

52. Granulierte Aktivkohle – Ein Review halb- und großtechnischer Untersuchungen

Frank Benstöm, Aachen, Andreas Nahrstedt, Mülheim a. d. Ruhr,
Marc Böhler, Dübendorf, Schweiz, Gregor Knopp, Darmstadt,
David Montag, Aachen, Hansruedi Siegrist, Dübendorf, Schweiz,
Johannes Pinnekamp, Aachen

Einleitung und Zielstellung

Als technische Lösungen zur Realisierung einer gezielten Spurenstoffelimination bei kommunalen Kläranlagen haben sich neben oxidativen Verfahren wie der Ozonung des Kläranlagenablaufs auch eine adsorptive Behandlung mit Pulveraktivkohle (PAK) als großtechnisch machbar und wirtschaftlich vertretbar herausgestellt (METZGER, 2010; ABEGGLEN et al., 2012; BÖHLER et al., 2012). Einige großtechnische Anlagen zur Ozonung und Pulveraktivkohlebehandlung wurden bereits in der Schweiz und Deutschland gebaut. An ihnen werden derzeit im kontinuierlichen Betrieb zunehmend mehr Erfahrungen und Ergebnisse im Umgang mit diesen neuen Verfahren der Abwasserreinigung gewonnen. Neben den genannten Verfahren wurde und wird auch vermehrt die Anwendung von granulierter Aktivkohle (GAK) zur Spurenstoffelimination aus kommunalen Abwässern untersucht, die sich seit Jahrzehnten im Trinkwasserbereich bewährt hat.

Zur Erreichung weitergehender Eliminationen von Feststoffen und Phosphor im biologisch gereinigten kommunalen Abwasser werden diskontinuierlich gespülte Raumfilter auf vielen Kläranlagen verwendet, die zum Teil eine vorhergehende Flockung/Fällung des Abwassers einschließen. Diese Infrastrukturen können prinzipiell für eine Adsorption von Spurenstoffen an GAK genutzt werden, indem das bestehende Filtermaterial (Sand und/oder Anthrazit/Blähschiefer oder Alumosilikate) gegen GAK ausgetauscht wird oder das quasi-feststofffreie Wasser aus dem Ablauf der Filtrationen zur Beschickung von nachgeschalteten GAK-Adsorbern verwendet wird. Der vorliegende Review gibt eine Übersicht der verschiedenen halb- und großtechnischen Untersuchungen unter Angabe von Kennzahlen zur Beschreibung der GAK, des Prozesses und der Abwassermatrix. Weiterhin werden die erzielten Reinigungsleistungen für ausgewählte Spurenstoffe und definierte Grenzkriterien in Abhängigkeit zu den Kennzahlen gebracht und diskutiert.

Im Folgenden soll eine Übersicht über die bereits durchgeführten halb- und großtechnischen Untersuchungen zur Adsorption an GAK mit dem Ziel der Spurenstoffelimination aus kommunalem Abwasser gegeben werden. Zudem sollen die für die Betriebskosten maßgeblichen erzielten Bettvolumina (NAHRSTEDT et al., 2011; BORNEMANN et al., 2012) bis zur Erreichung definierter Grenzkriterien dargestellt werden.

Bei der Frage nach der Abhängigkeit der erzielten Bettvolumina von gewählten Verfahrensparametern werden folgende potenziell zu erwartenden Zusammenhänge aus

den Daten der Studien näher betrachtet. Abhängigkeit der erzielten Bettvolumina von der:

- Prozess-Kennzahl Leerbettkontaktzeit EBCT [min] (Eng.: Empty Bed Contact Time: $EBCT [min] = GAK \text{ Betthöhe } h_{GAK} / \text{Filtergeschwindigkeit } v_F$),
- Abwassermatrix-Kennzahl DOC im Adsorberzulauf $c_{0,DOC}$ [mg/l] und
- GAK-Kennzahl Herstellungsart (Frischkohle oder Reaktivat)

Nicht weitergehend betrachtet wird hingegen die grundsätzliche Frage, welche Faktoren neben der adsorptiven Leistung maßgeblich sind, wenn über eine ggf. konkurrierende Nutzung der Einzelfilter einer Flockungsfiltrationsstufe zu entscheiden ist: Die P-Elimination mit Fällmittel und konventionellen Filtermaterialien gegenüber einer Spurenstoffelimination mit GAK. In den letzten Jahren hat der Kläranlagenzulauf vieler kommunaler Kläranlagen einen Rückgang der Frachten von DOC, CSB, und P_{ges} erfahren, so dass an den dort bestehenden Flockungsfiltrationsstufen neu nutzbare Freiheitsgrade entstanden sind. Weiterhin wird die Frage des maximalen Feststoffgehalts im Zulauf eines GAK-Adsorbers, ab dem dieser nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben wäre, aufgrund der bislang fehlenden Daten und der Abhängigkeit vom spezifischen Einzelfall explizit nicht erörtert. Im Weiteren wird der Begriff Adsorber synonym für GAK-Filter, GAK-Raumfilter oder GAK-Tiefenfilter verwendet, da hier die adsorptive Wirkung der GAK im Vordergrund stehen soll.

Theoretische Grundlagen

Aktivkohle und deren Herstellung

Aktivkohle bietet mit ihrer sehr großen inneren Oberfläche (typisch: 800 – 1.200 m²/g) eine hohe Adsorptionskapazität zur Aufnahme gelöster organischer Wasserinhaltsstoffe. Diese ist abhängig vom Aktivkohletyp, d. h. vom Ausgangsrohstoff (Stein- und Braunkohle, Kokosnussschale, Holz, Torf, synthetische Polymere), von der Art und Weise, wie dieser Rohstoff bei der Produktion zunächst thermisch verkocht (möglichst weitgehende Entfernung von flüchtigen Bestandteilen) wurde, und von der anschließenden thermischen Aktivierung (gezielter Abbrand von Kohlenstoff zur Vergrößerung der inneren Oberfläche). Diese Faktoren beeinflussen die innere Kornstruktur, sowie die Größe und die chemo-physikalischen Eigenschaften der inneren Oberfläche aus inhomogenen mikrokristallinen Grafitschichten (SONTHEIMER et al., 1985; KIENLE et al., 1980). GAK weist Durchmesser von wenigen Millimetern auf (ca. 0,5 – 4,0 mm) und wird zur Spurenstoffelimination als Schüttung in Adsorbern eingesetzt (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003).

Definition der Prozess-Parameter von GAK-Adsorbern

Zur Charakterisierung des GAK-Adsorbers aus verfahrenstechnischer Sicht können – wie bei der Filtration allgemein üblich – die Höhe der GAK-Schicht h_{GAK} [m] und die Filtergeschwindigkeit v_F [m/h] herangezogen werden. Die Filtergeschwindigkeit ist der Quotient des dem Adsorber zugeführten Volumenstroms Q [m³/h] und der Filterfläche A [m²]. Es konnte gezeigt werden, dass der Quotient aus Filtergeschwindigkeit

und Höhe der GAK-Schicht den Adsorptionsprozess hinreichend charakterisiert, so dass oftmals auf die alleinige Größe der Leerbettverweilzeit (engl. Empty Bed Contact Time, EBCT [min] = h_{GAK}/v_F) zurückgegriffen wird (KRÜCKELS et al., 1976). Die EBCT ist die Aufenthaltszeit, die das Wasser als zu behandelndes Medium benötigt, um das vom GAK-Bett beanspruchte Volumen als leeres Volumen zu durchströmen.

Für eine normierte Darstellung des zeitlichen Reinigungsverhaltens von GAK-Adsorbentien werden üblicherweise sogenannte Bettvolumina (BV in $\text{m}^3_{\text{Wasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$) verwendet. Im Gegensatz zur Angabe von Laufzeiten – in z. B. Monaten – haben diese den Vorteil, dass das eingesetzte Volumen des GAK-Betts in der Größe enthalten ist und so ein Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher GAK-Adsorbentien ermöglicht wird. Zur Abbildung des Durchbruchverhaltens von Qualitätskomponenten (z. B. definierte Spurenstoffe oder DOC) wird die Zulaufkonzentration des Adsorbentien c_0 auf Ablaufkonzentration c der jeweiligen Komponente i ($c_i/c_{i,0}$) bezogen.

