

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)

Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Moderne Ansätze in der Abwasserbehandlung

Volume II

Tagungsband der 34. Karlsruher Flockungstage 2023

Herausgegeben von: Mohammad Azari
 Stephan Fuchs

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Tagungsband der 34. Karlsruher Flockungstage 2023;
M. Azari, S. Fuchs (Hrsg.); Schriftenreihe SWW (Bd. 161)
Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe

Alle Rechte vorbehalten

Satz: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Vorwort

Trotz des erreichten hohen Ausbaustandards der Abwasserreinigung tragen die Einleitungen aus kommunalen Kläranlagen in relevantem Umfang zur Belastung der Oberflächengewässer und der mit ihnen verbundenen Ökosysteme bei.

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer quasi stetigen Weiterentwicklung der Abwasserbehandlung. Innovative verfahrenstechnische Ansätze zeichnen sich heute jedoch nicht nur durch eine hohe Verfahrenswirksamkeit, sondern auch durch den Nachweis ihrer Energie- und Ressourceneffizienz aus. Sie müssen ihren Beitrag zum Gewässerschutz auch unter Stressbedingungen, wie Betriebsstoffmangel oder Dürresituationen leisten.

Es entstehen damit neue Herausforderungen, die wir in der Fortsetzung der letztjährigen Tagung (Moderne Ansätze in der Abwasserbehandlung: Tagungsband der 33. Karlsruher Flockungstage 2022; DOI: 10.5445/IR/1000153905) aufnehmen und in drei Themenblöcken mit Ihnen diskutieren möchten.

1. Fortgeschrittene Phosphoreliminierung

2. Wasserwiederverwendung

3. Vierte Reinigungsstufe zur Eliminierung von Spurenstoffen

Ihrem Feedback folgend haben wir das Programm dieses Jahr so aufgebaut, dass ein Übersichtsvortrag immer von einem oder mehreren Praxisbeispielen begleitet wird. Auf diese Weise wollen wir einen intensiven Austausch fördern und sicherstellen, dass Sie Hinweise zu ihrer eigenen spezifischen Fragestellung bekommen.

Wir bedanken uns bei allen, die zum Gelingen der Karlsruher Flockungstage beitragen. Dies schließt alle Vortragenden ebenso wie alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer ein, die durch ihr Kommen und ihren aktiven Input den fachlichen Austausch möglich machen.

Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachbereiches, ohne die diese Veranstaltung nicht möglich wäre.

Karlsruhe, November 2023

Stephan Fuchs und Mohammad Azari

Inhaltsverzeichnis

Aktuelles aus dem Umweltministerium	7
Weitergehende Phosphorelimination auch bei Fällmittel-Knappheit?	20
Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen bei der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen	48
Spurenstoffelimination auf Kläranlagen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit	59
Enhancing phosphorus removal of photogranules by incorporating polyphosphate accumulating organisms	72
Innovative Phosphatfällung mit SCHAEFER PRECAphos®	81
Herausforderungen und Lösungsansätze für die weitestgehende P-Elimination auf Kläranlagen	86
Wasserwiederverwendung durch Heizen und Kühlen von Gebäuden	99
Möglichkeiten und Herausforderungen für eine Wasserwiederverwendung nach dem Prinzip „fit-for purpose“	110
Mikroplastikentfernung aus kommunalem Abwasser	141
Mikroschadstoff- und Phosphorentfernung – Neues Verfahren mit superfeinem Adsorbens und Polstoffiltration	156
Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption	164
Ausstellerverzeichnis	188
Schriftenreihe SWW – Karlsruhe	191

PRODUKTE UND VERFAHREN FÜR EINE OPTIMALE KLÄRSCHLAMMKONDITIONIERUNG



FLOCMIX® FLD-FLM
Dynamische Löse- und
Dosieranlage für polymere
Flockungsmittel



FLOCMIX® FLD-COM
Dynamische Löse- und
Dosieranlage für polymere
Flockungsmittel



FLOCMIX® IM3 Dynamischer
Inline-Motormischer
für polymere
Flockungsmittel



FLOCMIX® IM2CA
Dynamischer
Inline-Motormischer



FLOCMATIC® FMC
Zentralwassersensor



CERLIC CMC Mikrowellen
TS-Messung

ensola 
LABOR ■ WASSER ■ GAS

NEO WATERFX300 fällt Phosphor mit geringer Einsatzmenge und generiert wenig Fällschlamm – garantiert eine wirtschaftliche Abwasserreinigung

VORTEILE BEI DER PHOSPHORELIMINIERUNG GEGENÜBER EISEN-(III)-CHLORID:

- bis zu 8 x geringerer Fällmittelverbrauch
- bis zu 50 % geringere Fällungsschlammmenge
- verbesserte Schlammentwässerung
- bis zu 500 x geringerer Säureeintrag



Aktuelles aus dem Umweltministerium

Sarah Löwenthal

**Ministerium für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft
Baden-Württemberg**

Aktuelles aus dem Umweltministerium

**Sarah Löwenthal, Referat 53 Gewässerreinigung, stehende Gewässer und Bodensee
34. Karlsruher Flockungstage 21.11.2023**



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Der europäische Rahmen: Revision der Kommunalabwasserrichtlinie

Überarbeitung der Kommunalabwasserrichtlinie 91/271/EWG von 1991 im Rahmen des Null-Schadstoff-Aktionsplans

- 26. Oktober 2022 Veröffentlichung des Legislativvorschlags der Europäischen Kommission für die Überarbeitung der kommunalen Abwasserrichtlinie
- 05. Oktober 2023 Verhandlungsposition des europäischen Parlaments verabschiedet
- 16. Oktober 2023 Verhandlungsposition des europäischen Rats verabschiedet
- Start in den Trilog → EU Parlament, Rat und Kommission verhandeln gemeinsam finalen Rechtstext, unklar ob Abschluss vor Wahlen EP 2024



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Folie 2

Revision der Kommunalabwasserrichtlinie- Knackpunkte aus unserer Sicht

Mischwassermanagement Art. 5 + Anhang 5

Nährstoffelimination Art. 7 + Anhang 1B+D

Spurenstoffelimination Art. 8 + Art. 9

Energieneutralität + THG Emissionen Art. 11 + 21

Abwassermonitoring Art. 17

Genehmigung Indirekteinleiter und delegierte RA



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Folie 3

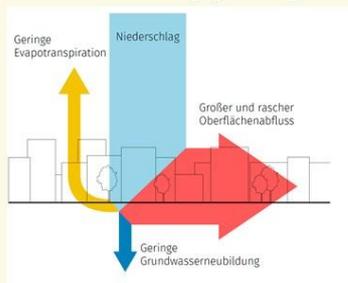
Mischwassermanagement Art. 5 + Anhang 5

- Liste von Gemeinden > 10.000 < 100.000 EW durch Überläufe von Siedlungsabwasser Risiko für Umwelt/menschliche Gesundheit, **Richtziel** Regenüberläufe > X% der jährlichen Abwasserlast bei TW
 - diese Gemeinden + Gemeinden ≥ 100.000 EW **bis Ende 2045/ 2035 integrierte Pläne für die kommunale Abwasserbewirtschaftung** erstellen
 - Umfang Pläne: u. a. Analyse und Beschreibung Kanalisationsnetz mit Speicherkapazität bei Niederschlägen, Schadstoffeintrag in Gewässer, Maßnahmenableitung zur Erreichung des **Richtziels**
- *aktuell Diskussion um Höhe und Auslegung des Richtziels im Zuge des Trilog (1-2 %)*
- *ambitioniert, ob Richtziel erreichbar ist, hängt von der Interpretation ab*

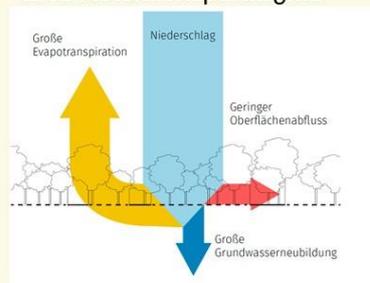
Folie 4

Urbanes Wasserressourcenmanagement

Früher: Ableitungsparadigma



Ziel: Retentionsparadigma



- Annäherung an den Wasserhaushalt eines unbebauten Referenzzustands
- **UWRM, Schwammstadt, wassersensible Siedlungsentwicklung, blau-grüne Infrastruktur, ...**



Folie 5

Abteilungsklausur 04 /05.05.2023 Oberkirch – UWRM / Stoffliche Belange

Nährstoffelimination („Drittbehandlung“) Artikel 7+Anhang 1 B+D

Vorschlag Kommission

Anforderungen für KA > 100.000 EW, KA > 10.000 risikobasiert, im Jahresmittel einzuhalten
Phosphor gesamt **0,5 mg/l** oder 90% Verringerung
Stickstoff gesamt **6 mg/l** oder 85% Verringerung

Vorschlag Parlament

Phosphor gesamt **0,2mg/l** oder 93% Verringerung
Stickstoff gesamt **8 mg/l** oder 80% Verringerung

Vorschlag Rat

Anforderungen für KA > 150.000 EW, KA > 10.000 risikobasiert
Phosphor gesamt **größere KA 0,5 mg/l mittlere 1 mg/l** oder 87,5% Verringerung
Stickstoff gesamt **größere KA 8 mg/l mittlere 10 mg/l** oder 82,5% Verringerung

P in BW erfüllbar, N ambitioniert, Zielrichtung Meeresschutz

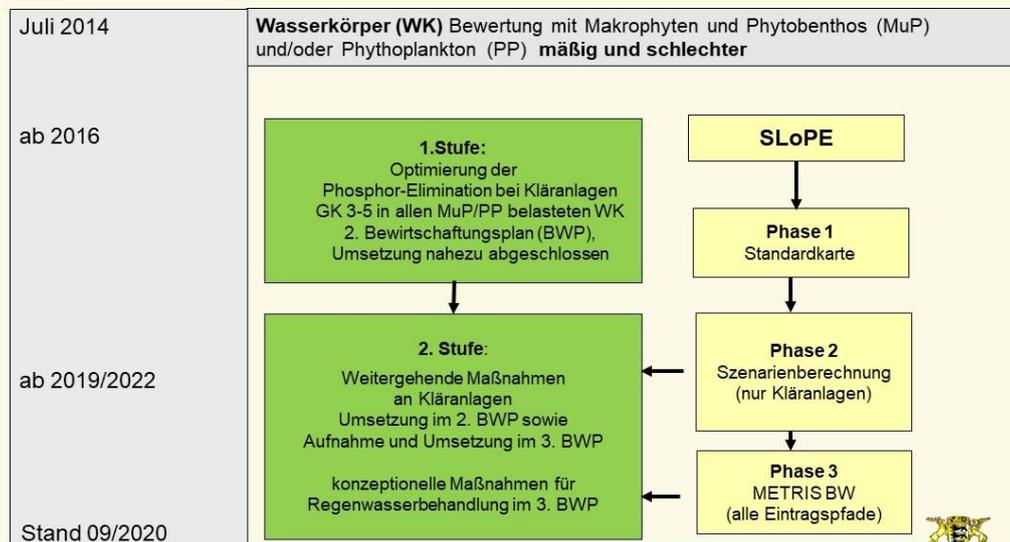
Folie 6



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Handlungskonzept Abwasser



Folie 7

SLoPE = Studie zur verbesserten Lokalisierung von PhosphorEmissionen
METRIS BW - Stoffeintragsmodell (Modelling of Emissions and Transport in River Systems)

Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

WRRL / Handlungskonzept Abwasser



P-Kulisse Kläranlagen

- wo aufgrund Monitoringergebnisse MuP erforderlich und Kläranlagen der maßgebliche Eintragspfad
- GK2: 0,5 mg/l Pges
- GK3-5:
0,2 mg/l Pges Filterv.; 0,3 mg/l Pges / 0,16 mg/l o-PO4-P Fällungsv.
- Bis Ende 2024: Baubeginn Filterv., Fällungsv. in Betrieb

Landesweit > 450 Kläranlagen betroffen, 2/3 der WB



P-Kulisse Urbane Flächen - RÜB

- dort, wo MuP im WK mäßig oder schlechter und aus METRIS Anteil der o-PO4-P-Einträge über urbane Flächen > 50% vom Orientierungswert

➤ zunächst nur konzeptionelle Maßnahmen, um relevante RÜB zu identifizieren

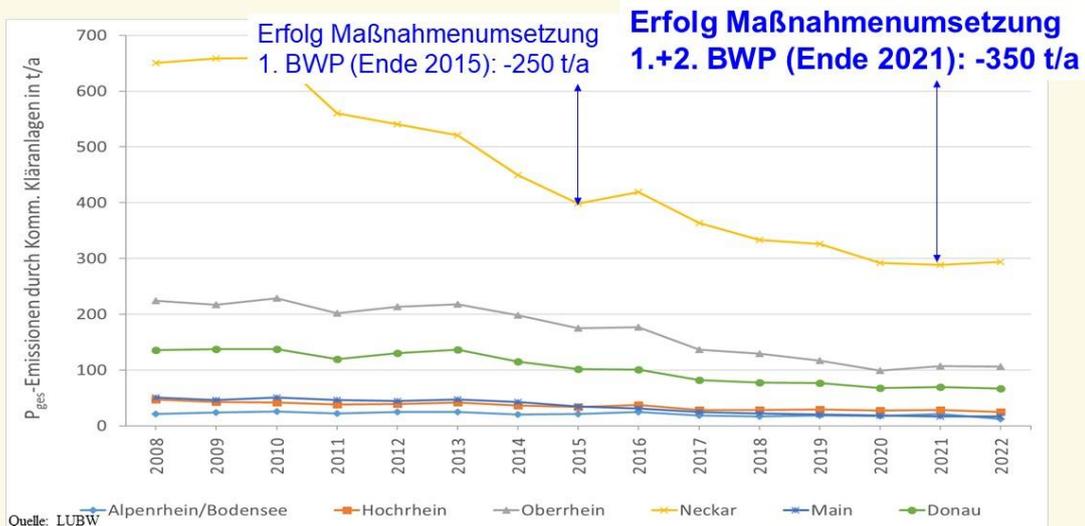


Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Folie 8

Kläranlagenfrachten P in BW 2008 - 2022



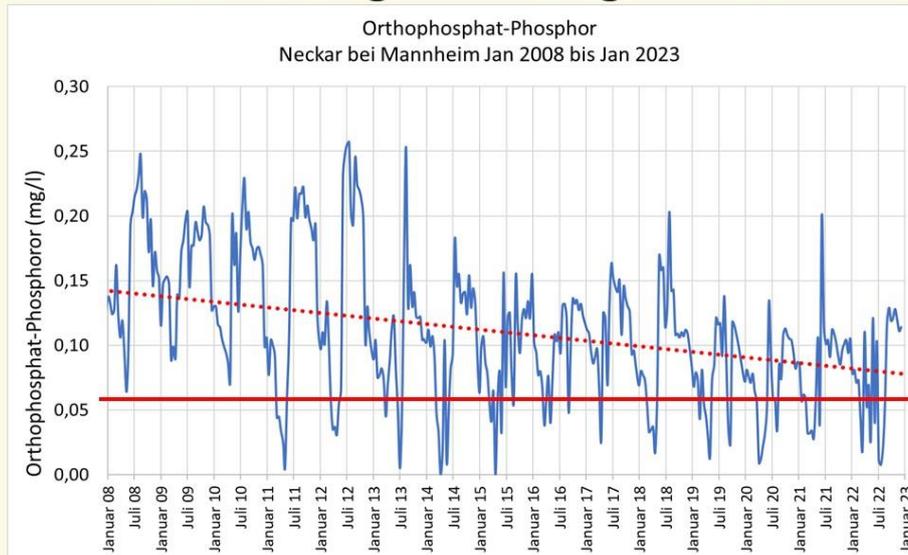
Quelle: LUBW

Folie 9

Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

P-Reduzierung – Wirkung im Neckar



Folie 10

Spurestoffelimination („Viertbehandlung“) Artikel 8 Erweiterte Herstellerverantwortung Artikel 9

Aktuelle Diskussion im Trilog

Viertbehandlung für größere KA verpflichtend (Grenze zwischen 100.000 und 200.000 EW)

für mittlere KA risikobasiert (Grenzen ab 10.000-100.000 EW in Diskussion)

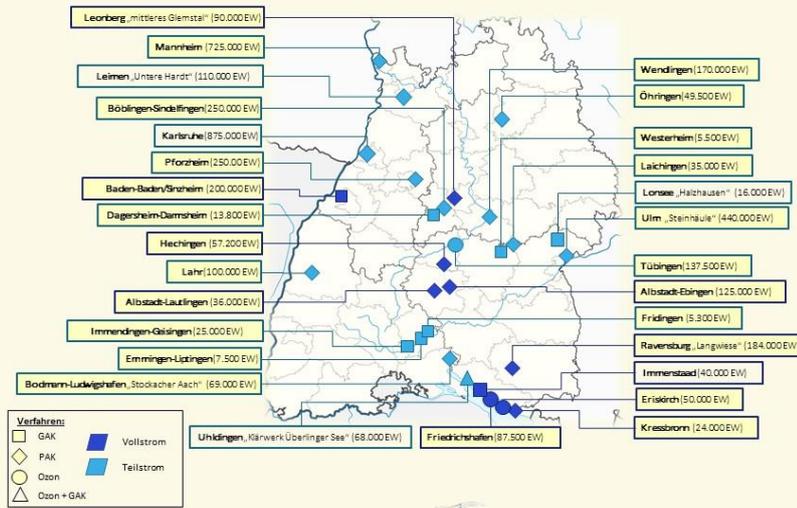
EHV: Viertbehandlung (teil-)finanziert durch Pharma- und Kosmetikindustrie

Viertbehandlung und EHV als Finanzierungsbeitrag wird von BW begrüßt, Zeithorizont aber auch ambitioniert!

BW als Vorreiter gut gerüstet

Folie 11

Kläranlagen mit einer Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg 29 Anlagen in Betrieb – Stand Oktober 2023

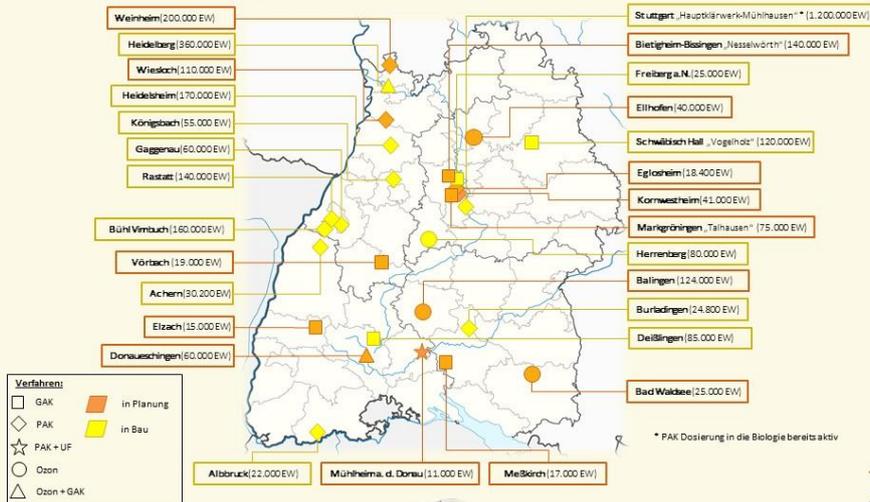


Quelle: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg
www.koms-bw.de



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Kläranlagen mit einer Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination in Baden-Württemberg 28 Anlagen in Planung oder Bau – Stand Oktober 2023



Quelle: Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg
www.koms-bw.de



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Klimarelevanz von Abwasseranlagen

direkte und indirekte THG-Emissionen bei Abwasserreinigung

Gewässerschutz und Klimaschutz sind beides wichtige Ziele
Es kann Zielkonflikte geben, aber auch Synergien

- Nutzung erneuerbarer Energiequellen auf Anlagen
- möglichst energieeffizienter Betrieb
- Optimierung zur Reduzierung direkter und indirekter THG-Emissionen



aber ohne negative Auswirkungen auf die Reinigungsleistung

Folie 14

Energieneutralität und direkte Treibhausgasemissionen Artikel 11 + 21

Vorschlag der Kommission Oktober 2022

Artikel 11 Energieaudits 4 jährlich KA > 10.000 EW, stufenweise Energieneutralität bis 2040
(Nachweis auf Mitgliedsstaatsebene)

Artikel 21 Überwachung der Treibhausgasemissionen bei KA > 10.000 EW und der von diesen Anlagen verbrauchten und erzeugten Energie

Verhandlungsposition Parlament Oktober 2023

Hinzunahme externer EE-Quellen, Klimaneutralität des Abwassersektors bis 2050, Messung Gesamtemissionen im kompletten System, Leckagen Methan und Abwasser auch im Sammler überwachen, detaillierte Beschreibung Energieaudits

Ausrichtung Rat Oktober 2023

externe EE-Quellen für Energieneutralität max. 30%, Energieaudits deutlich später, Mitgliedsstaaten sollen Erzeugung EE nach Ergebnissen Energieaudits sicherstellen, Energieneutralität bis 2045, Berechnung oder Modellierung direkter THG-Emissionen

Folie 15

Energieneutralität und direkte Treibhausgasemissionen Artikel 11 + 21

sinnvolle und wichtige Vorgaben, die aber anspruchsvoll sind!

Vorteil: es wird bessere Datenlage an Langzeittreibhausgasmessungen geben

zu erwartende Diskussion im Trilog um Bilanzgrenzen und Zeitschiene "Energieneutralität", Umfang und Beginn der Energieaudits und der THG-Messungen

- **BW ist gut gerüstet:** Größere KA verfügen in BW bereits Großteils über BHKWs zur Stromerzeugung ca. 46 % Eigenstromerzeugung (Stand 31.12.2022), Energieeffizienz bereits im Fokus, Daten zur Energieerzeugung und –verbrauch werden größtenteils bereits erhoben
- laufende Forschungsprojekte zur Klimarelevanz von Abwasseranlagen mit THG-Messungen und internationaler Austausch zu Vorgehen z. Bsp. mit Dänemark

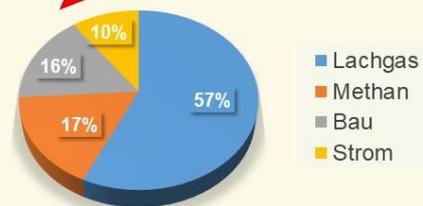
Folie 16

Erkenntnisse zur Relevanz direkter Emissionen

Gruber et al.: **Schweiz** 14 Messkampagnen mit insgesamt 20 Messjahren in der Schweiz

→ dort Anteil KA an THGE insgesamt ca. **2,5 %**
höhere Relevanz der direkten THG-Emissionen

aber in der Schweiz schlechtere N/DN
was nach aktuellen Annahmen zu mehr
Lachgas Emissionen führt



Folie 17

Aktuelle Forschungsprojekte in BW

Projekt ISWA THG-Emissionen Teil 1 2022/2023:

Kurzzeitige Messung von Lachgas und Methan **in der Fläche** auf 15 verschiedenen Kläranlagen mit Hauben Messung auf den Becken und Lasermessung über gesamte Anlage (Methan)



Folie 18

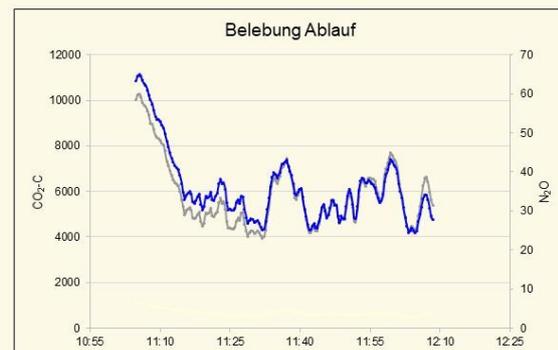
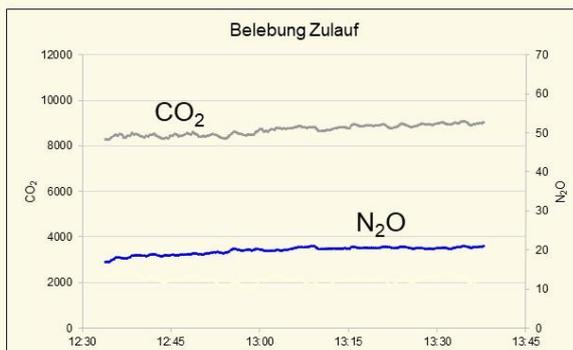


Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Ergebnisse - Einfluss der Messposition

Einfluss der Hauben Position bei Becken mit Durchfluss und kontinuierlicher Belüftung



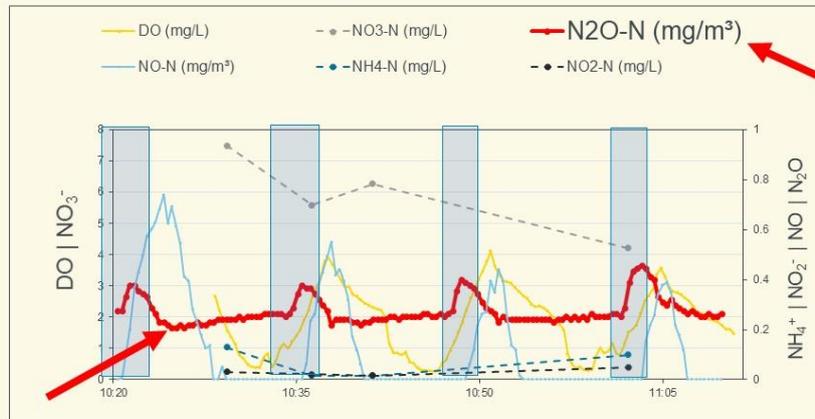
Folie 19



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Konzentrationsverlauf Einfluss Betriebsweise am Bsp. Lachgas in Niederstotzungen intermittierende Belüftung



Belüftung blau hinterlegt

Folie 20

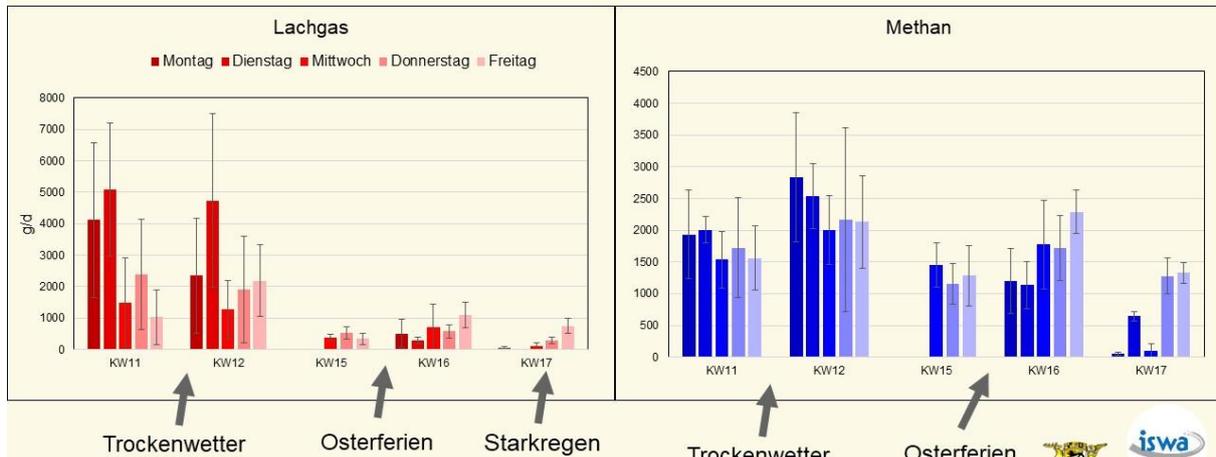


Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Ergebnisse – Langzeitmessungen im Klärwerk Göppingen

Zusammenhang zwischen erhöhten Emissionen und erhöhter Fracht nicht eindeutig



Folie 21



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Ergebnisse aus Projektteil 1

- Messungen an verschiedenen Anlagentypen geben guten Überblick über Einfluss Anlagentechnik und –betriebsweise, dafür aber eher Momentaufnahmen
- Innerhalb einer Anlage Emissionen abhängig von der Zulauffracht, zwischen den einzelnen Anlagen machen sich unterschiedliche Zulauffrachten nicht bemerkbar
- Einflüsse des Anlagentyps und des Managements sind stärker als die der Zulauffrachten
- **Anhaltspunkt: niedrige Ammonium- und Nges-Ablaufwerte, d. h. gute Nitrifikation und Denitrifikation führt zu niedrigen Lachgasemissionen**
- Methan: Thema Schlamm Lagerung und –stabilisierung → hohe Emissionen bei aerober Stabilisierung

Folie 22



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Welche Herausforderungen bestehen weiterhin?

- deutlich mehr und längere Messreihen erforderlich, um verbindliche Aussagen treffen zu können
- **Projektteil 2 ISWA zu längeren Messungen auf einzelnen der bereits beprobten Anlagen mit günstigen Randbedingungen 2023-2024**
- Vor- und Nachteile der verschiedenen Messverfahren und Einfluss unterschiedlicher Messorte beschäftigen aktuell die Forschung (Flüssigsensoren, Ablufthauben, Lasermessungen, Drohnenmessung)
- Ziele in BW: Handlungsempfehlungen für klimafreundlichen Betrieb von Kläranlagen
- Mittelfristig nach Möglichkeit belastbare Emissionsfaktoren für Anlagentypen

Folie 23



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Spurenstoffelimination („Viertbehandlung“) Artikel 8 Erweiterte Herstellerverantwortung Artikel 9

Vorschlag Kommission

Viertbehandlung KA > 100.000 EW verpflichtend

mittlere KA > 10.000 und < 100.000 EW risikobasiert

EHV: Viertbehandlung finanziert durch Pharma- und Kosmetikindustrie

Vorschlag Parlament

Viertbehandlung >150.000 EW verpflichtend, > 100.000 EW risikobasiert

EHV als Teilfinanzierung komplementierend zur Gebührenfinanzierung (20% Gebühren)

Vorschlag Rat

Viertbehandlung >200.000 EW verpflichtend, > 100.000 EW risikobasiert

EHV als Vollfinanzierung

Viertbehandlung und EHV als Finanzierungsbeitrag wird von BW begrüßt
BW als Vorreiter gut gerüstet



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Folie 25

Ausgewählte Kläranlagen, gruppiert nach Anlagentypen

	Anlagenname	KA- Nachbarschaft	Regierungsbezirk
SBR:	Sequenced batch Verfahren		
	Klärwerk Weikersheim	TBB 2	Stuttgart
	Klärwerk Rottal	SHA 3	Stuttgart
	Klärwerk Bühlertann	SHA 3	Stuttgart
	Klärwerk Waghäusel	KA 2	Karlsruhe
IDN:	Intermittierende Belüftung		
	Klärwerk Bad Mergentheim	TBB2	Stuttgart
	Kläranlage Abtsgmünd	AA 1	Stuttgart
	Klärwerk Owen	ES 1	Stuttgart
	Klärwerk Rottal	SHA 3	Stuttgart
	Kläranlage Halzhausen	UL 1	Tübingen
	Klärwerk Leopoldshafen Nord	KA 1	Karlsruhe
VDN:	Vorgeschaltete Denitrifikation		
	Klärwerk Göppingen	Nordost	Stuttgart
	Klärwerk Nürtingen	Nordost	Stuttgart
	Klärwerk Giengen	HDH 1	Stuttgart
	Klärwerk Niederstotzingen	HDH 1	Stuttgart
	Klärwerk Filderstadt- Sielmingen	ES 1	Stuttgart

26

nberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Weitergehende Phosphorelimination auch bei Fällmittel-Knappheit?

Matthias Barjenbruch
Cora Eichholz

Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität Berlin

Einleitung

Klimawandel, Energieautarkie oder die erweiterte Entfernung von Spurenstoffen sind nur einige der Gründe, warum Kläranlagen in Zukunft resilienter und gleichzeitig kosteneffizienter werden müssen. Die Situation hat sich durch die aktuellen Entwicklungen des Krieges in der Ukraine und durch die Herausforderungen der zukünftigen EU-Abwasserrichtlinie weiterhin speziell für den Parameter Phosphor (P) verschärft (DWA, 2023). Die aus dieser Situation resultierenden Versorgungs- und Energiekrisen führten zu einem Notstand in der Abwasserbehandlung im Jahr 2022. Besonders betroffen war die Versorgung mit Fällungsmitteln für die P-Eliminierung. Die Verwendung von Eisen(III)-chlorid als Fällungsmittel ist bei der chemischen P-Eliminierung und somit auch bei der weitergehenden P-Elimination weit verbreitet. Das Fällungsmittel fällt als Nebenprodukt in der Titanindustrie an. Derzeit hat sich die Lage bei der Bereitstellung von Fällungsmitteln wieder beruhigt, ist aber immer noch als prekär zu betrachten (Barjenbruch et al., 2023). Folglich werden in diesem Manuskript der Effekt und die Möglichkeiten für die weitergehenden P-Elimination betrachtet.

Notwendigkeit der weitergehenden P-Elimination

Die Einleitung von Abwasser in ein Gewässer bedarf gemäß dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) der Einhaltung bestimmter Anforderungen. Zum einen gilt das Emissionsprinzip (§ 57 WHG), bei dem gemäß Abwasserverordnung (AbwV) (BGBl. I, Nr. 28 v. 22.06.2004, S. 1108) (seit 1989) für den Parameter Phosphor aus kommunalen Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von 10.000 E Überwachungswerte von 2,0 mg TP /l und ab 100.000 E 1,0 mg TP /l eingehalten werden müssen.

Mit der Forderung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, RL 2000/60/EG) eines „guten ökologischen und chemischen Zustandes“ aller aquatischen Ökosysteme erfolgt seit 2015 bundesweit eine immissionsorientierte Betrachtung von Abwassereinleitungen. Die Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial werden in den Anhängen der Oberflächengewässer-Vorordnung (2016) als Qualitätsnormen entsprechend definiert. Demnach gelten für alle Fließgewässertypen Orientierungswerte von < 0,10 mg TP/l bzw. 0,05 bzw. 0,07 mg PO₄-P/l. Ausnahmen gelten für organisch geprägte Bäche und Flüsse, kleine Niederungsfießgewässer in Fluss- und Stromtälern (0,15 mg TP/l) sowie für Marschgewässer (0,15 mg TP/l) (OgewV, 2016). Für eutrophe Seen beträgt der TP-Zielwert gemäß OgewV (2016) 35 – 90 µg/l (je nach Referenzzustand), der allerdings für flache Seentypen und Flusseen abweichen kann.

Somit können in Deutschland regional und gewässerspezifisch sowie unter Beachtung besonderer Schutzbelange wie dem Schutz der Randmeere oder der Nutzung des Gewässers zur Trinkwassergewinnung niedrigere ges. P Überwachungswerte gefordert werden. Schleswig-Holstein hat beispielsweise zum Schutz der Nord- und Ostsee die Phosphorablaufwerte auf TP ≤ 0,5 mg/l für die 38 größten Kläranlagen begrenzt (Barjenbruch, 2007). In Einzugsgebieten des Bodensees werden 1,0 mg TP/l für Kläranlagen der Ausbaugröße 1.000 bis 40.000 E und sogar 0,3 mg/l TP für Kläranlagen über 40.000 E (im 24-h-Mittel) gefordert (vgl. IGKB, 2001).

Die EU-Abwasserrahmenrichtlinie (UWWTD) wird derzeit überarbeitet mit dem Vorschlag eine verpflichtende weitergehende P-Eliminierung für Kläranlagen mit einem Überwachungsgrenzwert von 0,2 mg TP/l und eine Eliminationsrate von mindestens 93 Prozent für Kläranlagen größer 100.000 EW vorzugeben und für Kläranlagen ab 10.000 EW entweder diesen Konzentrationswert oder diese Eliminationsrate. Dies zielt zwar auf eine Null-P-Emission ab, lässt aber den nicht fällbaren Anteil an Phosphor (Phosphonate) im Abwasser außer Acht, der kläranlagenspezifisch etwa bei 0,1 bis 0,3 mg/l liegen kann (DWA, 2023).

Gemäß einer Studie vom UBA zu einer bundesweiten Modellierung von Phosphoreinträgen in die Gewässer ergab sich aus Kommunale Kläranlagen,

Industrielle Direkteinleiter, Kanalisationssysteme, Atmosphärischer Deposition, Oberflächenabfluss, Erosion, Grundwasser und Dränagen ein Gesamt-Phosphoreintrag von 15.400 t/a. Speziell Kommunale Kläranlagen besitzen dabei einen Anteil am Gesamteintrag von 38 % (5.810 t/a): Zusätzliche urbane Anteile haben die erstmals berücksichtigten Kanalisationssysteme mit 25% (3.830 t/a) (Fuchs et al., 2022).

Obwohl die Phosphoreinträge aus Punktquellen durch den Ausbau kommunaler Kläranlagen und technischer Verbesserungen bei der Abwasserreinigung seit Mitte der 1980'er Jahre um 70 % gesunken sind, machen sie nach den Einträgen aus diffusen Quellen wie der Landwirtschaft den zweitgrößten Anteil der Phosphoreinträge aus. Der Rückgang der Phosphoreinträge im Zeitraum von 1985 bis 2011 lag vor allem an stark gesunken Einleitungen aus kommunalen und industriellen Kläranlagen, während sich die P-Einträge aus der Landwirtschaft in dieser Zeitspanne nicht verringerten.

Dennoch stellen der Bau und die Nachrüstung von kommunalen Kläranlagen auf weitergehende P-Elimination zum Erreichen der Ziele der WRRL dar, sowie der wahrscheinlich zukünftigen Forderungen der UWWTD.

Phosphorfraktionen im Abwasser

Die im Abwasser enthaltenen Phosphorverbindungen werden in der Praxis nicht einzeln identifiziert, sondern in Analysefraktionen eingeteilt und operationell definiert (WERF, 2008). Durch Filtration der Probe über einen Filter von 0,45 µm wird zwischen dem partikulären (pP) und dem gelösten Phosphor (sP = soluble phosphorus) unterschieden. Die nach DIN EN ISO 6878 (2004) festgelegte Phosphoranalyse basiert auf einer Reaktion von Orthophosphat in saurer Lösung mit Antimon- und Molybdänionen zu einem Antimon-Phosphormolybdat-Komplex, der mit Ascorbinsäure zu Molybdänblau-Komplex reduziert wird und photometrisch bestimmt werden kann. Diese Phosphorfraktion wird als reaktiver Phosphor (rP) überwiegend $\text{PO}_4\text{-P}$ bezeichnet. Durch Differenzbildung aus dem Gesamtphosphor und dem reaktiven Phosphor wird der nicht reaktive Phosphor (nrP) berechnet. Abbildung 1 verdeutlicht die Zusammenhänge.

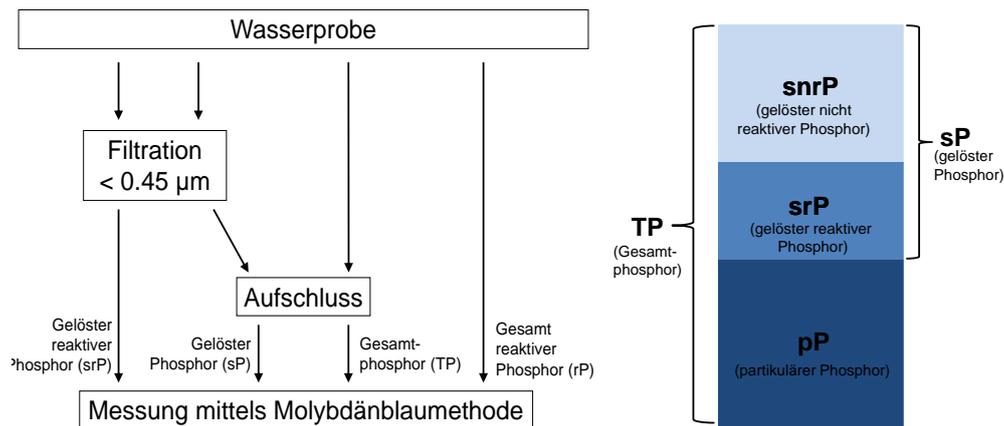


Abbildung 1: Übersicht über die unterschiedlichen, operationell definierten Phosphorspezies (nach SPERLICH UND GNIRSS, 2013)

Die weitestgehende Phosphorelimination ist von der Zusammensetzung des Phosphors (LANCASTER UND MADDEN, 2008) und einer nahezu vollständigen Entfernung des partikulären Phosphors abhängig (GU ET AL., 2011). Während sich der srP (gelöster reaktiver Phosphor, größtenteils Orthophosphat) durch den Einsatz von Fällmitteln sehr gut entfernen lässt, kann die anlagenspezifische Konzentration anderer im Klärprozess schwerer abbaubarer Phosphorfraktionen die weitestgehende Phosphorelimination erschweren. Die genaue Zusammensetzung des snrP ist nicht bekannt (WERF, 2008).

In einer seitens der TU Berlin durchgeführten Studie (Listringhaus, 2016) wurden die snrP-Konzentration aus Literaturdaten zu 60-450 $\mu\text{g snrP/L}$ ermittelt. Die Ablaufwerte (Datenbasis 28 Angaben) lagen in der Regel im Ablauf der konventionellen Kläranlage <math>< 100 \mu\text{g snrP/L}</math>. Der snrP-Ablaufwerte der untersuchten Filteranlagen (Datenbasis <math>< 80</math>) liegen durchschnittlich im Bereich von 30-80 $\mu\text{g snrP /L}</math>, und sind somit zum Teil noch über den Literaturangaben zum refraktären Anteil. Der maximale Ablaufwert betrug 190 $\mu\text{g/L}</math>, dort wurde auch die maximale Zulaufkonzentration von 1.300 $\mu\text{g/L}</math> nachgewiesen. In Anbetracht der zum Teil zukünftig geforderten Überwachungswerte erscheint der nicht abbaubare P-Anteil (snrP) relativ hoch und sollte bei jeder einzelnen Kläranlage im Überwachungskonzept berücksichtigt werden.$$$

Stand der Fällmittel-Knappheit

Im Zuge der Fällmittel-Knappheit wurde im Auftrag des Umweltbundesamts mehrere Online-Umfragen für ein Gutachten zur Fällmittelsituation durchgeführt. In einer Betreiberumfrage, die bis zum 01.01.2023 ging, wurden insgesamt 2.775 Antworten vollständig abgegeben. Teilweise wurde Anlagen zusammengefasst, z.B. für Berlin oder bei Verbänden. Die Umfrage erreichte 72% Kläranlagen, 14% Direkt- oder Indirekteinleiter und 14% Wasserversorgungsunternehmen. Der Fokus des

Gutachtens lag auf den abwassertechnischen Fragen. Bezogen auf die Einwohnerwerte wurden rund 90% der Kläranlagen in Deutschland erfasst mit insgesamt 136.460.601 EW (Kläranlagen inkl. Indirekteinleiter). Die Lage hat sich seitdem etwas entspannt. Manche Hersteller liefern wieder, aber trotzdem ist die Lage sehr unsicher, da Produktion auf Halde stattfindet und sich die Situation jederzeit wieder verschlimmern kann. Es wurden in der Umfrage weiterhin die benötigten Fällmittel ermittelt, sowie die Fehlmengen. Für alle Kläranlagen in Deutschland inklusive der Industrie wird pro Jahr eine Menge von 1.103.734 t benötigt. Weiterhin wurden Kalkulationen unter der Annahme gleichbleibender Angebotslage, ohne neue Bezugsquellen durchgeführt. Diese haben eine Fehlmenge im Abwassersektor bis Ende 2023 von 426.994 t ermittelt. Dieses Worst-Case-Szenario ist jedoch nicht eingetreten.

Es wurde eine Preissteigerung netto für die Klärwerke in Bezug auf Fällmittel im Vergleich von 2021 zu 2022 von 63% (~310 €/t) festgestellt. Die ermittelten Phosphorkonzentrationen zeigten im Ablauf einen Median für alle Kläranlagen von 0,5 mg/l, was bereits eine sehr gute P-Elimination der Kläranlagen in Deutschland zeigt. In einer weiteren Umfrage bei den Behörden wurden nach der Abgabe von 9 von 16 Bundesländern 1.066 sensible Gewässer identifiziert. Diese sensiblen Gewässer werden von 2.480 Anlagen beschickt. Davon besitzen 326 KA eine Größenklasse kleiner 3. Bei den Umfragen stellte sich weiterhin voraus, das als verfahrenstechnische Anpassung am meisten Bio-P als Möglichkeit, sowie die Reduzierung möglicher Überdosierung ausgewählt wurde. Circa 60 Mio EW betreiben in Deutschland reine chemische P-Elimination. 4 Mio. EW nur Bio-P und rund 58 Mio. EW Bio-P mit Stützfällung.

Biologische P-Elimination und alternative Verfahren

Phosphor kann nur im festen Aggregatzustand über den Schlammweg aus dem Abwasser entfernt werden. Die Überführung in gut abscheidbare Partikel kann entweder durch (erhöhte) Aufnahme in die Biomasse (Bio-P, PB) oder durch die chemische Fällung (PC) erfolgen.

Die Vorteile von Bio-P sind, dass keine Zusatzstoffe erforderlich sind und die Aufsalzung der Kläranlagenabläufe geringgehalten werden. Weiterhin entsteht ein geringerer Schlammanfall und es werden keine zusätzlichen Schwermetalle in den Schlamm überführt. Dies unterstützt weiterhin ein energieärmeres P-Recycling (Daneshgar et al., 2023). Außerdem besteht bei einer stabilen und betriebssicheren Bio-P keine Beeinträchtigung der Nitrifikation, da die Prozesse ungestört parallel ablaufen können. Bei einem Überwachungswert von 0,2 mg P/l werden jedoch zwangsweise Fällmittel eingesetzt werden müssen, daher wäre es sinnvoll den zuvor fällbaren Teil über Bio-P in den Schlammweg zu überführen. Günstige Voraussetzungen für die Bio-P sind hierbei ein möglichst geringer $\text{NO}_3\text{-N}$ -Zufluß und

kein O₂-Eintrag ins Anaerobbecken, ein günstiges BSB/P-Verhältnis (30 : 1), hoher Gehalt an organischen Säuren (> 100 mg/l), sowie eine ausreichende O₂-Zufuhr im Belebungsbecken zur optimalen Phosphataufnahme. Unterstützende Maßnahmen zur biologischen P-Elimination sind die Ansäuerung von Primärschlamm (z. B. Rückführung von Trübwässern aus Voreindickern), die Bypassführung von Rohabwasser in die biologische Vorstufe und die Verhinderung einer Nitratzufuhr in die Anaerobstufe durch getrennte Kaskadenbecken. Bekannte Nachteile (vorwiegend mangels Fällmitteldosierung) können relativ „unstable“ Ablaufwerte sein, sowie die Bildung von Blähschlamm und die Entschwefelung von Faulgas (zusätzliche Aufbereitungsstufen notwendig).

Durch die gezielte Umrüstung von Kläranlagen auf Bio-P, inklusive Mitbetrachtung von Lösungen für Entschwefelung von Faulgas und Bildung von MAP, würde eine erhöhte Resilienz auf kommunalen Kläranlagen erreicht werden. Für die weitergehende P-Elimination würde dies weiterhin in einen geringeren Gesamt-Fällmittelbedarf resultieren.

Weitere alternative Verfahren als Stand der Technik (SDT), sowie Stand der Wissenschaft (SDW) zu Bio-P wäre beispielsweise eine Schlammwasserteilstrombehandlung durch MAP-Fällung (SDT) oder durch Ionenaustauscher (mit SO₄²⁻) in Kombination mit einer Elektrolyse auch zur P-Rückgewinnung möglich (SDW). Im Hauptstrom wäre eine P-Elimination mittels folgender Alternativen möglich:

- Elektrokoagulation und Elektroflotation (SDW bis zu 90%)
- Elektro-Phosphatfällung z.T. Großtechnik, Abwasser muss bestimmte Eigenschaften aufweisen (z. B. elektrische Leitfähigkeit) (SDW)
- Adsorption (z.B. Ferrosorb, "modifizierter Wasserwerksschlamm" (SDT), Flugasche, Ca-, Fe- und Al-haltige Kiesarten, Tonerde, Apatit)
- Ionenaustausch (Fäulnis der Membran und hohe Kosten) (SDW)
- Kristallisation (CaPO an z.B. Sand) (SDW)
- Phosphatfänger Proteine, die spezifisch Phosphat binden (Crowdfunding)
- Algen (SDW)

Eine weitere Möglichkeit zur Abwasserreinigung ist das norwegische Schwebebettverfahren (Hias-Verfahren), das mittels Aufwuchskörper und verschiedene Zonen (anaerob, aerob) das Wasser aufreinigt. Die Aufwuchskörper werden über einen Fahrstuhl wieder in die anaerobe Zone befördert. Das aufgereinigte Wasser kann über ein Sieb die Hauptanlage verlassen. Suspendierte Biomasse wird über einen nachgeschalteten Disk-filter entfernt. Das Hias-Verfahren lässt sich ebenfalls mit weitergehenden P-Elimination über einen Dynasand-Filter kombinieren. (Hias, 2023)

Weitergehende P-Elimination unter Fällmittelmangel

Weitgehende Phosphorelimination

Um eine weitgehende P-Entfernung zu erreichen, muss eine chemische Fällung und eine sehr gute Partikelseparation den üblichen Verfahren nachgeschaltet werden. Hierdurch sehr geringe Abflusskonzentrationen (z. B. $< 0,2$ mg/L) zu erreichen. Die Prozesskette umfasst folgende Elemente:

- Chemikalien Dosierung (i.d.R. Eisen oder Aluminium) zur Überführung der löslichen, reaktiven Phosphorfraktion in abscheidbare Flocken
- Optionale Zugabe von Flockungsmitteln (Polymere) zur Verbesserung des Flockungsprozesses (in Abhängigkeit vom Trennprozess)
- Feststoffabscheidung zur Entfernung der phosphorhaltigen Flocken (z. B. Sedimentation, Flotation, Mikrosieb, Filtration).

Durch die eingeschränkte Verfügbarkeit von Fällmitteln, sowie Flockungsmitteln sind derzeit auch zwei Elemente der weitergehenden P-Elimination von den Versorgungsengpässen betroffen. Im Folgenden werden die für Deutschland relevanten Verfahren zur weitergehenden P-Elimination kurz vorgestellt.

Übersicht der Verfahren zur Partikelabscheidung

Die Feststoffseparation kann mit Sedimentation (bspw. ACTILFO® $< 0,3$ mg P/l), Flotation, Mikrosieb oder Filtrationsprozessen realisiert werden. Für die Sedimentation können einfache Absetzbecken (rechteckig oder rund) mit oder ohne Flockungszone, Lamellenseparatoren oder mit Hochgeschwindigkeits-lamellenseparatoren mit einer Dosierung von z.B. Mikro-Sand angewendet werden. Ebenfalls ist der Einsatz einer Flotation als direkte begaste Flotation oder Recycling-Druckbeaufschlagung möglich.

Bei der Filtration als weitgehende Partikelabscheidung können im Allgemeinen folgende Filtertypen unterschieden werden [Erreichbare Betriebsmittelwerte¹⁾ (mg/l P_{ges}) laut Entwurf DWA-A 202, 2023]:

- Oberflächenfilter mit körnigem Material (z.B. Zellenfilter und automatisch rückgewaschene Filter); die Wirkung liegt auf der Oberfläche
- Flächenfilter: Mikrosiebe [$< 0,3$ mg P/l], Tuchfilter [$< 0,2$ mg P/l]
- Raumfiltration (Partikelrückhalt in der Tiefe des Filterbetts): [$< 0,2$ mg P/l]
- Flockungsfiltration: Abwärtsdurchströmte Zweischichtfilter mit diskontinuierlicher Spülung als kontinuierlich arbeitender Filter (Durchlauf- oder Aufstauspülung) (MW bis zu ...0,1 - 0,2 mg/l P_{ges})
- Aufwärtsdurchströmte Einschichtfilter
- Kontinuierlich gespülte Filter (aufwärtsdurchströmt)

- Biologisch intensivierte Filter (Biofilter) z. B. Hauptbehandlungsstufe, Nitrifikation oder Denitrifikation
- Membranfiltration (Mikro- und Ultrafiltration) und Membranbioreaktoren (MBR) [MW < 0,05 mg P/l]

(DWA-A 202, Entwurf 2023)

In Abhängigkeit des nicht reaktiven Phosphoranteils, können die angegebenen Betriebsmittelwerte variieren. Für Mikrosiebe und Tuchfilter ist ein Flockungsreaktor erforderlich. Bei Raumfiltern ist dieser optional und bei Membranen nur bei einer nachgeschalteten Membran erforderlich (DWA-A 202, Entwurf 2023).

Kombinationen

Grundsätzlich können alle Verfahren auch kombiniert werden, z.B. zweistufige Fällung (Vorfällung und Simultanfällung oder Simultanfällung und Nachfällung), zweistufige Filtration (BluePro, Dynasand), Nachfällung und Filtration. In jedem Fall ist auf ausreichende Durchmischung und Flockung zu achten.

Ausblick und Fazit

Hinsichtlich der weitergehenden Anforderungen im Zuge der UWWTD und einer Forderung von 0,2 mg P/l im Ablauf sowie dem Fällmittelnotstand, zeigt sich das die Fällmitteleinsparung weitgehend möglich angewandt wurden/werden sollte. Hier ist es insbesondere wichtig, dass genug Fällmittel für die weitergehende P-Elimination vorhanden ist. Diese wird behördlich bereits jetzt gefordert, was durch die ermittelte Anzahl von minimal 1.066 sensitive Gewässer und rund 2.500 Kläranlagen mit strengeren GW als AbwV bestätigt wird. Derzeit beträgt der Input von kommunalen Kläranlagen kleiner 38 % der gesamten P-Einträge in die aquatische Umwelt. Trotzdem müssen auch die Kläranlagen noch einen Beitrag hinsichtlich Reduzierung des P-Eintrags sowie der Verringerung der Aufsatzung von Gewässern leisten. Die mittlere P-Ablaufgehalt aller Kläranlagen beträgt circa 0,5 mg TP/ l. Für die Unabhängigkeit von Fällmitteln ermittelte das Gutachten vom UBA ein Potenzial für den Umbau auf Bio-P zu ~ 60 Mio. EW. Als weitergehende Reinigungsstufe für die P-Elimination eignet sich die Flächenfiltration (Tuchfilter) mit ihren geringen Investitionskosten und geringen hydraulischen Verlusten. Im Ablauf für Gesamt-P sind für den Tuchfilter < 0,2 mg P/l möglich. Eine weitere Option ist die Flockungsfiltration (diskontinuierlich, kontinuierlich), wobei hierbei höhere Investitionen erforderlich sind. Durch die Flockungsfiltration sind im Betriebsmittel TP-Ablaufwerte << 0,1 mg/l möglich. Weiterhin sollten die Entwicklung und Untersuchung von neuen Verfahren zur P-Elimination ohne Fällmittel, wie zur weitergehenden P-Elimination in der Forschung intensiv vorangetrieben werden, um die Kläranlagen Deutschlands für die Zukunft resilienter aufzustellen.

Literatur

Barjenbruch, M.; Eichholz, Cora; Bannick, Claus-Gerhard; Hartwig, Peter (2023): Wie mit dem Fällmittelnormstand auf Kläranlagen umgehen? Beitrag in der wwt wasserwirtschaft wassertechnik, Mai 2023. Praxismagazin für Trink- und Abwassermanagement. Online verfügbar unter:

<https://www.umweltwirtschaft.com/epaper/umw/312/epaper/5094/index.html>.

