

**Institut für Wasser und Umwelt (IWU)**

**Wassergütewirtschaft**

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

**KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft**

---

## **Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität in der Abwasserbehandlung**

Tagungsband der 35. Karlsruher Flockungstage 2024

Herausgegeben von:                      Mohammad Azari  
   Stephan Fuchs

---

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Tagungsband der 35. Karlsruher Flockungstage 2024;  
M. Azari, S. Fuchs (Hrsg.); Schriftenreihe SWW (Bd. 162)  
Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe

Alle Rechte vorbehalten

Satz:            Institut für Wasser und Umwelt (IWU)  
                  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. Dabei wird immer deutlicher, dass die Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft und des Klimawandels nicht isoliert betrachtet werden können, sondern integraler Bestandteil moderner Abwasserbehandlungskonzepte sein müssen. Nur durch die Kombination von Wertstoffrückgewinnung z.B. Phosphorrückgewinnung, direkte und indirekte Emissionsreduktion und andere innovative Technologien können nachhaltige Lösungen für die Zukunft geschaffen werden.

Unter dem Titel "Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität in der Abwasserbehandlung" haben wir ein vielfältiges Programm zu aktuellen Themen der Abwasserwirtschaft zusammengestellt. Im Fokus stehen die neue Europäische Kommunalabwasserrichtlinie (KARL), die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) und das Klimaschutzgesetz als Impulsgeber für energie- und kosteneffiziente Innovation und Technologieentwicklung in diesem Bereich.

Die Konferenz beginnt mit einem Übersichtsvortragsblock, in dem Experten\*innen zum Hauptthema des Programms referieren. Dazu gehört auch ein Vortrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Anschließend folgen drei fachwissenschaftliche Blöcke. Die Themenschwerpunkte dieses Jahres lauten:

### **Nachhaltige Phosphorrückgewinnung**

### **CO<sub>2</sub>-Fussabdruck und Klimaneutralität**

### **Innovative Energie- und Wasserrückgewinnung**

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 2024

Mohammad Azari und Stephan Fuchs



# Inhaltsverzeichnis

Aktuelles aus dem Umweltministerium . . . . .	11
Praktische Relevanz der neuen EU-Kommunalabwasserrichtlinie . . . . .	21
Erweiterte Klassifizierung kommunaler Kläranlagen "Abwassercluster" ..	30
Der Beitrag der Schlamm Trocknung zur Phosphorrückgewinnung aus Asche. . . . .	37
ePhos® – Elektrochemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor am Beispiel RoKKa. . . . .	45
Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling. . . . .	53
Das Klick-Tool:	
Klimabilanz für Kläranlagen mit einem Klick. . . . .	66
Dynamische Simulation der Treibhausgasemissionen von Kläranlagen	74
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck von Fällungs- und Flockungsmitteln sowie von Aktivkohlen . . . . .	87
Wasserwiederverwendung – Ein Lösungsansatz auch in Deutschland. . .	99
Wasserrückgewinnung aus dem Papiergärprodukt zur Wiederverwendung in der Papierfabrik. . . . .	107
Thermisches und chemisches Potential von Abwasser innovativ nutzen.	119
Ausstellerverzeichnis . . . . .	131
Schriftenreihe SWW – Karlsruhe . . . . .	135





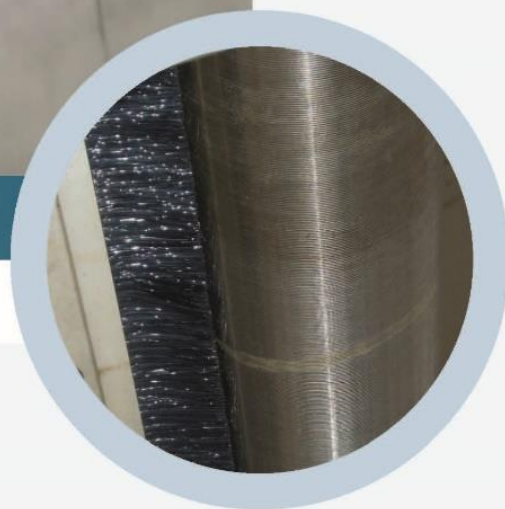
HM ECODRAIN

**H<sub>2</sub>ORTNER**

Wir haben es über Jahre optimiert.  
Den Gewinn ernten Sie!

## HM EcoDrain®

automatischer Trübwasserabzug über die volle Höhe.



TECHNIK  
ENGINEERING  
CHEMIE

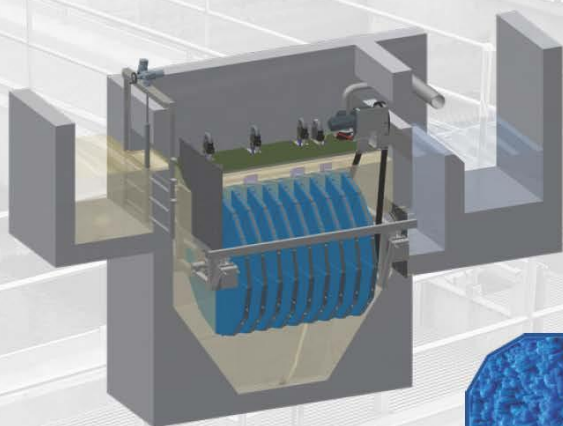
### HM EcoDrain®

Dreifache Perfektion  
von Ihrem H<sub>2</sub>ORTNER-Team.  
Tel.: 0851 - 75660 - 0



# PHOSPHORENTFERNUNG

## MITTELS POLSTOFFFILTRATION



PES-14



UF-10



### OPTIFIBER® MIKRO- UND ULTRAFASER ZUR PHOSPHORENTFERNUNG

- Effiziente Abscheidung von Mikrofloken auch bei kurzer Reaktionszeit des Fallmittels
- Phosphorkonzentration im Ablauf:

Gesamt-P  $\leq 0,1 - 0,2$  mg/L

Partikulär-P  $\leq 0,05 - 0,07$  mg/L

- Synergienutzung - gleichzeitige Mikroplastikentfernung



Engineered  
Water Solutions

[www.mecana.ch](http://www.mecana.ch)







# Wie viele Möglichkeiten hat eine Gemeinde, Geld zu sparen?

Wir ersetzen unnötige Ausgaben durch Forschung

## Wirtschaftliche CO<sub>2</sub>-Reduzierung im Betrieb einer Kläranlage

Auf uns vertrauen die effizientesten Kläranlagen weltweit

### VTA Trioxsan®

Top-Neuheit in der  
Abwasserbehandlung

- ▶ Erstmals sauerstoffunterstützte Phosphoreliminierung
- ▶ Reduziert den Energiebedarf für die Belüftung um bis zu 40 %
- ▶ Sofortige Geruchseliminierung im gesamten System
- ▶ Bis zu 65 % weniger Fällschlamm – dadurch Einsparungen bei der Schlamm Entsorgung

### VTA Nanocarbon®

Weltweit erfolgreich  
im Einsatz

- ▶ Ersatz der 4. Reinigungsstufe durch VTA Liquid Engineering Verfahren Nanocarbon®
- ▶ Entfernt Spurenstoffe, z.B. Medikamentenrückstände bis zu 98 %
- ▶ Entfernt kleinste Mikroplastikpartikel bis zu 99 %

Bei Rückfragen stehen wir Ihnen jederzeit gerne zur Verfügung: [institut@vta.cc](mailto:institut@vta.cc).

Weiterführende  
Informationen  
finden Sie unter  
den folgenden  
QR-Codes:



VTA Nanocarbon®  
Video



[www.vta.cc](http://www.vta.cc)

**VTA Deutschland GmbH**  
Henneberger Straße 1  
94036 Passau  
Deutschland  
Tel: +49 851 988 98-0  
E-mail: [welcome@vta.cc](mailto:welcome@vta.cc)



## **Aktuelles aus dem Umweltministerium**

---


**Dr. Sabine Aßmann**

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

# Aktuelles aus dem Umweltministerium

Dr. Sabine Aßmann, Referat 53

35. Karlsruher Flockungstage 18./19. November 2024

 Baden-Württemberg  
Ministerium für Umwelt, Klima  
und Energiewirtschaft



## Themenübersicht

Novellierung der EU-  
Kommunalabwasserrichtlinie

Energie- und Klimaschutz auf Kläranlagen

Gesetzliche Vorgaben

Konzept für Klimaschutz auf Kläranlagen in  
Baden-Württemberg



## EU-Kommunalabwasser-RL (KARL)

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

26. Oktober 2022: Legislativvorschlag der Europäischen Kommission [...]

29. Januar 2024: Einigung im Trilog

08. Oktober 2024: Annahme im EP

05. November 2024: Annahme im Rat

→ KARL kann vs. noch 2024 in Kraft treten  
KARL müsste bis Mitte 2027 in DE umgesetzt sein (in 30 Mon.)  
EHV müsste bis Ende 2027 in DE umgesetzt sein (in 36 Mon.)



## Themenschwerpunkte EU-KARL

### Nährstoffelimination

#### Strengere Anforderungen an P und N

für KA  $\geq 150.000$

für KA  $\geq 10.000$  EW bei Risiko

P: 0,5 / 0,7 mg/l oder 90% / 87,5% Abbau

N: 8 / 10 mg/l oder 80% Abbau

### Spurenstoffelimination

#### Verpflichtung zur 4. Reinigungsstufe

für KA  $\geq 150.000$  EW

für KA  $\geq 10.000$  EW bei Risiko

#### Erweiterte Herstellerverantwortung

80% Finanz. durch Pharma-/Kosmetikindustrie

### Integrierte

#### Abwasserbewirtschaftungspläne

für Kommunen  $\geq 100.000$  EW

für Kommunen  $\geq 10.000$  EW bei Risiko

(Richtziel MW-Überläufe  $< 2\%$  jährliche AW-Fracht bei TW)

UWRM / blau-grüne Infrastruktur

### Energieneutralität / THG messen

Energieneutralität für Anlagen  $\geq 10.000$  EW

(Nachweis auf Gebietsebene, nicht anlagenscharf)

Energieaudits für größere KA

Treibhausgase erfassen KA  $\geq 10.000$  EW

## Umsetzung KARL in DE

Begleitung durch Bund-Länder-AG KARL (mit Unter-AGs NW, Energie, ...)

Zentraler Streitpunkt: Erweiterte Herstellerverantwortung (EHV)

- UBA hat Rechtsgutachten vergeben
- KOM hat Rechtsgutachten vergeben, Ziel: Leitplanken für MS zur Umsetzung EHV

In DE vs. ca. 700 KA mit 4. RS erforderlich,  
Inv.kosten bis 2045: ca. 7-8 Mrd. EUR, jährliche Kosten inkl. Betrieb ca. 0,5 Mrd. EUR  
(Schätzungen VCI, VKU)

Water Package im Trilog hat insbesondere wg. Diclofenac starken Einfluss auf  
Gebietskulisse und Anzahl 4. RS

Rechtliche Umsetzung KARL in DE

AbwV Anhang 1: alle stofflichen Anforderungen an KA

KommunalabwasserV: alles Andere (Gebietskulissen, Energie, THG, AW-Monitoring, ...)

Keine Änderung AbwAG geplant, d.h. an Sonderweg DE zur qual. Stichprobe soll festgehalten werden



## Themenschwerpunkte EU-KARL

**Mischwassermanagement** Art. 5 + Anhang 5

**Nährstoffelimination („Drittbehandlung“)** Art. 7 + Anhang 1 B+C

**Spurenstoffelimination („Viertbehandlung“)** Art. 8 + Anh. 1 B+C  
**Erweiterte Herstellerverantwortung** Art. 9+10

**Energieneutralität** Art. 11  
**Direkte Treibhausgasemissionen** Art. 21

**Abwassermonitoring** Art. 17

## Energieneutralität Art. 11 Direkte Treibhausgasemissionen Art. 21

Artikel 11:

**Energieneutralität** stufenweise bis 2045 und Energieaudits 4 jährlich  
(mit Zwischenzielen, Nachweis auf Mitgliedsstaatsebene für KA  $\geq 10.000$  EW)

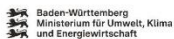
Berücksichtigung onsite und offsite generierter Energie oder Zukauf von max. 35% nicht fossiler Energie möglich

Artikel 21:

**THG Messung** bei KA  $\geq 10.000$  EW (CO<sub>2</sub>, Lachgas, Methan) unterstützt durch Berechnung oder Modellierung, Messmethodik soll in delegiertem Rechtsakt geregelt werden.

Klimaneutralität des Sektors bis 2050 bleibt ein Ziel, aber keine konkreten Anforderungen

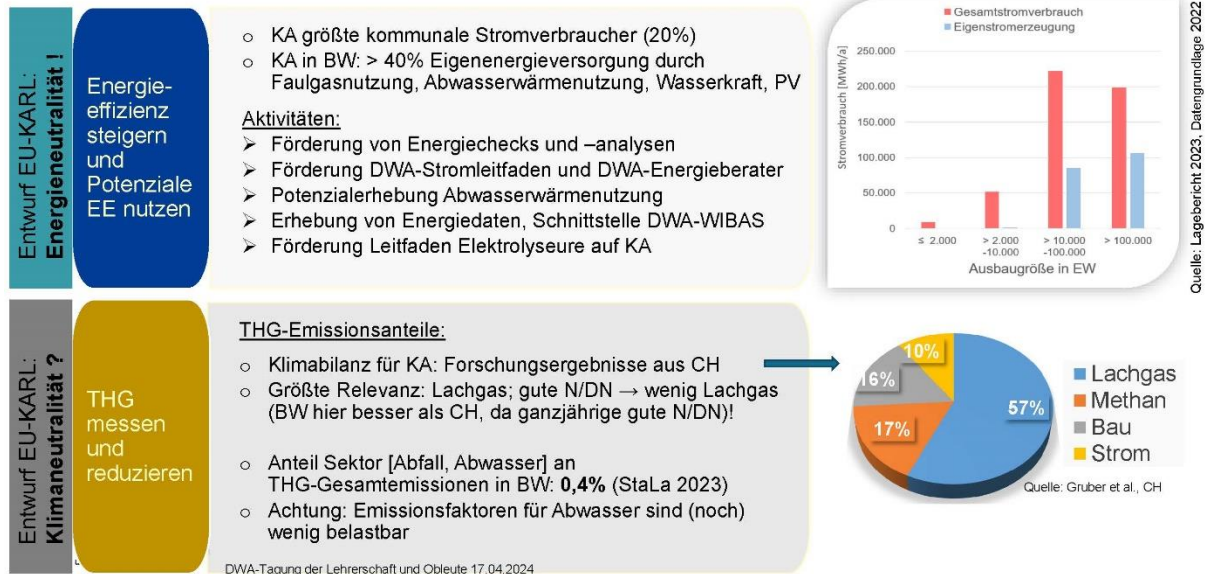
→ BW: Anforderungen ambitioniert, aber erfüllbar



## Energie und Klimaschutz auf Kläranlagen

Entwurf EU-KARL: <b>Energieneutralität !</b>	Energieeffizienz steigern und Potenziale EE nutzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>KA größte kommunale Stromverbraucher</li> <li>KA in BW: &gt; 40% Eigenenergieversorgung durch Faulgasnutzung, Abwasserwärmenutzung, Wasserkraft, PV</li> </ul> <p><u>Aktivitäten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Förderung von Energiechecks und -analysen</li> <li>➤ Förderung DWA-Stromleitfaden und DWA-Energieberater</li> <li>➤ Potenzialerhebung Abwasserwärmenutzung</li> <li>➤ Erhebung von Energiedaten, Schnittstelle DWA-WIBAS</li> <li>➤ Förderung Leitfaden Elektrolyseure auf KA</li> </ul>	<table border="1"> <caption>Stromverbrauch und Eigenstromerzeugung nach Ausbaugröße</caption> <thead> <tr> <th>Ausbaugröße in EW</th> <th>Gesamtstromverbrauch (MWh/a)</th> <th>Eigenstromerzeugung (MWh/a)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ 2.000</td> <td>~10.000</td> <td>~5.000</td> </tr> <tr> <td>&gt; 2.000 - 10.000</td> <td>~50.000</td> <td>~10.000</td> </tr> <tr> <td>&gt; 10.000 - 100.000</td> <td>~220.000</td> <td>~80.000</td> </tr> <tr> <td>&gt; 100.000</td> <td>~200.000</td> <td>~100.000</td> </tr> </tbody> </table>	Ausbaugröße in EW	Gesamtstromverbrauch (MWh/a)	Eigenstromerzeugung (MWh/a)	≤ 2.000	~10.000	~5.000	> 2.000 - 10.000	~50.000	~10.000	> 10.000 - 100.000	~220.000	~80.000	> 100.000	~200.000	~100.000	Quelle: Lagebericht 2023, Datengrundlage 2022
Ausbaugröße in EW	Gesamtstromverbrauch (MWh/a)	Eigenstromerzeugung (MWh/a)																	
≤ 2.000	~10.000	~5.000																	
> 2.000 - 10.000	~50.000	~10.000																	
> 10.000 - 100.000	~220.000	~80.000																	
> 100.000	~200.000	~100.000																	
Entwurf EU-KARL: <b>Klimaneutralität ?</b>	THG messen und reduzieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>Methan und Lachgas (Ausgasung Schlamm Lagerung, Kanalsystem, Biologie)</li> <li>Bei KA: THG-Emissionen bisher kein Betriebsthema</li> </ul> <p><u>Aktivitäten:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Förderung THG-Messungen auf KA</li> <li>➤ Entwicklung Messverfahren, Emissionsfaktoren</li> <li>➤ Sensibilisierung Betreiber und Behörden</li> <li>➤ Förderung Tool Klimabilanzierung für KA</li> </ul>		<div style="background-color: #d3d3d3; padding: 5px; display: inline-block;">→ THG-Emissionsanteile ?</div>															

## Energie und Klimaschutz auf Kläranlagen



## Gesetzliche Vorgaben zum Klimaschutz

- EU-KARL: THG-Messungen und Energieneutralität
- Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz BW





## Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz BW (KlimaG BW)

§10 Sektorziel: bis 2030 Minderungsziele von 88 % im Vergleich zu den Treibhausgasemissionen von 1990

§18 (2): Erfassung und Meldung des Energieverbrauchs

- Größenklasse und Einwohnerwert der Kläranlage,
- Anzahl der versorgten Einwohnerinnen und Einwohner
- Endenergieverbrauch an Strom

Gemeinden und Gemeindeverbände sind nach Maßgabe von Absatz 2 und 3 verpflichtet, für einzelne Energieverbraucher, für die bei den Gemeinden und Gemeindeverbänden Energiekosten anfallen, jährlich bis zum 30. Juni des Folgejahres in einer vom Land bereitgestellten elektronischen Datenbank Angaben zu machen. Soweit Energiekosten bei Unternehmen anfallen, an denen die Gemeinde oder der Gemeindeverband beteiligt ist, gilt dies auch, wenn die Beteiligung einen Anteil von mehr als 50 Prozent umfasst; im Übrigen hat die Gemeinde oder der Gemeindeverband bei einer Beteiligung von mehr als 25 Prozent auf die Bereitstellung der Daten gegenüber dem Unternehmen hinzuwirken und zu den insoweit übermittelten Daten Angaben zu machen.

## Konzept zum Klimaschutz auf Kläranlagen in Baden-Württemberg

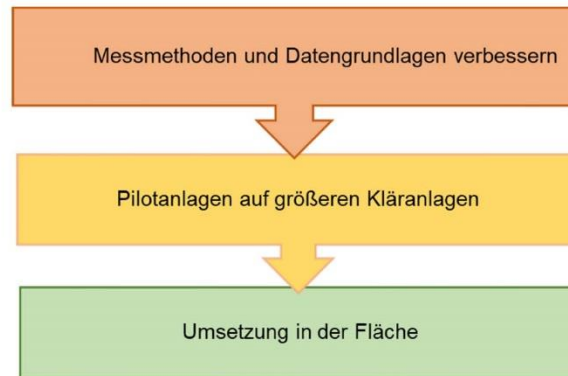
### Fragestellung:

Wie können Treibhausgas-Emissionen auf Kläranlagen erhoben und mit welchen Maßnahmen reduziert werden?

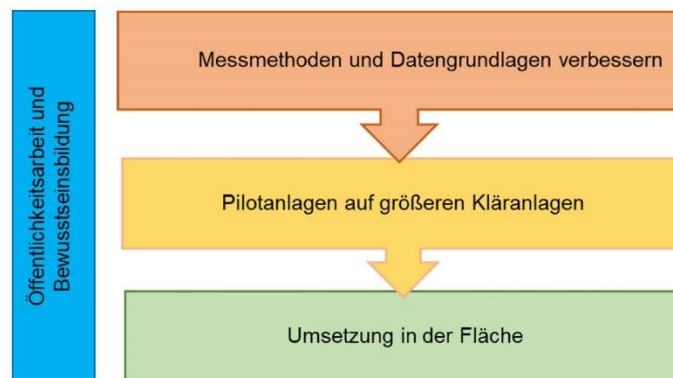
Keine Verschlechterung der Reinigungsleistung

Wissensstand noch am Anfang

## 3-stufiges Maßnahmenkonzept



## 3-stufiges Maßnahmenkonzept



## Fördermöglichkeiten

aktuell keine Fördermöglichkeiten von Seiten Abteilung 2 – Klima und 5 Wasser und Boden

Wechselwirkungen von THG-Messprogrammen und THG-Minderungsmaßnahmen mit KA und insbesondere Reinigungsleistung werden bei aktuellen Forschungsprogrammen in den Blick genommen

→ wenige Pilotprojekte und Erstellung eines Leitfadens werden als Forschungsvorhaben gefördert

## Fazit und Ausblick

durch bestehende und zukünftige Anforderungen an den Betrieb von Kläranlagen und Abwasserreinigung

- mehr Energie nötig
- vor dem Hintergrund der Installation zusätzlicher Reinigungsstufen im Bereich Stromverbrauch sind Energieeinsparungen auf Kläranlagen eine große Herausforderung
- Energieneutralität ambitioniert

# Vielen Dank für Ihr Interesse!



# **Praktische Relevanz und Konsequenzen der neuen EU-Kommunalabwasserrichtlinie für Baden-Württemberg**

---

**Dipl.-Ing. Kathrin Münch**

**DWA-Landesverband**

**Baden-Württemberg**

**Stuttgart**

## **1 Einleitung**

Die novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie setzt neue Maßstäbe für die Wasserwirtschaft. Die Novellierung der über 30 Jahre alten EU-Richtlinie musste an die neuesten Standards angepasst und an die Ziele des „Green Deals“ ausgerichtet werden. Am 05.11.2024 wurde die Richtlinie mit einer großen Mehrheit im EU-Ministerrat verabschiedet. Diese förmliche Annahme ist der letzte Schritt im ordentlichen Gesetzgebungsverfahren. Die Richtlinie wird nun unterzeichnet und im Amtsblatt der EU veröffentlicht. Sie tritt am zwanzigsten Tag nach ihrer Veröffentlichung in Kraft.

Neben den strengeren Grenzwerten für die Parameter Phosphor und Stickstoff beinhaltet die Richtlinie neue Themen und Vorgaben bezüglich der Grenzwerte für Mikroschadstoffe und den Ausbau von vierten Reinigungsstufen, Mikroplastik, Energieneutralität und Treibhausgasemissionen, Wasserwiederverwendung und das Abwassermonitoring für den Gesundheitssektor.

Im Folgenden wird dieser Beitrag auf die Vorgaben hinsichtlich der Energieneutralität und Treibhausgasemissionen eingehen und deren Auswirkungen für die Abwasserwirtschaft in Baden-Württemberg aufzeigen. Im Folgenden finden Sie die Folien des Vortrages.

## Was ist besonders an der novellierten EU-Kommunalabwasserrichtlinie (EU-KARL)?

„alte“ Kommunalabwasserrichtlinie, 91/271/EEC vom 21. Mai 1991:

- Fokus auf zentrale Ableitung und Behandlung,
- weniger auf kleine Siedlungsräume, dezentrale Behandlung und Regenwasser

## Notwendigkeit der Novellierung

- Anpassung an die neusten Standards
- bessere Ausrichtung des Sektors auf die Ziele des "Green Deal"



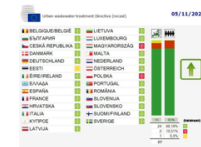
05.11.2024 finale Verabschiedung der novellierten Kommunalabwasserrichtlinie durch den EU-Ministerrat (90%ige Zustimmung)  
→ Umsetzung von EU-KARL in nationales Recht bis Mitte 2027

## Eckpunkte und neue Themen

- strengere Grenzwerte für die Parameter Stickstoff und Phosphor
- neue Grenzwerte für Mikroschadstoffe mit weiteren Reinigungsstufen (inkl. erweiterter Herstellerverantwortung/ Verursacherprinzip)
- Mikroplastik
- Ziel der Energieneutralität für den Sektor
- Reduzierung der Treibhausgasemissionen
- Wasserwiederverwendung
- Abwassermonitoring für den Gesundheitssektor



### Voting result



1

## EU-KARL Artikel 11 - Energieneutralität



Nationales Ziel: Energieneutralität des Abwassersektors bis 2045

- Anlagen mit einer Abwasserlast ab 10.000 EW
- Das Ziel gilt nicht anlagenscharf, sondern auf nationaler Ebene

Etappenziele:

- 20% bis 2030
- 40% bis 2035
- 70% bis 2040
- 100% bis 2045



- Durchführung von Energieaudits alle vier Jahre (Aufführen von kosteneffizienten Maßnahmen)



≥ 100.000 EW am 31.12.2028  
≥ 10.000 EW am 31.12.2032

- Zukauf von Energie aus nichtfossilen Brennstoffquellen gestattet
- Alle Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmen zur Steigerung der erneuerbaren Energieerzeugung durchgeführt
- Maximal 35 % in Bezug auf das genannte Ziel



Energieneutralität = Energieverbrauch – Energieproduktion - Rückgewinnung von Abwärme

auf Betreibergelände oder außerhalb davon erzeugt

bei gleichzeitiger Verringerung der Treibhausgasemissionen

2

## Energiebedarf von Kläranlagen in Baden-Württemberg



### Stromverbrauch

500 Mio. kWh/a

### Eigenstromerzeugung

218 Mio. kWh/a

### Eigenversorgungsgrad

43,7%

### Nettoenergiebedarf

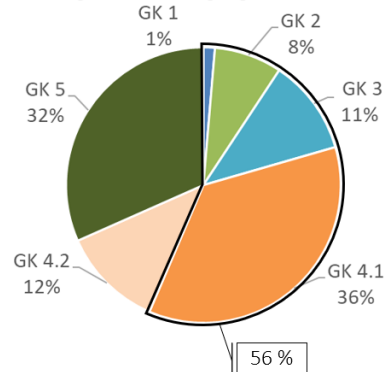
282 Mio. kWh/a

### Anzahl Kläranlagen

860

GK 4.1 10.001-50.000 EW  
GK 4.2 50.0001-100.000 EW

### Stromverbrauch nach Abzug der Eigenstromerzeugung in MWh/a



Größenklasse	Eigenversorgungsgrad in %
GK 1	0,8
GK 2	2,8
GK 3	5,4
GK 4.1	33,0
GK 4.2	53,9
GK 5	58,7

Quelle: Daten Leistungsnachweis 2023

3

## Was bedeutet EU-KARL für Baden-Württemberg?



Einsparung und Eigenproduktion von  
**223,8 Mio. kWh/a**



Erhöhung auf Grund des Ausbaus von Anlagen  
mit 4. Reinigungsstufen

### Spurenstoffelimination (Viertbehandlung) Art. 8

- Pauschaler Ansatz (Vorsorgeprinzip) für sehr große Kläranlagen mit > 150.000 EW
- Risikobasierter Ansatz für Kläranlagen mit mehr als 10.000 EW

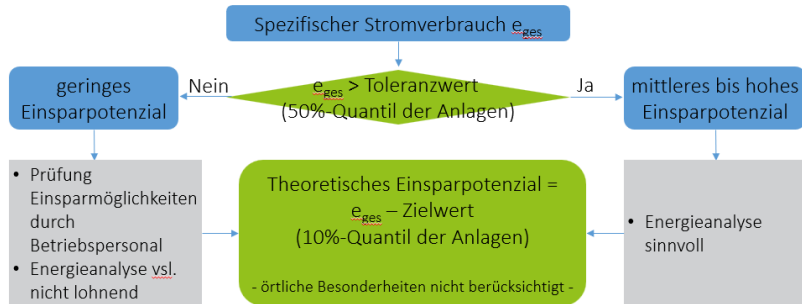
Quelle: Daten Leistungsnachweis 2023; Vera Kohlarüber (2024): „Spurenstoffelimination und EU-Kommunalabwasserrichtlinie - Stand der Umsetzung in Baden-Württemberg“, Aufbaukurs für Gewässerschutzbeauftragte am 06.11.2024 in Esslingen

4

## Benchmarking und theoretische Potenzialermittlung



- Orientierungswerte für den einwohnerspezifischen Stromverbrauch, unterschieden nach Größenklasse und biologischem Reinigungsverfahren
- Datenbasis für Toleranz- und Zielwerte ist der Leistungsnachweis 2022 des DWA-Landesverbands Baden-Württemberg



5

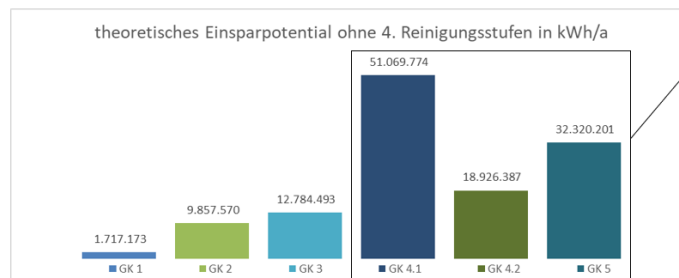
## Theoretisches Einsparpotenzial in Baden-Württemberg



gesamtes theoretisches Einsparpotenzial 183,1 Mio. kWh/a

Einsparpotenzial von Anlagen **mit** 4. Reinigungsstufe  
56,4 Mio. kWh/a

Einsparpotenzial von Anlagen **ohne** 4. Reinigungsstufe  
126,7 Mio. kWh/a



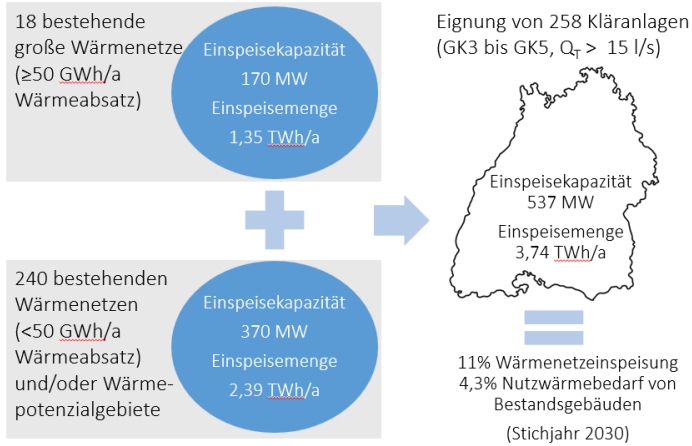
Theoretisches Einsparpotenzial der GK 4.1 bis 5 (≥ 10.000 EW)  
102,3 Mio. kWh/a  
→ relevant für EU-KARL

GK 4.1 10.001-50.000 EW  
GK 4.2 50.0001-100.000 EW  
Quelle: Daten Leistungsnachweis 2023

Bearbeitung basierend auf: Baumann, P., Maurer, P., Roth, M. (2024): „Erhöhung der Energieeffizienz auf Kläranlagen“, DWA-Landesverband Baden-Württemberg (Hrsg.), ISBN 978-3-96862-705-2

6

## Potenziale der Abwasserwärmenutzung



<https://www.abwasserwaerme-bw.de/>

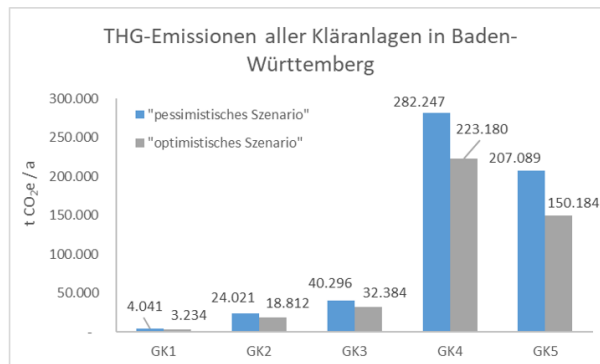
gefördert durch das Baden-Württemberg

7

## Theoretische THG-Emissionen aus Kläranlagen in Baden-Württemberg

Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg → Klimaneutralität bis 2040  
Klima-Maßnahmen-Register → Aufnahme „Reduzierung direkter Treibhausgasemissionen von Kläranlagen“ im Juni 2024

- Leistungsnachweis 2023 und Formeln des Klick-Tools der Umwelttechnik BW
- Keine Emissionen aus Lieferkette und Entsorgung enthalten
- Strommix 420 g CO<sub>2</sub>e/kWh
- 2 Faultürme/ Kläranlage



Gesamte theoretische THG-Emissionen der Kläranlagen in Baden-Württemberg

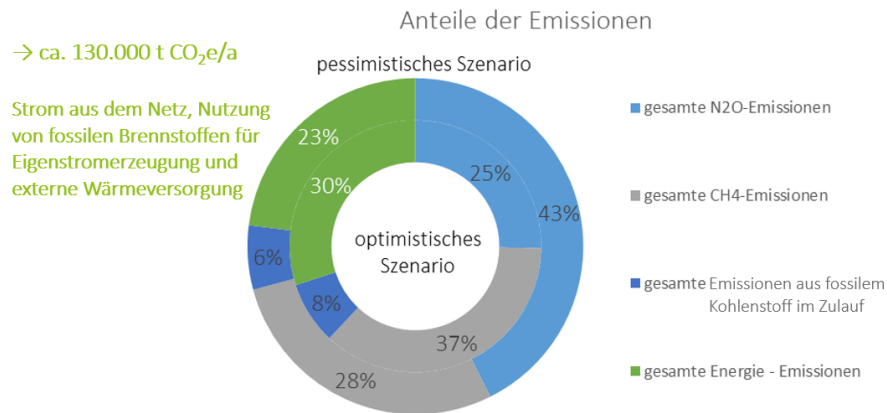
Pessimistisches Szenario:  
557.694 t CO<sub>2</sub>e/a

Optimistisches Szenario:  
427.794 t CO<sub>2</sub>e/a

Basis: Leistungsnachweis 2023 und Formeln des Klick-Tool der Umwelttechnik BW (<https://codeberg.org/slowtec/klick/wiki>)

8

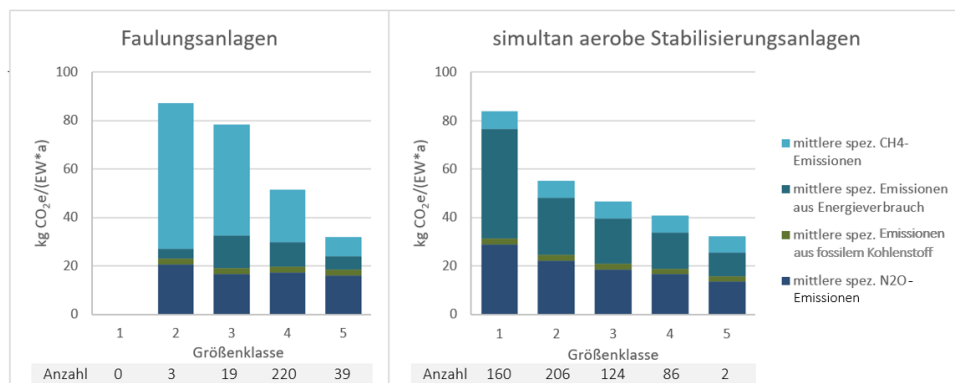
## Theoretische THG-Emissionen aus Kläranlagen in Baden-Württemberg



Basis: Leistungsnachweis 2023 und Formeln des Klick-Tool der Umwelttechnik BW (<https://codeberg.org/slowtec/klick/wiki>)

9

## Modellierung der theoretischen THG-Emissionen



Basis: Leistungsnachweis 2023 und Formeln des Klick-Tool der Umwelttechnik BW (<https://codeberg.org/slowtec/klick/wiki>)

10

## Modellierung der theoretischen THG-Emissionen

- Vergleich mit spez. Werten des UBA -



		Mittelwert optimistisches Szenario in kg CO <sub>2</sub> e/(EW*a)	Mittelwert pessimistisches Szenario in kg CO <sub>2</sub> e/(EW*a)	Ansätze UBA in kg CO <sub>2</sub> e/(EW*a)	
CH <sub>4</sub>	Alle Anlagen	11,9		7,3 14	2023 2024
	Faulungsanlagen	21,8			
	Simultan aerob stabilisierende Anlagen	7,2			
N <sub>2</sub> O	Alle Anlagen	9,6	20,7	9,6	
	Faulungsanlagen	10,3	17,2		
	Simultan aerob stabilisierende Anlagen	8,0	22,5		

Quelle: UBA (2024): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2024, National Inventory Document for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2022  
 Basis: Leistungsachweis 2023 und Formeln des Klick-Tool der Umwelttechnik BW (<https://codeberg.org/slowtec/klick/wiki>)

## 2 Literatur

Baumann, P., Maurer, P., Roth, M. (2024): „Erhöhung der Energieeffizienz auf Kläranlagen“ (Neuaufgabe des Leitfadens „Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen“), DWA-Landesverband Baden-Württemberg (Hrsg.), ISBN 978-3-96862-705-2

Europäische Union (2024): „Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung)“ vom 16. Oktober 2024. Amtsblatt der Europäischen Union, Veröffentlichung ausstehend.

