

Kosten der Pulveraktivkohleanwendung zur Spurenstoffelimination am Beispiel ausgeführter und in Bau befindlicher Anlagen

Steffen Metzger, Imee O. Tjoeng, Annette Rößler (Stuttgart),
Gert Schwentner (Sindelfingen) und Reinhold Rölle (Stuttgart)

Zusammenfassung

In Baden-Württemberg sind im Zuge der Spurenstoffdiskussion auf freiwilliger Basis mehrere Kläranlagen unterschiedlicher Größenordnung, die bereits eine Filteranlage besitzen, um eine Adsorptionsstufe erweitert worden. Weitere Anlagen befinden sich aktuell im Bau oder in der Planung. Die bisherigen Ergebnisse zur Spurenstoffelimination in diesen Anlagen bestätigen die Erkenntnisse halbertechnischer Untersuchungen. So zeigt sich beispielsweise, dass mit der Anwendung von 10 mg/L Pulveraktivkohle die Konzentration des Arzneimittelwirkstoffs Diclofenac in der Adsorptionsstufe dauerhaft zu mehr als 75 % verringert werden kann. Eine Auswertung der Herstellungs- und Betriebskosten der bereits realisierten bzw. sich in Bau befindlichen Anlagen auf Basis eines einheitlichen Maßstabs verdeutlicht, dass die Erweiterung der Kläranlagen um eine Adsorptionsstufe einen Anstieg der Abwassergebühr von 6 Cent bis 19 Cent pro Kubikmeter gebührenfähige Abwassermenge zur Folge hat. Bezogen auf einen Einwohner und Jahr resultieren daraus Mehrkosten für die Spurenstoffelimination zwischen 2 Euro und knapp 8 Euro.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Spurenstoff, Elimination, Pulveraktivkohle, Adsorption, Kosten

DOI: 10.3242/kae2014.11.007

Abstract

Costs of the Powdered Activated Carbon Application for the Elimination of Trace Elements using the Example of Implemented Plants and those under Construction

In Baden-Württemberg, as part of the trace element discussion, several wastewater treatment plants of various magnitudes, which already possess a filter facility, have been expanded on a voluntary basis with an adsorption stage. Several plants are currently under construction or are in the planning stage. The previous results of trace element elimination in these plants confirm the findings of semi-industrial investigations. Thus it appears, for example, that with the application of 10 mg/L powdered activated carbon the concentration of the pharmaceutical substance diclofenac in the adsorption stage can be permanently reduced by more than 75 %. An assessment of the manufacturing and operating costs of the already implemented plants respectively those under construction, on the basis of a uniform scale, illustrate that the expansion of the wastewater treatment plants by an adsorption stage have as a result an increase in the wastewater charge of 6 cents to 19 cents per cubic metre of chargeable wastewater. Related to one inhabitant and year there results an additional cost for the elimination of trace elements of between 2 Euros and just under 8 Euros.

Key words: wastewater treatment, municipal, trace element, elimination, powdered activated carbon, adsorption, costs

1 Einführung

Aufgrund der Entwicklung von immer feineren Messmethoden kann in den Gewässern zwischenzeitlich eine Vielzahl an anthropogen bedingten Substanzen nachgewiesen werden. Obwohl diese sogenannten „Spurenstoffe“ nur in sehr geringen Konzentrationen, das heißt im Nanogramm- bis Mikrogramm-Bereich, vorliegen, wurden in vereinzelt Untersuchungen

dennoch negative Einflüsse auf die aquatische Umwelt festgestellt [1, 2].

Als ein Haupteintragspfad für Spurenstoffe in die Gewässer werden kommunale Kläranlagen angesehen: Diese sind aufgrund ihrer geschichtlichen Entwicklung primär für den Rückhalt von Feststoffen, den Abbau von organischen Stoffen sowie

die Elimination von Nährstoffen ausgelegt. Der überwiegende Anteil an gelösten Spurenstoffen wird jedoch mit den bisherigen Reinigungsverfahren einer Kläranlage, auch wenn sie dem Stand der Technik entspricht, nur unzureichend oder gar nicht eliminiert. Um diese Substanzen gezielt aus dem Abwasser entfernen zu können, bedarf es daher einer zusätzlichen Reinigungsstufe (sogenannte vierte Reinigungsstufe). Als technisch umsetzbar haben sich für diesen Anwendungsfall bislang Verfahren mit Einsatz von granulierter oder pulverförmiger Aktivkohle als auch die Ozonung erwiesen.

Zu den Kosten für den Bau und Betrieb der vierten Reinigungsstufe existiert mittlerweile eine Reihe von Studien. Die bisher veröffentlichten Kostenangaben zur Spurenstoffentfernung unterscheiden sich jedoch oftmals durch unterschiedliche Ermittlungsansätze, was einen Vergleich erschwert. Hinzu kommt, dass für die Kostenabschätzungen der Betriebsmittel oftmals kein kläranlagenspezifischer Nachweis vorliegt, um die Wirksamkeit der angenommenen Dosiermenge an Aktivkohle oder Ozon für eine umfangreiche Spurenstoffelimination tatsächlich zu verifizieren. So sind in der Literatur beispielsweise für die simultane Anwendung von Pulveraktivkohle (PAC) Kostenangaben zu verzeichnen, die auf Dosiermengen von 20 mg/L PAC bis hin zu 60 mg/L PAC beruhen [3–6]. Demzufolge ergeben sich deutliche Unterschiede bei den Aussagen zu den Kosten.

In Baden-Württemberg sind inzwischen auf freiwilliger Basis mehrere Kläranlagen unterschiedlicher Größenordnung, die bereits eine Filteranlage besitzen, um eine vierte Reinigungsstufe erweitert worden. Weitere Anlagen befinden sich aktuell im Bau oder in der Planung [7]. Von einigen dieser Anlagen, bei denen allesamt Pulveraktivkohle zur Anwendung kommt, liegen mittlerweile belastbare Zahlen für die Kosten der Spurenstoffelimination vor.

Mit der nachfolgenden Darstellung können, basierend auf ausgeführten bzw. in Bau befindlichen Anlagenstufen und unter Berücksichtigung eines vergleichbaren Maßstabs, die Kosten für die Anwendung von Pulveraktivkohle zur Spurenstoffelimination aufgezeigt werden.

2 Umsetzung der vierten Reinigungsstufe

2.1 Verfahrensprinzip

Bei allen im Nachfolgenden betrachteten Kläranlagen wird das in Abbildung 1 dargestellte Verfahrensprinzip der Anwendung von Pulveraktivkohle zur Spurenstoffentfernung angewandt.

Das wesentliche Merkmal dieser Verfahrenstechnik besteht in der Verfahrensweise zur Beladung der Aktivkohle. Diese zeichnet sich in erster Linie durch die Entkopplung der Aufenthaltszeit des Abwassers von der Aufenthaltszeit der Pulveraktivkohle im System aus. Des Weiteren wird die Pulveraktivkohle innerhalb des Abwasserreinigungsprozesses der Kläranlage entgegen der Fließrichtung des Abwassers zur Anwendung gebracht.