Barjenbruch, M. (2007): Verfahren zur Abwasserfiltration – Grundlagen, Auslegung und Betriebserfahrungen. *Chemie Ingenieur Technik*, 79 (11), 1-10.

Daneshgar, S.; Callegari, A.; Capodaglio, A.; Vaccari, D. The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review. *Resources* **2018**, 7(2), 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources7020037>, last checked 27.10.2023

DWA-A 202 (Entwurf 2023): Derzeitig Überarbeitung des DWA-A 202 Entwurf 2023 (noch unveröffentlicht)

Fuchs, S.; Brecht, K.; Gebel, M.; Bürger, S.; Uhlig, M.; Halbfaß, S. Phosphoreinträge in die Gewässer bundesweit modellieren – Neue Ansätze und aktualisierte Ergebnisse von MoRE-DE. *UBA Texte* **2022**, 142/2022, p.109. Umweltbundesamt. Available online:

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/phosphoreintraege-in-die-gewaesser-bundesweit>, last checked 27.10.2023

Gu, A. Z., Neethling, J. B., Stensel H. D. and Murthy S. (2011): Treatability and fate of various phosphorus fractions in different wastewater treatment processes. *Water Science and Technology*, 63 (4), 804-810

Hias, 2023: <https://www.hias.as/home>, last checked 13.11.2023

Lancaster, C. D. und Madden, J. E. (2008): Not so fast! The impact of recalcitrant phosphorus on the ability to meet low phosphorus limits. WEFTEC Proceedings

Listringhaus, J. Untersuchung zur Bedeutung und Elimination des gelösten nicht reaktiven Phosphors (snrP) im kommunalen Abwasser, Masterarbeit am FG Siedlungswasserwirtschaft der TU Berlin, 2016

Sperlich, A. und Gnirss, R. (2013): Flockungs- und Biofiltration – Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse des FE-Projektes Raumfiltration. Bericht der Berliner Wasserbetriebe (unveröffentlicht)

Stellungnahme DWA vom 28.09.2023:

https://de.dwa.de/files/_media/content/01_DIE_DWA/Politikinformationen/Stellungnahmen/Brf.%20an%20MEP%20EU-Kommunalabwasserrichtlinie%20-%20Anforderungen%20an%20die%20Phosphorelimination%20.pdf

Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV). German Surface Water Ordinance. Available online:

https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/BJNR137310016.html, last checked 27.10.2023

WERF, 2008: Water Environment Research Foundation.

https://www.werf.org/c/KnowledgeAreas/NutrientRemoval/HDRContributions/NutrientCompendium/Tertiary_Phosphorus.aspx, last checked 13.11.2023

WRRL, 2014:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20141120&rid=2>, last checked 13.11.2023



2,0 mg P/l

0,2 mg P/l

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
SWW

Weitergehende P-Elimination auch bei Fällmittel-Knappheit?

Matthias Barjenbruch, Cora Eichholz | FG Siedlungswasserwirtschaft
34. Karlsruher Flockungstage | 21. November 2023 |

Was wird unter weitergehenden P-Elimination verstanden?

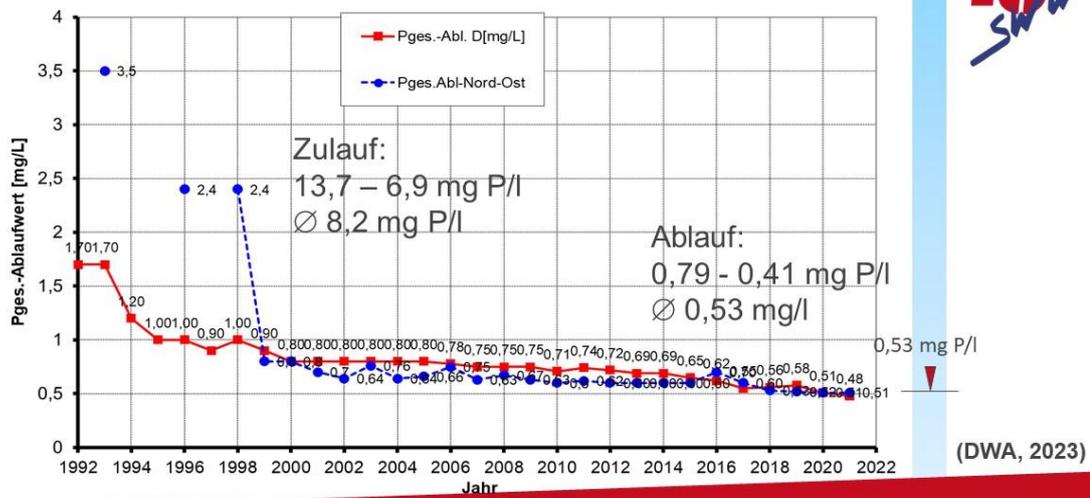
- Emission, bundesweit Abwasserverordnung (seit 1989)
 - Überwachungswerte Kläranlagen nach Abwasserverordnung
 - 10.000 - < 100.000 E: 2,0 mg TP/l
 - > 100.000 E: 1,0 mg TP/l
- Besondere regionale Anforderungen
 - Regionale, gewässer- und nutzungsspezifische Begrenzungen z.B.:
 - Dringlichkeitsprogramm Schleswig-Holstein TP ≤ 0,5 mg/l
 - Bodensee 1,0 mg/l TP für 1.000 - 40.000 E und 0,3 mg/l TP für > 40.000 E (im 24-h-Mittel) (vgl. IGKB, 2001)
- Immission, bundesweit Oberflächengewässerverordnung (2016)
 - Fließgewässer
 - **guter Gewässerzustand** von Fließgewässern < 0,10 mg/l TP
 - **Sehr guter Gewässerzustand** von Fließgewässern < 0,05 mg/l TP
 - Seen
 - **eutrophe Seen:** TP-Zielwert ~ 35 - 90 µg/l, je nach Referenzzustand
 - **mesotrophe Seen:** TP-Zielwert ~ 20 - 45 µg/l, je nach Referenzzustand

< 1,0 mg TP/l entspricht weitergehende P-Elimination

Vorschlag EU Kommunalabwasserrichtlinie:
< 0,5 mg P/l [0,2 mg P/l]
Null-P-Emission



Stand der P-Elimination in Deutschland P_{ges}-Mittelwerte im Kläranlagenablauf 1992 bis 2022

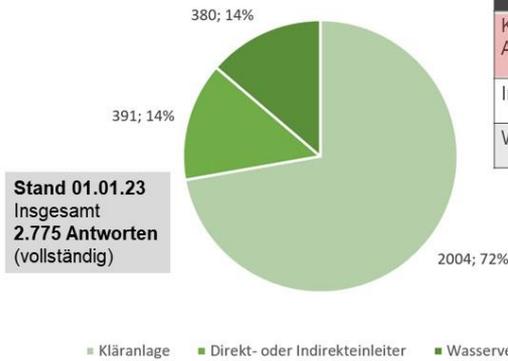


Modellierte Eintragspfad-spezifische Gesamtphosphoreinträge für Deutschland (UBA, 2022)

Eintragspfad	Neuer Eintrag in t/a	Anteil am Gesamteintrag in %	Bisheriger Eintrag in t/a	absolute Differenz in t/a	relative Differenz in %
Kommunale Kläranlagen	5.810	38	5.810	0	0
Industrielle Direkteinleiter	250	2	250	0	0
Kanalisationssysteme	3.830	25	4.120	-290	-7
atmosphärische Deposition	200	1	200	0	0
Oberflächenabfluss	1.420	9	1.460	-40	-3
Erosion	1.640	11	2.900	-1.260	-43
Grundwasser	1.250	8	5.100	-3.850	-75
Dränagen	1.010	7	1.080	-70	-6
Gesamt	15.400	100	20.910	-5.510	-26

Fällmittel-Knappheit

Umfragebereiche des Gutachtens*



Bereich	Anzahl
Kommunale Abwasserentsorgung	2.004
Industrieinleiter	391
Wasserversorgung	380

Bereich Abwasser	
KA inkl. Indirekteinleiter	136.460.601 EW
KA D inkl. Indirekt.	~152.000.000 EW
Industrie erfasst mit	
Direkteinleiter	11.966.114 EW
Indirekteinleiter	1.412.558 EW

* Teilweise zusammengefasste Anlagen, z.B. Berlin oder Verbände

Fällmittel-Knappheit

Fällmittelmengen kommunale und industrielle Kläranlagen

Kalkulationen unter Annahme gleichbleibender Angebotslage, ohne neue Bezugsquellen (Stand 01.01.2023)

Kläranlage + Industrie (Ohne Ausreißer):



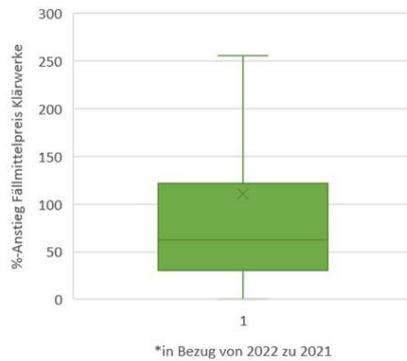
Fällmittel	Benötigte Jahresmenge [in t]
Aluminiumchlorid (AlCl ₃)	16.170
Aluminium-Eisen(III)-chlorid (AlCl ₃ + FeCl ₃)	111.242
Aluminiumsulfat (Al ₂ (SO ₄) ₃)	17.553
Aluminium-Eisen(III)-sulfat ((Al ₂ (SO ₄) ₃ + Fe ₂ (SO ₄) ₃) * n H ₂ O)	4.659
Eisen(II)-chlorid (FeCl ₂)	61.172
Eisen(III)-chlorid (FeCl ₃)	667.109
Eisen(III)-chloridsulfat (FeCl ₃ SO ₄)	74.978
Eisen(II)-sulfat (FeSO ₄ *7 H ₂ O)	50.125
Eisen(III)-sulfat (Fe ₂ (SO ₄) ₃)	9.418
Calciumhydroxid, Weißkalkhydrat (gelöschter Kalk), stabilisierte Kalkmilch	24.355
Natriumaluminat (NaAl(OH) ₄)	41.602
Polyaluminium-(hydroxid)-chlorid (PAC) ([Al(OH) ₃ -xCl _x] _n)	23.672
Polyaluminium-(hydroxid)-chloridsulfat (Al _x (OH) _y Cl _z (SO ₄) _k)	910
Sonstiges	767
Gesamt:	1.103.734

Worst-Case-Szenario Abwassersektor: Bis zum ... eine Fehlmenge von ...	in t	01/03/2023	01/06/2023	Ende 2023
Gesamt-Fehlmenge aller Fällmittel		-91.412	-186.226	-426.994

Ermittlung über:

- Monatsdurchschnittsverbrauch in t
- Lagerbestand in t
- Lieferzusage ja/nein + Zeitraum

Fällmittel-Knappheit Kläranlage: Preissteigerung Fällmittel in netto [€/t und %] 2022 zu 2021



Bezug auf 2021		
	Preissteigerung in %	Preis (2022) in €/t
Statistisches Mittel	1100	4000
Max	1100	4000
Min	0	22
Median	63	310
Mittelwert	111	396
Standardabweichung	135	356

(n = 978)

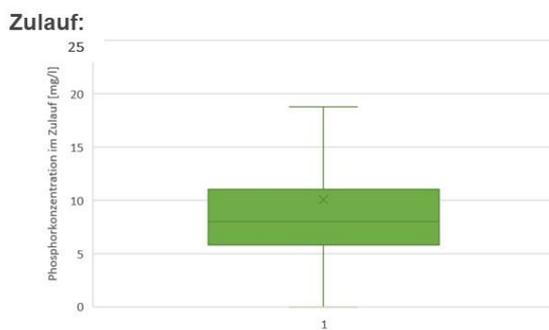
- Teilweise inkl. Transportmehrkostenpauschale und Energiezuschlag
- Auf Netto-Preise und €/t skaliert
- Überwiegend Bezug auf Eisen(III)-chlorid
- Betrachtung nur Kläranlagen – keine Mischabgaben aus Kläranlage und Wasserwerk oder Kläranlage und Industrie

Phosphorkonzentrationen Zulauf und Ablauf Kläranlagen, Umfrage UBA



- Strich zeigt Median an, x ist Mittelwert
- Kasten 50 % um den Median drum herum (Oberes und unteres Quartil)

n= 2004	Pin	Pout
Median	8	0,5
Mittelwert	10,0	0,8
Min	0,87	0,02
Max	800	17



Anzahl der sensiblen Gewässer in Deutschland, Umfrage UBA



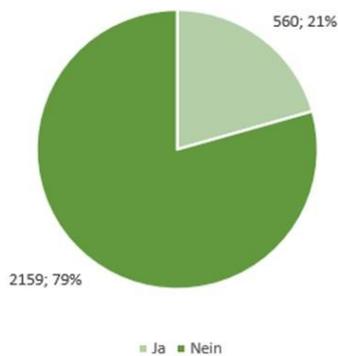
GK	Angepasster Grenzwert der Anlagen-Genehmigung [mg/l]	BY	NI	NW	RP	SL	SN	ST	SH	TH	Anlagen je GK und Intervall
5	< 2 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
	< 1 - 0,5	-	8	17	8	-	-	-	6	1	40
	< 0,5	-	-	117	-	-	-	-	-	-	117
4	>= 2	-	-	-	-	-	-	-	-	11	11
	< 2 - 1	-	114	194	143	2	9	16	15	6	499
	< 1 - 0,5	-	4	9	-	-	1	1	34	1	50
	< 0,5	-	1	4	-	-	-	-	1	-	6
326 KA < GK 3	>= 2	851	110	145	192	8	17	-	-	57	1380
	< 2 - 1	11	16	82	183	4	2	-	-	60	358
	< 1 - 0,5	1	1	8	-	-	-	-	-	4	14
	< 0,5	-	-	4	-	-	-	-	-	-	4
Anlagen je Bundesland		863	254	580	526	14	29	17	53	111	2.489

Identifikation
Σ 1.066 sensible Gewässer
(Bezug auf teilgenommene Bundesländer)

Verfahrenstechnische Anpassungen möglich?, Umfrage UBA



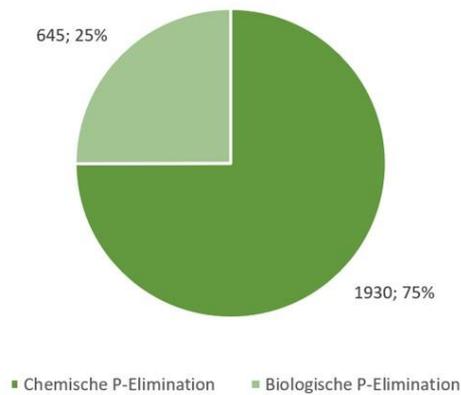
In **fett** häufige Maßnahmen



Umgesetzte Maßnahmen:

- Optimierung Fällmitteldosierung durch Frachtsteuerung
- Alternative Fällmittel
- **Bio-P**
- Volumen Bio-P durch Anpassung Belüfterzeiten vergrößert
- Streckbetrieb
- Annäherung an den Grenzwert
- Reinwasserzumischung
- KI zur Steuerung Biologie und P-Fällung
- angepasste SPS-Steuerung
- eisenhaltige Wasserwerksschlämme
- Kalkdosierung
- **Reduzierung möglicher Überdosierung**

Art der Phosphorelimination (kommunale Kläranlagen)*



Legende:

- PC (chemische P-Elimination)
- PB (biologische P-Elimination)
- PBC (biologische P-Elimination mit Stützfallung)

Art der P-Elimination in EW (Umfrage) *

PC	62.443.645 EW
PB	4.050.450 EW
PBC	57.690.832 EW

*zusammengefasste Angaben beachten

Biologische Phosphorelimination



Vorteile

- ❖ keine Zusatzstoffe erforderlich
- ❖ Verringerung der Aufsalzung der Kläranlagenabläufe
- ❖ geringerer Schlammfall, keine zusätzlichen Schwermetalle im Schlamm
- ❖ keine Beeinträchtigung der Nitrifikation

Günstige Voraussetzungen für die Bio-P

- ❖ möglichst geringer $\text{NO}_3\text{-N}$ -Zufluß und kein O_2 -Eintrag ins Anaerobbecken
- ❖ günstiges BSB/P-Verhältnis (30 : 1), hoher Gehalt an organischen Säuren (> 100 mg/l)
- ❖ ausreichende O_2 -Zufuhr im Belebungsbecken zur optimalen Phosphataufnahme

Unterstützende Maßnahmen zur biologischen P-Elimination

- ❖ Ansäuerung von Primärschlamm (z. B. Rückführung von Trübwässern aus Voreindickern)
- ❖ Bypassführung von Rohabwasser in die biologische Vorstufe
- ❖ Verhinderung einer Nitratzufuhr in die Anaerobstufe durch getrennte Kaskadenbecken

Nachteile (Vorwiegend mangels Fällmitteldosierung)

- ❖ Relativ „unstable“ Ablaufwerte
- ❖ Bildung von Blähschlamm, Entschwefelung von Faulgas

Empfehlung für den nächsten Schritt!



Erhöhte Resilienz der P-Elimination durch Bio-P in kommunalen Kläranlagen:

- 1 **Bestandsaufnahme**
 - ❖ Basis Umfrageergebnisse, Details aus Leistungsvergleich DWA
 - ❖ Identifikation von Standardverfahren + deren Automatisierungsgrad
- 2 **Verfahrenstechnische Anpassungen**
 - ❖ Wie können die Standardverfahren einfach umgerüstet werden?
 - ❖ Berücksichtigung aktuelle Auslastung und Stand der Automatisierung
- 3 **Weitere Auswirkungen der Einführung einer biologischen P-Elimination**
 - ❖ Welchen Effekt hat die Einführung und die Umstellung?
 - ❖ Was muss beachtet werden (z.B. Schlammbehandlung)?
- 4 **Entwicklung einer Handlungsempfehlung zur zeitnahen Umsetzung zur Bio-P**
 - ❖ Tool in Form einer Website, App für den End-User
 - ❖ Beratung über Chat...

Resultierend in weitergehende P-Elimination mit geringeren Gesamt-Fällmittelbedarf!

Einsatz alternativer Verfahren zur P-Elimination - Fällmittelreduktion



Schlammwasserteilstrombehandlung

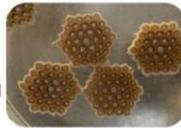
SDT ~Stand der Technik
SDW ~Stand der Wissenschaft

- ❖ **MAP-Fällung (SDT)**
- ❖ **Ionenaustauscher** (mit SO_4^{2-}) in Kombination mit einer Elektrolyse auch zur P-Rückgewinnung möglich (SDW)

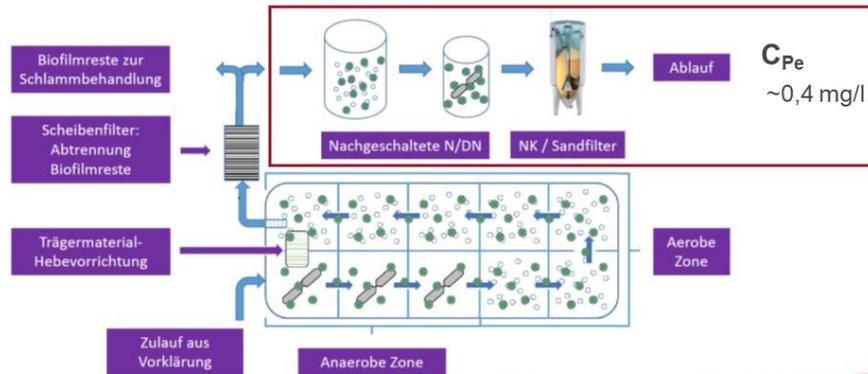
Hauptstrom

- ❖ Elektrokoagulation und Elektroflotation (SDW bis zu 90%)
- ❖ Elektro-Phosphatfällung z.T. Großtechnik, Abwasser muss bestimmte Eigenschaften aufweisen (z. B. elektrische Leitfähigkeit) (SDW)
- ❖ Adsorption (z.B. Ferrosorb, "modifizierte Wasserwerksschlamm" (SDT), Flugasche, Ca-, Fe- und Al-haltige Kiesarten, Tonerde, Apatit)
- ❖ Ionenaustausch (Fäulnis der Membran und hohe Kosten) (SDW)
- ❖ Kristallisation (CaPO an z.B. Sand) (SDW)
- ❖ Phosphatfänger - Proteine, die spezifisch Phosphat binden (Crowdfunding)
- ❖ Algen (SDW)

**Einsatz alternativer Verfahren:
Neuartiges Schwebebettverfahren**



Das Hias® - Verfahren: Verfahrensaufbau



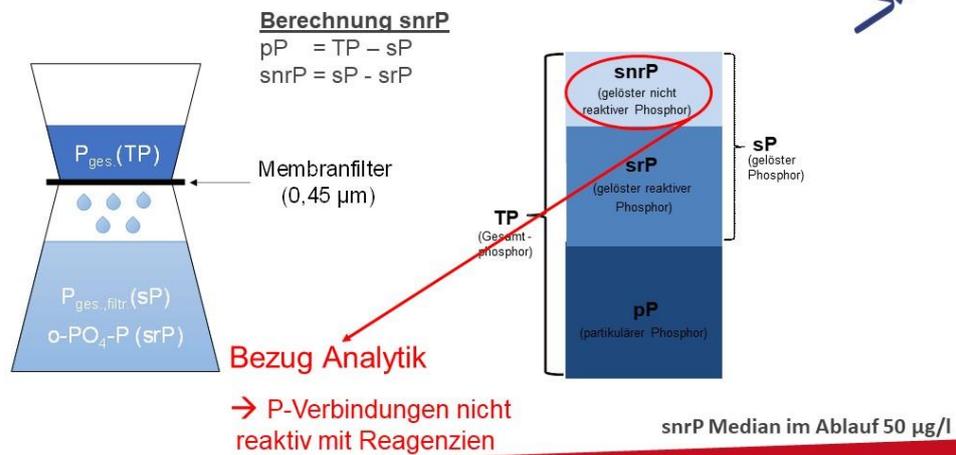
**Möglichkeiten zur weitergehenden
P-Elimination**

Anforderungen an die P-Ablaufwerte im LV Nord-Ost



- ❖ Brandenburg/Berlin: Nährstoffreduzierungskonzepte
 - ➔ Ausbau/Optimierung der Betriebsweise von kommunalen Kläranlagen
 - Großkläranlagen Emission 100 t P/a
 - ➔ Flockungsfiltration **Zielwert ges.P: 0,3 mg/l, Jahresmittel 0,1 mg/l**
 - GK 1-4: Optimierungsmaßnahmen
 - Neubau und Sanierung von Kleinkläranlagen
- ❖ Mecklenburg-Vorpommern freiwillig Jährliche P-Gesamtfracht aller KA: ca. 100 t P/a, davon ca. 60% aus **KA der GK 1-3**
 - ➔ Priorisierung in Abhängigkeit der Gewässerqualität
- ❖ Sachsen-Anhalt
 - ➔ Kläranlagen GK 3 = 2 mg ges.P/l
 - ➔ Kläranlagen GK 4 = 1 mg ges.P/l
 - ➔ Kläranlagen GK 5 = 0,7 mg ges.P/l

Nichtreaktiver Phosphor snrP limitiert weitergehende Abwasserreinigung Phosphorfractionen im Abwasser



Maßnahmen zur Verbesserung der P-Elimination auf Kläranlagen

Effekt auf
Fällmittel-Bedarf



- Bestandsaufnahme/Betriebsoptimierung (kurzfristige Maßnahmen)
 - Änderung der Betriebsweise
 - Erhöhung der Dosierung, **Art des Fällmittels/Bio-P-Anteil erhöhen**
 - Verkürzung des Schlammalters – Erhöhung Schlammproduktion
 - Verringerung Rücklösung/externe Lagerung von Schlamm
 - **Optimierung der Maschinenteknik, MSR-Technik, Dosiertechnik**
- Veränderung der Bestandstechnologie mittelfristige Maßnahmen
 - Austausch oder Ergänzung von Technologien (z.B. **Maschinenteknik: MSR-Technik, Dosiertechnik**)
 - Zweipunktfällung
 - Interkommunale Zusammenschlüsse (bei kleinen Anlagen)
- Ausrüstung von kleineren Kläranlagen z.B.:
 - **Prüfen wie weit Bio-P durch Regelung der Belüftung möglich ist**
 - **Dosierstation und Dosierregime (vorprogrammiert)**
 - Ggf. gemeinsamer Einkauf Fällmitteln mit Nachbarn
- **Erweiterung** von Kläranlagen

Was ist neu am DWA A 202!

- Anpassung der Grundlagen
- Aktualisierung der Fällmittelliste
- Hinweise zur Auswahl der Fällmittel und Dosierung (Streichung –Kp-Wert)
- Phosphorfraktionen: gelöster nicht reaktiver Phosphor
- Hinweise zur Aufsalzung bei Einsatz von Fällmitteln
- Integration der Biologischen P-Elimination
 - Grundlagen und Verfahren
 - Bemessung auf Basis A 131
- Aufnahme der Verfahren zur weitergehenden P-Elimination
- Hinweise zu Verfahren der Feststoffabscheidung
- Einflüsse auf die P-Rückgewinnung
- Hinweise zur Resilienz bei Fällmittelknappheit
- Auflistung alternativer Verfahren
- Kosten
- Anpassung der Beispiele



Verfahren zur weitergehenden P-Elimination



- Prüfung von Möglichkeiten zur Ertüchtigung der Nachklärung
 - ÜW qual. SP bis zu 0,5 mg/l, Betriebsmittelwert bis zu 0,4 mg/l P_{ges}
 - Ggf. Flockungsmitteldosierung
 - Verbesserte Einläufe (ggf. dynamisch variabel)
 - Lamellenabscheider
- Zusätzliche Stufe immer in Kombination mit Fällmitteldosierung:
 - Flächenfilter: Tuchfiltration / Mikrosiebung
 - Flockungsfiltration (MW bis zu ...0,1 - 0,2 mg/l P_{ges})
 - Abwärtsdurchströmte Raumfilter mit diskontinuierlicher Spülung
 - Kontinuierlich arbeitende Filter
 - Membranfiltration, bei weiteren Zielen (MW << 0,1 mg/l P_{ges})
 - Membranbioreaktor

Vergleich der Verfahren nach DWA-A 202

Übersicht der Verfahren der Feststoffabscheidung

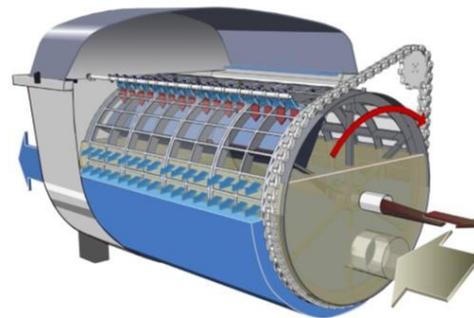


	Mikrosieb	Tuchfilter	Raumfiltration	Membran
Erreichbare Betriebsmittelwerte ¹⁾ [mg/l P _{ges}]	< 0,3	< 0,2	< 0,2	< 0,05 ¹⁾
Erreichbare Überwachungswerte [mg/l P _{ges}]			≤ 0,5	
Flockungsreaktor erforderlich	Ja	Ja	Optional	Nur bei nachgeschalteter Membran
Einsatz FHM	Ja	Nein	Optional	Optional
ANMERKUNGEN				
1) In Abhängigkeit des nicht reaktiven Phosphoranteils, können diese Werte variieren.				

(Entwurf DWA-A 202, 2023)

Moderne Mikrosiebung (Hydrotech)

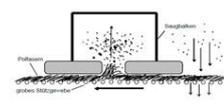
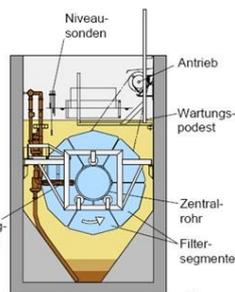
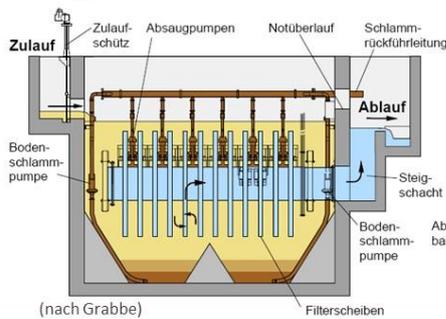
- engmaschiges, monofiles Gewebe (Weite $(6)10 - 100 \mu\text{m}$)
- System ist nur zu ca. 2/3 eingetaucht
- Filtergeschwindigkeit $v_{F,TW} \approx 10,0 \text{ m/h} - 20,0 \text{ m/h}$
- kleinere Partikel als Öffnungsweite rückhaltbar (5% offene Fläche)
- Reinigung durch Hochdruckabspritzung
- geringe Energiekosten durch Freigefällebetrieb
- AFS-Entnahme, P-Elimination



Nordic Water

Tuchfiltration Scheibenfilter

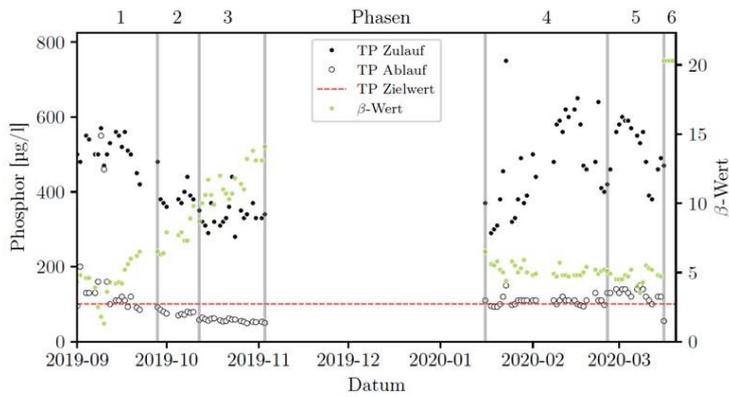
- Früher feinfaserige Nadelfiltztücher (Weite $10 - 50 \mu\text{m}$)
Heute **Polstoffe**
- Filtergeschwindigkeit $v_{F,TW,RW} \approx 10,0 \text{ m/h}$
- Feststoffflächenbelastung $< 400 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; AFS_{zu} max. 40 mg/l
- geeignet für AFS- und P-Entnahme



Grundfläche für Trommelfilter:

$$3,8 \text{ m}^2 A_F / \text{m}^2 A_{\text{Grf}}$$

P-Elimination mit Tuchfiltern Bespannt mit verschiedenen Polstoffen

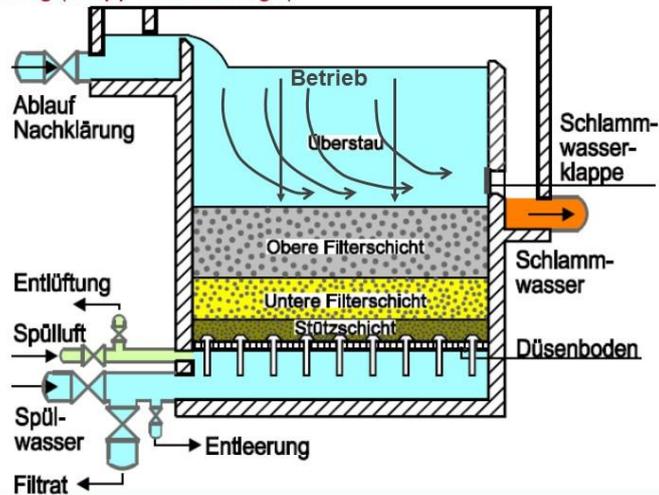


(Scheuer, 2020)

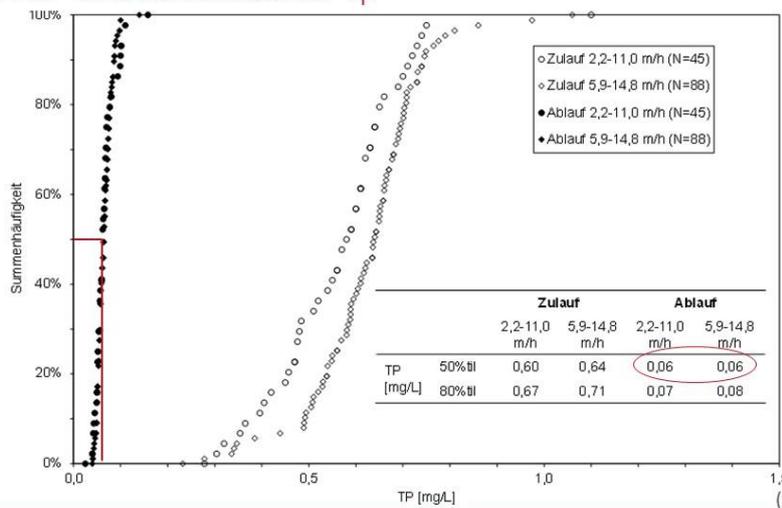
- Ablaufwerte < 0,1 mg/l TP mit Fällung und Polstoffen

- β -Wert: > 5 – 15 mol Me^{3+2+} /mol PO_4 -Pred
- β -Wert von 4 - 5 ausreichend

Abwärtsdurchströmter Raumfilter diskontinuierliche Spülung (Klappenfilteranlage)

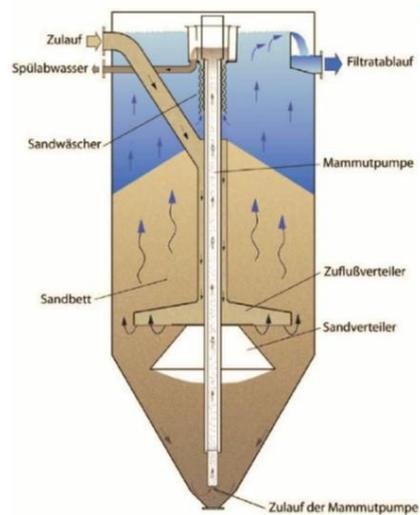
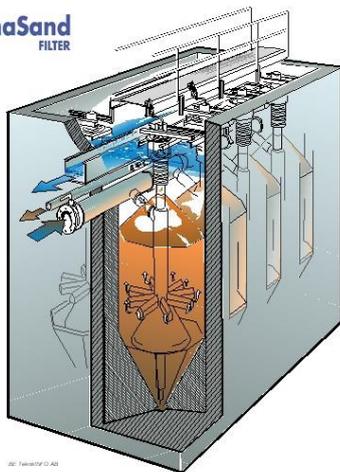


Summenhäufigkeit der TP-Konzentration im Zu- und Ablauf eines Flockungsfilters
 Dosierung von Fe^{3+} und verschiedenen v_f



(nach Geyer, Barjenbruch)

Kontinuierlich arbeitender Filter
 Aufwärtsdurchström



Projektziele des BMBF-Projekts Zero-P

Verschärfung der Anforderungen im Zuge der WRRL, diskutierte Anforderungen in Berlin und Brandenburg

➔ FuE-Bedarf „Null-Emission“

➔ BMBF-Projekt **Zero-P**

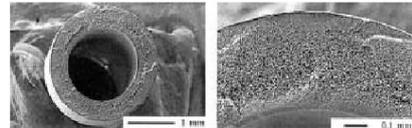
Weitestgehende Phosphorelimination auf Kläranlagen über eine nachgeschaltete Filtration für den Schutz von Gewässern und die Rückgewinnung von Phosphor

- Untersuchung der Verfahrenstechnik Nachfällung und Sandfiltration - Machbarkeit, Leistungsgrenzen und Effizienz
- Erprobung intelligenter Steuerung/Regelung, online-Messtechnik
- Herausforderung bereits 0,1 snrP (nicht reaktiv)
- Potential Phosphorrückgewinnung



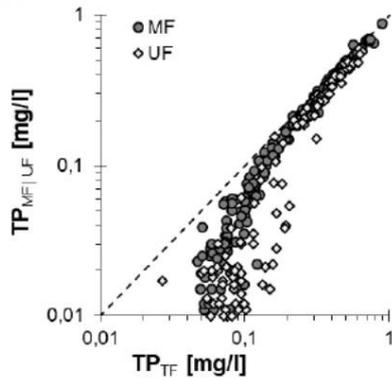
Nachgeschaltete Membranfiltration

- Modulvarianten
 - Rohr-, Kapillar-, Hohlfaser- und Flächenmodul
 - Membranmaterial (organisch - anorganisch)
 - Porenweiten von 0,01 bis 0,2 μm
 - vorgeschalteter Kornfilter erforderlich (Rückhalt von Partikel > 500 μm)
- Rückspülung mit Gas ca. alle 30 min.
- Flux-Rate 41,6 $\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bei 1,3 bar Eintrittsdruck
- Energieverbrauch: 0,2 kWh/m^3
- Ergebnisse
 - TP-Konzentration von 1 - 0,2 mg/L auf < 0,05 mg/L im Ablauf; Monatsmittel **0,025 - 0,045** mg/L
 - β -Wert = 2 – 5; kein Einsatz von Flockungshilfsmitteln



(Gnirss, 2007)

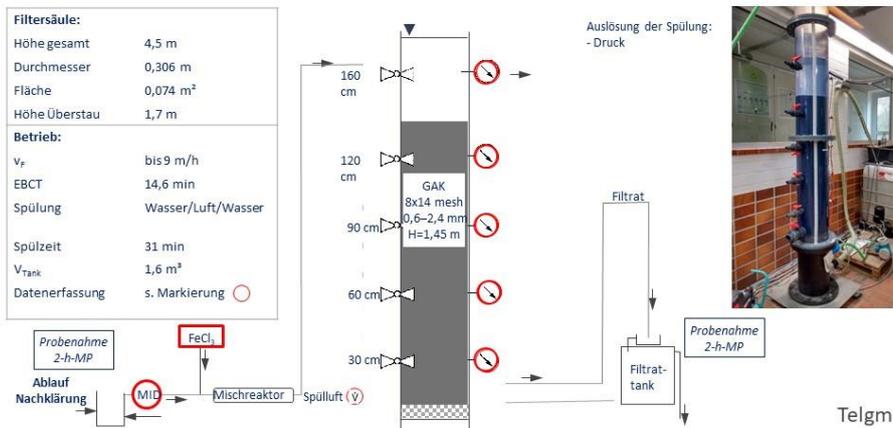
Vergleich Tuchfilter Membranfiltration



(Fundneider, 2019)

- erst ab TP-Gehalten $\ll 0,1$ mg/l besserer Rückhalt der Membranverfahren
- Membranverfahren haben mit ca. $0,1$ kWh/m³ einen etwa 10-fach höheren Energiebedarf als der Tuchfilter

Kombination Spurenstoff- u. P-Elimination Versuchsanlage GAK-Filter

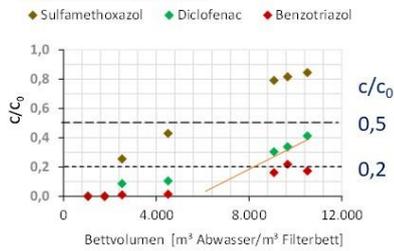


Telgmann 2020

Ergebnisse Kombination Spurenstoff- und P-Elimination im GAK-Filter



Durchbruchskurven



Einordnung der Ergebnisse: erreichte BV

	Durchbruchskriterium		Quelle
	$c/c_0 = 0,2$	$c/c_0 = 0,5$	
Sulfa-methoxazol	1.900	5.600	Telgmann
	600 - 7.900	4.000 - 5.500	Literatur
Diclofenac	6.000	>10.500	Telgmann
	700 - 20.000	3.000 - 23.000	Literatur
Benzotriazol	9.500	>10.500	Telgmann
	5.200 - 20.000	>10.000 - >14.000	Literatur

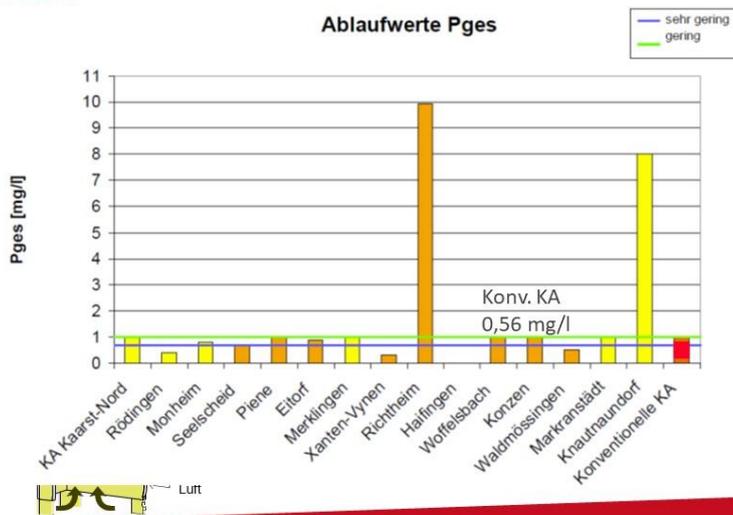
- Spurenstoffergebnisse liegen im Vergleich zu anderen Studien im mittleren Bereich
 - bei P_{Ges} -Zulauf rd. 0,3 mg/L → sehr niedrige P_{Ges} -Ablauf (0,08 mg/l); v_F maximal 9 m/h.
 - bei P_{Ges} -Zulauf rd. 0,6 mg/L → stiegen P_{Ges} -Ablauf auf 0,15 mg/l
- häufiges Spülen erforderlich, Feststoffanlagerung im oberen Bereich

Telgmann 2020

TP-Ablaufgehalte der MBR Deutschland



Ablaufwerte Pges



In der Praxis < 0,3 mg TP/l erreichbar

(PINNEKAMP ET AL., 2008)

Zusammenfassung und Ausblick

- Weitergehende Anforderungen
 - UWWTD 2024: 0,2 mg P/l
 - min. 1.066 sensitive Gewässer
 - ~ 2.500 KA mit strengeren GW als AbwV
- Kommunale Kläranlagen
 - \leftarrow < 38 % der gesamten P-Einträge in die aquatische Umwelt
 - Die mittlere P-Ablaufgehalt aller Kläranlagen beträgt 0,56 mg TP/ l
 - Ablaufmengen der Kläranlagen > 10.000 E entspricht 2/3 der eingeleiteten Fracht
 - Potenzial Umbau Bio-P: ~ 60 Mio. EW
- Flächenfiltration (Tuchfilter)
 - Geringere Investitionen, geringe hydraulische Verluste
 - TP-Ablaufwerte Tuchfilter < 0,2 mg/l möglich
- Flockungsfiltration (diskontinuierlich, kontinuierlich)
 - Höhere Investitionen
 - TP-Ablaufwerte \ll 0,1 mg/l möglich (Betriebsmittel)
- Nachgeschaltete Membranfiltration (Keimrückhalt, energieintensiv)
- Entwicklung und Untersuchung von neuen Verfahren



Anschrift der Verfasser:

Matthias Barjenbruch,

Cora Eichholz

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft,
Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin
Sekt. TIB 1B 16
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin
Tel.: +49 / (0) 30 / 314 72247

E-Mail: matthias.barjenbruch@tu-berlin.de

Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen bei der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen

Marie Launay

KomS Baden-Württemberg, Stuttgart



Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen bei der Spurenstoffelimination auf Kläranlagen

Dr.-Ing. Marie Launay
21.11.2023
34. Karlsruher Flockungstage, Karlsruhe

KomS Baden-Württemberg – dreifach gut



Spurenstoffelimination auf Kläranlagen – Aktueller Stand in Deutschland



NRW:

20 Anlagen in Betrieb (10 x O₃,
4 x PAK, 4 x GAK, 2 x O₃/GAK)
11 weitere in Bau und Planung

Weitere Bundesländer:

teilweise einzelne Vorhaben in Planung oder Bau

Hessen:

1 Anlage in Betrieb (O₃+PAK+Tuchfiltration)
„Spurenstoffstrategie für das Hessische Ried“ –
geplanter Ausbau von 7 Kläranlagen

Berlin:

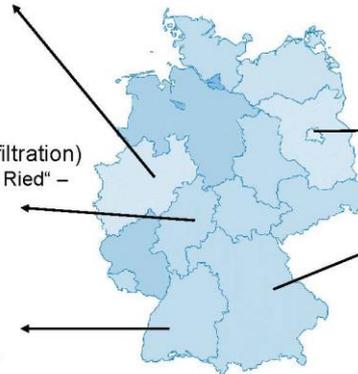
Ozonanlage im Bau (Schönerlinde)
geplante IBN Ende 2024

Bayern:

Pilotvorhaben in Weißenburg
O₃+Sand/GAK
Sonderförderprogramm
für 13 Kläranlagen

Baden-Württemberg:

29 Anlagen in Betrieb (17 x PAK,
8 GAK, 3 x O₃, 1 x O₃/GAK)
28 weitere in Bau und Planung



Schweiz:

20 Anlagen in Betrieb
46 Anlagen in Planung oder Bau

21.11.2023

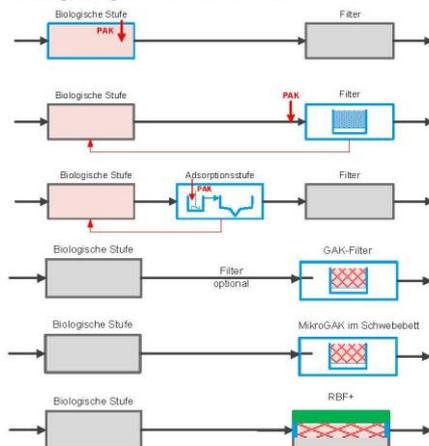
Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

2

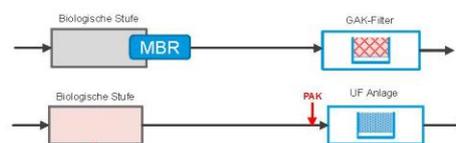
Technologien zur Spurenstoffelimination – Großtechnische Umsetzung



Bislang eingesetzte Verfahren



Neue Verfahren – in Planung bzw. Bau



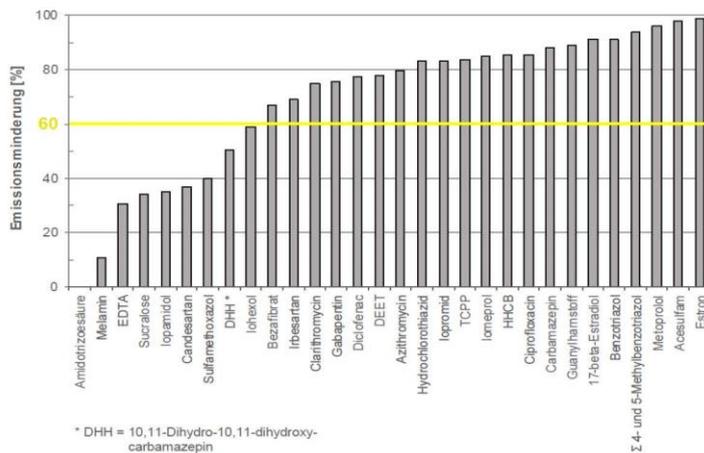
21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

3

Kläranausbau in Baden-Württemberg – Reduktion der Frachtemissionen

Reduktion der Spurenstoffemissionen (30 Substanzen)



6 Kläranlagen mit PAK-Verfahren

Emissionsminderung > 80 % für die Hälfte der Substanzen

Emissionsminderung > 60 % für rund 70 % der Substanzen

* DHH = 10,11-Dihydro-10,11-dihydroxy-carbamazepin

Quelle: Rößler und Launay, 2019

irfsruhe

4

Technologien zur Spurenstoffelimination – Großtechnische Umsetzung

Zahlreiche Erfahrungen in Deutschland und in der Schweiz:

- Forschungsprojekte
- Machbarkeitsstudien
- Planung bzw. Dimensionierung
- Bau
- Betrieb bzw. Betriebsoptimierung
- Spurenstoffmonitoring
- Genehmigungsverfahren
- Förderungsmöglichkeiten

→ Zusammenarbeit zwischen allen Akteuren und Austausch essenziell für die erfolgreiche Umsetzung der 4. Reinigungsstufe

Überarbeitung der EU Kommunalabwasserrichtlinie KOM S KOMPETENZENTRUM SÜDPFANDTUM BW

WARUM überarbeitet die EU die Vorschriften für die Behandlung von kommunalem Abwasser?



Es war Zeit!

Die derzeit geltende Richtlinie ist mehr als 30 Jahre alt (1991)

21.11.2023



Dynamische Entwicklung von Fachthemen

z.B.
EU Green Deal (Zero Pollution)
Corona-Monitoring im Abwasser
Nationale Wasserstrategie in Deutschland

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe



Handlungsbedarf auf verschiedenen Ebenen:

u.a.
Emissionen von Spurenstoffen
Energieeffizienz bzw. -neutralität
Abwasser Monitoring
Klimawandel...

6

Neuer Entwurf der EU Kommunalabwasserrichtlinie KOM S KOMPETENZENTRUM SÜDPFANDTUM BW

Entwurf vom 26.10.2022

	2025	2030	2035	2040
Mikroschadstoffe	Einführung von Systemen der erweiterten Herstellerverantwortung	Risikogebiete ermittelt (10 000 - 100 000 EW) + Zwischenziel für Anlagen mit > 100 000 EW	Alle Anlagen mit > 100 000 EW ausgestattet + Zwischenziele für Risikogebiete vorhanden	Alle Anlagen in Risikogebieten mit weitergehenden Behandlungsmöglichkeiten ausgestattet

+ erweiterte Herstellerverantwortung

- Ziel: mind. 80 % Entfernung von **mind. 6** Substanzen
- 12 Indikatorsubstanzen, 2 Kategorien, dabei muss die Anzahl der in die Kategorie 1 eingestuft Stoffe doppelt so hoch sein wie die Anzahl der Stoffe der Kategorie 2
- Soll für jede Probenahme eingehalten werden (Trockenwetter)
- Probenahme:
 - KA ≥ 50.000 EW → 2 Mal pro Woche
 - KA < 50.000 EW → 1 Mal pro Monat

Indikatorsubstanzen

Kategorie 1:

Amisulprid
Carbamazepin
Citalopram
Clarithromycin
Diclofenac
Hydrochlorothiazid
Metoprolol
Venlafaxine

Kategorie 2:

Benzotriazol
Candesartan
Irbesartan
4- and 5-methylbenzotriazol

21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

7

Neuer Entwurf der EU Kommunalabwasserrichtlinie



Weitere Entwicklungen:

- 20.09.2023: Breite Zustimmung zum Entwurf der Kommunalabwasserrichtlinie durch den EU-Umweltausschuss
- 05.10.2023: Zustimmung zum Entwurf durch das EU Parlament:
 - Änderungen:
 - Angepasste Größenklassen: 150.000 EW und 35.000 EW
 - Umsetzung der 4. Reinigungsstufe bis 15 Jahre nach Inkrafttreten der Richtlinie
 - Risiken durch PFAS und Mikroplastik müssen berücksichtigt werden
 - Erweiterte Herstellerverantwortung (Hersteller von Arzneimitteln und Kosmetika)
- 16.10.2023: Einigung durch den EU Rat erzielt
 - Neue Änderungen:
 - Bis 2045: alle KAs \geq 200.000 EW mit 4. Reinigungsstufe
 - Erweiterte Herstellerverantwortung (Hersteller von Arzneimitteln und Kosmetika)

21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

8

Über den Tellerrand schauen



Spurenstoffelimination

Synergien mit anderen Reinigungszielen

Digitalisierung

Desinfektion

Innovation

Energieeffizienz bzw. -neutralität

Mischwasserbehandlung

Minderung des CO₂-Fußabdrucks

Integrales Wassermanagement

Wasserwiederverwendung

Nachhaltigkeit

21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

9

Kläranlage Öhringen – Separate Adsorptionsstufe (PAK)



- KA Öhringen: 49.500 EW
- Separate Adsorptionsstufe seit März 2017, Teilstromanlage
- Jahr 2022: 81 % der Jahresabwassermenge wurde adsorptiv behandelt
- Verringerung der PAK-Dosis:
Soll-Wert: 8 → 7 mg/L / 7 → 6 mg/L / 6 → 5 mg/L



Quelle: Große Kreisstadt Öhringen

Spurenstoffergebnisse Elimination gesamte Kläranlage



Nr.	1	2	3	4	5	6	7	1-23	2-23	3-23		
Datum Probenahme	15./16.11 .2021	14./15.01 .2022	28./29.05 .2022	05./06.07 .2022	07./08.09 .2022	26./27.10 .2022	09./10.11 .2022	29./30.11 .2022	16./17.03 .2023	17./18.07 .2023	6./7.09.2023	26./27.09 .2023
beprobter Wochentag	Mo/Di	Fr/Sa	Sa/So	Di/Mi	Mi/Do	Mi/Do	Mi/Do	Di/Mi	Do/Fr	Do/Fr	Mi/Do	Di/Mi
Bemerkung	TW	TVV	TW	TW	TW	TW	RW	TW	TW	TW	TW	TW
PAK-Dosiermenge [mg/L]	8,4	8,1	7,5	6,6	7,6	7,5	7,0 (3,9*)	6,2	5,2	5,5	5,5	5,6
mittlere Eliminationsleistung je MK [%]	90	92	91	90	90	93	54	88	80	78	90	85
	90	92	91	90	90	93	54	88	80	78	90	85
	90	92	91	90	90	93	54	88	80	78	90	85
	90	92	91	90	90	93	54	88	80	78	90	85
	90	92	91	90	90	93	54	88	80	78	90	85
gleitendes Mittel [%]			89	89	90	91	-	91	89	87	86	86

Sollwert Dosierung: 7 mg/L Sollwert Dosierung: 6 mg/L Sollwert Dosierung: 5 mg/L

Technologiekombination: PAK-Dosierung vor einer Ultrafiltration



- Nach Betriebsoptimierung:
- Reduktion der Gesamtkeimzahl um 3 log-Stufen
- Alle untersuchten Bakterien konnten zu einem hohen Anteil entfernt werden
- ESBL-resistente E. coli bei nahezu jeder Probenahme um 100 % reduziert
- Viren wurden bis auf eine Ausnahme bei allen Probenahmen zu 100 % zurückgehalten
- PAK-Dosierung von 15 mg/L → mittlere Entnahme 7 BW Substanzen durch PAK-UF Anlage: 80 % (Gesamtelimination der KA Mühlheim > 90 %)
- FM-Dosierung: 1,5 mg Al/L, Dosierung von 16 Minuten zu Beginn jedes Filtrationszyklusses, mittlere Konzentration P_{ges} im Ablauf der PAK-UF Anlage lag bei 0,16 mg/L
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Beispiel Kläranlage von 10.000 EW → Kosten für das PAK-UF Verfahren liegen in dergleichen Größenordnung wie das Ozonverfahren bzw. das GAK-UV Verfahren



Förderantrag zur Planung einer PAK-UF Anlage auf der KA Mühlheim eingereicht

21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

14

Zahlreiche Chancen für den Abwassersektor



- Ehrgeiziger Vorschlag → besserer Schutz der aufnehmenden Gewässer
- Signifikante Reduzierung der Spurenstoffeinträge im Gewässer
- Ziel der Energieneutralität des Abwassersektors
- Neue Konzepte für Überwachung und Messungen werden erstellt
- Optimierung der bestehenden Systeme
- Integrierter Ansatz für Regenwasser- und Abwassermanagement
- Nationaler und internationaler Fachaustausch wird verstärkt
- Innovative Projekte werden entwickelt → Zusammenarbeit zwischen Gemeinden, lokalen Wasserbehörden, dem Umweltministerium (und dem Gesundheitsministerium), Ingenieurbüros, Planern, Forschungsinstituten, Geräteherstellern...