Durchbruchskurve und Ausnutzung der Adsorptionskapazität durch Parallelschaltung

Zu Beginn des Beladungsvorgangs eines, in diesem Fall abwärtsdurchströmten, GAK-Adsorbentien (Abb. 1, $t = 0$) weist die GAK noch keine Beladung auf. Mit fortschreitender Zeit wird das GAK-Bett von oben nach unten beladen. Dabei bildet sich innerhalb des Adsorbentien eine wachsende Zone beladener und eine schrumpfende Zone unbeladener GAK aus ($t = 1$). Der Bereich zwischen diesen Zonen wird als Massentransferzone (MTZ) oder Massenübergangszone bezeichnet, da hier die eigentlichen Adsorptionsvorgänge zum Zeitpunkt der Betrachtung erfolgen. Dieses theoretische Beladungsverhalten zeigt sich in realen Adsorbentien jedoch nur, wenn sich nach einem Rückspülvorgang und der damit einhergehenden Klassierung des Filtermaterials, bedingt durch unterschiedliche Körnung und Dichte des Filtermaterials, die gleiche Schichtung einstellt.

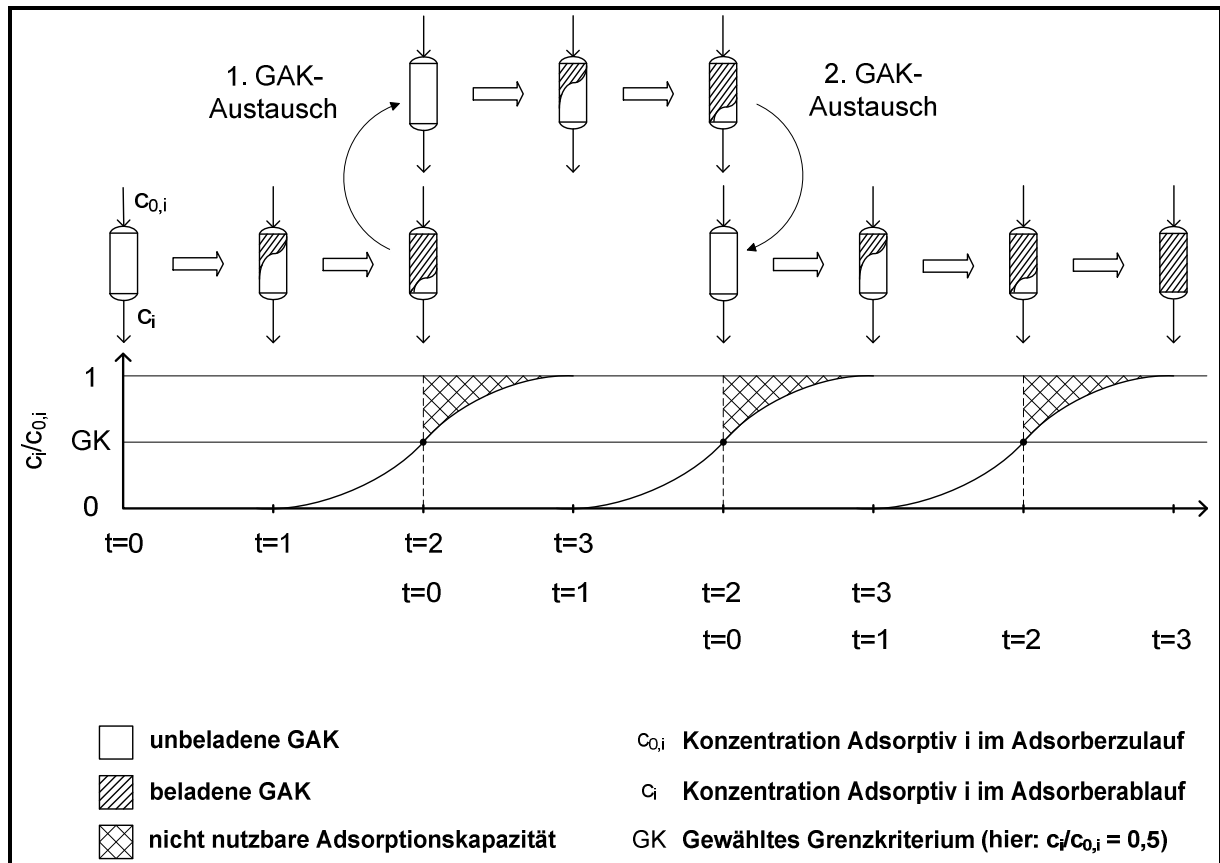


Abb. 1: Schematisierte Durchbruchskurven und nicht nutzbare Adsorptionskapazität bei Einzeladsorbern (BENSTÖM et al., 2016)

Stellt man die Konzentration des Adsorptivs auf den Zulauf normiert ($c_i/c_{0,i}$) gegen die Zeit oder die durchgesetzten Bettvolumina dar, so gelangt man zu der in Abbildung 1 dargestellten schematisierten Durchbruchskurve. Die Form der tatsächlichen Durchbruchskurve in der Praxis ist abhängig von der Adsorptionsisotherme des betrachteten Adsorptivs, den spezifischen Massentransferraten und der konkurrierende Adsorption. Es zeigt sich, dass erst wenn die Massentransferzone die unterste GAK-Schicht erreicht hat, eine Konzentration des Adsorptivs im Ablauf ($= c_i/c_{0,i} > 0$) messbar wird. Wenn ein in der jeweiligen Anwendung – z. B. aufgrund gesetzlich einzuhaltender Bestimmungen – zu definierendes Grenzkriterium (GK) erreicht wird, muss die beladene GAK gegen unbeladene ausgetauscht werden (erstmalig bei $t = 2$). Es wird deutlich, dass obwohl ein Austausch der GAK zur Einhaltung des GK erforderlich ist, die Adsorptionskapazität noch nicht erschöpft ist ($c_i < c_{0,i}$). Eine Parallelschaltung von GAK-Adsorbern führt hingegen zu einer deutlich besseren Ausnutzung der verwendeten GAK und damit zu einer längeren durchschnittlichen Standzeit, sofern immer die höchstbeladene GAK gegen unbeladene GAK ausgetauscht wird (ROBERTS et al., 1982; SONTHEIMER et al., 1988). Diese Tatsache liegt darin begründet, dass durch den sukzessiven Austausch der GAK ein Teil der Adsorber immer deutlich unterhalb des definierten GK betrieben wird. Da jedoch nur die Mischung aus allen Abläufen das GK unterschreiten muss, kann ein Teil der Adsorber oberhalb des zulässigen Grenzwerts betrieben werden. Bei bekannter Durchbruchskurve eines Einzeladsorbers kann die sich ergebende Laufzeitverlängerung und damit die erzielbaren Bettvolumina durch Parallelschaltung iterativ ermittelt werden. Die aus der quasi-

linearen Durchbruchskurve auf der Kläranlage Düren ermittelte Laufzeitverlängerung durch Parallelschaltung von sechs Adsorbern beträgt für den Spurenstoff Carbamazepin mit dem Grenzkriterium $c_i/c_{0,i} = 0,2$ (entspricht 80 % Restelimination im Adsorber) beispielsweise mehr als 70 % im Vergleich zum Einzeladsorber (BENSTÖM et al., 2014b). Die durch Parallelschaltung zu erzielende Laufzeitverlängerung ist insbesondere abhängig von der Anzahl der Adsorber, dem Reinigungsziel und der Form der Durchbruchskurve und ist deshalb fallspezifisch aus der Durchbruchskurve des Einzeladsorbers zu ermitteln.

Möglichkeiten der Einbindung von GAK-Adsorbern in kommunale Kläranlagen

GAK sollte i. A. in einem biologisch behandeltem, weitgehend feststofffreien Abwasser eingesetzt werden, da die GAK-Adsorber selbst eine feststofffilternde Wirkung haben und zu hohe Feststoffbeschickungen zu häufige Rückspülungen erfordern würden. Weiterhin ist eine gute biologische Reinigung vorzusehen, um die Beladung mit gelöstem, organischen Kohlenstoff (DOC) zu minimieren, da der DOC in Konkurrenz zu den Spurenstoffen bei der Aktivkohleadsorption steht (ZIETZSCHMANN et al., 2014; WORCH, 2012). Deshalb sollten GAK-Adsorber im Ablauf einer gut bis sehr gut funktionierenden Nachklärung (NK) oder im Ablauf einer konventionellen Feststoffabtrennung, wie einer Festbettdenitrifikation, einem Flockungsfilter, einem Mikrosieb, einem Tuchfilter etc. eingesetzt werden.

