kWh/m³ behandeltem Abwasser.

Zum Vergleich wurde das Verfahren zusätzlich mit MBR-gereinigtem Abwasser des Marienhospitals Gelsenkirchen untersucht. Die Ergebnisse bestätigten, dass die USONiQ-Ozonung auch in typischen Krankenhausabwässern eine Elimination von über 80 % der prioritären Spurenstoffe ermöglicht und damit Leistungsniveaus zentraler Anlagen mit vierter Reinigungsstufe erreicht. Dies verdeutlicht die Übertragbarkeit des Ansatzes auf größere Einrichtungen und die Möglichkeit, die skalierbare USONiQ-Ozonung an verschiedenen Punktquellen (Camping, Krankenhausabwasser, kleine Siedlungen ohne Kanalanschluss) zur Mikroschadstoffelimination einzusetzen.

Die Modellrechnungen zeigten, dass allein am Kohlberghaus jährlich mehrere hundert Gramm pharmakologisch aktiver Wirkstoffe (z. B. Amisulprid, Melperon, Quetiapin) ohne Zusatzbehandlung in die Umwelt eingetragen würden. Durch den Einsatz der USONiQ-Ozonung konnte dieser Eintrag nahezu vollständig vermieden werden. Aufgrund der fehlenden Kanalisation stellt die Vor-Ort-Behandlung hier einen entscheidenden Beitrag zum vorsorgenden Gewässerschutz dar. Das Projekt leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung technischer Lösungen für eine weitergehende Spurenstoffelimination in dezentralen Abwasserbehandlungsanlagen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für zukünftige Anwendungen an medizinischen Einrichtungen, Pflegeeinrichtungen sowie in sensiblen Einzugsgebieten mit erhöhtem Eintragspotenzial.

2. Einleitung

2.1 Spurenstoffe und deren Eintrag in die Umwelt

Organische Spurenstoffe sind Bestandteil zahlreicher Alltagsprodukte und gelangen durch die Nutzung von Haushaltschemikalien oder Arzneimitteln in die Kanalisation und somit in kommunale Kläranlagen, wo sie meist nicht vollständig eliminiert werden (Lei et al. 2023). Kläranlagen gelten daher als relevante Punktquellen für den Eintrag dieser Stoffe in Oberflächengewässer (Hillenbrandt et al. 2014; Epelle et al. 2023, Kosek et al. 2020).

In den meisten von Kläranlagen beeinflussten Gewässern werden Spurenstoffe bereits in teilweise ökotoxikologisch relevanten Konzentrationen nachgewiesen (UBA 2015, Alfonso-Muniozguren et al. 2021, Lei et al. 2023). Besonders in Ballungsräumen mit Trinkwassergewinnung aus Grund- oder Oberflächenwasser stellen sie die Wasserversorger vor große Herausforderungen (Reine Ruhr, 2014). Auch Mischwasserentlastungen tragen zum Eintrag bei. Die Umweltauswirkungen des breiten Stoffspektrums sind bislang nur unzureichend untersucht.

Psychopharmaka sind pharmakologisch aktive Substanzen, die gezielt auf das zentrale Nervensystem wirken, um psychische Erkrankungen zu behandeln oder deren Verlauf zu beeinflussen. Sie modulieren neuronale Prozesse über Neurotransmitter wie Serotonin, Dopamin, Noradrenalin, GABA oder Glutamat. Eingesetzt werden sie u. a. bei Depressionen, Angst-, Schlaf- oder bipolaren Störungen sowie Schizophrenie und ADHS.

In eigenen Untersuchungen (Seidel et al. 2013, Nielsen et al. 2013) als auch Daten aus der Literatur wurden ausgewählte Psychopharmaka in Konzentrationen bis in den µg/L-Bereich in Krankenhausabwässern detektiert (Diamanti et al. 2019, Christophoridis et al. 2021, Restrepo-Vieira et al. 2022). Auf Basis von Risikoquotienten (Predicted No Effect Concentration / Measured Environmental Concentration - PNEC/MEC) wurde ein relevantes Umweltgefährdungspotenzial nachgewiesen (Nielsen et al. 2013, Reichert et al. 2019, Lopez-Herguedas et al. 2023).

Abwässer aus Gesundheitseinrichtungen wie Krankenhäusern und psychiatrischen Einrichtungen enthalten häufig erhöhte Konzentrationen von Arzneimitteln und deren Metaboliten. In Deutschland werden diese Abwässer in der Regel in kommunalen Kläranlagen behandelt, wobei eine separate Behandlung kontrovers diskutiert wird (Majumder et al. 2021). Die Wirksamkeit spezieller Verfahren zur Spurenstoffelimination direkt am Krankenhaus wurde u. a. in Waldröl (Beier et al. 2012), im Rahmen der Projekte PILLS und noPILLS in Gelsenkirchen (PILLS Project 2012; noPILLS 2015), am Herlev-Hospital in Dänemark (Nielsen et al. 2016; Itzel et al. 2018) sowie im NRW-Forschungsprojekt zur Arzneimittelimination in Krankenhäusern (Seidel et al. 2013) untersucht.

Die Fördermaßnahme „Risikomanagement von neuen Schadstoffen und Krankheitserregern im Wasserkreislauf“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung behandelte das Thema Krankenhausabwässer nur am Rande; das Teilprojekt Sauber+ der RWTH Aachen griff es jedoch gezielt auf und prüfte Ozonung, UV-Oxidation und Aktivkohleadsorption zur Spurenstoffentfernung (<https://sauberplus.de/index.html>). In Dänemark (Nielsen et al. 2016) und den Niederlanden (Stowa 2013) wird der Abwasserbehandlung an Krankenhäusern größere Bedeutung beigemessen, da dort geklärte Abwässer direkt in Oberflächengewässer eingeleitet werden. Neben Spurenstoffen sind auch Viren und resistente Keime relevante Belastungen (Exner & Schwartz 2015; Paulus et al. 2019; Majumder et al. 2021; Pariente et al. 2022).

Psychiatrische Kliniken und Pflegeeinrichtungen wurden bislang kaum untersucht, sodass Kenntnisse zu Umwelteinträgen der dort eingesetzten Arzneimittel fehlen. Das Kohlberghaus, eine Pflegeeinrichtung für psychisch und geistig beeinträchtigte Bewohner im Naturschutzgebiet Homert, verfügt über 25 offene und 43 geschützte Plätze und betreibt eine eigene Kleinkläranlage (Sequencing-Batch-Reaktor - SBR) zur Abwasserbehandlung.

2.2 Gesetzliche Regelungen

Im Januar 2024 einigte sich das EU-Parlament auf die Neufassung der Kommunalabwasserrichtlinie (KARL; EU 2022/0344), die im November 2024 verabschiedet wurde. Die Richtlinie gilt als zentrales Regelwerk zur Behandlung von Spurenstoffen in der Abwasserreinigung und etabliert europaweit einheitliche Bewertungs-, Überwachungs- und Kontrollmechanismen. Die Richtlinie listet zwölf relevante Substanzen, unterteilt in zwei Gruppen: sehr leicht (Amisulprid, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Metoprolol und Venlafaxin) und leicht zu entfernende Stoffe (1H-Benzotriazol, Candesartan, Irbesartan und die Summe aus 4- und 5-Methylbenzotriazol). Darunter befinden sich ein Antipsychotikum, ein Antikonvulsivum und zwei Antidepressiva.

KARL schreibt ein durchschnittliches Eliminationsziel von 80 % über die gesamte Abwasserbehandlung, einschließlich der vierten Reinigungsstufe, vor. Dieses Ziel muss für mindestens sechs Substanzen, vier aus Gruppe 1 und zwei aus Gruppe 2, erreicht werden. Kläranlagen über 150.000 Einwohnergleichwerten (EW) sind verpflichtet, bis 2045 eine vierte Reinigungsstufe zu implementieren; Anlagen über 10.000 EW müssen diese bei Einleitung in sensible Gewässer nachrüsten. Detaillierte technische Vorgaben stehen noch aus (KOM-M.NRW 2016; BMUV 2023). Für Kleinkläranlagen ist derzeit keine Spurenstoffelimination vorgesehen, künftig könnten jedoch modulare Systeme insbesondere in Trinkwassereinzugsgebieten relevant werden.

Ergänzend dazu formuliert die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) das Ziel, einen guten ökologischen und chemischen Zustand der Gewässer zu erreichen. Daraus ergibt sich ein grundlegender Handlungsbedarf zur Reduktion des Spurenstoffeintrags in die aquatische Umwelt, um langfristig eine hohe Wasserqualität zu sichern.

2.3 Eingesetzte Verfahren zur Reduzierung von Spurenstoffeinträgen

Zur effizienten Entfernung von Spurenstoffen werden vor allem mechanische (Membranfiltration), oxidative (Ozonung, Advanced Oxidation Processes (AOPs) und adsorptive Verfahren (Aktivkohle) eingesetzt. Auf kommunaler Ebene dominieren Ozonung und Aktivkohleadsorption als vierte Reinigungsstufe (KOM-M.NRW 2016; Schaar et al. 2017; Krishnan et al. 2021). Bei der Ozonung erfolgt der Abbau über die direkte Reaktion mit Ozon oder über gebildete Hydroxylradikale. Aufgrund der dominanten Sekundärreaktionen gilt die Ozonung in der Abwasserbehandlung als AOP (Von Gunten 2003a; Pei et al. 2019). Eine vollständige Mineralisierung wird dabei nicht erreicht. Es entstehen Transformationsprodukte (TPs), die häufig polarer und biologisch besser verfügbar sind als die Ausgangssubstanzen (Bermúdez et al. 2021; Kharel et al. 2020). Zur Verminderung eventueller toxischer Belastungen durch die entstehenden TPs wird, nach heutigem Stand des Wissens, eine biologische Nachbehandlung nach der Ozonung empfohlen. (Itzel et al. 2020; Sauter et al. 2021). Zu den wichtigsten bekannten TPs zählen Bromat und Nitrosamine. Nitrosamine können biologisch weiter abgebaut werden, Bromat hingegen nicht. Die Effizienz der

Ozonbehandlung hängt wesentlich von der Abwasserzusammensetzung, insbesondere dem Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff und Partikeln, ab (Nöthe et al. 2009).

2.4 Dezentrale Abwasserbehandlung mittels Kleinkläranlagen

Im ländlichen Raum Deutschlands werden aufgrund großer Entfernungen zu zentralen Kläranlagen Abwässer von rund 2,3 Mio. Einwohnern in etwa 8.000 Kleinkläranlagen und 5.500 abflusslosen Gruben behandelt (Destatis 2018; 2021). Das gereinigte Abwasser wird meist in kleine Gewässer eingeleitet oder über Rieselfelder im Boden versickert, wobei natürliche Abbauprozesse zur Hygienisierung beitragen. Untersuchungen in den Niederlanden und in Braunschweig zeigen jedoch, dass Spurenstoffe bis in den Grundwasserleiter gelangen können (Ternes et al. 2007). Eine weitergehende Abwasserbehandlung zur Spurenstoffelimination vor der Verrieselung wäre daher sinnvoll, wird jedoch mangels rechtlicher Vorgaben bislang nicht umgesetzt.

2.6 Im Rahmen des Projektes eingesetzte Technologie

Im Rahmen des Projektes wurde ein neuartiges erweitertes Oxidationsverfahren, die sogenannte USONiQ-Ozonung, eingesetzt und in den Ablauf der Kleinkläranlage am Kohlberghaus implementiert und betrieben.

Bei der USONiQ-Ozonung werden in einem kompakten Rohrreaktor eine proprietär entwickelte Ultraschalltechnologie mit einer patentierten Gaseinbringung (Ozon) kombiniert. Die USONiQ-Ozonung nutzt skalierbare einzelne Reaktormodule (Abbildung 1), die je nach Auslegungsbedarf, sowohl parallel als auch in Reihe angeordnet werden können. Ein Reaktormodul besteht aus:

- Ultraschallresonator (US-Resonator) zur Zerstörung von Feststoff-Agglomeraten und erhöhter Erzeugung von Hydroxylradikalen
- Gaseintragssystem (OptimiXer®) bei reduziertem Ozonbedarf (STOWA, 2023)
- Weiterer Ultraschallresonator (US-Resonator) nach Ozoneintrag

Durch den effizienten Gaseintrag erfolgt die USONiQ-Ozonung vollkontrolliert in einem abgeschlossenen Raum. Auf die Installation weiterer Reaktions- oder Retentionsbecken kann somit größtenteils verzichtet werden.

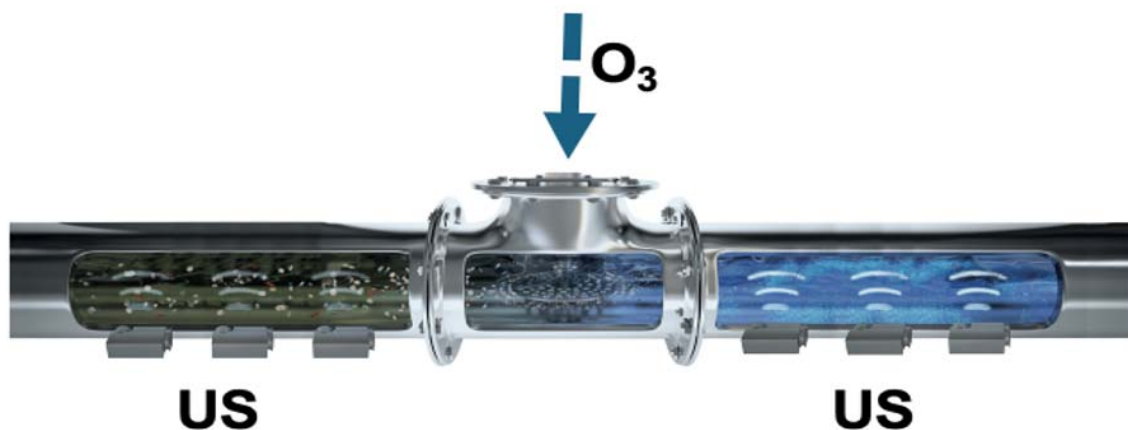


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines USONiQ-Reaktionsmoduls aus 2 Ultraschalleinheiten (US) und einem Ozoneintragsmodul.

3. Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens war die Reduktion von Arzneimittelwirkstoffen aus dem Abwasser einer medizinischen Pflegeeinrichtung nach einer biologischen Abwasserbehandlung in einer dezentralen Kleinkläranlage.

Zu diesem Zweck wurde ein innovatives AOP-Verfahren, bestehend aus einer Kombination aus Ultraschall und Ozonung (USONiQ-Ozonung), in die bestehende Abwasserreinigung implementiert und im Betrieb wissenschaftlich evaluiert. Das biologisch behandelte Abwasser wurde bislang mittels eines Verrieselungssystems im Bereich des Naturschutzparks Homert direkt im Boden versickert.

Im Zentrum der Untersuchungen stand die Elimination sogenannter Mikroschadstoffe, insbesondere pharmakologisch aktiver Substanzen, die durch konventionelle biologische Reinigungsverfahren, wie sie z. B. in Sequencing-Batch-Reaktoren eingesetzt werden, nur unzureichend entfernt werden können. Die Ergebnisse des Projekts lieferten eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Entwicklung und Anwendung weitergehender Verfahren zur Spurenstoffelimination in dezentralen Abwasserbehandlungsanlagen, insbesondere an Einrichtungen mit erhöhtem Eintrag spezifischer Wirkstoffe wie Krankenhäusern, psychiatrischen Kliniken und Pflegeeinrichtungen, sowie Kleinkläranlagen.

Darüber hinaus wurde untersucht, inwiefern sich die gewonnenen Erkenntnisse auf weitere dezentrale Systeme übertragen lassen. Im Fokus standen hierbei potenzielle Einsatzmöglichkeiten für die Abwasserbehandlung von Privathaushalten, Campingplätzen, Freizeiteinrichtungen sowie Krankenhäusern im ländlichen Raum.

Die konkreten Zielstellungen des Projekts umfassten:

- Identifikation und Quantifizierung spezifischer Spurenstoffeinträge aus psychiatrischen Einrichtungen und Pflegeheimen
- Evaluation und Optimierung eines kombinierten Ultraschall-Ozon-Verfahrens (USONiQ-Ozonung) zur Entfernung von Mikroschadstoffen aus dem Abwasser
- Grundlagenuntersuchungen zur Integration oxidativer Verfahren in dezentrale Kleinkläranlagen, unter Berücksichtigung technischer Machbarkeit, Energieeffizienz sowie ökologischer Auswirkungen
- Reduzierung der Umweltbelastung durch Spurenstoffeinträge in Boden- und Grundwasserökosysteme bei der Verrieselung von behandelten Abwässern. Ein besonderer Fokus lag hierbei auf der Vermeidung unbeabsichtigter Direkteinträge psychoaktiver Substanzen in das Grundwasser.

Darüber hinaus wurden die Desinfektionsleistungen der USONiQ-Ozonung, die Bildung von Transformationsprodukten wie auch insbesondere die Bromatbildung untersucht.

Mit der Kombination von SBR-Technologie und nachgeschalteter USONiQ-Ozonung wurde ein innovativer Verfahrensansatz umgesetzt, der über den Stand der Technik hinausging.

Insgesamt leistete das Forschungsvorhaben einen relevanten Beitrag zur Entwicklung und sicheren Anwendung effizienter Verfahren zur Spurenstoffelimination in der dezentralen Abwasserbehandlung. Die Ergebnisse können langfristig zur Entlastung der Umwelt und zur Sicherung sensibler Trinkwasserressourcen beitragen.

4. Darstellung der Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden

Die einzelnen durchgeführten Arbeitsschritte und die im Rahmen des Projektes verwendeten Analysenmethoden sind in den folgenden Kapiteln aufgeführt.

4.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte

Projektstart war der 02.04.2024. Ursprünglich war eine Projektlaufzeit von 9 Monaten zur Bearbeitung des Projektes vorgesehen. Aufgrund des doch sehr kalten Winters mit Frost musste das Projekt kostenneutral bis zum 30.06.2025 verlängert werden. Ein aktualisierter Zeitplan ist in Abbildung 2 dargestellt.

AP	Beschreibung	2024												2025					
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6			
		Projektmonat																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
1	Substanzauswahl und Methodenentwicklung																		
2	Untersuchung der biologischen Abwasserbehandlung am Kohlberghaus																		
3	Vorbereitung, Installation und Aufbau der USONiQ-Pilotanlage USO4 am Kohlberghaus																		
4	Untersuchungen zum Spurenstoffabbau mittels der USONiQ-Technologie																		
5	Bewertung der Umweltentlastung und Vorplanung eines Abwasserbehandlungskonzeptes zur Spurenstoffelimination bei dezentralen Kleinkläranlagen																		
6	Öffentlichkeitsarbeit und Berichtserstellung																		

Abbildung 2: Zeitplan des DBU Forschungsprojektes „SEKUSO“.

Insgesamt wurden im Projekt sechs Arbeitspakete (AP) behandelt. Die Arbeitspakete umfassten die Entwicklung einer Analysenmethode, den Aufbau der Pilotanlage und die Erfassung der Ist-Situation gefolgt von der Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Ozonung. Komplementiert wurde das Projekt durch die Bewertung der Ergebnisse, der Planung eines Behandlungskonzeptes für dezentrale Kleinkläranlagen und eine Öffentlichkeitsarbeit.

4.2 Verwendete Analysemethoden

In Tabelle 1 sind die Normen zu den verwendeten Methoden der instrumentellen Analytik und der mikrobiologischen Untersuchungen angegeben.

Tabelle 1: Verwendete Analysenmethoden mit den entsprechenden Normen.

