

Pilotprojekt „Vierte Reinigungsstufe“ in Weißenburg

Erfahrungen bei der Planung und wissenschaftlichen Begleitung

Sascha Rödel, F. Wolfgang Günthert, Christian Schaum (Neubiberg), Verena Rehbein (Weyarn), Regine Schatz, Tosca Zech (Weißenburg), Manfred Sengl, Marco Fioretti, Marc Eßlinger (Augsburg) und Michaela Hunze (Hannover)

Zusammenfassung

Im Pilotprojekt auf der Kläranlage Weißenburg wurden neben der Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse ein Spurenstoffscreening, ein Testverfahren zur Ozonierbarkeit des Weißenburger Abwassers, eine Strömungssimulation für den Ozonreaktor sowie eine Energieprognose für die vierte Reinigungsstufe durchgeführt. Ausgehend von diesen Erfahrungen und der wissenschaftlich gestützten Vorgehensweise in Weißenburg bildeten die ausführlichen Untersuchungen und Erhebungen aller notwendigen Basisdaten und bemessungs- sowie projektrelevanten Informationen die Grundlage für eine wirtschaftliche Entscheidung im Planungsverlauf und haben dazu beigetragen, den Planungsprozess zu optimieren und den Wissensgewinn zu erhöhen. Die Inbetriebnahme der vierten Reinigungsstufe, die als Ozonung mit zweistraßiger Nachbehandlung, bestehend aus baugleichen, kontinuierlich betriebenen Filtern mit unterschiedlichem Filtermaterial (granulierte Aktivkohle und Sand), ausgeführt wird, soll noch im Sommer 2017 erfolgen.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, weitergehende Reinigung, Spurenstoff, anthropogen, Planung, Ozonung, Nachbehandlung, Strömungssimulation, Energie

DOI: 10.3242/kae2017.07.003

Abstract

Pilot project “Advanced Wastewater Treatment” at the WWTP in Weißenburg Experiences in Planning and Scientific Monitoring

The research project at the wastewater treatment plant Weißenburg covers additionally to a basic evaluation and comprehensive inventory, a micropollutant monitoring and a test procedure to evaluate the treatability of wastewater with ozone. Furthermore, a flow simulation of the ozone reactor and an estimation of the energy consumption of the advanced purification stage were elaborated. Based on these experiences and the scientific approach, the detailed investigations and the collection of required basic and dimensioning relevant data were fundamental for an economical decision in the planning process. Thus, scientific findings optimized the planning. Start of operation of the advanced purification stage, consisting of an ozone reactor and a two-stage post-treatment with two identical continuously flushed filters with different filter material [granulated activated carbon (GAC) and sand], will be in summer 2017.

Key words: wastewater treatment, municipal, advanced wastewater treatment, micro-pollutant, anthropogenic, planning, ozonization, post-treatment, flow simulation, energy

1 Zielstellung des Pilotprojekts, Projektbeteiligte

Kommunale Kläranlagen gelten für viele anthropogene Spurenstoffe als wesentlicher Eintragungspfad in den Wasserkreislauf [1]. Insbesondere Arzneimittelwirkstoffe werden aufgrund ihrer meist schlechten biologischen Abbaubarkeit nur bedingt eliminiert. Sollen diese Spurenstoffe in Kläranlagen gezielt ebenfalls reduziert werden, ist eine zusätzliche sogenannte vierte Reinigungsstufe notwendig.

In Weißenburg wird mit Förderung des Freistaats Bayern erstmals für Bayern eine derartige Nachrüstung im Rahmen eines Pilotprojekts großtechnisch realisiert. Mit dem Vorhaben möchte man praktische Erkenntnisse zu Planung/Dimensionierung, Betrieb und Leistungsfähigkeit einer vierten Reinigungsstufe gewinnen und andere mögliche Vorhabensträger sowie

Planer von den Erfahrungen profitieren lassen. Zu diesem Zweck wird das Vorhaben im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt ingenieurtechnisch und wissenschaftlich durch die Universität der Bundeswehr München in Kooperation mit der Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft begleitet. Weiterhin wird ein umfassendes begleitendes Untersuchungsprogramm durch das Bayerische Landesamt für Umwelt, das sowohl chemische als auch biologische Parameter abdeckt, durchgeführt. Die Planung der vierten Reinigungsstufe erfolgt durch das Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner.

In den Voruntersuchungen von [2] wurden die bereits national und international großtechnisch umgesetzten Technologien zur Entfernung von Spurenstoffen bewertet und eine erste

Festlegung für die anzuwendenden Technologien für das bayrische Pilotprojekt erarbeitet. Im Ergebnis sollte bevorzugt eine Ozonungsanlage mit nachgeschalteter Reinigungsstufe, bestehend aus einem Filter mit granulierter Aktivkohle (GAK) oder einer biologischen Stufe zum Abbau der bei der Ozonung entstehenden Transformationsprodukte, eingesetzt werden. Diese Empfehlung wurde im weiteren Planungsprozess mit Modifikationen näher betrachtet. Die Nachbehandlung der Ozonung wird mit baugleichen Filtern, aber unterschiedlichem Filtermaterial ausgestattet, um die Effektivität des adsorptiven und biologischen Abbaus von anthropogenen Spurenstoffen anhand verschiedener Filtermaterialien [GAK als biologisch aktivierte Kohle (BAK) sowie Sand] untersuchen zu können.

2 Beeinflussbarkeit in der Projektplanung

Bei Projekten zur weitergehenden Abwasserbehandlung beziehen sich die Ziele auf die Einhaltung von Grenzwerten oder die Verbesserung der Gewässergüte. Die zu definierende Zielsetzung und eine detaillierte Erfassung des Bestandes und Klärung der Grundlagen sind daher entscheidende Voraussetzungen für die Errichtung einer vierten Reinigungsstufe. Aktuell gibt es in Deutschland keine rechtlich verbindlichen Vorgaben für die Elimination von Spurenstoffen auf Kläranlagen. Umgesetzte Maßnahmen erfolgten daher bisher im Wesentlichen auf freiwilliger Basis und mit finanzieller Förderung der Länder. Für die Zukunft lassen sich rechtlich verbindliche Anforderungen jedoch nicht ausschließen [3]. In Zukunft könnte im Vollzug der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sowie der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) eine gezielte Elimination vom Gesetzgeber gefordert werden. Ein Positionspapier des Umweltbundesamts [4] fordert zum Beispiel die Fortschreibung des Stands der Technik und die Einführung weitergehender Abwasserbehandlungsverfahren bei Kläranlagen der Größenklasse 5 sowie bei kleineren Kläranlagen an sensitiven Gewässern.

Das Reinigungsziel einer weitergehenden Abwasserbehandlung zur Elimination von anthropogenen Spurenstoffen kann sich sowohl nach einem emissionsbasierten als auch nach einem immissionsbasierten Ansatz (Grenzwertvorgabe für gewässerspezifische Einzelparameter) orientieren. Für den emissionsbasierten Ansatz wird das Erreichen des Reinigungsziels durch Sicherstellung eines definierten Eliminationsgrads, bezogen auf die Gesamtkläranlage für ausgewählte Indikatorsubstanzen, sowie durch die Vorgabe einer zu behandelnden Abwassermenge überprüft [5]. Die Schweiz hat bereits als erstes Land in Europa verbindliche Reinigungsanforderungen für die Elimination von Spurenstoffen für kommunale Kläranlagen erlassen. Für das Pilotprojekt Weißenburg soll in Anlehnung an das Vorgehen in der Schweiz (vgl. [6]) mindestens eine Reduktionsrate von 80 % (bezogen auf die Gesamtkläranlage) für die Indikatorsubstanzen Amisulprid, Carbamazepin, Citalopram, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Metoprolol und Venlafaxin erreicht werden.

