

# MEHRSTUFIGER OZON-EINTRAG – LOD-KONZEPT

## REDUZIERUNG DES OZONVERBRAUCHS BEI GLEICHBLEIBENDER ELIMINATION DER MIKROVERUNREINIGUNGEN

Seit Inbetriebnahme der Ozonung im März 2014 führte die ARA Neugut mehrere interne Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durch mit dem Ziel, die Mikroverunreinigungen mit einer bedarfsgerechte Ozondosierung zu eliminieren und den Ozonverbrauch zu reduzieren. Die Dosierung mit BEAR verhinderte Ozonüberschüsse und ergab Ressourceneinsparungen von ca. 20%. Darauf aufbauend, wurde das LOD-Mehrkammergeintragsverfahren realisiert. Dieses vermindert den Ozonverbrauch nochmals um 20%. Zudem führt die reduzierte Zugabe pro Kammer zu deutlich tieferen Ozonkonzentrationen im Reaktor, wodurch das Risiko der Bromatbildung minimiert wird.

Nathalie Hubaux; Max Schachtler\*, ARA Neugut

### RÉSUMÉ

#### PROCÉDÉ LOD – OXYDATION EN PLUSIEURS ÉTAPES: RÉDUIRE LA CONSOMMATION D'OZONE EN MAINTENANT L'ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS

Depuis la mise en service de l'ozonation en mars 2014, la STEP de Neugut ZH élimine les micropolluants (MP) avec un abattement de plus de 80%. En tant que première STEP de Suisse avec une 4<sup>e</sup> étape de traitement, Neugut a entrepris dès le départ de nombreux travaux visant à exploiter l'ozonation de manière optimisée et précise. En collaboration avec l'Eawag, Neugut a tout d'abord installé des sondes, dites «sondes UV» (UltraViolet), mesurant en ligne l'absorbance de l'eau et qui s'avèrent être prometteuses pour le contrôle en ligne de la production d'ozone. Neugut a résolu les problèmes initiaux liés au drift grâce aux modifications de l'installation des sondes UV et a ensuite mis sur pied un schéma à suivre permettant d'assurer et de contrôler en continu la qualité des mesures UV. Sur la base de ces mesures stables et fiables fournies par les sondes UV, Neugut a développé la stratégie BEAR qui permet de doser à tout moment l'exacte quantité d'ozone à appliquer afin d'atteindre une élimination de  $82 \pm 2\%$  des MP, ni plus ni moins (BEAR: *demand-Based dosis, Elimination, Analysis and monitoRing*). Avec l'algorithme BEAR, les excès d'ozone sont ainsi évités, le taux d'abattement des MP est stable et maîtrisé et la consommation d'ozone réduite de près de 20%. De plus, de par la

### EINLEITUNG

Im März 2014 wurde die erste grosstechnische Anlage der Schweiz zur Behandlung von Mikroverunreinigungen (MV) im gereinigten Abwasser in Betrieb genommen. Die ARA Neugut entfernt seitdem die MV mit einer Eliminationsleistung von >80% einwandfrei. Damit erfüllt die ARA Neugut in Dübendorf ZH die neuen Anforderungen der am 1. Januar 2016 in Kraft getretenen Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201; [1]) seit bald 3 Jahren. Die Ozonung eliminiert nicht nur die MV, sie reduziert auch die Ökotoxizität des gereinigten Wassers um ca. 80% [2] und zerstört Bakterien, die teilweise antibiotikaresistent sind [3].

Die Betriebserfahrungen der ARA Neugut mit Ozon (O<sub>3</sub>) sind sehr positiv. Der Betrieb ist stabil und sicher, der Personalaufwand gering und Störfälle sind bisher keine aufgetreten. Die Ozonung wurde optimal geplant und ausgeführt. Dies zeigte sich darin, dass keine verfahrenstechnischen Nachbesserungen veranlasst werden mussten.

Als erste Schweizer Abwasserreinigungsanlage mit einer Reinigungsstufe zur Entfernung von MV führte die ARA Neugut verschiedene Forschungsprojekte durch, um Erfahrungen und praktisches Know-how mit dieser Verfahrensstufe für interne

\* Kontakt: max.schachtler@neugut.ch

Optimierungen und für andere ARA, die eine Ozonung planen, zu generieren. Während des ersten Betriebsjahrs wurde zusammen mit der Eawag eine UV-Sonde (UV: Ultraviolett) getestet, die die Absorbanz, d. h. die Abschwächung des UV-Lichts mit einer Wellenlänge von 254 nm beim Durchgang durchs Wasser misst, um auf diese Weise den Ozoneintrag zu steuern [4–6].

Nach Abschluss des ersten Forschungsjahres installierte die ARA Neugut zusätzliche UV-Sonden (z. T. andere Fabrikate). Zudem wurden Probleme, wie Drift, Verschmutzung und Instabilität der Messwerte der UV-Sonden, angegangen, wobei die Installation komplett überarbeitet wurde. Seit der Neuinstallation und der Einführung einer automatischen Sondenreinigung mit Phosphorsäure sind die UV-Messungen zuverlässig [7]. Das ebenfalls entwickelte Qualitätssicherungskonzept mit parallel betriebenen Sonden gewährleistet die für die Steuerung/Regelung der Ozonung notwendige Genauigkeit der Absorbanzmessung von max. 0,1 l/m, d. h. von kleiner 1% (ein *Aqua & Gas*-Artikel hierzu folgt im Jahr 2017).

