

Abschlussbroschüre 2024

# KoalAplan – die Kläranlage der Zukunft



## Impressum

### Umwelttechnik BW

Landesagentur für Umwelttechnik und  
Ressourceneffizienz Baden-Württemberg

Kleiner Schlossplatz 13

70173 Stuttgart

info@umwelttechnik-bw.de

www.umwelttechnik-bw.de

T 0711 252841-10

### Titelbild

Alva Studios

### Autor:innen

Siehe Projektberichte

### Bildnachweise

Siehe Projektberichte

### Konzept und Gestaltung

Umwelttechnik BW GmbH

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere  
Texte, Abbildungen und Grafiken, sind  
urheberrechtlich geschützt. Jede Art der  
Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen  
Zugänglichmachung oder andere Nutzung  
bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen  
Zustimmung.

Stand: September 2024

## Inhaltsverzeichnis

### Vorwort

Dr. Andre Baumann..... 4

### Einleitung

Prof. Dr. Harald Horn..... 5

### Gesammelte Berichte der Projektpartner:innen

Kommunales Abwasser als Quelle für Ammoniumstickstoff, Wasserstoff und Bioplastik –  
die Bioraffinerie Bünsau ..... 6

Feststoffentnahme im Vorklärbecken und Siebung mit Mikrosieben..... 8

Stickstoffelimination durch Ionenaustausch ..... 10

Optimierung der Dunkelfermentation von Labor- bis Pilotmaßstab ..... 12

Optimierung der Feststoffabtrennung mit Membranen ..... 14

Mikrobielle Elektrolysezellen ..... 16

Mikrobielle Herstellung von PHAs aus saurem Hydrolysat ..... 18

Kaskade vom Abwasserzulauf bis zur Gewinnung kurzkettiger Fettsäuren ..... 20

Bilanzierung des Stickstoff- und Phosphatstroms in der Bioraffinerie ..... 22

Ökologische Bewertung von KoalAplan im Vergleich zur aktuellen Praxis ..... 24

Die Kommunikation rund um die Bioraffinerie KoalAplan ..... 26

Impressionen Filmdreh KoalAplan ..... 28

Ergebnisse Workshop: Politische Handlungsempfehlungen ..... 30



### **Dr. Andre Baumann**

Staatssekretär für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

#### **Sehr geehrte Damen und Herren,**

die nachhaltige Bioökonomie birgt ein großes Potenzial für den notwendigen Wandel hin zu einem kreislauforientierten und ressourceneffizienten Wirtschaften. Um innovative biologische Verfahren in eine breite industrielle Anwendung zu bringen, ist es notwendig, diese vom Labor- auf den Pilotmaßstab weiterzuentwickeln und so die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit aufzuzeigen. Im Rahmen des EFRE-Förderprogramms „Bio-Ab-Cycling - Bioraffinerien zur Gewinnung von Rohstoffen aus Abfall und Abwasser“ fördert das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft daher gemeinsam mit der EU-Kommission den Bau und die Umsetzung von fünf modularen urbanen und industriellen Bioraffinerien.

Das urbane Bioraffinerieprojekt „KoalAplan“ entwickelt Kläranlagen zu Abwasser-Bioraffinerien, denn Kläranlagen dienen heute nicht nur der Abwasserreinigung, sondern können auch wichtige Rohstoffe liefern. Am Lehr- und Forschungskläranlage der Universität Stuttgart in Bösau wird im Rahmen von KoalAplan untersucht, wie aus kommunalem Abwasser Produkte wie Ammoniumsalze, Wasserstoff und Polyhydroxyalkanoate als Grundstoffe für die Herstellung von Biokunststoffen gewonnen werden können. Die Umsetzung des Projektes unterstützt den Aufbau einer nachhaltigen Bioökonomie in Baden-Württemberg und kann so maßgeblich zum Klimaschutz, zur Ressourcenschonung und zu einer resilienten Rohstoffversorgung beitragen.

Wir danken allen Beteiligten sowie Projektpartnerinnen und Projektpartnern für Ihr Engagement und die hervorragende Arbeit bei diesen wegweisenden Pilotvorhaben.

### **KoalAplan: Kommunales Abwasser als Quelle für Ammoniumstickstoff, Wasserstoff und Bioplastik – die Bioraffinerie Bösau**

Kommunales Abwasser enthält verschiedene Komponenten, die bei geschickter Prozessführung einer Weiterverwertung zugeführt werden können. Die Hauptkomponente ist mit >99 % das Wasser, das bei der konventionellen Schwemmkanalisation für den Transport von Fäkalien und anderen Reststoffen aus dem täglichen Wirtschaften verwendet wird. Hier gibt es weltweit realisierte Projekte, die nach der biologischen Behandlung das Wasser so weit aufbereiten, dass es sogar als Trinkwasser wiederverwendet werden kann. Auch für die Rückgewinnung von Phosphor gibt es bereits großtechnische Anwendungen, die durch die europäische/nationale Gesetzgebung gefordert sind (siehe das Projekt RoKka).

Zwei weitere attraktive Komponenten sind der im kommunalen Abwasser gelöste Stickstoff und die Fracht an organischem Kohlenstoff. Im Rahmen des Projekts KoalAplan haben wir uns zur Aufgabe gesetzt, Stickstoff als Rohstoff zurückzugewinnen und den partikulären organischen Kohlenstoff gezielt in eine hochkonzentrierte Lösung organischer

Säuren zu überführen, die im Anschluss biotechnologisch in Wertstoffe umgewandelt werden können. Dazu werden bis zu zwei Drittel der Kohlenstofffracht als Feststoffe abgetrennt und einer Hydrolyse zugeführt, in der die organischen Säuren produziert werden. Der feststofffreie Hauptstrom wird für die Stickstoffrückgewinnung (>90 % als Ammoniumionen) über einen Ionenaustauscher geführt, womit eine konzentrierte Ammoniumlösung gewonnen werden kann. Die Lösung mit organischen Säuren aus der Hydrolyse wird mit Hilfe einer Mikrofiltration weiter aufbereitet, um eine klare Flüssigkeit zu erhalten. Hydrolyse und anschließende Mikrofiltration sind die Kernbausteine einer zukünftigen Bioraffinerie für kommunales Abwasser.

In zwei finalen Prozessschritten können wir die klare Lösung mit organischen Säuren zum einen mit einer Fermentation zu Bioplastik umwandeln. In einem weiteren Prozess wird zum anderen in einem bioelektrochemischen System aus den organischen Säuren Wasserstoff erzeugt.



### **Prof. Dr. Harald Horn**

Professor für Wasserchemie und Wassertechnologie  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

# KoalAplan – Kommunales Abwasser als Quelle für Ammoniumstickstoff, Wasserstoff und Bioplastik

**KoalAplan** – die Kläranlage als Bioraffinerie zeigt innovative Wege zur Gewinnung von Düngemitteln und Rohstoffen aus Abwasser. Der Weg zu einer klimaneutralen und nachhaltigen Kläranlage der Zukunft wird demonstriert.

Bei den Bemühungen, Wertstoffe aus kommunalem Abwasser zu gewinnen, ist die Stickstoffentfernung ein limitierender Faktor, da bei der herkömmlichen biologischen Abwasserbehandlung organischer Kohlenstoff für die finale Stickstoffelimination (die Denitrifikation) benötigt wird. Bei der Denitrifikation wandeln Mikroorganismen Stickstoffverbindungen zu gasförmigem Stickstoff um. Für ihren Stoffwechsel benötigen die Mikroorganismen organischen Kohlenstoff, der entsprechend nicht mehr als Rohstoff zur Verfügung steht, sondern neben dem gasförmigen Stickstoff in Form von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre entweicht.

