OZONUNG OHNE BROMATBILDUNG

WIE DIMENSIONIERUNG UND BETRIEBSWEISE EINE NIEDRIGE OZONKONZENTRATION ERMÖGLICHEN

Bei der Ozonung von gereinigtem Abwasser in Kläranlagen kann in Abhängigkeit von der Bromidkonzentration das Oxidationsprodukt Bromat gebildet werden. Die Bromatbildung hängt sowohl von der Ozonkonzentration, insbesondere von der momentanen, lokalen Konzentration im Reaktor, als auch von der Eintragsart des Ozons ab. Die ARA Neugut hat die Ozonung im grosstechnischen Betrieb durch die Optimierung des Ozoneintrags und weiterer Einflussfaktoren so weiterentwickelt, dass keine nachweisbare Bromatbildung stattfindet. Die Bromatkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage liegen unter 0,001 mg/l.

Max Schachtler, ARA Neugut*

RÉSUMÉ

OZONATION SANS FORMATION DES IONS BROMATES: COMMENT ATTEINDRE UNE PLUS FAIBLE CONCENTRATION EN OZONE?

La STEP de Neugut dispose de six ans d'expérience dans le fonctionnement d'un système d'ozonation pour l'élimination des micropolluants. L'installation est conçue de manière à permettre l'élimination de 80% des micropolluants exigée par la loi en évitant la formation de sous-produits d'oxydation indésirables comme le bromate. Afin d'atteindre cet objectif, l'apport en ozone doit être uniquement effectué à faibles concentrations. Si un réacteur d'ozonation est réparti en plusieurs chambres de passage et qu'il est équipé d'un système d'apport pour plusieurs des chambres, il est possible de mettre facilement et efficacement en œuvre cette exigence en ayant recours au concept d'exploitation LOD avec un apport progressif dans une proportion de 50/50 tant qu'un temps de réaction suffisant est assuré après la dernière chambre d'apport. Ce mode opérationnel a été développé et mis en place avec succès par la STEP de Neugut. Il a permis de diminuer de 20% le besoin total en ozone et de minimiser la formation potentielle d'ions bromates. Ce réacteur optimisé entraîne des frais d'exploitation annuels de 110 000 francs pour une pollution de 105 000 équivalent-habitants et 55 000 habitants raccordés. L'investissement en personnel et en maintenance s'élève à environ 100 heures par an, y compris 3 jours de nettoyage et d'entretien intensifs des réacteurs, diffuseurs etc.

EINLEITUNG

BROMID UND BROMAT

Bromid ist ubiquitär in der aquatischen Umwelt. Im Trink- und Grundwasser hängt die Konzentration von den geogenen Verhältnissen ab. Zusätzlich kann ein erhöhter Bromidgehalt auf eine Kontamination der Wasserressourcen durch Düngemittel oder Streusalz hinweisen. In der Schweiz liegen die Bromidkonzentrationen im Trinkwasser in den meisten Regionen im Allgemeinen unter 0,05 mg/l. Diese Hintergrundkonzentrationen finden sich auch im Abwasser wieder. Zusätzlich können Bromidfrachten mit Abwässern aus Industrie und Gewerbe, beispielsweise aus Kehrichtverbrennungsanlagen, der chemischen Industrie oder der Abfallindustrie, in die kommunale Kläranlage gelangen. Diese unterliegen, im Gegensatz zur konstanten Hintergrundkonzentration aus dem häuslichen Abwasser, in der Regel starken Schwankungen.

Bromid hat in den in der Schweiz auftretenden Konzentrationen keine negativen Auswirkungen auf die Funktion der Kläranlage. Doch es kann durch Ozon zu Bromat oxidiert werden, das als karzinogen und mutagen eingestuft wird. Aus diesem Grund gilt in Trinkwasser ein Höchstwert für Bromat von 10 µg/l. Für gereinigtes Abwasser wurde bislang kein Ablaufwert festgelegt.

** Kontakt: max.schachtler@neugut.ch*

Um die natürlichen Ressourcen zu schützen, gilt jedoch auch in der Abwasserreinigung, dass bei der Ozonung zur Elimination von Spurenstoffen eine Bromatbildung oberhalb des Trinkwassergrenzwertes unbedingt zu vermeiden ist. Seitens Bund wird eine generelle Minimierung der Bromatbildung durch die Kläranlagen verlangt.

EINFLUSS DER OZONKONZENTRATION

Im Jahr 2012 untersuchte die Eawag, ab welcher Ozonkonzentration eine verstärkte Bromatbildung im vorgereinigten Abwasser der ARA Neugut einsetzt [1]. Es zeigte sich, dass die Bromatbildung erst ab einer spezifischen Ozonkonzentration von rund 0,4 g O_3/g DOC einsetzt und bei 1,0 g O_3/g DOC eine Umsetzungsrate von etwa 20% der Bromidkonzentration erreicht (siehe *Fig. 2*). Das entspricht einem Bromatgehalt von rund 10 µg/l (= Höchstwert im Trinkwasser) bei einer Bromidkonzentration im Abwasser von 50–60 µg/l Bromid. Daher muss darauf geachtet werden, dass die Ozondosierung möglichst bedarfsgerecht erfolgt, um die Bromatbildung zu minimieren. Bei geringen spezifischen Ozonkonzentrationen bis rund 0,5 g O_3/g DOC ist die Bromatbildung vernachlässigbar. Mit höheren Ozonkonzentrationen steigt das Bromatbildungspotenzial sehr rasch an.
Die am 1. Januar 2016 in Kraft getretene Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201; [2]) verlangt eine Eliminationsleistung der Spurenstoffe von mindestens 80%, gemessen anhand von 12 Leitsubstanzen. Somit sind die Ingenieure herausgefordert, die Ozonanlagen so zu bauen, dass die geforderte Eliminationsleistung jederzeit erreicht wird, aber gleichzeitig die spezifische Ozonkonzentration (eingesetzte Ozonmenge pro vorhandener DOC-Menge, g O_3/g DOC) so tief wie möglich gehalten wird, um die Bromatbildung zu minimieren. Für die ARA Neugut sollte die Ozonkonzentration stets unter 0,5 g O_3/g DOC liegen. Wichtig ist zudem, dass die momentane lokale Ozonkonzentration ebenfalls unter diesem Wert bleibt.
Je nach Einzugsgebiet einer Kläranlage können die Charakteristika des Abwassers und somit das Bromatbildungspotenzial von denen der ARA Neugut abweichen. Für Kläranlagen mit einer Ozonstufe gilt jedoch generell: Eine niedrige spezifische Ozonkonzentration reduziert das Risiko der Bildung von Bromat. Daneben sind die Konzeptionierung und Dimensionierung sowie die Optimierung des Betriebs entscheidende Einflussfaktoren. Je besser diese aufeinander abgestimmt sind, desto weniger Ozon muss ins Abwasser gegeben werden, um die gesetzlich verlangte Abbauleistung zu erreichen.