3 Ausgangssituation in Weißenburg

Die Kläranlage Weißenburg wurde als Standort für das Pilotvorhaben im Rahmen eines Auswahlverfahrens vom Bayerischen Umweltministerium ausgewählt. Um die Stadt Weißenburg bei der freiwilligen Errichtung der vierten Reinigungsstu-

fe zu unterstützen, hat der Freistaat Bayern eine staatliche Förderung von 75 % der zuwendungsfähigen Investitionskosten zugesagt.

Die Kläranlage Weißenburg leitet in die Schwäbische Rezat ein. Die örtliche wasserwirtschaftliche Situation ist geprägt durch sehr ungünstige Mischungsverhältnisse im aufnehmenden Gewässer. Unter Niedrigwasserverhältnissen besteht der Abfluss an der Einleitungsstelle zu mehr als 50 % aus behandeltem Abwasser. Im sehr trockenen Sommer 2015 betrug der Anteil von behandeltem Abwasser bis zu 80 %. Die sensiblen wasserwirtschaftlichen Verhältnisse an der Einleitungsstelle waren daher eine wesentliche Voraussetzung für die Auswahl der Kläranlage in Weißenburg. Die vierte Reinigungsstufe soll hydraulisch und räumlich zwischen dem Ablauf Nachklärung und einem neuen Ablaufmessschacht errichtet werden.

4 Vorgehensweise und Ergebnisse

Während des Pilotprojekts Weißenburg wurden neben der Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse ein Spurenstoffscreening, ein Testverfahren zur Ozonierbarkeit des Weißenburger Abwassers, ein Variantenvergleich, eine Strömungssimulation für den Ozonungsreaktor sowie eine Energieprognose für die vierte Reinigungsstufe durchgeführt (Abbildung 1).

4.1 Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse

Die Kläranlage der Stadt Weißenburg befindet sich rund 50 km südlich von Nürnberg und ihre Ausbaugröße beträgt 35 000 Einwohnerwerte (EW). Die aktuelle Belastung der Kläranlage (85-Perzentil des BSB₅ an Trockenwettertagen) beträgt rund 26 100 EW. Der Trockenwetterabfluss (Q_T) beträgt regelmäßig bis zu 288 m³/h und der Mischwasserabfluss zur Kläranlage (Q_M) bis zu 972 m³/h. Das Einzugsgebiet wird weitgehend im Mischsystem entwässert. An die Kläranlage Weißenburg sind rund 17 000 Einwohner angeschlossen. An medizinischen Einrichtungen/Pflegeeinrichtungen im Einzugsgebiet sind insbesondere das Kreisklinikum Weißenburg (200 Betten) mit Facharztzentrum, Radiologie und Dialysestation sowie drei Altenheime zu nennen. Maßgebliche Einleitungen aus der Industrie kommen aus einem Aluminiumwerk (Eloxal und Galvanik), zwei Brauereien, einem Schlachthof sowie verschiedenen mittelständischen Unternehmen der Kunststoffverarbeitung.

Die Abwasserbehandlung erfolgt in einer mechanisch-biologisch-chemischen Kläranlage. Die bestehende Verfahrenstechnik umfasst Rechen, Langsandfang, Vorklärbecken, Tropfkörper, Zwischenklärung, Belebungsbecken und Nachklärbecken. Die Schlammbehandlung erfolgt mittels zweier beheizter Faulbehälter. Das anfallende Faulgas wird über ein Blockheizkraftwerk (BHKW) verstromt.

Die Auswertung der Betriebsdaten erfolgte gemäß ATV-DVWK-A 198 [7]. Weiterhin wurde eine Energieanalyse nach DWA-A 216 [8] durchgeführt, um die Steigerung des Energiebedarfs durch die vierte Reinigungsstufe beurteilen zu können.

In [9] konnte nachgewiesen werden, dass die Gesamteliminationsrate bei Spurenstoffen für eine Teilstrombehandlung bzw. bei einer Auslegung auf den maximalen Trockenwetterzufluss nur geringfügig kleiner ist als bei einer Vollstrombehandlung (Auslegung auf den Mischwasserabfluss). Die erforderlichen hydraulisch zu dimensionierenden Anlagen werden dadurch erheblich kleiner und die Investitions-

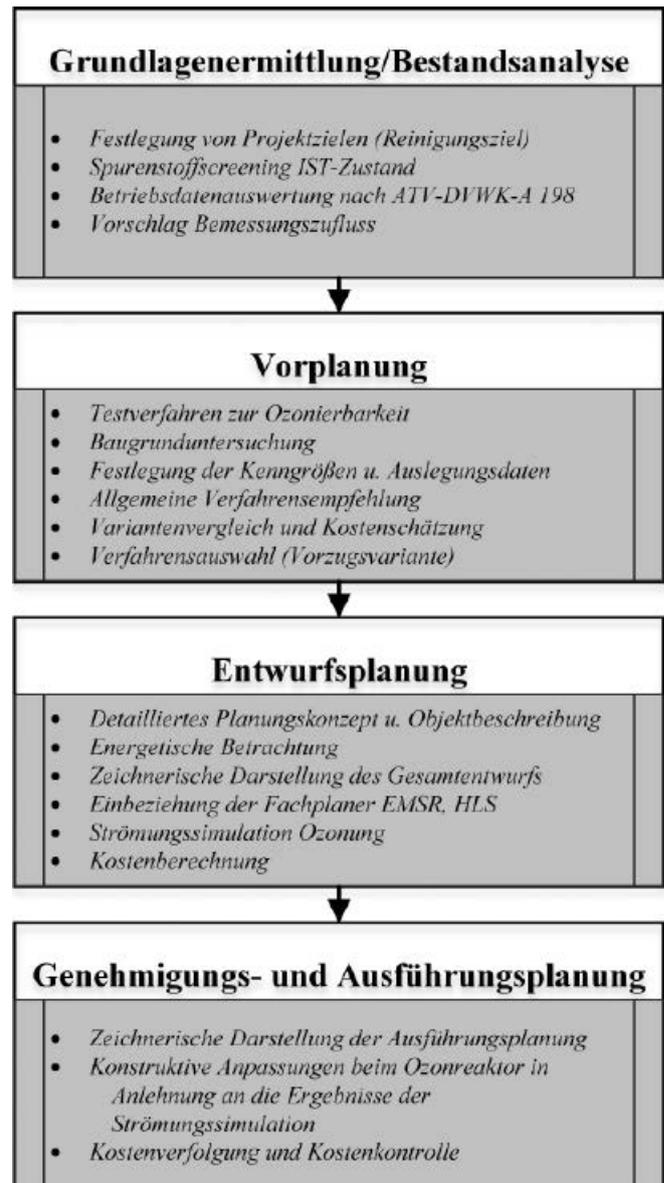


Abb. 1: Vorgehensweise im Planungsverlauf beim Pilotprojekt in Weißenburg

kosten sinken entsprechend. Aus diesem Grund wurde eine Teilstrombehandlung für Weißenburg als ausreichend betrachtet. Für die Bemessung und Auslegung der vierten Reinigungsstufe der Kläranlage Weißenburg wurde ein Bemessungszufluss von 430 m³/h ermittelt. Dieser Wert entspricht dem 80-Perzentil des Abfluss über alle Tage der Jahre 2011 bis 2013. Für die Berechnung wurden die 2h-Mittelwerte (Auslaufmessung Nachklärung) für die Jahre 2011 bis 2013 herangezogen. Eine Vorgehensweise zur Ermittlung der Auslegungswassermenge wird in [5] beschrieben.

