

BEAR: INNOVATIVE REGELSTRATEGIE DER OZONUNG

UV-MESSTECHNIK FÜR REGELUNG UND ÜBERWACHUNG DER ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN

Die ARA Neugut ist die erste Abwasserreinigungsanlage (ARA) der Schweiz, die Mikroverunreinigungen mittels Ozon mit einer Eliminationsleistung von $82 \pm 2\%$ seit zwei Jahren zuverlässig entfernt. Um einen stabilen und optimierten Betrieb zu gewährleisten, wurde eine neue Strategie entwickelt und erfolgreich implementiert, welche sowohl Elemente einer Steuerung als auch einer Regelung umfasst (genannt BEAR). Diese BEAR-Strategie erlaubt zudem eine kontinuierliche Überwachung der Eliminationsleistung.

Max Schachtler*, Nathalie Hubaux, ARA Neugut

RÉSUMÉ

ELIMINATION STABLE DES MICROPOLLUANTS AVEC BEAR – STRATÉGIE DE CONTRÔLE DE L'OZONATION INNOVATRICE AVEC DES SONDÉS UV

La STEP de Neugut est la première STEP de Suisse qui élimine les micropolluants (MP) de manière stable et fiable avec une efficacité de traitement de $82 \pm 2\%$ grâce à l'ozonation mise en service il y a deux ans. L'exploitation de l'ozonation est entièrement automatisée, sûre, simple et ne requiert que peu de maintenance.

L'efficacité du traitement et donc le respect de la législation, soit une élimination de plus de 80% sur l'ensemble de la STEP, dépend directement de la quantité d'ozone injectée dans le réacteur d'ozonation. La production d'ozone peut être contrôlée de manière plus ou moins simple. L'expérience à Neugut montre qu'un contrôle simple permet certes le respect de la législation, mais pas de manière optimisée. Une exploitation optimisée signifie: une élimination constante des micropolluants qui minimise les ressources et qui évite d'une part la formation de bromate, composé potentiellement cancérigène, et d'autre part, les fuites d'ozone dans l'effluent du réacteur d'ozonation.

Afin de garantir une exploitation stable et optimisée, Max Schachtler, CEO de la STEP Neugut, a développé et implémenté avec succès la stratégie BEAR (*Best Elimination, Analysis and MonitoRing*). Cette stratégie ne nécessite que 2 mesures supplémentaires (mesure en ligne de l'absorbance dans l'affluent et l'effluent du réacteur d'ozonation). Un algorithme complexe calcule en continu

EINLEITUNG

Seit Inbetriebnahme der Ozonung am 24. März 2014 übernimmt die ARA Neugut in Dübendorf eine Vorreiterrolle auf nationaler Ebene. Sie ist die erste Schweizer ARA, die im grosstechnischen Massstab Mikroverunreinigungen (MV) aus dem Abwasser entfernt. Mit der neuen Schweizer Gesetzgebung zur Elimination der MV vom 1. Januar 2016 werden in naher Zukunft um die 100 ARA mit einer neuen Reinigungsstufe nachgerüstet werden, um die MV aus dem Abwasser zu eliminieren [1]. Das gesamte Investitionsvolumen der Umsetzung in der Schweiz wird auf 1,2 Milliarden Franken veranschlagt.

Die Gewässerschutzverordnung [1] verlangt über die ganze ARA einen Reinigungseffekt für MV von 80%. Dieser wird aufgrund von 12 definierten Leitsubstanzen¹ berechnet [2]. Anerkannte und bewährte Technologien zur Elimination der MV sind die Ozonung und die Adsorption mit Pulveraktivkohle (PAK).

Eine zentrale Frage bei der Elimination der MV mittels Ozon ist die bedarfsgerechte Zugabe des Ozons zur Erreichung der geforderten Eliminationsleistung (EMV). Bei zu geringen Ozonzugabe wird die erforderliche EMV nicht erreicht. Ozonüberschüsse sind jedoch trotz hoher Leistung unerwünscht, nicht nur wegen der Mehrkosten, sondern auch, weil sie zum Ozonaustrag im Ablauf des Ozonreaktors führen können. Zusätzlich steigt mit

* Kontakt: max.schachtler@neugut.ch

Ozonüberschüssen das Risiko der Bromatbildung. Bromat ist potenziell karzinogen und wird proportional zur Ozonkonzentration gebildet [3]. Die Steuerung oder die Regelung der Ozonproduktion ist deshalb zentral für eine stabile Elimination der MV. Anders als bei einer Steuerung, die keine Kontrolleinrichtung für das Erreichen der Soll-Grösse besitzt, wird bei einer Regelung die Soll-Grösse permanent mit der Ist-Grösse (Eingangs- und Ausgangsgrösse) verglichen. Auf diese Weise wird bei einer Regelung sichergestellt, dass die Soll-Grösse erreicht wird und konstant bleibt.

Verschiedene Versuche der Eawag zeigten, dass die Messungen der Absorption des Lichtes im UV-Bereich grundsätzlich für die Steuerung oder Regelung der Ozonproduktion geeignet ist [4]. Vier Steuer- und Regelstrategien basierend auf UV-Messungen konnten im gross-technischen Massstab in der ARA Neugut getestet werden. Diese Versuche bestätigten, dass UV-Messungen zur Steuerung oder Regelung der Ozondosierung und für die Beurteilung bzw. Kontrolle der Reinigungsleistung der Anlage herangezogen werden können [5]. Eine praxistaugliche Steuerung oder Regelung mit bedarfsgerechter Ozonzugabe, wodurch Ozonüberschüsse vermieden werden, konnte jedoch nicht entwickelt werden.

Für eine erfolgreiche Anwendung der Ozonung in der Praxis mussten folgende Fragen, die durch die verschiedenen Forschungsprojekte noch nicht beantwortet worden waren, geklärt werden:

- Wie verhält sich die Ozonung im Dauerbetrieb?
- Welche Messtechnik eignet sich für die Steuerung oder Regelung der Ozonung?
- Ist es möglich, die Ozonproduktion so zu steuern oder sogar zu regeln, dass eine EMV von 80% zuverlässig und stabil erreicht wird?
- Ist eine aufwendige Regelung signifikant besser als eine einfache Steuerung?
- Ist ein Online-Monitoring der EMV (Überwachung/Kontrolle) durch den ARA-Betreiber möglich?

Diese Fragen werden im vorliegenden Artikel basierend auf den Betriebserfah-

rungen der ARA Neugut der letzten zwei Jahre und verschiedenen intern durchgeführten Entwicklungs- sowie angewandten Forschungsprojekten beantwortet.

DIE OZONUNG IN DER ARA NEUGUT

DIE VERFAHRENSSTUFEN

Die Reinigungskapazität der ARA Neugut ist auf 150 000 Einwohner (EW) ausgelegt. Die aktuelle Belastung beträgt 105 000 EW, wovon 50% aus Industrie und Gewerbe stammen. Die Belebtschlammstufe besteht aus einer Nitrifikation, Denitrifikation und einer biologischen Phos-

phorelimination. Im Anschluss an die biologische Behandlung durchläuft das Wasser die Nachklärbecken, den Ozonreaktor sowie die Sandfiltration und wird schliesslich gereinigt in das Gewässer, die Glatt, eingeleitet (Fig. 1).

INTEGRATION DER OZONUNG

Die Biologie der ARA Neugut wurde in den 1990er-Jahren auf zwei Ebenen erstellt. Dies erwies sich beim Bau der Ozonung im Jahre 2012 als ideal. Erstens konnte die gesamte Ozonanlage im vorhandenen Gebäude, zwischen Nachklärung und Sandfiltration, integriert werden (Fig. 2).

