ELIMINATION VON MIKROVERUNREINIGUNGEN AUF ARA

AKTUELLER STAND DER VERFAHREN UND KÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN

In diesem Artikel wird der aktuelle Stand der Verfahren zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus dem kommunalen Abwasser dargelegt und aufgezeigt, mit welchen künftigen Entwicklungen zu rechnen ist. Zudem wird auf wichtige Aspekte der Verfahren eingegangen und im Kontext der Verfahrenswahl diskutiert.

Pascal Wunderlin; Aline Meier; Julie Grelot, VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen»*

RÉSUMÉ

ÉLIMINATION DES MICROPOLLUANTS DES STEP: ÉTAT ACTUEL DES PROCÉDÉS ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Dans le cadre du projet «Stratégie Micropoll», différents procédés d'élimination des micropolluants des eaux usées communales ont été testés, l'accent ayant été mis en particulier sur l'ozonation et l'utilisation de charbon actif en poudre (CAP). On a constaté que les deux variantes du procédé étaient économiques, pouvaient bien s'intégrer dans les STEP existantes et éliminaient un large éventail de micropolluants, conformément aux exigences légales. Ce sont désormais des procédés établis et ils n'ont en principe pas changé. Cependant, la mise en œuvre de ces procédés a tendance à être plus compactes et moins onéreuses (par ex. le dosage de CAP au niveau du traitement biologique ou en amont du filtre à sable). Le charbon actif en grains (CAG), dans le filtre fixe dans le filtre à lit fluidisé, est une autre solution technologique en discussion. Il est important que, lors du choix du procédé, les contraintes liées au projet et à l'installation existante soient prises en compte. La version française de cet article sera publiée dans l'édition 1/18 de *Aqua & Gas*.

EINLEITUNG

Organische Substanzen, die in Gewässern in Konzentrationen im Bereich von wenigen Nano- bis Mikrogramm pro Liter vorkommen, werden organische Spurenstoffe respektive Mikroverunreinigungen genannt und nachfolgend als MV bezeichnet. Sie können auf Wasserlebewesen bereits in diesen geringen Konzentrationen nachteilige Effekte haben [1]. Die kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) stellen den wichtigsten kontinuierlichen Eintragspfad für Spurenstoffe dar [2]. Es ist bekannt, dass der Eintrag von MV aus kommunalen ARA und damit auch die ökotoxikologischen Effekte mit technischen Massnahmen wesentlich reduziert werden können, was zu einer Verbesserung der Wasserqualität in der Umwelt führt (z. B. [1, 3]).

Um diese Verbesserungen herbeizuführen, traten am 1. Januar 2016 das revidierte Gewässerschutzgesetz (GSchG) und die revidierte Gewässerschutzverordnung (GSchV) in Kraft. Damit sind in der Schweiz die gesetzlichen Grundlagen für den gezielten Ausbau von ARA um eine zusätzliche Reinigungsstufe geschaffen. Die Kriterien gemäss GSchV zur Auswahl der betroffenen ARA richten sich nach drei Zielen:

- Schutz der aquatischen Tier- und Pflanzenwelt
- Qualitätssicherung der Trinkwasserressourcen
- Reduktion der ins Ausland abgeleiteten Menge an MV, denn als Oberlieger trägt die Schweiz eine besondere Verantwortung gegenüber flussabwärts liegenden Ländern.

* Kontakt: pascal.wunderlin@vsa.ch

ALLGEMEINE ASPEKTE UND ANFORDERUNGEN AN DIE VERFAHREN

Die Verfahrenswahl trifft die ARA in enger Zusammenarbeit mit dem zuständigen Planungsbüro sowie in Absprache mit den kantonalen Behörden. Die Abgeltungsberechtigung richtet sich nach der Vollzugshilfe «Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasseranlagen: Finanzierung von Massnahmen» [4], wobei folgende gesetzliche Grundsätze berücksichtigt werden müssen:

- Zweckmässige Planung
- Sachgemässer Gewässerschutz
- Stand der Technik
- Wirtschaftlichkeit

Unter Berücksichtigung der relevanten Randbedingungen, ist somit eine systematische Herangehensweise notwendig. Das gewählte Verfahren muss die wirtschaftlichste Massnahme darstellen und am kostengünstigsten ausgeführt werden. Im Weiteren muss dadurch der Zustand des Gewässers verbessert werden. Dies bedeutet, dass beispielsweise bei Aktivkohleverfahren der Eintrag an Feststoffen (aufgrund von Aktivkohle-Schlupf) in die Gewässer minimal gehalten werden soll. Mit den bekannten, etablierten Abtrennverfahren ist das gewährleistet. Bei der Ozonung muss eine übermässige Bildung von stabilen toxischen Reaktionsprodukten (z. B. Bromat) vermieden werden. Zudem muss das gewählte Reinigungsverfahren dem Stand der Technik entsprechen und eine Reinigungsleistung von 80% für ausgewählte Substanzen gegenüber Rohwasser erreichen [5].
Im Jahr 2012 wurde ein umfassender Überblick über die Verfahrenstechnik zur Elimination von MV aus dem kommunalen Abwasser gegeben [2]. Seitdem haben sich die Verfahren weiterentwickelt. Im vorliegenden Artikel wird auf den aktuellen Stand der Verfahrenstechnik eingegangen und auf relevante Aspekte hingewiesen, die es im Zusammenhang mit der Verfahrenswahl zu berücksichtigen gilt.

VERFAHRENSBESCHRIEB

Mikroverunreinigungen können mit Ozon oder Aktivkohle aus dem kommunalen Abwasser eliminiert werden. Es zeigt sich, dass diese Verfahren über die letzten Jahre tendenziell kompakter und günstiger geworden sind. Weitere Verfahren werden in aktuell laufenden Langzeituntersuchungen getestet.

VERFAHREN MIT OZON (OXIDATION DER MV)

Die Ozonung wird der bestehenden ARA nachgeschaltet (nach Nachklärung, vor biologisch aktiver Nachbehandlungsstufe, *Fig. 1*), da eine gute biologische Reinigung von Vorteil ist: Nitrit (NO_2^-) wie auch organische Stoffe (DOC) zehren Ozon und sollten daher im Zulauf zur Ozonung in möglichst geringen Konzentrationen vorliegen. Ozon wird aus Sauerstoff vor Ort hergestellt und im Ozonreaktor mit dem gereinigten Abwasser in Kontakt gebracht. Bei der Ausführung des Ozonreaktors ist darauf zu achten, dass keine Kurzschlussströmungen auftreten. Mittels vorgängiger Visualisierung der Hydraulik kann dies vermieden werden. Die Aufenthaltszeit im Kontaktreaktor ist so zu wählen, dass auch bei Regenwetter ausreichend Zeit bleibt, damit das Ozon abreagieren kann und nicht auf die biologische Nachbehandlungsstufe durchschlägt. Auf der ARA Neugut (Dübendorf) liegt die minimale Aufenthaltszeit im Ozonreaktor bei 13 Minuten und die mittlere Aufenthaltszeit bei 37 Minuten. Die Ozonung auf der ARA Reinach (Oberwynental) weist eine minimale Kontaktzeit von 14 Minuten und eine mittlere Aufenthaltszeit ($Q_{TW,max}$) von 25 Minuten auf.
Im Umgang mit Ozon und Sauerstoff müssen sicherheitstechnische Aspekte berücksichtigt werden. Beispielsweise muss das Restozon in der Abluft zerstört werden, bevor es in die Umgebung abgegeben wird, da es sich um ein Reizgas handelt [6, 7]. Bisherige Betriebserfahrungen zeigen, dass der spezifische Ozonverbrauch zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen tendenziell tiefer ist (im Bereich von 0,4 bis 0,7 mg O_3/mg DOC), als aufgrund von Pilotversuchen angenommen (0,6 bis 1 mg O_3/mg DOC; [2]). Dies ist nicht zuletzt auf neue Regelstrategien und eine gute biologische Behandlung (Nitrit < 0,1 mg N/l) zurückzuführen. So stellt beispielsweise die UV-Absorbanzmessung bei 254 nm im Zu- und Ablauf der Ozonung ein wichtiger Parameter dar, um die Ozondosierung effizient und bedarfsgerecht zu regeln. Im Weiteren hat sich gezeigt, dass anhand einer 2-Punkt-Dosierung des Ozons (d. h. sowohl in der ersten wie auch in der dritten Kammer des Ozonreaktors; *Fig. 1*) die spezifische Ozondosis nochmals gesenkt werden kann [9].