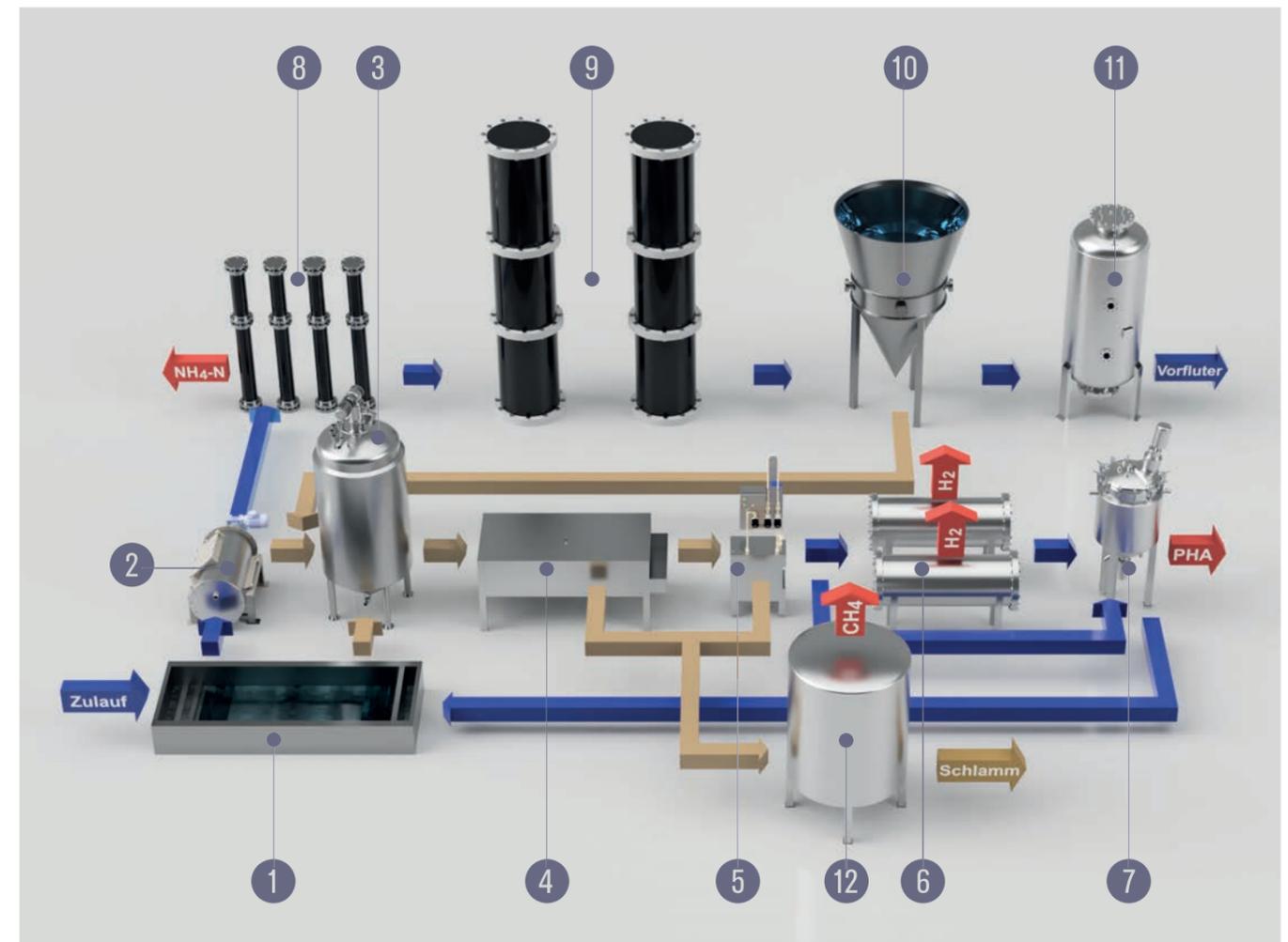
Im Projekt KoalAplan (Kommunales Abwasser als Quelle für Ammoniumstickstoff, Wasserstoff und Bioplastik – die Bioraffinerie Bünsau) wurden Möglichkeiten untersucht, die im Abwasser enthaltenen Rohstoffe besser zu nutzen und mit bioökonomischen Verfahren vermarktungsfähige Produkte herzustellen.

Dabei wird auf der Kläranlage Bünsau ein Verfahren untersucht, mit dem die Denitrifikation umgangen werden kann. Das geplante Konzept kombiniert chemische, physikalische und biologische Prozessschritte. So wird es möglich, die organische Fracht gezielt aus dem Abwasser auszuschleusen. Ein neuartiges **Mikrosieb (2)** trennt den im Ablauf der **Vorklärung (1)** noch enthaltenen partikulären organischen Kohlenstoff ab, um aus diesem und dem Kohlenstoff des Primärschlammes der Vorklärung im Nebenstrom – der eigentlichen Bioraffinerie – Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Rohstoffe für Biokunststoffe zu erzeugen. Der abgetrennte Kohlenstoff wird dazu einer sauren **Hydrolyse (3)** unterzogen. Es entstehen organische Säuren, die mit mikrobieller **Elektrolyse (6)**

entweder zu Wasserstoff umgesetzt werden, oder in einem **Fermenter (7)** zu Polyhydroxyalkanoaten (PHA), einem Grundstoff für Bioplastik, verarbeitet werden.

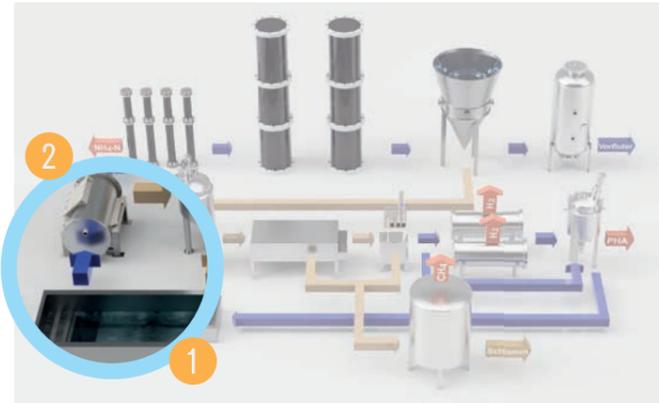
Im Hauptstrom wird der Ammoniumstickstoff im Abwasser über einen **Zeolithfilter (8)** entfernt. Das Ammonium wird bei der Regeneration des Zeoliths zurückgewonnen und kann als Dünger eingesetzt werden. Das Abwasser wird anschließend über einen **Schwachlasttropfkörper (9)** behandelt, um verbleibende Inhaltsstoffe abzubauen.

KoalAplan soll zeigen, dass es möglich ist, aus kommunalem Abwasser die Produkte Ammonium, H<sub>2</sub> und PHA zu gewinnen. Gleichzeitig ist die Einhaltung der Einleitwerte für das Lehr- und Forschungsklärwerk (LFKW) in Bünsau zentraler Bestandteil. Die großtechnische Umsetzung unterstützt die Ziele der Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie“. Das Recycling von Kohlenstoff und Stickstoff senkt den notwendigen Einsatz fossiler Rohstoffe. Zudem führt die Produktion von PHA und Wasserstoff indirekt zu einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die geplante Verknüpfung innovativer Verfahren kann damit zu einer intensiveren Kreislaufwirtschaft und mehr Klimaschutz beitragen. Neben der Ressourceneffizienzstrategie unterstützt das Vorhaben auch die Nachhaltigkeits- und Innovationsstrategie sowie die Klimaschutzziele des Landes Baden-Württemberg.



- |                   |                           |                           |                                    |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| 1 Vorklärung      | 4 Kammerfilterpresse      | 7 PHA-Fermentation        | 10 Nachklärung                     |
| 2 Mikrosieb       | 5 Mikrofiltration         | 8 Zeolithfilter           | 11 Aktivkohlefiltration (optional) |
| 3 Saure Hydrolyse | 6 Mikrobielle Elektrolyse | 9 Schwachlast-Tropfkörper | 12 Anaerobe Schlammbehandlung      |

# Feststoffentnahme im Vorklärbecken und Siebung mit Mikrosieben



In der konventionellen Klärtechnik werden Vorklärbecken zur Feststoffabtrennung durch Sedimentation zur Entlastung der nachgeschalteten biologischen Stufen verwendet. Dadurch werden der Feststoffgehalt und der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) verringert. Allerdings können die kolloidal gelösten Partikel so nicht entfernt werden. Zur besseren Feststoffabtrennung können Siebe eingesetzt werden.

## // METHODIK

Im Projekt KoalAplan soll die weitergehende Feststoffabtrennung untersucht werden. Dazu wurden zuerst Nasssiebkurven von Rohabwasser und dem Ablauf der Vorklärung erstellt. Durch die Untersuchung verschiedener Siebplatten in einer Mikrosiebtrommel wurde das Verständnis über die Partikelverteilung verbessert.

Die folgende Abbildung zeigt das Verfahrensfließbild. Der Feststoffgehalt und der CSB Gehalt wurde gemäß DIN Norm gemessen.