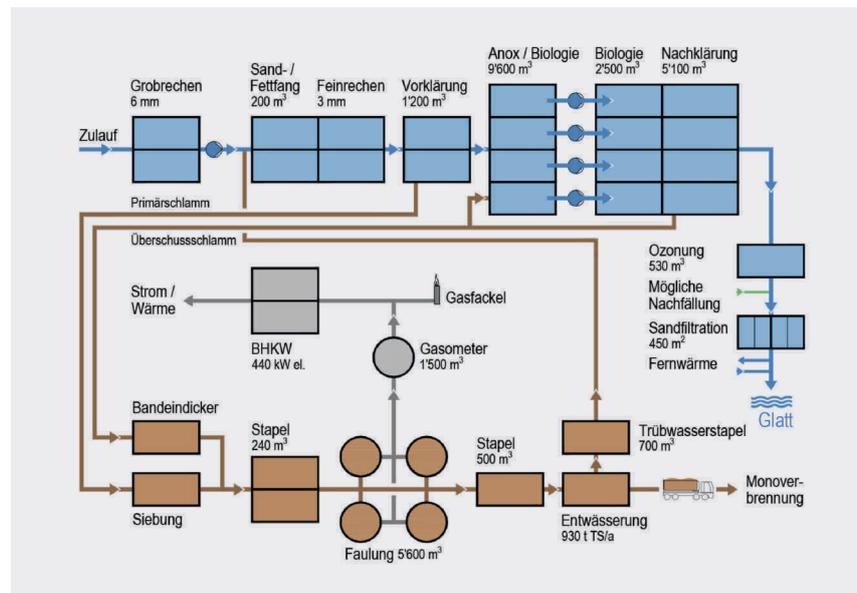


Fig. 1 Verfahrensschema der ARA Neugut mit der neuen Reinigungsstufe (Ozonung)
STEP Neugut - procédé de traitement avec la nouvelle étape de traitement (ozonation)

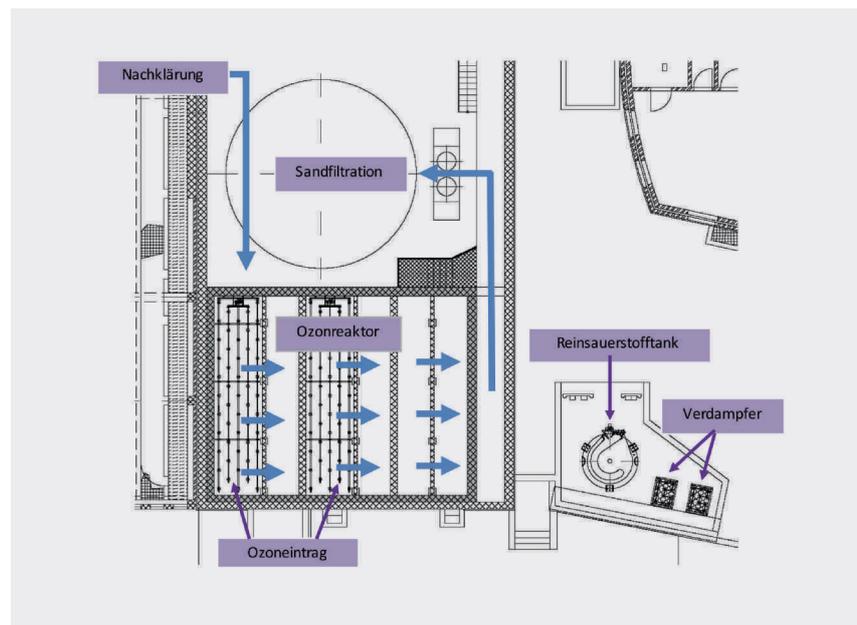


Fig. 2 ARA Neugut: Grundriss der Ozonung zwischen Nachklärung und Sandfiltration
STEP Neugut: Plan de l'ozonation entre la décantation secondaire et la filtration à sable

¹ Amisulprid, Benzotriazol, Candesartan, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Methylbenzotriazol, Metoprolol, Venlafaxin

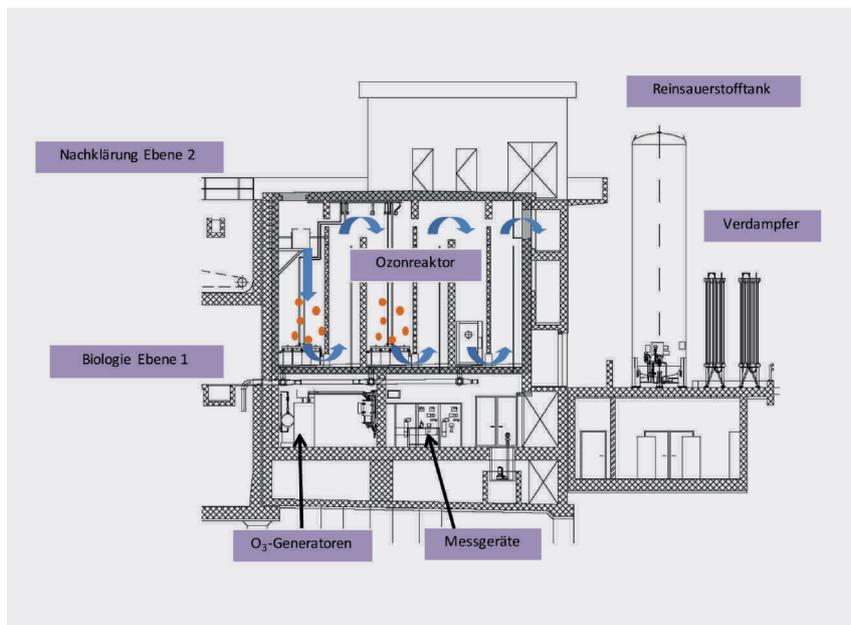


Fig. 3 Die kompakte Bauart der ARA Neugut. Schnitt Ozonreaktor, Ozoneintrag in Kammern 1 und 3, Generatoren- und Messtechnikraum, Reinsauerstofftank und Verdampfer
 La construction compacte de la STEP Neugut. Coupe du réacteur d'ozonation, injection d'ozone dans les chambres 1 et 3, locaux avec les générateurs d'ozone et les appareils de mesure, réservoir à oxygène liquide et dégazeur

Zweitens gelangt das biologisch gereinigte Wasser im freien Gefälle von der Nachklärung zum Ozonreaktor und von dort in die Sandfiltration.

Das Wasser durchfließt die sechs Kammern des Ozonreaktors (Fig. 3). Das Ozon kann in die Kammern 1 und/oder 3 dosiert werden. Die Aufenthaltsdauer im Ozonreaktor (530 m³ Inhalt und 6 m Wassertiefe) beträgt mindestens 13 Minuten, im Mittel 37 und maximal 125 Minuten. Der für die Ozonung benötigte Reinsauerstoff wird in einem 30-m³-Tank flüssig gelagert, dann in den Verdampfern zu gasförmigem Sauerstoff umgewandelt und anschliessend zu den Ozongeneratoren geleitet. Die zwei Ozongeneratoren mit je einer Kapazität von 5,5 kg O₃/h tragen das Gasgemisch (O₃ und O₂) in den Ozonreaktor ein, wo die MV oxidiert werden. Die entstehenden Oxidationsprodukte werden in der nachfolgenden Sandfiltration biologisch abgebaut. Das im gasdichten Ozonreaktor anfallende Offgas, welches hauptsächlich Sauerstoff

und einen geringen Anteil an Restozon (1–2 ppm) enthält, wird abgesaugt und im Restozonvernichter behandelt, damit nur Sauerstoff in die Atmosphäre abgegeben wird.

Die Ozonung ist zur Behandlung der gesamten Wassermenge (Vollstrom, Q_{max} = 660 l/s) ausgelegt (Q_{min} = 70 l/s, Q_{mittel} = 200 l/s). Im Jahresverlauf fließen 15 000 bis 57 000 m³ Abwasser pro Tag respektive durchschnittlich 8 Millionen m³ pro Jahr durch die ARA. In Tabelle 1 sind die Wasserinhaltsstoffe im Zulauf zur Ozonung aufgelistet.