OPTIMIERUNG DER OZONUNG

Seit dem 24. März 2014 entfernt die erste grosstechnische Anlage der Schweiz zur Behandlung von Spurenstoffen im gereinigten Abwasser, die ARA Neugut in Dübendorf ZH, die Spurenstoffe mit einer konstanten und stabilen Eliminationsleistung von 82% ± 2%. Darüber hinaus reduziert die Ozonung die Ökotoxizität des gereinigten Wassers um ca. 80% [3] und zerstört Bakterien, die teilweise antibiotikaresistent sind [4]. Seit der Inbetriebnahme der Ozonung optimierte die ARA Neugut das Gesamtsystem stetig. Zu den Verbesserungsmassnahmen gehörten:
- Einführung des LOD-(*Low-Ozone-Dosage*-)Betriebsregimes
- Vorgaben zur Installation der UV/VIS-Sonden
- Reinigung der Sonden mit Druckluft und Phosphorsäure, um exakte SAK-Messwerte zu erreichen
- Bau einer Kontroll- und Reinigungsvorrichtung für die Ozoneintragsdiffusoren
- Einführung der bedarfsgerechten Ozonzugabe und des Betriebsmonitorings der Spurenstoffelimination (BEAR)
- Verwertung des Offgases in der Biologie

Für eine erfolgreiche zukünftige Planung, Dimensionierung und Realisierung von Ozonungen in ARA sind folgende Fragen von zentraler Bedeutung:
- Wie kann das Risiko der Bromatbildung in Ozonanlagen ausgeschlossen werden?
- Was ist bei der Planung und beim Bau einer Ozonanlage zu beachten, damit kein oder möglichst wenig Bromat gebildet wird?
- Wie aufwendig ist eine solche Ozonungsanlage (Kosten und Unterhalt)?

Diese Fragen werden im vorliegenden Artikel – basierend auf den Betriebserfahrungen der ARA Neugut der letzten sechs Jahre und den in dieser Zeit intern durchgeführten Entwicklungs- und Forschungsprojekten – beantwortet.

KLASSISCHER OZONEINTRAG

Der Ozonreaktor der ARA Neugut ist in sechs Kammern unterteilt, von denen zwei als Eintragskammer mit je 53 Diffusoren ausgerüstet sind *(Fig. 1)*. Im ersten Betriebsjahr wurde er klassisch betrieben und diverse Steuer- und Regelstrategien zur Erreichung der gesetzlich geforderten Eliminationsleistung getestet [5]. Mit klassischen Ozondosierungsstrategien, wie der Ozondosierung proportional zum Durchfluss ($Q_{prop.}$), proportional zum SAK (als Mass für den DOC) im Einlauf ($SAK_{INprop.}$)

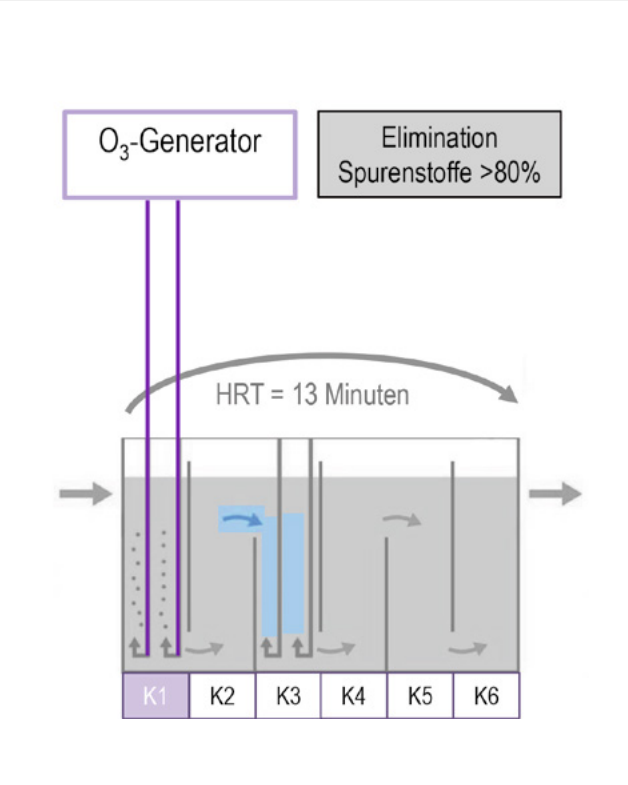


Fig. 1 Klassischer Ozoneintrag in Kammer 1. Ozonreaktor der ARA Neugut mit 6 Kammern und einer Aufenthaltszeit HRT über den gesamten Reaktor von 13 Minuten bei Vollstrom (Q_{max} = 660 l/s).