Mit den zuverlässigen UV-Messwerten im Zu- und Ablauf des Ozonreaktors konnte auf der ARA Neugut der BEAR-Algorithmus in die Praxis eingeführt werden (BEAR steht für: Bedarfsgerechte Dosis, Elimination, Analytik und MonitoRing) [7, 8]. Der BEAR-Algorithmus erlaubt, durch die bedarfsgerechte Ozonzugabe die Elimination der Mikroverunreinigungen (EMV) auf einem konstanten Wert zu halten. Zudem konnte dabei die Korrelation des online gemessenen UV-Signals mit der im Labor bestimmten Eliminationsleistung für die vom BAFU festgelegten 12 Leitsubstanzen<sup>1</sup> nachgewiesen werden [7, 8]. Ein wesentlicher Vorteil des BEAR-Algorithmus ist folglich, dass sich damit die EMV durch den Betreiber online überwachen lässt. Die externen Laboranalysen dienen der zusätzlichen Qualitätssicherung, der Ausweisung des in der GSchV geforderten Reinigungseffekts für die Vollzugsbehörde und zur internen Kontrolle der UV-Messwerte.

Eine zentrale Fragestellung bei Planung und Bau einer Ozonungsanlage ist die

Konzeptionierung des Ozoneintrags in den Reaktor. Aus den Resultaten verschiedener Pilotversuche mit Ozon in der Schweiz konnten bisher keine klaren Schlussfolgerungen diesbezüglich gezogen werden [10, 11]. Für erfolgreiche zukünftige Planungen, Dimensionierungen und Bau von Ozonreaktoren in ARA sind jedoch folgende Fragen von zentraler Bedeutung:

- Ist ein mehrstufiger Ozoneintrag von Vorteil bezüglich Betriebssicherheit und Ozonverbrauch verglichen mit einem einstufigen Ozoneintrag?
- Kann die Eintragungseffizienz gesteigert werden, indem mehr Diffusoren beaufschlagt werden?

Diese Fragen werden im vorliegenden Artikel, basierend auf den Betriebserfahrungen der ARA Neugut der letzten Jahre und den intern durchgeführten Entwicklungs- und angewandten Forschungsprojekten, beantwortet.

## DIE OZONUNG IN DER ARA NEUGUT

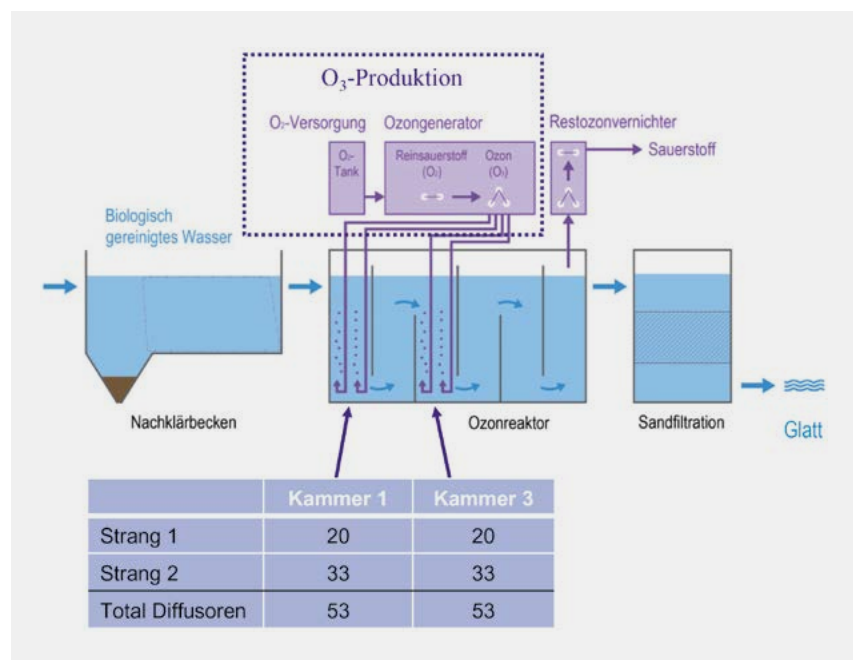
### VERFAHREN UND AUSLEGUNG

Die Reinigungskapazität der ARA Neugut ist auf 150 000 Einwohnerwerte (EW)

ausgelegt; die aktuelle Belastung beträgt 105 000 EW. Die Biologiestufe besteht aus einer Nitrifikation, Denitrifikation und einer biologischen Phosphorelimination. Das biologisch gereinigte und geklärte Wasser durchfließt die sechs Kammern des Ozonreaktors (*plug flow*), wo die MV oxidiert werden (*Fig. 1*). Die entstehenden Oxidationsprodukte werden während der anschließenden Sandfiltration biologisch abgebaut.

Der Ozonreaktor wurde im bestehenden Gebäude zwischen dem Nachklärung und der Sandfiltration integriert und ist zur Behandlung der gesamten Wassermenge ausgelegt (Vollstrom,  $Q_{\max} = 6601/s$ ,  $Q_{\min} = 701/s$ ,  $Q_{\text{mittel}} = 2001/s$ ;  $Q_{\text{Tag}} = 13\,000$  bis  $57\,000\text{ m}^3/\text{Tag}$ ). Der  $530\text{ m}^3$  grosse Reaktor ist 6 m tief, um einen optimalen Kontakt zwischen Ozon und Wasser zu erreichen.

Das Ozon wird aus vor Ort gelagertem, flüssigem Reinsauerstoff in zwei Ozongeneratoren mit je einer Kapazität von  $5,5\text{ kg O}_3/h$  produziert. Der Inhalt des Reinsauerstofftanks beträgt  $30\text{ m}^3$  und reicht für eine Betriebszeit von mehr als einem Monat. Das mit den Ozongeneratoren erzeugte Ozon wird als Gasgemisch, das Flux genannt wird und je nach Be-



*Fig. 1* Schema der Ozonung der ARA Neugut. Das biologisch gereinigte Wasser durchfließt die 6 Kammern des 6 m tiefen Reaktors ( $530\text{ m}^3$ ). Das Ozon wird im Gegenstrom zum Wasserfluss in Kammer 1 und/oder 3 eingetragen. Pro Kammer sind die Diffusoren in 2 Eintragsrampen mit 20 und 33 Diffusoren angeordnet.