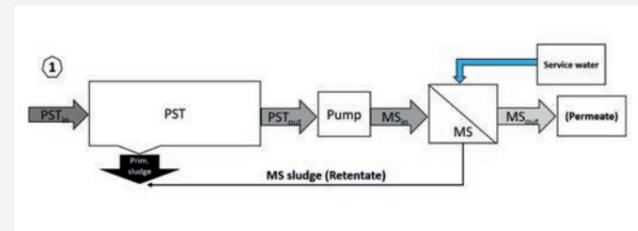


Abb. 1: Verfahrensfließbild.



Abb. 2, links: Nasssiebkolonne. Abb. 3, rechts: Halbtechnische Mikrosiebtrommel.

## // ERGEBNISSE

Bei der Durchführung der Siebanalysen wurde Rohabwasser (Zulauf Vorklärung) mit einer Schlauchpumpe entnommen und auf das größte Sieb geleitet. Es wurden Siebe zwischen 2 mm und 20 µm Maschenweite verwendet. Der Ablauf des kleinsten Siebs wurde durch Faltenfilter mit Maschenweiten zwischen 2 µm und 15 µm geleitet. Mit dem Ablauf des Vorklärbeckens wurde ebenso verfahren.

Die Ergebnisse von Siebanalysen an verschiedenen Tagen sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse für die Zulauf-Vorklärung zeigen,

dass auf den Sieben, die größer als 63 µm sind, die meisten Partikel zurückgehalten werden. Der aufsummierte Rückhalt für 63 µm beträgt zwischen 58 % und 84 % der abfiltrierbaren Stoffe. Partikel unter 20 µm haben einen geringen Gewichtsanteil.

Im Ablauf des Vorklärbeckens sind dagegen sehr wenige Partikel enthalten, die größer als 63 µm sind. Die kleineren Partikel verteilen sich analog zum Zulauf des Beckens. Daraus folgt, dass durch Absetzen Partikel mit ca. 63 µm gut zurückgehalten werden, kleinere Partikel

## // ERGEBNISSE

aber nicht. Für die Weiterverwertung als organische Kohlenstoffquelle ist es wichtig zu ermitteln, ob die zurückgehaltenen Stoffe überwiegend organisch sind. Deshalb wurden sie bei 550 °C verglüht und der Masseverlust ermittelt. Der Glühverlust beträgt bis zu einer Maschenweite von 45 µm mehr als 90 %. Kleinere Partikel haben mehr anorganische Anteile und Partikel <4 µm bestehen zu ca. 50 % aus anorganischem Material.

Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass mit einer der Vorklärung nachgeschalteten Siebung mit einer Maschenweite

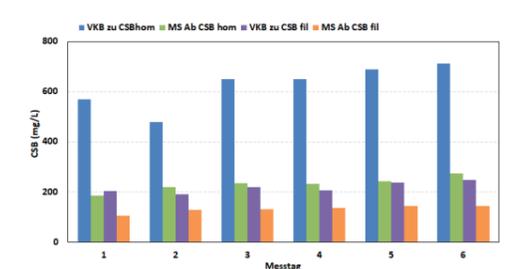
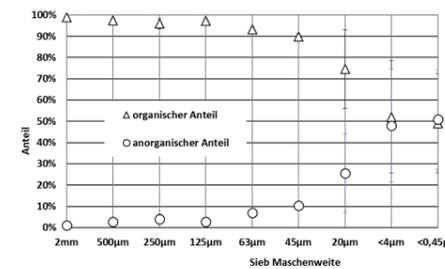
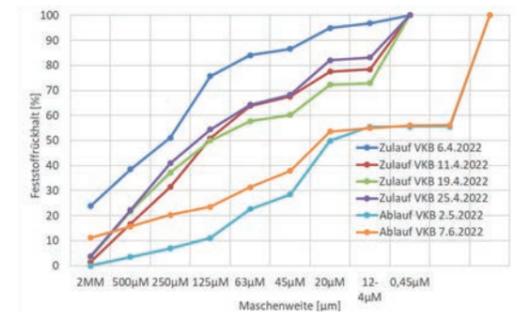
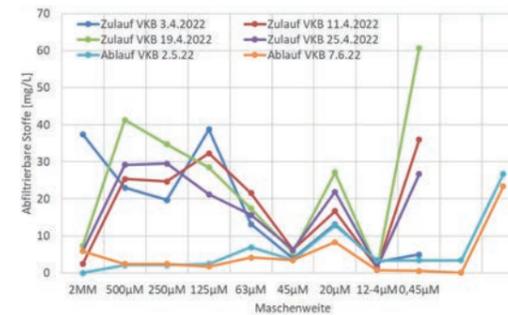


Abb. 4, links oben: Ergebnisse der Siebanalyse Zu-/Ablauf Vorklärung, abfiltrierbare Stoffe. Abb. 5, rechts oben: Rückhaltsummenlinie. Abb. 6, links unten: Organischer Anteil für die Siebrückhalte. Abb. 7, rechts unten: Ergebnisse der CSB Messungen im Dauerversuch.

## // FAZIT

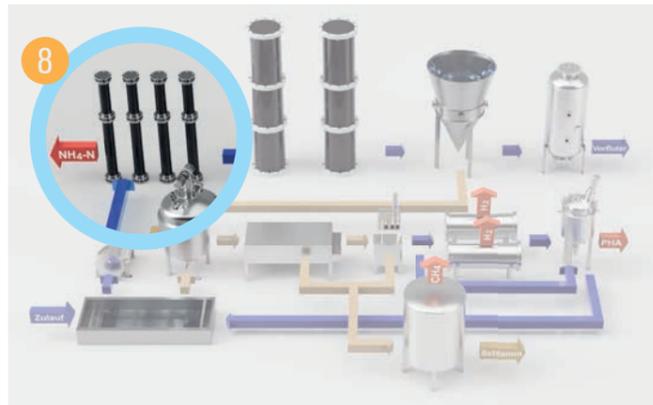
Eine weitergehende Feststoffentnahme durch eine dem Vorklärbecken nachgeschaltete Siebung ist möglich. Nasssiebversuche zeigen, dass durch die Kombination von Sedimentation und Siebung zwischen 64 % und 84 % der abfiltrierbaren Stoffe mit einem organischen Anteil >90 % entnommen werden können und damit eine hohe CSB-Fracht. Dazu müssen Partikel >15 µm abgefiltert werden. Versuche mit technischen Sieben zeigen, dass Trommelsiebe abhängig von der Abwasserkonzentration verstopfen. Die Deckschichtbildung unterstützt den Prozess der Siebung. Bei höher konzentrierten Abwässern war es möglich, mit einem Sieb mit 20 µm Maschenweite eine höhere Filtrationsleistung bei gleicher Feststoffentnahme zu erzielen. Eine Verblockung konnte durch intensivere Rückspülungen (Intervallspülung) vermieden werden.

## // AUTOREN

**M. Sc. Behnam Askari Lasaki,**  
behnam.askari-lasaki@iswa.uni-stuttgart.de  
**Dipl.-Ing. Peter Maurer,**  
peter.maurer@iswa.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart  
Institut für Siedlungswasserbau Wassergüte- und Abfallwirtschaft  
Lehr- und Forschungskläwerk  
Bandtäle 1, 70569 Stuttgart

# Stickstoffelimination durch Ionenaustausch



Die weitgehende Entnahme von Kohlenstoffverbindungen in Vorklärbecken und Siebung verschiebt das C/N Verhältnis auf Werte  $<5$ . Dadurch ist nicht genügend Kohlenstoff vorhanden, um eine stabile Denitrifikation zu erzielen. Durch die Adsorption an Ionenaustauschern können Stickstoffverbindungen physikalisch entfernt werden. Schlussendlich kann  $\text{NH}_4$  als Produkt gewonnen werden.