Weiterhin ist die Einbindung von GAK-Adsorbern hinter Membranen möglich. Hierbei lassen sich insbesondere Membranbioreaktoren, die verfahrensbedingt ohne Nachklärung auskommen, und Mikro- oder Ultrafiltrationsmembranen unterscheiden. Für die Spurenstoffentfernung aus kommunalem Abwassers stehen somit folgende drei Verfahrensvarianten zur Verfügung:

1. Variante V1: GAK-Adsorber ohne vorgeschaltete Feststoffabtrennung: NK+GAK
2. Variante V2: GAK-Adsorber mit vorgeschalteter konventioneller Feststoffabtrennung durch Flockungsfilter (FF) oder Festbettdenitrifikation (FD): NK+FF+GAK oder NK+FD+GAK
3. Variante V3: GAK-Adsorber mit vorgeschalteter Feststoffabtrennung mittels Membranen durch Membranbioreaktor (MBR) oder nachgeschalteten Membranen, wie Mikrofiltration (MF) oder Ultrafiltration (UF): MBR+GAK, NK+MF+GAK oder NK+UF+GAK

Weiterhin lassen sich die GAK-Adsorber hinsichtlich der Durchströmungsrichtung (abwärts oder aufwärts) und des verwendeten Drucks (Gravitations- oder Druckfilter) unterscheiden. Für die Verwendung von GAK lassen sich oftmals bereits vorhandene bauliche Strukturen umnutzen. In Frage kommen dazu bei der GAK z. B. bestehende Flockungsfilter, wobei hier durch Austausch des alten Filtermaterials durch GAK und Anpassung der Betriebseinstellungen (Spülprogramm, Spülgeschwindigkeit etc.) eine Umnutzung einzelner Filter/Filterzellen vorgenommen werden kann (BENSTÖM et al., 2012; NAHRSTEDT et al., 2014). Ein Sonderfall der GAK-Anwendung besteht in

der Verwendung von sogenannten kontinuierlich gespülten Filtern als GAK-Adsorber. Diese werden aufgrund der fundamental anderen Wirkungsweise (andere Schichtung der GAK entsprechend des Korndurchmessers/der Dichte und andere Durchbruchkurven wie bei diskontinuierlich gespülten GAK-Adsorbern) an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Kontinuierlich gespülte GAK-Adsorber werden z. B. in (JEDELE, K.; MÜLLER, M., 2015) behandelt.

Reaktivierung von GAK

Mit zunehmender Beladung der GAK geht eine stetige Verminderung der Eliminationsleistung im Ablauf des Adsorbers einher. Wird das Grenzkriterium erreicht, müssen die Aktivkohlen thermisch reaktiviert oder durch neue ersetzt werden. Für den Ausbau der erschöpften GAK wird der Filterbetrieb unterbrochen, die GAK hydraulisch aus den Filtern in Silotransporter überführt und zu einem entsprechenden Dienstleister gebracht. Von diesem wird die GAK i. d. R. chargenrein gelagert, reaktiviert, gesiebt und zurückgeliefert. Beim Reaktivierungsprozess wird die GAK, deren Korn noch mit Wasser gefüllt ist, i. d. R. ohne mechanische Vortrocknung durch einen Drehrohrofen (seltener: Etagenofen) mit drei Zonen transportiert: die Korntrocknung bei geringer Temperatur, die Desorption von flüchtigen organischen Verbindungen und die Pyrolyse bei 800°C (HENNING et al., 2008). Je nach Quelle werden die Verluste bei der Reaktivierung durch Abbrand und Abrieb mit typischerweise zwischen 5 und 10 % (ÇEÇEN et al., 2012) oder mit 5 bis 15 % (GROMBACH et al., 2000) angegeben. Diese Verluste hängen insbesondere von der GAK-Sorte und der Betriebsweise des Reaktivierungsofens ab und müssen durch frische GAK – das sogenannte Make-Up – wieder ausgeglichen werden. Ein großer Teil dieser Verlustmenge beim Abrieb während der Reaktivierung gelangt i. d. R. als Pulveraktivkohle wieder in den Handel.

Material und Methode

Auswahl der eingeschlossenen Studien

Zur Aufnahme in die Auswertung wurden folgende Forderungen an die eingeschlossenen Studien gestellt:

- Beschickung der GAK-Adsorber mit Ablauf Nachklärung oder mit Ablauf Flokkationsfiltration oder mit Ablauf einer Festbett-Denitrifikation oder Ablauf eines Membranbiorektors / einer Membranfiltration (Mikrofiltration MF oder Ultrafiltration UF, jedoch keine „dichten Membranen“ wie Nanofiltration oder Umkehrosmose) aus der kommunalen Abwasserreinigung
- Nur GAK-Festbettadsorber in denen eine diskontinuierliche Spülung erfolgt, kein Wirbelbett, Fließbett o. Ä.
- Keine Ozonung oder AOP (Advanced Oxidation Processes) vor dem GAK-Adsorber
- Nur großtechnische oder halbtechnische GAK-Adsorber ($Q_{\min} = 100 \text{ l/h}$), insbesondere keine Schnelltests (sogenannte Rapid Small Scale Column Tests = RSSCT) mit aufgemahlener GAK

- Keine wesentliche Änderung der mittleren Leerbettkontaktzeit EBCT während der Versuchslaufzeit
- Reale Spurenstoffkonzentrationen in der Abwassermatrix, insbesondere keine (hoch)dotierten Spurenstoffkonzentrationen
- Bezug der Eliminationen auf den Zulauf der GAK-Adsorber, nicht auf eine andere Stufe des Reinigungsprozesses wie z. B. den Zulauf der Kläranlage

Auswahl der betrachteten Spurenstoffe

Ein weiteres Kriterium für den Einbezug einer Studie in den vorliegenden Review sind die gemessenen organischen Spurenstoffe. Zur Messung der Leistung von Verfahren zur Spurenstoffelimination haben sich Spurenstoffe bewährt, die seit Beginn der Betrachtung und Diskussion der Gewässerbelastung durch Spurenstoffe in vielen Studien gemessen wurden und welche auch mit gängigen analytischen Methoden in messbaren Konzentrationen ($> \mu\text{g/L}$) in den Abläufen der Behandlungsstufen nachweisbar sind. Sie finden sich in der Regel in jedem kommunalem Abwasser und werden in der biologischen Stufe nur ungenügend abgebaut. Ausgewählt wurden die Spurenstoffe Carbamazepin (CBZ, Antiepileptikum), Diclofenac (DCF, Analgetikum), Metoprolol (MET, Betablocker) und Sulfamethoxazol (SMX, Antibiotikum), die in verschiedenen Publikationen u. a. als Leitparameter diskutiert und/oder empfohlen werden (KOMS, 2014; WITTMER et al., 2014; GÖTZ et al., 2015). Die drei Erstgenannten sind gut bis sehr gut adsorbierbare Spurenstoffe, Sulfamethoxazol ist mittel bis schlecht adsorbierbar (JEKEL et al., 2013). Sehr schlecht adsorbierende Spurenstoffe wie z. B. das Röntgenkontrastmittel Amidotrizoensäure werden an dieser Stelle nicht betrachtet, da hier keine Durchbruchkurven im üblichen Messraster darstellbar sind und sie sich damit zur Quantifizierung der Adsorptionsleistung von GAK-Adsorbentien auf Kläranlagen nicht bewährt haben. Ebenfalls nicht betrachtet wurden Spurenstoffe wie Candesartan, Irbesatan u. a., die sich zwar in der aktuellen Änderung der Schweizer Gewässerschutzverordnung als Leitsubstanzen zur Überwachung der Spurenstoffelimination (UVEK, 2012) befinden, jedoch in den meisten der hier betrachteten Studien nicht untersucht wurden.

Datenextraktion und gewählte Grenzkriterien

Probenumfang und Probenahmeintervall sind bei den Studien sehr unterschiedlich. Der Bezugsmaßstab der normierten Ablaufkonzentration c/c_0 (Konzentration Ablauf Adsorber zu Zulauf Adsorber) ist immer das erzielte Bettvolumina BV [$\text{m}^3_{\text{behandeltesWasser}}/\text{m}^3_{\text{GAK}}$]. Für die Spurenstoffe wurde ein Grenzkriterium von 80% Restelimination im Adsorber definiert. Somit sind die BV zum Zeitpunkt $c/c_0 = 0,2$ des betrachteten Spurenstoffs maßgebend. Das gewählte Grenzkriterium stellt kein von den Autoren favorisiertes Qualitätsziel dar, sondern orientiert sich vielmehr an verschiedenen aktuellen Vorschlägen für eine mögliche Zielvorgabe einer zukünftigen Spurenstoffelimination in Deutschland und der Schweiz.