Parameter	Norm
pH-Wert	DIN EN ISO 10523: 2012
Leitfähigkeit	DIN EN 27888: 1993
Spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm (SAK ₂₅₄)	DIN 38404-3: 2005
Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC)	DIN EN 1484: 2019
Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)	DIN EN 1484: 2019
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	DIN ISO 15705-2003
Abfiltrierbare Stoffe (AFS)	DIN 38409-2: 1987
Nitrit	DIN EN 26777 D10, Schnelltest
Nitrat	DIN 38405 – D9, Schnelltest
Ammonium	DIN 38406 – E5, Schnelltest
Gesamt-Stickstoff (TNb)	DIN 38405, Schnelltest
Bromid und Bromat	LC-MS/MS
E. Coli	DIN EN ISO 9308-1: 2017-09 ^a
Coliforme Bakterien	DIN EN ISO 9308-1: 2017-09 ^a
Enterokokken	DIN EN ISO 7899-2: 2000-11 ^a
Psychopharmaka	LC-MS/MS
Organische Spurenstoffe	LC-MS/MS
Röntgenkontrastmittel	LC-MS/MS
Nitrosamine	LC-MS/MS
Non Target Screening (NTS)	HRMS

^a Analyse erfolgte im Unterauftrag durch ein akkreditiertes Labor

Die LC-MS/MS Analysen der Psychopharmaka, der organischen Spurenstoffe (Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol (4 + 5), 1*H*-Benzotriazol (Benzo), Amisulprid (Ami), Candesartan (Cande), Carbamazepin (Carba), Citalopram (Cita), Clarithromycin (Clari), Diclofenac (Diclo), Gabapentin (Gaba), Hydrochlorothiazid (Hydro), Irbesartan (Irbe), Metoprolol (Meto), Sulfamethoxazol (SMX) und Venlafaxin (Venla)), der Röntgenkontrastmittel (Amidotrizoesäure, Iohexol, Iomeprol, Iopamidol, Iopromid und Ioversol) und des NTS erfolgte mittels Direktmessung ohne vorherige Anreicherung. Die neu entwickelte Methode zur Analyse der Psychopharmaka ist in Kapitel 5.1 ausführlich beschrieben.

Die Analyse der Nitrosamine (N-Nitrosodibutylamine (NDBA), N-Nitrosodiethylamine (NDEA), N-Nitroso-di-iso-propylamine (NDIPLA), N-Nitrosodimethylamine (NDMA), N-Nitrosodi-n-propylamine (NDPA), N-Nitrosomethylethylamine (NMEA), N-Nitrosomorpholine (NMOR), N-Nitrosopiperidine (NPIP) und N-Nitrosopyrrolidine (NPYR)) erfolgte nach Anreicherung von 1.000 mL entsprechend EPA 521:2005 -Methode mit 2 g, 6 mL Supelclean Coconut Charcoal Festphasenextraktion (SPE) Kartuschen (Merck, Darmstadt, Germany).

Für die NTS wurden MS1-Daten von *m/z* 50 bis 1200 mit einer Rate von 5 Spektren pro Sekunde erfasst. MS2-Daten wurden mit derselben Rate über datenabhängige Erfassung (DDA) erfasst. Der AutoMS-Modus wurde mit der Mass Hunter Acquisition-Software (Agilent, Santa Clara, USA) verwendet. Für jeden Zyklus (mit einer maximalen Dauer von 0,9 Sekunden) wurden drei MS1-Vorläufer mit einer Intensität von über 5.000 Counts unter Verwendung eines Isolationsfensters von 1,3 Da ausgewählt und bei 10 und 35 eV fragmentiert. Um das Erfassungszeitfenster zu verkürzen und sowohl die MS1- als auch die MS2-Daten zu maximieren, wurden maximal 25.000 Counts pro Spektrum erfasst.

5. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Zur Berechnung der Ergebnisse wurde bei Analysenergebnissen unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) mit $\frac{1}{2}$ BG gerechnet. Die Analysenergebnisse sind mit zwei signifikanten Stellen angegeben.

5.1 Substanzauswahl und Methodenentwicklung (AP 1)

In Tabelle 2 ist eine Aufstellung des Verbrauchs des Kohlberghauses über die verschriebenen und eingesetzten Medikamente aus dem Jahr 2021 dargestellt. Neben der Wirkstoffmenge ist ebenfalls die berechnete maximale Umweltkonzentration (PEC_{max}) angegeben. Innerhalb der letzten Jahre konnten keine signifikanten Änderungen der Verschreibung beobachtet werden.

Tabelle 2: Eingesetzte Arzneimittelmengen und hieraus berechnete (PEC_{max}) für das Kohlberghaus im Jahr 2021 mit einem Gesamtabwasservolumen von 5.147 m³/a.

Arzneimittelwirkstoff	Wirkstoffmenge 2021 (g/a)	PEC_{max} (µg/L)
Valproat	9.855	1.915
Ibuprofen	730	142
Perazin	730	142
Amisulprid	730	142
Quetiapin	730	142
Levomepromazin	548	106
Fluanxol	456	89
Oxcarbazepin	438	85
Clozapin	365	71
Sertralin	365	71
Pantoprazol	292	57
Zuclopenthixiol	292	57
Chlorprothixen	274	53
Promethazin	228	44
Melperon	183	35
Pipamperon	146	28
Oxazepam	146	28
Lorazepam	73	14
Spasmex/Tropiumchlorid	55	11
Haloperidol	46	8,9
Olanzapin	37	7,1
Ciatyl	37	7,1
Diazepam	18	3,5
Risperidon	11	2,1
Benperidol	7,3	1,4
Ramipril	7,3	1,4
Torasemid	3,7	0,7
Clobazam	3,7	0,7
Rivaroxaban	2,7	0,5

Die Substanzauswahl für die entwickelte HPLC-MS/MS-Methode erfolgte anhand der folgenden Kriterien: Verschreibungsmenge, Verschreibungszweck bzw. Wirkstoffklasse des

Medikamentes, Verfügbarkeit von analytischen Reinstoffstandards, Ionisierbarkeit mittels Electrospray-Ionisation. Auf die Implementierung von Substanzen, welche keine Psychopharmaka sind (bspw. Ibuprofen) wurde verzichtet. Weiterhin wurden drei Metaboliten der ausgewählten Psychopharmaka mit eingebunden, woraus sich folgendes Substanzspektrum ergab (Tabelle 3):

Tabelle 3: Auflistung der Wirkstoffe (mit Abkürzung) mit CAS-Nummer und molarer Masse zur Entwicklung der LC-MS/MS Analysenmethode.

Substanz und Abkürzung	Wirkstoffklasse	Verschreibungszweck	CAS-Nummer	Molare Masse g/mol
Diazepam (Dia)	Benzodiazepine	Behandlung von Angststörungen	439-14-5	284.74
Flupentixol (Flu)	Thioxanthene	Behandlung schizophrener Psychosen	2413-38-9	507.44
Levomepromazin (Levo)	Phenothiazine	Behandlung von Erregungszuständen	1236-99-3	364.93
Melperon (Mel)	Butyrophenone	Sedierung	3575-80-2	263.35
N-Desmethyl-levomepromazin	Metabolit von Levomepromazin	-	37819-98-0	314.44
Norquetiapin (DesLevo)	Metabolit von Quetiapin	-	753475-15-9	295.4
Norsertalin (NorSer)	Metabolit von Sertralin	-	87857-41-8	292.2
Oxazepam (Oxa)	Benzodiazepine	Behandlung von Angststörungen	604-75-1	286.71
Quetiapin (Que)	Dibenzothiazepine	Behandlung von Schizophrenie und bipolaren Störungen	111974-72-2	883.09
Sertralin (Ser)	Serotonin-Wiederaufnahmehemmer	Behandlung von Depressionen, Panik- und Angststörungen	79617-96-2	306.23

Eine effektive chromatographische Trennung ist Voraussetzung für die Empfindlichkeit des Massenspektrometers und somit Grundlage jeder Ultraspurenstoffanalytik im Umweltmonitoring. Verwendet wurde eine Phenomenex Synergi Polar-RP-Säule (100 mm × 2 mm, 2,5 µm), deren ethergebundene Phenylgruppe π - π -Wechselwirkungen ermöglicht und aromatische Zielanalyten effektiv retardiert. Die Säulenlänge erhöht die Trennleistung, der geringe Innendurchmesser verbessert die Fokussierung bei moderatem Rückdruck.

Als mobile Phasen dienten A: Wasser + 0,1 % Ameisensäure und B: Acetonitril + 0,1 % Ameisensäure. Zur Sicherung der Präzision wurden zwei isotope markierte interne Standards eingesetzt (Sertralin-¹³C, ¹⁵N, ^{d3} und Melperon-^{d4}), ausgewählt nach den Retentionszeiten der Analyten. Die Optimierung der massenspektrometrischen Parameter erfolgte mittels Design-of-Experiment im Full-Factorial-Design zur Bestimmung der Signal-optimalen Einstellungskombination (Tabelle 4):

Tabelle 4: Parameter der Ionenquelle und des Massenspektrometers.

Parameter	Einheit	Wert
Spannung ESI	kV	4
CID-Gasdruck	kPa	270
Nebulizing Gas Flow	L/min	2
Heating Gas Flow	L/min	10
Interface Temperatur	°C	400
Desolvation Temperatur	°C	650
Desolvation Line Temperatur	°C	200
Heat Block Temperatur	°C	400
Drying Gas Flow	L/min	10

Die Validierung der Methode erfolgte anhand einer Referenzprobe und einer Standardaddition. Die Übersicht der Validierung ist in Tabelle 5 dargestellt. Zu sehen sind Masse-zu-Ladungsverhältnisse (m/z) mit Precursor-Ion (PI), Qualifier (Q1) und Quantifier (Q2), Retentionszeit (Ret), verwendeter IS, Arbeitsbereich (AB), Bestimmungsgrenze (BG) und Nachweisgrenze (NWG) der einzelnen Substanzen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Validierung der LC-MS/MS Analysenmethode zur Analyse von Psychopharmaka in der Matrix Abwasser.

Substanz	PI m/z	Q1 m/z	Q2 m/z	Ret min	IS	AB $\mu\text{g/L}$	R ²	BG ng/L	NWG ng/L
Flu	435.50	305.15	265.05	8.00	IS 1	0.045 - 90	0.999	45	15
DesLevo	315.10	242.00	283.95	7.40	IS 1	0.045 - 22.5	0.999	30	10
Mel	264.15	122.95	165.00	5.20	IS 2	0.009 - 9	0.999	15	5
Levo	329.20	167.15	186.00	7.60	IS 1	0.045 - 9	0.998	30	10
Dia	285.25	223.10	194.10	8.10	IS 1	0.045 - 90	0.999	50	16
NorQue	296.20	253.15	210.15	5.00	IS 2	0.045 - 22.5	0.998	15	5
NorSer	293.70	129.05	161.00	7.60	IS 1	0.09 - 90	0.999	50	20
Oxa	287.20	269.50	241.50	6.80	IS 1	0.09 - 90	0.999	200	66
Que	384.05	221.15	253.15	5.70	IS 2	0.0225 - 22.5	0.999	15	5
Ser	307.75	158.90	276.55	7.90	IS 1	0.045 - 22.5	0.999	15	5
HydroCarba	255.20	237.00	194.10	4.40	IS 2	0.00225 - 22.5	0.999	15	5

5.2 Untersuchung der biologischen Abwasserbehandlung am Kohlberghaus (AP 2)

Das im Naturschutzpark Homert gelegene Kohlberghaus ist nicht an die Kanalisation angeschlossen und betreibt eine dezentrale SBR-Kleinkläranlage. Diese umfasst Grobfang, Belebung (Puffer- und Hauptbecken) sowie Nachklärung. Die Probenahme im Zulauf erfolgte im ersten Becken, die USONiQ-Anlage wurde aus der Nachklärung beschickt. Die Mittelwerte im Zulauf zum SBR lagen bei 195, 99, 182 bzw. 65 mg/L für TOC, DOC, CSB bzw. TNb. Die erzielten Ablaufqualitäten des SBR mit Schwankungsbreiten sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Ablaufwerte des SBR des Kohlberghauses

	Parameter	Einheit	Mittelwerte Ablauf SBR Kohlberghaus
Basisparameter	pH	-	6,9 ± 0,32
	LF	µS/cm	586 ± 38
	AFS	mg/L	25 ± 20
	TOC	mg/L	16 ± 6,6
	DOC	mg/L	10 ± 1,6
	SAK ₂₅₄	1/m	32 ± 7,2
	CSB	mg/L	30 ± 9,1
	Nitrit	mg/L	0,20 ± 0,11
	Nitrat	mg/L	27 ± 5,5
	Ammonium	mg/L	0,84 ± 0,36
	TNb	mg/L	31 ± 5,4
	Phosphor gesamt	mg/L	9,0 ± 0,85
	Ortho-Phosphat	mg/L	7,8 ± 0,71
	Bromid	µg/L	103 ± 26
	Bromat	µg/L	< 1

Der Ablauf des SBR unterliegt zum Teil großen Schwankungen. Diese Schwankungen liegen vermutlich an den unterschiedlichen Zuläufen durch die unterschiedliche Nutzung von z. B. Toiletten, Duschen und Waschmaschinen. Die organische Fracht konnte durch den SBR um 90 % bezogen auf den DOC reduziert werden. Neben den klassischen Abwasserparametern wurde auch das Vorkommen von Spurenstoffen in Zu- und Ablauf des SBR des Kohlberghauses untersucht. Die Konzentrationen mit den Schwankungsbreiten und der Elimination durch die biologische Behandlung sind in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7: Mittelwerte mit Schwankungsbreite der Spurenstoffe in Zu- und Ablauf des SBR am Kohlberghaus mit Eliminationsleistung durch die biologische Behandlung.

Parameter	Einheit	Mittelwerte Zulauf SBR	Mittelwerte Ablauf SBR	Elimination %
Organische Spurenstoffe	Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol	ng/L	< 45	-
	1H-Benzotriazol	ng/L	164 ± 100*	< 35
	Amisulprid	ng/L	51.600 ± 19.386	53.769 ± 10.150
	Candesartan	ng/L	2.140 ± 680	1.330 ± 418
	Carbamazepin	ng/L	4.020 ± 2.594	4.364 ± 2.098
	Citalopram	ng/L	182 ± 121	439 ± 178
	Clarithromycin	ng/L	< 30	< 30
	Diclofenac	ng/L	1.822 ± 1.915	1.742 ± 1.484
	Gabapentin	ng/L	82.000 ± 57.376	1.837 ± 1.059
	Hydrochlorothiazid	ng/L	1.724 ± 979	1.636 ± 671
	Irbesartan	ng/L	59 ± 71	84 ± 94
	Metoprolol	ng/L	2.150 ± 1.497	1.695 ± 953
	Sulfamethoxazol	ng/L	1.140 ± 1.593	17 ± 7,5
	Venlafaxin	ng/L	425 ± 21	610 ± 154
Psychopharmaka	Diazepam	ng/L	338 ± 153	521 ± 139
	Flupentixol	ng/L	< 45	< 45
	Hydroxycarbamazepin	ng/L	33 ± 14	30 ± 17
	Levomepromazin	ng/L	896 ± 381	251 ± 116
	Melperon	ng/L	2.196 ± 1.003	4.858 ± 1.381
	N-desmethyllumpromazin	ng/L	836 ± 447	349 ± 110
	Norquetiapin	ng/L	9.900 ± 4.124	9.975 ± 2.885
	Norsertalin	ng/L	< 50	< 50
	Oxazepam	ng/L	7.740 ± 2.524	10.367 ± 3.415
	Quetiapin	ng/L	33.800 ± 8.136	2.528 ± 1.246
	Sertralin	ng/L	448 ± 89	285 ± 95

* 2 Einzelwerte

Einige Spurenstoffe, wie Citalopram und Melperon, wurden durch die biologische Behandlung des SBR nicht eliminiert und wiesen im Ablauf höhere Konzentrationen als im Zulauf auf. Dieses Phänomen lässt sich u. a. auf Rücklösung/Desorption aus Schlamm (Joss et al., 2005), Umwandlung von Metaboliten oder Konjugaten (Ternes et al., 2004), analytische Matrixeffekte oder abweichende Probenahmen zurückführen. Dagegen zeigten andere Substanzen, z. B. Sulfamethoxazol, deutliche Konzentrationsreduktionen durch Adsorption an Schlamm oder biologischen Abbau. Die ausgeprägten Konzentrationsschwankungen von Arzneimitteln im Krankenhausabwasser sind bereits in der Literatur dokumentiert (Svebrant et al., 2021).

5.3 Vorbereitung, Installation und Aufbau der USONiQ-Pilotanlage USO4 am Kohlberghaus (AP 3)

5.3.1 Vorbereitung und Installation der USONiQ-Ozonung in den Ablauf des SBR des Kohlberghauses

Das vornehmliche Ziel des Pilotprojektes SEKUSO war zu ermitteln, inwieweit die Belastung der Umwelt durch Verrieselung in einem Naturschutzgebiet von biologisch gereinigten Abwässern einer Pflegeeinrichtung reduziert werden kann, in dem eine USONiQ-Ozonung in das bestehende Behandlungskonzept integriert wird.

Dazu erfolgte zunächst eine Bestandsanalyse der vorhandenen Infrastruktur. Die Kleinkläranlage am Kohlberghaus in Altena besteht aus einer SBR-Anlage mit einer ursprünglichen Auslegung für 70 Betten. Im Zuge der geplanten Erweiterung der Einrichtung inkl. eines Neubaus für zusätzliche Bewohner wurde die künftige Kapazität überprüft. Das Fließschema zeigt die geplante Integration der 4. Reinigungsstufe (USONiQ-Ozonung) mit den Probenahmestellen: Zulauf zum SBR (A), Ablauf des SBR bzw. Zulauf zur Ozonung (B) und Ablauf der Versuchsanlage (C) (Abbildung 3).

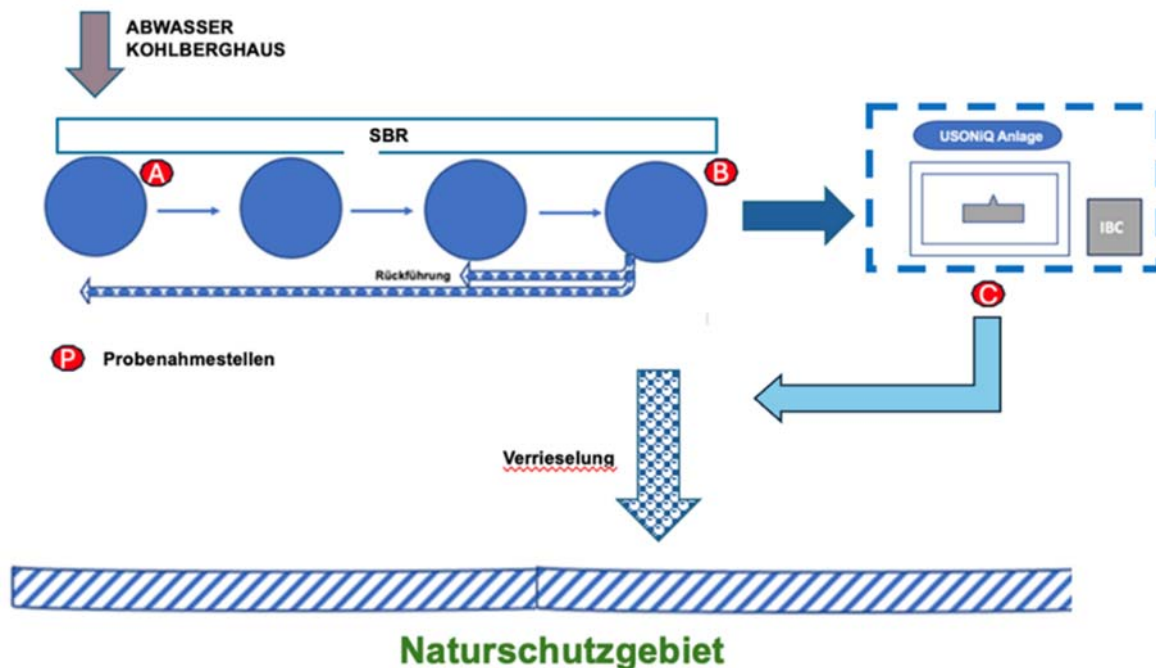


Abbildung 3: Einbettung der USONiQ-Ozonung in die bestehende Struktur der Abwasserbehandlung des Kohlberghauses mit den Probenahmestellen A: Zulauf SBR, B: Ablauf SBR/Zulauf USONiQ-Ozonung und C: Ablauf USONiQ-Ozonung.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens kam eine mobile Testanlage (USO4) der Fa. USONiQ zum Einsatz. Behandelt werden konnten Volumenströme 1 – 4 m³/h. In der Anlage ist ein Rohrreaktormodul mit einem Rohrquerschnitt von 100 mm verbaut. Zur Ozonherzeugung kam ein Ozongenerator der Marke Ozonia zum Einsatz, welcher mit Leitungswasser gekühlt wurde. Die Sauerstoffversorgung erfolgte über Flaschen. Für den Einsatz am Kohlberghaus wurde die Anlage in einen 20'-Container integriert und mit zusätzlichen Sensoren für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit ausgestattet (Abbildung 4). Da bei der USONiQ-Ozonung verfahrensbedingt kein Restozon anfällt, ist nur für Ausnahmefälle ein

Restozonzerstörer installiert. Zur Anpassung an variable Bedingungen im Batch- und Inlinebetrieb wurde eine neue Anlagensteuerung entwickelt und getestet.