## // METHODIK

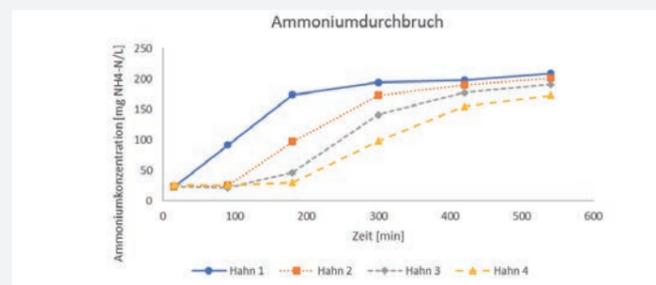
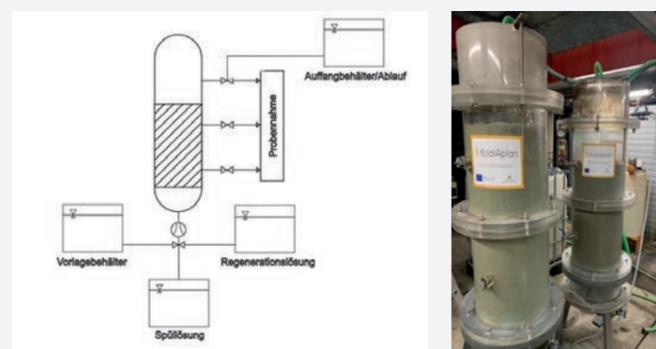
Die weitergehende Entfernung von im Wasser gelösten Stickstoffverbindungen soll untersucht werden. Dazu werden Adsorptionskolonnen mit Klinoptinolith (CLI), einem natürlichen Ionenaustauscher mit einer Korngröße von 0,62 bis 1 mm (im Mittel 0,8 mm) gefüllt und mit ammoniumhaltigem Abwasser durchströmt. Dabei wird die Oberflächenbeschickung (und damit die Kontaktzeit) und die  $\text{NH}_4$  Konzentration variiert. Der Feststoffgehalt, die Leitfähigkeit und der  $\text{NH}_4$  Gehalt wurden gemäß DIN Norm gemessen.

Für die Demonstration wurden, basierend auf den Vorversuchen im Labormaßstab, Filterkolonnen mit einem Durchmesser von 50 cm mit ca. 1 m CLI gefüllt. Die Kolonnen wurden von oben durchströmt und von unten zurückgespült oder regeneriert.

Abb. 1, links oben: Verfahrensbild.

Abb. 2, rechts oben: Halbtechnische Ionenaustauscherkolonne.

Abb. 3, unten: Durchbruchkurven für  $q_A = 3 \text{ m}^{-1}$ .



## // ERGEBNISSE

Die in der Literatur beschriebenen Ionenaustauschprozesse zur Abtrennung und zum Rückhalt von  $\text{NH}_4$  wurden in der Regel mit Rührreaktoren im Batch-Betrieb durchgeführt. Die dabei ermittelten Betriebsparameter Kontaktzeit, Feststoffgehalt und Beladbarkeit können auf den Betrieb als Durchflusskolonne nicht direkt übertragen werden. Für die Umsetzung als Durchflusskolonne müssen die Oberflächenbeschickung und die Abhängigkeit von schwankenden Konzentrationen geklärt werden. Für die Vorversuche wurden Laborglassäulen mit CLI gefüllt und in ver-

schiedenen Höhen beprobt. Durchbruchkurven wurden für verschiedene Oberflächenbeschickungen ( $q_A = 1 \text{ m}^{-1}, 3 \text{ m}^{-1}, 5 \text{ m}^{-1}$ ) und eine Konzentration von  $270 \text{ mg L}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$  erstellt. Ein Ergebnis für  $q_A = 3 \text{ m}^{-1}$  zeigt Abbildung 3. Die Messergebnisse an den vier Probennamestellen weisen auf einen typischen Verlauf hin. Die  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration nimmt über der CLI Betthöhe ab und steigt mit zunehmender Zeit an. Die Durchbruchkurven sind verhältnismäßig flach. Dies weist auf eine Längsdispersion hin. Flache Durchbruchkurven haben den technischen Vorteil,

## // ERGEBNISSE

dass ein beginnender Durchbruch frühzeitig erkannt werden und eine Regeneration gestartet werden kann. Die niedrigste Konzentration im Ablauf der Kolonne war hier ca.  $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$ . Die Endkonzentration wird von der Kontaktzeit und damit der Oberflächenbeschickung bei gleicher Schüttungshöhe beeinflusst. Die Ergebnisse an einer Probennamestelle für verschiedene Oberflächenbeschickungen zeigt Abbildung 4. Die Anfangskonzentration verändert sich bis zu einer Oberflächenbeschickung von  $3 \text{ m}^{-1}$  nur gering. Höhere Oberflächenbeschickungen führen zu einer kürzeren Aufenthaltszeit und damit einem schnelleren Durchbruch. Kurzschlussströmungen führen zu vergleichbaren Ergebnissen. Abbildung 5 zeigt, dass mit zunehmender Zulaufkonzentration die Kolonne früher durchbricht. Die niedrigste Konzentration ist nur abhängig vom Erfolg der Regeneration und der Spülung der Kolonne ( $97 \text{ mg L}^{-1}$  Kurve beginnt mit erhöhten Werten). Die Kolonne erreicht höhere Ablaufwerte, wenn die Adsorptionskapazität erreicht ist. Be-

ladungsversuche mit den halbtechnischen Säulen mit einem Bettvolumen von  $137,4 \text{ L}$  und einem Durchmesser von  $50 \text{ cm}$  zeigen vergleichbare Ergebnisse. Abhängig von der Regeneration steigt die Konzentration im Ablauf der Kolonne an. Die Schwankungen sind auf Veränderungen in der Abwasserkonzentration und der Durchströmung der Kolonne zurückzuführen. Die Ionenaustauschkolonne kann durch Regeneration mit einer  $\text{NaCl}$ -Lösung vollständig und reversibel regeneriert werden. Für die Regeneration in der Kolonne muss das CLI Bett fluidisiert werden. Dies ermöglicht einen guten Stoffaustausch. Mit zunehmender  $\text{NaCl}$  Konzentration können höhere  $\text{NH}_4$  Konzentrationen im Regenerationswasser erreicht werden. Da  $\text{NH}_4$  in der Adsorptionsreihenfolge vor  $\text{Na}$  liegt, muss für eine weitgehende Regeneration  $\text{Na}$  überstöchiometrisch vorliegen. Gute Ergebnisse wurden für eine Rückspiegelgeschwindigkeit von  $5 \text{ m}^{-1}$  und einer  $\text{NaCl}$  Konzentration von mehr als  $20 \text{ g L}^{-1}$  erzielt.

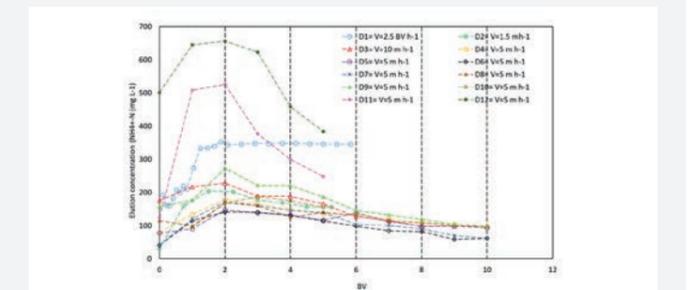
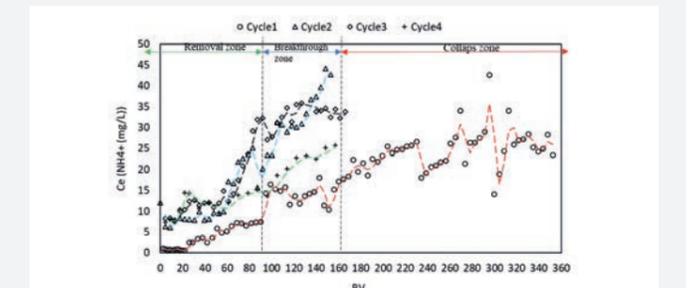
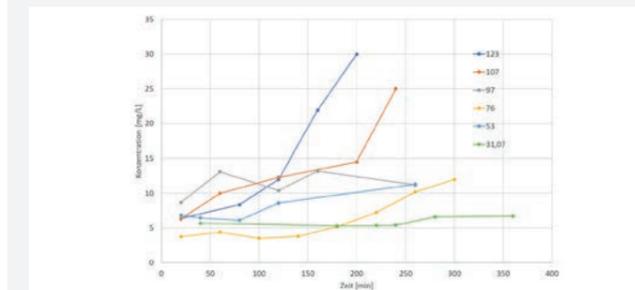
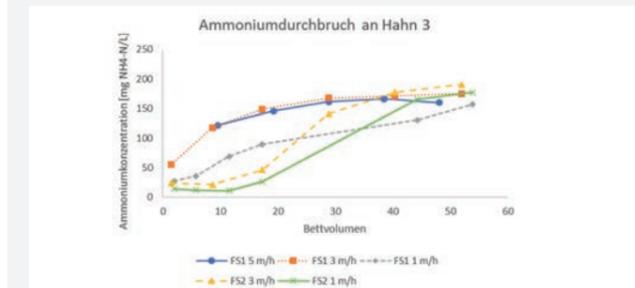


Abb. 4, links oben: Variation der Oberflächenbeschickung. Abb. 5, links unten: Durchbruchkurven für unterschiedliche  $\text{NH}_4$  Zulaufkonzentrationen. Abb. 6, rechts oben: Durchbruchkurven für reales Abwasser im Durchlaufbetrieb. Abb. 7, rechts unten: Regenerationskurven mit Variation der Rückspülgeschwindigkeit und Salzkonzentration.