Die behandelte Jahresabwassermenge für den Zeitraum 2011 bis 2013 betrug im Mittel rund 2,9 Millionen m³/a. Mit dem gewählten Bemessungszufluss können rund 86 % der Jahresabwassermenge (ca. 2,5 Millionen m³/a) in der vierten Reinigungsstufe behandelt werden. Abbildung 2 zeigt anhand des blau gekennzeichneten Bereichs die behandelte Abwassermenge für den festgelegten Bemessungswert (430 m³/h) für alle Tage (Q_h) und für Trockenwettertage (Q_{h,TW}).

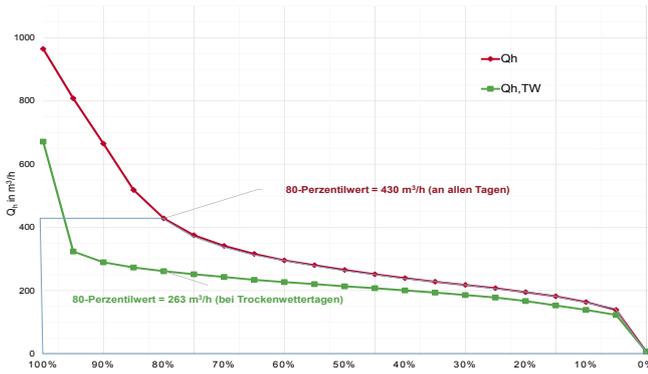


Abb. 2: Behandelte Abwassermenge für den festgelegten Bemessungswert (430 m³/h); Basis: 2h-Mittel des Abflusses

4.2 Spurenstoffscreening Ist-Zustand

Zusätzlich zu den Standardparametern (vgl. mit Betriebstagebuch) wurde ein erweitertes Monitoring der anthropogenen Spurenstoffe durchgeführt, das auf die standortspezifischen Bedingungen, zum Beispiel infolge von Indirekteinleitern, und die Vorbelastung des Gewässers sowie die geplante Anlage zur Spurenstoffelimination, abgestimmt wurde.

Im Rahmen des Spurenstoffscreenings wurden unter anderem der Gesamt Ablauf der Kläranlage Weißenburg [nach der Nachklärung (NK)] sowie der Ablauf der Vorklärung (VK) beprobt (zeitproportionale 24h-Mischproben). Die gemessenen Konzentrationen bewegen sich in einer durchschnittlichen Größenordnung, wie sie bei Kläranlagenabläufen aus vielen Untersuchungen bekannt sind (vgl. [10–12]). Die in [6] erarbeiteten „Schweizer“ Indikatorsubstanzen konnten nachgewiesen werden, wobei das Korrosionsschutzmittel Benzotriazol eine auffällig hohe Konzentration im Ablauf der Kläranlage Weißenburg aufweist und Mecoprop in drei Frühjahrsproben nicht nachweisbar war. Abbildung 3 (nur Indikatorsubstanzen) und

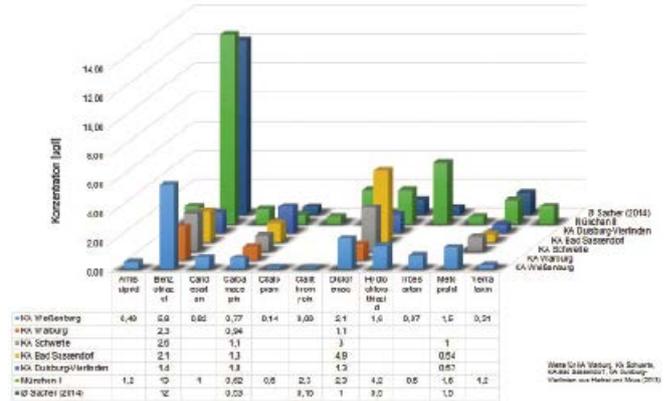


Abb. 3: Vergleich der Konzentrationen der Indikatorsubstanzen im Ablauf von Kläranlagen mit der Kläranlage Weißenburg (Mittelwerte mit n = 15 für die Kläranlage Weißenburg)

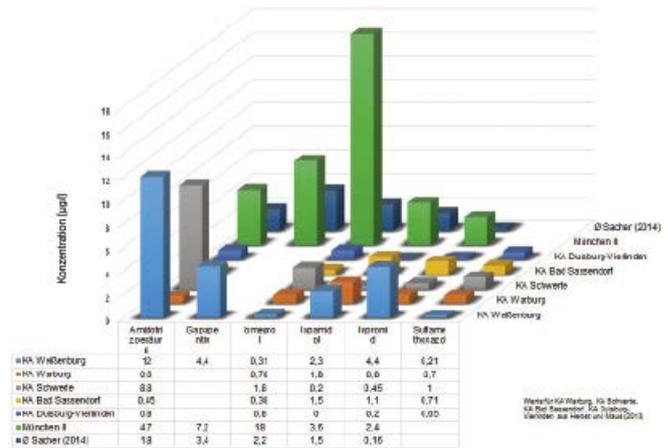


Abb. 4: Vergleich der Konzentrationen von weiteren Spurenstoffen im Ablauf von Kläranlagen mit der Kläranlage Weißenburg (Mittelwerte mit n = 15 für die Kläranlage Weißenburg)

Abbildung 4 (weitere Spurenstoffe) zeigen den Vergleich der gemessenen Konzentrationen auf der Kläranlage Weißenburg (nach NK) mit Literaturdaten (Werte aus [13] und [14]) sowie gemessenen Werten auf der Kläranlage München II (Klärwerk Gut Marienhof). Auch hier zeigt sich, dass die Werte in Weißenburg vergleichbar mit anderen Kläranlagenabläufen sind. Lediglich Iopromid und Amidotrizoesäure sind erhöht (vermutlich bedingt durch das Klinikum Altmühlfranken Weißenburg und Diagnosticum Bayern Mitte – Standort Weißenburg).

Im Jahresverlauf ist zu erkennen, dass die Spurenstoffkonzentrationen im Mai 2015 und Januar/Februar 2016 im Vergleich zu den anderen Monatswerten niedriger sind. Dies ist vermutlich auf einen durch starke Niederschläge verursachten Verdünnungseffekt zurückzuführen. Abbildung 5 veranschaulicht den Jahresverlauf der Spurenstoffkonzentrationen und die Abwassermengen am Ablauf der Kläranlage (Tagesmittelwert der 2h-Werte). Bei höheren Abwassermengen sind tendenziell niedrigere Spurenstoffkonzentrationen zu verzeichnen.