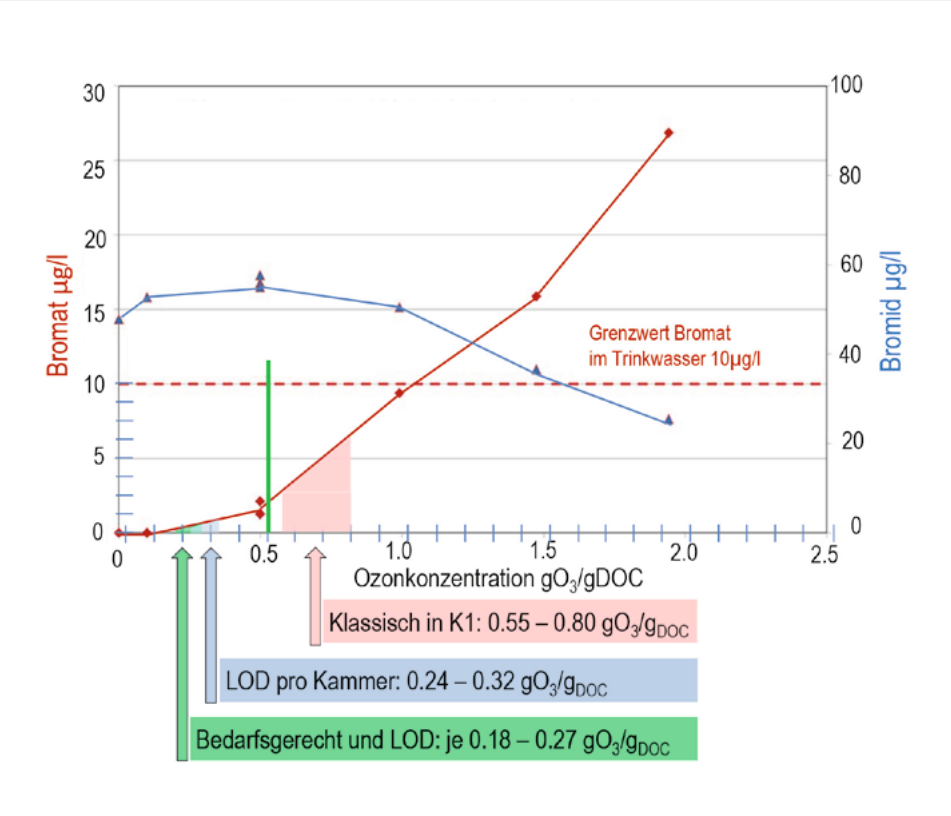


Fig. 2 Die Ozonkonzentrationen beim klassischen einstufigen Ozoneintrag in Kammer 1 befinden sich oberhalb der Grenze (grüner Linie), ab der eine höhere Bromatbildung einsetzt. Bei Nitrit im Zulauf zur Ozonung oder Regenwetterspitzen kann es erforderlich sein, die Ozonkonzentration über 0,80 g O_3/g DOC anzuheben, um die geforderte Eliminationsleistung zu erreichen.

oder proportional zur SAK-Differenz Einlauf-Auslauf (ΔSAK), wurde im Normalfall eine mittlere Spurenstoffelimination von 86% ± 6% erreicht, wofür spezifische Ozonkonzentrationen von 0,55 bis 0,80 g O_3/g DOC nötig waren [6]. Um sicherzugehen, dass im 48-Stunden-Durchschnitt die Eliminationsleistung immer > 80% ist, muss wegen verschiedener Einflussfaktoren eine mittlere Ozonkonzentration vorgegeben werden. *Figur 2* zeigt die mögliche Bromatbildung beim klassischen Ozoneintrag im Normalfall. *Figur 2* zeigt aber auch – wie bereits erläutert –, dass die spezifische Ozonkonzentration unter 0,5 g O_3/g DOC liegen sollte, um die Bromatkonzentration im Ablauf deutlich unter dem Höchstwert für Trinkwasser zu halten. Daher wurden Alternativen zum klassischen einstufigen Ozoneintrag gesucht.

REDUKTION DER SPEZIFISCHEN OZONKONZENTRATION

Im Herbst 2015 wurde entschieden, das Ozon in den beiden Eintragskammern des Reaktors gleichzeitig einzutragen *(Fig. 3)*. Dieser mehrstufige Ozoneintrag erhielt den Namen LOD (LOD steht für *Low Ozone Dosage*), weil dadurch der spezifische Ozonverbrauch massiv sank (um ca. 20%), wohingegen die Spurenstoffelimination konstant blieb. Das LOD-Betriebskonzept wurde im *Aqua & Gas 11/2016* [6] bereits im Detail beschrieben.

Ein Vorteil des LOD-Betriebsregimes ist, dass die in eine Kammer zudosierte Ozonmenge und folglich auch die spezifische Ozonkonzentration deutlich gesenkt werden kann. Der Bedarf beträgt pro Kammer nur noch 0,24–0,32 g O_3/g DOC (siehe *Fig. 2*) bei einer mittleren Spurenstoffelimination von 82% ± 2%.

DIMENSIONIERUNG DER OZONUNG MIT LOD-PRINZIP

Die Einsparungen mit dem LOD-Verfahrensprinzip bedingen Anpassungen in der Dimensionierung der Ozonreaktoren. Die wesentlichen Dimensionierungsfaktoren für LOD sind die Aufenthaltszeit (HRT, *hydraulic retention time*) und die Reaktionszeit (RZ). Letztere ist definiert als Zeit nach dem Einmischen des Ozons bis zum Ende des Ozonreaktors. Auf der ARA Neugut wird also die Reaktionszeit erst ab Kammer K4 (nach dem zweiten Ozoneintrag in Kammer K3) berechnet (siehe *Fig. 3*). Diese muss ausreichend lange sein, damit einerseits genügend Zeit für die Reaktion des Ozons mit den Spurenstoffen zur Verfügung steht und andererseits ein Mitreissen von Restozonblasen aus dem Reaktor verhindert wird. Die für den Spurenstoffabbau ebenfalls relevante Aufenthaltszeit (HRT) beginnt allerdings bereits beim Ozoneintrag in Kammer K1. Bei einer maximalen Durchflussmenge