Neben der Elimination von Spurenstoffen ist die konkurrierende, stets parallel stattfindende Adsorption des gelösten organischen Kohlenstoffs (gemessen als DOC) ebenfalls von grosser Bedeutung zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der GAK-Filtration, da eine Reduzierung ggf. zu einer Reduzierung oder Befreiung von der

Abwasserabgabe in Deutschland führt (AbwV, 2014). Der für die Bemessung der Abwasserabgabe relevante homogenisierte CSB ist jedoch zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Adsorbern ungeeignet, da er neben den gelösten Anteilen (CSB filtriert) auch partikuläre Anteile enthält, deren Abscheidung nicht adsorptiv erfolgt. Die Auswertung des filtrierten CSB ist aus Ermangelung an Messwerten in den Studien nicht möglich, weshalb der DOC gewählt wurde. Als Abbruchkriterium für den DOC wurde das Unterschreiten von 20 % Restelimination (entspricht $c/c_0 = 0,8$) im GAK-Adsorber definiert. I. d. R. verbleibt nach Erschöpfung der Adsorptionskapazität der GAK eine konstante Elimination von rund 10 bis 20% der zulaufenden DOC Konzentration, so dass mit dem gewählten Grenzkriterium von 80 % bei den meisten Studien eine Erschöpfung des Adsorbers in Bezug auf den DOC erwartet werden kann. Man geht bisher davon aus, dass diese verbleibende Elimination durch biologische Aktivität in der GAK-Schüttung sowie Flockung und Anlagerung von kolloidalem CSB an Biofilmen generiert wird (BÖHLER, M.; FLEINER, J.; SIEGRIST, H.; SCHACHTLER, M., 2015; NAHRSTEDT et al., 2014).

Die Datenpunkte der Durchbruchkurven (c/c_0 des betrachteten Stoffs gegen BV) mussten zum Teil aufgrund fehlender Messwerttabellen in den Veröffentlichungen aus den Diagrammen abgelesen und interpoliert werden. Dort, wo Daten als tatsächliche Werte vorlagen, wurden diese von den jeweiligen Autoren als diskrete Werte übernommen. Zur Berechnung der erzielten Bettvolumina bis zum Erreichen eines gewählten Grenzkriteriums wurde zwischen den beiden nächstliegenden Werten unter- und oberhalb linear interpoliert.

Ergebnisse

In Abbildung 2, Abbildung 3 und Abbildung 4 sind der Einfluss der potentiell relevantesten Prozess-, GAK- und der Matrix-Kennzahl auf die erzielbaren Bettvolumina separat für die drei Grenzkriterien DOC ($c/c_0 = 0,8$), Carbamazepin und Diclofenac (je $c/c_0 = 0,2$) als Blasendiagramme dargestellt. Betrachtet wurden ausschließlich Studien, die Angaben zu EBCT, DOC_0 , GAK-Herstellungsart und erzielte Bettvolumina bis zum Erreichen des jeweiligen Grenzkriteriums machten. Der gezeigte Blasendurchmesser verhält sich dabei proportional zur Höhe des DOC_0 , die Färbung der Kreise gibt Auskunft über die Herstellungsart der GAK, die Lage der Mittelpunkte der Kreise zeigt die erzielten Bettvolumina der betrachteten Einzeladsorber in Abhängigkeit der Leerbettkontaktzeit EBCT.

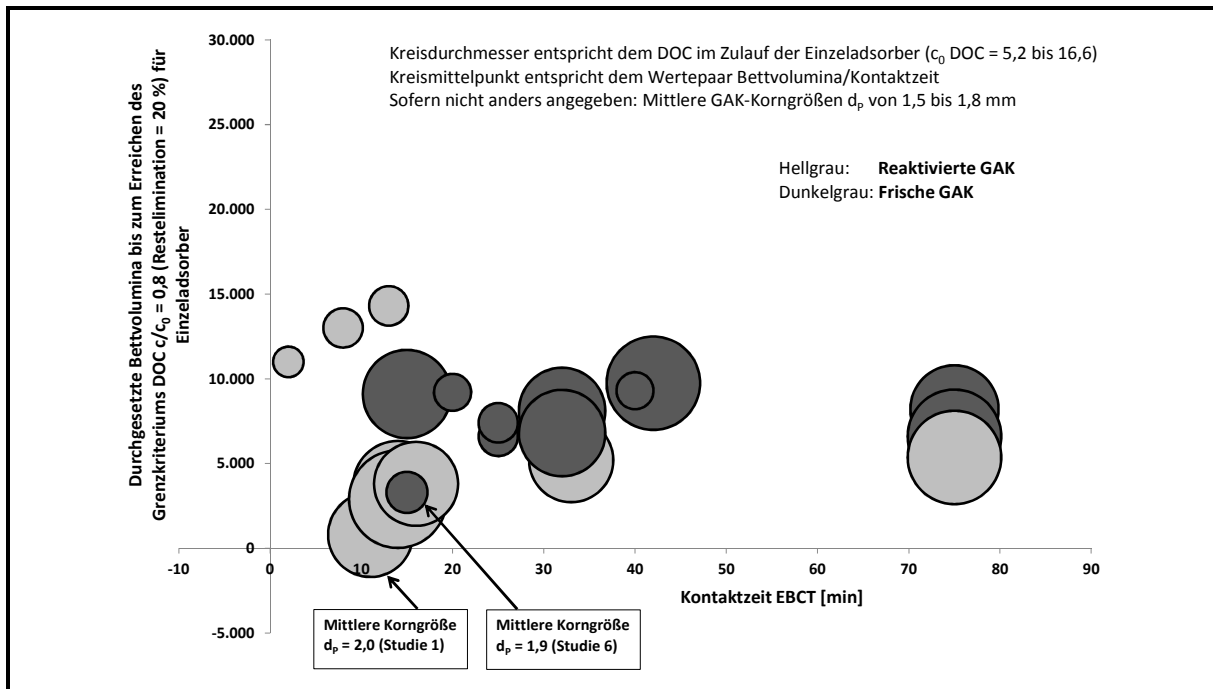


Abb. 2: Einfluss der Prozesskennzahl Leerbettkontaktzeit EBCT, der Matrixkennzahl DOC im Zulauf der GAK-Einzeladsorber und der GAK-Kennzahl Herstellungsart (Reaktivierte / Frische GAK) auf die durchsetzbaren Bettvolumina bis zum Erreichen des Grenzkriteriums $s\ c/c_0 = 0,8$ für DOC (Entspricht Restelimination von 20 %) für GAK-Einzeladsorber ($n = 20$) (BENSTÖM et al., 2016)

