

Schlussbericht zum Einzelvorhaben

Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg,

Erfahrungen im Regelbetrieb

-Kurzfassung-

Auftraggeber (LfU):

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Auftragnehmer (TUM):

Technische Universität München
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes
Am Coulombwall 3
85748 Garching
Tel: 089 289-13713
FAX: 089 289-13718

Projektleitung bei TUM:

Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes
Tel: 089 289-13713
Email: jdrewes@tum.de

Kooperationspartner (IB 1):

Weber Ingenieure GmbH
Bauschlötterstr. 62
75177 Pforzheim
ing.de
Tel: 07231 5830
FAX: 07231 583100

Ansprechpartner bei WI

Dr.-Ing. Steffen Metzger
Tel. 07231 583 153
Email: steffen.metzger@weber-

Kooperationspartner (IB 2):

Dr. Resch + Partner, PartG
Holzgasse 28
91781 Weißenburg
Teil.: 09141 85210
FAX: 09141 852128

Ansprechpartner bei IBR

Dr.-Ing. Tosca Zech
Tel. 09141 852112
Email: zech@ibresch.de

Impressum

Herausgeber

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München

Autoren

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, Technische Universität München

Dr.-Ing. Johann Müller

Dr. rer. nat. Oliver Knoop

Dr.-Ing. Uwe Hübner

Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes

Weber-Ingenieure GmbH

Dr.-Ing. Steffen Metzger

M.Sc. Bärbel Daub

Dr.-Ing. Christopher Keyzers

Ingenieurbüro Dr. Resch + Partner PartG

Dr.-Ing. Tosca Zech

Dipl.-Ing. Regine Schatz

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Dr. Elisabeth Müller

Dr. Margit Schade

Mag. Georgia Buchmeier

Begleitung

Stefan Bleisteiner (LfU)

Dr. Kurt Müller (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz)

Mitwirkung

Martina Hanke und Markus Eisenmann (Stadt Weißenburg)

Prof. Dr. rer. nat. habil. Brigitte Helmreich, Rebecca Zinser, Amr Souf (TU München)

Kurzfassung

Der Lehrstuhl für Siedungswasserwirtschaft der Technischen Universität München führte in Kooperation mit den Ingenieurbüros Weber Ingenieure GmbH in Pforzheim und Dr. Resch + Partner, PartG in Weißenburg, in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Weißenburg und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt eine vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanzierte Studie zum Thema „Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe auf der Kläranlage Weißenburg, Erfahrungen im Regelbetrieb“ durch. Dabei wurden vier Arbeitspakete bearbeitet, in denen die Spurenstoffentfernung durch eine weitergehende Abwasserbehandlung sowie in der Gesamtanlage bestimmt, die betriebliche und energetische Optimierung der weitergehenden Abwasserbehandlung fachlich und experimentell unterstützt, Synergieeffekte der Behandlung identifiziert und Empfehlungen für den Betrieb von Anlagen zur Elimination von anthropogenen Spurenstoffen im Freistaat Bayern erarbeitet wurden.

Standort Weißenburg

Die Stadt Weißenburg i. Bay. betreibt die Kläranlage (KA) Weißenburg (35.000 EW) als zentrale Abwasserbehandlungsanlage für die Reinigung der Abwässer der Stadt Weißenburg und weiterer angeschlossener Ortsteile. Die Kläranlage behandelt Abwasser von etwa 17.000 angeschlossenen Einwohnern sowie aus maßgeblichen industriellen Indirekteinleitungen und verschiedenen medizinischen Einrichtungen und Pflegeheimen. Die konventionelle Abwasserbehandlung in Weißenburg umfasst konventionelle mechanisch-biologische Verfahren sowie eine weitergehende chemische Phosphatelimination. [1]

Das auf der KA Weißenburg behandelte Wasser wird in die Schwäbische Rezat eingeleitet. Die Schwäbische Rezat liegt im Einzugsgebiet des Main und ist insbesondere bei Trockenheit sehr abflussschwach. Einleitungen der KA Weißenburg können somit einen erheblichen Anteil des Gesamtabflusses ausmachen. Im Stoffflussmodell zur Abschätzung des Belastungszustands der Gewässer in Bayern für ausgewählte anthropogene Spurenstoffe wurde die Schwäbische Rezat als ein Gewässer identifiziert, in dem die Konzentrationen einzelner Verbindungen oberhalb ökotoxikologisch abgeleiteter PNEC-Werte liegen (PNEC: Predicted No Effect Concentration) [2].

Die KA Weißenburg erfüllte als mittelgroße Kläranlage, die in ein abflussschwaches Gewässer im Einzugsgebiet des Mains einleitet und in dem es zu Überschreitungen von PNEC-Werten kommt, die vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz definierten Kriterien als Standort für die Durchführung einer bayerischen Pilotstudie zur Umsetzung einer weitergehenden Abwasserbehandlung zur Spurenstoffentfernung. Infolgedessen wurde die KA Weißenburg im Jahr 2014 als Standort für die Realisierung des bayerischen Pilotprojekts zur sogenannten „4. Reinigungsstufe“ ausgewählt. Nach Fertigstellung der baulichen Maßnahmen ist die weitergehende Abwasserbehandlungsanlage zur Spurenstoffentfernung nun seit Oktober 2017 in Betrieb.