Kohlgrüber, V. (2024): „Spurenstoffelimination und EU-Kommunalabwasserrichtlinie - Stand der Umsetzung in Baden-Württemberg.“ Aufbaukurs für Gewässerschutzbeauftragte am 06.11.2024 in Esslingen

Münch, K., Blömer, S., Lütkes, L., Pehnt, M., Schoor, B., Schmidt, C., Schuler, W. (2022): Bericht Abwasserwärmenutzung aus dem Auslauf von Kläranlagen. Lokalisierung von Standorten in Baden-Württemberg. DWA-Landesverband Baden-Württemberg (Hrsg.). <https://www.abwasserwaerme-bw.de/publikationen/>

UBA (2024): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2024. National Inventory Document for the Germany Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2022.

Weideler, A., Herb J., Baur, C., Nilges, A. (2024): „50. Leistungsnachweis der kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg. DWA-Leistungsnachweis 2023.“ In: Kläranlagen- und Kanal-Nachbarschaften in Baden-Württemberg 2024., DWA-Landesverband Baden-Württemberg (Hrsg.), ISBN: 978-3-96862-728-1, 2024



**Anschrift der Verfasser:**

**Dipl.-Ing. Kathrin Münch**

DWA-Landesverband  
Baden-Württemberg  
Rennstraße 8  
D-70499 Stuttgart

Tel.: +49 711 896 631 - 160

Fax: +49 711 896 631 - 111

E-Mail: [kathrin.muench@dwa-bw.de](mailto:kathrin.muench@dwa-bw.de)

## **Erweiterte Klassifizierung kommunaler Kläranlagen "Abwassercluster"**

---

**Jutta Niederste-Hollenberg  
Thomas Hillenbrand**

**Fraunhofer-Institut für System- und  
Innovationsforschung ISI, Karlsruhe**

**Stephan Fuchs  
Mohammad Azari  
Fritzi Ziebell**

**Institut für Wasser und Umwelt  
am KIT, Karlsruhe**

**Yannick Taudien  
Gerd Kolisch**

**Wupperverbandsgesellschaft für  
integrale Wasserwirtschaft mbH WIW,  
Wuppertal**

### **1 Einleitung**

Das Abwasser von mehr als 96% der deutschen Bevölkerung wird in ca. 9.300 kommunalen Kläranlagen gereinigt. Die Abwasserverordnung (AbwV) regelt das Einleiten von Abwasser in Gewässer in Abhängigkeit von der Abwasserart. Im Anhang 1 der AbwV sind die Anforderungen an häusliche und kommunale Abwässer geregelt. Unter der Annahme, dass die einwohnerspezifische Fracht an leicht abbaubaren organischen Stoffen  $60 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$  beträgt, ergeben sich daraus die Größenklassen (GK 1-5) von Kläranlagen. Die Konzentrationen der weiteren Abwasserinhaltsstoffe, die im Ablauf von Kläranlagen einzuhalten sind, werden entsprechend der Größenklasse festgelegt. Die AbwV bildet die wesentliche Grundlage für die technische Ausgestaltung und den Betrieb der kommunalen Kläranlagen in Deutschland.

Die Klassifizierung der Kläranlagen nach ihrer Ausbaugröße hilft die Abwasserreinigung zu standardisieren und innerhalb des vorgegebenen Rahmens

gleiche Bedingungen für den Bau und den Betrieb der technischen Anlagen zu schaffen. Für eine Reihe aktueller Fragestellungen wie beispielsweise die Erhöhung des Ressourcennutzungspotentials oder die Reduzierung der Spurenstoffemissionen ist eine rein CSB/BSB<sub>5</sub>-basierte Klassifizierung allerdings zu kurz gegriffen. Die Abwasserinfrastruktur steht vor der großen Herausforderung, neue Anforderungen zu erfüllen und sich gleichzeitig zu einem System mit hocheffizienter Energie- und Ressourcennutzung zu wandeln. Um diese Aufgaben anzugehen und zu einem gewissen Grad zu lenken, müssen Klassifizierungssysteme entwickelt werden, mit denen die Komplexität der modernen Abwasserwirtschaft abgebildet werden kann und die eine Zuordnung zu neuen Zielvorgaben erlauben.

Das Umweltbundesamt hat sich dieser Fragestellungen mit der Beauftragung des Projektes „Abwassercluster“ angenommen.

## 1.1 Zielsetzung

Das Ziel der kommunalen Abwasserreinigung ist es bisher, den Eintrag insbesondere von organischen Belastungen und Nährstoffen in Fließgewässer und Küstengewässer zu begrenzen. Die Klassifizierung des Kläranlagenbestands in Größen erfolgt basierend auf dem BSB<sub>5</sub>-Einwohner-Gleichwert (EW) gemäß Anhang 1 der Abwasserverordnung. Die Größenklassen bilden die Basis für die gesetzlich einzuhaltenden Ablaufwerte.

Diese BSB<sub>5</sub>-basierte Klassifizierung von Kläranlagen ist gut für die Kohlen- und Nährstoffentfernung aus Abwasser geeignet, ermöglicht aber nur zum Teil auf aktuelle und kommende Herausforderungen spezifisch einzugehen. Sie kann daher für wichtige Zukunftsaufgaben nur begrenzt Informationen zur Quantifizierung von Auswirkungen verschiedener Umbaupotenziale im Abwassersektor geben.

Im Projekt „Abwassercluster“ sollen ergänzende Klassifizierungsmöglichkeiten erarbeitet, analysiert und bewertet werden, die die beschriebenen Sachverhalte aufgreifen und ggf. für bestimmte Fragestellungen deutlich besser geeignet sind. Neben Fragen der Energie- und Ressourceneffizienz stehen insbesondere die Beseitigung von Mikroverunreinigungen und anderen Sekundärschadstoffen in Wasser und Luft sowie die emittierten THG-Emissionen im Vordergrund der ebenfalls zu adressierenden Herausforderungen. Außerdem kann die Einstufung der Nährstoffentfernung für die Größenklassen, insbesondere mit der sehr weit gespannten GK 4, überprüft werden und es können im Bedarfsfall angepasste oder langfristig steigende Anforderungen für bestimmte Prozessziele berücksichtigt werden.

## 2 Ansatzpunkte für die erweiterte Klassifizierung

Thematisch stehen folgende Aspekte im Fokus der Überlegungen im Projekt: In Deutschland gibt es rund 9.300 Anlagen, die bislang nur hinsichtlich der Einwohnergleichwerte klassifiziert sind. Es sind alles Solitäre, das Grundprinzip der Behandlung ist jedoch relativ ähnlich.

Interessant wäre dementsprechend, ob es Parameter gibt, die eine ergänzende Einordnung und Clusterung erlauben. Dazu sollen die unterschiedlichen, möglichen Themenbereiche und Ansatzpunkte analysiert und konzeptionelle Ideen für eine inhaltliche Ausgestaltung entwickelt werden.

Folgende Ansatzpunkte für eine erweiterte Kategorisierung können bspw. näher geprüft werden:

- **Einzugsgebiet:** ländlich/urban, gewerblich/industriell, Indirekteinleiter, Entwässerungstechnik, Fremdwasseranteil
- **Weitergehende Reinigung / Hygienisierung:** Abwasserwiederverwendung (Grundwasseranreicherung, Bewässerung, Brauchwassernutzung) | Spurenstoffe, Keime, Mikroplastik
- **Energie:** Energienetzdienlicher Betrieb (positive/negative Regelleistung) | Energieumwandlung (Energiespeicher im Sinne Power to Gas)
- **Gewässer:** Immissionsorientierte Vorgaben | Einfluss der Lage der Einleitstelle | Art des Gewässers
- **Ressourcen:** Nährstoffrückgewinnungspotenzial | Wasserwiederverwendung
- **Klimarelevante Themenbereiche:** THG-Emissionen.

Wichtige Randbedingung für eine mögliche Klassifizierung ist der konkrete Datenbedarf der unterschiedlichen Fragestellungen. Es ist zu prüfen, inwieweit dieser Bedarf durch existierende Anlagendaten gedeckt werden kann und wie ggf. eine wünschenswerte Erweiterung der Datenberichterstattung erreicht werden könnte. Dieses Vorgehen bedingt das Vorhandensein einer möglichst großen Datenbasis, durch die eine hohe Belastbarkeit der Auswertungen für die zu entwickelnden Klassifizierungsansätzen sichergestellt wird.

Mit Blick auf die Novellierung der Kommunalabwasserrichtlinie werden nachstehend mögliche Klassifizierungen hinsichtlich der Energieeffizienz und der Spurenstoffthematik etwas näher beleuchtet.

## 2.1 Klassifizierung nach Energieverbrauch

Hier stellt sich die Frage, wie eine Klassifizierungsmöglichkeit für den Energieverbrauch einer Kläranlage aussehen und wie dieser durch die Nutzung der bestehenden Messinfrastruktur dargestellt werden kann.

**Tabelle 1: Stromverbrauch nach Größenklassen in den Jahren 2011 und 2020, Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen (Quelle: DWA, 2020)**

	Anzahl		Ausbaugröße [Mio. EW] "		mittl. Belastung [Mio. EW]"		Stromverbrauch [GWh/a]"		spez. Stromverbrauch [kWh/(E*a)]"	
	2011	2020	2011	2020	2011	2020	2011	2020	2011	2020
GK 1	811	938	0,4	0,5	0,4	0,4	22,7	22,5	54,1	56,1
GK 2	1.292	1.484	3,6	4,0	3,1	3,4	128,6	145,2	41,5	42,1
GK 3	610	664	4,7	5,1	4,0	4,1	152,6	161,7	38,1	39,8
GK 4	1.415	1.538	46,1	50,6	36,0	39,5	1.229,3	1.235,1	34,1	31,3
GK 5	203	211	66,0	68,5	51,2	53,5	1.684,6	1.583,6	32,9	29,6
Gesamt	4.331	4.835	120,8	128,7	94,7	100,9	3.217,7	3.148,1	34,0	31,2

Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass durchschnittlich die Belüftung im Belebungsbecken den größten Verbrauchswert aufweist, gefolgt von Raumfiltern sowie dem Einlaufhebewerk. Direkt dahinter folgt der Verbrauchswert für die Umwälzung des Faulbehälters sowie der belüftete Sandfang.

Die EW-bezogenen Einstufungen spiegeln nicht die unterschiedlichen Randbedingungen (Ausbau, Verfahren, Reinigungsleistung, Topografie etc.) wider.

Der Anteil regenerativ erzeugter Energie wird zwar in Einzelfällen angegeben, wird aber nicht systematisch erfasst. Das könnte in einer separaten Klassifizierung münden.

## 2.2 Stoffliche Klassifizierung (Spurenstoffe und Mikroplastik)

Bezüglich der Elimination von **Spurenstoffen** aus kommunalem Abwasser bestehen derzeit keine bundesweiten rechtlichen Anforderungen. Das Thema hat aber im Rahmen der Spurenstoffstrategie des Bundes hohe Bedeutung und wird u.a. durch das neu gegründete Spurenstoffzentrum des Bundes (SZB) beim UBA vorangetrieben.

Der Stakeholder-Dialog zur Spurenstoffstrategie des Bundes empfiehlt für die weitergehende Abwasserbehandlung auf kommunalen Kläranlagen zur Reduzierung der Gewässerbelastungen mit relevanten Spurenstoffen einen bundeseinheitlichen Orientierungsrahmen (BMU/UBA, 2019). Als mögliche Kriterien hierfür wurden z. B. die Belastungssituation, die Nutzungsanforderungen und die Empfindlichkeit der Gewässer genannt.

Der Orientierungsrahmen unterstützt die Bundesländer hinsichtlich der Umsetzung weitergehender Anforderungen. Im Detail können sich dabei unterschiedliche Strategien je nach Bundesland ergeben.

Von Nafo et al. (2022) durchgeführte Stoffflussbilanzierungen für einzelne Flusseinzugsgebiete zeigen, dass für eine flächendeckende Reduzierung der Gewässerbelastung mehrere Kriterien kombiniert werden sollten. Aus Gewässersicht ist dabei die Lage der Kläranlage zu berücksichtigen. Ein sinnvolles Kriterium zur Kläranlagenklassifizierung kann daher beispielsweise die streckengewichtete Fracht sein, bei der neben der reinen Emissionsminderung auch deren Strahlwirkung (entlastete Fließstrecke) berücksichtigt wird (Nafo et al., 2022).

Aus den Arbeiten des KIT-IWU zur Priorisierung von Spurenstoffen im Rahmen eines deutschlandweit harmonisierten Monitorings steht den Projektpartnern eine umfassende Datenbasis zur Spurenstoffsituation deutscher Kläranlagen zur Verfügung, die im Sinne einer möglichen und sinnvollen Klassifizierung analysiert wird.

Mit Blick auf **Mikroplastik** erscheint eine reine Regulierung der Emissionen aus kommunalen Kläranlagen nach derzeitigem Wissensstand wirtschaftlich nicht sinnvoll, insbesondere da auch andere Eintragspfade (Misch- und Niederschlagswasser) eine große Rolle spielen können. Die synergetische Elimination von Mikroplastik kann jedoch ein wichtiges Argument für den Einsatz einer weitergehenden Abwasserreinigung sein (BMBF-REPLAWA, 2022).

Für die Kategorisierung kommunaler Kläranlagen ist in diesem Zusammenhang insbesondere der Eintragspfad über den Klärschlamm zu berücksichtigen. Aktuelle Messungen zeigen, dass über 80% des abgeschiedenen Mikroplastiks im Klärschlamm verbleibt (vgl. Tabelle 2; BMBF-REPLAWA, 2022). Bei einer stofflichen Verwertung des Klärschlammes in der Landwirtschaft oder im Landbau wird das Mikroplastik (sowie organische Spurenstoffe) in Böden und Gewässer eingetragen. Der Verwertungsweg der Klärschlämme wäre daher bei der Klassifizierung mit Blick auf Mikroplastik zwingend einzubeziehen. Die novellierte Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 2017) sieht zwar mittelfristig eine thermische Klärschlammverwertung für alle Anlagen ab 50.000 EW vor, trotzdem verbleibt langfristig für alle kleineren Kläranlagen die Möglichkeit der landwirtschaftlichen Verwertung. Es wäre also bspw. zu überlegen, ob abhängig von der Klärschlammverwertung unterschiedliche Anforderungen an den Umgang mit Mikroplastik zu entwickeln sind.

### 3 Ausblick

Das Projekt „Abwassercluster“ ist ein laufendes Projekt des Umweltbundesamtes, das voraussichtlich Ende nächsten Jahres abgeschlossen wird. Es soll helfen, die neuen Herausforderungen, denen die Abwasserwirtschaft sich stellen muss, auch in der Klassifizierung zu adressieren und insbesondere auch die neuen regulativen

Anforderungen in nationale Normen zu übersetzen. Eine neue Klassifizierung von Kläranlagen mit den möglichen Konsequenzen bspw. hinsichtlich rechtlicher Vorgaben wäre ein weitreichender Eingriff in die langjährige Praxis. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse möglichst breit abgesichert werden. Im Projekt sollen die Ergebnisse daher mit relevanten Stakeholdern diskutiert werden.

**Tabelle 2: Mikroplastikdetektion in Stoffströmen der Schlammbehandlung für eine Kläranlage GK 5 (BMBF-REPLAWA, 2022)**

Schlammart	MP	Einheit	Bemerkung
eingedickter Primärschlamm	8,17	mg/g TM	Mittelwert aus 3 Probenahmetagen
eingedickter ÜSS	8,00	mg/g TM	Mittelwert aus 3 Probenahmetagen
Faulschlamm	9,63	mg/g TM	Mittelwert aus 2 Probenahmetagen
entwässerter Faulschlamm	10,71	mg/g TM	Mittelwert aus 3 Probenahmetagen
Zentrat Überschussschlammeindikung	4,85	mg/g TM	Mittelwert aus 2 Probenahmetagen
Zentrat Überschussschlammeindikung	7,79	mg/l	Mittelwert aus 3 Probenahmetagen
Zentrat Faulschlammmentwässerung	5,10	mg/g TM	Mittelwert aus 3 Probenahmetagen
Zentrat Faulschlammmentwässerung	28,77	mg/l	Mittelwert aus 3 Probenahmetagen

## 4 Literatur

BMBF-REPLAWA (2022): „Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt“, Abschlussbericht, Stand August 2022, gefördert über das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02WPL1445A ff.

BMU/UBA (Hrsg.) (2019): Ergebnispapier - Ergebnisse der Phase 2 des Stakeholder-Dialogs »Spurenstoffstrategie des Bundes« zur Umsetzung von Maßnahmen für die Reduktion von Spurenstoffeinträgen in die Gewässer. Eds.: Hillenbrand, T.; Tettenborn, F.; Bloser, M.; Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit/Dessau: Umweltbundesamt.

DWA (2020): 33. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen, Entwicklung des Stromverbrauches

Nafo, I.; lyko, S.; Kolisch, G; Taudien, Y. (2022): „Identifizierung und Priorisierung von kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffelimination in einem Flussgebiet“ in KA, Korrespondenz Abwasser, Abfall 2022 (69) Nr. 6

**Anschrift der Verfasser:**

**Dr.-Ing. Jutta Niederste-Hollenberg**

Fraunhofer-Institut für System- und  
Innovationsforschung  
Breslauer Str. 48  
D-76139 Karlsruhe

Tel. +49 721 6809 - 115  
E-Mail: [jnh@isi.fraunhofer.de](mailto:jnh@isi.fraunhofer.de)

**Dr.-Ing. Thomas Hillenbrand**

Fraunhofer-Institut für System- und  
Innovationsforschung  
Breslauer Str. 48  
D-76139 Karlsruhe

Tel. +49 721 6809 - 119  
E-Mail: [hi@isi.fraunhofer.de](mailto:hi@isi.fraunhofer.de)



# **Der Beitrag der Schlamm Trocknung zur Phosphorrückgewinnung aus Asche**

---

**Dr.-Ing. Albert Heindl**

**HUBER SE**

**Technologiezentrum**

**Leiter F & E Klärschlammbehandlung**

**Berching**

## **1 Einleitung**

Die Klärschlamm Trocknung stellt einen wichtigen Prozessschritt in der Phosphorrückgewinnung aus Asche dar. Je nachdem, ob der Klärschlamm teilgetrocknet oder vollgetrocknet wird, kann die Trocknungsanlage direkt einer Wirbelschichtverbrennung vorgeschaltet oder der vollgetrocknete Schlamm als zusätzlicher Regelbrennstoff verwendet werden. Die Rückgewinnung des Phosphors aus Asche kann durch Suspension in verdünnter Säure und Sprühgranulation erfolgen. Es werden eine Übersicht über mögliche Trocknungsverfahren für Klärschlamm gegeben und die Eigenschaften der getrockneten Produkte erläutert. Final wird eine Darstellung einer regionalen P-Rückgewinnung unter Integration aller Kläranlagengrößen präsentiert.

## **2 Trocknungsverfahren für Klärschlamm**

Klärschlamm wird je nach Durchsatzleistung und notwendigem Trockenrückstand mit konvektiven Trocknungsverfahren oder mittels Kontakt Trocknung getrocknet. Die Auswahl des Trocknungsverfahrens richtet sich nach dem Einsatzfall des

Trockenschlammes, dem notwendigen Trockenrückstand sowie nach dem örtlichen Angebot an Grundfläche und Abwärme.

## 2.1 Teiltrocknung von Klärschlamm mittels Kontakt Trocknung

Eine Teiltrocknung erfolgt in der Regel in Kombination mit einer nachgeschalteten Wirbelschichtverbrennung, wobei die Abwärme der Verbrennung für die Beheizung des Kontakt Trockners verwendet wird. Ab einem TR-Gehalt von 38-45% des teiltrockneten Schlammes kann eine Wirbelschichtverbrennung selbstgänglich betrieben werden. Das Abwärmemeterniveau liegt üblicherweise zwischen 120 und 220°C, es kommen Abdampf oder Thermoöl zur Anwendung. Eine Energieauskoppelung z.B. zur Schlammvorwärmung oder Nahwärmeversorgung kann aus dem Kondensator der Brüdenbehandlung erfolgen. Eingesetzt werden beispielhaft Scheibentrockner, Dünnschichttrockner und Paddeltrockner. Abbildung 1 zeigt ein Paar Scheibentrockner, welche einer Wirbelschichtverbrennung vorgeschaltet sind.



**Abbildung 1: Scheibentrockner zur Teiltrocknung von 130.000 t entwässertem Klärschlamm pro Jahr vor einer Wirbelschichtverbrennung mit einer Nahwärmeauskoppelung von rund 5.000 kW bei 85-90°C (HUBER 2022)**

## 2.2 Volltrocknung von Klärschlamm mittels Bandtrocknung

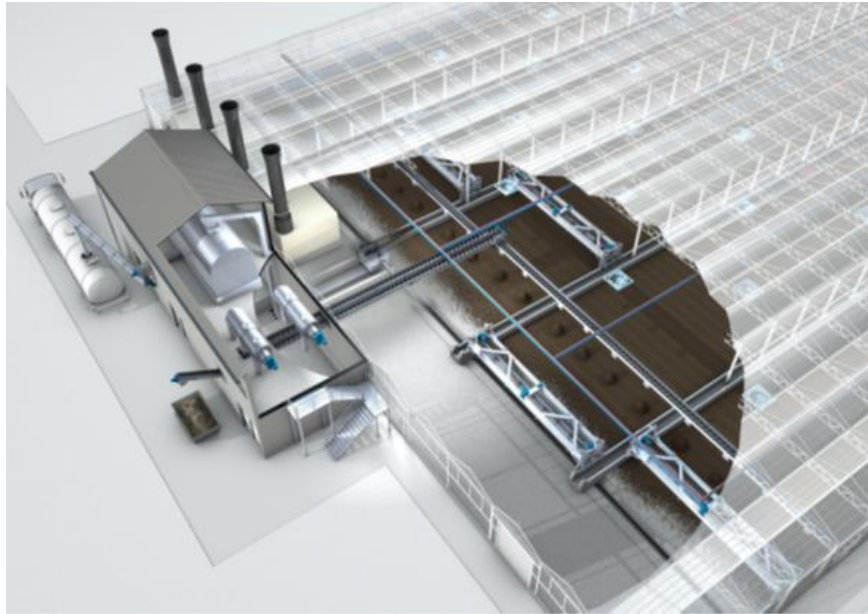
Mittels Bandtrocknung wird üblicherweise ein vollgetrocknetes Klärschlammgranulat mit einem TR-Gehalt von über 90% und einem hohen Heizwert von bis über 10 MJ/kg getrocknetem Schlamm erzeugt. Abwärmequellen im Temperaturbereich von 70 bis 150°C können genutzt werden, was für eine hohe Flexibilität in der Abwärmenutzung sorgt (Heindl 2024a). Auch kann eine Energieauskoppelung zur Nahwärmeversorgung realisiert werden. Abbildung 2 illustriert einen Bandtrockner auf einer kommunalen Kläranlage.



**Abbildung 2: Bandrockner auf einer kommunalen Kläranlage zur Trocknung von rund 21.000 t entwässertem Klärschlamm pro Jahr und einer Nahwärmeauskoppelung von rund 400 kW bei 65-70°C (HUBER 2019)**

### **2.3 Voll- und Teiltrocknung von Klärschlamm mittels thermosolarer Trocknung**

Rein solare Trocknung kann abhängig von der Jahreszeit und der solaren Energieeinstrahlung einen TR von 50 bis 92% für den Trockenschlamm erzielen. Im Fall einer Abwärme-unterstützten thermo-solaren Trocknung (über Warmluft oder Bodenheizung) kann dieser Bereich auf rund 75 bis 92% eingengt werden. Das Temperaturniveau der Abwärme beträgt in der Regel für die Warmlufterzeuger bis 90°C, für die Kontaktwärmeübertragung bis 60°C. Vollgetrockneter Klärschlamm aus solaren Trocknungsanlagen kann einen vergleichsweise hohen Staubanteil enthalten, der den Einsatz in Verbrennungsanlagen erschwert. Hier kann durch eine Pelletierung im TR-Bereich von 60 bis 95% die Anwendungseignung verbessert werden. Abbildung 3 zeigt eine thermo-solare Trocknung mit Abwärmeunterstützung über Warmlufterzeuger, welche die Abwärme von einer nahegelegenen Biogasanlage erhalten.



**Abbildung 3: Thermo-solare Trocknung von rund 9.000 t entwässertem Klärschlamm mit Abwärmeunterstützung durch Warmlufterzeuger von rund 600-700 kW (HUBER 2013)**

## **2.4 Übersicht über Eigenschaften der Trockenprodukte**

Je nach Anwendungsfall des Trockengutes im Bereich der P-Rückgewinnung wird eine bestimmte Eigenschaft des Trockengutes in Hinblick auf TR-Gehalt und Korngröße verlangt. So wird für eine pneumatische Förderung von Granulat ein TR-Gehalt von  $> 90\%$  und oftmals eine Korngröße  $< 4-10$  mm gefordert. Auch kann der Staubgehalt begrenzt werden. Eine hohe Schüttdichte des Trockengranulats begünstigt die Ausnutzung des Ladevolumens von Silo-Lkws. Durch Einsatz von Pelletieranlagen oder staubarmen Brechern kann die Korngrößenverteilung und die Schüttdichte beeinflusst werden. Tabelle 1 bringt eine Übersicht über die Eigenschaften von voll- und teilgetrocknetem Klärschlammgranulat. Voll- und teilgetrocknete Schlämme können mit entwässerten Schlämmen zur TR-Einstellung gemischt werden, vollgetrocknete Schlämme können bei der Wirbelschichtverbrennung als Regelbrennstoff verwendet werden.

**Tabelle 1: Eigenschaften (Richtwerte) von voll- und teilgetrocknetem Klärschlammgranulat (Heindl 2024b)**

Trocknungsverfahren	Scheibentrocknung	Bandrocknung mit Extrusion	Bandrocknung mit Rückmischung	Solar-trocknung
TR in % (Teiltrocknung TT, Volltrocknung VT)	TT: 38-45  VT mit Rückmischung: > 90%	VT: > 90	VT: >90	60-90
Schüttdichte in kg/m <sup>3</sup>	TT: ~1.000-1.100  VT: ~600	VT: ~350-500	VT: ~500-650	~700-900
Korngröße in mm	VT: 0,1-6, i.M. 1	VT: 2-7, i.M. 5, max. 20	VT: 0,5-8, i.M. 2	1-10, max-20
Staubanteil in Massen-% Trocknerausgang (<0,5 mm)	VT: 10-40	<3%	In der Regel wird Feingut unter 1 mm abgesiebt und zur Mischung mit entwässertem Klärschlamm rückgeführt.	Bei TR>75% bis 25%

### 3 Trocknung und P-Rückgewinnung – Szenarien

Bei der Bildung von regionalen Organisationen zur Klärschlammverwertung bis hin zur Phosphorrückgewinnung ist zu berücksichtigen, dass Mischschlammkontingente immer unter die P-Rückgewinnungspflicht fallen, auch wenn Kläranlagen unterhalb der Größenklasse 4b sich beteiligen, welche eigentlich gemäß der AbfallKlär von 2017 ausgenommen wären. Die Betreiber der Verbrennungsanlagen übernehmen dabei die P-Rückgewinnungspflicht. In Abbildung 4 wird ein derartiges Szenario unter Einbindung aller Größenklassen von Kläranlagen dargestellt.





Abbildung 4: Szenario zur P-rückgewinnung unter Einbindung von Verbrennung, Trocknung und Entwässerung von Klärschlamm (HUBER 2017)

## 4 Zusammenfassung

Die Klärschlamm-trocknung ist ein wichtiger Baustein für die P-Rückgewinnung aus Klärschlamm-asche. Für eine selbstgängige Wirbelschichtverbrennung muss der TR des teilgetrockneten oder gemischten Klärschlamm-im Bereich von 38 bis 45% liegen. Die Einbeziehung von Kläranlagen aller Größenklassen in die P-Rückgewinnung kann durch eine regionale Organisation über Entwässerung, Trocknung und Verbrennung erfolgen. In flexibel aufgebauten Verbrennungsanlagen können sowohl entwässerter Klärschlamm, als auch voll- und aufbereitete teilgetrocknete Klärschlamm-e mit einer entsprechend angepassten Anlieferlogistik verarbeitet werden. Die P-Rückgewinnung aus Asche erzielt den höchsten Wirkungsgrad mit über 80%. Allerdings ist es noch ein weiter Weg, bis das Zusammenspiel von Klärschlamm-verbrennung sowie Aschelagerung und -verarbeitung zum Zwecke der P-Rückgewinnung in Deutschland vollumfänglich umgesetzt werden kann. Nicht nur der Bau und der wirtschaftliche Betrieb von P-Rückgewinnungszentren muss gelöst werden, sondern auch die Verfügbarkeit von Deponieraum für Asche und die anfallenden Abbaukosten müssen berücksichtigt werden.

## **5 Literatur**

**Vortrag anlässlich der 35.Karlsruher Flockungstage, 18.-19. November 2024**

HUBER (2013) (2017) (2019) (2023) Bildmaterial der HUBER SE Berching

Heindl A (2024a) Belt Drying of Sludge. Springer Verlag

Heindl A (2024b) Schulung „Trocknung von Klärschlamm“ VDI-Spezialtag anlässlich der VDI-Klärschlammkonferenz in Wolfsburg 10.09.2024

### **Anschrift des Verfassers:**

**Dr.-Ing. Albert Heindl**

HUBER SE

Technologiezentrum

Leiter F & E Klärschlammbehandlung

Industriepark Erasbach A1

D-92334 Berching

Tel. +49 8462 201 - 281

Fax: +49 8462 201 - 88281

E-Mail: [albert.heindl@huber.de](mailto:albert.heindl@huber.de)





## **ePhos® – Elektrochemisches Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor am Beispiel RoKKa**

---

**Michael Bohn**

**Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und  
Bioverfahrenstechnik IGB  
Stuttgart**

### **1. Einleitung**

Mit dem weltweit steigenden Bedarf an Lebensmitteln wächst die Nachfrage für phosphorhaltige Düngemittel. Zur Rückgewinnung von Ammonium und Phosphat aus Abwasser hat das Fraunhofer IGB einen neuartigen Prozess entwickelt und patentieren lassen.

Mit ePhos® werden die Stoffe in einem elektrochemischen Prozess als pflanzenverfügbares Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP, Struvit) ausgefällt. Struvit ist ein hochwertiger Langzeitdünger und kann in der Landwirtschaft direkt als Düngemittel eingesetzt werden.

Um Phosphor (P) und Stickstoff (N) aus einer Flüssigphase (Prozess- oder Abwasser) zurückzugewinnen, bietet sich die Kristallisation als Struvit (Magnesium-Ammonium-Phosphat-Hexahydrat:  $\text{Mg}(\text{NH}_4)[\text{PO}_4] \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) an. Bei der herkömmlichen Fällung von Struvit muss Magnesium als limitierender Reaktant in Form einer Lösung von  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  oder  $\text{MgO}$  zudosiert werden. Zudem muss, z. B. mit Natronlauge, der pH-Wert angehoben werden. Beim ePhos®-Verfahren erfolgt die Phosphatfällung elektrochemisch.

## 2. ePhos

### 2.1 Verfahrensprinzip

Abbildung 1 zeigt eine Prinzipskizze des ePhos- Verfahrens. Die elektrochemische Phosphorfällung findet in einer Elektrolysezelle statt, die aus einer inerten Kathode und einer Opferanode aus Magnesium besteht. Durch die kathodische Reduktion werden Wassermoleküle gespalten, wobei Wasserstoff ( $H_2$ ) und  $OH^-$ -Ionen gebildet werden.

Die  $OH^-$ -Ionen erhöhen den pH-Wert des Abwassers, der bei pH 9 konstant bleibt. Hierdurch entfällt beim ePhos®-Verfahren die Einstellung des pH-Wertes durch Dosierung von Laugen für den Fällungsprozess. An der Anode findet eine Oxidation statt: Magnesiumionen gehen in Lösung und reagieren mit dem im Wasser enthaltenen Phosphor und Stickstoff zu Struvit.

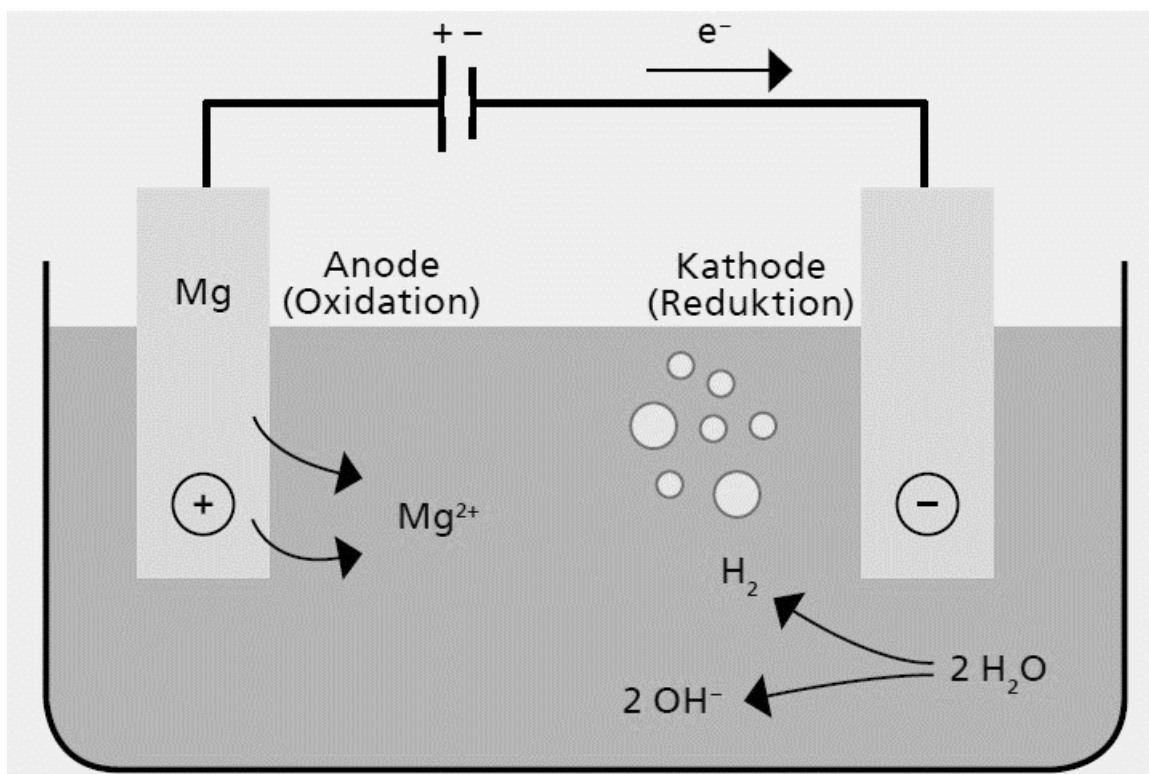


Abbildung 1: Prinzipskizze ePhos

Wesentlicher Vorteil der Technologie ist der vollständige Verzicht auf die Zugabe flüssiger Chemikalien. Das zur Struvitbildung benötigte Magnesium wird mittels einer Opferanode in einer Elektrolysezelle zudosiert.

Der Energiebedarf für das Verfahren ist vergleichsweise gering. Er ist umso geringer, je höher die Konzentration an Ionen im Abwasser ist. Bei Pilotversuchen lag die erforderliche Energie im Bereich von 0,78 Kilowattstunden pro Kubikmeter Abwasser.