BETRIEB, SICHERHEIT UND MESSKONZEPT

Die Ozonung in der ARA Neugut weist seit der Inbetriebnahme im März 2014 einen stabilen Betrieb auf, ist benutzerfreundlich und sicher. Der Personalaufwand der Ozonung ist mit 200 Stunden pro Jahr (inkl. Jahresrevision) gering. Die Verfügbarkeit der Anlage beträgt infolge des einstrassigen Reaktors und der jährlichen Wartungsarbeiten 97–99%. Für die Gewährleistung

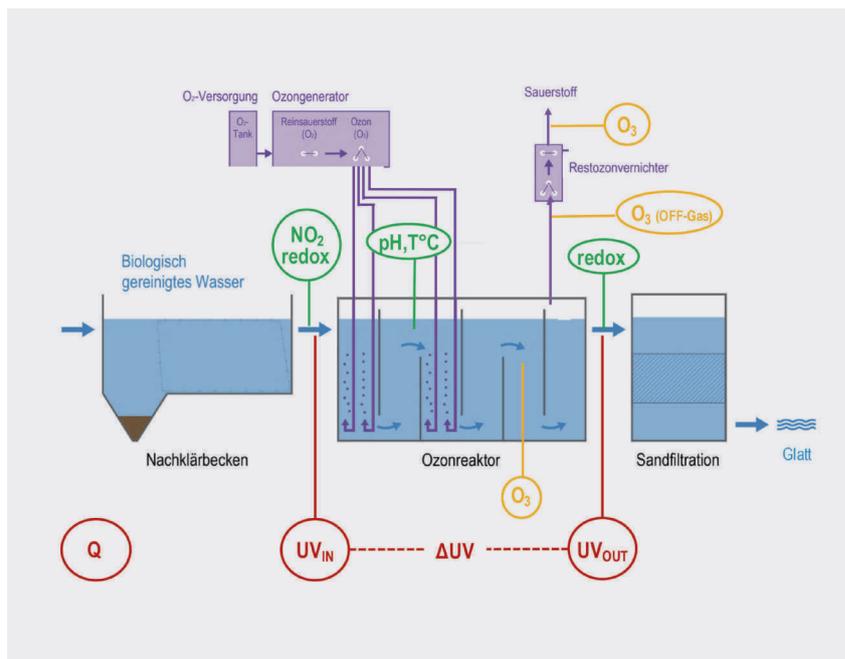


Fig. 4 Messkonzept Ozonung. Rot: Messungen für den Routinebetrieb; orange: Messungen für die Sicherheit; grün: Messungen zur Information
 Concept de mesures pour l'ozonation. Paramètres mesurés pour l'exploitation de routine (en rouge), pour la sécurité (en orange) et à titre informatif (vert)

	GUS mg/l	BSB ₅ mg O ₂ /l	CSB mg O ₂ /l	DOC mg/l	NH ₄ -N mg/l	NO ₂ -N mg/l	P _{tot} mg/l	Temp. °C	pH
Mittelwert	3,0	5,0	16,0	5,3	0,08	0,030	0,30	18	7,4
10%-Wert	1,0	2,0	15,0	2,5	0,04	0,009	0,15	13	7,1
90%-Wert	5,0	8,0	22,0	6,5	0,09	0,028	0,65	24	7,7

Tab. 1 Wasserinhaltsstoffe im Zulauf zur Ozonung; Mittelwerte, 10%- und 90%-Werte
 Substances dans l'affluent du réacteur d'ozonation; valeurs moyennes et quantiles 10% et 90%



Fig. 5 UV-Sonde (links) mit dem Messabschnitt von 40 mm und im eingebauten Zustand mit der Durchflussarmatur (rechts)

Sonde UV (gauche) avec une section de mesure de 40 mm et sonde UV installée à Neugut avec chambre de passage (droite)

eines sicheren Betriebes der Ozonung wird die Ozonkonzentration in der Wasserphase am Ende des Ozonreaktors und im Off-gas vor und nach dem Restozonvernichter überwacht (Fig. 4). Zusätzlich sind im Generatoren- und Messtechnikraum Ozonfühler installiert und die entsprechende Raumlüftung vorhanden.

Für den täglichen Betrieb der Ozonung in der ARA Neugut sind folgende Messungen erforderlich (Fig. 4): Q (Volumenstrom), UV_{IN} (UV-Absorption im Zulauf des Ozonungsreaktors) und UV_{OUT} (UV-Absorption im Auslauf des Ozonungsreaktors); die UV-Messtechnik wird später im Text erläutert. Zur Information werden zusätzlich folgende Parameter online erfasst: Nitrit im Zulauf zur Ozonung, das Redox-Potential im Zu- und Ablauf der Ozonung, im Reaktor der pH-Wert und die Temperatur.

MESSTECHNIK ZUR STEUERUNG DER OZONPRODUKTION

AUSGANGSLAGE

Der Stand der Technik erlaubt bis dato keine Online-Messung der einzelnen MV [6]. Ein online messbarer Summenparameter, der möglichst gut die Dynamik der MV im Wasser widerspiegelt, ist deshalb nötig.

Eine Möglichkeit ist die Messung der Konzentrationen der organischen Stoffe mit einem TOC-Analyser (bestimmt nach Vorfiltration als gelöster organischer Kohlenstoff, DOC) vor und nach der Ozonung. Die in den zwei Betriebsjahren in der ARA Neugut getesteten TOC-Analyser konnten die organische Belastung aber zu wenig

präzise ermitteln und ein durchgehender Dauerbetrieb war nicht möglich. Eine Ursache hierfür war wahrscheinlich der geforderte tiefe Messbereich, da dieselben Messgeräte bei höheren DOC-Werten andernorts funktionieren. Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung organischer Inhaltsstoffe ist die Messung der Absorption des Lichtes im UV-Bereich².

UV-MESSTECHNIK

Bei der UV-Messtechnik wird ein pulsierendes UV-Licht in einen Messabschnitt eingestrahlt und das durchdringende, nicht absorbierte Licht gemessen. Je höher die Absorption des Lichtes im Messabschnitt, desto höher ist die Konzentration von Fremdstoffen im Wasser. Die Masseinheit ist E/m (Extinktion pro Meter) oder 1/m.

Für die Messung organischer Stoffe hat sich Licht mit einer Wellenlänge von 254 nm als geeignet erwiesen. Viele organische Moleküle, zum Beispiel solche mit Doppelbindungen, absorbieren Licht mit dieser Wellenlänge [6]. Die Absorption kann somit als Summenparameter zur Messung der organischen Stoffe verwendet werden.

Während des Oxidationsprozesses in der Ozonung werden u. a. Doppelbindungen zerstört [7]. Die UV-Absorption im Ablauf der Ozonung (UV_{OUT}) ist daher schwächer. In Stufenversuchen mit unterschiedlichen Ozondosen konnte die Elimination einzelner Substanzen mit dem ΔUV -Wert (Differenz zwischen dem UV_{IN} - und UV_{OUT} -Messwert) korreliert werden [6, 8-10].

OPTIMIERUNG DER UV-SONDEN

Im ersten Betriebsjahr der Ozonung war die schnelle Verschmutzung der UV-Sonden (Fig. 5) ein Problem. Das veranlasste

die ARA Neugut, je drei UV-Sondenpaare von unterschiedlichen Herstellern (Sigrist, E+H und Hach) parallel einzubauen, um weitere Informationen über das Verhalten der UV-Sonden zu gewinnen und Optimierungen durchzuführen.

Ein stabiles und zuverlässiges UV-Messsignal wurde erreicht, wenn bei der Anordnung und dem Einbau der UV-Sonden auf folgende Punkte geachtet wurde: Anströmung der Messzelle, Verhindern von Luftblasen in der Probenahmeverrichtung und ein nicht zu geringer Durchfluss. Unerlässlich sind ausserdem eine regelmässige Reinigung der Messzelle (idealerweise automatisch) sowie eine stete Qualitätssicherung.

Falls drei UV-Sondenpaare gleichzeitig eingesetzt werden, können sich diese gegenseitig überwachen. Wird nur ein Sondenpaar installiert, so kann die UV_{IN} -Sonde die UV_{OUT} -Sonde überwachen (und vice versa), indem über einen Bypass an beiden Sonden das gleiche Wasser vorbeigeleitet wird. Dies ermöglicht die Kontrolle der Messwerte und der Messgenauigkeit des Sondenpaares.