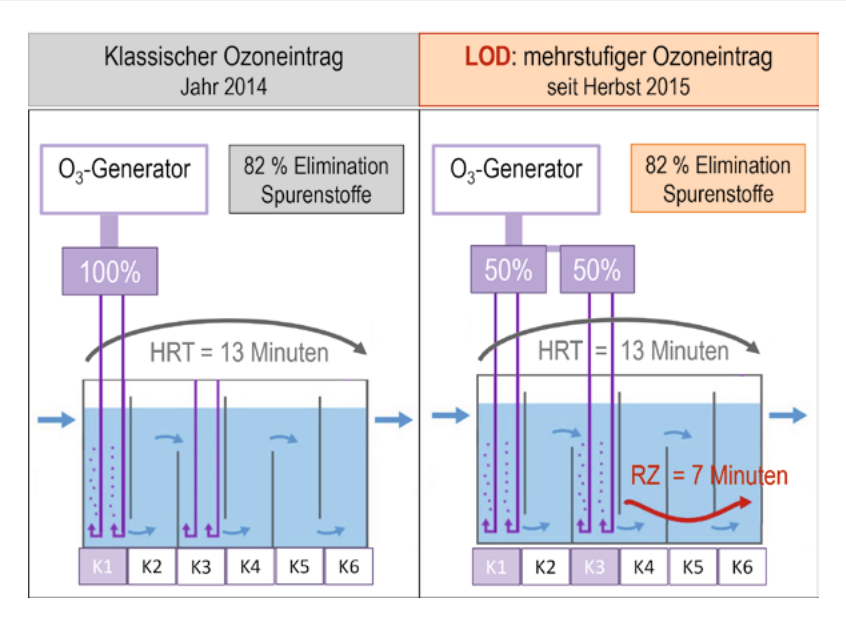


Fig. 3 Ozonreaktor der ARA Neugut mit schematischer Darstellung des klassischen Ozoneintrags und des LOD-Betriebsregimes (zweistufiger Ozoneintrag). Die Aufenthaltszeit im Reaktor (HRT) und die Reaktionszeit (RZ) nach dem letzten Ozoneintrag bei Q_{max} sind ebenfalls angegeben.

Q_{max} = 660 l/s führt dies im Ozonreaktor der ARA Neugut zu folgenden Werten für HRT und RZ *(Fig. 3)*:

- Aufenthaltszeit HRT = 13 Minuten (Volumen des gesamten Reaktors: 530 m^3)
- Reaktionszeit RZ = 7 Minuten (Volumen von Kammer K4 bis Ablauf Reaktor: 265 m^3).

Eine RZ von nur 7 Minuten reicht im Fall der ARA Neugut seit 2015 für einen sicheren und stabilen Betrieb aus, unabhängig von der Wettersituation. Das ist auch das Ergebnis der im Gesamtsystem der Kläranlage ausgeführten Optimierungen. Bei der Planung neuer Ozonanlagen wird jedoch empfohlen, RZ bei Q_{max} höher, nämlich bei 10 bis 12 Minuten, anzusetzen, um Einflüsse abzufedern wie temporär höhere Nitritkonzentrationen, ansteigende DOC-Frachten oder höhere GUS-Konzentrationen im Zulauf der Ozonung, die bei Regenereignissen auftreten können. Die Ozonung gewinnt damit an Betriebsstabilität.

REDUZIERUNG DER BROMATBILDUNG BEI HÖHERER BELEGUNGSDICHTE

Das Eintragssystem der ARA Neugut weist pro Kammer zwei regelbare Stränge auf, im Strang 1 sind 20 Diffusoren angeordnet und 33 Diffusoren im Strang 2 *(Fig. 4)*. Die Anzahl beaufschlagter Diffusoren ist entscheidend für die Menge der Gasblasen und deren Grösse. Mit steigender Anzahl an Diffusoren steigt die Menge der Gasblasen. Gleichzeitig sind diese kleiner, was die Kontaktmöglichkeit des Ozons mit den Spurenstoffen wesentlich erhöht. Eine bessere Ozoneintragseffizienz ist sowohl beim klassischen Ozoneintrag als auch beim LOD-Betriebsregime feststellbar *(Tab. 1)*. Die Effektivität des Letzteren wird dadurch wesentlich gesteigert. Mehr Informationen zum Eintragssystem und der Anzahl Diffusoren sind ebenfalls im Artikel [6] im *Aqua & Gas 11/2016* zu finden.

Fig. 4 Eintragskammer der ARA Neugut mit 53 Diffusoren zur grossflächigen und feinblasigen Verteilung des Ozons im Reaktor.

	Direkter Einfluss	Messbares Ergebnis
LOD-Betriebsregime (Mehrkammerregime)	Erhöhte Oxidationsleistung	Reduktion O_3-Verbrauch 20–25%
Erhöhte Anzahl Diffusoren	Kleinere Gasblasen Erhöhte Anzahl an Gasblasen	Bessere Ozoneintragseffizienz 3–5% (im LOD-Betriebsregime)

Tab. 1 Einfluss des LOD-Betriebsregimes und der erhöhten Anzahl Diffusoren (Flächenbelegung) auf die Eintragseffizienz im Vergleich zum klassischen Ozoneintrag

Mit einer höheren Anzahl an Diffusoren kann aufgrund der besseren Eintragseffizienz die Ozonkonzentration gesenkt und die Bromatbildung reduziert werden. Ausserdem ist die Restozonkonzentration (ROK) im Offgas tiefer. Eine grössere Anzahl an Diffusoren verringert den Gasfluss durch den einzelnen Diffusor, was wiederum eine geringere Auftriebsgeschwindigkeit der Ozonblasen zur Folge hat. Dies führt zu einer höheren Aufenthaltszeit des Ozons im Wasser, weswegen mehr Spurenstoffe mit dem Ozon in Kontakt kommen.