*Schéma du procédé d'ozonation à la STEP de Neugut. L'eau traitée par la biologie traverse les 6 chambres du réacteur d'ozonation (6 m profond,  $530\text{ m}^3$ ). L'ozone est ajouté à contre-courant en bas de chambre 1 et/ou 3 par le biais de diffuseurs répartis en 2 lignes par chambre de 20 et 33 diffuseurs.*

<sup>1</sup> Amisulprid, Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Clarithromycin, Citalopram, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Methylbenzotriazol, Metoprolol, Venlafaxin [9]



Fig. 2 Kammer 3 des Ozonreaktors der ARA Neugut; Ozoneintrag mit Keramikdiffusoren  
 Chambre 3 du réacteur d'ozonation de la STEP de Neugut et diffuseurs poreux en céramiques à travers lesquels l'ozone est ajouté.

triebsfall Anteile von 2-12% O<sub>3</sub> und 88-98% O<sub>2</sub> aufweist, in den Ozonreaktor eingetragen.

Der Ozoneintrag ins Wasser erfolgt gegenströmig mittels Keramikdiffusoren. Das Ozon kann in die Kammern 1 oder 3 dosiert werden, wobei jede Kammer zwei Eintragsstränge mit je 20 und 33 Keramikdiffusoren aufweist (Fig. 1 und 2). Der Ozonreaktor ist gasdicht geschlossen und das Off-Gas, das Sauerstoff und eine sehr geringe Restozonkonzentration (ROK) enthält (<1 bis 3 ppm), wird abgesaugt und im Restozonvernichter behandelt.

**BEDARFSGERECHTE OZONPRODUKTION**

Mit BEAR werden Ozonproduktion und -eintrag vorgegeben und kontrolliert, sodass die angestrebte Abbauleistung, z.B. 82% EMV, erzielt wird. Der BEAR-Algorithmus bezieht die Reaktionen des Ozons mit den im Wasser gelösten Stoffen in die Berechnungen ein. So wird der Ozonbedarf kontinuierlich angepasst und die EMV konstant gehalten [7]. Diese Innovation führte zu einer Reduktion des Ozonverbrauchs um 20%. Gleichzeitig

wird eine Ozonüberdosierung verhindert und somit vermieden, dass zusätzliche Oxidationsnebenprodukte wie Bromat

gebildet werden. Bromat ist ein potenziell krebserregender Stoff, der sich aus Bromid durch Oxidation mit Ozon ab einer bestimmte Ozonkonzentration bilden kann. Als Messgrößen verwendet der BEAR-Algorithmus die UV-Absorbanz im Zu- und Ablauf des Ozonreaktors (Fig. 3).

Mit dem BEAR-Algorithmus wird ARA-Betreibern ein zuverlässiges Instrument an die Hand gegeben, das ihnen erlaubt, die EMV konstant zu halten und zugleich kontinuierlich und zuverlässig zu überwachen. Damit einher geht eine verbesserte Wirtschaftlichkeit in den Bereichen Ozonproduktion, Wärmeabfuhr, Laboranalysen und Controlling. Ausserdem benötigt der BEAR-Algorithmus kein spezielles Trockenwetter- oder Regenwetterunterprogramm. Er ist auch so strukturiert, dass er weitere Messwerte, wie DOC, Nitrit, Redox, ROK, integrieren kann. Die Modularität von BEAR ermöglicht eine einfache Implementierung in anderen Kläranlagen.

**LOD-KONZEPT**

Der Ozonreaktor in der ARA Neugut ist mit zwei Eintragskammern ausgerüstet. Im Herbst 2014 wurde zu Testzwecken das Ozon in Kammer 3 statt wie üblich in Kammer 1 zudosiert. Das Ergebnis zeigte, dass bei Regenwetter eine Aufenthaltszeit in Anwesenheit von Ozon von 8 min reicht, um die angestrebte EMV

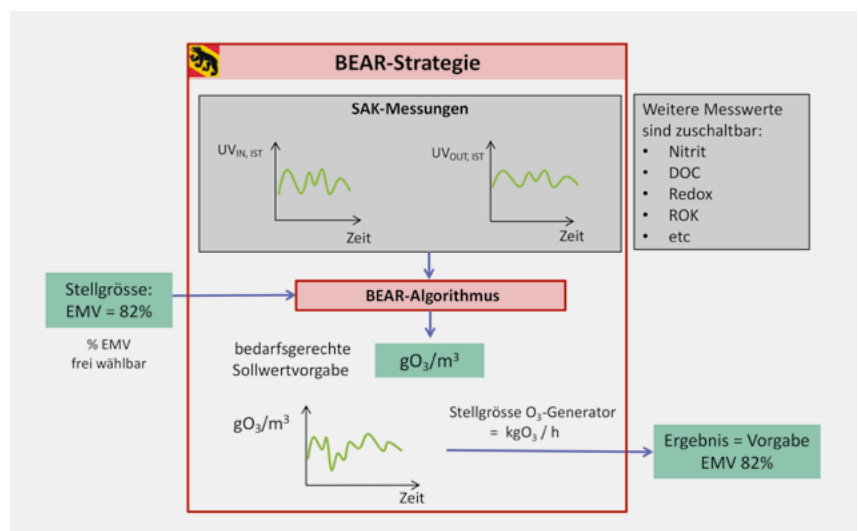


Fig. 3 Grundprinzip des in der ARA Neugut verwendeten BEAR-Algorithmus. Die Stellgröße ist die gewünschte EMV. BEAR berechnet die benötigte Ozonkonzentration, um die vorgegebene EMV zu erreichen ohne Ozonüberdosierung.

Principe de l'algorithme BEAR développé par Neugut. La consigne est une élimination des MP de 82%. BEAR calcule la quantité d'ozone à produire afin d'atteindre le taux d'élimination désiré en évitant les sur-dosages d'ozone.

zu erzielen, und das mit einer Dosis von  $0,6 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  [12].