Abbildung 4: Blick in den 20' Seecontainer mit eingebauter Testanlage USO4 und Sauerstoffversorgung.

5.3.2 Betriebsarten der USONiQ-Ozonung

Der Betrieb der USONiQ-Ozonung kann grundsätzlich mittels zwei Betriebsarten erfolgen:

- Batch-Betrieb
- Inline-Betrieb

Die Wahl des Betriebsmodus kann abhängig von den jeweiligen lokalen hydraulischen Verhältnissen und/oder dem Platzangebot erfolgen.

Zu Beginn der Testserien wurde die Versuchsanlage aufgrund ihrer Auslegung als mobile Testanlage zunächst im sogenannten Batch- bzw. Kreislaufbetrieb gefahren. Typische Einsatzgebiete dieses Betriebs sind Punktquellen wie Krankenhäuser, Kleinkläranlagen oder Industriebetriebe mit hohen Frachten, die meist über Puffer- oder Speichersysteme verfügen.

Der Ablauf der Kleinkläranlage des Kohlberghauses wurde in einen 1 m³ IBC Container gefüllt und behandelt. Dabei wurde die Ozondosis stufenweise erhöht. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine gezielte Betrachtung der Einflussfaktoren (z. B. Ozondosis, Volumenstrom, Einstellungen der Ultraschallbehandlung etc.) auf die Oxidation. Abschließend erfolgte eine Kalibrierung der Versuchsanlage. Für jede untersuchte Einstellung erfolgte eine Input-Output Probenahme. Im Batchbetrieb ist kein zusätzlicher Puffertank notwendig. Eine grafische Darstellung dieser Betriebsart in Abbildung 5 zu finden.

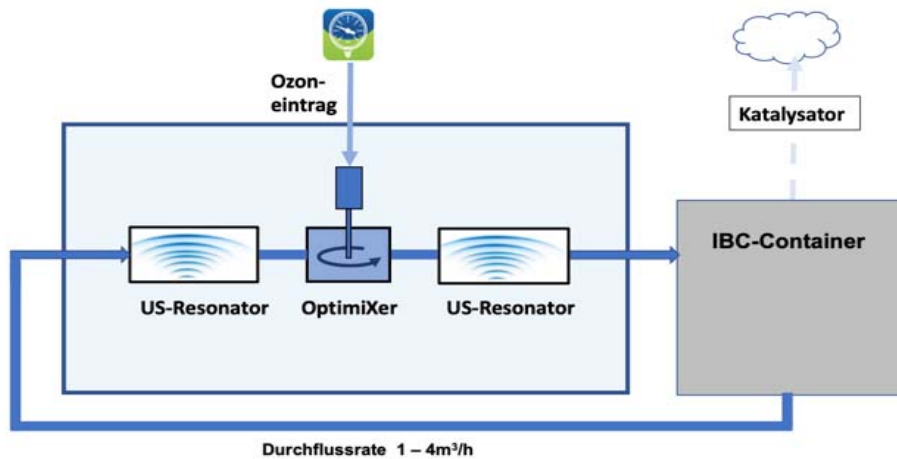


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Batch-Betriebs der USONiQ-Ozonung.

Nach Kalibrierung und Programmierung wurde der Inline- bzw. Durchlaufbetrieb vorbereitet. Dabei kann der Betrieb volumenproportional oder unter Nutzung eines Pufferbeckens erfolgen, das Schwankungen ausgleicht und den Anlagenbetrieb optimiert (siehe Abbildung 6).

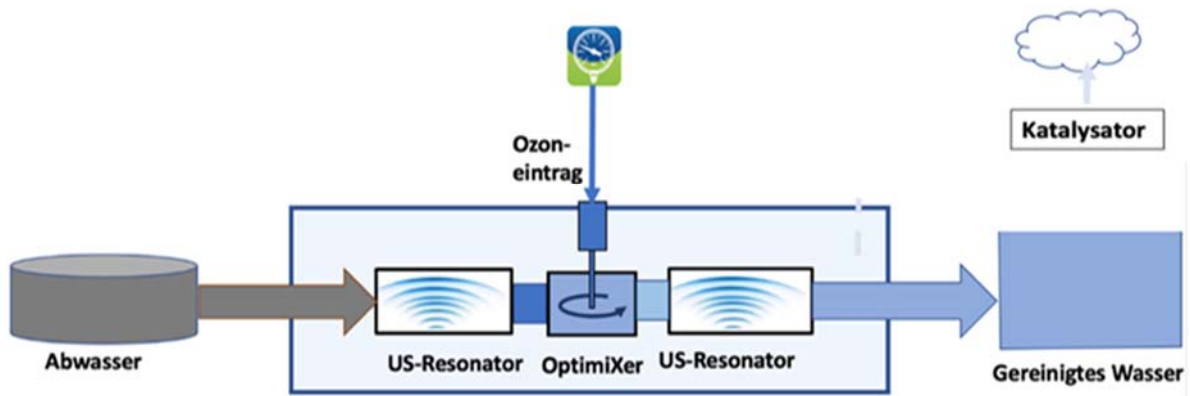


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Inline-Betriebs der USONiQ-Ozonung.

Im Inlinebetrieb wurde der zu behandelnde Abwasserstrom einmalig durch einen Rohrreaktor geführt. Die Ozondosierung erfolgte hierbei volumenproportional. Klassische Einsatzgebiete sind die Behandlung von großen Volumenströmen (z. B. kommunale Kläranlage).

5.3.3 Planung und Aufbau

Die Installation der Testanlage am Kohlberghaus in Altena erforderte eine umfassende Planung der hydraulischen Infrastruktur, Probenahmestellen und Einhausung unter Berücksichtigung begrenzter Flächen ($3 \times 7 \text{ m}$) und der Sicherheit der Bewohner. Nach 3D-Vermessung und Fundamentierung wurde die Anlage USO4 in einen 20'Container integriert und am 31.07.2024 installiert (Abbildung 7).

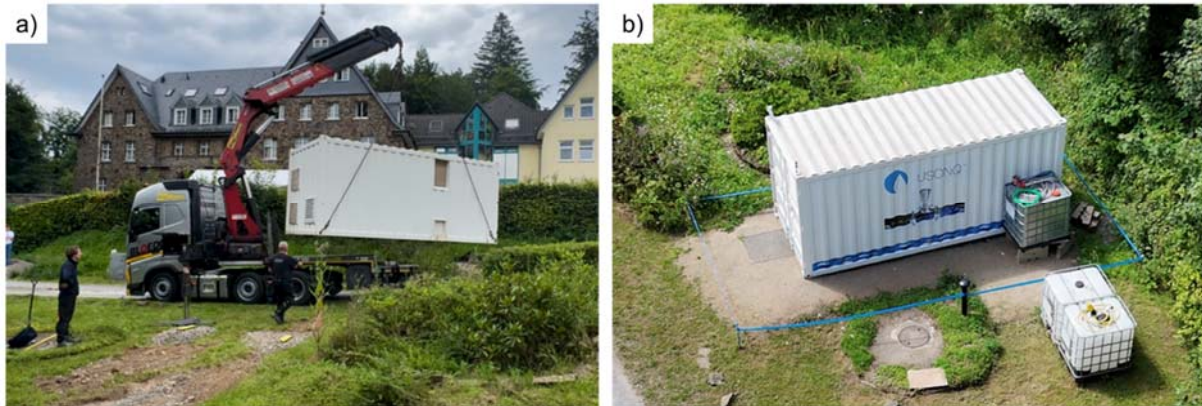


Abbildung 7: Anlieferung (a) und Aufstellort mit und effektiv verfügbarer Arbeitsfläche für die Versuche zur Ozonung des Ablaufs des SBR am Kohlberghaus.

5.4 Untersuchungen zum Spurenstoffabbau mittels der USONiQ-Technologie (AP 4)

Nach erfolgreichem Einbau und Kalibrierung der Testanlage wurden insgesamt 5 Testreihen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden jeweils in den Aufbau der folgenden Testreihe einbezogen.

Eine besondere Herausforderung stellte die Probenahme dar. Da am vorhandenen SBR keine herkömmlichen Probenahmestellen installiert werden konnten, musste jede einzelne Probenahme händisch an den vorhandenen Schächten unter großem Aufwand durchgeführt werden. Ein Eindruck der Probenahme des Zulaufs des SBR mit dem Blick in den Zulaufschacht ist in Abbildung 8 a) dargestellt. In Abbildung 8 b) ist eine Probe des Ablaufs des SBR (linke Flasche) und eine Probe des Überstandes des SBR-Zulaufs (rechte Flasche) dargestellt.

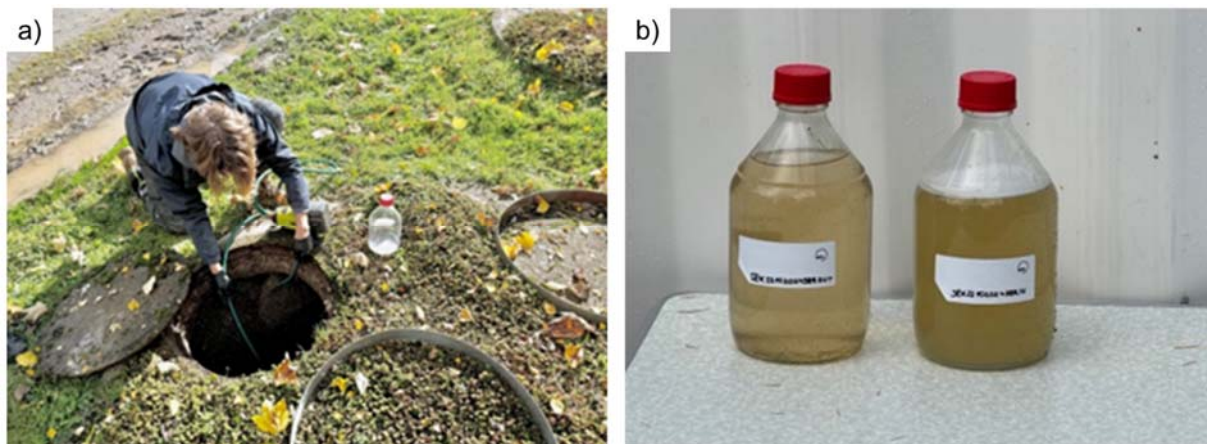


Abbildung 8: a) Probenahme am Zulaufschacht des SBR mit b) Proben vom Überstand des Zulaufs und des Ablaufs des SBR.

Aufgrund der exponierten Lage des Kohlberghauses war der Testzeitraum von starken Schneefällen und Frost geprägt, sodass die Anlage im Dezember 2024 außer Betrieb genommen, winterfest gemacht und erst im Frühjahr 2025 wieder in Betrieb genommen werden konnte. Die begrenzten hydraulischen und räumlichen Bedingungen verhinderten den geplanten 14-tägigen Dauerbetrieb. Zur Erweiterung der Aussagekraft wurde zusätzlich eine Testreihe mit biologisch gereinigtem Abwasser des Marienhospitals Gelsenkirchen durchgeführt. Hierfür wurde, mit Unterstützung der Emschergenossenschaft, 1 m³ Abwasser entnommen und in Altena mittels der USO4 Ozonung behandelt.

Eine Übersicht über die einzelnen Testreihen mit den Einstellungen der USONiQ-Ozonung ist in Tabelle 8 gegeben. Der Optimixer[®] wurde konstant mit 3.000 U/min betrieben. Mit diesem Versuchsdesign konnten sowohl die Stabilität der Anlage im Langzeitbetrieb als auch die Vergleichbarkeit von Inline- und Batchverfahren unter realen Betriebsbedingungen bewertet werden. Die zusammengefassten Ergebnisse der einzelnen Testreihen sind in den darauffolgenden Abbildungen und Tabellen dargestellt. Die Detailergebnisse sind im Anhang zu finden.

Tabelle 8: Durchgeführte Testreihen nach Inbetriebnahme der USONiQ-Ozonung.

Nr	Datum	Betriebsart	O ₃ Dosierung g/m ³	Spezifische O ₃ Dosierung mg _{O3} /mg _{DOC}	Ziel
1.1	05.10.2024	Batch	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 und 16	0,26, 0,51, 0,77, 1,0, 1,3, 1,5, 1,8 und 2,1	Untersuchungen zu Spurenstoffabbau und Ozondosis
1.2	06.10.2024	Inline	8	0,94	Erster Inline-Betrieb
2	22.10.2024	Batch	2, 3, 4, 5 und 6	0,18, 0,27, 0,36, 0,45 und 0,55	Untersuchungen zu Spurenstoffabbau und Ozondosis
3.1	13.12.2024	Inline	8, 10, 12, 16 und 20	0,33, 0,42, 0,50, 0,67 und 0,83	Untersuchungen zu Spurenstoffabbau und Ozondosis, Testung Inline-Betrieb
3.2	13.12.2024	Batch	Sechs Versuche mit jeweils 10	0,83	Ermittlung Zusammenhang zwischen Stoffstrom (Gesamtgas), dessen Zusammensetzung (Ozonanteil) und dem Stromvolumen
4.1	25.03.2025	Batch	2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14 und 16	0,13, 0,27, 0,40, 0,47, 0,53, 0,60, 0,67, 0,80, 0,93 und 1,1	Untersuchungen im Ablauf eines Krankenhauses zum Vergleich,
4.2	25.03.2025	Inline	4, 6, 6, 16 und 20	0,27, 0,40, 0,40, 1,3 und 1,1	Ermittlung Energiebedarf der USONiQ-Ozonung
5.1	17.06.2025	Inline	8, 10 und 12	0,86, 1,1 und 1,3	Simulierter Dauerbetrieb, Betrachtungen zu Desinfektionswirkung und Transformationsprodukten
5.2	18.06.2025	Inline	6, 10, 14 und 18	0,63, 1,1, 1,5 und 1,9	Inline-Batch-Vergleich
5.3	18.06.2025	Batch	8 und 12	0,84 und 1,3	Inline-Batch-Vergleich

Der Zusammenhang zwischen der eingesetzten Ozondosis und dem Spurenstoffabbau ist im Allgemeinen positiv korreliert: Mit steigender Ozondosis nimmt die Abbaurate der meisten Spurenstoffe zu. Dabei wird die Ozondosis üblicherweise als spezifische Ozondosis ($\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$) angegeben. In Abbildung 9 sind exemplarisch durch die USONiQ-Ozonung erzielte Eliminationsraten für 2 Spurenstoffe und 2 Psychopharmaka bei verschiedenen spezifischen Ozondosen dargestellt. Der SBR wurde nicht mitbetrachtet.

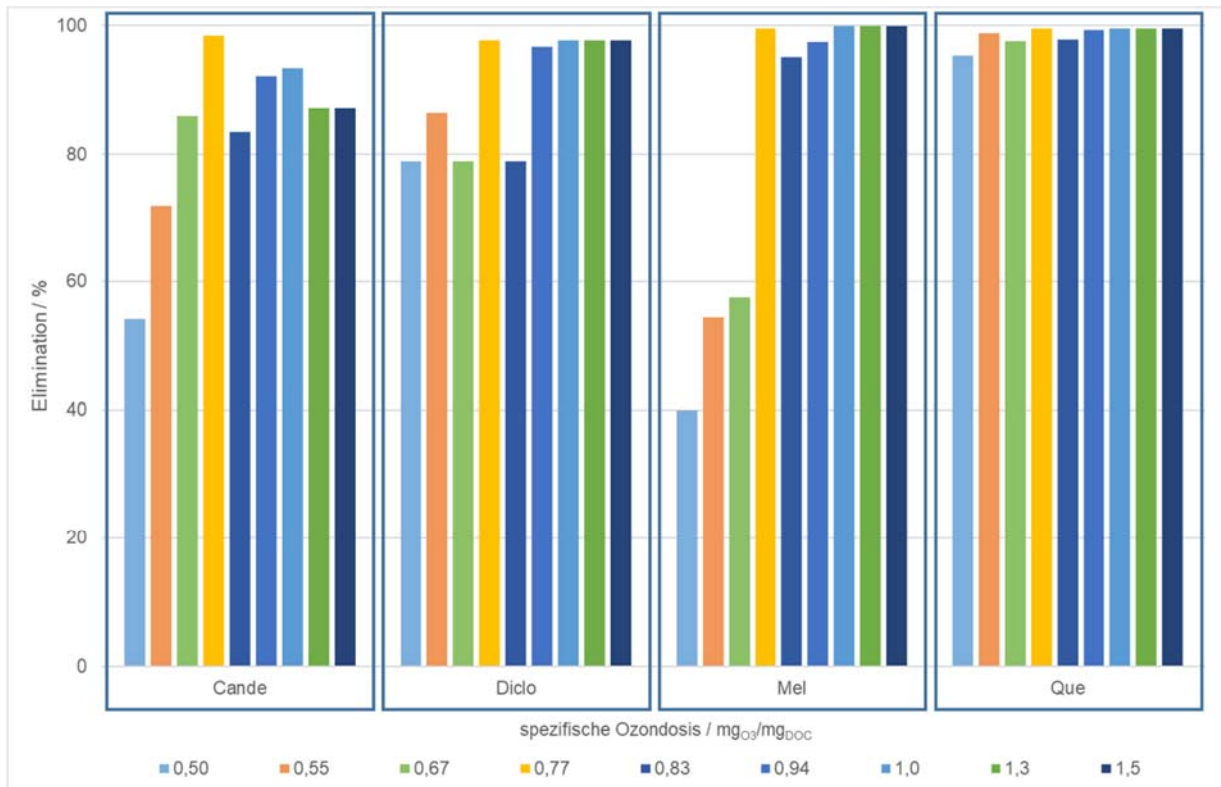


Abbildung 9: Beispielhafte Eliminationsleistung der USONiQ-Ozonung bei verschiedenen spezifischen Ozondosen ($\text{mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$) für 2 Spurenstoffe und 2 Psychopharmaka.

Obwohl die EU-Kommunalabwasserrichtlinie für öffentliche Kläranlagen und nicht für Krankenhausabwässer bzw. Punktquellen ein Eliminationsziel von 80% festsetzt, wurden die Testversuche mit dem Ziel einer Vergleichbarkeit, insbesondere auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zur Entlastung der öffentlichen Kläranlagen durchgeführt.

Im Betrieb am Kohlberghaus zeigte sich, dass bereits ab einer spezifischen Ozondosis von $0,26 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{mg}_{\text{DOC}}$ Gesamteliminationsraten (SBR und USONiQ-Ozonung) von $> 80 \%$ für die gemäß EU-KARL relevanten Substanzen erzielt wurden. Die weitergehenden relevanten Entlastungsvorteile für öffentliche Kläranlagen in punkto Desinfektion sind in Kapitel 5.4.1.3 dargestellt.

Als letzter Punkt wurde die Zusammensetzung des Gasgemisches optimiert. In Testreihe 3.2 ist eine experimentelle Untersuchung durchgeführt worden, die den Zusammenhang zwischen Stoffstrom (Gesamtgas), dessen Zusammensetzung (Ozonanteil) und dem Stromvolumen analysierte. Ziel war es, den Zusammenhang zwischen Gasvolumenstrom, Ozonübertrag in die Flüssigphase sowie dessen Einfluss auf die Spurenstoffelimination besser zu verstehen. In dieser Testreihe wurden sechs Proben mit einer konstanten Ozonkonzentration von $10 \text{ g}/\text{m}^3$ genommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei variierendem Luftstrom deutliche Unterschiede in der Eliminationsleistung auftreten, obwohl die eingespeiste Ozonkonzentration stets konstant blieb. So erzielten höhere Luftströme und niedrigerer Ozonanteil (z. B. 0,50 m³/h) eine deutlich geringere Übertragungsleistung als geringere Luftströme (z. B. 0,085 m³/h) in Verbindung mit hohem Ozonanteil im Trägergas. Bedingt durch den effizienten Gas-Flüssig-Mischer (OptimiXer®) konnten auch bei sehr kleinen Luftmengen hohe Übertragungsraten erzielt werden. Aus diesem Grund ist die letztere Kombination für das USONiQ-Verfahren zu bevorzugen.