### 3. RoKKa

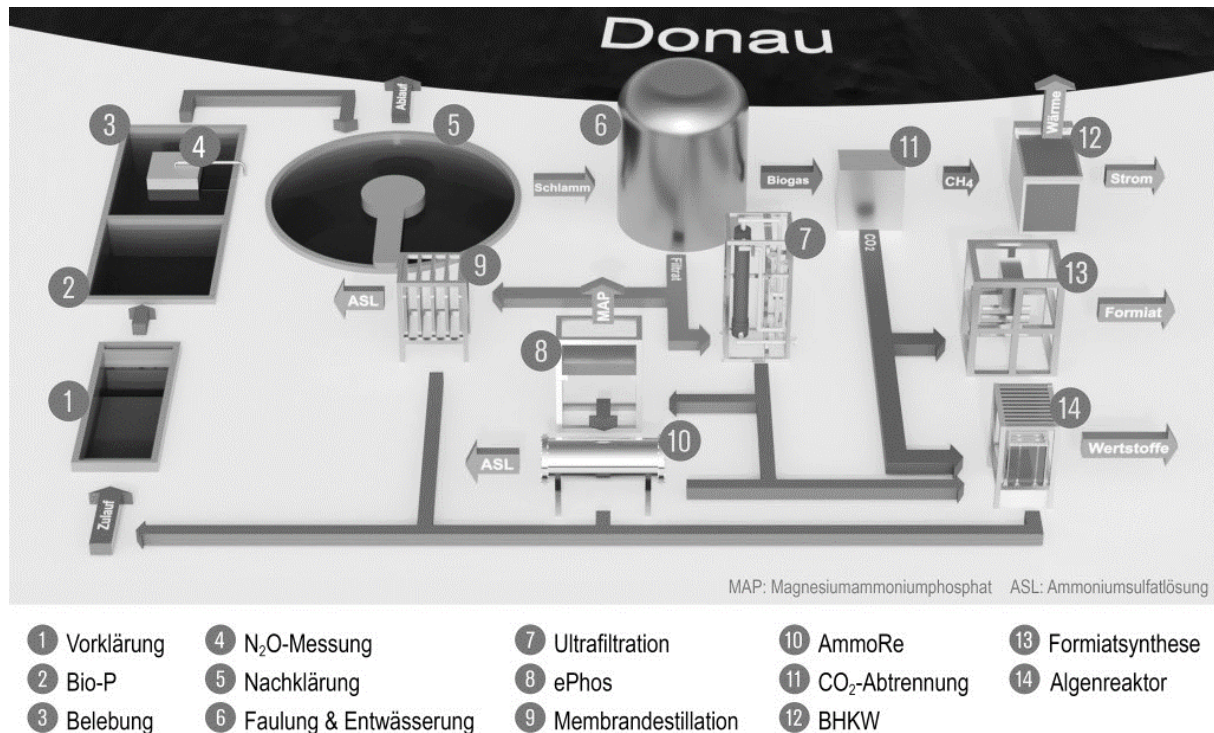
#### 3.1 Hintergrund

Die Klärschlammfaulung ist ein etabliertes Verfahren, um Energie in Form von Biogas aus dem Wasser zu nutzen. Das Filtrat aus der Entwässerung des Faulschlammes muss in der Kläranlage mitbehandelt werden, weil es hohe Phosphor- und Stickstoffkonzentrationen enthält. Allerdings erhöhen Nährstoffrückbelastungen aus der Faulung durch Frachtstöße den Energieverbrauch in der Belüftung, führen zu höheren Lachgasemissionen und schlimmstenfalls zu erhöhten Ablaufkonzentrationen von Ammoniumstickstoff in der Kläranlage. Die Nährstoffe des Filtrats können zurückgewonnen werden, um Ressourcen zu schonen und Stoßbelastungen vermeiden. Vor allem der Lachgasausstoß. Dieser ist mit einem rund 300-fach stärkeren Treibhausgaspotenzial als CO<sub>2</sub> in der Klimabilanz einer Kläranlage kritisch zu bewerten. (Umwelttechnik BW, 2024)

#### 3.2 Projektinhalt

Projekt RoKKa (Rohstoffquelle Klärschlamm und Klimaschutz auf Kläranlagen) untersucht auf der Kläranlage der Stadt Erbach Möglichkeiten zur Behandlung des Filtrats aus der Klärschlammfaulung. Die Wissenschaftler:innen erproben Verfahren, um Phosphor- und Stickstoffverbindungen für Düngemittel zu gewinnen. Daneben werden mit Mikroalgen Pflanzenstärkungsmittel und Bodenverbesserer für die Landwirtschaft erzeugt. Selbst das CO<sub>2</sub>, das bei der Herstellung von Biogas anfällt, wird abgetrennt und wieder zu einem Rohstoff für die chemische Industrie verarbeitet.

Abbildung 2 zeigt ein vereinfachtes Schema der Kläranlage Erbach, sowie die implementierten Pilotmodule. Das ePhos-Verfahren (8) des Fraunhofer IGB widmet sich der Phosphorrückgewinnung. Mithilfe einer Opferanode aus Magnesium wird der Phosphor elektrochemisch als Struvit gefällt. Danach trennen zwei Pilotanlagen den Ammonium-Stickstoff (9, 10) aus dem Schlammwasser ab. Die Nährstoffe, die nach den Verfahren im Wasser verbleiben, erhalten Mikroalgen (14) als Nahrung. Die Algen benötigen zur Photosynthese neben Licht auch CO<sub>2</sub>. Dazu wird das CO<sub>2</sub>, das bei der Biogasfaulung entsteht, mithilfe einer Aminosäurelösung abgetrennt und über eine Elektrodialyse-Vorrichtung (11) zurückgewonnen. Den Überschuss an CO<sub>2</sub>, den die Mikroalgen nicht benötigen, wandelt eine Elektrosynthesanlage (13) in Formiat um. (Umwelttechnik BW, 2024)



**Abbildung 2: 3D Visualisierung des Verfahrens (Umwelttechnik BW)**

### 3.3 Projektziele

Mit dem Projekt soll demonstriert werden, dass es möglich ist, eine Kläranlage zur Bioraffinerie auszubauen. Neben dem Ziel der Abwasserbehandlung werden Rohstoffe aus dem Abwasser gewonnen. Durch die Vermeidung von Nährstoffrückbelastungen werden klimarelevante Emissionen reduziert und so ein Beitrag zur Klimaneutralität geleistet. Ziel ist, die Projekt-Ergebnisse großtechnisch auf Kläranlagen umzusetzen. Eine großtechnische Umsetzung unterstützt die Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie. Das Recycling von Phosphor und Stickstoff senkt den Einsatz fossiler Rohstoffe. Die Rohstoffrückgewinnung führt durch die Vermeidung von Frachtstößen ebenfalls zu einer Minderung der Treibhausgas-Emissionen. Die geplante Verknüpfung innovativer Verfahren kann zu einer intensiveren Kreislaufwirtschaft und mehr Klimaschutz beitragen. Neben der Ressourceneffizienzstrategie unterstützt das Vorhaben auch die Nachhaltigkeits- und Innovationsstrategie sowie die Klimaschutzziele Baden-Württembergs. (Umwelttechnik BW, 2024)

Abschlussbericht: <https://www.umwelttechnik-bw.de/de/biooekonomie-abwasser>

## 4. Pilotanlage ePhos

### 4.1 Aufstellung

Den beiden Pilotanlagen zur Nährstoffrückgewinnung des Fraunhofer IGB wurden eine Ultrafiltration vorgeschaltet. Sie diente vor allem als Barriere gegen suspendierte Partikel, um die Membranen der Stickstoffrückgewinnung zu schützen.

Die aufgestellte Pilotanlage auf der Sammelkläranlage in Erbach wurde auf eine Behandlung von ca. 600 L/h ausgelegt. Das entspricht in etwa der Hälfte des Vollstroms an Filtratwasser, welcher auf der Kläranlage anfällt. Mit der anderen Hälfte wurde das Stickstoff- Rückgewinnungsmodul des Projektpartners Solar Spring versorgt.

Schon in vorangegangenen Pilotierungen wurde mit ePhos in diesem Maßstab Struvit gefällt. Auch diesmal konnte mit ePhos Struvit aus dem Abwasser gewonnen werden. Bei der ePhos- Pilotierung in Erbach wurde zum ersten Mal ein neues Abscheideverfahren mit Erfolg getestet. Um die ausgefällten P- Salze aus der Flüssigkeit zu gewinnen, kam erstmals ein Bandfilter zum Einsatz.

### 4.2 Ergebnisse

#### 4.2.1 Effizienz

Aus der Erfahrung heraus wurden stabile Fällereffizienzen zwischen 80 und 90% erwartet. Vereinzelt konnten Fällereffizienzen zwischen 70 und 80% erreicht werden. Für eine dauerhaft effiziente Phosphorrückgewinnung erwiesen sich die Phosphorkonzentrationen im Abwasser jedoch als zu gering. Grund dafür ist auch, dass beim Versuch ein Bio-P- Verfahren an der Kläranlage Erbach zu etablieren, die erwartungsgemäß hohen Phosphorkonzentrationen im Filtratwasser nicht erreicht wurden. Darüber hinaus kam es zu einem Zurückhalten von Phosphor durch die vorgeschaltete Ultrafiltration.

Abbildung 3 zeigt die  $\text{PO}_4\text{-P}$ - Konzentrationen, die der ePhos- Pilotanlage zu- und abgingen. Sie zeigt auch, welche Fällereffizienz sich daraus errechnet. Vor allem die Werte in Phase 1 machen deutlich, dass geringe Zugangskonzentrationen die Fällereffizienz mindern. In dieser Phase lag die Fällereffizienz bei durchschnittlich 31%. Aus diesem Grund wurde entschieden, mit einer synthetisch angesetzten Lösung die Phosphorkonzentration im Zulauf der Anlage zu erhöhen. Gleichzeitig wurde die Verweilzeit erhöht. Dies macht sich in Phase 2 bemerkbar. Die Fällereffizienz steigt im Durchschnitt auf 40%. In Phase 3 wurde der Durchsatz erneut reduziert, um die Retentionszeit für die Kristallisation im System zu erhöhen. Die durchschnittliche Fällereffizienz stieg in dieser Phase auf 60%. In Phase 4 wurde die Verweilzeit nochmals erhöht, um die ursprünglich angestrebte Eingangskonzentration von 30 mg/L zu

behandeln. Mit 58% konnte eine ähnlich hohe Fäll-effizienz erzielt werden, wie in Phase 3.

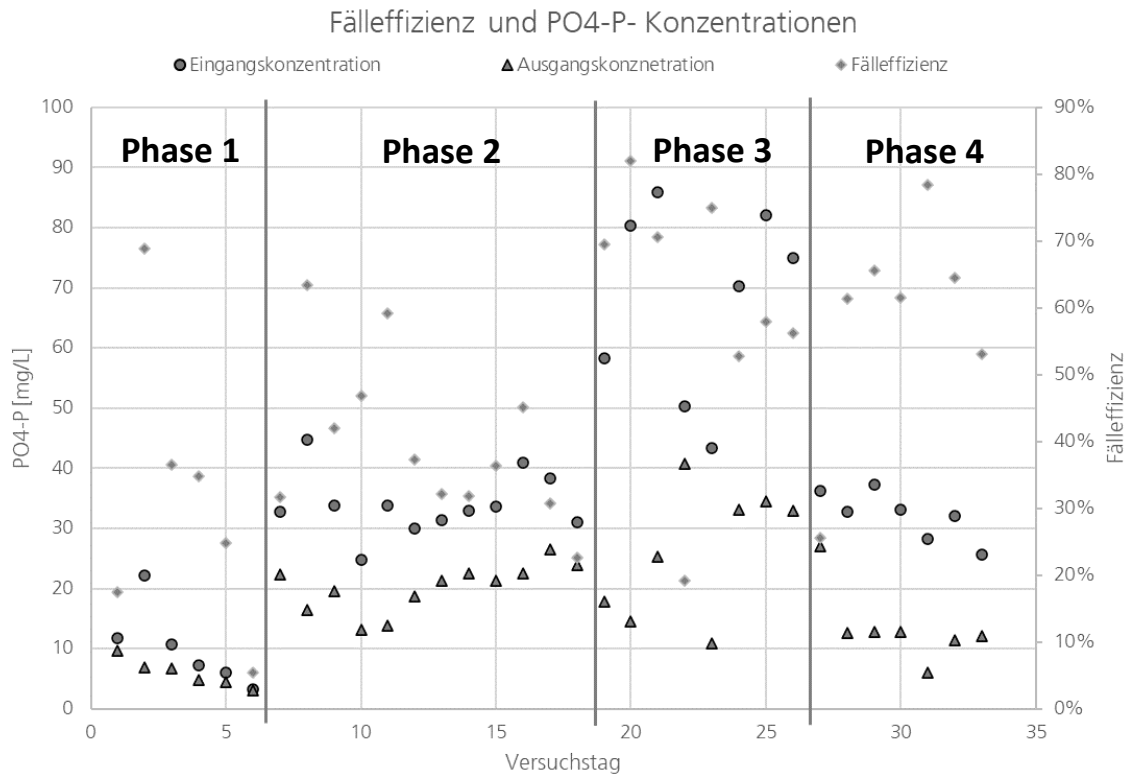


Abbildung 3: Fäll-effizienz und PO<sub>4</sub>-P Konzentration ePhos

#### 4.2.2 Produkt

Abbildung 4 zeigt eine Probe aus der ePhos- Pilotanlage, die mit dem Bandfilter abgeschieden wurde. Erste Analysen lassen darauf schließen, dass es sich um eine P- Salzmischung handelt, wobei der Anteil an Calcium dominiert. Reines MAP weist ein theoretisches Stoffmengenverhältnis an Mg:N:P von 1:1:1 auf. Die Stoffmenge an Calcium in dieser Probe entspricht dem Sechsfachen ihrer Stoffmenge an Phosphor. Dieser Wert ist darauf zurückzuführen, dass das Trinkwasser am Pilotierungsstandort Erbach eine Wasserhärte von 20,8°dH aufweist. Somit ist im behandelten Filtratwasser eine hohe Calciumkonzentration zu erwarten. Es liegt nahe, dass die Anwesenheit von Calcium- Ionen das Ausfällen von Calciumphosphaten begünstigt und den Anteil an MAP in der P-Salzmischung vermindert.



Abbildung 4: Getrocknetes P- Salz

## 5. Fazit

Die ePhos- Pilotanlage konnte gut in den Betrieb der Kläranlage Erbach integriert werden. Für einen wirtschaftlichen Betrieb erwiesen sich die Phosphorkonzentrationen jedoch als zu gering. Zusätzlich erwies sich eine Ultrafiltration als Vorbehandlung für die Phosphorrückgewinnung als ungeeignet, da sie Phosphor zurückhält. Es wurden neue Erkenntnisse zum Gesamtsystem gewonnen. Hierbei sind die positiven Ergebnisse zur erstmals erprobten Kristallabscheidung mittels Bandfilter hervorzuheben. Ferner muss das Reaktionsvolumen zukünftiger Anlagen vergrößert werden, um eine ausreichend lange Verweilzeit und damit höhere Fällereffizienzen zu erreichen.

## 6. Literatur

Umwelttechnik BW (2024): Projekt- Website „RoKKa: Die Kläranlage als Rohstoffquelle und Bioraffinerie“, <https://www.umwelttechnik-bw.de/de/rokka>

**Anschrift der Verfasser:****Michael Bohn B. Sc.**

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und  
Bioverfahrenstechnik IGB

Nobelstr. 12

70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-4244

Mobil +49 172 5372 075

michael.bohn@igb.fraunhofer.de



# **SATELLITE – Verfahrenstechniken im Haupt- und Satellitenbetrieb eines interkommunalen Recyclingzentrums für ein optimiertes regionales Nährstoffrecycling**

**Torben Martens, M.Sc.  
Dr.- Ing. Maike Beier**

**Institut für  
Siedlungswasserwirtschaft und  
Abfalltechnik (ISAH)  
Leibniz Universität Hannover**

## **1 Einleitung**

Mit dem Projekt SATELLITE wird ein Konzept zur Umsetzung eines umfassenden interkommunalen Verbundes, beispielhaft für die Region des südlichen Niedersachsens, zur gemeinsamen Entsorgung von Klärschlämmen und Nährstoffrückgewinnung erarbeitet. Explizit integriert sind die relevanten regionalen Nährstoff- (Phosphor und Stickstoff) und Energiequellen (Organik, Abwärme). Das Projekt bietet somit eine Richtschnur für die Umsetzung eines nachhaltigen, regionalen Nährstoffrecyclings für stark landwirtschaftlich geprägt Regionen.

Im Fokus liegt die Untersuchung der dem eigentlichen Verbrennungs- und Rückgewinnungsprozess vor- und nachgelagerten relevanten Verfahrensschritte auf den zuliefernden Kläranlagen. Das Ziel ist dabei eine für das zentrale Recycling-Zentrum optimale Klärschlammqualität (Heizwert, P-Gehalt) zum optimalen Zeitpunkt (gleichmäßige Auslastung) mit dem geringsten Umweltimpact (Transport) bereitzustellen, bei gleichzeitig positiver Bilanz für die anliefernden regionalen Zentren, durch angepasste Verfahrensauswahl, regionale Wertstoffrückführung und Unterstützung bei der Bewirtschaftung.

Eingebettet werden diese Untersuchungen in Modelle, die Betreiber:innen von Kläranlagen, Verbrennungsanlagen und Recyclingzentren bei der Entscheidungsfindung für Investitionen und Betriebsweisen unterstützen sollen.



EW mit anaerober Stabilisierung) einem interkommunalen Recycling-Zentrum (KNRN) zugeführt werden. Dort werden die Schlämme getrocknet, in einer Monoklärschlammverbrennungsanlage thermisch verwertet und der in der Asche enthaltene Phosphor perspektivisch zu Phosphorsäure aufbereitet. Neben dem Hauptbetrieb können auch Kläranlagen, die sich nicht langfristig an das Recycling-Zentrum binden wollen, über die regionalen Zentren im Satelliten-/Nebenbetrieb den errichteten Entsorgungsweg mit P-Rezyklierungsoption nutzen, ohne dem Verbund beizutreten.

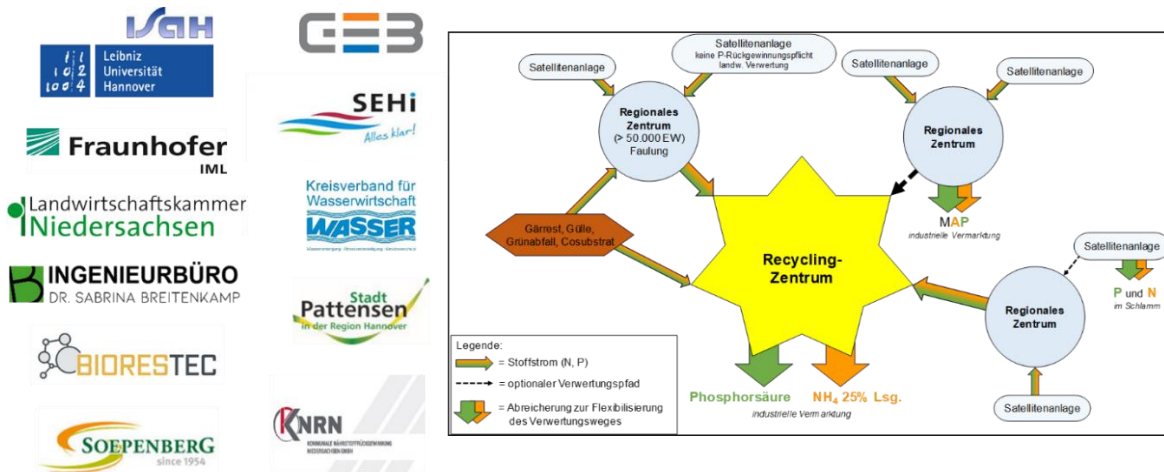


Abbildung 6: Projektpartner:innen & Schema Projektstruktur

### 3 Regionales Zentrum – Modellgestützte Entscheidungsunterstützung

Die Kläranlage Göttingen liegt im südlichsten Niedersachsen und ist Teil des KNRN-Verbunds. Sie hat eine Ausbaugröße von 205.000 EW und ist mit knapp 200.000 EW<sub>CSB</sub> belastet. Daher ist die Anlage im Projektkontext als regionales Zentrum (Faulung & EW > 50.000) klassifiziert. Die Fragestellung für diese Anlage ist die Ausgestaltung und der Betrieb einer thermischen Trocknung, die dem KNRN (Betreiber Monoklärschlammverbrennung und KS-Trocknung) vorgelagert ist.

#### 3,1 Energie- und Stoffstrommodell

Hierzu wurde die Klärschlammbehandlung der Kläranlage zunächst in einem Energie- und Stoffstrommodell abgebildet (siehe Abbildung 7) und damit im Anschluss Szenarien für die thermische Trocknung erarbeitet. Die Schlammbehandlung besteht aus Klärschlammfaulung und -entwässerung. Der Faulgasstrom aus der Faulung wird durch einen Gasstrom eines Kompostwerks (Behandlung von häuslichem Bioabfall) um ca. 25 % aufgestockt, aufbereitet und in einem Blockheizkraftwerk verbrannt ( $\eta_{el.}$ : 36 %;  $\eta_{th.}$ : 47 %). Die dabei entstehende Wärme wird zur Beheizung der

Faultürme genutzt und die überschüssige Wärme steht zukünftig zur Trocknung von Klärschlamm zur Verfügung.

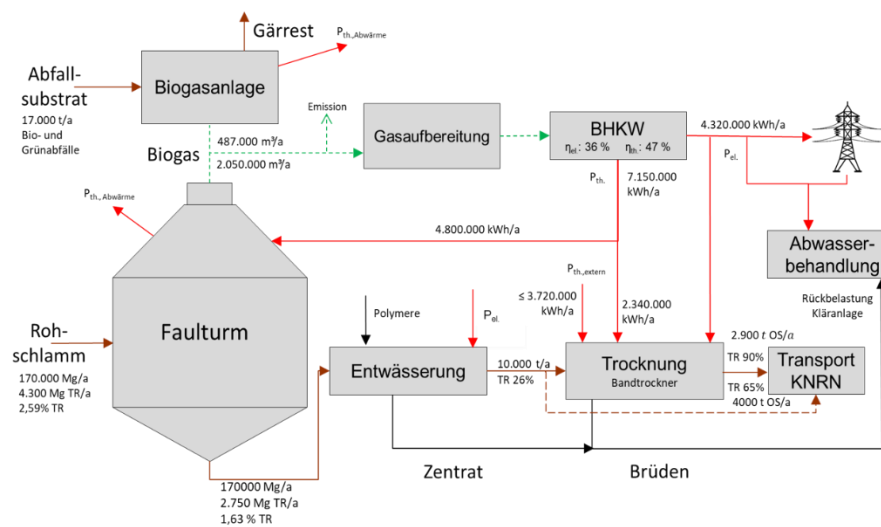


Abbildung 7: Auszug Energie- und Stoffstrommodell Schlammbehandlung GEB

### 3.2 Szenarien

Im Rahmen dieser Energiebilanz wurden anschließend folgende Szenarien erarbeitet:

#### 1. Trocknung des Klärschlamms ausschließlich mit Eigenenergie

Die Trocknung erfolgt ausschließlich mit Überschussenergie. Dadurch kann der TR-Gehalt des zu entsorgenden Schlammes um ca. 10 % auf 36 % angehoben werden. Dies führt zu einer Verringerung der zu entsorgenden Klärschlammmenge von ca. 25 %. Zudem steigt die Lagerkapazität des Schlammes erheblich und die THG-Emissionen des Transports sinken (1 LKW/d = 20 t OS/d).

#### 2. Volltrocknung mit Zufeuerung

Die Trocknung erfolgt durch Einsatz zusätzlicher externer Energie. Hierdurch entstehen weitere Energiekosten, aber die Transportmenge kann bei einem TR-Gehalt von 90 % um weitere 45 % sinken. Rechnerisch müssten für den Abtransport zum KNRN täglich 0,4 LKW (8 t OS/d) bewegt werden.

#### 3. Keine Trocknung, Bahntransport statt LKW

Des Weiteren wurde untersucht den Klärschlamm aus Göttingen per Bahn nach Hildesheim zu transportieren, da es im Verkehrsraum des KNRN eine Beschränkung des Schwerlastverkehrs gibt.

### 3.3 Verfahrensentscheidung

Die drei Szenarien wurden anschließend durch Kennzahlen aus dem Modell beschrieben und in eine Entscheidungsfindung gegeben. Diese Kennzahlen umfassten Energiebedarfe/-kosten, Investitionskosten, Rückbelastung auf Belebung (dynamische Simulation), CO<sub>2</sub>e-Emissionen, Entsorgungskosten und Flexibilität/Betrieb.

Auf Grundlage dieser Zahlen und einer Wichtung dieser nach Interesse/Schwerpunkt der Entscheider:innen wurde sich für die Variante der Volltrocknung entschieden.

## 4 Regionales Zentrum – Verfahrenserprobung und -umstellung

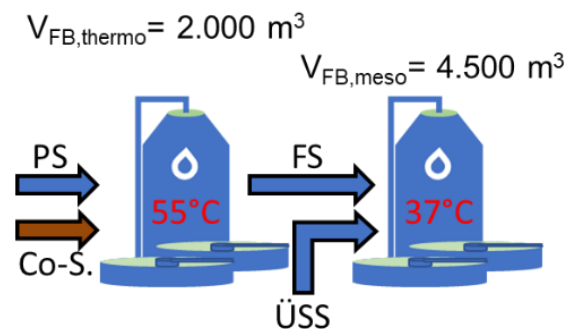
Die Kläranlage Hildesheim liegt in direkter Nachbarschaft zur geplanten Monoklärschlammverbrennung der KNRN. Im Rahmen dieser Nachbarschaft wurden dort Projektfragestellung in Bezug auf die gemeinsame Behandlung von Teilströmen, Fremdschlämmen (Satelliten) und Co-Substraten, sowie damit einhergehend Verfahrenserprobungen und -umstellungen untersucht.

Die Kläranlage Hildesheim hat eine Ausbaugröße von 240.000 EW und wird im Zulauf mit 140.000 EW<sub>CSB</sub> belastet. Daher besteht dort die Möglichkeit der Behandlung weiterer Schmutzfrachten, wie sie bspw. durch eine Erhöhung der Rückbelastung infolge der Annahme von Fremdschlämmen und Co-Substraten in der Faulung entstehen.

### 4.1 Fremdschlamm- und Co-Substratannahme durch Optimierung der Faulung

Die Kläranlage Hildesheim betrieb zu Projektbeginn lediglich einen großen älteren Faulbehälter (FBH) mit ausreichender Dimensionierung und stand vor der Fragestellung, wie im Falle einer Wartung die Klärschlammstabilisierung gewährleistet werden kann. Daraufhin wurde sich für den Bau eines zusätzlichen Behälters (40 % kleineres Volumen) entschieden. Die Besonderheit dabei ist aber, dass dieser FBH mit einer thermophilen Temperatur (50 – 55 °C) betrieben werden kann, sodass ein erhöhter Abbaugrad erzielt werden kann. Rechnerisch steigt der Abbaugrad durch den thermophilen Faulungsprozess um 7 % im Vergleich zum mesophilen Prozess. Des Weiteren erzeugt die Schaffung der Zweistufigkeit eine Entkopplung des hydraulischen Durchflusses beider FBH, wodurch der Abbaugrad nochmals um 8 bis 10 % gegenüber eines Parallelbetriebs steigt. Durch diese Verfahrensausprägungen ergibt sich die Möglichkeit, selbst im Wartungsfall des älteren großen FBH eine hinreichende

Klärschlammstabilisierung zu gewährleisten. Der Wartungsfall tritt nun auch in 2025 ein. Aufgrund von Verzögerungen in der Bauphase konnte der thermophile Betrieb noch nicht erprobt werden, sodass während der Wartungsphase der kleine FBH nur mesophil betrieben werden kann. Somit sieht das Konzept in solchen Fällen die anaerobe Stabilisierung von Primärschlamm und die aerobe Stabilisierung von Überschussschlamm (möglich aufgrund geringer Zulaufbelastung gegenüber Ausbaugröße der KA) vor.



**Abbildung 8: Schema thermophile/mesophile Faulung Kläranlage Hildesheim**

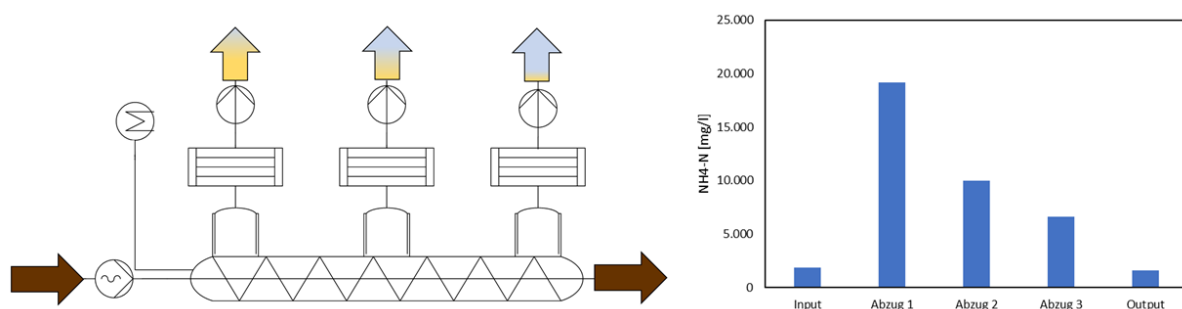
Darüber hinaus bietet die thermophile/mesophile Reihenfaulung im Regelfall die Möglichkeit der Annahme von Fremdschlämmen oder Co-Substraten. Hierdurch können kleine Kläranlagen „Satelliten“ ihren Klärschlamm ebenfalls über das KNRN entsorgen und einer Phosphorrückgewinnung zuführen, ohne dafür Gesellschafter:in in der KNRN sein zu müssen. Ebenso kann die Kläranlage Hildesheim ihre Energiebilanz durch die Annahme und anaerobe Behandlung weiterer Substrate positiv beeinflussen.

## 4.2 Stickstoffrückgewinnung mittels sequenziellem Brüdenabzug

Ziel der BMBF-Fördermaßnahme RePhoR (SATTELITE ist Teil dieser Fördermaßnahme) ist es „einen Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung zu leisten, die eine Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlämmen künftig vorschreibt“ (FONA, 2024). Aus Sicht des SATTELITE Projektkonsortiums ist die alleinige Fokussierung auf die Rückgewinnung von Phosphor im Rahmen der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung aber zu kurzfristig gedacht. Im Zuge dessen, sowie durch Fragestellungen wie der kommunalen Wärmeplanung, dem Ressourcenschutz und der Energie- & Klimaneutralität (wird durch EU-KARL in nationales Recht überführt) sollte auch der auf Kläranlagen prominente Nährstoff Stickstoff stärker in den Fokus gerückt werden.

In Teilströmen der Klärschlammbehandlung und -trocknung kommt Stickstoff in hohen Konzentrationen vor, sodass im Rahmen des Projekts auch ein innovatives Verfahren zur sequentiellen Brüdenausschleusung durch die BIORESTEC GmbH halbertechnisch auf der Kläranlage Hildesheim erprobt wurde. Hierbei wird entwässerter Klärschlamm

in einem Schneckentrockner getrocknet und dabei an verschiedenen Stellen entlang des Trocknungsweges Trocknungsbrüden abgezogen (siehe Abbildung 9). Die Trocknungsbrüden werden kondensiert und enthalten unterschiedliche Ammonium-Stickstoff-Konzentrationen. Der Vorgang basiert auf dem Prinzip des geringen Siedepunkts von Ammoniak, wodurch dieses schnell in die Gasphase überführt wird. Ausgenutzt wird dieses durch einen örtlich frühen Abzug der ersten Brüdenfraktion. Hierdurch können Konzentrationen von bis zu 40 g  $\text{NH}_4\text{-N/l}$  in der ersten Fraktion erreicht und die N-Fracht des Schlammes bereits bei einer Trocknung von ca. 25 % TR auf 35 % TR um 60 % reduziert werden. Die hochkonzentrierte Brüdenfraktion könnte bspw. durch eine leichte Aufkonzentrierung direkt in der Düngemittelherstellung genutzt werden.



**Abbildung 9: Sequenzielle Brüdenkodensation & mittlere Konzentrationen der Fraktionen**

### 4.3 Phosphorfixierung

Die „Elimination“ von Phosphor aus dem Hauptstrom einer Kläranlage erfolgt durch die Inkorporation in die Biomasse, die vermehrt biologische Phosphorentfernung (BioP) oder/und die Fällung mit Eisen- oder Aluminiumsalzen. In der Regel erfolgt der Abzug gemeinsam mit dem Überschussschlamm. Zur Abschätzung des Potentials, z.B. einer Nachfällung, zeigt Abbildung 10 die verschiedenen Fraktionen. Die Höhe der ÜS-Produktion und damit der Anteil des physiologisch gebundenen Anteils ist dabei direkt abhängig von der zugeführten Kohlenstofffracht. Der resultierende P-Gehalt des Schlammes hängt dann vom CSB/P-Verhältnis und dem Eliminationsverfahren ab.





pflanzenverfügbar und es bedarf gegenüber der Rückgewinnung aus Asche weniger Energie- und Säureeinsatz.

Die Kläranlage Hildesheim betreibt zu 100 % BioP und setzt seit Jahren betriebsstabil keine Fällmittel im Hauptstrom ein.

## **5 Unterverbund mit Satelliten und regionalen Zentren**

Die Kläranlagenbetreiber:innen im Landkreis haben sich im Zuge der Gründung der KNRN als Klärschlammverbund (KS-Verbund) zusammengeschlossen und als ein Gesellschafter beteiligt. Der Verbund besteht aus 2 regionalen Zentren und 11 Satellitenanlagen. Diese Anlagen haben in der Vergangenheit ihren Klärschlamm überwiegend bodenbezogen verwertet und dürften es zukünftig auch weiterhin, hatten aber vermehrt Probleme mit Ausbringungsverboten aufgrund von Schadstoffgrenzwerten oder Konkurrenz zu günstigen Düngemittelpreisen. Daher wurde sich für die Entsorgungssicherheit im KNRN entschieden.

Ein Anwendungsfall der strategischen Modellierung und anschließenden Nutzung der Szenarienmodelle als Bewirtschaftungstool war damit für den Unterverbund die Analyse, ob es im Rahmen der Bewirtschaftung der Klärschlamm-mengen ggf. sinnvoll ist, saisonal (also im Sommerhalbjahr) die Nährstoffe direkt zu verwerten, statt sie dem KNRN zuzuführen. Auch der Frage, welche Klärschlammqualitäten aktuell auf den Anlagen vorliegen und ob sie eine gute Voraussetzung für die Rezyklierung über die verschiedenen Wege bieten, wurde nachgegangen. Im Zuge dessen wurde der Klärschlamm aller Anlagen dieses Verbunds im Projektkontext auf P-Gehalte und Fällsalze untersucht (siehe Abbildung 12). Es hat sich gezeigt, dass der Gehalt im Sommer tendenziell höher ist, vermutlich da die Schlammproduktion im Vergleich zum Winter geringer ist, aber die P-Fracht konstant bleibt und damit eine Verschiebung hin zu den Fällungsschlämmen stattfindet. In diesem Jahr wurde das Schlammscreening um eine Analyse von Eisen und Aluminium ergänzt. Daraus ist einerseits zu erkennen, dass Anlagen mit BioP vergleichsweise geringere Metallgehalte haben, andererseits aber auch, dass überwiegend Eisensalze zur Fällung verwendet werden. Diese Tendenz sollte sich im Frühjahr verschieben, da kleine Kläranlagen dort häufig Probleme mit der Bildung von Fadenbakterien haben und zur Unterdrückung dieser häufig Aluminiumsalze verwendet werden.

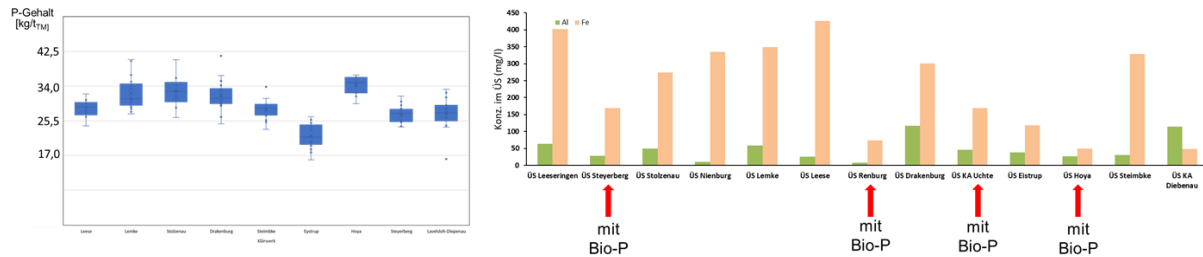


Abbildung 12: P-Gehalte und Fällsalze von Klärschlamm aus Satellitenanlagen

## 6 Bewertung, Modelle und Tools

Zusammenfassend wird deutlich, dass es kein allgemeingültiges optimales Rückgewinnungsverfahren geben wird, sondern immer die lokalen Randbedingungen, technischen Anlagen und Verfahren, aber auch die Möglichkeiten der kurzen regionalen Kreisläufe bei der Bewertung entscheidend sein werden. Auch spielt nicht allein das P-Rückgewinnungsverfahren die maßgebende Rolle – sondern bei der Bewertung muss die gesamte Verfahrenskette Eingang finden, um Wirkungsabhängigkeiten zu berücksichtigen. Das umfasst die, der Verbrennung und Rückgewinnung ebenso wie die die Qualität des Schlammes maßgebend beeinflussenden vorgelagerten Prozesse und letztendlich auch die nachgelagerten Prozessschritte der Rückführung der Nährstoff in die Bedarfsregionen und Logistik der Stoffströme.

**Die Bewertung der nachhaltigen Phosphorrückgewinnung darf nicht nur anhand des Rückgewinnungsverfahrens selbst geschehen, sondern die gesamte Verfahrenskette muss einbezogen werden.**

Damit die Entscheidungsträger:innen eine solche Bewertung anhand von Kennzahlen und der Wichtung dieser gewissenhaft und vereinfacht durchführen können, wie es in Kapitel 0 die Kläranlage Göttingen für die thermische Klärschlamm-trocknung getan hat, wird SATELLITE sowohl die Methodik beispielhaft anwenden, aber auch entsprechende Produkte/Tools mit Abschluss des Projekts erarbeitet haben.

Prozesse werden im Rahmen von Verfahrensmo-  
dule und Verfahrensteckbriefen in einer open Access Modulbibliothek abgebildet. Diese beschreiben die ausgewählten Verfahren mit den prozessbedingten Einflussfaktoren, sowie Faktoren, die durch die Umgebung oder Einbindung bestimmt werden und fallspezifisch sind (vgl. auch EXPO-PLAN (Beier & Kabisch, 2020)). Diese einzelnen Module werden dann miteinander verknüpft, wodurch ein Modell einer bestimmten Verfahrenskette entsteht (vgl. Abbildung 5).