Hierzu wird die frische Pulveraktivkohle zunächst dem biologisch gereinigten Abwasser im Bereich des Kontaktreaktors der sogenannten Adsorptionsstufe zugegeben. Um die Kohle im anschließenden Sedimentationsbecken abtrennen zu können, müssen dem Abwasser zusätzlich Flockungsmittel (Fällmittel) zum Aufbau einer absetzbaren Flocke wie auch Polymere (= Flockungshilfsmittel) zudosiert werden. Der im Sedimentationsbe-

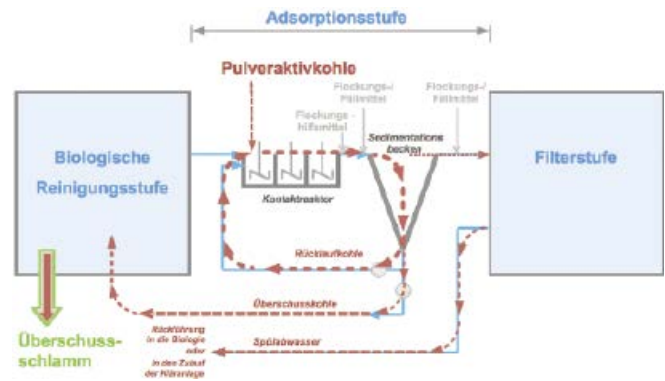


Abb. 1: Einbindung der Adsorptionsstufe in den Reinigungsprozess

cken abgesetzte „Kohleschlamm“ wird zur besseren Ausnutzung der Aktivkohle wieder als „Rücklaufkohle“ in den Kontaktreaktor, der mit einem Feststoffgehalt von ca. 2,5 bis 4 g/L betrieben wird, kontinuierlich zurückgeführt. Während die Aufenthaltszeit des Abwassers im Kontaktreaktor für den Bemessungsfall oftmals weitaus weniger als eine Stunde beträgt, verbleibt die Pulveraktivkohle durch die ständige Kreislaufführung mehrere Tage im System der Adsorptionsstufe und wird aus diesem in Form der „Überschusskohle“ entnommen und im Sinne des Gegenstromprinzips in die biologische Reinigungsstufe zurückgeführt. Da dort ein höheres Konzentrationsniveau gegeben ist, kann eine weitere Beladung der Aktivkohle erfolgen.

Die unzureichende Abtrennung der Pulveraktivkohle durch Sedimentation erfordert es, dass nach der eigentlichen Verringerung von gelösten, organischen Substanzen als letzter Verfahrensschritt eine Filteranlage zur Sicherstellung eines nahezu feststofffreien Kläranlagenablaufs anzuordnen ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Feinstabtrennung durch einen konventionellen Sandfilter erfolgen kann [8]. Allerdings muss dieser für einen dauerhaften Rückhalt der Pulveraktivkohle als Flockungsfiltration betrieben werden [9–11]. Darüber hinaus konnte im halbertechnischen Maßstab festgestellt werden, dass sich ein Tuchfilter ebenfalls grundsätzlich zur Feinstabtrennung eignet [12]. Diese Alternative zum Sandfilter wird, im Anschluss an eine Adsorptionsstufe, erstmals in Baden-Württemberg auf der Kläranlage Lahr großtechnisch realisiert.

2.2 Realisierung in den betrachteten Kläranlagen

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Kenndaten der betrachteten Kläranlagen wie auch über die Realisierung der adsorptiven Verfahrenstechnik. In vier der sechs Anlagen wurde die Adsorptionsstufe als Teilstrombehandlung ausgelegt. Auswertungen haben gezeigt, dass mit dem jeweils gewählten Teilstrom rund 85 % der jährlich biologisch gereinigten Abwassermenge gezielt behandelt werden kann [13].

Die Bemessung der Kontaktreaktoren sowie der Sedimentationsbecken wurde von den Planern wegen fehlender einheitlicher Vorgaben nach unterschiedlichen Ansätzen und unter Berücksichtigung der vorhandenen Platzverhältnisse durchgeführt. So wurden für die Bemessung der Kontaktreaktoren minimale Aufenthaltszeiten zwischen 30 Minuten und knapp einer Stunde gewählt. Die Volumina der Sedimentationsbecken wurden für eine minimale Aufenthaltszeit von einer Stunde bis hin zu knapp drei Stunden ausgelegt. Daraus resultieren, bezogen auf den maximal zu behandelnden Volumenstrom, unterschiedliche Beckengrößen und somit auch spezifische Investitionskosten.

Kläranlage	Kressbronn-Langenargen	Stockacher Aach	Lahr	Langwiese	Böblingen-Sindelfingen	Mannheim
Ausbaugröße	24.000 E	43.000 E	100.000 E	184.000 E	250.000 E	725.000 E
Belastung*	25.600 E	56.300 E	69.000 E	200.300 E	141.200 E	517.700 E
biologisch behandelte Jahresabwassermenge	2.300.000 m³	5.700.000 m³	6.100.000 m³	16.000.000 m³	14.500.000 m³	30.000.000 m³
Jahresschmutzwassermenge	1.520.000 m³	3.450.000 m³	3.800.000 m³	9.750.000 m³	8.900.000 m³	21.220.000 m³
gebührenfähige Abwassermenge	900.000 m³	1.500.000 m³	2.600.000 m³	5.200.000 m³	7.000.000 m³	21.000.000 m³
maximaler Zufluss bei Regenwetter	252 L/s	450 L/s	650 L/s	1.100 L/s	2.000 L/s	4.000 L/s
Adsorptionsstufe						
Q _{max, Ads.-stufe}	252 L/s	250 L/s	350 L/s	1.100 L/s	1.000 L/s	300 L/s 1.500 L/s
Jahr der Inbetriebnahme	2011	2012	2014	2013	2011	2010 2015
Ausführung	Neubau	Neubau	Neubau	Neubau	Neubau	Benutzung bestehender Becken
Kontaktreaktor						
- Volumen	552 m³	852 m³	1.030 m³	3.750 m³	1.800 m³	740 m³ 3.700 m³
- minimale Aufenthaltszeit	35 min	57 min	49 min	57 min	30 min	39 min
Sedimentationsbecken						
- Volumen	2.540 m³	924 m³	3.550 m³	8.500 m³	7.200 m³	2.350 m³ 11.750 m³
- minimale Aufenthaltszeit	2,6 h	1,0 h	2,8 h	2,1 h	2,0 h	2,2 h
- maximale Oberflächenbeschickung	1,6 m/h	0,82 m/h **	1,4 m/h	1,9 m/h	2,0 m/h	1,1 m/h
Filteranlage						
bereits vor Bau der Ads.-stufe vorhanden	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Art des Filters	Zweischichtfilter	Zweischichtfilter	Tuchfilter	Zweischichtfilter	Zweischichtfilter	Zweischichtfilter

* ermittelt über die mittlere CSB-Fracht der Jahre 2010 bis 2012

** Die angegebene Oberflächenbeschickung von 0,82 m/h bezieht sich auf die durch den Einbau von Lamellenabscheidern erzielte "wirksame" Oberfläche.

