

# Spurenstoffelimination mit Pulveraktivkohle im Aufstaubetrieb

Franziska Ehrhardt (Pforzheim/Kaiserslautern), Niklas Beißwenger (Neckarsulm/Pforzheim), Thi Hoa Nguyen (Pforzheim), Janna Parniske (Kassel), Johanna Neef (Stuttgart), Marie Launay (Stuttgart), Tobias Morck (Kassel), Thorsten Morhaus (Neckarsulm), Mario Bitsch (Pforzheim), Steffen Metzger (Pforzheim/Hamburg)

## Zusammenfassung

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie zur Erweiterung der Kläranlage Neckarsulm des Abwasserzweckverbands Unteres Sulmtal um eine Stufe zur gezielten Spurenstoffelimination wurde die Idee entwickelt, das „Ulmer Verfahren“, bei dem Pulveraktivkohle (PAK) zur Adsorption von organischen Spurenstoffen zum Einsatz kommt, im Aufstaubetrieb zu realisieren. Den Fragestellungen, inwieweit sich das Verfahren im Sequencing-Batch-Modus betreiben lässt und von welchen Auslegungswerten für dessen Realisierung ausgegangen werden kann, wurde im Fördervorhaben „PAKAuf“ nachgegangen. Hierbei wurde die Verfügbarkeit von Reallaboren in Baden-Württemberg genutzt und auf verschiedenen Kläranlagen mit einem Ulmer Verfahren das Absetzen des PAK-Schlammes im Kontaktreaktor untersucht. Parallel dazu wurde auf der Kläranlage in Neckarsulm eine Pilotanlage betrieben. Das abschließende Fazit des Projekts „PAKAuf“ lautet: Die Ausführung des Ulmer Verfahrens im Aufstaubetrieb ist möglich.

**Schlagwörter:** Abwasserreinigung, kommunal, Spurenstoffelimination, Pulveraktivkohle, Sedimentation, Aufstaubetrieb, Reallabor

DOI: 10.3242/kae2023.11.002

## Abstract

### Eliminating micropollutants with powdered activated carbon in a sequencing batch reactor

The idea of opting for the ‘Ulm method’ – which employs a powdered activated carbon (PAC) adsorption stage to remove organic micropollutants in a sequencing batch reactor (SBR) – emerged as part of a feasibility study on expanding the Neckarsulm wastewater treatment plant (WWTP) to add another treatment stage to remove micropollutants. Questions about the extent to which the post-treatment step can be operated in an SBR and which design specifications must be considered were examined in the ‘PAKAuf’ funding project. The project leveraged the availability of living labs in the federal state of Baden-Württemberg and investigated the settling properties of PAC sludge in the contact reactor at various WWTPs with a post-treatment step. The process was simultaneously operated in an SBR pilot plant at the Neckarsulm WWTP. This project demonstrates the feasibility of running a PAC-based adsorption stage in an SBR.

**Keywords:** Wastewater treatment, municipal, micropollutant elimination, powdered activated carbon, sedimentation, sequencing batch reactor, living labs

## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund

Manche organischen Spurenstoffe können schon in sehr geringen Konzentrationen nachteilige Wirkungen auf die aquatische Umwelt haben [1–3]. Kommunale Kläranlagen stellen einen bedeutenden Eintragspfad für viele dieser Spurenstoffe dar, deshalb wurde insbesondere in der ersten Dekade nach der Jahrtausendwende die Entwicklung von neuen Reinigungsverfahren zur Entfernung von Spurenstoffen vorangetrieben. Als geeignet und technisch umsetzbar haben sich dabei die Ozonung wie auch Verfahren mit granulierter Aktivkohle und Pulveraktivkohle (PAK) erwiesen. Ausgehend von Erkenntnissen aus halbtechnischen Untersuchungen wurden Ende der ersten Dekade erste Anlagen im großtechnischen Maßstab errichtet [4–6]. So war es möglich, die für eine Etablierung der Technik notwendigen Betriebserfahrungen zu sammeln. Zwischenzeitlich wird auf mehr als 45 Kläranlagen in Deutschland, mit unterschiedlicher Größenordnung, ein Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination betrieben [7].

Verfahren mit PAK erlauben eine situationsbezogene und damit bedarfsgerechte Dosierung des Adsorbens. Gegenwärtig sind drei verschiedene Verfahren zum PAK-Einsatz auf Kläranlagen bekannt und erprobt: Das sogenannte „Ulmer Verfahren“, die Dosierung von PAK vor einen Filter und die simultane Dosierung von PAK [8, 9]. Das Ulmer Verfahren war das erste, auf Kläranlagen in Baden-Württemberg realisierte Verfahren zur Spurenstoffentnahme. Zwischenzeitlich liegen für dieses Verfahren Betriebserfahrungen von 18 Kläranlagen in Deutschland und der Schweiz vor [10, 11].

### 1.2 Ulmer Verfahren

Bei dem Verfahren wird die PAK in eine der biologischen Stufe nachgeschalteten Adsorptionsstufe dosiert. Von dort aus wird sie zur weiteren Ausnutzung in eine vorgelagerte Reinigungsstufe zurückgeführt. Baulich besteht die Adsorptionsstufe aus

einem Kontaktreaktor und einem Sedimentationsbecken. Ihr wird in der Regel ein Filter zur Abtrennung von restlicher Aktivkohle nachgeschaltet. Die im Sedimentationsbecken abgesetzte PAK wird zur besseren Ausnutzung des Adsorbens wieder in den Kontaktreaktor zurückgeführt. Durch den damit innerhalb der Reinigungsstufe angereicherten PAK-Schlamm ist selbst bei einem Ausfall der PAK-Dosierung noch eine vergleichsweise hohe Spurenstoffelimination gegeben. Die verfahrensbedingte Zugabe von Fällmittel zur chemisch-physikalischen Abtrennung der PAK hat sehr niedrige  $P_{ges}$ -Ablaufwerte im Bereich von 0,1 bis 0,2 mg/l zum Nebeneffekt. Auswertungen haben ergeben, dass zum Erreichen dieser Werte insgesamt nicht mehr Fällmittel eingesetzt wird als vor dem Ausbau der Kläranlagen dosiert wurde [12]. Betrieblich erweist sich das Verfahren gegenüber einem AFS-Abtrieb aus der Nachklärung als vergleichsweise robust: Die abtreibenden Flocken werden größtenteils in den PAK-Schlamm eingebaut und damit in der Adsorptionsstufe abgetrennt. Hierdurch kann ein überproportionaler Feststoffanfall im Zulauf des Filters und damit eine Überlastung des Filters vermieden werden. Nachteile des Verfahrens sind der vergleichsweise hohe Flächenbedarf und der bauliche Aufwand.

Bislang verwendete Bemessungsansätze für das Ulmer Verfahren stammen aus den Untersuchungen während der Verfahrensentwicklung auf der Kläranlage Steinhäule in Ulm/Neu-Ulm. Im Rahmen dieser Untersuchungen lag der Schlammvolumenindex (ISV) des PAK-Schlammes, der wiederum Relevanz für die Auslegung der Sedimentation hat, im Bereich um 100 ml/g. Aus der Betriebsanalytik bestehender Anlagen geht hervor, dass die PAK-Schlämme meist ISV-Werte zwischen 40 und 100 ml/g aufweisen und damit als „sehr gut“ bis „günstig“ absetzbar einzustufen sind [13]. Des Weiteren ist bekannt, dass die Absetz- und Eindickeigenschaften des PAK-Schlammes im Jahresverlauf betrachtet relativ konstant sind und zudem durch die Zugabe von Hilfsstoffen wie Fällmittel und Polymer gezielt beeinflusst werden können [14, 15].