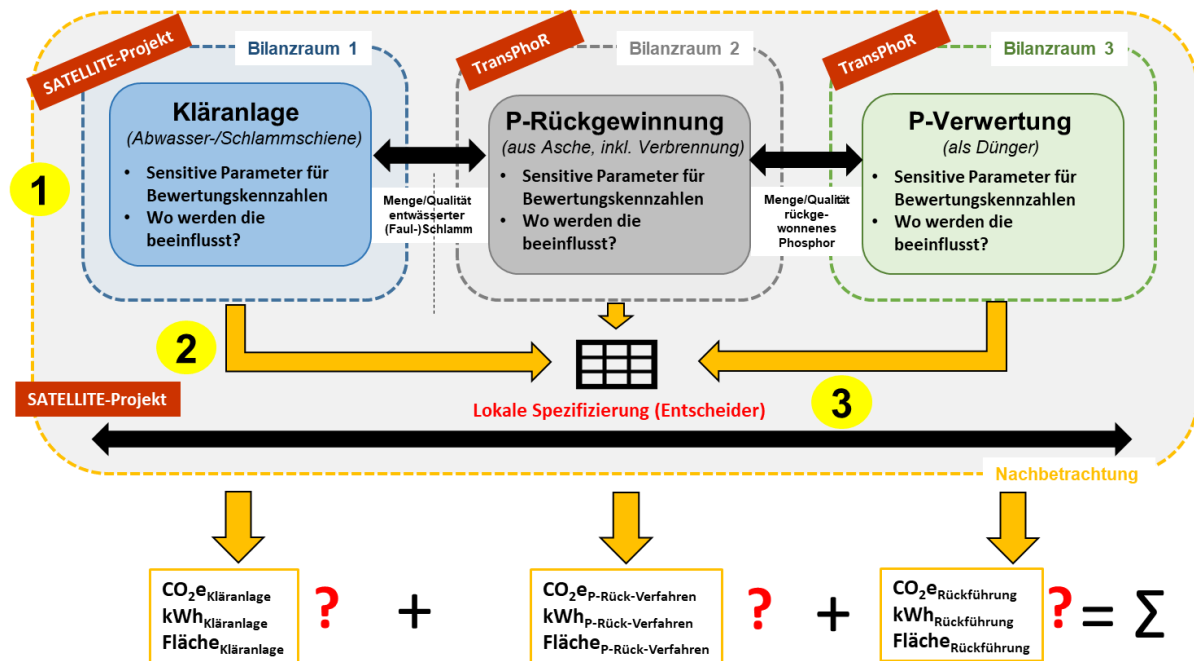


Abbildung 13: Bewertungsrahmen Phosphorrückgewinnung

Mit einem solchen Modell können dann Vergleiche zu verschiedenen Verfahrensausprägungen oder -arten durchgeführt werden, indem entweder die Kennzahlen in dem Verfahrensmodul geändert oder das Verfahrensmodul durch ein anderes ersetzt wird. Im Ergebnis entstehen Bewertungskennzahlen der einzelnen Varianten aus dem Modell, die die Entscheider:innen in der Entscheidungsfindung unterstützen und die Einflüsse transparent darstellen.

Die Zusammenführung dieser Module zu Modellen, sowie die Einbeziehung von Logistik und Standortfragen für interkommunale Verbünde geschieht durch das Ingenieurbüro Dr. Sabrina Breitenkamp in Form eines marktfähigen Tools „OptiNETZ-Tool #plan“ zur Planung von Verbünden.

## 7 Literatur

SATELLITE (2024): <https://www.satellite-rephor.de/>

BMBF - FONA (Forschung für Nachhaltigkeit) (2024): „Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR)“ [Online], Verfügbar unter:  
<https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/regionales-phosphor-recycling.php#:~:text=Ziel%20ist%20es%2C%20einen%20Beitrag,von%20Phosphorimporten%20ma%C3%9Fgeblich%20verringert%20werden.> [Zuletzt besucht: 15.11.2024 2024].

Beier, M., Kabisch, N.-K. (2020): „Entwicklung eines anwendungsorientierten Werkzeugs zur Unterstützung von Kläranlagenplanungen in kalten und warmen Klimaten EXPOPLAN – Abschlussbericht Teilprojekt 3“

#### **Anschrift der Verfasser:**

##### **Torben Martens, M.Sc.**

Institut für Siedlungswasserwirtschaft  
und Abfalltechnik (ISAH), Leibniz  
Universität Hannover  
Welfengarten 1  
D-30167 Hannover

Tel. +49 511 762 - 12291

Fax: +49 511 762 - 2881

E-Mail: [martens@isah.uni-hannover.de](mailto:martens@isah.uni-hannover.de)

##### **Dr.-Ing. Maike Beier**

Institut für Siedlungswasserwirtschaft  
und Abfalltechnik (ISAH), Leibniz  
Universität Hannover  
Welfengarten 1  
D-30167 Hannover

Tel. +49 511 762 - 2898

Fax: +49 511 762 - 2881

E-Mail: [beier@isah.uni-hannover.de](mailto:beier@isah.uni-hannover.de)



## **Das Klick-Tool:**

### **Klimabilanz für Kläranlagen mit einem Klick**

---

**Jürgen Schmidtke**

**Dr. Aennes Abbas**

**Umwelttechnik BW GmbH**

**Stuttgart**

## **1 Der Weg zur Klimaneutralität von Kläranlagen**

Da ein durchschnittlicher Temperaturanstieg des Weltklimas um mehr als 2 °C drastische Auswirkungen auf Menschen und Umwelt haben wird (IPCC 2019), müssen sich alle Teilbereiche unserer Gesellschaft in Richtung Nachhaltigkeit und Klimaneutralität verändern. Der Abwassersektor verzeichnet neben indirekten Emissionen, z.B. durch Strom und Hilfsstoffe, auch signifikante direkte Emissionen von Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas. In der Berichterstattung über Treibhausgas (THG-)Aufkommen nach dem Kyoto-Protokoll muss der Abwassersektor direkte Emissionen im Sektor 5 ausweisen. Mit den aktuellen Bilanzierungsansätzen des Umweltbundesamtes (UBA) werden sich die zu berichtenden Emissionen schätzungsweise mehr als verdoppeln.

Das Klick-Tool ermöglicht es Kläranlagenbetreiber:innen, schnell eine erste Klimabilanz ihrer Kläranlage zu erstellen. Grundlage des interaktiven Tools sind die Leistungsdaten der Kläranlage, die den Anlagenbetreiber:innen vorliegen. Auf Basis dieser Daten erhält man eine erste Klimabilanz und kann verschiedene Sensitivitätsbetrachtungen durchführen. Das Tool führt die Nutzer:innen durch mehrere potentielle Reduktionsmaßnahmen, deren Auswirkungen auf die Klimabilanz direkt dargestellt werden. Auf diese Weise werden die "low hanging fruits" für die Betreiber:innen leicht sichtbar gemacht.

## 1.1 Das Klick-Tool und -Projekt

Das Verbundprojekt „Klick - Klimacheck auf Kläranlagen“ hat sich zum Ziel gesetzt THG-Emissionen zu bilanzieren, zu visualisieren und aktiv den Klimaschutz an Kläranlagen voranzubringen.

Als Grundlage des Klick-Projekts wurde ein webbasiertes Tool <https://klimabilanzklaeranlage.de/> entwickelt mit dem erste THG-Bilanzen für Kläranlagen erstellt werden können. Kläranlagenbetreiber:innen erhalten durch die Eingabe von Betriebsdaten und Abwasserparametern in wenigen Schritten Informationen über die wesentlichen Methan- und Lachgasquellen und über die jeweiligen Mengen, die bei der Abwasser- und Schlammbehandlung entstehen können. Auf Basis dieser Aufschlüsselung und Bilanzierung werden im Tool gezielte und praxisnahe Minderungsmaßnahmen empfohlen, die die Klimabilanz verbessern.

Das Projektvorhaben wird von Umwelttechnik BW (UTBW) gemeinsam mit dem Verbundpartner Leibniz Universität Hannover (LUH, Dr. M. Beier, A. H. Freyschmidt) und den assoziierten Partnern Universität Kassel (Prof. Dr. T. Morck, M. Thormann) und Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) bearbeitet. Die universitären Projektpartner führen in verschiedenen Projekten Langzeitmessungen von THG an ausgesuchten Modellkläranlagen durch. Mit diesen werden Emissionsfaktoren validiert und Plausibilitätsprüfungen für das Tool durchgeführt. Beim erfolgreichen Einsatz und der Verbreitung des Tools unterstützt die DWA in Form von Workshops und Vorträgen. Im Projekt ist ein „KlimaNetzwerk“ für klimaneutrale und nachhaltige Kläranlagen in BW initiiert worden. Dieses Netzwerk hat im Laufe des Projektes ein Whitepaper „Klimaschutz an Kläranlagen - Messen, Bilanzieren und Mindern von Lachgas- und Methanemissionen aus Abwasser“ für Politik, Ingenieurbüros und Betreiber verfasst (Ab Dezember 2024 auf der UTBW-Homepage [www.umwelttechnik-bw.de/de/klimabilanz-klaeranlagen-klick](http://www.umwelttechnik-bw.de/de/klimabilanz-klaeranlagen-klick) abrufbar.)

## 1.2 Klimabilanzen von Kläranlagen

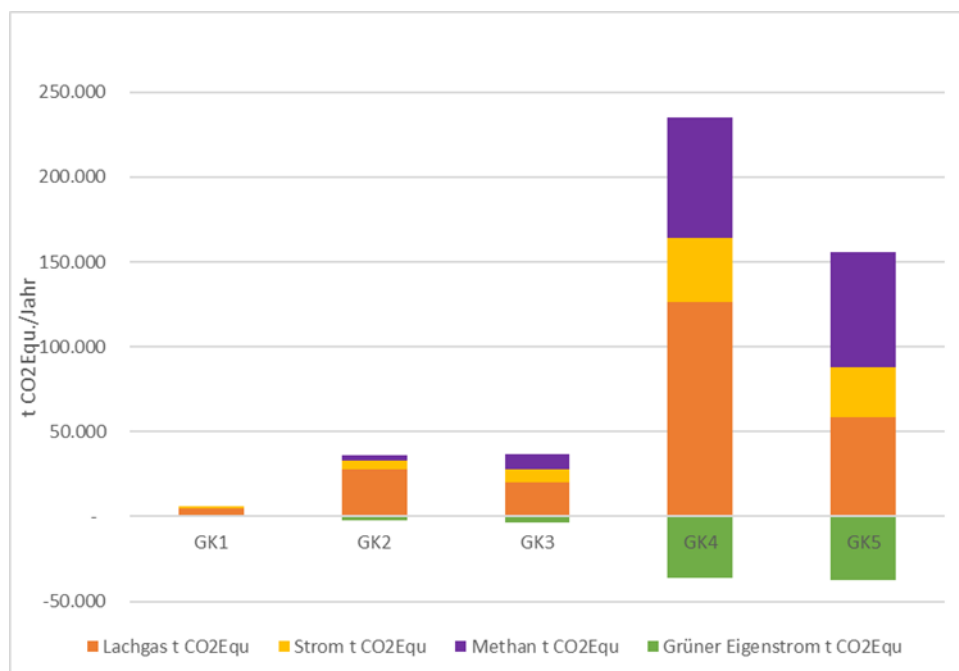
In der Berichterstattung über THG nach dem Kyoto-Protokoll muss der Abwassersektor seine direkten Emissionen im Sektor 5 ausweisen. Die bisherigen Bilanzierungsansätze unterschätzen die direkten Emissionen von Methan und Lachgas auf Kläranlagen (IPCC 2019). Das UBA wird nun erstmals für 2024 die Emissionsfaktoren anpassen und realistischere Emissionen für den nationalen Abwassersektor ausweisen (Kessler 2024). Geplant ist hierbei, die Lachgasemissionen mit 35 g/(EW\*Jahr) und die Methanemissionen mit 500 g/(EW\*Jahr) anzusetzen. Aufgrund des sehr hohen Erderwärmungspotentials (Global Warming Potential) beider Gase (Lachgas nach dem 5. Sachstandberichtes des IPCC (AR5) das 265-fache und Methan das 28-fache von Kohlenstoffdioxid) werden sich die zu berichtenden Emissionen gegenüber dem Berichtsjahr 2023 mehr

als verdoppeln. Es ist absehbar, dass die kommunale Abwasserbehandlung in der aktuellen Berichtsperiode (2024) mit über 2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. zum nationalen Klimainventar beitragen wird. Auf dem Weg zur Klimaneutralität müssen auch diese Emissionen reduziert werden. Ein wichtiger nächster Schritt dafür ist, die Emissionen nicht nur national, sondern auch für jede einzelne Anlage abzuschätzen und zu bilanzieren. Aufgrund dieser Klimabilanzen können dann Minderungsmaßnahmen abgeleitet und priorisiert werden.

Im Folgenden wurden die Gesamtemissionen für Baden-Württemberg (BW) auf Basis der DWA-Leistungsbilanz 2020 abgeschätzt. Dabei wurden mehrere kleinere Anlagen mit höheren Emissionsfaktoren und die Mehrheit der größeren Anlagen mit niedrigeren Emissionsfaktoren bewertet. Hintergrund dieser Annahme ist, dass größere Anlagen in der Regel stabiler betrieben werden können. Nitritakkumulation oder temperaturbedingte Unterbrechungen der Denitrifikation treten hier seltener auf (Gruber et al. 2022). Beide Faktoren können zu erhöhten Lachgasemissionen führen. In Tabelle 1 ist dies für die Emissionsfaktoren nach Gruber (2022) zusammengefasst.

**Tabelle 3: Exemplarische Emissionsfaktoren für Kläranlagen der Größenklasse 1-5 und Anteile an den verwendeten Emissionsfaktoren (EF) für die Berechnung der Lachgasemissionen.**

EF	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5
EF 4%	75%	50%	20%	15%	4%
EF 1,1%	15%	20%	20%	20%	11%
EF 0,3%	10%	30%	60%	65%	85%



**Abbildung 14: Verteilung der THG-Emissionsmengen nach GK 1-5 der Kläranlagen in [t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr]. Grüner Eigenstrom als CO<sub>2</sub>-Einsparungsmöglichkeit als „negativer“ CO<sub>2</sub>-Äq.-Wert aufgetragen.**



Die Abbildung 1 zeigt, dass selbst bei Annahme hoher Emissionsfaktoren für kleine Anlagen der GK 1-3 für die Gesamtbilanz in BW diese wenig relevant sind. Die vorhandenen Lachgasemissionen hängen mit den Stickstofffrachten zusammen, die hauptsächlich in den Kläranlagen der GK4 und GK5 behandelt werden. Daher sollten Minderungsmaßnahmen vorrangig bei diesen Anlagenklassen ansetzen.

### **1.2.1 Bilanzierung im europäischen Raum**

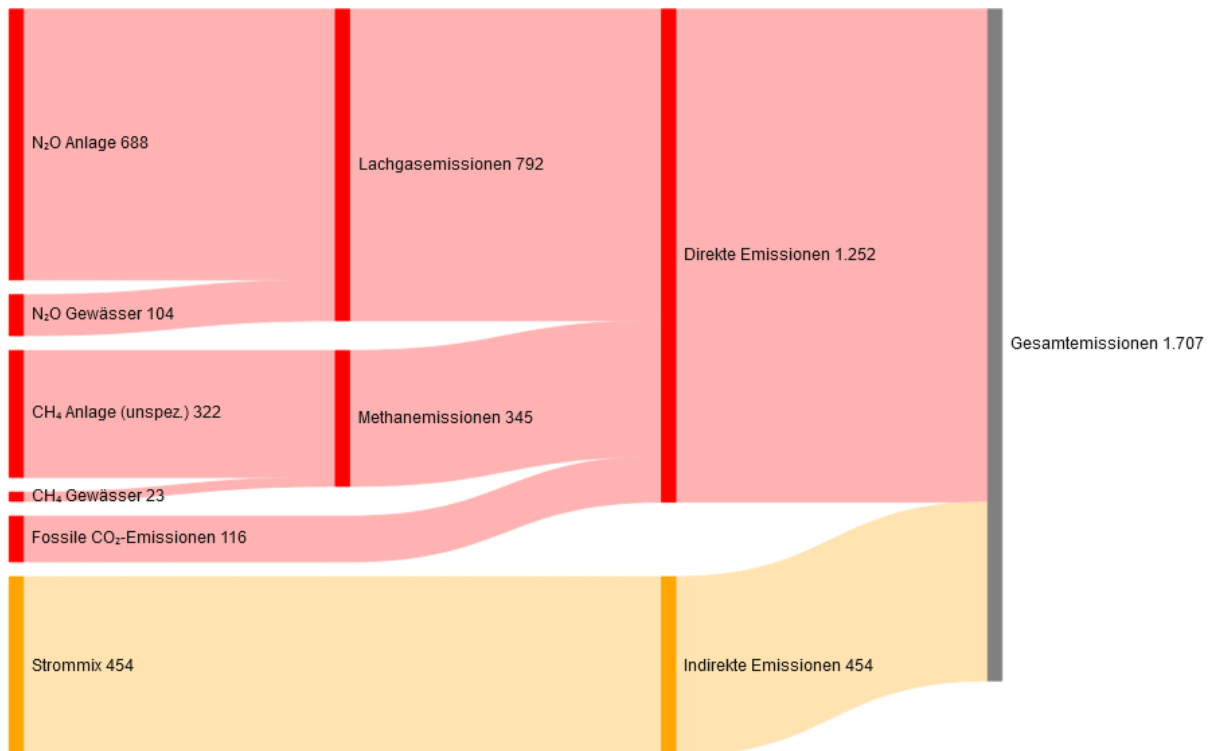
Mit Blick auf die Nachbarstaaten Deutschlands ist festzustellen, dass Österreich, Schweiz und Dänemark bereits nationale Emissionsfaktoren für Lachgas durch flächendeckende Messkampagnen ermittelt haben. In diesen Ländern gibt es allerdings unterschiedlich ambitionierte Minderungsmaßnahmen. Dänemark nimmt hier eine Vorreiterrolle ein. Das dänische Umweltministerium (2024) hat in diesem Jahr ein Strategiepapier (mit dem deutschen Titel) „Vorgeschlagene Kontrollmethoden zur Reduzierung der Lachgasemissionen aus Kläranlagen“ veröffentlicht. Darin wird dargelegt, wie der dänische Staat zukünftig Messungen und Minderungsmaßnahmen an Kläranlagen fördern und gesetzlich regeln möchte. Dies ist der erste Ansatz in Europa Lachgasemissionen aus Kläranlagen gesetzlich zu regeln.

## **1.3 Bilanzierung mit dem Klick-Tool**

Das Klick-Tool bietet Betreiber:innen die Möglichkeit, mit den DWA-Leistungsdaten und wenigen Zusatzinformationen eine erste und aussagekräftige Klimabilanz zu erstellen. Die Bilanz kann durch eine Auswahl von Sensitivitätsoptionen leicht für unterschiedliche Fallbeispiele und an spezifische Szenarien angepasst werden. Da nur für sehr wenige Kläranlagen Messwerte für direkte THG-Emissionen vorliegen, muss für die Bilanzierung teilweise mit Annahmen gearbeitet werden. Ziel ist es, dass die Betreiber:innen sehen, welche Annahmen sich wie stark auf die Klimabilanz auswirken. So sollen kritische Bereiche („Hotspots“) identifiziert werden, die dann durch Messungen und/oder weitere Maßnahmen verifiziert werden können. Im letzten Schritt werden den Betreiber:innen erste Minderungsmaßnahmen zur Verbesserung ihrer Klimabilanz empfohlen.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine mit dem Klick-Tool erstellte Klimabilanz für eine durchschnittliche Kläranlage in BW. Grundlage für diese Bilanz sind die Daten des 50. Leistungsvergleichs für das Jahr 2023 der DWA BW. Gemittelt und ausgelegt auf 50.000 EW wurden die Daten aller Kläranlagen der GK4 (n = 306) einschließlich GK5 (n = 41) des Bundeslandes und die entsprechenden im DWA-Leistungsvergleichs 2023 berichteten Parameter „Erfasste mittlere Belastung\* in E“ (6.687.096 und 6.770.083), „Behandeltes Abwasser“ (831 und 617 Mio m<sup>3</sup>/a), sowie die jeweiligen in Konzentrationen [mg/L] umgerechneten Frachten im Zu- und Ablauf für den CSB und Ges-N (vergl. Tab. 1–3 des DWA-Leistungsvergleichs 2023). Der „Stromverbrauch gesamt“ wurde ebenfalls unter Miteinbezug der „Stromerzeugung aus Faulgas“ für die

GK5/6 bilanziert (vergl. Tab. 4 des DWA-Leistungsvergleichs 2023 bzw. Abbildung 2). Die Lachgasemissionen wurden mit dem Szenario TU Wien 2016 ( $\text{N}_2\text{O-EF}=0,81$ ) berechnet.



**Abbildung 2:** Auszug aus Klimabilanz für eine theoretische durchschnittliche Kläranlage mit 50.000 EW in Baden-Württemberg. THG-Emissionsmengen in [t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr].

Das Klick-Tool steht kostenlos zur Verfügung und ist vollständig als Open-Source-Anwendung programmiert. Der Quellcode ist vollständig zugänglich (<https://codeberg.org/slowtec/klick>). Ein ausführliches Wiki führt die Nutzer:innen durch die verschiedenen Eingabeparameter und Berechnungsgrundlagen, die hinter dem Tool stehen. Bei der Verwendung des Tools im Browser werden keine Daten übertragen. Die Daten verbleiben ausschließlich im lokalen Speicher des Internetbrowsers der Nutzer:innen. Auf diese Weise ist der Datenschutz, die Datensicherheit und die anonyme Nutzbarkeit optimal gewährleistet. Alternativ besteht die Möglichkeit der Anmeldung (per Emailadresse), wobei Projekt- und Dateneingaben auf dem Server des Tools gespeichert werden können.

## 1.4 Minderungsmaßnahmen für Lachgasemissionen

Im Klick-Projekt wurden verschiedene Minderungsmaßnahmen für Lachgasemissionen aus der Fachliteratur beurteilt und ausgewählt. Hierrunter fallen u.a. folgende optimierte Betriebsbedingungen:

- Sicherstellung einer weitestgehenden Stickstoffelimination (N/DN)
- Günstige Denitrifikationsbedingungen

- Vergleichmäßigte Rückführung von Stickstoffrückbelastungen aus der Schlammbehandlung
- Stickstoffausschleusung zur N-Rückgewinnung aus Schlammwasser
- Abluftbehandlung in Nebenstrom/Teilstromprozessen

Mit der Inkraftsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (KARL) werden sich die Anforderungen an die Stickstoffablaufwerte für viele Kläranlagen verschärfen (EC 2024). Um diese Werte zu erreichen, wird die Optimierung der bestehenden Kläranlagenprozesse die vorrangige Option sein, bevor zusätzliches Denitrifikationsbeckenvolumen gebaut wird. Im Zuge einer dynamischen Regelung der Nitrifikation und Denitrifikation wäre es wichtig, Messwerte der Lachgasemissionen mit einzubeziehen. Die für die dynamische Regelung zu erstellenden Modellen könnten dabei Lachgasemissionen als weitere Regelgröße reduzieren. Auch wenn derzeit noch keine gesetzlich-bindenden Grenzwerte für Lachgasemissionen existieren, sollte dies aufgrund des Aufwandes für eine dynamische Regelung bereits im Zuge der Umsetzung von KARL angegangen werden.

## 1.5 Minderungsmaßnahmen für Methanemissionen

Im Zuge des Klick-Vorhabens und der Literaturrecherche wurden zudem eine erste Auswahl an Minderungsmaßnahmen für Methanemissionen identifiziert und ins Klick-Tool integriert. Hierzu zählen:

- Vermeidung anaerober Zustände im Kanalsystem
- Kontinuierlicher Primärschlammabzug aus dem Vorklärbecken
- Hoher Stabilisierungsgrad vor Schlammverwertung
- Kurze Lager-/Aufenthaltszeiten von „freiem“ Schlamm
- Leckagen aufspüren und schließen
- Abdecken von Schlammlagern
- Faulbehälter schließen (offene Faulschlammtaschen)
- Methan-Schlupf im BHKW senken (unvollständige Verbrennung)

## 1.6 Fazit

Das Projekt Klick zeigt, dass bereits mit vergleichsweise wenig Daten eine erste Klimabilanz einer Kläranlage erstellt werden kann. Diese Bilanz lässt erkennen, dass neben dem Stromverbrauch, der in der Regel etwa ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Äq. ausmacht, die direkten Emissionen in Form von Methan und Lachgas zu jeweils ungefähr einem weiteren Drittel zur Klimabilanz beitragen (vergl. Abbildung 2). Diese mit dem Klick-Tool abgeschätzte erste Klimabilanz kann durch verschiedene Sensitivitätsparameter

weiter verfeinert werden. Für eine akkurate und spezifische Ermittlung der Lachgasemissionen und damit eine genauere Bilanz wird eine Lachgasmessung ein entscheidender Schritt sein. Werden erhöhte Emissionen festgestellt, könnte die Reduktion der Lachgasemissionen im Zuge der Ausstattung der Kläranlagen mit einer dynamischen Regelung zur Erreichung besserer Stickstoffablaufwerte erfolgen (Gruber 2022).

Das Klick-Tool zeigt „low hanging fruits“ für erste effektive Minderungsmaßnahmen auf. Zur Minimierung von Methanemissionen müssen u.a. Leckagen weitestgehend verhindert werden. Das Schließen von Faulschlammtaschen am Faulbehältern oder das Schließen von Schlammstapelbehältern sind vergleichsweise einfache und effektive Maßnahmen zur Verbesserung der Klimabilanz.

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2045 klimaneutral zu werden. BW möchte bereits 2040 klimaneutral sein. In Anbetracht der verbleibenden 16 Jahre, müssen Kommunen in allen Sektoren, einschließlich Gebäude und Infrastrukturen, vorangehen und zeigen, dass dieser Transformationsprozess möglich ist. Im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels ist es wichtig, dass wir besser heute als morgen handeln. Die Abwasserwirtschaft leistet durch den Gewässerschutz einen unverzichtbaren Beitrag zum Erhalt des Lebensraumes Erde. Sie kann dies mit vergleichsweise geringem Aufwand auch bezüglich des Klimaschutzes tun. Machen wir uns gemeinsam auf den Weg.

## 2 Danksagung

Das Projekt „Klick Klimaschutz an Kläranlagen mit einem Klick“ wird im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative ([NKI](#)) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz ([BMWK](#)) gefördert. Wir bedanken uns bei dem Fördermittelgeber für die Unterstützung unserer Klimaschutzidee.

## 3 Literatur

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Landesverband Baden-Württemberg. (2023). 50. DWA Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen in Baden-Württemberg. DWA. Abgerufen unter <https://www.dwa-bw.de/de/9087/ergebnisse-des-50-leistungsnachweises-der-kommunalen-klaeranlagen-in-baden-wuerttemberg.html>

European Parliament and of the Council (EC 2024). Amendments adopted by the European Parliament on 5 October 2023 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast) (COM(2022)0541 - C9-6363/2022 - 2022/0345(COD)). [URL](#)

- Gruber, W., Villez, K., Kipf, M., Wunderlin, P., Siegrist, H., Vogt, L. & Joss, A. (2020). „N<sub>2</sub>O emission in full-scale wastewater treatment: Proposing a refined monitoring strategy“, Science of the Total Environment, 699, Artikel 134157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134157>
- Dänische Umweltministerium (2024). Umweltprojekt Nr. 2273 „Forslag til reguleringsmetoder til reduktion af lattergasemissioner fra renseanlæg“, (Deutscher Titel: „Vorgeschlagene Kontrollmethoden zur Reduzierung der Lachgasemissionen aus Kläranlagen“). Abgerufen unter, <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2024/08/978-87-7038-629-6.pdf>
- IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and
- Federici, S. (eds). IPCC, Switzerland Wenzel, G.; Niederdorfer, R.; Bürgmann H.; Joss A. (2022). Lachgasemissionen aus ARA. „Reduktionsmassnahmen zeichnen sich ab“, Aqua & Gas, No.1 2022. [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/News/2022/01/20/fa\\_joss.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/News/2022/01/20/fa_joss.pdf)
- Kessler, Umweltbundesamt, Vortrag bei dem DWA Web-Seminar „Zero Emissions“ 16. April 2024.

**Anschrift des Verfassers:****Dipl.-Ing. Jürgen Schmidtke****Dr. Aennes Abbas**

Umwelttechnik BW GmbH  
Kleiner Schlossplatz 13  
D-70173 Stuttgart

Umwelttechnik BW GmbH  
Kleiner Schlossplatz 13  
D-70173 Stuttgart

Tel. +49 711 252841-27

Tel. +49 711 252841-76

E-Mail:

[juergen.schmidtke@umwelttechnik-bw.de](mailto:juergen.schmidtke@umwelttechnik-bw.de)

E-Mail:

[aennes.abbas@umwelttechnik-bw.de](mailto:aennes.abbas@umwelttechnik-bw.de)

# Dynamische Simulation der Treibhausgasemissionen von Kläranlagen

---

Stephan Fritsch, Dr.-Ing.

Weber Ingenieure GmbH  
D- 75177 Pforzheim

## 1 Einleitung

Als bundesweit tätiges Planungsbüro im Bereich der Wasserwirtschaft und des Umweltschutzes verbinden wir praktisches Wissen mit innovativen Lösungen zur Senkung von Kosten und Emissionen.

Um eine Synergie aus Effizienz, Sicherheit, Ökonomie und Ökologie in den vielfältigen Projekten der WEBER Ingenieure zu erreichen, werden fortschrittliche Technologien eingesetzt, die einen echten Mehrwert bieten.

In diesem Vortrag stellen wir ein **Dynamisches Simulationsmodell** zur Bilanzierung, Bewertung und Prognose von Treibhausgasemissionen vor, um Kommunen eine Hilfestellung beim Erreichen der gesetzlich verankerten Klimaziele anzubieten.

## 2 Rechtlicher Rahmen und Zielvorgaben

Aktive Maßnahmen gegen den Klimawandel, die Einsparung von Ressourcen und der Erhalt von Lebensräumen stehen im Mittelpunkt der Klimaschutzgesetze des Bundes. Die internationale Staatengemeinschaft verabschiedete 2015 das Pariser Klimaabkommen auf Grundlage der Sachstandsberichte des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023) um die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Das darauf aufbauende Klimaschutzgesetz des Landes Baden-Württemberg (KlimaG BW, KMR, 2023) fordert die Einhaltung verbindlicher Klimaschutzziele, von denen einige Bereiche eine herausragende Bedeutung für die Abwasserwirtschaft besitzen:

- Emissionsminderung um 65% bis 2030 sowie Klimaneutralität bis 2040
- Erfassung von Energieverbräuchen und Emissionen (Monitoring)
- Nutzung vorhandener Flächen zum Ausbau Erneuerbarer Energien
- Maximierung der Energieeffizienz und Anstreben von Energie-Autarkie
- Ausbau der Wertstoffrückgewinnung (Kreislaufwirtschaft)

## 3 Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Bilanz in der Abwasserwirtschaft

Neben den allgemeinen Zielen wurden im Landesrecht Sektorenziele für den Bereich der Energiewirtschaft von 75% sowie der Entsorgungs- und Abfallwirtschaft von 88% verabschiedet. Das erfordert die Erfassung und Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kläranlagen, um Emissionsminderungskonzepte zu erarbeiten, da Kläranlagen zu den bedeutenden Verbrauchern von Energie und Verursachern von Emissionen zählen.

### 3.1 Definition von Hauptkategorien

Bei der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung richten wir uns nach dem **Leitfaden Klimaneutrale Kommunalverwaltung** Baden-Württemberg (ifeu, 2023) auf Grundlage der BSKO-Systematik, die in mehrere Hauptkategorien unterteilt wird:

- **Verbrennung von Energieträgern, Mobilität / Fuhrpark**
- **Stromverbrauch, Fernwärme, Fernkälte**
- **Energieproduktion, Beschaffung/ IT, Veranstaltungen**

### 3.2 Emissionsquellen auf Kläranlagen

Als Bestandteile der kritischen Infrastruktur besteht die Hauptaufgabe einer Kläranlage darin, das Abwassers einer Kommune und angrenzender Bereiche zu reinigen. Neben

dem Verbrauch an Energie entstehen im Rahmen der biologischen Prozesse auch gasförmige Emissionen. Zudem werden Betriebsmittel und Rohstoffe verbraucht und Abfälle erzeugt. Somit ergeben sich mehrere Hauptbereiche der CO<sub>2</sub>-Bilanz:

### Wir definieren den Rahmen der CO<sub>2</sub>-Bilanz von Kläranlagen

- ♦ .... **Kläranlagen** sind Produzenten **klimaschädlicher Gase**, die bei der Abwasserreinigung entstehen
- ♦ .... **Kläranlagen** sind bedeutende Verbraucher von **Betriebsmitteln, Wärme und elektrischer Energie**
- ♦ .... **Kläranlagen** sind Produzenten erheblicher Mengen an Abfall wie **Schlamm, Rechengut und Sand**
- ♦ .... **Emissionen** von Kläranlagen sollen erfasst und mit **Emissions-Minderungsmaßnahmen** optimiert werden

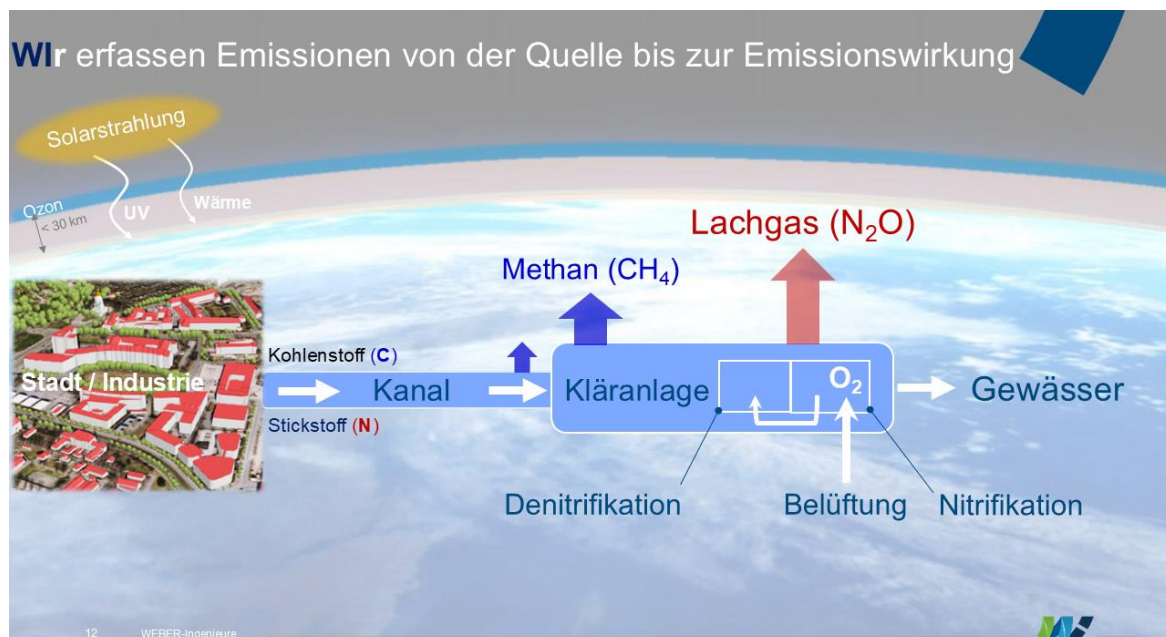


11 WEBER-Ingenieure



Abbildung 16: Emissionsquellen in der Abwasserwirtschaft

Um eine umfassende Ermittlung und Bewertung der Emissionen zu ermöglichen, betrachten wir das Spektrum von Ursache und Wirkung der Emissionen in der Umwelt.



12 WEBER-Ingenieure



Abbildung 17: Emissionen von der Quelle bis zur Einwirkung



Im Rahmen der Ableitung des warmen Abwassers beginnt der biologische Abbau der Nährstoffbausteine wie Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel und Stickstoff und setzt Gase wie Methan ( $\text{CH}_4$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und  $\text{CO}_2$  frei (Abbildung 2). Von diesen Gasen haben **Lachgas und Methan** das höchste Treibhausgaspotential. Das ausgasende  $\text{CO}_2$  wird als neutral angesehen, da es aus dem Abbau organischen Materials stammt.

Ein bedeutender Anteil klimawirksamer Gase liegt gelöst im Rohabwasser vor ( $\text{CH}_4$ ) oder wird mit dem gereinigten Abwasser in das Gewässer ausgetragen ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Diese Eintrags- und Verdrängungspfade werden in unseren **Simulationsmodellen** gesondert betrachtet. Sie bilden einen Ansatzpunkt zur Emissionsminderung durch betriebliche Maßnahmen und sind unabhängig vom biologischen Abbau zu betrachten.

## 4 Dynamische Simulation

### 4.1 Berechnung der $\text{CO}_2$ -Emission

Die dynamische Simulation basiert auf den Berechnungsmodellen ASM1 bis ASM3 (Activated Sludge Model) nach M. Henze (1986).