5.4.1 Abschließende Untersuchungen mit erweitertem Analysenspektrum zur Bewertung der Transformationsprodukte und der Desinfektionsleistung und zur Simulation eines Dauerbetriebes der Versuchsanlage

5.4.1.1 Eliminationsleistung im simulierten Dauerbetrieb

Im Rahmen der letzten durchgeführten Testreihen war ein Teilziel eine Integrationssimulation der Anlage unter realitätsnahen Bedingungen herzustellen. Dazu wurde in stündlichen Intervallen über mehrere Stunden im konstanten Inline-Betrieb jeweils eine definierte konstante Ozondosis (8, 10 und 12 mgO₃/L) eingestellt und systematisch beprobt. Eine Probe wurde zu Beginn der Untersuchungen entnommen und eine Probe nach einer Stunde Laufzeit. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 als mittlere Elimination mit Schwankungsbreite über alle analysierten Spurenstoffe bzw. Psychopharmaka dargestellt. Die Spurenstoffe $\Sigma 4 + 5$ Methylbenzotriazol, 1H-Benzotriazol, Clarithromycin und Sulfamethoxazol und die Psychopharmaka Flupentixol und Norsertraline wurden nicht berücksichtigt, da sie im in den Versuchsproben nicht nachweisbar waren. Negative Eliminationsleistungen im SBR wurden bei der Auswertung aufgrund der gewählten Darstellungsform als „0“ interpretiert.

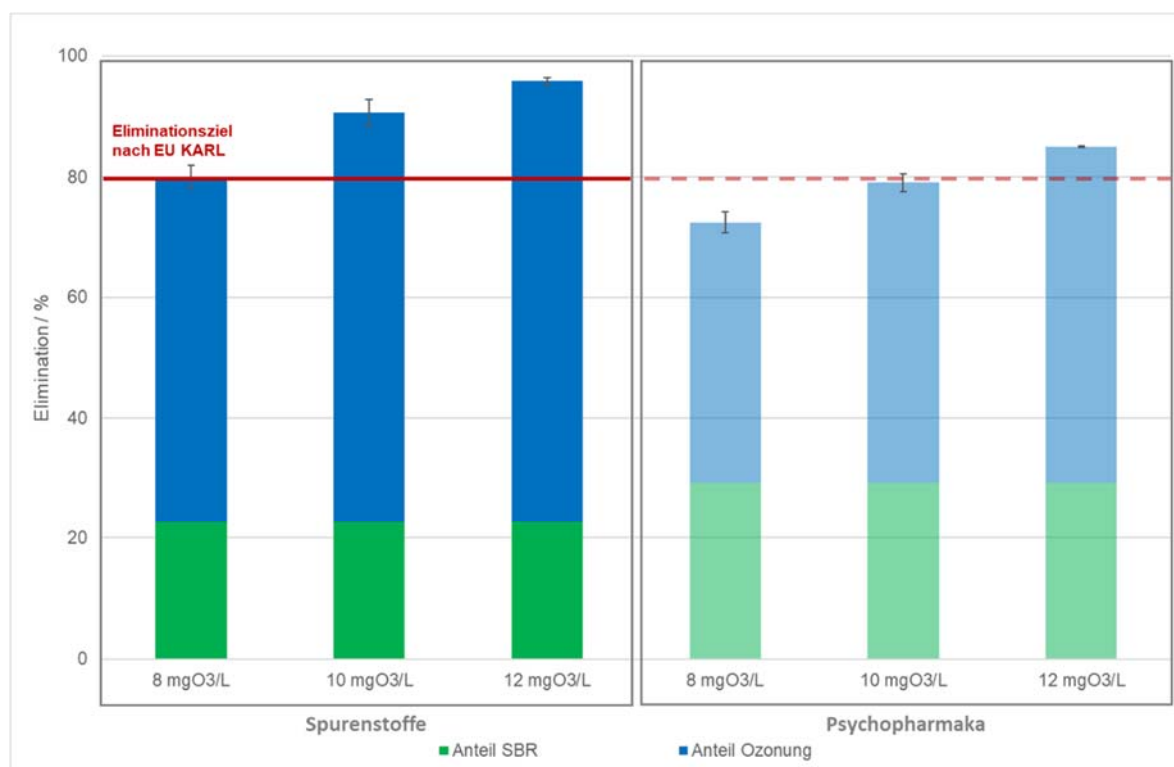


Abbildung 10: Mittlere Elimination der Spurenstoffe und der Psychopharmaka über das Gesamtsystem mit Anteil SBR und Ozonung.

Für die Spurenstoffe konnte das Eliminationsziel von 80 % im Mittel über die gesamte Abwasserbehandlung sicher ab einer zugegebene Ozondosis von 8 mg/L (spezifische Dosierung = 0,86 mg_{O₃}/mg_{DOC}) erreicht werden. Der Anteil des SBR lag durchschnittlich bei 23 %. Die Psychopharmaka waren mit leicht höheren spezifischen Ozondosen ebenfalls sicher aus dem Abwasser zu entfernen. Die Eliminationsleistungen der Anlage wiesen über den Testlauf zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten Abweichungen von < 1,4 % auf.

Neben der Eliminationsleistung der Spurenstoffe und der Psychopharmaka wurde im Rahmen der letzten Probenserie am Kohlberghaus in Altena die Bildung von Transformationsprodukten und die Desinfektionsleistung näher betrachtet.

5.4.1.2 Betrachtungen zu Transformationsprodukten

Zu den derzeit als besonders problematisch eingestuften Transformationsprodukten zählen Stoffe mit kanzerogenen oder mutagenen Eigenschaften wie Bromat (BrO₃⁻) oder Nitrosamine (Jahan et al., 2021; Kosek et al., 2020). Während Nitrosamine bzw. die mutagene Wirkung von Nitrosaminen und weiteren unbekannten TP's in der Regel durch biologische Nachbehandlungsverfahren reduziert werden können, ist dies bei Bromat nicht möglich. Eine erhöhte Bromatbildung kann somit die Einführung der Ozonung als erweiterte Abwasserbehandlung beeinträchtigen (Jahan et al., 2021; Sauter et al., 2021; Soltermann et al., 2016; Von Gunten, 2003a).

Im Rahmen der letzten Versuchsreihe konnte selbst bei einer spezifischen Ozondosis von 1,3 mg_{O₃}/mg_{DOC} keine Bromatbildung nachgewiesen werden. Alle Analysenwerte lagen unterhalb von der Bestimmungsgrenze (1 µg/L).

Die Analyse der Nitrosamine ergab, dass NDMA bereits im Zulauf zur Ozonung mit einer Konzentration von 9,4 ng/L nachgewiesen werden konnten. Die ist ggf. auf die Verwendung von Desinfektionsmitteln zurückzuführen. Durch die Ozonung wurde die Konzentration von NDMA bei einer Zugabe von 10 mg_{O₃}/L im Ablauf der Ozonung auf durchschnittlich 37 ng/L erhöht. Die Konzentrationen der weiteren untersuchten Nitrosamine lagen auch nach der Zugabe von Ozon unterhalb der Bestimmungsgrenze (5 µg/L). Durch die biologischen Prozesse im Boden des Verrieselungsfeldes kann dieser Eintrag jedoch vermutlich abgebaut werden. In Deutschland liegt der (provisorische) Trinkwassergrenzwert für die Gesamtkonzentration der Nitrosamine bei 0,01 µg/L. Die WHO empfiehlt einen Trinkwasserrichtwert von 0,1 µg/L. Im Abwasser sind diese Stoffe bisher gesetzlich nicht geregelt. Aus den Empfehlungen zur Eignungsprüfung eines Abwassers auf die Möglichkeit der Ozonung des VSA wird eine Gesamtnitrosamin-Konzentrationen nach einer Ozonung von < 50 ng/L als unauffällig eingestuft (VSA, 2021). Dieser Wert konnte auch noch der Zugabe von Ozon eingehalten werden.

Mit Hilfe eines Non-Target Screening werden hochauflösende Chromatogramme nach sogenannten Features (Masse-zu-Ladungs-Verhältnissen) durchsucht. Diese Features stellen peakähnliche Signale dar, welche durch ihre akkurate Masse und die Retentionszeit definiert sind. Ein Non-Target Screening kann zusätzliche Informationen über eine Probe geben. Es wird unter anderem zur Suche nach zusätzlich vorhandenen Substanzen, zur Ermittlung von Unterschieden zwischen den einzelnen Proben oder zur Beschreibung von Prozessen eingesetzt. Die Datenverarbeitung des NTS erfolgte mit StreamFind (Version 0.3.0), einer Open-Source-Software, die unter <https://github.com/odea-project/StreamFind> verfügbar ist. Die Ergebnisse wurden anhand der Gesamtzahl der Features in jeder Analysen-Replikationsgruppe sowie durch Durchführung einer Fold-Change-Analyse zwischen dem

Zulauf und den Abläufen der Ozonung erstellt. Die Anzahl der gefundenen Features ist in Abbildung 11 dargestellt.

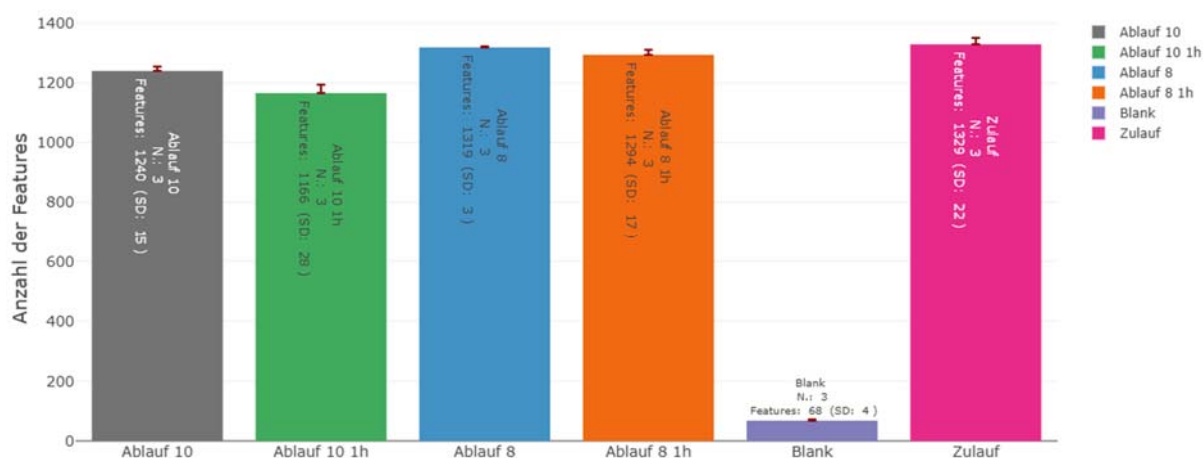


Abbildung 11: Detektierte Features in den verschiedenen Proben vor Ozonung (pinker Balken) und nach Zugabe von 10 mg_{O3}/L (grauer Balken und nach einer Stunde grüner Balken) bzw. 8 mg_{O3}/L (blauer Balken und nach einer Stunde oranger Balken). Der Blank ist als lila Balken dargestellt.

Die Anzahl der in der Zulaufprobe nachgewiesenen Features war ähnlich der Anzahl der Features nach Zugabe von 8 mg_{O3}/L. Die wenigsten Features konnten in der Probe nach einer Stunde Zugabe mit der Dosis 10 mg_{O3}/L detektiert werden. Da die Anzahl der Features jedoch keine Veränderungen der Intensitätswerte anzeigt, wurden Fold-Change-Analysen durchgeführt, um die Unterschiede zwischen den Proben weiter zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

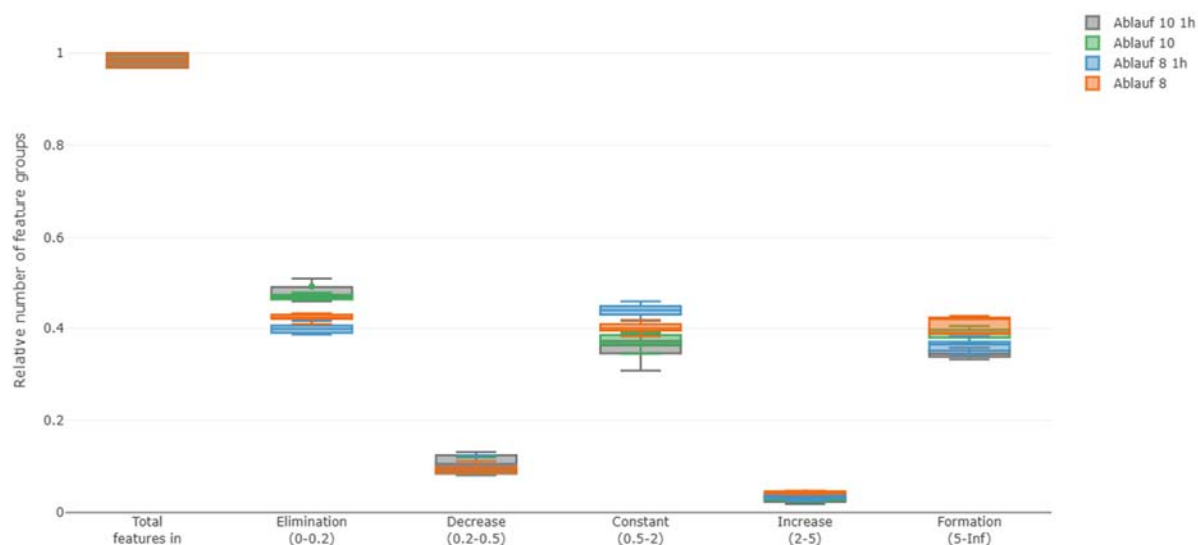


Abbildung 12: Ergebnisse der Fold-Change-Analysen.

Die Intensitätsstufen der Features wurden unter Verwendung des Gesamtionenchromatogrammprofils in Kombination mit internen Standards korrigiert, um mögliche Matrixeffekte zwischen den verschiedenen Proben zu berücksichtigen. Die Fold-Change-Analyse wurde anhand von fünf Kategorien durchgeführt: Konstante Features mit konstanten Intensitätsstufen (Fold Change zwischen 0,5 und 2); zunehmende Features mit erhöhten Intensitätsstufen (Fold Change größer als 2 und kleiner als 5); abnehmende Features mit verringerten Intensitätsstufen (Fold Change kleiner als 0,5 und größer als 0,2); Eliminierte Features, die in den Abwasserproben nach Ozonung nicht nachgewiesen wurden (Fold Change kleiner als 0,2); und Bildungsfeatures, die in der Zulaufprobe zur Ozonung nicht nachgewiesen wurden (Fold Change größer als 5). Die Ergebnisse zeigen, dass die Abwasserproben nach der Zugabe von 10 mg_{O3}/L die höchste Anzahl an entfernten Features aufwiesen (ca. 48 %), verglichen mit den Proben mit 8 mg_{O3}/L (ca. 40 %). Die Anzahl der Features, die zu- oder abnahmen, war unter beiden Bedingungen ähnlich und lag bei etwa 10 bzw. 4 %. Schließlich bildete sich bei der Zugabe von 8 mg_{O3}/L eine etwas höhere Anzahl an Features als bei der Zugabe von 10 mg_{O3}/L. In den Versuchen konnte somit sowohl die Bildung neuer TPs als auch die Entfernung von Features durch die USONiQ-Ozonung gezeigt werden.

5.4.1.3 Ermittlung der Desinfektionswirkung

Zur Betrachtung der Desinfektionswirkung wurde in 2 Probenserien auch die Anzahl von Enterokokken, E. Coli und Coliformen pro mL analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt. Zur besseren Einordnung der erzielten Ergebnisse sind die Anforderungen an fäkalinduzierte Belastungen der Badegewässerverordnung (BadegewVO) mit der Qualitätsstufe „ausgezeichnete Qualität“ in Klammern hinter dem Messwert angegeben.

Tabelle 9: Anzahl an Enterokokken, E. Coli und Coliformen pro mL in Zulauf und Ablauf zur Ozonung bei verschiedenen Ozondosen.

Probenbezeichnung	Zugabe Ozon mg _{O3} /L	Enterokokken Anzahl/mL	E. Coli Anzahl/mL	Coliforme Bakterien Anzahl/mL
Zulauf Ozonung		360	1.000	26.000
Ablauf Ozonung	8	< 1 (2*)	10 (5*)	430
Ablauf Ozonung nach 1 h	8	< 1 (2*)	9 (5*)	55
Zulauf Ozonung		8	500	6.400
Ablauf Ozonung	10	0 (2*)	< 1 (5*)	0
Ablauf Ozonung nach 1 h	10	0 (2*)	< 1 (5*)	0

* Grenzwert nach Badegewässerverordnung für eine „ausgezeichnete Qualität“ hinsichtlich der Belastung mit fäkalinduzierten Keimen.

Die Desinfektionswirkung der USONiQ-Ozonung war deutlich zu erkennen. Durch die Zugabe von 8 mg_{O3}/L (spezifische Dosis von 0,86 mg_{O3}/mg_{DOC}) wurde eine Reduzierung für > 99 % für Enterokokken und E. Coli erzielt. Coliforme konnten um > 98 % aus dem Abwasser entfernt werden. In den Proben nach Zugabe von 10 mg_{O3}/L (spezifische Dosis = 1,1 mg_{O3}/mg_{DOC}) konnten keine Bakterien der drei untersuchten Spezies nachgewiesen werden. Verglichen mit den Werten der Badegewässerverordnung konnte hinsichtlich der Belastung fäkal induzierter Keime (Enterokokken und E. Coli) eine „ausgezeichnete Qualität“ bei der Zugabe von

10 mg_{O3}/L erzielt werden. Das Vorkommen von Coliformen Bakterien im Allgemeinen ist in der Badegewässerverordnung nicht geregelt.

5.4.2 Exkurs: Behandlung von Krankenhausabwasser nach einem MBR am Beispiel Marienhospital Gelsenkirchen mittels USONiQ-Ozonung

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wurde eine Ablaufprobe des Membran-Bioreaktors des Marienhospitals in Gelsenkirchen mit Unterstützung der Emschergenossenschaft entnommen und zur Pilotanlage in Altena transportiert. Dort wurde die Probe mit verschiedenen Ozondosen sowohl im Batch- als auch im Inline-Betrieb beaufschlagt. Im Anschluss wurden Eliminationsleistungen für Spurenstoffe ermittelt. Psychopharmaka wurden in dieser Versuchsreihe nicht betrachtet.

Zunächst wurden die 6 relevanten Stoffe nach KARL bestimmt. Das zur Ermittlung der Reinigungsleistung einer Kläranlage beschlossene Vorgehen ist bereits in Kapitel 2.2 beschrieben. Im Fall der Versuche mit dem Abwasser des Marienhospitals in Gelsenkirchen wurden folgende Stoffe identifiziert:

- Gruppe 1: Amisulprid, Clarithromycin, Diclofenac und Hydrochlorothiazid
- Gruppe 2: Candesartan und 1H-Benzotriazol

In Abbildung 13 ist die Gesamtelimination für die 6 gewählten Spurenstoffe im Inline-Betrieb bei spezifischen Ozondosen von 1,1 und 1,3 mg_{O3}/mg_{DOC} dargestellt. Unterschieden wurde zwischen Elimination im MBR (grüne Balken) und Elimination durch Ozonung (blaue Balken). Zusätzlich ist die mittlere Gesamtelimination bei beiden spezifischen Ozondosen aufgeführt.