### 1.3 Untersuchungsvorhaben „PAKAuf“

Der Abwasserzweckverband (AZV) Unteres Sulmtal beabsichtigt, seine Kläranlage (Ausbaugröße 200 000 EW) um eine Spurenstoffelimination zu erweitern. Die für die Erweiterung vorhandene Fläche weist verschiedene bauliche Herausforderungen auf, die das Platzdargebot einschränken. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie [16] zur Spurenstoffelimination erarbeiteten die Weber-Ingenieure GmbH daher erstmalig, wissend um die guten Absetzeigenschaften des PAK-Schlammes, das Ulmer Verfahren im Aufstaubetrieb als eine Verfahrensvariante (PAK-SBR-Verfahren). Vorteile gegenüber dem Verfahren im Durchlaufbetrieb werden in einem geringeren Bauvolumen, dem Entfall des Rücklaufkohlepumpwerks wie auch in einer einfacheren Ausbildung der Dosiertechnik aufgrund der batchweisen Zugabe der Betriebsmittel gesehen. Um die getroffenen Annahmen zur Auslegung des Verfahrens zu verifizieren und auch um die Reinigungsleistung des Verfahrens zu prüfen, wurde vom AZV gemeinsam mit dem Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, der Universität Kassel und der Weber-Ingenieure GmbH das vom Land Baden-Württemberg geförderte Untersuchungsvorhaben „PAKAuf“ durchgeführt.

## 2 Vorgehensweise

Im Rahmen des Projekts „PAKAuf“ sollten als zentrale Fragestellungen die Reinigungsleistung und das Absetzverhalten untersucht werden (Abbildung 1). Dazu wurde auf der Kläranlage Neckarsulm über vier Monate eine Pilotanlage betrieben. Zusätzlich wurde in Reallaboren auf den Kläranlagen Mannheim, Öhringen, Wendlingen und Pforzheim das Absetzverhalten von PAK-Schlamm in bereits realisierten, unterschiedlich tiefen Kontaktreaktoren mittels Sichtscheibe und Schlammspiegelmessrohr untersucht. Begleitend wurden mit den PAK-Schlamm aus den Reallaboren und später auch an der Pilotanlage in Neckarsulm Absetzversuche in Standzylindern durch-

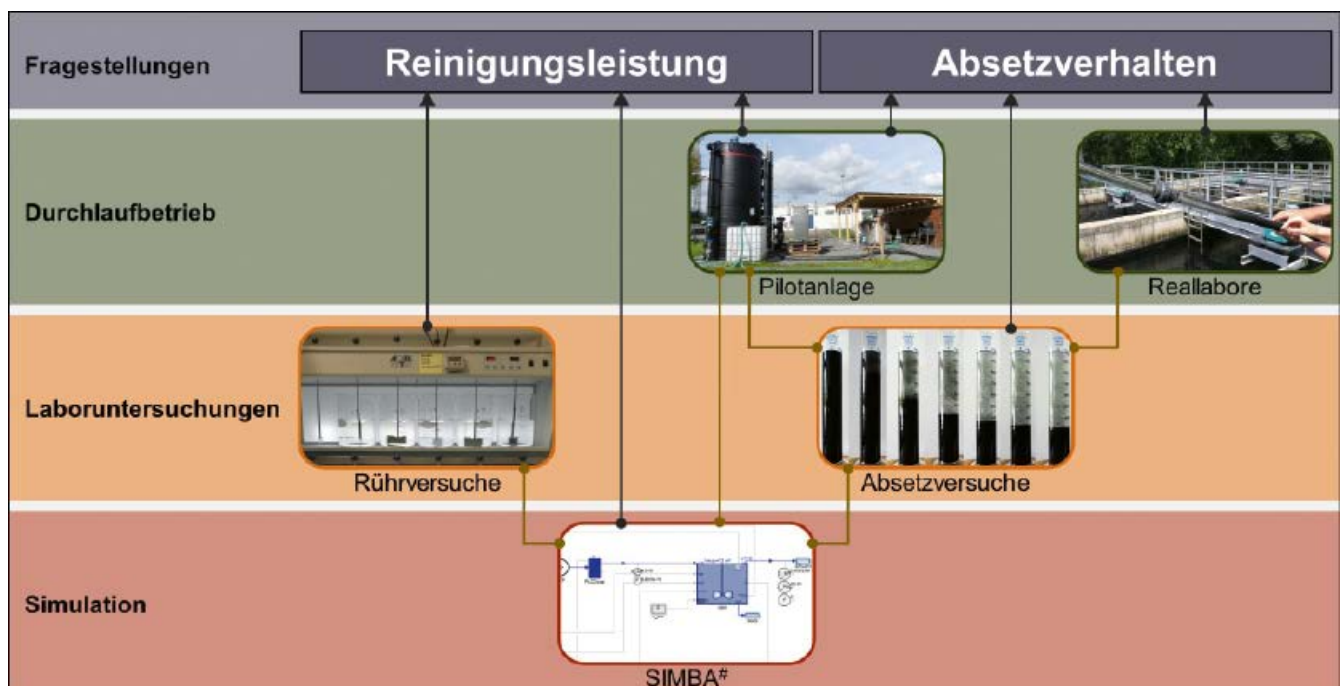


Abb. 1: Arbeitsschwerpunkte und Fragestellungen des Fördervorhabens „PAKAuf“

geführt. Ziel war hierbei, durch Variation des TS-Gehalts weiterführende Erkenntnisse zum Absetz- und Eindickverhalten des PAK-Schlammes zu erlangen.

Um Aussagen über die Reinigungsleistung des PAK-SBR-Verfahrens treffen zu können, wurden mehrmals wöchentlich 24-h-Mischproben aus dem Zu- und Ablauf der Pilotanlage unter anderem auf CSB,  $SAK_{254}$ ,  $PO_4\text{-P}$ ,  $P_{ges}$  und AFS untersucht. Zusätzlich wurden fünf Spurenstoffmesskampagnen, verteilt über den gesamten Versuchszeitraum, durchgeführt. Mithilfe von Rührversuchen im Labor wurden zusätzliche Erkenntnisse zur Reinigungsleistung des PAK-Schlammes generiert, die wiederum als Datengrundlage für die Erstellung eines Simulationsmodells des PAK-SBR-Verfahrens in SIMBA<sup>#</sup> dienten. Grundlagen zur Simulation des Ulmer Verfahrens wurden bereits im Rahmen des Vorhabens „MachS“ erarbeitet, das seinerzeit ebenfalls vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert wurde [17]. Darauf aufbauend konnte im Rahmen von „PAKAuf“ ein Modell für das PAK-SBR-Verfahren entwickelt und mittels Daten aus der Pilotanlage verifiziert werden. Mithilfe des PAK-SBR-Modells konnten zusätzliche Fragestellungen bearbeitet werden, denen aufgrund der begrenzten Versuchsdauer nicht mit der Pilotanlage nachgegangen werden konnte. Für eine Realisierung des Verfahrens kann das Modell eine Möglichkeit sein, um die Bau- und Betriebsweise hinsichtlich der Reinigungsleistung zu optimieren.