Die Behandlungsstrategie zur weitergehenden Spurenstoffentfernung auf der KA Weißenburg umfasst ein zweistufiges Verfahren, bestehend aus einer Ozonung und einer Nachbehandlung des ozonierten Wassers in biologisch aktiven Filtern. Zu Versuchszwecken wurde die Nachbehandlung zunächst in zwei parallel betriebenen Filterstraßen umgesetzt, um sowohl den Betrieb mit biologisch aktiver Sandfiltration als auch mit biologisch aktiver granulierter Aktivkohle (BAK) zu untersuchen. Die Steuerung und Regelung der Ozondosierung kann volumenproportional oder über die Überwachung der Reduzierung der UV-Absorption bei einer Wellenlänge von 254 nm erfolgen (Δ SAK₂₅₄-Konzept).

Untersuchungen im Regelbetrieb

Zur Überwachung der Reinigungsleistung der seit Ende 2017 auf der KA Weißenburg betriebenen weitergehenden Behandlungsstufe und Charakterisierung der Rahmenbedingungen für die Spurenstoffentfernung wurden über das Jahr 2020 umfangreiche und regelmäßige Beprobungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Beprobungen zeigten eine deutliche Reduzierung der Konzentrationen der meisten untersuchten Verbindungen im Rahmen der konventionellen und der weitergehenden Behandlung. Abhängig von der betrachteten Verfahrenskombination in der weitergehenden Behandlungsstufe (Ozonung + Sandfilter vs. Ozonung + BAK-Filter) und der Ozondosis (ΔSAK_{254} 27% vs. ΔSAK_{254} 35%) traten jedoch teils deutliche Unterschiede bei der Entfernung von Einzelsubstanzen auf. Die Betrachtung der Entfernung von acht definierten Indikatorsubstanzen¹ unter Berücksichtigung aller auf der KA Weißenburg eingesetzten Behandlungsprozesse (konventionell + weitergehende Behandlungsstufe) zeigte, dass eine Kombination aus konventioneller Behandlung, Ozonung und nachfolgender Sandfiltration erst bei Nutzung einer höheren Ozondosis (ΔSAK_{254} 35%) eine zuverlässige mittlere Entfernung der Substanzen um mindestens 80% bewirkte (Abb. 1). Durch Nutzung der BAK- anstelle der Sandfilter konnten die betrachteten Stoffe hingegen bereits bei einer niedrigeren Ozondosis (ΔSAK_{254} 27%) um über 80% entfernt werden. Bei Betrachtung mittlerer Eliminationsleistungen muss jedoch eine kritische Diskussion hinsichtlich der berücksichtigten Indikatorsubstanzen erfolgen. So kann die Eliminationsleistung bei Betrachtung anderer Stoffe deutlich abweichen (Beispiel Primidon, s. Abb. 1).