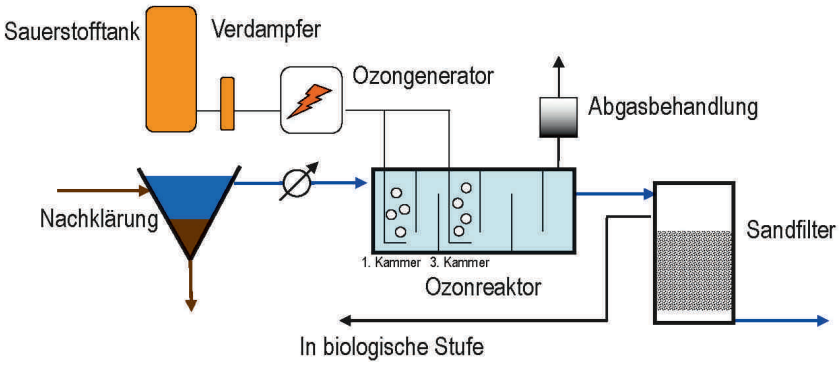

Fig. 1 Allgemeines Verfahrensschema einer Ozonung. *(Quelle: aus [2], angepasst)*
Schéma général du procédé d'ozonation. *(Source: adapté de [2])*

OZONUNG

Die Ozonung ist ein etabliertes und funktionierendes Verfahren. Eine biologisch aktive Nachbehandlung (z. B. Sandfiltration) ist notwendig. Da eine Ozonung nicht für jedes Abwasser geeignet ist, muss das entsprechende Abwasser frühzeitig (vor der Verfahrenswahl) untersucht werden [12].

Bei einer Ozonung werden die MV umgewandelt. Typischerweise bleiben unproblematische Umwandlungsprodukte der Spurenstoffe – sogenannte Transformationsprodukte – zurück, die keine oder deutlich geringere Effekte haben als die Ausgangssubstanz. Zudem können stabile wie auch labile toxische Reaktionsprodukte entstehen.

Stabile toxische Reaktionsprodukte

Bei einer übermässigen Bildung von stabilen toxischen Reaktionsprodukten (z. B. Bromat) ist das Abwasser nicht für eine Ozonung geeignet. Dies kann der Fall sein, wenn beispielsweise Abwässer von Kehrichtverbrennungsanlagen mit nasser Rauchgaswäsche (bromhaltig), Abwässer von Deponien oder von bedeutenden Industrie- und Gewerbebetrieben auf die kommunale ARA geleitet werden [10, 11]. Das Abwasser muss somit frühzeitig (vor der Verfahrenswahl) auf dessen Eignung für eine Ozonung untersucht [12] und, wo notwendig und möglich, Massnahmen an der Quelle getroffen werden. Ansonsten ist ein auf aktivkohlebasiertes Verfahren zu realisieren.

Labile toxische Reaktionsprodukte

Die labilen toxischen Reaktionsprodukte werden durch die Nachbehandlung wieder abgebaut und damit auch deren negativen ökotoxikologischen Effekte eliminiert [13, 14]. Eine Ozonung ist daher mit einer biologisch aktiven Nachbehandlungsstufe auszurüsten. Als mögliches Nachbehandlungsverfahren eignet sich die Sandfitration. Ein Wirbelbettsystem ist grundsätzlich möglich, dazu sind aber noch weitere Untersuchungen zu empfehlen [13]. Auch Filter mit granulierter Aktivkohle (GAK) können als Nachbehandlungsstufe eingesetzt werden. Da durch die GAK zusätzlich auch MV eliminiert werden, kann die Ozonung entsprechend reduziert werden (geringere spezifische Ozondosis; *s. weiter unten*).

Die ersten beiden grosstechnischen Anlagen in der Schweiz sind auf der ARA Neugut (Dübendorf) und der ARA Reinach (Oberwynental) in Betrieb. Weitere Projekte befinden sich in der Realisierungsphase.

VERFAHREN MIT AKTIVKOHLE (ADSORPTION DER MV)

Allgemeine Aspekte

Bei den Aktivkohleverfahren werden die MV durch Adsorption aus dem Abwasser entfernt. Verfahren mit Aktivkohle sind grundsätzlich für alle kommunalen Abwässer geeignet.

Es gibt viele verschiedene Aktivkohleprodukte auf dem Markt, wobei zwischen Pulveraktivkohle (PAK) und granulierter Aktivkohle (GAK) unterschieden wird. Die Produktauswahl sollte vorgängig anhand von (Labor-)Untersuchungen (z.B. Schüttel- oder Rührversuche) durchgeführt werden, da die herkömmlichen Parameter (wie Iodzahl, Methylenblauzahl etc.) für die Entfernung von MV aus kommunalem Abwasser zu wenig aussagekräftig sind. Da zudem auch die Leistung der Kohle schwanken kann, ist eine Qualitätssicherung vor Ort zu empfehlen. Dazu werden gegenwärtig geeignete Methoden und Konzepte entwickelt.

Aktivkohleprodukte werden noch grösstenteils aus nicht erneuerbaren Ressourcen hergestellt, was zu einem hohen Primärenergieverbrauch und CO_2-Emissionen führt, da ein Grossteil des Materials zur Aktivierung ausgebrannt wird (für die Herstellung von 1 Tonne Aktivkohle werden beispielsweise rund 5 bis 6,5 Tonnen Braunkohle benötigt [15]). Die Treibhausgasbilanz der GAK ist deutlich besser als diejenige der PAK, da GAK regeneriert werden kann und lediglich 3 bis 20% (je nach Rohstoff [15]) als Frischkohle ergänzt werden muss (die PAK wird zusammen mit dem Klärschlamm verbrannt). Es sind zwar bereits heute Aktivkohleprodukte auf dem Markt, die komplett aus erneuerbaren Rohstoffen, wie Holz oder Fruchtschalen, hergestellt werden. Sie haben sich jedoch – unter anderem auch aus preislichen Gründen – in der kommunalen Abwasserreinigung noch nicht durchgesetzt.

Beim Umgang mit Aktivkohle sind sicherheitstechnische Aspekte zu berücksichtigen. Insbesondere beim Einsatz von PAK muss darauf geachtet werden, dass diese nicht eingeatmet wird. Im Weiteren sind Staubexplosionen und Glimmbrände durch entsprechende Massnahmen zu verhindern [16].

Es ist sehr wichtig, dass das behandelte Abwasser vor der Einleitung frei von Aktivkohle ist. Das bedeutet, dass die PAK wieder möglichst vollständig vom gereinigten Abwasser abgetrennt wird. Anhand einer neu entwickelten Messmethode – der sogenannten Thermogravimetrie [17] – ist es möglich, den Aktivkohlenanteil im Ablauf zu quantifizieren. Ob anhand der Standardparameter (Trübung, Feststoffe etc.) künftig eine Aussage über den Aktivkohle-Anteil im Ablauf gemacht werden kann, wird aktuell untersucht. Die VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» erarbeitet gegenwärtig einen umfassenden Überblick über die Aktivkohle-Abtrennverfahren sowie über deren Abtrennleistung.

Die PAK kann in die biologische Stufe zurückgeführt werden, um eine zusätzliche Beladung der Aktivkohle mit MV zu erreichen (Ausnutzung einer sogenannten Mehrstufigkeit). Dadurch wird auch eine gewisse Pufferwirkung erreicht. Andererseits gilt es zu beachten, dass die Biologiebecken ausreichend gross sind, um die biologische Aktivität dadurch nicht negativ zu beeinflussen (ausreichendes aerobes Schlammalter). Die PAK wird der Schlammbehandlung gemeinsam mit dem Belebtschlamm zugeführt. Die Schlammbehandlung wird dadurch nicht negativ beeinflusst (bezogen auf die Entwässerbarkeit und den Heizwert). Auch findet keine signifikante Rücklösung der gebundenen MV in der Faulung statt [18]. Es wird aber, abhängig von der notwendigen PAK-Dosis, entsprechend mehr Klärschlamm produziert (in der VSA-Empfehlung «Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA» [19] wird bei PAK-Stufen von einer zusätzlichen Schlammproduktion von 1,5 Mal der dosierten PAK-Menge ausgegangen; darin sind der adsorbierte DOC wie auch der Fällschlamm enthalten).