## // FAZIT

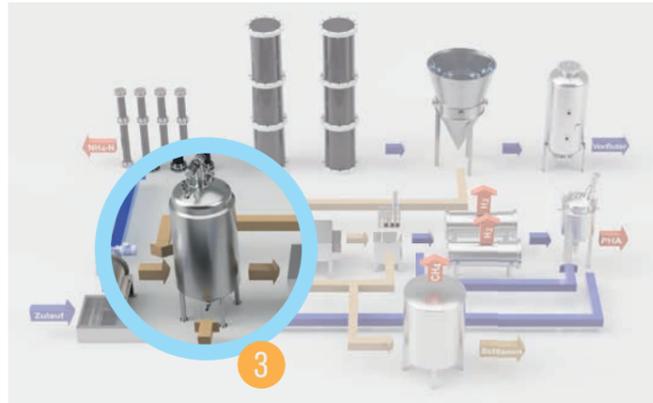
Die Entfernung von  $\text{NH}_4$  aus Abwasser im Vollstrom mit einer Ionenaustauscherkolonne ist möglich. Die Reinigungsleistung hängt von der Oberflächenbeschickung und der Filterbetthöhe ab. Die Betaufenthaltszeit sollte bei mehr als  $20 \text{ min}$  liegen, um im Ablauf der Kolonne weniger als  $10 \text{ mg L}^{-1}$  zu erreichen. Die Beladung von CLI mit  $\text{NH}_4$  ist vollständig reversibel und kann mit einer  $\text{NaCl}$ -Lösung erfolgen.

## // AUTOREN

**M. Sc. Behnam Askari Lasaki,**  
behnam.askari-lasaki@iswa.uni-stuttgart.de  
**Dipl.-Ing. Peter Maurer,**  
peter.maurer@iswa.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart  
Institut für Siedlungswasserbau Wassergüte- und Abfallwirtschaft  
Lehr- und Forschungsklärwerk  
Bandtäle 1, 70569 Stuttgart

# Optimierung der Dunkelfermentation von Labor- bis Pilotmaßstab



Die aus der Vorklärung gewonnenen Feststoffe werden in der Dunkelfermentation durch Mikroorganismen anaerob zu kurzkettigen Fettsäuren umgewandelt. Für eine Maximierung der Ausbeute und die Vermeidung der weiteren Umsetzung zu Methan wurden die Schlüsselparameter hydraulische Verweilzeit, pH-Wert und Temperatur optimiert.

## // METHODIK

Experimente im Labormaßstab wurden mit 2-Liter-Reaktoren (Abb. 1) im Batchbetrieb durchgeführt, um die Produktion der kurzkettigen Fettsäuren (SCFAs, short chain fatty acids) und die Methanbildung zu charakterisieren. Es folgten Versuche im 40-Liter-Maßstab im halbkontinuierlichen Betrieb zur Optimierung von pH-Wert und hydraulischer Verweilzeit (HRT) (Abb. 2).

Die Untersuchungen wurden mit Primärschlämmen aus unterschiedlichen Kläranlagen (Büsnau und Sindelfingen) durchgeführt. Die Reaktoren wurden kontinuierlich mit Schneckenpumpen durchmischt, pH-Wert, Temperatur und gelöster Sauerstoff wurden in der Rezirkulationsleitung des Reaktors überwacht.

Die als optimal bestimmten Bedingungen wurden auf eine Pilotanlage mit 300 L Volumen mit ähnlicher Konfiguration übertragen (Abb. 3).

Hier wurde zusätzlich der Einfluss der Temperatur untersucht. Während der Experimente im Pilotmaßstab wurde der Reaktor aufgrund der Schwankungen der Primärschlammbeschaffenheit verschiedenen organischen Beladungsraten (OLR, organic loading rate; angegeben in g organische Feststoffe pro L Reaktorvolumen und Tag) ausgesetzt.

Die Ausbeute der Dunkelfermentation  $Y_{SCFAs}$ , angegeben in mg kurzkettige Fettsäuren pro g organischer Feststoffe (VS, volatile solids), wurde anhand der folgenden Gleichung berechnet:

$$Y_{SCFAs} [mg \cdot g_{VS}^{-1}] = \frac{r_{SCFAs} [mg \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}]}{OLR [g_{VS} \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}]}$$

Wobei  $r_{SCFAs}$  die tägliche Produktivität von SCFAs pro L Reaktorvolumen darstellt.



Abb. 1, links: Batch-Reaktoren (ampts2<sup>®</sup>) im Labormaßstab mit einem Volumen von 2 L. Abb. 2, mitte: 40 L halbkontinuierlicher Reaktor. Abb. 3, rechts: 300 L halbkontinuierlicher Reaktor im Pilotmaßstab, gekoppelt mit einem Vorklärrichter.

## // ERGEBNISSE

Die Versuche im Batchbetrieb zeigten bereits, dass die höchste Produktivität  $r_{SCFAs}$  an kurzkettigen Fettsäuren nach eher kurzen Fermentationszeiten erreicht werden konnte. Bis zu diesem Punkt konnte auch die Methanisierung geringgehalten werden. Der Einfluss der hydraulischen Verweilzeit wurde im halbkontinuierlichen Betrieb im 40 L-Reaktor getestet; die Temperatur betrug bei diesen Versuchen etwa 25 °C. Die Ausbeute ( $Y_{SCFAs}$ ) stieg bis zu 36 Stunden linear an und stabilisierte sich dann bei 48 Stunden. Bei den

Produkten waren Essig- und Propionsäure vorherrschend (Abb. 4A). Um die Auswirkung des pH-Werts auf die Produktion zu bestimmen, wurden Versuche bei einer optimierten hydraulischen Verweilzeit von 36 Stunden mit pH-Werten zwischen 5,2 und 10 durchgeführt. Die höchsten Ausbeuten wurden bei einem neutralen bis leicht alkalischen Milieu erzielt (Abb. 4B). Ein ähnlicher Trend wurde auch bei Schlämmen aus Sindelfingen festgestellt (Abb. 4C). Die optimierten Bedingungen (HRT: 36 h; pH-Wert: 7) wurden auf die

Pilotanlage übertragen und der Einfluss der Temperatur bei 25,2 °C und 32,4 °C untersucht (Abb. 4D). Bei 32 °C wurde eine Ausbeute  $Y_{SCFAs}$  von etwa 150 mg kurzkettigen Fettsäuren pro Gramm organischer Feststoffe erreicht. Bei organischen Beladungsraten zwischen 13 und 22  $g_{VS} L^{-1} d^{-1}$  waren die Ausbeuten stabil, während sie bei geringeren Beladungsraten von unter 13  $g_{VS} L^{-1} d^{-1}$  anstiegen (Abb. 4E).