21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

15

Planetare Grenzen



Pläne der EU-Kommission

Reform der EU-Chemikalienverordnung droht zu scheitern

Eigentlich will die EU-Kommission die schädlichsten Chemikalien in der EU verbieten. Doch daraus wird laut SPIEGEL-Informationen offenbar vorerst nichts.

Von **Julia Köppe**

16.10.2023, 19.51 Uhr

Entwurf verzögerte sich immer wieder

Eigentlich beabsichtigte die EU-Kommission, schon Ende 2022 einen Vorschlag für eine Reform der Chemikalienverordnung vorzulegen. Der Termin wurde jedoch immer wieder verschoben. Schon vor etwa einem Jahr gab es deshalb Befürchtungen, in dieser Legislaturperiode könnte die EU-Kommission **überhaupt keinen Vorschlag mehr vorlegen**.

Das bestätigt sich nun offenbar. Denn im Arbeitsprogramm der EU-Kommission für das Jahr 2024, das dem SPIEGEL vorliegt, kommt Reach nicht vor.

21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

18

SAVE THE DATE

KOMS-TECHNOLOGIEFORUM
IN SPURENSTOFFE



05. Juni 2024

13. KomS Technologieforum in Uhldingen (Bodensee)



21.11.2023

Dr.-Ing. Marie Launay – 34. Karlsruher Flockungstage – Karlsruhe

19

**VIELEN DANK
FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT!**

Dr.-Ing. Marie Launay
marie.launay@koms-bw.de
Tel.: 0711 / 685 -65420
www.koms-bw.de



Spurenstoffelimination auf Kläranlagen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit

Julia Hiller

**Weber-Ingenieure GmbH
Pforzheim**

Einleitung

Anthropogene organische Spurenstoffe, die beispielsweise aus Industriechemikalien, Haushaltschemikalien, Arzneimitteln oder Bioziden stammen, treten ubiquitär in der aquatischen Umwelt in sehr geringen Konzentrationen auf (Nanogramm pro Liter bis Mikrogramm pro Liter). Für viele dieser Stoffe sind Einleitungen über das kommunale Abwassersystem ein dominierender Eintragspfad in die Gewässer. Die weitergehende Abwasserreinigung wird daher vermehrt mit separaten Reinigungsstufen zur Spurenstoffelimination betrieben. Zur Spurenstoffelimination werden dabei die Verfahren der Ozonung oder die Aktivkohleadsorption angewandt, die naturgemäß einen nicht unerheblichen Ressourceneinsatz sowohl zur Herstellung der Anlagen als auch in Form von Betriebsmitteln erfordern. Im Folgenden soll die Spurenstoffelimination auf Kläranlagen speziell unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit betrachtet werden.

Spurenstoffelimination auf Kläranlagen

Spurenstoffeintragspfade

Als organische Spurenstoffe sind anthropogenen Chemikalien bezeichnet, die in sehr geringen Konzentrationen im Bereich von Nanogramm pro Liter bis Mikrogramm pro Liter ubiquitär in der aquatischen Umwelt vorliegen können. Solche organischen Spurenstoffe sind beispielsweise Arzneimittelrückstände, Additive in Kunststoffen, Duftstoffe in Kosmetika, Pestizide, Industriechemikalien oder Korrosionsschutzmittel.

Organische Spurenstoffe werden auf vielfältigen Wegen in Gewässer eingetragen. Dominierende Punktquellen sind Kläranlagenabläufe, wobei die Spurenstoffe über Haushalte, gewerbliche oder industrielle Indirekteinleiter oder abfließendes Oberflächenwasser in Mischkanalisationen der Kläranlage zugeleitet werden.

Spurenstoffeliminationsverfahren auf Kläranlagen

In konventionellen Kläranlagen werden Spurenstoffe meist nur zu einem geringen Anteil entfernt. Zum vorbeugenden Gewässerschutz werden daher Kläranlagen vermehrt mit einer sogenannten vierten Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination ausgestattet.

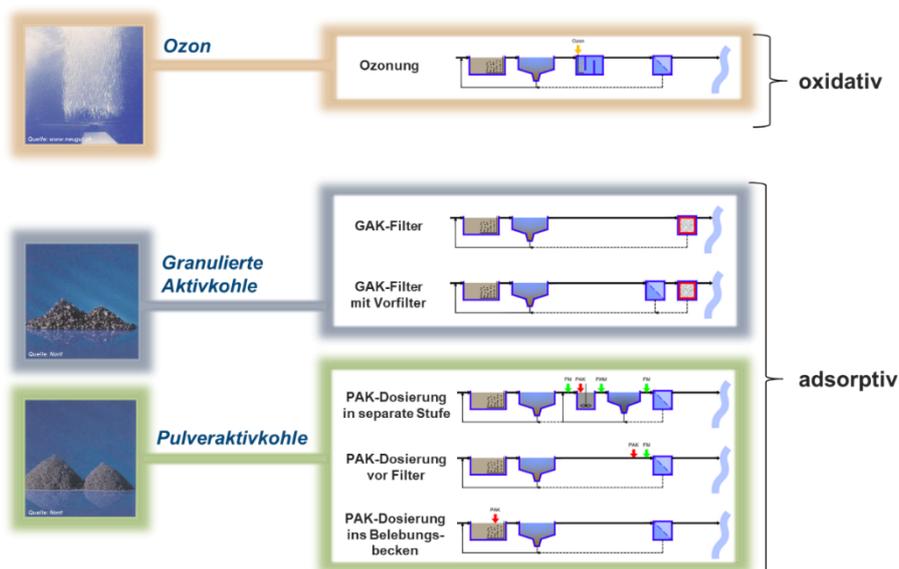


Abbildung 2: Großtechnisch realisierte Verfahren zur Spurenstoffelimination auf Kläranlagen

Als großtechnische Verfahren zur Spurenstoffelimination haben sich dabei die Ozonung und die Adsorption an Aktivkohle, sei es mit Hilfe von Pulveraktivkohle (PAK) oder mit Hilfe von granulierter Aktivkohle (GAK), etabliert. Gängige Verfahrensvarianten sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Anforderungen an die Spurenstoffelimination

Anders als beispielsweise bei den Parametern Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor, wird zum Nachweis einer ausreichenden Reinigungsleistung der Kläranlage bei der Spurenstoffelimination nicht deren Ablaufkonzentration betrachtet, sondern es wird normalerweise eine mittlere Eliminationsleistung der Kläranlage im Hinblick auf eine bestimmte Auswahl von Spurenstoffen ausgewertet.

Tabelle 1: Unterschiedliche Anforderungen zum Nachweis einer ausreichenden Spurenstoffelimination

Baden-Württemberg (KomS, 2018)	Referentenentwurf AbwAG (UBA, 2021)	Schweiz (Verordnung des UVEK vom 03.11.2016)
7 Indikatorsubstanzen Eliminationsziel von 80% im Mittel der jeweils 6 letzten Messkampagnen	6 aus 9 Indikatorsubstanzen Eliminationsziel von 80% als Mittel im Veranlagungszeitraum	Auswahl von gut / sehr gut eliminierbaren Indikatorsubstanzen im Verhältnis 2:1 Eliminationsziel von 80% bei jeder Messung

Zum Nachweis einer ausreichenden Reinigungsleistung einer Kläranlage mit Spurenstoffelimination werden dabei z.B. im Wesentlichen die in Tabelle 1 zusammengestellten Anforderungen gestellt.

Ressourceneinsatz zur Spurenstoffelimination

Zur Realisierung einer vierten Reinigungsstufe auf einer Kläranlage ist je nach Verfahren der Einsatz unterschiedlicher Ressourcen sowohl zur Herstellung der Anlage als auch zur Bereitstellung der erforderlichen Betriebsmittel erforderlich. Im Wesentlichen sind dies für die Ozonung ein Ozonreaktor, in welchem die Oxidation der organischen Spurenstoffe erfolgt, sowie ein nachgeschalteter biologisch aktiver Raumfilter, in welchem die bei der Oxidation entstehenden Transformationsprodukte biologisch abgebaut werden können. Weiterhin ist eine Ozonanlage zur Bereitstellung des Betriebsmittels Ozon erforderlich. Für die PAK-Verfahren ist eine Dosieranlage für die PAK, ein Reaktionsraum, in welchem die Adsorption der Spurenstoffe an die PAK erfolgt, sowie ein nachgeschalteter Filter zum Rückhalt der beladenen PAK erforderlich. Als Betriebsmittel werden die PAK, sowie Fällmittel oder Fällungshilfsmittel eingesetzt. Für die GAK-Verfahren muss die Adsorptionsstufe mit einer Filterkammer zur Aufnahme der GAK sowie optional ein vorgeschalteter Vor-Filter bereitgestellt werden. Die GAK wird nach Erlangen ihrer Kapazitätsgrenze ausgetauscht. Unabhängig vom eingesetzten Verfahren erfordert die Herstellung der Anlage einen Flächenverbrauch. Für den Betrieb ist in unterschiedlichem Ausmaß der Einsatz von elektrischer Energie und zusätzlicher Personaleinsatz notwendig.

Nachhaltigkeit

Was bedeutet Nachhaltigkeit?

Im Duden wird der Begriff der Nachhaltigkeit definiert als: Längere Zeit anhaltende Wirkung; als forstwirtschaftliches Prinzip, nach dem nicht mehr Holz gefällt werden darf, als jeweils nachwachsen kann; oder als Prinzip, nach dem nicht mehr verbraucht werden darf, als jeweils nachwachsen, sich regenerieren, künftig wieder bereitgestellt werden kann. In letzterem Sinne wird der Begriff Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit Umweltthemen derzeit zumeist verwendet. Um „Nachhaltigkeit“ zu realisieren, werden die Prinzipien Suffizienz (Verringerung von Produktion und Konsum), Effizienz (ergiebigere Nutzung von Material und Energie) und Konsistenz (naturverträgliche Stoffkreisläufe, Wiederverwertung, Müllvermeidung) verfolgt. Häufig wird definiert, dass ein Prozess nachhaltig ist, wenn dieser „zukunftsfähig“ oder „enkeltauglich“ ist.

Zielkonflikt

Wie in Kapitel Ressourceneinsatz zur Spurenstoffelimination erläutert, ist für die Realisierung von Spurenstoffeliminationsverfahren der Einsatz von Ressourcen notwendig. Im Sinne der Nachhaltigkeit sind diejenigen Betriebsstoffe besonders relevant, die aus fossilen Rohstoffen bereitgestellt werden, da diese sicherlich nicht in dem Maße wieder regeneriert werden oder nachwachsen können, wie sie verbraucht werden.

Die Abwasserreinigung befindet sich in einem Zielkonflikt, da einerseits das Ziel eines möglichst umfassenden Gewässerschutzes bzw. eine Verbesserung der Gewässergüte erreicht werden soll, andererseits aber auch Klimaschutzziele im Fokus stehen, wofür grundsätzlich der notwendige Energieeinsatz zu minimieren ist.

Beiden Zielen gleichermaßen gerecht zu werden, ist eine der Herausforderungen, denen die Abwasserreinigung zukünftig gegenübersteht.

Nachhaltigkeit bei der Spurenstoffelimination

Um die Spurenstoffelimination möglichst nachhaltig zu gestalten, werden bereits vielfältige Ansätze verfolgt, die nachfolgend aufgezeigt werden.

Planungsphase

Ökobilanz

Bereits im Stadium der Planung einer neuen Anlage zur Spurenstoffelimination können zur Auswahl des geeignetsten Verfahrens nicht nur Randbedingungen, wie

beispielsweise Flächenverfügbarkeit, Kosten oder spezifische Anforderungen auf der Kläranlage, sondern auch die jeweiligen Umweltauswirkungen der verschiedenen Verfahren bewertet werden. Als Bewertungskriterien hierfür stehen beispielsweise die folgenden Parameter zur Verfügung:

- Treibhauspotenzial: Fähigkeit eines bestimmten Stoffes oder einer Aktivität, zum Treibhauseffekt beizutragen
- Kumulierter Energieaufwand: ganzheitlicher Energiebedarf für die Herstellung, den Betrieb und die Entsorgung eines Produkts oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus hinweg
- Versauerung: Prozess, bei dem saure Substanzen in die Umwelt freigesetzt werden und den pH-Wert von Gewässern, Böden oder anderen Umgebungen senken
- Ökotoxizität: potenziell schädliche Wirkung von Substanzen auf Ökosysteme
- Humantoxizität: potenziell schädliche Wirkung von Substanzen auf die menschliche Gesundheit
- Eutrophierung: Überdüngung von Gewässern mit Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor, die zu einem übermäßigen Wachstum von Algen und anderen Wasserpflanzen führen

In verschiedenen Studien (Jekel und Ruhl, 2016; Remy und Miehe, 2017; Remy, 2020) wurden die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Verfahren zur Spurenstoffelimination bereits abgeschätzt. Eine besondere Herausforderung, die Ergebnisse dieser Studien einzuordnen, besteht jedoch darin, dass die jeweiligen Umweltauswirkungen zu einem großen Teil von dem Verbrauch an eingesetzten Betriebsmitteln abhängen, andererseits aber je nach Betriebsmitteleinsatz ein unterschiedliches Maß an Spurenstoffelimination erzielt wird. Eine generelle Vergleichbarkeit der Verfahren wird hierdurch enorm erschwert. In (Laqua, 2023) wurden daher die Ergebnisse der Ökobilanzen aus der Literatur jeweils auf eine Betriebsmitteldosierung normiert, die im Mittel zur Erreichung des Reinigungsziels nach KomS Handlungsempfehlung (KomS, 2018) ausreichend ist. Es konnte gezeigt werden, dass bei den derzeit eingesetzten Verfahren die Verfahren Ozonung und granuliert Aktivkohle mit Vorfilter insgesamt die geringsten Umweltauswirkungen aufweisen, gefolgt von den Pulveraktivkohle-Verfahren. Ein Grund hierfür ist, dass die Verfahren mit granulierter Aktivkohle im Vergleich zu den Verfahren mit Pulverkohle durch den Einsatz von regenerierter GAK insgesamt geringere Treibhausgasemissionen verursachen. Bei der Ozonung wird zwar ein höherer Energieverbrauch auf der Kläranlage festgestellt, allerdings werden keine fossilen Rohstoffe für die Bereitstellung der Betriebsmittel aufgewendet. In Summe weisen

jedoch nach den angesetzten Bewertungskriterien unter Anwendung einer definierten Gewichtung der Wirkungskategorien alle Verfahren einen negativen Einfluss auf die Umwelt aus, sofern ausschließlich die Spurenstoffstufe betrachtet wird. Sobald der Einfluss der Filtration in den Bilanzraum mit aufgenommen wird, wird der Gesamteinfluss auf die Umwelt positiv, was hauptsächlich in einer Reduzierung der Eutrophierung aufgrund der vermehrten Elimination von partikulär gebundenem Phosphor und einer Reduzierung der Ökotoxizität aufgrund des Rückhalts von AFS-gebundenen Schwermetallen begründet ist. Zu bedenken ist, dass die organischen Spurenstoffe zum einen in sehr geringen Konzentrationen vorliegen und zum anderen bisher keine Humantoxizität nachgewiesen wurde, so dass im Umkehrschluss deren Reduktion „rechnerisch“ nur einen geringen positiven Effekt auf die Umwelt ausmachen kann. Im Sinne einer langanhaltenden Zukunftsperspektive sind der vorbeugende Gewässerschutz und eine damit einhergehende zuverlässige Sicherstellung der Trinkwasserversorgung durch die Realisierung von Spurenstoffeliminationsverfahren jedoch zweifellos als nachhaltig zu bewerten.

Als Fazit ist festzuhalten: Die Ergebnisse einer Ökobilanz (insbesondere als Absolutwerte) zur Bewertung der Eliminationsverfahren hängen sehr stark von den jeweiligen Betrachtungsparametern ab, wie z.B.

- Wo liegt die Systemgrenze?
- Welche Spurenstoffe werden in die Bewertung mit einbezogen?
- Welche Dosiermengen werden der Bewertung zugrunde gelegt?
- Welches Reinigungsziel soll erreicht werden?
- Welcher Strommix wird der Bewertung zugrunde gelegt?
- Wie werden die einzelnen Wirkungskategorien gewichtet?

Die relativen Ergebnisse (als „Rangfolge“) einer Ökobilanz sind zur Einordnung der Verfahren mit Blick auf deren Umweltauswirkungen allerdings geeignet.

Neue Verfahren

Ein Ansatzpunkt, um eine möglichst nachhaltige Gestaltung der Spurenstoffelimination zu erreichen, liegt darin, den Ressourcenverbrauch zur Herstellung der Eliminationsanlage zu minimieren. Eine Möglichkeit hierzu könnte die Umsetzung des Ulmer Verfahrens im Aufstaubetrieb (PAK-SBR-Verfahren, SBR - „Sequenced-Batch-Reactor“) bieten (Ehrhardt et al., 2023). Hierbei wird die Adsorptionsstufe ähnlich einer herkömmlichen SBR-Anlage in der Abwasserreinigung betrieben: Der SBR wird mit Abwasser aus der Nachklärung befüllt, bereits während der Befüllung erfolgt eine chargenweise Zugabe von PAK und Fällmittel bzw. Flockungshilfsmitteln, anschließend folgt eine Reaktionszeit, in welcher der Reaktorinhalt durchmischt wird

so dass die Adsorption stattfinden kann und schließlich sedimentiert die PAK und der Klarwasserüberstand wird abgezogen (vgl. Abbildung 3).

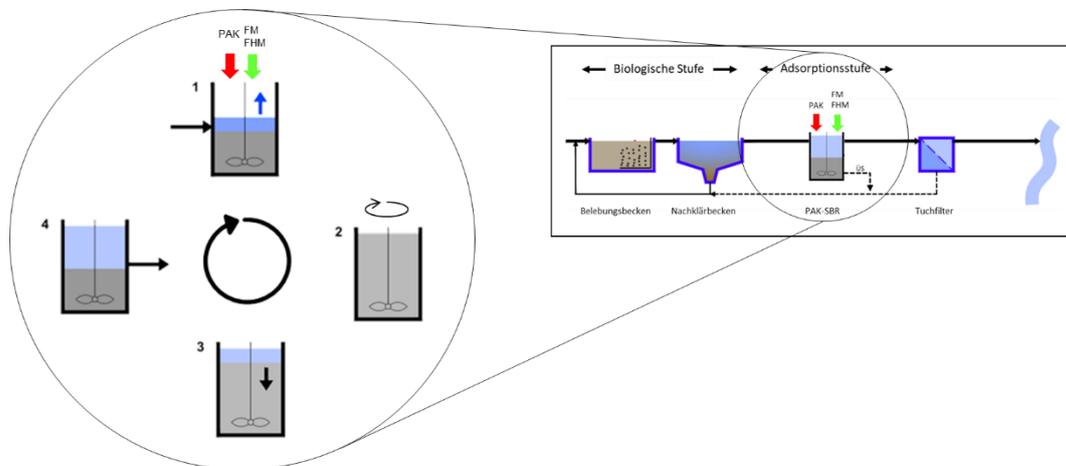


Abbildung 3: Zyklus des Ulmer Verfahrens im Aufstaubetrieb

Im Rahmen des vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Vorhabens „PAKAuf“ wurde dieses Verfahren im Pilotmaßstab auf der Kläranlage Neckarsulm erprobt und untersucht, wobei insbesondere Bemessungsparameter für die Auslegung des Verfahrens ermittelt wurden. Als wesentliches Ergebnis konnte abgeschätzt werden, dass das in Baden-Württemberg vorgegebene Eliminationsziel von 80 % bezogen auf die Indikatorsubstanzen über die Gesamtkläranlage bei einem gegenüber dem Ulmer Verfahren reduzierten Flächen- und Volumenbedarf erreichbar ist.

Betriebsphase

Zumindest was die Umweltauswirkungen betrifft, haben die zur Spurenstoffelimination eingesetzten Betriebsmittel den deutlich größeren Einfluss auf die Bewertung der Eliminationsverfahren als die eingesetzten Bauwerke. Daher sind zielführende Strategien zur Steigerung der Nachhaltigkeit insbesondere im Bereich der eingesetzten Betriebsmittel zu suchen. Ansätze zur Optimierung können dabei die Auswahl bzw. die Bereitstellung der Betriebsmittel betreffen als auch Maßnahmen sein, die die Einsatzmenge der Betriebsmittel gezielt reduzieren.

Ozon

Ozon wird aus molekularem Sauerstoff vor Ort auf der Kläranlage hergestellt, wofür elektrische Energie benötigt wird. Durch Einsatz von elektrischem Strom aus regenerativen Energiequellen wie Windkraft, Sonnenenergie oder Biomasse können die Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung reduziert und somit die Nachhaltigkeit des Eliminationsverfahrens unmittelbar verbessert werden.

Optimierungsansätze können außerdem im Bereich der Sauerstoffbereitstellung zu finden sein.

Aktivkohle

Gemeinhin wird als „grüne Kohle“ eine Aktivkohle bezeichnet, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt ist. Die aus der Bereitstellung der Kohle resultierenden Treibhausgasemissionen können hierdurch wesentlich reduziert werden (Remy und Meier, 2020). Prinzipiell können aber auch andere Strategien zu einem reduzierten Umweltimpact der eingesetzten Kohle führen, wie beispielsweise kurze Transportwege durch lokale Herstellung oder Regenerierung, besonders effektive Verfahren zur Aktivierung der Kohle oder eine vergleichsweise höhere Adsorptionskapazität der Kohle. In jedem Fall muss sichergestellt werden, dass die alternativen Kohleprodukte keine negativen Auswirkungen auf die Wasserqualität, beispielsweise durch eine Desorption von Schwermetallen haben. Bei den GAK-Verfahren steigert der Einsatz von regenerierter Aktivkohle die Nachhaltigkeit erheblich (Remy und Meier, 2020).

Betrieboptimierung

Bei einer Kläranlage mit einer Spurenstoffelimination nach dem Ulmer Verfahren wurde in einem Optimierungszeitraum von mehreren Jahren die zudosierte PAK-Menge sukzessive reduziert, bis letztlich das Eliminationsziel von 80 % bei einzelnen Messkampagnen unterschritten wurde (vgl. Abbildung 4). Eine volumenproportionale PAK-Dosierung von circa 4,5 mg/l genügt demnach, das geforderte Eliminationsziel zu erreichen. Der Betriebsmitteleinsatz und die aus der Bereitstellung resultierenden Emissionen konnten hierdurch im Vergleich zur Inbetriebnahme etwa auf die Hälfte reduziert werden.

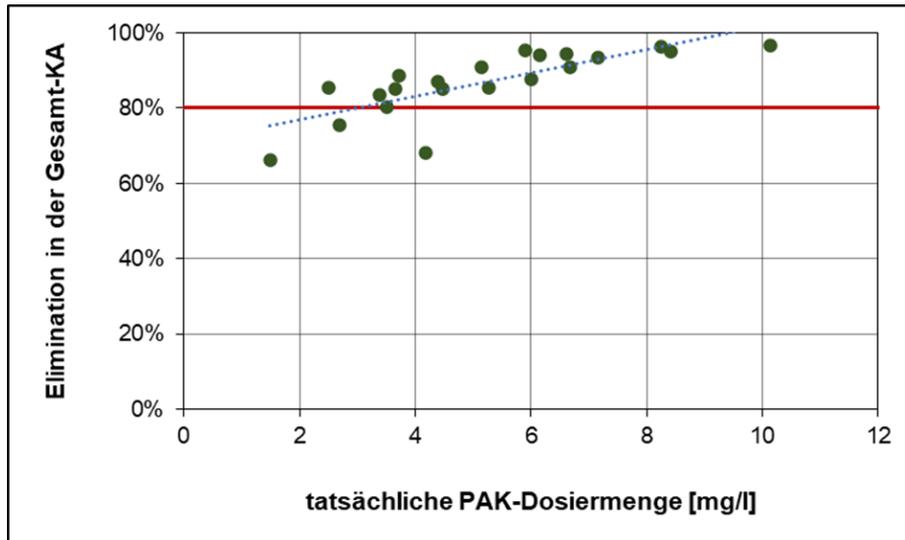


Abbildung 4: Betriebserfahrungen mit dem Ulmer Verfahren: Eliminationsgrad bezogen auf die 7 Indikatorsubstanzen in Baden-Württemberg in Abhängigkeit der PAK-Dosierung

Online-Monitoring und digitale Methoden

Das vom BMBF geförderte Verbundprojekt DecS (Decoding Spurenstoffe - Implementierung einer intelligenten Monitoring- und Steuerungszentrale für eine ressourceneffiziente Spurenstoffelimination aus Abwasser) hat das Ziel, mithilfe digitaler Technologien eine besonders ressourceneffiziente Spurenstoffentfernung aus Abwasser zu ermöglichen. Hierzu wurde die Entwicklung von Simulationsmodellen vorangetrieben, die die Adsorption an Aktivkohle und die Spurenstoffelimination bei einer Ozonung abbilden können, so dass mit Hilfe eines virtuellen Kläranlagenmodells Automatisierungsstrategien zur Einsparung von Ressourcen erprobt und evaluiert werden können. Um die Simulationsmodelle und letztendlich die entwickelten Strategien an realen Kläranlagen verifizieren zu können, wurden außerdem die Entwicklung eines onlinefähigen Spurenstoffmessgerätes adressiert sowie eine Vielzahl von Spurenstoffanalysen bei einer realen Kläranlage ausgewertet. Bei der Auswertung der Messdaten in Hinblick auf eine Zielgröße für eine effektive Steuer- und Regelstrategie hat sich als kritischer Punkt die Tatsache herauskristallisiert, dass die Anforderung an das Verfahren üblicherweise als ein gemittelter Eliminationsgrad bezüglich einer bestimmten Auswahl von organischen Spurenstoffen gestellt wird (vgl. Kapitel Anforderungen an die Spurenstoffelimination). Die Auswahl der Indikatorsubstanzen ist dabei essenziell, da sie unmittelbar den erzielbaren Eliminationsgrad beeinflusst (siehe auch Hübner et al., 2023).

Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Spurenstoffelimination ist es wie bei jeder anderen Fragestellung zur Beurteilung der Nachhaltigkeit. Es stellt sich stets die Frage: Welche Umwelteffekte

(positive wie negative) hat das betrachtete Verfahren und wie werden diese bewertet bzw. gewichtet. Zusammenfassend kann für die Spurenstoffelimination festgehalten werden:

- Unter Nachhaltigkeitsaspekten befindet sich die Spurenstoffelimination in einem Spannungsfeld.
- Zur Einordnung der Eliminationsverfahren in Bezug auf deren Umweltauswirkungen existieren vielfältige Bewertungsparameter. Das jeweilige Ergebnis ist geprägt von den gewählten Randbedingungen und Gewichtungsfaktoren.
- Nachhaltigkeit kann durch eine geeignete Verfahrenswahl aber auch durch Betriebsoptimierung gesteigert werden. Lösungsansätze sind vorhanden und werden teilweise schon erfolgreich umgesetzt.
- Synergieeffekte wirken sich positiv auf weitere Reinigungsziele aus.
- Eine ganzheitliche Betrachtung darf sich nicht nur auf die Kläranlage beschränken. Die Vermeidung von Spurenstoffeinträgen und deren Elimination an der Quelle müssen gleichermaßen verfolgt werden.
- Regenwassereinleitungen und Mischwasserüberläufe dürfen nicht unberücksichtigt bleiben.

Literatur

Ehrhardt, F. et al. (2023): „Spurenstoffelimination mit Pulveraktivkohle im Aufstaubetrieb“, Korrespondenz Abwasser, Abfall (70) 11, 2023

Hübner, U. et al. (2023): „Herausforderungen bei der Bewertung der Spurenstoffelimination am Beispiel der Kläranlage Weißenburg“, Korrespondenz Abwasser, Abfall (70) 9, 2023

Jekel, M., Ruhl, A.S. (2016): „Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken“, Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2806-8, 2016

KomS (2018): „Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination“, Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, 2018

- Laqua S. (2023): „Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Weingarten - Machbarkeitsstudie unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit“, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023
- Remy, C. (2020): „Bewertung der Umweltauswirkungen von Kläranlagen mit Ökobilanzen/LCA“, Wiener Mitteilungen, Band 252, 267-282, 2020
- Remy, C., Meier A (2020): „Klimafreundlich Gewässer schützen: CO₂-Fußabdruck verkleinern bei der Elimination organischer Spurenstoffe auf Kläranlagen“, Aqua & Gas 2, 2020
- Remy, C., Miehe, U. (2017): „Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck von Aktivkohleadsorption und Ozonung zur Spurenstoffentfernung in Berlin“, 5 Jahre Kompetenzzentren Spurenstoffe KomS BW, KOM-M.NRW und VSA-Plattform, Jubiläumsveranstaltung am 28./29.06.2017, KomS BW
- UBA (2021): „Reform des Abwasserabgabengesetzes – mögliche Aufkommens- und Zahllasteffekte“, Abschlussbericht, Umweltbundesamt, ISSN 1862-4804, 2021

Anschrift der Verfasserin:**Julia Hiller**

Weber-Ingenieure GmbH
Bauschlotter Str. 62
D-75177 Pforzheim

Tel. +49 7231 583 - 303

E-Mail: julia.hiller@weber-ing.de

Enhancing phosphorus removal of photogranules by incorporating polyphosphate accumulating organisms

Lukas M. Trebuch

NIOO-KNAW, Nederlande

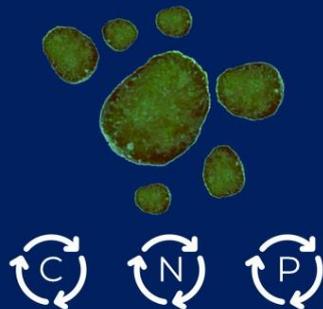
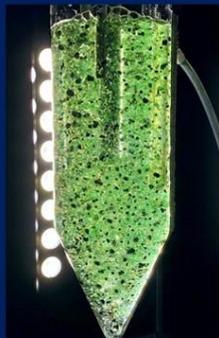
Summary

Photogranules are a novel wastewater treatment technology that can utilize the sun's energy to treat water with lower energy input and have great potential for nutrient recovery applications. They have been proven to efficiently remove nitrogen and carbon but show lower conversion rates for phosphorus compared to established treatment systems, such as aerobic granular sludge. In this study, we successfully introduced polyphosphate accumulating organisms (PAOs) to an established photogranular culture. We operated photobioreactors in sequencing batch mode with six cycles per day and alternating anaerobic (dark) and aerobic (light) phases. We were able to increase phosphorus removal/recovery by 6 times from 5.4 to 30 mg/L/d while maintaining similar nitrogen and carbon removal compared to photogranules without PAOs. To maintain PAOs activity, alternating anaerobic feast and aerobic famine conditions were required. In future applications, where aerobic conditions are dependent on in-situ oxygenation via photosynthesis, the process will rely on sunlight availability. Therefore, we investigated the feasibility of the process under diurnal cycles with a 12-h anaerobic phase during nighttime and six short cycles during the 12 h daytime. The 12-h anaerobic phase had no adverse effect on the PAOs and

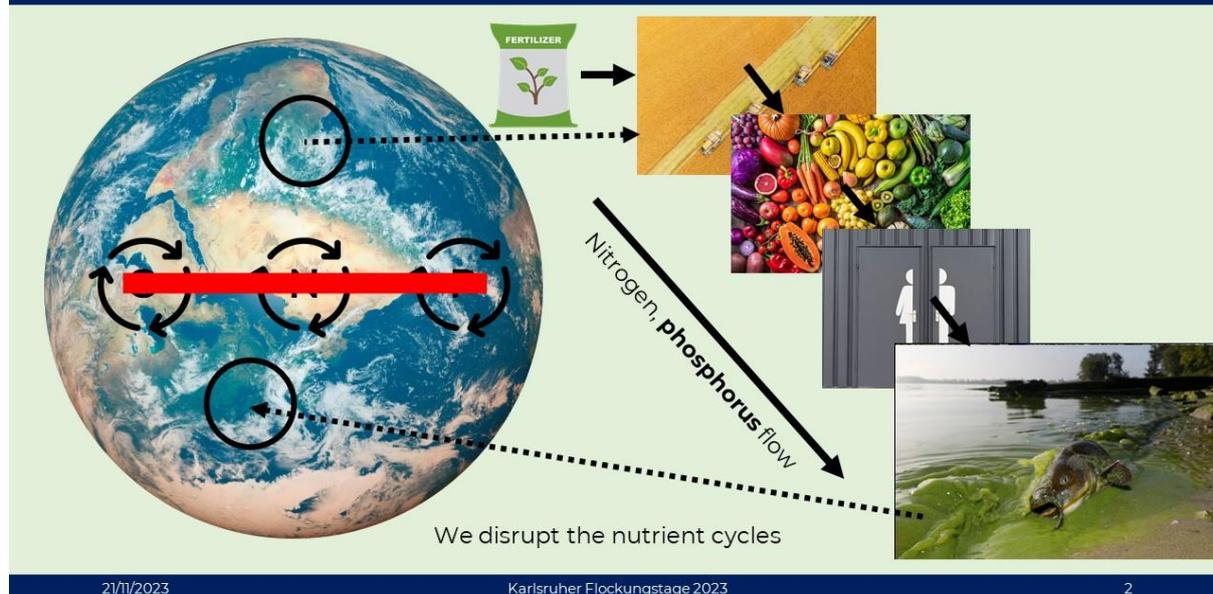
phototrophs. Due to the extension of one anaerobic phase to 12 h the six aerobic phases were shortened by 47% and consequently decreased the light hours per day. This resulted in a decrease of phototrophs, which reduced nitrogen removal and biomass productivity up to 30%. Finally, we discuss and suggest strategies to apply PAO- enriched photogranules at large-scale.

Enhancing phosphorus removal of photogranules by incorporating polyphosphate accumulating organisms

Dr. Lukas M. Trebuch
The Netherlands Institute of Ecology (NIOO-KNAW)

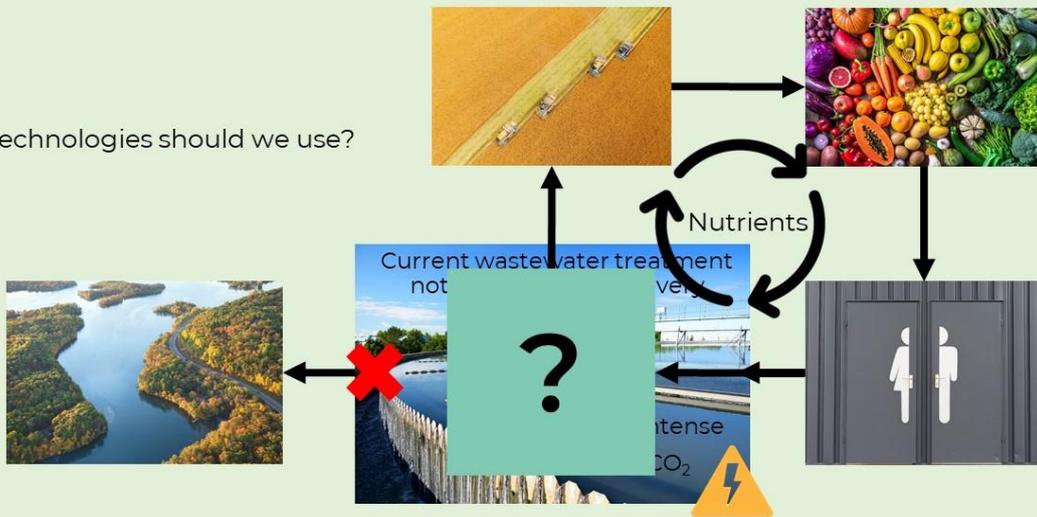


GLOBAL REDISTRIBUTION OF NUTRIENTS

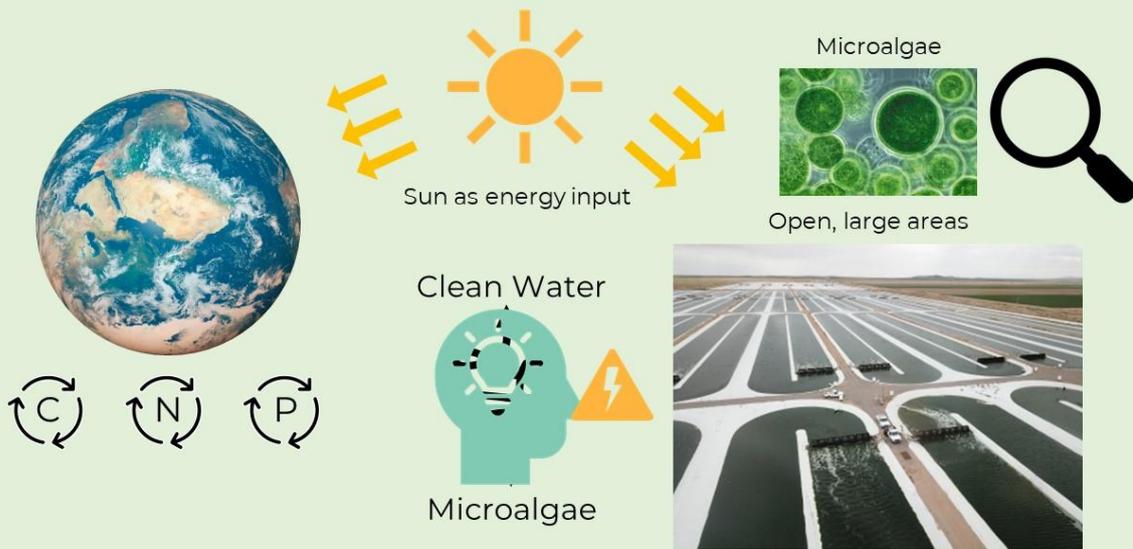


CLEAN WATER AND NUTRIENT RECOVERY

What technologies should we use?



USING THE SUN TO CLEAN WATER



PHOTOTROPHIC AGGREGATES IN NATURE



21/11/2023

Karlsruher Flockungstage 2023

5

PHOTOGRANULES

Sequencing batch mode (SBR)

1. REACTION

2. SETTLING

3. DRAINING

4. FILLING

MEDIUM

EFFLUENT

PHOTOGRANULE ASSEMBLY

Bacteria

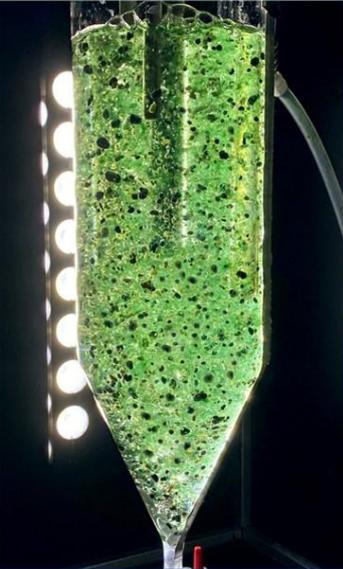
Microalgae + Cyanobacteria

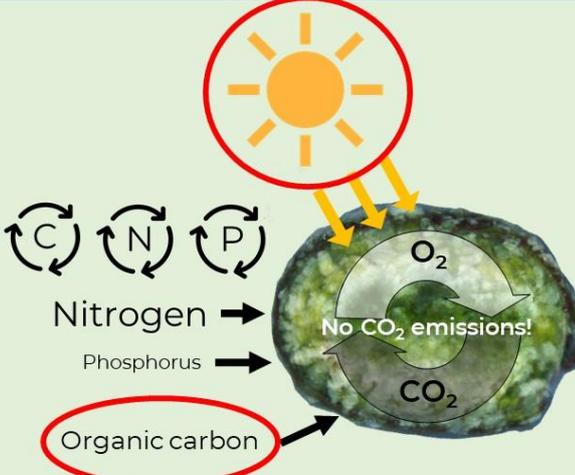
21/11/2023

Karlsruher Flockungstage 2023

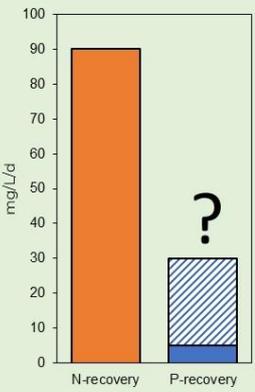
6

PHOTOGRANULES





Fast growing!

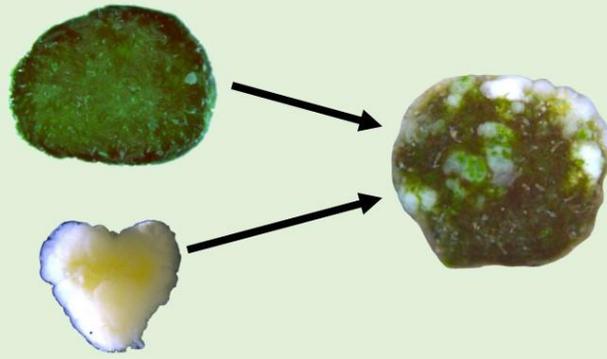


Recovery Type	Value (mg/L/d)
N-recovery	~90
P-recovery	~30

21/11/2023
Karlsruher Flockungstage 2023
7

ENHANCING PHOSPHORUS RECOVERY

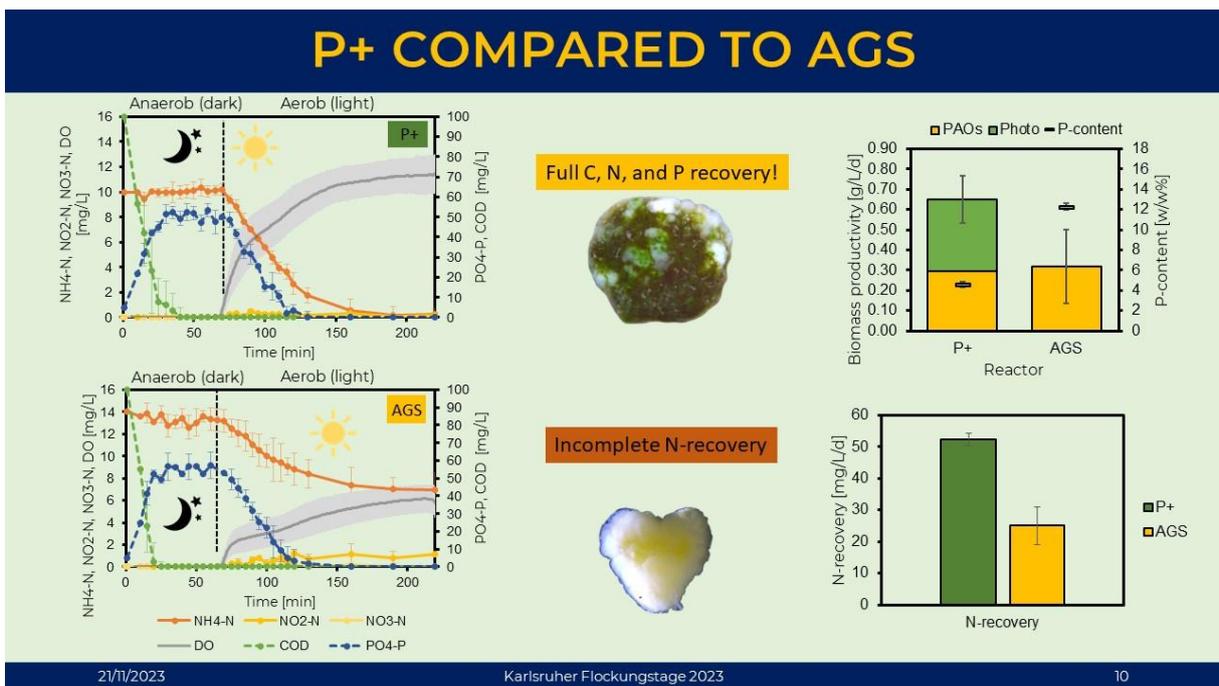
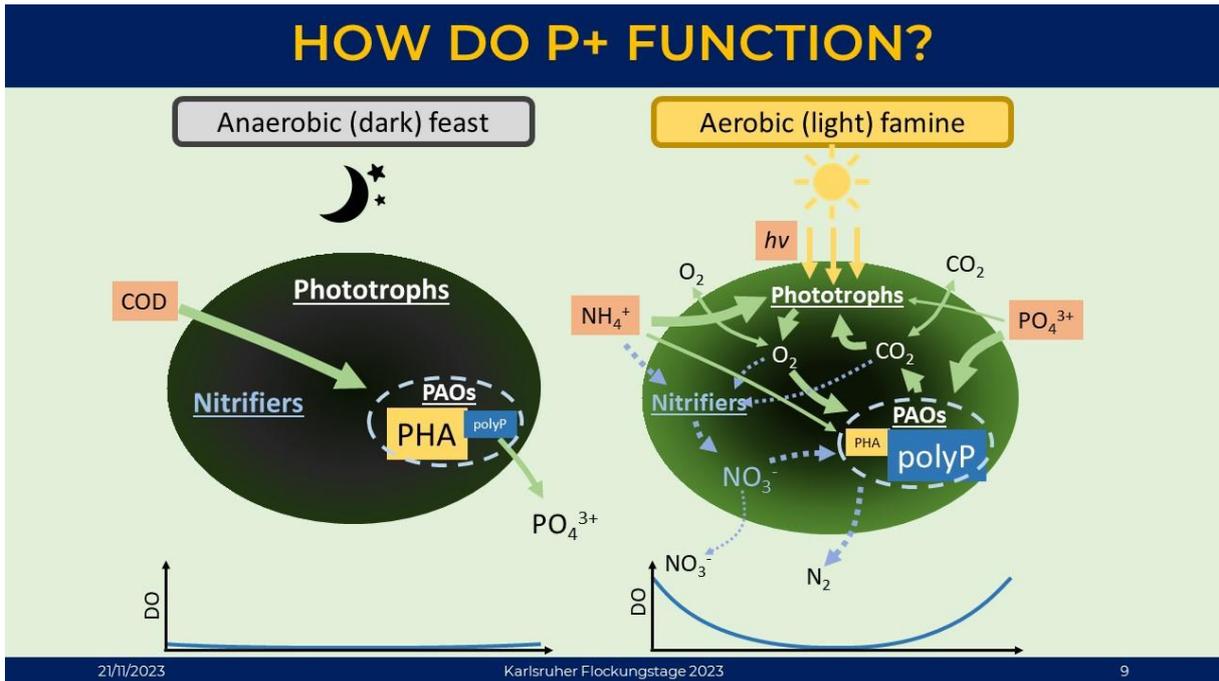


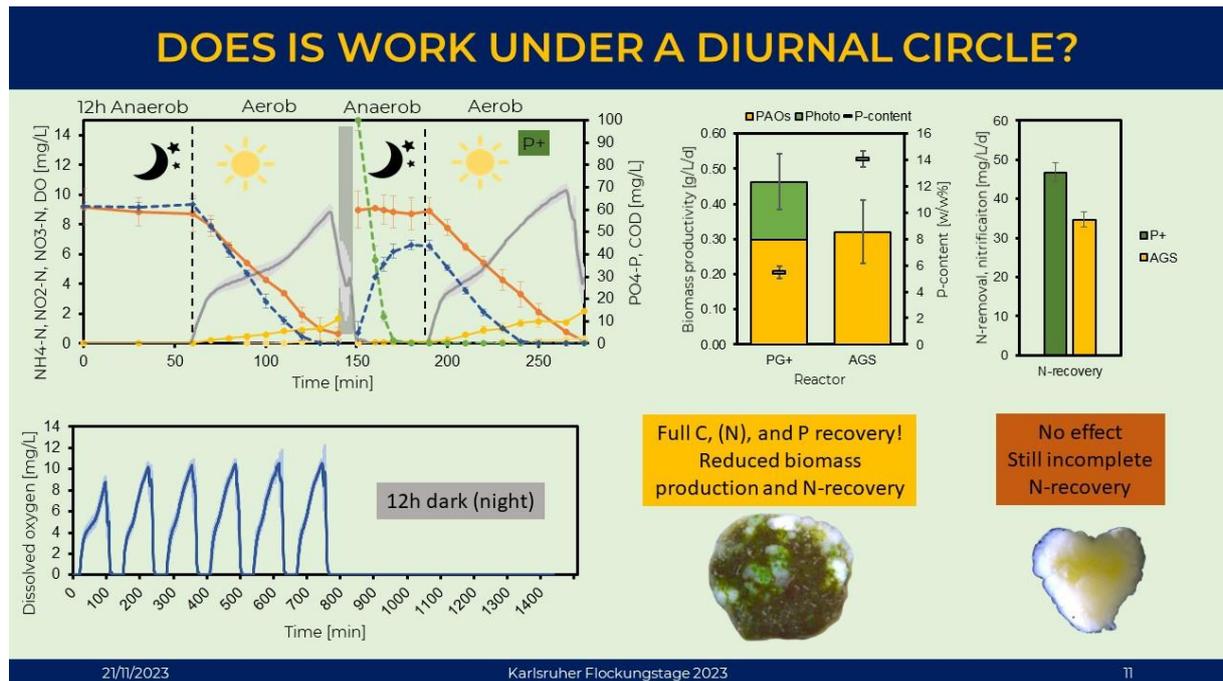


Increased phosphorus content?

Aerobic granular sludge (AGS) enriched with polyphosphate accumulating organisms (PAOs)

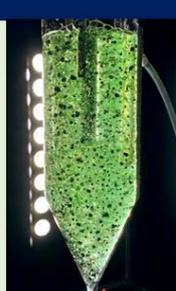
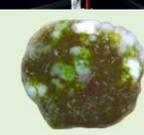
21/11/2023
Karlsruher Flockungstage 2023
8





WHAT HAVE WE LEARNED

- ✓ Successfully enriched photogranules with PAOs
- ✓ Increased performance
 - 6 times higher P-recovery (than normal photogranules)
 - 2-3 times higher N-recovery (than AGS)
 - 2-3 times higher biomass productivity (than AGS)
- ✓ Suitable operation under natural diurnal cycle
 - Upscaling potential with no aeration needed!
 - N-recovery and biomass productivity dependent on light






21/11/2023 Karlsruher Flockungstage 2023 12

OUTLOOK: TAILOR-MADE FERTILIZER

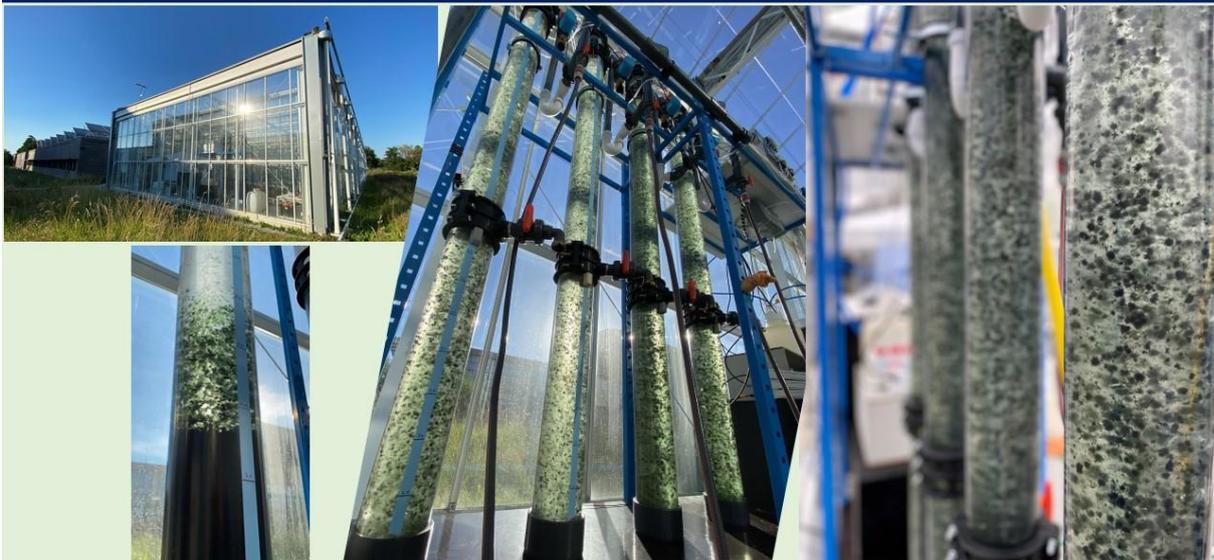


21/11/2023

Karlsruher Flockungstage 2023

13

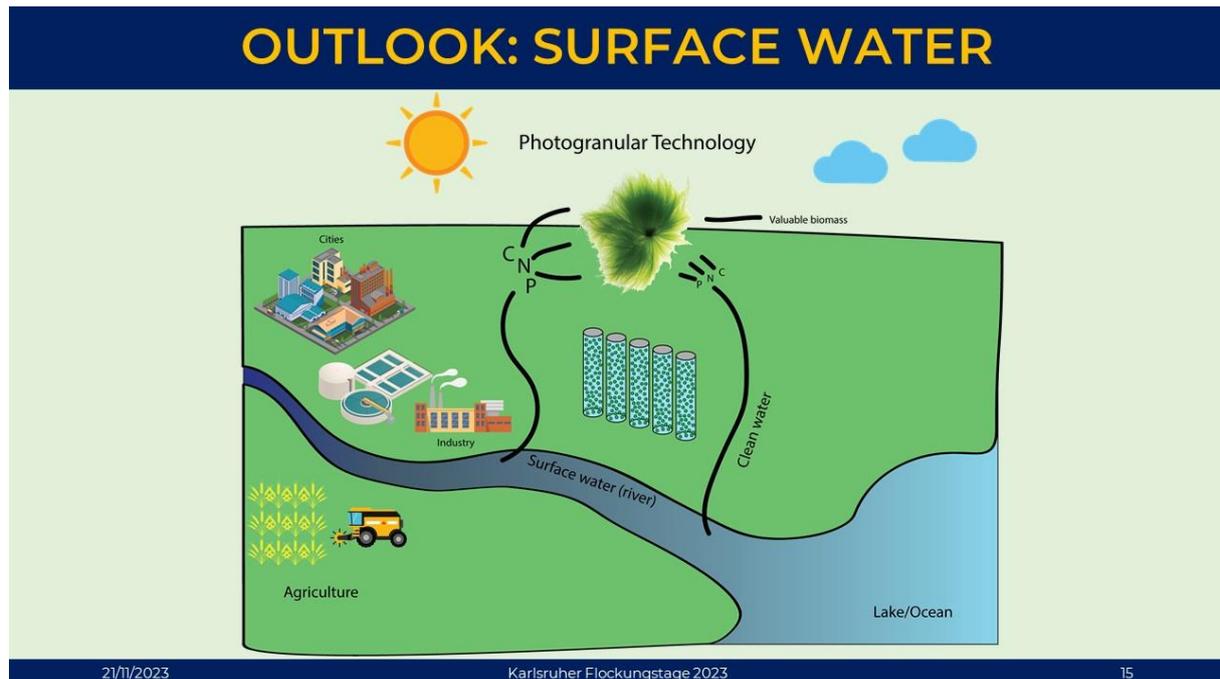
OUTLOOK: HOW TO UPSCALE



21/11/2023

Karlsruher Flockungstage 2023

14



ACKNOWLEDGMENTS



Tânia V Fernandes
Louise EM Vet
Research assistants
NIOO student



René H Wijffels
Marcel Janssen
Research assistants
WUR student



Mario Pronk



Dirk de Beer
Olivia Bourceau

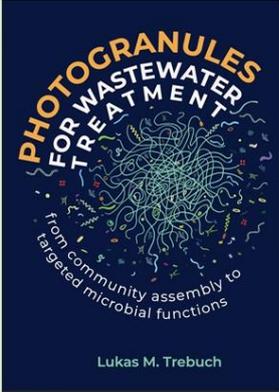


Thomas R Neu
Ute Kuhlicke

Thank you for your attention!