Beruhend auf dieser Erfahrung wurde im Herbst 2015 entschieden, nach der Implementierung der bedarfsgerechten BEAR-Strategie das Ozon in beide Kammern gleichzeitig einzutragen. Dieser mehrstufige Ozoneintrag erhielt den Namen LOD (LOD steht für: *Low Ozone Dosage*), weil dadurch der spezifische Ozonverbrauch massiv sank ( $\sim 20\%$ ), wohingegen die EMV konstant blieb.

Wird das gesamte zugeführte Ozon hälftig auf die zwei Kammern aufgeteilt, so führt das zu einer Halbierung der lokalen Ozonkonzentration im Reaktor (Fig. 4). Das Verhältnis des Ozoneintrages in Kammer 1 und 3 kann beliebig gewählt werden. Für eine gesamte notwendige Ozonkonzentration von  $2,0 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  ergibt dies beispielsweise eine Ozonkonzentration von je  $1,0 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  pro Kammer oder einer Ozondosis von je  $0,20 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  bei  $5 \text{ mg DOC/l}$ . Zum Vergleich: Im Einkammereintragsverfahren beträgt die Ozonkonzentration  $2,4 \text{ g O}_3/\text{m}^3$  respektive die Dosis  $0,48 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ , um dieselbe EMV zu erzielen.

Die Verminderung der lokalen Ozonkonzentration ist von Vorteil, denn so kann die unerwünschte Bromatbildung verhindert werden. Eine Studie auf der ARA Neugut zeigte, dass die Bromatbildung ab einer Ozondosis von  $0,5 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  einsetzt und mit steigender Ozondosis zunimmt, sofern eine entsprechend hohe Menge Bromid vorhanden ist (Fig. 5; [13]). Durch die Halbierung und gleichzeitige Verringerung der Ozondosis von  $0,48 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  auf  $0,2 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  pro Eintragskammer liegt die Ozondosis weit unterhalb des Schwellenwerts von  $0,50 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ , ab dem sich Bromat bildet.

Die deutliche Verminderung des Ozonbedarfs im LOD-Betrieb sowie die bessere Ausnützung des im Wasser gelösten Ozons für die Elimination der MV lassen sich in Figur 6 gut erkennen. Der Ozonbedarf verringerte sich um  $20\%$  bei konstanter EMV. Ausserdem sank die ROK im Offgas von  $3 \text{ ppm}$  auf  $1 \text{ ppm}$ . Der empirische Nachweis der Reduktion des Ozonverbrauchs bei gleichbleibender EMV mittels LOD-Konzept führte zur Frage: Was bewirkt den verringerten Ozonbedarf beim LOD-Betrieb - die mehrstufige Oxidation und/oder die Anzahl beaufschlagter Diffusoren? Ein Teil der  $20\%$ igen Einsparung konnte aus den

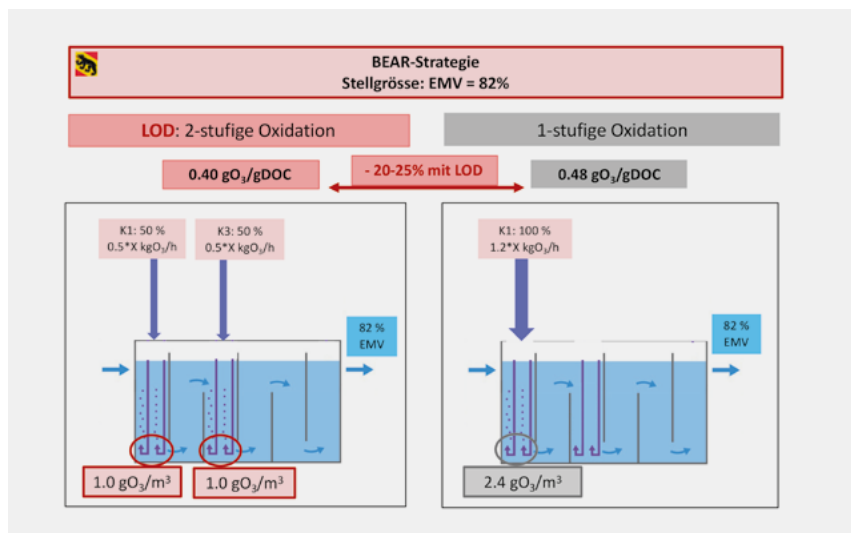


Fig. 4 LOD-Mehrkammereintragsverfahren in der ARA Neugut. Mit LOD sinkt der Bedarf an Ozon um  $20\%$  gegenüber dem Einkammereintragsverfahren für eine EMV von  $82\%$ . Zudem führt es zu Ozonkonzentrationen in Kammern 1 und 3, die  $40\%$  tiefer sind als mit einstufigem Eintrag (Aufteilung LOD-Eintrag  $50:50$ ; die Aufteilung kann beliebig gewählt werden). Le procédé LOD avec ajout successif d'ozone en chambre 1 et 3. Avec LOD la concentration d'ozone nécessaire pour une élimination de  $82\%$  des MP est réduite de  $20\%$  comparé à une addition d'ozone en une étape. L'ajout par étape permet de réduire localement la concentration d'ozone de  $40\%$  (avec  $50\%$  en chambre 1 et  $50\%$  en chambre 3; le ratio d'ajout d'ozone entre les 2 chambres est flexible).