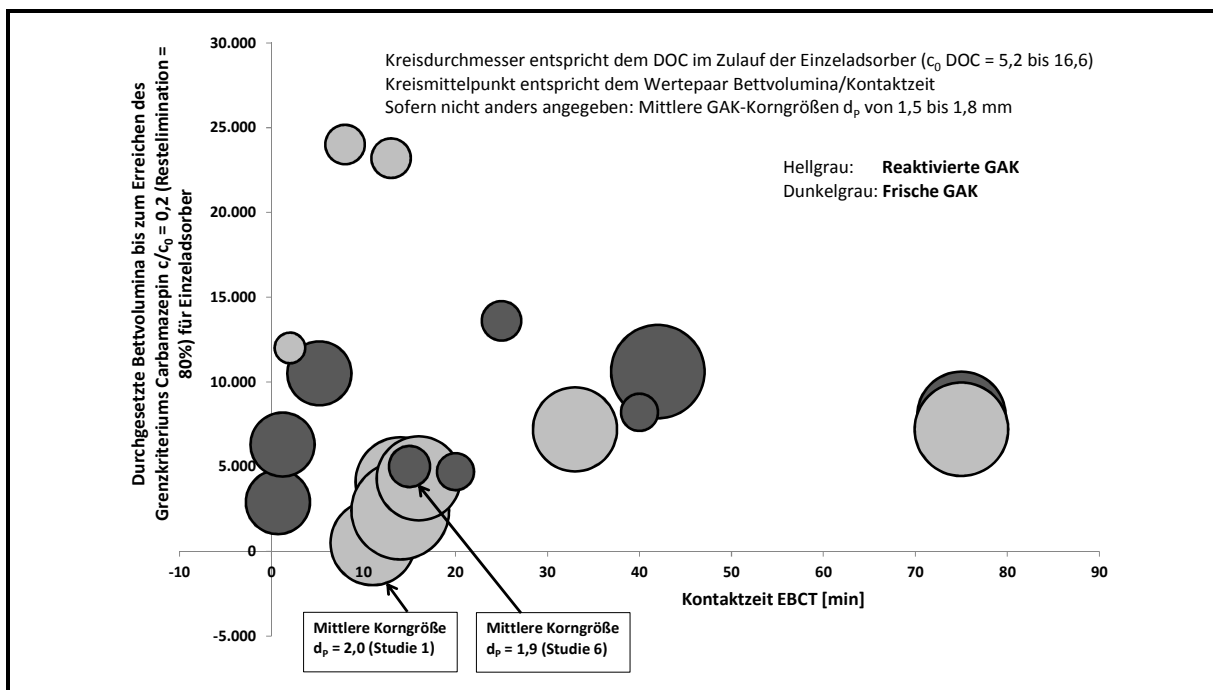


Abb. 3: Einfluss der Prozesskennzahl Leerbettkontaktzeit EBCT, der Matrixkennzahl DOC im Zulauf der GAK-Einzeladsorber und der GAK-Kennzahl Herstellungsart (Reaktivierte / Frische GAK) auf die durchsetzbaren Bettvolumina bis zum Erreichen des Grenzkriteriums $c/c_0 = 0,2$ (entspricht Restelimination von 80 %) für Carbamazepin bei GAK-Einzeladsorbern ($n = 18$) (BENSTÖM et al., 2016)

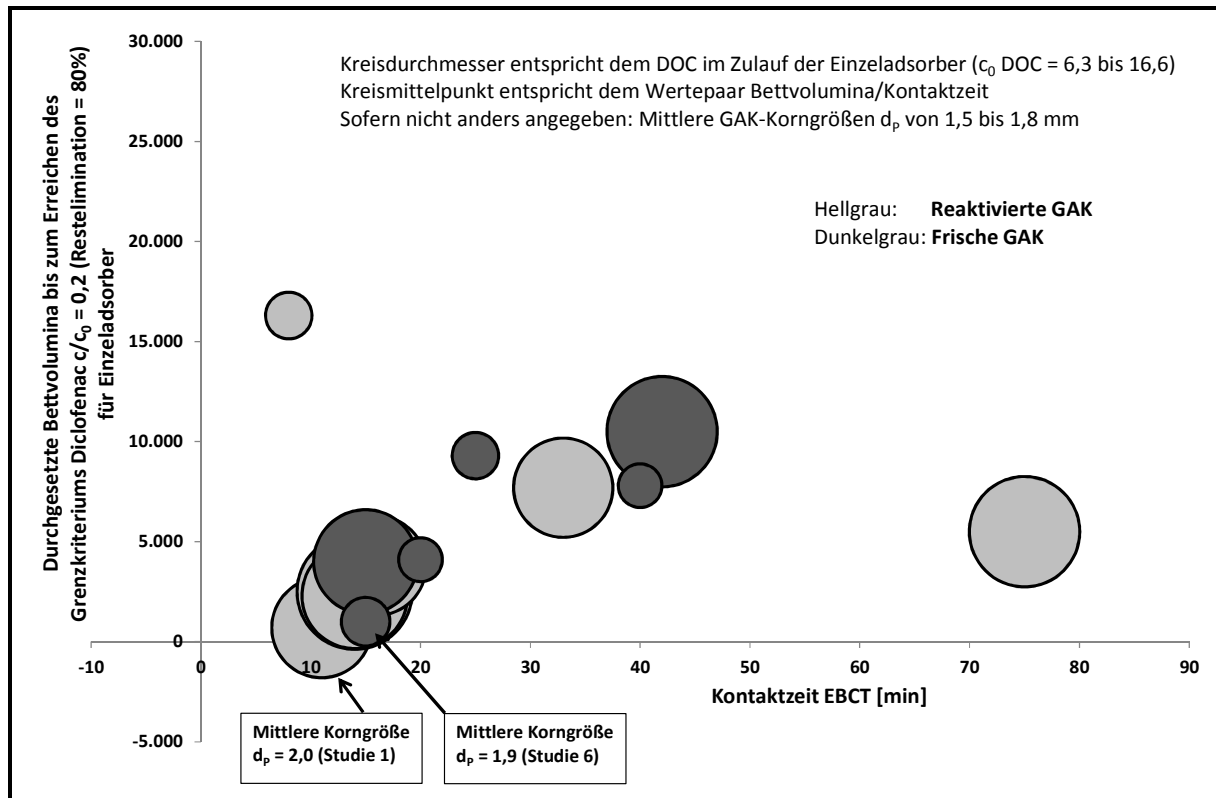


Abb. 4: Einfluss der Prozesskennzahl Leerbettkontaktzeit EBCT, der Matrixkennzahl DOC im Zulauf der GAK-Einzeladsorber und der GAK-Kennzahl Herstellungsart (Reaktivierte / Frische GAK) auf die durchsetzbaren Bettvolumina bis zum Erreichen des Grenzkriteriums $c/c_0 = 0,2$ (entspricht Restelimination von 80 %) für Diclofenac bei GAK-Einzeladsorbern ($n = 13$) (BENSTÖM et al., 2016)

Folgende Aussagen lassen sich aus den drei Abbildungen ableiten:

- Bei hohem DOC_0 (etwa 14 bis 17 mg/l) scheint eine EBCT zwischen etwa 20 und 40 min hinreichend zu sein, um die Adsorptionskapazität der GAK unter den verfahrenstechnischen Randbedingungen auszunutzen. Bis zum Grenzkriterium für Carbamazepin und Diclofenac ($c/c_0 = 0,2$) konnten Bettvolumina in der Größenordnung von 10.000 durchgesetzt werden. Bis zum Grenzkriterium für den DOC ($c/c_0 = 0,8$) konnten Bettvolumina in der Größenordnung von etwa 5.000 bis 10.000 BV durchgesetzt werden. Leerbettkontaktzeiten von deutlich größer 40 min führen offenbar zu keiner weiteren Erhöhung der erzielten Bettvolumina.
- Bei niedrigem und mittlerem DOC_0 (etwa 5 bis 11 mg/l) könnten bereits Leerbettkontaktzeiten kleiner etwa 20 min hinreichend sein, um die Leistung der GAK unter den verfahrenstechnischen Randbedingungen auszunutzen. Es ergeben sich hier sehr große Streuungen der erhobenen Daten, so dass z. B. bis zum Grenzkriterium für Carbamazepin ($c/c_0 = 0,2$) zwischen 4.700 bis 24.000 Bettvolumina durchgesetzt wurden. Für Leerbettkontaktzeiten deutlich größer 20 min fehlen bislang Daten, um ggf. eine weitere Steigerung der erzielbaren Bettvolumina nachzuweisen / zu widerlegen.
- Bei hohem DOC_0 (etwa 14 bis 17 mg/l) konnten Einzeladsorber mit frischer GAK zwar insgesamt höhere Bettvolumina erzielen als Einzeladsorber mit reaktivierter GAK; gleichzeitig wurden jedoch die höchsten Bettvolumina (bis zu 24.000 beim

Grenzkriterium Carbamazepin bis 24.000) bei geringen DOC_0 (etwa 5 bis 11 mg/l) mit reaktivierten GAK erzielt. Es lässt sich damit bislang keine eindeutige Präferenz für eine Herstellungsart (frische oder reaktivierte GAK) geben. Das ist insofern von besonderer Bedeutung, da Reaktivatpreise (inkl. Ein- und Ausbau) bei der Hälfte der Frischkohlepreise liegen können (BENSTÖM et al., 2014a) und die Menge der eingesetzten GAK der mit Abstand bedeutendste Kostenanteil bei ihrer Verwendung zur gezielten Spurenstoffelimination darstellt (BORNEMANN et al., 2012; NAHRSTEDT et al., 2014).

- Die Studien 1 und 6 mit den größten mittleren GAK-Korndurchmessern in den auswertbaren Studien von $d_p = 1,9$ resp. $2,0$ mm erzielten bei allen drei Grenzkriterien sehr geringe Bettvolumina, was sich wahrscheinlich auf die folgenden Einflussfaktoren zurückführen lässt: schlechte Adsorptionskinetik aufgrund einer kleineren Kornoberfläche und längere Transportwege ins Korninnere sowie potentiell schlechtere Aktivierung von größeren Körnern beim Herstellungsprozess.