FEINBLASIGE DIFFUSOREN REDUZIEREN DEN OZONBEDARF

Das Ozon kann mit unterschiedlichen Eintragssystemen in den Reaktor eingetragen werden. Die ARA Neugut untersuchte, ob sich das Blasenbild von Diffusoren auf den Ozonbedarf auswirkt. Die Frage lautete: Bewirken grössere Blasen eine Zunahme der Restozonkonzentration im Offgas (ROK) oder nicht? Die Annahme war, dass grössere Blasen zu einer höheren ROK führen. Die ROK wurde seit der Inbetriebnahme im Jahre 2014 aufgezeichnet *(Fig. 5)*.

Die mittlere ROK blieb von Januar 2014 bis im Januar 2018 – bei gleichbleibender Spurenstoffelimination von durchschnittlich 82% im Jahresmittel – weitgehend konstant. Ab Januar 2018 stieg die ROK merklich an. Deshalb wurden die Diffusoren während des jährlichen Serviceunterbruchs im Sommer 2018 ausgebaut und das Blasenbild in einer Testvorrichtung kontrolliert. Die Analysen zeigten, dass die Diffusoren nach vier Jahren Betriebszeit mehrheitlich recht grosse Blasen erzeugten *(Fig. 6, Foto links)*. Daraufhin wurden die Diffusoren gereinigt und das Blasenbild wiederum kontrolliert. Die Diffusoren erzeugten wieder ein feines, gleichmässiges Blasenbild *(Foto rechts* in *Fig. 6)*. Nach der Wiederinbetriebsetzung der Ozonanlage konnte der Effekt erstmals gemessen und damit nachgewiesen werden, dass sich unterschiedliche Blasengrössen auf die benötigte Ozonkonzentration auswirken. Die ROK reduzierte sich nach der Reinigung der Diffusoren um den Faktor 5 *(Fig. 5)*. Dadurch sank der Strombedarf pro Kilogramm eingetragenes Ozon für eine Spurenstoffelimination > 80% um 13% von 11,4 kWh/kg O_3 auf 9,9 kWh/kg O_3. Damit einhergehend nahm die spezifische Ozonkonzentration zur Erreichung der Spurenstoffelimination ab. Dies veranschaulicht, dass feinblasige Eintragssys-

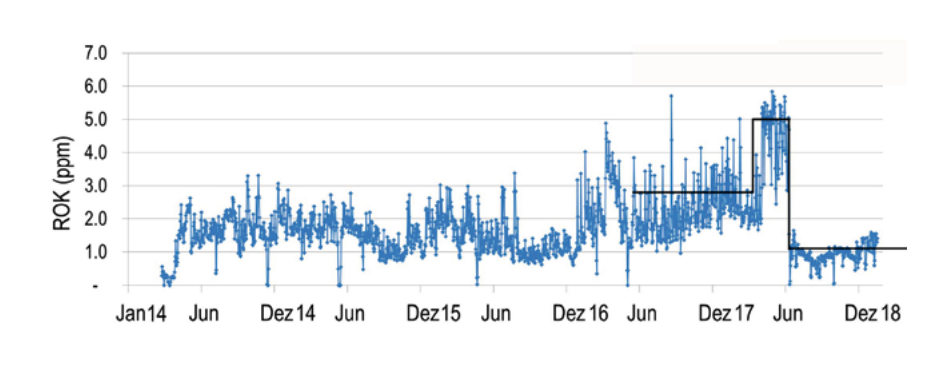


Fig. 5 Entwicklung der Restozonkonzentration (ROK) im Offgas des Ozonreaktors der ARA Neugut von März 2014 bis Ende 2018

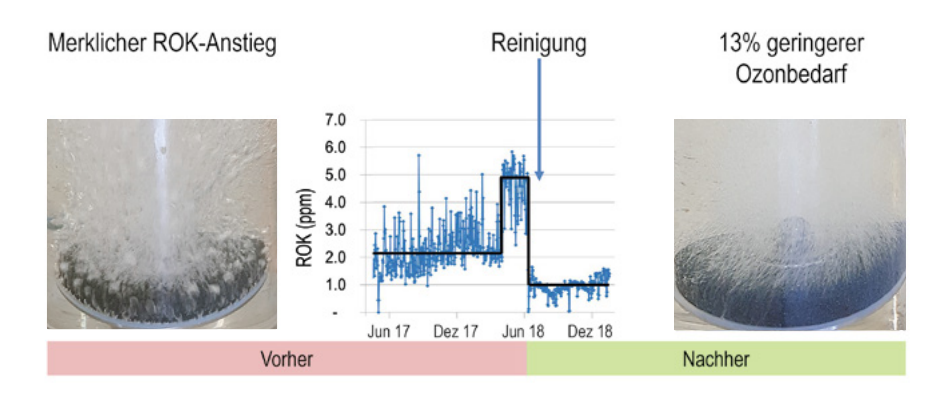


Fig. 6 Blasenbild eines Ozon-Diffusors in der Testvorrichtung ARA Neugut. Links: Diffusor nach 4 Jahren im Einsatz vor der Reinigung mit deutlich grösseren Blasen. Rechts: gleicher Diffusor nach der Reinigung mit vielen kleinen Blasen.

teme wesentlich sind zur Reduzierung der Bromatbildung und für eine hohe Eliminationsleistung bei geringer Ozonkonzentration.

STRATEGIEN DER OZONZUGABE UND BROMATBILDUNG

Im Vorfeld der Ausführung der vierten Reinigungsstufe sind Planer und Betreiber gefordert, die personelle und kostenmässige Strategie der Ozondosierung für die vorliegenden Strukturen zu definieren. Die Strategie der Ozonzugabe ist auf die verfahrenstechnischen Gegebenheiten und die Rahmenbedingungen im Einzugsgebiet der ARA anzupassen.