Die dynamische Simulation ergänzt statische Bemessungsmethoden, die in den Arbeitsblättern der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. wie z.B. Arbeitsblatt DWA-A 131 (2016) beschrieben werden. Die Berechnung der Treibhausgasemissionen von Kläranlagen erfolgt in Anlehnung an die Merkblätter DWA-M 230-1 (2022) und DWA-M 230-2 (2022).

Die direkten Lachgas-Emissionen werden auf die Stickstoff- (N) und die Methan-Emissionen auf die Kohlenstoffbelastung (CSB) des Rohabwassers bezogen und in  $[\text{kg CO}_2\text{e}/\text{Einwohner}]$  angegeben. Da die dynamische Simulation den Abbau von CSB und N der einzelnen Betriebstage berechnet, liefert sie auch die  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Der zeitliche Verlauf von CSB-/ N-Abbau und  $\text{CO}_2$ -Emission wird in Abbildung 3 dargestellt.

## Wir modellieren die Bildung und Freisetzung von Klimagasen

- .... **Lachgas und Methan** sind klimaschädliche Gase mit langer atmosphärischer Wirkungsdauer
- .... **Stickstoffverbindungen (N)** im Abwasser (Proteine u.a.) sind Quellen von **Lachgas ( $N_2O$ )**
- .... **Kohlenstoffverbindungen (C)** im Abwasser (Stärke u.a.) sind Quellen von **Methan ( $CH_4$ )**
- .... **Die Dynamische Simulation** ermittelt Emissions-Zeitpunkt und -Menge aus Messdaten und ermöglicht Prognosen

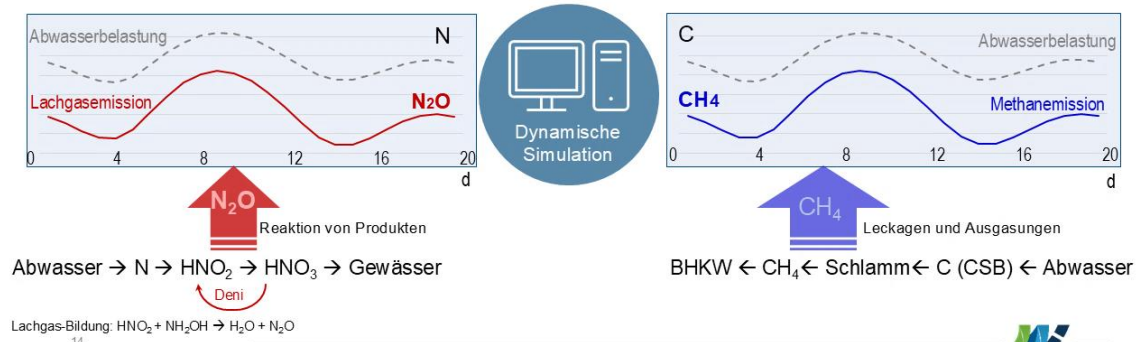


Abbildung 19: Modellierung der Bildung und Freisetzung von Klimagasen

## 4.2 Variabilität und Präzision

Da die Emissionen klimawirksamer Gase eine starke Dynamik aufweisen, kommt ein dynamisches Simulationsmodell als digitales Abbild der Anlage zum Einsatz.

Dieser **Digitale Zwilling** bildet alle Prozesse ab, die zu einem Emissionsanstieg führen. Dazu gehören u.a. die Belastung des Abwassers (Spitzenbelastungen am Mittag), die Wassertemperatur, saisonale Effekte (Werktage, Ferien) und Niederschläge (Regen- und Trockenwetter).

## Wir berücksichtigen saisonale Schwankungen und variable Belastungen

- .... Abwasserbelastungen schwanken an jedem Betriebstag (Tagesganglinie)
- .... Biologische Prozesse sind abhängig von der Temperatur (Jahresganglinie)
- .... Regenereignisse stellen zusätzliche Einflussgrößen dar (Hydraulische Spitzen)
- .... Industrieeinleiter induzieren relevante Stoßbelastungen (N- und CSB-Spitzen)

Emissionen sind über die Betriebstage und Betriebsjahre extrem veränderlich!

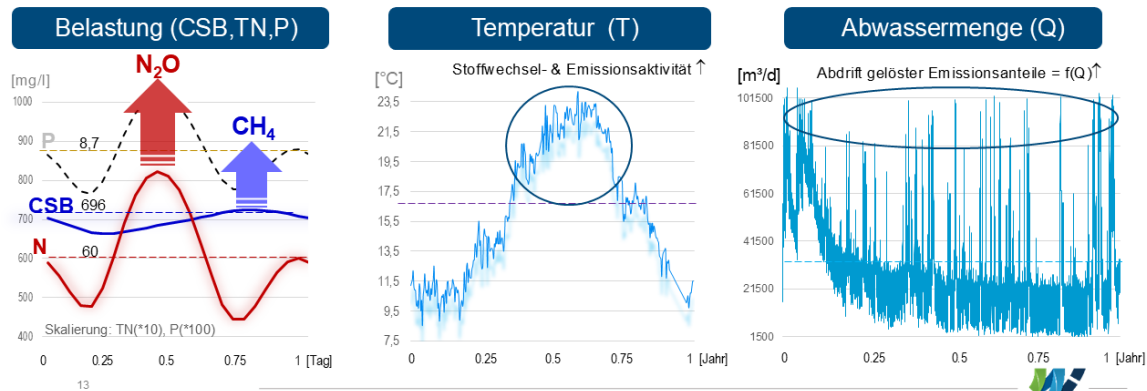


Abbildung 21: Einflussgrößen der simulationsbasierten Emissionsberechnung

Die wesentlichen Vorteile, die sich dadurch ergeben, sollen am Beispiel der dynamischen Simulation der Emission von Lachgas dargestellt werden (Abbildung 5).

## Wir ermitteln die Lachgasemissionen der Abwasserbehandlungsstufen

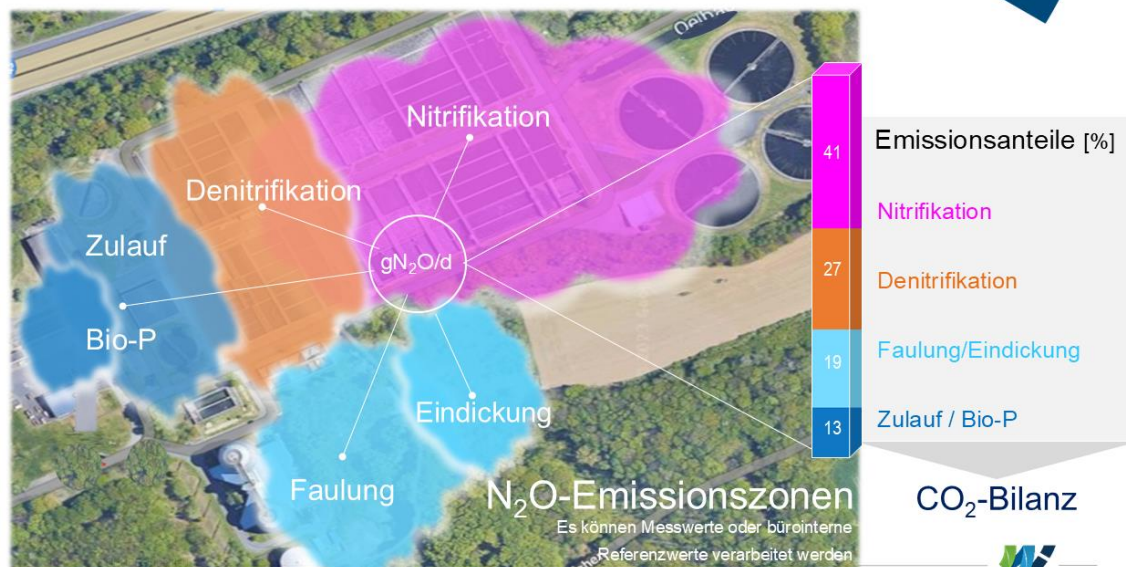


Abbildung 22: Lachgasemissionszonenplan einer Kläranlage

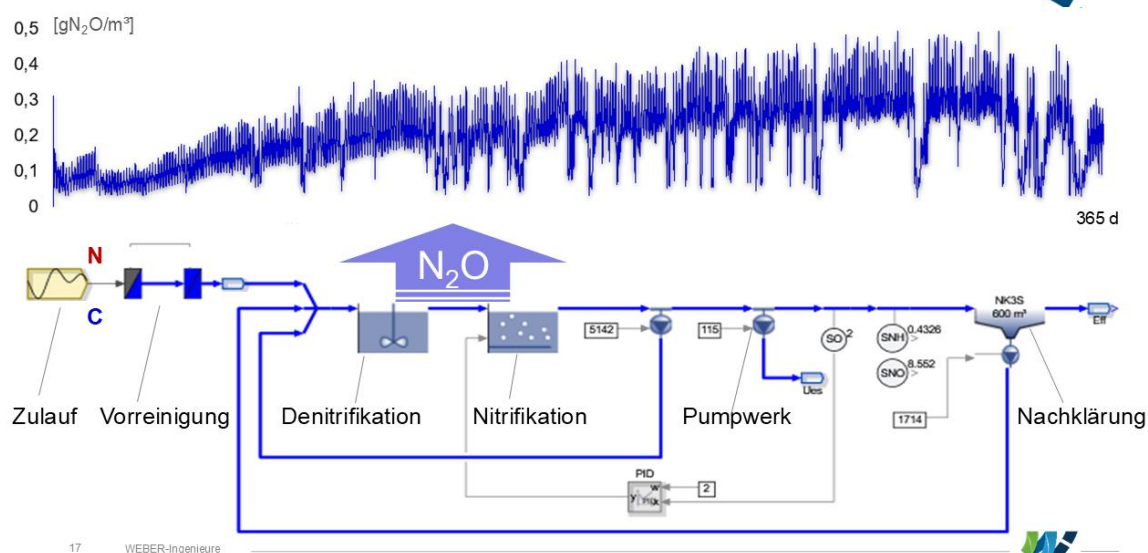
Die Lachgasemissionen sind dort am höchsten, wo am meisten Stickstoff aus dem Abwasser oder dem Klärschlamm entfernt wird. Um die CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund von

Lachgas möglichst präzise den **Orten der Emission auf der Kläranlage** zuordnen zu können, stehen uns 2 Optionen zur Verfügung:

1. **Verarbeitung von Messwerten (Gassensoren, Drohnen, optische Geräte)**
2. **Verwendung von Basiswerten auf Grundlage von Studien (Defaultwerte)**

Das digitale Simulationsmodell ermittelt für jede der oben dargestellten Bereiche den zonenspezifischen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für jeden Betriebstag und jedes Betriebsjahr, im Optimalfall auf Grundlage von Messwerten, die aus Datenbanken importiert werden. Die Methanemissionen werden ebenfalls nach der hier beschriebenen Vorgehensweise ermittelt und zonenspezifisch dargestellt.

### Dynamische Entwicklung der Lachgasemission eines Betriebsjahres



**Abbildung 24: Jahresganglinie der Lachgasemission einer Kläranlage**

Für jede Stufe kann eine Emissionsganglinie dargestellt werden. In Abbildung 6 wird beispielhaft die Lachgasemission der Denitrifikation und Nitrifikation veranschaulicht.

Diese Strategie ermöglicht uns, eine **Prioritätenliste** zu erarbeiten. Somit können wir dem Anlagenbetreiber hinreichend genau mitteilen, wann (Zeit) und wo (Ort) welche Maßnahme zur **Emissionsminderung** (Technologie oder Betriebsweise) den größten Beitrag zum Erreichen der Klimaziele der Kommune aufweisen. Auch eine zeitlich gegliederte **Kostenplanung** von Optimierungs- und Umbaumaßnahmen kann auf dieser Grundlage erarbeitet werden.

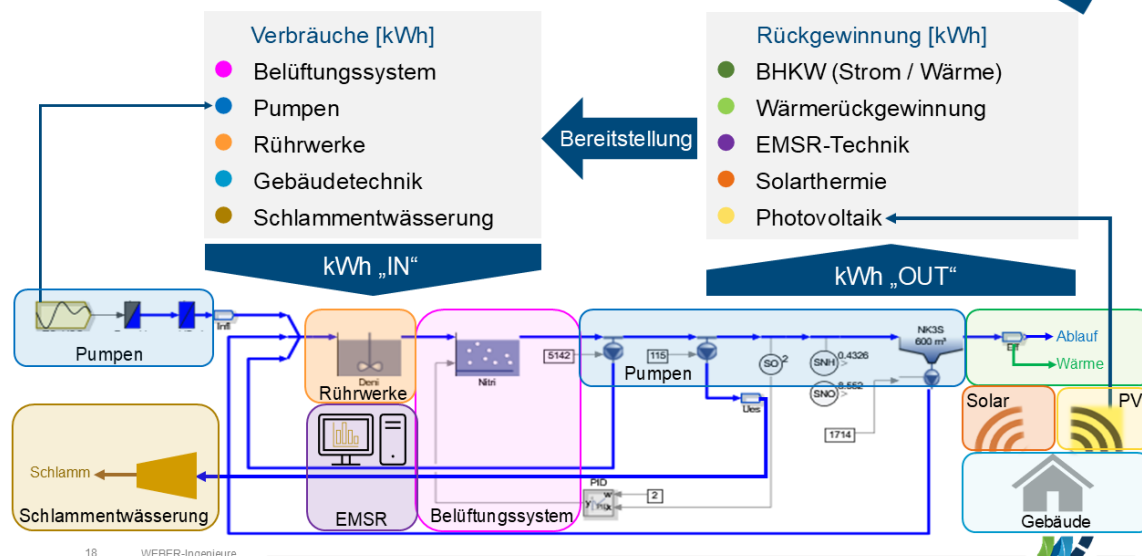
### 4.3 Energieverbrauch und Einsparpotential

Mit dem Merkblatt DWA-A 216 (2015) steht ein Instrument zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen zur Verfügung. Das dynamische Simulationsmodell bildet den Energiecheck und die Energieanalyse gemäß DWA-A 216 ab (Abbildung 7).

Das ermöglicht eine digitale Berechnung und (Langzeit-) Prognose in den Bereichen:

- **Energieverbrauch (Strom, Wärme, Kälte)**
- **Energierückgewinnung (Abwärme, BHKW, Solar, PV, Wärmepumpe u.a.)**
- **Energieeinsparung und Energieeffizienz**
- **Schrittweises Erreichen von Energieautarkie**

## Wir modellieren Verbrauch und Rückgewinnung von Energie



**Abbildung 26: Energetisches Simulationsmodell einer Kläranlage**

#### 4.4 Digitale Massenermittlung für CO<sub>2</sub>-Bilanz und Recycling

Das Simulationsmodell dient neben der Ermittlung der direkten Emissionen (Lachgas, Methan u.a.), den Verbräuchen und der Rückgewinnung von Energie auch zur Berechnung der Verbräuche an Betriebsmitteln wie Chemikalien (Flockungs- und Fällungsmittel u.a.) und dem Materialeinsatz aus den Bereichen Bau-, Maschinen und EMSR-Technik. Das ermöglicht eine CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz (Scope-1-3) und geht einher mit den Empfehlungen des IPCC (2023), eine umfassende Bewertung vorzunehmen. Um die ständig wachsende Datenmenge zu bewältigen, kann das Simulationsmodell mit dem Bauwerksmodell gekoppelt werden. Somit können Massen und Materialtypen digital eingelesen (importiert) und verarbeitet (bilanziert) werden. Gerade im Zeitalter

der Digitalisierung und den Vorteilen der dreidimensionalen Konstruktion (CAD, BIM und KI) erreichen wir eine hohe Präzision bei minimaler Fehleranfälligkeit.

## Wir berechnen dynamische Material- und Wertstoffkreisläufe

Softwarebasierter Massenauszug → DIN 276 konform

KG	Bezeichnung	Kategorie	Menge	Einheit
330	Außenwände			
331	Beton	Tragende Außenwände	1.105	m³
dbc.630.00.04.01	Beton C 20/25	'Mineralis' DIN EN 15804 / ISO 14025		
dbc.630.00.04.01	Beton C 35/45	'Mineralis' DIN EN 15804 / ISO 14025		
331	Bau Stahl-Bewehrung (Stahlbeton)		198.500	kg
e9ae9120.19.1.1	Bewehrungsstahl 'Reinforcement 'Metalle' / DIN EN 15804			
e9ae9120.19.1.1	Bewehrungsstahl 'Reinforcement 'Metalle' / DIN EN 15804			



Übertrag

### Materialverbrauch [kg]

- Beton
- Bewehrungsstahl
- Erdarbeiten & Verbau
- Rohrleitungsbau
- Stahl- / Edelstahlarbeiten
- Technische Ausrüstung
- E/MSR-Ausrüstung
- Außenanlagen, Freiflächen
- Betriebsmittel

Dynamische  
Simulation

### Reststoffverwertung

- Mineralische Werkstoffe
- Metallische Werkstoffe
- Pflanzen und Böden
- Holz und Papier
- Kunststoffe

- kgCO<sub>2</sub>/d

CO<sub>2</sub>-Bilanz

19

WEBER-Ingenieure



Abbildung 27: Simulationsmodell der Material- und Wertstoffkreisläufe



## 5 Bilanzergebnisse von Kläranlagen und Kommunen

Die oben beschriebene simulationsbasierte Ermittlung liefert CO<sub>2</sub>-Bilanzergebnisse, deren Gegenüberstellung und Gewichtung in Abbildung 9 anschaulich dargestellt wird.

**Wir** stellen die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Bilanz anschaulich dar

80000 EW

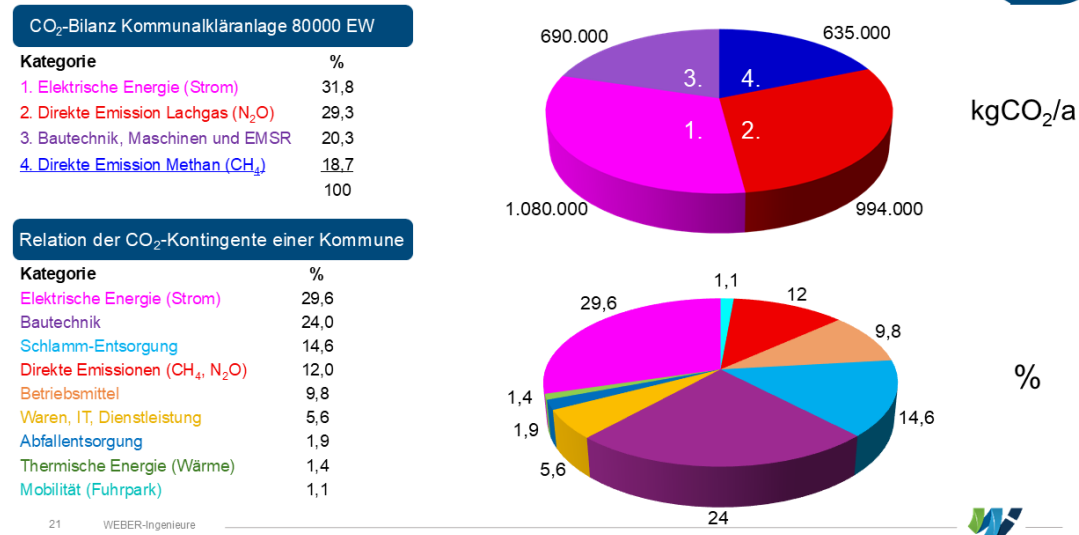


Abbildung 29: Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Bilanz von Kläranlage und Kommune

**Biogene** und **Fossile** Emissionen des Stromverbrauchs der Kläranlage

80000

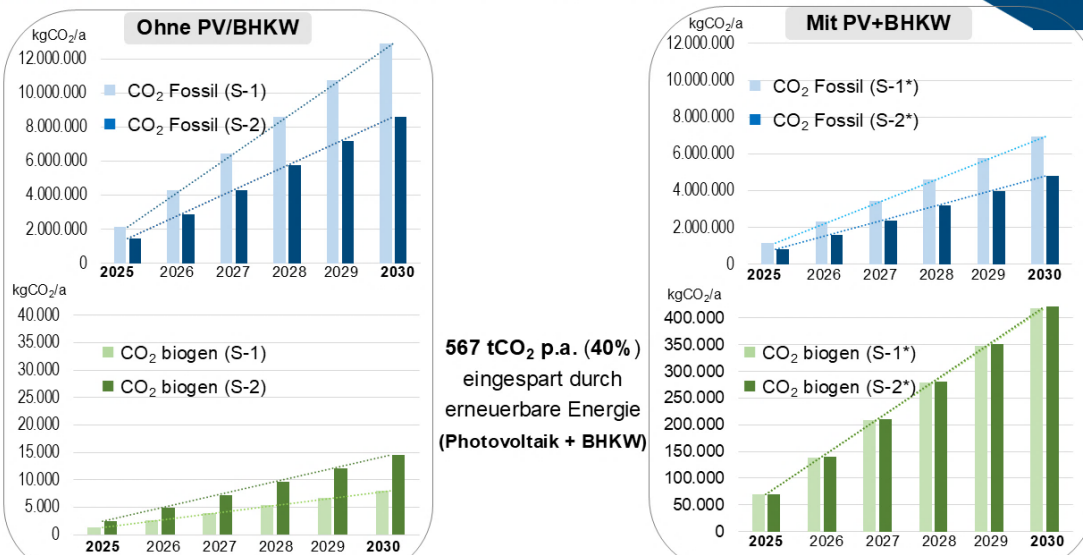


Abbildung 30: Biogene und fossile Emissionen des Stromverbrauchs einer Kläranlage

Biogenes CO<sub>2</sub> wird im Emissionsbericht als nicht klimawirksam bilanziert (SLBW, 2024) und von der CO<sub>2</sub>-Steuer befreit. Das CO<sub>2</sub>-Splitting wird in Abbildung 10 gezeigt. Das entspricht auch dem Brennstoffhandelsgesetz, gilt jedoch nicht für vorgelagerte Emissionen im Rahmen der Produktion, die erfasst werden (Vorkette).

In Abbildung 9 wird gezeigt, dass die direkten Emissionen und der Energieverbrauch mit insgesamt 80% für den größten Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Kläranlage verantwortlich sind. Die restlichen 20% entfallen auf den Materialverbrauch (Bau-, Maschinen & EMSR). Werden die oben dargestellten Emissionen über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, sind die materialbasierten Emissionen auf die jeweilige Nutzungsdauer zu beziehen (aufzuteilen). Es kann festgehalten werden, dass die direkten und energiebasierten Emissionen den Abwassersektor dominieren. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Kläranlage ist ein wichtiger Bestandteil der CO<sub>2</sub>-Bilanz einer Kommune.

## 6 Vorteile und Nutzen der CO<sub>2</sub>-Bilanz einer Kläranlage

Die in dieser Arbeit vorgestellte Herangehensweise liefert nicht nur den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, um die Planung und Umsetzung von Klimaschutzprogrammen zu ermöglichen, sondern zeichnet sich durch eine ganze Reihe von Vorteilen aus:

- Ermittlung der leistungsfähigsten Variante mit den geringsten Umweltauswirkungen → Variantenvergleich
- Entscheidungsgrundlage für die Auswahl von Neubau, Sanierung oder Erweiterung → kommunale und industrielle Bauprojekte
- Einbettung der Sektoren Abwasser und Abfall in die Kommunalplanung
- Intelligente und schonende Nutzung der eingesetzten Ressourcen
- Nationale und internationale Vergleichbarkeit der Bilanzergebnisse
- Bilanzierung der Kosten von Umweltwirkungen über den Lebenszyklus einer Anlage oder eines Projektes → Umweltkostenberechnung

Der Steigerung von Anlagenleistung und Effizienz sowie dem Klimaschutz haben wir schon immer besondere Beachtung geschenkt. Die Anwendung der Dynamischen Simulation repräsentiert nun einen weiteren Schritt auf dem Weg zur Klimaneutralität.



## 7 Literatur

KlimaG BW (2023): „Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg“, GI-Nr. 2129-3, 7523

KMR (2023): „Das Klima-Maßnahmen-Register“, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, 1. Ausgabe, 2023

IPCC (2023): „The Intergovernmental Panel on Climate Change, AR6 Synthesis Report Climate Change“, 2023

ifeu (2023): „Leitfaden Klimaneutrale Kommunalverwaltung Baden-Württemberg“, 2023

DWA-M 230-1 (2022): „Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung – Teil 1: Direkte Treibhausgasemissionen – Messen und Bewerten“, Oktober 2022, 58 Seiten, ISBN 978-3-96862-518-8, 2022

DWA-M 230-2 (2022): „Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung – Teil 2: Motivation und Vorgehen zur Erstellung von CO<sub>2</sub>e-Bilanzen“, Oktober 2022, 39 Seiten, ISBN 978-3-96862-520-1, 2022

DWA-A 131 (2016): „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“, 62. Seiten, ISBN 978-3-88721-276-6, 2016

Henze et al. (1986): „Activated sludge model No. 1, Scientific and Technical Report No. 1“, IAWPRC, London, 1986

DWA-A 216 (2015): „Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, ISBN 978-3-88721-276-6, 2015

SLBW (2024): „Emissionsbericht 2024, Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg“, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2024

**Anschrift des Verfassers:****Dr.-Ing. Stephan Fritsch**

Weber Ingenieure GmbH  
Bauschlötter Straße 62  
D- 75177 Pforzheim

Tel. +49 7231 583 352

Fax: +49 7231 583 100

E-Mail: [stephan.fritsch@weber-ing.de](mailto:stephan.fritsch@weber-ing.de)

# **CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Fällungs- und Flockungsmitteln sowie von Aktivkohlen**

---

Alexander Jereb

INCOPA, Brüssel, Belgien

Donau Chemie AG, Brückl, Österreich

## **1 Einleitung**

In der modernen Abwasserreinigung werden neben biologischen bzw. biochemischen Verfahren auch chemisch-physikalische Verfahren eingesetzt, um die Reinigungsziele der Kläranlagen zu erreichen. So ist die Phosphatelimination mit anorganischen Fällmitteln seit langem erfolgreich im Einsatz. Steigende Anforderungen an die Reinigungsleistung, wie sie beispielsweise in der Neufassung der kommunalen Abwasserrichtlinie festgelegt sind, werden die Bedeutung und den Bedarf an anorganischen Fällungsmitteln erhöhen. Die neue Abwasserrichtlinie ist es auch, die erstmals eine weitergehende Behandlung zur Entfernung von Spurenstoffen vorschreibt. Zur Entfernung dieser Substanzen haben sich im Wesentlichen zwei Verfahren etabliert, wobei der Einsatz von Aktivkohlen eine davon darstellt. Im Kontext der Wasserbehandlung gewinnen Themen wie Dekarbonisierung, Treibhausgasemissionen und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zunehmend an Bedeutung, was sich auch in der neuen Richtlinie widerspiegelt. Letztere gibt unter anderem eine Energieneutralität der Abwasserbehandlung auf nationaler Ebene als Ziel vor. Daher ist eine Erfassung aller direkten und indirekten Quellen für Treibhausgasemissionen auf Kläranlagen sowie deren Quantifizierung erforderlich. Im Folgenden soll der Beitrag der Fällungsmittel zu den Treibhausgasemissionen beleuchtet sowie der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Aktivkohlen erörtert werden.

## 2 Einfluss der Fällung auf die Treibhausgasemissionen

Anhand zweier Studien soll im Folgenden der Einfluss von Fällungsmitteln auf die Treibhausgasemissionen aus der Abwasserbehandlung beschrieben werden: 2023 führte das schwedische Forschungsinstitut IVL eine LCA-Studie (Life Cycle Assessment) für die Produktion der wichtigsten Fällungsmittel durch (Johansson & Liljenroth, 2023). In einer anderen Studie desselben Instituts aus dem Jahr 2020 wurde die Auswirkungen unterschiedlicher Phosphatfällungsvarianten (Vorfällung, Simultanfällung und reine biologische Phosphatentfernung) auf den ökologischen Fußabdruck von Kläranlagen anhand von dynamischen Prozessmodellen berechnet (Rahmberg, Andersson, Lindblom, & Johansson, 2020).

Eine LCA untersucht die Umweltauswirkungen eines Produkts oder Systems während dessen Lebenszyklus. Eine Lebenszyklusanalyse bewertet den Energie- und Ressourcenverbrauch sowie die Emissionen in sämtlichen Lebenszyklusphasen. Die LCA erfasst alle Phasen eines Produkts, von der Materialproduktion bis zum Recycling. Im Rahmen der Untersuchung wurde ein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck erstellt, der die Auswirkungen auf den Klimawandel umfasst.

### 2.1 CO<sub>2</sub>-Bilanz der Fällungsmittel-Produktion

#### 2.1.1 Rahmenbedingungen

Ziel der Studie war es, CO<sub>2</sub>-Bilanzen der Produktion der am häufigsten verwendeten Fällungsmittel zu berechnen, wobei durch Sensitivitätsanalysen die bedeutendsten Einflussgrößen herausgearbeitet werden sollten.

Folgende Produkte wurden erfasst:

- |                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| ▪ Natriumaluminat      | ▪ Eisen(III)Sulfat        |
| ▪ Polyaluminiumchlorid | ▪ Eisen(III)chloridsulfat |
| ▪ Aluminiumsulfat      | ▪ Eisen(III)chlorid       |

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden für jedes Produkt mindestens zwei Produktionswege erfasst. Dies umfasst beispielsweise die Berücksichtigung unterschiedlicher Rohstofftypen, Konzentrationen oder anderer Charakteristika.

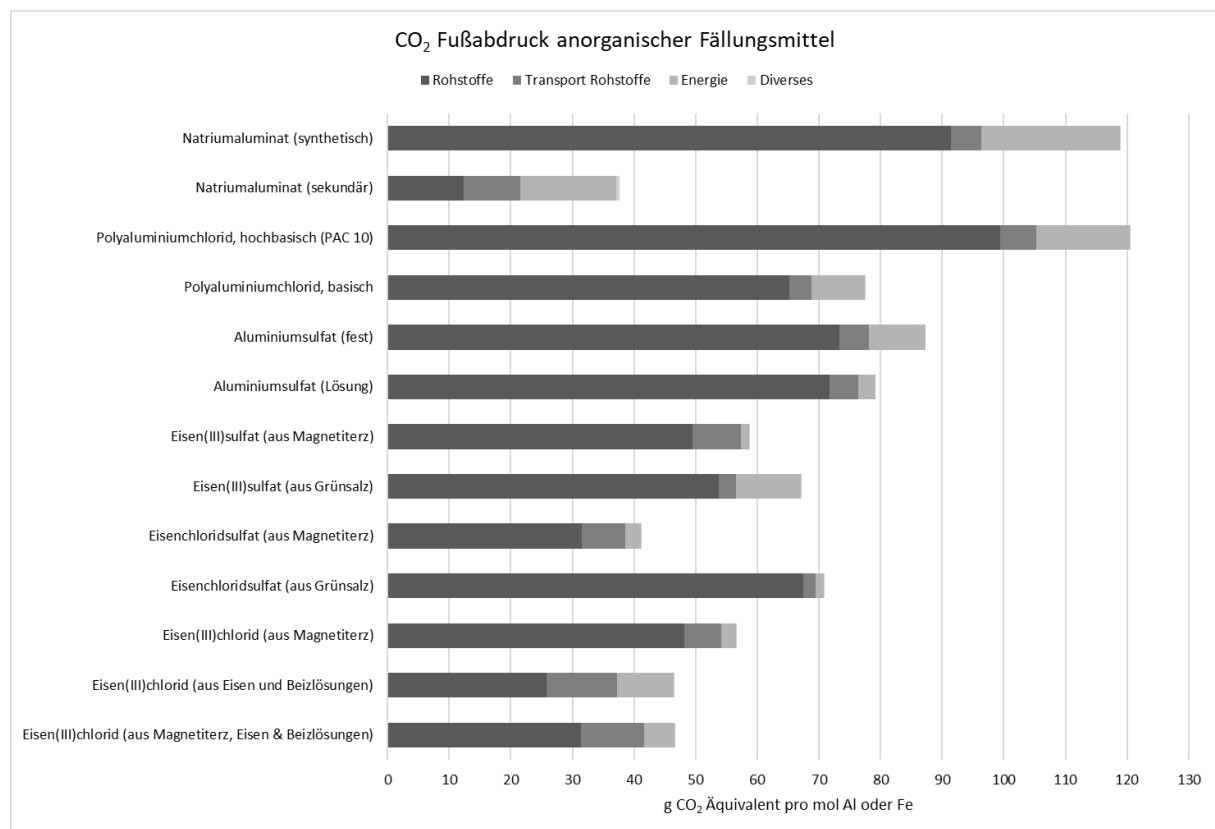
Die Studie basiert auf dem Cradle-to-Gate-Ansatz, welcher die Umweltaspekte von der Rohstoffgewinnung über den Transport zur Produktionsanlage bis hin zur Herstellung des Fällungsmittels berücksichtigt. Die Studie legte den Fokus auf Europa, indem ausschließlich Anlagen von INCOPA-Mitgliedern berücksichtigt wurden. Neben- oder Recyclingprodukte als Rohstoffe wurden unterschiedlich bewertet: während Rohstoffen wie Eisen(II)sulfat als Nebenprodukt der Titandioxidproduktion über einen Schlüssel ein Teil des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Titandioxid zugeordnet wurde, wurden

Recyclingprodukten wie Schrott oder Beizlösungen entsprechend derzeit üblicher Vorgehensweisen kein ökologischer Fußabdruck angerechnet.

## 2.1.2 Ergebnisse

In Anbetracht der vorangehend dargelegten Gegebenheiten resultieren die in Abbildung 1 dargestellten CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke für die zuvor erwähnten Fällungsmittel. Es sei angemerkt, dass die Kategorie "Energie" den Dampf- und Stromverbrauch bei der Herstellung der Produkte umfasst. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Auswirkungen auf den Klimawandel in Gramm Kohlendioxid-Äquivalenten pro Mol Wirkstoff angegeben.

Wie in der Abbildung dargestellt, liegen die berechneten Werte für Aluminiumprodukte bei 40 bis 120 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Mol Aluminium und für eisenbasierte Fällungsmittel zwischen 40 und 70 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Mol Eisen.

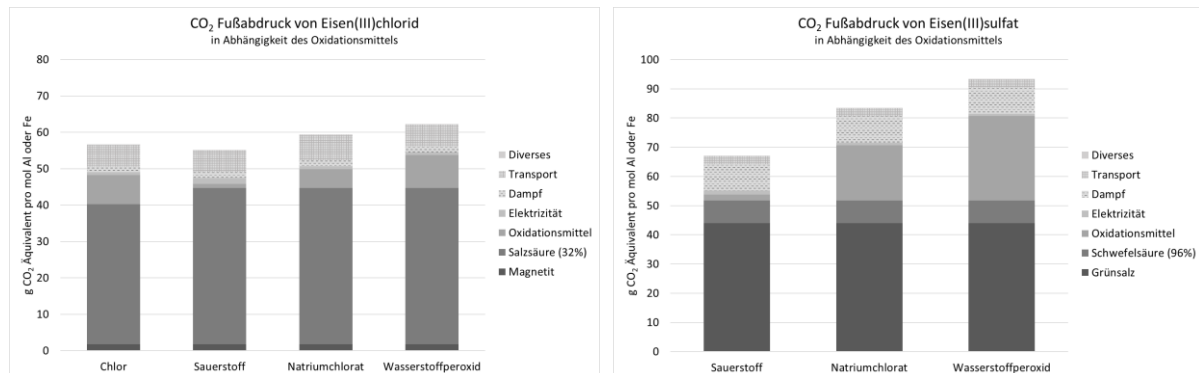


**Abbildung 31 CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke der erfassten Fällungsmittel**

Der größte Anteil der Treibhausgasemissionen ist auf die Produktion der Rohstoffe zurückzuführen. In Konsequenz dessen werden für Fällungsmittel, welche aus Recycling-Rohstoffen hergestellt werden, die geringsten Werte berechnet.

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen erfolgte eine detaillierte Betrachtung ausgewählter Einflussfaktoren. Diesbezüglich sei angemerkt, dass die Auswahl der Oxidationsmittel, welche im Rahmen der Erzeugung eisenbasierter Produkte zum Einsatz gelangen, eine gewisse Relevanz aufweist. Die durchgeführten Berechnungen

ergaben, dass die Oxidation mit Sauerstoff einen geringeren Fußabdruck aufweist als beispielsweise die Anwendung von Wasserstoffperoxid.



**Abbildung 32 CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke bei Anwendung unterschiedlicher Oxidationsmittel**

Der Einfluss des Oxidationsmittels ist umso bedeutender, je höher der Anteil im zu oxidierenden Grundprodukt (beispielsweise Grünsalz) ist. Die Differenzen für aus Magnetit hergestelltes Eisen(III)chlorid sind geringer, da beim Auflösen des Erzes bereits ein signifikanter Anteil des Eisens in dreiwertiger Form vorliegt, was zu einer Reduktion des Oxidationsmittelbedarfs je Mol Eisen führt.