Fazit

Im vorliegenden Review wurden erstmalig Kennzahlen aus 34 Studien, die sich mit der Elimination organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen mittels granulierter Aktivkohle (GAK) beschäftigten, zusammengetragen und ausgewertet. Die Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Nennvolumenstrom als Kennzeichen der Anlagengröße betrug $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $> 1.000 \text{ m}^3/\text{h}$, wobei 16 der 34 Anlagen einen Volumenstrom $< 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ aufwiesen. Aus den Studien wurden bis zu je 14 verschiedene Prozess-, GAK- und Matrixkennzahlen extrahiert, wobei nur zu den Prozesskennzahlen (Art der Vorbehandlung, Durchfluss und Leerbettkontaktzeit EBCT) vollständige und bei den Matrixkennzahlen nur zum Spurenstoff Carbamazepin bei allen Studien Angaben vorlagen. Bei den GAK-Kennzahlen wie Jodzahl, BET-Zahl usw. (zumeist Angaben der Lieferanten) und bei allen verbleibenden Matrixkennzahlen fanden sich hingegen nur in einem Teil der Studien Angaben (BENSTÖM et al., 2016).
- Hinsichtlich der Adsorberzulaufkonzentrationen für die Parameter AFS (0 bis 30 mg/l) und DOC ($5,2$ bis $16,6 \text{ mg/l}$) zeigten die Studien erhebliche Unterschiede, wobei die AFS entscheidend für den Betrieb der Adsorber hinsichtlich erforderlicher Spülintervalle und der DOC entscheidend für die zu erwartende konkurrierende Adsorption und damit die potentielle Standzeit der GAK ist. Für die Spurenstoffe Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol konnten im Mittel Konzentrationen von 1.429 ng/l , 1.688 ng/l , 1.481 ng/l und 391 ng/l im Zulauf der Adsorber ermittelt werden.
- In den meisten Studien wurden für die betrachteten Spurenstoffe (Grenzkriterium $c/c_0 = 0,2$, d. h. 80 % Restelimination im Einzeladsorber) eine Häufung im Bereich von $5.000 - 15.000$ Bettvolumina erzielt. Beim DOC lagen trotz anderem Grenzkriterium ($c/c_0 = 0,8$, d. h. 20 % Restelimination im Einzeladsorber) die durchgesetzten Bettvolumina in einer ähnlichen Größenordnung. Daraus folgt, dass obwohl für den DOC keine adsorptive Elimination mehr im Filter erfolgt, eine weitergehende Elimination der ausgewählten Spurenstoffe weiterhin stattfindet. Damit ist der DOC nach bisherigen Erkenntnissen alleine nicht geeignet, um für das GAK-Verfahren

die aktuelle Spurenstoffelimination durch Korrelation – so wie bei der PAK-Dosierung oder der Ozonung bislang geschehen – zu bestimmen.

- Die erzielten Bettvolumina bis zum Erreichen der definierten Grenzkriterien von Einzeladsorbern unterscheiden sich in Abhängigkeit der Randbedingungen der Studien erheblich. Im Falle von Diclofenac mit einem gewählten Grenzkriterium von $c/c_0 = 0,2$ (= 80 % Restelimination im Adsorber) wurden z. B. Bettvolumina von 800 bis 16.000 erzielt, was einem Faktor von 20 entspricht. Dies ist das Resultat des Vergleichs einer Vielzahl von Studien mit sehr inhomogenen Randbedingungen (Prozess-, GAK- und Matrixkennzahlen).
- Der Feststoffgehalt im Zulauf zum Adsorber hat keinen Einfluss auf die erzielbaren Bettvolumina bei den hier gewählten Grenzkriterien (BENSTÖM et al., 2016). Die vorherige Feststoffabscheidung hat jedoch maßgeblichen Einfluss auf die zu erwartenden Spülintervalle des GAK-Adsorbers (BENSTÖM et al., 2014b), die hier jedoch nicht betrachtet wurden.
- Bei hohem DOC_0 (etwa 14 bis 17 mg/l) scheint eine Leerbettkontaktzeit in der Größenordnung von etwa 30 min hinreichend zu sein, um die Adsorptionskapazität der GAK unter den verfahrenstechnischen Randbedingungen auszunutzen, was bei GAK-Betthöhen von 1,5 bis 3 m zu mittleren Filtergeschwindigkeiten von 3 bis 6 m/h führt. Bei niedrigem und mittlerem DOC_0 (etwa 5 bis 11 mg/l) scheinen bereits Leerbettkontaktzeiten kleiner etwa 20 min hinreichend zu sein, um die Adsorptionskapazität der GAK unter den verfahrenstechnischen Randbedingungen auszunutzen. Für Leerbettkontaktzeiten deutlich größer 20 min bei niedrigem bis mittlerem DOC_0 fehlen bislang Daten, um ggf. eine weitere Steigerung der erzielbaren Bettvolumina nachzuweisen / zu widerlegen.
- Bislang lässt sich keine eindeutige Präferenz für eine Herstellungsart (frische oder reaktivierte GAK) geben.
- Die Studien 1 und 6 mit den größten mittleren GAK-Korndurchmessern von $d_p = 1,9$ resp. 2,0 mm in den auswertbaren Studien erzielten bei allen drei Grenzkriterien sehr geringe Bettvolumina.
- Zu den Vorteilen der Adsorption an GAK zählen insbesondere ein aktivkohlefreier Schlamm Pfad auf der Kläranlage, ein aktivkohlefreies Filtrat, eine mögliche Reaktivierung und dadurch Rezyklierung des Adsorbens mit daraus resultierendem vermindertem Einfluss auf den Treibhauseffekt (MOUSEL et al., 2015; ASKURIS, 2015), eine mögliche Umrüstung von bestehenden Filterzellen oftmals ohne Baumaßnahmen durch Austausch des Filtermaterials und Anpassung des Spülprogramms und eine tatsächliche Entfernung statt Transformation von Spurenstoffen.
- Als wesentliche Anwendungsbegrenzung der Adsorption an GAK sind die Feststoffe (gemessen als AFS) im Zulauf der Adsorber zu nennen. Diese führen unter sonst identischen Bedingungen und gut abgestimmten Spülprogrammen nach bisherigem Kenntnisstand zwar nicht zu einer Verringerung der erzielbaren Bettvolumina (BENSTÖM et al., 2014b; KOLISCH et al., 2014; KNOPP et al., 2013), jedoch kann bei zu hohen AFS-Frachten ein sicherer Filterbetrieb durch zu häufiges Rückspülen nicht mehr gewährleistet werden. Die Adsorption an GAK zur gezielten Spurenstoffelimination aus kommunalem Abwasser ist damit bei vorheriger Feststoffabtrennung grundsätzlich besser anwendbar. Bei direkter Beschickung von GAK-Adsorbern aus dem Ablauf der Nachklärung ist eine Einzelfallbetrachtung erforderlich, um die Umsetzbarkeit zu verifizieren, wobei zumindest halbtech-

nische Versuche anzuraten sind. Es kann sich jedoch auch – sofern ein Flockungsfilter auf der Kläranlage vorhanden ist – anbieten, eine von in der Regel mindestens 6 großtechnischen (Flockungs-)Filterzellen auf GAK umzurüsten, um die Eignung für den spezifischen Fall insbesondere hinsichtlich der Spülintervalle im Praxisbetrieb zu prüfen.