Proportionale Dosierung

Die einfachste Strategie der Ozonzugabe ist die proportionale Dosierung. Diese kann anhand zweier Parameter vollzogen werden und führt üblicherweise zu einer Bandbreite der Spurenstoffelimination von ±7% auf 80 bis 94%. Die beiden Parameter sind:

- Abwassermenge: $g\,O_3/m^3$ Abwasser
- CSB-Konzentration im Zulauf der Ozonung: $g\,O_3/g\,CSB$

Erweiterte Dosierungsstrategien

Bei folgenden erweiterten Strategien ist die Installation von Online-UV/VIS-Sonden zur Messung des spektralen Absorptionskoeffizienten (SAK) vor und/oder nach dem Ozonreaktor erforderlich:

- Dosierung proportional zum SAK-Wert im Zu- oder Ablauf der Ozonung: $g\,O_3/Em^{-1}$.
- Dosierung proportional zum ΔSAK-Wert über den Ozonreaktor: $g\,O_3/\Delta SAK$.

Dabei sind UV/VIS-Sonden mit einer ausreichend grossen Spaltbreite (mindestens 40 bis 100 mm) zu verwenden. Mit diesen beiden Strategien lässt sich eine Genauigkeit von ±6% bei einer Spurenstoffelimination von 80 bis 92% erreichen.

Bedarfsgerechte Ozondosierung

Eine weitere Verbesserung lässt sich mit der bedarfsgerechten Ozondosierung erzielen ($g\,O_3$/% Spurenstoffelimination; BEAR) [7]. Diese zeichnet sich aus durch eine konstante und stabile Eliminationsleistung von 82% ± 2%, tiefe spezifische Ozonkonzentrationen von 0,18–0,27 $g\,O_3/g$ DOC pro Eintragskammer (*Fig. 2*) und die Vermeidung von erhöhten Ozonkonzentrationen im Tagesverlauf, weswegen es zu nahezu keiner Bromatbildung kommt. Folgende Anforderungen werden an das Betriebsmonitoring im Falle der bedarfsgerechten Ozondosierung gestellt:

- Vorhandensein von drei Sondenpaaren (vor und nach dem Reaktor) zwecks automatischen Vergleichs der Messwerte.
- Bestimmung der SAK-Werte mit einer Genauigkeit von ± 0,05 E/m. Dies erfordert u. a. eine regelmässige automatische Reinigung der Sonden mit Druckluft und Phosphorsäure, damit die Streuung der Messwerte nicht mehr als 1% beträgt. Die Eignung von UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination ist in [8] im Detail beschrieben.
- Qualitätssicherung mittels LC-MS/MS-Analytik.
- Ausbildung des Betriebspersonals, damit dieses die verschiedenen Abläufe und deren Zusammenhänge genau kennt.

ARA NEUGUT: OPTIMIERTE BIOLOGIE UND VIERTE STUFE

Die vierte Reinigungsstufe und ihre Dimensionierung ist im Verbund mit der Kläranlage und dem Abwassernetz zu betrachten. Faktoren, die sich positiv auf die Leistung der vierten Stufe auswirken, sind: eine biologische Stufe mit stabiler, hoher Reinigungsleistung, kein Nitrit im Zulauf zum Ozonreaktor, gleichmässige Abwasser- und Frachtbelastung, geringe Frachtstösse (Trocken- und Regenwetter) und tiefe GUS-Werte im Zulauf der Ozonung. In der Planung der vierten Reinigungsstufe ist daher das Gesamtsystem Kläranlage und Netz einzubeziehen.

Tabelle 2 fasst die Wasserinhaltsstoffe des Ablaufs der biologischen Reinigungsstufe der ARA Neugut und damit des Zulaufs zur Ozonung zusammen. Die gleichmässig stabile Reinigungsleistung der biologischen Stufe in der ARA Neugut trägt zu tiefen Ozonkonzentrationen im Tagesverlauf wie auch zu Flexibilität und hoher Betriebssicherheit bei.

Die Elimination von Spurenstoffen geschieht nicht ausschliesslich in der eigens dafür vorgesehenen Verfahrensstufe, sondern auch in der mechanischen und biologischen Reinigungsstufe *(Fig. 7)*. Die ARA Neugut eliminiert die Spurenstoffe stabil zu 82% im Jahresmittel und weist eine überdurchschnittliche Elimination

Jahre 2016–2018	GUS mg/l	CSB mg O_2/l	DOC mg/l	SAK E/m	NH_4-N mg/l	NO_2-N mg/l	P_{tot} mg/l	Temp. °C	pH
Mittelwert	3	17,7	5,3	11,40	0,06	0,03	0,25	18,0	7,5
10%-Wert	1	14,2	2,5	9,30	0,04	0,01	0,11	13,7	7,3
90%-Wert	5	21,2	6,5	13,10	0,07	0,05	0,49	22,4	7,8

Tab. 2 Durchschnittliche Konzentrationen im Zulauf zur Ozonung der ARA Neugut in den Jahren 2016 bis 2018

einzelner Spurenstoffe in der Biologie auf, insbesondere von Benzotriazol, Metoprolol und Methylbenzotriazol. Die Ursachen für diese guten Eliminationsleistungen der Biologie wurden bislang nicht näher untersucht.

Das Ergebnis der vorgängig erwähnten Massnahmen und Optimierungen ist ein sehr wirtschaftlicher Betrieb der Ozonung. *Tabelle 3* gibt eine Übersicht der spezifischen Verbrauchszahlen in Bezug auf den Zulauf der Ozonung sowie der dazugehörenden Ozonkonzentration.