Vergleicht man die Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage mit den Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage, so ist zu erkennen, dass Spurenstoffe durch die Kläranlage unterschiedlich stark eliminiert werden (Abbildung 6). Ein Vergleich mit Literaturwerten (vgl. [14–16]) verdeutlicht eine teilweise signifikante Varianz der Eliminationsgrade bei den betrachteten Stoffen. Die verschiedenen Eliminationsleistungen in den Kläranlagen ergeben sich aufgrund der Unterschiede bei den Temperaturen, den Verweilzeiten in der Anlage, der angewandten Technologie, der biologischen Aktivität des belebten Schlammes, den Niederschlagsereignissen, der Beprobungsart und dem Beprobungsumfang. Die Röntgenkontrastmittel Iopromid (76 %) und Iomeprol (67 %) werden in der Kläranlage Weißenburg im Vergleich zur Literatur deutlich besser reduziert, während die Eliminationsleistungen für Diclofenac und Carbamazepin mit den Literaturangaben vergleichbar sind. Vor allem bei 4-Acetylaminoantipyrin (75 %) und Acesulfam (67 %) und Iopromid (76 %) muss allerdings beachtet werden, dass dort die Zulaufkonzentrationen bereits so hoch sind, dass auch im Ablauf noch hohe Konzentrationen nachgewiesen werden können. Bei den Indikatorsubstanzen liegt die mittlere Elimination der elf untersuchten Substanzen (Mecoprop nicht nachweisbar) bei 23 % (Clarithromycin mit maximal 69 % und Carbamazepin und Venlafaxin mit nahezu 0 %). Daher sind diese Substanzen sehr gut für eine spätere Einschätzung der Leistung der vierten Reinigungsstufe geeignet. Die Belastung mit ande-

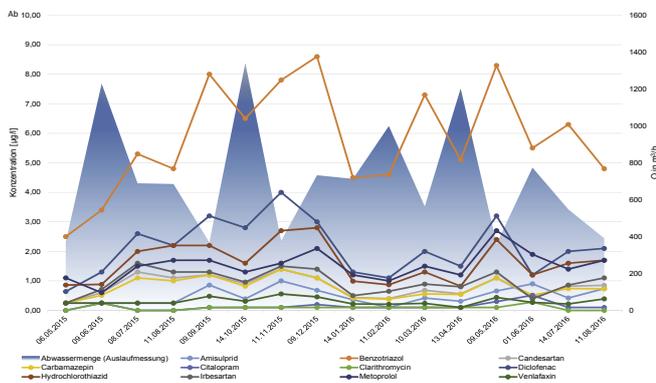


Abb. 5: Konzentrationen der Indikatorsubstanzen und Abwassermengen am Ablauf der Kläranlage Weißenburg – Jahresprofil

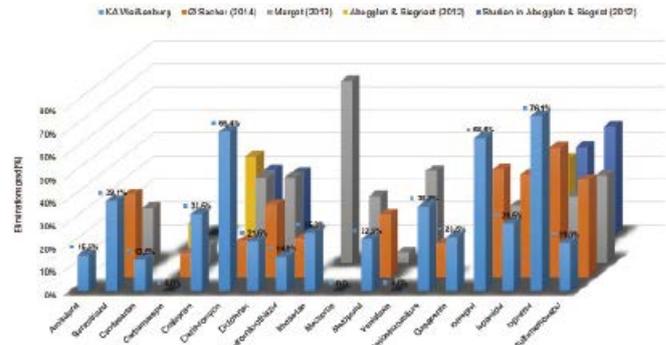


Abb. 6: Vergleich der Eliminationsgrade der Kläranlage Weißenburg mit Literaturangaben

ren Substanzen wie 4-Acetylaminoantipyrin, Acesulfam, Levitiracetam und Pregabalin kann durch die bestehenden Reinigungsverfahren der Kläranlage Weißenburg bereits zu über 70 % reduziert werden (Daten zu diesen Stoffen sind in Abbildung 6 nicht dargestellt).

4.3 Testverfahren Ozonierbarkeit

Für die Feststellung der grundsätzlichen Eignung des Kläranlagenablaufs für eine Ozonung wurde ein Laborversuch (CSB- und SAK-Abbau bei verschiedenen Ozondosen) durch die Firma Xylem durchgeführt (eine 24h-Mischprobe). Die benötigte Ozonmenge wurde inklusive einer Reserve auf 3,2 kg O₃/h abgeschätzt. Ein weiterer Laborversuch für die Validierung der Bemessungsparameter wurde durchgeführt, um zusätzlich Aussagen zum Verhalten von Ozon im vorgereinigtem Abwasser, zur OH-Radikal-Ausbeute sowie zur Bildung von toxischen Nebenprodukten treffen zu können und um Effizienzprobleme bei der Spurenstoffelimination frühzeitig zu identifizieren. Hierzu wurde ein Teil des modularen Testverfahrens nach [17] angewendet. Mit den verschiedenen labortechnischen Untersuchungen (Batchsystem) wurde die Firma Envilab in der Schweiz beauftragt. Dafür wurde eine Wochenmischprobe vom Ablauf der Nachklärbecken der Kläranlage Weißenburg verwendet. Folgende Arbeitspakete wurden ausgeführt:

- Charakterisierung des Abwassers und Bestimmung der Prozessparameter sowie der Ozonzehrung und der OH-Radikal-Ausbeute bei drei verschiedenen Ozondosen in einer Probe (Wochenmischprobe)
- Ermittlung des Spurenstoffabbaus für die Ozonung (Wochenmischprobe)
- Bestimmung der Bromidbelastung in zehn Proben (Tagesmischproben) und des Oxidationsnebenprodukts Bromat in einer Probe (Wochenmischprobe).

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass keine auffälligen Punkte identifiziert wurden, welche die Implementierung einer Ozonung auf der Kläranlage Weißenburg grundsätzlich ausschließen würden. Zudem wurde bei einer Dosierung von 0,5 g O₃/g DOC keine signifikante Bromatbildung gefunden. Durch die Untersuchungen zur Ozonstabilität konnte festgestellt werden, dass die Expositionen (= Restkonzentration × Reaktionszeit) von Ozon (mit 0,0027 mol × s) und von Hydroxyl-Radikalen ([•]OH) (mit 1,74 × 10⁻¹⁰ mol × s) bei einer Ozon-

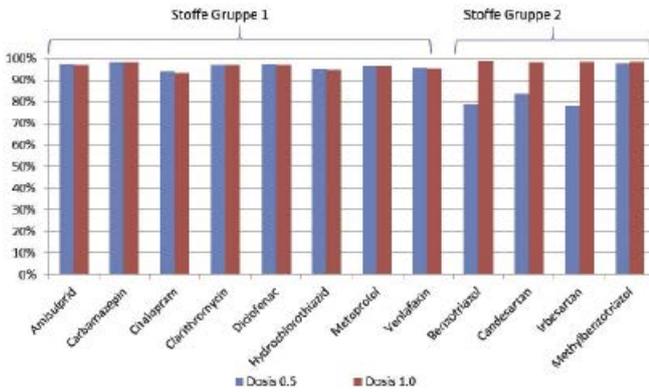


Abb. 7: Abbauleistung der Ozonung bei 0,5 und 1,0 g O₃/g DOC in Batch-Versuchen mit Abwasser der Kläranlage Weißenburg (Gruppe 1: sehr gut oxidierbar, Gruppe 2: gut oxidierbar)

dosis von 0,5 g O₃/g DOC nach [18] und [17] im erwarteten Bereich für unproblematische Abwässer liegen. Treten im Vergleich zu Referenzabwässern (siehe [18] und [17]) signifikante Abweichungen auf, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Abwassermatrix stark von den bereits untersuchten Abwasserproben unterscheidet. Dies weist auf andere ozonzehrende Inhaltsstoffe hin, was potenziell zu einer erhöhten Bildung von Transformations- oder Oxidationsnebenprodukten und erhöhten Ozondosen führen kann [17].