Wie zuvor dargelegt, wird dem Schrott als Recyclingprodukt kein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zugeordnet. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde ein Szenario angenommen, in dem Schrott aus der Primärproduktion verwendet wurde (Prä-Verbraucher-Abfall). Diesbezüglich ist festzuhalten, dass der Post-Verbraucher-Abfall aufgrund der geringeren Qualität zusätzliche Behandlungsschritte erforderlich macht, während der Vor-Verbraucher-Abfall über eine höhere Qualität verfügt. In Konsequenz dessen kann für den prä-verbraucherseitigen Schrott ein ökologischer Fußabdruck angenommen werden. Die Ergebnisse verändern sich dadurch jedoch lediglich um 7–8 % (von 47 auf 50–51 g CO<sub>2</sub> eq pro Mol Eisen).

Im Gegensatz zu den bisherigen Praktiken wurde für das Grünsalz ein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck definiert, wodurch sich eine neue Ausgangslage ergibt. Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte im Vergleich zum Hauptprodukt Titandioxid. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine Aufteilung des ökologischen Fußabdrucks vorgenommen, wobei 3,4 % dem Grünsalz und 96,6 % dem Titandioxid zugeordnet wurden. Die Aufteilung basiert auf Marktdaten. In einer weiteren Sensitivitätsanalyse wurde der ökonomische Verteilungsfaktor um einen Prozentpunkt verändert (von 3,4 % erhöht und gesenkt), um die Auswirkungen kleiner, relativer Preisänderungen zwischen Grünsalz und Titandioxid auf den Kohlenstoff-Fußabdruck zu veranschaulichen. Diese geringfügige Modifikation resultiert jedoch in einer Abweichung beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 20 % (+/-).

## 2.2 Einfluss der Fällungsmittel auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Wasserbehandlung

Wie im vorherigen Abschnitt dargelegt, liegt der ökologische Fußabdruck der Fällungsmittel, in Abhängigkeit vom jeweiligen Produkt, bei 40–120 g CO<sub>2</sub>-eq pro Mol Eisen bzw. Aluminium. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, in welchem Umfang die Produkte zu den Treibhausgasemissionen in der Wasserbehandlung als Fällungs- bzw. Flockungsmittel beitragen. Die Ergebnisse von Studien an Kläranlagen in den Regionen Stockholm, Göteborg und Malmö weisen auf einen ökologischen Fußabdruck der Abwasserbehandlung im Bereich von 200 bis 600 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Kubikmeter Abwasser hin. Dabei ist der wesentliche Beitrag auf direkte Emissionen von Lachgas und Methan zurückzuführen. Der Einfluss der Fällmittel stellt lediglich einen Anteil von ein bis sechs Prozent an den Treibhausgasemissionen dar.

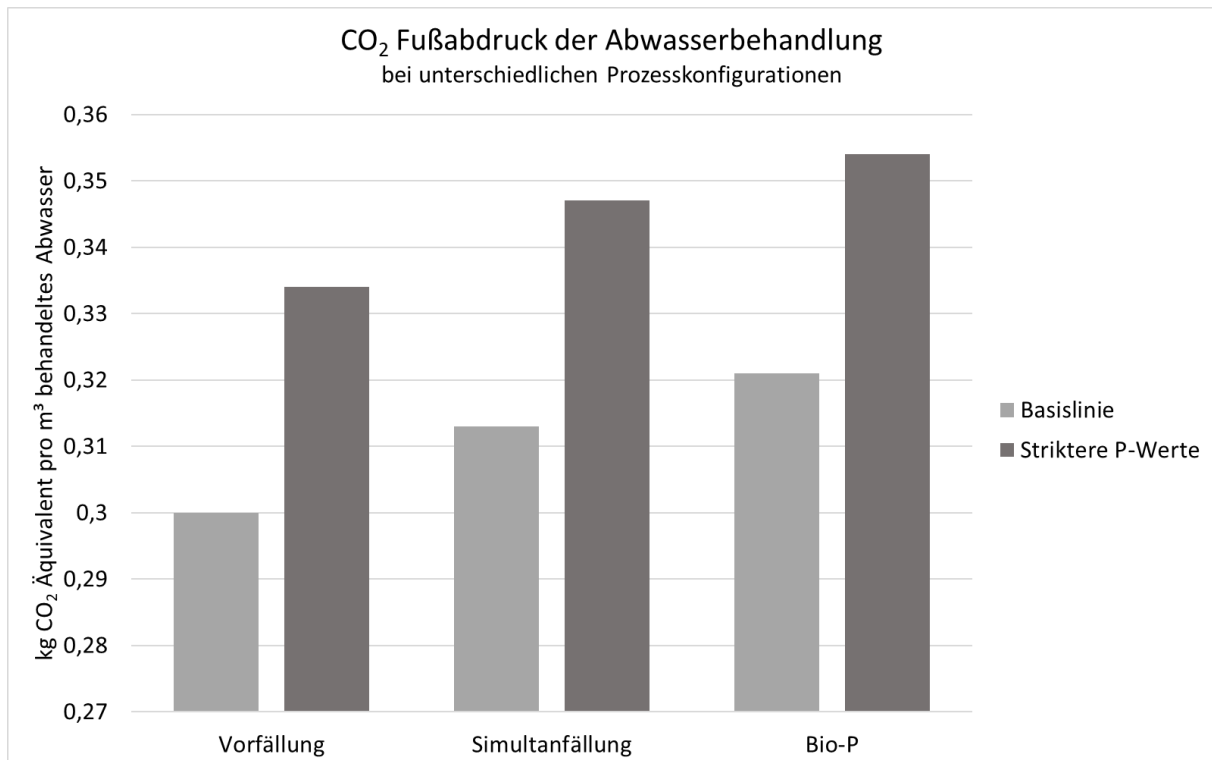
Des Weiteren wurde durch IVL eine LCA-Studie zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck diverser Phosphatfällungsprozesse durchgeführt (vgl. Rahmberg, Andersson, Lindblom & Johansson, 2020). Im Rahmen der Studie wurden die Vorfällung, die Simultanfällung sowie die biologische Phosphorentfernung (Bio-P) bei zwei unterschiedlichen Zielwerten im Ablauf (1 mg P/L („Basislinie“) und 0,3 mg P/L („strikttere P-Werte“)) modelliert. Die Zulaufqualität war für alle Modelle gleich, ebenso die Ablaufwerte für BSB<sub>5</sub> (25 mg/L) und N<sub>ges</sub> (10 mg/L).

Für alle drei betrachteten Phosphatfällungsverfahren wurde dieselbe Anlagenkonfiguration angenommen, bestehend aus:

- |               |                               |
|---------------|-------------------------------|
| 1. Vorklärung | 3. Nachklärung                |
| 2. Belebung   | 4. Anaerobe Schlammbehandlung |

Für das Szenario „Strikttere P-Werte“ wurde zusätzlich ein nachgeschalteter Sandfilter berücksichtigt.

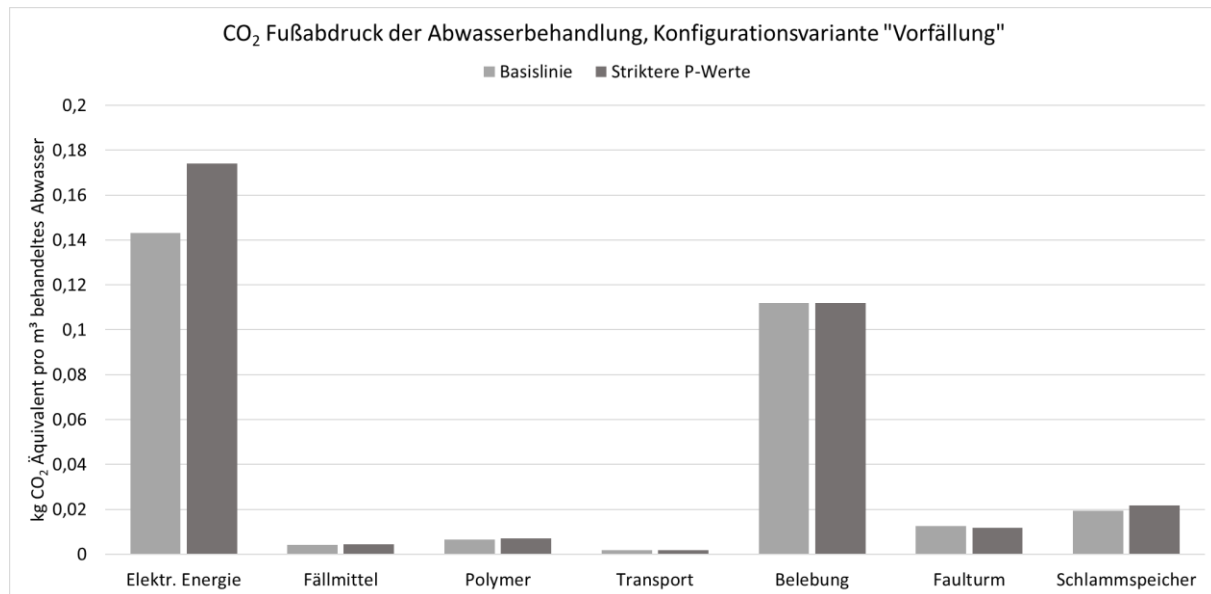
Die Ergebnisse der Modellrechnung sind in Abbildung 3 dargestellt und umfassen die Fußabdrücke der gesamten Abwasserbehandlung unter den oben genannten Rahmenbedingungen und Anlagenkonfigurationen.



**Abbildung 33 CO<sub>2</sub> Fußabdruck für die kommunale Abwasserbehandlung unter Verwendung unterschiedlicher Phosphatfällungsverfahren**

Die Darstellung in Abbildung 3 zeigt, dass die Prozesskonfiguration „Vorfällung“ mit den geringsten Treibhausgasemissionen verbunden ist, während die Abwasserbehandlung mit reiner biologischen P-Entfernung die höchsten Werte aufweist. Die Entlastung der Belebung ist die Ursache für die geringeren Treibhausgasemissionen. Dies hat zum einen zur Folge, dass weniger organische Fracht in die aerobe Behandlungsstufe gelangt, wodurch der Bedarf an Belüftungsenergie und die Lachgasemissionen reduziert werden. Ein weiterer Effekt ist in der Darstellung noch nicht inkludiert: Die in der Vorfällung abgetrennte organische Fracht würde im Faulturm zu einer gesteigerten Biogasproduktion führen, was eine Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zur Konsequenz hätte. Eine Reduktion der Phosphatablaufwerte führt zu einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente für alle drei Verfahren. Der Grund hierfür ist in dem ergänzenden Behandlungsschritt, der Sandfiltration mit zusätzlicher Polymerdosierung, zu finden, wobei nicht die Polymerdosierung zu höheren Werten führt, sondern der zusätzliche Verbrauch an elektrischer Energie. Eine Aufteilung der Treibhausgasemissionen auf einzelne Verursacher zeigt, dass die elektrische Energie für rund die Hälfte des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks verantwortlich ist (vgl. Abbildung 4). Die direkten Emissionen durch Belebung, insbesondere Lachgas und Kohlendioxid, sind für etwas mehr als ein Drittel der gesamten Emissionen der Anlage verantwortlich. Der Anteil der Fällmittel ist für beide Szenarien mit 1,4 % als äußerst gering anzusehen.





**Abbildung 34 Treibhausgasbilanz der Abwasserbehandlung, Prozessvariante „Vorfällung“**

Die Berechnung der elektrischen Energie erfolgte auf Basis eines europäischen Strommix, wobei als Datenbasis die interne Datenbank der LCA-Software GaBi Professional 8.6 (2020) diente. Sofern die elektrische Energie zu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen, wie beispielsweise Wasserkraft, gewonnen wird, kann der Fußabdruck der Abwasserbehandlung auf etwa die Hälfte reduziert werden. Unter Berücksichtigung der internen Nutzung des Biogases als Ersatz fossiler Energieträger lassen sich die Treibhausgasemissionen der Kläranlage um 20 bis 30 % reduzieren. Dabei zeigt sich die größte Verbesserung bei der Vorfällung aufgrund der erhöhten Biogasproduktion.

### 3 Einfluss der Aktivkohle auf die Treibhausgasemissionen

Aktivkohle stellt ein Kohlenstoffmaterial mit einer extrem hohen Porosität dar. Die große innere Oberfläche, die einen Wertebereich von 600 bis 2.100 m<sup>2</sup>/g aufweist, ermöglicht die Adsorption einer Vielzahl von Stoffen aus der Gas- oder Flüssigphase. Dabei handelt es sich um einen physikalischen Prozess, der reversibel ist, was eine Regeneration beispielsweise mit Dampf oder Heißgas erlaubt. Aktivkohlen können aus einer Vielzahl von Rohstoffen hergestellt werden. Als Beispiele seien hier Stein- und Braunkohlen, Holz sowie andere nachwachsende Rohstoffe wie Kokosnussschalen genannt. Die Aktivierung kann auf chemischem Wege erfolgen, beispielsweise durch den Einsatz von Phosphorsäure an unverkohltem Material in Verbindung mit einer nachfolgenden Pyrolyse. In einer weiteren Verfahrensoption besteht die Möglichkeit der Gasaktivierung von bereits verkohltem Material. Diese Methode wird typischerweise in Drehrohr- oder Wirbelschichtöfen bei Temperaturen zwischen 800 und 1000 °C in inerter Atmosphäre mit einem Aktivierungsgas (beispielsweise

Wasserdampf, Kohlendioxid oder Luft) durchgeführt (DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen, 2016). Durch die Aktivierung entsteht die typische Porosität, wobei diese durch den Rohstoff, sowie dem Aktivierungsverfahren und den Aktivierungsbedingungen bestimmt wird. Die gewonnene Aktivkohle wird anschließend auf eine bestimmte Korngrößenverteilung gesiebt (granulierte Kohle, GAK) oder auch vermahlen (Pulverkohle, PAK). Granulierte Aktivkohlen können zudem durch Reaktivierung wiederverwendet werden. Im Rahmen dieses Prozesses erfolgt eine thermische Zerstörung der adsorbierten Substanzen, sodass eine erneute Verwendung des Produktes möglich ist.

Aktivkohlen stellen ein wichtiges Hilfsmittel bei der Gasreinigung sowie der Wasseraufbereitung dar. Der jährliche globale Bedarf an Aktivkohlen belief sich im Jahr 2020 auf etwa 2.000.000 Tonnen, wobei ein signifikantes Wachstum zu verzeichnen ist. Ein beträchtlicher Anteil der weltweit produzierten Aktivkohle (>60 %) wird in Asien und Australien hergestellt und anschließend per Schiff nach Europa importiert. Demgegenüber sind die Reaktivierungsanlagen vor Ort verfügbar.

Der ökologische Fußabdruck der Aktivkohle ist folglich definiert durch die Rohstoffgewinnung und Transport zur Aktivierung, Karbonisierung, Aktivierung, Nachbehandlung sowie den Transport zu den Anwendern. Bei einer umfassenden Betrachtung des Lebenszyklus ist zudem die Reaktivierung sowie die spätere Entsorgung zu berücksichtigen.

Es gibt unterschiedliche Publikationen, die den Fußabdruck der Aktivkohlen in der Abwasserbehandlung beleuchten. Im Rahmen des Projekts „CoAct Integriertes Stadt Land Konzept zur Erzeugung von Aktivkohle und anderen Energieträgern aus Restbiomassen“ in Kooperation mit dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) wurden auch die CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke von Aktivkohlen aus Steinkohle sowie Kokosnussschalen berechnet. Wie in Abbildung 5 dargestellt, weist die auf Steinkohle basierte Aktivkohle in der Produktion einen etwa fünfmal so hohen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf wie Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen. Die dargestellten Summen resultieren aus der Herstellung, Reaktivierung sowie der thermischen Verwertung nicht mehr reaktivierbarer Aktivkohle. Im Zusammenhang mit der Verbrennung ist zu beachten, dass der Kokoskohle als nachwachsender Rohstoff keine CO<sub>2</sub>-Emission zugeordnet wird. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Granulate mehrfach reaktiviert werden können. Im Rahmen der Reaktivierung geht ein Teil der Masse als "Abbrand" verloren, so dass dieser durch Frischkohle, auch als "Make-up" bezeichnet, ersetzt werden muss. Diese Aspekte sind in den Treibhausgasbilanzen erfasst.

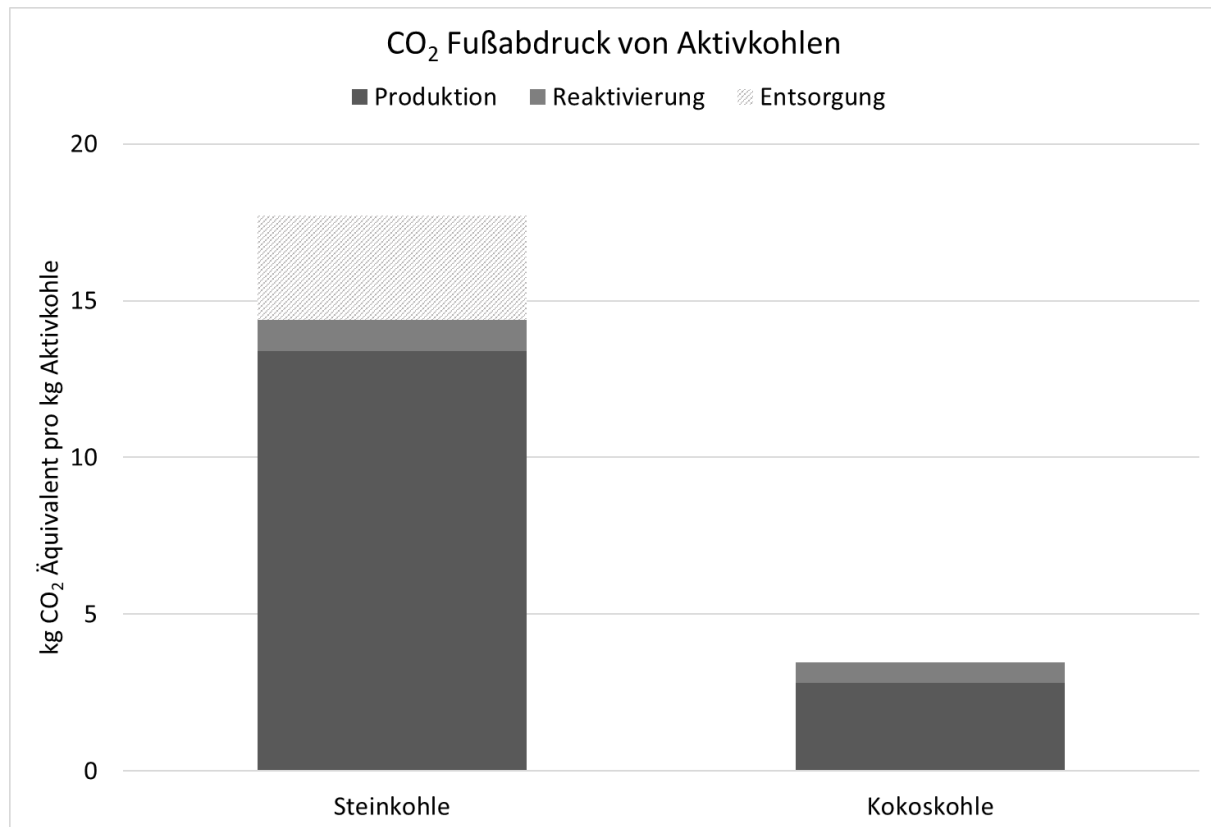


Abbildung 35 – CO<sub>2</sub> Fußabdruck von Aktivkohlen

Unter Berücksichtigung der in Abbildung 6 dargestellten Einsatzmengen in der vierten Reinigungsstufe lässt sich ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Bilanz der Kläranlage ableiten (ohne Berücksichtigung der thermischen Entsorgung). Die ermittelten Werte stimmen mit den im ENVELO-ABSchlussbericht (Bolle & Pinnekamp, 2011) angegebenen Bandbreiten überein, welche sich zwischen -0,045 und 0,368 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup> bewegen. In Gegenüberstellung dazu weist der ENVELO-ABSchlussbericht für eine alternative Ozonbehandlung einen Wertebereich von 0,017 bis 0,311 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup> auf, was im Bereich der Aktivkohle ist. Durch die Reaktivierung kann jedoch eine deutliche

Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks erzielt werden und somit eine signifikante Reduktion gegenüber der Ozonbehandlung.

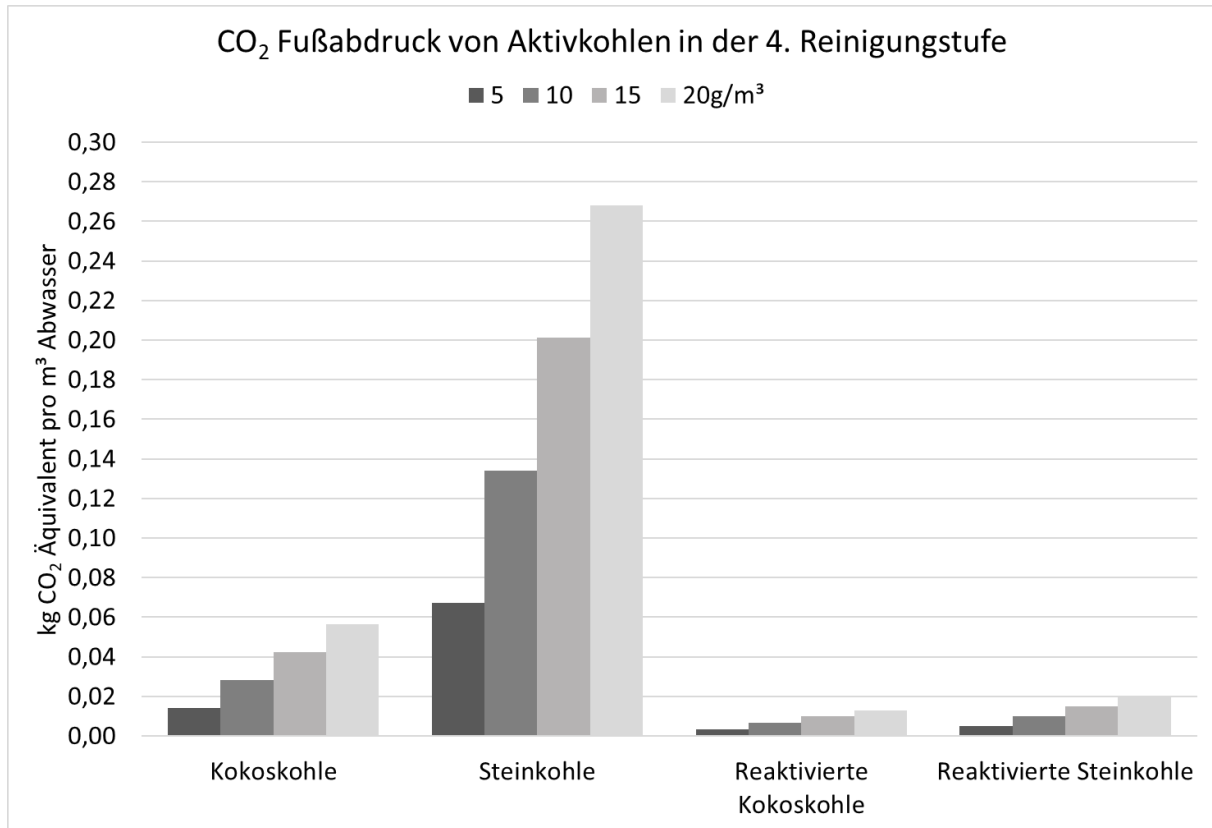


Abbildung 36 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Aktivkohleinsatzes zur weitergehenden Abwasserbehandlung

## 4 Zusammenfassung

Die Berechnung des ökologischen Fußabdrucks ergibt, dass die Herstellung von Fällungsmitteln mit vergleichsweise niedrigen Treibhausgasemissionen verbunden ist. Ein nicht unerheblicher Anteil der Fällungsmittel wird aus Sekundär- bzw. Recyclingstoffen gewonnen. Deren Aufbereitung ist daher im Sinne der Kreislaufwirtschaft sinnvoll, zumal ihre Anwendung einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Wasserqualität der Gewässer leistet. Modellrechnungen belegen zudem, dass die chemische Phosphatfällung zu einer Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz der Abwasserbehandlung führt. Die Anwendung in der Vorfällung ist mit einer Entlastung des Belebtschlammprozesses verbunden, was mit einem niedrigeren Energieverbrauch und verringerten Treibhausgasemissionen aus der biologischen Stufe einhergeht. Des Weiteren wird die Biogasproduktion intensiviert, was einen wesentlichen Beitrag zur geforderten Energieneutralität darstellt.

Im Rahmen einer weitergehenden Abwasserbehandlung finden Aktivkohlen zunehmend Anwendung bei der Spurenstoffentfernung. Durch die Nutzung von Aktivkohlen aus nachwachsenden Rohstoffen, wie beispielsweise Kokosnussschalen oder anderen biogenen Reststoffen, sowie die mehrfache Reaktivierung der Kohlen, kann der Anteil der Aktivkohle und damit der vierten Reinigungsstufe am ökologischen Fußabdruck der Abwasserbehandlung deutlich reduziert werden und stellt so die ökologisch sinnvollste Option für die weitergehende Abwasserreinigung dar.

## 5 Literaturverzeichnis

- Bolle, F.-W., & Pinnekamp, J. (2011). *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase I*. Aachen: Forschungsinstitut für Wasser und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.
- DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen. (2016). Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 63(12), S. 1062 ff.
- Johansson, K., & Liljenroth, A. (2023). *Carbon footprints of inorganic coagulants*. Von INCOPA: <https://www.incopa.org/news/incopa-publishes-an-updated-lca-study-with-ivl/> abgerufen
- Rahmberg, M., Andersson, S., Lindblom, E. U., & Johansson, K. (2020). *LCA analysis of different WWTP processes*. Von INCOPA: <https://www.incopa.org/news/life-cycle-assessment-lca-report/> abgerufen
- Universität Kassel et al. (2018-2023). *CoAct - Integriertes Stadt-Land-Konzept zur Erzeugung von Aktivkohle und Energieträgern aus Restbiomassen*. Abgerufen am 8. 11 2024 von Universität Kassel: [www.uni-kassel.de/forschung/coact/coact](http://www.uni-kassel.de/forschung/coact/coact)

**Anschrift des Verfassers:****DI Alexander Jereb**

Donau Chemie AG  
Klagenfurter Straße 17  
A-9371 Brückl  
Österreich

Tel. +43 4214 2326 – 0

Email: [alexander.jereb@donau-chemie.com](mailto:alexander.jereb@donau-chemie.com)

INCOPA - a Cefic Sector group  
rue Belliard 40  
1040 Brüssel  
Belgien

Tel. +32 2 436 9300

E-Mail: [ppa@cefic.be](mailto:ppa@cefic.be)

# **Wasserwiederverwendung – Ein Lösungsansatz auch in Deutschland**

---

**Dr. Michael Janzen**

**Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband  
Brake**

**Minori Matoba**

**Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband  
Brake**

## **1 Einleitung**

Die Verfügbarkeit von Wasser in quantitativer und qualitativer Hinsicht ist ein Schlüsselfaktor für die Wirtschaft jeder Region der Welt. Aufgrund des Klimawandels und einem wachsenden Wasserbedarf u.a. durch die industrielle Entwicklung, geraten die verfügbaren Wasserressourcen in Teilen Niedersachsens zunehmend unter Druck.

Der Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband (OOWV) versorgt auf einer Fläche von 7.150 km<sup>2</sup> rund eine Million Kunden im Nordwesten Niedersachsens mit Trinkwasser aus Grundwasser. Darunter werden auch Kunden aus Gewerbe, Industrie und Landwirtschaft versorgt, bei denen das Trinkwasser für die verschiedensten Nutzungszwecke verwendet wird. Um die Grundwasserressourcen in der Region zu schützen und den erhöhten Wasserbedarf zukünftig decken zu können, rückt die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser für die Nutzung als industrielles Betriebswasser immer mehr in den Fokus.

Der OOWV sieht vor allem in der Wasserwiederverwendung für Gewerbe und Industrie große Potentiale einer nachhaltigen Wasserversorgung, um so einerseits die Produktionsstandorte zu sichern und andererseits die Grundwasserressourcen in den Wassergewinnungsgebieten zu schonen.

## 2 Wiederverwendung von kommunalem Abwasser

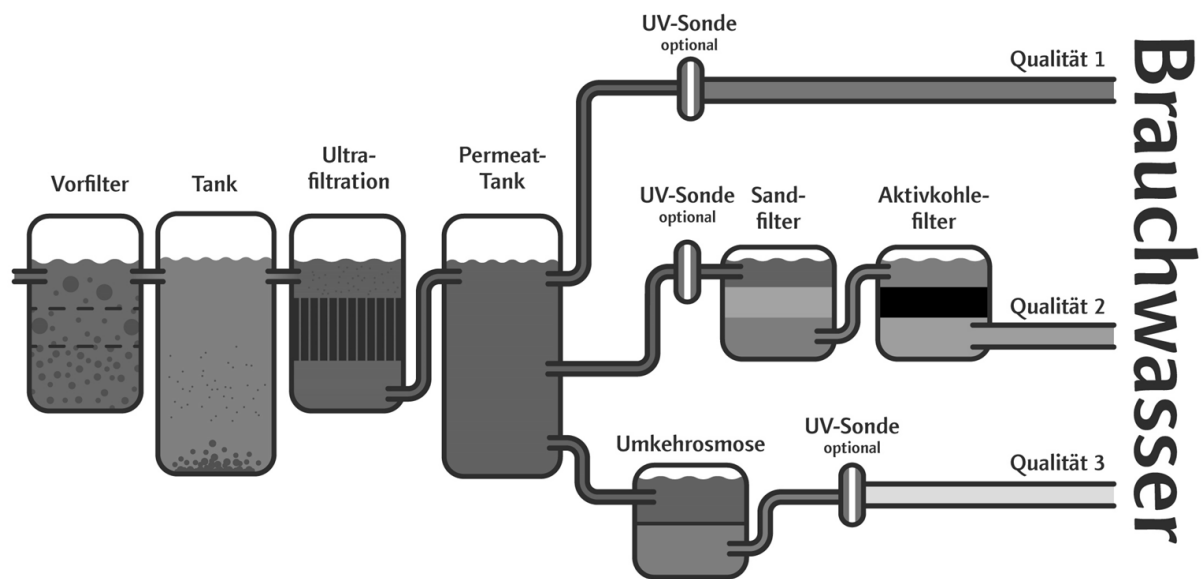
### 2.1 Forschungsprojekt MULTI-ReUse

Um die Möglichkeiten der Wiederverwendung von Wasser zu untersuchen, wurde 2016 das nationale Forschungsprojekt Multi-ReUse gestartet. Die Umsetzung erfolgte am Standort der Kläranlage Nordenham (Niedersachsen) in einer Pilotanlage. Dort besteht mit der Versorgung von wasserintensiven Industriekunden ein konkreter Bedarf für die Wiederverwendung von Abwasser.

Die Qualitätsanforderungen des aufbereiteten Wassers hängen von der Nutzung des Wassers ab, wobei zu beachten ist, dass hochwertige Wasserqualitäten ökonomisch nur dann sinnvoll sind, wenn diese auch tatsächlich erforderlich sind. Tatsächlich werden in Anwendungen in Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft Wasserqualitäten benötigt, die nicht zwingend aus Grund- bzw. Trinkwasservorkommen gewonnen werden müssen. Darüber hinaus werden häufig Qualitäten benötigt, die gar nicht denen des Trinkwassers gemäß Trinkwasserverordnung entsprechen. Diesen „water fit for purpose“-Ansatz verfolgt der OOWV bei seinen Brauchwasserprojekten, um sicher zu stellen, dass nachhaltig und gesamtwirtschaftlich jeder Kunde die optimale(n) Wasserqualität(en) aus der richtigen Wasserressource erhält.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Verfahren getestet um den Kläranlagenablauf für verschiedene Zwecke in erforderlicher Qualität und Menge zu konkurrenzfähigen Preisen aufzubereiten. Ziel war es eine modular aufgebaute Verfahrenskette zur Produktion von definierten Wasserqualitäten und -mengen bereitzustellen, flexibel an verschiedene Nutzungsszenarien anzupassen und dabei innovative Neuentwicklungen und Verfahrenskombinationen zu erproben. Konkret bedeutete dies, dass drei verschiedene Wasserqualitäten mit unterschiedlichem Reinheitsgrad erzeugt wurden. Das Wasser mit der ersten Qualitätsstufe eignete sich für Prozesse bei niedrigem oder sehr hohem Temperaturniveau, z.B. für geschlossene Kühlprozesse oder als Spülwasser. Das Wasser der zweiten Qualitätsstufe war trinkwasserähnlich und eignete sich beispielsweise für offene Kühlprozesse. Das Wasser mit der höchsten Qualitätsstufe wies eine stark reduzierte Ionenkonzentration auf bei einer Leitfähigkeit von etwa 25  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und eignete sich somit als Kesselspeisewasser oder Kühlturmsatzwasser. Ein Fließbild der Verfahrensketten für die drei Wasserqualitäten ist in Abbildung 37 dargestellt.





**Abbildung 37: Prozesskette der Pilotanlage im MULTI-ReUse-Projekt (Illustration: Niedersachsen Wasser Kooperations- und Dienstleistungsgesellschaft mbH)**

Als zuverlässiges Verfahren in dem Bereich der Wasserwiederverwendung hat sich die Membranfiltration bewährt. Ultrafiltrationsmembranen (UF) bilden mit ihren Porengrößen  $< 25$  nm eine sichere Barriere für Partikel und Kolloide sowie für Bakterien und Viren (IWW 2020). Aus diesem Grund bildete sie die erste zentrale Verfahrensstufe für alle drei Wasserqualitäten, um eine Hygienisierung des Wassers zu erreichen. Ein stabiler Betrieb der UF konnte insbesondere durch den Einsatz einer Inline-Koagulation erreicht werden.

Für die zweite Qualitätsstufe wurden nach der UF ein Sand- sowie Aktivkohlefilter geschaltet. Nachfolgend zu einer Filtrationsstufe wird die Adsorption an Aktivkohle bereits in einigen großtechnischen Kläranlagen als sogenannte vierte Reinigungsstufe eingesetzt (DWA 2019) und dient der Entfernung von anthropogenen organischen Mikroschadstoffen.

Zur weiteren Aufbereitung von Kläranlagenablauf für anspruchsvolle Nutzungen, wie z. B. die Aufarbeitung zu vollentsalztem Wasser, ist die Umkehrosmose (UO) gut geeignet und daher in vergleichbaren Fällen im internationalen Umfeld bereits an einigen Stellen eingesetzt (van Houtte und Verbauwhede 2008; Tang et al. 2018). UO-Membranen bilden mit einer nicht-porösen Membran eine Barriere für (fast) alle im Wasser gelösten Stoffe. Die Wirtschaftlichkeit von Membranprozessen wird maßgeblich durch die Vorbehandlung des Wassers beeinflusst. Durch geeignete Verfahren kann die Ausbildung von Verschmutzungen auf den Membranen eingegrenzt werden. Im Falle der Pilotanlage wurde vor der UO Monochloramin hinzudosiert, um so die Bildung von Biofilmen zu limitieren. Da Monochloramin die Membran weitgehend passieren kann sorgte es zusätzlich für eine Depotwirkung im Permeat (IWW 2020).

Als abschließende Desinfizierung wurde des Weiteren in jeder der drei Verfahrensketten eine optionale UV-Sonde vorgesehen.

Die direkte Behandlung von Abwasser ist eine anspruchsvolle Aufgabe, da es an Verdünnung und hydraulischer Verweilzeit im Vorfluter (Umweltpuffer) fehlt. Das Konzept der Mehrfachbarriere garantierte jedoch konstant sicheres Wasser. So konnte am Ende des Projekts im Jahr 2019 gezeigt werden, dass zuverlässig verschiedene Wasserqualitäten erzielt wurden, die in der örtlichen Industrie verwendet werden können.

## **2.2 Vom Forschungsprojekt zur großtechnischen Anlage**

Nachdem mit dem MULTI-ReUse-Projekt erfolgreich gezeigt werden konnte, dass aus dem Ablauf der kommunalen Kläranlage Brauchwasser in der von der Industrie benötigten Qualität hergestellt werden kann, wurde beschlossen in die großtechnische Umsetzung zu gehen. Ein Vorhaben für das es bisher wenige Beispiele in Deutschland gibt.

Basierend auf den Erfahrungen die in vielen Pilotprojekten gesammelt werden konnten, war der Ansatz, in der Umgebung von wasserintensiven Industrien nach alternativen Wasserquellen zu schauen. Aus diesem Grund wurden die Städte Nordenham und Brake für die Realisierung einer großtechnischen Anlage gewählt, da der Ablauf der kommunalen Kläranlage als alternative Wasserressource für die dort ansässigen wasserintensiven Industrien dienen kann. Hinzu kommt, dass der Landkreis Wesermarsch in der sich die beiden Städte befinden kein eigenes Wasserwerk besitzt, sondern durch das Verbundnetz des OOWV versorgt wird. Somit kann durch den Bau der beiden Brauchwasserwerke zukünftig die Versorgungssicherheit im gesamten Verbandsgebiet erhöht werden.