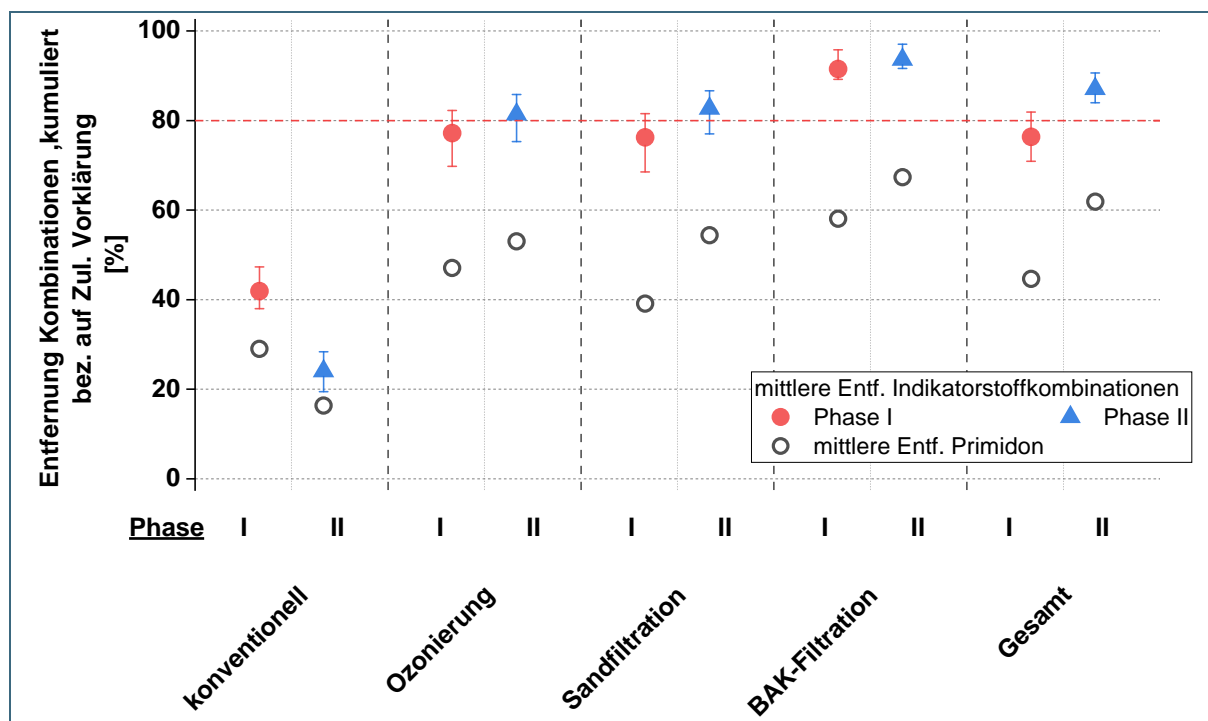


Abb. 1: Entfernung der Indikatorstoffkombinationen und der Konzentration an Primidon in den untersuchten Prozessstufen in den Versuchsphasen I und II (Steuerung der Ozonanlage über das ΔSAK_{254} -Konzept; Sollwert: 27% bzw. 35%). Die Darstellung für die Entfernung der Indikatorstoffkombinationen zeigt die mittlere Entfernung aller 28 möglichen Kombinationen (jeweils 6 aus 8 Stoffen)¹. Die Antennenenden markieren die Kombinationen mit minimaler und maximaler Entfernung. Die Darstellung für die Versuchsphasen I und II basieren auf jeweils 10 Probenahmen (48h- bzw. 24h-Mischproben).

¹ Indikatorsubstanzen gemäß 2020 diskutiertem Entwurf zur Novellierung des Abwasserabgabengesetzes (AbwAG) (Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Sulfamethoxazol, Benzotriazol, 4/5-Methylbenzotriazol). Der Entwurf sieht eine mittlere Gesamtentfernung von 80% für eine Auswahl von mindestens 6 der 9 Stoffe vor. Clarithromycin wurde im Rahmen dieser Studie nicht gemessen, daher reduziert sich die Darstellung hier auf 6 aus 8 Stoffe, für die theoretisch 28 verschiedene Kombinationen denkbar sind.

Generell zeigte sich bei den Untersuchungen, dass die weitergehende Behandlungsstufe auch einen positiven Effekt auf die Entfernung anderer, teils abgaberelevanter Parameter (CSB, AFS) hatte. Die Beprobungen gaben auch bereits Hinweise auf bestehendes Optimierungspotential. So wurden insbesondere in den Wintermonaten teils deutlich erhöhte Konzentrationen an Nitrit und Ammonium im Ablauf der Nachklärung festgestellt. Die dadurch erhöhte Ozonzehrung während der Ozonung (Nitrit) sowie eine starke Sauerstoffzehrung in den biologischen Filtern (Ammonium) können die Effizienz der weitergehenden Behandlungsstufe deutlich herabsetzen.

Untersuchungen zur Dosierungsstrategie und zur Optimierung der Ozondosis

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Studie lag auf der Ermittlung und Ausschöpfung eines möglichen betrieblichen und energetischen Optimierungspotentials der weitergehenden Behandlungsstufe. Für den Betrieb der weitergehenden Behandlungsstufe stand hier insbesondere die Steuerung und Regelung der Ozondosierung über das ΔSAK_{254} -Konzept im Fokus der Untersuchungen. Hierzu wurde in Laboruntersuchungen zunächst der Zusammenhang zwischen ΔSAK_{254} und prozentualer Entfernung der Indikatorstoffkombinationen überprüft (Abb. 2). Zwischen dem ΔSAK_{254} und der Entfernung der untersuchten Einzelsubstanzen konnte auch für die KA Weißenburg zumeist eine gute lineare Korrelation bestätigt werden. Für eine mittlere Entfernung der acht näher betrachteten Indikatorstoffe um 80% (nur Ozonung) konnte so ein erforderlicher ΔSAK_{254} -Wert von etwa 35% ermittelt werden. In einem großtechnischen Stufenversuch auf der KA Weißenburg konnte das Ergebnis der Laboruntersuchungen bestätigt werden. Infolge der Optimierungsversuche wurde eine Anpassung des ΔSAK_{254} -Sollwerts auf 35% für den Regelbetrieb vorgenommen (Versuchsphase II). Bei einem ΔSAK_{254} -Sollwert von 35% sollte gemäß den Ergebnissen dieser Studie ein mittleres Eliminationsziel von 80% für die acht näher betrachteten Stoffe allein durch die Ozonung erreichbar sein. Dies konnte durch Probenahmen in Phase II bestätigt werden. Hinsichtlich einer sowohl betrieblichen als auch energetischen Optimierung muss jedoch die gewählte Verfahrenskombination berücksichtigt werden. So konnte bei biologischer Nachbehandlung des Ablaufs der Ozonanlage in einem BAK-Filter das Eliminationsziel durch zusätzliche sorptive Entfernung von Substanzen auch bei einem ΔSAK_{254} -Sollwert von 27 % erreicht werden.