Mit einer Ozondosis von 0,5 g O₃/g DOC, die im Fall der untersuchten Probe der Kläranlage Weißenburg 5,6 g O₃/m³ Ab-

wasser entspricht (2,5 g O₃/m³ wurden alleine zur Oxidation von Nitrit benötigt), wurde eine Abbauleistung von 90 % für die Ozonung erreicht, gemessen anhand von zwölf Spurenstoffen (Abbildung 7). Die hier eruierten Ozonabbauraten der einzelnen Stoffe sind aufgrund der im Laborversuch optimalen Ozoneinbringung tendenziell leicht höher als auf Pilotanlagen oder großtechnischen Anlagen. Verschiedene aktuelle Pilotanlagen haben aber gezeigt, dass bei einer Dosierung von 0,5 g O₃/g DOC in kommunalem Abwasser durchaus auch eine mittlere Elimination dieser zwölf Stoffe von > 85 % erreicht werden kann (vgl. [15, 19]).

4.4 Verfahrensempfehlung und Variantenvergleich

Die Vorteile der Verfahrenskombination Ozonung mit BAK wurden unter anderem für die Trinkwasseraufbereitung bereits von [20–22] erkannt. Für die Abwasserbehandlung wird unter anderem in [15] der Einsatz einer der Ozonung nachgeschalteten Stufe zum Abbau von entstehenden Transformationsprodukten empfohlen. Ein biologisch aktivierter Kohlefilter kann bei entsprechender Betriebsweise (Ausbildung einer Biozönose) sehr hohe Eliminierungsraten für bestimmte anthropogene Spurenstoffe in Kombination mit einer vorhergehenden Ozonung erzielen. Forschungsergebnisse hierzu finden sich unter anderem in [23–28]. Hier konnten geringfügige bis verbesserte bzw. höhere Spurenstoffentfernungen (abhängig von den betrachteten Zielsubstanzen) sowie höhere Eliminationsraten für Toxizitäten beobachtet werden als im Vergleich zur alleinigen

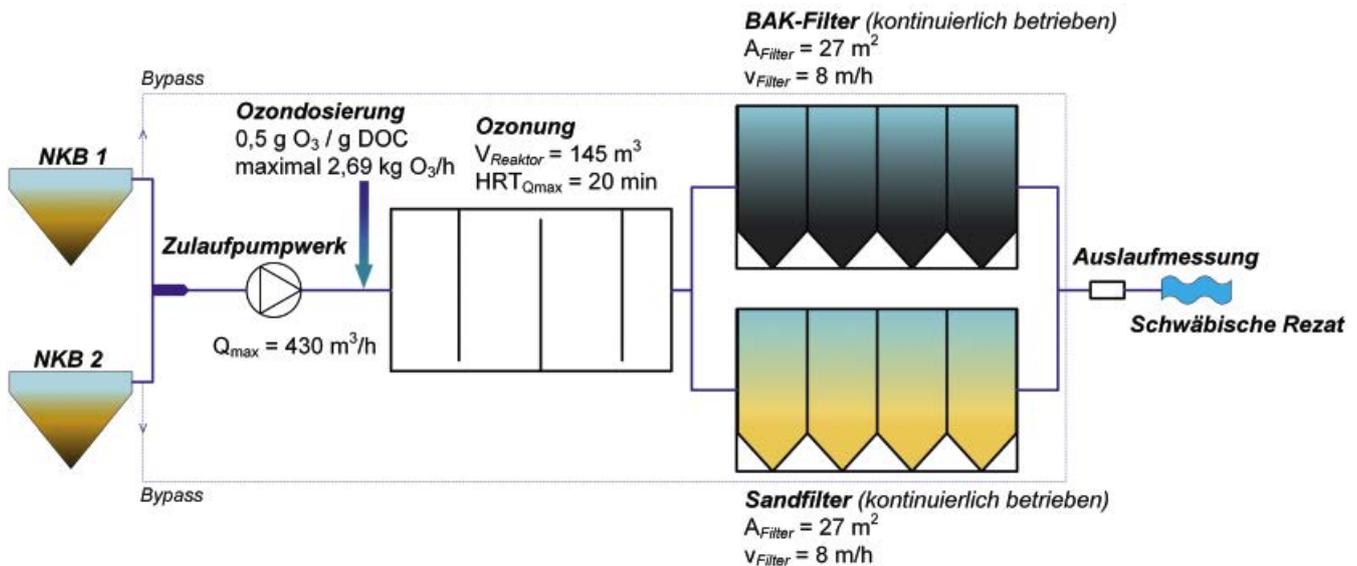


Abb. 8: Grundfließschema der vierten Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg

Ozonung oder Filterstufe. Darüber hinaus kann die Ozonung die Standzeit (Verschiebung der Durchbruchkurven) von Filtern verlängern. Neben der Erhöhung der Bioverfügbarkeit der DOC-Fractionen [biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) und assimilable organic carbon (AOC)] verringert die Ozonung die Adsorbierbarkeit der organischen Hintergrundorganik, womit die Adsorbierbarkeit der Spurenstoffe verbessert wird [29]. Da die Untersuchungen bislang vor allem im halbertechnischen Maßstab erfolgten, fehlen zurzeit noch weitgehende Erfahrungen aus großtechnischen Anlagen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Literatur und der Grundlagenermittlung wurde in der Vorplanung des Ingenieurbüros Dr. Resch + Partner eine Variantenuntersuchung mit Kostenvergleichsrechnung nach [30] durchgeführt. Dabei wurden die Varianten Ozonung mit BAK-Filter, Ozonung mit BAK- und Sand-Filter sowie Ozonung mit biologischem Festbett erarbeitet, bewertet und miteinander verglichen. Die Ozonung mit zweistraßiger Nachbehandlung, bestehend aus je einem BAK- und einem Sand-Filter, wurde favorisiert (Abbildung 8). Mit dieser Variante können drei verschiedene Verfahrensmöglichkeiten der nachgeschalteten Stufe erprobt und analysiert werden (GAK-Adsorptionsfilter, BAK- und Sand-Filter). Gegenüber der Variante mit einem nachgeschalteten, biologischen Festbett ist eine deutlich höhere Elimination von Spurenstoffen zu erwarten (vgl. [31]). Die in der Vorplanung geschätzten Investitionskosten lagen bei allen betrachteten Verfahren bei ca. 2 bis 2,2 Millionen Euro.