Die Betriebskosten belaufen sich inklusive Sandfiltration auf 110 000 Franken pro Jahr. Das entspricht 2 Franken pro Einwohner resp. 1 Franken pro Einwohnerwert und Jahr. Dieselben Aufwendungen sind für die Amortisation ohne Berücksichtigung von Beiträgen zu tätigen. Die Betriebskosten teilen sich prozentual wie folgt auf:

- 50% Reinsauerstoff.
- 15% Strom (Anteil am Bedarf der gesamten Kläranlage unter 5%).
- 20% Personal und externer Jahresservice.
- 15% LC-MS/MS-Analytik und Betriebsmittel für die Messgeräte.

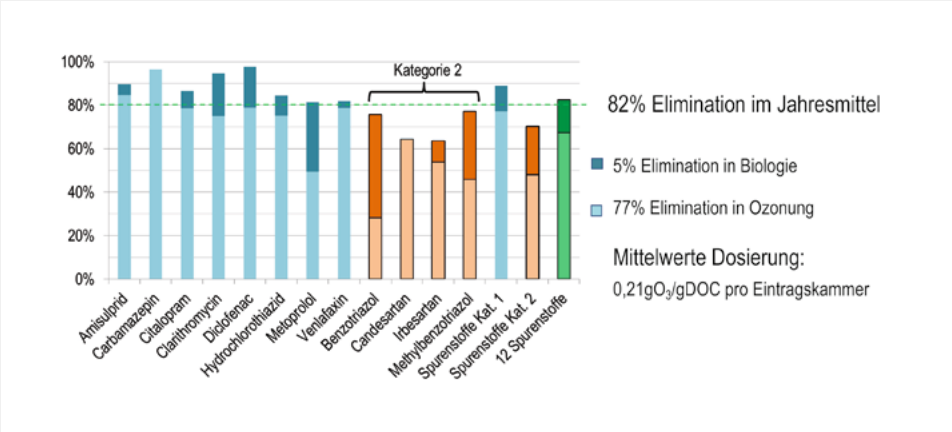


Fig. 7 Elimination der 12 Leitsubstanzen über die Ozonung (hell), die Biologie (dunkel) und die Gesamtanlage der ARA Neugut in den Jahren 2016 bis 2018 bei durchschnittlich 0,21 g O_3/g DOC pro Eintragskammer. Die drei Säulen rechts geben die Mittelwerte für die 8 Leitsubstanzen der Kategorie 1 (sehr gut eliminierbar), für die 4 Leitsubstanzen der Kategorie 2 (gut eliminierbar) sowie für alle 12 Leitsubstanzen gemeinsam an.

Jahr 2018	Spezifischer Energieverbrauch; Ozonkonzentrationen pro Eintragskammer					
	Abwasser kWh/m³	DOC kWh/kg DOC	CSB kWh/kg CSB	Ozon kWh/kg O_3	DOC gO_3/g DOC	CSB gO_3/g CSB
Mittelwert	0,021	4,6	1,27	9,9	0,22	0,060
10%-Wert	0,017	3,7	1,03	9,2	0,19	0,055
90%-Wert	0,025	5,7	1,53	11,1	0,26	0,070

Tab. 3 Spezifischer Energie- und Ozonverbrauch der ARA Neugut im Jahr 2018. Basis: LOD-Betriebsregime, bedarfsgerechte Ozonzugabe, Abwasserbewirtschaftung, konstante Elimination der Spurenstoffe von 82% ± 2%.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ozonung ist ein wirtschaftliches, effizientes, sicheres und robustes Verfahren, um Spurenstoffe aus dem Abwasser zuverlässig zu entfernen. In Kläranlagen kann sie so betrieben werden, dass die Bildung von Oxidationsnebenprodukten wie Bromat stark minimiert oder gar ganz verhindert wird. Die Betriebserfahrungen und Optimierungen der ARA Neugut weisen auf folgende Aspekte mit zentraler Bedeutung hin:

LOD-Betriebsregime

Das LOD-Betriebsregime hat sich als sehr effizientes Verfahren erwiesen, mit dem die Ozonkonzentration bei gleichbleibender Spurenstoffelimination reduziert werden kann. Durch die Aufteilung des Ozoneintrags auf zwei Kammern wird die Einzeldosis auf einen für die Bromatbildung unkritischen Bereich limitiert. Die Verteilung der Ozonmenge im Verhältnis 1:1 erwies sich als ideal. Die Folge dieser Ergebnisse ist, dass in der Schweiz seit 2016 die Ozonreaktoren standardmässig mit dem LOD-Prinzip ausgerüstet werden.

Dimensionierung der Ozonung

Die Ozonanlage sollte eine ausreichend hohe Reaktionszeit (RZ) aufweisen, um mögliche Störeinflüsse betrieblich abzufedern. Die Dimensionierung der Ozonung ist eine Kombination von Ozonreaktorgrösse, Generatorenleistung, Eintragssystem und der Dynamik der Abwasserbewirtschaftung. Die Berücksichtigung dieser Eckpunkte führt zu Betriebssicherheit, nicht nachweisbarer Bromatbildung selbst bei allfälligen kurzzeitigen Bromidbelastungen und zu keinem Mitreissen von Restozonblasen aus dem Reaktor. Zudem kann flexibel auf Änderungen in der Abwassermenge, -zusammensetzung und weitere betriebliche Gegebenheiten reagiert werden.

Strategie Betrieb Ozonung

Die Aufgabe des Betreibers ist, die für ihn im täglichen Betrieb sinnvollste Strategie der Ozonzugabe zu definieren, von proportional bis bedarfsgerecht. Eine Spurenstoffelimination von > 80% ist für den Betreiber einfach zu erreichen. Je höher die Ozonkonzentration, umso höher ist die Abbauleistung. Dies kann mit einer proportionalen Ozonzugabe ohne zusätzliche Messtechnik erreicht werden.

Weit anspruchsvoller ist, die Eliminationsleistung knapp über 80% stabil zu halten und zugleich im Ta-

DANK

Die Innovationen und Optimierungen seit der Inbetriebnahme der Ozonung der ARA Neugut im Jahre 2014 sind das Werk vieler Beteiligter. Ausgelöst einerseits durch den Willen der ARA-Mitarbeiter, Fortschritte zu erzielen, und andererseits durch zahlreiche Diskussionen mit Forschern, Ingenieuren und Politikern wurden die beschriebenen Innovationen angegangen und erreicht.