Pulveraktivkohle nachgeschaltet (Ulmer Verfahren)

Bei diesem Verfahren wird die PAK in einen nachgeschalteten Kontaktreaktor gegeben und mit dem gereinigten Abwasser vermischt *(Fig. 2).* Durch die Zugabe von Fällmitteln (Eisen)

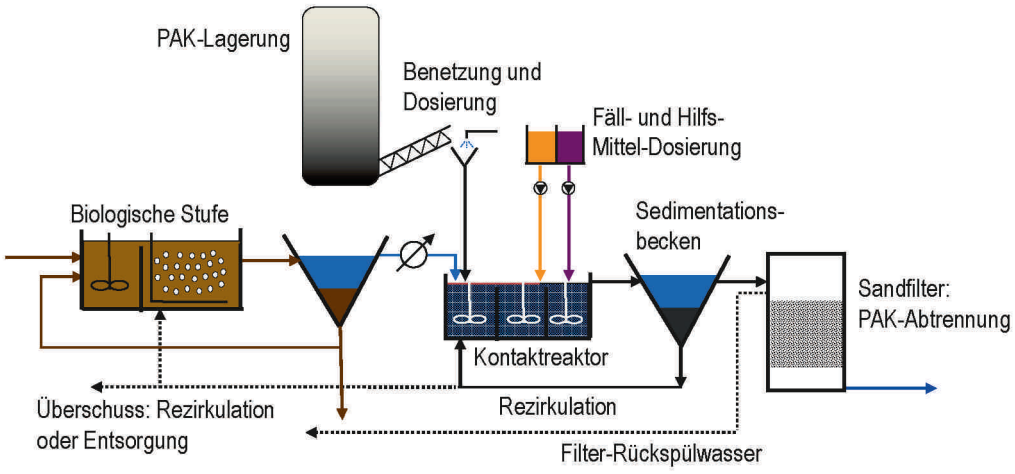

Fig. 2 Allgemeines Verfahrensschema einer Pulveraktivkohle-Stufe nach dem «Ulmer Verfahren». *(Quelle: [2])*
Schéma général de l'étape de charbon actif en poudre selon le «procédé d'Ulmer». *(Source: [2])*

PAK-STUFE NACHGESCHALTET (ULMER VERFAHREN)
Die nachgeschaltete PAK-Stufe gemäss dem «Ulmer Verfahren» ist ein etabliertes und robustes Verfahren, für das bereits viel Erfahrung vorliegt. Bedingt durch die Sedimentation ist es relativ platz- und daher kostenintensiv. Erfahrungen mit alternativen, platzsparenden Verfahren, typischerweise unter Verwendung von Lamellenabscheidesystemen, sind noch abzuwarten.

und Flockungshilfsmitteln (Polymer) bilden sich PAK-Flocken, die sich in einer Sedimentation zuverlässig vom Abwasser abtrennen und in den Kontaktreaktor zurückführen lassen. In der nachgeschalteten Filtrationsstufe (z. B. Sandfilter, Tuchfilter) werden zusätzlich noch feinste Kohlepartikel zurückgehalten.
In Baden-Württemberg (D) sind bereits einige Anlagen in Betrieb. Die meisten verfügen über konventionelle Sedimentationsbecken, einige aber auch über Lamellen zur kompakteren Bauweise. Das erste «Ulmer Verfahren» der Schweiz betreibt die ARA Bachwis (Herisau) seit Mitte 2015. Weitere Anlagen (z. B. auf der ARA Thunersee und auch in Deutschland) befinden sich in der Realisierungsphase.
Bei den in den letzten Jahren realisierten PAK-Stufen in Baden-Württemberg (D) wurden die Kontaktbecken auf eine minimale Aufenthaltszeit im Bereich von 30 bis knapp 60 Minuten und die Sedimentationsbecken (ohne Lamellen) auf eine Mindestaufenthaltszeit von 2 Stunden ausgelegt [20]. Auf der ARA Bachwis in Herisau beträgt die minimale Kontaktzeit 30 Minuten und die minimale Aufenthaltszeit in der Sedimentation liegt bei zwei Stunden [21]. Auf der ARA Thunersee ist der Kontaktreaktor auf eine minimale Kontaktzeit von 48 Minuten und die Sedimentation auf eine minimale Aufenthaltszeit von 2,7 Stunden dimensioniert. Die Sedimentation hat folglich bei diesem Verfahren einen relativ grossen Platzbedarf.
Alternativ zur konventionellen Sedimentation beim «Ulmer Verfahren» können Verfahren mit Lamellenabscheidern eingesetzt werden. Diese Verfahren zeichnen sich durch eine kompakte, platzsparende Bauweise aus [22]. Eine grosstechnische Umsetzung ist auf der STEP de Vidy (Lausanne) vorgesehen. Die Erfahrungswerte sind hier noch abzuwarten.

Dosierung der Pulveraktivkohle vor den Sandfilter

Bei der PAK-Dosierung vor den Sandfilter dient der Sandfilter sowohl als Kontaktreaktor als auch als PAK-Abtrennungsstufe *(Fig. 3)*. Daher ist ein diskontinuierlich rückgespülter 2-Schicht-Sandfilter zu verwenden. Bei einem kontinuierlich rückgespülten Filter kann sich vergleichsweise wenig PAK im Filter einlagern, was sich negativ auf den PAK-Verbrauch und/oder die MV-Eliminationsleistung auswirkt. Ebenso ist die Betriebssicherheit bei diesem Filtertyp aufgrund des Aufbaus als 1-Schicht-Filter geringer als beim 2-Schicht-Filter. Die bisherigen Betriebserfahrungen mit 2-Schicht-Filtern – bezüglich PAK-Rückhalt und dem Filterrückspülverhalten – sind sehr positiv.
Es hat sich aber auch gezeigt, dass der PAK-Flockungsprozess vor dem Sandfilter sehr wichtig ist, damit sich die Flocken anschliessend optimal im Sandfilterbett einlagern können [23]. Dabei ist zu beachten, dass nach aktuellem Stand des Wissens lediglich Fällmittel notwendig sind (keine Flockungshilfsmittel) und bei der Einmischung nicht zu starke Turbulenzen erzeugt werden dürfen, damit sich die Flocken optimal ausbilden können. Im Gegensatz zum «Ulmer Verfahren» führt ein Ausfall der PAK-Dosierung rasch zu einer Abnahme der Eliminationsleistung, da weniger PAK im System und damit die Pufferwirkung gering ist (dies wird aber durch eine PAK-

DOSIERUNG DER PAK VOR DEN SANDFILTER
Die PAK-Dosierung vor den Sandfilter stellt eine gute Alternative (z. B. bei knappen Platzverhältnissen oder bei bestehenden Filtern) zum «Ulmer Verfahren» dar. Das Verfahren befindet sich auf dem Weg zum Standardverfahren.

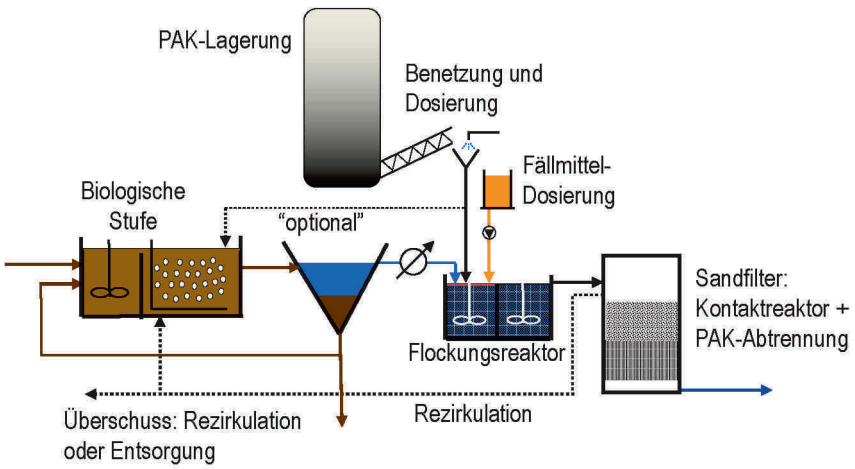

Fig. 3 Allgemeines Verfahrensschema der Pulveraktivkohle-Dosierung vor den Sandfilter. *(Quelle: [2])*
Schéma général du procédé de dosage de charbon actif en poudre en amont du filtre de sable. *(Source: [2])*

Rückführung in die biologische Stufe verbessert). Der PAK-Verbrauch, und somit die Betriebskosten, ist vergleichbar mit dem «Ulmer Verfahren» und liegt im Bereich von 2 mg PAK/mg DOC. Die minimale Aufenthaltszeit (bei Regenwetter) in der Flockung sollte im Bereich von 10 bis 15 Minuten liegen [23]. Bei der geplanten MV-Stufe auf der ARA Schönau (Cham) beträgt die minimale Aufenthaltszeit 15 Minuten.

Es ist aktuell noch keine grosstechnische Umsetzung realisiert worden. Auf folgenden Anlagen ist die Umsetzung aber am laufen: ARA Schönau (Cham; zusätzlich auch PAK-Dosierung in die Biologie möglich), ARA Lachen-Untermarch.