Nach Durchführung dieser Optimierungen und bei regelmässiger Qualitätssicherung erwies sich die UV-Messtechnik für die Steuerung und Regelung der Ozonung auf der ARA Neugut als geeignet und dies bei geringem Aufwand

DIE BEAR-STRATEGIE

GRUNDGEDANKE

Der Grundgedanke von Max Schachtler bei der Entwicklung einer neuen Strategie zur bedarfsgerechten Ozonproduktion war, den ΔUV -Wert vorzugeben und stabil zu halten. Wenn dies gelingt, so die Annahme, sollte der ΔUV -Wert mit der erforder-

² Der Messparameter wird häufig in der Literatur als Spektraler Absorptionskoeffizient (SAK) bezeichnet.

derlichen EMV korrelieren. Das bedeutet, dass einerseits eine den Wasserinhaltsstoffen angepasste Ozonmenge produziert wird und andererseits die Kontrolle der EMV mittels UV-Messtechnik erfolgt. Folglich könnte der ARA-Betreiber mit dem ΔUV -Wert die Eliminationsleistung selber überwachen, analog zur bekannten ARA-internen Laborüberwachung. Die externe Laboranalytik würde dann der Bestätigung der internen Überwachung dienen. Diese Idee erhielt den Namen BEAR (*Best Elimination, Analysis and Monitoring*), der die verschiedenen Aspekte der Strategie widerspiegelt.

AUFBAU UND PRINZIP VON BEAR

Ozon reagiert nicht nur mit MV, sondern auch mit anderen Stoffen. Je nach Wasser-

zusammensetzung muss somit die eingesetzte Ozonkonzentration variieren, um einen stabilen ΔUV -Wert bzw. eine stabile EMV zu erreichen. Selbstverständlich ist die Stabilität der UV-Sonden eine Grundvoraussetzung für eine robuste und stabile Strategie.

Die nötige Ozonproduktion wird durch den Algorithmus von BEAR berechnet. Der Algorithmus ermittelt die Soll-Ozonkonzentration ($g O_3/m^3$) und multipliziert diese mit dem Durchfluss, sodass die Soll-Ozonproduktion ($kg O_3/h$) erhalten wird. Letztere wird dem Ozongenerator als Stellgröße vorgegeben (Fig. 6).

Die BEAR-Strategie enthält sowohl Elemente einer Steuerung als auch einer Regelung. Sie verwendet nicht eine einzige Logik zur Ermittlung der bedarfsgerech-

ten Ozonkonzentration, sondern mehrere Logiken, genannt Module. Die verschiedenen Module können unterschiedlich aktiviert werden, automatisch oder manuell. Dadurch ist es möglich, die spezifischen Eigenheiten jedes Moduls zu verstehen und auf die Bedingungen jeder ARA optimal abzustimmen.

Bei Regenereignissen gelangen spezielle Module zum Einsatz. Begrenzungsfunktionen und Module in der Steuerlogik schützen die Anlage vor Überlast und ermöglichen einen kontinuierlichen und effizienten Betrieb der Ozonung, auch bei einer UV-Sondenstörung oder bei ungewöhnlichen Betriebswerten.

STABILE ELIMINATIONSLEISTUNG MIT BEAR

Mit BEAR besteht die Möglichkeit, den gewünschten ΔUV -Wert vorzugeben und stabil zu halten, wie die Ergebnisse zeigen (Fig. 7). Die Variabilität der Wasserzusammensetzung wird mit der bedarfsgerechten Ozonzugabe sehr gut kompensiert.

Dank der präzisen BEAR-Strategie konnte erstmals der Nachweis erbracht werden, dass der ΔUV -Wert sich im Tagesgang innerhalb von $\pm 2\%$ halten lässt, was wiederum bedeutet, dass die Ozonzugabe bedarfsgerecht, der Betrieb energiesparend und die Bildung von Oxidationsnebenprodukten minimiert ist. Gemäss den Ergebnissen der Laboruntersuchungen entspricht ein ΔUV -Wert von $42 \pm 2\%$ einer Elimination der 12 Leitsubstanzen von $82 \pm 2\%$.

KORRELATION ΔUV -VORGABE UND EMV

Im nächsten Schritt galt es, die BEAR-Strategie bei Variation der Vorgaben für den ΔUV -Wert zu testen und so zu prüfen, ob der ΔUV -Wert mit der Elimination der 12 Leitsubstanzen korreliert. Bekannt war bisher lediglich, dass die Elimination einzelner Leitsubstanzen mit dem ΔUV -Wert korreliert.

Hierzu wurde ein Stufenversuch durchgeführt. Dabei wurde jeweils während mindestens 24 Stunden ein vordefinierter, konstanter ΔUV -Sollwert vorgegeben und die 24h-Mischproben durch ein externes Analytiklabor ausgewertet. Die Ergebnisse dieses Stufenversuches zeigten klar, dass mit der BEAR-Strategie die Vorgabe des ΔUV -wertes möglich ist und der ΔUV -Wert mit der EMV korreliert (Fig. 8).

Es konnte zudem belegt werden, dass der ΔUV -Wert nicht nur mit einzelnen

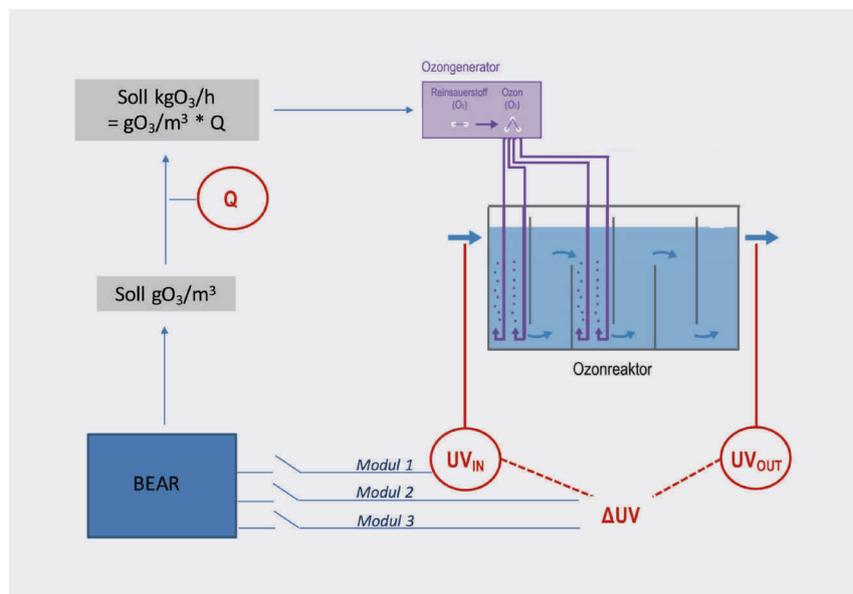


Fig. 6 Grundprinzip der modularen BEAR-Strategie zur Steuerung/Regelung der Ozonung
Principe de base de la stratégie modulaire BEAR

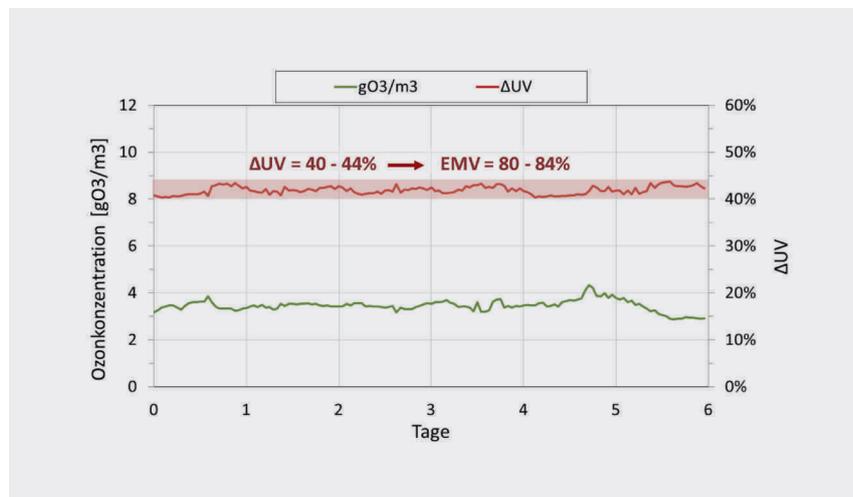


Fig. 7 Mit BEAR lässt sich ein stabiler ΔUV -Wert mit einer geringen Bandbreite von $\pm 2\%$ einstellen
BEAR génère une valeur ΔUV stable à $\pm 2\%$