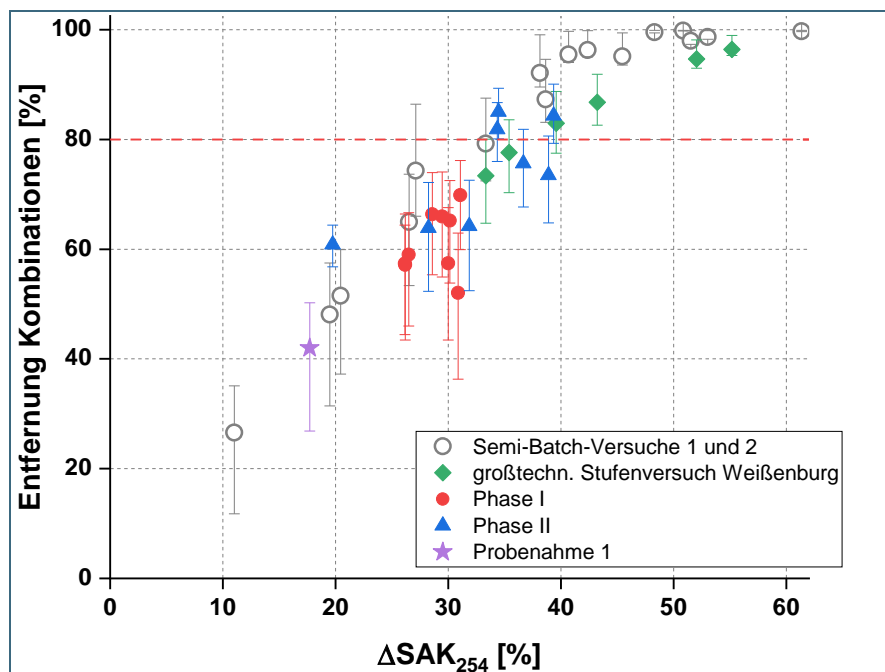


Abb. 2: Ergebnisse aus Versuchen im Semi-Batch-System, großtechnischem Versuch sowie Probenahmen im Regelbetrieb: Entfernung der Indikatorstoffkombinationen in Abhängigkeit des ΔSAK_{254} -Werts in der Ozonung. Die Darstellung für die Entfernung der Indikatorstoffkombinationen zeigt die mittlere Entfernung aller 28 möglichen Kombinationen (jeweils 6 aus 8 Stoffen)¹. Die Antennenenden markieren die Kombinationen mit minimaler und maximaler Entfernung.

Charakterisierung der Filterstraßen

Ein Vergleich der Filterstraßen, in denen das ozoniertes Wasser nachbehandelt wird, zeigte deutliche Unterschiede in der Reinigungsleistung hinsichtlich einer zusätzlichen Entfernung von Spurenstoffen. Während in den Sandfiltern keine deutliche zusätzliche Elimination der Indikatorsubstanzen erfolgte, zeigte sich in den BAK-Filtern, trotz fortgeschrittener Laufzeit (35.000 bis 55.000 Bettvolumina im Untersuchungszeitraum), eine effektive Entfernung vieler Verbindungen, die nach der Ozonung noch messbar waren. Zusätzliche Laboruntersuchungen deuteten darauf hin, dass die Adsorptionskapazität für gut sorbierende Stoffe noch nicht erschöpft ist. Für beide Filter konnte eine deutliche zusätzliche Entfernung organischer Summenparameter festgestellt werden. Die Entfernung organischer Summenparameter spricht dafür, dass die biologische Aktivität in beiden Filterstraßen zu einer biologischen Stabilisierung des ozonierten Wassers beitragen kann. Im Vergleich der beiden Filterstraßen zeigte sich in den BAK-Filtern eine bessere Entfernung organischer Summenparameter sowie eine höhere Sauerstoffzehrung. Dies könnte für eine höhere biologische Aktivität in den BAK-Filtern sprechen. Eine quantitative Abschätzung des Einflusses der Restadsorptionskapazität auf die Entfernung von Summenparametern ist jedoch nicht möglich.

Analyse des Energieverbrauchs der weitergehenden Behandlungsstufe

Der Stromverbrauch der KA Weißenburg betrug im Jahr 2020 insgesamt rd. 822.000 kWh (Netzbezug plus Strom aus Photovoltaik und BHKW). Die weitergehende Behandlungsstufe hatte mit rd. 188.000 kWh einen Anteil von 23 % am Gesamtstromverbrauch. Bezogen auf die Kläranlagenbelastung (85%-Wert CSB₁₂₀ im Jahr 2020) von rd. 25.750 EW entspricht das einem Energieverbrauch von 7,3 kWh/(E·a).

In einer detaillierten Analyse des Energieverbrauchs der weitergehenden Behandlungsstufe seit Inbetriebnahme im Jahr 2017 erfolgte eine Aufstellung aller relevanten Verbraucher. Die Analyse erlaubt die Identifikation der kostentechnisch bedeutendsten Positionen und zeigt mögliche Stellschrauben für eine Reduzierung des Energieverbrauchs auf. Als Hauptverbraucher mit einem Anteil von 41% des Energieverbrauchs wurde die Ozonung identifiziert. Eine Optimierung der Ozondosis stellt folglich eine vielversprechende Möglichkeit zur Optimierung des Energieverbrauchs dar. Bei der Analyse zeigte sich, dass 21% des Gesamtenergieverbrauchs keiner Position zugeordnet werden konnte. Nach derzeitigem Kenntnisstand liegt für diese Position jedoch kein Einsparpotential vor.