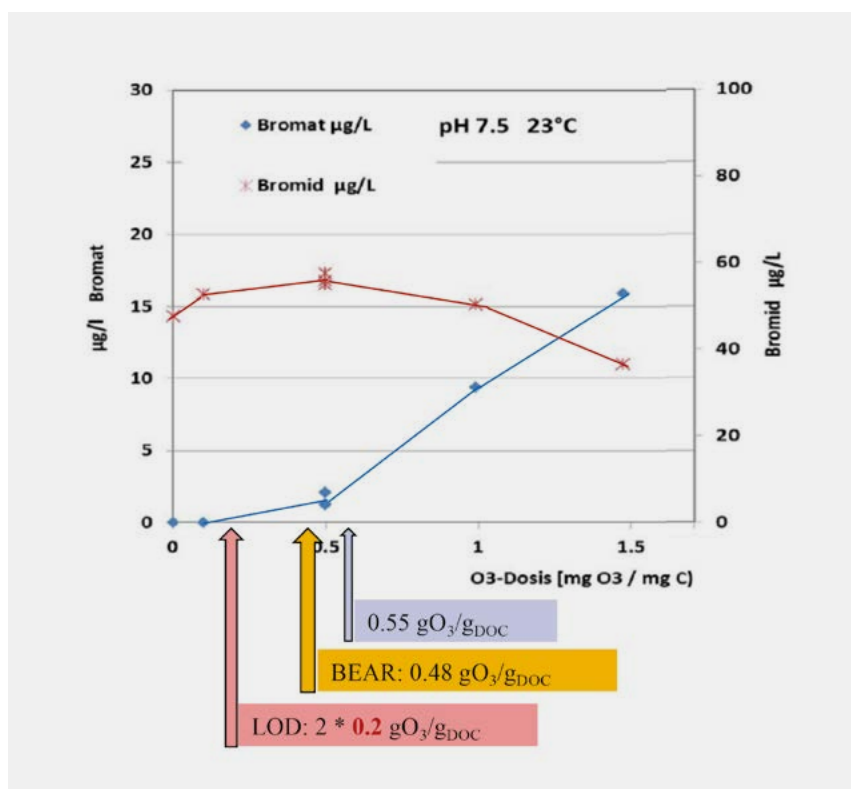


Fig. 5 Bromatbildung in Abhängigkeit von der Ozondosierung (Bromid-Konzentrationen im Zulauf der Ozonung:  $40-60 \mu\text{g/l}$ ). Mit BEAR und LOD beträgt die Ozonkonzentration im Reaktor bei einer Dosierung von  $0,2 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$  fast ein Drittel der ursprünglich vorgesehenen Konzentration [adaptiert nach 13].

Formation de bromate en fonction de la dose d'ozone (concentration de bromure en entrée d'ozonation de  $40-60 \mu\text{g/l}$ ). Avec BEAR et LOD la concentration d'ozone dans le réacteur est de  $0,2 \text{ g O}_3/\text{g DOC}$ , soit près d'un tiers de la concentration initialement prévue [adapté de 13].

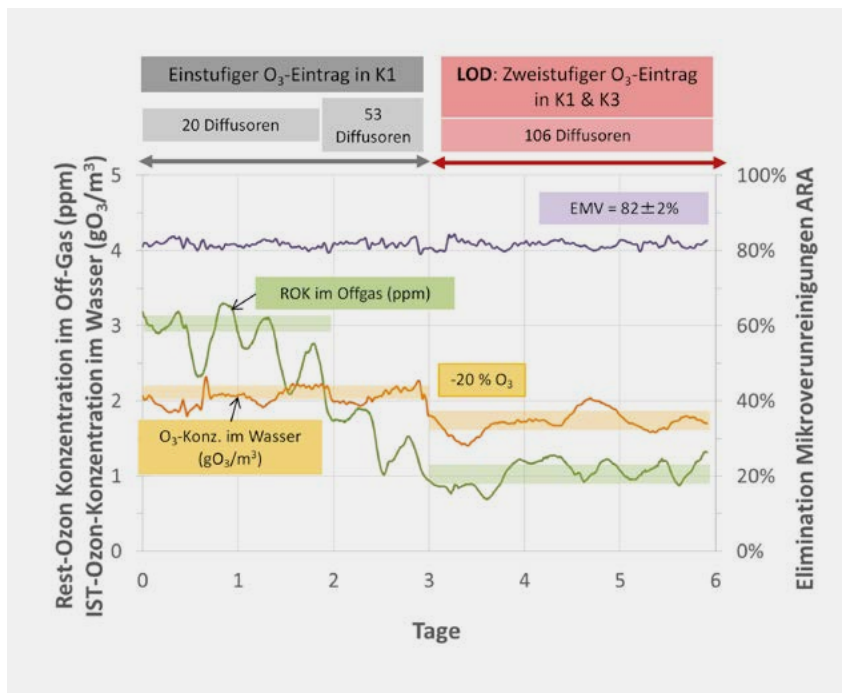


Fig. 6 Verringerung der notwendigen Ozonkonzentration  $g\ O_3/m^3$  um 20% und der Restozonkonzentration im Offgas um 65% durch das LOD-Mehrkammerverfahren (Trockenwetter; Stellgröße BEAR: EMV = 82%; Aufteilung LOD-Eintrag 50:50, mit insgesamt 106 Diffusoren; Einkammereintrag mit 20 bis 53 Diffusoren.

Réduction de la concentration d'ozone de ~20% et de la concentration en ozone résiduel (ROK) dans l'offgas avec LOD (temps sec, consigne BEAR: EMP = 82%; LOD: ajout d'ozone 50:50 en chambre 1 et 3 par 106 diffuseurs; avec ajout d'ozone simple: 100% ozone en chambre 1 par 20 et 53 diffuseurs).