Die Verfahrensketten auf beiden Anlagen basieren auf den getesteten Verfahren des MULTI-ReUse-Projekts und verfolgen den Ansatz eines Multibarrieren-Konzepts. Im ersten Schritt erfolgt eine Vorfiltration zur Entfernung gröberer Partikel um die nachfolgenden UF-Membranen zu schonen. Als nächstes erfolgt eine Flockungsmitteldosierung (FM) um suspendierte und kolloidale Partikel, inklusive Bakterien und Viren, in größere Flocken zu überführen. Diese können dann in der UF abgetrennt werden. Für die Entfernung von gelösten Nährstoffen, Salzen und anthropogenen Stoffen erfolgt dann die UO in Nordenham, bzw. eine Nanofiltration (NF) in Brake. Folgende Qualitätsanforderungen wurden festgelegt:

- Partikelfrei
- Nährstoffarm
- Geringe Konzentration an gelösten Metallen und Salzen
- Gehalt an Härtebildnern entsprechend des OOWV-Trinkwassers
- Chemisch und hygienisch stabil

Beide Anlagen befinden sich zurzeit im Baubeginn und sollen Ende 2025 bzw. Mitte 2026 in Betrieb gehen. Neben der technischen Vorbereitung fanden im Vorfeld viele Gespräche mit den zuständigen Behörden, zukünftigen Abnehmern und politischen Verbänden sowie umfangreiche Informierung der Öffentlichkeit statt.

Die Anlage in Nordenham soll zukünftig 1,1 Mio. m<sup>3</sup>/a Brauchwasser liefern und Trinkwasser einsparen. Dies entspricht dem Trinkwasserbedarf von etwa 24.000 Menschen. Die Investitionssumme für die gesamte Anlage inklusive einer etwa 6,5 km langen Leitung beträgt ca. 17,5 Mio. Euro. Die Kläranlage Nordenham, von der das Wasser entnommen wird, hat eine Größe von 36.000 Einwohnerwerten (EW) und beinhaltet eine mechanische Reinigung (Rechen, Sand- und Fettfang), Schlammkontaktbecken, Vorklärung, Belebung und Nachklärung.

In Brake fällt die Anlage mit 350.000 m<sup>3</sup>/a Brauchwasser kleiner aus. Hier kann der Trinkwasserbedarf von etwa 7.650 Menschen eingespart werden. Die Investitionskosten inklusive des Rohrleitungsbaus betragen ca. 6,3 Mio. Euro. Die kommunale Kläranlage hat eine Größe von 34.000 EW und beinhaltet eine mechanische Vorreinigung (Rechen, Lang- und Sandfang), sowie Belebung und Nachklärung.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt bei der Aufbereitung von geklärtem Abwasser, u.a. unter Nutzung von Membranprozessen, ist die Entsorgung von Konzentraten und Reinigungsabwässern. Die Konzentrate enthalten alle Stoffe, welche von den Membranen aus dem Wasser abgetrennt werden, während die Reinigungsabwässer aus den teils chemisch unterstützten Reinigungen der Membranen entstehen (Nahrstedt et al. 2020). In den Brauchwasserwerken werden die Reinigungsabwässer zu der jeweiligen Kläranlage zurückgeführt und durchlaufen die Klärung. Die Konzentrate werden am Punkt der Kläranlageneinleitung ebenfalls in die Weser eingeleitet. In einer Studie konnte gezeigt werden, dass die Konzentration der einzuleitenden Stoffe bereits an der Einleitungsstelle erheblich gemindert werden und sich die Einleitung schon nach wenigen Metern über weite Teile der Wassersäule verteilt, aufgrund der vorhandenen Grundströmung in der Weser. Im Vergleich zur Einleitung durch die Kläranlage ist bei den meisten Parametern eine Erhöhung der Konzentration zu erwarten, da durch die Membranprozesse eine Aufkonzentrierung erfolgt. Trotz gleichbleibender Frachten bedeutet dies für den Vorfluter, dass eine entsprechend höhere Verdünnung benötigt wird und somit die Größe des Vorfluters entscheidend ist.

Eine Schwierigkeit bei der Beantragung der Direkteinleitergenehmigung ergab sich dadurch, dass es sich bei den Brauchwasserwerken um einen neuen Anlagentyp handelt, für den es keine festgelegten Einleit- und Überwachungswerte gibt.

### 3 Ausblick

Eine große Triebkraft für die Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser stellt die Energiewende und die damit verbundenen Entwicklungen der Wasserstofferzeugung im Verbandsgebiet dar. Wasserstoff ist ein wichtiger Energieträger für die Dekarbonisierung verschiedener Sektoren, allerdings werden dafür große Mengen an Wasser benötigt. Obwohl die benötigten Wassermengen grundsätzlich in Deutschland vorhanden sind variieren Wasserverfügbarkeit, -verbrauch und -qualität sehr stark je nach Standort (Bormann et al. 2020). Um eine Konkurrenz zwischen der Wasserstoffindustrie und der Daseinsvorsorge zu vermeiden, hat der OOWV beschlossen, mittel- und langfristig keine Grundwasserquellen für die Wasserstoffindustrie bereitzustellen. Daher wird derzeit die mögliche Nutzung verschiedener alternativer Wasserressourcen, insbesondere die Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser, analysiert.

### 4 Literatur

- Bormann, H., Gramlich, E., Müller, F., Schröder, M., Vodegel, S., Sievers, M. (2020): Keine Energie ohne Wasser – Zukunftsszenarien und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserwirtschaft unter gravierend veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Abschlussbericht der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Hennef
- DWA (2019): Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung - Verfahrensvarianten, Reinigungsleistung und betriebliche Aspekte. DWA-Themen T1/2019, DWA, Hennef
- IWW, DECHEMA, De.EnCon GmbH, BASF, OOWV, Universität Duisburg-Essen, ZALF, ISOE, LANXESS (2020): Abschlussbericht MULTI-ReUse: Modulare Aufbereitung und Monitoring bei der Abwasser-Wiederverwendung
- Nahrstedt, A., Gaba, A., Zimmermann, B., Jentzsch, T., Krömer, K., Tiemann, Y., Harsanyi, L., Buchta, P., Doelchow, U., Lipnizki, J., Mende, K., Koch, T., Rohn, A. (2020) Reuse of municipal wastewater for different purposes based on a modular treatment concept. Journal of Water Reuse and Desalination, 2020(10.4), 301-316
- Tang, C. Y., Yang, Z., Guo, H., Wen, J. J., Nghiem, L. D., Cornelissen, E. (2018): Potable water reuse through advanced membrane technology. Environmental Science & Technology, 2018(52), 10215-10223
- Van Houtte, E., Verbauwhede, J. (2008): Operational experience with indirect potable reuse at the Flemish Coast. Desalination (218), 198-207

**Anschrift der Verfasser:**

**Dr.-Ing. Michael Janzen**

Oldenburgisch-Ostfriesischer  
Wasserverband  
Georgstraße 4  
D- 26919 Brake

Tel. +49 (173) 2099057  
E-Mail: m.janzen@oowv.de

**Minori Matoba**

Oldenburgisch-Ostfriesischer  
Wasserverband  
Georgstraße 4  
D- 26919 Brake

Tel. +49 (171) 9446394  
E-Mail: matoba@oowv.de



## **Wasserrückgewinnung aus dem Papiergärprodukt zur Wiederverwendung in der Papierfabrik**

---

**Dheeraja Cheenakula<sup>12</sup>**

**Isabel Kuperjans<sup>1</sup>**

**Markus Grömping<sup>1</sup>**

**Silvio Beier <sup>2</sup>**

**<sup>1</sup> Institut NOWUM-Energy, FH Aachen,**

**Campus Jülich Heinrich-Mussmann-**

**Str. 1 52428 Jülich**

**<sup>2</sup> Fakultät Bauingenieurwesen**

**Bauhaus-Universität Weimar**

**Wielandstraße 2, 99421 Weimar**

### **1 Einleitung**

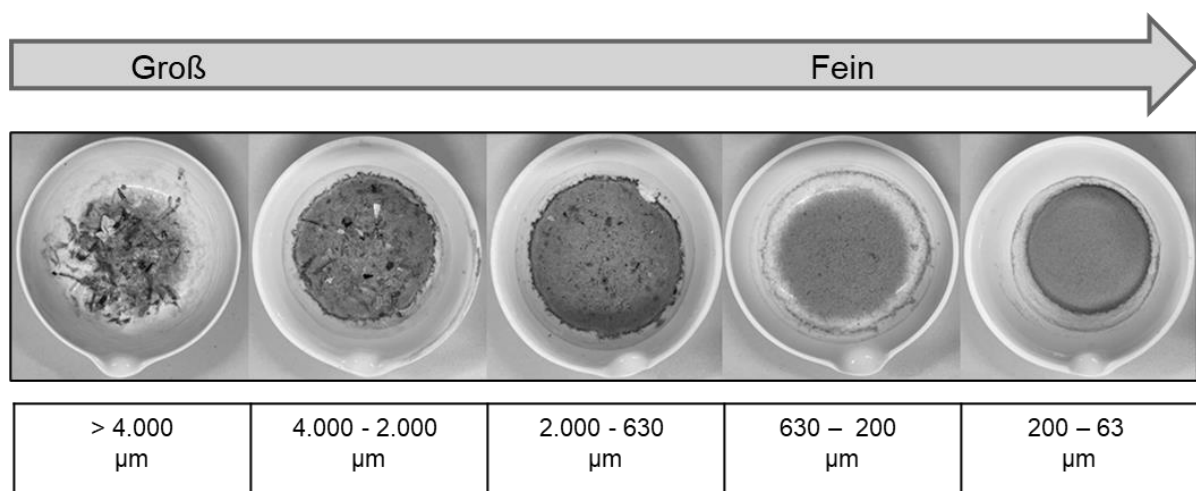
Die Papierindustrie gehört zu den energieintensivsten Sektoren in Deutschland. Der Verbrauch von Papier und Pappe lag 2022 bei 17,9 Mio.t pro Jahr, wobei etwa 83 % des Altpapiers wiederverwendet werden (Umweltbundesamt 2024a). Kurzfaserige Reststoffe wie z.B. Deinking Schlamm, die beim Altpapierrecycling anfallen, werden kostenpflichtig verbrannt. Zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und nachhaltigen Energieversorgung sollen diese Reststoffe künftig für die Biogasproduktion genutzt werden. Bei der Biogasproduktion fallen nährstoff- und wasserreiche Gärprodukte an, die aufgrund von industriellen Schadstoffen und der Düngemittelverordnung (§7 (3) 19 und §8 (4) 9) nicht als Düngemittel in der Landwirtschaft zugelassen sind. Ein ressourcenschonendes Gärproduktmanagement ist entscheidend für die Verbesserung der Energieeffizienz und den Gewässerschutz. Das aktuelle Projekt zielt auf die Entwicklung eines Abwasserbehandlungssystems für die Gärprodukte aus kurzfasrigen Reststoffen ab. Dabei werden Membranfiltrationsverfahren wie Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose nach der Fest-Flüssig Separation der Gärprodukte eingesetzt. Das gereinigte Wasser soll im Altpapierrecyclingprozess wiederverwendet werden, um den Wasserbedarf im Papiersektor weiter zu senken.

## 2 Zusammensetzung des Gärprodukts

Für die Forschung in der vorliegenden Arbeit wurden Gärprodukte von Papierrecyclingreststoffen aus anaeroben Fermentern im Labor- (Gärprodukt 1) und im Pilotmaßstab (Gärprodukt 2) untersucht (Kuperjans et al. 2019; Kuperjans et al. 2022).

### 2.1 Partikelgrößenverteilung

Die Abbildung 38 zeigt die Partikelgrößenverteilung im Gärprodukt 1 aus kurzfasrigen Reststoffen. Das Gärprodukt 1 enthält unterschiedlichen Partikelgrößen in den verschiedenen Fraktionen: 4.000  $\mu\text{m}$  (grob); 4.000 - 2.000  $\mu\text{m}$  (mittel); 2.000 – 630  $\mu\text{m}$  (fein); 630 – 200  $\mu\text{m}$  (sehr fein) und 200 – 63  $\mu\text{m}$  (ultrafein). Die Partikelgrößenverteilung ergab signifikante Fraktionen: kleiner 0,63  $\mu\text{m}$  (6-20%), 0,63-20  $\mu\text{m}$  (38-52%) und größer 20  $\mu\text{m}$  (11-16%). Detaillierte Ergebnisse der Partikelgrößenverteilung für zwei verschiedene Gärprodukte, jeweils mit und ohne chemische Behandlung, sind in der Studie von Cheenakula et al. (2024) verfügbar. Diese Verteilung ist wahrscheinlich auf die heterogene Beschaffenheit der als Ausgangsmaterial für den anaeroben Vergärungsprozess verwendeten Kurzfasern zurückzuführen. Das Gärprodukt enthält sowohl Makroplastik mit Größen größer als 2.000  $\mu\text{m}$  als auch Mikro- und Nanoplastik mit Größen kleiner als 200  $\mu\text{m}$  (Cole et al. 2011; Andrady 2011). Die Anwesenheit von Mikroplastik in Gärprodukt kann Auswirkungen auf die weitere Nutzung des Gärprodukts haben.



**Abbildung 38: Partikelgrößenverteilung im Gärprodukt 1 von kurzfasrigen Reststoffen durch Siebanalyse**

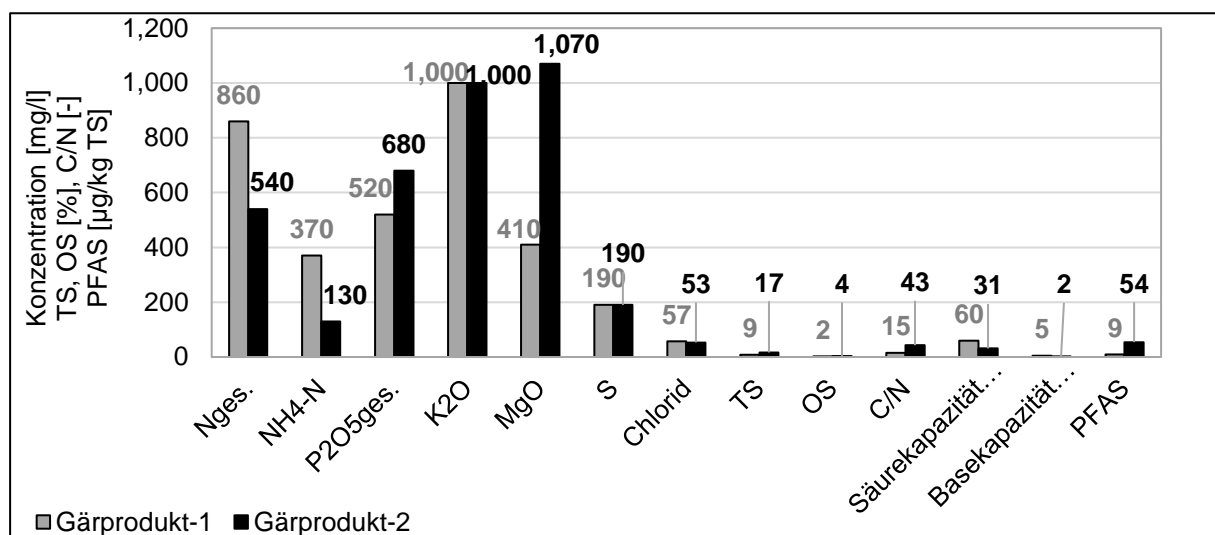
Die Kenntnis der Partikelgrößenverteilung kann zur Planung und Optimierung von Fest-Flüssig-Trennungs- und Gärproduktaufbereitungsverfahren beitragen. Wenn die Partikelgrößenverteilung bekannt ist, kann die am besten geeigneten Trenn- und Behandlungstechnologien und die entsprechenden Betriebsbedingungen ausgewählt



werden. Optimierte Prozesse können zu einer Senkung des Energieverbrauchs und der Betriebskosten führen. Ein effektives Gärproduktmanagement kann zu einer nachhaltigeren Kreislaufwirtschaft beitragen, indem Abfälle reduziert und wertvolle Ressourcen zurückgewonnen werden.

## 2.2 Physikalisch-chemische und biologische Eigenschaften

Die Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die Zusammensetzung der Gärprodukte 1 und 2. Die Analyse umfasst Messungen verschiedener Parameter, darunter Trockensubstanz (TS) nach DIN 38414-6, organische Substanz (OS) nach DIN 38414-11, Gesamtstickstoff (Nges) nach VDLUFA Methodenbuch Band II, Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) nach DIN 38406 - E5-2 1983-10 und Phosphat gesamt ( $\text{P}_2\text{O}_{5\text{ges}}$ ), Kaliumoxid ( $\text{K}_2\text{O}$ ) - Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ), Schwefel (S) und Chlorid nach DIN EN ISO 11885 2009-09, Säurekapazität und Basenkapazität nach DIN 38409-7 (H7-4): 2005-12 und Per- oder Polyfluoralkylverbindungen (PFAS) nach DIN 38414-14 (S14): 2011-08.

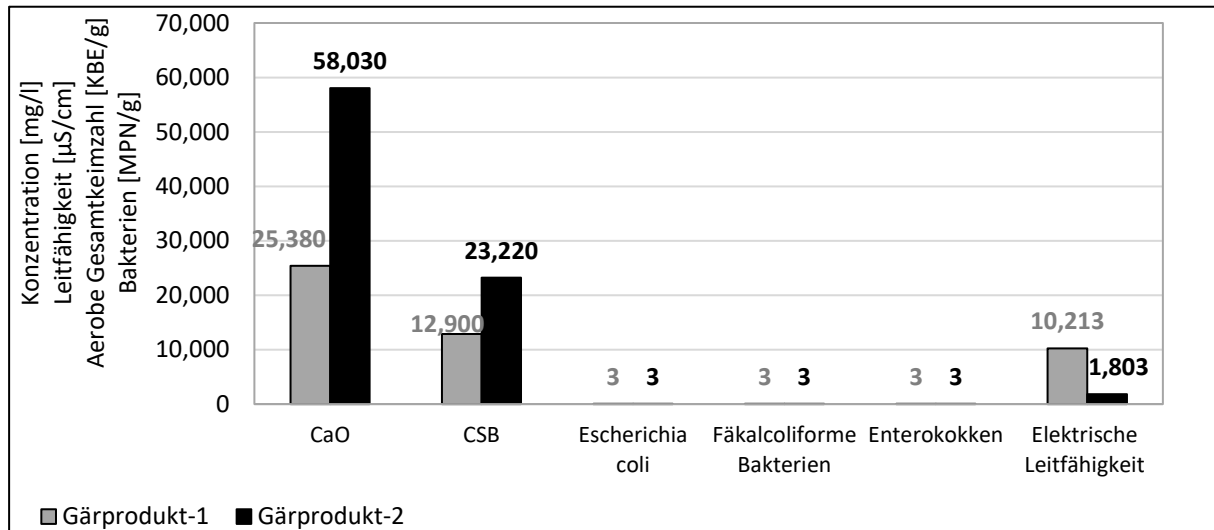


**Abbildung 39: Physikalisch-chemische Eigenschaften von Gärprodukten aus kurzfasrigen Reststoffen**

**Nährstoffe:** Beide Gärprodukten weisen ähnliche Gehalte an Nges. zwischen 860 - 540 mg/l auf. Gärprodukt 1 weist jedoch eine etwas höhere Konzentration an  $\text{NH}_4\text{-N}$  auf. Beide Gärprodukten weisen ähnliche Gehalte an  $\text{P}_2\text{O}_{5\text{ges}}$  zwischen 680 - 520 mg/l auf.

**PFAS:** Beide Gärprodukten enthalten nachweisbare Mengen an PFAS zwischen 9 - 54 µg/kg TS, wobei Gärprodukt 1 etwas höhere Konzentrationen aufweist. Das Umweltbundesamt (2024) meldete PFAS-Hotspots in Deutschland, insbesondere in Verbindung mit Feuerlöschschäumen, Deponien, Metallbeschichtungen und der Papierindustrie, wo PFAS-haltige, wasserabweisende Beschichtungen genutzt wurden. In Rastatt sind etwa 700 Hektar Ackerflächen und das Grundwasser durch PFAS-belasteten Klärschlamm der Papierindustrie verunreinigt, was zu PFAS-

Rückständen in Nutzpflanzen führt. Auch im Hochsauerlandkreis (Arnsberg, Möhnetalsperre) hat die Papierproduktion in Kombination mit Löschschäumen großflächige PFAS-Kontaminationen verursacht, die spezielle Wasserfilter erfordern. Zudem enthalten Gärprodukte aus Kurzfaser-Rückständen relevante Mengen PFAS, die über Dünger in Böden und Grundwasser gelangen.



**Abbildung 40: Weitere Eigenschaften von Gärprodukten aus kurzfasrigen Reststoffen**

Die Papierindustrie hat somit maßgeblich zur PFAS-Belastung beigetragen, sowohl direkt als auch über die Nutzung ihrer Abfallstoffe in der Landwirtschaft. Auch in Gärprodukten aus kurzfasrigen Reststoffen wurden erhebliche Mengen an PFAS in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen. Das Vorhandensein von PFAS in beiden Gärprodukten rechtfertigt weitere Untersuchungen.

**Feststoffe und Organik:** Gärprodukt 2 weist im Vergleich zu Gärprodukt 1 einen etwas höheren TS- (9 - 17%) und OS-Gehalt (2 - 4%) auf. Beide Gärprodukten enthalten CSB Mengen zwischen 12.000 – 23.000 mg/l, wobei Gärprodukt 2 einen etwas höheren CSB-Wert aufweist, was auf eine höhere organische Belastung hinweist.

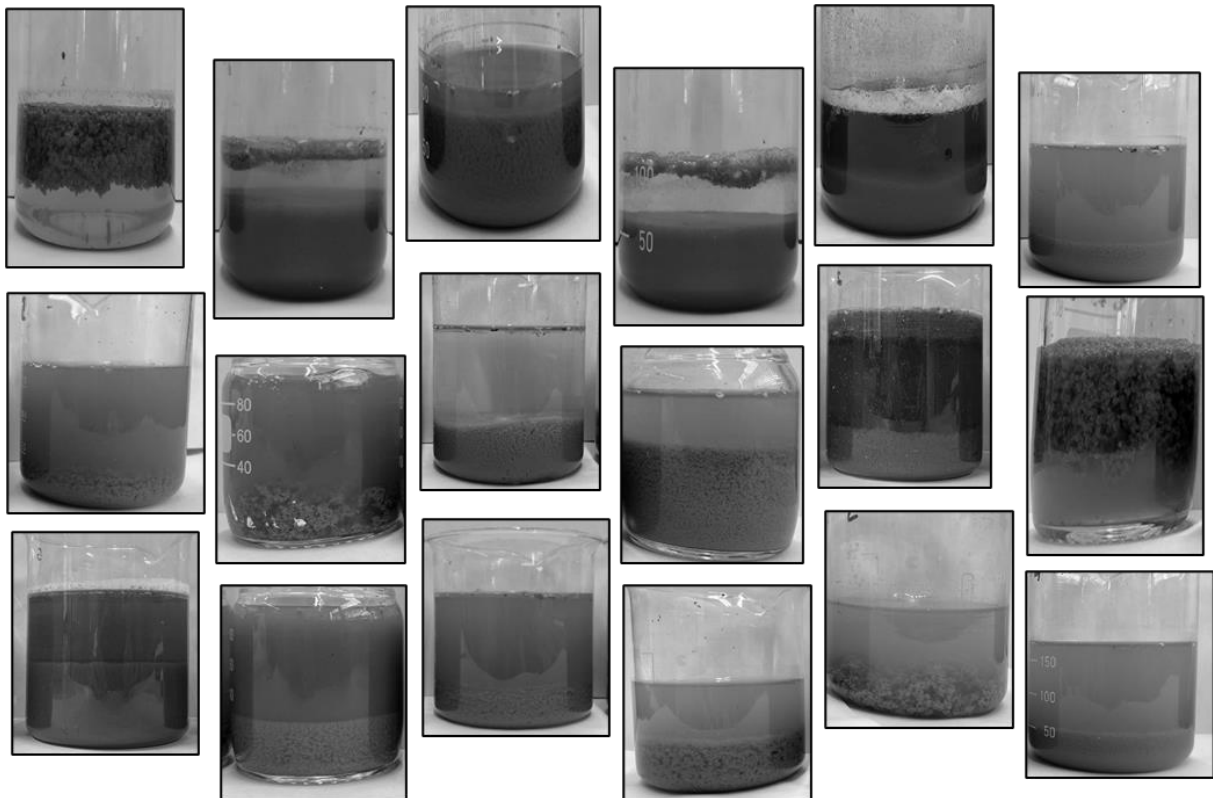
**Elektrische Leitfähigkeit:** Eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit in Gärprodukten, die auf höhere Konzentrationen gelöster Salze und Ionen hinweist, kann bei der Rückführung der Abwässer in den Papierherstellungsprozess zu verschiedenen Problemen wie z.B. Veränderungen der Fasereigenschaften, Maschinenproblemen, Beeinträchtigung der Papierqualität oder Umweltproblemen führen.

Um diese Probleme zu vermeiden, sollten Gärprodukte durch Fest-Flüssig-Separation behandelt werden. Anschließend kann die flüssige Phase weiter aufbereitet werden, um sie wieder im Produktionsprozess zu nutzen. Diese Vorgehensweise reduziert bei geeigneter Technik die Salz- und Ionenbelastung, minimiert Ablagerungen und Korrosionsschäden, verbessert die Papierqualität und verringert Umweltrisiken wie Eutrophierung und Salzablagerungen.

### 3. Gärproduktentwässerung

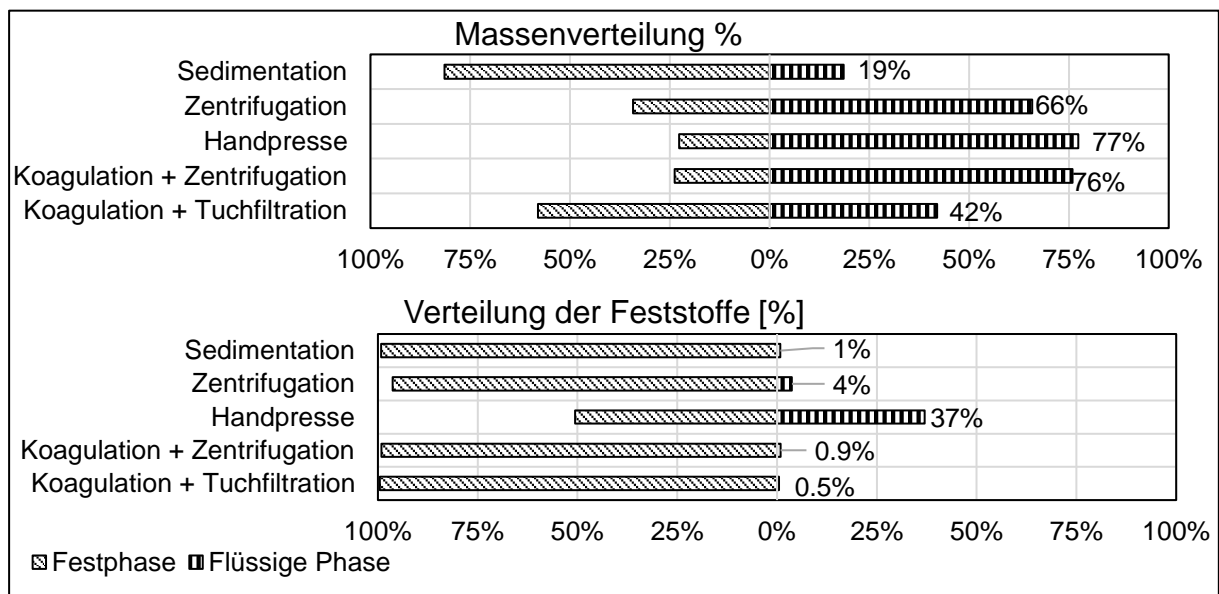
Im Rahmen der Vorversuche zur Gärproduktentwässerung wurde optisch der Einfluss von Koagulations- und Flockungsmitteln auf die Fest-Flüssig-Separation von Gärprodukt untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Kombinationen und Dosieraten dieser Chemikalien getestet. Abbildung 41 zeigt einen Eindruck von den Vorversuchen zur Gärproduktentwässerung mit chemischen Behandlungen.

Es wurden deutliche Unterschiede in der Wirksamkeit der verschiedenen Koagulations- und Flockungsmittel beobachtet. Aus der Abbildung 41 geht es hervor, dass einige Kombinationen zu einer klaren Trennung der festen und flüssigen Phasen führten, während andere keine oder nur eine unzureichende Trennung ermöglichten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswahl der geeigneten Koagulations- und Flockungsmittel sowie deren optimale Dosierung für eine erfolgreiche Entwässerung von Gärprodukt entscheidend sind. Die unterschiedlichen Effekte der verschiedenen Chemikalien können auf die folgenden unterschiedlichen Faktoren zurückgeführt werden: (a) Chemische Eigenschaften der Flockungsmittel: Die chemische Struktur der Flockungsmittel beeinflusst ihre Fähigkeit, die kolloidalen Partikel im Gärprodukt zu destabilisieren und zu verbinden; (b) Eigenschaften des Gärprodukts: Die Zusammensetzung des Gärprodukts wie z.B. der Gehalt an organischen Stoffen und Feststoffen kann die Wirksamkeit der Flockungsmittel beeinflussen; (c) Dosierung der Flockungsmittel: Eine unzureichende oder übermäßige Dosierung kann die Flockenbildung beeinträchtigen.



**Abbildung 41: Vorversuche zur Fest-Flüssig-Separation des Gärprodukts durch chemische Behandlungen**

Die Abbildung 42 zeigt die Massenverteilung und die Verteilung von Feststoffen im Gärprodukt und in der Flüssigphase unter Verwendung verschiedener Separationsmethoden: 1. Sedimentation, 2. Zentrifugation, 3. Handpresse, 4. Koagulation + Zentrifugation und 5. Koagulation + Tuchfiltration.



**Abbildung 42: Massenverteilung und Verteilung der Feststoffe bei der Fest-Flüssig-Separation von Gärprodukten**

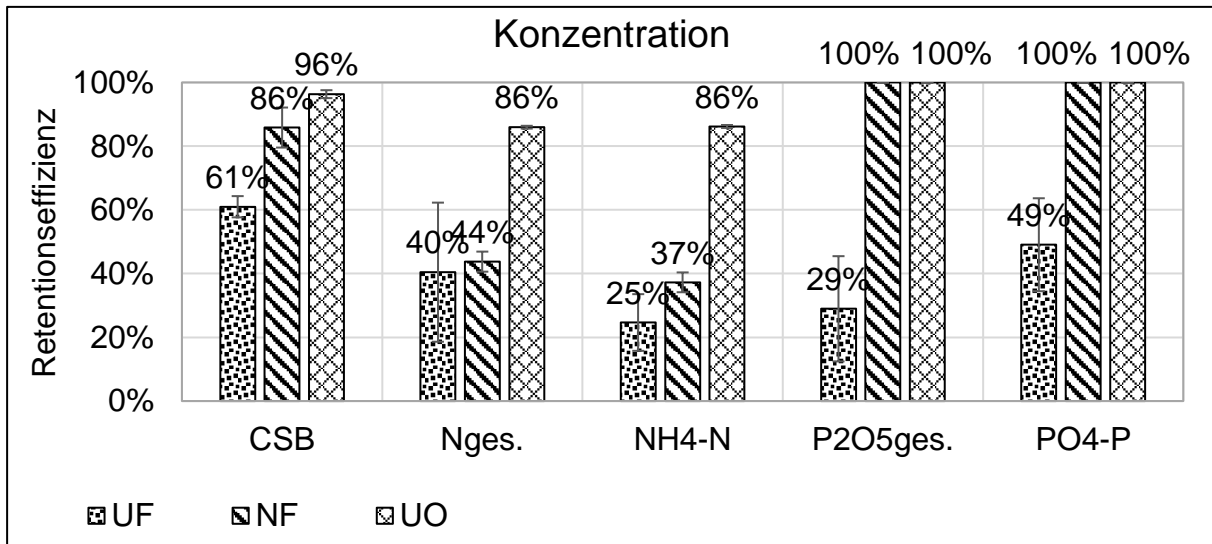
Massenverteilung: Die Handpresse und die Koagulation in Kombination mit der Zentrifugation erzielten die höchste Feststoffabtrennung und sorgte dafür, dass vom unentwässerten Gärprodukt 76-77 % nach der Entwässerung als flüssige Phase vorlagen.

Feststoffverteilung: Allerdings führt die Handpresse auch zu einer höheren Konzentration von Feststoffen in der flüssigen Phase (bis zu 37 %), was für die nachgeschaltete Behandlung der flüssigen Phase durch Membranfiltration nicht geeignet ist. Die Koagulation in Kombination mit der Zentrifugation führt zu der geringsten Feststoffverteilung von nur 0,9 % in der flüssigen Phase. Obwohl die Sedimentation im Hinblick auf den Energieverbrauch im großen Maßstab vergleichsweise gering ist, erweist sich die Sedimentation als die am wenigsten effektive Methode, da sie in der vorliegenden Arbeit nur eine geringe Feststoffentfernung erzielt. Der Feststoffgehalt in der abgetrennten flüssigen Phase des Gärprodukts hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung und Effizienz von nachgeschalteten Membranfiltrationsverfahren. Die hohen Feststoffgehalte in der flüssigen Phase des Gärprodukts nach der Phasentrennung können zu Membranverstopfung, Membranverschmutzung, Membranbeschädigung führen.

Schwebende Feststoffe können die Poren der Membran verstopfen, was zu verringerten Filtrationsraten und erhöhtem Energieverbrauch führt. Organische Stoffe und andere Bestandteile im Gärprodukt können die Membranoberfläche verschmutzen, wodurch die Permeabilität verringert und der Reinigungsbedarf erhöht wird. Die abrasive Wirkung von Feststoffpartikeln kann die Membranoberfläche beschädigen, was zu einer verkürzten Lebensdauer und erhöhten Betriebskosten führt. Daher ist es wichtig, die Menge der in der abgetrennten Flüssigphase vorhandenen Feststoffe zu minimieren. Ein niedriger Feststoffgehalt in der flüssigen Phase kann zu höheren Filtrationsraten und einem erhöhten Durchsatz führen. Dies kann weiter die Reinigungsfrequenz der Membranen reduzieren. Eine sauberere Membranoberfläche kann die Reinigungsfrequenz verringern, was zu geringeren Betriebskosten und Ausfallzeiten führt.

## **4. Membranfiltration**

Die flüssige Phase des aus der Koagulation mit gleichzeitiger Zentrifugation entwässerten Gärprodukts wurde mit Membranfiltrationen wie Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose (UO) einzeln behandelt. Die Abbildung 43 zeigt die Retentionseffizienzen der verschiedenen Membranfiltrationstechniken für verschiedene Nährstoffe im Gärprodukt. Die Ergebnisse zeigen, dass die verschiedenen Membrantechniken unterschiedlich effektiv bei der Rückhaltung/Retention von Nährstoffen sind.



**Abbildung 43: Nährstoffretentionseffizienz von Ultrafiltration, Nanofiltration und Umkehrosmose bei der Behandlung der flüssigen Phase von Gärprodukten aus kurzfasrigen Reststoffen**

Die UF-Membran zeigt eine Retentionseffizienz für CSB von 61%, Nges. von 40%, NH<sub>4</sub>-N von 25%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ges. von 29% und PO<sub>4</sub>-P von 49%. Die UF-Membran zeigt eine hohe Retentionseffizienz für CSB, während die Retention von Nges., P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ges. und PO<sub>4</sub>-P geringer ist und von NH<sub>4</sub>-N am geringsten ist. Dies bestätigt, dass die UF vor allem organische Verbindungen effektiv zurückhält, während gelöste Ionen wie Ammonium und Phosphat permeieren.

Die NF-Membran zeigt eine insgesamt höhere Retentionseffizienz als die UF. Für CSB (86%), Nges. (44%) und NH<sub>4</sub>-N (37%) sind die Retentionen vergleichbar oder leicht erhöht. Die größte Verbesserung zeigt die NF bei P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ges. und PO<sub>4</sub>-P mit einer Retention von 100%. Dies bestätigt die Fähigkeit der NF, sowohl organische als auch anorganische Verbindungen zurückzuhalten. Die NF-Membran hat kleinere Poren als die UF und kann zusätzlich zu Partikeln auch einige gelöste Ionen zurückhalten. Die Retention von Ionen hängt von ihrer Ladung, Größe und der spezifischen Membran ab.

Die UO-Membran zeigt die höchste Retentionseffizienz für alle untersuchten Nährstoffe. Mit Retentionen von über 86% bis zu 100% ist dies eine sehr effektive Methode zur Entfernung von gelösten Stoffen, einschließlich Nährstoffen. Die UO-Membran hat die kleinsten Poren und hält nahezu alle gelösten Stoffe zurück.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Membranfiltration eine vielversprechende Technologie zur Nährstoffrückgewinnung aus Gärprodukt ist. Die Wahl der geeigneten Membrantechnologie hängt von den spezifischen Anforderungen und Zielen ab. Die UF-Membran ist eine gute Wahl, wenn die Entfernung von organischen Stoffen und gelöstem Stickstoff im Vordergrund steht. Sie ist eine relativ kostengünstige und energieeffiziente Technologie. Wasserqualität zur Wiederverwendung ist jedoch durch UF in der derzeitigen Arbeit nicht zu erreichen. Die NF-Membran bietet eine höhere

Retentionseffizienz für eine breitere Palette von Nährstoffen, einschließlich P. Sie ist jedoch in der Regel energieintensiver und teurer als die UF. Die UO-Membran bietet die höchste Retentionseffizienz für alle Nährstoffe, aber sie ist auch die energieintensivste und teuerste Technologie.