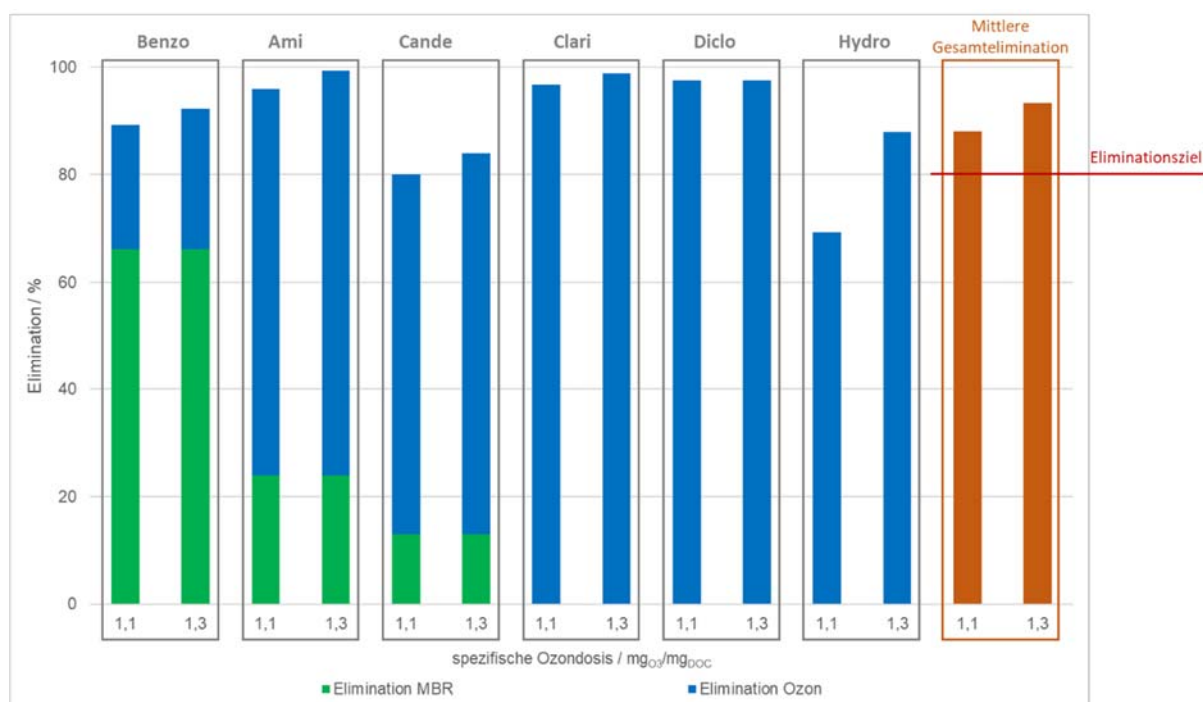


Abbildung 13: Eliminationsleistungen durch MBR (grüne Balken) und USONiQ-Ozonung (blaue Balken) im Inline-Betrieb des Ablaufs des Marienhospitals in Gelsenkirchen bei verschiedenen spezifischen Ozondosen mit mittlerer Gesamtelimination (rote Balken).

Für die Stoffe 1*H*-Benzotriazol, Amisulprid und Candesartan ist eine Elimination durch die biologische Behandlung im SBR nachweisbar. Die Elimination von Clarithromycin, Diclofenac und Hydrochlorothiazid fand im Rahmen der Versuchsreihe ausschließlich durch Ozon statt. Die nach KARL berechnete mittlere Gesamtelimination lag bei 88 bzw. 93 % für die spezifischen Ozondosen 1,1 bzw. 1,3 mg_{O3}/mg_{DOC}. Eine weitere Versuchsreihe im Batch-Betrieb (bei steigender Ozonzugabe) zeigte ähnliche Gesamteliminationsleistungen auf.

In der modernen medizinischen Bildgebung werden Röntgenkontrastmittel (RKM) eingesetzt, um die Darstellung anatomischer Strukturen und funktioneller Prozesse durch eine verbesserte Röntgendichte zu ermöglichen. Nach der Applikation werden die RKM nahezu unverändert innerhalb von etwa 24 Stunden ausgeschieden. Aufgrund ihrer hohen chemischen Stabilität und Wasserlöslichkeit erfolgt in kommunalen Kläranlagen in der Regel nur eine Umwandlung. Der iodierte Kern der Substanzen bleibt meist weiterhin bestehen.

Einmalig wurden im Ablauf der biologischen Reinigung mittels MBR am Marienhospital in Gelsenkirchen auch Röntgenkontrastmittel analysiert und deren Verhalten bei unterschiedlichen Ozondosen der USONiQ-Ozonung betrachtet. Die erzielte Gesamtelimination im Batch-Betrieb ist in Abbildung 14 für Iopromid, Amidotrizoesäure und Iohexol dargestellt. Eine Betrachtung von Iomeprol, Iopamidol und Ioversol war aufgrund der Konzentrationen im Ablauf des MBR nicht möglich.

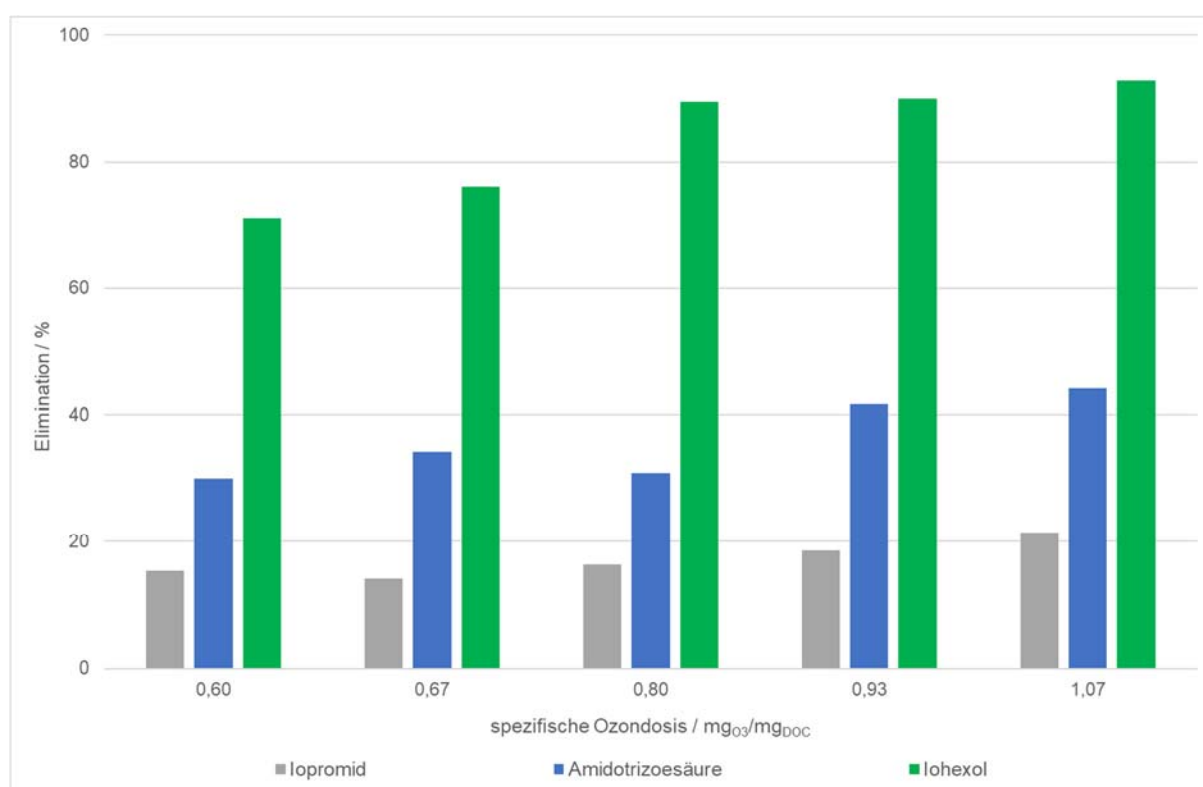


Abbildung 14: Gesamtelimination (aus MBR und USONiQ-Ozonung) der RKM im Batch-Betrieb-Betrieb bei verschiedenen spezifischen Ozondosen aus dem Abwasser des Marienhospitals in Gelsenkirchen.

Für die RKM war eine Steigerung der Elimination mit zunehmender spezifischer Ozondosis erkennbar. Bei einer spezifischen Ozondosis von 0,93 mg_{O3}/mg_{DOC} konnten z. B.

Eliminationsleistungen von 19, 42 bzw. 90 % für Iopromid, Amidotrizoesäure bzw. Iohexol beobachtet werden. Iodierte RKM sind chemisch sehr stabil. Das liegt an ihrer mehrfach iodierten, aromatischen Struktur mit stark elektronenentziehenden Gruppen. Diese Struktur schützt den aromatischen Kern vor Angriffen durch Ozon oder Hydroxylradikale. Bei der Abwasserozonung werden Röntgenkontrastmittel aus diesem Grund nur teilweise oxidiert. Die Struktur des aromatischen Rings bleibt meist erhalten, sodass viele TP's weiterhin stabil und teils persistent sind.

5.5 Bewertung der Umweltentlastung und Vorplanung eines Abwasserbehandlungskonzeptes zur Spurenstoffelimination bei dezentralen Kleinkläranlagen (AP 5)

Als abschließender Teil der Untersuchungen wurde die Umweltentlastung durch den Einsatz der USONiQ-Ozonung am Einsatzort Kohlberghaus berechnet. Dazu sind Frachtabschätzungen für verschiedene eingetragene Ozondosen durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.5.1 dargestellt. Darüber hinaus wurde ein Konzept zur technischen Umsetzung der dezentralen Spurenstoffelimination entwickelt. Das Ergebnis ist in Kapitel 5.5.2 zu finden.

5.5.1 Bewertung der Umweltentlastung

Durch die Verrieselung von biologisch behandelten Abwässern einer psychiatrischen Pflegeeinrichtung können erhebliche Frachten an pharmakologisch aktiven Substanzen in die Umwelt eingetragen werden. Die mittleren Ablaufkonzentrationen der einzelnen Spurenstoffe bzw. Psychopharmaka wurden für eine Frachtberechnung mit der mittleren Jahresabwassermenge (5.147 m³/a) in Relation gesetzt. Die sich daraus ergebende Abschätzung der Fracht der Einträge in die Umwelt ist in Tabelle 10 mit der Predicted No Effect Concentration (PNEC) und dem Beurteilungswert (BW) nach NRW D4-Liste dargestellt. Die Beurteilungswerte setzen sich aus (wenn vorhanden) Umweltqualitätsnormen, Orientierungswerten oder ohne Bewertungsgrundlage Präventivwerten zusammen. Eine Auflistung ist auf der Internetseite [Flussgebiete.nrw](https://www.flussgebiete.nrw.de/monitoring-leitfaden-oberflaechengewaesser) des Landesamts für Umwelt, Naturschutz und Klima des Landes NRW zu finden (<https://www.flussgebiete.nrw.de/monitoring-leitfaden-oberflaechengewaesser>).

Tabelle 10: Mittlere Ablaufkonzentrationen des SBR des Kohlberghauses, berechnete Fracht und Beurteilungswerte der untersuchten Spurenstoffe.

Parameter	Mittlere Ablaufkonzentration des SBR µg/L	Fracht g/a	PNEC µg/L	BW nach D4-Liste µg/L
Organische Spurenstoffe	Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol	< 0,045	-	140
	1H-Benzotriazol	< 0,035	-	97
	Amisulprid	54	277	10
	Candesartan	1,3	6,8	100
	Carbamazepin	4,4	22	0,5
	Citalopram	0,44	2,3	6,4
	Clarithromycin	< 0,030	-	0,002
	Diclofenac	1,7	9,0	0,05
	Gabapentin	1,8	9,5	10
	Hydrochlorothiazid	1,6	8,4	0,00262
	Irbesartan	0,084	0,43	-
	Metoprolol	1,7	8,7	-
	Sulfamethoxazol	0,017	0,088	-
	Venlafaxin	0,61	3,1	-
Psychopharmaka	Diazepam	0,52	2,7	2,7
	Flupentixol	< 0,045	-	-
	Hydroxycarbamazepin	0,030	0,15	-
	Levomepromazin	0,25	1,3	-
	Melperon	4,9	25	-
	N-desmethylevomepromazin	0,35	1,8	-
	Norquetiapin	10	51	-
	Norsertalin	< 0,050	-	-
	Oxazepam	11	59	1,9
	Oxcarbazepin	2,5	13	10
	Quetiapin	0,29	1,5	0,12
				-

Die höchsten Frachten konnten für das Antipsychotikum Amisulprid berechnet werden. Er wird vor allem zur Behandlung von Schizophrenie und anderen psychotischen Störungen eingesetzt. Es wirkt hauptsächlich durch die Blockade von Dopamin-D2- und D3-Rezeptoren im zentralen Nervensystem. Amisulprid ist ein persistent vorkommender Spurenstoff im Abwasser, da es nach Einnahme unverändert oder als Metabolit ausgeschieden wird. Er ist in KARL in die Gruppe der gut abbaubaren Substanzen eingegliedert. Die berechnete umweltrelevante Fracht lag im Beispiel des Kohlberghauses bei 277 g/a. Die Konzentration im Ablauf des SBR lag durchschnittlich bei 54 µg/L. Die eingesetzte Wirkstoffmenge betrug 730 g im Jahr 2021. 38 % des eingesetzten Wirkstoffes gelangten somit unverändert in die Umwelt. Durch die Implementation der USONiQ-Ozonung in den Abwasserreinigungsprozess am Kohlberghaus konnten die Spurenstoffe bzw. Psychopharmaka in weiten Teilen aus dem Abwasser eliminiert werden. Die Eliminationsraten bei der spezifischen Ozondosis von 1,1 mg_{O₃}/mg_{DOC} wurden mit der berechneten Fracht in Relation gesetzt um die resultierende Jahresfracht des Eintrags in die Umwelt an der Verrieselungsstelle zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zu finden.

Tabelle 11: Resultierende Jahresfrachten des Eintrags von Spurenstoffen und Psychopharmaka in die Umwelt vor und nach Implementierung einer USONiQ-Ozonung bei einer spezifischen Ozondosis von 1.1 mg_{O₃}/mg_{DOC}.

Parameter	Fracht (ohne O ₃) g/a	Durchschnittliche Elimination bei Zugabe von 1,1 mg _{O₃} /mg _{DOC} %	Resultierende Fracht (nach O ₃) g/a
Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol	-	-	-
1H-Benzotriazol	-	-	-
Amisulprid	277	99	3,0
Candesartan	6,8	86	0,98
Carbamazepin	22	100	0,077
Citalopram	2,3	92	0,19
Clarithromycin	-	-	-
Diclofenac	9,0	100	0,038
Gabapentin	9,5	51	4,7
Hydrochlorothiazid	8,4	88	1,0
Irbesartan	0,43	85	0,064
Metoprolol	8,7	85	1,3
Sulfamethoxazol	0,088	-	-
Venlafaxin	3,1	91	0,28
Diazepam	2,7	76	0,64
Flupentixol	-	-	-
Hydroxycarbamazepin	0,15	72	0,042
Levomepromazin	1,3	41	0,77
Melperon	25	78	5,4
N-desmethyllvomepromazin	1,8	53	0,85
Norquetiapin	51	99	0,76
Norsertalin	-	-	-
Oxazepam	59	81	11
Oxcarbazepin	13	98	0,22
Quetiapin	1,5	81	0,28

Derzeit werden am Kohlberghaus jährlich ca. 500 g Spurenstoffe bzw. Psychopharmaka in die Umwelt und insbesondere in ein Naturschutzgebiet eingetragen. Dieser Eintrag kann theoretisch, wie in diesem exemplarischen Beispiel gezeigt, unter Einsatz der im Pilotprojekt eingesetzten USONiQ-Ozonung auf ca. 32 g reduziert werden.

5.5.2 Vorplanung eines Abwasserbehandlungskonzeptes zur Spurenstoffelimination bei dezentralen Kleinkläranlagen

Für das Pilotprojekt SEKUSO am Kohlberghaus/Altena kam eine modifizierte USONiQ-Testanlage (USO4) mit Rohrreakorteknik zum Einsatz. Das USONiQ-Verfahren ermöglicht durch Kombination von Ultraschall und patentierter Ozonbringung in einem Rohrreaktor eine hocheffiziente Elimination von Spurenstoffen sowie Desinfektion von Abwässern an Punktquellen, wie z. B. Krankenhäusern. Die Ozonung erfolgt direkt im Durchfluss, ohne Rückhaltebecken, was eine kompakte Bauweise erlaubt. Die Anlage wurde zwar als Pilotprojekt installiert, aber unter realen Bedingungen im simulierten Dauerbetrieb betrieben. Sie ist auf variable Durchflussmengen zwischen 1 und 4 m³/h ausgelegt. Im Betrieb am

Kohlberghaus wurde eine konstante Betriebsleistung von 2 m³/h gefahren. Die Ozonzugabe ist stufenlos regelbar im Bereich von 0 - 20 mg/L. Während des Testzeitraums wurde die Anlage direkt in den Ablauf der SBR-Reaktoren installiert. Aufgrund eines stark schwankenden Abwasserzulaufs und sehr begrenzter Platzverhältnisse wurde ein Zwischenspeicher eingebaut, um den Zulauf zur Ozonanlage hydraulisch zu entkoppeln.

Die Pflegeeinrichtung war während des Testbetriebs mit einer Belegung von 61 Betten voll belegt. Ein angestrebtes Ziel der Untersuchungen war zu ermitteln, inwieweit eine geplante Erweiterung der Pflegeeinrichtung auf 80 Betten durch den Einsatz der USONiQ-Technologie skalierbar wäre.

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse zeigen, dass bei der eingesetzten Anlagengröße relevante Ergebnisse zur Entlastung des unmittelbaren Eintrags kritischer Substanzen in die Umwelt (Naturschutzpark) erzielt werden konnten. Gleichzeitig konnte ermittelt werden, dass die eingesetzte Anlagenkapazität auch die Erhöhung für das Ausbauvorhaben auf 80 Betten bewältigen könnte. Zum Ziel einer weiteren Vergleichbarkeit wurden auch Ausbaugrößen von 100, 250 und 500 Betten für Krankenhäuser kalkuliert. Darüber hinaus wurde auch die Implementierung in Kleinkläranlagen auf z. B. Campingplätzen, Yachthäfen und zur häuslich/landwirtschaftlichen Nutzung mit je 25 und 50 Nutzern betrachtet. Eine Übersicht für mögliche Anlagengrößen samt Kosten findet sich in Anhang 2.

Anlagenkonzeption Kohlberghaus und Wirtschaftlichkeit

Die Kostenermittlung am Kohlberghaus wurde anhand realer Verbrauchswerte der eingesetzten USONiQ-Testanlage durchgeführt. Dabei gilt zu beachten, dass die Anlage durch den hydraulischen Testaufbau nicht unter optimierten Bedingungen lief. Für real integrierte Anlagen ist daher mit geringeren Betriebskosten zu rechnen. Außerdem wurden die Messungen zu Vergleichszwecken mit anderen Studien mit einer relativ hohen Ozondosis von 10 mg/L durchgeführt. Auch die Marktpreise für Energie und Sauerstoff wurden konservativ kalkuliert: Strom 0,30 €/kWh; Sauerstoff: 0,80 €/Nm³.

Die Messdaten (Messung am 25.03.2025) ergaben einen Stromverbrauch von $\approx 1,13$ kWh/h entsprechend einem Stromverbrauch von 0,56kWh/m³ sowie einen Sauerstoffverbrauch von $\approx 0,20$ Nm³/h.

Hieraus ergeben sich jährliche Gesamtbetriebskosten von 1.249,48 €. Die zugrunde gelegte jährliche Abwassermenge am Kohlberghaus beträgt 4.978 m³. Daraus ergeben sich spezifische Betriebskosten in Höhe von 0,25 €/m³ bzw. 0,06 €/pro Bett/Tag.

Für die geplante Ausbaugröße des Kohlberghauses mit 80 Betten würde sich inklusiv Reserve eine Anlage des Typs USOmed 100 empfehlen mit einer Jahresabwasserkapazität von 8.160 m³ entsprechend 100 Betten. Bei Investitionskosten in Höhe von 280.000 € ergeben sich spezifische Gesamtkosten von 2,52 - 2,95 €/m³ bzw. 0,57 €/pro Bett/Tag bei einer Nutzungsdauer von 15 Jahren.

Bei der USONiQ-Ozonung handelt sich um eine skalierbare Abwasseraufbereitungslösung, die durch ihren modularen Aufbau und geringen Platzbedarf einfach integriert und vollautomatisch betrieben werden kann. Durch den skalierbaren und modularen Aufbau der USONiQ-Ozonung werden somit auch für Kläranlagen < 1000 EW Spurenstoffeliminationen zu wirtschaftlichen spezifischen Kosten möglich.