Tertiäre Membranen und feine Pulveraktivkohle

Eine weitere Möglichkeit der nachgeschalteten PAK-Anwendung ist die Abtrennung der PAK mittels Ultrafiltrationsverfahren, welche die PAK vollständig zurückhält *(Fig. 4)*. Die Ultrafiltration eliminiert die Mikroverunreinigungen hingegen nicht direkt, da die Poren zu gross sind. Dazu müsste eine Nanofiltration mit kleineren Poren eingesetzt werden. Die Anwendung einer Nanofiltration ist aber technisch sehr aufwendig und daher momentan nicht wirtschaftlich. Auf die PAK-Dosierung in Membranbioreaktoren (MBR) wird im nächsten Kapitel eingegangen. Wie bei der PAK-Dosierung vor den Sandfilter oder beim «Ulmer

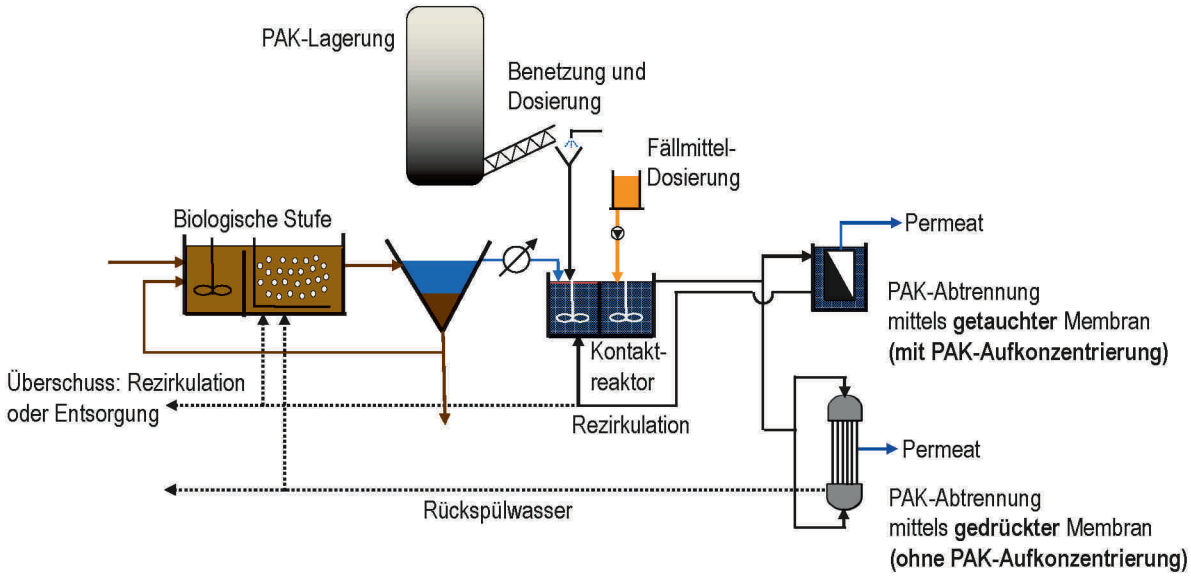

Fig. 4 Allgemeines Verfahrensschema der nachgeschalteten Pulveraktivkohle-Dosierung und der Abtrennung mittels getauchter (oben) oder gedrückter (unten) Ultrafiltrationsmembran. *(Quelle: [2], angepasst)*
Schéma général du procédé de dosage de charbon actif en poudre en aval et de séparation à l'aide d'une membrane d'ultrafiltration immergée (en haut) ou enfoncée (en bas). *(Source: adapté de [2])*

TERTIÄRE MEMBRANEN UND FEINE PAK

Die PAK-Abtrennung mittels Ultrafiltrationsmembranen (getauchtes System wie auch als Druckrohrmembran) wurde untersucht und ist grundsätzlich geeignet. Eine grosstechnische Realisierung ist aktuell nicht bekannt.

Verfahren» ist auch bei diesem Verfahren ein zusätzlicher Kontaktreaktor notwendig, wo die Kohle dosiert und mit Abwasser vermischt wird. Zur Verbesserung der Funktion der Ultrafiltration wird häufig zusätzlich ein Fällmittel beigegeben. Das Verfahren kann grundsätzlich mit oder ohne Aufkonzentrierung der PAK erfolgen (d. h. mit oder ohne Rückführung der abgetrennten PAK in den Kontaktreaktor). Dabei kann zwischen einem getauchten System und einem System im Überdruck (Druckrohrmembranen) unterschieden werden *(Fig. 4):*

- Beim getauchten System ist die Membran direkt im PAK-haltigen Wasser installiert und das gereinigte Abwasser fliesst permeatseitig ab. Die abfiltrierte PAK wird durch Turbulenzen und ergänzend mittels periodischen Rückspülungen von der Membran entfernt.
- Bei Drucksystemen wird PAK-haltiges Wasser in ein Membransystem gedrückt. Je nach System wird ohne Querströmung entlang der Membran (= Dead-End-Betrieb) oder mit Querströmung (= Cross-Flow-Betrieb) betrieben, um damit den Filterkuchen auf der Membran laufend abzutragen.

In verschiedenen Untersuchungen wurden Membransysteme zur PAK-Abtrennung eingesetzt [24, 25]. Es hat sich gezeigt, dass sowohl getauchte Membranen wie auch Druckrohrmembranen geeignet sind. Dabei sind getauchte Systeme zu bevorzugen in Kombination mit einer PAK-Aufkonzentrierung (bei einer Druckrohrmembran wäre in diesem Fall der Energieverbrauch für die PAK-Abtrennung zu hoch). Wird die PAK nicht aufkonzentriert, sind Druckrohrmembranen besser geeignet. Diese Resultate wurden von einer neueren Untersuchung auf der Kläranlage Neuss-Ost (Deutschland [26]) bestätigt, wo unter anderem eine getauchte Membran zur PAK-Abtrennung erfolgreich pilotiert wurde. Im Zusammenhang mit Ultrafiltrationsmembranen können auch feiner gemahlene PAK-Produkte eingesetzt werden [27]. Bei diesen Produkten findet die Adsorption der MV schneller statt (d. h. sie sind schneller im Gleichgewicht), wodurch die Kontaktbecken kleiner dimensioniert werden können. Dies ist aber nur bei Systemen ohne PAK-Rückführung relevant (Druckrohrmembranen). Diese Anwendung ist noch weiter zu untersuchen.

Pulveraktivkohle-Dosierung in die biologische Reinigungsstufe

Ist eine nachgeschaltete PAK-Dosierung nicht möglich (z. B. aufgrund knapper Platzverhältnisse), kann die PAK auch direkt in konventionelle Belebtschlammsysteme [28] *(Fig. 5)* wie auch in Membranbioreaktoren (MBR) dosiert werden [29]. Die PAK wird dabei im hinteren Bereich der Biologie dosiert, wo ein bedeutender Teil der organischen Stoffe bereits eliminiert wurde (geringere Konkurrenz des DOC um die Bindungsstellen auf der Aktivkohle). Bei MBR-Systemen kann aufgrund der Ultrafiltrationsmembran eine etwas feinere PAK verwendet werden, was sich positiv auf den PAK-Verbrauch auswirkt [29].
Bei konventionellen biologischen Reinigungsstufen mit suspendiertem Belebtschlamm ist zur effizienten PAK-Abtrennung – zusätzlich zur Nachklärung - eine Filtration notwendig (analog

PAK-DOSIERUNG IN DIE BIOLOGISCHE STUFE

Die PAK-Dosierung in die biologische Stufe (konventionell wie auch Membranbiologie) funktioniert und ist insbesondere für kleinere und mittelgrosse ARA (z. B. bei knappen Platzverhältnissen) eine gute Verfahrensalternative. Wichtige Voraussetzungen sind aber ein dafür geeignetes biologisches Reinigungsverfahren mit genügend Reservekapazität. Im Vergleich zu den nachgeschalteten PAK-Verfahren sind die Investitionskosten tiefer, hingegen sind die Betriebskosten aufgrund des höheren PAK-Verbrauchs höher.