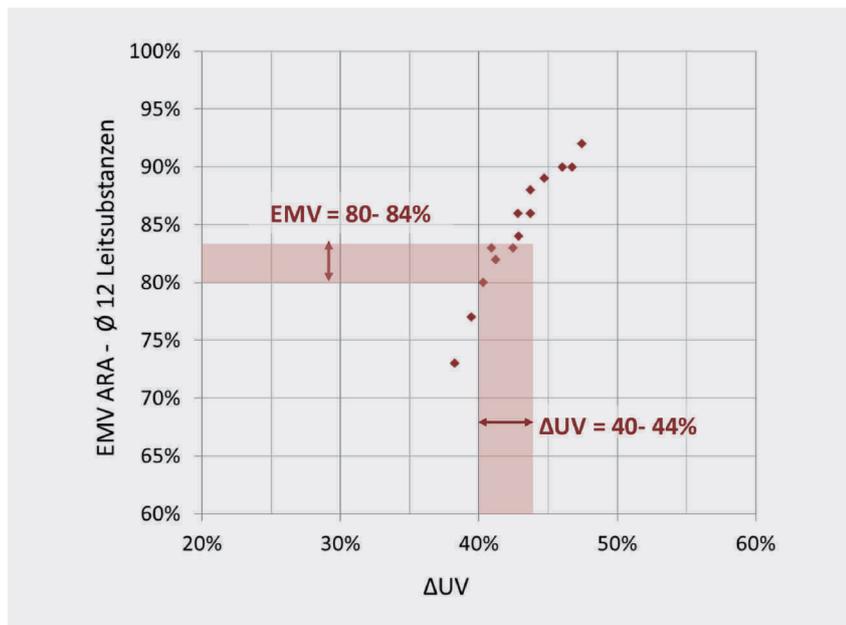


Fig. 8 Korrelation der Elimination der 12 Leitsubstanzen über die ganze ARA mit dem ΔUV -Wert. Ergebnisse eines Stufenversuchs auf der ARA Neugut bei Trockenwetter. Die Leitsubstanzen wurden in 24h-Mischproben analysiert

Corrélation entre l'élimination moyenne des 12 substances indicatrices sur l'ensemble de la STEP et l'abattement de l'absorption UV dans le réacteur d'ozonation (ΔUV). Tests par niveau effectué sur des échantillons de 24 h, par temps sec

Leitsubstanzen korreliert, sondern auch mit dem Mittelwert der vom BAFU festgelegten 12 Leitsubstanzen. Mit dem Stufenversuch wurde somit erstmals der Nachweis erbracht, dass der ΔUV -Wert im Alltagsbetrieb der Ozonung als Indikator für die Elimination der MV genutzt werden kann. Ein ΔUV -Wert von $42 \pm 2\%$ entspricht in der ARA Neugut einer EMV von $82 \pm 2\%$.

ÜBERWACHUNG DER MV-ELIMINATION MIT BEAR

Mit der Kombination BEAR für eine bedarfsgerechte Ozonzugabe und zuverlässigen UV-Sonden lässt sich also der ΔUV -Wert als Indikator für die Elimination der MV im Routinebetrieb verwenden. Basierend auf einer Korrelationskurve kann aus dem Zielwert für die EMV der ΔUV -Wert abgeleitet und als Vorgabe für die Steuerung der Ozonzugabe festgelegt werden. Die Online-Überwachung der EMV durch den ARA-Betreiber lässt sich also in der Praxis realisieren.

Folgende Faktoren bestimmen die Präzision der Online-Überwachung: BEAR-Strategie, zuverlässige UV-Sonden, Korrelationskurve ΔUV zu EMV und Genauigkeit der externen Laboranalytik (die Labors weisen bisher eine Genauigkeit von $\pm 20\%$ untereinander auf). Zusätzlich zum EMV-Zielwert (z. B. 82%) für die

Steuerung der Ozonzugabe definiert jede ARA die zulässige Mittelwertabweichung (z. B. $\pm 2\%$). Zu beachten ist, dass die Beziehung zwischen ΔUV -Wert und EMV sondenhersteller- und folgerichtig auch ARA-spezifisch ist. Dies bedeutet, dass nach bestandener Qualitätsprüfung der UV-Sonden und bei stabilem Ozonbetrieb der ΔUV -Wert, der erforderlich ist, um

die gewünschte EMV zu erreichen, mit Labormessungen ermittelt werden muss.

ALTERNATIVE STEUERSTRATEGIEN

Während des DEMAU-Projektes mit der Eawag im Jahr 2014/2015 wurden vier verschiedene Steuer- und Regelstrategien zur Ozonproduktion getestet [5, 11]. Zwei Ansätze (basierend auf DOC und ΔUV) ergaben aus mess- und regeltechnischen Gründen im Routinebetrieb nicht die gewünschten Ergebnisse. Die Q- und die UV_{IN} -Strategie hingegen wurden auf der ARA Neugut erfolgreich angewendet. Das Merkmal dieser Strategien ist die Verwendung einer volumenstrom- bzw. UV-proportionalen Ozonkonzentration, ergänzt mit diversen Abfangroutinen und Begrenzungen. Bei der Q- und der UV_{IN} -Steuerungen ist ein NO_2 -Analyzer im Zulauf der Ozonung notwendig, damit die NO_2 -N-Spitzen berücksichtigt werden können. Im Gegensatz zu BEAR sind beides reine Steuerungen und enthalten keine Regelungselemente.

DIE Q-STEUERUNG

Prinzip

Hierbei wurde zunächst mit Messungen die mittlere DOC-Konzentration im Abwasser eruiert und in Stufenversuchen eine geeignete Ozondosis (in $g O_3/g DOC$) festgelegt. Durch Multiplikation dieser Werte mit der zufließenden Wassermenge wurde dann die Ozonzugabe (in

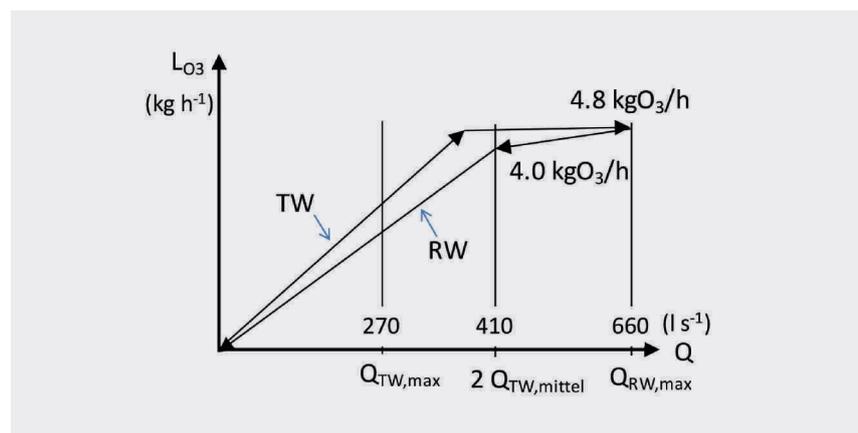


Fig. 9 Prinzip der Q-Steuerung. Bei Trockenwetter (TW, obere Linie) erfolgt die Ozonzugabe L_{O_3} proportional zum Durchfluss Q bis knapp vor $2 Q_{TW,mittel}$. Danach wird die Ozonproduktion bis $Q_{RW,max}$ plafoniert. Nach einem Regenereignis (RW, untere Linien) erfolgt eine geringere Ozonzugabe, um den Verdünnungseffekt auszugleichen und einer Überdosierung entgegenzuwirken

Principe du contrôle proportionnel au débit. Par temps sec (TW, ligne supérieure), la production de l'ozone est proportionnelle au débit jusqu'à $2 Q_{TW,mittel}$, au-delà, la production d'ozone est plafonnée. Après une pluie (RW, ligne inférieure), la production d'ozone est plus faible en raison de la dilution de l'eau, ceci afin d'éviter un surdosage