Die Planung der Vorzugsvariante wurde nach EU-weiter Ausschreibung der Planungsleistung (VOF-Verfahren) an das Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner vergeben. Die vierte Reinigungsstufe besteht aus den Anlagenteilen Zulaufpumpwerk, Ozonung sowie Filtration und wird zwischen dem Ablauf der beiden bestehenden Nachklärbecken und dem bestehenden Auslaufmessschacht der Kläranlage angeordnet. Die Ozonzugabe erfolgt vor dem Reaktor über ein Pumpe-Injektorsystem. Die Filteranlagen werden als kontinuierlich betriebene Filter (Rutschbettfilter) ausgeführt. Wassermengen über $430 \text{ m}^3/\text{h}$ werden im Bypass über die bestehenden Leitungen an der Anlage vorbei geleitet. Die der Ozonung nachgeschaltete Filterstufe wird zweistraßig mit einer BAK-Filter-Straße mit vier Fil-

terzellen sowie einer Sandfilter-Straße mit vier Filterzellen ausgeführt. Beide Filterstraßen werden baugleich ausgeführt, um eine spätere Umrüstung auf Aktivkohle zu ermöglichen.

Die Ausschreibung und Vergabe der Bauleistungen erfolgte im Sommer 2016. Der Bau der vierten Reinigungsstufe startete im September 2016. Der Abschluss der Arbeiten soll im Sommer 2017 mit der Inbetriebnahme stattfinden.

4.5 Energetische Betrachtung

Eine Energieanalyse nach DWA-A 216 ergab einen spezifischen Gesamtstromverbrauch der Kläranlage Weißenburg von ca. $28,6 \text{ kWh}/(\text{E} \times \text{a})$ für den Ist-Zustand (ca. 672.000 kWh/a bei einer mittleren CSB-Belastung aller Tage ($\text{EW}_{\text{CSB},120,\text{m}}$) von 23.500 E). Basierend auf den Unterlagen und Daten aus der Entwurfsplanung wurde für die geplante vierte Reinigungsstufe ein spezifischer Stromverbrauch von ca. $13,35 \text{ kWh}/(\text{E} \times \text{a})$ abgeschätzt. Insgesamt ergäbe sich ein fast 47 % höherer jährlicher Energieverbrauch. Der spezifische Gesamtstromverbrauch der Kläranlage mit vierter Reinigungsstufe betrage dann $42 \text{ kWh}/(\text{E} \times \text{a})$. Ausgehend von einer in der vierten Reinigungsstufe behandelten Jahreswassermenge von 2,5 Millionen m^3/a würde der prognostizierte spezifische Stromverbrauch (kein Messwert) der vierten Reinigungsstufe in Weißenburg ca. $0,126 \text{ kWh}/\text{m}^3$ betragen und ist vergleichbar mit aktuellen Mess- und Literaturwerten (vgl. [32]). Parallel zum Bau der vierten Reinigungsstufe werden energetische Optimierungsmaßnahmen durchgeführt, um den zukünftigen Strombedarf der Kläranlage Weißenburg zu reduzieren.

4.6 Strömungssimulation für die geplante Ozonungsanlage

Zur konstruktiven Optimierung des Ozonreaktors erfolgte eine hydraulische Modellierung der Strömungs- und Durchmischungsverhältnisse durch die Firma FlowConcept. Die entsprechende Modellgeometrie (Reaktor, Abstand zwischen Einleitstelle und Reaktor, Rohrlänge zwischen Injektor und Einleitstelle etc.) sowie die Randbedingungen und Betriebsdaten wurden durch das planende Ingenieurbüro festgelegt. Es wurde für ein Zwei-Phasen-Gemisch, bestehend aus Wasser und

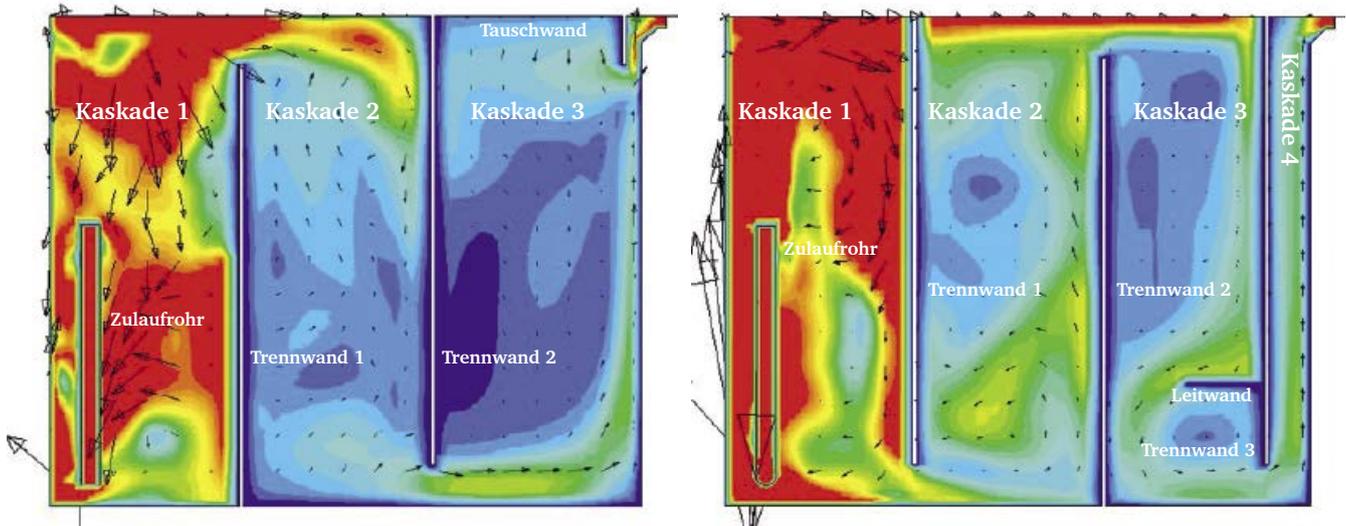


Abb. 9: Geschwindigkeitsverteilung im Reaktor-Längsschnitt (rot = 0,2 m/s, gelb = 0,13–0,14 m/s, blau = 0 m/s) für den Planungszustand (links) und die Optimierungsvariante 2 (rechts) (Abbildungen der Fa. FlowConcept)

gasförmigem Sauerstoff-Ozon-Gemisch, die Strömung dreidimensional und zeitabhängig für die relevanten Lastfälle berechnet.

Die Simulationsergebnisse zeigen für den Planungszustand, dass in der ersten Kaskade bei sehr hohen Geschwindigkeiten eine gute Einmischung des Zulaufstromes erfolgt, dass aber in den folgenden Kaskaden die Aufenthaltszeit stark eingeschränkt ist, was durch die Anordnung der Trennwände zwischen den Kaskaden bedingt war. Eine Walzenströmung und Durchmischung in Kaskade 2 und 3 war nicht festzustellen.