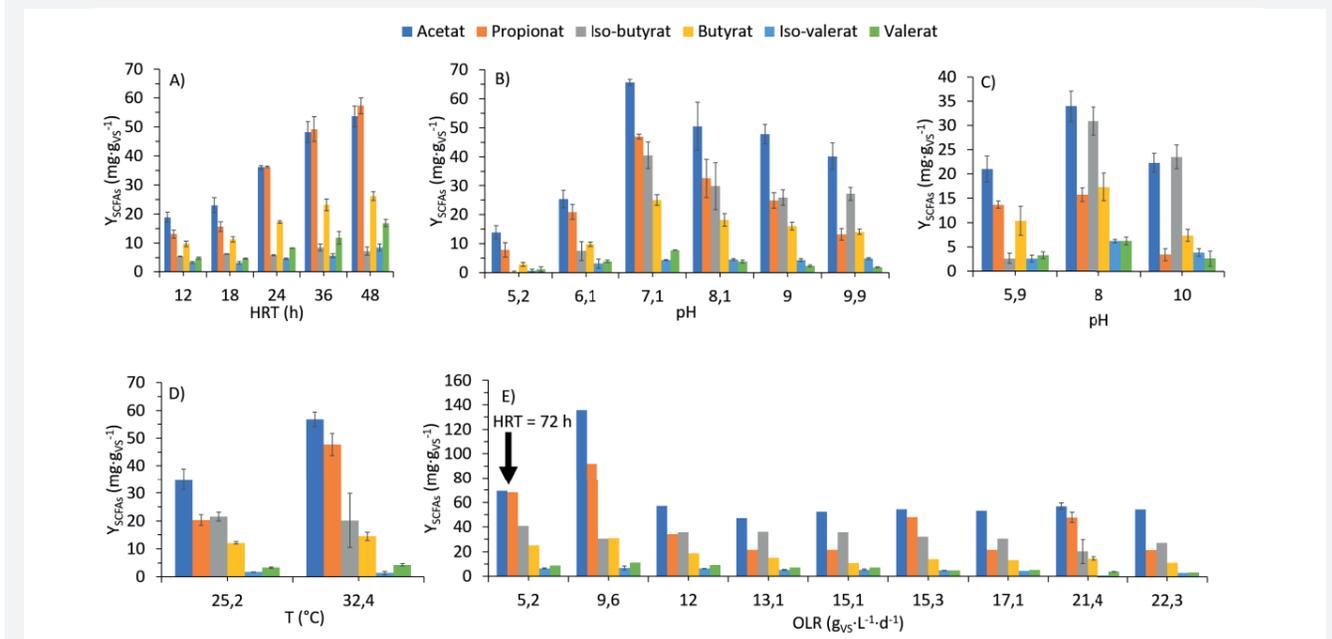


Abb. 4: Optimierung von A) hydraulischer Verweilzeit (HRT), B) und C) pH-Wert (Primärschlamm Büsnau bzw. Sindelfingen), D) Temperatur und E) organischer Beladungsraten bei einer HRT von 36 Stunden (Ausnahme gekennzeichnet). Experimente A, B und C wurden im 40 L-Maßstab, Experimente D und E im Pilotmaßstab durchgeführt.

## // FAZIT

Die Dunkelfermentation kann ein praktikabler Ansatz für die Verwertung von organischem Kohlenstoff in der Feststoffbehandlungsstufe einer Bioraffinerie sein. Die Erfordernisse einer hydraulischen Verweilzeit von weniger als 48 Stunden, eines neutralen pH-Wertes und einer Temperatur von 32 °C machen dieses Verfahren wirtschaftlich interessant. Die Ausbeute an kurzkettigen Fettsäuren konnte bei niedrigen organischen Beladungsraten um mehr als 50 % erhöht werden. Eine mögliche Strategie zur Steigerung der Erträge wäre die Erhöhung der Häufigkeit von Fütterung und Ernte in der Dunkelfermentation, um durchschnittlich niedrigere organische Beladungsraten zu gewährleisten.

## // AUTOREN

M. Sc. Nikhil Shylaja Prakash, nikhil.prakash@partner.kit.edu

Dipl.-Ing. Peter Maurer, peter.maurer@iswa.uni-stuttgart.de

Prof. Dr. Harald Horn, harald.horn@kit.edu

Dr. Andrea Hille-Reichel, andrea.hille-reichel@kit.edu

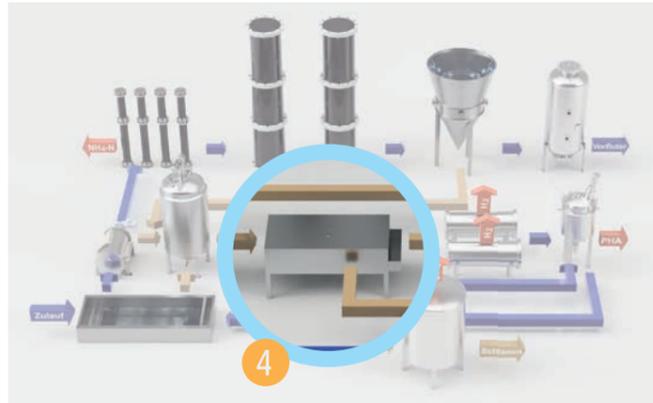
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des

KIT und Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

Wasserchemie und Wassertechnologie

Engler-Bunte-Ring 9a, 76131 Karlsruhe

# Optimierung der Feststoffabtrennung mit Membranen



Das Hydrolysat enthält nach der Dunkelfermentation neben den gelösten kurzkettigen Fettsäuren noch eine beträchtliche Menge Feststoff. Ziel war es, die Entwässerung mittels einer Kammerfilterpresse zu optimieren, gefolgt von der Optimierung der Mikrofiltration bezüglich physikalischer und chemischer Membranreinigungsmethoden.

## // METHODIK

Da die Gasproduktion während der Dunkelfermentation gering ist, ist der Feststoffgehalt (TS, total solids) im Hydrolysat ähnlich wie der des behandelten Primärschlammes. Zur Optimierung der Entwässerung des Hydrolyсата wurde Stärke auf Kartoffelbasis (Emsland Group, Deutschland) verwendet, die zu ca. 20 % aus Amylose und zu 70 % aus Amylopektin besteht. Das Flockungsmittel wurde mit 2,3-Epoxypropyltrimethylammoniumchlorid veredelt, das Endprodukt war Hydroxypropyltrimethylammonium-Stärke (HPAS). Die Filtration erfolgte in einer Kammerfilterpresse (Abb. 1) im Dead-End-Modus mit Filtertüchern auf Polyesterbasis mit einer Maschenweite von 100 µm bei einem Druck von 15 bar. Das Filtrat wurde daraufhin für die Mikrofiltration verwendet, während der Filterkuchen der anaeroben Vergärung im Faulturn zugeführt wurde.

Das Filtrat wurde einer Mikrofiltration im Querstromverfahren unterzogen (Abb. 2). Der Druck am Einlass betrug 2,2 bar, und als Material wurde Keramik ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Porengröße = 0,2 µm; Länge = 1 m; effektive Filtrationsfläche ( $A_{\text{eff}}$  = 0,316 m<sup>2</sup>) verwendet. Die Überströmgeschwindigkeit der Membran lag im Bereich von 5 bis 6 m s<sup>-1</sup>.

Der Permeatflux ( $J_{\text{std}}$ ) wurde auf 25 °C standardisiert und anhand der folgenden Gleichung berechnet:

$$J_{\text{std}} [\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}; \text{LMH}] = \frac{Q_{\text{Permeat}} [\text{L} \cdot \text{h}^{-1}]}{A_{\text{eff}} [\text{m}^2] \cdot f_T}$$

Wobei  $Q_{\text{Permeat}}$  die Permeatflussrate und  $f_T$  den Temperaturkorrekturfaktor darstellen.



Abb. 1: Kammerfilterpresse mit mehreren Kammern (Filtertücher mit 100 µm Maschenweite).



Abb. 2: Querstrom-Mikrofiltration mit Keramikmembranen (Röhren mit Membranen mit Pfeilen gekennzeichnet; Länge je 1 m, Porengröße 0,2 µm); Anlage Atec, Ulm.

## // ERGEBNISSE

Die Entwässerung des Hydrolyсата aus der Dunkelfermentation wurde im Labormaßstab mittels eines Siebs mit 100 µm Maschenweite untersucht und die Dosierung von HPAS variiert. Eine optimale Dosierung wurde bei 30 g HPAS pro kg Gesamtfeststoff (TS) erreicht (Abb. 3A). Bezüglich der Qualität des Abwassers zeigte sich, dass bei dieser spezifischen Dosierung die niedrigste Restkonzentration an abfiltrierbaren Feststoffen (AFS) zu verzeichnen war. Die Ergebnisse wurden auf den Pilotmaßstab übertragen. Hier wurden etwa 1.000 L Hydrolysat bei einer Dosierung von 28 g HPAS pro kg Gesamtfeststoffe filtriert,

wobei die durchschnittliche AFS-Konzentration bei etwa 500 mg L<sup>-1</sup> lag.