Tabelle 1: Kenndaten der betrachteten Kläranlagen

Auf der Kläranlage Stockacher Aach wurden zum Beispiel wegen der beengten Platzverhältnisse hydraulisch hochbelastete Sedimentationsbecken mit Lamellenabscheidern realisiert. Andererseits werden in der Kläranlage Mannheim nicht mehr benötigte Regenüberlaufbecken zur Adsorptionsstufe umgebaut, weshalb dort, im Vergleich zu den anderen Kläranlagen, die Einrichtung der vierten Reinigungsstufe nur sehr geringe spezifische Investitionskosten erfordert. Anhand dieser Beispiele wird deutlich, dass die Integration einer Adsorptionsstufe in eine bestehende Anlagenkonfiguration eine individuelle Aufgabenstellung ist. Die in Kapitel 4 dargestellten Ausführungen zu den Kosten erheben daher nicht den Anspruch einer allgemeingültigen Aussage, sondern spiegeln den Kostenrahmen wider, der bei realisierten Anlagen bzw. in der fortgeschrittenen Realisierung befindlicher Anlagen aufgetreten ist.

Die Bilanzierung erfolgt anhand von 24-h-Mischproben, die im Zu- und Ablauf der Adsorptionsstufe mengenproportional gezogen wurden. Vor der Analyse wurden sämtliche Proben

3 Reinigungsleistung

3.1 Beurteilungsmaßstab

Die Reinigungsleistung durch die angewandte adsorptive Verfahrenstechnik beinhaltet sowohl die Entnahme in der nachgeschalteten Adsorptionsstufe als auch die Entnahme in der biologischen Stufe aufgrund der zurückgeführten „Überschusskohle“. Die nachfolgend dargestellten Reinigungsleistungen berücksichtigen allerdings nur die Entnahmen in den jeweiligen Adsorptionsstufen, da der zusätzliche Reinigungseffekt durch die Rückführung der „Überschusskohle“ in die biologische Stufe aufgrund einer fehlenden Vergleichsstraße nicht näher beziffert werden kann. Zudem ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den Daten der Kläranlage Lahr um Ergebnisse aus halbtechnischen Untersuchungen handelt. Für die Kläranlage Langwiese (Ravensburg) liegen bislang keine vergleichbaren Daten zur Reinigungsleistung vor, da man sich dort noch in der Einfahrphase befindet.

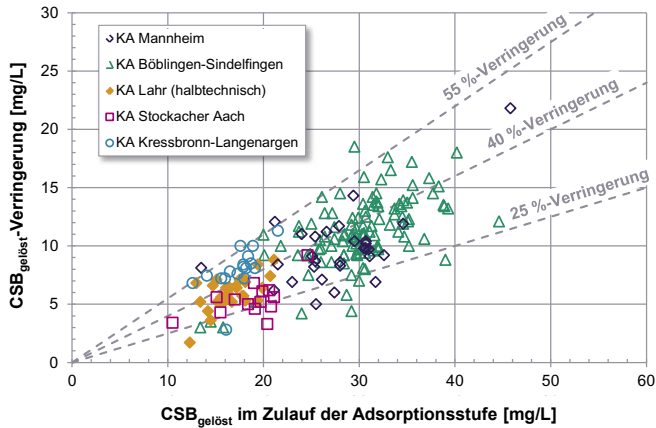


Abb. 2: $CSB_{gelöst}$ -Verringerung in der Adsorptionsstufe bei einer Pulveraktivkohledosierung von 10 mg/L

membranfiltriert (Porengröße 0,45 μm), da die Anwendung von Pulveraktivkohle ausschließlich auf eine Verbesserung der gelösten Abwasserfraktion abzielt. Zudem ist ein Vergleich zwischen den Leistungen verschiedener Adsorptionsstufen nur auf Basis der gelösten Phase möglich.

3.2 Verringerung der gelösten Restorganik

Aus Abbildung 2 geht hervor, dass bereits durch den Einsatz von rund 10 mg/L PAC die gelöste Restorganik in der Adsorptionsstufe signifikant verringert wird. Mit derselben Pulveraktivkohledosiermenge wird dabei je betrachteter Kläranlage mit zunehmendem $CSB_{gelöst}$ im Zulauf zur Adsorptionsstufe absolut eine höhere Verringerung der gelösten Restorganik erzielt. Die jeweilige prozentuale Verringerung bleibt indes allerdings gleich.

Trotz derselben eingesetzten Adsorbensdosiermengen zeigen sich jedoch kläranlagenspezifische Unterschiede im Hinblick auf die erzielten Verringerungen an gelöster Restorganik. Bei einem $CSB_{gelöst}$ -Eingangswert von 20 mg/L beträgt beispielsweise die Verringerung für die Kläranlage Stockacher Aach rund 5 mg/L bzw. 25 %, wohingegen für die Kläranlage Kressbronn-Langenargen eine rund doppelt so hohe Verringerung festgestellt werden kann.

3.3 Entnahme von Spurenstoffen

Die mittleren Eliminationsraten für ausgewählte Spurenstoffe in den Adsorptionsstufen sind in Abbildung 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Konzentrationen von adsorptiv sehr gut entfernbaren Substanzen, wie beispielsweise Metoprolol oder Carbamazepin, mit den eingesetzten Dosiermengen von 10 mg/L PAC auf allen Kläranlagen bereits zu über 80 % vermindert werden. Ähnlich hohe Entfernungsraten ergeben sich für Benzotriazol sowie Diclofenac. Sulfamethoxazol hingegen wird bei derselben Adsorbensdosiermenge in einem weitaus geringeren Umfang entnommen. Je nach Kläranlage liegt die mittlere Eliminationsleistung für dieses Antibiotikum bei rund 15 bis 65 %.

Aus Untersuchungen auf der Kläranlage Mannheim ist inzwischen bekannt, dass vorrangig Substanzen, die als gut adsorbierbar einzustufen sind, bereits durch die Rückführung der „Überschusskohle“ in die biologische Reinigungsstufe in einem gewissen Umfang aus dem Abwasser entfernt werden, sodass

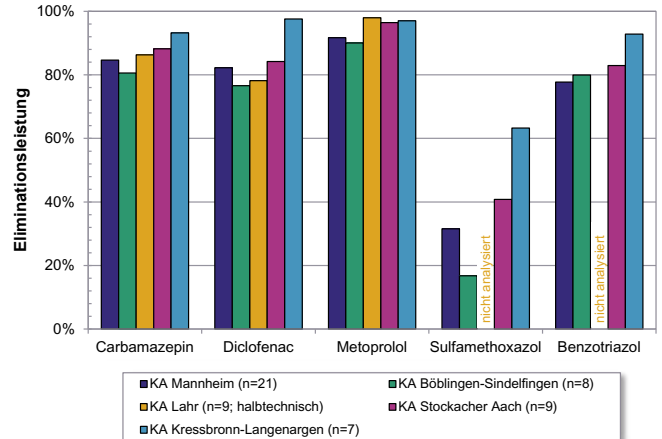


Abb. 3: Entnahme ausgewählter Spurenstoffe in der Adsorptionsstufe bei einer Pulveraktivkohledosierung von 10 mg/L