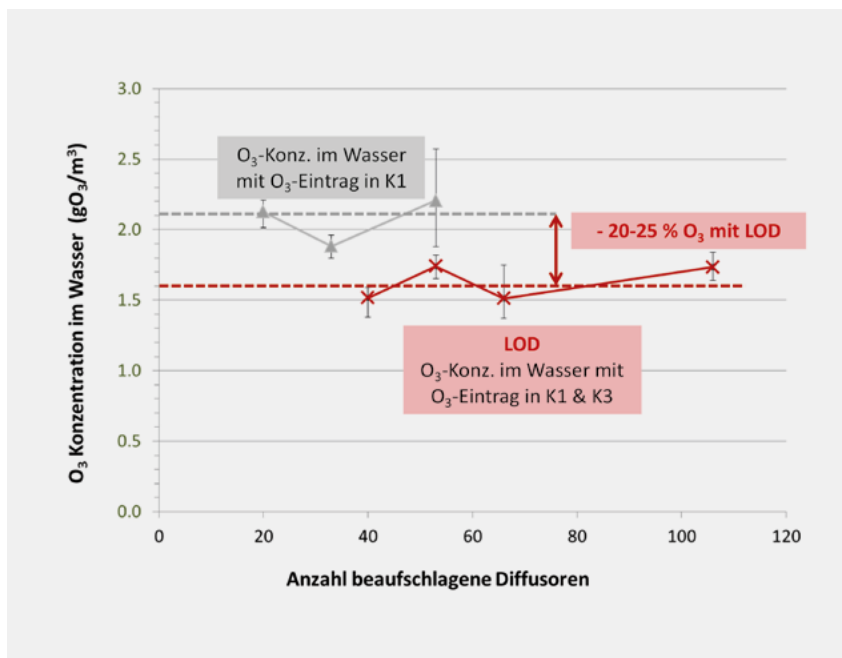


Fig. 7 Ozonkonzentrationen im Wasser bei ein- und zweistufigem Ozoneintrag (Trockenwetter; Stellgröße BEAR: EMV = 82%; Aufteilung LOD-Eintrag 50:50; Flux = 20–21  $kg\ [O_2+O_3]/h$ ) Réduction de la concentration d'ozone de 20–25% avec l'ajout en deux étapes de LOD comparé à l'ajout simple en chambre 1 (temps sec; consigne BEAR: EMP = 82%; LOD: ajout d'ozone 50:50 en chambre 1 et 3; quantité d'air totale injectée  $[O_2+O_3] = 20-21\ kg/h$ )

Daten direkt ermittelt werden: Der ROK-Wert sinkt um 65%. Das entspricht einer

Einsparung von 3–5%. Somit verbleiben aber immer noch Einsparungen von 15–

17%, die anderweitig verursacht werden. Da die Ozonchemie komplex ist und die Oxidationsprozesse von diversen Faktoren abhängt, ist es schwierig, die in der grosstechnischen Anlage beobachteten Einsparungen vollständig zu erklären. Eine mögliche Ursache könnte die durch den zweistufigen Eintrag veränderte Reaktionskinetik sein: Durch die erste Ozonzugabe in Kammer 1 werden zuerst die Moleküle oxidiert, die schnell mit Ozon reagieren (z.B. gewisse Spurenstoffe oder Nitrit). Allerdings würde bei Anwesenheit von Nitrit die zugegebene Ozonmenge ansteigen. Ausserdem weist das in der ARA Neugut behandelte Abwasser in der Regel sehr niedrige Nitritkonzentrationen auf, was gegen diese Begründung spricht.

Eine andere Erklärung könnte sein: Die organischen Stoffe, die schnell mit Ozon reagieren, werden in Kammer 1 oxidiert. Bis zum zweiten Eintrag in Kammer 3 ist das in Kammer 1 eingetragene Ozon mehr oder weniger vollständig verbraucht. Bei der zweiten Ozonzugabe könnten daher gewisse Prozesse, z.B. die Umwandlung von Ozon in Hydroxyl-Radikale, welche die langsamer reagierenden Stoffe oxidieren, vielleicht effizienter ablaufen. Eine abschliessende Erklärung für die empirisch ermittelten Ergebnisse zu finden, ist im Rahmen der angewandten Forschung auf der ARA Neugut nicht geplant.

### EINTRAGSSYSTEM UND ANZAHL DIFFUSOREN

Mit einer ausführlichen Untersuchungsreihe wurde geprüft, ob und inwieweit die Anzahl Diffusoren zur Effizienzsteigerung beiträgt (Tab. 1). Die Auswertung der Messreihen bestätigte das Ergebnis des LOD-Mehrkammereintragsverfahrens. In allen getesteten Fällen verminderte sich beim LOD-Betrieb die Ozonkonzentration im Wasser um 20–25%. Der Ozonverbrauch pro Eintragungssystem bei veränderter Anzahl Diffusoren ist Schwankungen von unter +/- 10% unterworfen, ohne dass sich eine klare Korrelation mit der Anzahl beaufschlagter Diffusoren erkennen lässt (Fig. 7).

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluss des Eintragsverfahrens auf die Ozoneintragseffizienz bei unterschiedlicher Anzahl der beaufschlagten Diffusoren untersucht (Fig. 8). Eine höhere Anzahl an Diffusoren steigert sowohl im Einkammereintragsverfahren als auch im LOD-

Anzahl beaufschlagene Diffusoren	Einstufiger O <sub>3</sub> -Eintrag				LOD, zweistufiger O <sub>3</sub> -Eintrag			
	K1	20	33	20 + 33	20	20	33	20 + 33
	K2	-	-	-	20	33	33	20 + 33
Total	20	33	53	40	53	66	106	

Tab. 1 Überblick über die Untersuchungsreihe mit unterschiedlichen Ozoneintragsarten (Trockenwetter; Stellgröße BEAR: EMV = 82%; Aufteilung LOD-Eintrag 50:50; Flux = 20-21 kg [O<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>]/h).

Vue d'ensemble de la série d'expériences effectuées en variant la manière d'ajouter l'ozone dans le réacteur (temps sec; consigne BEAR: EMP = 82%; LOD: ajout d'ozone 50:50 en chambre 1 et 3; quantité d'air totale injectée [O<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>] = 20-21 kg/h).