Zwei Beispielkonzepte zur Behandlung von Abwässern von Krankenhäusern mit einer Belegung von 100 bzw. 500 Betten sind in Anhang 3 dargestellt.

5.6 Öffentlichkeitsarbeit und Berichtserstellung (AP 6)

Bedingt durch die Tatsache, dass es sich beim Kohlberghaus um eine geschlossene Einrichtung mit hohen Sicherheitsauflagen für die Bewohner handelt, waren Informationsveranstaltungen am Projektort nicht möglich. Deshalb musste die Informationsarbeit dezentral erfolgen.

Als mediale Maßnahmen wurden geplant:

- Erstellung einer Website für medizinische Einrichtungen
- Erstellung einer Broschüre
- Erstellung eines Infofilms
- Informationsveranstaltungen mit dem KiJuRat-Iserlohn und NRW
- Download-Angebote über die Website für Fachpublikum

Gespräche mit Vertretern der KiJuRäte sowie Schülergruppen und Politikern haben bereits stattgefunden und weitere Informationsveranstaltungen insbesondere zur Sensibilisierung von Schülern für das Thema Abwasser sind geplant.

Die Projektergebnisse sind erstens sowohl mittelbar als auch unmittelbar für Betreiber von dezentraler Kleinkläranlagen nutzbar, dazu zählen u.a. Krankenhäuser, medizinische Pflegeeinrichtungen, Campingplätze, Yachthäfen sowie landwirtschaftliche und industrielle Betriebe. Zweitens liefern sie Planungsbüros wie auch Betreibern kommunaler Kläranlagen sowie Regierungsstellen und Aufsichtsbehörden Handlungsoptionen für dezentrale Abwasseraufbereitungslösungen an Punktquellen. Drittens kann durch den einfachen Einsatz der Technologie insbesondere im ländlichen Raum eine starke Entlastung der Umwelt erreicht werden.

Die mit dem Projekt verbundene Öffentlichkeitsarbeit wird über das Projektende hinaus fortgeführt.

6. Fazit

In Deutschland wird Krankenhausabwasser grundsätzlich zentral in kommunalen Kläranlagen behandelt. Unter besonderen Randbedingungen, wie etwa fehlendem Kanalanschluss, begrenzter Kläranlagenkapazität, langen Zuleitungen oder sensiblen Standorten wie am Kohlberghaus, ist jedoch die Vor-Ort-Behandlung der Punktquelle Krankenhausabwasser ökologisch und technisch sinnvoll.

Ein aktuelles Beispiel hierfür ist der Neubau der Zentralklinik Georgsheil (Norden), bei dem mehrere Krankenhäuser zusammengelegt werden und die kommunale Kläranlage keine Kapazität für das Krankenhausabwasser aufweist. Dort wird, in einem ähnlichen Umfang wie dies beispielsweise in Dänemark bereits Stand der Technik ist, das Krankenhaus mit einer eigenständigen Abwasserbehandlung mit 4. Reinigungsstufe (Ozonung) gebaut.

Im DBU-Vorhaben „Spurenstoffentfernung an Punktquellen im ländlichen Raum – Pilotanwendung der USONiQ-Ozonung zur Behandlung von Krankenhausabwässern (SEKUSO)“ wurde die Wirksamkeit einer kombinierten Ultraschall-Ozon-Technologie zur Eliminierung von Spurenstoffen und mikrobiellen Belastungen untersucht. An der psychiatrischen Pflegeeinrichtung Kohlberghaus in Altena konnte exemplarisch gezeigt werden, dass die USONiQ-Ozonung pharmakologisch aktive Substanzen um bis zu 99 % reduzieren und gleichzeitig eine Desinfektion des Abwassers auf „ausgezeichnete Badegewässerqualität“ erreichen kann. Trotz hoher Ozondosen konnte keine relevante Bildung von Bromat oder NDMA nachgewiesen werden, was für einen sicheren Einsatz der Technologie spricht.

Die Ergebnisse belegen, dass die Technologie auch an kleinen, dezentralen Anlagen stabil, effizient und wirtschaftlich betrieben werden kann und somit eine effektive, skalierbare und wirtschaftliche Lösung zur Reduktion von Spurenstoffen und Keimen darstellen und damit einen wichtigen Beitrag zum vorsorgenden Umweltschutz leisten kann.

7. Literatur

Alfonso-Muniozguren, Pello; Serna-Galvis, Efraím A.; Bussemaker, Madeleine; Torres-Palma, Ricardo A.; Lee, Judy (2021): A review on pharmaceuticals removal from waters by single and combined biological, membrane filtration and ultrasound systems. *Ultrasonics sonochemistry* 76: 105656.

Anjali, R., and Shanthakumar, S. 2019. "Insights on the current status of occurrence and removal of antibiotics in wastewater by advanced oxidation processes." *Journal of Environmental Management*, 246: 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.090>.

Beier S., Cramer C., Mauer C., Köster S., Schröder H.F., Pinnekamp J. (2012): MBR technology: a promising approach for the (pre-)treatment of hospital wastewater. *Water Sci Technol.* 65(9):1648-1653.

Bermúdez et al. 2021

BMUV (2023). Nationale Wasserstrategie. Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nationale_wasserstrategie_2023_bf.pdf (Zugriff zuletzt 18.03.2023)

Christophoridis C, Veloutsou S, Mitsika E, Zacharis CK, Christia C, Raikos N, Fytianos K. (2021): Determination of illicit drugs and psychoactive pharmaceuticals in wastewater from the area of Thessaloniki (Greece) using LC-MS/MS: estimation of drug consumption. *Environ Monit Assess.* 193(5):249.

Destatis, 2018: Statistisches Bundesamt, Fachserie 19 Reihe 2.1.3, 2016, Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung - Strukturdaten zur Wasserwirtschaft.

Destatis, 2021: Statistisches Bundesamt, Wasserwirtschaft - Gemeinden mit öffentlicher und privater Abwasserentsorgung 2019, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/ww-02-abwasserentsorgung-2019.html> (Zugriff am 22.03.2023)

Diamanti K, Aalizadeh R, Alygizakis N, Galani A, Mardal M, Thomaidis NS (2019): Wide-scope target and suspect screening methodologies to investigate the occurrence of new psychoactive substances in influent wastewater from Athens. *Sci Total Environ.* 685:1058-1065.

Edefell, E., Falås, P., Kharel, S., Hagman, M., Christensson, M., Cimbritz, M., and Bester, K. 2021. "MBBRs as post-treatment to ozonation: Degradation of transformation products and ozone-resistant micropollutants." *The Science of the total environment*, 754, p. 142103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142103>.

EU 2020/741: „Verordnung (EU) 2020/741 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung“.

EU Proposal 2022/0344 (COD): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy, Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration and Directive 2008/105/EC on environmental quality standards in the field of water policy.

Epelle, Emmanuel I.; Macfarlane, Andrew; Cusack, Michael; Burns, Anthony; Okolie, Jude A.; Mackay, William et al. (2023): Ozone application in different industries: A review of recent developments. *Chemical engineering journal*.454: 140188.

Exner, M. und Schwartz, T. (2015): RiSKWa-Statuspapier Bewertungskonzepte der Mikrobiologie mit den Schwerpunkten neue Krankheitserreger und Antibiotikaresistenzen. Dechema e.V.

Harth, F.U.R., Arras, C., Brettschneider, D.J., Misovic, A., Oehlmann, J., Schulte-Oehlmann, U., Oetken, M., 2018. Small but with big impact? Ecotoxicological effects of a municipal wastewater effluent on a small creek. *J. Environ. Sci. Health Part A* 53, 1149–1160. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1530328>

Hillenbrandt, T., et al. (2014): Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer. UBA Texte 85/2014.

- Itzel F, Jewell KS, Leonhardt J, Gehrmann L, Nielsen U, Ternes TA et al. Comprehensive analysis of antagonistic endocrine activity during ozone treatment of hospital wastewater. *Science of the Total Environment*. 2018; 624:1443-54.
- Itzel, F., Baetz, N., Hohrenk, L. L., Gehrmann, L., Antakyali, D., Schmidt, T. C., and Tuerk, J. 2020. "Evaluation of a biological post-treatment after full-scale ozonation at a municipal wastewater treatment plant." *Water research*, 170, p. 115316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115316>.
- Jahan, B.N., Li, L., Pagilla, K.R., 2021. Fate and reduction of bromate formed in advanced water treatment ozonation systems: A critical review. *Chemosphere* 266, 128964. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128964>
- Joss, A., Zabczynski, S., Göbel, A., Hoffmann, B., Löffler, D., McArdell, C. S., Ternes, T. A., Thomsen, A., & Siegrist, H. (2006). Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme. *Water Research*, 40(8), 1686–1696. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.02.014>
- Kharel, S., Stapf, M., Miehe, U., Ekblad, M., Cimbritz, M., and Falås, P. 2020. "Ozone dose dependent formation and removal of ozonation products of pharmaceuticals in pilot and full-scale municipal wastewater treatment plants." *The Science of the total environment*, 731, p. 139064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139064>.
- KOM-M.NRW 2018. "Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination – 3. Überarbeitete und erweiterte Auflage". Stand 2018. Nicht veröffentlicht.
- KOM-M.NRW 2016. "Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination – 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage". Stand 01.09.2016. Hrsg. ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW.
- Kosek, Klaudia; Luczkiewicz, Aneta; Fudala-Książek, Sylwia; Jankowska, Katarzyna; Szopińska, Małgorzata; Svahn, Ola et al. (2020): Implementation of advanced micropollutants removal technologies in wastewater treatment plants (WWTPs) - Examples and challenges based on selected EU countries. *Environmental Science & Policy*. 112: 213–226.
- Krishnan, R.Y., Manikandan, S., Subbaiya, R., Biruntha, M., Govarthan, M., Karmegam, N., 2021. Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: A review. *Environ. Technol. Innov.* 23, 101757. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101757>
- Lei, Yu; Wagner, Thomas; Rijnaarts, Huub; Wilde, Vinnie de; Langenhoff, Alette (2023): The removal of micropollutants from treated effluent by batch-operated pilot-scale constructed wetlands. *Water research* 230: 119494.
- Lopez-Herguedas N, Irazola M, Alvarez-Mora I, Orive G, Lertxundi U, Olivares M, Zuloaga O, Prieto A (2023): Comprehensive micropollutant characterization of wastewater during Covid-19 crisis in 2020: Suspect screening and environmental risk prioritization strategy. *Sci Total Environ*. 873:162281.
- Majumder, A., Gupta, A.K., Ghosal, P.S., Varma, M. (2021): A review on hospital wastewater treatment: A special emphasis on occurrence and removal of pharmaceutically active compounds, resistant microorganisms, and SARS-CoV-2. *J Environ Chem Eng*. 9(2):104812. doi: 10.1016/j.jece.2020.104812.
- Nielsen U, Hastrup C, Klausen MM, Pedersen BM, Kristensen GH, Jansen JLC, Bak SN, Tuerk J. (2013): Removal of APIs and bacteria from hospital wastewater by MBR plus O₃, O₃ + H₂O₂, PAC or ClO₂. *Water Sci Technol*. 67(4):854–862.
- Nielsen, U.; Hastrup, C.; Klausen, M.M.; Pedersen, B.M.; Kristensen, G.H.; la cour Jansen, J.; Bak, S.N.; Tuerk, J. Removal of APIs and bacteria from hospital wastewater by MBR plus O₃, O₃+H₂O₂, PAC or ClO₂. *Water Sci. Technol*. 2013, 674, 854–862.
- Nielsen et al. (2016): Report „Full scale advanced wastewater treatment at Herlev Hospital, Treatment performance and evaluation“, Grundfos BioBooster A/S, May 2016.

- Nöthe, T.; Fahlenkamp, H.; Von Sonntag, C. Ozonation of wastewater: Rate of ozone consumption and hydroxyl radical yield. *Environ. Sci. Technol.* 2009, 43, 5990–5995.
- noPILLS (2015): Abschlussbericht noPILLS in waters, Interreg IV B NWE project partnership 2012 – 2015, http://www.no-pills.eu/conference/BS_NoPills_Final%20Report_long_EN.pdf
- Pariente, M.I., Segura, Y., Álvarez-Torrellas, S., Casas, J.A., de Pedro, Z.M., Diaz, E., García, J., López-Muñoz, M.J., Marugán, J., Mohedano, A.F., Molina, R., Munoz, M., Pablos, C., Perdigón-Melón, J.A., Petre, A.L., Rodríguez, J.J., Tobajas, M., Martínez, F. (2022): Critical review of technologies for the on-site treatment of hospital wastewater: From conventional to combined advanced processes. *J Environ Manage.* 320:115769.
- Paulus GK, Hornstra LM, Alygizakis N, Slobodnik J, Thomaidis N, Medema G. (2019): The impact of on-site hospital wastewater treatment on the downstream communal wastewater system in terms of antibiotics and antibiotic resistance genes. *Int J Hyg Environ Health.* 222(4):635-644.
- Pei, M., Zhang, B., He, Y., Su, J., Gin, K., Lev, O., Shen, G., and Hu, S. 2019. "State of the art of tertiary treatment technologies for controlling antibiotic resistance in wastewater treatment plants." *Environment International*, 131: 105026. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105026>.
- PILLS Project (2012): Abschlussbericht PILLS Project: Pharmazeutische Rückstände in der aquatischen Umwelt – eine Herausforderung für die Zukunft - Erkenntnisse und Aktivitäten des Europäischen Kooperationsprojektes PILLS, Abschlussbericht, Interreg IV B Programm.
- Reichert JF, Souza DM, Martins AF (2019): Antipsychotic drugs in hospital wastewater and a preliminary risk assessment. *Ecotoxicol Environ Saf.* 170:559-567.
- Reine Ruhr (2014): Programm Reine Ruhr zur Strategie einer nachhaltigen Verbesserung der Gewässer- und Trinkwasserqualität in Nordrhein-Westfalen. Herausgegeben Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV).
- Restrepo-Vieira LH, Busetti F, Linge KL, Joll CA (2022): Development and validation of a direct injection liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the analysis of illicit drugs and psychopharmaceuticals in wastewater. *J Chromatogr A.* 1685:463562.
- Sauter, D., Dąbrowska, A., Bloch, R., Stapf, M., Miehe, U., Sperlich, A., Gnirss, R., Wintgens, T., 2021. Deep-bed filters as post-treatment for ozonation in tertiary municipal wastewater treatment: impact of design and operation on treatment goals. *Environ. Sci. Water Res. Technol.* 7, 197–211. <https://doi.org/10.1039/D0EW00684J>
- Schaar, H., Kreuzinger, N., 2017. 4. Reinigungsstufe auf Kläranlagen zur weitergehenden Behandlung kommunaler Abwässer. *Österr. Wasser- Abfallwirtsch.* 69, 340–345. <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0406-z>
- Seidel, U., et al. (2013): Teilprojekt 3 - Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, im Auftrag von MKULNV NRW, AZ IV-7 - 042 600 001C.
- Soltermann, F., Abegglen, C., Götz, C., Von Gunten, U., 2016. Bromide Sources and Loads in Swiss Surface Waters and Their Relevance for Bromate Formation during Wastewater Ozonation. *Environ. Sci. Technol.* 50, 9825–9834. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01142>
- STOWA (2013): Analysebericht Pharmafilter – Vollmaßstäbliche Versuchsanlage im Reinier de Graaf-Krankenhaus in Delft, Bericht 16a, ISBN 978.90.5773.593.6, 2013
- STOWA (2023): VERWIJDERING VAN MEDICIJNRESTEN MET BEHULP VAN OZON EN ULTRASOUND: VERKENNEND PILOTONDERZOEK, Rapport 30, 2023, ISBN 978.94.6479.016.0
- Svebrant, S.; Spörndly, R.; Lindberg, R.H.; Olsen Sköldstam, T.; Larsson, J.; Öhagen, P.; Söderström Lindström, H.; Järhult, J.D. 2021: On-Site Pilot Testing of Hospital Wastewater Ozonation to Reduce Pharmaceutical Residues and Antibiotic-Resistant Bacteria. *Antibiotics* 2021, 10, 684. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10060684>

Ternes, T. A., Stüber, J., Herrmann, N., 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(8), 1976–1982. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00570-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00570-5)

Ternes TA, Bonerz M, Herrmann N, Teiser B, Andersen HR (2007): Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: an option to remove pharmaceuticals and musk fragrances. *Chemosphere*. 66(5):894-904.

UBA (2015): Positionspapier des Umwelt Bundesamtes „Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern - Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge“.

Von Gunten, U., 2003a. Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. *Water Res.* 37, 1469–1487. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00458-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00458-X)

VSA (2021): ABKLÄRUNGEN VERFAHRENSEIGNUNG OZONUNG,
https://micropoll.ch/wpcontent/uploads/2021/07/Anpassungen-Verfahrenseignung-Ozonung_Empfehlung-V2.pdf

8. Anhang

Anhang 1: Analysenergebnisse und Versuchseinstellungen

Tabelle 1 Anhang 1: Ergebnisse der Inbetriebnahme und der Testserien 1 und 2.

IUTA Nummer	Nummer USONiQ	Probenbezeichnung	Datum	Betriebsart	Serie	Versuchseinstellungen		
						Parameter	Ozondosis	Spezifische Ozondosis
						Einheit	mg/L	mg _{O3} /mg _{DOC}
LR 20240801-965		Zulauf SBR		-	0			
LR 20240801-966		Ablauf SBR		-	0			
LR 20240903-94		Ablauf SBR	03.09.2024	-	0			
LR 20240913-26-27		Ablauf SBR		-	0			
LR 20240923-3-4		Ablauf SBR		-	0			
LR 20241002-11		Ablauf SBR		-	0			
LR 20241004-8		Ablauf SBR	02.10.2024	-	0			
LR20241008-98	SEK06102024SBROUT1	Ablauf SBR	05.10.2024	-	1.1			
LR20241008-99	SEK06102024INOUE	Ablauf USONiQ-Ozonung	05.10.2024	Batch	1.1		8	0,94
LR20241008-100	SEK05102024SBRIN	Zulauf SBR	06.10.2024	-	1.2			
LR20241008-101	SEK05102024SBROUT	Ablauf SBR	06.10.2024	-	1.2			
LR20241008-102	SEK05102024BOU1 2	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		2	0,26
LR20241008-103	SEK05102024BOU2 4	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		4	0,51
LR20241008-104	SEK05102024BOU3 6	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		6	0,77
LR20241008-105	SEK05102024BOU4 8	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		8	1,0
LR20241008-106	SEK05102024BOU5 10	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		10	1,3
LR20241008-107	SEK05102024BOU6 12	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		12	1,5
LR20241008-108	SEK05102024BOU7 14	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		14	1,8
LR20241008-109	SEK05102024BOU8 16	Ablauf USONiQ-Ozonung	06.10.2024	Batch	1.2		16	2,1
LR-20241023-58	SEK22102024SBRIN	Zulauf SBR	22.10.2024	-	2			
LR-20241023-59	SEK22102024SBROUT	Ablauf SBR	22.10.2024	-	2			
LR-20241023-60	SEK22102024BOU1	Ablauf USONiQ-Ozonung	22.10.2024	Batch	2		2	0,18
LR-20241023-61	SEK22102024BOU2	Ablauf USONiQ-Ozonung	22.10.2024	Batch	2		3	0,27
LR-20241023-62	SEK22102024BOU3	Ablauf USONiQ-Ozonung	22.10.2024	Batch	2		4	0,36
LR-20241023-63	SEK22102024BOU4	Ablauf USONiQ-Ozonung	22.10.2024	Batch	2		5	0,45
LR-20241023-64	SEK22102024BOU5	Ablauf USONiQ-Ozonung	22.10.2024	Batch	2		6	0,55

Tabelle 2 Anhang 1: Ergebnisse der Inbetriebnahme und der Testserien 1 und 2.