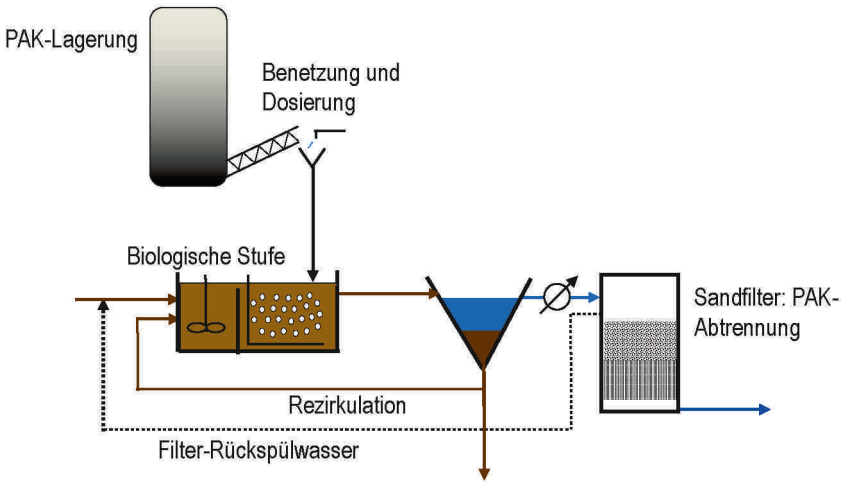

Fig. 5 Allgemeines Verfahrensschema der Pulveraktivkohle-Direktdosierung in die biologische Reinigungsstufe. (Quelle: [2], angepasst)
Schéma général du procédé de dosage direct de charbon actif en poudre à l'étape de l'assainissement biologique. (Source: adapté de [2])

zu anderen PAK-Verfahren). Dazu können Tuchfilter, statische oder kontinuierlich rückgespülte Sandfilter eingesetzt werden. Dieses Verfahren ist sehr kompakt mit geringen zusätzlichen Investitionen, da der Bau eines Kontaktreaktors und einer zusätzlichen Sedimentation entfällt. Andererseits sind die Betriebskosten tendenziell höher als bei nachgeschalteten PAK-Verfahren, weil die Mehrstufigkeit fehlt und der PAK-Verbrauch darum höher liegt (bei zirka 3 mg PAK/mg DOC [28]). Bei MBR-Systemen konnte ein PAK-Verbrauch von etwa 2 mg PAK/mg DOC gemessen werden [29]. Wichtig ist, dass die biologische Reinigungsstufe über ein ausreichendes Volumen verfügt, damit die Nitrifikation dadurch nicht negativ beeinflusst wird. Eine gute biologische Reinigungsleistung hinsichtlich der organischen Stoffe ist von Vorteil, da der DOC sich direkt auf den PAK-Verbrauch auswirkt. Eine erste grosstechnische Umsetzung soll auf der ARA Flos (Wetzikon) realisiert werden, weitere Erfahrungen sind zu machen.

Inwiefern eine direkte PAK-Dosierung bei Biofilmsystemen geeignet ist, kann nicht abschliessend beurteilt werden. Projekte dazu sind am laufen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass sowohl die Festbett- wie auch die Wirbelbett-Systeme nur bedingt geeignet sind. Die PAK-Zugabe in Hybridwirbelbett-Systeme wie auch in Systeme mit granulierter Biomasse könnte jedoch funktionieren.

Spezielle Pulveraktivkohle-Abtrennverfahren

Die PAK-Abtrennung mittels Flotation und nachgeschaltetem Filter (z. B. Tuchfiltration) wurde auf der ARA Bioggio, der ARA Visp sowie auf der ARA Ergolz in Sissach im Pilotmassstab untersucht. Es hat sich gezeigt, dass dieses System aufgrund des vergleichsweise hohen Energieverbrauches vermutlich nur bei speziellen Situationen (z. B. zur Reinigung von Industrieabwasser mit hohen Feststoffgehalten oder bei bereits vorhandener Flotation) zum Einsatz kommen wird [30].

Ein PAK-Rückhaltesystem mit Kerzenfiltern wird gegenwärtig angeboten. Es sind aber weder Langzeitversuche noch eine Realisierung im grosstechnischen Massstab bekannt.

Granulierte Aktivkohle im Wirbelbett

Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine nachgeschaltete Behandlungsstufe, wobei das Abwasser von unten nach oben ein Kohlebett durchströmt *(Fig. 6)*. Um die Aktivkohleschicht mit einer Körnung zwischen 0,2 und 0,9 mm in Schwebe zu halten, ist eine Filtergeschwindigkeit von zirka 7 bis 15 m/h nötig (abhängig vom Kohleprodukt), die bei geringem Abwasseranfall durch eine interne Rezirkulation aufrechterhalten wird.

Die durchschnittliche Aufenthaltszeit der Aktivkohle im System liegt bei 80 bis 100 Tagen. Die Frischkohle wird nicht wie bei PAK-Systemen üblich kontinuierlich, sondern periodisch zugegeben (täglich oder mehrmals wöchentlich) und die beladene GAK aus dem System abgezogen und für die Regeneration aufbewahrt. Bei der Zugabe von Frischkohle ist zu beachten, dass die Feinanteile vorgängig abgetrennt werden müssen, damit diese nicht über den Ablauf in den Vorfluter gelangen können. Erhöhte Feststofffrachten im Zulauf zum GAK-System führen zu einer stärkeren Expansion des Aktivkohlebetts. In diesem Fall muss das System rückgespült werden. Daher ist eine kontinuierliche Überwachung der Aktivkohle-Betthöhe notwendig. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen scheint keine zusätzliche Filtration notwendig.

Langzeitversuche im Pilotmassstab [31] haben gezeigt, dass die erforderliche Aktivkohle-Dosis in einem ähnlichen Bereich liegt

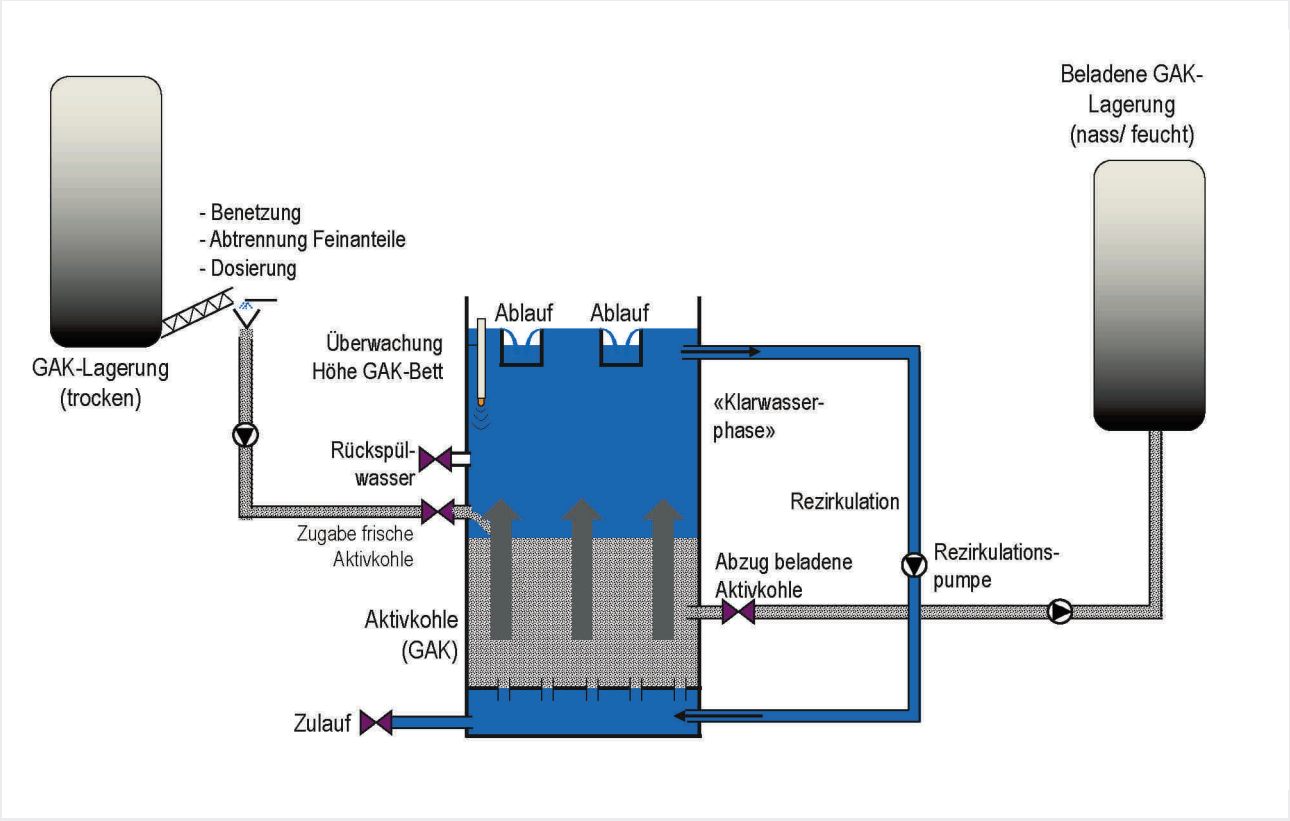

Fig. 6 Allgemeines Verfahrensschema der GAK im Wirbelbett.
Schéma général du procédé du CAG dans le lit fluidisé.