- Die erzielten Bettvolumina von Einzeladsorbern sind nicht hinreichend geeignet zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit. Erst die berechneten Bettvolumina von parallelgeschalteten Adsorbern können zur Ermittlung von Kosten herangezogen werden, da sie eine wesentlich bessere Ausnutzung der GAK und damit Laufzeitverlängerung ermöglichen. So beträgt beispielsweise die aus der quasi-linearen Durchbruchkurve auf der Kläranlage Düren ermittelte Laufzeitverlängerung durch Parallelschaltung von sechs Adsorbern für den Spurenstoff Carbamazepin mit dem Reinigungsziel 80 % Restelimination im Adsorber im Gegensatz zum Einzeladsorber mehr als 70 % (BENSTÖM et al., 2014b). Demnach würde z. B. ein Einzeladsorber der nach 7.500 BV ein definiertes Grenzkriterium erreicht, durch Parallelbetrieb von sechs Adsorbern 12.750 BV erzielen können. Die Tatsache, dass GAK mehrfach reaktiviert werden kann, was üblicherweise deutlich günstiger ist, als frische GAK zu kaufen, muss dabei ebenso bedacht werden, wie die dabei auftretenden Masseverluste durch Handling bei Ein- und Ausbau, Transport und Abbrand bei der Reaktivierung, die durch frische GAK ersetzt werden müssen („Make-up“ Kohle). Weiterhin müssen die sich ggf. ändernden Adsorptionseigenschaften durch (insbesondere wiederholte) Reaktivierung beachtet werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine GAK, die vergleichsweise geringe Bettvolumina erzielt bei gleichzeitig geringen Kosten (Euro je m³ GAK inkl. Ein- und Ausbau) die wirtschaftlichste Variante sein kann, wobei dann der häufigere Austausch der GAK aus logistischer/betrieblicher Sicht bei der Bewertung mit betrachtet werden sollte.
- Bei den Kosten je behandeltem m³ Abwasser sind der GAK-Verbrauch und dessen Kosten je m³ GAK die wesentlichen Einflussfaktoren, sofern ein bestehender (Flockungs-)Filter als Adsorber genutzt werden kann (BORNEMANN et al., 2012; NAHRSTEDT et al., 2014). Die Kosten je m³ GAK können dabei in Abhängigkeit des gewählten Produkts um bis zum Faktor zwei schwanken (BENSTÖM et al., 2014a). Der GAK-Verbrauch lässt sich aus den erzielten Bettvolumina bei definiertem Grenzkriterium ableiten. Zudem ist maßgebend, welche organischen Spurenstoffe ausgewählt und welcher Eliminationsgrad definiert werden für eine derartige Betrachtung, da diese bei gleichen definierten Abbruchkriterium sehr unterschiedlich erreichbare Bettvolumina generieren. Bisher gibt es noch keine formulierten Qualitätsziele oder Kriterien für den Betrieb der 4. Reinigungsstufe mit Ausnahme der Schweiz, so dass noch ein großer Spielraum zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit besteht.

Empfehlungen und Ausblick

Aufgrund der Erkenntnisse während der Datenextraktion und den Ergebnissen des vorliegenden Reviews lassen sich folgende Empfehlungen geben und folgender Ausblick formulieren:

- Es wurden die erzielten Bettvolumina bis zum Erreichen definierter Grenzkriterien verglichen. Hinsichtlich der Spurenstoffe wurden aber nur in einer sehr geringen Anzahl von Studien Durchbruchskurven gemessen, die weit über das hier mit $c/c_0 = 0,2$ sehr tief gewählte Grenzkriterium für Spurenstoffe hinausgingen. Hier sollten zukünftig die Adsorber länger betrieben und messtechnisch begleitet werden, um Durchbruchskurven bis im besten Falle $c/c_0 = 1$ für ausgewählte Spurenstoffe im praktischen Betrieb zu generieren, um zukünftig insbesondere die sehr vorteilhafte Parallelschaltung von GAK-Adsorbieren exakter berechnen zu können.
- Die unterschiedlich gute Adsorbierbarkeit der verschiedenen Spurenstoffe führt bei der Planung des Messprogramms oftmals zu Zielkonflikten. Einerseits ist ein konstantes Probenahmenintervall mit gleichem analytischem Umfang (z. B. nach jeweils 1.000 BV) für die Abwicklung und das analysierende Labor wünschenswert. Andererseits muss auch dem unterschiedlichen Durchbruchverhalten Rechnung getragen werden, so dass bei gut adsorbierbaren Stoffen nicht zu viele Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen, die hinsichtlich der zu erstellenden Durchbruchskurve nicht verwertbar sind. Als vorteilhaft hat es sich dabei erwiesen, den DOC und andere sehr schlecht adsorbierbare Spurenstoffe beispielsweise exakt doppelt oder dreifach häufiger zu bestimmen als die gut adsorbierbaren Spurenstoffe und das Messprogramm im späteren Projektverlauf ggf. für einige Parameter aufgrund des bereits vollständigen Durchbruchs ($c/c_0 = 1,0$ oder $c/c_0 = \text{konstant}$) auszusetzen.
- Es konnte nur ein Teil der 34 Studien in die detaillierte Betrachtung einbezogen werden, da in einigen Studien wesentliche Angaben fehlten und/oder bestimmte Stoffe nicht gemessen wurden. Folgende Angaben sollten daher für zukünftige Studien mindestens gemacht werden: Art der Vorbehandlung vor Zulauf Adsorber, Leerbettkontaktzeit EBCT, Durchfluss Q, Verwendete GAK mit Korngröße, Schütt- und Rütteldichte, Rohstoff und Herstellung sowie die Matrixkennzahlen AFS, DOC, Carbamazepin, Diclofenac, Metoprolol und Sulfamethoxazol. Der SAK₂₅₄ hat sich ebenfalls als sinnvolle und kostengünstige Messgröße erwiesen und sollte daher zukünftig ebenso stets dokumentiert werden.
- Einzelfragestellungen (z. B. erforderliche Spülintervalle, Vergleich erzielbare Bettvolumina mit frischer GAK vs. GAK mit mehrfachen Reaktivierungszyklen, längere Leerbettkontaktzeiten bei geringem bis mittlerem DOC₀) sollten fallbezogen mit Änderung nur eines Parameters bei sonst identischen Randbedingungen im vorzugsweise großtechnischen Maßstab getestet werden.
- Die Adsorption an GAK zur gezielten Entfernung von Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser ist noch vergleichsweise neu, so dass derzeit verstärkt Bestrebungen der Lieferanten / der Reaktivierer erkennbar werden, die bestehenden GAK-Produkte / Reaktivierungslinien für den neuen Einsatzzweck / potentiellen Markt zu optimieren.
- Bislang existieren ebenso wie bei der PAK noch keine Qualitätskriterien, die die Eignung eines Aktivkohleprodukts für den spezifischen Anwendungszweck schnell und kostengünstig erkennen lassen. Die historischen Kennzahlen wie z. B. BET-Oberfläche oder Jodzahl haben sich hier als nicht hinreichend erwiesen (ZIETZ-SCHMANN et al., 2014). An dieser Fragestellung wird derzeit verschiedentlich geforscht, um zukünftig Aktivkohleprodukte schnell und kostengünstig – abseits teurer Spurenstoffanalytik – prüfen zu können.

- Aktuell werden auf den Kläranlagen Wuppertal Buchenhofen, Detmold, Köln Rodenkirchen, Köln Stammheim und Furt (Bülach, Schweiz) weitere halb- und/oder großtechnische Untersuchungen zur Adsorption an GAK durchgeführt.
- Zukünftig wird die Kombination der Verfahren Ozonung und GAK-Filtration (kurz: BAK = biologisch aktivierte Kohle) in die nähere Betrachtung rücken, da sich diese Kombination bereits seit vielen Jahrzehnten in der Trinkwassergewinnung als zielführend erwiesen hat. Dieses Verfahren wird in halb- und/oder großtechnischen Versuchen auf den Kläranlagen Detmold, Paderborn, Weißenburg (RÖDEL, S., 2015) und Furt (Bülach, Schweiz) in 2016 erprobt.