### 3 Pilotanlage

#### 3.1 Versuchsaufbau

Die Pilotanlage (Abbildung 2) wurde auf dem Gelände der Kläranlage Neckarsulm errichtet. Das zentrale Element der Anlage bildete der Versuchsreaktor mit einem Durchmesser von 2 m und einem Volumen von 12,6 m<sup>3</sup>. Für die Durchmischung des Versuchsreaktors wie auch zur optimalen Einmischung der Dosierstoffe wurde dieser mit einem Frequenzumwandlergeregelten Hyperboloid-Rührwerk ausgestattet. Der Reaktor wurde auf einer Höhe von ca. 4 m mit einer Beschickungspumpe befüllt, die im Ablaufgerinne der Kläranlage installiert war. An einer Seite des Reaktors waren für den Abzug des gereinigten



Abb. 2: Pilotanlage zur Untersuchung des PAK-SBR-Verfahrens

Abwassers über die Höhe fünf Auslässe angebracht, ausgestattet jeweils mit einer Motorabsperrklappe. Oberhalb des Behälterbodens wurde seitlich, mittels eines Handschiebers, überschüssiger PAK-Schlamm abgezogen. Die Behälter und Pumpen für die Bevorratung und Dosierung von PAK, Fällmittel- und Polymer waren in nächster Nähe zum Reaktor aufgestellt. Im Zu- und Ablauf der Anlage war jeweils eine automatische Probenahme eingerichtet.

#### 3.2 Zyklusablauf im PAK-SBR

In Abbildung 3 ist der zeitliche Ablauf eines PAK-SBR-Zyklus dargestellt. Ähnlich einer SBR-Anlage zur biologischen Abwasserbehandlung wurde der PAK-SBR über eine bestimmte Zeitdauer befüllt, anschließend durchmischt und nach der Reaktionszeit und der Sedimentation wieder geleert. Nach einer kurzen Wartezeit begann die Füllung des Reaktors erneut. Der Zyklus des PAK-SBR-Betriebs gliederte sich in fünf Phasen. In Phase 1 wurde der Reaktor mit Abwasser (Ablauf Nachklärung) befüllt und die Dosierstoffe zugegeben. Nach etwa der Hälfte der Befülldauer wurde die PAK-Menge, die für die adsorptive Behandlung des pro Zyklus zugeführten Abwasservolumens notwendig ist, als PAK-Suspension zugegeben. Nach

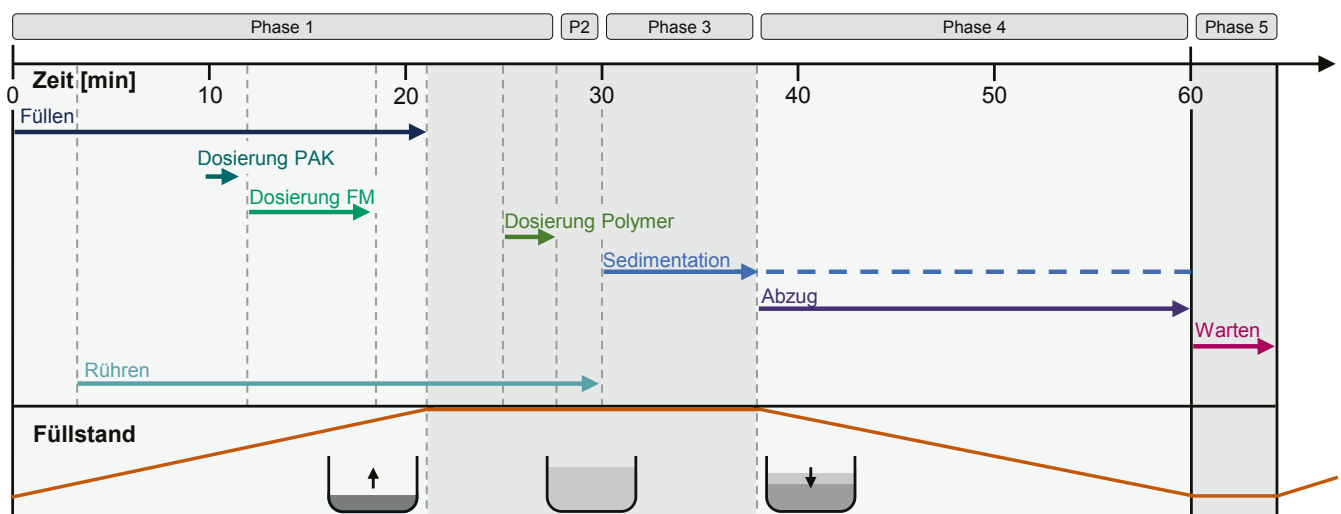


Abb. 3: Ablauf eines Zyklus des PAK-SBR-Verfahrens

der PAK-Dosierung wurde das Fällmittel (Eisen(III)-chlorid) zudosiert. Nach einer kurzen Einmischzeit für PAK und Fällmittel wurde das kationische Polymer zugegeben. Eine sich anschließende Rühr- und Reaktionszeit bildete die Phase 2 des Zyklus. In Phase 3 begann der Schlamm zu sedimentieren. In Phase 4 wurden für den Klarwasserabzug, beginnend bei der obersten Motorabsperreklappe, alle Klappen nacheinander geöffnet. Der Reaktor wurde bis auf das Totraumvolumen entleert. Zeitgleich zur Entleerung sedimentierte der PAK-Schlamm weiter. An Phase 4 schloss sich eine kurze Wartezeit an (Phase 5) bevor der Zyklus wieder von neuem startete.

### 3.3 TS-Gehalt und Kontaktzeit

In der Pilotanlage war im volldurchmischten Zustand über den Versuchszeitraum in der Regel ein TS-Gehalt zwischen 1,0 und 1,5 g/l gegeben. Die mittlere Kontaktzeit im SBR lag bei knapp 18 Minuten. Dabei war das Abwasser, das zuletzt in den Reaktor eingegeben wurde, nur etwas mehr als 7 Minuten mit dem PAK-Schlamm in Kontakt. Für knapp 40 % des behandelten Abwassers war eine Kontaktzeit von weniger als 15 Minuten gegeben.

## 4 Reinigungsleistung

Im Zeitraum zwischen September und November wurden im Zu- und Ablauf der Pilotanlage dreimal wöchentlich 24-h-Mischproben gezogen. Die Proben wurden auf klassische Abwasserparameter analysiert, und ausgewählte Proben, die bei Trockenwetterbedingungen gezogen wurden, wurden auch auf organische Spurenstoffe untersucht.

### 4.1 Abwasserparameter

Im Ablauf der Pilotanlage lag im Mittel in der filtrierten Probe ein CSB von 19,4 mg/l vor, die mittlere AFS-Konzentration betrug 2,6 mg/l. Für  $P_{ges}$  war im Ablauf der Pilotanlage im Mittel ein Wert von 0,15 mg/l gegeben. Der  $PO_4$ -P lag im Mittel bei 0,10 mg/l. Damit konnte der  $PO_4$ -P im Versuchsreaktor bedingt durch die Fällmittelzugabe um 34 % reduziert werden. Für den  $SAK_{254}$  waren in der Pilotanlage über den gesamten Versuchszeitraum Reduktionsraten zwischen 2,5 und 35 % gegeben, im Mittel wurde der  $SAK_{254}$  um 16 % reduziert.