Kostenszenarien für den Betrieb der weitergehenden Behandlungsstufe

Für insgesamt neun Verfahrensoptionen erfolgten detaillierte Prognosen zu anfallenden Betriebskosten (Tab. 1). Sieben der Kostenszenarien lagen Kombinationsverfahren unter Verwendung von Ozon mit biologischer Nachbehandlung in Sand- bzw. BAK-Filtern zugrunde. Zwei Szenarien bildeten eine alleinige Nutzung von GAK/BAK als weitergehender Behandlungsstufe ab. Die Szenarien unterschieden sich hierbei in den Betriebsbedingungen (Ozondosis, Steuerkonzept) oder der Standzeit der genutzten BAK-Filter. Die Wahl verschiedener Szenarien hatte zum Ziel, ein breiteres Spektrum hinsichtlich der geschätzten Stringenz zur Einhaltung definierter und darüber hinaus gehender Reinigungsziele abzubilden².

Tab. 1: Betriebsmittelverbrauch und -kosten verschiedener Betriebsszenarien der weitergehenden Behandlungsstufe²

Szenario Nr.	Verfahren		Reinigungsleistung	Betriebsmittelverbrauch						Betriebsmittelkosten €/a	
				Ozonung			GAK-Filtration				
	Ozonung	GAK-Filter**		Ozonfrucht kg/a	O ₂ -Bedarf m ³ /a	O ₂ -Kosten €/a	Standzeit a	GAK-Bedarf t/a	GAK-Kosten €/a		
1	a	Keine Ozonung	12.000 BV	80 % +	0	0	0	0,75	77	150.700	150.700
	b		32.000 BV	80 %	0	0	0	2	29	56.500	56.500
2	a	Steuerung nach ΔSAK 27%	32.000 BV	80 % +	5.310	41.100	8.700	2	29	56.500	65.200
	b		64.000 BV	80 %	5.310	41.100	8.700	4	14	28.300	37.000
3	a	Steuerung nach ΔSAK 35%	keine GAK	80 %	8.200	63.390	13.400	0	0	0	13.400
	b		32.000 BV	80 % ++	8.200	63.390	13.400	2	29	56.500	69.900
4		Q-prop. Dosierung* 60% der Tage 35% ΔSAK	64.000 BV	80 %	8.480	65.570	13.800	4	14	28.300	42.100
5	a	Q-prop. Dosierung* 85% der Tage 35% ΔSAK	keine GAK	80 %	9.210	71.240	15.000	0	0	0	15.000
	b		32.000BV	80 % ++	9.210	71.240	15.000	2	29	56.500	71.500

* Annahme: Drosselung Ozongenerator bei O₃ im Offgas ab 40 % ΔSAK

** Beide Filter als GAK-Filter

Die Betriebskosten von Kombinationsverfahren, welche sowohl Ozonung als auch BAK-Filtration beinhalten, sind innerhalb derselben Reinigungskategorie etwas höher als die von Einzelverfahren (Abb. 3 und Tab. 1), jedoch ist mit dem Betrieb einer Verfahrenskette aus Ozonung und BAK-Filter auch eine höhere Betriebssicherheit gegeben. Zudem bieten die Kombinationsverfahren eine flexible Anpassungsmöglichkeit der Reinigungsleistung und je nach Betriebsweise der Ozonung ist weniger Personalbedarf notwendig, als wenn die Ozonung als Einzelverfahren exakt operieren muss, um stets eine ausreichende Reinigungsleistung zu gewährleisten.

Für eine Optimierung des Energieverbrauchs ist auf die Ozonung bezogen eine Dosierung nach ΔSAK₂₅₄ vorteilhaft verglichen mit einer zulaufproportionalen Dosierung. Jedoch ist bei kleinen Kläranlagen aus betrieblicher und wirtschaftlicher Sicht eine Abwägung zu treffen, ob der erhöhte Aufwand zur kontinuierlichen Erfassung von verlässlichen SAK₂₅₄-Werten mittels Sondenmesstechnik für das Betriebspersonal zumutbar ist, oder ob es sinnvoller ist, eine zulaufproportionale Betriebsweise oder gar ein anderes Verfahren zur Spurenstoffentfernung zu wählen.

² Die mit einer Reinigungsleistung von „80%“ gekennzeichneten Szenarien sind so ausgelegt, dass die Vorgaben einer mittleren Entfernung der Indikatorstoffe von 80% erreicht werden. Szenarien mit einer Reinigungsleistung von „80%+“ sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Spurenstoffelimination über die zu erwartenden Anforderungen des AbwAG hinaus gewährleisten können. Die Szenarien mit Reinigungsleistung „80%++“ sind als Kombination beider Verfahren mit bestmöglicher Reinigungsleistung konzipiert und sollen eine verstärkte Breitbandwirkung ermöglichen.