Das Filtrat wurde für die Optimierung der Mikrofiltration verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass überschüssiges Flockungsmittel die Maschen der Kammerfilterpresse (100 µm) passiert und die Keramikmembranen verschmutzt, was zum Einbrechen des Permeatfluxes führt (Abb. 3B). Bei erhöhter Rückspülfrequenz alle 600 Sekunden für 20 Sekunden kann der Permeatflux ( $J_{\text{std}}$ ) aufrechterhalten werden. Eine weitere Möglichkeit, einen hohen  $J_{\text{std}}$ -Wert langfristig zu gewährleisten,

besteht darin, den pH-Wert unter dem isoelektrischen Punkt des Membranmaterials ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) zu halten (Abb. 3B). Dies führt zu einer positiven Ladung der Keramikmembran und verhindert die Adsorption von positiv geladenem HPAS. Wenn die Membran vollständig belegt ist, muss sie mit einer basischen Lösung gereinigt werden, um organische Verschmutzungen zu entfernen und mit einer sauren Lösung, um HPAS-induzierte Verblockungen zu entfernen (Abb. 3C).

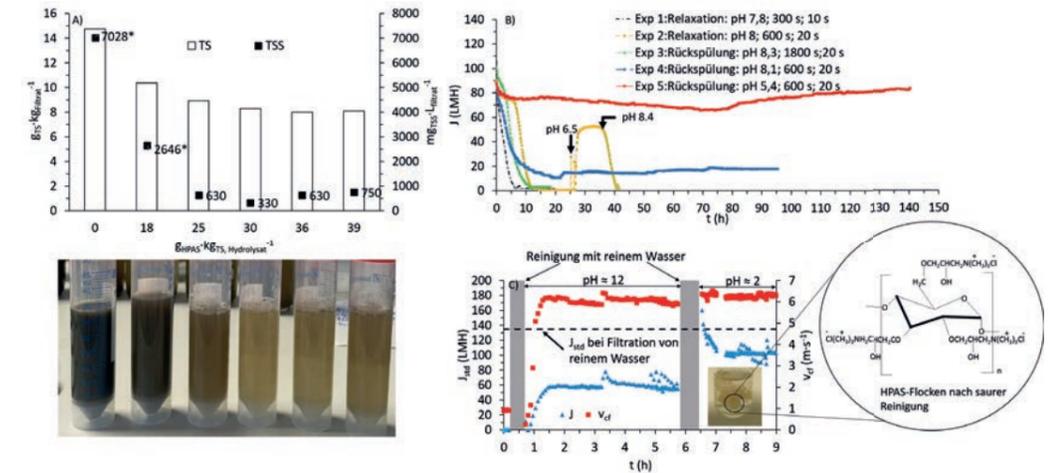


Abb. 3: A) Entwässerung im Labormaßstab mit HPAS (das Foto unten zeigt das Filtrat nach der Entwässerung), B) Optimierung der physikalischen Reinigungsmethoden für die Langzeit-Mikrofiltration und C) chemische Reinigung zur Wiederherstellung des Permeatfluxes (Überströmgeschwindigkeit der Membran: 5 bis 6 m s<sup>-1</sup>).

## // FAZIT

Die Flockung mit HPAS und die Entwässerung mit einer Kammerfilterpresse können die Feststoffbelastung bei der Mikrofiltration stark reduzieren. Überschüssiges HPAS oder an HPAS gebundene Partikel können jedoch die Filtertücher auf Polyesterbasis passieren und erhebliche Verschmutzungen der Keramikmembran verursachen. Eine erhöhte Rückspülfrequenz sowie eine Modifizierung der Oberflächenladung (durch pH-Senkung) sind mögliche Optionen für die Langzeitfiltration.

## // AUTOREN

M. Sc. Nikhil Shylaja Prakash, nikhil.prakash@partner.kit.edu

Dipl.-Ing. Peter Maurer, peter.maurer@iswa.uni-stuttgart.de

Prof. Dr. Harald Horn, harald.horn@kit.edu

Dr. Andrea Hille-Reichel, andrea.hille-reichel@kit.edu

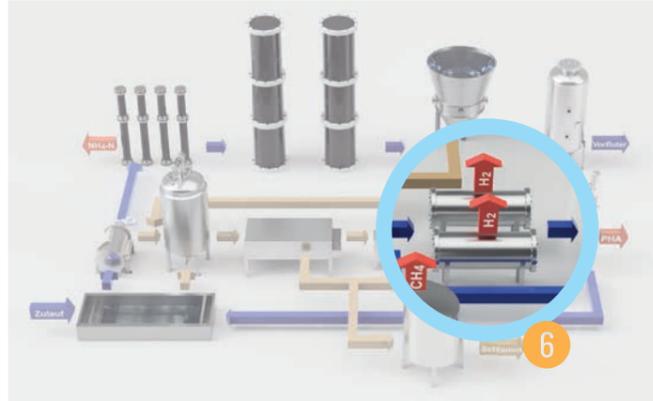
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des

KIT und Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

Wasserchemie und Wassertechnologie

Engler-Bunte-Ring 9a, 76131 Karlsruhe

# Mikrobielle Elektrolysezellen (MEC)



Mikrobielle Elektrolysezellen (MEC) sind eine innovative Technologie, die die effiziente Erzeugung von Wasserstoff aus Abwasser ermöglicht. In diesem Arbeitspaket sollten optimale Prozessbedingungen mittels mikrofluidischer Reaktoren ermittelt und eine erste Hochskalierung auf 10 L durchgeführt werden.

## // METHODIK

Um die Effizienz von MEC zu verbessern, wurden Strategien zur Untersuchung und Optimierung der Biofilmleistung und Wasserstoffproduktion entwickelt (Abb. 1). Mithilfe eines mikrofluidischen bioelektrochemischen Systems, gekoppelt mit einer Bildgebung durch die optische Kohärenztomographie, untersuchten wir die Dicke und Struktur des Biofilms und die Auswirkungen dieser Parameter auf die Effizienz des Elektronentransfers. Wir verwendeten auch kleine bioelektrochemische Reaktoren (250 ml) mit Hydrolysat als Substrat, um die Auswirkungen von Parametern wie dem pH-Wert, dem angelegten Potenzial und der Substratkonzentration auf die MES-Leistung und die mikrobiellen Gemeinschaften zu untersuchen.



Abb. 1: Mikrofluidisches bioelektrochemisches System.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse führten wir eine Hochskalierung in einem bioelektrochemischen 10-Liter-Scheibentauchkörper durch (Abb. 2). Die Rotation der scheibenförmigen Anoden verbessert die Durchmischung und den Stofftransport, wodurch der Kontakt zwischen exoelektrogenen Bakterien und organischen Substraten verbessert wird. Dieser skalierbare Aufbau ermöglicht die Untersuchung von Randbedingungen für einen kontinuierlichen Betrieb, was für die Anwendung im Klärwerk entscheidend ist. Darüber hinaus kann das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen den mikrobiellen Spezies im Reaktor zu optimierten mikrobiellen Konsortien führen, die die Gesamteffizienz der Wasserstoffproduktion steigern.



Abb. 2: Bioelektrochemischer 10-L-Drehscheibenreaktor.

## // ERGEBNISSE

Der Einfluss der Scherbelastung auf die MEC-Leistung wurde über eine Variation der angelegten Durchflussraten untersucht. In diesen Experimenten wurden die Biofilmstrukturen und die erreichbare Stromdichte gemessen.

Wir konnten feststellen, dass höhere Flussraten mit dichteren Biofilmen und höheren Stromdichten korrelieren. Darüber hinaus zeigten wir, dass die Biofilmstruktur nicht nur durch die physikalische Kompression bestimmt wird. Die Zellen passen sich

innerhalb weniger Tage an die Scherbelastungen an und produzieren formstabile Biofilme, sodass keine konstant hohe Scherkraft notwendig ist, um optimale Stromdichten zu erzielen (Abb. 3).

Auf der Grundlage von Experimenten, die in kleinen bioelektrochemischen Systemen unter Batch-Bedingungen durchgeführt wurden, stellten wir fest, dass die Aufrechterhaltung eines neutralen pH-Werts von 7, die Verwendung einer Hydrolysatkonzentration von 40 % und das Anlegen

eines Anodenpotenzials von 0 V gegen eine Standardwasserstoffelektrode die Effizienz der Wasserstoffproduktion in mikrobiellen Elektrolysesystemen (MES) maximieren.

Bei Anwendung der gleichen Versuchsbedingungen und einer Skalierung auf den 10-Liter-Scheibentauchkörper wurde eine maximale Stromdichte von 1,2 A m<sup>-2</sup> und eine Wasserstoffproduktion von 8 L Tag<sup>-1</sup> erreicht (Abb. 4).