### 4.2 Spurenstoffe

#### Bilanzraum PAK-SBR

In Abbildung 4 ist die Elimination, zwischen Zu- und Ablauf der Adsorptionsstufe, der sieben in Baden-Württemberg für die Betriebsüberwachung relevanten organischen Spurenstoffe dargestellt. Die Hintergrunddaten zeigen die Ergebnisse der Vergleichsmessungen des Kompetenzzentrums Spurenstoffe (KomS) Baden-Württemberg aus dem Jahr 2019 [18]. Betrachtet man die Spurenstoffelimination in der Pilotanlage in Neckarsulm im Vergleich zu der auf anderen Kläranlagen in Baden-Württemberg, die schon seit längerer Zeit mit einer Adsorptionsstufe und einem Filter ausgerüstet sind, stellt man fest, dass die Elimination in der Pilotanlage schlechter ist als in den anderen betrachteten Adsorptionsstufen. Insbesondere bei den Stoffen Irbesartan, Diclofenac und Metoprolol zeigen sich

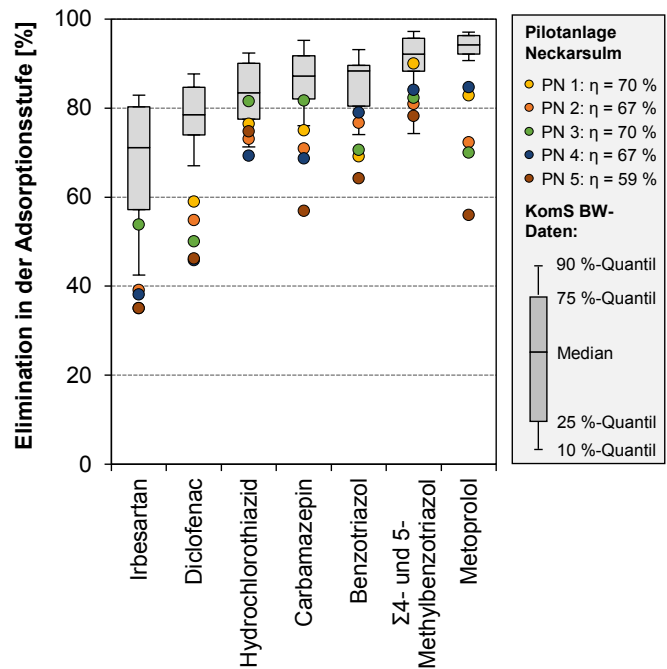


Abb. 4: Spurenstoffelimination im PAK-SBR bei einer Dosiermenge von 10 mg/l PAK im Vergleich zur Spurenstoffelimination in anderen, im Durchlauf betriebenen, Adsorptionsstufen in Baden-Württemberg

größere Unterschiede zu den Ergebnissen der Vergleichsmessungen. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass Spurenstoffe, die auf anderen Kläranlagen in vergleichsweise geringem Umfang eliminiert werden, im Versuchsbetrieb in Neckarsulm ähnlich schlecht eliminiert wurden. Die durchschnittliche Eliminationsleistung je Probenahme (PN), berechnet anhand der in Baden-Württemberg definierten Leitparameter für den Nachweis zur Einhaltung einer ausreichenden Spurenstoffelimination [19, 20], betrug 60 bis 70 %.

Gründe für eine geringere Reinigungsleistung im PAK-SBR können sowohl beim TS-Gehalt als auch der Kontaktzeit des frischen Abwassers mit der PAK liegen. In der Pilotanlage wurde versucht, im Versuchszeitraum einen TS-Gehalt zwischen 1,0 und 1,5 g/l einzustellen, um ein möglichst schnelles Absetzen des PAK-Schlammes zu ermöglichen. Im Vergleich dazu: In den Kläranlagen der Reallabore wurden in den vergangenen Jahren in der Regel TS-Gehalte von mehr als 3 g/l im Kontaktreaktor gefahren [21].

Ein weiterer Grund für die geringere Spurenstoffelimination in der Pilotanlage könnte die kürzere Kontaktzeit der PAK mit dem frischen Abwasser sein. In der Pilotanlage war durchweg eine mittlere Kontaktzeit von weniger als 20 min gegeben. Die Adsorptionsstufen bzw. die Kontaktreaktoren der Vergleichskläranlagen sind jeweils auf eine Mindestaufenthaltszeit des Abwassers von 30 min bei  $Q_{Spur,max}$  dimensioniert. Da die Vergleichsprobenahmen alle bei Trockenwetterbedingungen durchgeführt wurden, war an jenen Tagen eine deutlich längere Kontaktzeit von frischer PAK als 30 min gegeben.

#### Bilanzraum Gesamtkläranlage

Die mittlere Spurenstoffelimination im PAK-SBR über alle fünf Probenahmen lag bei 66 %. Die Einhaltung einer ausreichenden



den Spurenstoffelimination wird derzeit an einer Elimination von 80 % über die Gesamtkläranlage festgemacht [16]. Für das untersuchte Verfahren gilt es zu beachten, dass sich die Gesamteliminationsleistung aus der Entnahme in der biologischen Stufe und der Entnahme in der Adsorptionsstufe (PAK-SBR) zusammensetzt. Die Untersuchungen im Rahmen der Machbarkeitsstudie haben ergeben, dass in der biologischen Stufe bereits heute eine Elimination von ca. 27 % für die ausgewählten Substanzen gegeben ist [15]. Zusammen mit der Adsorptionsstufe als PAK-SBR ergibt sich damit im Mittel eine Gesamteliminationsleistung von ca. 75 %. Bei diesem Ergebnis gilt es zu beachten, dass die zusätzliche Entnahme in der biologischen Stufe aufgrund der Rückführung von Überschussschle noch nicht berücksichtigt ist. Der Umfang dieser ist wiederum abhängig von der Beladung der PAK in der nachgeschalteten adsorptiven Stufe [13]. Da gemäß den Untersuchungsergebnissen mittels der PAK im SBR-Betrieb eine etwas geringere Eliminationsleistung in der Adsorptionsstufe erzielt wird, ist davon auszugehen, dass die Überschussschle auch eine geringere Beladung aufweist als bei gleicher PAK-Dosiermenge beim Ulmer Verfahren im Durchlaufbetrieb. Folglich stehen noch mehr freie Adsorptionsplätze zur Verfügung, woraus eine höhere adsorptive Eliminationsleistung in der biologischen Stufe durch Überschussschle resultiert. Dies lässt wiederum bei gleicher PAK-Dosiermenge in Summe für eine großtechnische Realisierung eine vergleichbare Spurenstoffelimination wie beim Ulmer Verfahren im Durchlaufbetrieb erwarten.

## 5 Absetzverhalten von PAK-Schlamm

### 5.1 Grundlegendes

Im Unterschied zur biologischen Behandlung von Abwasser im Aufstaubetrieb ist die Behandlungsdauer des Abwassers im PAK-SBR kürzer. Daraus resultiert, dass das notwendige Bauvolumen einer PAK-SBR-Anlage maßgeblich von der Zeitdauer der Phase zum Absetzen des Schlamms und Abziehen des gereinigten Abwassers bestimmt wird. Voraussetzung für eine vergleichsweise kurze Behandlungsdauer ist eine Anreicherung der PAK im Reaktor.