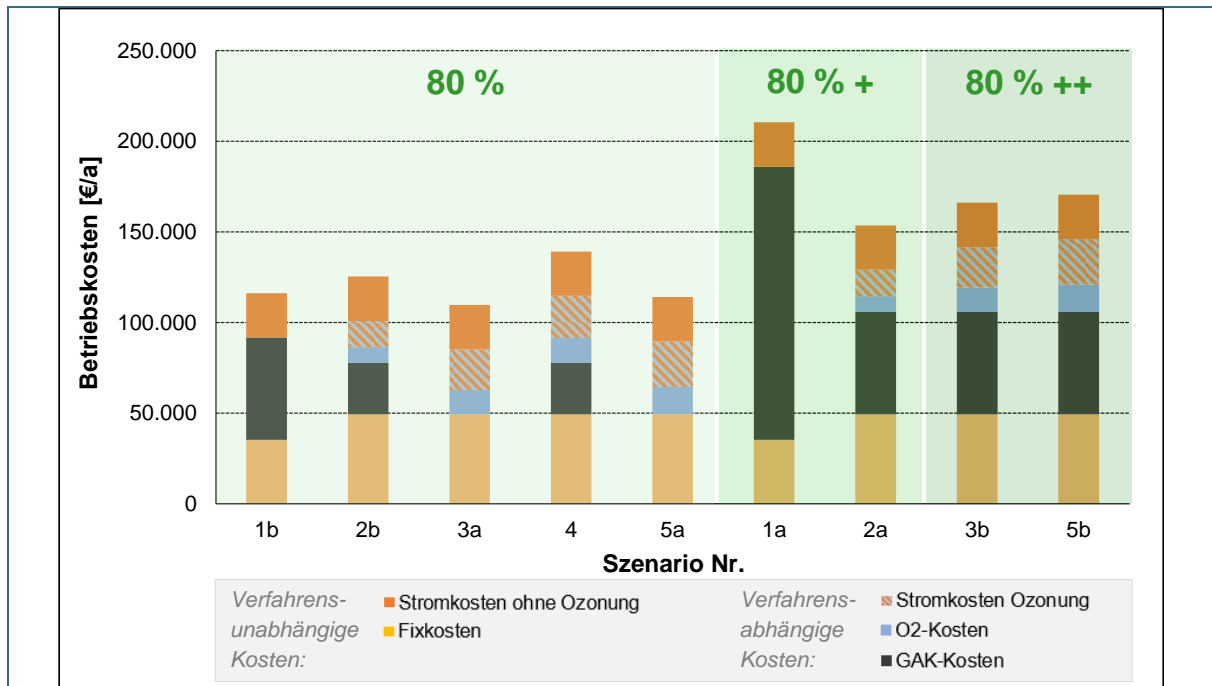


Abb. 3: Betriebskosten für die untersuchten Szenarien gemäß Tab. 1 im Verhältnis zur erwarteten Reinigungsleistung²

Synergieeffekte beim Einsatz der weitergehenden Behandlungsstufe

In einer umfangreichen Literaturrecherche konnte das synergistische Potential typischer zum Ziel der Spurenstoffentfernung eingesetzter Verfahrensvarianten aufgezeigt und an Fallbeispielen veranschaulicht werden (Tab. 2). Hierbei wurden insbesondere positive Effekte der weitergehenden Behandlung auf allgemeine, teilweise abgaberelevante Abwasserparameter (bspw. CSB, Phosphor, Stickstoff) berücksichtigt. Auch mögliche Auswirkungen auf die mikrobiologische Qualität und weitere derzeit verstärkt diskutierte Wasserqualitätsparameter (insb. Mikroplastik, Antibiotikaresistenzen) des gereinigten Wassers wurden zusammengetragen. Die Ergebnisse der Studie erlauben eine Übersicht über zu erwartende positive Auswirkungen verschiedener Verfahrensvarianten der weitergehenden Behandlungsstufe, die über das Primärziel einer weitgehenden Entfernung von Spurenstoffen hinausgehen.

Tab. 2: Beeinflussbarkeit abwassertechnischer Parameter durch Verfahren zur weitergehenden Abwasserbehandlung

	primäres Betriebsmittel Spurenstoffelimination			weitere(r) Bestandteil(e) / Reinigungsmechanismus(en) der Stufe zur weitergehenden Abwasserreinigung							
Prozess	Adsorption		Oxidation	biologischer Abbau			Fällung	Feststoffabtrennung			JV-Bestrahlung
	PAK	GAK	Ozon	SF	WB	BAK	F	TF	SF	MF/UF	UV
X_{CSB}			x					x	x	x	
S_{CSB}	x	x	x	x		x	x				
X_P			x					x	x	x	
S_{PO4-P}							x				
Mikroplastik			x					x	x	x	
Path. Keime								x ²⁾	x ²⁾	x	x
ARB / ARG			x					x ²⁾	x ²⁾	x	x
NH_4-N				x ¹⁾	x	x					
NO_3-N				x ¹⁾							
Transformations- produkte				x	x	x					

X - partikulär
S - gelöst

1) Unter Beigabe von Betriebsmitteln (Luft, C-Quelle, etc.)