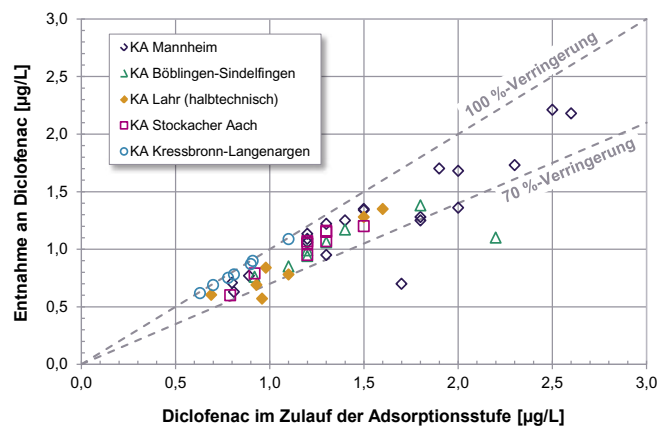


Abb. 4: Entnahme des Arzneimittelwirkstoffs Diclofenac in Abhängigkeit von der jeweiligen Zulaufkonzentration der einzelnen Adsorptionsstufen bei einer Pulveraktivkohledosierung von 10 mg/L

die Gesamtentnahme für derartige Stoffe somit noch etwas größer ist als in Abbildung 3 gezeigt.

Aus den Untersuchungsergebnissen der Kläranlagen geht zudem hervor, dass mit einer gleichbleibenden Pulveraktivkohledosiermenge mit zunehmender Konzentration einer Substanz im Zulauf zur Adsorptionsstufe eine absolut höhere Entnahme vorliegt [14]. Abbildung 4 zeigt dies beispielhaft für den Arzneimittelwirkstoff Diclofenac.

4 Kosten

4.1 Hinweise zur Kostenbetrachtung

In der nachfolgenden Kostenbetrachtung werden nur die Kosten für die Adsorptionsstufe in Ansatz gebracht. Die Kosten für eine der Adsorptionsstufe nachzuschaltende Filteranlage werden nicht mit einbezogen, da, mit Ausnahme der Kläranlage Lahr, wo aktuell eine Tuchfilteranlage erstellt wird, bei allen anderen Kläranlagen bereits seit mehreren Jahren ein Zweischichtfilter in Betrieb ist.

Als Bezugsgröße für die Ermittlung der zusätzlichen spezifischen Kosten wird die jeweilige gebührenfähige Abwassermenge herangezogen.

Gliederung der Kosten	Kurzzeichen	Dim	Adsorptionsstufe der Kläranlage					
			Kressbronn-Langenargen	Stockacher Aach	Lahr*	Langwiese**	Böblingen-Sindelfingen	Mannheim***
Anlagenkapazität Adsorptionsstufe	$Q_{max,Ads}$	L/s	252	250	350	1.100	1.000	1.500
gebührenfähige Abwassermenge	GebQ	m³/a	900.000	1.500.000	2.600.000	5.200.000	7.000.000	21.000.000
Bauwerk	BW	€	1.730.000	2.175.000	2.580.000	6.776.000	3.320.000	1.323.778
technische Ausrüstung	TA	€	1.290.000	1.185.000	3.050.000	3.197.000	980.000	5.447.222
Summe Herstellungskosten	HK	€	3.020.000	3.360.000	5.630.000	9.973.000	4.300.000	6.771.000
Abschreibung [BW/NZ_B + T/ANZ_{TA}]	AfA	€/a	129.250	133.375	267.833	382.533	148.333	396.243
durchschnittlicher gewichteter AfA-Satz	AfA	%	4,28	3,97	4,76	3,84	3,45	5,85
Zinsen [(HK/2)]* 4%	KaZi	€/a	60.400	67.200	112.600	199.460	86.000	135.420
Kapitalkosten (ohne Zuwendungen)	KKoZu	€/a	189.650	200.575	380.433	581.993	234.333	531.663
spez. Kapitalkosten (Bezug auf GebQ)		€/m³	0,211	0,134	0,146	0,112	0,033	0,025
Zuwendungen	Zu	€	1.730.000	2.016.000	2.160.000	4.851.000	2.100.000	1.354.200
Förderquote		%	57	60	38	49	49	20
Auflösung der Zuwendungen Mittelwert über 40 /15 Jahre	AlZu	€/a	./. 74.044	./. 80.035	./. 102.816	./. 186.278	./. 72.450	./. 79.221
Zinseinsparung durch Zuwendung	KaZi	€/a	./. 34.600	./. 40.320	./. 43.200	./. 97.020	./. 42.000	./. 27.084
Kapitalkosten (mit Zuwendungen)	KKmZu	€/a	81.006	80.220	234.417	298.695	119.883	425.358
spez. Kapitalkosten (Bezug auf GebQ)		€/m³	0,090	0,053	0,090	0,057	0,017	0,020

* Kostenanschlag: ohne Investitionskosten der Tuchfiltration und ohne Kosten für die Erneuerung der Fällmitteldosierstation und Brauchwasserversorgung

** Kostenanschlag, da in Ausführung bzw. in der Phase der Inbetriebnahme

*** Kostenberechnung

Tabelle 2: Kapitalkosten

4.2 Kapitalkosten

Für die bereits vor mehreren Jahren in Betrieb gegangenen Adsorptionsstufen in den Kläranlagen Kressbronn-Langenargen, Stockacher Aach und Böblingen-Sindelfingen liegen die Kostenfeststellungen vor. Die Adsorptionsstufen der Kläranlagen Langwiese und Lahr befinden sich aktuell in der Phase der Inbetriebnahme bzw. noch im Bau, sodass hier der Kostenanschlag angesetzt wurde. Für den Ausbau der Kläranlage Mannheim wird auf die Kostenberechnung zurückgegriffen. Bei allen angegebenen Kosten handelt es sich um Bruttokosten.

Die Kapitalkosten setzen sich aus den Aufwendungen für Abschreibung und Zinsen sowie den Auflösungen der erhaltenen Zuwendungen (Förderungen) zusammen. Maßgeblich für die Höhe der Abschreibungen sind die jeweiligen Herstellungskosten und Abschreibungsdauern. Zur Vergleichbarkeit wurden für alle Anlagen die Abschreibungsdauern entsprechend der erwarteten Nutzungsdauer für die Bauwerke auf 40 Jahre und für die Maschinenteknik auf 15 Jahre festgelegt. Die Abschreibung der Herstellungskosten erfolgt linear, das heißt über die gesamte Abschreibungsdauer mit jeweils gleichen Jahreskosten.

Die Zinsaufwendungen, die sich aus den aufgenommenen Krediten ergeben, wurden gemäß dem Kommunalabgabengesetz nach der Durchschnittsmethode berechnet, bei welcher die Hälfte des Kreditbetrags mit dem gewählten Zinssatz beaufschlagt wird. Der Zinssatz wurde einheitlich mit 4 % angesetzt.