Literatur

- ABEGGLEN, C.; SIEGRIST, H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Bundesamt für Umwelt, Umwelt-Wissen Nr. 1214, Bern
- ASKURIS (2015): Verfahrensbewertung, Risikowahrnehmung, Risikoverhalten und Risikomanagement, Anthropogene Spurenstoffe und Krankheitserreger im urbanen Wasserkreislauf: Bewertung Barrieren und Risikokommunikation, Poster der TU Berlin und weiteren Partnern im Rahmen der Abschlussveranstaltung der BMBF-Fördermaßnahme RiSKWa, 10. und 11. Februar 2015, Berlin
- BENSTÖM, F.; PINNEKAMP, J. (2012): Übersicht über die verfahrenstechnischen Möglichkeiten der Anwendung von Aktivkohle auf kommunalen Kläranlagen. In: Pinnekamp, J. 2012, 13. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium, Band 16, 17. und 18. Oktober 2012, Köln, ISBN: 978-3-938996-09-6
- BENSTÖM, F.; KEYSERS, C.; LINNEMANN, V.; MONTAG, D.; PINNEKAMP, J.; HARTENBERGER, M.; NIEHOFF, H.; MAUER, C.; ARMBRUSTER, M. (2014a): AdOx Köln – Umrüstung der Kölner BIOFOR-Filter auf Spurenstoffelimination. In: Pinnekamp, J. 2014, Band 234, ISBN: 978-3-938996-40-9
- BENSTÖM, F.; STEPKES, H.; ROLFS, T.; MONTAG, D.; PINNEKAMP, J. (2014b): Untersuchung einer bestehenden Filterstufe mit dem Einsatz von Aktivkohle zur Entfernung organischer Restverschmutzung auf der Kläranlage Düren-Merken, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. (http://www.lanuv.nrw.de/uploads/tx_mmkresearchprojects/20140131-Abschlussbericht-WVER-GAK_end.pdf)
- BENSTÖM, F.; NAHRSTEDT, A.; BÖHLER, M.; KNOPP, G.; MONTAG, D.; SIEGRIST, H.; PINNEKAMP, J. (2016): Leistungsfähigkeit granulierter Aktivkohle zur Entfernung organischer Spurenstoffe aus Abläufen kommunaler Kläranlagen - Ein ReView halb- und großtechnischer Untersuchungen - Teil 1 und Teil 2, Korrespondenz Abwasser, No. 3/4
- BÖHLER, M.; ZWICKENPFLUG, B.; HOLLENDER, J.; THERNES, J.; JOSS, A.; SIEGRIST, H. (2012): Removal of micropollutants in municipal wastewater treatment plants by powder-activated carbon, Water Supply, Vol. 66, No. 10, pp. 2115–2121
- BÖHLER, M.; FLEINER, J.; SIEGRIST, H.; SCHACHTLER, M. (2015): Übersicht zu den biologischen Nachbehandlungen - Projekt „ReTREAT“ - Verfahrenstechnik und Betriebsergebnisse, VSA Peak Veranstaltung, EAWAG, 12. und 19. Juni 2015
- BORNEMANN, C.; HACHENBERG, M.; KAZNER, C.; HERR, J.; JAGEMANN, P.; LYKO, S.; BENSTÖM, F.; MONTAG, D.; PLATZ, S.; WETT, M.; KAUB, J. M.; KOLISCH, G.; OSTHOFF, T.; ROLFS, T.; STEPKES, H. (2012): Projekt Nr. 5: Ertüchtigung kommunaler Kläranlagen, insbesondere kommunaler Flockungsfiltrationsanlagen durch den Einsatz von Aktivkohle. Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, Abschlussbericht, Arge "Forschung Spurenstoff NRW" - MIKROFlock, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. (http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht_MikroFlock.pdf)

- ÇEÇEN, F.; AKTAŞ, Ö. (2012): Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment. Integration of Adsorption and Biological Treatment, Wiley-VCH, ISBN: 978-3-527-32471-2
- GÖTZ, C.; OTTO, J.; SINGER, H. (2015): Überprüfung des Reinigungseffekts. Auswahl geeigneter organischere Spurenstoffe, Aqua & Gas, Vol. 95, No. 2, pp. 34–40
- GROMBACH, P.; HABERER, K.; MERKL, G.; TRÜEB, E. U. (2000): Handbuch der Wasserversorgungstechnik, Oldenbourg Industrieverlag, Aufl. 3, ISBN: 3-486-26394-3
- HENNING, K.-D.; WANZL, W. (2008): Herstellung von kohlenstoffhaltigen Adsorptionsmitteln. In: Schmalfeld, J.; Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V 2008, ISBN: 978-3-936418, Hamburg
- JEDELE, K.; MÜLLER, M. (2015): Technologien zur Entfernung von Spurenstoffen und Keimen. Eine Bewertung der in Schussen Aktivplus realisierten Methoden aus Sicht des Ingenieurs, Präsentation auf der Abschlussveranstaltung BMBF - Verbundprojekt "Schussen Aktivplus"
- JEKEL, M.; DOTT, W. (2013): Leitfaden - Polare organische Spurenstoffe als Indikatoren im anthropogen beeinflussten Wasserkreislauf. Ergebnisse des Querschnittsthemas „Indikatorsubstanzen“, BMBF-Fördermaßnahme, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
- KIENLE, H. von; BÄDER, E. (1980): Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung, Ferdinand Enke Verlag, ISBN: 3432908814, Stuttgart
- KNOPP, G.; CORNEL, P. (Hrsg.) (2013): Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung, 10. Aachener Tagung Wasser und Membranen, 29. bis 30. Oktober 2013, Aachen, ISBN: 3-8107-0178-5
- KOLISCH, G.; TAUDIEN, Y.; BORNEMANN, C. (2014): Potenzial der Spurenstoffelimination mit Pulver- und Kornaktivkohle in bestehenden Filteranlagen, Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik an der Ruhr Universität Bochum, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum Nr. 67
- KOMS (2014): Handlungsempfehlungen zur Vergleichskontrolle und zur Betriebsüberwachung der 4. Reinigungsstufe, Kompetenzzentrum Spurenstoffe, Baden-Württemberg. (www.koms-bw.de)
- KRÜCKELS, W.; WEYL, R.; BUCHHOLZ, H. (1976): Untersuchung der Adsorption organischer Reststoffe an Aktivkohlen unter den Bedingungen der weitergehenden Abwasserreinigung, Schlussbericht über das Teilprojekt 4 des Sonderforschungsbereiches 82, Kommissionsverlag Oldenbourg, ISBN: 3-486-20671-0
- METZGER, S. (2010): Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser, Dissertation, TU Berlin, Oldenbourg Industrieverlag, München
- MOUSEL, D.; KREBBER, K.; PALMOWSKI, L.; PINNEKAMP, J. (Hrsg.) (2015): Energieverbrauch der Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen, 48. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, April 2015, Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, ISBN:
- NAHRSTEDT, A.; ALT, K.; BARNSCHIEDT, I.; FRITSCHKE, J.; SÜRDER, T.; BURBAUM, H.; KLAK, A. (2011): CSB- und Spurenstoffadsorption am Aktivkohlefestbett, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. (http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/forschung/pdf/Abschlussbericht_AOL.pdf)
- NAHRSTEDT, A.; BURBAUM, H.; MAUER, C.; ALT, K.; SÜRDER, T.; FRITSCHKE, J. (2014): Der Einsatz von granulierter Aktivkohle auf dem Verbandsklärwerk ‚Obere Lutter‘, KA Korrespondenz Abwasser Abfall, Vol. 61, No. 5, pp. 408–426
- ROBERTS, P. V.; SUMMERS, R. S. (1982): Performance of granular activated carbon for total organic carbon removal, Journal AWWA (American Water Works Association), Vol. 72, No. 2, pp. 113–118
- RÖDEL, S. (2015), telefonische Mitteilung an Frank Benstöm, 02. Oktober 2015, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München
- SONTHEIMER, H.; FRICK, B. R.; FETTIG, J.; HÖRNER, G.; HUBELE, C.; ZIMMER, G. (1985): Adsorptionsverfahren zur Wasserreinigung, Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, Karlsruhe
- SONTHEIMER, H.; CRITTENDEN, J. C.; SUMMERS, R. S.; HUBELE, C. (1988): Activated carbon for water treatment, Aufl. 2, ISBN:

- TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. (2003): Wastewater engineering. Treatment and reuse, McGraw-Hill, Aufl. 4, ISBN: 978-0-07-112250-4, Boston, Mass.
- UVEK, Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Abteilung Wasser (2012): Erläuternder Bericht zur Änderung der Gewässerschutzverordnung (GSchV)
- AbwV (2014): Verordnung über Anforderung an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung)
- WITTMER, I.; JUNGHANS, M.; SINGER, H.; STAMM, C. (2014): Mikroverunreinigungen – Beurteilungskonzept für organische Spurenstoffe aus diffusen Einträgen, Studie im Auftrag des BAFU, EAWAG, Dübendorf
- WORCH, E. (2012): Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes and Modeling, Walter de Gruyter, ISBN: 978-3-11-024022-1
- ZIETZSCHMANN, F.; ALTMANN, J.; RUHL, A. S.; DÜNNBIER, U.; DOMMISCH, I.; SPERLICH, A.; MEINEL, F.; JEKEL, M. (2014): Estimating organic micro-pollutant removal potential of activated carbons using UV absorption and carbon characteristics, Water Research, Vol. 56, pp. 48–55

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Frank Benstöm
Dr.-Ing. David Montag
Univ.-Prof. Dr.-Ing Johannes Pinnekamp
Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe Str. 1
52074 Aachen
E-Mail: benstoem@isa.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Andreas Nahrstedt
IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH
Moritzstraße 26, 45476 Mülheim an der Ruhr
E-Mail: a.nahrstedt@iww-online.de

Dipl.-Ing. Marc Böhler
Prof. Dr. Hansruedi Siegrist
Eidgenössische Anstalt für Abwasserreinigung, Wasserversorgung und Gewässerschutz, Eawag
Überlandstrasse 133, Postfach 611, CH 8600 Dübendorf
E-Mail: marc.boehler@eawag.ch

M. Sc. Gregor Knopp
Technische Universität Darmstadt
Institut IWAR – Fachgebiet Abwassertechnik
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt
E-Mail: g.knopp@iwar.tu-darmstadt.de