2) Reduktion um etwa 0,5 bis 1,0 log-Stufen beim Betrieb als Flockungsfilter

x Zielreichung sicher
x partieller Effekt

Fazit

Die Installation zusätzlicher Barrieren im Rahmen der kommunalen Abwasserbehandlung kann den Eintrag einer Vielzahl von Verbindungen in die aquatische Umwelt effektiv unterbinden oder minimieren und kann, gemäß dem Vorsorgeprinzip, dazu beitragen negative Umweltauswirkungen und eine mögliche nachteilige Beeinträchtigung von Trinkwasserressourcen zu reduzieren. Der flächendeckenden Einführung von weitergehenden Behandlungsstufen zur Spurenstoffentfernung in der kommunalen Abwasserbehandlung stehen jedoch die entstehenden Kosten und ein höherer betrieblicher Aufwand entgegen. Erkenntnisse dieser Studie zum Einsatz der weitergehenden Behandlungsstufe auf der KA Weißenburg sollten dazu beitragen, eine genauere Abschätzung zur Durchführbarkeit und zur Effektivität weitergehender Maßnahmen zur Elimination anthropogener Spurenstoffe zu ermöglichen.

Ergebnisse aus Untersuchungen auf der KA Weißenburg konnten zeigen, dass die eingesetzten Verfahrensvarianten in der Lage sind, einen großen Teil der untersuchten Einzelstoffe effektiv aus dem Wasser zu entfernen bzw. diese zu transformieren. Angesichts der großen Zahl unterschiedlicher Substanzen, die sich in kommunalem Abwasser befinden, ist die Reinigungsleistung einzelner Prozesse aber stoffspezifisch stark verschieden. Während einige Stoffe mit teils sehr hohen Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage bereits in der konventionellen Behandlung bis unter die Bestimmungsgrenzen entfernt wurden, konnten andere Substanzen erst in den oxidativen und adsorptiven Prozessen der weitergehenden Behandlungsstufe entfernt werden. Manche Stoffe hingegen zeigten auch in der weitergehenden Behandlungsstufe noch eine hohe Persistenz und konnten nur zu einem gewissen Grad aus dem Wasser entfernt werden.

Eine klar definierte gesetzliche oder freiwillige Vorgabe der Behandlungsziele ist die Grundvoraussetzung für die zielgerichtete Planung und den erfolgreichen Betrieb von Anlagen zur weitergehenden Wasserbehandlung. Im Rahmen der 2020 diskutierten Novellierung des Abwasserabgabengesetzes (AbwAG) wurde auch eine Auswahl von Indikatormaterialien vorgeschlagen, die typischerweise und in gut messbaren Konzentrationen im kommunalen Abwasser auftreten. Anhand der Stoffe und der vor-

gesehenen mittleren Reinigungsleistung von 80% kann eine Bewertung und Einordnung einer ermittelten Reinigungsleistung erfolgen. Die Stoffauswahl ist geprägt durch Substanzen, die gut bis sehr gut mit Ozon reagieren (bspw. Carbamazepin, Diclofenac) oder sehr effektiv durch sorptive Prozesse entfernt werden können (bspw. Benzotriazol, 4/5-Methylbenzotriazol, Metoprolol). Die Stoffauswahl eignet sich daher gut, um die Reinigungsleistung von oxidativen, adsorptiven oder von auf diesen Prozessen basierenden Kombinationsverfahren für Stoffe darzustellen, die mit diesen Verfahrensoptionen entfernbar sind. Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass die Auswahl der für die Bewertung genutzten Stoffe einen deutlichen Einfluss auf die erzielte mittlere Reinigungsleistung haben kann. Die für die Bewertung der Reinigungsleistung einer Anlage herangezogenen Indikatorsubstanzen sollten daher von einer unabhängigen Instanz und gegebenenfalls standortspezifisch festgelegt werden.

Es muss beachtet werden, dass es durchaus Substanzen gibt, die aufgrund ihrer stoffspezifischen Eigenschaften in oxidativen und adsorptiven Prozessen keine oder nur eine begrenzte Elimination erfahren. Zur Verdeutlichung wurde im Rahmen der Ergebnisdarstellung in dieser Studie wiederholt auf die nur begrenzte Entfernung des Antikonvulsivums Primidon in den untersuchten Verfahrenskombinationen verwiesen. Weitere Beispiele für Stoffe, die in oxidativen und adsorptiven Reinigungsstufen nicht effektiv entfernt werden, sind das Antikonvulsivum Gabapentin, künstliche Süßstoffe wie Acesulfam und Sucralose sowie die Gruppe der iodierten Röntgenkontrastmittel (bspw. Iopromid, Iomeprol, Diatrizoesäure). Auch die in den letzten Jahren zunehmend im Fokus der Diskussion stehenden per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) können durch den Einsatz oxidativer und adsorptiver Verfahren größtenteils nicht oder nur unvollständig aus dem Wasser entfernt werden. Hierbei kann als besonders problematisch angesehen werden, dass diese Substanzen aufgrund ihrer Polarität eine hohe Mobilität in der aquatischen Umwelt aufweisen. Da diese Substanzen auch im Rahmen der Uferfiltration nicht aus dem Wasser entfernt werden können, besteht das Risiko einer Gefährdung von Trinkwasserressourcen.