GAK IM WIRBELBETT

Die durchgeführten Pilotierungen (STEP de Penthaz, ARA Langmatt in Wildegg) haben vielversprechende Resultate gezeigt. Es handelt sich um ein interessantes Verfahren, das relativ einfach im Betrieb zu sein scheint.

wie bei der GAK-Anwendung im statischen Filter (s. weiter unten). Jedoch erlaubt das Wirbelbettsystem – im Gegensatz zur GAK-Filtration – eine periodisch erhöhte Aktivkohle-Zugabe während Frachtspitzen oder bei längeren Regenwettersituationen. Auf diese Weise kann ein Einbruch der Eliminationsleistung verhindert werden.

Eine erste grosstechnische Umsetzung ist auf der STEP de Penthaz in Ausführung.

Granulierte Aktivkohle-Filtration

Bei der granulierten Aktivkohle(GAK)-Filtration wird die Aktivkohle entweder in einen diskontinuierlich oder in einen kontinuierlich rückgespülten Raumfilter gefüllt, wo sie vom Abwasser durchströmt wird (analog zu einem normal betriebenen Filter, *Fig. 7*). Der Partikelrückhalt ist vergleichbar mit einem Sandfilter und somit ist eine zusätzliche Stufe für den Kohlerückhalt nicht notwendig (allfällige Feinanteile der GAK werden während der Inbetriebnahme-Phase ausgespült und der Schlammbehandlung zugeführt; ein zusätzlicher Abrieb der Kohle im Betrieb ist vernachlässigbar [32]). Auch müssen keine automatisierten Kohledosiersysteme oder Chemikalien (zur Fällung und Flockung) eingesetzt werden. Jedoch ist zu beachten, dass für das periodische Einbringen und Absaugen der GAK (zu Reaktivierungszwecken) entsprechende Vorrichtungen erforderlich sind.

Für einen effizienten Betrieb der GAK-Filtration sind hauptsächlich zwei Aspekte zu berücksichtigen [33, 34]: Ausreichende Leerbettkontaktzeit im Bereich von 20 bis 30 Minuten bei tiefem DOC (mindestens 25 Minuten bei einer GAK-Körnung von 1,2 bis 2,3 mm gemäss [35]) und möglichst geringe DOC-Konzentration im zufliessenden Abwasser. Ein feststoffarmer Filterzulauf führt dazu, dass weniger oft rückgespült werden muss und/oder eine feinere Körnung eingesetzt werden kann. Die bisherigen Projekte (z. B. [35, 36]) haben gezeigt, dass eine GAK-Filtration (sowohl diskontinuierlich wie auch kontinuierlich rückgespült) verfahrenstechnisch machbar ist. Allerdings ist aufgrund der Datenlagen die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit noch unsicher. Diese hängt insbesondere davon ab, wie häufig die GAK reaktiviert werden muss. Es braucht daher noch mehr Wissen und Erfahrungen. Viele ARA in der Schweiz verfügen bereits über Sandfilter. Diese könnten künftig für eine GAK-Filtration umgenutzt werden. Nichtsdestotrotz sind nach aktuellem Stand des Wissens gewisse (betriebliche, bauliche) Anpassungen notwendig, um die für die GAK-Filtration notwendigen Aufenthaltszeiten zu erreichen. Aktuell ist eine grosstechnische Umsetzung in der Schweiz bekannt (Abwasserverband Altenrhein; in Kombination mit einer Ozonung). In Deutschland sind unter anderem beim Abwasserverband Obere Lutter und auf den Kläranlagen Rietberg und Emmingen-Liptingen grosstechnische GAK-Filter in Betrieb.

GAK-FILTRATION

Die GAK-Filtration stellt zunehmend eine Verfahrensalternative dar, beispielsweise wo eine PAK-Rückführung in die Biologie nicht möglich und/oder das Abwasser für eine Ozonung ungeeignet ist. Bestehende Sandfilter können umgenutzt werden, wobei die Auslegung gemäss aktuellem Stand des Wissens nach der Kontaktzeit erfolgt.

VERFAHRENSKOMBINATION (OXIDATION UND ADSORPTION)

Bei der Verfahrenskombination wird die Oxidation (Ozon) mit der Adsorption (Aktivkohle; z. B. PAK-Dosierung vor den Sand-

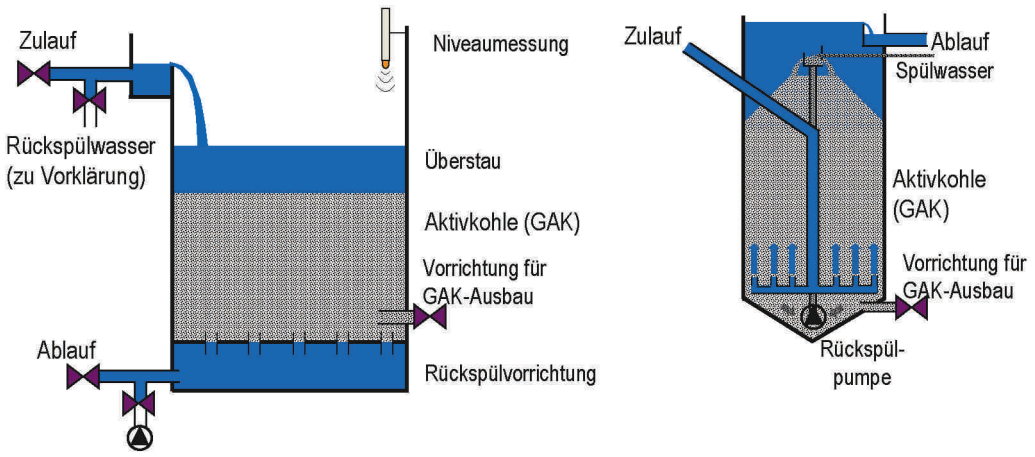

Fig. 7 Allgemeines Verfahrensschema der granulierten Aktivkohle-Filtration, diskontinuierlich rückgespült (links; aus [2]), kontinuierlich rückgespült (rechts).

Schéma général du procédé de filtration par charbon actif en granulés rétrolavé de manière discontinue (à gauche, tiré de [2]), rétrolavé de manière continue (à droite).

VERFAHRENSKOMBINATION

Bei einer Verfahrenskombination kommen zwei Verfahren zum Einsatz, was zwar eine grössere Flexibilität, aber auch eine höhere Komplexität zur Folge hat. Eine Verfahrenskombination geht über die gesetzlichen Anforderungen hinaus und ist hauptsächlich für grosse ARA interessant.

filter oder mit einer GAK-Filtration; *Fig. 8*) kombiniert. Diese Verfahrensführung ist technisch möglich und machbar (siehe Ausführungen zu den einzelnen Verfahren weiter oben), bringt betriebliche Vorteile (z. B. höhere Flexibilität), jedoch auch eine höhere Komplexität der Anlage. Verfahrenskombinationen gehen über die gesetzlichen Anforderungen (80%ige Elimination) hinaus. Aufgrund der Wirkung der Aktivkohle ist eine Teil-Ozonung (reduzierte spezifische Ozondosierung) ausreichend. Es muss darauf hingewiesen werden, dass auch bei einer Verfahrenskombination sorgfältig abgeklärt werden muss, ob das Abwasser für eine Ozonung geeignet ist [12].