In einer ersten Optimierungsvariante wurde daher die Anordnung dieser Wände dahingehend verändert, dass die erste Wand unterströmt und die zweite überströmt wurde. Zusätzlich wurde eine dritte Wand statt der verkürzten Tauchwand vor dem Ablauf angeordnet. Die Ergebnisse zeigten eine verbesserte Einmischung in Kaskade 2, jedoch kam es zu einer Kurzschlussströmung vom Zulauf bis zur zweiten Trennwand. Um diese zu reduzieren, wurden in einer zweiten Optimierungsvariante die Zulauföffnungen am Zulaufrohr um 45° in Richtung Wasseroberfläche gedreht. Des Weiteren wurde eine horizontale Leitwand an der dritten Trennwand angeordnet, um die Abströmung aus der Kaskade 3 zur Kaskade 4 und damit zum Ablauf zu verlangsamen. Es zeigte sich, dass durch die veränderten Austrittsöffnungen die gesamte Abströmung aus dem Rohrleitungssystem verändert wurde, da das Wasser-Gas-Gemisch nun frei, ohne Begrenzung durch die Wand austreten konnte. Die Geschwindigkeiten in der Kaskade 1 stiegen an, jedoch wurde auch die Vermischung intensiviert. Insgesamt konnte eine Verlängerung der Aufenthaltszeiten verzeichnet werden. Aufgrund der gewonnen Erkenntnisse wird die Optimierungsvariante 2 für die bauliche Ausführung des Ozonreaktors berücksichtigt. Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen Planungszustand und zweiter Optimierungsvariante ist in Tabelle 1 und Abbildung 9 dargestellt.

5 Fazit

In Deutschland existiert keine einheitliche Vorgehensweise, die eine Erweiterung der Kläranlagen um eine vierte Reinigungsstufe im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung ermöglicht.

Rechtliche Vorgaben und ein entsprechendes technisches Regelwerk existieren hierzu bisher nicht. Die im Pilotprojekt durchgeführten Untersuchungen und die wissenschaftlich gestützte Vorgehensweise sollen dazu beitragen, den Planungsprozess zu optimieren und den Wissensgewinn zu erhöhen.

Merkmale	Planungszustand	Optimierungsvariante 2
Lastfall	$Q_{\text{Zulauf}} = 430 \text{ m}^3/\text{h}$; $Q_{\text{Bypass}} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{Ozongas}} = 18 \text{ m}^3/\text{h}$	
Geschwindigkeitsverteilung (Abbildung 9)	<ul style="list-style-type: none"> ● gute Einmischung des Zulaufstroms nur in Kaskade 1 und hohe Geschwindigkeiten im Einstrombereich ● geringe Geschwindigkeiten und reduzierte Aufenthaltszeiten in Kaskade 2 und 3 	<ul style="list-style-type: none"> ● wandnahe Strömungen in Richtung Kaskade 2 werden reduziert ● Schwankungen der Ozongasfahnen in eine Richtung begünstigt ● keine geschlossene Walzenbewegung in Kaskade 2, dafür zwei Walzenbewegungen in Kaskade 3 ● verbesserte Durchmischung in Kaskade 2 und 3 durch Quervermischungen ● Verlängerung der Aufenthaltszeit
Verteilung des Ozongases (Grafiken nicht dargestellt)	<ul style="list-style-type: none"> ● bodennahe Sammlung des Ozongases in den außenwandnahen Eckbereichen in Kaskade 1 ● in Kaskade 3 kein Ozongas mehr 	<ul style="list-style-type: none"> ● Ozongas strömt insbesondere an den Öffnungen aus ● keine nennenswerte Menge des Ozongases in Kaskade 2 und 3
Tracerverteilung (Grafiken nicht dargestellt)	<ul style="list-style-type: none"> ● zu schneller Transport von Kaskade 1 bis zum Ablauf ● im Ablauf höhere Konzentrationen als in Kaskade 3 	<ul style="list-style-type: none"> ● höhere Tracerkonzentration und bessere Einmischung des Tracers in den ersten beiden Kaskaden

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen Simulationsvarianten

Ausgehend von den bisherigen Erfahrungen in Weißenburg können für die Errichtung einer vierten Reinigungsstufe und zur Erhöhung der Planungssicherheit unter anderem folgende planerische Hinweise gegeben werden:

- Ausführliche Untersuchungen und Erhebungen aller notwendigen Basisdaten und bemessungs- sowie projektrelevanten Informationen sind die Grundlage für eine wirtschaftliche Entscheidung im Planungsverlauf. Im Zuge der Grundlagenermittlung und Bestandsanalyse können u. a. folgende Erhebungen von Belang sein:
 - Bestandsaufnahme (Ist-Zustand, Bausubstanz, Verfahrens- und Maschinenteknik, EMSR, bestehende Kapazitäten, Boden- und Grundwasserverhältnisse etc.) und Auswertung der Ablaufwerte bzw. der Standard-Abwasserparameter sowie der hydraulischen Belastung bzw. der Wassermengen (gemäß ATV-DVWK-A 198)
 - gegebenenfalls Bewertung des energetischen Ist-Zustands (nach DWA-A 216)
 - gegebenenfalls Spurenstoffscreening im Gewässer und am Kläranlagenzulauf und -ablauf sowie Ermittlung der Reinigungsleistung der Kläranlage.
- Für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens und zur Erhöhung der Planungssicherheit können unter Berücksichtigung der Zielvorgaben Pilotversuche, Testverfahren zur Ozonierbarkeit, Schnelltests [zum Beispiel Rapid small-scale column test (RSSCT) für GAK-Filter] und Simulationsberechnungen (zum Beispiel für Ozonung) vorteilhaft sein.
- Insbesondere beim Einsatz einer Ozonung ist es sinnvoll, das Abwasser früh in der Planungsphase auf seine Eignung zu untersuchen. Je nach Abwassereigenschaften kann es gegebenenfalls zur Bildung von Nebenprodukten (zum Beispiel Bromat) oder auch zu erhöhten Betriebskosten bzw. Ozondosen durch ozonzehrende Inhaltsstoffe (zum Beispiel Nitrit) kommen.
- Für eine bestimmte Anwendung hängt die Auswahl des geeigneten Verfahrens neben der Wirtschaftlichkeit von vielen weiteren Faktoren und Kriterien, wie zum Beispiel ökologischen Auswirkungen, Ressourcenverbrauch und Arbeitssi-

cherheit, ab und kann mithilfe einer Liste von Kriterien getroffen werden (siehe unter anderem [33, 34, 5]), die auch nicht monetarisierbare Bewertungskriterien berücksichtigt, die entsprechend der definierten Zielsetzung für jeden Standort gewichtet werden können.

Dank

Besonderer Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz sowie dem Projektträger Bayerisches Landesamt für Umwelt für die finanzielle Unterstützung des Projekts. Weiterhin möchten wir uns bei den verschiedenen Projektpartnern (Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner, Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft, Kläranlage Weißenburg) sowie den Firmen Envilab AG (Dr. Christian Götz) und FlowConcept für ihre fachliche Unterstützung bedanken.