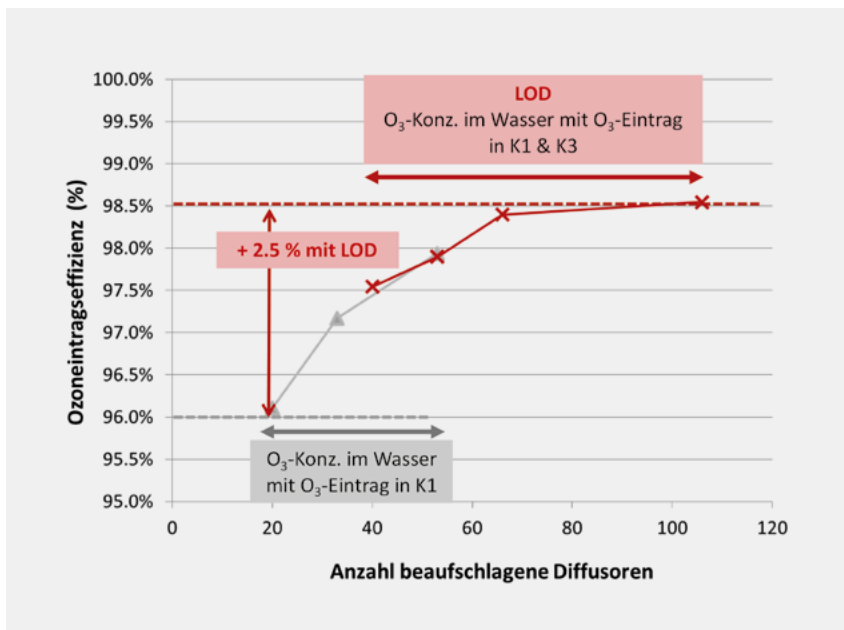


Fig. 8 Ozoneintragseffizienz mit und ohne LOD in Abhängigkeit der Anzahl beaufschlagter Diffusoren (Trockenwetter; bedarfsgerechte Ozondosierung mit BEAR-Strategie: EMV = 82%; Aufteilung LOD-Eintrag 50:50; Flux = 20-21 kg (O<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>)/h)

Taux d'utilisation de l'ozone dans le réacteur avec et sans LOD en fonction du nombre de diffuseurs actifs (temps sec; consigne BEAR: EMP = 82%; LOD: ajout d'ozone 50:50 en chambre 1 et 3; quantité d'air totale injectée (O<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>) = 20-21 kg/h)

Vergleichsparameter	Direkter Einfluss	Messbares Ergebnis
<b>LOD-Mehrkammereintrag</b>	Erhöhte Oxidationsleistung	Reduktion O <sub>3</sub> -Verbrauch 20-25%
<b>Steigende Anzahl Diffusoren</b>	Kleinere Gasblasen Erhöhte Anzahl an Gasblasen	Bessere Ozoneintragseffizienz 2-5%

Tab. 2 Zusammenfassung der Merkmale des LOD-Mehrkammereintragsverfahrens und der Anzahl beaufschlagter Diffusoren

Récapitulatif de l'influence de l'ajout de l'ozone par étape et du nombre de diffuseurs actifs

Betrieb	gO <sub>3</sub> /gDOC	Steuerung / Regelung O <sub>3</sub> -Produktion	O <sub>3</sub> -Eintrag
<b>Herbst 2014</b>	<b>0,55</b>	Proportionale Steuerung/Regelung*	Einkammereintrag 20-53 Diffusoren
<b>Sommer 2015</b>	<b>0,48</b>	<b>BEAR</b> -Algorithmus	Einkammereintrag 20-53 Diffusoren
<b>Herbst 2015</b>	<b>2 x 0,20</b>	<b>BEAR</b> -Algorithmus	<b>LOD-Mehrkammerkonzept</b> 40-106 Diffusoren

\*Q-proportional, UV<sub>IN</sub>-proportional und ΔUV-proportional.

Tab. 3 Reduktion der Ozondosierung in der ARA Neugut dank der Innovationen BEAR und LOD  
Réduction de la consommation d'ozone avec les innovations BEAR et LOD de la STEP de Neugut

Mehrkammereintragsverfahren die Eintragseffizienz deutlich von 96 auf 98,5%. Die Anzahl beaufschlagter Diffusoren ist entscheidend für die Menge der Gasblasen und deren Grösse. Mit mehr Diffusoren steigt die Menge der Gasblasen. Zugleich sind sie kleiner, sodass sich mehr Ozon im Wasser löst.

Das LOD-Mehrkammereintragsverfahren und eine hohe Anzahl Diffusoren ergeben zusammen einen ressourcenoptimierten Ozonbetrieb (Tab. 2). Für die ARA Neugut wurde herausgefunden, dass bei Trockenwetter 66 Diffusoren für einen effizienten Ozoneintrag ausreichend sind. Bei Regenwetter sind die restlichen 40 Diffusoren dazuzuschalten, damit die Eintragseffizienz stets hoch bleibt.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der mehrstufige LOD-Ozoneintrag weist gegenüber dem einfachen Eintrag zahlreiche Vorteile auf. Der Ozonverbrauch konnte bei gleichbleibender Abbauleistung um 20-25% gesenkt werden. Die ROK im Offgas wurde sogar um 65% reduziert und das Risiko der Bildung von Oxidationsnebenprodukten konnte minimiert werden.

In Tabelle 3 sind die entscheidenden Innovationen bei der Ozonung der ARA Neugut seit 2014 zusammengefasst. Gegenüber der Betriebsart, die als Ausgangssituation im Herbst 2014 vorlag, ist eine Energie- und Ressourceneinsparung von rund einem Drittel erreicht worden. Die zwei wesentlichen Gründe dafür sind der im Aqua & Gas 5/2016 beschriebene BEAR-Algorithmus zur Steuerung und Regelung des Ozoneintrags [7] und das hier vorgestellte LOD-Mehrkammereintragsverfahren. Eine erhöhte Anzahl an Diffusoren, d. h. eine grössere Flächenbelegung, steigert die Eintragseffizienz zusätzlich. Die Ozonung erreichte dadurch auf der ARA Neugut einen Wirkungsgrad von mehr als 98%, was einer absoluten Steigerung von 2,5% gegenüber dem einstufigen Eintrag mit 20 Diffusoren bedeutet.