Für die Realisierung der Adsorptionsstufen werden in allen Fällen Fördermittel gewährt. In Bezug auf die Herstellungskosten betragen die Förderquoten zwischen 20 und 60 %. Die gewährten Fördermittel bewirken eine Verminderung der Kapitalkosten. Diese setzt sich aus der Auflösung der

Fördermittel, berechnet mit dem durchschnittlichen AfA-Satz, und den Zinseinsparungen infolge der geringeren Kreditaufnahme zusammen. Letztere wurden analog den Zinsaufwendungen berechnet, sodass die Hälfte des Zuwendungsbetrags mit dem gewählten Zinssatz beaufschlagt und in Abzug gebracht wurde.

Ohne die gewährten Zuwendungen beträgt die aus den Kapitalkosten resultierende Erhöhung der Abwassergebühr für die Adsorptionsstufe zwischen 3 Cent/m³ (Mannheim) und 21 Cent/m³ (Kressbronn-Langenargen) (Tabelle 2). Die großen Unterschiede sind auf die individuellen Randbedingungen in Bezug auf die Anlagengröße, die vor Ort erforderlichen Baulichkeiten bzw. die Nutzung vorhandener Anlagenteile und die jeweiligen Baugrundverhältnisse zurückzuführen.

Die in unterschiedlicher Höhe gewährten Zuwendungen bzw. Förderquoten führen zu einer Verminderung der auf die Abwassergebühren umzulegenden Kapitalkosten. Die Bandbreite der aus den Kapitalkosten resultierenden Abwassergebühr beträgt zwischen 2 und 9 Cent/m³.

Da mit dem Betrieb einer Adsorptionsstufe die Reinigungsleistung beim CSB in der Regel um mehr als 20 % verbessert wird, ist eine Verrechnung der anfallenden Herstellungskosten mit der Abwasserabgabe grundsätzlich möglich. Hierdurch können sich erhebliche Einsparungen ergeben. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde dies in der hier dargestellten Betrachtung jedoch nicht berücksichtigt, da in einigen Fällen andere Maßnahmen zur Verrechnung herangezogen wurden.

4.3 Betriebskosten

Die Betriebskosten der Adsorptionsstufen setzen sich aus verschiedenen Kostenarten zusammen, auf die im Folgenden einzeln eingegangen wird.

Zu den Betriebsmitteln zählen die Pulveraktivkohle sowie die Flockungshilfsmittel (Polymere) und die Flockungsmittel (Fällmittel), die zur Ausbildung einer gut absetzbaren bzw. abtrennbaren Flocke vor dem Sedimentationsbecken und vor dem Filter dosiert werden. Die Kosten für die Flockungsmittel (Fällmittel) im Zulauf des Sedimentationsbeckens wurden in der Kostenbetrachtung nicht angesetzt, da eine entsprechende Verminderung der Fällmittelmenge für die vorgelagerte Simultanfällung, ohne Einbußen in der Phosphorelimination hinnehmen zu müssen, möglich ist. Lediglich die Einsatzmengen vor der Filtration wurden kostenmäßig berücksichtigt. Aus Vergleichsgründen wurden bei allen Anlagen für die Ermittlung der Betriebsmittelkosten jeweils dieselben spezifischen Preise (Bruttopreise) und spezifischen Verbrauchsmengen angesetzt. Durch die mengenproportionale Dosierung wird der Vollstrom wie Teilstrombehandlung ebenso Rechnung getragen wie dem individuellen Fremdwasser- und Niederschlagswasseranteil. Die spezifischen Betriebsmittelkosten werden durch die Beschaffungskosten der Aktivkohle dominiert und betragen zwischen 2,4 und 6,3 Cent je Kubikmeter gebührenfähiger Abwassermenge.

Nach den bisherigen Erfahrungen sind für den Betrieb der Adsorptionsstufen und zur Unterhaltung der Einrichtungen je nach Anlagengröße zwischen 0,5 bis 1,0 Stellenanteile erforderlich. Die Jahreskosten für eine Stelle wurden einheitlich mit 50 000 Euro veranschlagt. Auf die gebührenfähige Abwassermenge bezogen, liegen die Personalkosten unter 3 Cent/m³, bei den größeren Anlagen sogar deutlich darunter.

Die Angaben zum Stromverbrauch der Adsorptionsstufen beruhen bei den im Bau befindlichen Anlagen auf den Hochrechnungen aus der Planung und, soweit die Anlagen bereits in Betrieb sind, auf den tatsächlich gemessenen Verbräuchen. Dabei zeigt sich, dass die spezifischen Stromverbräuche der Adsorptionsstufen in Abhängigkeit der örtlichen Verhältnisse (zum Beispiel hydraulische Verluste, Fremdwasseranfall) zwischen 1,3 und 3,1 kWh/(EW × a) betragen. Zur Berechnung der Stromkosten wurde für alle Anlagen ein mittlerer Strompreis von 0,20 €/kWh angesetzt, der den Arbeitspreis und Leistungspreis sowie alle Zuschläge enthält. Auf die gebührenfähige Abwassermenge bezogen resultieren daraus Stromkosten zwischen 0,6 und 2,3 Cent/m³.

Der in der Adsorptionsstufe entstehende Schlamm wird bei allen Anlagen der vorgeschalteten biologischen Stufe zugeführt. Aufgrund der geringen Menge ist der Anstieg des zu entsorgenden Schlammes in der Praxis messtechnisch nur schwer erfassbar. Deshalb wird der zusätzliche Schlammanfall auf der Basis der dosierten Aktivkohle berechnet. Überschlägig wird angenommen, dass sich durch die Adsorption von ehemals gelösten Abwasserinhaltsstoffen die Masse der dosierten Aktivkohle verdoppelt. Die bislang gesammelten Betriebserfahrungen zeigen keine signifikante Verbesserung der Entwässerungseigenschaften des zu entsorgenden Schlammes [15]. Der Preis für die Entsorgung wurde mit 240 € je Mg Trockenrückstand angesetzt. Dies entspricht einem Entsorgungspreis von 80 € je Mg entwässertem Klärschlamm mit einem Trockenrückstand von rund 33 %. Die Mehrkosten der Schlamm Entsorgung liegen demzufolge bei rund 1 Cent pro Kubikmeter gebührenfähiger Abwassermenge.

Zur Überwachung der Spurenstoffelimination sind in regelmäßigen Abständen an den Stellen „Zulauf Kläranlage“, „Zulauf Adsorptionsstufe“ und „Kläranlagenablauf“ Proben zu ziehen und das Abwasser auf relevante Leitparameter zur Beurteilung der Adsorption (fünf Arzneimittelwirkstoffe, fünf Röntgenkontrastmittel sowie Benzotriazol) analysieren zu lassen. Es wird empfohlen, mindestens sechs Messkampagnen pro Jahr durchzuführen, bei größeren Anlagen (> 100 000 EW) sollte eine Beprobung pro Kohleanlieferung vorgenommen werden, jedoch maximal einmal pro Monat. Die Analysekosten betragen ca. 1000 Euro für eine Messkampagne. Auf die gebührenfähige Abwassermenge bezogen, sind diese Betriebskosten von untergeordneter Bedeutung.