Abbildung 5 verdeutlicht die Phasen des Absetzvorgangs anhand einer idealisierten Absetzkurve. Nach Pflanz [22] lässt sich der Vorgang in vier Phasen unterteilen. Der Beginn des Absetzvorgangs ist durch das Abstellen des Rührwerks gekennzeichnet. Nach der sogenannten Flockungsphase (A), die der Energiedissipation dient, beginnen die Schlammflocken zu sedimentieren. Charakteristisch für die Phase des gleichmäßigen Absetzens (B) ist eine lineare Reduktion der Schlammspiegelhöhe mit fortschreitender Zeit. Nach einem Übergangsbereich, dessen Merkmal der sogenannte Kompressionspunkt (KP) bildet, schließt sich die Phase des Eindickens an (D). In dieser wird die Schlammmasse komprimiert. Den Beginn des Eindickvorgangs markiert KP. Das Ende des Eindickvorgangs ist erreicht, wenn keine nennenswerte Änderung der Schlammspiegelhöhe im Reaktor bzw. des Absetzvolumens mehr zu beob-

## Tuchfiltration, Sandfiltration und Aktivkohle-Adsorption

### Flexible Produktlösungen für die Vierte Reinigungsstufe

- ▶ Vielseitige Optionen für die Vorfiltration
- ▶ Zuverlässiger Rückhalt von PAK
- ▶ Effiziente Entfernung von Spurenstoffen mit GAK
- ▶ Gezielte Nutzung von Synergien bei gleichzeitiger Phosphor-Elimination



Entdecken Sie unsere Webinare:  
[huber.de/webinar](http://huber.de/webinar)



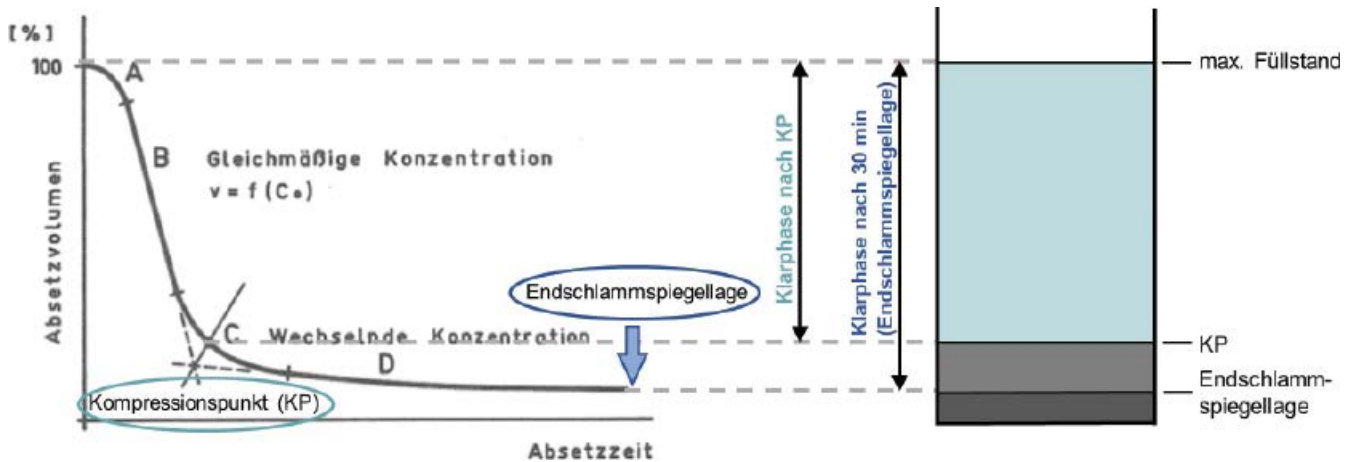


Abb. 5: Phasen des Absetzvorgangs (Bildquelle: [20]) und zugehörige Schlammspiegellagen im Reaktor

achten ist. Bei der Bestimmung des Vergleichsschlammvolumens mittels Standzylinder ist die Absetzzeit auf 30 min normiert. Die Schlammhöhe bzw. das Absetzvolumen zu diesem Zeitpunkt wird im Folgenden als Endspiegellage bezeichnet. Das Vorgehen zur Bestimmung von KP im Rahmen der Untersuchungen ist in der Arbeit von Beißwenger [23] beschrieben.

Entscheidend für das Volumen des Reaktors ist einerseits die Dauer, die es bedarf, um den PAK-Schlamm abzusetzen, und dass das abgesetzte Schlammvolumen im Mittel einen TS-Gehalt im Bereich von KP aufweist. Andererseits ist das benötigte Volumen zur Zwischenspeicherung der gesamten Schlammmasse von Relevanz. Dieses bemisst sich durch den TS-Gehalt von KP zuzüglich eines Mindestklarwasserüberstands.

### 5.2 Zusammensetzung und Charakteristika von PAK-Schlamm

Der PAK-Schlamm setzt sich aus der PAK, den durch den Einsatz von Fällmittel entstehenden Flocken, dem Polymer, den aus der Nachklärung abtreibenden abfiltrierbaren Stoffen und

der entnommenen Restorganik zusammen. Das Absetzen des PAK-Schlammes wird demzufolge durch viele Faktoren bestimmt.

Gemäß Abbildung 6 gilt es festzustellen, dass die Absetzeigenschaften von PAK-Schlamm mit denen von belebten Schlämmen vergleichbar sind. Zudem wird deutlich, dass mit Verringerung des Schlammvolumens eine höhere Sinkgeschwindigkeit einhergeht.

### 5.3 Sinkgeschwindigkeit von PAK-Schlamm

Aus Abbildung 7 geht hervor, dass sich die Sinkgeschwindigkeiten der PAK-Schlämme der untersuchten Kläranlagen deutlich voneinander unterscheiden. Während für zwei Schlämme eine durchschnittliche Sinkgeschwindigkeit von etwa 4 m/h zu verzeichnen ist, setzen sich die anderen beiden Schlämme mehr als doppelt so schnell ab. Als Grund hierfür ist der Feststoffgehalt der Schlämme zum Zeitpunkt der Volldurchmischung anzuführen. Deutlich wird dies beim Vergleich der Schlämme aus den Reallaboren Pforzheim und Wendlingen. Beide weisen praktisch den gleichen ISV-Wert auf. Gemäß diesem Wert ist

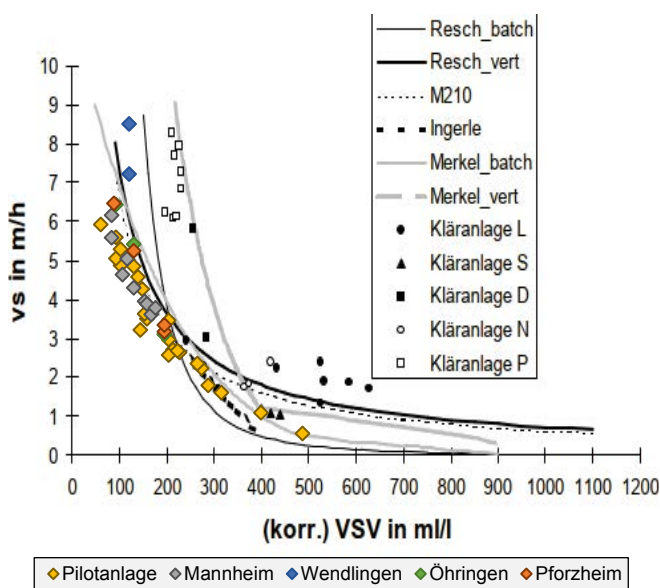


Abb. 6: Vergleich der Sinkgeschwindigkeiten von PAK-Schlamm mit denen von belebten Schlämmen (Bildquelle: [24])