Literatur

- [1] *Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer*, Umweltbundesamt, Texte 85/2014, Dessau-Roßlau, 2014
- [2] Rödel, S., Günther, F. W., Bleisteiner, S.: Technologien für die Elimination anthropogener Spurenstoffe auf kommunalen Kläranlagen – Strategie für Bayern, *gwf-Wasser/Abwasser* 2014, 155 (5), 648–658
- [3] Bleisteiner, S., Sengl, M., Rödel, S.: Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg, *Tagungsband der 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft*, 2.–4. März 2016, Essen, 53/1–53/8
- [4] *Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern, Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2015
- [5] Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (KOM-M.NRW): *Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination*, 2. Aufl., Hrsg. v. Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW, 2016
- [6] Götz, C., Otto, J., Singer, H.: Überprüfung des Reinigungseffektes. Auswahl geeigneter organischer Spurenstoffe, *Aqua & Gas* 2015 (2), 34–40
- [7] Arbeitsblatt DWA-A 198: *Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen*, Hennef, 2003
- [8] Arbeitsblatt DWA-A 216: *Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen*, Hennef, 2015

- [9] Metzger, S.: *Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser*, München, Oldenbourg Industrie-verlag, 2010
- [10] Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J.: A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment, *Science of The Total Environment* 2014, 473–474, 619–641
- [11] Grünebaum, T., Jardin, N., Lübken, M., Wichern, M., Lyko, S., Rath, L.: Untersuchung verschiedener Verfahren zur weitergehenden Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen im großtechnischen Maßstab, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2014, 61 (10), 876–884
- [12] *Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen*, DWA-Themenband, T3/2015, Hefen, 2015
- [13] Herbst, H., Maus, C.: *Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Warburg*, Machbarkeitsstudie, Hrsg. v. Grontmij GmbH und IUTA, Köln, 2013
- [14] Sacher, F., Thomas, A., Lehmann, M., Scherer, I., Stier, K., Maier, U.: *Spurenstoffinventar der Fließgewässer in Baden-Württemberg. Ergebnisse der Beprobung von Fließgewässern und Kläranlagen 2012/2013*, Hrsg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2014
- [15] Abegglen, C., Siegrist, H.: *Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser*, Umwelt-Wissen Nr. 1214, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2012
- [16] Margot, J., Kienle, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., Alencastro, L. F.: Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Science of The Total Environment* 2013, 461–462, 480–498
- [17] Wunderlin, P., Mestankova, H., Salhi, E., Wildhaber-Schindler, Y., Schäfer, M., Schirmer, K., Gunten, U.: Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon. Testverfahren zur Beurteilung, *Aqua & Gas* 2015, 7/8, 28–37
- [18] Wildhaber, Y., Mestankova, H., Schäfer, M., Schirmer, K., Salhi, E., Gunten, U.: Novel test procedure to evaluate the treatability of wastewater with ozone, *Water Research* 2015, 75, 324–335
- [19] Schachtler, M.: *Erfahrungen aus der Praxis: Erste Ozonung in der Schweiz – Betriebserfahrungen*, Vortrag im Rahmen der DWA-Landesverbandstagung Baden-Württemberg 2015, KomS-Technologieforum zur Spurenstoffelimination – Innovationen und Technik, Pforzheim, 16. Oktober 2015
- [20] Eberhardt, M., Madsen, S., Sontheimer, H.: *Untersuchungen zur Verwendung biologisch arbeitender Aktivkohlefilter bei der Trinkwasseraufbereitung*, Veröffentlichungen des Bereichs und des Lehrstuhls für Wasserchemie der Universität Karlsruhe, Heft 7, 1974
- [21] Sontheimer, H., Heilker, E., Jekel, M., Nolte, H., Vollmer H. F.: The Mühlheim Process, *Journal – American Water Works Association* 1978, 70 (7), 393–396
- [22] Sontheimer, H.: Applying Oxidation and Adsorption Techniques: A Summary of Progress, *Journal – American Water Works Association* 1979, 71 (11), 612–617
- [23] Reungoat, J., Escher, B. I., Macova, M., Argand, F. X., Gernjak, W., Keller, J.: Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents, *Water Research* 2012, 46 (3), 863–872
- [24] Zhu, I. X., Wang, J., Wieland, A.: Ozone-Enhanced Biologically Active Filtration for Wastewater Reuse, *Journal – American Water Works Association* 2015, 107 (12), E685–E692
- [25] Kreuzinger, N., Haslinger, J., Kornfried, L., Schaar, H., Saracevic, E., Winkelbauer, A.: *KomOzAk – Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer mit Ozon sowie Aktivkohle für die Entfernung organischer Spurenstoffe*, Abschlussbericht, Hrsg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, TU Wien, 2015
- [26] Knopp, G., Cornel, P.: *Charakterisierung, Kommunikation und Minimierung von Risiken durch neue Schadstoffe und Krankheitserreger im Wasserkreislauf – Teilprojekt 4*, Schlussbericht des Forschungsvorhabens mit dem Förderkennzeichen O2WRS1275D, TU Darmstadt, IWAR, 2015
- [27] Jekel, M., Ruhl, A. S.: *Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken*, Abschlussbericht zum Projekt: Vergleich verschiedener Verfahrensvarianten der weitergehenden Abwasserreinigung zur Entlastung der Berliner Gewässer – Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken, Universitätsverlag der TU Berlin, Berlin, 2016
- [28] Böhler, M., Fleiner, J., Langer, M., McDardell, C. S., Siegrist, H.: Möglichkeiten der biologischen Nachbehandlung nach Ozonung, *Tagungsband des 7. KomS-Technologieforums Spurenstoffe*, 6. Oktober 2016, Lahr, 135–162
- [29] Zietzschmann, F., Mitchell, R.-L., Jekel, M.: Impacts of ozonation on the competition between organic micro-pollutants and effluent organic matter in powdered activated carbon adsorption, *Water Research* 2015, 84, 153–160
- [30] DWA (Hrsg.): *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*, 8. Aufl., Hefen, 2012
- [31] Böhler, M., Fleiner, J., McDardell, C. S., Kienle, C., Schachtler, M., Siegrist, H.: Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung- ReTREAT, Beitrag im Tagungsband zur 49. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft, *49. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft, Wasserwirtschaft 4.0*, Reihe GWA, Bd. 239, Aachen, 2016, 54/1–54/13
- [32] Pinnekamp, J., Mousel, D., Krebber, K., Palmowski, L., Bolle, F. W., Gredigk-Hoffmann, S.: *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen, Phase II*, Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, ENVELOSO – Phase 2 (Az. IV-7-042 600 003 J), RWTH Aachen, 2015
- [33] Rödel, S., Günther, F. W.: *Bewertung vorhandener Technologien für die Elimination anthropogener Spurenstoffe auf kommunalen Kläranlagen*, Hrsg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt Bayern (Augsburg) und Universität der Bundeswehr München (Neubiberg), 2013
- [34] Pinnekamp, J., Letzel, M., Palmowski, L.: *RiSKWa-Leitfaden „Begriffe und Definitionen zu ausgewählten Technologien zur Elimination von Spurenstoffen und Krankheitserregern aus Abwasser*, Hrsg. DE-CEMA, Frankfurt a. M., 2015

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günther

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum

Dipl.-Ing. Sascha Rödel (Korrespondenzautor)

Universität der Bundeswehr München

Institut für Wasserwesen

Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

E-Mail: sascha.roedel@unibw.de

Dr.-Ing. Verena Rehbein

Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH

Ziegelstraße 2, 83629 Weyarn

Dipl.-Ing. Regine Schatz

Dr.-Ing. Tosca Zech

Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner

Holzgasse 28, 91781 Weißenburg

Dr. Manfred Sengl

Marc Eßlinger

Marco Fioretti

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Referat 75: Spezielle Analytik für Umweltüberwachung

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg

PD Dr.-Ing. habil. Michaela Hunze

FlowConcept GmbH

Warmbüchenstraße 15, 30159 Hannover