PhD thesis:
[https://www.wur.nl/en/publication-
details.htm?publicationId
=publication-way-
353936333937](https://www.wur.nl/en/publication-details.htm?publicationId=publication-way-353936333937)

Contact:
Lukas M. Trebuch
L.Trebuch@nioo.knaw.nl



PHOTOGANULES
FOR WASTEWATER
TREATMENT

From community assembly to
targeted microbial functions

Lukas M. Trebuch

21/11/2023

Karlsruher Flockungstage 2023

16

Anschrift des Verfassers:

Lukas M. Trebuch
AQUATIC ECOLOGY | MICROALGAE
ECO-TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

**NIOO-KNAW, Wageningen,
Niederlande**

E-Mail: L.Trebuch@nioo.knaw.nl

Innovative Phosphatfällung mit SCHAEFER PRECAphos®

Benjamin J. Hellmann

Volker Ermel

Schaefer Kalk GmbH & Co. KG

Louise-Seher-Straße 6

65582 Diez

Einleitung

Das Element Phosphor und sein Anion Phosphat sind verantwortlich für die Eutrophierung von Gewässern und gefährden in der Folge die aquatische Umwelt. Die Verringerung von Biodiversität bis hin zur Entstehung von Todeszonen in den Gewässern ist die Folge. Eingebracht werden diese Phosphate über die Abwässer aus Industrieanlagen, öffentlichen und gewerblichen Gebäuden und privaten Haushalten. Um diese Gefährdung zu reduzieren, werden seit den 1980er Jahren Phosphatfällungsmittel auf deutschen Kläranlagen verwendet. Zum Einsatz kommen zumeist in starken Säuren oder Laugen aufgelöste Eisen- oder Aluminiumverbindungen. Der Eintrag dieser Säuren oder Laugen ist jedoch für den Prozess der Abwasserreinigung schädlich, da unter anderem die Stickstoffeliminationsleistung der Kläranlage

gehemmt wird. Zudem wirkt sich ein hoher Eintrag von Säure oder Lauge negativ auf die Flockenstruktur und damit auf die biologische Abwasserreinigung aus. Die europäische Wasserrahmenrichtlinie sieht zudem eine Verbesserung des Gewässerzustandes und damit eine weitere Reduktion des Eintrags von Phosphaten in die Gewässer vor. Aus diesem Grund werden die Grenzwerte für die Einleitung von Phosphat weiter herabgesetzt. Dies bedeutet, dass die Dosiermengen an Fällungsmitteln überproportional steigen und die o. g. Nachteile verstärkt zum Tragen kommen. Hier setzt Schaefer Kalk mit der Innovation SCHAEFER PRECAphos® an.

Innovative Lösung

SCHAEFER PRECAphos® steht für eine effektive Phosphatfällung in Kombination mit der Optimierung der biologischen Abwasserreinigung. Es handelt sich um ein pulverförmiges, hochkonzentriertes Mehrkomponenten-Produkt auf Basis von hochreinen Calciumverbindungen in Kombination mit speziellen Eisensalzen, die ohne zusätzlichen Säureeintrag wirken. Durch den Einsatz von SCHAEFER PRECAphos® ist die Phosphatfällung um bis zu 30 % effektiver als die konventionelle Fällung mit Eisen- oder Aluminiumsalzlösungen. Hierdurch werden Ressourcen und Energie eingespart und die Umwelt merklich entlastet.

Die Handhabung gestaltet sich einfach, denn das Produkt kann direkt als Pulver dosiert werden und verbessert systematisch viele Prozesse in der Abwasserreinigung. Dies ist auch vorteilhaft für die mehr als 1500 kleinen Kläranlagen in Deutschland, bei denen eine Phosphatelimination bislang nicht wirtschaftlich darstellbar war. Im Gegensatz zum Stand der Technik entfällt bei der Verwendung von SCHAEFER PRECAphos® die Investition in eine nach Wasserhaushaltsgesetz konforme Lagerung der Gefahrgüter. Hierdurch werden je nach Anlagengröße Investitionskosten von mehreren 10.000 € vermieden. Auch auf Kläranlagen der Größenklassen 2 - 4 findet die Innovation bereits Anwendung. Hier kann das Produkt direkt über eine von Schaefer Kalk bereitgestellte Leih-Siloanlage in das Belebungsbecken dosiert werden. Im Vergleich zu herkömmlichen flüssigen und sehr sauren Fällungsmitteln wirkt SCHAEFER PRECAphos® säureneutralisierend und kann ohne Einschränkungen im Transportrecht befördert werden.



Abbildung 1: Vorteile beim Einsatz von SCHEAFER PRECAphos®.

Die besondere Eigenschaft der Innovation, Säuren zu neutralisieren und den pH-Wert des Wassers im optimalen Bereich zu stabilisieren, hat weitreichende positive Effekte auf die biologische Abwasserreinigung. Die natürlichen Calciumverbindungen erhöhen die Säurekapazität direkt im Belebtschlamm und verbessern die Stickstoffeliminationsleistung, die Flockenausbildung und stabilisieren das Absetzverhalten des Klärschlammes. Auch im Faultrum wirkt SCHEAFER PRECAphos® effektiv und bindet schädlichen Schwefelwasserstoff. Das so entstehende Biogas, kann sicher in wertvolle Energie umgewandelt werden.

Ebenso zeigen sich die Vorteile der Innovation im letzten Schritt des Prozesses der Abwasserreinigung. In Anlagen, die SCHAEFER PRECAphos® einsetzen, kann der ausgeschleuste Klärschlamm wesentlich besser entwässert und abgepresst werden, so dass auch hier günstigere Transporte und eine effektivere Verwertung des Klärschlammes realisiert werden können. In **Tabelle 1** finden Sie eine Gegenüberstellung der positiven Eigenschaften der Innovation im Vergleich zum Stand der Technik.

Tabelle 2: Gegenüberstellung des Stands der Technik zu SCHAEFER PRECAphos®

	Stand der Technik	SCHAEFER PRECAphos®
Phosphat-Elimination		bis zu 30 % effizientere Phosphateliminationsleistung
Transport	Gefahrgut nach Transportrecht	kein Gefahrgut nach Transportrecht
Lagerung und Dosierung	aufwändige Anlagen nach WHG	Sackware oder lose in Siloanlage
Säurekapazität	verringert die Säurekapazität	erhöht aktiv die Säurekapazität
Stickstoff-Elimination	wirkt hemmend	deutlich verbessert
Klärschlammmentwässerung	bei hohen Dosiermengen tritt eine Verschlechterung ein	deutlich verbessert
Belebtschlammflocken	schädigt Flockenausbildung	fördert kompakte Flockenausbildung
Absetzverhalten	keine Auswirkung	deutlich verbessert
Sichttiefe	keine Auswirkung	deutlich verbessert

SCHAEFER PRECAphos® überzeugt nicht nur Kläranlagenbetreiber; es hat auch die Jury des rheinlandpfälzischen Innovationspreises 2022 überzeugt. SCHAEFER KALK erhielt den rheinlandpfälzischen Innovationspreis in der Kategorie „Sonderpreis Industrie“.

Literatur

Hahn, H., Ermel, V., (2021): „Ein neuer Weg der Phosphatfällung“, KA Betriebsinfo (51), S. 3060f

Hellmann, B. J., Ermel, V., EP3799578 „Mittel zur Senkung des Phosphatgehaltes in Abwässern“ (2018)

<https://innovationspreis.rlp.de/de/innovationspreis-2011-2023/innovationspreis-2022/sonderpreis-industrie/>

Anschrift der Verfasser:

Benjamin J. Hellmann

Schaefer Kalk GmbH & Co. KG

Louise-Seher-Straße 6

65582 Diez

Tel. +49 6432 503 410

Fax: +49 6432 503 33 410

E-Mail:

benjamin.hellmann@schaeferkalk.de

(FH) Volker Ermel

Schaefer Kalk GmbH & Co. KG

Louise-Seher-Straße 6

65582 Diez

Tel. +49 6432 503 108

Fax: +49 6432 503 33 108

E-Mail:

volker.ermel@schaeferkalk.de

Herausforderungen und Lösungsansätze für die weitestgehende P-Elimination auf Kläranlagen

Peter Wulf
Kristina Haber

Emscher Wassertechnik GmbH
Essen

Einleitung

Aktuell wird für zahlreiche kommunale Kläranlagen die Verschärfung der Anforderungen an die Phosphorelimination diskutiert und umgesetzt.

Hintergrund bilden insbesondere die Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2016) sowie Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenpläne zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000) mit dem Ziel eines guten oder sehr guten Zustandes der Gewässer bis 2027. Mit der immissionsorientierten Betrachtungsweise ergeben sich für Phosphor als relevanten Eutrophierungsfaktor und Kläranlagen als Punktquellen im Vergleich zur vorrangig emissionsorientierten Betrachtungsweise des Anhangs 1 der Abwasserverordnung (AbwV, 2020) deutlich strengere Anforderungen an die Phosphorelimination.

Aktuell hat das EU-Parlament am 5. Oktober 2023 einen modifizierten Entwurf der EU-Kommission zur Novellierung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie angenommen. Mit derzeitigem Stand wird dabei ein Grenzwert von 0,2 mg/l für Gesamtphosphor diskutiert, was eine weitere erhebliche Verschärfung darstellen würde.

Mit den Verfahren zur vermehrten biologischen und chemischen Phosphorelimination sowie der Flockungsfiltration stehen bewährte Technologien zur Phosphorelimination zur Verfügung. Vorgenannte gestiegene Anforderungen bedingen jedoch die Leistung und Effizienz auszuschöpfen, wofür nachfolgend Ansätze erläutert werden.

Veranlassung und neue Anforderungen an die Phosphor-elimination

Die Wasserrahmenrichtlinie formuliert für Oberflächengewässer das Ziel eines guten ökologischen Zustandes und guten chemischen Zustandes bis 2027. Abbildung 1 zeigt den Anteil der Wasserkörper in Fließgewässern in mindestens gutem Zustand oder mit mindestens gutem Potenzial auf der Datenbasis 2021. Mit dem Stand werden etwa 8 % der deutschen Fließgewässer-Wasserkörper in einen „guten“ oder „sehr guten“ ökologischen Zustand beziehungsweise ein gutes ökologisches Potenzial eingestuft.

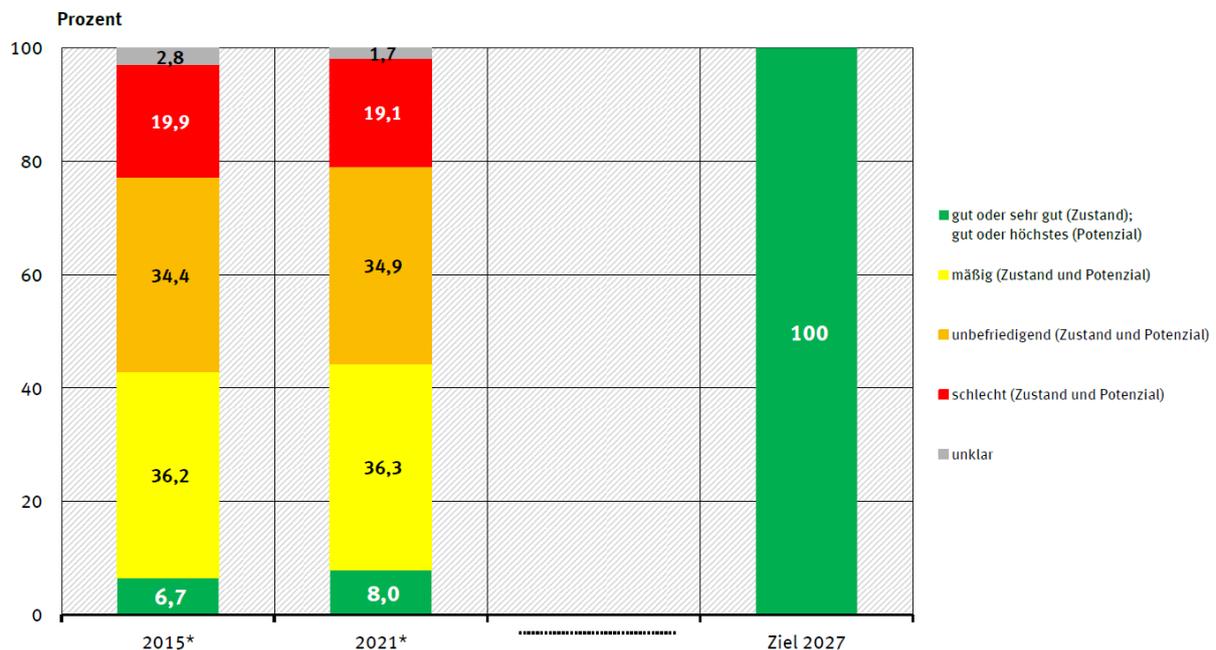


Abbildung 1: Anteil der Wasserkörper in Fließgewässern in mindestens gutem Zustand oder mit mindestens gutem Potenzial (UBA, 2022)

Es zeigt sich der weitere Handlungsbedarf im 3. Bewirtschaftungszyklus für das Ziel der WRRL. Neben den wesentlichen hydromorphologischen Ursachen und diffusen Einträgen spielt die Phosphor-Belastung aus Kläranlagen als Punktquelle eine große Rolle. Entsprechend enthalten die Maßnahmenprogramme und Bewirtschaftungspläne der Länder umfangreiche Verschärfungen im Vergleich zu den Anforderungen der Abwasserverordnung. Tabelle 1 zeigt exemplarisch die Verschärfung der Anforderungen im Zuge der Umsetzung der WRRL am Beispiel der Maßnahmenprogramme in Baden-Württemberg, Hessen und Bayern im Vergleich zur Abwasserverordnung. Auch noch weitergehende Anforderungen werden zurzeit umgesetzt. In Nordrhein-Westfalen werden fallweise je Kläranlage und Vorfluter die Einleitanforderungen auf Basis einer Mischungsrechnung abgeleitet. Im vorgestellten Projekt werden sehr weitgehende Anforderungen bis i. M. 0,1 mg/l P_{ges} für den Raum Berlin / Brandenburg erörtert (Kapitel „Projekt Zero-P“).

Tabelle 1: Verschärfung der Anforderungen im Zuge der Umsetzung der WRRL, Beispiele aus den Maßnahmenprogrammen im Vergleich zur Abwasserverordnung

GK	AbwV (2004)	Baden-Württemberg, 1. Stufe, Bewirtschaftungsplan Neckar (UM BW, 2015)	Hessen, Maßnahmenprogramm 2015 - 2021 (HMuKLV, 2015)	Bayern (LfU, Merkbl. Nr. 4.4/22, 03/2018)			
				innerhalb P-Handlungsgebiet	außerhalb P-Handlungsgebiet		
1	-	-	-	-			
2	-	-	2 mg/l P _{ges} als ÜW 1 mg/l P _{ges} als JM	-	2 mg/l P _{ges} (ab 2000 EW, MV < 10)	-	2 mg/l P _{ges} (ab 2000 EW, MV < 110)
3	-	0,8 mg/l P _{ges} als JM		1 mg/l P _{ges}	2 mg/l P _{ges} (30 < MV < 110)	1 mg/l P _{ges} (MV < 30)	
4	2 mg/l P _{ges}	0,5 mg/l P _{ges} als JM	mit bestehenden Filteranlagen 0,3 mg/l P _{ges} als JM 0,7 mg/l P _{ges} als ÜW 0,5 mg/l P _{ges} als MM (24 h-MP) 0,2 mg/l oPO ₄ als 24 h-MP (auch einzelne Anlagen GK 4) 0,4 mg/l P _{ges} als ÜW 0,2 mg/l P _{ges} als MM (24 h-MP)	1 mg/l P _{ges}	2 mg/l P _{ges}	1 mg/l P _{ges} (MV < 30)	
5	1 mg/l P _{ges}	0,5 mg/l P _{ges} als JM		0,5 mg/l P _{ges}	1 mg/l P _{ges}	0,5 mg/l P _{ges} (MV < 15)	

In der Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2016) werden als Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potenzial für Fließgewässer je nach Gewässertyp beim Orthophosphat Werte $\leq 0,05$ bis $0,2$ mg/l und beim P_{ges} Werte $\leq 0,1$ bis $0,3$ mg/l gefordert. Für den sehr guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potenzial liegen die Werte beim Orthophosphat $\leq 0,02$ mg/l und bei P_{ges} bei $\leq 0,05$ mg/l.

Herausforderungen und Lösungsansätze für die weitestgehende P-Elimination

Für die Phosphorelimination auf Kläranlagen stehen grundsätzliche bewährte Verfahren zur vermehrten biologischen Phosphorelimination (BIO-P) und chemischen Phosphorelimination (CHEM-P) zur Verfügung. Die Verfahren werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert, es wird auf die Fachliteratur verwiesen (z. B. DWA, 2011; Bever, 2002). Das Arbeitsblatt DWA-A 202, Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser, wird aktuell überarbeitet und beinhaltet in der neuen Fassung alle anerkannten Verfahren der Phosphorelimination, inkl. der biologischen P-Elimination und vor allem auch der weitergehenden P-Elimination aus Abwasser. Der Gelbdruck ist für 2023 vorgesehen (DWA, 2023).

Die Einhaltung der Überwachungswerte allein durch die vermehrte biologische Phosphorelimination ist insbesondere bei weitergehenden Anforderungen nicht möglich. Die vermehrte biologische Phosphorelimination kann jedoch wesentlich zur Einsparung von Fällmitteln beitragen. Eine Auswertung für 55 Kläranlagen ergab im Mittel eine Fällmitteleinsparung von ca. 50 % bei den Anlagen mit BIO-P gegenüber

den Anlagen mit ausschließlicher chemischer Phosphorelimination. Dies bezieht sich auf Anlagen mit bisher üblichen Ablaufanforderungen.

Für die weitergehenden Anforderungen an die Phosphorelimination gilt es die Leistung und Effizienz der Verfahren zu steigern. Um eine weitgehende Elimination des Gesamtphosphors zu erzielen, muss sowohl eine weitgehende Fällung mit Überführung des gelösten Phosphors in ungelöste Verbindungen als auch eine sehr gute Feststoffabscheidung erreicht werden.

Im Jahr 2022 wurde der Einfluss der Weltpolitik und internationaler Handelsketten für die Aufgabe der Phosphorelimination auf Kläranlagen besonders deutlich. In Folge des Angriffskriegs der Russischen Föderation auf die Ukraine ergab sich eine massive Verknappung und Verteuerung der Fällmittel für die chemische Phosphorelimination. Das Verfahren der Bio-P und die Effizienzsteigerung der chemischen Phosphorelimination rückten auch dadurch weiter in den Fokus.

Nachfolgend werden ausgewählte wesentliche Aspekte bei der weitergehenden Phosphorelimination erörtert.

Check-Up der Phosphorelimination

Sowohl zur grundsätzlichen Überprüfung und Optimierung der Phosphorelimination als auch für die Ertüchtigung im Fall weitergehender Anforderungen empfiehlt sich bei Bestandsanlagen eine systematische Analyse der Ist-Situation zur Ableitung von Optimierungsansätzen und einem etwaigen Erweiterungsbedarf. Wesentliche Schritte bilden die Auswertung der aktuellen Betriebsdaten, die Überprüfung der Verfahrensführung, Anlagentechnik und MSR-Konzepte und ggf. ergänzende Laborversuche und Messprogramme.

Auswertung der aktuellen Betriebsdaten

- Auswertung Zu- und Ablaufwerte (Phosphorfraktionen, Schwankungen der Konzentrationen und Frachten, Spitzenfaktor f_P , Feststoffgehalt im Ablauf, Verhältniswerte $P_{\text{ges}}/PO_4\text{-P}$ im Ablauf), gebundener Phosphor im Schlamm
- Aufstellung der Phosphorbilanz inkl. Rückbelastungen
- Prüfung der Milieubedingungen in den Verfahrensstufen (pH-Werte und Säurekapazität vor und nach der Fällung, anaerobe Bedingungen bzw. Nitratgehalte im Becken zur vermehrten biologischen Phosphorelimination)
- Ermittlung maßgebender Kenngrößen der chemischen P-Elimination (β -Wert, K_P) und vermehrten biologischen P-Elimination (Kontaktzeit, Substratverfügbarkeit), Vergleich zu Bemessungs- / Erfahrungswerten
- Bewertung des Fällmittelverbrauchs im Vergleich zum rechnerischen Bedarf

Überprüfung der Verfahrensführung, Anlagentechnik und MSR-Konzepte

- Dosierstelle und Einmischung des Fällmittels zur chemischen P-Elimination
- Einsatz der Dosiertechnik, Leistung und Betriebsweise der Dosierpumpen
- Automatisierungskonzept zur Steuerung / Regelung
- Einsatz der Messtechnik, Überprüfung der Messbereiche und Genauigkeit für weitergehende Anforderungen, Ersatzwertstrategie
- Feststoffrückhalt und weitergehender Suspensarückhalt (s. a. Abschnitt „Suspensa-Rückhalt bei der weitergehenden Phosphorelimination“)
- Integration der Prozesse in die Verfahrenskette der Abwasser- und Schlammbehandlung

Laborversuche und Messprogramme

- Messungen zur Schließung der Phosphorbilanz
- Ermittlung des refraktären Phosphors (s. a. Abschnitt „Phosphorfraktionen im Abwasser: gelöster reaktiver Phosphor, refraktärer Phosphor und partikulärer Phosphor“)
- Versuche zur Phosphatrücklösung und -aufnahme zur Bewertung der vermehrten biologischen Phosphorelimination
- Tests zur Untersuchung der Wirksamkeit unterschiedlicher Fällmittel

Aufbauend auf dem Check-Up können Optimierungsmaßnahmen am Bestand abgeleitet, erforderliche Erneuerungen und Erweiterungen geplant und umgesetzt werden.

Phosphorfraktionen im Abwasser: gelöster reaktiver Phosphor, refraktärer Phosphor und partikulärer Phosphor

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit und Maßnahmenableitung empfiehlt sich im Zuge der Auswertung der Betriebsdaten bzw. ergänzender Messprogramme u. a. die Bestimmung der Phosphorfraktionen. Bei Forderung sehr geringer Ablaufwerte sollte auch der refraktäre Phosphor (Abkürzung snrp oder GUP) ausgewertet werden. Die Ermittlung erfolgt indirekt aus der Differenz zwischen dem gesamten gelösten Phosphor und dem gelösten Orthophosphat-Phosphor. Diese Fraktion kann durch Fällung nicht gezielt eliminiert werden. Häufig werden für diese Fraktion Konzentrationen von 0,1 mg/l, aber in Einzelfällen auch bis zu 0,3 mg/l analysiert.

Forderungen für P_{ges} von beispielsweise 0,2 mg/l, wie jüngst im EU-Parlament diskutiert, sind damit auch bei vollständiger Elimination des fällbaren Anteils und vollständigem Rückhalt des gebundenen Phosphors ggf. nicht einhaltbar.

Suspensa-Rückhalt bei der weitergehenden Phosphorelimination

Zur Erzielung niedriger P_{ges} -Ablaufkonzentrationen wird eine sehr gute Feststoffabscheidung erforderlich. Beispielsweise resultieren aus 5 mg/l AFS bereits 0,15 mg/l gebundener Phosphor bei 3 % Phosphorgehalt im Schlamm. Der gebundene Phosphor wie auch der refraktäre Phosphor ist bei der Auslegung und Verfahrensführung bei weitergehenden Anforderungen an P_{ges} neben dem fällbaren Anteil zu beachten.

Für weitergehende Anforderungen mit geforderten Überwachungswerten unter 0,5 mg/l kommen zur Feststoffabscheidung über die Nachklärung hinaus Raumfilter, Mikrosiebe und Tuchfilter zum Einsatz. Weiterhin erzielen Membranverfahren einen nahezu vollständigen Feststoffrückhalt, mit dem alleinigen Ziel der P-Elimination sind diese aufgrund der Kosten in Deutschland derzeit jedoch nicht im Einsatz.

Vor Planung und Umsetzung einer zusätzlichen Stufe zum Suspensarückhalt empfiehlt sich die Überprüfung von Möglichkeiten zur Ertüchtigung der Nachklärung hinsichtlich folgender Punkte:

- Betriebsdatenauswertung, ggf. Messprogramm, Überprüfung der Kennwerte der Nachklärung
- Senkung ISV durch Optimierung der Belebung (Belastungssituation)
- Prüfung Rücklaufschlammverhältnis und Maßnahmen in der Kanalisation zur Reduktion Q_m
- Optimierung der Gestaltung des Einlaufbauwerks, v. a. Einlaufhöhe, ggf. Strömungssimulation
- Optimierung Gestaltung Ablauf, u. a. Schwimmschlammräumung, Tauchwand
- Aufstockung, Prüfung Erweiterung, ggf. temporärer Polymereinsatz

Eine leistungsfähige Nachklärung ist auch Voraussetzung zur Vermeidung unzulässig hoher Feststoffbeladungen und übermäßiger, energetisch aufwendiger Spülungen einer nachgeschalteten Filteranlage. Synergieeffekte bestehen insbesondere zur 4. Reinigungsstufe mit Filteranlagen, bei der sich planerisch die Möglichkeit einer Nachfällung integrieren lässt.

Fällmitteleinsatz bei der weitergehenden Phosphorelimination

Sowohl der absolute als auch der spezifische Fällmittelbedarf nimmt mit weitergehenden Anforderungen bei der chemischen Phosphorelimination zu.

Abbildung 2 zeigt Erfahrungs- und Literaturwerte zum β -Wert in Abhängigkeit der PO_4 -P-Konzentration nach der Fällung. Erfahrungswerte und Literaturangaben für den Fällmittelverbrauch liegen für den Bereich bis etwa 0,3 mg/l PO_4 -P vor, den die Emissionsanforderungen der Abwasserverordnung und verschärfte Anforderungen der

Vergangenheit (z. B. Dringlichkeitsprogramm an der Ostsee, Anforderungen am Bodensee) abdecken.

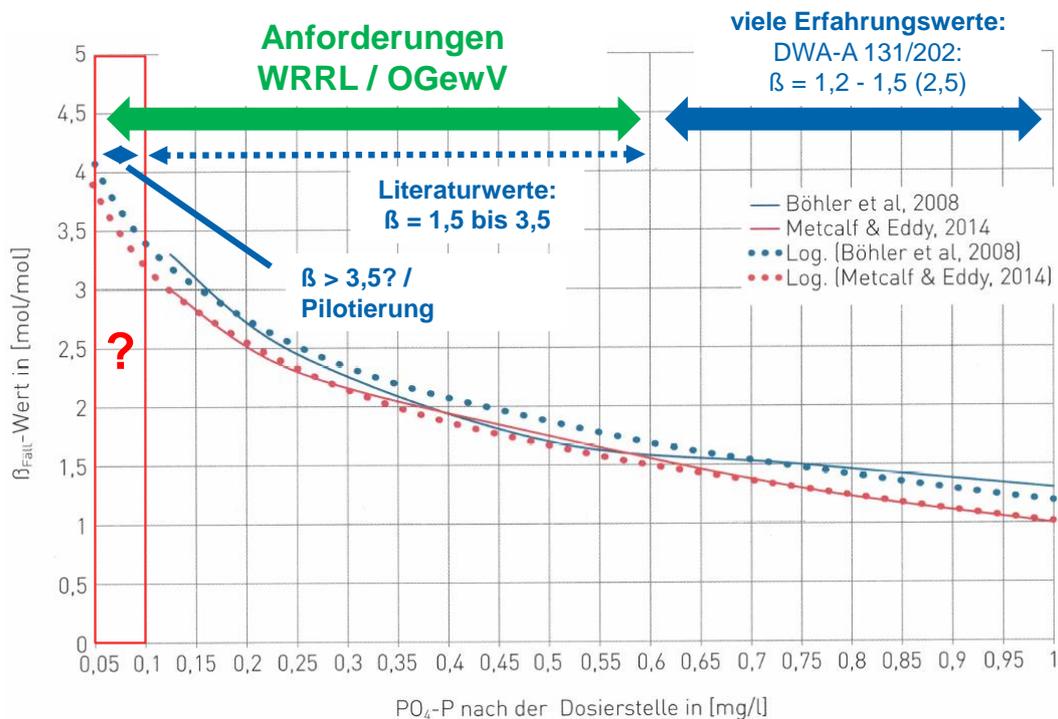


Abbildung 2: Erfahrungs- und Literaturwerte zum β -Wert in Abhängigkeit der $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration nach der Fällung (bearbeitet nach DWA, 2019)

Aus der Immissionsbetrachtung und aktuellen Anforderungen resultieren erforderliche $\text{PO}_4\text{-P}$ -Ablaufwerte bis unterhalb 0,1 mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$. Dies wird entweder als direkter Grenzwert für $\text{PO}_4\text{-P}$ formuliert oder ergibt sich aus Forderungen für P_{ges} mit Berücksichtigung des gebundenen Phosphors und refraktären Phosphors. Für diesen Bereich liegen noch wenige Erfahrungen vor. Für die Auslegung der Dosiertechnik empfiehlt sich in diesem Bereich von höheren β -Werten als bisher auszugehen, mindestens entsprechend der dargestellten extrapolierten Werte, und eine Staffelung bzw. Erweiterbarkeit vorzusehen.

Aspekte der 2-Punkt-Fällung

Für die weitergehende P-Elimination gewinnt die zweistufige Fällung zur Erzielung eines effizienten Fällmitteleinsatzes an Bedeutung. Auswertungen und eigene Laboruntersuchungen zeigen, dass mit einer zweistufigen Fällung im Vergleich zur einstufigen Fällung eine deutlich reduzierte Fällmitteldosierung möglich ist (EAWAG, 2008; Wulf, 2021).

Abbildung 3 zeigt den rechnerischen Fällmittelverbrauch einer 1- und 2-stufigen Fällung für einen identischen Überwachungswert von 0,5 mg/l mit und ohne

nachgeschalteter Flockungsfiltration für zwei Anlagenkonstellationen. Ohne Flockungsfiltration bedingt dies Reinigungsziel eine sehr leistungsfähige Nachklärung.

Im Beispiel ergibt sich eine rechnerische Fällmittlersparnis von 27 bis 33 %. Bei der Simultanfällung wurde gemäß Abbildung 2 ein β -Wert von 2 angesetzt, um einen Betriebsmittelwert von 0,3 mg/l bzw. Überwachungswert von 0,5 mg/l zu erzielen. Aus diesem β -Wert in Verbindung mit dem weitgehenden Reinigungsziel resultiert bei der 1-stufigen Fällung der vergleichsweise hohe Fällmittelverbrauch im Vergleich zur 2-stufigen Fällung. Selbstverständlich rechtfertigt diese Fällmittlersparnis ohne vorherige intensive Prüfung nicht den Bau und Betrieb einer nachgeschalteten Filtration, wenn das Reinigungsziel allein mit einer Simultanfällung erreicht werden könnte. Bei entsprechend vorhandener Anlagenkonstellation zeigen die exemplarischen Berechnungen und der Vergleich aber das Potential zum optimierten Fällmitteleinsatz einer zweistufigen Fällung auf. Bei der Optimierung des Fällmitteleinsatzes sind die Feststoffbeladung und resultierenden Spülungen bei den Filteranlagen zu berücksichtigen.

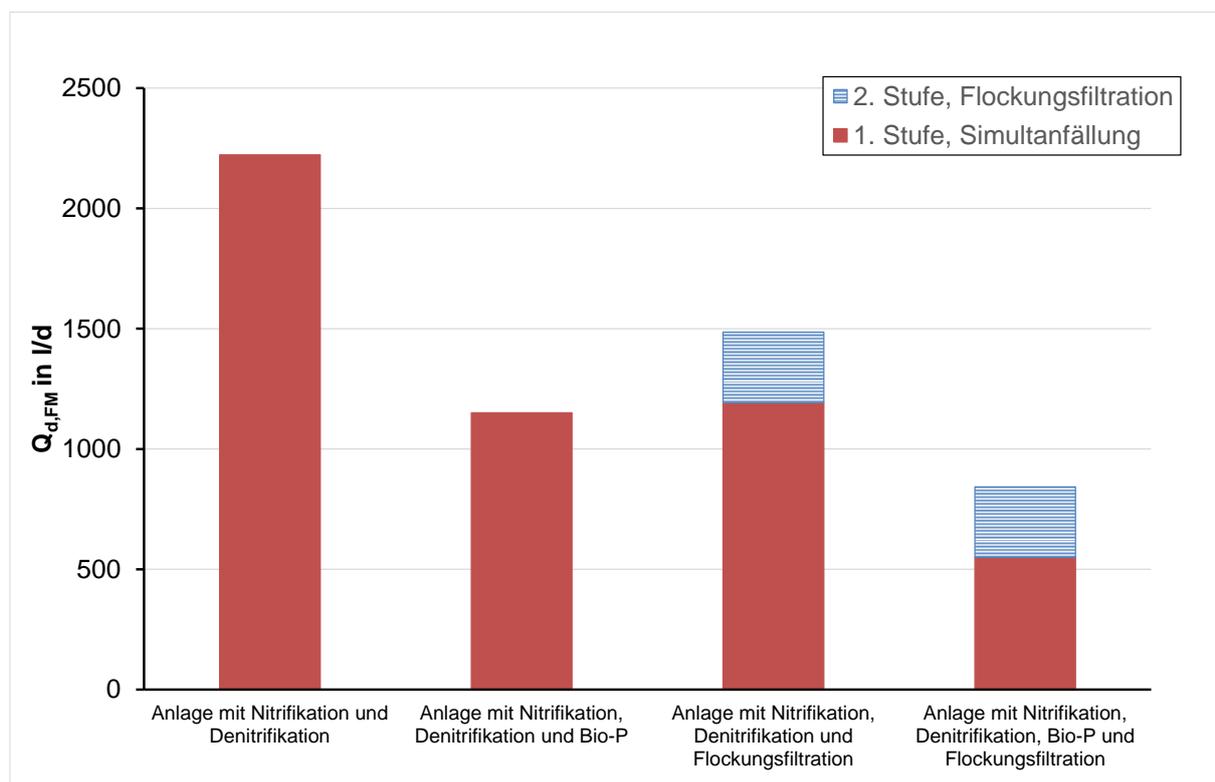


Abbildung 3: Exemplarischer Vergleich der rechnerisch erforderlichen Fällmittelmenge einer 1- und 2-Punkt-fällung für einen P_{ges} -Überwachungswert 0,5 mg/l für verschiedene Anlagenkonstellationen

Projekt Zero-P

Zur Untersuchung der weitestgehenden P-Elimination haben Nordic Water GmbH, TU Berlin und die Emscher Wassertechnik GmbH gemeinsam das Projekt Zero-P durchgeführt. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „KMU-innovativ“ gefördert.

Für die Untersuchungen wurde auf der Kläranlage Brandenburg-Briest in Brandenburg an der Havel eine großtechnische Pilotanlage zur Flockungsfiltration mittels kontinuierlichem Sandfilter errichtet. Die Fällmitteleinmischung erfolgte mit einem statischen Mischer in der Rohrleitung, ergänzt um einen Flockungstank.

Als exemplarische Zielwerte wurden dabei unter anderem im Raum Berlin / Brandenburg für Kläranlagen diskutierte Ablaufwerte untersucht. Es werden Ablaufwerte von bis zu $\leq 0,03 \text{ mg/l PO}_4\text{-P}$ und $< 0,1 \text{ mg/l P}_{\text{ges}}$ als Jahresmittel bzw. $< 0,3 \text{ mg/l P}_{\text{ges}}$ in der qualifizierten Stichprobe gefordert.

Wesentliche Untersuchungsziele bildeten die Untersuchung der Verfahrenstechnik Nachfällung und Sandfiltration (Machbarkeit, Leistungsgrenzen und Effizienz), die Erprobung von Automatisierungslösungen (Steuerung / Regelung, Einbindung online-Messtechnik) und das Potential zur Phosphorrückgewinnung.



Abbildung 4: Versuchsanlage auf der Kläranlage in Brandenburg

Anhand der Versuche konnte gezeigt werden, dass Phosphat-Konzentrationen von 0,03 mg/l im Kläranlagenablauf durch eine automatisierte Nachfällung und weitgehender Suspensa-Rückhalt grundsätzlich erreicht werden können. Große Herausforderungen bestanden bei der erforderlichen Genauigkeit der Online-Messtechnik, die zur Überprüfung des Zielwertes und für eine Automatisierungslösung zum effizienten Fällmitteleinsatz einzubinden ist. Für den Abwasserbereich sind keine großtechnisch bewährten Online-Analysatoren mit ausreichender Genauigkeit für die angestrebten Phosphat-Konzentrationen verfügbar. Es wurden unterschiedliche Automatisierungslösungen mit Steuerung und Regelung der Fällmitteldosierung erprobt und vor dem Hintergrund der Messgenauigkeit der online-Messtechnik bewertet. Mit einer reinen Steuerung konnten Ablaufwerte zwischen 0,05 - 0,02 mg/l PO₄-P bei β -Werten bis 7 erzielt werden. Mit der Regelung konnte der Zielwert von 0,03 mg/l PO₄-P sicher eingehalten werden, jedoch stellten sich zeitweise wesentlich höhere β -Werte ein. Als limitierender Faktor für den effizienten Fällmitteleinsatz und eine präzise Einhaltung des Zielwertes zeigte sich hierbei die Analysetechnik. Von den eingesetzten Analysatoren erwies sich das Analysegerät mit dem Molybdänblau-Verfahren im Vergleich zum Gerät mit Gelbmethode als besser geeignet. Pflanzenverfügbarkeitstests zeigten, dass der im Tertiärschlamm gebundene Phosphor für die Pflanzen verfügbar ist und somit ein Potential zur landwirtschaftlichen Nutzung besteht. Dies deckt sich mit Ergebnissen des DBU-Projektes P-Rec, Phosphorrückgewinnung auf Kläranlagen mittels gezielter Nachfällung und Fällschlammseparation, in dem dies aktuell explizit herausgearbeitet wird. Im Vergleich zu weiteren Erfahrungswerten für den Fällmittelverbrauch bzw. β -Werten auf großtechnischen Anlagen ergaben sich im Projekt höhere Werte. Als ursächlich werden die eingesetzte online-Messtechnik bei der Regelung und die Spezifikation des statischen Mischers zur Fällmitteleinmischung gesehen. Mit weiterer Verdünnung des Fällmittels wurden niedrigere Fällmittelverbräuche erzielt.

Trotz genereller Erreichbarkeit von PO₄-P-Werten im Ablauf von 0,03 mg/l ist die Verhältnismäßigkeit einer solchen Anforderung abzuwägen. Zum Beispiel bei einem erprobten, ebenfalls noch sehr niedrigen Zielwert von 0,05 mg/l PO₄-P ergab sich ein signifikant niedriger Fällmittelbedarf, verbunden mit einer geringeren Aufsatzung des Ablaufs.

Fazit

Auch für weitergehende Anforderungen an die P-Elimination mit Umsetzung der WRRL bzw. OGewV stehen auf Kläranlagen grundsätzlich bewährte Verfahren zur Verfügung. Für die verschärften Anforderungen gilt es jedoch die Leistung und Effizienz der Verfahren auszuschöpfen. Zur Erzielung niedriger P_{ges}-Ablaufwerte sind sowohl eine weitgehende Phosphatfällung als auch ein weitgehender Suspensarückhalt zu erwirken.

Bei der chemischen Fällung kommt u. a. der differenzierten Betrachtung der Phosphorfraktionen mit besonderem Augenmerk auf den refraktären Phosphor, der Einmischung des Fällmittels und der Mehrpunktfällung sowie der Automatisierungslösung und eingebundenen online-Messtechnik für niedrige Messbereiche eine besondere Rolle zu. Erfahrungen auch für Ablaufanforderungen von $\leq 0,03$ mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ und $< 0,1$ mg/l P_{ges} als Jahresmittel wurden beispielsweise im jüngst abgeschlossenen BMBF-Projekt Zero-P gewonnen. Wird eine signifikante Konzentration refraktären Phosphors ermittelt, empfiehlt sich dazu die Abstimmung mit der überwachenden Behörde. Ziel sollte in dem Fall sein, dass die Fraktion bereits bei der Formulierung der Anforderung berücksichtigt wird oder dass die Werte des refraktären Phosphors bei den erzielten P_{ges} -Ablaufwerten zum Abzug gebracht werden können. Für die weitergehende Suspensa-Entnahme gilt es die Ertüchtigung der Nachklärung zu prüfen und ggf. Filteranlagen zu ergänzen. Bei der planerischen Lösung sind für zielgerichtete Investitionen - wie stets - Investitions- und Betriebskosten zu betrachten.

Literatur

- BGBl. I S. 1108 (2004), zuletzt geändert durch BGBl. I S. 87 (2022) Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV)
- BGBl. I S. 1373 (2016), zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2873 (2020) Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV)
- Bever J. et al. (2002) Weitergehende Abwasserreinigung, Vulkan-Verlag Gmb, ISBN-10 3835665278
- DWA (2019) Phosphorelimination Optimierung auf Kläranlagen, Hrsg. DWA-Landesverband Baden-Württemberg, Autoren Baumann P. und Jedele K., Heft 14, ISBN 978-3-88721-815-7, 2019
- DWA (2011) Arbeitsblatt DWA-A 202 Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser
- DWA (unveröffentlicht) Überarbeitetes Arbeitsblatt DWA-A 202 Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser
- EAWAG (2008) Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen“, Gutachten im Auftrag der Europa Fachhochschule Fresenius und des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG)
- Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik

Umweltbundesamt (2022) Berichtsportal WasserBLICK, Bundeanstalt für Gewässerkunde, Bewirtschaftungspläne für die Periode 2022 bis 2027

Wulf P. (2021) Erfahrungen mit der weitestgehenden Phosphorelimination an Fallbeispielen – Planung, Umsetzung und Betriebserfahrungen, DWA WebSeminar Neues zur Phosphorelimination in Kläranlagen, am 19./20. Mai 2021

Wulf P., Haber K., Fuhrmann T., Guggenberger T., Winandi S., Anger J. (2023) Zero-P: Weitestgehende Phosphorelimination auf Kläranlagen über eine nachgeschaltete Filtration für den Schutz von Gewässern und die Rückgewinnung von Phosphor, Sachbericht Teil 2 – Ergebnisbericht, Förderkennzeichen 02WPL1445A ff.

Anschrift der Verfasser:

Peter Wulf

Emscher Wassertechnik GmbH
Brunnenstraße 37
D-45128 Essen

Tel. +49 (0) 201 3610 110
Fax: +49 (0) 201 3610 100
E-Mail: wulf@ewlw.de

Kristina Haber

Emscher Wassertechnik GmbH
Brunnenstraße 37
D-45128 Essen

Tel. +49 (0) 201 3610 355
Fax: +49 (0) 201 3610 100
E-Mail: haber@ewlw.de

Wasserwiederverwendung durch Heizen und Kühlen von Gebäuden

Johannes Dommer

HUBER SE

Erasbach bei Berching

Einleitung

Um die Energiewende erfolgreich zu gestalten, ist eine Abkehr von fossilen Energieträgern mehr und mehr unabdingbar. Ein wichtiger Baustein der Energiewende ist die Wärmewende, die Umstellung der Bereitstellung von Wärme, also das Heizen und Kühlen von Gebäuden sowie die Bereitstellung von Warmwasser, auf nachhaltige Technologien. Im Jahr 2023 werden in Deutschland noch ca. 75 % aller Häuser und Wohnungen mit fossilen Energieträgern geheizt (BMWK, 2023). Neben der Erzeugung von Wärme durch Verbrennung von Energieträgern rückt auch die Wiederverwendung von Restwärme aus bereits genutzten Medien immer weiter in den Fokus, um schrittweise die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren. Abwasser bringt hier optimale Voraussetzungen mit, da Abwasser im Sommer wie im Winter ein relativ gleichbleibend hohes Temperaturniveau (ca. 10 – 15 °C) besitzt und eignet sich deshalb als hervorragende Wärmequelle für Wärmepumpen. Ein weiterer Vorteil dieser Form der Wärmewiederverwendung ist, dass sich Wärmequelle und Wärmeverbraucher in unmittelbarer Umgebung befinden, nämlich vorwiegend im urbanen Raum.

Grundlagen und theoretisches Potential

Möglichkeiten der Wärmebereitstellung

Seit jeher ist der Mensch auf Wärme angewiesen. Besonders in der kälteren Jahreszeit benötigt der Mensch zum Überleben Wärme aus äußeren Quellen. Während in der älteren Vergangenheit die Sonne, die Körperwärme von anderen Lebewesen, oder der Energieinhalt von Brennstoffen wie Holz oder leichter zugängliche Kohle genutzt wurde, hat sich seit der industriellen Revolution die Nutzung klar in Richtung fossiler Energieträger, wie Kohle, Öl oder Erdgas verschoben. Um die Wärmewende hin zu erneuerbaren Energien zu forcieren, ist es nötig diesen Trend umzukehren und die Wärme aus alternativen, nachhaltigen Quellen zu nutzen. Mittlerweile ist das System Wärmepumpe in Kombination mit einer adäquaten Gebäudedämmung so weit ausgereift, dass hiermit die Raumtemperatur eines immer größeren Teils der Wohnhäuser bzw. Wohnungen auf angenehmer Temperatur gehalten werden kann. Im Normalfall dient die Umwelt für Wärmepumpen als Wärmequelle, beispielsweise durch die Nutzung von Erdwärme, Umgebungsluft oder Solewasser. In diesem Zusammenhang ist als optimale Wärmequelle auch Abwasser oder auch bereits (teil-)gereinigtes Abwasser in Kläranlagen zu nennen, da hier das Temperaturniveau ganzjährig relativ hoch ist und somit optimal für eine wirtschaftliche Jahresarbeitszahl ist.

Grundgleichungen der Wärmeübertragung

Um den Prozess der Wärmeübertragung mathematisch zu beschreiben sind zwei Grundgleichungen vonnöten.

Die Gleichung für die Wärmemenge bzw. den Wärmestrom eines betrachteten Mediums lautet wie folgt:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{bzw.} \quad \dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Hierbei ist

Q die Wärmemenge bzw. \dot{Q} der Wärmestrom

m die Masse bzw. \dot{m} der Massenstrom des betrachteten Mediums

c_p die spezifische Wärmekapazität des betrachteten Mediums und

ΔT die Temperaturdifferenz.

Der übertragene Wärmestrom in einem Wärmetauscher wird folgendermaßen bestimmt:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_{m, \log}$$

Hierbei ist

\dot{Q} der Wärmestrom

k der Wärmedurchgangskoeffizient

A die Austauschfläche und

$\Delta T_{m, \log}$ die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz.

Die spezifische Wärmekapazität c_p , der Wärmedurchgangskoeffizient k und die Austauschfläche A dieser Gleichungen sind Stoffkonstanten bzw. bauartbedingt vom betrachteten Wärmetauscher.

Die Masse m bzw. der Massenstrom \dot{m} und die Temperaturniveaus sind abhängig vom jeweiligen Projekt.

Das führt zu zwei unterschiedlichen Anwendungsfällen.

- Große Wassermengen bei geringer Temperaturdifferenz (z.B. Kommunale Anwendungen oder Wärmeentnahme aus Oberflächengewässern)
- Geringe Wassermengen bei hoher Temperaturdifferenz (z.B. Industrieanwendungen oder Krankenhäuser)



Abbildung 1: Potentielle Orte der Wärmerückgewinnung: Wasser aus der Kläranlage oder aus Oberflächengewässern

Theoretisches Potential von Wasser

Folgendes Rechenbeispiel verdeutlicht den Energieinhalt von Wasser:

1 m³ des in Deutschland hauptsächlich verwendeten Erdgases (H-Gas) besitzt einen Brennwert von ca. 10,0 bis 13,1 kWh/m³ (Bundesnetzagentur, 2023). Als Vergleichswert für das Rechenbeispiel wird ein Brennwert von 10,5 kWh/m³ herangezogen.

Zum Vergleich wird 1 m³ Wasser herangezogen. Wird diese Menge Wasser um 9 K abgekühlt, wird die Wärmemenge von 10,44 kWh frei, die anderweitig – beispielsweise zum Heizen - genutzt werden kann.

In der Praxis wird eine Abkühlung von 9 K meist nicht realisierbar sein. Je nach projektspezifischen Bedingungen kann kommunales Abwasser typischerweise um ca. 2 – 5 K abgekühlt werden. Bei einer angenommenen Abkühlung von 3 K werden also 3 m³ Abwasser benötigt, um die Energiemenge zu erreichen, die im Mittel bei Verbrennen von 1 m³ Erdgas frei wird.

Rahmenbedingungen für Wirtschaftlichkeit von Wärme aus Abwasser

Um die Wärme aus Abwasser in den Kreislauf der Wärmepumpe und im Anschluss in die Wohnräume zu bringen, wird eine technische Maschine benötigt. Diese muss in der Lage sein, die Wärme aus einem unsauberem Medium Abwasser auf ein sauberes Medium zu übertragen, ohne, dass auf lange Sicht der Wärmeübergang durch beispielsweise Fouling und damit einhergehend der Wirkungsgrad der Maschine abnimmt. Damit ein Heizungssystem mit einer Wärmepumpe, die als Wärmequelle Abwasser nutzt, wirtschaftlich betrieben werden kann, sind folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

Tabelle 1: Rahmenbedingungen für Wirtschaftlichkeit zur Nutzung von kommunalem Abwasser

Ausreichend vorhandenes Abwasser (Trockenwetter im Kanal)	$Q_{\min} = 10 - 15 \text{ L/s}$
Temperaturniveau des Abwassers	$T_{\min} = \text{ca. } 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Minimaler Wärme-/Kältebedarf	$P_{\text{Wärme/Kälte}} \geq 100 \text{ kW}$
Niedrige Heizungsvorlauftemperaturen (z.B. bei Verwendung von Fußbodenheizung)	

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, bietet kommunales Abwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen eine sehr gute Alternative. Für Anwendungen in der Industrie bzw. bei projektspezifischen Besonderheiten können die in Tabelle 1 genannten Werten auch abweichen.

Beispielrechnungen

Die nachfolgenden Beispiele sollen dazu dienen, die Dimensionen hinsichtlich der Energie, die in Abwasser gespeichert werden kann, greifbar zu machen.

Stadt München

Ab Januar 2024 tritt in Deutschland das „Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze“ in Kraft, was Kommunen verpflichtet eine Wärmeplanung zu erarbeiten. Immer mehr Kommunen machen sich aufgrund dessen Gedanken, wie die Wärmewende gelingen kann. Die Stadt München stellt beispielsweise bereits Kartenmaterial zur Verfügung, aus dem das Potential zur Abwasserwärmenutzung ersichtlich ist (Geodatenservice München, 2023). Im Ballungsraum um die Stadt München wird das Abwasser in wenigen großen Kläranlagen behandelt. Die beiden größten Kläranlagen sind die Kläranlage Gut Großlappen und Kläranlage Gut Marienhof jeweils im Norden der Stadt. Auf diesen beiden Kläranlagen fallen bei Trockenwetterzulauf 6,6 m³/s bzw. 4,0 m³/s Abwasser an.

Bei einer Temperaturentnahme von 4 K aus dem TW-Zulauf der Kläranlage Gut Großlappen (6,6 m³/s) ließe sich ein Wärmestrom von $\dot{Q}_{therm} = 30,73 \text{ kWh/s}$ entnehmen. Bei Vergleich mit dem mittleren Brennwert von H-Gas von 10,5 kWh/m³ (vgl. Abschnitt „Theoretisches Potential von Wasser“) würde das eine Einsparung von knapp 3 m³/s Erdgas bedeuten. Im Zeitraum von einem Tag entspräche das einer beachtliche Erdgaseinsparung von ca. 253.000 m³/d. Dies entspricht bei einem CO₂-Emissionsfaktor von Erdgas von 56,1 tCO₂/TJ (Umweltbundesamt, 2016) einer Einsparung von ca. 536 t CO₂ pro Tag.

Heizkostenvergleich Mehrparteienhaus

Auf kleinerem Maßstab kann ein typisches Mehrparteienhaus herangezogen werden. Das Beispielhaus wird von 30 Parteien bewohnt, ist ein Neubau (BJ: 2019, ca. 55 kWh/(m² a)) und weist einen jährlichen Energiebedarf von rund 135.000 kWh/a auf.

In der Abbildung 2 ist erkennbar, dass sich durch den Einsatz von Abwasser als Wärmequelle relativ niedrige Arbeitspreise erzielen lassen. Die Jährlichen Betriebskosten liegen aufgrund der Stromkosten (Strompreisdeckel Wärmepumpe: 28 ct/kWh) weit über den Betriebskosten der Öl- und Gasheizung, jedoch liegen die Brennstoffkosten bei 0 €, da Abwasser kostenlos ist. Daraus ist ersichtlich, dass sich jährlich neben großen Mengen CO₂ mehrere Tausend Euro Heizkosten sparen lassen.

Energiebedarf (Mehrparteienhaus, Neubau, 30 Parteien):	135.000 kWh/a		
	Heizöl	Erdgas	AWT RoWin
Brennstoffkosten [ct/kWh] (Stand 13.11.2023)	11,06	8,5	0,0
Brennstoffkosten pro Jahr [€/a]	14.932,65	11.475,00	0,00
Betriebskosten [€/a]	300,00	300,00	8.439,20
Wartung [€/a]	1.600,00	1.250,00	750,00
Ges. Heizkosten pro Jahr [€/a]	16.832,65	13.025,00	9.189,20
Arbeitspreis [ct/kWh]	12,47	9,65	6,81
CO ₂ -Äquivalent [kg/a]	35.964	27.265	
Betriebszeit Jahre [a]	20		
Ersparnis bei Nutzung von Abwasser auf 20 Jahre [€]	152.870,00	76.716,00	

Abbildung 2: Beispielrechnung Heizkosten eines modernen Mehrparteienhauses

In der Berechnung wurden Brennstoff- und Stromkosten mit Stand November 2023 verwendet, d.h. Preissteigerungen von Heizöl und Erdgas, beispielsweise durch eine schrittweise Erhöhung der CO₂-Abgabe für diese fossilen Energieträger sind hierbei nicht berücksichtigt.

Das Verfahren HUBER ThermWin

Die Nutzbarmachung von Energie aus Abwasser kann mittels dem HUBER ThermWin-Verfahren erfolgen. Im ersten Schritt wird über ein Entnahmebauwerk ein Teilstrom des Rohabwassers aus dem Abwasserkanal abgeleitet und mit einer HUBER Schachtsiebanlage ROTAMAT® RoK4 grob vorgereinigt. Die in der Siebanlage zurückgehaltenen Feststoffe werden vertikal nach oben gefördert und abstromseitig in die Kanalisation zurückgegeben. Das gesiebte Abwasser wird über die im Entnahmebauwerk positionierte Pumpentechnik auf den oberirdisch aufgestellten Abwasserwärmetauscher RoWin geleitet.