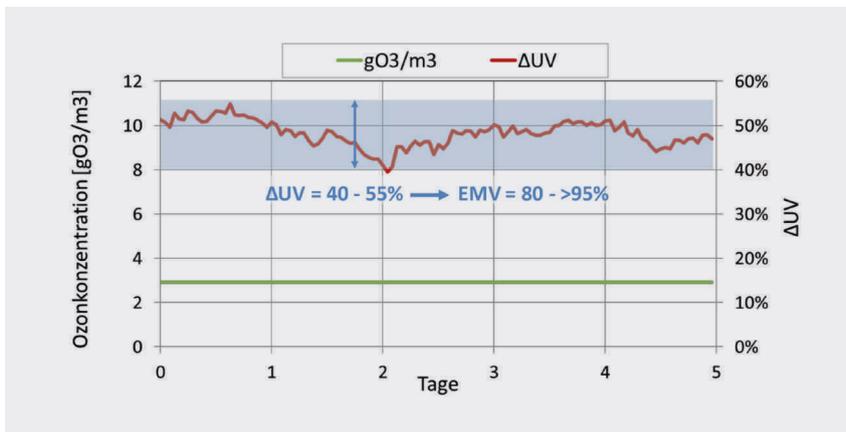


Fig. 10 Die Q-Steuerung ergab keine stabilen ΔUV-Werte infolge der fixen Vorgabe der Ozonkonzentration in g O₃/m³

Le contrôle proportionnel au débit ne génère pas une valeur constante du ΔUV car la concentration d’ozone est maintenue constante (en g O₃/m³)

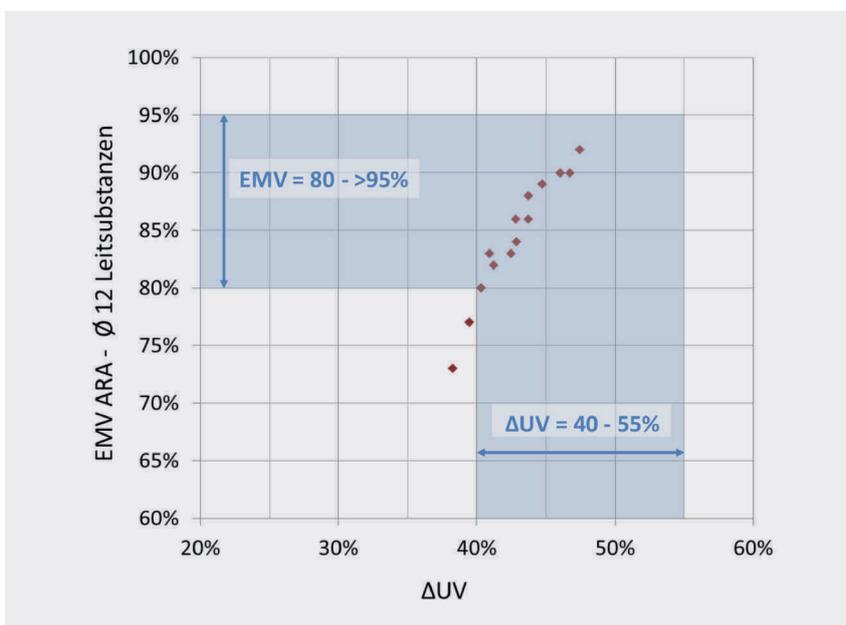


Fig. 11 Die grosse Bandbreite der ΔUV-Werte (40 - 55%) bei der Q-Steuerung entsprach einer EMV von 80 - >95%

Avec un contrôle proportionnel au débit, le ΔUV oscille entre 40 et 55% ce qui correspond à une élimination des micropolluants de 80 - >95%

kg O₃/h) errechnet. Die Ozondosierung erfolgte entlang vordefinierter Trocken- und Regenwetterganglinien (Fig. 9).

Vorteil

Sehr einfach anzuwendende und zu betreibende Steuerung.

Nachteil

Die Strategie ermöglichte keine konstante EMV, wie der stark schwankende ΔUV-Messwert veranschaulicht (Fig. 10). Vielmehr führte sie zu EMV zwischen 80 und >95% (Fig. 11), wobei auch Werte < 80% und > 95% gefunden wurden. Die Ozonkonzentration muss daher so hoch angesetzt werden, dass die MV-Eliminationsleistung jederzeit erreicht wird.

DIE UV_{IN}-STEUERUNG

Prinzip

Es handelt sich um eine frachtproportionale Steuerung, die UV_{IN}-Messwerte anstelle von DOC-Messwerten benutzt (Fig. 12). Basierend auf den UV_{IN}-Werten wurde die Ozonkonzentration mit C_{O3} = 0,26 x UV_{IN} berechnet (der Faktor 0,26 wurde zuvor in Stufenversuchen ermittelt). Unter Einbezug des Volumenstroms rechnete die Steuerung dies in die Ozonzugabe in kg O₃/h um. Die Ozonzugabe erfolgte innerhalb vordefinierter UV_{IN}-Grenzlinien.

Vorteil

Die Änderungen der DOC-Konzentration im Zulauf der Ozonung werden berücksichtigt.

Nachteil

Auch diese Strategie ermöglichte keine konstante EMV, wie der stark schwankende ΔUV-Messwert zeigt (Fig. 13). Folglich

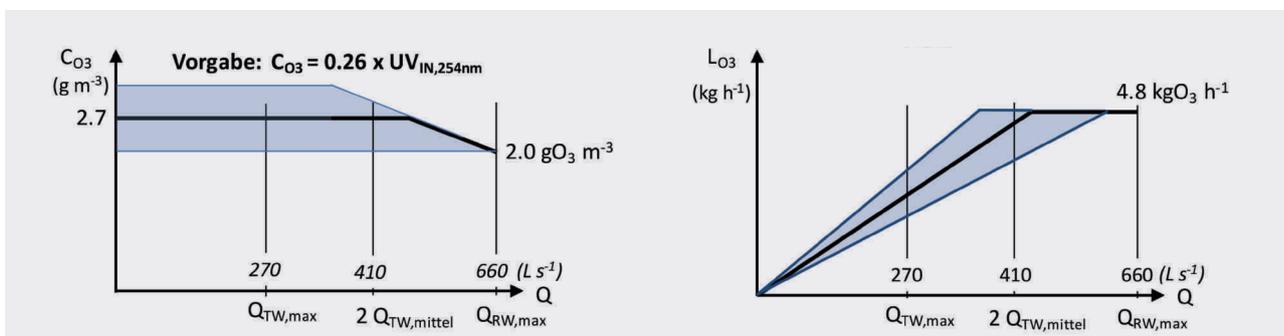


Fig. 12 Prinzip der UV_{IN}-Steuerung. Die Ozonzugabe erfolgt proportional zum gemessenen UV_{IN}-Wert und der Durchflussmenge bis knapp unterhalb von 2 Q_{TW,mittel}. Danach wird die Ozonproduktion bis Q_{RW,max} plafoniert. Die blauen Flächen liegen innerhalb der definierten UV_{IN}-Grenzlinien
Principe du contrôle proportionnel à la mesure de l’absorption dans l’affluent du réacteur d’ozonation (UV_{IN}). La production d’ozone est proportionnelle au signal UV_{IN} et au débit jusqu’à 2 Q_{TW,mittel}, au-delà, elle est ensuite plafonnée. La production d’ozone selon ce contrôle évolue dans les zones bleues

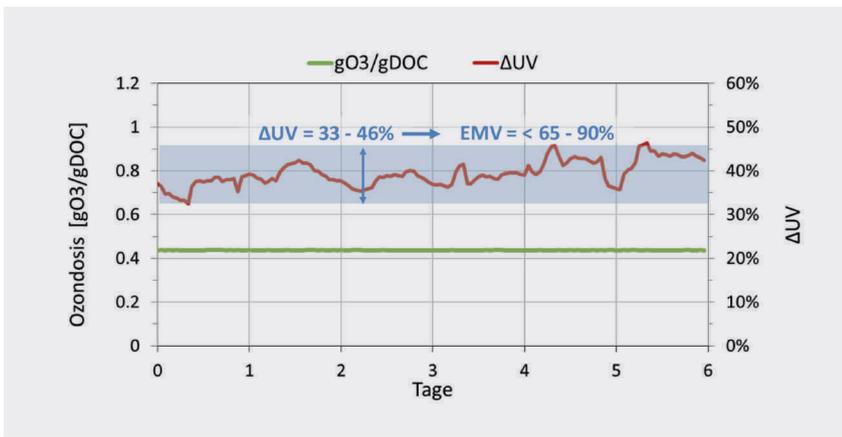


Fig.13 Die UV_{IN} -Steuerung ergab keine stabilen ΔUV -Werte wegen der Vorgabe einer fixen Ozonosis $g O_3/g DOC$. Ein zu tief angesetzter Vorgabewert führt zu einer verminderten EMV
 Le contrôle proportionnel au signal UV_{IN} ne génère pas une valeur constante du ΔUV car la dose d’ozone est maintenue constante ($g O_3/g DOC$). Une dose d’ozone trop faible réduit l’efficacité du traitement