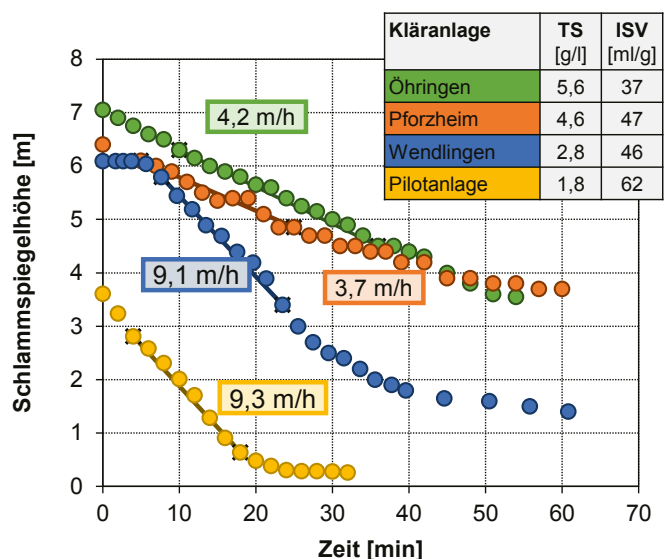


Abb. 7: Absetzverhalten von PAK-Schlamm in den Kontaktreaktoren der Reallabore und in der Pilotanlage

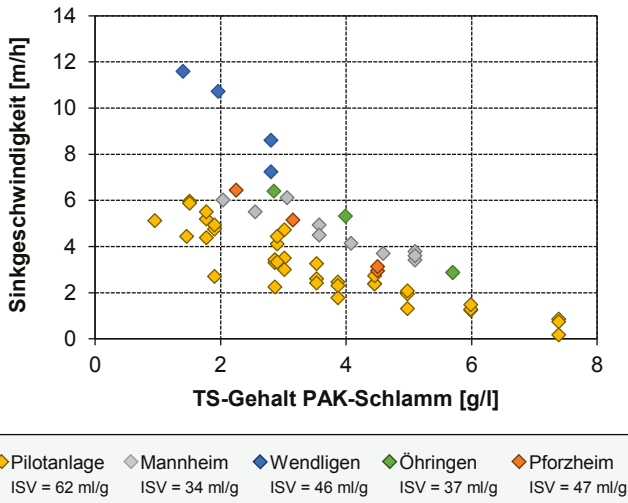


Abb. 8: Sinkgeschwindigkeiten von PAK-Schlamm im Standzylinder

das Absetzverhalten der Schlämme als günstig bis sehr gut einzustufen. Der Schlamm aus Pforzheim weist mit 4,6 g/l jedoch einen um 60 % höheren TS-Gehalt als jener aus Wendlingen auf. Gestützt wird diese Aussage durch die Ergebnisse in Abbildung 8, bei der mit abnehmendem TS-Gehalt tendenziell höhere Sinkgeschwindigkeiten festzustellen sind. Hierbei ist die Sinkgeschwindigkeit über die Masse an Trockensubstanz aufgetragen, die in einem Standzylinder mit einem Volumen von 1 Liter eingegeben wurde. Die Resultate der Schlämme aus den Reallaboren wurden ausgehend von jeweils einer angesetzten Schlammprobe in unterschiedlichen Verdünnungsreihen erzielt. Die Spannweite der Sinkgeschwindigkeiten bei gleichem TS-Gehalt ist nicht ausschließlich durch den ISV-Wert zu begründen.

Des Weiteren wird anhand von Abbildung 7 deutlich, dass die Dauer der Absetzphase neben der Sinkgeschwindigkeit von

der Höhe des Reaktors bestimmt wird. So setzt sich der Schlammspiegel in der Pilotanlage über eine Höhe von rund 3,5 m innerhalb von knapp 20 Minuten ab. Währenddessen wird auf der Kläranlage in Wendlingen für das Absetzen des Schlammspiegels über eine Höhe von etwas mehr als 4 m, bei vergleichbarer Sinkgeschwindigkeit, eine Zeitdauer von etwa 30 min benötigt.

Auch wenn sich niedrige Feststoffgehalte positiv auf die Absetzdauer auswirken, so haben die Untersuchungen an der Pilotanlage gezeigt, dass der Schlamm zum Zeitpunkt des Durchmischens einen Feststoffgehalt von mindestens 1 g/l aufweisen sollte. Andernfalls ist nach dem Absetzen ein hoher Anteil an Feinpartikel im Klarwasser zu verzeichnen, was auf einen unzureichenden Flockenverbund für ein „klärendes“ Absetzen zurückgeführt wird.

### 5.4 Eindicken von PAK-Schlamm

Aus Abbildung 9 geht hervor, dass der zum Zeitpunkt von KP im Absetzvolumen erzielbare Feststoffgehalt signifikant von den Schlammeigenschaften, ausgedrückt über den ISV, geprägt ist. So ist mit zunehmendem ISV-Wert ein geringerer TS-Gehalt im Absetzvolumen gegeben. Dies hat bei gleichem Ausgangs-TS-Gehalt zur Folge, dass Schlämme mit höherem ISV-Wert zum Zeitpunkt des Erreichens von KP ein größeres Absetzvolumen einnehmen und damit, bei identischen Abmessungen des Reaktors, eine geringere Klarwasserphase vorherrscht.

Des Weiteren macht Abbildung 9 deutlich, dass die Kenntnis über den ISV-Wert durchaus Rückschlüsse auf den TS-Gehalt zum Zeitpunkt von KP erlaubt. So kann bei einem ISV-Wert von 60 ml/g davon ausgegangen werden, dass die Eindickphase mit Erreichen eines TS-Gehalts im Absetzvolumen von etwa 8 g/l einsetzt und damit der Schlamm nur noch unwesentlich absinkt.

Das Volumen der Klarwasserphase zum Zeitpunkt des Erreichens von KP bildet letztlich das austauschbare Volumen oder

# Bürsten-Baumgartner



Hersteller von Industrie- und Spezialbürsten



### Einfach und Effektiv

Das Bürstsystem zur Reinigung zwischen Tauchwand und Zackenreihe bzw. Beton- und Gerinnewandung im Nachklärbecken.

### Vorteil

- Universelle Reinigung von
  - Tauchwand und Zackenreihe
  - Zwischenraum und Querstreben
  - überstehenden Gegenständen (z.B. Schrauben und Profilen)

### Bürsten-Baumgartner

Scheiblerstraße 1 \* DE-94447 Plattling  
 + 49 (0)9931 / 89660-0  
 info@buersten-baumgartner.de  
 www.buersten-baumgartner.de

### Wir fertigen Spezialbürsten für

- alle Rinnenreinigungsgeräte
- Fahrbahnreinigungsgeräte
- Tauchwand und Zackenreihe
- maschinelle Schlammeindicker
- Siebbandpressen
- Kammerfilterpressen
- Technische Bürstsysteme

und Kleinserien nach Maß in **Neuanfertigung oder Aufarbeitung** Ihrer bestehenden Bürsten.