IUTA Nummer	Datum	Basisparameter														Anionen		
		Parameter	pH	LF	AFS	TOC	DOC	SAK254	CSB	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	TNb	Nges	Pges	Ortho-P	Bromid	Bromat
		Einheit		µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	1/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L
LR 20240801-965																		
LR 20240801-966		-	-	-	30	7,7	-	-	0,13	22	0,62	-	-	-	-	-	-	-
LR 20240903-94	03.09.2024	6,2	626	21	17	11	41	46	0,38	34	0,57	35	37	9,8	8,9	-	-	-
LR 20240913-26-27		6,9	553	-	19	12	33	23	0,14	33	0,74	35	35	9,9	8,0	95	< 1	< 1
LR 20240923-3-4		6,7	687	10	15	12	51	26	0,21	28	1,0	32,04	31	8,8	7,9	110	< 1	< 1
LR 20241002-11		6,7	558	54	13	7,9	33	29	0,13	22	1,5	23	24	8,2	7,3	95	< 1	< 1
LR 20241004-8	02.10.2024	6,8	551	14	12	8,7	36	27	< 0,1	24	0,62	25	27	8,1	7,1	-	-	-
LR20241008-98	05.10.2024	6,7	576	-	10	8,5	26	-	-	-	-	31	-	-	-	93	< 1	< 1
LR20241008-99	05.10.2024	6,5	576	-	10	8,6	17	-	-	-	-	31	-	-	-	110	2,3	2,3
LR20241008-100	06.10.2024	6,6	913	-	230	140	190	-	-	-	-	67	-	-	-	110	< 1	< 1
LR20241008-101	06.10.2024	6,8	567	-	9,5	7,8	27	-	-	-	-	28	-	-	-	97	< 1	< 1
LR20241008-102	06.10.2024	6,8	572	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR20241008-103	06.10.2024	6,7	569	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR20241008-104	06.10.2024	6,7	565	-	-	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR20241008-105	06.10.2024	6,7	564	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	2,0
LR20241008-106	06.10.2024	6,7	566	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,4	2,4
LR20241008-107	06.10.2024	6,8	568	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,4	2,4
LR20241008-108	06.10.2024	6,9	557	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9	2,9
LR20241008-109	06.10.2024	6,8	586	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	3,2
LR-20241023-58	22.10.2024	7,0	832	-	-	-	130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR-20241023-59	22.10.2024	6,4	622	-	-	11	26	-	-	-	-	-	-	-	-	72	< 1	< 1
LR-20241023-60	22.10.2024	6,8	621	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR-20241023-61	22.10.2024	7,0	620	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR-20241023-62	22.10.2024	6,8	620	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR-20241023-63	22.10.2024	6,9	615	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1
LR-20241023-64	22.10.2024	6,8	618	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	< 1

Tabelle 3 Anhang 1: Ergebnisse der Inbetriebnahme und der Testserien 1 und 2.

IUTA Nummer	Datum	Spurenstoffe KARL+														
		Parameter	4 + 5	Benzo	Ami	Cande	Carba	Cita	Clari	Diclo	Gaba	Hydro	Irbe	Meto	SMX	Venla
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
LR 20240801-965																
LR 20240801-966			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR 20240903-94	03.09.2024		< 45	< 90	47.000	1.400	6.400	630	< 30	620	-	3600	< 15	3.100	< 30	-
LR 20240913-26-27			< 45	< 90	51.000	1.300	6.700	600	< 30	2.200	-	1.400	< 15	2.700	< 30	-
LR 20240923-3-4			< 45	< 90	47.000	1.400	4.200	550	< 30	2.300	-	1.700	< 15	2.700	< 30	-
LR 20241002-11			< 45	< 90	51.000	1.700	6.100	500	< 30	900	-	1800	< 15	2.600	< 30	-
LR 20241004-8	02.10.2024		< 45	< 90	56.000	1.200	5.700	560	< 30	440	-	1800	< 15	2.100	< 30	-
LR20241008-98	05.10.2024		< 45	< 90	41.000	660	4.900	520	< 30	450	-	1.400	29	1.600	< 30	-
LR20241008-99	05.10.2024		< 45	< 90	300	52	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	29	< 30	-
LR20241008-100	06.10.2024		< 45	235	49.000	1.800	7.400	380	< 30	320	-	1.700	< 15	2.700	< 30	-
LR20241008-101	06.10.2024		< 45	< 90	54.000	930	600	570	< 30	630	-	1.700	41	2.000	< 30	-
LR20241008-102	06.10.2024		< 45	< 90	7.300	210	120	98	< 30	< 30	-	390	< 15	460	< 30	-
LR20241008-103	06.10.2024		< 45	< 90	260	69	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	110	< 30	-
LR20241008-104	06.10.2024		< 45	< 90	66	< 30	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	< 15	< 30	-
LR20241008-105	06.10.2024		< 45	< 90	41	62	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	< 15	< 30	-
LR20241008-106	06.10.2024		< 45	< 90	30	120	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	< 15	< 30	-
LR20241008-107	06.10.2024		< 45	< 90	< 30	120	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	< 15	< 30	-
LR20241008-108	06.10.2024		< 45	< 90	< 30	120	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	< 15	< 30	-
LR20241008-109	06.10.2024		< 45	< 90	< 30	47	< 30	< 15	< 30	< 30	-	< 200	< 15	< 15	< 30	-
LR-20241023-58	22.10.2024		< 45	< 90	31.000	1.700	4.900	50	< 30	150	16.000	920	< 15	950	3.400	-
LR-20241023-59	22.10.2024		< 45	< 90	45.000	570	4.000	220	< 30	110	510	670	< 15	280	< 30	-
LR-20241023-60	22.10.2024		< 45	< 90	30.000	320	730	140	< 30	< 30	370	400	< 15	65	< 30	-
LR-20241023-61	22.10.2024		< 45	< 90	28.000	320	560	120	< 30	< 30	350	340	< 15	30	< 30	-
LR-20241023-62	22.10.2024		< 45	< 90	26.000	280	440	110	< 30	< 30	350	390	< 15	< 15	< 30	-
LR-20241023-63	22.10.2024		< 45	< 90	24.000	260	200	97	< 30	< 30	330	250	< 15	< 15	< 30	-
LR-20241023-64	22.10.2024		< 45	< 90	19.000	160	64	65	< 30	< 30	300	190	< 15	< 15	< 30	-

Tabelle 4 Anhang 1: Ergebnisse der Inbetriebnahme und der Testserien 1 und 2.

IUTA Nummer	Datum	Psychopharmaka											
		Parameter	Flu	DesLevo	Mel	Levo	Dia	Norque	NorSer	Oxa	Que	Ser	HydroCarba
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
LR 20240801-965													
LR 20240801-966			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR 20240903-94	03.09.2024		< 45	580	6.200	520	560	15.000	< 50	15.000	5.600	470	77
LR 20240913-26-27			< 45	340	6.100	170	430	13.000	< 50	13.000	3.200	400	43
LR 20240923-3-4			< 45	470	6.200	330	410	12.000	< 50	13.000	2.100	380	22
LR 20241002-11			< 45	370	5.700	230	700	10.000	< 50	15.000	2.100	190	34
LR 20241004-8	02.10.2024		< 45	340	6.000	200	650	12.000	< 50	15.000	1.900	300	26
LR20241008-98	05.10.2024		< 45	270	4.200	50	410	8.800	< 50	11.000	990	200	16
LR20241008-99	05.10.2024		< 45	230	110	< 30	< 50	140	< 50	680	< 15	21	< 15
LR20241008-100	06.10.2024		< 45	1.200	1.700	1.200	550	14.000	< 50	9.300	38.000	550	22
LR20241008-101	06.10.2024		< 45	310	5.100	110	640	10.000	< 50	14.000	1.500	230	22
LR20241008-102	06.10.2024		< 45	240	1.400	< 30	140	480	< 50	3.400	51	60	< 15
LR20241008-103	06.10.2024		< 45	< 30	320	< 30	83	89	< 50	1.400	< 15	17	< 15
LR20241008-104	06.10.2024		< 45	< 30	26	< 30	< 50	40	< 50	460	< 15	< 15	< 15
LR20241008-105	06.10.2024		< 45	< 30	< 15	< 30	< 50	< 15	< 50	< 200	< 15	< 15	< 15
LR20241008-106	06.10.2024		< 45	< 30	< 15	< 30	< 50	< 15	< 50	< 200	< 15	< 15	< 15
LR20241008-107	06.10.2024		< 45	< 30	< 15	< 30	< 50	< 15	< 50	< 200	< 15	< 15	< 15
LR20241008-108	06.10.2024		< 45	< 30	< 15	< 30	< 50	< 15	< 50	< 200	< 15	< 15	< 15
LR20241008-109	06.10.2024		< 45	< 30	< 15	< 30	< 50	< 15	< 50	< 200	< 15	< 15	< 15
LR-20241023-58	22.10.2024		< 45	110	680	270	120	3.500	240	7.900	41.000	530	48
LR-20241023-59	22.10.2024		< 45	300	1.800	330	200	5.500	< 50	6.500	640	150	21
LR-20241023-60	22.10.2024		< 45	< 30	1.300	220	120	3.600	< 50	3.300	160	87	< 15
LR-20241023-61	22.10.2024		< 45	< 30	1.100	220	98	2.900	< 50	2.800	110	91	< 15
LR-20241023-62	22.10.2024		< 45	< 30	1.000	220	95	2.600	< 50	2.500	79	76	< 15
LR-20241023-63	22.10.2024		< 45	< 30	970	220	76	2.300	< 50	2.200	21	63	< 15
LR-20241023-64	22.10.2024		< 45	< 30	820	< 30	76	1.600	< 50	1.700	< 15	46	< 15

Tabelle 5 Anhang 1: Ergebnisse der Testserien 3 und 4.

IUTA Nummer	Probenbezeichnung	Datum	Betriebsart	Serie	Versuchseinstellungen		
					Parameter	Ozondosis	Spezifische Ozondosis
					Einheit	mg/L	mgO ₃ /mgDOC
LR-20241217-14	SEK13122024/SBROUT	Ablauf SBR	13.12.2024	-	3		
LR-20241217-8	SEK13122024/OUL1	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Inline	3.1	10	0,83
LR-20241217-9	SEK13122024/OUL2	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Inline	3.1	10	0,83
LR-20241217-10	SEK13122024/OUL3	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Inline	3.1	10	0,83
LR-20241217-11	SEK13122024/OUL4	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Inline	3.1	10	0,83
LR-20241217-12	SEK13122024/OUL5	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Inline	3.1	10	0,83
LR-20241217-13	SEK13122024/OUL6	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Inline	3.1	10	0,83
LR-20241217-3	SEK13122024/OU1	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Batch	3.2	4	0,33
LR-20241217-4	SEK13122024/OU2	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Batch	3.2	5	0,42
LR-20241217-5	SEK13122024/OU3	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Batch	3.2	6	0,50
LR-20241217-6	SEK13122024/OU4	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Batch	3.2	8	0,67
LR-20241217-7	SEK13122024/OU5	Ablauf USONiQ-Ozonung	13.12.2024	Batch	3.2	10	0,83
LR-20250327-34	SEK25032025-MBR IN	Zulauf MBR	25.03.2025	-	4		
LR-20250327-35	SEK25032025-MBR OUT	Ablauf MBR	25.03.2025	-	4		
LR-20250327-41	SEK25032025-BOU 1	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	2	0,13
LR-20250327-42	SEK25032025-BOU 2	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	4	0,27
LR-20250327-43	SEK25032025-BOU 3	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	6	0,40
LR-20250327-44	SEK25032025-BOU 4	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	7	0,47
LR-20250327-45	SEK25032025-BOU 5	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	8	0,53
LR-20250327-46	SEK25032025-BOU 6	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	9	0,60
LR-20250327-47	SEK25032025-BOU 7	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	10	0,67
LR-20250327-48	SEK25032025-BOU 8	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	12	0,80
LR-20250327-49	SEK25032025-BOU 9	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	14	0,93
LR-20250327-50	SEK25032025-BOU 10	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Batch	4.1	16	1,1
LR-20250327-36	SEK25032025-IOU 1	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Inline	4.2	4	0,27
LR-20250327-37	SEK25032025-IOU 2	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Inline	4.2	6	0,40
LR-20250327-38	SEK25032025-IOU 3	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Inline	4.2	6	0,40
LR-20250327-39	SEK25032025-IOU 4	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Inline	4.2	20	1,3
LR-20250327-40	SEK25032025-IOU 5	Ablauf USONiQ-Ozonung	25.03.2025	Inline	4.2	16	1,1

Tabelle 6 Anhang 1: Ergebnisse der Testserien 3 und 4.

IUTA Nummer	Datum	Basisparameter														Anionen		
		pH	LF	AFS	TOC	DOC	SAK254	CSB	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	TNb	Nges	Pges	Ortho-P	Bromid	Bromat	
			µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	1/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L
LR-20241217-14	13.12.2024	6,9	569	-	-	12	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Störung	< 1
LR-20241217-8	13.12.2024	6,8	566	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-		2,2
LR-20241217-9	13.12.2024	6,8	566	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1,6
LR-20241217-10	13.12.2024	6,8	568	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1,4
LR-20241217-11	13.12.2024	6,8	563	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1,3
LR-20241217-12	13.12.2024	6,8	563	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-		< 1
LR-20241217-13	13.12.2024	6,8	563	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-		< 1
LR-20241217-3	13.12.2024	6,8	569	-	-	-	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	
LR-20241217-4	13.12.2024	6,9	567	-	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	
LR-20241217-5	13.12.2024	6,8	569	-	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	
LR-20241217-6	13.12.2024	6,8	570	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	
LR-20241217-7	13.12.2024	6,9	566	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	
LR-20250327-34	25.03.2025	7,4	1325	-	-	83	191	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170	< 2
LR-20250327-35	25.03.2025	7,5	1198	-	-	15	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170	2,8
LR-20250327-41	25.03.2025	7,3	1202	-	-	-	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9
LR-20250327-42	25.03.2025	7,3	1198	-	-	-	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2
LR-20250327-43	25.03.2025	7,3	1200	-	-	-	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,1
LR-20250327-44	25.03.2025	7,2	1210	-	-	-	57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9
LR-20250327-45	25.03.2025	7,2	1163	-	-	-	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9
LR-20250327-46	25.03.2025	7,2	1162	-	-	-	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4
LR-20250327-47	25.03.2025	7,2	1162	-	-	-	46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0
LR-20250327-48	25.03.2025	7,2	1165	-	-	-	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0
LR-20250327-49	25.03.2025	7,2	1161	-	-	-	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,3
LR-20250327-50	25.03.2025	7,2	1162	-	-	-	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,2
LR-20250327-36	25.03.2025	7,4	1201	-	-	-	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,7
LR-20250327-37	25.03.2025	7,6	1204	-	-	-	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,8
LR-20250327-38	25.03.2025	7,7	1199	-	-	-	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,8
LR-20250327-39	25.03.2025	7,2	1207	-	-	-	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4
LR-20250327-40	25.03.2025	7,4	1205	-	-	-	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9

Tabelle 7 Anhang 1: Ergebnisse der Testserien 3 und 4.

IUTA Nummer	Datum	Spurenstoffe KARL+														
		Parameter	4 + 5	Benzo	Ami	Cande	Carba	Cita	Clari	Diclo	Gaba	Hydro	Irbe	Meto	SMX	Venla
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
LR-20241217-14	13.12.2024	< 45	< 90	34.000	1.200	< 30	410	< 30	71	610	1.700	130	550	42	880	
LR-20241217-8	13.12.2024	< 45	< 90	1.600	260	< 30	27	< 30	< 30	260	55	190	89	< 30	85	
LR-20241217-9	13.12.2024	< 45	< 90	2.300	140	< 30	38	< 30	120	260	220	380	100	< 30	110	
LR-20241217-10	13.12.2024	< 45	< 90	2.200	74	< 30	38	< 30	< 30	280	240	200	100	< 30	110	
LR-20241217-11	13.12.2024	< 45	< 90	2.300	200	< 30	39	< 30	60	260	250	390	100	< 30	100	
LR-20241217-12	13.12.2024	< 45	< 90	4.000	190	< 30	57	< 30	< 30	300	310	320	130	< 30	130	
LR-20241217-13	13.12.2024	< 45	< 90	5.400	300	< 30	74	< 30	< 30	280	360	520	130	< 30	160	
LR-20241217-3	13.12.2024	< 45	< 90	24.000	850	980	310	< 30	< 30	510	1.100	380	380	79	570	
LR-20241217-4	13.12.2024	< 45	< 90	21.000	590	310	280	< 30	< 30	470	960	290	340	68	500	
LR-20241217-5	13.12.2024	< 45	< 90	17.000	550	25	230	< 30	< 30	410	780	580	280	54	390	
LR-20241217-6	13.12.2024	< 45	< 90	11.000	170	< 30	150	< 30	< 30	370	540	440	210	33	270	
LR-20241217-7	13.12.2024	< 45	< 90	6.900	200	< 30	95	< 30	< 30	330	400	470	160	< 30	190	
LR-20250327-34	25.03.2025	260	13.000	2.500	10.000	Störung	150	14.000	590	56.000	1.200	Störung	4.500	170	1.600	
LR-20250327-35	25.03.2025	310	4.400	1.900	8.700	240	270	26.000	600	1.600	1.500	140	900	260	1.900	
LR-20250327-41	25.03.2025	260	2.900	870	5.600	39	200	12.000	41	1.400	1.100	73	580	320	1.100	
LR-20250327-42	25.03.2025	250	2.500	650	4.400	< 30	160	6.900	< 30	1.100	970	68	490	200	970	
LR-20250327-43	25.03.2025	220	1.700	320	3.200	< 30	95	1.400	75	1.500	700	39	350	100	630	
LR-20250327-44	25.03.2025	190	1.400	74	2.000	< 30	27	260	< 30	740	350	33	220	64	330	
LR-20250327-45	25.03.2025	160	820	< 30	1.000	< 30	< 15	150	< 30	540	110	16	100	39	120	
LR-20250327-46	25.03.2025	130	300	< 30	230	< 30	< 15	75	< 30	310	< 30	< 15	< 15	< 30	< 30	
LR-20250327-47	25.03.2025	120	140	< 30	84	< 30	< 15	55	< 30	310	< 30	< 15	< 15	< 30	< 30	
LR-20250327-48	25.03.2025	< 45	< 90	< 30	< 30	< 30	< 15	37	< 30	100	< 30	< 15	< 15	< 30	< 30	
LR-20250327-49	25.03.2025	< 45	< 90	< 30	< 30	< 30	< 15	< 30	< 30	90	< 30	< 15	< 15	< 30	< 30	
LR-20250327-50	25.03.2025	< 45	< 90	< 30	< 30	< 30	< 15	< 30	< 30	70	< 30	< 15	< 15	< 30	< 30	
LR-20250327-36	25.03.2025	290	3.700	1.500	7.600	140	250	20.000	210	1.400	1.300	120	760	550	1.600	
LR-20250327-37	25.03.2025	300	3.400	1.300	6.800	87	200	18.000	130	1.300	1.300	110	680	520	1.400	
LR-20250327-38	25.03.2025	270	3.200	1.200	5.800	57	230	16.000	67	1.300	1.400	98	640	210	1.300	
LR-20250327-39	25.03.2025	180	1.000	< 30	1.600	< 30	< 15	280	< 30	600	180	22	140	110	170	
LR-20250327-40	25.03.2025	200	1.400	100	2.000	< 30	40	840	< 30	760	460	34	140	170	400	

Tabelle 8 Anhang 1: Ergebnisse der Testserie 3.

IUTA Nummer	Datum	Psychopharmaka											
		Parameter	Flu	DesLevo	Mel	Levo	Dia	Norque	NorSer	Oxa	Que	Ser	HydroCarba
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
LR-20241217-14	13.12.2024		< 45	163	4.000	180	450	8.400	< 50	9.600	2.800	270	< 15
LR-20241217-8	13.12.2024		< 45	< 30	893	< 30	95	89	< 50	1.800	39	87	< 15
LR-20241217-9	13.12.2024		< 45	< 30	1.100	< 30	100	120	< 50	2.200	49	89	< 15
LR-20241217-10	13.12.2024		< 45	< 30	1.100	< 30	110	130	< 50	2.000	48	92	< 15
LR-20241217-11	13.12.2024		< 45	< 30	1.100	< 30	79	130	< 50	2.100	49	80	< 15
LR-20241217-12	13.12.2024		< 45	< 30	1.200	< 30	88	130	< 50	2.100	62	100	< 15
LR-20241217-13	13.12.2024		< 45	< 30	1.300	< 30	100	130	< 50	2.500	55	100	< 15
LR-20241217-3	13.12.2024		< 45	115	3.000	110	280	6.100	< 50	6.300	780	270	< 15
LR-20241217-4	13.12.2024		< 45	< 30	2.700	110	210	4.600	< 50	5.500	380	220	< 15
LR-20241217-5	13.12.2024		< 45	< 30	2.400	< 30	220	2.400	< 50	4.500	130	200	< 15
LR-20241217-6	13.12.2024		< 45	< 30	1.700	< 30	170	390	< 50	3.900	70	140	< 15
LR-20241217-7	13.12.2024		< 45	< 30	200	< 30	110	180	< 50	2.800	62	130	< 15

Tabelle 9 Anhang 1: Ergebnisse der Testserie 4.