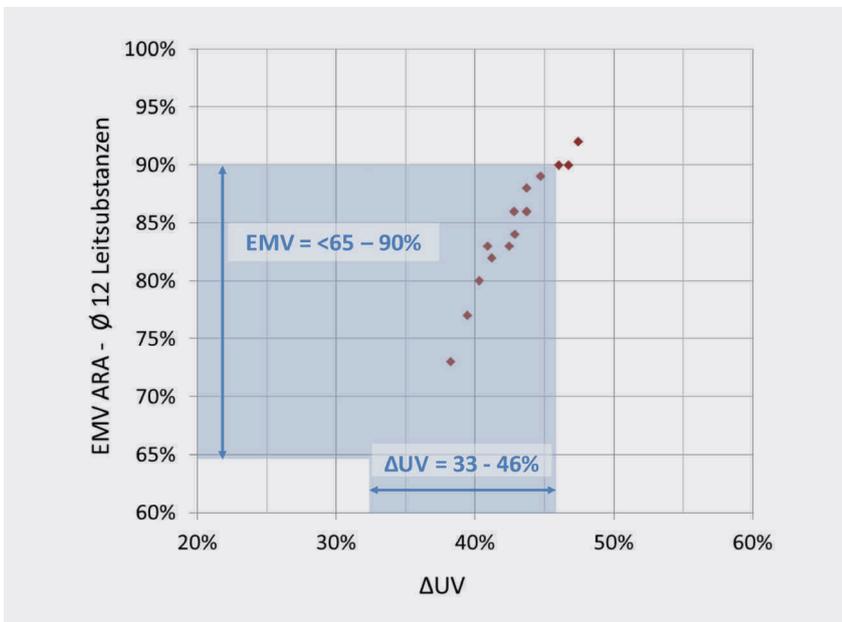


Fig.14 Die grosse Bandbreite der ΔUV -Werte (33 – 46%) bei der UV_{IN} -Steuerung entsprach einer EMV von <math>< 65 - 90\%</math>. Der Grenzwert von 80% wurde teilweise unterschritten
 Avec un contrôle proportionnel au signal UV_{IN} , le ΔUV oscille entre 33 et 46% ce qui correspond à une élimination des micropolluants de <math>< 65 - 90\%</math>. L’élimination minimale de 80% n’est pas toujours atteinte

muss die Soll-Ozonosis so hoch angesetzt werden, dass die EMV jederzeit erreicht wird. Die EMV variierten zwischen 65 und 90% (Fig. 14). Werte unter der geforderten EMV von 80% werden durch eine zu tief angesetzte Vorgabe für die Soll-Ozonosis wie auch durch die ungenügende Berücksichtigung der Wasserinhaltsstoffe durch die UV-Sonde verursacht.

VERGLEICH BEAR MIT Q- UND UV_{IN} -STRATEGIE

Die Ergebnisse von BEAR und der beiden proportionalen Steuerungen un-

terscheiden sich deutlich. Das Grundprinzip von BEAR ist die variable Ozonkonzentration, während bei den proportionalen Steuerungen eine zuvor in Versuchen ermittelte Ozonosis verwendet wird. In Figur 15 wird die UV_{IN} -Steuerung (blaue Punkte) der BEAR-Strategie (rote Punkte) gegenübergestellt. Die grosse Bandbreite der mit der UV_{IN} -Steuerung erhaltenen ΔUV -Werte im Gegensatz zum schmalen Band der BEAR-Strategie lässt sich klar erkennen. Da BEAR für die bedarfsge-

richteten Ozonzugabe einen Algorithmus mit mehreren Logiken verwendet, kann ein sehr stabiler und konstanter ΔUV -Wert und damit eine stabile EMV erzielt werden.

Tabelle 2 zeigt weiter, dass die EMV bei der UV_{IN} -Steuerung leicht niedriger war als bei BEAR, obwohl die Vorgabe für die Soll-Ozonosis um 5% höher angesetzt war als der Mittelwert der BEAR-Strategie. Ohne eine regelmässige Überdosierung kann daher die UV_{IN} -Steuerung die geforderte EMV nicht erbringen. Da bei beiden Steuerungen (Q und UV_{IN}) für eine ausreichende EMV die Ozonzugabe um 25 bis 30% höher angesetzt werden muss als bei BEAR, kommt es immer wieder zur Überdosierung von Ozon.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die BEAR-Strategie erstmals ermöglicht, auf einen vorgegebenen ΔUV -Wert abzu zielen und somit ein robustes Endergebnis zu erhalten. Am besten veranschaulicht dies die Mittelwertabweichung der EMV von $\pm 2\%$ bei BEAR im Vergleich zu $\pm 8\%$ und $\pm 12\%$ bei der Q- respektive der UV_{IN} -Steuerung (Tab. 2).

Anzumerken bleibt, dass BEAR eine komplette Neuentwicklung ist und der verwendete Algorithmus, der sowohl Elemente einer Steuerung als auch einer Regelung enthält, mit der im Jahre 2014 auf der ARA Neugut angewendeten ΔUV -Regelung nicht vergleichbar ist. Es werden jedoch bei BEAR die gleichen UV-Sonden und auch der gleiche ΔUV -Wert verwendet.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Erfahrungen mit der Ozonung in der ARA Neugut sind sehr gut. Das Verfahren bewährt sich, ist sicher und voll automatisiert, erfordert wenig Personalaufwand und reduziert zudem die Ökotoxizität des gereinigten Wassers deutlich [12]. Die Ozonung eliminiert die 12 Leitsubstanzen des BAFU gesetzeskonform und zuverlässig im Bereich von $82 \pm 2\%$. Der Bedarf an Reinsauerstoff und der Stromverbrauch für die Ozonerzeugung machen rund 60% der Gesamtbetriebskosten von 110 000 Franken pro Jahr aus. Die restlichen 40% verteilen sich auf die externe und interne Analytik, die Wartungsarbeiten und das Personal. Die optimierten UV-Sonden liefern zuverlässige und stabile UV-Messwerte und der Unterhaltsaufwand ist gering. Ob eine Redundanz der UV-Sonden sinnvoll ist, muss von Fall zu Fall festgelegt werden.

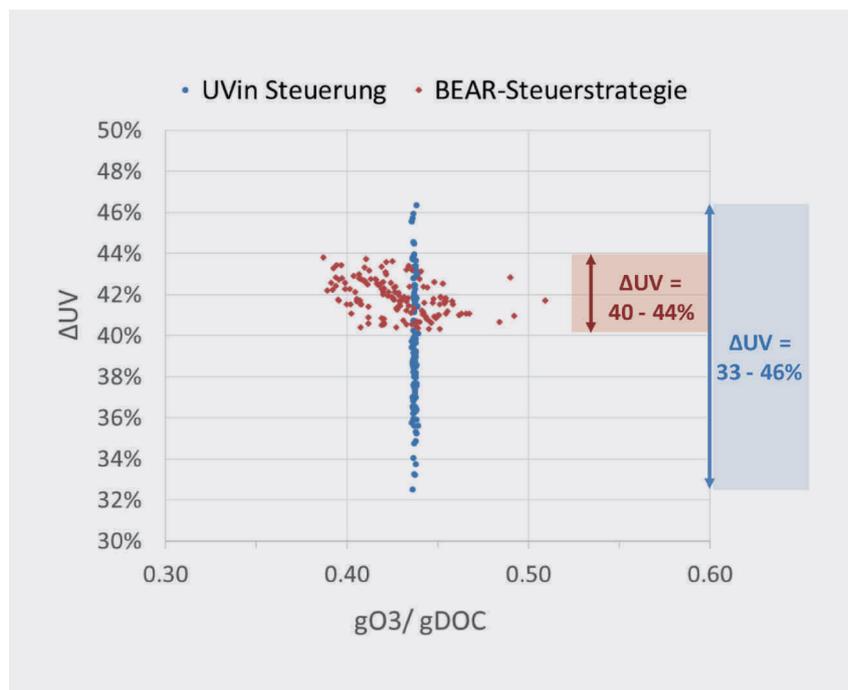


Fig.15 Mit der variablen Ozondosis von BEAR (rote Punkte) resultieren stabile ΔUV -Werte von $\pm 2\%$. Die UV_{in} -Steuerung (blaue Punkte) berücksichtigt die Wasserinhaltsstoffe zu wenig; es resultieren ΔUV -Werte von $\pm 12\%$

Avec la concentration d'ozone variable de BEAR (points rouges) le ΔUV reste stable à $\pm 2\%$.