>>> **Online Shop** <<<  
**buerstencenter.de**

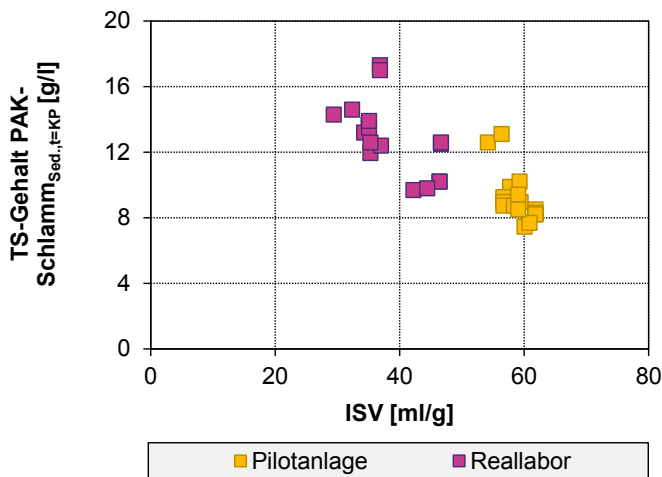


Abb. 9: Einfluss des Schlammvolumenindex auf den TS-Gehalt im Absetzvolumen zum Zeitpunkt des Kompressionspunktes (KP) – Untersuchungen im Standzylinder

auch Behandlungsvolumen des Reaktors. Aus Abbildung 10 geht hervor, dass zum Zeitpunkt von KP eine um etwa 15 bis 20 % geringere Klarphase vorherrscht als nach dem Erreichen der Endschlammspiegellage. Gleichzeitig wird deutlich, dass in der Endschlammspiegellage unabhängig vom Absetzverhalten des PAK-Schlammes mindestens rund 70 % des Füllvolumens als Klarwasserphase vorliegen.

## 6 Fazit

Der Versuchsbetrieb an der PAK-SBR-Pilotanlage macht deutlich, dass eine Ausbildung des Ulmer Verfahrens im Aufstaubetrieb möglich ist. Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Dosierung von 10 mg/l PAK, einer mittleren Kontaktzeit von knapp 20 min und einem TS-Gehalt von ca. 1,5 g/l eine Spurenstoffelimination im Mittel von 65 % im PAK-SBR erzielt wird. Für die Elimination über den Bilanzraum der gesamten Kläranlagen ist von einer vergleichbaren Spurenstoffentnahme wie beim Ulmer Verfahren im Durchlaufbetrieb auszugehen. Das im Rahmen des Projekts erstellte Simulationsmodell, auf das hier nicht weiter eingegangen wurde, macht eine Optimierung der Betriebsweise auch nach Abbau der Versuchsanlage möglich.

Inwiefern eine großtechnische Umsetzung des PAK-SBR-Verfahrens tatsächlich die gewünschte Platzeinsparung gegenüber dem klassischen Ulmer Verfahren im Durchlaufbetrieb bringt, hängt maßgeblich von der Dauer des Absetzprozesses ab. Die Absetzdauer wiederum ist unter anderem davon abhängig, über welche Höhendifferenz der PAK-Schlamm in sich zusammensinken muss. Ebenso entscheidend für ein schnelles Absetzverhalten ist neben einem geringen ISV-Wert ( $\leq 60$  ml/g) der TS-Gehalt im Reaktor während des Mischens bei Vollfüllung des Reaktors. Dieser sollte nicht über 3,0 g/l und nicht unter 1,0 g/l liegen.

Die Frage nach der Notwendigkeit der Nachschaltung einer Filtrationsstufe lässt sich nur mittels Betriebserfahrungen im großtechnischen Maßstab beantworten. Relevant wird hierbei sein, inwieweit es durch eine Abstimmung der Betriebsmittel aufeinander gelingen kann, die PAK ausreichend und dauerhaft in die sedimentierbaren Flocken des PAK-Schlammes einzubin-

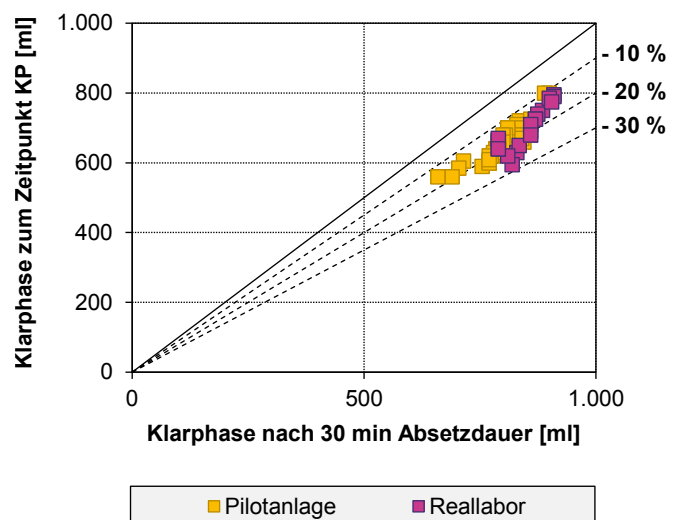


Abb. 10: Gegenüberstellung der Klarwasserphasen zu Beginn der Eindickphase und nach 30 min Absetzzeit – Untersuchungen im Standzylinder

den. Diesen Fragestellungen wird man in Neckarsulm in ein paar Jahren nachgehen können, da die Planung zur Erweiterung der Kläranlage des AZV Unteres Sulmtal um eine Spurenstoffelimination das Verfahren des PAK-SBRs vorsieht. Diese erstmalige Realisierung des Verfahrens erlaubt es zudem, die möglichen Vorteile wie beispielsweise eine bedarfsabhängige Anpassung der Verweilzeit oder eine chargenweisen PAK-Dosierung zu bewerten. Interessant wird sein, welche Einsparung an Bauvolumen und -material sich tatsächlich erzielen lässt.

Anhand des Untersuchungsvorhabens „PAKAuf“ wird deutlich, welche Relevanz sich aus der Verfügbarkeit von Reallaboren ergibt. Nur mit belastbaren Betriebserfahrungen lassen sich Optimierungspotenziale für eine Weiterentwicklung der Verfahrenstechniken zur Spurenstoffelimination ableiten. Zudem erlauben sie es, den gleichen Sachverhalt unter verschiedenen Randbedingungen zu untersuchen, um so breit abgestützte Erkenntnisse für eine Weiterentwicklung der Verfahren zur Spurenstoffelimination zu generieren.

Vor der anstehenden Aufgabe der Erweiterung einer Vielzahl von Kläranlagen um eine gezielte Spurenstoffelimination erscheint es vor dem Hintergrund der damit verbundenen Investitionskosten wie auch des Betriebsaufwands lohnend, das bislang Erreichte zu hinterfragen. Dies erlaubt es, das Prozessdesign der Spurenstoffeliminationsverfahren weiter zu verbessern und zusätzliche Kenntnisse zu deren Dimensionierung zu erlangen.

## Dank

Die Autoren danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung des Vorhabens „PAKAuf“ wie auch dem Regierungspräsidium Stuttgart für die fachliche Begleitung der Untersuchungen und die administrative Abwicklung des Fördervorhabens. Dem Betriebspersonal der Kläranlagen in Neckarsulm, Mannheim, Öhringen, Pforzheim und Wendlingen sei Dank für die Möglichkeit zur Einrichtung der Untersuchungen wie auch für deren tatkräftiges Mitwirken.