Durch eine Durchströmung im Freispiegel werden die Voraussetzungen für stabile hydraulische Verhältnisse und einen kontrollierten Wärmeübergang geschaffen. Im HUBER Abwasserwärmetauscher RoWin erfolgt die Übertragung der Wärmeenergie auf ein Kühlmedium (i.d.R. Wasser). Dieses wiederum transportiert die Energie zu einer Wärmepumpe.

Das abgekühlte Abwasser fließt unter gleichzeitiger Mitnahme des Siebgutes der HUBER Schachtsiebanlage ROTAMAT® RoK4 zurück in den Abwasserkanal.

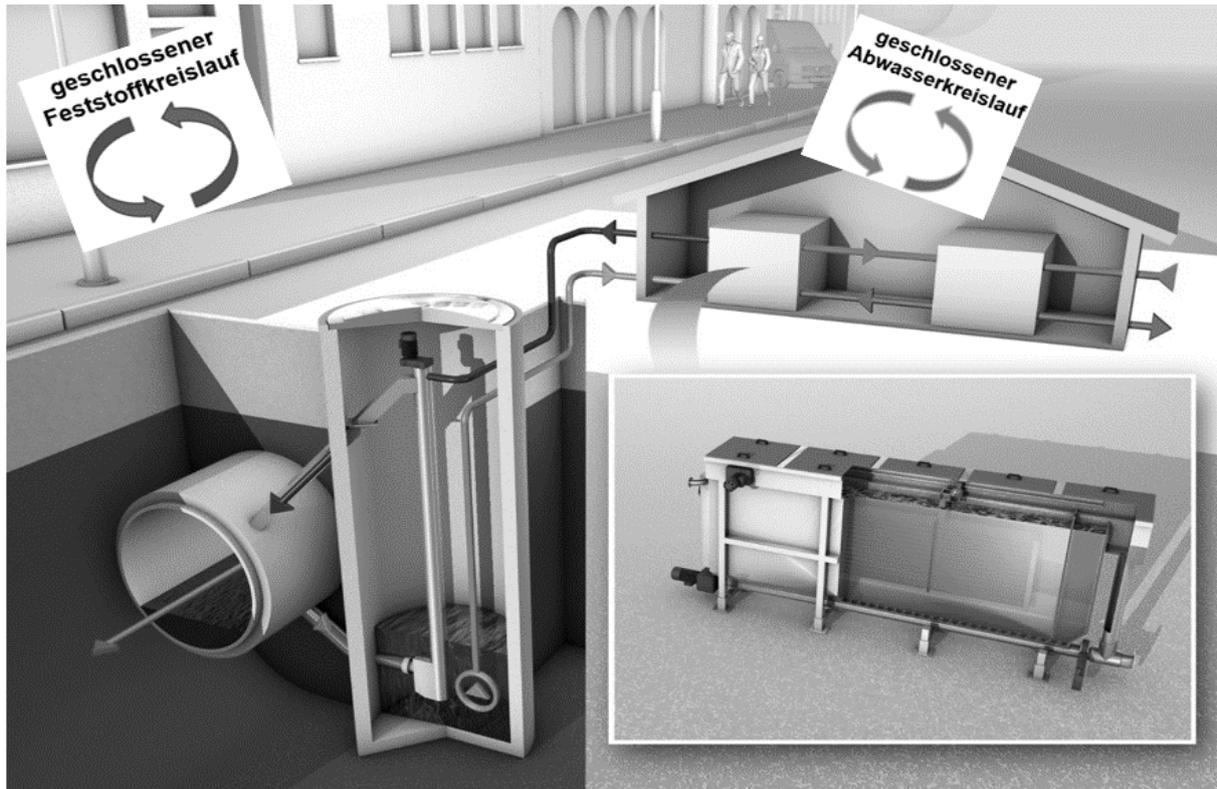


Abbildung 3: Das HUBER ThermWin-Verfahren

Neben dem Heizen von Gebäuden besteht auch die Möglichkeit, Wärme an das Abwasser abzugeben und dadurch beispielsweise im Sommer Gebäude und Wohnungen zu kühlen.

Referenzen des HUBER ThermWin-Verfahrens

Mit weltweit knapp 100 verkauften Maschinen stellt der Abwasserwärmetauscher HUBER RoWin eine wichtige Komponente des Systems HUBER ThermWin, ein etabliertes System zur Rückgewinnung von Wärme aus Abwasser, dar.

Diverse Projekte wurden mit dieser Technologie in der Vergangenheit realisiert und sind zusammen mit Energieplanern und Ingenieurbüros laufend in Planung.

Nachfolgend sind einige einschlägige Projekte aufgeführt:

Haus der bayerischen Geschichte – Regensburg

Mitten im Herzen der bayerischen Domstadt Regensburg wurde im Jahr 2019 ein neues Museum fertig gestellt, das Haus der bayerischen Geschichte ([Haus der Bayerischen Geschichte \(hdbg.de\)](https://www.hdbg.de) 2023).



Abbildung 4: Blick auf das Haus der Bayerischen Geschichte in Regensburg vom gegenüberliegenden Donauufer

Das Haus wurde im Passivhausstandard gebaut und bezieht die nötige Energie zum Heizen und Kühlen aus dem nahegelegenen Kanal.

Das Abwasser des Kanals wird zunächst von einer HUBER Schachtsiebanlage Rotamat® RoK4/500 vorgesiebt und anschließend in zwei HUBER Abwasserwärmetauscher RoWin BG 8 gepumpt. Dort wird eine maximale Entzugsleistung von bis zu 850 kW erreicht, die dann ganzjährig zum Heizen und Kühlen des Gebäudes genutzt wird.

Klinikum rechts der Isar, München

Für dieses Projekt wurde die kleinste Baugröße des HUBER Abwasserwärmetauschers RoWin im Keller des Gebäudes der zentralen Sterilgutversorgungsabteilung des Universitätsklinikums installiert.

Ziel dieses Wärmetauschers ist es das Prozesswasser der Autoklaven vorzuwärmen, um so Energie zum Anwärmen des Wassers zu minimieren. Trotz der eher geringen Entzugsleistung von ca. 60 kW, kann dieses Projekt äußerst wirtschaftlich betrieben werden, da kein Vorsieben oder Anheben (Pumpen) des heißen Abwassers nötig ist. Dadurch und durch die sehr hohen Abwassertemperaturen direkt aus den Autoklaven können die Betriebskosten minimal gehalten werden.



Abbildung 5: Abwasserwärmetauscher RoWin 4S im Keller der ZSVA des Universitätsklinikums der LMU München

Toronto Western Hospital in Kanada

Das bisher größte Projekt zur Abwasserwärmenutzung befindet sich momentan im Zentrum Torontos in Kanada im Bau. Dieses Projekt wird mit dem nordamerikanischen Projektpartner Noventa realisiert (Noventa, 2023).



Abbildung 6: Blick auf das Krankenhaus Toronto Western Hospital

Die Inbetriebnahme wird ca. Mitte 2024 stattfinden. Zur Erreichung der Wärme- und Kühlleistung von bis zu 17 MW werden hier 16 Stück HUBER Abwasserwärmetauscher RoWin BG 8 zusammen mit 3 Stück HUBER Schachtsiebanlage RoK 4/700 XL installiert, um eines der größten Krankenhäuser der Stadt mit Wärme zu versorgen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die momentan stattfindende Energiewende führt in nahezu allen Bereichen zu einer Bewusstseinsänderung und zum Umdenken.

Aufgrund starker Preisschwankungen, Verfügbarkeitsengpässe bedingt durch internationale Krisen, erschwerte Logistik und politische Steuermechanismen (z.B. CO₂-Steuer), werden sich fossile Energieträger in Zukunft weiterhin verteuern.

Abwasser hingegen ist steuerfrei und in urbanen Raum in großen Mengen verfügbar. Die darin enthaltene Energie stellt eine sehr günstige Alternative als Energiequelle für Wärmepumpen dar. Auch machen staatliche Förderungen den Wechsel auf diese Art des Heizens und Kühlens attraktiv. In Deutschland besteht im Jahr 2023 die Möglichkeit einer Förderung von bis zu 40 % der Investitionskosten bei Wechsel bzw. Wahl einer Wärmepumpe mit Abwasser als Wärmequelle.

Wärmepumpenhersteller haben das erkannt, und sind daran interessiert, mit Abwasser als Wärmequelle neue Geschäftsfelder zu erschließen. Dies und die immer größeren Dimensionen der Projekte zeigen, dass die Marktakzeptanz dieser Lösung von Jahr zu Jahr steigt. Die Firma HUBER SE bietet mit dem Abwasserwärmetauscher RoWin ein hervorragendes Produkt um Abwasser als Energiequelle zu erschließen.

Abwasser wird als Energieträger ein wichtiger Baustein der Wärmewende sein, um den Wechsel weg von fossilen Energieträgern hin auf nachhaltige Technologien zu realisieren.

Literatur

[BMWK - Startschuss fürs Heizen mit erneuerbaren Energien – Bundestag beschließt Novelle des Gebäudeenergiegesetzes](#) (Zugriffsdatum: 15.11.2023)

[Bundesnetzagentur - Homepage - Brennwert \(Gas\)](#) (Zugriffsdatum: 16.11.2023)

[Energieportal \(muenchen.de\)](#) (Zugriffsdatum: 16.11.2023)

[CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe \(umweltbundesamt.de\)](#) (Zugriffsdatum: 16.11.2023)

[Haus der Bayerischen Geschichte \(hdbg.de\)](#) (Zugriffsdatum: 16.11.2023)

[The Toronto Western Hospital WET™ Project — Noventa Energy](#) (Zugriffsdatum: 16.11.2023)

Anschrift des Verfassers:

Johannes Dommer

HUBER SE

Industriepark Erasbach A1

D-92334 Berching

Tel. +49 8462 201-304

Fax: +49 8462 201-810

E-Mail: johannes.dommer@huber.de

Möglichkeiten und Herausforderungen für eine Wasserwiederverwendung nach dem Prinzip „fit-for-purpose“

Martin Wagner

**Fachgebiet Abwassertechnik
Technische Universität Darmstadt**

Sonja Bauer

**Fachgebiet Landmanagement
OTH Amberg-Weiden**

Einleitung

Wassermangel als Herausforderung für künftige Entwicklungen

Eine aktuelle globale Herausforderung besteht darin, dass Bevölkerungswachstum, Klimawandel, zunehmender Wohlstand aber auch sich verändernde politische Situationen zu einer weltweiten Verknappung von natürlichen Ressourcen wie bspw. Wasser oder Boden führen. So steigt beispielsweise die Nachfrage nach Nahrungsmitteln und damit auch der Bedarf an Wasser für die Bewässerung in der Landwirtschaft, um die Flächenproduktivität zu erhalten. Die durch den Klimawandel verursachten zunehmenden Dürreperioden zeigen weltweit, dass die Wasserversorgung an ihre Grenzen stößt. Kalifornien beispielsweise hat mit immer längeren Dürreperioden zu kämpfen (Tortajada et al. 2017), während in China große Regionen aufgrund der ungleichen Verteilung der natürlichen Wasserressourcen und der starken Verschmutzung der Gewässer unter hohem Wasserstress stehen (WRI – World Resource Institute 2018). Weltweit haben etwa zwei Milliarden Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser und 3,6 Milliarden keinen Zugang zu sicheren sanitären Einrichtungen (UNESCO 2023). Folglich wird Wasserknappheit nicht nur für die Landwirtschaft, sondern auch für städtebauliche Entwicklungen und Industrieansiedlungen zu einer immer größeren Herausforderung. Auch in

Deutschland gibt es bereits Regionen, in denen sich die negativen Auswirkungen der Wasserknappheit bemerkbar machen. Bspw. konnte in Brandenburg der Bau einer neuen Schule aufgrund von Wassermangel nicht genehmigt werden (Malinowski 2022).

Erschließung alternativer Wasserquellen

Um die Wasserversorgung sicherzustellen und um somit die Nahrungsmittelproduktion, städtebauliche Entwicklungen und Industrieansiedlungen zu ermöglichen, müssen alternative Wasserquellen erschlossen werden. Derzeit wie auch in der Vergangenheit werden häufig Konzepte zur Speicherung von Regenwasser in Betracht gezogen, um Trinkwasser einzusparen. Regenwasser kann u.a. für Bewässerungszwecke oder für die Toilettenspülung eingesetzt werden. Diese Wasserquelle ist jedoch eine unsichere Ressource, da die Menge des benötigten Regenwassers nicht zu jedem Zeitpunkt verfügbar ist. Insbesondere bei langanhaltenden Dürreperioden reicht das gespeicherte Regenwasser nicht aus, um den Bedarf zu decken. Folglich wird in diesen Zeiträumen ergänzend Trinkwasser eingesetzt.

Eine weitere alternative und nachhaltige Ressource ist die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser. Im Gegensatz zur Speicherung und Nutzung von Regenwasser ist aufbereitetes Abwasser eine wertvolle Ressource, die täglich und in kalkulierbaren Mengen zur Verfügung steht. Ganzheitliche Wasserwiederverwendungskonzepte werden jedoch nur selten realisiert (Bauer et al. 2020c). Generell muss zwischen verschiedenen Anwendungsbereichen unterschieden werden, da aufbereitetes Abwasser u.a. für landwirtschaftliche, städtische und industrielle Zwecke eingesetzt werden kann. Des Weiteren wird zwischen einer Anwendung für trinkbare und nicht-trinkbare Anwendungszwecke unterschieden (Shoushtarian und Negahban-Azar 2020). In diesem Zusammenhang ist die Aufbereitung des Abwassers nach dem "fit-for-purpose"-Prinzip zu nennen, was bedeutet, dass das Wasser für die Wiederverwendung in unterschiedlichen Qualitäten, folglich für einen bestimmten Anwendungszweck, bereitgestellt wird. Beispielsweise ist zwar für die Toilettenspülung oder die Bewässerung von Grünflächen eine bestimmte Wasserqualität erforderlich, dennoch muss sie nicht der Qualität von Trinkwasser entsprechen. Für das genannte Beispiel bedeutet dies, dass das aufbereitete Abwasser für die Toilettenspülung eine höhere Qualität (desinfiziert) erfordert als bspw. Wasser für die Bewässerung von Grünflächen (Bauer und Wagner 2022).

Implementierungen von Konzepten der Wasserwiederverwendung

Weltweit existieren zahlreiche Beispiele für eine Implementierung von Wasserwiederverwendungskonzepten, die sich jedoch oftmals auf einen bestimmten räumlichen Bereich beziehen. Gebäudespezifische Ansätze sind häufiger anzutreffen als Implementierungen auf gesamtstädtischer Ebene. Im Folgenden werden zwei erfolgreiche Wasserwiederverwendungskonzepte vorgestellt, bei denen das Wasser zweckdienlich bereitgestellt wird. Hierfür wurden die Städte Irvine und San Diego in Kalifornien gewählt, die auf städtischer Ebene einen ganzheitlichen Ansatz verfolgen, da sie über ein zweites Leitungsnetz, das sog. „dual pipe system“ für die Bereitstellung von aufbereitetem Abwasser verfügen.

Irvine Ranch

Das Beispiel der Stadt Irvine in Kalifornien zeigt, wie eine Wasserwiederverwendung bereits in den 1960er Jahren gesamtstädtisch umgesetzt wurde. Eine Besonderheit ist, dass Irvine seinerzeit als Satellitenstadt geplant wurde (Forsyth 2002). Eine gesamtstädtische Masterplanung ermöglichte, dass u.a. urbane Grünflächen mit wiederverwendetem Wasser bewässert werden können. Grundlage ist das integrierte zweite Leitungsnetz, so dass neben Trinkwasser auch recyceltes Abwasser bereitgestellt werden kann (Irvine Company 2015). Dieses Leitungsnetz umfasst eine Länge von ca. 725 Kilometer Meilen (Irvine Company 2022).

Das aufbereitete Abwasser wird für verschiedene nicht trinkbare Zwecke eingesetzt, wobei die größte Menge für die Bewässerung der Vegetation, wie Straßenbegleitgrün, Golfplätze, Parks, Spielplätze anfällt (Grigg et al. 2013). 91 % des für die Bewässerung verwendeten Wassers ist recyceltes Abwasser (Irvine Company 2015). Neben Bewässerungszwecken wird das recycelte Wasser für die Toilettenspülung in Gewerbe- und Wohngebäuden sowie als Kühlwasser in Kühltürmen eingesetzt (Grigg et al. 2013). Das Netz liefert bis zu 106.000 m³ pro Tag. Aufgrund weiterer technischer wassersparender Maßnahmen können weitere Mengen an Wasser erfolgreich eingespart werden (Irvine Company 2015).

San Diego

Mit recyceltem Abwasser verfügt San Diego über eine zuverlässige, ganzjährige und lokal kontrollierte Wasserressource. Um den künftigen Wasserbedarf zu decken und um gleichzeitig die Abhängigkeit von Wasserimporten aus Nordkalifornien und dem Colorado River zu verringern, hat die Stadt die beiden Wasseraufbereitungsanlagen North City und South Bay errichtet, die sie selbst betreibt. In diesen Anlagen wird das Abwasser auf ein entsprechendes Niveau aufbereitet, das u.a. für die Bewässerung

und andere (nicht-trinkbare) Zwecke zugelassen ist. Die Überwachung durch städtische Mitarbeiter, staatliche Gesundheitsbehörden und Wasserqualitätskontrollbehörden stellt sicher, dass das von der Stadt San Diego produzierte aufbereitete Wasser alle bundesstaatlichen, staatlichen und lokalen Wasserqualitätsstandards erfüllt (The City of San Diego 2023a, 2023b).

Die Regeln und Vorschriften für die Verwendung von recyceltem Wasser in San Diego sind umfangreich. Dazu gehört, dass alle Rohre, Sprinklerköpfe, Zählerkästen und andere Bewässerungsanlagen ordnungsgemäß gekennzeichnet oder mit einem violetten Farbcode bzw. Schildern versehen sein müssen, um sie von der regulären Trinkwasserversorgung zu unterscheiden (The City of San Diego 2023a). Zu den genehmigten Verwendungszwecken gehört die Bewässerung der Grünflächen von Parks, Spielplätzen, Schulhöfen, Grünflächen in Wohngebieten/Aufenthaltsbereichen, Baumschulen, Grünflächen an Freeways und Golfplätzen (The City of San Diego 2020, 2023a).

Ferner erlauben die Gesundheitsbehörden des Staates Kalifornien die Einrichtung lokaler „Tankwagenprogramme“, dem sog. Recycled Water Tanker Truck Program (RWTTP) für recyceltes Wasser (The City of San Diego 2023a). Recyceltes Wasser steht allen am Programm teilnehmenden Kunden zur Verfügung, die das Wasser für Bauzwecke (Staubbekämpfung, Bodenverdichtung) oder für die Straßenreinigung einsetzen möchten. Teilnehmer benötigen für die Nutzung des recyceltem Wasser eine entsprechende Genehmigung (The City of San Diego 2019).

Forschungsprojekt: Water-Reuse in Industrieparks

(WaRelp)

Auch wenn im urbanen Raum der Einsatz für eine Wasserwiederverwendung vielfältig ist, ist auch die Industrie ein bedeutender „Konsument“ dieser besonderen Ressource. Die Anwendungszwecke können vielfältig aber zugleich auch sehr anspruchsvoll sein. Demzufolge sind Anwendungsbeispiele bzw. Implementierungen im industriellen Bereich seltener vorzufinden.

Industrielle Ansiedlungen sind für die Stadtentwicklung unverzichtbar und funktionieren nicht ohne eine sichere Wasserversorgung. Da bspw. Industrieparks große Wassermengen für industrielle Prozesse aber auch für infrastrukturelle Zwecke, wie für die Bewässerung von Grünflächen, zur Straßenreinigung, für den Einsatz in Kühlsystemen oder als Löschwasser, ist eine effiziente Wasserversorgung sicherzustellen. Der Einsatz von aufbereitetem Abwasser eignet sich insbesondere für infrastrukturelle Zwecke, da das recycelte Wasser für nicht trinkbare Zwecke eingesetzt wird und daher eine geringere Qualität - je nach nationalem Standard -

aufweisen muss. Trotz des großen Potenzials ist der Einsatz von recyceltem Abwasser in Industrieparks nicht weit verbreitet.

Die Entwicklung nachhaltiger Konzepte für eine Wasserwiederverwendung in Industrieparks zur Reduzierung eines hohen Wasserverbrauchs aus natürlichen Ressourcen ist ein wichtiger Ansatz, um eine Ansiedlung von Unternehmen weiterhin zu ermöglichen.

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt Water-Reuse in Industrieparks (WaRelp, BMBF-Förderkennzeichen: 02WAV14) wurde das Industrial WasteWater Management Concept with the focus on Reuse (abgekürzt: IW²MC→R) entwickelt (Bauer et al. 2020a; Bauer et al. 2019; Bauer et al. 2020b). Das Konzept beinhaltet die nachhaltige Aufbereitung von industriellem Abwasser nach dem „fit-for-purpose“-Prinzip, so dass es in der entsprechend benötigten Qualität für infrastrukturelle Zwecke eingesetzt werden kann (Bauer et al. 2020b). Hierzu wurden spezifische Untersuchungen in China, Vietnam und Deutschland durchgeführt, wobei es das Ziel war, die jeweilige Wasserversorgungssituation, das System der Abwasserbehandlung und einen möglichen Einsatz von aufbereitetem Abwasser in Industrieparks zu analysieren und zu vergleichen. Als erstes Ergebnis konnten zwei unterschiedliche Ansätze zur Abwasserbehandlung abgeleitet werden. Wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Ansätzen besteht darin, dass entweder das Abwasser in einer Leitung oder mehreren Abwasserleitungen, getrennt nach einer bestimmten Abwasserqualität zur zentralen Kläranlage geleitet wird. In beiden Ansätzen ist der zentralen Kläranlage eine sog. Water-Reuse Plant (WRP) nachgeschaltet, die das bereits behandelte Abwasser nach dem Prinzip „fit-for-purpose“ für den jeweiligen Anwendungszweck bereitstellt (Bauer et al. 2020a).

Ferner wurde im Forschungsprojekt ein Modellindustriepark anhand des Fallbeispiels China entwickelt, welcher 19 verschiedene Produktionsanlagen aus dem Bereich der chemischen Industrie und der Nahrungsmittelproduktion berücksichtigt, um konkrete Abwasserbehandlungsverfahren für eine Wiederverwendung nach dem Prinzip „fit-for-purpose“ zu entwickeln. Dabei wurden alle Abwasserströme entsprechend ihrer Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorkonzentration kategorisiert. Die Analysen haben ergeben, dass gemäß der Abwasserkonzentrationen in der zentralen Kläranlage zwei getrennte Abwasserbehandlungsstraßen benötigt werden. In der ersten Reinigungsstufe wird das Abwasser aerob mit dem Belebtschlammverfahren behandelt, das eine Nährstoffzusammensetzung von CSB:N:P von 100:5:1 aufweist. Da der Modellindustriepark über einen besonderen Abwasserstrom verfügt, der sich aus einer einzelnen Produktionsanlage, der Ethanolproduktion ergibt, wird eine separate Vorbehandlung vorgeschlagen. Analysen haben gezeigt, dass in diesem Fall hohe Konzentrationen von Feststoffen vorliegen, die vor einer biologischen Behandlung aus dem Abwasser entfernt werden müssen. Weiterhin berücksichtigt der Modellindustriepark Abwasserströme mit hohen Salzkonzentrationen, die bspw. bei

der Herstellung von Natriumkarbonat entstehen. Diese Abwasserströme sind daher gesondert zu betrachten. In diesen Fällen wird eine Verbrennung oder Verdunstung vorgeschlagen. Um die Anforderungen der erforderlichen Qualitätsstandards für die Wasserwiederverwendung zu erfüllen, wird das Abwasser in der WRP in nur einer Behandlungsstraße aufbereitet. Da die chinesischen Qualitätsnormen für die Bewässerung von Grünflächen, für eine Nutzung als Toilettenspülwasser, zur Brandbekämpfung, zur Straßenreinigung und zum Einsatz als Kühlwasser sehr ähnlich sind, wird für den Modellindustriepark nur eine Behandlungsstraße in der WRP entwickelt (Bauer et al. 2020b). Folglich ermöglicht der Modellindustriepark eine Anpassung an eine spezifische, vor Ort gegebene Situation, so dass bezogen auf die Abwasserkonzentrationen bestimmte Behandlungsverfahren vorgeschlagen bzw. entwickelt werden können. Zudem sind dabei die Qualitätsanforderungen des jeweiligen Landes in dem der Industriepark verortet ist, zu berücksichtigen.

Herausforderungen bei der Wiederverwendung von Abwasser nach dem Prinzip „fit-for-purpose“

Unterschiedliche Regelungen für den Einsatz von aufbereitetem Abwasser

Die bereits genannten Qualitätsanforderungen sind eine wichtige Voraussetzung für einen sicheren Einsatz von aufbereitetem Abwasser. In diesem Zusammenhang haben sich die spezifischen Abwasserbehandlungsverfahren an Normen und Vorschriften des jeweiligen Landes zu orientieren. Diese können jedoch stark variieren. In einigen Ländern gibt es Regelwerke, die nur eine Wasserqualität für die Wasserwiederverwendung vorschreiben, während andere Länder sehr detaillierte Normen für die jeweilige Anwendung haben. Beispielsweise erließ der Bundesstaat Kalifornien bereits 1918 eine Vorschrift für die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser in der Landwirtschaft und war damit der erste Staat in den USA, welcher über eine solche Verordnung verfügte (Shoushtarian und Negahban-Azar 2020). In den USA werden diesbezüglich die Vorschriften von den Bundesstaaten erlassen; folglich existieren keine Bundesverordnungen, die spezifisch die Wasserwiederverwendung regeln (Luthy et al. 2020; US EPA und CDM Smith 2017). Sofern keine Richtlinien oder Vorschriften existieren, ist die Herstellung von Wasser zur Wiederverwendung in den USA zulässig, wenn die Anforderungen des Safe Drinking Water Act (SDWA), des Clean Water Act (CWA) sowie die staatlichen Anforderungen eingehalten werden (US EPA und CDM Smith 2017). In Kalifornien wird zudem zwischen der „Anwendung für nicht trinkbare Zwecke“ und der „trinkbare Zwecke“ unterschieden (California Water Boards 2021).

Ein weiteres Land, welches detaillierte Normen für die Wasserwiederverwendung erlassen hat, ist China. Um die Wasserwiederverwendung voranzutreiben, hat die chinesische Regierung bereits vor etwa 20 Jahren eine Reihe von Standards für verschiedene Wiederverwendungszwecke erlassen. In diesem Zusammenhang sind u.a. der Standard für eine Wasserwiederverwendung für verschiedene städtische Zwecke (GBT 18920-2002), der Standard für die industrielle Wiederverwendung (GBT 19923-2005), der Standard für die Wiederverwendung zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen (GB20922-2007) oder der Standard für die Wiederverwendung zur Bewässerung von Grünflächen (GB/T25499-2010) zu nennen (Lyu et al. 2016). Daher werden in den WRPs je nach Anwendungszweck spezifische Behandlungsstufen erforderlich, um die jeweiligen Anforderungen zu erfüllen.

Im Vergleich zu anderen Ländern hat die Europäische Union (EU) erst sehr spät eine Richtlinie für die Wasserwiederverwendung erlassen, während einzelne Länder wie Spanien oder Portugal zuvor eigene Regelungen implementiert haben (Shoushtarian und Negahban-Azar 2020). Im Jahr 2020 erließ die EU die Verordnung über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung (Regulation 2020/741). Die Richtlinie war bis zum 26. Juni 2023 in nationales Recht umzusetzen (Dingemans et al. 2020; European Commission 2021).

Wasserwiederverwendung in Deutschland

In Deutschland wurden im Jahr 2019 etwa 0,4 Milliarden Kubikmeter für die landwirtschaftliche Bewässerung entnommen, was einen geringen Anteil von rund 2,2 % der Gesamtwasserentnahmen ausmacht. Dennoch konnte eine leichte Steigerung im Vergleich zum Jahr 2016 zu beobachtet werden. Werden in diesem Zusammenhang die tatsächlich bewässerten Flächen betrachtet, so konnte von 2009 bis 2019 eine Zunahme um 36 % beobachtet werden. In einigen Regionen Deutschlands ist jedoch aufgrund des Klimawandels mit einem steigenden Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft zu rechnen, der zugleich die Grundwasserneubildung übersteigen kann, was in einigen Gebieten bereits jetzt schon der Fall ist (Umweltbundesamt 2023b).

Das zunehmende Interesse an dem Einsatz von aufbereitetem Wasser ist in Deutschland vornehmlich regional zu beobachten. Um mögliche Anwendungen genauer zu erforschen und im ein besseres Verständnis von Risiken, Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten zu erhalten, wurden verschiedene Fördermaßnahmen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) etabliert (Umweltbundesamt 2023b, 2023a).

Gemäß dem Umweltbundesamt (2023a) wird aufbereitetes, kommunales Abwasser lediglich in Wolfsburg und Braunschweig eingesetzt. In Braunschweig wird das recycelte Abwasser auf landwirtschaftlichen Flächen verregnet, wohingegen in

Wolfsburg im Sommer behandeltes, nährstoffreiches Abwasser für die Bewässerung eingesetzt und im Winter nährstoffarmes Wasser zur Grundwasseranreicherung genutzt wird. Zum Rohverzehr ist jedoch der Anbau von Obst- und Gemüse an beiden Standorten verboten, da bislang noch keine Desinfektion und Filtration bei der Wasseraufbereitung stattfand (Umweltbundesamt 2023a). Diese Situation könnte sich generell aufgrund der **Verordnung (EU) 2020/741 über Mindestanforderungen für die Wasserwiederverwendung** zukünftig ändern.

Herausforderungen an Aufbereitungsverfahren

Eine aktuelle Herausforderung hinsichtlich der Wasserqualität besteht darin, Mikroverunreinigungen und Mikroplastik aus dem Abwasser zu entfernen, wie bspw. Arzneimittelrückstände, Kosmetika, Haushalts- und Industriechemikalien, antibiotikaresistente Krankheitserreger oder bestimmte Chemikalien. Diese haben potenziell eine negative Auswirkung auf Ökosysteme. Ferner könnten solche Stoffe Auswirkungen auf die Qualität des Trinkwassers haben. Daher sind ergänzende Verfahren für die Abwasserbehandlung erforderlich, um die menschliche Gesundheit nicht zu gefährden und um Wasserverunreinigungen weiter zu minimieren.

Ein grundlegender Behandlungsschritt zur Beseitigung von Mikroverunreinigungen ist die Adsorption mit Aktivkohle. Oxidationsverfahren mittels UV und/oder Ozon sowie fortgeschrittene Oxidationsverfahren (Advanced Oxidation Processes (AOP)) sind eine weitere Möglichkeit neben dem Einsatz von Membranen.

Ist eine zusätzliche Desinfektion des Kläranlagenablaufs erforderlich, sind Desinfektionsverfahren mittels UV oder Chlor essentiell. Chlor wird jedoch in einigen Ländern nicht eingesetzt, obwohl es in den USA eine übliche Vorgehensweise ist (Bonvin 2011). Der Einsatz von Chlor ist von spezifischen Vorschriften abhängig, der aufgrund seiner negativen Umweltauswirkungen oftmals vermieden werden soll (Ghernaout und Elboughdiri 2020; Sedlak et al. 2011).

Schlussfolgerung

Die weltweit zunehmende Wasserknappheit verdeutlicht die Dringlichkeit der Umsetzung von Wasserwiederverwendungskonzepten. Länder, die seit Jahrzehnten unter hohem Wasserstress leiden, wie bspw. die USA oder China, haben bereits frühzeitig entsprechende Regelungen zur Wasserwiederverwendung eingeführt, um eine ausreichende Wasserqualität zu gewährleisten.

In den meisten Ländern gibt es zwar Vorschriften für die Einleitung von gereinigtem Abwasser in Oberflächengewässer, aber darauf aufbauende Regelungen zur Wiederverwendung von Wasser nach dem "fit-for-purpose"-Prinzip fehlen teilweise. In Europa wurden Regelungen generell sehr spät erlassen. Aus neuen

Qualitätsanforderungen resultieren folglich weitergehende Anforderungen an die Abwasserbehandlung.

Eine weitere Herausforderung ist die Umsetzung von Wasserwiederverwendungskonzepten. Nur wenige Länder haben ganzheitlich-integrierte Wassermanagementkonzepte realisiert, die eine Wasserwiederverwendung von recyceltem Abwasser beinhalten. Strategische Raumplanungskonzepte fehlen auf gesamtstädtischer Ebene, um die Wasserwiederverwendung voranzutreiben. Ein Vorbild ist hier u.a. die Gemeinde Irvine in Kalifornien, die bereits in den 60er Jahren eine entsprechende Masterplanung entwickelt und implementiert hat. Der voranschreitende Klimawandel und die damit einhergehende Wasserknappheit wird dies jedoch auch in anderen Ländern künftig vorantreiben, da ohne ein nachhaltiges Wassermanagement und ohne Implementierungen eine ausreichende Wasserversorgung gefährdet ist.

Literaturverzeichnis

Bauer, S.; Dell, A.; Behnisch, J.; Chen, H.; Bi, X.; Nguyen, V. A. et al. (2020a): Water-reuse concepts for industrial parks in water-stressed regions in South East Asia. In: *Water Supply* 20 (1), S. 296–306. DOI: 10.2166/ws.2019.162.

Bauer, S.; Dell, A.; Behnisch, J.; Linke, H. J.; Wagner, M. (2020b): Sustainability requirements of implementing water-reuse concepts for new industrial park developments in water-stressed regions. In: *Journal of Water Reuse and Desalination*, Artikel jwrd2020028. DOI: 10.2166/wrd.2020.028.

Bauer, S.; Dell A; Behnisch, J.; Chen, H.; Bi, X.; Nguyen, V. A.; Linke H.J., Wagner, M. (2019): Water-reuse concepts for industrial parks in water-stressed regions in South-East-Asia. In: *Water Supply*. DOI: 10.2166/ws.2019.162.

Bauer, Sonja; Linke, Hans Joachim; Wagner, Martin (2020c): Combining industrial and urban water-reuse concepts for increasing the water resources in water-scarce regions. In: *Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation* 92 (7), S. 1027–1041. DOI: 10.1002/wer.1298.

Bauer, Sonja; Wagner, Martin (2022): Possibilities and Challenges of Wastewater Reuse—Planning Aspects and Realized Examples. In: *Water* 14 (10), S. 1619. DOI: 10.3390/w14101619.

Bonvin, Didier (2011): The dark side of chlorine. Hg. v. EPFL News. Online verfügbar unter <https://actu.epfl.ch/news/the-dark-side-of-chlorine/>.

California Water Boards (2021): Recycled Water Policy. Hg. v. State of California. Online verfügbar unter https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/water_recycling_policy/, zuletzt geprüft am 08.03.2021.

Dingemans, Milou; Smeets, Patrick; Medema, Gertjan; Frijns, Jos; Raat, Klaasjan; van Wezel, Annemarie; Bartholomeus, Ruud (2020): Responsible Water Reuse Needs an Interdisciplinary Approach to Balance Risks and Benefits. In: *Water* 12 (5), S. 1264. DOI: 10.3390/w12051264.

European Commission (2021): Water Reuse. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/environment/water/reuse.htm>, zuletzt geprüft am 09.03.2021.

Forsyth, Ann (2002): Who Built Irvine? Private Planning and the Federal Government (13).

Ghernaout, Djamel; Elboughdiri, Nouredine (2020): Is Not It Time to Stop Using Chlorine for Treating Water? In: *OALib* 07 (01), S. 1–11. DOI: 10.4236/oalib.1106007.

Grigg, Neil S.; Rogers, Peter D.; Edmiston, S. (2013): Dual Water Systems: Characterization and Performance for Distribution of Reclaimed Water. Hg. v. Water Research Foundation.

Irvine Company (2015): Master Planning Saves Water.

Irvine Company (2022): 450+ Miles of Purple Pipe. Online verfügbar unter <https://www.goodplanning.org/sustainability/water-conservation/recycled-water-map/>.

Luthy, Richard G.; Wolfand, Jordyn M.; Bradshaw, Jonathan L. (2020): Urban Water Revolution: Sustainable Water Futures for California Cities. In: *J. Environ. Eng.* 146 (7), S. 4020065. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001715.

Lyu, Sidan; Chen, Weiping; Zhang, Weiling; Fan, Yupeng; Jiao, Wentao (2016): Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges. In: *Journal of environmental sciences (China)* 39, S. 86–96. DOI: 10.1016/j.jes.2015.11.012.

Malinowski, Johannes (2022): Tesla-Fabrik verhindert Bau von neuer Schule. In: *BZ-Berlin*, 09.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.bz-berlin.de/brandenburg/tesla-fabrik-verhindert-bau-von-neuer-schule>.

Umweltbundesamt (Hg.) (2023b): Wasserwiederverwendung. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserbewirtschaften/wasserwiederverwendung>, zuletzt geprüft am 30.0.2023.

UNESCO (Hg.) (2023): Imminent risk of a global water crisis, warns the UN World Water Development Report 2023. Online verfügbar unter <https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023>, zuletzt geprüft am 29.09.2023.

US EPA; CDM Smith (2017): 2017 Potable Reuse Compendium.

WRI – World Resource Institute (Hg.) (2018): Drop by Drop, Better Management Makes Dents in China’s Water Stress. Online verfügbar unter <https://www.wri.org/blog/2018/04/drop-drop-better-management-makes-dents-chinas-water-stress>, zuletzt geprüft am 17.05.2019.

Anschrift der Verfasser:

Martin Wagner

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Abwassertechnik
Franziska-Braun-Str. 7
D-64287 Darmstadt

Tel. +49 06151 16-20302

E-Mail: m.wagner@iwar.tu-darmstadt.de

Sonja Bauer

Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden (OTH)
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
D-92224 Amberg

Tel. +49 9621 482-3613

E-Mail: s.bauer@oth-aw.de



MÖGLICHKEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN FÜR EINE WASSERWIEDERVERWENDUNG NACH DEM PRINZIP „FIT FOR PURPOSE“

Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wagner, FG Abwassertechnik, TU Darmstadt
 Prof. Dr.-Ing. Sonja Bauer, FG Landmanagement, OTH Amberg-Weiden
 34. Karlsruher Flockungstage, 21. - 22. November 2023

Inhalt



01 | Hintergrund – Warum Wasserwiederverwendung?

02 | Implementierungen von Konzepten der Wasserwiederverwendung

03 | Forschungsprojekt – Water-Reuse in Industrieparks (WaRelp)

04 | Herausforderungen bei der Wiederverwendung von Abwasser nach dem Prinzip „fit for purpose“

05 | Schlussfolgerungen

01 Hintergrund – Warum Wasserwiederverwendung?



Bildquelle: Shutterstock

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 3

Globale Herausforderung: Wachsende Bevölkerung weltweit



Bildquelle: Shutterstock

2021:	7.9 Mrd.
2050:	9.7 Mrd.
2100:	10.9 Mrd.

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 4

Das Bevölkerungswachstum führt zu einem steigenden Wasserbedarf...

- aufgrund der wachsenden Nachfrage nach **Wohnraum**
- durch Steigerung der **industriellen Produktion/Industrieparks**
(hoher Wasserbedarf: Produktionsprozesse, Kühlwasser, Bewässerung ...)
- aufgrund der steigenden Nachfrage **nach Lebensmitteln**
(hoher Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung)



Quelle: Shutterstock



Quelle: Eigene Aufnahme, Shanghai Chemical Industry Park

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 5

Quelle: Eigene Aufnahme, Shanghai



Klimawandel und Wasserverfügbarkeit



Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 6

Wasserknappheit weltweit

World Water Development Report 2023:

- Weltweit verfügen 2 Milliarden Menschen (26 % der Bevölkerung) über kein sauberes Trinkwasser
- 3,6 Milliarden Menschen (46 %) haben keinen Zugang zu sicheren sanitären Einrichtungen



Quelle: <https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023>

Source: Istock

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 7

Neue Strategien erforderlich!



Bildquelle: Shutterstock

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 8

Vielfach praktiziert: Speicherung und Nutzung von Regenwasser



- Regenwasser ist eine "unzuverlässige" Wasserquelle, besonders in langen Dürreperioden
- Wassermenge zum gewünschten Zeitpunkt nicht kalkulierbar



Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 9

Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser "fit for purpose"



Quelle: Eigene Aufnahme, Industrial wastewater treatment plant in Vietnam



Quelle: Eigene Aufnahme, Wastewater treatment plant in Thailand

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 10

Mögliche Anwendungen für Water-Reuse "fit for purpose"



Bildquelle: Shutterstock

Augsburger Allgemeine



"Reuse Brew": Herforder Firma Xylem braut Bier aus Abwasser



Mit Bier aus Abwasser will eine Herforder Firma ein Zeichen für die Nutzung von recyceltem Schmutzwasser setzen.

Foto: Christoph Soeder, dpa

Quelle: Augsburg Allgemeine: <https://www.augsburger-allgemeine.de/panorama/Bier-Reuse-Brew-Herforder-Firma-Xylem-braut-Bier-aus-Abwasser-054608651.html>

02 Implementierungen von Konzepten der Wasserwiederverwendung



Bildquelle: Shutterstock

Beispiele

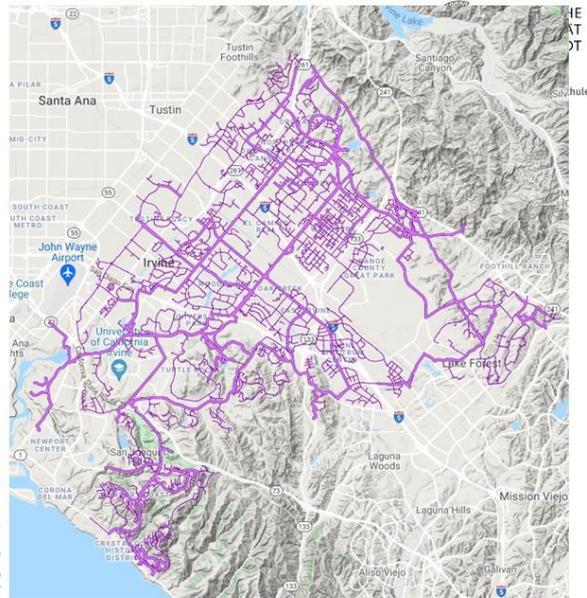
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 13

Irvine, Kalifornien

- Zweites Leitungsnetz für aufbereitetes Abwasser
- 91 % des für die Landschaft benötigten Wassers ist aufbereitetes Abwasser
- Wasserwiederverwendung: Verwendung in Einkaufszentren, Bürogebäuden, Wohngebieten
- Wassereinsparungen von 25 % pro Person
- Wassersparende Technologien
- Geplant bereits in den 1960er Jahren

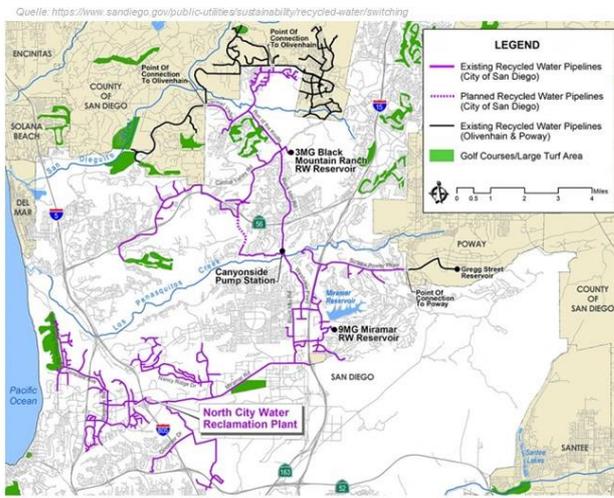
Quelle: Google
Maps and
<https://www.goodplanning.org/sustainable-buildings/water-conservation/recycled-water-map/>



Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 14

San Diego, Kalifornien



Quelle: <https://www.kpbs.org/news/environment/2015/09/09/san-diego-gets-recycled-water-filling-station>

- Anwohner können recyceltes Wasser beziehen, auch wenn ihr Grundstück nicht an das „zweite Leitungsnetz“ angeschlossen ist
- Neue „Tankstelle“ für recyceltes Wasser

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 15



03 Forschungsprojekt – Water-Reuse in Industrieparks (WaRelp)



Bildquelle: Shutterstock

www.wareip.de



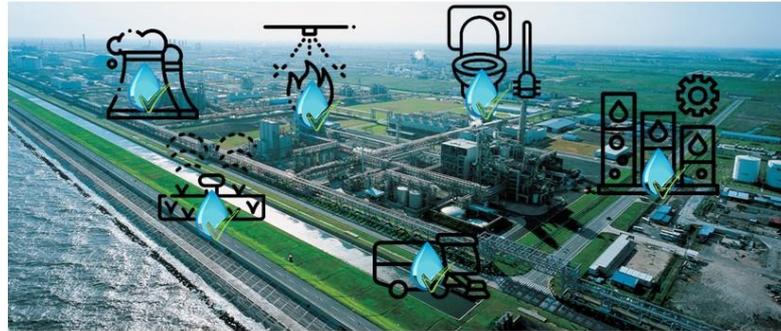
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 16

Wasserwiederverwendung in Industrieparks



- In Industrieparks nicht weit verbreitet
- Enormes Potenzial für infrastrukturelle Zwecke:
 - Kühlwasser
 - Grünflächenbewässerung
 - Straßenreinigung
 - Toilettenspülung
 - Löschwasser
 - *Innerhalb des Produktionsprozesses (hier nicht weiter verfolgt)*



Shanghai Chemical Industrial Park

Quelle:
https://www.shik.gov.cn/shik/zhong_wen_jing_dian/11818.html
Quelle (Konze): Dillerstock und Freppik

Forschungskonzept



Entwicklung des
Industrial **W**aste**W**ater **M**anagement **C**oncept with a focus on **Re**use

IW²MC→R

- beinhaltet eine nachhaltige Behandlung von Abwasser in Industrieparks
- Bereitstellung von wiederverwendetem Wasser für verschiedene Infrastrukturzwecke durch eine Water-Reuse Plant (WRP)



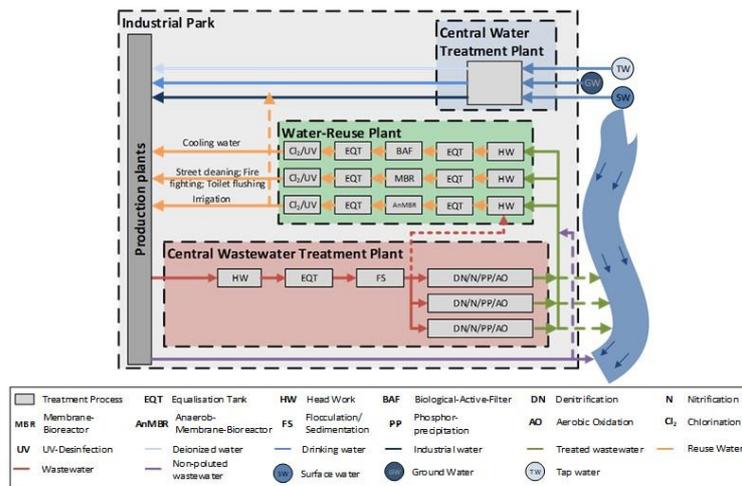
Methodik

Entwicklung des IW²MC → R

- **Untersuchungen** in Deutschland, China und Vietnam (in 2017)
 - von den bestehenden Industrieparks für neue Parks lernen
 - 3 Bereiche entscheidend :
 - Situation der Wasserversorgung
 - System der Abwasserbehandlung
 - Möglichkeiten der Wasserwiederverwendung
 - **2 Ansätze für ein Wasserwiederverwendungskonzept abgeleitet**



Ansatz 1 zur Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser (IW²MC → R)



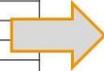
Modellindustriepark (MIP)



19 beispielhafte Produktionsanlagen

(berücksichtigt: chemische Produktion/Lebensmittelproduktion, Abwasser der Kaninte und sanitäres Abwasser)

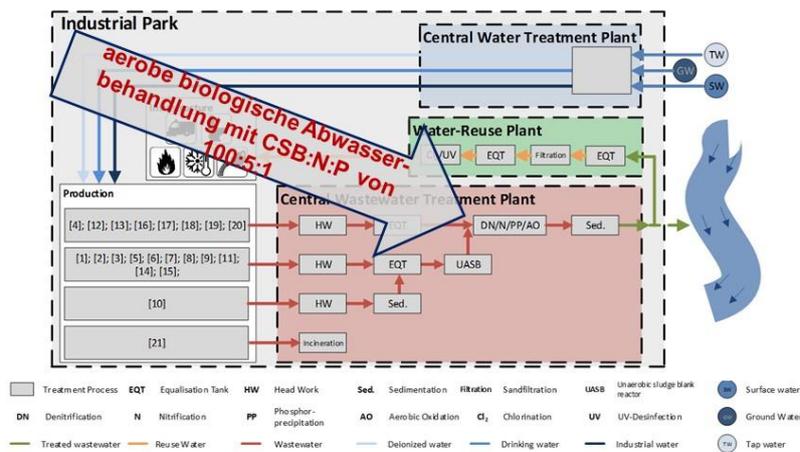
1	H ₂ O ₂
2	Polystyrene
3	Chlorine
4	Fruit juice
5	Maize starch
6	Wheat starch
7	Yeast
8	Sugar (beets)
9	Silicone
10	Ethanol
11	Paper
12	Canteen
13	Butchery (cattle)
14	Polato
15	Animal by-products
16	Filament Glass fibre
17	Superphosphate
18	Soft drinks
19	Potato starch
20	Sanitary wastewater
21	Sodium carbonate



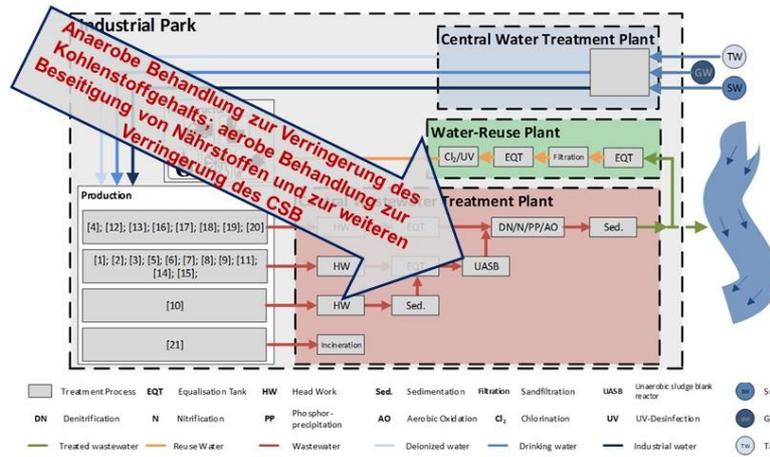
Charakterisierung von Abwasserströmen für eine Behandlung in verschiedenen Behandlungsstraßen in zentraler Kläranlage:
 → Eingeteilt in Kategorien entsprechend ihrer Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorkonzentration



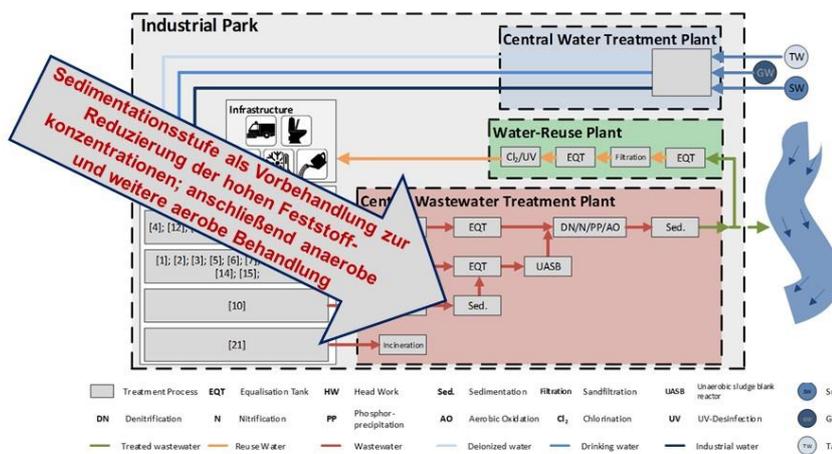
Wasserwiederverwendung „fit for purpose“



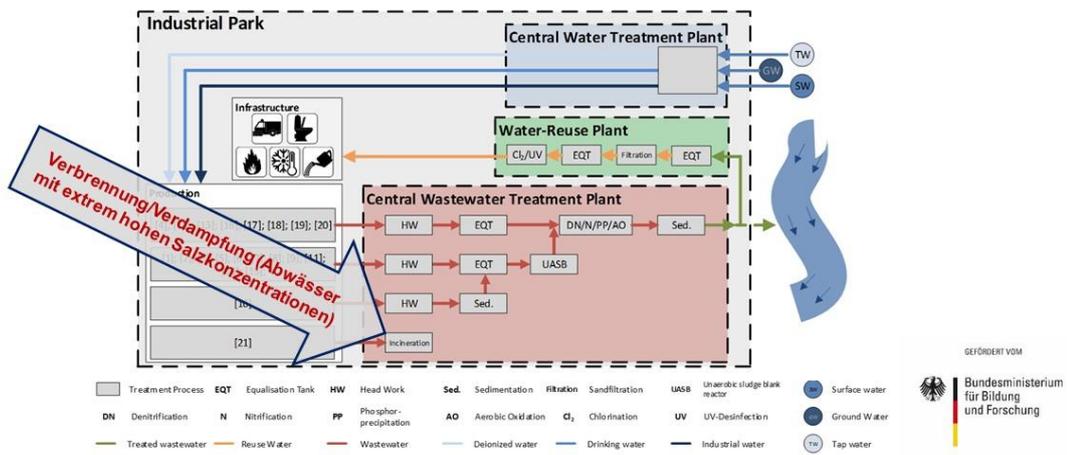
Wasserwiederverwendung „fit for purpose“



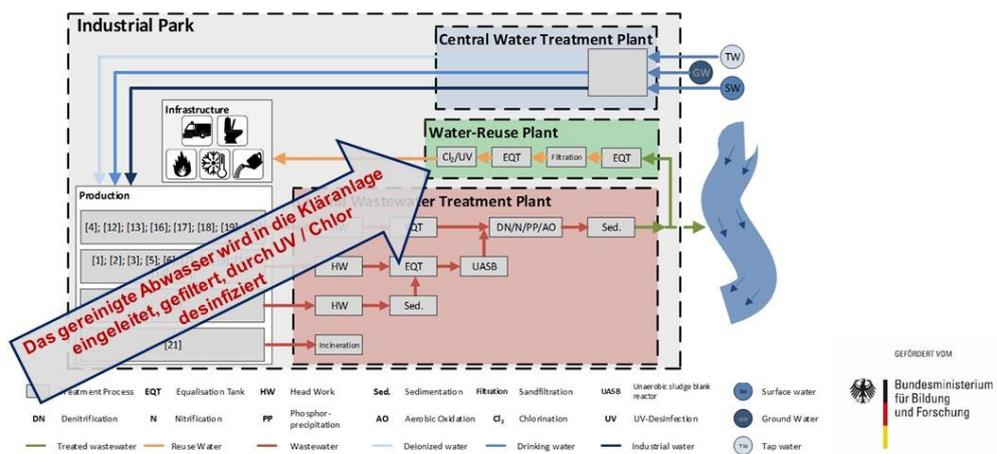
Wasserwiederverwendung „fit for purpose“



Wasserwiederverwendung „fit for purpose“



Wasserwiederverwendung „fit for purpose“



04 Herausforderungen bei der Wiederverwendung von Abwasser nach dem Prinzip „fit-for-purpose“



Bildquelle: Shutterstock

1. Unterschiedliche Regelungen für den Einsatz von aufbereitetem Abwasser
2. Herausforderungen an Aufbereitungsverfahren

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 29

1. Unterschiedliche Regelungen für den Einsatz von aufbereitetem Abwasser

Qualitätsanforderungen sind eine Voraussetzung für die sichere Anwendung von aufbereitetem Abwasser!