Da die Adsorptionsstufen auf den Anlagen erst seit wenigen Jahren in Betrieb sind, können derzeit die erforderlichen Instandhaltungskosten nur grob abgeschätzt werden. Die bislang gesammelten Betriebserfahrungen zeigen jedoch keine ungewöhnlichen Verschleiß- oder Korrosionserscheinungen. Die jährlichen Instandhaltungskosten werden deshalb pauschal mit 0,5 % der Herstellungskosten angesetzt und liegen zwischen 0,2 und 1,7 Cent/m³.

Die Anwendung der Aktivkohle führt neben einer weitgehenden Spurenstoffentnahme auch zu einer Verminderung des CSB im Ablauf. Durch die Zugabe der Flockungs- bzw. Fällmittel in der Adsorptionsstufe erfolgt zudem eine weitere Verringerung des P_{ges} im Ablauf. Diese Reduzierung der eingeleiteten Schadstofffrachten aufgrund der Verbesserung der Reinigungsleistung nutzen die Betreiber je nach Ausgangslage in unterschiedlichem Umfang bei der Erklärung der Abwasserabgabe. Bei günstigen Randbedingungen kann dies sogar zu einer Unterschreitung der Schwellenwerte (CSB < 20 mg/L, P_{ges} < 0,1

Betriebskosten	Kurzzeichen	Dim	Adsorptionsstufe der Kläranlage					
			Kressbronn-Langenargen	Stockacher Aach	Lahr	Langwiese	Böblingen-Sindelfingen	Mannheim
Anlagenkapazität	Q _{max,Ads}	L/s	252	250	350	1.100	1.000	1.500
behandelte Abwassermenge Kläranlage	BehQ _{KA}	m³/a	2.300.000	5.700.000	6.100.000	16.000.000	14.500.000	30.000.000
behandelte Abwassermenge Adsorptionsstufe	BehQ _{PAC}	m³/a	2.300.000	4.800.000	5.185.000	16.000.000	12.200.000	25.500.000
gebührenfähige Abwassermenge	GebQ	m³/a	900.000	1.500.000	2.600.000	5.200.000	7.000.000	21.000.000
Aktivkohleverbrauch (Dosierung 10 g/m³)		Mg/a	23	48	52	160	122	255
Aktivkohlekosten (1.785 €/Mg)		€/a	41.055	85.680	92.552	285.600	217.770	455.175
Flockungs-/Fällmittel vor Filter (0,5 g Fe/m³)		Mg/a	9	20	21	65	50	104
Fällmittelkosten (160 €/Mg)		€/a	1.496	3.122	3.372	10.407	7.935	16.585
Flockungshilfsmittel (0,3 g Wirksubstanz/m³)		Mg/a	0,7	1,4	1,6	4,8	3,7	7,7
Flockungshilfsmittel-/Polymerkosten (4.000 €/Mg)		€/a	2.760	5.760	6.222	19.200	14.640	30.600
Summe Betriebsmittelkosten	BMK	€/a	45.311	94.562	102.147	315.207	240.345	502.360
<i>spez. Betriebsmittelkosten (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,050	0,063	0,039	0,061	0,034	0,024
Stellenanteile (für eine Stelle 50.000 €/a)			0,50	0,50	1,00	0,65	0,65	1,00
Personalkosten	PK	€/a	25.000	25.000	50.000	32.500	32.500	50.000
<i>spez. Personalkosten (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,028	0,017	0,019	0,006	0,005	0,002
Stromverbrauch		kWh/a	102.000	133.000	227.000	260.000	206.000	1.000.000
Stromkosten (0,20 €/kWh)	SK	€/a	20.400	26.600	45.400	52.000	41.200	200.000
<i>spez. Stromkosten (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,023	0,018	0,017	0,010	0,006	0,010
zusätzlicher Schlammanfall		Mg/a	46	96	104	320	244	510
Entsorgungskosten (240 €/Mg TR)	EnK	€/a	11.040	23.040	24.888	76.800	58.560	122.400
<i>spez. Entsorgungskosten (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,012	0,015	0,010	0,015	0,008	0,006
Spurenstoffanalysen		Anzahl	6	6	6	12	12	12
Analysekosten (1.000 €/Messkampagne)	AK	€/a	6.000	6.000	6.000	12.000	12.000	12.000
<i>spez. Analysekosten (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,007	0,004	0,002	0,002	0,002	0,001
Herstellungskosten	HK	€	3.020.000	3.360.000	5.630.000	9.973.000	4.300.000	6.771.000
Instandhaltungskosten (0,5% der HK)	IK	€/a	15.100	16.800	28.150	49.865	21.500	33.855
<i>spez. Instandhaltungskosten (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,017	0,011	0,011	0,010	0,003	0,002
Jahresschmutzwassermenge nach Abwasserabgabe		m³/a	1.520.000	3.450.000	3.800.000	9.750.000	8.900.000	21.220.000
Abwasserabgabe	Abwa	€/a	./. 29.000	./. 55.000	./. 115.000	./. 36.500	./. 28.000	./. 153.000
<i>spez. Abwasserabgabe (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,032	0,037	0,044	0,007	0,004	0,007
Summe Betriebskosten	BK	€/a	93.851	137.002	141.585	501.872	378.105	767.615
<i>spez. Betriebskosten (Bezug auf GebQ)</i>		€/m³	0,104	0,091	0,054	0,097	0,054	0,037

Tabelle 3: Betriebskosten bei den Anlagenstufen zur Spurenstoffelimination

mg/L) führen und damit zu einer Befreiung der auf die Parameter CSB und Phosphor entfallenden Abwasserabgabe. Aus den individuellen Angaben der Kläranlagenbetreiber resultieren Gebührenminderungen zwischen 0,4 und 4,4 Cent/m³.

Bei sämtlichen Kostenarten der Betriebskosten schneiden, wie die Tabelle 3 zeigt, größere Kläranlagen günstiger ab als kleinere Kläranlagen. In der Summe bewegen sich die spezifischen Betriebskosten in einer Spanne zwischen 4 und 10 Cent/m³.

4.4 Gesamtkosten

Insgesamt führt die Erweiterung um eine Adsorptionsstufe bei den betrachteten Anlagen zu einem Anstieg der Abwassergebühr in Höhe von 6 bis zu 19 Cent/m³ (Tabelle 4). Bezogen auf die derzeitigen Abwassergebühren (umgerechnet auf den einheitlichen Gebührenmaßstab) zwischen 1,80 und 2,68 €/m³, ergeben sich daraus für eine verbesserte Abwasserreinigung Gebührenerhöhungen von 3 bis 7 %.

Der durch die Adsorptionsstufe verursachte Gebührenerstieg fällt bei den betrachteten Anlagen mit zunehmender Anlagengröße deutlich ab (Abbildung 5).