Mein Dank geht an das Team der ARA Neugut für die Ideen, die Installationen und den grossen Einsatz; an *Peter Bruderer*, *Hansruedi Sigrist*, *Michael Thomann* und *Michel Blunschi* für die Ausführung der Ozonung; an *Christian Götz*, *Annette Remmele* und *Margarete Bucheli* für die Unterstützung bei diesem Beitrag.

gesverlauf die spezifische Ozonkonzentration von 0,5 g O_3/g DOC immer zu unterschreiten. Doch damit kann am effektivsten einer Nebenproduktebildung entgegengetreten werden und zugleich ist eine hohe Wirtschaftlichkeit gegeben.

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Böhler, M. et al. (2012): Berichterstattung – Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der ARA Neugut. BAFU, Bern*

[2] *GSchV (2016): Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Juni 2018), SR 814.201. www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19983281/index.html*

[3] *Kienle, C. (2015): Ökotoxikologische Untersuchungen zur Effizienz der biologischen Nachbehandlungen. VSA PEAK Veranstaltung, Eawag, Juni 2015*

[4] *Czeklaski, N.; Von Gunten, U.; Bürgmann, H. (2016): Antibiotikaresistenzen im Wasserkreislauf – Ein Überblick über die Situation in der Schweiz. Aqua & Gas, 9/2016: 72–80*

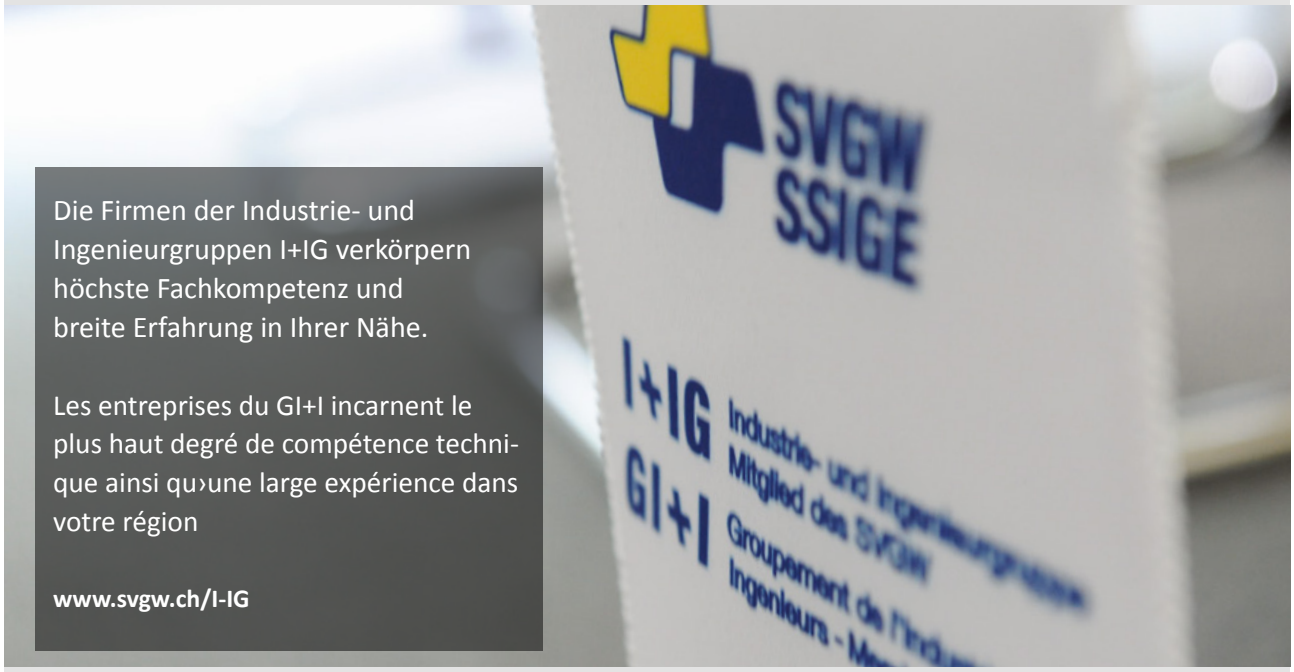
[5] *Fleiner, J. et al. (2015): Ozonung ARA Neugut, Dübendorf – Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung. Schlussbericht BAFU, Dezember 2015*

[6] *Hubaux, N.; Schachtler, M. (2016): Mehrstufiger Ozoneintrag – LOD. Reduzierung des Ozonverbrauchs bei gleichbleibender Elimination der Mikroverunreinigungen. Aqua & Gas 11/2016: 50–56*

[7] *Schachtler, M.; Hubaux, N. (2016): BEAR: Innovative Regelstrategie der Ozonung – UV-Messtechnik für Regelung und Überwachung der Elimination von Mikroverunreinigungen. Aqua & Gas 5/2016: 84–93*

[8] *Hubaux, N.; Schachtler, M.; Götz, C. (2017): Eignung von UV/VIS-Sonden zur Überwachung der Spurenstoffelimination. Korrespondenz Abwasser, Abfall 64: 899–904*

Schweizer Leistungen für den Schweizer Markt



Die Firmen der Industrie- und Ingenieurgruppen I+IG verkörpern höchste Fachkompetenz und breite Erfahrung in Ihrer Nähe.

Les entreprises du GI+I incarnent le plus haut degré de compétence technique ainsi qu›une large expérience dans votre région

www.svgw.ch/I-IG

SVGW SSIGE

I+IG Industrie- und Ingenieurgruppe Mitglied des SVGW

GI+I Groupement de l'Industrie et des Ingenieurs Membre de la SSIGE