- Normen oder Vorschriften weichen voneinander ab
- Manche Länder haben
 - Normen, die nur **eine Wasserqualität** für die Wasserwiederverwendung festlegen
 - sehr detaillierte Normen für einen spezifischen Anwendungszweck (wie bspw. Bewässerung)



Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 30

Wasserwiederverwendung in Deutschland



- In Deutschland ist mit steigendem Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft zu rechnen
- Vornehmlich regionales Interesse an Wasserwiederverwendung

Gem. Umweltbundesamt wird an zwei Standorten aufbereitetes Kommunalabwasser genutzt: **Wolfsburg und Braunschweig**

- In **Braunschweig** wird recyceltes Wasser auf **landwirtschaftlichen Flächen verregnet**
- In **Wolfsburg** wird behandeltes nährstoffreiches Abwasser im Sommer für die **Bewässerung** und im Winter nährstoffarmes Wasser zur **Grundwasseranreicherung** genutzt
- An beiden Standorten ist der Anbau von **Obst- und Gemüse zum Rohverzehr**

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

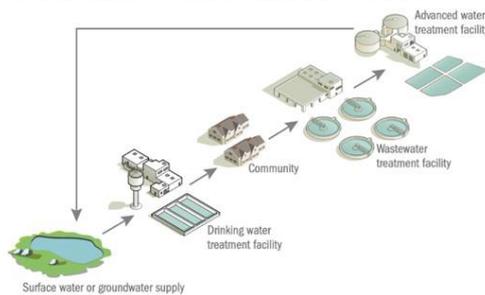
untersagt.

2. Herausforderungen an Aufbereitungsverfahren

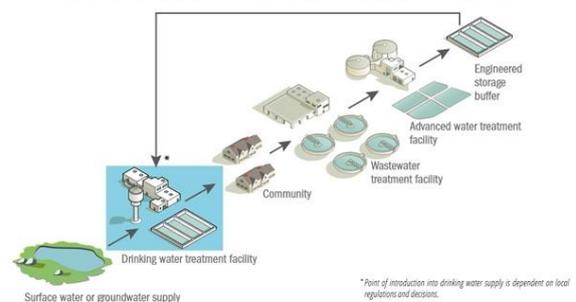


Fortgeschrittene Abwasserbehandlungsverfahren sind unerlässlich, bevor das Wasser „fit-for-purpose“ wiederverwendet werden kann

Fließschema der indirekten Trinkwasserwiederverwendung



Fließschema der direkten Wiederverwendung von Trinkwasser



*Point of introduction into drinking water supply is dependent on local regulations and decisions.

2. Herausforderungen an Aufbereitungsverfahren

Eliminierung von Mikroorganismen aus dem Abwasser (gesundheitliche Aspekte):

- Zur Beseitigung von Mikroverunreinigungen erfolgt die Behandlung durch Adsorption mit Aktivkohle
- Oxidationsverfahren wie UV, Ozon oder fortgeschrittene Oxidationsverfahren (AOP) sind eine weitere Option
- Einsatz von Membranen ist eine dritte Möglichkeit



Quelle: <https://www.wtrw.com/2016/03/23/werlitz-bayerer-abwasser-oxidation-facility-tesche-schlagel-rwth>

05 Schlussfolgerungen



Bildquelle: Shutterstock

Schlussfolgerungen

- Länder, die seit Jahrzehnten unter hohem Wasserstress stehen (z. B. USA oder China), haben **frühzeitig geeignete Vorschriften** für die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser erlassen, um eine ausreichende Wasserqualität zu gewährleisten.
- In einigen Ländern **gibt es keine Vorschriften** für die Herstellung von wiederverwendbarem Wasser nach dem Prinzip „fit-for-purpose“ (und damit für die entsprechenden Aufbereitungsverfahren)
- **Die Implementierung von Wasserwiederverwendungskonzepten** ist immer noch eine Herausforderung, daher müssen die Akteure der Raum- und Stadtplanung sowie der Siedlungswasserwirtschaft eng zusammenarbeiten, um die Wasserwiederverwendung zu **steigern/umzusetzen**



Bildquelle Shutterstock

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

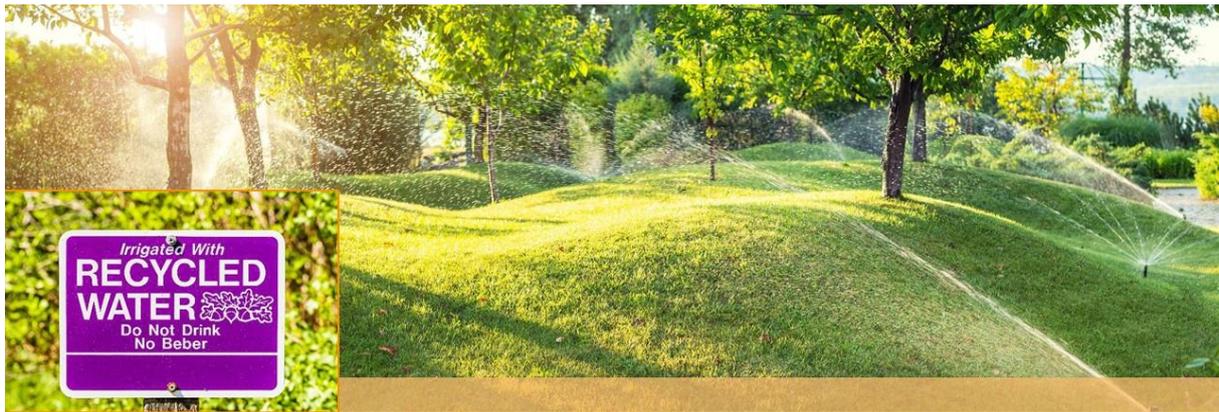
22.12.2023 35

Eigene Fachliteratur

- Wagner, Martin; Bauer, Sonja (Hg.) (2023): Industrial and Municipal Wastewater Treatment with a Focus on Water-Reuse: MDPI. [Link](#)
[Special Issue](#)
- Bauer, S. und Wagner, M. (2022): Possibilities and Challenges of Wastewater Reuse—Planning Aspects and Realized Examples. In: Water. <https://doi.org/10.3390/w14101619>
- Bauer, S.; Dell, A.; Behnisch, J.; Linke, H. J.; Wagner, M. (2020): Sustainability requirements of implementing water-reuse concepts for new industrial park developments in water-stressed regions. In: Water Reuse & Desalination, [DOI: 10.2166/wrd.2020.028](https://doi.org/10.2166/wrd.2020.028)
- Bauer, S.; Linke, H. J.; Wagner, M. (2020): Optimizing water-reuse and increasing water-saving potentials by linking treated industrial and municipal wastewater for a sustainable urban development. In: Water Science and Technology, 81 (9), p. 1927–1940. [DOI: 10.2166/wst.2020.257](https://doi.org/10.2166/wst.2020.257)
- Bauer, S.; Linke, H. J.; Wagner, M. (2020): Combining industrial and urban water-reuse concepts for increasing the water resources in water-scarce regions. In: Water Environment Research (WER). Water Environment Research 92 (7), p. 1027–1042. [DOI: 10.1002/wer.1298](https://doi.org/10.1002/wer.1298)
- Bauer, S.; Dell, A.; Behnisch, J.; Chen, H.; Bi, X.; Nguyen, V. A.; Linke, H. J.; Wagner, M. (2019): Water-reuse concepts for industrial parks in water-stressed regions in South East Asia. In: Water Supply 20 (1), p. 296–306 [DOI: 10.2166/ws.2019.162](https://doi.org/10.2166/ws.2019.162)
- Bauer, S.; Dell, A.; Behnisch, J.; Linke, H. J.; Wagner, M. (2019): Optimizing water-reuse opportunities for industrial Parks. In: Water Environment Federation (WEF) (Hg.): 92nd Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference (WEFTEC 2019). Chicago, S. 470–484, <http://www.proceedings.com/50954.html>
- Bauer, S.; Behnisch, J.; Dell, A.; Gahr, A.; Leinhos, M.; Linke, H. J.; Shen, W.; Tolksdorf, J.; Wagner, M. (2019): Water Reuse Fit for Purpose by a Sustainable Industrial Wastewater Management Concept. In: Chemie Ingenieur Technik, [DOI: 10.1002/cite.201900024](https://doi.org/10.1002/cite.201900024)

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Wagner, Prof. Dr.-Ing. S. Bauer

22.12.2023 36



VIELEN DANK!

Prof. Dr.-Ing. habil. Martin
Wagner

FG Abwassertechnik

Technische Universität Darmstadt

Tel. +49 (6151) 16-20302

m.wagner@iwar.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. Sonja Bauer
FG Landmanagement

Ostbayerische Technische
Hochschule (OTH) Amberg-
Weiden

Tel. +49 (9621) 482-3613

s.bauer@oth-aw.de

Mikroplastikentfernung aus kommunalem Abwasser – Rückhalt von Mikroplastikpartikeln in Kläranlagen

Tim Fuhrmann
Peter Wulf

Emscher Wassertechnik GmbH
Essen

Einleitung

Da Kunststoffe in stetig steigenden Mengen produziert werden und gleichzeitig sehr langlebig sind, ist eine zunehmende Anreicherung in der limnischen und maritimen Umwelt zu verzeichnen, auch in Form von Mikroplastik. Viele Kunststoffarten gelten zwar an sich als toxikologisch unbedenklich, allerdings sind die öko- und humantoxikologischen Risiken von immer weiter degradierenden Kunststoffpartikeln noch unklar, zumal die Partikel unterschiedlichste Additive enthalten und auch als Träger von Spurenstoffen und pathogenen Mikroorganismen dienen können (UBA, 2017). Eine Reduzierung der weiteren Kunststoffemissionen in die Umwelt erscheint schon aus Vorsorgegründen unabdingbar.

Schon vor Jahren haben Untersuchungen zu Kunststoff-Partikeln in deutschen Binnengewässern (UBA, 2017; Länderbericht, 2018) haben auf Kunststoffeinträge über unterschiedliche Abwasserpfade aufmerksam gemacht. Im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt“ wurde dazu im REPLAWA-Verbundprojekt der Rückhalt von Mikroplastikeinträgen im Zusammenhang mit der kommunalen Abwasserbehandlung untersucht (Hinzmann et al., 2022; REPLAWA, 2022a).

Eintragungspfade von Mikroplastik in die aquatische Umwelt

Als Mikroplastik werden in der Regel Kunststoffpartikel in einem Größenbereich von 1 – 5.000 µm bezeichnet, teilweise wird jedoch auch der Größenbereiche 1 – 1.000 µm abgegrenzt, da dieser eine sinnvolle methodische Anwendbarkeit der Analyseverfahren für die massebezogene Mikroplastikdetektion ermöglicht (Braun et al., 2020; Bertling et al., 2022). Neben Einträgen durch Verwehungen, Littering und Bodenabtrag werden Mikroplastikpartikel auch über Schmutz-, Misch- und Niederschlagswasser in die aquatische Umwelt eingetragen.

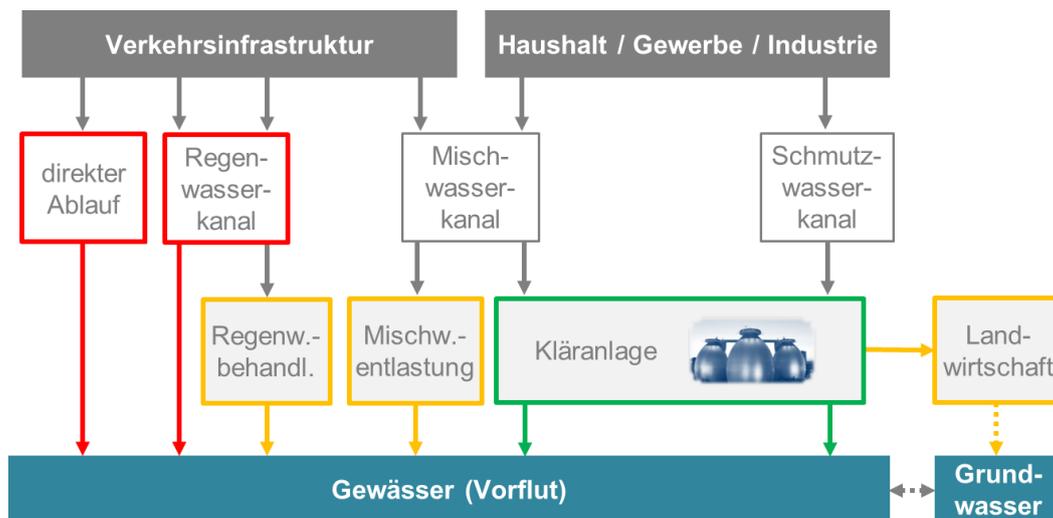


Abbildung 1: Eintragungspfade von Mikroplastik in die aquatische Umwelt (modifiziert nach Scheer und Fuhrmann, 2019)

Mikroplastik im Abwasser gelangt dabei grundsätzlich auf drei Wegen in die aquatische Umwelt (Abbildung 1):

- über das in Kläranlagen behandelte Schmutz- und Mischwasser (Eintrag in die Gewässer) bzw. über das Ausbringen von Klärschlamm in der Landwirtschaft (Eintrag in Böden),
- über Mischwasserentlastungen,
- über unbehandeltes oder durch Regenwasserbehandlungsanlagen aufbereitetes Niederschlagswasser.

Eine besondere Rolle spielen Mikroplastikemissionen von Verkehrsflächen. Insbesondere der Reifenabrieb, der für Deutschland mit rund 100.000 t/a abgeschätzt wird (Bertling et al., 2018; Venghaus et al., 2021). Soweit die Entwässerung der Verkehrsflächen über die Mischwasserkanalisation erfolgt, sind entsprechende Frachten an Reifenabrieb und sonstigen verkehrsbezogenen Partikeln als eine der Mikroplastikfraktionen im Kläranlagenzulauf zu finden, von denen – wie in Abschn. 0

quantifiziert wird – der allergrößte Teil in den Kläranlagen jedoch zurückgehalten werden kann.

Bei Verkehrsflächen, die über die Regenwasserkanalisation entwässert werden, erfolgt ein gewisser Mikroplastikrückhalt über die Regenwasserbehandlung, sofern vorhanden. Belastbare Daten liegen hierzu bisher nicht vor; diese werden derzeit u. a. im Vorhaben ReMiPla (2023) erhoben. Über nicht erfasste Oberflächenabflüsse von Verkehrsflächen gelangen Mikroplastikpartikel ohne Frachtreduzierung in die aquatische Umwelt (Baensch-Baltruschat et al., 2021).

Rückhalt von Mikroplastik in Kläranlagen

Kläranlagen als Senke für Mikroplastik

Während des Reinigungsprozesses in der Kläranlage wird auch die Mikroplastikfracht im zufließenden Abwasser schrittweise reduziert. Als Senke wirken das Rechen- und Sandfanggut, das Leichtstoff-/Fettfanggut sowie der Klärschlamm (siehe Abbildung 2 und Kapitel „Mikroplastik im Klärschlamm“).

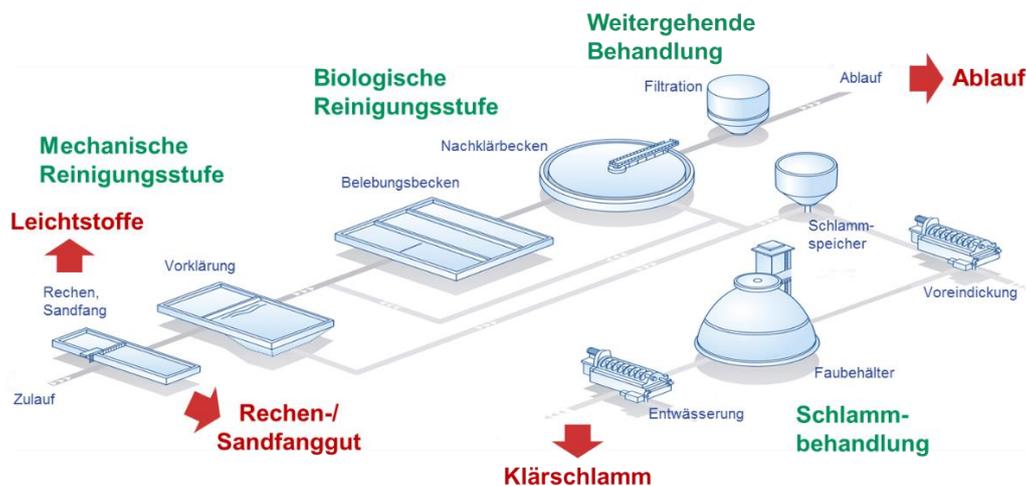


Abbildung 2: Austragspfade von Mikroplastik auf Kläranlagen

Größere Partikel (großes Mikroplastik > 1 mm und Makroplastik > 5 mm) lassen sich in der mechanischen Stufe von Kläranlagen generell besser abscheiden als kleines Mikroplastik. Schätzungsweise 80 – 90 % der Mikroplastikeinträge, vor allem größere Fraktionen, werden bereits vor der biologischen Stufe zurückgehalten (Talvitie und Heinonen, 2014; siehe auch Abbildung 3).

Kunststofffraktionen mit Partikelgrößen oberhalb des Mikroplastiks (> 5 mm) werden zu rund 100 % zurückgehalten (Breitbarth und Urban, 2018). Austräge größerer Kunststoffpartikel, wie sie 2018 an der Schlei zu beobachten waren, sind Ausnahmefälle, die auf unsachgemäße Betriebszustände oder im genannten Fall auf

die unregelmäßige Zuführung von Kunststoffpartikeln über Co-Substrate zurückzuführen sind.

Da Kunststoffpartikel mit größerer Dichte eher durch Sedimentationsprozesse bei der Abwasserreinigung entfernt werden, gelangen Kunststoffpartikel mit einer geringen Dichte eher in den Ablauf. Die Größenverteilung dreht sich zum Ablauf hin nahezu um, insbesondere bei Vorhandensein einer weitergehenden Filtration. Untersuchungen von Spelthahn et al. (2019) zeigen bspw. im Zulauf für Partikelgrößen von 1 – 5 mm einen Anteil von 45 % und für < 63 µm von 10 %, jedoch im Ablauf nach einer Sandfiltration Werte von < 10 % für Partikelgrößen von > 1 mm und 40 % für 20 – 63 µm.

Quantifizierung des Mikroplastikrückhalts in Kläranlagen

Wegen fehlender Standards bei der Mikroplastikbestimmung und fehlenden Detailangaben zu Probenahme, -aufbereitung und Analytik sind publizierte Messergebnisse von Mikroplastikkonzentrationen meist nicht direkt vergleichbar. Die Eliminationsraten für die gesamte Kläranlage oder einzelne Behandlungsstufen liegen allerdings oftmals in vergleichbaren Größenordnungen.

So deuten frühere Untersuchungen, fast ausschließlich auf Basis von Partikelzahlen, in die Richtung, dass Mikroplastikpartikel im konventionellen Klärprozess (Rechen, Sandfang, ggf. Vorklärung, Belebungsverfahren) in Größenordnungen von mindestens 90 – 96 % zurückgehalten werden (z. B. Mintenig et al., 2014; Talvitie und Heinonen, 2014; Klasmeier und Wissing, 2017; Frehland et al., 2018; Siegel und Thyen, 2020). Aktuellere massenbezogene Messwerte u. a. aus Aachen, Berlin und Braunschweig (Spelthahn et al., 2019; REPLAWA, 2022 und Abbildung 4) zeigen jedoch höhere Eliminationsgrade bei konventioneller mechanisch-biologischer Abwasserreinigung in einer Größenordnung von über 99 % (entspricht Reduzierung um ca. 2 – 3 Log-Stufen) sowie Größenordnungen um 99,9 – 99,99 % (ca. 3 – 4 Log-Stufen) bei nachgeschalteten Filtrationsverfahren (Sand- und Tuchfilter) (siehe Abbildung 3).

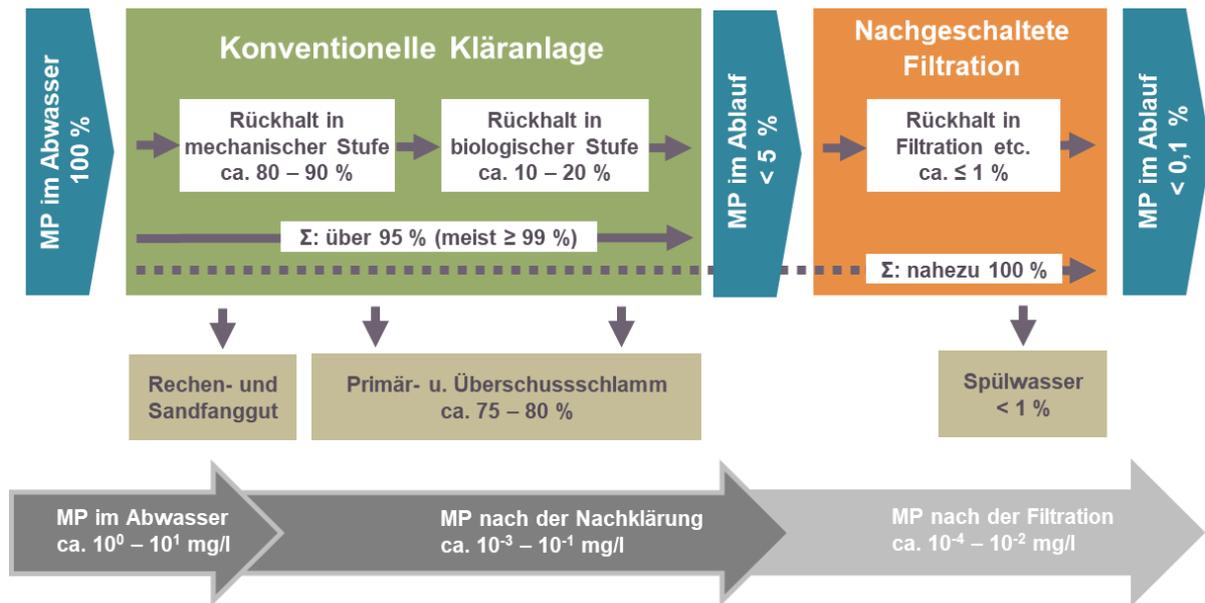


Abbildung 3: Größenordnungen von Eliminationsraten und Massenkonzentrationen für Mikroplastik in kommunalen Kläranlagen (REPLAWA, 2022a; modifiziert in Hinzmann et al., 2022)

Diese Elimination wird durch die in Abbildung 4 dargestellten Werte bestätigt, die auf Untersuchungsergebnissen zu acht Kläranlagen (mechanisch-biologische Reinigung, tlw. Sand- und Tuchfiltration) im Rahmen des REPLAWA-Projekts (REPLAWA, 2022a) basieren. Die Proben wurden mittels 24-h-Mischproben durch ein rotierendes Sieb mit 10 μ m Maschenweite gewonnen und mittels Gefriertrocknung und Mahlen für die Analytik in der TED-GC/MS an der TU Berlin aufbereitet (Fuhrmann et al., 2021; REPLAWA, 2022a).

Die relativen Mikroplastikeliminationen auf den acht Kläranlagen unterschiedlicher Größenklassen zeigen jeweils die gleiche Größenordnung und werden durch Untersuchungen von anderen Forschungsvorhaben im BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“ (Hinzmann et al., 2022) sowie von Spelthahn et al. (2019) in Aachen größenordnungsmäßig bestätigt. Die Ergebnisse aus dem REPLAWA-Projekt wie auch von Spelthahn et al. (2019) ergeben Zulaufkonzentrationen in einer Größenordnung um 10^1 mg/l. Im Ablauf der mechanisch-biologischen Behandlung werden Größenordnungen von 10^{-3} bis 10^{-1} mg/l erreicht. PE und PP bilden den größten Anteil unter den untersuchten Kunststoffen, zusammen meist deutlich über 90 %. Von Funck et al. (2020) publizierte Vergleichswerte für den Einzelkunststoff PS von 0,072 μ g/l im Kläranlagenablauf liegen in ähnlicher Größenordnung wie der REPLAWA-Wert von 0,115 μ g/l, obwohl erstgenannte mit einem anderen Verfahren analysiert wurden (Py-GC/MS). Dagegen weisen unveröffentlichte Daten aus Berlin große Unterschiede bis zum Faktor 10^3 auf. Dies macht deutlich, dass Messergebnisse, die mit unterschiedlichen Messmethoden ermittelt wurden, oftmals nicht direkt vergleichbar sind. Solche Abweichungen sind auf unterschiedliche Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analysemethoden

zurückzuführen. Dies betrifft bspw. die Reduzierung der in der Probenmatrix enthaltenen Organik (z. B. über Fenton-Auflösung).

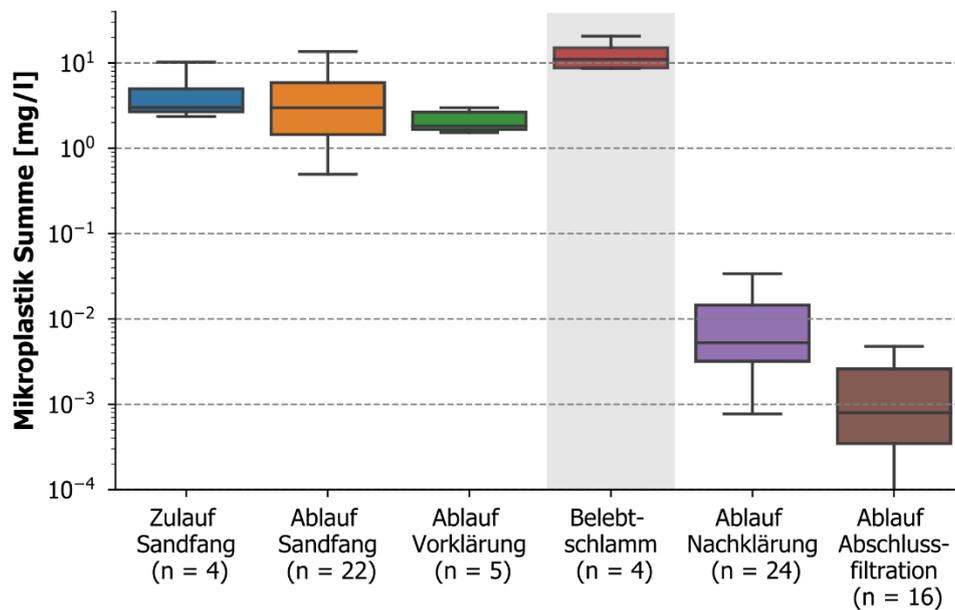


Abbildung 4: Mikroplastik-Massenkonzentrationen (PE, PP, PS, PMMA, PET; 10 – 1.000 µm) in den einzelnen Reinigungsstufen von acht Kläranlagen in Deutschland (in Klammern: Anzahl der Proben n); deutlich erkennbar ist die Anreicherung im Belebtschlamm

Auch wenn weitere Validierungen und die Verdichtungen von Messwerten noch nötig sind, zeigt sich bereits, dass der Kläranlagenablauf als Eintragspfad für Mikroplastik in die aquatische Umwelt nur eine untergeordnete Rolle spielt. Bei üblichen 5 – 6 mg/l AFS im Kläranlagenablauf entspräche eine Mikroplastikkonzentration gemäß Abbildung 4 einem Anteil von grob 1 % der Feststoffe im Ablauf.

Ein Abgleich mit den vorliegenden Messwerten zu Mikroplastikfrachten in Gewässern (z. B. aus Länderbericht, 2018) ist nur begrenzt möglich, da im Gewässerbereich bisher überwiegend die Partikelanzahlen statt der Massengehalte als Messgröße sowie abweichende Messbereiche der Partikelgröße zur Anwendung kamen.

Maßnahmen zum weitergehenden technischen Rückhalt von Mikroplastik

Um in Kläranlagen einen weitergehenden Rückhalt von Mikroplastikpartikeln zu erzielen, können Filtrationsverfahren wie Tuchfiltration, Mikrosiebung, Raumfiltration (Sand- bzw. DynaSand-Filter) und Membranverfahren eingesetzt werden. Mintenig et al. (2014) berichteten für die Kläranlage Oldenburg mit einer Tuchfiltration als nachgeschalteter Verfahrensstufe von einem Mikroplastikrückhalt von 97 %. Neuere Daten von großtechnischen Kläranlagen aus dem REPLAWA-Projekt (2022a) und auch von Spelthahn et al. (2019) zeigen die oben genannten, deutlich höheren massebezogenen Eliminationsraten von rund 99,9 – 99,99 % (3 – 4 Log-Stufen), siehe

Abbildung 3 und Abbildung 4. Der Gesamteliminationsgrad für Mikroplastik in der Kläranlage kann durch nachgeschaltete Filtration somit um rund 1 – 2 Log-Stufen gegenüber der konventionellen mechanisch-biologischen Behandlung erhöht werden.

Halbtechnische Untersuchungen zur Nachfiltration über Tuch- und Sandfilter sowie die Mikrosiebung mit Dotierung von fluoreszierendem Mikroplastik und Detektion über Fluoreszenzmikroskopie konnten Abscheidegrade von insgesamt bis zu 99,9 %, bzw. bezogen auf den Filterzulauf von 80 – 98 %, bestätigen (Meyer und Bauerfeld, 2020; REPLAWA, 2022a).

Mikroplastik im Klärschlamm

Bilanziert man den Verbleib der Mikroplastikpartikel im Zulauf der Kläranlage über den Gesamtprozess der Abwasserbehandlung (Abbildung 3), so lässt sich die in der mechanischen Reinigungsstufe inkl. Rechen und Sand-/Fettfang entfernte Mikroplastikfracht nach Spelthahn et al. (2019) sowie Talvitie und Heinonen (2014) grob auf 80 bis 90 % des Zulaufs beziffern, für die biologische Stufe auf 10 % (Talvitie und Heinonen, 2014) bis 20 % (Meyer und Bauerfeld, 2020). Insgesamt werden rund 75 – 80 % der Zulauffracht im Rohschlamm inkorporiert. Zu beachten ist, dass diese Werte auf unterschiedlichen Messmethoden beruhen, sodass die absoluten Messwerte teilweise nicht vergleichbar sind; die relativen Größenordnungen korrelieren jedoch zueinander.

Eine zuverlässige Bilanzierung der Mikroplastikfrachten für einzelne Prozessschritte der Klärschlammbehandlung wird durch die Herausforderungen, die die komplexe Klärschlammmatrix an die Probenaufbereitung und Detektion von Mikroplastikpartikeln stellt, erschwert. Auch hier widerspricht die Heterogenität der Untersuchungsansätze internationaler Studien klaren Aussagen zum Mikroplastikverbleib (Bauerfeld, 2020). Nach bisherigem Stand des Wissens scheint die Klärschlammstabilisierung, selbst unter thermophilen Randbedingungen, die Mikroplastikfracht im Rohschlamm nicht signifikant zu verändern, kann aber die Partikelgrößenverteilung beeinflussen. Dieser Zusammenhang lässt sich beispielsweise auch für die Biobabfallvergärung aufzeigen (Kranert, 2020). Für den Verfahrensschritt der Klärschlammmentwässerung ist davon auszugehen, dass Mikroplastikpartikel aus der Feststoffmatrix entzogen und dem Schlammwasser zugeführt werden.

Neben den grundsätzlichen Überlegungen zum Verbleib des Mikroplastiks bei der Schlammbehandlung lassen bis dato lediglich einige wenige Einzelmessungen zu Massenkonzentrationen eine Einschätzung der Mikroplastikfracht im zu entsorgenden Klärschlamm zu und erlauben damit direkte Rückschlüsse auf eine potenzielle Befrachtung der aufnehmenden Umweltkompartimente. So beschreiben Dierkes et al. (2019) für die Polymere PE, PP und PS Konzentrationen im Klärschlamm von 3,7 – 3,9 mg MP/ g TR. Vorläufige Ergebnisse großtechnischer Beprobungskampagnen auf

kommunalen Kläranlagen im REPLAWA-Projekt liegen vergleichbar im ein- bis zweistelligen Promillebereich der Massenkonzentration. Eine weitaus umfangreichere Datenlage zeigt sich in Studien mit Mikroplastikpartikelzählungen. Diese Daten lassen allerdings keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Mikroplastikfracht im Klärschlamm zu.

Mikroplastikeinträge über Mischwasserabschläge und Regenüberläufe

Wie in Abbildung 1 dargestellt, stellt der Eintrag von Mikroplastik über die Schmutz- oder Mischwasserkanalisation und die Kläranlage nur einen von mehreren siedlungswasserwirtschaftlichen Eintragungspfaden in die aquatische Umwelt dar. Wie oben ausgeführt, zeigen die bisherigen Untersuchungen, dass der Eintrag von Mikroplastik über Kläranlagen nur eine untergeordnete Rolle spielt und mit technischen Mitteln (Filtrationsstufen) weitgehend beherrschbar ist. Überschlägige Abschätzungen zeigen für die Kläranlagenabflüsse vermutlich einen Anteil von unter 3 % an den gesamten direkten Mikroplastik-Emissionen in die aquatische Umwelt (REPLAWA, 2022a).

Deutlich größeres Potential für Emissionsminderungen stellt der Eintrag über Mischwasser- und Regenwasserabschläge oder der direkte Abfluss von Verkehrsflächen dar. Nach Bertling et al. (2018) sind über 50 % (1.548 von 2.880 g/(E·a)) der erfassten Mikroplastikemissionen dem Verkehrssektor zuzurechnen (Abrieb von Reifen, Fahrbahnen und Markierungen). Der Niederschlagswasserabfluss von diesen Flächen wird aber nur zu einem Teil den Kläranlagen zugeführt, sodass insbesondere im Bereich der Niederschlagswasserbehandlung weiterer Handlungsbedarf besteht. Jedoch stehen gerade für diesen Bereich belastbare Daten zu Mikroplastikstoffströmen noch weitgehend aus bzw. sind noch Gegenstand weiterer Untersuchungen (ReMiPla, 2023).

Die Erfassung von Verkehrsflächen außerhalb der Siedlungsbebauung, deren Abflüsse weder gefasst noch gereinigt werden, aber auch die große Zahl an einzelnen Austragsquelle aus der Misch- und Regenwasserkanalisation stellt eine besondere Herausforderung für mögliche Maßnahmen zur Verringerung von Mikroplastikeinträgen dar: Während die Anzahl der öffentliche Kläranlagen mit rund 9.105 angegeben wird, gibt es nach offiziellen Zahlen 45.508 erfasste Regenüberlaufbecken, Stauraumkanäle und Regenwasserüberläufe im Mischsystem sowie 4.133 Regenklärbecken in der Regenwasserkanalisation (Dettmar und Brombach, 2019; Datengrundlage 2016). Und viele Abflüsse von Verkehrsflächen gerade im ländlichen Bereich sind dabei noch gar nicht erfasst.

Fazit und Ausblick

Mikroplastik wird über Schmutz-, Misch- und Niederschlagswasser in die aquatische Umwelt eingetragen und betrifft daher direkt die Abwasserentsorgung. Für die Bewertung der Mikroplastikemissionen über das Abwasser bestehen noch große Herausforderungen aufgrund unterschiedlicher Messgrößen (Partikelzahl/Massengehalt) sowie fehlender Standardisierung der Probenahme, Probenaufbereitung und Analyse von Umweltproben auf Mikroplastik. Daher sind Publikationen zu Mikroplastikkonzentrationen in Abwasserströmen und Gewässern in Bezug auf absolute Messwerte nur bedingt miteinander vergleichbar.

Die Untersuchungen zu massenbezogenen Eliminationsraten von Mikroplastik in Kläranlagen im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt“ zeigen, dass bei der konventionellen mechanisch-biologischen Abwasserreinigung Mikroplastik zu über 99 % (ca. 2 – 3 Log-Stufen) aus dem Abwasserstrom eliminiert wird. Mit zusätzlichen technischen Maßnahmen wie Filteranlagen werden Eliminationsraten von bis zu 99,99 % (ca. 3 – 4 Log-Stufen) erzielt. Diese relativen, massebezogenen Eliminationsraten decken sich größenordnungsmäßig mit anderen Literaturdaten, liegen aber über den bisherigen partikelbezogenen Auswertungen. Ein kritischer Punkt sind die teilweise erheblichen Unterschiede in den publizierten Absolutwerten der Massenkonzentrationen, die mehrere Zehnerpotenzen betragen können. Diese werden insbesondere auf unterschiedliche Probenahme- und Probenaufbereitungsmethoden zurückgeführt.

Auch wenn weitere Validierungen noch ausstehen, kann zusammenfassend davon ausgegangen werden, dass unter den Eintragungspfaden für Mikroplastik in die aquatische Umwelt die Kläranlagen aufgrund der hohen Eliminationsleistungen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Für den Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sind daher zukünftig verstärkt die Eintragungspfade über Mischwasserentlastungen und Regenwasserabflüsse in den Blick zu nehmen.

Mit der Entfrachtung des Mikroplastiks aus dem Abwasserstrom in den Kläranlagen ist eine Belastung des Klärschlammes als Senke der partikulären Polymere unmittelbar verknüpft. Die Aufkonzentration im Klärschlamm wird relevant, wenn dieser bodenbezogen verwertet wird und Mikroplastikpartikel damit in Böden eingetragen werden. Die noch wenig belastbare Datengrundlage zu Massenkonzentrationen im Klärschlamm erlaubt aktuell nur näherungsweise Abschätzungen der Verfrachtung von Mikroplastik über Klärschlamm in die Umwelt. Von Interesse kann auch die Qualität der zukünftig steigenden Mengen an Phosphor-Rezyklaten in Bezug auf eine mögliche Mikroplastikkontamination sein.

Für kleinere Partikel unterhalb der bis dato probenahmetechnisch erfassbaren Grenze von 5 – 10 µm (also von Sub-Mikroplastik bzw. Nanoplastik), denen ein höheres

ökotoxikologisches Potenzial zugeschrieben wird, liegen bisher kaum belastbare Daten vor. Diese sehr kleinen Partikel sind, wie auch flüssige, gelöste und gelartige Polymere, zudem mit vielen bisher eingesetzten technischen Filtrationssystemen kaum zu eliminieren. Es besteht also weiterhin vielfältiger Forschungsbedarf zum Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft (REPLAWA, 2022b).

Danksagung

Um dem großen Klärungsbedarf zu den Eintragungspfaden von Kunststoffen in die Umwelt zu untersuchen, ist vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) der Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“ aufgesetzt worden (PlastikNet, 2023). Die Autoren danken dem BMBF für die Unterstützung des Forschungsprojekts REPLAWA (Förderkennzeichen 02WPL1445A ff.) im Rahmen dieses Forschungsschwerpunkts.

Literatur

- Baensch-Baltrusch et al. (2021): Tyre and road wear particles – A calculation of generation, transport and re-lease to water and soil with special regard to German roads, *Science of the Total Environment*, 752, 2021, 141939
- Bauerfeld, K. (2020): Klärschlamm als Senke für Mikroplastik jetzt und in Zukunft? Fachtagung der Kommission Bodenschutz beim UBA (KBU) zum Weltbodentag 2020: Kunststoffe in der Umwelt – Ein Problem für unsere Böden, oder nur falscher Alarm? 03.12.2020, online
- Bertling, J., Bannick, C. G., Brinkmann, L., Barkmann, L., Braun, U., Knoblauch, D., Kraas, C., Mederake, L., Nosić, F., Philipp, B., Sartorius, I., Schmitt, H., Stein, U., Wencki, K., Wendt-Potthoff, K., Woidasky J. (2022): Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium, 2. Auflage 2022, <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-647638>, online verfügbar unter https://bmbf-plastik.de/de/Publikation/Kompendium_Kunststoff-in-der-Umwelt_2022
- Bertling, J., Bertling, R. und Haman, L. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Kurzfassung der Konsortialstudie, Hrsg.: Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen, Juni 2018
- Braun, U. et al. (2020): Mikroplastik-Analytik, Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren. Statuspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Plastik in der Umwelt - Quellen • Senken • Lösungsansätze“, Stand: November 2020, https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier_Mikroplastik%20Analytik_Plastik%20in%20der%20Umwelt_2020.pdf

- Breitbarth, M., Urban, A. I. (2018): Kunststoffe in kommunalen Kläranlagen – Eintrag und Verteilung in ausgewählten Kläranlagen. In: KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2018 (65), Nr. 9, S. 800-807
- Dettmar, J., Brombach, H. (2019): Im Spiegel der Statistik: Abwasserkanalisation und Regenwasserbehandlung in Deutschland. In: KA Korrespondenz Abwasser, 2019 (66), Nr. 5, S. 354-364
- Dierkes, G., Lauschke, T., Becher, S., Schumacher, H., Földi, C., Ternes, T. (2019): Quantification of microplastics in environmental samples via pressurized liquid extraction and pyrolysis-gas chromatography, *Anal. Bioanal. Chem.*, 411, 2019, S. 6959–6968, <https://doi.org/10.1007/s00216-019-02066-9>
- Frehland, S., Schmiedgruber, M., Kägi R., Mitrano, D. (2018): Fate and Transport of Particulate Plastics in a Pilot Scale Wastewater Treatment Plant (WWTP). Vortrag bei der Konferenz MICRO 2018, Lanzarote, 19.-23.11.2018
- Fuhrmann, T., Urban, I., Scheer, H., Lau, P., Reinhold, L., Barjenbruch, M., Bauerfeld, K., Meyer, S. (2021): Mikroplastik-Emissionen aus Kläranlagen - Welche Rolle spielt die Abwasserbehandlung? *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Jg. 68, Nr. 9, pp. 730-741
- Funck, M., Yildirima, A., Nickela, C., Schramc, J., Schmidt, T. C., Türk, J. (2020): Identification of microplastics in wastewater after cascade filtration using Pyrolysis-GC-MS, *MethodsX*, 7, 2020, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2019.100778>
- Hinzmann, M., Knoblauch, D., Mederake, L., Schmitt, H., Stein, U. (Hrsg.) (2022): Kernbotschaften zum Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“. Download unter <https://bmbf-plastik.de/de/Publication/Kernbotschaften>
- Klasmeier, J., Wissing, M. (2017): Waschmaschinenablauf als mögliche Eintragsquelle von Textilfasern (Mikroplastik) in Gewässer, Abschlussbericht, Universität Osnabrück, 2017, https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presse_und_offentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/neue-studie-klaeranlagen-bremsen-mikrofasern-aus-154426.html
- Kranert, M. (2020): Mikrokunststoffe in Produkten aus Bioabfall – Einträge in Böden, Fachtagung der Kommission Bodenschutz beim UBA (KBU) zum Weltbodentag 2020: Kunststoffe in der Umwelt – Ein Problem für unsere Böden, oder nur falscher Alarm? 03.12.2020
- Länderbericht (2018): Mikroplastik in Binnengewässern Süd- und Westdeutschlands. Bundesländerübergreifende Untersuchungen in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Teil 1: Kunststoffpartikel in

- der oberflächennahen Wasserphase. Karlsruhe, Augsburg, Wiesbaden, Recklinghausen, Mainz, 2018, https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/6_sonderreihen/L%C3%A4nderbericht_Mikroplastik_in_Binnengew%C3%A4ssern.pdf
- Meyer, S., Bauerfeld, K. (2020): Mikroplastikverbleib in kommunalen Kläranlagen und im Klärschlamm. DWA-Seminar „Mikroplastik im Abwasser – ein Problem?“, 01.10.2020, Kassel
- Mintinig, S., Int-Veen, I., Löder, M., Gerdts, G. (2014): Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen. Probenanalyse mittels Mikro-FTIR Spektroskopie. Abschlussbericht, 2014
- PlastikNet (2023): Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt – Quellen • Senken • Lösungsansätze“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Website des übergreifenden Vernetzungsprojekts PlastikNet, www.bmbf-plastik.de
- ReMiPla (2023): Untersuchung von Mikroplastik-Einträgen über Misch- und Niederschlagswassereinleitungen in Gewässer. Website des vom Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen geförderten Verbundprojekts, www.evlw.de/remipla
- REPLAWA (2022a): Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt. Schlussbericht zum BMBF-geförderten FuE-Vorhaben, Juli 2022, online verfügbar unter <http://www.replawa.de/publikationen/>.
- REPLAWA (2022b): Mikroplastik-Einträge über das Abwasser in die aquatische Umwelt – Handlungsempfehlungen und Erkenntnisse aus dem REPLAWA-Vorhaben zur Ermittlung und Verringerung von Mikroplastik-Einträgen im Bereich der Abwasserentsorgung. August 2022, online abrufbar unter <https://www.replawa.de/publikationen> und <https://bmbf-plastik.de/de/ergebnisse>.
- Scheer, H.; Fuhrmann, T. (2019): Rückhalt von Mikroplastik in Kläranlagen. Vortrag und Beitrag in: Tagungsband zum 37. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft „Mikroplastik – Herausforderungen und Lösungen für die Siedlungswasserwirtschaft“ am 05.09.2019 in Bochum, Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 79, S. 41-48, ISSN 0178-0980.
- Siegel, H., Thyen, E. (2020): Pilotscreening nach Mikroplastik am Zentralkläwerk Lübeck – Aufkommen und Verteilung von Mikroplastik in einer kommunalen Kläranlage. In: KA Korrespondenz Abwasser Abfall, Jg. 67, Nr. 2, 2020, S. 105-111

- Spelthahn, V., Dolny, R., Giese, C., Giebel, K., Leuchthaler, S., Pinnekamp, J., Linnemann, V. (2019): Mikroplastik aus Mischsystemen. Beitrag zur 52. Essener Tagung am 20.-22.03.2019. In: GWA - Gewässerschutz, Wasser & Abwasser, Bd. 250, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft a. d. RWTH Aachen
- Talvitie, J., Heinonen, M. (2014): Preliminary study on synthetic microfibers and particles at a municipal waste water treatment plant, Hrsg.: HELCOM – Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki, 2014
- UBA (Hrsg.) (2017): Wasserwirtschaft in Deutschland, Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. Hrsg.: Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2017, ISSN 2363-832X, Download unter www.umweltbundesamt.de/publikationen, Kap. 3.8 Einträge von Kunststoffen in die Umwelt
- Venghaus, D., Schmerwitz, F., Reiber, J., Sommer, H., Lindow, F., Herper, D., Barjenbruch, M. (2021): Reifenabrieb Hot Spots im urbanen Straßenraum – Möglichkeit zur Identifizierung und Bewertung, im Begutachtungsprozess bei GWF Wasser/Abwasser, 2021

Anschrift der Verfasser:**Tim Fuhrmann**

Emscher Wassertechnik GmbH
Brunnenstraße 37
45128 Essen

Tel. +49 201 3610 - 555
Fax: +49 201 3610 - 100
E-Mail: fuhrmann@ewlw.de

Peter Wulf

Emscher Wassertechnik GmbH
Brunnenstraße 37
45128 Essen

Tel. +49 201 3610 - 120
Fax: +49 201 3610 - 100
E-Mail: wulf@ewlw.de

Mikroschadstoff- und Phosphorentfernung – Neues Verfahren mit superfeinen Adsorbens und Polstofffiltration

**Thomas Fundneider
Randy Schäfer
Ulrich Grabbe**

**Mecana Umwelttechnik GmbH
Reichenburg, Schweiz**

**Franziska Kirchen
Susanne Lackner**

**Technische Universität Darmstadt,
Darmstadt, Deutschland**

Einleitung

Die Entfernung von Pulveraktivkohle (PAK) als Adsorbens für Mikroschadstoffe mit Polstofffiltration (englisch: Pile Cloth Media Filtration, PCMF) ist Stand der Technik. Bei dem Einsatz von PAK als nachgeschaltete Behandlungsstufe ist die vollständige Entfernung von PAK erforderlich, sodass der Restgehalt < 1 mg/l oder die Entfernung ≥ 95 % beträgt (DWA, 2022). Mikrofaser Polstoffe (englisch: Pile Cloth Media, PCM) erzielen hierbei PAK-Restgehalte kleiner der Nachweisgrenze von 0,2 mg/l (Wevelsiep et al., 2021). Geringe Gesamtphosphor- (TP $< 0,2$ mg/l) und Feststoffgehalte (AFS $< 2 - 3$ mg/l) sowie die Entfernung von Mikroplastik sind Synergieeffekte. Die notwendige Kontaktzeit der Aktivkohle (AK) hängt von der Adsorptionskinetik ab. Typischerweise beträgt die Kontaktzeit bei dem nachgeschalteten PAK-Einsatz ~ 30 min. Bei PAK-Anreicherung liegt der AK-Bedarf zur 80 %igen Spurenstoffentfernung bei $\sim 8 - 10$ mg/l, wohingegen dieser ohne die Anreicherung bei ~ 15 mg/l liegt (DWA, 2022). Je kleiner der Partikeldurchmesser ist, desto schneller wird das Adsorptionsgleichgewicht erreicht. Superfeine Adsorbens, wie superfeine PAK (sPAK) mit $d_{50} \leq 1 - 5$ μm bieten das Potential den Platz- und Ressourcenbedarf,

durch die bessere Adsorptionskinetik (Bonvin et al., 2016), zu senken. Dieser Beitrag betrachtet nachfolgend Aspekte der Herstellung von superfeinen Adsorbens und das Potential des neuen Verfahrens der Direktzugabe von sPAK vor PCMF zur Entfernung von Mikroschadstoffen.

Material und Methoden

Herstellung von superfeinen Adsorbens

Die Herstellung von sPAK erfolgte durch Nassvermahlung mittels einer Kugelmühle (NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH, Germany). Hierzu wurden Mahlkörper aus Zirconiumdioxid mit einer Feinheit von 0,7 – 0,8 mm verwendet. Zur Beurteilung der Mahleigenschaften wurden sechs AK aus unterschiedlichen Rohmaterialien (Holz, Torf, Kokosnuss-Schalen, Braun- und Steinkohle) untersucht. Alle AK wurden auf $d_{50} \sim 1 \mu\text{m}$ vermahlen und zu einer $\sim 10\%$ igen sPAK-Suspension ($\rho \sim 1'000 \text{ kg/m}^3$) überführt.

Direktzugabe von superfeinen Adsorbens vor Polstofffiltration

Die Untersuchungen des Kompaktverfahren erfolgten im Ablauf einer kommunalen Kläranlage mit Belebtschlammverfahren in Süd-Hessen über 400 Tage. Das Verfahren umfasste einen Injektor (sPAK), statischen Mischer (Fäll-/Flockungsmittel), Flockungsreaktor (hydraulische Aufenthaltszeit (HRT) = 0,5 – 2 min) sowie PCMF (Mecana Umwelttechnik GmbH, Schweiz), siehe Abbildung 1.

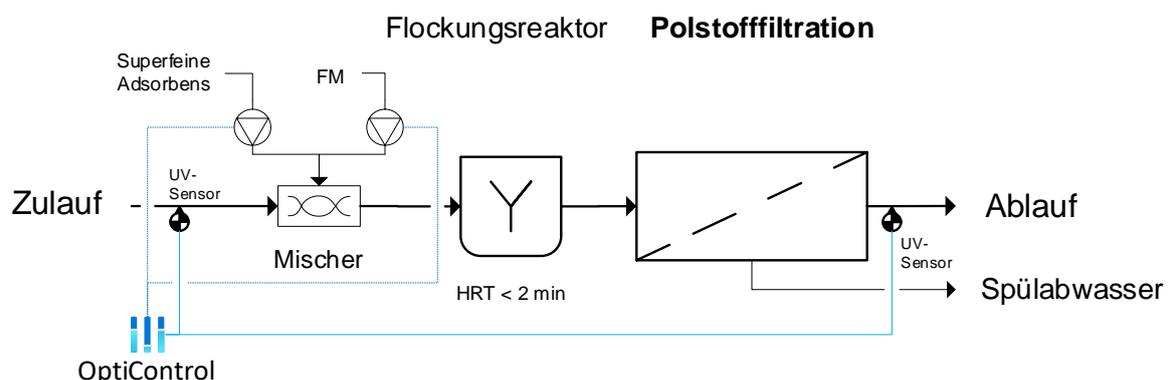


Abbildung 1: Schematische Verfahrensübersicht – Einmischung von superfeinen Adsorbens, Flockungsmittel (FM), Flockungsreaktor mit hydraulischer Aufenthaltszeit (HRT) < 2 min und Polstofffiltration.

Der PCMF-Prozess bestand aus einem Trommelfilter mit einer Filterfläche von 2 m^2 und wurde mit Filtergeschwindigkeiten von 1,0 - 9,0 m/h betrieben. Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei Absauglippen, eine profilierte Version und eine profilierte Version mit Borsten untersucht. Zwei verschiedene OptiFiber® Polstoffe (PCM), Mikrofaser (PCM1) und Ultrafaser (PCM2), wurden untersucht. Dem Kläranlagenablauf wurden zunächst sPAK (5 – 15 mg/l), anschließend

Eisen(III)-chlorid ($0 - 1,0 \text{ g Fe}^{3+}/\text{g sPAK}$) und (phasenweise) anionisches oder kationisches Polymere ($0 - 10 \text{ mg Polymer/g Fe}^{3+}$) mit einem Injektor und statischen Mischern (Fluitec mixing + reaction solutions AG, Schweiz) zugegeben. Die Dosierung von sPAK erfolgte mit einer Schlauchpumpe (Watson-Marlow AG, Vereinigtes Königreich) und die Zugabe der Additive mit einer Membrandosierpumpe (Grundfos, Dänemark). Die Dosiermengen wurden gravimetrisch mit einer Fasswaage (PCE Deutschland GmbH, Deutschland) bestimmt. Das Eisen(III)-chlorid (40 %) wurde mit dem Faktor 1:10 verdünnt, um eine bessere Durchmischung und die Mindestdosierung von $1 \text{ l}/10 \text{ m}^3$ im statischen Mischer zu gewährleisten. Die hydraulische Verweilzeit (HRT) in der Flockungseinheit betrug je nach Filtergeschwindigkeit $< 0,5 - 2$ Minuten vor der PCMF. Weitere Angaben zum Versuchsaufbau sowie durchgeführten Analysen sind Fundneider et al. (2023) zu entnehmen.

Analyse des Restgehaltes der superfeinen Adsorbens

Die Analyse des AK-Restgehaltes im Ablauf der Filtration wurde von der Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Ecopreneurship (Schweiz), durchgeführt. Für jede Analyse wurden 10 l Probenvolumen entnommen und mit der Grauwertmethode analysiert. Für die Grauwertmethode wird die Probe filtriert ($0,45 \mu\text{m}$; Nitratzellulosefilter). Anschließend erfolgt eine Aufnahme des getrockneten Filterpapiers (bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ für mindestens 4 Stunden) mit hochauflösendem Scanner (2.400 dpi). Die Rot-, Grün- und Blauwerte werden mit Hilfe eines Matlab-Codes bestimmt und die Ermittlung der AK-Konzentration erfolgt mit Hilfe eines Algorithmus. Die Bestimmungsgrenze liegt bei $0,03 \text{ mg/l}$ ($30 \mu\text{g/l}$).