Es wird aktuell davon ausgegangen, dass eine Verfahrenskombination hauptsächlich für grosse ARA wirtschaftlich und technisch interessant sein dürfte, weil hier die erhöhte Komplexität (zwei Verfahren) weniger ins Gewicht fällt als bei kleinen ARA. Zudem ist noch unklar, wie sich die Ozonung auf den Betrieb einer nachgeschalteten Aktivkohlestufe auswirkt. Es sind gegenwärtig verschiedene Untersuchungen zu Verfahrenskombinationen am Laufen (z. B. auf der ARA ProRheno (Basel), der ARA Bülach-Furt und beim Abwasserverband Glarnerland). Auf folgenden ARA sind Verfahrenskombinationen in Planung oder werden aktuell realisiert:

- Abwasserverband Altenrhein (Ozonung in Kombination mit einer GAK-Filtration)
- ARA ProRheno in Basel (Ozonung in Kombination mit einer PAK-Dosierung vor dem Sandfilter)
- STEP de Vidy in Lausanne (Ozonung in Kombination mit einem PAK-Verfahren mit Lamellenabscheider)

WEITERE VERFAHREN

Aus Untersuchungen im Rahmen des Projekts «Strategie Micropoll» [2] ist bekannt, dass die biologische Reinigungsstufe aufgrund der fehlenden Breitbandwirkung alleine nicht ausreichend ist, um die organischen Spurenstoffe effizient zu eliminieren. Neuste Untersuchungen [37] bestätigen dies. Selbst mit deutlich aufwendigeren Varianten der biologischen Behandlung (d. h. Schlammalter > 25 Tage, hydraulische Verweilzeiten von über einem Tag, anaerobe Behandlungsstufen) wird die gesetzlich geforderte Elimination der Spurenstoffe nicht erreicht. Es wurde zwar beobachtet, dass bei gewissen Stoffen – wie beispielsweise Diuron und Diclofenac – eine weitgehende Elimination möglich ist (z. B. mit einem Hybridwirbelbett-Verfahren wie auf der ARA Bad Ragaz), eine Breitbandwirkung ist aber nicht vorhanden. Auch nachgeschaltete biologische Stufen (z. B. Bodenpassagen oder Behandlung mit Pilzen) scheinen

WEITERE VERFAHREN

Momentan ist nicht davon auszugehen, dass andere Verfahren ausser Ozon und Aktivkohle sich demnächst etablieren werden. Meistens sind neue Ansätze den etablierten Verfahren technisch und wirtschaftlich unterlegen.

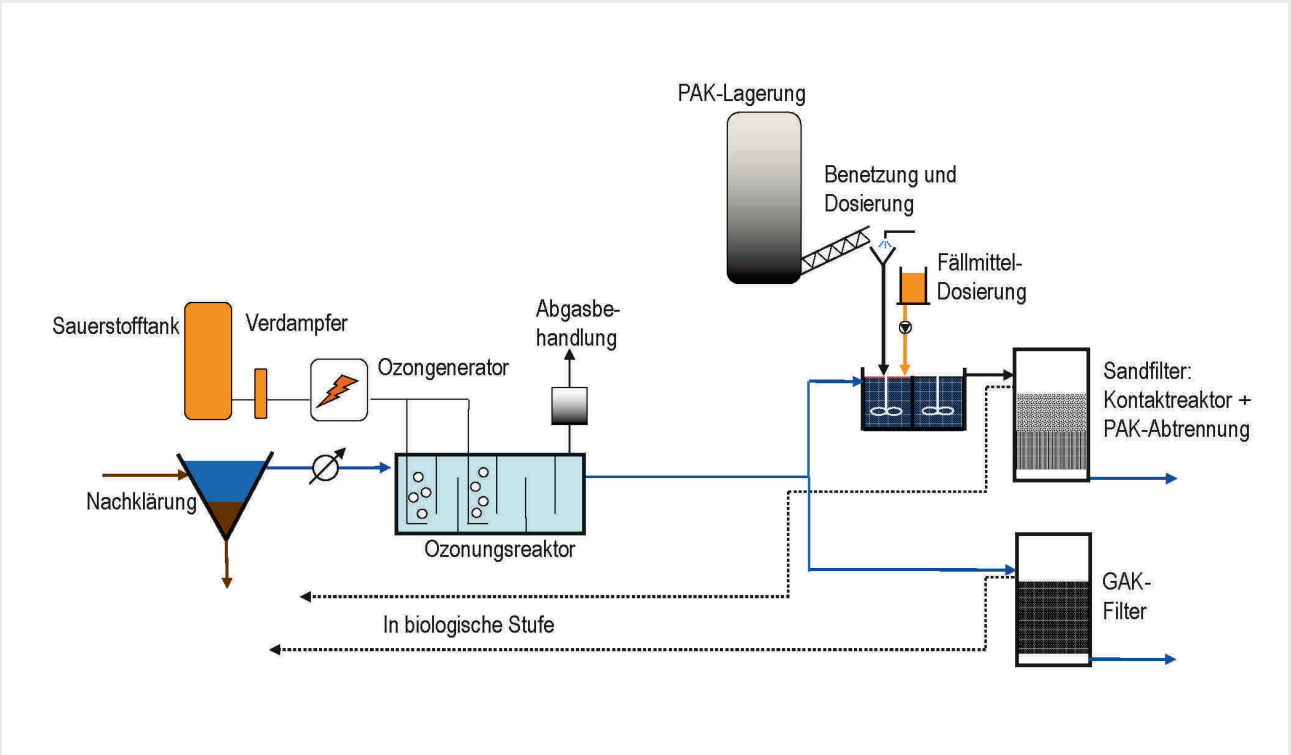

Fig. 8 Allgemeines Verfahrensschema der Kombination einer Ozonung mit einer Pulveraktivkohle-Dosierung vor den Sandfilter (oben) beziehungsweise mit einer granulierten Aktivkohle-Filtration (unten). *(Quelle: aus [2], angepasst)*

Schéma général du procédé de combinaison d'une ozonation avec un dosage de charbon actif en poudre en amont du filtre de sable (en haut) ou avec une filtration par charbon actif en granulés (en bas). *(Source: adapté de [2])*

nicht geeignet oder nicht wirtschaftlich zu sein. Optimierungen der biologischen Reinigungsstufe, die zu einer höheren MV-Elimination beitragen, sind aber zu begrüssen.
Neben der Ozonung wurden verschiedene andere Oxidationsmittel, wie beispielsweise Ferrat (Fe(VI)) [38] oder sogenannte *Advanced Oxidation Processes* (AOP), untersucht. Die Verfahren befinden sich aber entweder noch im Forschungsstadium (Ferrat) oder sind nicht wirtschaftlich für die MV-Elimination im kommunalen Abwasser. Der Einsatz von Nanofiltration oder Umkehrosmose im kommunalen Abwasserbereich ist nicht wirtschaftlich (bis zu 25% des behandelten Abwasserstroms fällt als Retentat an, das letztendlich auch behandelt werden muss [2]).

FAZIT

Verfahren mit Ozon und PAK haben sich etabliert und werden tendenziell kompakter und günstiger. Weitere Alternativen stellen die GAK-Verfahren dar. Grundsätzlich ist es wichtig, dass bei der Verfahrenswahl die relevanten Randbedingungen berücksichtigt werden. Zu den einzelnen Verfahren kann folgendes Fazit gezogen werden:

STANDARDVERFAHREN

- Die Ozonung ist ein etabliertes und funktionierendes Verfahren. Eine biologisch aktive Nachbehandlungsstufe ist notwendig. Es ist wichtig, frühzeitig zu untersuchen, ob das Abwasser für eine Ozonung geeignet ist.
- Die nachgeschaltete PAK-Stufe gemäss dem «Ulmer Verfahren» ist ein etabliertes Verfahren, zu dem bereits viel Erfahrung vorliegt. Bedingt durch die Sedimentation ist es relativ platzintensiv.

AUF DEM WEG ZUM STANDARDVERFAHREN

- Die PAK-Dosierung vor den Sandfilter ist zunehmend eine Verfahrensalternative (z. B. bei knappen Platzverhältnissen oder bei bestehenden Filtern) mit ersten grosstechnischen Umsetzungen.
- Die PAK-Abtrennung mittels Ultrafiltrationsmembranen (tertiär wie auch als MBR) wurde untersucht und ist grundsätzlich geeignet.
- Die PAK-Dosierung in die Biologie ist für kleine und mittelgrosse ARA (z. B. bei knappen Platzverhältnissen) interessant, wo die Biologie über ein ausreichendes Volumen verfügt. Eine erste grosstechnische Umsetzung soll realisiert werden, weitere Erfahrungen sind zu machen.

WEITERE ERFAHRUNGEN UND ERKENNTNISSE NOTWENDIG

- Die GAK-Anwendung im Wirbelbett zeigt vielversprechende Resultate und ist zunehmend ein interessantes Verfahren, das relativ einfach im Betrieb zu sein scheint.
- Die GAK-Filtration wird zunehmend eine Verfahrensalternative, z. B. wo eine PAK-Rückführung in die Biologie nicht möglich und/oder das Abwasser für eine Ozonung ungeeignet ist. Bestehende Sandfilter können umgenutzt werden.
- Bei einer Verfahrenskombination kommen zwei Verfahren zum Einsatz, was eine grössere Flexibilität ergibt, aber auch eine höhere Komplexität zur Folge hat. Verfahrenskombinationen sind hauptsächlich für grosse ARA ein Thema. Erste grosstechnische Umsetzungen sind am Laufen.
- Aktuell sind keine neuen, vielversprechende Verfahren in Sicht – Weiterentwicklungen oder Alternativen der oben beschriebenen Verfahren ausgenommen. Meistens sind neue Ansätze den etablierten Verfahren technisch und wirtschaftlich unterlegen.