Trotz der Tatsache, dass die bei der 2020 geplanten Novellierung des AbwAG diskutierten Indikatorsubstanzen und Reinigungsvorgaben keine umfassende Aussage über die Entfernung von in kommunalem Abwasser enthaltenen Spurenstoffen erlauben, können die angedachten Vorgaben doch den Effekt weitergehender Behandlungsschritte auf die Wasserqualität darstellen. So ist die Stoffauswahl geeignet, um den Einfluss der Verfahrensführung und die Vorteile von Kombinationsverfahren abzubilden. Der Vergleich der Entfernung der Indikatorstoffe in den untersuchten Verfahrensvarianten (Ozonung + Sandfiltration bzw. Ozonung + BAK-Filtration) zeigt deutlich die Vorzüge der Kombination mehrerer Entfernungsmechanismen für die Effektivität und Robustheit der Spurenstoffentfernung. Die Kombination verschiedener Verfahren bedingt einen positiven additiven Effekt für die Gesamtentfernung einzelner Substanzen, verringert die Varianz der Entfernungsleistung und kann zudem ein breiteres Stoffspektrum abdecken. Insbesondere in Szenarien, in denen hohe Anforderungen an die zu erreichende Wasserqualität gestellt werden, erlauben Kombinationsverfahren daher ein zusätzliches Maß an Sicherheit.

Neben der Elimination anthropogener Spurenstoffe könnte auch die Entfernung oder Verminderung weiterer Kontaminanten gefordert werden. Hierunter könnten bspw. Anforderungen an die mikrobiologische Wasserqualität fallen, wie sie an manchen Standorten zur Einhaltung der Badewasserqualität in den Sommermonaten bereits bestehen. Auch mögliche Anforderungen an neue Parameter, die seit einiger Zeit vermehrt in der Diskussion stehen, wie Antibiotikaresistenzgene und antibiotikaresistente Bakterien oder Mikroplastik, könnten bei der Definition der Behandlungsziele perspektivisch eine Rolle spielen. Behandlungsziele könnten sich zudem auch standortspezifisch unterscheiden. Hierbei könnte der Definition des übergeordneten Schutzguts eine entscheidende Rolle zufallen (Schutz der aquati-

schen Umwelt und Schutz der Trinkwasserressourcen). Auch könnten lokal auftretende erhöhte Belastungen mit bestimmten Substanzen oder Substanzgruppen in standortspezifisch unterschiedlichen Behandlungszielen resultieren.

Die Wahl der Verfahrensoption kann auch durch mögliche erwünschte synergistische Effekte beeinflusst werden. Erwünschte synergistische Effekte können hierbei standortspezifisch variieren. Der Einfluss einer weitergehenden Abwasserbehandlung auf generelle und abgaberelevante Abwasserparameter kann über eine Gegenfinanzierung dazu beitragen, die Ausgaben für Investition und Betrieb der weitergehenden Behandlungsstufe zur Spurenstoffentfernung abzufedern. Weiterhin können bereits vorhandene bauliche Elemente (bspw. Abwasserfilter) oder der Mangel an verfügbarer Fläche den Ausschlag für eine bestimmte Verfahrensoption geben.

Neben der Wahl der eingesetzten Prozessvarianten bedingt auch die Art der Verfahrensführung die Effektivität einer weitergehenden Behandlungsstufe. So kann die Betriebsweise erheblichen Einfluss auf die Erreichung einer Zielstellung haben. Im Falle der KA Weißenburg konnte etwa der Einfluss der Ozondosis auf die angestrebte Entfernung von Substanzen untersucht und abgebildet werden. Auch die Standzeit eines BAK-Filters hat erheblichen Einfluss auf die Effektivität der Reinigungsleistung. Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Kostenszenarien für den Betrieb einer weitergehenden Behandlungsstufe betrachtet. Eine sichere Entfernung der Indikatorsubstanzen oder eine über dieses Ziel hinausgehende Breitbandwirkung bedingt einen Anstieg der zu erwartenden Betriebskosten. Die Entscheidung für eine bestimmte Verfahrensvariante und die betriebliche Umsetzung in der Verfahrensführung müssen das Ergebnis einer kritischen Kosten-Nutzen-Analyse sein. Für die Umsetzung durch die Betreiber müssen daher klar formulierte und idealerweise standortspezifische Anforderungen vonseiten der Behörden formuliert werden.

Literatur

1. Rödel, S., Günthert, F.W., Rehbein, V., Steinle, E., Schatz, R., Zech, T., Sengl, M., Eßlinger, M., Weiß, K., Kopf, W., Buchmeier, G., Schwaiger, J., Schade, M., Müller, E., Schlößer, I.: Elimination von anthropogenen Spurenstoffen auf kommunalen Kläranlagen (Pilotprojekt 4. Reinigungsstufe) - Abschlussbericht. (2019)
2. Klasmeier, J., Kehrein, N., Berlekamp, J., Matthies, M.: Mikroverunreinigungen in oberirdischen Gewässern: Ermittlung des Handlungsbedarfs bei kommunalen Kläranlagen - Abschlussbericht. (2011)