Ergebnisse

Herstellung von superfeinem Adsorbens

Unabhängig vom Rohmaterial wurde bei gleicher Mahldauer und Slurry-Konzentration eine vergleichbare Partikelgröße erreicht. Die Partikelgröße, unter der 90 % aller Partikel (d_{90}) nach dem Mahlen lagen, korreliert mit d_{50} . Der d_{90} bei einem d_{50} von etwa $1 \mu\text{m}$ lag bei $\leq 2 - 3 \mu\text{m}$. Der Energiebedarf der Vermahlung hängt nur von der Mahldauer ab unabhängig von der Slurry-Konzentration ($5 - 15 \%$). Abbildung 2 zeigt die Beziehung zwischen Mahldauer, Partikeldurchmesser und Energiebedarf.

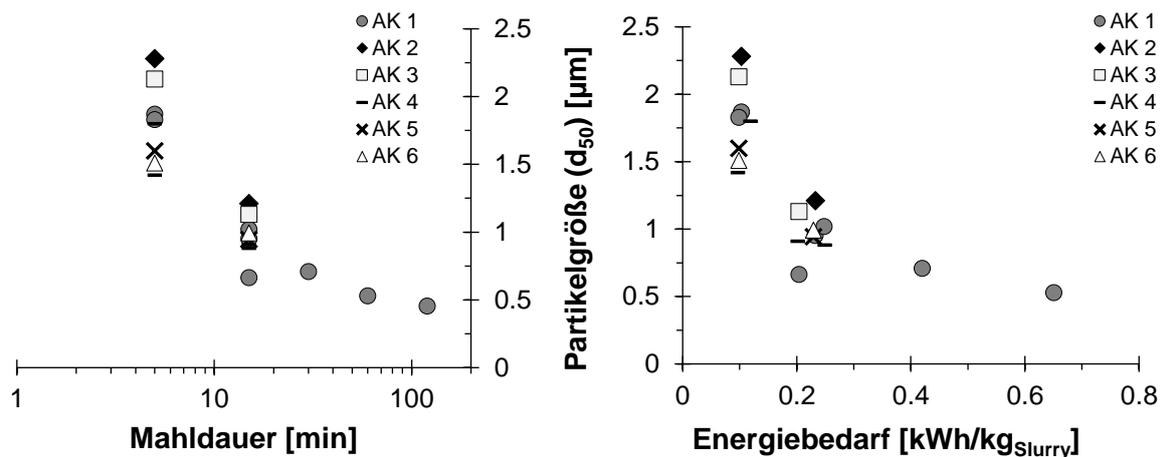


Abbildung 2: Beziehung zwischen Partikelgröße (d_{50}), Mahldauer und Energiebedarf zur Herstellung von superfeinen Adsorbens aus verschiedenen Aktivkohlen (AK) nach Fundneider et al. (2023).

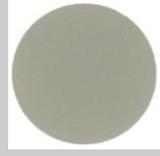
Der spezifische Energiebedarf zur sPAK-Herstellung mit $d_{50} \sim 1 \mu\text{m}$ betrug etwa $0,2 \text{ kWh/kg Slurry}$. Somit beträgt der spezifische Energiebedarf des Mahlprozesses zum Erreichen eines Partikeldurchmessers von $d_{50} \sim 1 \mu\text{m}$ etwa 20 Wh/m^3 (bei 10 mg/l). Für sPAK mit einem Partikeldurchmesser von $d_{50} \sim 1,5 \mu\text{m}$ beträgt der spezifische Energiebedarf nur etwa 10 Wh/m^3 (bei 10 mg/l). Zu erwähnen ist, dass der Kühlwasserbedarf für die Herstellung ($\sim 100 - 150 \text{ l/l Mahlräumvolumen/h}$) und damit dessen spezifischer Energiebedarf nicht in der Berechnung berücksichtigt wurde. Die sPAK-Herstellung kann vor Ort erfolgen. Für die bedarfsgerechte Dosierung sind keine speziellen Wiege- und Mischvorrichtungen erforderlich. Die sPAK-Slurry kann einfach vor der Filtrationsstufe dosiert werden. Die Handhabung des Slurry sowie das bei der Produktion eingesetzte Nassmahlverfahren sind aus Sicht des Explosionsschutzes unkritisch.

Surrogatparameter für den Restgehalt an Aktivkohle

Tabelle 1 zeigt einen qualitativen und quantitativen Vergleich der PCMF-Ablaufqualität für verschiedene $\text{Fe}^{3+}/\text{sPAK}$ -Verhältnisse. Hierbei zeigt sich deutlich, dass die qualitative Bewertung der Qualität nicht mit den quantitativen Messungen übereinstimmt. Trotz der geringen Trübung sowie der niedrigen sPAK-Restgehalte ist bei einigen Proben eine deutliche Färbung zu erkennen. Diese ist teilweise durch die Färbung des Abwassers selbst bedingt und wird durch die Ablaufbedingungen der Kläranlage beeinflusst. Die Messungen des sPAK-Restgehalts mit der Grauwertmethode ($n = 15$) zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der Trübung ($\text{sPAK} [\mu\text{g/l}] = 305,8 \cdot \text{Trübung} [\text{NTU}]$, $R^2 = 0,97$) und dem spektralen Absorptionskoeffizienten bei einer Wellenlänge von 550 nm ($\text{sPAK} [\mu\text{g/l}] = 138,8 \cdot \text{SAK}_{550\text{nm}} [1/\text{m}]$, $R^2 = 0,98$). Dies zeigt, dass die Durchlicht- als auch Streulichtmethode eine sehr gute Korrelation ($R^2 \gg 0,9$) mit dem AK-Restgehalt aufweist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass dieser Zusammenhang lediglich durch die AK-Partikelgröße (bzw. Partikelgrößenverteilung) und zweitrangig durch die

Abwassermatrix beeinflusst wird. Die Trübung eignet sich demnach als Surrogatparameter für den Restgehalt an sPAK im PCMF-Ablauf.

Tabelle 1: Quantitativer und qualitativer Vergleich des PCMF-Ablaufs mit Ultrafaser-Polstoff (PCM2) bei 10 mg sPAK/l und verschiedenen Fe³⁺/sPAK-Verhältnissen nach Fundneider et al. (2023).

1 L Ablauf filtriert mit Membranfiltern (Ø = 47 mm; 0,45 µm)					
Fe ³⁺ /sPAK [mg/g]	450	350	350	250	150
Abflussbedingung TW: Trockenwetter RW: Regenwetter	TW	RW/TW	RW/TW	RW/TW	TW
Trübung [NTU]	0,20	0,26	0,50	0,76	0,92
SAK _{550nm} [1/m]	0,08	0,10	0,14	0,16	0,26
AFS [mg/l]	0,20	0,73	1,13	0,73	1,00
AFS/Filter [g/m ²]	1,15	4,21	6,51	4,21	5,76
sPAK [µg/l]	< BG (30)	< BG (30)	180 ± 10	280 ± 0	420 ± 10
AK/Filter [g/m ²]	< 0,17	< 0,17	1,04	1,61	2,42

Einfluss der Flockung auf die Ablaufqualität

Die Abscheidung von Partikeln mit $d_{50} \sim 1 \mu\text{m}$ mittels PCMF ist nur mit einer ordnungsgemäßen Flockung und dementsprechender Agglomeration der Partikel realisierbar. Abbildung 3 zeigt die Beziehung zwischen (a) dem Fe³⁺/sPAK-Verhältnis und der Trübung nach Flockung, (b) der verbleibende gelöste reaktive Phosphor (sRP) und (c) den quantitativen Vergleich der sPAK-Agglomeration in Abhängigkeit des Fe³⁺/sPAK-Verhältnisses. Ein spezifisches Verhältnis von 150 - 500 mg Fe³⁺/g sPAK erwies sich als vorteilhaft bezüglich der Agglomeration. Die Untersuchung zeigte, dass bei diesem spezifischen Verhältnis eine Verringerung der Trübung bei gleichbleibender sPAK-Konzentration zu beobachten war, was einen Rückschluss auf die Agglomeration zulässt. Ein positiver Nebeneffekt der Zugabe von Flockungsmittel ist die sRP-Entfernung von. Allerdings sollte die spezifische Konzentration von sRP bei der Dosierung des Fällmittels berücksichtigt werden, da höhere sRP-Konzentrationen auch zu höheren Fe³⁺/sPAK-Verhältnissen führen können.

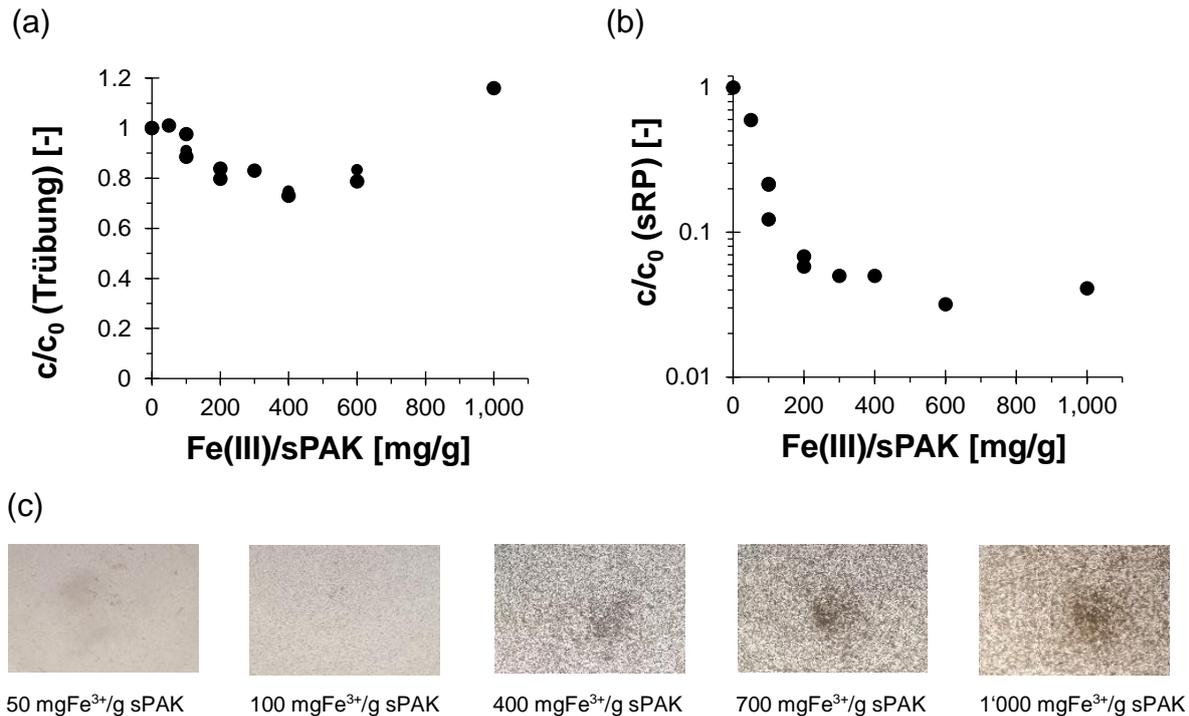


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen dem $\text{Fe}^{3+}/\text{sPAK}$ -Verhältnis und (a) der Abnahme der Trübung (c/c_0) nach Flockung, (b) der Entfernung von gelöstem reaktivem Phosphor (sRP) und (c) quantitativer Vergleich der Flockenausbildung von 10 mg sPAK/l nach Fundneider et al. (2023).

Entfernung von superfeinen Adsorbens mit Polstoff

Unabhängig von dem eingesetzten PCM, war ein bestimmtes $\text{Fe}^{3+}/\text{sPAK}$ -Verhältnis für eine ausreichende Flockenbildung und die effiziente sPAK-Entfernung erforderlich. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz von feineren Polfasern (Ultrafaser) zu einer verbesserten Trübungsabnahme und somit zu einer höheren sPAK-Entfernung führt. Aufgrund des kleineren Faserdurchmesser kommt es zur Ausbildung von kleineren (Poren-)Kanälen in der Polfaserschicht, wodurch der sPAK-Rückhalt erhöht wird. Abbildung 4 (a) stellt den Vergleich der Zu- und Ablauftrübung für PCM1 und PCM2 dar. Deutlich erkennbar ist dieser Effekt bei dem Vergleich der Trübung im Ablauf mit PCM1 mit durchschnittlich 7,29 NTU, während die Trübung mit PCM2 bei durchschnittlich 0,88 NTU lag. Dies zeigt sich auch bei der Ablaufkonzentration des partikulären Phosphors (pTP) von PCM1 ~ 44 $\mu\text{g}/\text{l}$ bzw. PCM2 ~ 7 $\mu\text{g}/\text{l}$. Der Einsatz von Polymeren (bei $\text{HRT} < 2$ min) führte zu keiner Leistungssteigerung von PCM1. Gleichzeitig führen feinere Polfasern zu einer geringeren spezifischen Feststoffbelastung, woraus bei gleicher Feststoffbelastung ein höherer Spülabwasseranfall resultiert [6]. Bei PCM2 lag der Spülabwasseranfall (in Abhängigkeit des $\text{Fe}^{3+}/\text{sPAK}$ -Verhältnis) mit 1,6 – 6,3 % etwa doppelt so hoch wie bei PCM1 mit 0,6 – 3,4 %. Abbildung 4 (b) zeigt den Einfluss des $\text{Fe}^{3+}/\text{sPAK}$ -Verhältnisses auf den sPAK-Restgehalt und damit den direkten Zusammenhang zwischen der Menge des zugesetzten Flockungsmittels und der verbleibenden sPAK-Konzentration im Ablauf der PCMF (für PCM2). Mit einem $\text{Fe}^{3+}/\text{sPAK}$ -Verhältnis von

100 - 150 mg Fe³⁺/g sPAK lag ein sPAK-Restgehalt von 0,4 – 0,55 mg/l und eine Trübung von 0,95 NTU im Ablauf vor. Wohingegen bei 300 - 500 mg Fe³⁺/g sPAK ein sPAK-Restgehalt von < 0,05 - 0,18 mg/l und eine Ablauftrübung von durchschnittlich 0,75 NTU erreicht wurde. Somit können die Anforderung an einen AK-Restgehalt von << 1 mg/l im Ablauf der PCMF bei Anwendung von sPAK mit einer Trübung von < 2 NTU eingehalten werden. Für das Erzielen einer 95 %igen AK-Entfernung hingegen, sind geringere Ablauftrübungen erforderlich und damit verbunden höhere Fe³⁺/sPAK-Verhältnisse oder eine zweistufige PCMF.

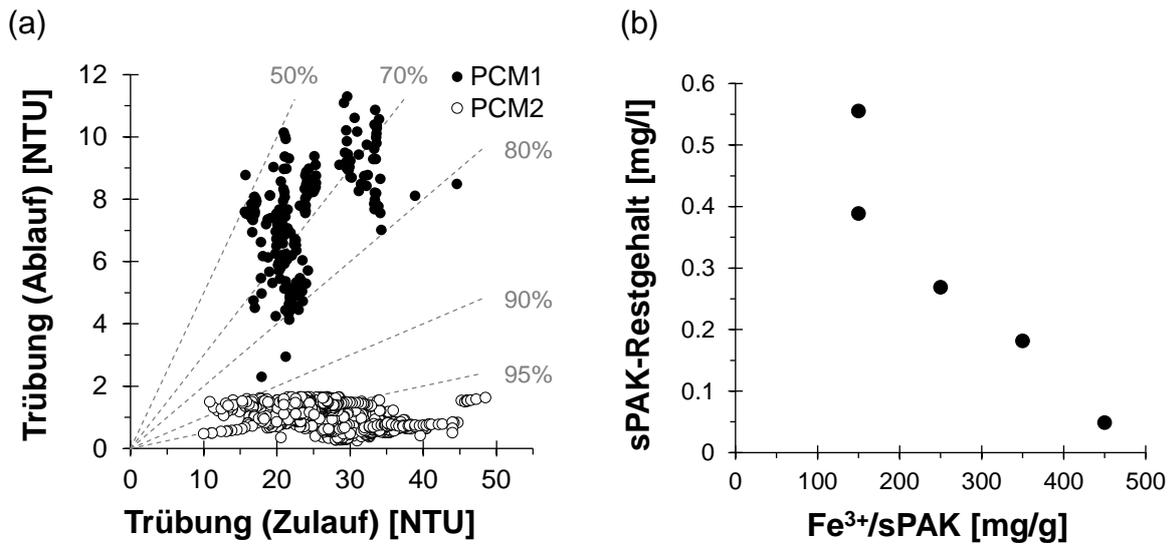


Abbildung 4: (a) Vergleich der Trübung im Zu- und Ablauf des PCMF für PCM1 (Mikrofaser Polstoff) und PCM2 (Ultrafaser Polstoff) über den Versuchszeitraum mit Fe³⁺- und sPAK-Dosierung. (b) Einfluss des Fe³⁺/sPAK-Verhältnisses auf den Restgehalt an sPAK für PCM2.

Entfernung von Mikroschadstoffen

sPAK-Dosis und Abnahme des SAK bei 245 nm (SAK_{245nm}) stehen im direkten Zusammenhang miteinander, womit sich der SAK_{245nm} wie auch bei PAK-Anwendungen zur Steuerung der Dosiermenge einsetzen lässt. Durch HRT < 2 min ist eine zielgerichtete und bedarfsgerechte Dosierung möglich. Abbildung 5 (a) stellt die relative SAK_{245nm}-Entfernung und Entfernung von Mikroschadstoffen dar. Mit einer sPAK-Dosis von 5,9 mg/l (bei DOC₀ ~ 7,5 mg/l) konnte eine 65 %ige Entfernung aller 12 Schweizer Leitsubstanzen (ΣMP(CH)) erzielt werden, siehe Abbildung 5 (b). Eine Abnahme des SAK_{245nm} um etwa 30 - 35 % wurde bei 8 – 9 mg/l erreicht, woraus eine ΣMP(CH) von 80 % resultiert. Durch Erhöhung der HRT oder Rückführung des Spülabwassers in die biologische Stufe kann die verbleibende Adsorptionskapazität weiter ausgenutzt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ab etwa 10 min bei d₅₀ ~ 1 µm keine Steigerung der Mikroschadstoffentfernung festzustellen ist. Trotz der kurzen HRT < 2 min ist der AK-Bedarf etwa 40 – 50 % geringer als bei Verfahren mit PAK-Dosierung vor einem Filter [7]. Die kleinere HRT führt zudem zu einem deutlich kleineren Platzbedarf als vergleichbare Verfahren mit PAK.

(a) (b)

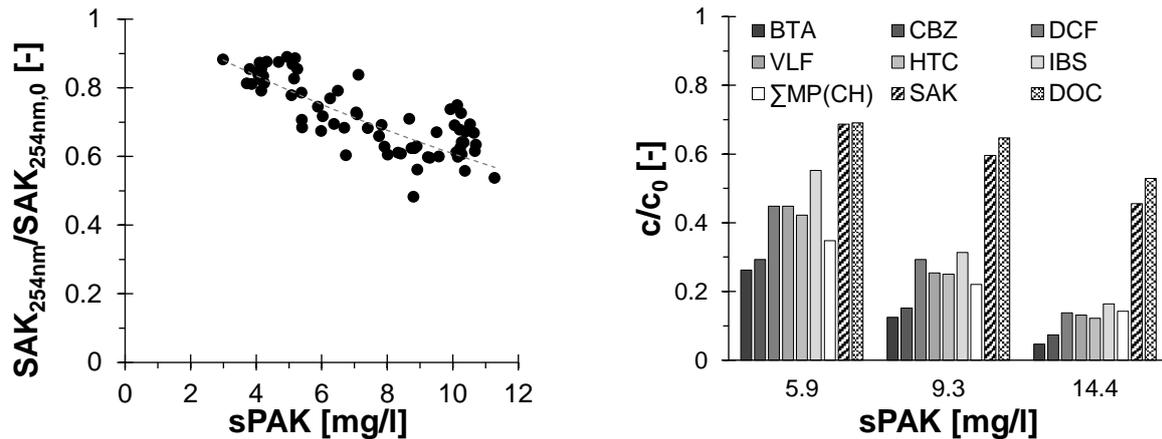


Abbildung 5: Relative Entfernung (a) des $\text{SAK}_{254\text{nm}}$ (a) sowie (b) einer Auswahl von Spurenstoffen und den Schweizer Leitsubstanzen ($\Sigma\text{MP(CH)}$) in Abhängigkeit der sPAK-Konzentration bei $\text{DOC}_0 = 7,5 \text{ mg/l}$ und $\text{HRT} < 2 \text{ min}$. (BTA: Benzotriazol, CBZ: Carbamazepin, DCF: Diclofenac, HTC: Hydrochlorothiazid, IBS: Irbesartan, SAK: spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm, DOC: gelöster organischer Kohlenstoff)

sPAK-PCMF Verfahrensdesign

Das sPAK-PCMF-Verfahren, mit einstufiger Filtration, $\text{HRT} < 2 \text{ min}$ und Ultrafaser PCM entfernt effektiv Mikroschadstoffe und Phosphor. Ausgehend von etwa 10 mg sPAK/l und $400 \text{ mg Fe}^{3+}/\text{g sPAK}$ beträgt die maximale Feststoffflächenbelastung $\sim 100 \text{ g/m}^2/\text{h}$ und die entsprechende Spülabwassermenge $< 5 \%$. Die Untersuchungen zeigen, dass eine sPAK-Entfernung von 98 % und eine sPAK-Konzentration im Abwasser von $\sim 0,2 \text{ mg/l}$ ($\sim 0,68 \text{ NTU}$) erreicht werden. Im Fall strengerer Ablaufanforderungen, bietet ein zweistufiger PCMF-Ansatz die Möglichkeit, die Restkonzentration von sPAK auf $\sim 0,10 \text{ mg/l}$ zu reduzieren. Der Energiebedarf für eine einstufige PCMF liegt bei $\sim 4 \text{ Wh/m}^3$. Der Gesamtenergiebedarf für die Produktion und Abtrennung von sPAK und PCMF beträgt somit $\sim 24 \text{ Wh/m}^3$ (bei 10 mg sPAK/l ; $d_{50} \sim 1,0 \mu\text{m}$). Eine weitere Reduzierung des Energie- und Ressourcenbedarf kann beispielsweise durch eine höhere HRT, Spülabwasserrückführung oder sPAK mit $d_{50} \sim 2 \mu\text{m}$ erzielt werden.

Zusammenfassung

Die Kombination aus sPAK und PCMF zeigt, dass der Einsatz von superfeinen Adsorbens den Ressourcen- und Platzbedarf zur Mikroschadstoffentfernung minimiert. Dabei sind die schnelle Adsorptionskinetik und die damit verringerte Kontaktzeit von entscheidender Bedeutung für den geringen Platzbedarf. Mit einer HRT von $< 2 \text{ min}$ und sPAK-Konzentration von $\sim 8 \text{ mg/l}$ lassen sich über 80 % organischer Spurenstoffe aus kommunalem Abwasser entfernen. PCMF mit Ultrafaser Polstoff erzielt hierbei einen sPAK-Restgehalt von $< 0,2 \text{ mg/l}$ und $\text{TP} < 100 \mu\text{g/l}$ mit $\sim 400 \text{ mg Fe}^{3+}/\text{g sPAK}$ ohne die Zugabe von Polymer in einer einstufigen Filtration.

Danksagung

Wir danken Prof. Michael Thomann und den Mitarbeitenden der Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Ecopreneurship (Schweiz), für die Rest-PAK-Analyse. Wir möchten uns auch bei NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH für die Zusammenarbeit bedanken.

Literatur

- Bonvin, F., Jost, L., Randin, L., Bonvin, E., & Kohn, T. (2016). Super-fine powdered activated carbon (SPAC) for efficient removal of micropollutants from wastewater treatment plant effluent. *Water Research*, 90(Supplement C), 90-99.
- DWA. (2022). Einsatz der Ozonung zur Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Erfahrungen, verfahrenstechnische Aspekte und offene Fragen. In *DWA-Themen*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Fundneider, T., Kirchen, F., Schäfer, R., Grabbe, U., & Lackner, S. (2023). *REMOVAL OF SUPERFINE ADSORBENTS WITH 3D WOVEN HIGH PERFORMANCE OPTIFIBER PILE CLOTH MEDIA* FILTECH, Cologne, Germany.
- Wevelsiep, D., Wetter, C., Brüggling, E., & Grotholtmann, C. (2021, 2.-3.11.2021). *Untersuchungen zur Funktionsweise einer vierten Reinigungsstufe mit Kontaktreaktor und Tuchfiltration* 14. Aachener Tagung Wassertechnologie, Online - Veranstaltung, Aachen.

Anschrift der Verfasser:

Thomas Fundneider

Mecana Umwelttechnik GmbH
Industriestrasse 39
CH-8864 Reichenburg

Tel. +41 55 464 12 14
Fax: +41 55 464 12 01
E-Mail: t.fundneider@mecana.ch

Franziska Kirchen

Technische Universität Darmstadt,
Institut IWAR, Fachgebiet Wasser und
Umweltbiotechnologie
Franziska-Braun-Str. 7
D-64287 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 203 12
Fax: +49 6151 16 203 05
E-Mail: f.kirchen@iwar.tu-darmstadt.de

Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption

Johannes Hilsdorf
Cristiano Lerche



Passavant-Geiger GmbH
Passavant-Geiger-Straße 1
65326 Aarbergen
Deutschland

Einleitung

Zahlreiche Chemikalien – unter anderem organische Pharmazeutika, Pestizide und Industriechemikalien – werden aufgrund ihrer geringen Konzentration als "Mikroverunreinigungen" bezeichnet, eine langfristige Exposition ihr gegenüber kann erhebliche Risiken für Wasserorganismen und die menschliche Gesundheit erbringen (Kosek et al. 2022). Während sich das Management von Mikroverunreinigungen vor allem auf Verbindungen aus der pharmazeutischen Industrie wie Sulfamethoxazol, Ibuprofen und Östradiol konzentriert hat, gewinnen viele Pestizide (z. B. Heptachlor und Diazinon) und Industriechemikalien (z.B. Phenole und Perfluoroctansulfonsäure) als Ziele für Risikomanagement und Sanierungsmaßnahmen an Bekanntheit (Yang et al. 2022). Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS, vom englisch „per- and polyfluoroalkyl substances“) sind sehr persistente Mikroverunreinigungen (deshalb auch Ewigkeitschemikalien genannt), welche aufgrund ihrer allgegenwärtigen Verbreitung und ihrer potenziellen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen haben (Zeng et al. 2020, Murray et al. 2022, Wang et al. 2022, Winchell et al. 2022).

Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) sind eine Klasse von Verbindungen, die aus einem Perfluoralkyl-Grundgerüst und einer funktionellen Gruppe bestehen (Abbildung 1).

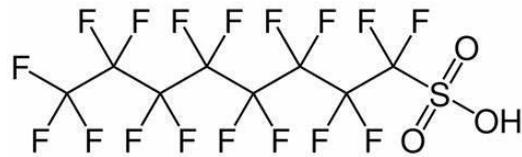


Abbildung 1: Perfluorooctansulfonsäure

Die meisten PFAS für industrielle Anwendungen sind sogenannte langkettige perfluorierte Verbindungen ($C > 7$), wie Perfluorsulfonsäuren (PFOS) und Perfluorcarbonsäuren (z.B. PFOA, Perfluorooctansäure). Jedoch führten strengere Regulierungen dieser Substanzen zu einer weltweiten Umstellung der Produktion auf kurzkettige PFAS, die auch häufig aus dem teilweisen Abbau von langkettigen PFAS entstehen (Ateia et al. 2019, Li et al. 2020, Neuwald et al. 2022).

Die derzeit angewendeten Verfahren sind unzureichend, um einige Mikroverunreinigungen aus den Abwässern zurückzuhalten. Viele dieser Chemikalien werden in Kläranlagen nur teilweise oder gar nicht entfernt, und fließen somit frei in die Gewässer und damit zu einem gewissen Teil in das Grundwasser (Kosek et al. 2022, Yang et al. 2022). Fortgeschrittene Abwasserbehandlungsmethoden der sogenannten „4. Reinigungsstufe“ oder Spurenstoffelimination - wie z.B. Aktivkohleadsorption, Membranbioreaktoren, Nanofiltration oder Umkehrosmose - können eine höhere und gleichmäßigere Entfernung von Mikroverunreinigungen erreichen (Luo et al. 2014, Zeng et al. 2020, Mastropietro et al. 2021, Murray et al. 2022).

Allerdings ist die weitestgehende oder gänzliche Entfernung von Mikroverunreinigungen mit hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden. Unter den derzeit gängigen Optionen für die gezielte Entfernung von einigen Mikroverunreinigungen aus Abwasser ist die Adsorption, bei der Moleküle aus der Umgebung an der Masse oder Oberfläche einer festen oder flüssigen Phase aufgenommen werden. Adsorptionsmethoden sind sowohl in Bezug auf die Entfernung von Mikroverunreinigungen als auch wirtschaftlich vielversprechend (Guillossou et al. 2019, Echevarría et al. 2020, García et al. 2021, Pourhakkak et al. 2021, Pistocchi et al. 2022).

Diese Übersicht stellt einen Einblick in den Stand der Technik zur Entfernung von Mikroverunreinigungen bei der Abwasserbehandlung sowie eine Einschätzung dessen Zukunftsperspektiven in der weitergehenden Abwasserbehandlung, mit speziellem Fokus auf PFASs dar.

Stand der Technik und Perspektiven

Mikroverunreinigungen umfassen ein breites Spektrum von Schadstoffen, unter anderem Industriechemikalien, pharmazeutische Rückstände, Steroidhormone, Körperpflegeprodukte, und werden bei der Abwasserreinigung nur teilweise entfernt. Diese können in Gewässern in Konzentrationen von ng/L bis zu mehreren µg/L nachgewiesen werden, nur ein Anteil wird durch gesetzliche Vorschriften abgedeckt (Rogowska et al. 2018, Bhatt et al. 2022).

Die weit verbreitete Kontamination von Oberflächen- und Grundwasser mit PFAS hat in den letzten Jahren aufgrund ihrer Persistenz und Toxizität in der Umwelt, ihres Bioakkumulationspotenzials und ihrer möglichen negativen Auswirkungen auf die Gesundheit, große Besorgnis ausgelöst. Sie wurden im Boden, im Wasser und in der Luft entdeckt, sowie in aquatischen und terrestrischen Organismen. Einige PFAS sind in hohem Maße bioakkumulativ und wurden mit gesundheitsschädlichen Wirkungen in Verbindung gebracht (Abunada et al. 2020, Costello & Lee 2020, Banyoi et al. 2022). PFAS sind in der aquatischen Umwelt allgegenwärtig und können aus vielen Quellen in die Umwelt gelangen, insbesondere aus Haushalten und der Industrie über die Kläranlagen. Obwohl sie in Gewässern in der Regel in ng/l Konzentrationen vorhanden sind, wurden in der Nähe von fluorchemischen Industrien und/oder hochgradig kontaminierten Gebieten auf der ganzen Welt Werte im µg/l-Bereich festgestellt (Li et al. 2020, Zhao et al., 2020, Banyoi et al. 2022, Evich et al., 2022).

PFAS können in die Luft durch Aerosole, flüchtige Bestandteile (z.B. von Wandfarben oder bei Verdampfung bei der Fluorpolymer-Beschichtung) oder durch die unvollständige Verbrennung von Festabfällen und kontaminiertem Klärschlamm gelangen (Morales-McDevitt et al. 2021, Cahuas et al. 2022, Wickersham et al. 2022, Faust 2023). PFAS gelangen entweder direkt aus der Atmosphäre (z. B. Regen, Ablagerung), über kontaminiertes Wasser oder aus festen Abfällen und der Ausbringung von Klärschlamm in den Boden. Mehrere Studien haben die globale Bedeutung des Bodens als langfristiges Reservoir für PFAS dokumentiert, welche durch Bioakkumulation in Pflanzen und Bodenlebewesen aufkonzentriert werden, oder auch Gewässer und die Atmosphäre kontaminieren (Brusseau et al. 2020, Costello & Lee 2020, Bolan et al. 2021, Pepper et al. 2021).

Für die Sanierung der Umwelt durch Mikroverunreinigungen wurden verschiedene Strategien vorgeschlagen und angewandt, die von ökologischen/biologischen Ansätzen bis hin zu physikalischen und chemischen Methoden reichen, einschließlich dem Einsatz von Adsorptionsmitteln (Zhong et al. 2019, Bai et al. 2022, Gouma et al., 2022, Nzilu et al. 2023). Viele innovative Sanierungsstrategien durch Adsorption wurden getestet, bei denen Aktivkohle eingesetzt wird, um Spurenstoffe und insbesondere PFAS zu immobilisieren und ihre Bioverfügbarkeit zu verringern (Bolan et al. 2021, Vuaille et al. 2022).

Eine über die gezielte Nährstoffelimination hinausgehende Abwasserbehandlung wird bereits seit Jahrzehnten (z.B. Windhoek, Namibia) in ariden Regionen praktiziert. Seit

einigen Jahren werden Abwässer in Europa einer weitergehenden Behandlung unterzogen (du Pisani & Menge 2013, Wallmann et al. 2021). Die eingesetzten Techniken variieren in Abhängigkeit von Vorgaben und Verwendung. In der Schweiz und Deutschland erfolgt i.d.R. keine direkte Nutzung aus dem Ablauf einer Kläranlage, dennoch wird u.a. aus Vorsorgegründen zunehmend eine weitergehende Behandlung von Abwasser praktiziert. Das Ziel ist meistens die Verminderung von Spurenstoffen. Am weitesten verbreitet sind Verfahren zur Adsorption an pulverförmiger Aktivkohle (PAK), Lösungen mit Aktivkohle-Granulat (GAK) werden zunehmend realisiert (Abbildung 2).

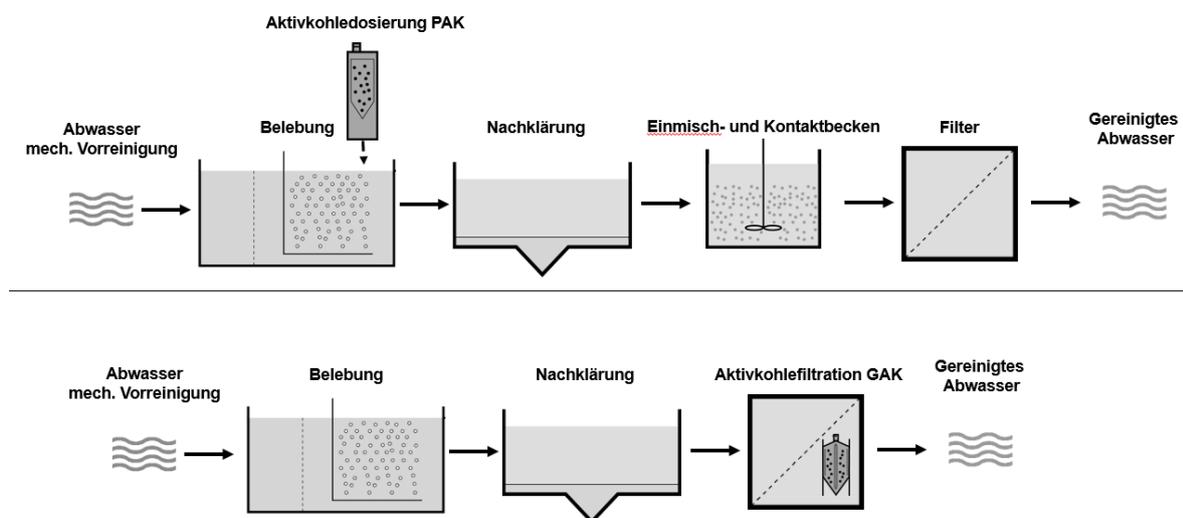


Abbildung 2: Spurenstoffelimination mit PAK (oben) und GAK (unten).

GAK-Lösungen werden des Öfteren auch mit einer Ozonung kombiniert. Eine Ozonung allein ist weniger häufig zu finden und wird meist mindestens mit einer biologischen Nachbehandlung z.B. Sandfiltration oder GAK ausgeführt (Hollender et al. 2009, Gulde et al. 2021, Ullberg et al. 2021, Yu et al. 2021). Neuentwicklungen hinsichtlich Adsorption an Aktivkohle gibt es in verschiedenen Varianten, beispielsweise Variation der Aktivkohlesorten (z.B. biogene Aktivkohlen aus nachwachsenden Rohstoffen), Variation der Korngrößen, Reduktion der Dosiermenge oder Verminderung des maschinentechnischen Aufwandes. Mehrere dieser Ansätze werden in dem Projekt „Schwarzes Gold“ untersucht. Hierbei findet neben biogener Aktivkohlen auch ein höhenverstellbares bzw. adaptives Einlaufsystem Anwendung, mit dem auf eine Filtration verzichtet werden könnte (DBU-Projekt 38353/01).

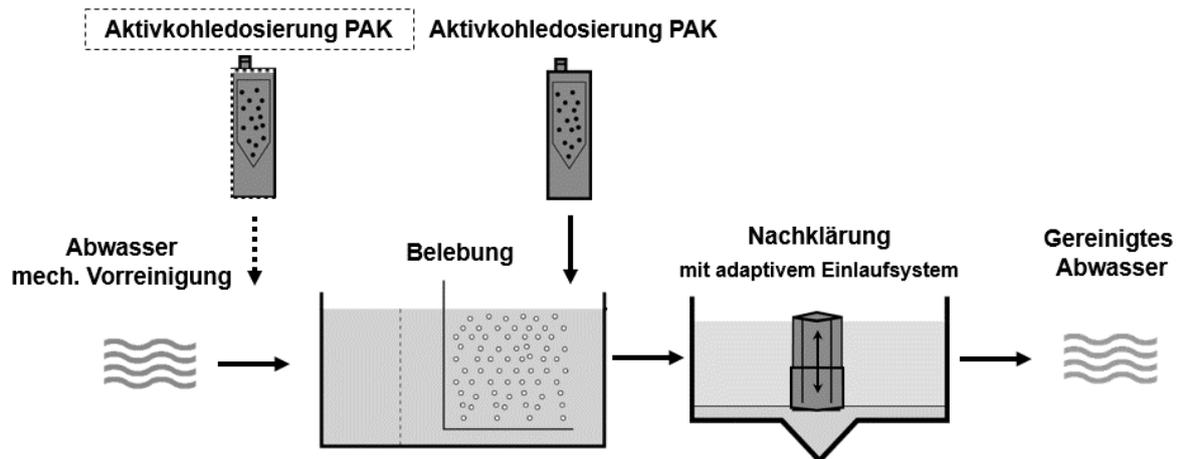


Abbildung 3: Schema des Projektes „schwarzes Gold“ (DBU-Projekt 38353/01), gestrichelt = alternativer Dosierpunkt.

Die Verwendung von Nachklärbecken (NKB) nach dem Stand der Technik (DWA A-131, 2016) können die Investitionskosten der Spurenstoffelimination insgesamt deutlich reduzieren, da der Feststoffabtrieb aus der Nachklärung signifikant reduziert wird (Armbruster & Barth, 2017). Auf einer Kläranlage in Deutschland wurde eine GAK-Filtration dank nachträglich eingebautem adaptiven Einlaufsystem (adapt der Fa. hydrograv GmbH) wesentlich entfrachtet. Bei einer weiteren Kläranlage wurde bereits bei der Planung eines adaptiven Einlaufsystems gleichen Typs in Kombination mit einer GAK-Filtration geplant und realisiert. Werden NKB nach dem Stand der Technik (d.h. mit einem adaptiven Einlaufsystem) ausgestattet, sind Tuch- oder Sandfilter verzichtbar bzw. können zumindest deutlich kleiner dimensioniert werden. Um eine effektive Spurenstoffelimination zu erreichen, sind Kenntnisse über die Abwasserinhaltsstoffe wichtig, wofür ein Spurenstoffscreening angewandt wird. Die zu betrachtenden Substanzen sind nicht einheitlich geregelt und unterschiedliche Richtlinien, je nach politischem, wirtschaftlichem und wissenschaftlichem Paradigma, nehmen unterschiedliche Stoffe ins Visier (DWA-M 285-2, KomS Leitfaden, Blum et al. 2018, Mladenov et al. 2022). Die Ergebnisse der Analytik helfen bei der Auswahl der weiteren Anlagentechnik, beispielsweise kann mit PAK eine effektive Elimination von Spurenstoffen erreicht werden. Alternativ wird GAK wegen der Mehrfachverwendung (Reaktivierung) ausgewählt und ggf. mit anderen Verfahren kombiniert, um eine breitere Eliminationsleistung zu erreichen. Bei der Reaktivierung werden GAK typischerweise $800^{\circ}\text{C} < t < 1.000^{\circ}\text{C}$ erhitzt (z.B. CarboTech AC GmbH, Jacobi Carbons AB, Donau Carbon GmbH, etc.). Dabei erfolgt eine thermische Desorption, wodurch die meisten Verbindungen zerstört bzw. unschädlich gemacht werden.

Die am weitesten verbreitete Technologie zur Entfernung von PFAS aus Abwässern ist die Adsorption an granulierter Aktivkohle (GAK). PFAS-gesättigte GAK wird üblicherweise durch thermische Behandlung bei sehr hohen Temperaturen ($> 1200^{\circ}\text{C}$) reaktiviert, um die adsorbierten Schadstoffe vollständig zu zerstören und

die Wiederverwendung der Aktivkohle zu ermöglichen (Bamdad et al. 2022, DiStefano et al. 2022).

Umkehrosmose und Nanofiltration gehören ebenso zu den praktikablen Optionen für die Abwasserbehandlung und haben gezeigt, dass sie mehrere Mikroverunreinigungen – einschließlich PFAS – effizient entfernen können. Der in Umkehrosmoseanlagen anfallende konzentrierte Abwasser- oder Salzstrom stellt jedoch einen großen Nachteil für dessen Anwendung dar und verursacht hohe Betriebskosten (Yang et al. 2019, Echevarria et al. 2020, Mastropietro et al. 2021, Osorio et al. 2022).

Mehrere Adsorptionsverfahren haben sich bei der Entfernung von Mikroverunreinigungen als wirksam erwiesen, darunter die Adsorption in Aktivkohle oder Ionenaustauscharzen. Studien zu den Eliminationsraten in granulierter Aktivkohle haben jedoch gezeigt, dass die Eliminationsraten für viele relevante Mikroverunreinigungen bei etwa 80 % liegen und insbesondere kleinere Moleküle (wie kurzkettige PFAS) durch die Adsorption von Aktivkohle nicht gänzlich zurückgehalten werden (Guilossou et al. 2019, Li et al. 2020, Sher et al. 2021, Evers et al. 2022). Ionenaustauscharze zeigen zum Teil höhere Eliminationsraten, sind jedoch empfindlich gegenüber bestimmten Stoffen und oxidierenden Substanzen, die die Oberfläche verstopfen oder verunreinigen können, sodass häufig eine Vorreinigung erforderlich ist. Auch die Produktion von Rückspül- und Spülabwässern während der Regeneration von Ionenaustauschmedien schränkt den Nutzen des Ionenaustauschs für die Abwasserbehandlung ein und der Einsatz von Säuren/Basen (oder alternativ Einwegharzen) verursacht erhebliche Kosten (Martins et al. 2020, Dixit et al. 2021-b, Zusman et al. 2021, Riegel et al. 2023).

Obwohl Ionenaustausch (kurz: IEX) eine bis zu dreimal höhere Halbwertsättigung als GAK in Studien zeigte, lassen sich einige Mikroverunreinigungen mit höherer Hydrophobie und höherem Molekulargewicht besser mit GAK adsorbieren. IEX wies auch eine höher abnehmende Effizienzrate, wobei GAK nach der Behandlung von 15 000 Bettvolumina weiterhin ca. 20 % der eingehenden Mikroverunreinigungen konsequent entfernte (Franke et al. 2019, Zeng et al. 2020, Chow et al. 2022).

Beide Verfahren sind stark vom gelösten organischen Kohlenstoff (DOC, englisch „dissolved organic carbon“) beeinflusst, da dies mit Mikroverunreinigungen um Adsorptionsstellen konkurriert, was ebenso für eine Vorreinigung vor einer gezielten Spurenstoffelimination durch Adsorption spricht (Guilossou et al. 2019, Ullberg et al. 2021, Medina et al. 2022). Ebenso ist die Adsorptionsneigung von kurzkettigen Per- und Polyfluoralkylcarbonsäuren (PFCA) in beiden Verfahren deutlich geringer als die von langkettigen PFAS oder kurzkettigen Perfluorsulfonsäuren (PFSA). Insbesondere zur Behandlung von mit PFAS kontaminierten Abwässern haben sich die Adsorption in Aktivkohle und/oder in Ionenaustauscharzen als aussichtsreich erwiesen, aber bislang hat sich keine Strategie als optimale Lösung bestätigt (Guilossou et al. 2019,

Zeng et al. 2019, Dixit et al. 2021a, b, García et al 2021, Murray et al. 2021, Gidstedt et al 2022, Medina et al. 2022, Pistocchi et al. 2022).

In der Praxis wird einerseits Aktivkohle durch thermische Reaktivierung wiederverwendbar gemacht, ein Prozess der keine Chemikalien benötigt, aber sehr energieaufwendig ist. Dies steht andererseits in direktem Gegensatz zum Ionenaustauschsystem, da für die Regeneration der Harze Chemikalien (wie Säuren und Basen) eingesetzt werden müssen und verschmutztes Abwasser anfällt, jedoch sehr wenig Energie erforderlich wird. IEX-Harze versprechen zwar höhere Entfernungskapazitäten als GAK-basierte Behandlungsverfahren, aber noch stehen einige Fragen bezüglich der Regenerierung und Wiederverwendung von IEX-Harzen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen (und insbesondere PFAS) aus. Die Ergebnisse zur Regenerierung sowie dessen geeigneter Strategien variieren je nach Mikroverunreinigungen und Harzeigenschaften und die Regenerationsraten liegen i.d.R. um 70% - 80% (Dixit et al. 2021a, Liu & Sun, 2021).

Die Adsorption an körniger Aktivkohle (GAK) ist eine bewährte Technologie zur Entfernung von Mikroverunreinigungen (einschließlich langkettiger PFAS), die Effizienz nimmt allerdings bei kleinen Molekülen (wie kurzkettigen PFAS) ab. IEX-Methoden haben in Pilotstudien gezeigt, dass sie Mikroverunreinigungen wirksam entfernen, bei der Entfernung kleinerer Moleküle effizienter zu sein scheinen als die GAK-Filtration. Sobald die Adsorptionsmittel mit gelöstem organischem Kohlenstoff und Mikroverunreinigungen (wie langkettigen PFAS) beladen sind, werden kleinere Moleküle wieder ausgespült (McLeaf et al 2017, Aumeier et al. 2023, Riegel et al 2023). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Planer und Betreiber von Behandlungsprozessen die selektive Natur der Sorption und die damit verbundene Desorption kleinerer Moleküle (wie kurzkettige PFCAs) während der gleichzeitigen Entfernung mehrerer Mikroverunreinigungen berücksichtigen müssen.

Perspektivisch muss für die gezielte Reinigung von Mikroverunreinigungen aus Abwässern nach einer vorhergehenden DOC-Entfernung ein Hybridverfahren eingesetzt werden, bei dem einer GAK-Filtration zur Entfernung größerer Mikroverunreinigungen (wie langkettige PFAS) eine Behandlung mit Ionenaustauschern für kleinere Moleküle folgt (Riegel 2022). Somit würden im Vergleich mit beiden Methoden einzeln Betriebskosten reduziert werden, indem GAK-Reaktivierung und insbesondere IEX-Harz Regenerierung später erfolgen müssten und kleinere Mengen an (hochkontaminiertem) Waschwasser von IEX-Regenerierung anfallen würden bzw. weniger Einwegharze zu verbrennen wären.

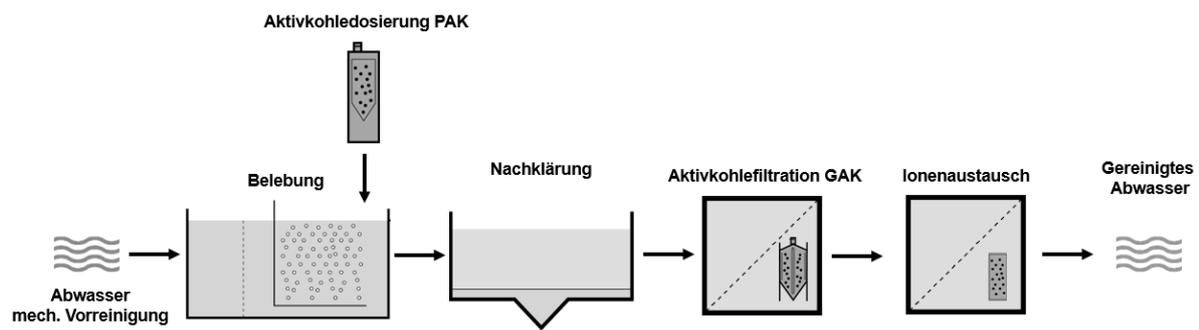


Abbildung 4: Hypothetisches hybrides Verfahrenskonzept für PFAS-Elimination in Kläranlagen.

Literatur

- Abunada, Z. & M. Y. D. Alazaiza, M. J. K. Bashir, 2020. An Overview of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Environment: Source, Fate, Risk and Regulations. *Water* (12):3590
- Ateia, M. & A. Maroli, N. Tharayil, Tanju Karanfil, 2019. The overlooked short- and ultrashort-chain poly- and perfluorinated substances: A review. *Chemosphere* (220): 866-882.
- Armbruster, M., Barth, M.: Kläranlage Dresden – Potenziale moderner Nachklärbeckeneinläufe, *in: wwt – Wasserwirtschaft Wassertechnik – Modernisierungsreport 2016/2017*, 2017, S. 24-30.
- Aumeier, B. M. & A. Georgi, N. Saeidi, G. Sigmund, 2023. Is sorption technology fit for the removal of persistent and mobile organic contaminants from water? *Science of The Total Environment* (880): 163343.
- Bai, Y. & Z. Wang, J. P. van der Hoek, 2022. Remediation potential of agricultural organic micropollutants in in-situ techniques: A review. *Ecological Informatics* (68): 101517.
- Bamdad, H. & S. Papari, E. Moreside, F. Berruti, 2022. High-Temperature Pyrolysis for Elimination of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from Biosolids. *Processes* (10): 2187.
- Banyoi, S.-M. & T. Porseryd, J. Larsson, M. Grahn, P. Dinnétz, 2022. The effects of exposure to environmentally relevant PFAS concentrations for aquatic organisms at different consumer trophic levels: Systematic review and meta-analyses. *Environmental Pollution* (315): 120422.
- Bhatt, P. & G. Bhandari, M. Bilal, 2022. Occurrence, toxicity impacts and mitigation of emerging micropollutants in the aquatic environments: Recent tendencies and perspectives. *Journal of Environmental Chemical Engineering* (10, 3): 107598.

- Blum, K. M. & P. L. Andersson, L. Ahrens, K. Wiberg, P. Haglund, 2018. Persistence, mobility and bioavailability of emerging organic contaminants discharged from sewage treatment plants. *Science of the Total Environment* (612): 1532–1542.
- Bolan, N. & B. Sarkar, M. Vithanage, G. Singh, D. C.W. Tsang, R. Mukhopadhyay, K. Ramadass, A. Vinu, Y. Sun, S. Ramanayaka, S. A. Hoang, Y. Yan, Y. Li, J.J. Rinklebe, H. Li, M. B. Kirkham, 2021. Distribution, behaviour, bioavailability and remediation of poly- and per-fluoroalkyl substances (PFAS) in solid biowastes and biowaste-treated soil. *Environment International* 155 (2021) 106600.
- Brusseau, M. L. & R. H. Anderson, B. Guo, 2020. PFAS Concentrations in Soils: Background Levels versus Contaminated Sites. *Science of The Total Environment* (740): 140017.
- Cahuas, L. & D. J. Muensterman, M. L. Kim-Fu, P. N. Reardon, I. A. T., J. A. Field, 2022. Paints: A Source of Volatile PFAS in Air—Potential Implications for Inhalation Exposure. *Environmental Science & Technology* (56, 23): 17070–17079
- Chow, S. J. & H. C. Croll, N. Ojeda, J. Klamerus, R. Capelle, J. Oppenheimer, J. G. Jacangelo, K. J. Schwab, C. Prasse, 2022. Comparative investigation of PFAS adsorption onto activated carbon and anion exchange resins during long-term operation of a pilot treatment plant. *Water Research* (226):119198.
- Costello, M. C. S. & L. S. Lee, 2020. Sources, Fate, and Plant Uptake in Agricultural Systems of Per- and Polyfluoroalkyl Substances. *Current Pollution Reports* (2020).
- DiStefano, R. & T. Feliciano, R. A. Mimna, A. M. Redding, J. Matthis, 2022. Thermal destruction of PFAS during full-scale reactivation of PFAS-laden granular activated carbon. *Remediation* (42, 4): 231 – 238.
- Dixit, F. & P. Chintalapati, B. Barbeau, M. Han, T. R. R. Whittaker, M. Mohseni, 2021-b. Ion exchange and vacuum UV: A combined approach for removing organic matter and microcystins from natural waters. *Chemical Engineering Journal* (414): 128855.
- Dixit, F. & R. Dutta, B. Barbeau, P. Berube, M. Mohseni, 2021-a. PFAS removal by ion exchange resins: A review. *Chemosphere* (272): 129777.
- du Pisani, P. & J. G. Menge, 2013. Direct potable reclamation in Windhoek: a critical review
- DWA-A-131, 2016. Arbeitsblatt DWA-A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen (Juni 2016)
- DWA-M 285-2, 2021. Merkblatt DWA-M 285-2 „Spurenstoffentfernung auf kommunalen Kläranlagen – Teil 2: Einsatz von Aktivkohle – Verfahrensgrundsätze und Bemessung“,
- Echevarria, C. & C. Valderrama, J. Cortina, I. Martín, M. Arnaldos, X. Bernat, A. Cal, M. Boleda, À. Vega, A. Teuler, E. Castellví, 2020. Hybrid sorption and pressure-driven membrane technologies for organic micropollutants removal in advanced

- water reclamation: A techno-economic assessment. *Journal of Cleaner Production* (273): 123108.
- Echevarría, C. & C. Valderrama, J.L. Cortina, I. Martín, M. Arnaldos, X. Bernat, A. De la Cal, M.R. Boleda, A. Vega, A. Teuler, E. Castellví, 2020. Hybrid sorption and pressure-driven membrane technologies for organic micropollutants removal in advanced water reclamation: A techno-economic assessment. *Journal of Cleaner Production* (273):123108.
- Evers, M. & R.-L. Lange, E. Heinz, M. Wichern, 2022. Simultaneous powdered activated carbon dosage for micropollutant removal on a municipal wastewater treatment plant compared to the efficiency of a post treatment stage. *Journal of Water Process Engineering* (47): 102755.
- Evich, M. G. & M. J. B. Davis, J. P. McCord, B. Acrey, J. A. Awkerman, D. R. U. Knappe, A. B. Lindstrom, T. F. Speth, C. Tebes-Stevens, M. J. Strynar, Z. Wang, E. J. Weber, W. M. Henderson, J. W. Washington, 2022. Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. *Science* (375), Issue 6580.
- Faust, J. A., 2023. PFAS on atmospheric aerosol particles: a review. *Environmental Science: Processes & Impacts* (25): 133-150
- Franke, V. & P. McCleaf, K. Lindegren, L. Ahrens, 2019. Efficient removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: nanofiltration combined with active carbon or anion exchange. *Environmental Science: Water Research & Technology* (5): 1836-1843.
- García, L. & J. C. Leyva-Díaz, E. Díaz, S. Ordóñez, 2021. A review of the adsorption-biological hybrid processes for the abatement of emerging pollutants: Removal efficiencies, physicochemical analysis, and economic evaluation. *Science of The Total Environment* Volume 780 :146554.
- Gidstedt, S. & A. Betsholtz, P. Falås, M. Cimbritz, Å. Davidsson, F. Micolucci, O. Svahn, 2022. A comparison of adsorption of organic micropollutants onto activated carbon following chemically enhanced primary treatment with microsieving, direct membrane filtration and tertiary treatment of municipal wastewater. *Science of the Total Environment* 811: 152225.
- Gouma, V. & C. Tziasiou, A. D. Pournara, D. L. Giokas, 2022, A novel approach to sorbent-based remediation of soil impacted by organic micropollutants and heavy metals using granular biochar amendment and magnetic separation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* (10, 2): 107316.
- Guillossou, R. & J. Le Roux, R. Mailler, E. Vulliet, C. Morlay, F. Nauleau, J. Gasperi, V. Rocher, 2019. Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: What are the benefits of an advanced treatment by activated carbon adsorption in comparison to conventional treatment? *Chemosphere*. (218): 1050-1060.
- Guillossou, R. & J. Le Roux, R. Mailler, E. Vulliet, C. Morlay, F. Nauleau, J. Gasperi, V. Rocher, 2019. Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: What are the benefits of an advanced treatment by activated carbon adsorption in comparison to conventional treatment? *Chemosphere* (218): 1050 – 1060.