Den größten Anteil an den Betriebskosten haben die Betriebsmittelkosten (Abbildung 6), die wiederum durch die Beschaffungskosten der Aktivkohle geprägt sind. Deshalb ist ein besonderes Augenmerk auf einen ordnungsgemäßen Betrieb

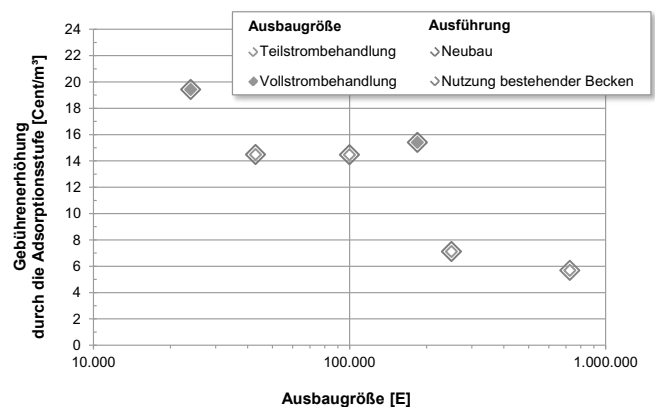


Abb. 5: Erhöhung der Abwassergebühr in Abhängigkeit von der Ausbaugröße (bezogen auf die gebührenfähige Abwassermenge)

der Dosieranlagen und auf die tatsächlich erforderlichen Dosiermengen zu legen.

5 Diskussion und Fazit

Von der Bevölkerung werden die Risiken aus der Einleitung von Spurenstoffen in die Gewässer vermehrt mit einem spürbaren Unbehagen wahrgenommen. Deshalb ist die Akzeptanz

Gliederung der Kosten	Kurzzeichen	Dim	Adsorptionsstufe der Kläranlage					
			Kressbronn-Langenargen	Stockacher Aach	Lahr	Langwiese	Böblingen-Sindelfingen	Mannheim
gebührenfähige Abwassermenge	GebQ	m³/a	900.000	1.500.000	2.600.000	5.200.000	7.000.000	21.000.000
Kapitalkosten (ohne Zuwendungen)	KK	€/a	189.650	200.575	380.433	581.993	234.333	531.663
spez. Kapitalkosten (Bezug auf GebQ)		€/m³	0,21	0,13	0,15	0,11	0,03	0,03
Kapitalkosten (mit Zuwendungen)	KKmZu	€/a	81.006	80.220	234.417	298.695	119.883	425.358
spez. Kapitalkosten (Bezug auf GebQ)		€/m³	0,09	0,05	0,09	0,06	0,02	0,02
Betriebskosten	BK	€/a	93.851	137.002	141.585	501.872	378.105	767.615
spez. Betriebskosten (Bezug auf GebQ)		€/m³	0,10	0,09	0,05	0,10	0,05	0,04
Jahreskosten (ohne Zuwendungen)	JK	€/a	283.501	337.577	522.018	1.083.865	612.438	1.299.278
spez. Gesamtkosten (Bezug auf GebQ)		€/m³	0,32	0,23	0,20	0,21	0,09	0,06
spez. Gesamtkosten (Bezug auf Einwohner)		€/(E*a)	12,60	9,00	8,03	8,34	3,50	2,47
Jahreskosten (mit Zuwendungen)	JK	€/a	174.857	217.222	376.002	800.566	497.988	1.192.973
spez. Gesamtkosten (Bezug auf GebQ)		€/m³	0,19	0,14	0,14	0,15	0,07	0,06
spez. Gesamtkosten (Bezug auf Einwohner)		€/(E*a)	7,77	5,79	5,78	6,16	2,85	2,27

Tabelle 4: Gesamtkosten und Gebührenänderung

für weitergehende Maßnahmen auf den Kläranlagen sehr hoch, zumal die damit einhergehenden Gebührenerhöhungen mit 3 bis 7 % vergleichsweise moderat ausfallen.

Der mehr als zweijährige Betrieb der Adsorptionsstufen in den Kläranlagen Kressbronn-Langenargen, Stockacher Aach, Böblingen-Sindelfingen und Mannheim sowie der Einfahrtrieb der Kläranlage Langwiese hat gezeigt, dass die angesetzten Bemessungsgrößen und Dosiermengen einen sicheren Betrieb und eine weitgehende Spurenstoffentfernung ermöglichen. So kann bereits mit einer Pulveraktivkohledosiermenge von 10 g/m³ eine Vielzahl von Stoffen in einem hohen Umfang aus dem Abwasser entfernt werden. Zudem zeigt sich, dass die Stoffe, unabhängig von deren Konzentration im Zulauf zur Adsorptionsstufe, immer in gleichem prozentualen Umfang aus dem Abwasser eliminiert werden. Des Weiteren werden auf den betrachteten Kläranlagen, trotz der verschiedenen gewählten Bemessungsansätze und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Aufenthaltszeiten sowohl in den Kontaktreaktoren als auch in den Sedimentationsbecken, unter Anwendung der gleichen Pulveraktivkohlemenge, ähnliche Spurenstoffentfernungsraten erzielt. Der Einsatz der Pulveraktivkohle bewirkt zudem eine erhebliche Verminderung der in die Gewässer eingeleiteten Restorganik. Je nach Abwasserzusammensetzung ist eine Halbierung der eingeleiteten Fracht möglich.

Die Herstellungskosten der betrachteten Adsorptionsstufen betragen je nach Anlagengröße und vorhandenen Randbedingungen zwischen 3 und 10 Millionen Euro. Unter Berücksichtigung der in unterschiedlicher Höhe gewährten Zuschüsse resultieren daraus Gebührenerhöhungen zwischen 2 und 9 Cent/m³ gebührenfähiger Abwassermenge. Die Betriebskosten der Adsorptionsstufen betragen zwischen 4 und 10 Cent/m³. Die spezifischen Gesamtkosten betragen demzufolge zwischen 6 und 18 Cent/m³ und können so mit einem entsprechenden Gebührenerhöhung einhergehen. Die spezifischen Kosten nehmen dabei mit zunehmender Anlagengröße ab.

Unter Zugrundelegung eines durchschnittlichen gebührenpflichtigen Abwasseranfalls von rund 40 m³ je Einwohner betragen die jährlichen Mehrkosten für einen Einwohner somit zwischen 2,40 und 7,40 Euro. Ohne die tatsächlich gewährten

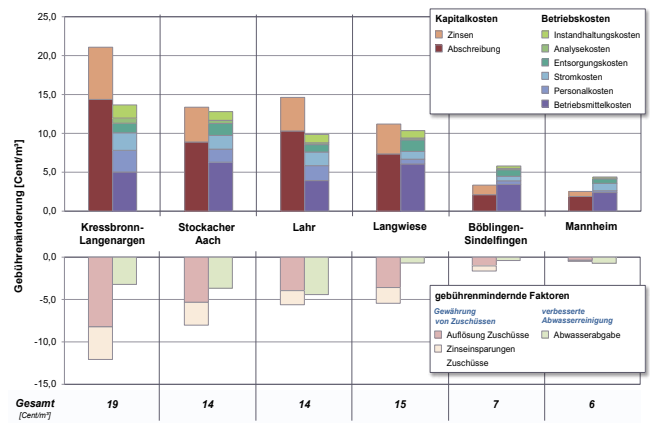


Abb. 6: Zusammensetzung der Gesamtkosten und Gebührenänderung in den jeweiligen Kläranlagen

Zuschüsse wäre der auf einen Einwohner entfallende Gebührenerhöhung zwischen 0,20 € und 4,80 € höher ausgefallen.