Die Ozonung der ARA Neugut weist Betriebskosten für Reinsauerstoff und Strom von unter 2 Franken pro natürlichem Einwohner und Jahr auf. Auch wenn die Aufwände für Analytik, Personal und die Jahresrevision hinzugerechnet werden, so liegen die Kosten immer noch unter 3 Franken.

**DANK**

Ein grosser Dank geht an das Personal der ARA Neugut für den engagierten Einsatz und die wertvollen und zahlreichen Ideen bei allen Entwicklungen der Ozonung. Wir möchten auch *Christian Götz* von der Envilab AG für das Gegenlesen und Kommentieren des Artikels danken.

**EMPFEHLUNGEN**

Um eine ressourcen- und energieeffizienten Ozonanlage zu planen und zu realisieren, ist es erforderlich, das Ozonzehrverhalten des Abwassers einzubeziehen. Zudem sollten bei der Dimensionierung verschiedene Lastfälle, darunter auch aussergewöhnliche Lastfälle berücksichtigt werden. Es ist ferner von Vorteil, das Einzugsgebiet zu kennen und auch eventuell auftretende Problemstoffe nicht ausser Acht zu lassen. Die Auslegung der Ozonung und die Vorhersage des Ozonbedarfs stossen jedoch an Grenzen, die aufzuzeigen sind. Eine geschickte Kombination der Faktoren Ozongenerator, Ozon-eintragssystem, Reaktorvolumen und Reaktorausgestaltung ermöglicht eine optimierte, kosteneffiziente Ozonung, die alle Anforderungen an die EMV erfüllt.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] *GSchV (2016): Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998, SR 814.201 (Stand 02.02.2016)*
- [2] *Kienle, C. (2015): Ökotoxikologische Untersuchungen zur Effizienz der biologischen Nachbehandlungen. VSA PEAK Veranstaltung, Eawag, Juni 2015*
- [3] *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*
- [4] *Wittmer, A.; Heisele, A.; McArdell, C. S.; Böhler, M.; Longrée, P.; Siegrist, H. (2015): Decreased UV absorbance as an indicator of micropollutant removal efficiency in wastewater treated with ozone. Water Sci. Technol. 71: 980–985*
- [5] *Fleiner, J.; Wittmer, A.; Böhler, M.; McArdell, C.S.; Teichler, R.; Bourgin, M.; Schachtler, M.; Siegrist,*

- H. (2015): Ozonung ARA Neugut, Dübendorf – Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung. Schlussbericht BAFU, Dezember 2015*
- [6] *Wittmer, A.; Ramisberger, M.; Böhler, M.; Heisele, A.; Siegrist, H.; Hollender, J.; McArdell, C. S.; Longrée, P. (2013): UV-Messung zur Regelung der Ozondosis und Überwachung der Reinigungsleistung. Schlussbericht BAFU, August 2013*
- [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] *Schachtler, M.; Hubaux, N. (2016): ARA Neugut: Ozonung, Praxis Erfahrungen. VSA Fortbildungskurs Mikroverunreinigung vom 1.–3. Juni 2016 in Emmetten*
- [9] *Götz, C.; Otto, J.; Singer, H. (2015): Überprüfung des Reinigungseffekts – Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe. Aqua & Gas 2/2015: 34–40*
- [10] *Ville de Lausanne (2011): Traitement des micropolluants dans les eaux usées. Rapport final sur les essais pilotes à la Step de Vidy*
- [11] *Abegglen, C. et al. (2009): Ozonung von gereinigtem Abwasser – Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf. Eawag, AWEL, BAFU, BMG, Hunziker Betatech*
- [12] *Schachtler, M. (2014): Ozonung in der Abwasserreinigung – ARA Neugut/Eawag – Realisierung und Praxis Ozonung. Fachtagung ARA Personal Kanton Zürich*
- [13] *Böhler, M.; Wittmer, A.; Heisele, A.; Wohlhauser, A.; Salhi, L.; von Gunten, U.; McArdell, C.; Longrée, P.; Beck, P.; Siegrist, H. (2013): Bericht-erstattung – Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der ARA Neugut. BAFU, Bern*

**> SUITE DU RÉSUMÉ**

corrélacion qui réside entre l'élimination des MP et la différence de l'absorbance de l'eau en entrée et en sortie du réacteur d'ozone, Neugut a démontré la faisabilité d'utiliser dans la pratique cette mesure comme indicateur de performance précis. Neugut s'est ensuite penchée sur la question de l'influence de la diffusion de l'ozone dans le réacteur. Différentes campagnes de mesure ont permis de conclure les points suivants: i) Une oxydation en deux étapes permet de réduire la consommation d'ozone de 20% environ, comparée à une oxydation en une étape. Ce procédé de diffusion de l'ozone en plusieurs étapes a été nommé LOD (*Low Ozone Dosage*). ii) Le nombre de diffuseurs actifs (20-106) n'impacte pas de manière significative la consommation d'ozone. Néanmoins, lorsque l'ozone est ajouté par 20 diffuseurs, l'utilisation de l'ozone dans le réacteur est plus faible (96%) que lorsque la diffusion se fait par 53 diffuseurs ou plus (98,5%).

Un autre avantage du procédé LOD est qu'il permet le maintien de concentrations d'ozone très faibles dans le réacteur d'ozone de par la division de l'ajout d'ozone. Ceci joue un rôle important quant à la formation indésirable de bromate qui augmente de manière quasi linéaire avec une dose d'ozone croissante, et ce, à partir d'une certaine dose d'ozone.

Les innovations de Neugut BEAR et LOD ont permis de réduire de presque un tiers la consommation d'ozone initialement déterminée (de 0,55 à 0,4 g O<sub>3</sub>/g DOC). De par sa modularité, BEAR peut aisément être adapté à d'autres STEP concernées. Une oxydation en plusieurs étapes est également à favoriser à condition de laisser un temps de réaction suffisant après le dernier ajout d'ozone afin d'éviter les pertes d'ozone dans l'effluent (8 minutes à Neugut).