IUTA Nummer	Datum	RKM						
		Parameter	Amidotrizoesäure	lohexol	lomeprol	lopamidol	lopromid	loversol
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
LR-20250327-34	25.03.2025		120.000	18	> 100.000	> 100.000	Störung	< 50
LR-20250327-35	25.03.2025		110.000	22	> 100.000	> 100.000	31.170	< 50
LR-20250327-41	25.03.2025		92.000	15	> 100.000	> 100.000	25.040	< 50
LR-20250327-42	25.03.2025		86.000	14	> 100.000	> 100.000	25.230	< 50
LR-20250327-43	25.03.2025		91.000	14	> 100.000	> 100.000	24.190	< 50
LR-20250327-44	25.03.2025		94.000	11	> 100.000	> 100.000	25.400	< 50
LR-20250327-45	25.03.2025		81.000	9,5	> 100.000	> 100.000	24.990	< 50
LR-20250327-46	25.03.2025		84.000	5,2	> 100.000	> 100.000	26.430	< 50
LR-20250327-47	25.03.2025		79.000	4,3	> 100.000	> 100.000	26.810	< 50
LR-20250327-48	25.03.2025		83.000	1,9	> 100.000	> 100.000	26.110	< 50
LR-20250327-49	25.03.2025		70.000	1,8	> 100.000	> 100.000	25.400	< 50
LR-20250327-50	25.03.2025		67.000	1,3	> 100.000	> 100.000	24.530	< 50
LR-20250327-36	25.03.2025		94.000	17	> 100.000	> 100.000	26.860	< 50
LR-20250327-37	25.03.2025		120.000	18	> 100.000	> 100.000	25.830	< 50
LR-20250327-38	25.03.2025		95.000	16	> 100.000	> 100.000	25.880	< 50
LR-20250327-39	25.03.2025		74.000	9,8	> 100.000	> 100.000	22.240	< 50
LR-20250327-40	25.03.2025		90.000	11	> 100.000	> 100.000	23.750	< 50

Tabelle 11 Anhang 1: Ergebnisse der Testserie 5.

IUTA Nummer	Probenbezeichnung	Datum	Betriebsart	Serie	Versuchseinstellungen		
					Parameter	Ozondosis	Spezifische Ozondosis
					Einheit	mg/L	mgO ₃ /mg _{DOC}
LR-20250624-31	SEK17062025SBR-Z4 1	Ablauf SBR	17.06.2025	-	5.1	-	-
		Ablauf SBR nach ca. 1 Stunde					
LR-20250624-32	SEK17062025SBR-Z4 2	Versuchslaufzeit	17.06.2025	-	5.1	-	-
LR-20250624-33	SEK17062025SBR-Z4 3	Zulauf SBR für 8 mgO ₃ /L	17.06.2025	-	5.1	-	-
LR-20250624-34	SEK17062025SBR-Z4 19	Ablauf SBR	17.06.2025	-	5.1	-	-
		Ablauf SBR nach ca. 1 Stunde					
LR-20250624-35	SEK17062025SBR-Z4 20	Versuchslaufzeit	17.06.2025	-	5.1	-	-
LR-20250624-36	SEK17062025SBR-Z4 21	Zulauf SBR für 10 mgO ₃ /L	17.06.2025	-	5.1	-	-
LR-20250624-37	SEK17062025-IOU 1	Ablauf USONiQ-Ozonung	17.06.2025	Inline	5.1	8	0,86
LR-20250624-38	SEK17062025-IOU 2		17.06.2025	Inline	5.1		
LR-20250624-39	SEK17062025-IOU 3	Ablauf USONiQ-Ozonung nach	17.06.2025	Inline	5.1	8	0,86
LR-20250624-40	SEK17062025-IOU 4	1 Stunde Versuchslaufzeit	17.06.2025	Inline	5.1		
LR-20250624-41	SEK17062025-IOU 7	Ablauf USONiQ-Ozonung	17.06.2025	Inline	5.1	10	1,1
LR-20250624-42	SEK17062025-IOU 8		17.06.2025	Inline	5.1		
LR-20250624-43	SEK17062025-IOU 9	Ablauf USONiQ-Ozonung nach	17.06.2025	Inline	5.1	10	1,1
LR-20250624-44	SEK17062025-IOU 10	1 Stunde Versuchslaufzeit	17.06.2025	Inline	5.1		
LR-20250624-45	SEK17062025-IOU 13	Ablauf USONiQ-Ozonung	17.06.2025	Inline	5.1	12	1,3
LR-20250624-46	SEK17062025-IOU 14		17.06.2025	Inline	5.1		
LR-20250624-47	SEK17062025-IOU 15	Ablauf USONiQ-Ozonung nach	17.06.2025	Inline	5.1	12	1,3
LR-20250624-48	SEK17062025-IOU 16	1 Stunde Versuchslaufzeit	17.06.2025	Inline	5.1		
LR-20250624-51	SEK18062025-SBROUT	Ablauf SBR	18.06.20205	-	5	-	-
LR-20250624-52	SEK18062025-IOU 1	Ablauf USONiQ-Ozonung	18.06.20205	Inline	5.2	6	0,63
LR-20250624-53	SEK18062025-IOU 2	Ablauf USONiQ-Ozonung	18.06.20205	Inline	5.2	10	1,1
LR-20250624-54	SEK18062025-IOU 3	Ablauf USONiQ-Ozonung	18.06.20205	Inline	5.2	14	1,5
LR-20250624-55	SEK18062025-IOU 4	Ablauf USONiQ-Ozonung	18.06.20205	Inline	5.2	18	1,9
LR-20250624-56	SEK18062025-Bou 1	Ablauf USONiQ-Ozonung	18.06.20205	Batch	5.3	8	0,84
LR-20250624-57	SEK18062025-Bou 2	Ablauf USONiQ-Ozonung	18.06.20205	Batch	5.3	12	1,3

Tabelle 12 Anhang 1: Ergebnisse der Testserie 5.

IUTA Nummer	Datum	Basisparameter													Anionen		
		pH	LF	AFS	TOC	DOC	SAK254	CSB	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	TNb	Nges	Pges	Ortho-P	Bromid	Bromat
			µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	1/m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L
LR-20250624-31	17.06.2025	7,3	591	-	-	9,2	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-32	17.06.2025	7,3	597	-	-	-	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-33	17.06.2025	7,1	874	-	-	59	190	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-34	17.06.2025	7,3	570	-	-	9,7	28	-	-	-	-	-	-	-	-	57	< 1
LR-20250624-35	17.06.2025	7,3	572	-	-	9,3	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-36	17.06.2025	6,9	887	-	-	-	260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-37	17.06.2025	7,0	570	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-38	17.06.2025	7,0	566	-	-	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-39	17.06.2025	7,0	568	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-40	17.06.2025	7,1	569	-	-	-	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-41	17.06.2025	6,9	569	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-42	17.06.2025	7,0	568	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-43	17.06.2025	7,1	567	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-44	17.06.2025	7,0	571	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-45	17.06.2025	7,0	566	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-46	17.06.2025	7,1	572	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-47	17.06.2025	7,1	574	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-48	17.06.2025	7,0	574	-	-	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-51	18.06.20205	7,1	579	-	-	9,5	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-52	18.06.20205	7,0	576	-	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-53	18.06.20205	6,8	578	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-54	18.06.20205	6,8	575	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-55	18.06.20205	6,8	574	-	-	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-56	18.06.20205	6,9	578	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1
LR-20250624-57	18.06.20205	6,9	584	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1

Tabelle 13 Anhang 1: Ergebnisse der Testserie 5.

IUTA Nummer	Datum	Spurenstoffe KARL+													
		Parameter 4 + 5	Benzo	Ami	Cande	Carba	Cita	Clari	Diclo	Gaba	Hydro	Irbe	Meto	SMX	Venla
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
LR-20250624-31	17.06.2025	< 45	< 90	57.000	1.600	4.300	65	< 30	3.500	2.200	1.400	210	1.400	< 30	500
LR-20250624-32	17.06.2025	-	-	-	-	-	-	< 30	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-33	17.06.2025	< 45	< 90	73.000	3.100	1.500	160	< 30	4.000	120.000	1.400	150	3.600	< 30	440
LR-20250624-34	17.06.2025	< 45	< 90	65.000	1.500	4.220	310	< 30	3.700	2.200	1.200	230	1.400	< 30	570
LR-20250624-35	17.06.2025	< 45	< 90	62.000	1.500	4.400	330	< 30	3.600	2.300	1.400	230	1.400	< 30	570
LR-20250624-36	17.06.2025	< 45	< 90	70.000	2.600	1.300	140	< 30	3.800	110.000	1.200	120	3.300	< 30	410
LR-20250624-37	17.06.2025	< 45	< 90	7.100	370	< 30	70	< 30	< 30	1.100	390	61	380	< 30	120
LR-20250624-38	17.06.2025	< 45	< 90	8.200	390	< 30	68	< 30	< 30	1.100	380	59	370	< 30	130
LR-20250624-39	17.06.2025	< 45	< 90	10.000	480	< 30	80	< 30	< 30	1.500	460	61	430	< 30	140
LR-20250624-40	17.06.2025	< 45	< 90	10.000	490	< 30	81	< 30	< 30	1.500	510	57	430	< 30	140
LR-20250624-41	17.06.2025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-42	17.06.2025	< 45	< 90	660	220	< 30	19	< 30	< 30	1.100	160	33	210	< 30	50
LR-20250624-43	17.06.2025	< 45	< 90	1.700	300	< 30	33	< 30	< 30	1.200	210	44	250	< 30	64
LR-20250624-44	17.06.2025	< 45	< 90	1.400	330	< 30	21	< 30	< 30	1.200	210	35	250	< 30	62
LR-20250624-45	17.06.2025	< 45	< 90	79	120	< 30	< 15	< 30	< 30	750	39	23	92	< 30	< 30
LR-20250624-46	17.06.2025	< 45	< 90	95	200	< 30	< 15	< 30	< 30	920	67	20	110	< 30	< 30
LR-20250624-47	17.06.2025	< 45	< 90	67	250	< 30	< 15	< 30	< 30	880	60	25	97	< 30	< 30
LR-20250624-48	17.06.2025	< 45	< 90	98	140	< 30	< 15	< 30	< 30	850	71	26	110	< 30	< 30
LR-20250624-51	18.06.20205	< 45	< 90	75.000	2.200	3.600	320	< 30	3.800	3.200	1.200	160	1.600	< 30	530
LR-20250624-52	18.06.20205	< 45	< 90	30.000	1.200	92	150	< 30	64	2.300	710	72	880	< 30	240
LR-20250624-53	18.06.20205	< 45	< 90	6.500	540	< 30	41	< 30	< 30	1.800	350	54	450	< 30	100
LR-20250624-54	18.06.20205	< 45	< 90	2.200	480	< 30	22	< 30	< 30	1.700	210	47	360	< 30	73
LR-20250624-55	18.06.20205	< 45	< 90	150	250	< 30	< 15	< 30	< 30	1.300	38	29	110	< 30	20
LR-20250624-56	18.06.20205	< 45	< 90	41.000	1.400	420	180	< 30	248	2.300	960	95	1.100	< 30	300
LR-20250624-57	18.06.20205	< 45	< 90	11.000	620	< 30	55	< 30	< 30	1.900	460	58	580	< 30	130

Tabelle 14 Anhang 1: Ergebnisse der Testserie 5.

IUTA Nummer	Datum	Psychopharmaka											
		Parameter	Flu	DesLevo	Mel	Levo	Dia	Norque	NorSer	Oxa	Que	Ser	HydroCarba
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L
LR-20250624-31	17.06.2025		< 45	260	3.200	230	650	6.800	< 50	7.500	3.000	180	32
LR-20250624-32	17.06.2025		-	590	4.800	380	500	7.900	< 50	6.700	3.600	380	25
LR-20250624-33	17.06.2025		< 45	1.200	3.100	1.200	340	9.900	< 50	5.200	26.000	380	25
LR-20250624-34	17.06.2025		< 45	300	4.300	290	560	7.500	< 50	6.900	3.000	310	26
LR-20250624-35	17.06.2025		< 45	460	4.300	320	490	7.500	< 50	7.900	3.000	290	24
LR-20250624-36	17.06.2025		< 45	890	2.900	950	320	9.100	< 50	5.300	24.000	350	22
LR-20250624-37	17.06.2025		< 45	200	1.600	180	170	230	< 50	1.900	74	93	< 15
LR-20250624-38	17.06.2025		< 45	200	1.600	180	170	180	< 50	2.000	57	110	< 15
LR-20250624-39	17.06.2025		< 45	190	1.700	180	200	220	< 50	2.200	55	110	< 15
LR-20250624-40	17.06.2025		< 45	190	1.700	180	180	220	< 50	2.300	47	94	< 15
LR-20250624-41	17.06.2025		< 45	190	790	180	100	98	< 50	1.200	48	51	< 15
LR-20250624-42	17.06.2025		< 45	190	900	180	130	110	< 50	1.400	54	54	< 15
LR-20250624-43	17.06.2025		< 45	190	1.100	180	150	96	< 50	1.600	44	64	< 15
LR-20250624-44	17.06.2025		< 45	190	1.200	180	140	98	< 50	1.500	46	64	< 15
LR-20250624-45	17.06.2025		< 45	180	360	180	93	90	< 50	810	43	51	< 15
LR-20250624-46	17.06.2025		< 45	180	460	180	95	84	< 50	1.000	43	43	< 15
LR-20250624-47	17.06.2025		< 45	180	410	180	88	74	< 50	860	42	40	< 15
LR-20250624-48	17.06.2025		< 45	180	410	180	110	69	< 50	830	39	53	< 15
LR-20250624-51	18.06.20205		< 45	260	4.800	240	500	9.500	< 50	7.200	3.600	340	29
LR-20250624-52	18.06.20205		< 45	< 30	2.500	< 30	250	2.400	< 50	3.500	100	110	16
LR-20250624-53	18.06.20205		< 45	< 30	1.400	< 30	170	330	< 50	2.300	68	50	< 15
LR-20250624-54	18.06.20205		< 45	< 30	1.100	< 30	140	220	< 50	2.200	60	49	< 15
LR-20250624-55	18.06.20205		< 45	< 30	220	< 30	< 50	210	< 50	1.100	58	37	< 15
LR-20250624-56	18.06.20205		< 45	< 30	3.000	< 30	260	4.500	< 50	3.600	260	170	20
LR-20250624-57	18.06.20205		< 45	< 30	1.600	< 30	160	520	< 50	2.500	54	62	< 15

Tabelle 15 Anhang 1: Ergebnisse der Testserie 5.

IUTA Nummer	Datum	Nitrosamine										Hygieneparameter		
		Parameter	NDBA	NDEA	NDIPLA	NDMA	NDPA	NMEA	NMOR	NPIP	NPYR	Enterokokken	E.Coli	Coliforme
		Einheit	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	ng/L	Anzahl/mL	Anzahl/mL	Anzahl/mL
LR-20250624-31	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-32	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-33	17.06.2025													
LR-20250624-34	17.06.2025		< 15 ^a	< 5	< 6 ^a	9,4	< 6 ^a	< 5	< 5	< 5	< 5	8	500	6400
LR-20250624-35	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	360	1000	26000
LR-20250624-36	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-37	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	10	430
LR-20250624-38	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-39	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 1	9	55
LR-20250624-40	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-41	17.06.2025		< 5	< 5	< 5	35	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	0	< 1	0
LR-20250624-42	17.06.2025		-									-	-	-
LR-20250624-43	17.06.2025		< 5	< 5	< 5	38	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	0	< 1	0
LR-20250624-44	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-45	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-46	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-47	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-48	17.06.2025		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-51	18.06.20205		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-52	18.06.20205		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-53	18.06.20205		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-54	18.06.20205		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-55	18.06.20205		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-56	18.06.20205		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LR-20250624-57	18.06.20205		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anhang 2: Kostenabschätzung

Tabelle 16 Anhang 2: Kostenabschätzung für verschiedene Typen einer USONiQ-Ozonung zur Implementation in Kleinkläranlagen

USONiQ-Anlagentypen und -größen

Krankenhäuser und Kleinkläranlagen

Anlage	Einsatz	Betten/ Nutzer	Abwassermenge pro Jahr	Abwassermenge pro Bett/Nutzer	Investitionskosten*	Betriebskosten pro Jahr**	Spez. Jahreskosten pro m3	Spez. Kosten pro Nutzer/Tag
		#	m3/a	m3/Bett-Nutzer/Tag	€	€/a	€/m3	€/Nutzer/Tag
USOmed 500	Klinik	500	67500	0,375	1.200.000	13.500	1,39	0,52
USOmed 250	Klinik	250	33750	0,375	650.000	6.750	1,48	0,56
USOmed 100	Klinik, Pflege	100	9000	0,250	280.000	1.877	2,30	0,58
USOmobil 50	Camping	50	2250	0,125	125.000	315	3,84	0,48
USOmobil 25	Landwirtschaft, Privat	25	1125	0,125	60.000	158	3,70	0,46

* Nutzung 15 Jahre

**Verbrauchskosten Strom: €0,30/kWh

- Investitionskosten: Kapitalkosten sind je nach Ausgangslage individuell zu berücksichtigen und beinhalten nicht die Berücksichtigung von Förderungen.
- Betriebskosten beinhalten Verbrauchskosten wie Strom und O₂. Personalkosten für externes Personal fallen nicht an.
- Service- und Wartungskosten könnten z. B. mit einem vergleichbaren Prozentsatz (2%) angenommen werden, sind aber nicht Bestandteil dieser Übersicht.

Anhang 3: Planung verschiedener Anlagenkonzepte der USONiQ-Ozonung



Abbildung 1 Anhang 3: Anlagenkonzept für eine mögliche Umsetzung der USONiQ-Ozonung für ein Krankenhaus mit einer Kapazität von 100 Betten.

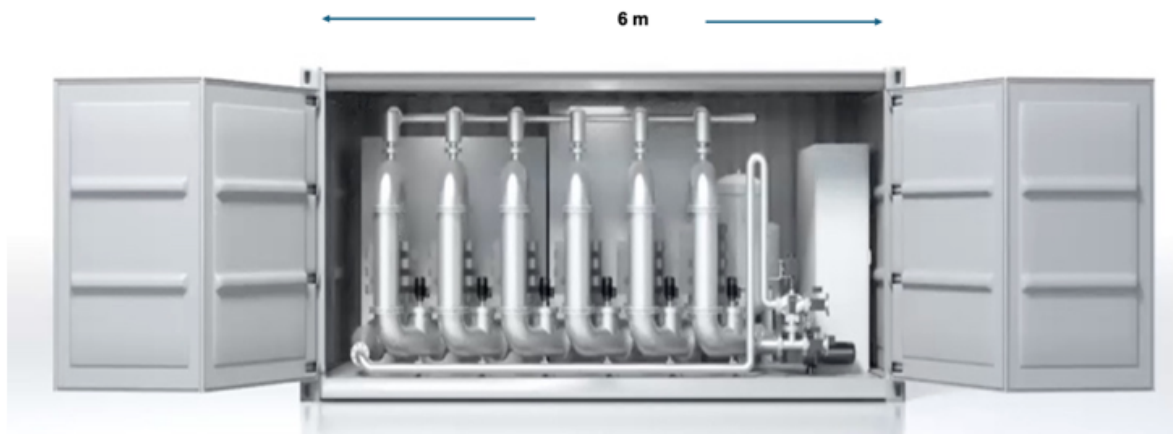


Abbildung 2 Anhang 3: Anlagenkonzept für eine mögliche Umsetzung der USONiQ-Ozonung für ein Krankenhaus mit einer Kapazität von 500 Betten.