Avec le contrôle proportionnel au signal UV_{in} (points bleus) la composition de l'eau n'est pas suffisamment prise en considération ce qui a pour résultat un ΔUV variant de $\pm 12\%$

Strategie	BEAR	Q	UV_{in}
Ozondosis [g O ₃ /g DOC]	0,33 – 0,50 Mittel 0,42	0,55	0,44
ΔUV [%]	42 ± 2	48 ± 8	40 ± 6
EMV [%]	82 ± 2	88 ± 8	78 ± 12

Tab. 2 Ergebnisse der verschiedenen auf der ARA Neugut getesteten Strategien
Comparaison et résultats des différentes stratégies

Die Qualitätssicherung der UV-Sonden ist auf jeden Fall ein entscheidender Faktor, der bestimmt, wie stabil und zuverlässig das Endergebnis der MV-Elimination sein wird. Die Q- und UV_{in} -Steuerstrategien sind bewährte und geeignete Strategien, um die erforderliche EMV grundsätzlich zu erzielen. Der Nachteil dieser Strategien ist allerdings die stark schwankende EMV, weil die Wasserzusammensetzung nicht ausreichend berücksichtigt wird. Um eine möglichst sichere EMV von $> 80\%$ zu erreichen, müssen daher bei diesen Strategien die Soll-Ozondosen mit ausreichend hoher Sicherheit (d.h. 25 bis 30% höher als bei BEAR) festgelegt werden. Diese regelmässige Überdosierung führt zur Bildung unerwünschter Oxidationsnebenprodukte. Beim Einsatz der Q- oder UV_{in} -Steuerung muss ausserdem ein NO_2 -Analyser im Zulauf der Ozonung installiert werden, um allfällige

NO_2 -N-Spitzen zu berücksichtigen. Mit BEAR wurde erstmals eine Strategie entwickelt, mit der in der Praxis stabile ΔUV -Werte zuverlässig erreicht werden. Die Ergebnisse der Laboranalysen von August 2015 bis März 2016 bestätigen, dass BEAR robust und zuverlässig funktioniert. Zudem spart BEAR Ressourcen durch den geringeren Bedarf an Ozon und vermeidet Ozonüberschüsse. Damit ist die BEAR-Strategie signifikant besser als die bisherigen Strategien. Dank der Struktur und den Modulen von BEAR kann diese Strategie sehr einfach in anderen ARA angewendet werden.

Werden optimierte UV-Sonden verwendet und die Qualitätssicherung regelmässig durchgeführt, so steht dem Betreiber mit dem ARA-spezifischen ΔUV -Wert als Indikator für die EMV ein Instrument für die Online-Überwachung der EMV zur Verfügung. Wenn eine ARA sich für eine

kontinuierliche Überwachung der EMV entscheidet, ist die Anwendung von BEAR von Vorteil, da kein zusätzliches Messgerät notwendig ist.

Zusammen mit der BEAR-Strategie wurde auch das LOD-Betriebskonzept (LOD: Low Ozon Dosage) von der ARA Neugut entwickelt und eingeführt. Mit diesem Betriebskonzept konnte der Ozoneintrag um 15 bis 20% verringert werden unter Einhaltung der EMV von $> 80\%$. Dieses Betriebskonzept beruht auf einem variablen Einsatz der Ozonungskammern 1 und 3 wie auch der einzelnen Stränge in den Kammern (eine Publikation hierzu folgt).

DANK

Ein besonderer Dank geht an die MitarbeiterInnen der ARA Neugut, die in Eigenregie die Installationen und Optimierungen der UV-Sonden so ausführten, dass die UV-Werte zuverlässig gemessen werden konnten, sowie für die unermüdliche und stetige Qualitätssicherung. Wir danken auch Peter Bruderer der Chestonag AG in Seengen für seinen hervorragenden Einsatz und Michael Thomann der Holinger AG (Liestal), der uns mit grossem Einsatz und kritischen Diskussionen stets unterstützte. Ein Dank geht zudem an das Analytiklabor Envilab in Zofingen, das unsere Proben immer rasch analysierte.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GSchV (2016): Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998, SR 814.201 (Stand 02.02.2016)
- [2] Götz, C. et al. (2015): Überprüfung des Reinigungseffekts – Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe. Aqua & Gas 2/2015, 34–40
- [3] Margot, J. et al. (2011): Traitement des micropolluants dans les eaux usées. Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne). Ed. Ville de Lausanne
- [4] Wittmer, A. et al. (2013): UV-Messung zur Regelung des Ozondosis und Überwachung der Reinigungsleistung – Labor- und halbtechnische Pilotversuche. Abschlussbericht an das Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- [5] Fleiner, J. et al. (2015): Ozonung ARA Neugut, Dübendorf – Grosstechnische Optimierung der Ozondosierung. Schlussbericht BAFU.
- [6] Nanaboina, V. et al. (2010): Evolution of absorbance spectra of ozonated wastewater and its relationship with the degradation of trace-level organic species. Environ. Sci. Technol. 44, 6130–6137
- [7] Broséus, R. et al. (2009): Ozone oxidation of phar-

maceuticals, endocrine disruptors and pesticides during drinking water treatment. *Water Research* 43, 4707–4717

- [8] *McArdell, C. et al. (2015): Verhalten von Spurenstoffen und Zwischenprodukten in der Ozonung und biologischen Nachbehandlung. VSA PEAK Veranstaltung, Eawag, Juni 2015*
- [9] *Gerrity, D. et al. (2012): Development of surrogate correlation models to predict trace organic contaminant oxidation and microbial inactivation during ozonation. Water Research* 46, 6257–6272
- [10] *Wittmer, A. et al. (2015): Decreased UV absorbance as an indicator of micropollutant removal efficiency in wastewater treated with ozone. Water Sci. Technol.* 71, 980–985
- [11] *Thomann, M. et al. (2014): Ozonung in der Abwasserreinigung – ARA Neugut. Realisierung und Praxis Ozonung. Dübendorf, Tagung ARA Neugut/Eawag, November 2014*
- [12] *Kienle, C. (2015): Ökotoxikologische Untersuchungen zur Effizienz der biologischen Nachbehandlungen. VSA PEAK Veranstaltung, EAWAG, Juni 2015*

> SUITE DU RÉSUMÉ

la quantité d’ozone à ajouter dans le réacteur d’ozonation pour atteindre le degré d’élimination désiré. BEAR a pour résultat une élimination constante et choisie des micropolluants (80 – 84%), et ce par tout temps. La consommation en énergie, le risque de former du bromate et les pertes d’ozone dans l’effluent du réacteur d’ozonation sont minimisés. De plus, l’exploitant peut surveiller en continu et très simplement l’élimination des micropolluants. La stratégie BEAR avec sa structure flexible peut facilement être adaptée et implémentée à d’autres STEP.



Continental
The Future in Motion

AQUAPAL®

Der Beste fürs Trinkwasser

Der hochflexible Trinkwasserschlauch AQUAPAL® erfüllt höchste Anforderungen an Reinheit und Hygiene:

- Absolut geruchs- und geschmacksneutral
- Hochtemperaturbeständig und dämpfbar
- Resistent gegen handelsübliche Reinigungs- und Desinfektionsmittel sowie alle Desinfektionschemikalien gemäß DVGW-W291
- Für den Einsatz im Freien zugelassen
- Erfüllt alle Anforderungen der Trinkwasserverordnung
- FDA-konform, WRAS-geprüft
- 3 Jahre Garantie



Industrial Fluid Systems

ContiTech