Soweit jedoch noch günstigere Randbedingungen vorliegen (zum Beispiel höhere Zuschussquote, optimale Verrechnung mit der Abwasserabgabe, Unterschreitung der Schwellenwerte) sind im Einzelfall auch noch geringere Gebührenerhöhungen bis hin zu einer vollständigen Kompensation möglich.

Laut einer bundesweiten Erhebung der DWA [16] lagen im Jahr 2013 die mittleren jährlichen Gesamtkosten der Abwasserbeseitigung bei 143 Euro je Einwohner. Die ermittelte Kostenspanne der realisierten Adsorptionsstufen zeigt deutlich, dass die damit verbundene zusätzliche finanzielle Belastung für einen Einwohner, selbst ohne die Berücksichtigung von Zuschüssen, vergleichsweise gering ist. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass nach derzeitigem Kenntnisstand der Betrieb einer Adsorptionsstufe gleichzeitig die Nachschaltung einer Filterstufe erfordert. Sofern diese noch nicht vorhanden sein sollte, ergäben sich tatsächlich höhere Kosten als hier dargestellt. Beispielsweise hat der im Jahr 2007 auf der Kläranlage Böblingen-Sindelfingen in Betrieb genommene Flockungsfilter zu einer Gebührenerhöhung von rund 10 Cent/m³ bzw. von jährlich rund 4 Euro je Einwohner geführt. In Böblingen-Sindelfingen beträgt die Mehrbelastung eines Einwohners bei der Abwasser-

beseitigung durch eine Adsorptionsstufe und einen Flockungsfilter weniger als 10 %.

Dank

Die Autoren danken dem Betriebspersonal der Kläranlagen Kressbronn-Langenargen, Stockacher Aach, Lahr, Langwiese, Böblingen-Sindelfingen und Mannheim für die Bereitstellung der notwendigen Angaben zur Erstellung des Kostenvergleichs. Zugleich gilt der Dank dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, das mit der finanziellen Förderung zur Einrichtung des Kompetenzzentrums Spurenstoffe Baden-Württemberg die Zusammenführung von Erfahrungen und Erkenntnissen rund um die vierte Reinigungsstufe in Baden-Württemberg ermöglicht.

Literatur

[1] Triebkorn, R.: *Modellstudie zur Effizienz der Reduktion der Gehalte an anthropogenen Spurenstoffen durch Aktivkohle in Kläranlagen: Monitoring vor Inbetriebnahme der Adsorptionsstufe auf der Kläranlage Langwiese*, Abschlussbericht an das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, UVM-Vorhaben-Nr. 306/2010, Tübingen, 2012

[2] Knörzer, B., Pfluger, P., Wasserrab, B., Dietrich, D. R.: *Entwicklung und Validierung von in vitro Prüfsystemen zum Nachweis von endokrin wirksamen Fremdstoffen: Chemisch-analytische Überprüfung und biologischer Nachweis von potenziell endokrin wirksamen Stoffen in ausgewählten Kläranlagenausläufen bzw. Vorflutern Baden-Württembergs*. Zwischenbericht des BWPLUS-Programms, 2000

[3] Fahlenkamp, H., Nöthe, T., Nowotny, N., Launer, M.: *Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination von gefährlichen Stoffen in kommunalen Kläranlagen: Phase 3*, Abschlussbericht, 2008

[4] Ivashechkin, P.: *Elimination organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser*, Dissertation, RWTH Aachen, 2006

[5] Knollmann, J., Hübner, H.: *Ertüchtigung der Zentralkläranlage Rietberg zur Elimination von Spurenstoffen: Variantenbetrachtung, Machbarkeitsstudie*, Hannover, 2013

[6] Tacke, D., Herbst, H., Köster, S., Beier, S., Bergmann, A., Mälzer, H.-J.: *Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen: Gütebetrachtungen und Kostenbetrachtungen*, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Aachen, 2008

[7] Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, www.koms-bw.de/klaeranlage (Stand 31. Juli 2014)

[8] Röbler, A.: *Betriebsbedingungen und Leistung einer Sandfilteranlage nach Aktivkohlebehandlung von Abwasser*, Diplomarbeit am Institut für GEO und UMWELT der Hochschule Biberach, 2007

[9] Mayer, V.: Anwendung von Aktivkohlepulver in zweischichtigen Schnellsandfiltern zur weitergehenden Abwasserreinigung, *gwf – Wasser/Abwasser* 1984, 125 (8), 373–380

[10] Metzger, S., Röbler, A., Kapp, H.: *Optimierung der Pulveraktivkohleabtrennung durch Filtration als Grundlage zur Analogendimensionie-*

rung – Abschlussbericht Teilprojekt 2B des BMBF-Verbundprojektes „Erweiterung kommunaler Kläranlagen durch eine adsorptive Stufe zur Elimination organischer Spurenstoffe“ (Förderkennzeichen 02WA1023)

[11] Metzger, S., Röbler, A., Kapp, H.: *Machbarkeitsstudie zur Erweiterung des Klärwerks Mannheim um eine Adsorptionsstufe zur Verbesserung der Abwasserreinigung*, Februar 2013, unveröffentlicht

[12] Kapp, H.: *Feststoffabtrennung nach der Adsorptionsstufe mit Hilfe der Tuchfiltration im Klärwerk Lahr*, Untersuchungsbericht im Auftrag des Abwasserverbandes Raumschaft Lahr, November 2011, unveröffentlicht

[13] Metzger, S., Kapp, H.: Einsatz von Pulveraktivkohle zur Elimination von Mikroverunreinigungen, Vortrag bei der VSA-Fachtagung „Technische Verfahren zur Entfernung von Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser“ am 28. Oktober 2008 in Regensdorf/Schweiz, veröffentlicht in den Tagungsunterlagen

[14] Röbler, A., Metzger, S.: *Bestimmung der Spurenstoffelimination in Kläranlagen mit Aktivkohleeinsatz*, Abschlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Dezember 2013, unveröffentlicht

[15] Kopp, J.: *Untersuchung des Entwässerungsverhaltens von sechs ausgefaulten ÜS-Schlammproben der Kläranlage Mannheim aus einer Versuchsanlage*, Abschlussbericht zu den Untersuchungen im Auftrag des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL), April 2014, unveröffentlicht

[16] DWA: *Wirtschaftsdaten der Abwasserbeseitigung*, Ausgabe 2014, http://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/StOeP/DWA_Wirtschaftsdaten_2014.pdf (Stand: 31. Juli 2014), *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2014, 61 (8), 701–707

Autoren

Der Beitrag wurde von Mitgliedern der Arbeitsgruppe „Kosten und Energiebedarf der 4. Reinigungsstufe“ des Kompetenzzentrum Spurenstoffe (KomS) Baden-Württemberg sowie Mitarbeitern des KomS erarbeitet.

Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg
c/o Universität Stuttgart
Bandtäle 2, 70569 Stuttgart

Dr. Steffen Metzger
Imee O. Tjoeng, M. Eng.
Dipl.-Ing. (FH) Annette Röbler
Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg

E-Mail: steffen.metzger@koms-bw.de

Dipl.-Ing. Gert Schwentner
Stadt Sindelfingen

Dr.-Ing. Reinhold Rölle
Ingenieurbüro Götzelmann & Partner