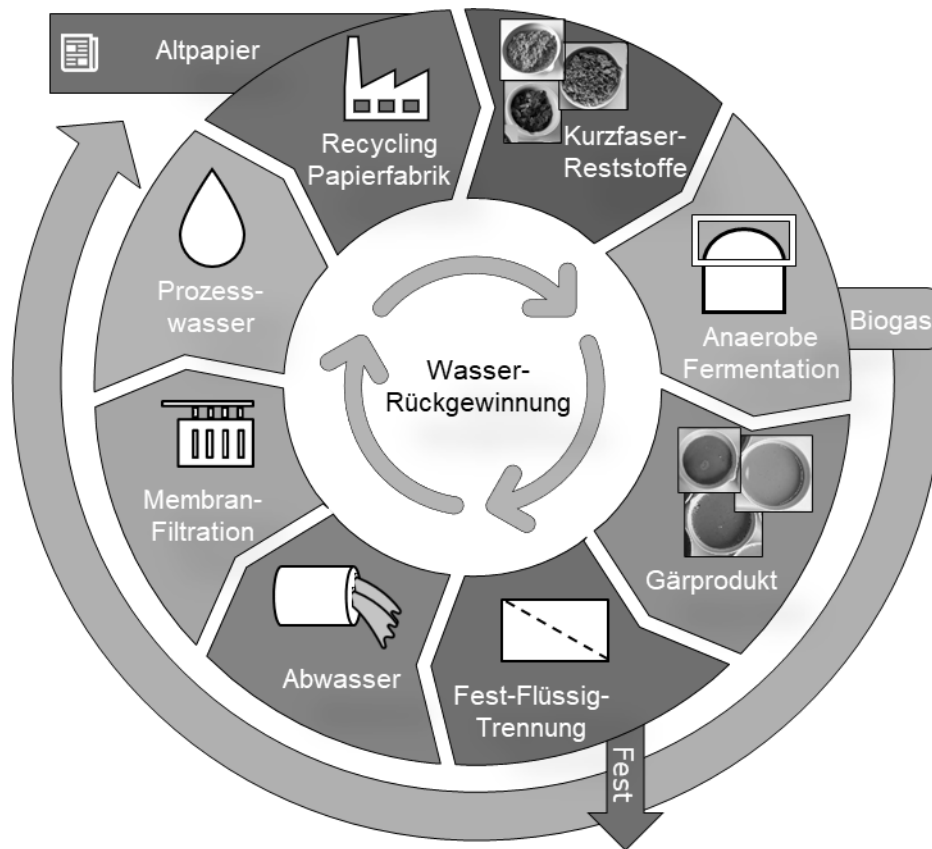
Die Wahl der Membrantechnologie sollte auch unter Berücksichtigung der Wasserqualität des Permeats getroffen werden. Für die Wiederverwendung des behandelten Wassers bzw. des Permeats in den Papierherstellungsprozess müssen die Anforderungen an die Wasserqualität erfüllt werden. Dies beinhaltet insbesondere die Kontrolle der folgende Parameter: pH-Wert, CSB, Nges.,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\text{ges.}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , Leitfähigkeit, TDS, Härte, Farbe und Trübstoffe. In der vorliegenden Arbeit zeigt die UO jedoch deutliche Vorteile bei der Erreichung der für die Wiederverwendung in Papierfabriken erforderlichen Wasserqualitätsstandards.

## 5. Fazit

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die Kreislaufwirtschaft im Bereich des Altpapierrecyclings und Abwasserbehandlung ein vielversprechender Ansatz zur Ressourcenschonung und zum Umweltschutz ist (Abbildung 44). Durch die Kombination von Recycling, anaerober Vergärung und Membranfiltration mit vorgeschalteter Phasentrennung des Gärprodukts können wertvolle Nährstoffe aus dem Gärprodukt der kurzfasrigen Reststoffe zurückgewonnen und das Abwasser zur Wiederverwendung aufbereitet werden.

Gärprodukte aus kurzfasrigen Reststoffen weisen eine weite Partikelgrößenverteilung auf. Gärprodukte aus kurzfasrigen Reststoffen enthalten Mikroplastik und Makroplastik.

Die Fest-Flüssig-Trennung ist ein wichtiger Schritt bei der Aufbereitung von Gärprodukt. Die Kombination von mechanischen Verfahren bzw. Zentrifugation mit chemischen Verfahren wie Koagulation kann eine effektive Trennung ermöglichen.



**Abbildung 44: Wasserrückgewinnung aus dem Papiergärprodukt zur Wiederverwendung in der Papierfabrik**

Die Membranfiltration ist eine vielversprechende Technologie zur Nährstoffrückgewinnung und Wasseraufbereitung. Die Wahl der geeigneten Membrantechnologie (UF, NF, UO) hängt von den spezifischen Anforderungen ab. UO ist geeignet für die Entfernung von gelöstem, sowie an- und organischer Stoffe.

Das behandelte Wasser aus der Membranfiltration kann unter bestimmten Bedingungen wieder in den Papierherstellungsprozess zurückgeführt werden. Dabei müssen die Anforderungen an die Wasserqualität, insbesondere hinsichtlich der Salzkonzentration, der organischen Belastung und der pH-Wert, erfüllt werden.

Um die Membranfiltration zur Wasserrückgewinnung aus dem Gärprodukts der kurzfasrigen Reststoffe im Industriemaßstab realisieren zu können, sollten folgende Inhalte noch geklärt werden: Optimierte Membran-Reinigungsstrategie, Prozessstabilität, Zusammenspiel mit anderen Technologien und Lebenszyklusanalyse des Konzepts ‚Wasserkreislaufschließung‘.



## 6. Literatur

Andrady, Anthony L. (2011): Microplastics in the marine environment. In *Marine pollution bulletin* 62 (8), pp. 1596–1605. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.

Cheenakula, Dheeraja; Hilmi, Rida; Semchuk, Ivan; Pettrak, Jürgen; Kuperjans, Isabel; Grömping, Markus; Beier, Silvio (2024): Investigation of particle size distribution and ultrafiltration of digestates from short-fibre residues in paper mills. In *Water Reuse*, Article jwrd2024073. DOI: 10.2166/wrd.2024.073.

Cole, Matthew; Lindeque, Pennie; Halsband, Claudia; Galloway, Tamara S. (2011): Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. In *Marine pollution bulletin* 62 (12), pp. 2588–2597. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025;:contentReference[oaicite:0]{index=0}&#8203;:contentReference[oaicite:1]{index=1}.

Kuperjans, Isabel.; Grömping Markus.; Krafft, Simone., Paulsen, Svea (2019): Project Re-Papier. Project period: 2016-2019, Grant: EFRE-0800081/ EU-1-1-014A. With assistance of PlanET Biogastechnik GmbH, Ministry of Economics, Industry, Climate Protection and Energy of the State of North Rhine-Westphalia, European Union. Institute NOWUM-Energy, FH Aachen University of applied sciences. Available online at <https://www.fh-aachen.de/forschung/institute/nowum/forschung-und-entwicklung-am-institut-nowum-energy/bioenergie-und-bioressourcenmanagement/re-papier>.

Kuperjans, Isabel.; Grömping Markus.; Krafft, Simone., Paulsen, Svea., Dheeraja, Cheenakula (2022): Project Plus Re-Papier. Project period: 01.07.2019-31.12.2022, Grant: KESW-1-1-011A. With assistance of PlanET Biogastechnik GmbH, Ministry of Economics, Industry, Climate Protection and Energy of the State of North Rhine-Westphalia, European Union. Institute NOWUM-Energy; FH Aachen University of applied sciences. Available online at <https://www.fh-aachen.de/forschung/institute/nowum/forschung-und-entwicklung-am-institut-nowum-energy/bioenergie-und-bioressourcenmanagement/plus-re-papier>.

Umweltbundesamt (2024a): Altpapier. Available online at <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#vom-papier-zum-altpapier>.

Umweltbundesamt (2024b): PFAS excessively high in blood of children and adolescents in Germany. Available online at <https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/pfas-excessively-high-in-blood-of-children>.

**Anschrift der VerfasserInnen:**

**Dheeraja Cheenakula, M.Sc.**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Silvio Beier**

**Prof. Dr.-Ing. Isabel Kuperjans**

**Prof. Dr.-Ing. Markus Grömping**

Institut NOWUM-Energy

Fakultät Bauingenieurwesen

FH Aachen, Campus Jülich

Bauhaus-Universität Weimar

Heinrich-Mussmann-Str. 1

Wielandstraße 2

52428 Jülich

99421 Weimar

Tel. +49 241 6009 53547

Tel. +49 3643 584658

E-Mail: [cheenakula@fh-aachen.de](mailto:cheenakula@fh-aachen.de)

E-Mail: [silvio.beier@uni-weimar.de](mailto:silvio.beier@uni-weimar.de)

E-Mail: [kuperjans@fh-aachen.de](mailto:kuperjans@fh-aachen.de)

E-Mail: [Groemping@fh-aachen.de](mailto:Groemping@fh-aachen.de)

# **Thermisches und chemisches Potential von Abwasser innovativ nutzen!**

---

**Johannes Dommer, M.Sc.**

**HUBER SE  
Erasbach bei Berching**

## **1 Einleitung**

Mit den immer höher werdenden Anforderungen an die Abwasserqualität, beispielsweise durch die Weitergehende Abwasserreinigung steigen gezwungenermaßen auch die Behandlungskosten von Abwasser in Kommunen. Um diesen Anstiegen in den Behandlungskosten und auch den bisher anfallenden Behandlungskosten entgegenzuwirken ist es sinnvoll den kompletten Kläranlagenprozess zu betrachten, um so Möglichkeiten zu finden, vorhandene Prozesse zu optimieren oder den Betrieb von bestehender Maschinenteknik effizienter zu gestalten.

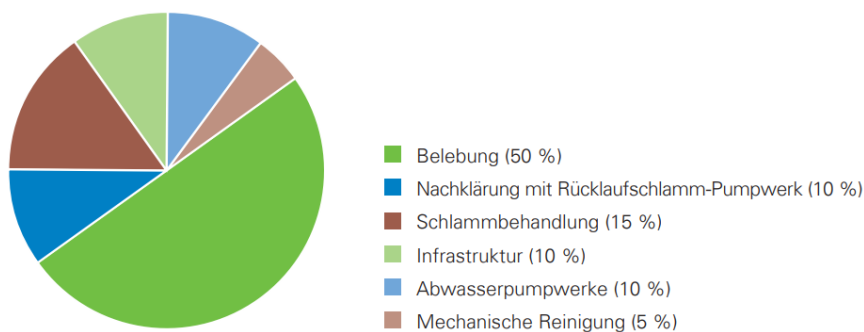
Die typische Kläranlage bietet hierzu aktuell diverse Ansatzpunkte, um deren Betrieb zu verbessern. Hierbei ist es möglich, sowohl das Chemische Potential des Klärschlammes weiter unter die Lupe zu nehmen, als sich auch die gegebenen Bedingungen, wie ganzjährig hohe Temperaturniveaus des Abwassers zu Nutze zu machen, um diese Wärme innovativ in vorhandene Prozesse zu transferieren und diese so effizienter zu gestalten.

## 2 Grundlagen und theoretisches Potential

### 2.1 Energiebedarf - Grundlegende Fragestellung auf Kläranlagen

Das oberste Ziel von Kläranlagen muss sein, dass die Abbauprozesse sicher ablaufen und das Wasser mit einer guten bis sehr guten Qualität in die Vorflut abgegeben werden kann. Um dies zu erreichen, stellen Kläranlagen einen der größten Verbraucher in Kommunen dar, noch weit vor Schulen, Verwaltungsgebäuden oder Straßenbeleuchtung [1]. Grund hierfür sind die, je nach Größe und Struktur der Kommune (Größenklasse der Kläranlage), teils sehr großen Mengen an zu behandeltem Abwasser, was teils mehrmals gepumpt, in Bewegung gehalten oder durchmischt werden oder mit unterschiedlichen Medien z.B. Sauerstoff oder Flockungs-/Fällungsmittel versetzt werden muss.

Ein detaillierterer Blick in den Gesamtstromverbrauch von Kläranlagen zeigt die Zusammensetzung aufgeteilt nach unterschiedlichen Bereichen [1] (hier: Kläranlagen in Bayern).



**Abbildung 45: Verteilung des Stromverbrauchs einer Kläranlage [1].**

Während durch effizientere Maschinen und Geräte in allen Bereichen Einsparpotential möglich ist, liegt es nahe, den Bereich mit dem prozentual größten Stromverbrauch, die Belebung mit ca. 50 %, genauer zu betrachten. Auch hier kann gegebenenfalls durch einen Austausch älterer Geräte eine Einsparung im Energieverbrauch erzielt werden, jedoch besteht hier auch die Möglichkeit tiefer in die bestehende Verfahrenstechnik einzusteigen und diese zu überdenken.

## 2.2 Kohlenstoffausschleußung vor der Belebung

### 2.2.1 Theoretisches Potential von Klärschlamm

Für die energetische Optimierung sind zwei maßgebliche energetische Faktoren von Bedeutung:

Die Reduzierung des Sauerstoffeintrags in die Belebung über beispielsweise Verdichter und der Mehrertrag durch die Verstoffwechslung von Primärschlamm anstelle von Überschussschlamm.

Der Großteil der in der Belebung benötigten Energie wird für den Eintrag von Sauerstoff in das Abwasser aufgewandt, damit die aerobe Schlammstabilisierung vorteilhaft ablaufen kann. Ein Ansatz, um den Energiebedarf für den Sauerstoffeintrag zu reduzieren ist, die Schlammmenge, die in die Belebung fließt zu reduzieren und diesen Primärschlamm in die Schlammeschiene zu leiten. Diese Kohlenstoffausschleußung bildet die Grundlage der energetischen Optimierung, was mit Maschinentechnik, namentlich mittels Trommelsieben, Tuch- oder Scheibenfiltern realisiert werden kann. Wichtig bleibt aber, dass nicht der komplette Kohlenstoff in die Schlammeschiene umgeleitet wird, sondern nur ein Teil, damit auch weiterhin ein optimales Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff für die Mikrobiologie im Belebungsbecken vorherrscht.

Primärschlamm und Überschussschlamm unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Inhaltsstoffe. Während Primärschlamm vorwiegend aus Kohlenhydraten und organischen Fetten besteht, verschiebt sich die Zusammensetzung des Überschussschlamms durch den Biomasseaufbau in der Belebung stark in Richtung von Proteinen.

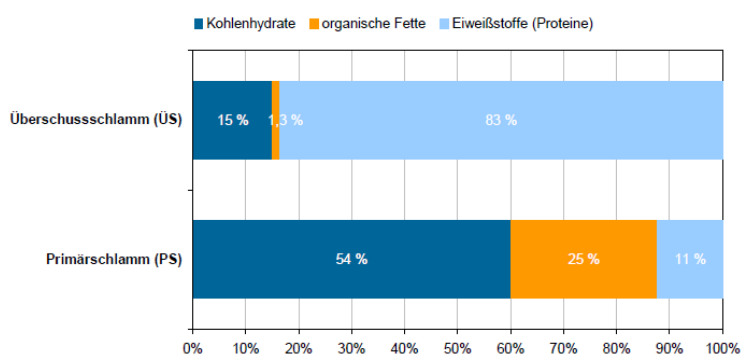


Abbildung 46: Zusammensetzung von Primär- und Überschussschlamm (nach Lindholm & Ossiansson, 2008) [2]

Gerade aber für die Anaerobe Schlammstabilisierung sind Kohlenhydrate und Fette besser geeignet als Proteine, da diese von den vorhandenen Mikroorganismen leichter in Methan verstoffwechselt werden können. Die Methanausbeute von Primärschlamm

ist etwa doppelt so hoch wie die Menge an Methan, die aus der Verstoffwechslung von Überschussschlamm hervorgeht [3].

Nachfolgend eine Beispielrechnung, wie viel Energieeinsparung bzw. -ertrag in der Nutzung von Primärschlamm steckt, anstatt diesen in der Belebung in Überschussschlamm umzuwandeln:

Um aus 1 kg BSB im Belebungsbecken ca. 1 kg Überschussschlamm zu produzieren, wird etwa 1,5 kg Sauerstoff und daraus folgend, je nach Belüftereffizienz, ca. 0,75 kWh<sub>el</sub> benötigt.

Laut WINTER, 2003 kann aus 1 kg oTR (organischem Trockenrückstand) ca. 500 – 600 L<sub>Faulgas</sub>/kg<sub>oTR</sub> erzeugt werden. Frischer Primärschlamm aus der Vorklärung besteht zu ca. 70 – 80 % aus oTR, d.h. aus 1 kg Primärschlamm können 420 L Faulgas gewonnen werden. Bei einem Methananteil von ca. 65 % in Faulgas kann aus einem Kilogramm Primärschlamm also ca. 273 L Methan gewonnen werden.

Bei einem Heizwert von Methan von 10 kWh/m<sup>3</sup> kann so 2,73 kWh<sub>ges</sub> gewonnen werden.

Aus diesen beiden betrachteten Komponenten folgt eine Einsparung von ca. 1,73 kWh<sub>el</sub> (bei 35 % el. Wirkungsgrad) bzw. 3,48 kWh<sub>ges</sub> pro kg Primärschlamm.

## 2.2.2 Anwendungsfälle anhand unterschiedlicher Kläranlagenprozesse

Je nach Größenklasse der betrachteten Kläranlage und den damit verbundenen mehr oder weniger komplexen Abwasserbehandlungsprozess ergeben sich damit zwei Möglichkeiten.

Für **kleinere Kläranlagen** ohne Vorklärbecken kann mittels Maschinenteknik vor dem Belebungsbecken eingegriffen werden. Hier kann ein Großteil des Kohlenstoffs entnommen und einer anaeroben Vergärung zugeführt werden.

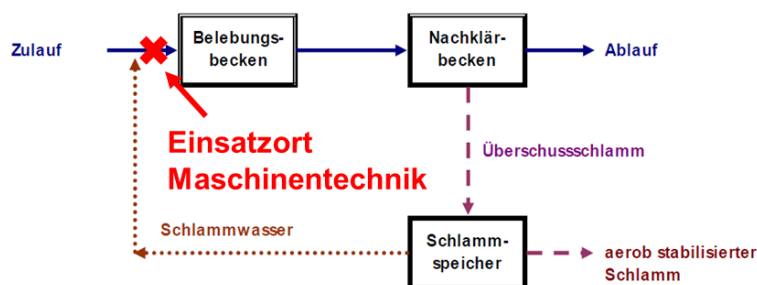


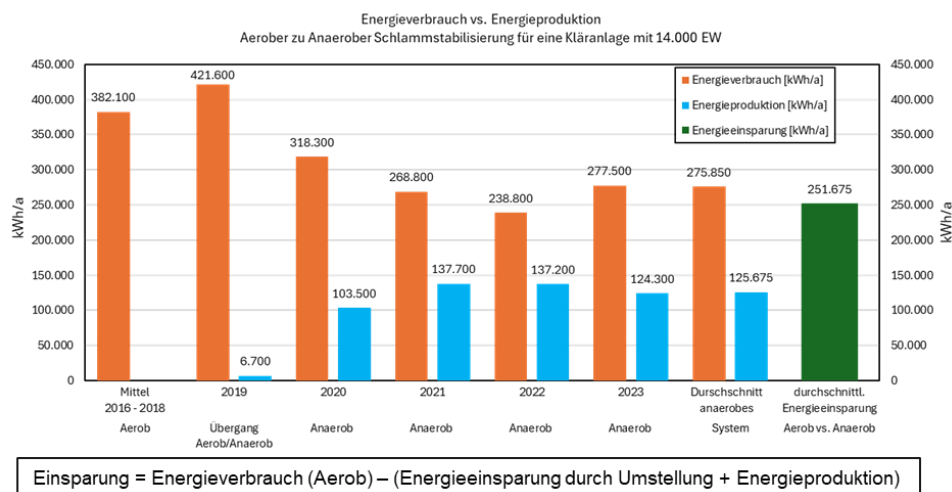
Abbildung 47: Verfahrensschema für kleine Kläranlagen und Einsatzort für Prozessoptimierung.

So können ca. 50 bis max. 70 % des CSB vorzeitig abgetrennt werden um daraus in der Faulung Biogas zu produzieren. Nachteil hierbei ist, dass gerade bei kleinen

Kläranlagen meist keine Faulung und Biogasverwertung z.B. mittels Blockheizkraftwerk vorhanden ist, die dann nachgerüstet werden müssen.

Die Energiebilanz der Kläranlage kann durch diesen Eingriff jedoch durchaus optimiert werden.

Beispielhaft sind in nachfolgender Abbildung die Energiedaten einer Kläranlage mit ca. 14.000 EW in Bayern dargestellt, bei der die Umstellung von einer Aeroben auf eine Anaerobe Schlammstabilisierung stattgefunden hat.



**Abbildung 48: Energiedaten einer Kläranlage in Bayern vor und nach Umstellung des Kläranlagenprozesses**

Allein der Energieverbrauch konnte durch den Umbau bei dieser Kläranlage im Durchschnitt über die letzten vier Jahre um ca. 126.000 kWh/a, also ca. 31 % im Vergleich zu vor der Umstellung reduziert werden. Zusätzlich können ebenfalls nochmal 126.000 kWh/a durch das sich in der anaeroben Schlammstabilisierung entstehende Methan produziert werden. Dies entspricht bei einem Brutto-Strompreis von 20 ct/kWh einer jährlichen Ersparnis von über 50.000 €.

Bei **größeren Kläranlagen**, bei denen bereits ein Vorklärbecken im Bestand ist, geht es um eine Optimierung des Kläranlagenprozesses.





Dieses Temperaturniveau des Abwassers bietet sowohl im Winter die Möglichkeit Wärme zu entziehen und so beispielsweise Gebäude zu beheizen, oder im Sommer Räumlichkeiten nach Bedarf zu kühlen oder zu heizen.

Über geeignete Technologien, z.B. Abwasserwärmetauscher in Verbindung mit Wärmepumpen kann diese ganzjährig verfügbare Energiequelle zugänglich gemacht werden.

Die Vorteile dieses Vorgehens liegen auf der Hand:

Die Abwassermengen unterliegen geringen Schwankungen. Kläranlagen werden so ausgelegt, dass diese definierte Abwasserströme behandeln, die dann wiederum auch der Wärmeentnahme dienen können. Über die Mikroorganismen in der biologischen Behandlungsstufe nimmt die Temperatur weiter zu, weshalb es sinnvoll ist, die Wärmeentnahme in einer der letzten Stufen der Kläranlagen, am geschicktesten direkt vor dem Auslauf der Kläranlage, durchzuführen. Dadurch ist auch sichergestellt, dass bei einer zu großen Wärmeentnahme aus dem (Roh-)Abwasser die biologische Aktivität der Mikroorganismen nicht leidet.

Bei einer Entnahme von 3 °C bei einem Kläranlagendurchfluss im Trockenwetter von ca. 100 L/s, was einer Kläranlage der GK 3 entspricht, ist eine durchschnittliche Entzugsleistung von 1.260 kW ohne größere Probleme möglich.

Zum Vergleich mit Erdgas mit einem Heizwert von ca. 10,5 kWh/m<sup>3</sup> können so, rein durch die Nutzbarmachung von bereits vorhandener Energie, etwa 2.870 m<sup>3</sup><sub>Erdgas</sub>/d eingespart werden [4].

Die Nutzung dieser Wärme kann auf Kläranlagen über mehrere Wege realisiert werden. Beispielhaft sind nachfolgend mehrere Möglichkeiten genannt, wie die Wärme sinnvoll genutzt werden kann:

Gerade bei größeren Kläranlagen wird das Thema Schlamm-trocknung immer relevanter, um die anfallenden Schlamm-mengen sinnvoll zu nutzen. Die entzogene Wärme aus dem Abwasser kann im Schlamm-behandlungsprozess in unterschiedlichen Verfahrensschritten verwendet werden. Mögliche Eintragsorte für die Wärme wären beispielsweise der Schlammstapel-tank, um den gelagerten Schlamm auf vorteilhafte Temperaturen zu halten, um nachfolgende Behandlungsschritte zu vereinfachen.

Die Schlamm-entwässerung ist ein weiterer Eintragsort von Wärme, die aus dem behandelten Abwasser entzogen werden kann. Im nachfolgenden Kapitel wird genauer auf die Vorteile von höheren Schlamm-temperaturen bei der Schlamm-entwässerung eingegangen.

Bei der Schlamm Trocknung wird ebenfalls viel Wärme benötigt. Je nach Trocknungsprozess kann die Wärme aus dem Abwasser direkt genutzt werden, oder zumindest einen Teil beitragen. Bei den Trocknungsprozessen werden beispielsweise bei Bandtrocknern oder Scheibentrocknern relativ hohe Temperaturen der Trocknungsluft oder des Sattdampfes benötigt. Diese Temperaturen können über die Abwasserwärme nicht oder nur unter hohem Aufwand erreicht werden, die Abwasserwärme kann aber durchaus dazu genutzt werden, dass die Prozessluft bzw. das Prozesswasser vorgewärmt wird, und so zumindest ein Teil der benötigten Wärme bereitgestellt werden kann, um den Einsatz von anderen Wärmequellen (z.B. in chemisch gespeicherter Form wie Erdgas, Methan oder Faulgas) zu minimieren.

Für die solare Schlamm Trocknung werden niedrigere Temperaturniveaus benötigt. Hierfür bietet es sich durchaus an, die Abwasserwärme auf die entsprechenden Niveaus zu heben und damit dann die Warmluftgebläse zu speisen oder die Trocknungsleistung über Fußbodenheizungen, die direkt unterhalb des Schlammbeets verlaufen, zu verbessern und den Trocknungsprozess durch einen Wärmeeintrag sowohl von oben über die Gebläse, als auch von unten, über die Fußbodenheizungen zu beschleunigen.

Falls die Kläranlage die Energie aus dem Abwasser nicht selbst nutzen kann, bleibt auch noch die Möglichkeit, die Energie an ein potenziell vorhandenes Nah- oder Fernwärmenetz abzugeben und so einen Beitrag für eine nachhaltige Wärmeversorgung umgebender Industrie- oder Wohngebiete zu leisten.

#### **2.2.4 Nutzung von Abwasserwärme zur Schlammentwässerung**

Auf jeder Kläranlage fällt unweigerlich Klärschlamm an. Aus diesem Grund ist es für Kläranlagenbetreiber immer auch Bestandteil des Arbeitsalltags, sich mit Themen wie dem Umgang mit Schlamm, die Schlamm Lagerung und -behandlung zu beschäftigen.

Neben den Investitionskosten trägt die Schlammbehandlung einen großen Teil zu den Gesamtbetriebskosten der Abwasserbehandlung bei. Diese setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Zum einen tragen die Energiekosten wie in Abbildung 45 dargestellt einen Teil zu den Betriebskosten bei. Dazu kommen Kosten für benötigte Zusatzstoffe wie z.B. Polymere, die positive Einflüsse auf den Entwässerungsprozess haben, und zuletzt noch die Entsorgungskosten des Klärschlammes.

Hier ist es auch zielführend, diese Prozesse zu optimieren, um so Betriebskosten zu reduzieren.

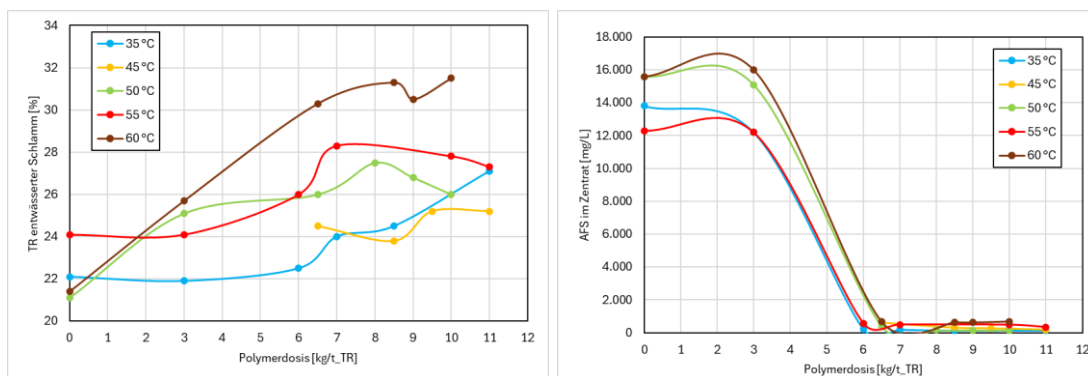
Die Temperatur hat einen entscheidenden Einfluss auf den Entwässerungsprozess.

Neben anderen relevanten Parametern wie der Partikelgröße, pH-Wert oder Zustand des Polymers hat die Temperatur sowohl beim zu behandelnden Schlamm selbst, als auch beim Polymer direkten Einfluss auf den Entwässerungserfolg.

Höhere Temperaturen führen beim Schlamm beispielsweise zu einer geringeren Dichte und Viskosität oder eine Erhöhung der Sedimentationsgeschwindigkeit von im Schlamm enthaltenen Partikeln. Beim Polymer führt eine höhere Temperatur zu einer größeren Reaktionsrate und verbessert gleichzeitig auch die Löslichkeit des Polymers. Effekte, die beim Schlammmentwässerungsprozess also sehr wünschenswert sind.

Großtechnische Versuche in der Gegend um Barcelona, Spanien [5] bestätigen genau diese positiven Effekte auf die Entwässerung. Hier wurde die Schlammtemperatur variiert und untersucht, bei welchen Polymerkonzentrationen welche Trockenrückstände erreichbar sind, wobei auch gleichzeitig die Qualität des jeweils entstehenden Zentrats betrachtet wurde.

In nachfolgender Abbildung sind die Ergebnisse abgebildet, die in Spanien erzielt wurden.



**Abbildung 51: Entwässerungsergebnisse für den Schlamm und das dazugehörige Zentrat in Abhängigkeit von Polymerkonzentration und Temperatur [5]**

Es wurde der Einfluss der Schlammtemperatur von 35 °C bis 60 °C untersucht, während die Polymerkonzentration von 0 kg/t<sub>TR</sub> bis 11 kg/t<sub>TR</sub> variiert wurde.

Nach Auswertung der Versuche ergibt sich für die Polymerkonzentration ein Optimum bei ca. 6 – 8 kg/t<sub>TR</sub>. Hier ist gut zu erkennen, dass die Temperatur bei diesen Schlammtemperaturen einen großen Einfluss hat. So ist bei der oben genannten Konzentration und bei 60 °C ein TR-Gehalt des entwässerten Schlammes von ca. 30 – 31 % erreichbar. Die erzielbaren TR-Gehalte liegen im Vergleich zu niedrigeren Schlammtemperaturen um bis zu acht Prozentpunkte höher, was einer Gewichtseinsparung von knappen 35 % entspricht.

Niedrigere Polymerkonzentrationen als beim oben genannten Optimum genutzt, führen dazu, dass das Zentrat stark mit Feststoffen belastet ist. Das bedeutet, dass sich die kleineren Schlammpartikel nicht zurückhalten lassen, weil diese nicht agglomerieren und so das Lochblech der Zentrifuge/Siebpresse passieren können.

Diese Versuchsreihen zeigen, dass auch im Bereich Schlammmentwässern noch Potential vorhanden ist, um den Prozess wirtschaftlicher zu gestalten und Wärme, beispielsweise aus dem Kläranlagenablauf wiederzuverwenden.

### **3 Zusammenfassung und Ausblick**

Bisher war die Kläranlage einer der größten Einzelverbraucher in den Kommunen. Aufgrund der großen Anzahl an Maschinen und Geräten liegt der Strombedarf der Abwasserbehandlung weit über dem Verbrauch von öffentlichen Gebäuden, wie Schulen oder Verwaltungsgebäuden.

Anhand der Beispiele in dieser Abhandlung ist ersichtlich, dass es durchaus Möglichkeiten gibt, den Energiebedarf zu reduzieren, die Wärmeströme auf Kläranlagen zu optimieren und im Idealfall positive Energiebilanzen zu erreichen.

Vorgehen, dies zu erreichen sind beispielsweise die Optimierung bestehender Maschinenteknik und eine Fokussierung auf die anaerobe Schlammstabilisierung. Außerdem kann das vergleichsweise hohe Temperaturniveau des Abwassers genutzt werden, um andere Prozesse mit Wärme zu versorgen, bzw. im Optimalfall sogar Wärme an Wärmenetze liefern. Ebenso können einzelne Prozessschritte wie die Schlammmentwässerung durch innovative Anpassungen verbessert werden um eine Einsparung an Verbrauchsmitteln zu reduzieren.

Zusammen mit anderen zukunftsweisenden, nachhaltigen Technologien wie Photovoltaik oder – sofern es der Standort zulässt - sogar Windkraft, können Kläranlagen zu „klimaneutralen Entsorgungsparks“ transformiert werden, die sich wunderbar mit anderen kommunalen Zukunftsthemen wie Wärmenetze verknüpfen lassen.

## 4 Literatur

[1] [Energie aus Abwasser - Ein Leitfaden für Kommunen - Publikationsshop der Bayerischen Staatsregierung](#) (Zugriffsdatum: 11.11.2024)

[2] [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/klaieranlage\\_abwasser/2014\\_Abschlussbericht\\_TP2.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/klaieranlage_abwasser/2014_Abschlussbericht_TP2.pdf) (Zugriffsdatum: 11.11.2024)

[3] K.-H. Rosenwinkel et. al, Anaerobtechnik, 3. Auflage, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.

[4] [CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe \(umweltbundesamt.de\)](#) (Zugriffsdatum: 13.11.2024)

[5] Sludge preheating system as a strategy to improve sludge dewatering in WWTPs. Full scale trials. (S. López-Palau, A. May-Masnou, C. Garcia-Belinchón, N. de Arespacochaga, A. Vidal, L. Bouchy) [nicht veröffentlicht]

**Anschrift des Verfassers:****Johannes Dommer, M. Sc.**

HUBER SE

Industriepark Erasbach A1

D-92334 Berching

Tel. +49 8462 201-304

Fax: +49 8462 201-810

E-Mail: [johannes.dommer@huber.de](mailto:johannes.dommer@huber.de)

## Ausstellerverzeichnis

### **Bellmer GmbH**

Marco Simon

Hauptstrasse 37-43

75223 Niefern-Öschelbronn

Tel.: +49 7233 74 0

E-Mail: [info@bellmer.com](mailto:info@bellmer.com)



### **Hach Lange GmbH**

Reimund Hauser

Willstätterstraße 11

40549 Düsseldorf

Tel.: +49 211 52880

E-Mail: [info-de@hach.com](mailto:info-de@hach.com)



### **HUBER SE**

#### **Elmar Börsig**

Industriepark Erasbach A1

92334 Berching

Tel: +49 8462 2010

E-Mail: [info@huber.de](mailto:info@huber.de)



**Mecana AG**

Nikolai Otto

Industriestrasse 39

CH-8864 Reichenburg

Tel.: + 41 55 464 12 00

E-Mail: [info@mecana.ch](mailto:info@mecana.ch)

**MECANA**

A Metawater Company

**Passavant-Geiger GmbH**

Johannes Hilsdorf

Passavant-Geiger-Str. 1

65326 Aarbergen

Tel.: +49 6120 28 0

E-Mail: [info@passavant-geiger.com](mailto:info@passavant-geiger.com)

**Passavant  
Geiger****SCHAEFER KALK GmbH & Co. KG**

Volker Ermel

Louise-Seher-Str. 6

65582 Diez

Tel.: +49 6432 503 0

E-Mail: [info@schaeferkalk.de](mailto:info@schaeferkalk.de)





**SEEPEX GmbH**

Jens Heidecker

Scharnhölzstr. 344

46240 Bottrop

Tel.: 02041 9960

E-Mail: [info@seepex.com](mailto:info@seepex.com)

**SEEPEX.**

An Ingersoll Rand Business

**SIDRA Wasserchemie GmbH**

Raimund Schipp

Zeppelinstraße 27

49479 Ibbenbüren

Tel.: +49 5459 540

E-Mail: [info@sidra.de](mailto:info@sidra.de)



**Siegrist GmbH**

Alexandra Siegrist

An der Tagweide 6

76139 Karlsruhe

Tel.: +49 721 6252650

E-Mail: [info@siegrist.de](mailto:info@siegrist.de)



**Siegrist GmbH**

**System S&P GmbH**

Sebastian Lindel

Ahornstraße 27

74592 Kirchberg/Jagst

Tel.: +49 7954 9804 0

E-Mail: [info@system-s-and-p.de](mailto:info@system-s-and-p.de)

**VTA Austria GmbH**

Umweltpark 1

4681 Rottenbach/Austria

Tel. +43 7732 4133

E-Mail: [Institut@vta.cc](mailto:Institut@vta.cc)



## 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 1<sup>st</sup> 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 (Eigenverlag 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-/Flockungskemikalien. 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.: Biofilmmaktivität 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
- [161] AZARI, M.; FUCHS, S. (Hrsg.): Moderne Ansätze in der Abwasserbehandlung - Volume II : Tagungsband der 34. Karlsruher Flockungstage 2023; DOI: [10.5445/IR/1000166033](https://doi.org/10.5445/IR/1000166033). Karlsruhe 2023 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

**Bestellanschrift:**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Wasser und Umwelt (IWU)

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](mailto:irmtraud.kaupa@kit.edu)