FACHLICHE BEGLEITGRUPPE
Die inhaltliche Erarbeitung dieses Artikels wurde im Rahmen einer fachlichen Begleitgruppe durchgeführt. Ein grosses Dankeschön gilt folgenden Personen: *Martin Baggenstos* (früher Wabag Wassertechnik AG, jetzt Hunziker Betatech AG), *Marc Lambert* (Alpha Wassertechnik AG), *Thomas Wintgens* (Fachhochschule Nordwestschweiz), *Daniel Urfer* (RWB Groupe SA), *Knut Leikam* (Pöyry Schweiz AG), *Damian Dominguez* (BAFU), *Saskia Zimmermann-Steffens* (BAFU), *Adriano Joss* (Eawag), *Christian Abegglen* (VSA, ERZ).

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Kienle, C. et al. (2015): Ökotoxikologische Biotests – Anwendung von Biotests zur Evaluation der Wirkung und Elimination von Mikroverunreinigungen. Aqua & Gas, Nr. 7/8, S. 18–26*
[2] *Abegglen, C.; Siegrist, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen Nr. 1214: 210 S.*
[3] *Stamm, C. et al. (2017): Einfluss von Mikroverunreinigungen. Lebensgemeinschaften in Fliessgewässern – Ergebnisse aus dem Projekt EcoImpact. Aqua & Gas, Nr. 6, S. 90–95*
[4] *Dominguez, D.; Diggelmann, V.; Binggeli, S. (2016): Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasseranlagen. Finanzierung von Massnahmen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1618: 34 S.*
[5] *Verordnung des UVEK zur Überprüfung des Reinigungseffekts von Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen bei Abwasserreinigungsanlagen, 814.201.231, vom 3. November 2016 (Stand am 1. Dezember 2016)*
[6] *VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» (2016): Sicherheitsaspekte zum Umgang mit Ozon auf Kläranlagen. www.micropoll.ch*
[7] *VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» (2016). Sicherheitsaspekte zum Umgang mit Sauerstoff auf Kläranlagen. www.micropoll.ch*
[8] *Schachtler, M.; Hubaux, N. (2016): BEAR: Innovative Regelstrategie der Ozonung. UV-Messtechnik für Regelung und Überwachung der Elimination von Mikroverunreinigungen. Aqua & Gas, Nr. 5, S. 84–93*
[9] *Hubaux, N.; Schachtler, M. (2016): Mehrstufiger Ozoneintrag – LOD-Konzept. Reduzierung des Ozonverbrauchs bei gleichbleibender Elimination der Mikroverunreinigungen. Aqua & Gas, Nr. 11, S. 50–56*
[10] *Wunderlin, P. et al. (2015). Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon – Testverfahren zur Beurteilung. Aqua & Gas, Nr. 7/8, S. 25–38*
[11] *Soltermann, F. et al. (2016): Bromid im Abwasser: Bromatbildung bei der Ozonung – Einschätzung der zukünftigen Situation. Aqua & Gas, Nr. 10, S. 64–71*
[12] *VSA (2017): Empfehlung «Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung»*
[13] *Böhler, M. et al. (2017): Projekt ReTREAT – Untersuchungen zu Verfahren für die biologische Nachbehandlung nach Ozonung. Aqua & Gas, Nr. 5, S. 54–63*
[14] *Kienle, C. et al. (2017): Biologische Nachbehandlung von kommunalem Abwasser nach Ozonung – ReTREAT: Teilprojekt Biotests. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL, Dübendorf*
[15] *Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung – Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 «Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen». KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2016(63) Nr. 12, S. 1062–1067*
[16] *VSA-Plattform «Verfahrenstechnik Mikroverunreinigungen» (2016): Sicherheitsaspekte zum Um-*

gang mit Pulveraktivkohle (PAK) auf Kläranlagen. www.micropoll.ch

[17] *Krahnstöver, T.; Wintgens, T. (2017): Aktivkohle-Nachweis im Abwasser. Quantitativer und selektiver Nachweis niedriger PAK-Konzentrationen mittels Thermogravimetrie. Aqua & Gas, Nr. 1, S. 32–37*

[18] *Meckes, J.; Metzger, S.; Kapp, H. (2014): Untersuchung zum Spurenstoffbindungsverhalten von Pulveraktivkohle unter anaeroben Bedingungen. Abschlussbericht*

[19] *VSA (2017): Empfehlung «Definition und Standardisierung von Kennzahlen für Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen in ARA»*

[20] *Metzger, S. et al. (2015): Status quo der Erweiterung von Kläranlagen um eine Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination. wwt Modernisierungsreport 2015/2016, S. 14–19*

[21] *Zöllig, H. et al. (2017): PAK-Stufe ARA Herisau. Erste grosstechnische Umsetzung einer PAK-Stufe in der Schweiz – Erfahrungen nach einem Jahr. Aqua & Gas, Nr. 1, S. 14–23*

[22] *Böhler, M. et al. (2012): Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser mittels PAK in einem Actiflo®Carb und durch Ozon auf der ARA Schönau, Cham (GVRZ), Technologieförderungsprojekt des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern, Herausgeber: Alpha Umwelttechnik AG, Nidau*

[23] *Löwenberg, J. et al. (2016): Forschungsprojekt «Aktifilt»: Elimination von Mikroverunreinigungen mittels PAK-Dosierung im Zulauf der Raumfiltration. Aqua & Gas, Nr. 1, S. 36–43*

[24] *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*

[25] *Löwenberg, J. et al. (2014): PAK/UF-Verfahrenskombinationen im Vergleich – Membranbetrieb und Entfernungsleistung. Aqua & Gas Nr. 1, S. 30–34*

[26] *Herbst, H.; Baumgartner, S.; Valperz, A. (2016): Membrantechnik und Mikroschadstoffelimination am Beispiel der Kläranlage Neuss-Ost. Arzneimittel und Mikroschadstoffe in Gewässern. 19. und 20. September 2016, Düsseldorf*

[27] *Bonvin, F. et al. (2016): Super-fine powdered activated carbon (SPAC) for efficient removal of micropollutants from wastewater treatment plant effluent. Water Research, 90, 90–99*

[28] *Obrecht, J. et al. (2015): PAK-Dosierung ins Belebungsverfahren – Alternative zur nachgeschalteten Pulveraktivkohleadsorption. Aqua & Gas, Nr. 2, S. 20–32*

[29] *Fuchsmann, T.; Lehky, M. (2014): Behandlung von Mikroverunreinigungen durch Dosierung von PAK in den Belebtschlamm einer MBR-Anlage. Abschliessender Bericht zu den Teststudien in der Kläranlage von Locle, Lausanne, Dezember 2014*

[30] *Schlussbericht PAK & Flotation (2016): Abwasserbehandlung mit einer Verfahrenskombination aus Pulveraktivkohleadsorption und nachgeschalteter Flotation zur verbesserten Abtrennung von Mikroverunreinigungen. Vertrag-Nr.: UTF 399.33.11/2006-02423/343/03 – K452-1692*

[31] *Horisberger M.; Casazza R. et al. (2017): Essais-pilotes STEP de Penthaz – Traitement des micropolluants par charbon actif en micrograins*

[32] *Benstöm, F.; Mousel, D.; Pinnekamp, J. (2015): Abrasion of granular activated carbon used for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment. 9th micropoll and ecohazard*

[33] *Benstöm, F. et al. (2016a): Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein Review halb- und grosstechnischer Untersuchungen – Teil 1: Veranlassung, Zielsetzung und Grundlagen, Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA), Nr. 3, 187–192*

[34] *Benstöm, F. et al. (2016b): Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen – Ein Review halb- und grosstechnischer Untersuchungen – Teil 2: Methoden, Ergebnisse und Ausblick, Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA), Nr. 4, 276–289*

[35] *Joss, A.; Fleiner, J.; Wunderlin, P. et al. (2017). Elimination von Spurenstoffen durch granulierte Aktivkohle (GAK) Filtration: Grosstechnische Untersuchungen auf der ARA Bülach-Furt. Zwischenbericht, Kurzfassung. Dübendorf, Januar 2017*

[36] *Böhler, M. et al. (2012): Ergänzende Untersuchungen zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der ARA Neugut, Bericht der Eawag, Dübendorf*

[37] *Falas, P. et al. (2016): Tracing the limits of organic micropollutant removal in biological wastewater treatment. Water Research, 95, 240–249*

[38] *Zimmermann-Steffens, S. et al. (2013): Einsatz von Ferrat und Ozon zur Behandlung kommunalen Abwassers im Pilotmassstab. Schlussbericht zu den Pilotversuchen an der ARA Aviron in Vevey. Lausanne*