Literatur

[1] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland – BUND (Hrsg.): *Hormonaktive Substanzen im Wasser*, 2009, [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/fluesse/fluesse\\_hormonaktive\\_substanzen\\_hintergrund.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/fluesse/fluesse_hormonaktive_substanzen_hintergrund.pdf) (eingesehen am 03.03.2023)

[2] Triebskorn, R., et al.: Freshwater ecosystems profit from activated carbon-based wastewater treatment across various levels of biological organization in a short timeframe, *Environmental Sciences Europe* 2019, DOI: 10.1186/s12302-019-0267-0

[3] Kidd, K., Blanchfield; P. J.; Mills, K. H.; Flick, R. W.: Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen, *PNAS*, 2007, 104 (21), 8897–8901, <https://doi.org/10.1073/pnas.0609568104>

[4] <https://klaerwerk.info/nuetzliches/allgemeine-meldungen-und-berichte/bad-sassendorf-lippeverband-setzt-erstmalig-ozon-zur-abwasserreinigung-ein> (eingesehen am 24.02.2023)

[5] ARGE Spurenstoffe NRW: *Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen*, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umweltschutz, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalens, 2013

[6] Alt, K.; Mauritz, A.: Projekt zur Teilstrombehandlung mit Pulveraktivkohle im Klärwerk Mannheim, *Korrespondenz Abwasser*, Abfall 2010, 57 (2), 161–166

[7] Metzger, S.: Betriebserfahrungen mit Anlagen zur Spurenstoffelimination, Vortrag beim Tag des Abwassermeisters am 30.11.2022 in Neubrandenburg, veranstaltet vom DWA-Landesverband Nord-Ost

[8] DWA-M 285-2: *Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung*, Hennef, 2021

[9] Qian, J.; Riede, P.; Abbt-Braun, G.; Parniske, J.; Metzger, S.; Morck, T.: Removal of organic micropollutants from municipal wastewater by powdered activated carbon – activated sludge treatment, *Journal of Water Process Engineering* 2022, 50, 103246, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103246>

[10] <https://micropoll.ch/Mediathek/liste-der-aras-mit-mv-stufe> (eingesehen am 03.03.2023)

[11] <https://dwa-bw.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=b014a2a5903c4f5bb567d0e47135d72b> (eingesehen am 03.03.2023)

[12] Metzger, S.; Keyzers, C.; Duschek, K.: Synergieeffekte der Spurenstoffelimination im Kontakt der weitergehenden Abwasserreinigung, DWA-Landesverbandstagung Baden-Württemberg, Pforzheim, 2019

[13] Metzger, S.; Rößler, A.: Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle auf Kläranlagen in Baden-Württemberg, *Tagungsband der 30. Karlsruher Flockungstage 2017*, Schriftenreihe SWW, Band 151

[14] Metzger, S.: *Einsatz von Pulveraktivkohle zur weitergehenden Reinigung von kommunalem Abwasser*, Dissertation, TU Berlin, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2010

[15] Rößler, A.: Optimierung der Abtrennung von Pulveraktivkohle, Vortrag beim Symposium Aktivkohle am 23./24. Juni 2010, Mannheim, DWA-Landesverband Baden-Württemberg

[16] Weber-Ingenieure: *Machbarkeitsstudie für den Ausbau einer Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Neckarsulm*, Juni 2021

[17] Merkler, K.; Fenrich, E.; Launay, M.; Metzger, S.; Al-Asad'd, H.; Alex, J.; Morck, T.: *Auswertung von Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination und Erstellung von Planungswerkzeugen*, Abschlussbericht zum UM-Vorhaben Nr. 457/2019, 2021

[18] Rößler, A.; Launay, M.: *Durchführung von Vergleichsmessungen zur Spurenstoffelimination beim Ausbau von Kläranlagen um eine 4. Reinigungsstufe*, Abschlussbericht zum UM-Vorhaben-Nr. 367/2014, [https://koms-bw.de/cms/content/media/2019\\_07\\_Abschlussbericht%20Koms\\_Vergleichsmessungen%20zur%20Spurenstoffelimination.pdf](https://koms-bw.de/cms/content/media/2019_07_Abschlussbericht%20Koms_Vergleichsmessungen%20zur%20Spurenstoffelimination.pdf) (eingesehen am 03.03.2023)

[19] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.): *Arbeitspapier Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg*, Stuttgart, 2018, [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3\\_Umwelt/Wasser/210614-Arbeitspapier-Spurenstoffelimination-kommunale-Klaeranlagen-barrierefrei.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Wasser/210614-Arbeitspapier-Spurenstoffelimination-kommunale-Klaeranlagen-barrierefrei.pdf) (eingesehen am 03.03.2023)

[20] Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (Hrsg.): *Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Be-*

*trieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination*, Stuttgart, 2018, [https://koms-bw.de/cms/content/media/Koms\\_Handlungsempfehlung\\_Stand\\_07.2018\\_korrigiert.pdf](https://koms-bw.de/cms/content/media/Koms_Handlungsempfehlung_Stand_07.2018_korrigiert.pdf) (eingesehen am 03.03.2023)

[21] Projektverbund AZV Unteres Sulmtal, Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Universität Kassel, Weber Ingenieure GmbH: *Spurenstoffelimination mit PAK im Aufstaubetrieb PAKAuf – Weiterentwicklung des Ulmer Verfahrens*, Abschlussbericht, gerichtet an das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2022

[22] Pflanz, P.: Über das Absetzen des belebten Schlammes in horizontal durchströmten Nachklärbecken, Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft, TH Hannover, Heft 25, 1966

[23] Beißwenger, N.: *Entwickeln eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung einer SBR-anlage zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen mit Pulveraktivkohle*, Bachelorarbeit, Hochschule Heilbronn, 2022

[24] DWA-Arbeitsbericht: *Absetzvorgänge und Klarwasserabzug im SBR*, Mai 2005

Autoren

Franziska Ehrhardt, M. Sc.<sup>\*)</sup>  
 Weber-Ingenieure GmbH  
 jetzt:  
 Rheinland-Pfälzische Technische Universität  
 Kaiserslautern-Landau  
 Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung  
 Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

E-Mail: [franziska.ehrhardt@rptu.de](mailto:franziska.ehrhardt@rptu.de)

Niklas Beißwenger, B. Sc.; Thi Hoa Nguyen, M. Sc.; Dipl.-Ing. Mario Bitsch  
 Weber-Ingenieure GmbH  
 Bauschlotter Straße 62, 75177 Pforzheim

Janna Parniske, M. Sc.; Prof. Dr.-Ing. Tobias Morck  
 Universität Kassel  
 Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft  
 Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel

Johanna Neef, M. Sc.  
 Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg  
 jetzt:  
 Holinger Ingenieure GmbH  
 Wankelstraße 14, 70563 Stuttgart

Dr.-Ing. Marie Launay  
 Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg  
 Universität Stuttgart  
 Bandtäle 2, 70569 Stuttgart

Thorsten Morhaus  
 Abwasserzweckverband Unteres Sulmtal  
 NSU Einfahrbahn 124, 74172 Neckarsulm

Dr.-Ing. Steffen Metzger  
 Weber-Ingenieure GmbH  
 jetzt:  
 Hamburg Wasser  
 Billhorner Deich 2, 20539 Hamburg

<sup>\*)</sup> Korrespondenzautorin