- Gulde R. & M. Rutsch, B. Clerc, J. E. Schollée, U. von Gunten, C. S. McArdell, 2021. Formation of transformation products during ozonation of secondary wastewater effluent and their fate in post-treatment: from laboratory- to full-scale. *Water Research* (200): 117200.
- Hollender, J. & S. G. Zimmermann, S. Koepke, M. Krauss, C. S. McArdell, C. Ort, H. Singer, U. von Gunten, H. Siegrist, 2009. Elimination of Organic Micropollutants in a Municipal Wastewater Treatment Plant Upgraded with a Full-Scale Post-Ozonation Followed by Sand Filtration. *Environmental Science & Technology* (43, 20): 7862–7869
- KomS Leitfaden, 2020. Leitfaden - Machbarkeitsstudien zur Spurenstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen.
- Kosek, K., & A. Luczkiewicz, S. Fudala-Książek, K. Jankowska, M. Szopińska, O. Svahn, J. Tränckner, A. Kaiser, V. Langas, E. Björklund, 2022. Implementation of advanced micropollutants removal technologies in wastewater treatment plants (WWTPs) - Examples and challenges based on selected EU countries. *Environmental Science & Policy* (112): 213-226.
- Li, F. & J. Duan, S. Tian, H. Ji, Y. Zhu, Z. Wei, D. Zhao, 2020. Short-chain per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic systems: Occurrence, impacts and treatment. *Chemical Engineering Journal* (380): 122506.
- Liu, Y.-L. & M. Sun, 2021. Ion exchange removal and resin regeneration to treat per- and polyfluoroalkyl ether acids and other emerging PFAS in drinking water. *Water Research* (207): 117781.
- Luo, Y., & W. Guo, H. H. Ngo, L. C. Nghiem, F. I. Hai, J. Zhang, S. Liang, X. C. Wang, 2014. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment* (473–474): 619-641.
- M. Riegel, B. Haist-Gulde, F. Sacher, 2023. Sorptive removal of short-chain perfluoroalkyl substances (PFAS) during drinking water treatment using activated carbon and anion exchanger. *Environmental Sciences Europe* (35):12.
- Martins, V. L. & M. D. Ogden, M. R. Jones, S. A. Trowsdale, P. J. Hall, H. S. Jensen, 2021. Opportunities for coupled electrochemical and ion-exchange technologies to remove recalcitrant micropollutants in water. *Separation and Purification Technology* (239): 116522.
- Mastropietro, T. F & R. Bruno, E. Pardo, D. Armentano, 2020. Reverse osmosis and nanofiltration membranes for highly efficient PFASs removal: overview, challenges and future perspectives. *Dalton Transaction* (50, 16): 5398-5410.
- Medina, R. & M. W. Pannu, S. A. Grieco, M. Hwang, C. Pham, M. H. Plumlee, 2022. Pilot-scale comparison of granular activated carbons, ion exchange, and alternative adsorbents for per- and polyfluoroalkyl substances removal. *AWWA Water Science*: e1308.
- Mladenov, N. & N. G. Dodder, L. Steinberg, W. Richardot, J. Johnson, B. S. Martincigh, C. Buckley, T. Lawrence, E. Hoh, 2022 Persistence and removal of

- trace organic compounds in centralized and Decentralized wastewater treatment systems. *Chemosphere* (286): 131621.
- Morales-McDevitt, M. E. & J. Becanova, A. Blum, T. A. Bruton, S. Vojta, M. Woodward, R. Lohmann, 2021. The Air that we Breathe: Neutral and volatile PFAS in Indoor Air. *Environmental Science & Technology* (8, 10): 897–902.
- Murray, C. C. & R. E. Marshall, C. J. Liu, H. Vatankhah, C. L. Bellona, 2021. PFAS treatment with granular activated carbon and ion exchange resin: Comparing chain length, empty bed contact time, and cost. *Journal of Water Process Engineering* (44): 102342.
- Neuwald, I. J. & D. Hübner, H. L. Wiegand, V. Valkov, U. Borchers, K. Nödler, M. Scheurer, S. E. Hale, H. P. H. Arp, D. Zahn, 2022. Ultra-Short-Chain PFASs in the Sources of German Drinking Water: Prevalent, Overlooked, Difficult to Remove, and Unregulated. *Environmental Science & Technology* (56, 10): 6380–6390
- Nzilu, D. M. & E. S. Madivoli, D. S. Makhanu, B. V. Otenda, P. G. Kareru, P. K. Kairigo, T. Tuhkanen, 2023. Environmental remediation using nanomaterial as adsorbents for emerging micropollutants. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* (20): 100789.
- of the design philosophy of new Goreangab drinking. *Water Science & Technology Water Supply* (13, 2):214
- Osorio, S. C. & P.M. Biesheuvel, E. Spruijt, J.E. Dykstra, A. van der Wal, 2022. Modeling micropollutant removal by nanofiltration and reverse osmosis membranes: considerations and challenges. *Water Research* (225): 119130.
- P. McCleaf, S. Englund, A. Östlund, K. Lindegren, K. Wiberg, L. Ahrens, 2017. Removal efficiency of multiple poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests. *Water Research* (120): 77-87.
- Pepper, I. L. & M. L. Brusseau, F. J. Prevatt, B. A. Escobar, 2021. Incidence of PFAS in soil following long-term application of class B biosolids. *Science of The Total Environment* (793): 148449.
- Pistocchi, A. & H.R. Andersen, G. Bertanza, A. Brander, J.M. Choubert, M. Cimbritz, J.E. Drewes, C. Koehler, J. Krampe, M. Launay, P.H. Nielsen, N. Obermaier, S. Stanev, D. Thornberg, 2022. Treatment of micropollutants in wastewater: Balancing effectiveness, costs and implications. *Science of The Total Environment* (850): :157593.
- Pourhakkak, P., & A. Taghizadeh, M. Taghizadeh, M. Ghaedi, S. Haghdoust, 2021. Chapter 1 - Fundamentals of adsorption technology (In: *Adsorption: Fundamental Processes and Applications*, Interface Science and Technology, Volume 33, Pages 1-70).
- Riegel. M., 2022. Entfernung (kurzkettiger) PFAS mit einem neuen Ansatz aus Aktivkohle und Ionenaustauscher. *Vom Wasser* (120): 4 – 9.

- Rogowska, J. & M. Cieszyńska-Semenowicz, W. Ratajczyk, L. Wolska, 2018. Micropollutants in treated wastewater. *Ambio* (49): 487–503
- Sher, F. & K. Hanif, A. Rafey, U. Khalid, A. Zafar, M. Ameen, E. C. Lima, 2021. Removal of micropollutants from municipal wastewater using different types of activated carbons. *Journal of Environmental Management* (278, 2): 111302.
- Ullberg, M. & E. Lavonen, S. J. Köhler, O. Golovkova, K. Wiberg, 2021. Pilot-scale removal of organic micropollutants and natural organic matter from drinking water using ozonation followed by granular activated carbon. *Environmental Science: Water Research & Technology* (7): 535-548.
- Vuaille, J. & T. K. O. Gravert, J. Magid, M. Hansen, N. Cedergreen, 2022. Long-term fertilization with urban and animal wastes enhances soil quality but introduces pharmaceuticals and personal care products. *Agronomy for Sustainable Development* (42): 1
- Wallmann, L. & J. Krampe, J. Lahnsteiner, E. Radu, P. van Rensburg, 2021. Fate and persistence of antibiotic-resistant bacteria and genes through a multi-barrier treatment facility for direct potable reuse. *Journal of Water Reuse and Desalination* 11(2).
- Wang, Y. & J. Kim, C.-H. Huang, G. L. Hawkins, K. Li, Y. Chen, Q. Huang, 2022. Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances in water: a review. *Environmental Science: Water Research & Technology* (8): 1136-1151.
- Wickersham, L. C. & J. M. Mattila, J. D. Krug, S. R. Jackson, M. A. G. Wallace, E. P. Shields, 2023. Characterization of PFAS air emissions from thermal application of fluoropolymer dispersions on fabrics. *Journal of the Air & Waste Management Association* (73,7): 533-552.
- Winchell, L. J. & M. J. M. Wells; J. J. Ross; X. Fonoll; J. W. Norton Jr., S. Kuplicki; M. Khan; K. Y. Bell, 2022. Per- And Polyfluoroalkyl Substances Presence, Pathways, and Cycling through Drinking Water and Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Engineering* 148(1): 03121003.
- Yang, Y., & X. Zhang*, J. Jiang, J. Han, W. Li, X. Li, K. M. Y. Leung, S. A. Snyder, P. J. J. Alvarez, 2022. Which Micropollutants in Water Environments Deserve More Attention Globally? *Environmental Science & Technology*, 56 (1): 13–29.
- Yang, Z. & Y. Zhou, Z. Feng, X. Rui, T. Zhang, Z. Zhang, 2019. A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification. *Polymers* (11,8):1252.
- Yu, M. & E. Lavonen, A. Oskarsson, J. Lundqvist, 2021. Removal of oxidative stress and genotoxic activities during drinking water production by ozonation and granular activated carbon filtration. *Environmental Sciences Europe* (33): 124.
- Zeng, C. & A. Atkinson, N. Sharma, H. Ashani, A. Hjelmstad, K. Venkatesh, P. Westerhoff, 2020. Removing per- and polyfluoroalkyl substances from groundwaters using activated carbon and ion exchange resin packed columns. *AWWA Water Science*: e1172.

Zhong, C. & H. Zhao, H. Cao, Q. Huang, 2019. Polymerization of micropollutants in natural aquatic environments: A review. Science of The Total Environment (683, 25): 133751.

Zusman, O. B. & A. Perez, Y. G. Mishael, 2021. Multi-site nanocomposite sorbent for simultaneous removal of diverse micropollutants from treated wastewater. Applied Clay Science (215): 106300.

Anschrift der Verfasser:

Johannes Hilsdorf

Produktmanager & Abteilungsleiter
Passavant Verfahrenstechnik

Passavant-Geiger GmbH
Passavant-Geiger-Straße 1
D-65326 Aarbergen

Tel. +49 6120 28 - 2158

E-Mail: johannes.hilsdorf@passavant-geiger.com

Cristiano Lerche

Projektleiter
Passavant Verfahrenstechnik

Passavant-Geiger GmbH
Passavant-Geiger-Straße 1
D-65326 Aarbergen

Tel. +49 6120 28 - 2364

E-Mail: cristiano.lerche@passavant-geiger.com



**Passavant
Geiger**

Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption

Johannes Hilsdorf,
Passavant-Geiger GmbH,
Karlsruhe

A brand of
Aqseptence Group

Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption Kurzvorstellung



- **Passavant-Geiger GmbH**
 - Experten im Bereich der Wasser- und Abwasserbehandlung
 - Lieferant für Lösungen zu PAK, GAK, Tuchfiltration etc.

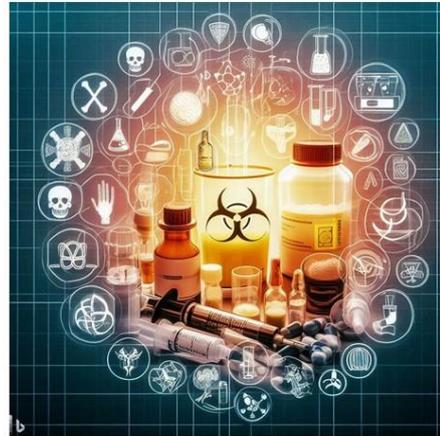


Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption

Arten von Mikroverunreinigungen



- **Welche Mikroverunreinigungen?**
 - PPCP (Pharmazeutika und Körperpflegeprodukte)
z.B. Hormone (Östradiol)
 - Pestizide
z.B. TBT (Tributylzinn-Verbindungen) oder
DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan)
 - Industriechemikalien
z.B. PFAS (PFOA = Perfluorooctansäure)



Seite 3

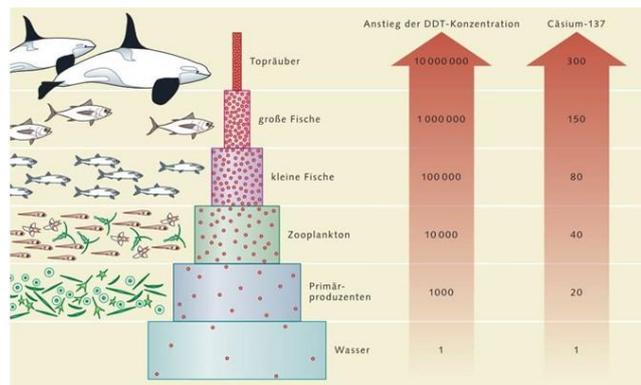
©2023 – Version 1/2023

Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption

Mengen/Nachweisbarkeit



- Sehr kleine Mengen → ng/l bis µg/l
- Toxizität
- Haltbarkeit
- Bioakkumulation / Biomagnifikation



<https://worldoceanreview.com/>

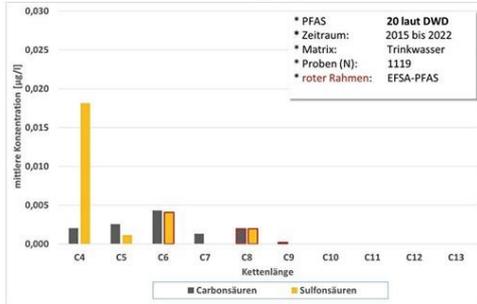
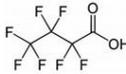
Seite 4 Passavant-Geiger GmbH – Water Processing Solutions – A brand of Aquseptence Group

©2023 – Version 1/2023

Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption PFAS in den Gewässern



- Insbesondere kurz-kettige (z.B. Perfluorbutan, PFBA)

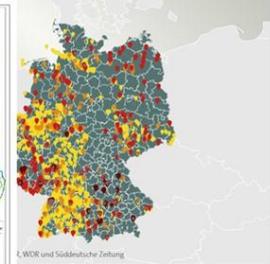
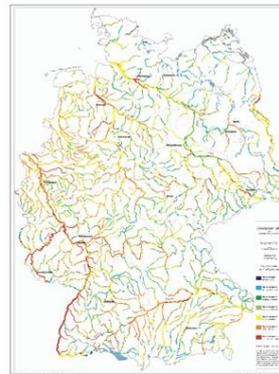


<https://www.laborpraxis.vogel.de/>

Nachgewiesene PFAS-Belastung

in Nanogramm pro Liter | Nanogramm pro Kilogramm

≤ 100 ≤ 1.000 ≤ 100.000 ≥ 100.000 unbekannt



<https://www.tagesschau.de/>

- Zukünftige Summengrenzwert für PFAS (EFSA)

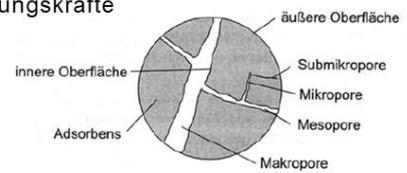
- PFAS_{Σ20} = 0,10 µg/l
- PFAS_{gesamt} = 0,50 µg/l

<https://www.umweltbundesamt.de/>

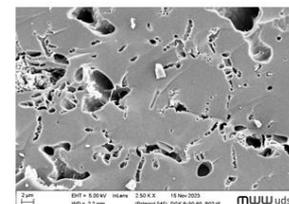
Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption Warum ist Aktivkohle geeignet?



- Adsorptionsmittel mit extrem großer Oberfläche (500 – 1500 m²/g AK)
- Unpolare Stoffe adsorbieren aufgrund hydrophober Wechselwirkungskräfte
- Rohstoff und Herstellung beeinflussen Eigenschaften der AK
 - Granulierte Aktivkohle (GAK) 0,5 – 2,5 mm
 - Pulveraktivkohle (PAK) 5 – 100 µm (bzw. 0,1 mm)



DWA Aktivkohleinsatz auf Kläranlagen, Mai 2019

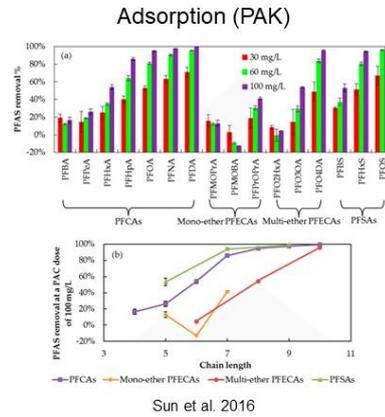
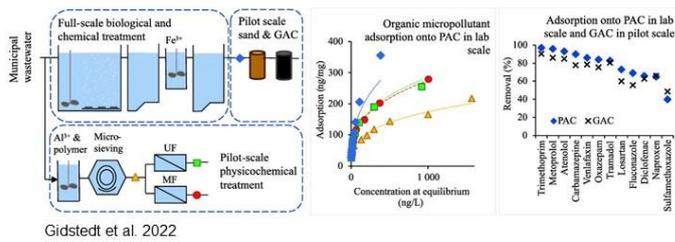


CarboTech AC GmbH

Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption Leistungsfähigkeit zur PFAS-Elimination



- Adsorption in GAK oder PAK etabliert zur Entfernung von Mikroverunreinigungen
- Adsorptionsneigung von kurzkettigen PFAS geringer als von langkettigen PFAS (Ausspülung kleiner Moleküle)



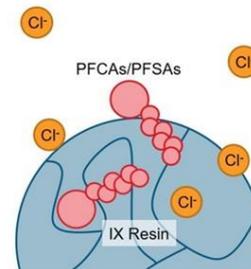
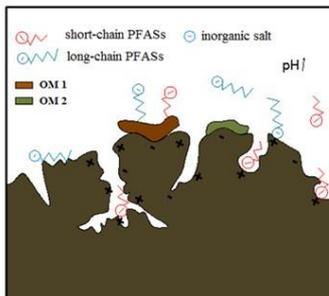
Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption Adsorption in Kombination



Aktivkohle (GAK / PAK)

Adsorption

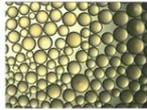
Ionenaustausch (Anionen)



Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption Ionenaustauscher



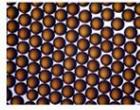
Standard
0,42-1,2 mm (16x40 Mesh)



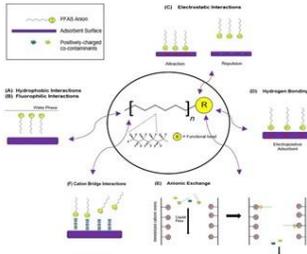
Uniform Beads (UB)
0,5-0,7 mm (U.C. 1,2)



Extra Uniform Beads
0,6-0,65 mm (U.C. 1,1)



<https://lanxess.com/de>



Leung et al. 2023

Hauptsächlich AEX
(PFAS eher negativ geladen)

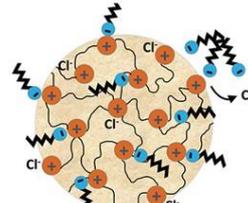
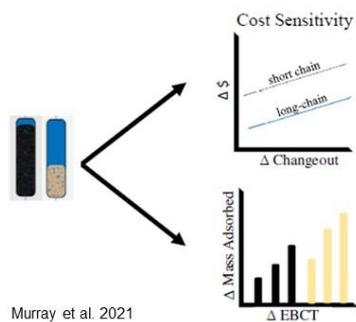


Figure 2. Illustration of an anion exchange resin loaded with chloride designed to remove PFAS. The reaction can be simplistically modeled as $PFAS_{aq} + Cl_{ads} \leftrightarrow PFAS_{ads} + Cl_{aq}^{-}$
<https://wconline.com/>

Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption Leistungsfähigkeit Vergleich IX vs. GAK

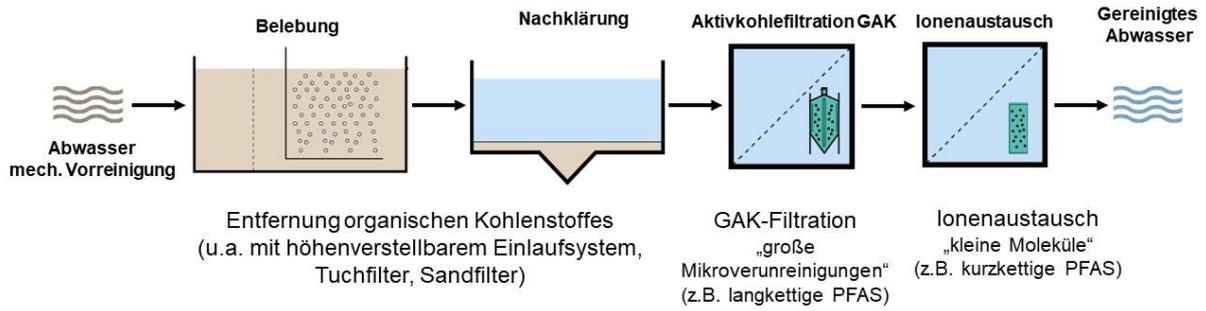


- Hohe Halbwertsättigung (bis 3x GAK)
- Sehr gute Leistung insbesondere für kleinere Moleküle (z.B. kurzkettige PFAS)
- IX zeigt schnellere Verminderung der Effizienzrate (>> GAK)
- IX zeigt geringere Effizienz bei höherem Molekulargewicht und hydrophoben Molekülen



Murray et al. 2021

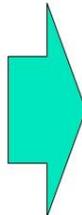
Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption
 Erweitertes Konzept für umfassende Adsorption



Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption
 Kostenreduktion: Optimierung der Nachklärung –
 Verzicht auf Filtration bzw. kleinere Filtration vor GAK



Kläranlage Billerbeck



Messung nach Installation eines variablen Einlaufsystems:

$$P_{ges} = 0,08 \text{ mg/l}$$

Alle Messungen bisher:

$$P_{ges} < 0,2 \text{ mg/l}$$



hydrograv GmbH



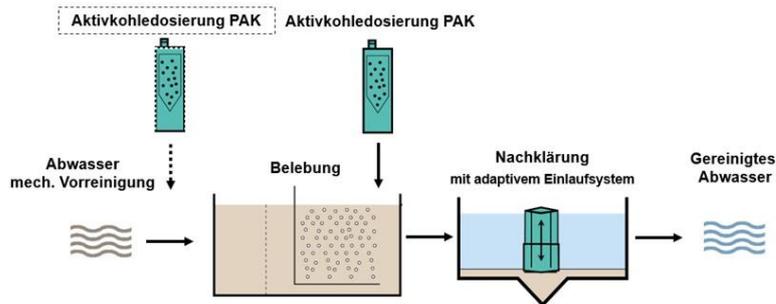
Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption

Energie- und Ressourcenschonende Simultandosierung von PAK?
Ausblick Projekt „Schwarzes Gold“ DBU 38353/01



Entwicklung eines integrierten, energie- und ressourcenschonenden Abtrennverfahrens („hydrograv adapt-PAK“) für PAK aus nachwachsenden Rohstoffen zur Spurenstoffentfrachtung von Oberflächengewässern. Mit:

- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen Institut für Siedlungswasserwirtschaft Lehrstuhl für Siedlungswasser- und Wassergütemirtschaft (Projekträger)
- hydrograv GmbH
- Ingenieurgesellschaft für Abwasserwirtschaft und technische Dienstleistungen mbH (ATD)
- Kläranlage Bad Berleburg (Bad Berleburg)



Entfernung von Mikroverunreinigungen durch Adsorption



- Mit Passavant® Verfahrenstechnik Mikroschadstoffen begegnen!



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen ?



Passavant



Geiger



Noggerath



**Johnson
Screens**



Aquatlogic®



Roediger

Passavant-Geiger GmbH
Water Processing Solutions

Passavant-Geiger-Strasse 1 · 65326 Aarbergen
www.passavant-geiger.com
info.passavant@passavant-geiger.com

Passavant-Geiger GmbH
Water Processing Solutions

Hardeckstraße 3 · 76185 Karlsruhe
www.passavant-geiger.com
info.passavant@passavant-geiger.com

Haftungsausschluss:
Die in dieser Präsentation angegebenen technischen Daten sind nur Richtwerte und müssen im Einzelfall festgelegt werden. Technische Änderungen vorbehalten.

Ausstellerverzeichnis

Bellmer GmbH

Marco Simon

Hauptstrasse 37-43

75223 Niefern-Öschelbronn

Tel.: +49 7233 / 74 0

E-Mail: info@bellmer.com



CNP CYCLES GmbH

Bernhard Ortwein

Am Sportplatz 11

63791 Karlstein am Main

Tel.: +49 6188 / 992760

E-Mail: info@cnp-cycles.de



CNP CYCLES
watering life

Feralco Deutschland GmbH

Alexander Matthiesen

Große Drakenburger Str. 93-97

31582 Nienburg/Weser

Tel.: +49 5021 / 988 470

E-Mail: info.de@feralco.com



Flocmix GmbH

Bernhard Giersberg

Bordeaux-Straße 4

28309 Bremen

Tel.: +49 4202 988 4632

E-Mail: info@flocmix.de**Ensola AG**

Peter Freisler

Schützenstraße 29

CH-8902 Urdorf

Tel.: +41 44870 88 00

E-Mail: info@ensola.com**Hach Lange GmbH**

Reimund Hauser

Willstätterstraße 11

40549 Düsseldorf

Tel.: +49 211 / 52880

E-Mail: info-de@hach.com

Passavant-Geiger GmbH

Johannes Hilsdorf

Segment Water Processing
Solutions

Passavant-Geiger-Strasse 1

65326 Aarbergen

Tel.: +49 6120 28 0

E-Mail: info@passavant-geiger.com



**Passavant
Geiger**

SIDRA Wasserchemie GmbH

Raimund Schipp

Zeppelinstraße 27

49479 Ibbenbüren

Tel.: +49 5459 540

E-Mail: info@sidra.de

**SCHAEFER KALK GmbH & Co.
KG**

Volker Ermel

Louise-Seher-Str. 6

65582 Diez

Tel.: +49 6432 503 0

E-Mail: info@schaeferkalk.de



Schriftenreihe SWW - Karlsruhe

Bisher aus der Arbeit am Institut erschienen

- [1] KARPE, H.-J.: Zur Wirtschaftlichkeit bei der Planung von Fernwasserversorgungen. Karlsruhe 1969 (Eigenverlag des Verfassers).
- [2] PÖPEL, J.: Schwankungen von Kläranlagenabläufen und ihre Folgen für Grenzwerte und Gewässerschutz. GWF, Schriftenreihe Wasser - Abwasser, 16. Oldenbourg Verlag, München 1971.
- [3] MEIER, P.M.: Möglichkeiten zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung von Zweckverbänden. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 4. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1972.
- [4] ABENDT, R.; AHRENS, W.; CEMBROWICZ, R.G.; HAHN, H.H.; KNOBLAUCH, A.; ORTH, H.: Operations Research und seine Anwendung in der Siedlungswasserwirtschaft I. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 5. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1972.
- [5] NOLL, K.: Untersuchungen zur Grundwasserentnahme aus den pleistozänen Sedimenten des Rheintalgrabens im Rhein-Neckar-Raum. Karlsruhe 1972 (Eigenverlag des Verfassers).
- [6] NEIS, U.: Experimentelle Bestimmung der Stabilität anorganischer Schwebstoffe in natürlichen Gewässern. Karlsruhe 1974 (Eigenverlag des Verfassers).
- [7] AHRENS, W.: Optimierungsverfahren zur Lösung nichtlinearer Investitionsprobleme - angewandt auf das Problem der Planung regionaler Abwasserentsorgungssysteme. Quantitative Methoden der Unternehmensplanung, Bd. 4. Verlag Meisenheim/Glan 1975.
- [8] ORTH, H.: Verfahren zur Planung kostenminimaler regionaler Abwasserentsorgungssysteme. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 9. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1975.
- [9] MOSEBACH, K.G.: Phosphatrücklösung bei der Ausfällung von Simultanschlamm. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 11. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1975.
- [10] AHRENS, W.; CEMBROWICZ, R.G.; DEHNERT, G.; HEISS, H.-J.; HAHN, H.H.; HENSELEIT, H.J.; ORTH, H.; SENG, H.J.: Operations Research und seine Anwendung in der Siedlungswasserwirtschaft II. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 12. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1976.
- [11] DEHNERT, G.: Regionale Planung der Standorte für Abwasserbehandlungsanlagen mit Hilfe graphentheoretischer Algorithmen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 1. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1976.

- [12] HAHN, H.H. (Hrsg.): Umweltschutz im Bereich des Wasserbaus. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 14. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1976.
- [13] JØRGENSEN, S.E.: Reinigung häuslicher Abwässer durch Kombination eines chemischen Fällungs- und Ionenaustauschverfahrens. Karlsruhe 1976 (Eigenverlags des Verfassers).
- [14] RUF, J.: Gewässergütesimulation unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse. Prognostisches Modell Neckar, Bericht 16. Dornier System. Friedrichshafen 1977.
- [15] AHRENS, W.; DEHNERT, G.; DURST, F.; GERBER, J.; HAHN, H.H.; PAESSENS, H.; WEUTHEN, H.K.: Tourenplanung bei der Abfallbeseitigung. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 3. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1977.
- [16] KLUTE, R.: Adsorption von Polymeren an Silikaoberflächen bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen. Karlsruhe 1977 (Eigenverlag des Verfassers).
- [17] KNOBLAUCH, A.: Mathematische Simulation des Phosphorkreislaufs in einem gestauten Gewässer. GWF, Schriftenreihe Wasser- Abwasser, Bd. 17. Oldenbourg Verlag, München 1978.
- [18] ABENDT, R.: Aussagefähigkeit von Sauerstoffhaushaltsrechnungen. Hochschulsammlung Ingenieurwissenschaft, Wasserwirtschaft, Bd. 1. Hochschulverlag, Stuttgart 1978.
- [19] SENG, H.J.: Systematische Beurteilung der Umweltverträglichkeit bei Abfalldeponiestandorten. Hochschulsammlung Ingenieurwissenschaft, Abfallwirtschaft, Bd. 2. Hochschulverlag, Stuttgart 1979.
- [20] INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT: Fortschritte bei der Anwendung von Flockungsverfahren in der Abwassertechnologie. 2. Verfahrenstechnisches Seminar. Karlsruhe 1979 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [21] HAHN, H.H. (Hrsg.): Von der Abfallbeseitigung zur Abfallwirtschaft, Fachkolloquium zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Hans Straub, Karlsruhe 1980 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [22] INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT: Planung und Organisation von Einzelkläranlagen und Gruppenkläranlagen, 6. Planungstechnisches Seminar. Karlsruhe 1980 (Eigenverlag des Instituts).
- [23] KÄSER, F.: Transport suspendierter Feststoffe in Fließgewässern. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [24] EPPLER, B.: Aggregation von Mikroorganismen. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

-
- [25] INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT: Fortschritte bei der Anwendung des Flotationsverfahrens in der kommunalen Abwasserreinigung, 3. Verfahrenstechnisches Seminar. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts).
- [26] PAESSENS, H.: Tourenplanung bei der regionalen Hausmüllentsorgung. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts).
- [27] KIEFHABER, K.P.: Versuchsanlagen zur Entspannungsflotation von Abwasser - Vergleich von Versuchsergebnissen. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [28] HAHN, H.H.; SENG, H.J. (Hrsg.): Wirtschaftlichkeit in der Abfallwirtschaft. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts).
- [29] HAHN, H.H.; PAESSENS, H. (Hrsg.): Tourenplanung in der Abfallwirtschaft II. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts).
- [30] DICKGIESSER, G.: Betriebssichere und wirtschaftliche Klärschlamm-entsorgung. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [31] HAHN, H.H. (Hrsg.): Wasserversorgung und Abwasserbehandlung in Entwicklungsländern. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts).
- [32] HAHN, H.H. (Hrsg.): Schlämme aus der Abwasserfällung/-flockung. Karlsruhe 1983 (Eigenverlag des Instituts).
- [33] v. FALKENHAUSEN, K.: Planung eines Entsorgungssystems für die Klärschlamm-behandlung. Karlsruhe 1983 (Eigenverlag des Instituts).
- [34] HEISS, H.-J.: Stabilität kostenminimaler Lösungen bei der Planung von Abwasserentsorgungssystemen. Karlsruhe 1983 (Eigenverlag des Instituts).
- [35] HAHN, H.H. (Hrsg.): Planung im Gewässerschutz unter besonderer Berücksichtigung von Flussgebietsmodellen. Karlsruhe 1984 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [36] BANTZ, I.: Ein Rechenverfahren zur Darstellung der Auswirkungen von Stoßbelastungen auf die Qualität von Fließgewässern. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [37] LÖHR, J.: Einfluss der Tiefendurchmischung auf die Entwicklung von Phytoplankton - dargestellt am Beispiel des Maines. Karlsruhe 1984 (Eigenverlag des Instituts).
- [38] TROUBOUNIS, G.: Strukturorientierte Simulation des Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor- und Sauerstoffhaushaltes flacher Gewässer. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [39] DITTRICH, A.: Transport und Sedimentation organischer Stoffe in Abwasserteichen. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [40] GROHMANN, A.; HAHN, H.H.; KLUTE, R. (Hrsg.): Chemical Water and Wastewater Treatment. Practical Experience and New Concepts. Proceedings

- of the 1st Gothenburg Symposium 1984. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1985 (vergriffen).
- [41] HAHN, H.H.; NEIS, U. (Hrsg.): Belastungsschwankungen auf Kläranlagen: Auswirkungen und Möglichkeiten zur Reduktion, insbesondere durch Chemikalieneinsatz. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts).
- [42] SCHMITT, T.G.: Der instationäre Kanalabfluss in der Schmutzfrachtmodellierung. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).
- [43] IOSSIFIDIS, V.: Die Rolle der Ablagerungen bei der Schmutzfrachtberechnung in Kanalisationsnetzen. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).
- [44] SCHMITT, T.G.; HAHN, H.H. (Hrsg.): Schmutzfrachtberechnung für Kanalisationsnetze. Karlsruhe 1986 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).
- [45] DÖLL, B.: Die Kompensation der Oberflächenladung kolloidaler Silika-Suspensionen durch die Adsorption kationischer Polymere in turbulent durchströmten Rohrreaktoren. Karlsruhe 1986 (Eigenverlag des Instituts).
- [46] MERTSCH, V.: Sedimentation, Eindickung und Entwässerung von Fällungs-/Flockungsschlämmen. Karlsruhe 1987 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [47] KORDES, B.: Berechnung der Energiebilanz von Kläranlagen unter Berücksichtigung zeitlicher Schwankungen. Karlsruhe 1987 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [48] GEPPERT, B.: Tourenplanung bei der innenstädtischen Hausmüllentsorgung. Karlsruhe 1987 (Eigenverlag des Instituts).
- [49] GUTEKUNST, B.: Sielhautuntersuchungen zur Einkreisung schwermetallhaltiger Einleitungen. Karlsruhe 1988 (Eigenverlag des Instituts).
- [50] HAHN, H.H.; KLUTE, R.; BALMER, P. (Hrsg.): Recycling in Chemical Water and Wastewater Treatment. Proceedings of the 2nd Gothenburg Symposium. Karlsruhe 1986 (Eigenverlag des Instituts).
- [51] HAHN, H.H.; PFEIFER, R.; (Hrsg.): Abwasserreinigung in Entwicklungsländern mit besonderer Berücksichtigung der Industrie. Karlsruhe 1987 (Eigenverlags des Instituts).
- [52] HOFFMANN, E.: Strömungsstrukturen in Flockungsreaktoren. (in Vorbereitung).
- [53] HAHN, H.H.; PFEIFER, R. (Hrsg.): Fällung/Flockung - Erfahrungen aus Labor und Praxis. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).
- [54] KRÜGER, E.M.: Stabilität mineralischer Basisabdichtungen von Hausmülldeponien bezüglich des Ausbreitungsverhaltens anorganischer Schadstoffe. Karlsruhe 1989 (Eigenverlag des Instituts).

-
- [55] SISKOS, D.: Kläranlagenauslegung für stehende Vorfluter. Karlsruhe 1989 (Eigenverlag des Instituts).
- [56] HOU, R.: Kontrollstrategien für Fällung und Flockung auf Kläranlagen mit einem Vorhersagemodell der Zu- und Ablauffracht. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).
- [57] XANTHOPOULOS, C.: Methode für die Entwicklung von Modellregenspektren für die Schmutzfrachtberechnung. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).
- [58] HAHN, H.H.; XANTHOPOULOS, C. (Hrsg.): Schadstoffe im Regenabfluss aus städtischen Gebieten - Präsentation eines BMFT - Verbundprojektes. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [59] LEE, C.-M.: Tone zur physikalisch-chemischen Abwasserreinigung. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).
- [60] HARTMANN, K.-H.: Anaerobe Behandlung von Sickerwässern aus Hausmülldeponien. Karlsruhe 1991 (Eigenverlag des Instituts).
- [61] HAHN, H.H.; PFEIFER, R. (Hrsg.): Vor-, Simultan- oder Nachfällung? - Entscheidungskriterien für Planung, Entwurf und Betrieb. Karlsruhe 1991 (Eigenverlag des Instituts).
- [62] LEONHARD, D.: Eindickung und Entwässerung als Konsolidierungsvorgang. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts).
- [63] WEISSER, M.: Untersuchungen zur Belastung kommunaler Klärschlämme durch organische Schadstoffe - Abschlußbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02 WS 464/8. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).
- [64] HAHN, H.H.; XANTHOPOULOS, C. (Hrsg.): Schadstoffe im Regenabfluss II. Präsentation des BMFT-Verbundprojektes. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).
- [65] HAHN, H.H.; PFEIFER, R. (Hrsg.): Sanierung von Kläranlagen. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts).
- [66] DÜRETH-JONECK, S.: Entwicklung eines naturnahen, praxisorientierten. Mobilitätstests für Schwermetalle und Arsen in kontaminierten Böden. Karlsruhe 1993 (Eigenverlag des Instituts).
- [67] HAHN, H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Fällungs-/Flockungchemikalien. Anforderungen, Angebot, Auswahl und Qualität. Karlsruhe 1993 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).
- [68] HAHN, H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Wechselwirkungen der biologischen und chemischen Phosphorelimination. Karlsruhe 1993 (Eigenverlag des Instituts).
- [69] LANGER, S.J.: Struktur und Entwässerungsverhalten polymergeflockter Klärschlämme. Karlsruhe 1994 (Eigenverlag des Instituts).

- [70] MÜLLER, N.: Gewässergütemodellierung von Fließgewässern unter Berücksichtigung qualitativer, quantitativer, flächenhafter und sozioökonomischer Informationen. Karlsruhe 1994 (Eigenverlag des Instituts).
- [71] HAHN; H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Klärschlamm - Ressource oder kostenintensiver Abfall? Karlsruhe 1994 (Eigenverlag des Instituts).
- [72] MIHOPULOS, J.: Wechselwirkung Flockenbildung - Flockenabtrennung unter Berücksichtigung der Durchströmungsmuster in Sedimentations- und Flotationsbecken. München 1995 (Oldenbourg Verlag).
- [73] XANTHOPOULOS, C.; HAHN, H.H. (Hrsg.): Schadstoffe im Regenabfluss III. München 1995 (Oldenbourg Verlag).
- [74] HAHN, H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Wirtschaftlichkeitsfragen in der Abwasserreinigung. München 1995 (Oldenbourg Verlag).
- [75] SCHMID, K.: Tensidunterstützte und biologische Sanierung der Feinkornfraktion aus der Bodenwäsche bei kohlenwasserstoffhaltigen Altlasten. München 1996 (Oldenbourg Verlag).
- [76] HÖLZER, D.: EDV-gestützte Planung von Belebtschlammanlagen unter Berücksichtigung betrieblicher Aspekte. München 1996 (Oldenbourg Verlag).
- [77] HARITOPOULOU, T.: Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle in urbanen Entwässerungssystemen - Aufkommen, Transport und Verbleib. München 1996 (Oldenbourg Verlag).
- [78] HAHN, H.H.; TRAUTH, R.: Wechselwirkung zwischen Einzugsgebiet und Kläranlage. München 1996 (Oldenbourg Verlag).
- [79] FUCHS, S.: Wasserwirtschaftliche Konzepte und ihre Bedeutung für die Ökologie kleiner Fließgewässer - Aufgezeigt am Beispiel der Mischwasserbehandlung. München 1997 (Oldenbourg Verlag).
- [80] BEUDERT, G.: Gewässerbelastung und Stoffaustrag von befestigten Flächen in einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet. München 1997 (Oldenbourg Verlag).
- [81] WITT, P.CH.: Untersuchungen und Modellierungen der biologischen Phosphat-elimination in Kläranlagen. München 1997 (Oldenbourg Verlag).
- [82] PSCHERA, S.: Abwasserbehandlung mit Ozon: Klassifizierung von Abwasser zur optimierten Verfahrensgestaltung in der Kreislaufwirtschaft. München 1997 (Oldenbourg Verlag).
- [83] TRAUTH, R.: Lokalisierung von Grundwasserschadstoffquellen in urbanen Räumen. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [84] JAKOBS, J.: Quantifizierung der Wirkung von Kanalnetzbewirtschaftungsmaßnahmen mit Hilfe des detailliert hydrodynamischen Schmutzfrachtmodells HAuSS. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

-
- [85] XANTHOPOULOS, C.: Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 1 - Oberfläche. München 1998 (Oldenbourg-Verlag).
- [86] SCHMITT, T.G.: Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 2 - Kanalisation. München 1997 (Oldenbourg Verlag).
- [87] SEYFRIED, C.F.: Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 3 - Kläranlage. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [88] HAHN, H.H.; SCHÄFER, M. (Hrsg.): Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 4 - Emission/Immission. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [89] HAHN, H.H.; WILHELMI, M.: Abwasserreinigung - Reststoffproblem oder Sekundärrohstoffquelle. München 1997 (Oldenbourg Verlag).
- [90] SCHULZ, ST.: Der Kanal als Reaktor: Neubildung von AOX durch Wirkstoffe in Reinigungsmitteln. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [91] WOLTER, CH.: Steuer- und Regelkonzepte der Vorklärung unter Einbeziehung der Vorfällung/Flockung und Schlammhydrolyse. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [92] PFEIFER, R.: Schmutzstoffrückhalt durch chemisch/physikalische Regenwasserbehandlung im Trennsystem. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [93] LIN, L.Q.: Entstabilisierung und Aggregation von Silika und Huminsäure mit Aluminiumsalzen in turbulenten Rohrströmungen. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [94] HAHN, H.H.; WILHELMI, M. (Hrsg.): Abwasserfällung und Flockung. München 1998 (Oldenbourg Verlag).
- [95] HUPPERT, N.: Elimination von Ibuprofen und NBBS in kommunalen Kläranlagen analysiert mittels Festphasenmikroextraktion. München 1999 (Oldenbourg Verlag).
- [96] FUCHS, S.; HAHN, H.H. (Hrsg.): Schadstoffstoffe im Regenabfluss IV. Abschlusspräsentation des BMBF-Verbundprojektes NIEDERSCHLAG. München 1999 (Oldenbourg Verlag).
- [97] SCHÄFER, M.: Regionalisierte Stoffstrombilanzen in städtischen Einzugsgebieten - Möglichkeiten, Probleme und Schlussfolgerungen.
- [98] HAHN, H.H.; KRAUS, J. (Hrsg.): Technologische Aspekte der Wasser-, Abwasser- und Schlammbehandlung. Karlsruhe 1999 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [99] KISHI, R.T.: Einzugsgebietseigenschaften und Fließgewässergüte (Modellierung stofflicher Parameter mit Hilfe raumbezogener Daten). Karlsruhe 2000 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

- [100] NAUDASCHER, I.: Kompostierung menschlicher Ausscheidungen durch Verwendung biologischer Trockentoiletten - mit besonderer Berücksichtigung des Kleingartenbereichs. Karlsruhe 2001 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [101] ANDERS, G.: Der Einsatz von Scheibentauchkörpern zur Güllebehandlung mit dem Ziel der weitergehenden Nährstoffreduktion. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [102] WITTLAND, C.: Angepasste Verfahren zur Industrieabwasserreinigung - Modell zur Verfahrensauswahl. Karlsruhe 2000 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [103] HAHN, H.H.; KRAUS, J. (Hrsg.): Projektmanagement, Maschinentechnik und gesetzliche Vorgaben. Karlsruhe 2000 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [104] SCHMID-SCHMIEDER, V.: Vergleich der Leistungsfähigkeit von Biofilmverfahren bei Sanierungen bzw. Erweiterungen von kommunalen Kläranlagen. Karlsruhe 2001 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [105] HAHN, H.H.; KRAUS, J.: Geruchsemissionen. Karlsruhe 2001 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [106] ANTUSCH, E.: Lokalisierung organischer Schadstoffemissionen durch Sielhautuntersuchungen. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [107] OBERACKER, F.E.: Verwendung und Entsorgung arsenhaltiger Wasserwerksschlämme. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [108] HAHN, H.H.; KRAUS, J.: Bläh- und Schwimmschlamm. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [109] HITZLER, A.: Beurteilung und Optimierung von Sandwaschanlagen auf Kläranlagen. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [110] KLINGEL, M.: Prozess-Simulation in der Abwasser- und Abfallbehandlung. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [111] SONG, Y.: Precipitation Chemistry of Calcium Phosphate for Phosphorous Recovery. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [112] KRAUS, J.: Herstellung von Leichtzuschlagstoffen aus Klärschlamm. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

-
- [113] ZHANG, P.: Herstellung und Charakterisierung und Wirksamkeit polymerer anorganischer Flockungsmittel. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [114] HAHN, H. H.; KRAUS, J.: Wertschöpfung durch Betriebsoptimierung. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [115] LUCAS, S.: Auftreten, Ursachen und Auswirkungen hoher Fremdwasserabflüsse - eine zeitliche und räumliche Analyse. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [116] SCHWARZ, M.: Mikrobielle Kolmation von abwasserdurchsickerten Bodenkörpern: Nucleinsäuren zum Nachweis von Biomasse und Bioaktivität. Karlsruhe 2004 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [117] HOLZ, A.: Immissionsorientierte Bilanzierung punktueller und diffuser Schwermetallfrachten. Karlsruhe 2004 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [118] HAHN, H.H.; KEGEBEIN, J.: Auf dem Weg zur Kläranlage von morgen. Karlsruhe 2004 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).
- [119] BUTZ, J.: Stoffstrombilanzen für Phosphor und sechs Schwermetalle am Beispiel des oberen Kraichbachs. Karlsruhe 2005 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).
- [120] MAHMUTSPAHC, Z.: Projektfinanzierung - ein PPP Modell für internationale siedlungswasserwirtschaftliche Projekte. Karlsruhe 2005 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).
- [121] HAHN, H.H.; FRIEDRICH, K.: Chemikalien in der Abwasserbehandlung - was haben wir dazugelernt? Karlsruhe 2005 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).
- [122] KEGEBEIN, J.: Die Verwendung von Küchenabfallzerkleinerern (KAZ) aus abwasser- und abfallwirtschaftlicher Sicht. Karlsruhe 2006 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).
- [123] HAHN, H.H.; HOFFMANN, E.; BLANK, A.: Abwasserproblemstoffe - Erfahrungen mit neuen Produkten und Technologien. Karlsruhe 2006 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).
- [124] KPONGBENGA, K.: Wasserver- und Entsorgung in der Stadt Lomé/Togo: Analysen, Beiträge und Konzepte. Karlsruhe 2006 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).
- [125] BEKKER, M.: Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen. Karlsruhe 2007 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).

- [126] DUTTA, S.: Mathematical Modeling of Rotating Biological Contactor for Process Optimisation in Wastewater Treatment. Karlsruhe 2007 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [127] HAHN, H.H.; HOFFMANN, E.; BLANK, A.: Die optimierte Kläranlage - Vision oder Realität? Karlsruhe 2007 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [128] FUCHS, S.; FACH, S.; HAHN, H.H.: Stoffströme in Flussgebieten - Von der Bilanzierung zur Bewirtschaftung. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [129] SCHERER, U.: Prozessbasierte Modellierung der Bodenerosion in einer Lösslandschaft. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [130] BECHTEL, A.: Abschätzung regionaler Nitrateinträge in das Grundwasser unter Verwendung von N_{\min} -Daten. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [131] SCHEER, M.: Ermittlung und Bewertung der Wirkung der Abflusssteuerung für Kanalisationssysteme. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [132] LITTY, K.: User-Oriented Wastewater Treatment Technology in Developing and Newly Industrialising Countries. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [133] HOFFMANN, E., BLANK, A.: Nachhaltigkeit in der Abwasserreinigung - Der Weg ist das Ziel. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [134] HILLENBRAND, T.: Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [135] BLANK, A.: Einfluss der Abwassertemperatur auf Bemessung, Auslegung und Reinigungsleistung von Scheibentauchkörpern. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [136] TURKOVIĆ, R.: Sauerstoffregime in abwasserdurchsickerten Filtersanden. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [137] HOFFMANN, E., BLANK, A.: Abwasserreinigung - Perspektiven, Hilfsstoffe und neue Technologien. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [138] HOMA, J.: Biofilmaktivität in Scheibentauchkörpern - Grundlagen, Anpassung und Anwendung des Dehydrogenasentests. Karlsruhe 2010 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [139] HOFFMANN, E., Blank, A.: Ökoeffizienz und Abwasserreinigung - Strategien und Lösungen für die Herausforderungen von Morgen. Karlsruhe 2010 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

-
- [140] MORCK, T.: Stickstoffelimination aus Schlammwasser mittels Ionenaustauscher und Elektrodialyse. Karlsruhe 2011 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [141] HOFFMANN, E.; BLANK, A.: Innovation und Flexibilität - Systemoptimierung und Systemerweiterung. Karlsruhe 2011 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [142] ORB, R.K.: Rückhalt hygienerelevanter Bakterien in mischwasserbeschickten Retentionsbodenfiltern - Konstruktive Hinweise. Karlsruhe 2012 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [143] HOFFMANN, E., HOMA, J.: Zukunftsfähige Abwasser- und Schlammbehandlung - Bauliche, verfahrenstechnische und energetische Optimierungspotenziale. Flockungstage 2012. Karlsruhe 2012 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [144] WEINGÄRTNER, D.E.: Greywater - Characteristics, Biodegradability and Reuse of some Greywaters. Karlsruhe 2013 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [145] FACH, S.: Bewertung der Abwasserbehandlung in Entwicklungs- und Schwellenländern. Karlsruhe 2012 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [146] HOFFMANN, E.; LEICHT, M.: Strategien, Analysen, Kennwerte und Qualitätsaspekte. Flockungstage 2013. Karlsruhe 2013 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [147] HOFFMANN, E.; LEICHT, M.: Bewährte und neue Techniken für die Aufgaben von Morgen. Flockungstage 2014. Karlsruhe 2014 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [148] HOFFMANN, E.; LEICHT, M.: Betriebliche Probleme, Lösungs- und Optimierungsstrategien. Flockungstage 2015. Karlsruhe 2015 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [149] HILGERT, S.: Analysis of spatial and temporal heterogeneities of methane emissions of reservoirs by correlating hydro-acoustic with sediment parameters, URN: urn:nbn:de:swb:90-469573, Karlsruhe 2015
- [150] KEMPER, M.: Strömungsverhalten und Sedimentationswirksamkeit in Regenbecken mit Schrägklärer-Einbauten, DOI 10.5445/IR/1000068909, Karlsruhe 2016
- [151] HOFFMANN, E., MORCK, T.: Dreißig Jahre Flockungstage. Flockungstage 2017. Karlsruhe 2017 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [152] WANDER, R.: Ableitung adäquater Daten für die Modellierung von urbanen Stoffeinträgen in die Gewässer auf Flussgebietsebene, DOI 10.5445/IR/1000086653, Karlsruhe 2018

- [153] ANGGRAINI, A.K.: Optimization of Slow Sand Filtration Design by Understanding the Influence of Operating Variables on the Physical Removal Mechanisms, DOI: 10.5445/IR/1000082692, Karlsruhe 2018
- [154] MORCK, T.; HILLER, J.; FUCHS, S. (Hrsg.): Gegenwärtige Einsichten für zukünftige Entscheidungen. 31. Karlsruher Flockungstage 2018. Karlsruhe 2018 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [155] MORCK, T.; RAMASWAMI, S.; FUCHS, S. (Hrsg.): Siedlungswasserwirtschaft mit Weitblick - Von der Auslegung bis zur Rückgewinnung. 32. Karlsruher Flockungstage 2019. Karlsruhe 2019 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [156] WAGNER, A.: Event-Based Measurement and Mean Annual Flux Assessment of Suspended Sediment in Meso Scale Catchments, DOI 10.5445/IR/1000104223, Karlsruhe 2020
- [157] MEULER-LIST, S.: Foulingverhalten einer kommunalen MBR-Anlage, DOI 10.5445/IR/1000120245, Karlsruhe 2020
- [158] SOTIRI, K.: Integrated Sediment Yield and Stock Assessment for the Passaúna Reservoir, Brazil, DOI: 10.5445/IR/1000127716, Karlsruhe 2020
- [159] AZARI, M.; FUCHS, S. (Hrsg.): Moderne Ansätze in der Abwasserbehandlung: Tagungsband der 33. Karlsruher Flockungstage 2022; DOI: [10.5445/IR/1000153905](https://doi.org/10.5445/IR/1000153905). Karlsruhe 2022 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)
- [160] NCKEL, J.P.: Micropollutant Emissions from Combined Sewer Overflows, DOI: 10.5445/IR/1000156862, Karlsruhe 2023

Bestellanschrift:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)

Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft

BIBLIOTHEK, Abteilung: Schriftenreihe

Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31

76131 Karlsruhe

Tel.: 0721/608-42457

Fax: 0721/608-44729

E-Mail: irmtraud.kaupa@kit.edu