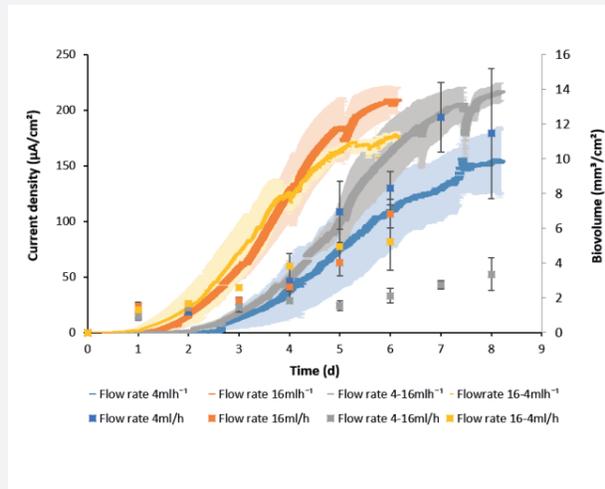


Abb. 3: Der Einfluss unterschiedlicher Durchflussraten, die zur Kontrolle der Biofilmdicke verwendet werden, auf die mittlere Stromdichte und das Biovolumen.

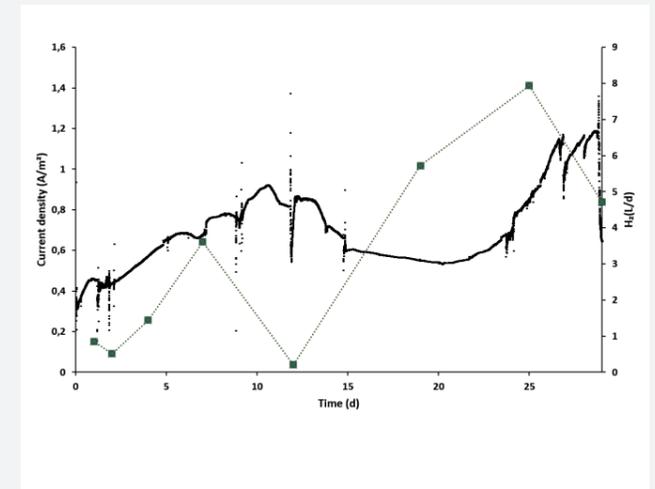


Abb. 4: Stromdichte und Wasserstoffproduktion in einem bioelektrochemischen Drehscheibenreaktor.

## // FAZIT

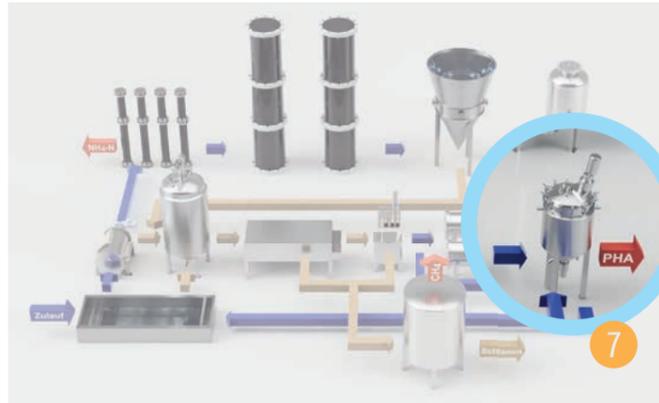
Zusammenfassend konnten Randbedingungen für einen optimalen Betrieb der MEC gefunden werden. Die ermittelten optimalen Bedingungen verbesserten die Effizienz der Wasserstoffproduktion in Batch-Versuchen erheblich. Die Skalierung auf einen bioelektrochemischen 10-Liter-Scheibentauchkörper bestätigte diese Ergebnisse und zeigte die Skalierbarkeit der MEC und ihr Potenzial für eine nachhaltige Wasserstoffproduktion aus organischen Abfällen. Zukünftige Forschungsanstrengungen sollten die mikrobiellen Interaktionen und das Reaktordesign verfeinern, um die MEC-Effizienz für praktische Anwendungen weiter zu verbessern.

## // AUTOR

Prof. Dr. Johannes Gescher, johannes.gescher@tuhh.de

TU Hamburg  
Institut für Technische Mikrobiologie  
Kasernenstraße 12 (F)  
21073 Hamburg

# Mikrobielle Herstellung von PHAs aus saurem Hydrolysat



Polyhydroxyalkanoate (PHA) sind thermoplastische Biopolymere, die von verschiedenen Mikroorganismen aus einem vielfältigen Substratspektrum hergestellt werden können. Ziel der Arbeit war es, geeignete PHA-Produzentenstämme zu identifizieren und die Säuren der Hydrolyse von Primärschlamm für das Wachstum und die Produktion von PHA nutzen zu können. Außerdem soll die PHA-Produktion im Pilotmaßstab mit den identifizierten Mikroorganismen etabliert werden.

## // METHODIK

Basierend auf einer Literaturrecherche und Nutzwertanalyse wurde je ein Stamm von *Cupriavidus necator*, *Azohydromonas australica*, *Pseudomonas putida* und *Haloferax mediterranei* zur genaueren Untersuchung ausgewählt.

Eine systematische Charakterisierung des Wachstumsverhaltens der ausgewählten Mikroorganismen auf verschiedenen organischen Säuren erfolgte mit Hilfe eines Mikrobioreaktors. Es wurden Wachstumskinetiken der einzelnen Mikroorganismen auf organischen Säuren erstellt, um den vielversprechendsten Stamm zu identifizieren.

Unsere Untersuchungen ergaben, dass sich die entstehenden organischen Säuren als toxisch erwiesen. Daher konnte keine einfache satzweise Prozessführung durchgeführt werden, sondern die organischen

Säuren mussten kontinuierlich zugeführt werden. Wir haben daher erstmals eine Perfusionsmethode mit Querstromfiltration entwickelt, damit durch eine Zellrückhaltung die Zufütterung mit variablen Säurekonzentrationen ermöglicht werden konnte. Das Filtrat wurde aus dem Bioreaktor abgeführt, sodass ein kontinuierlicher Zustrom an Nährstoffen in das System gewährleistet war.

Der Prozess wurde in zwei Phasen unterteilt: In eine Zellwachstumsphase mit Nährstoffen im Überschuss und in eine PHA-Produktionsphase mit Stickstoffmangel. Der Wechsel von Zellwachstum zu PHA-Bildung findet in den Zellen durch Limitierung von verfügbarem Stickstoff statt. Dies kann beispielsweise erreicht werden, indem Zeolithe in das Substrat gegeben werden, an welchem der Stickstoff adsorbiert wird.

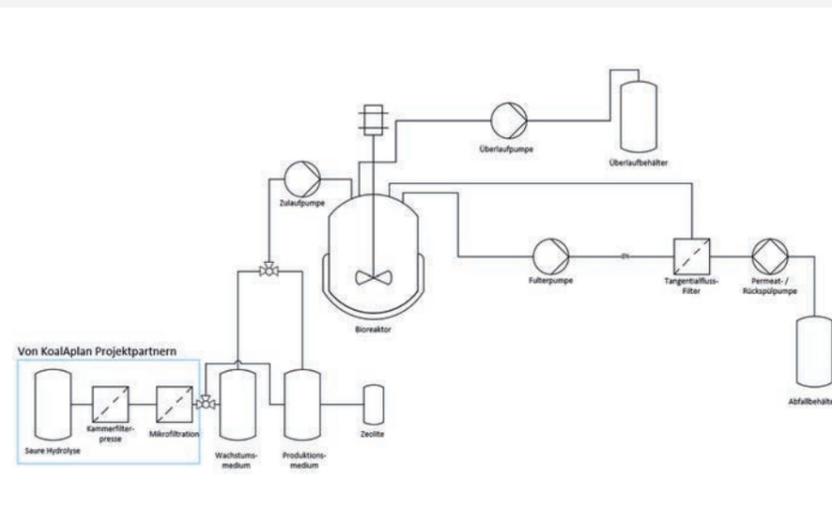


Abb. 1,2: Schema (links) und Laboraufbau (rechts) der PHA-Herstellung mit dem Perfusionsverfahren.



## // ERGEBNISSE

In der sauren Hydrolyse entsteht eine Mischung aus verschiedenen organischen Säuren, darunter z. B. Essig-, Propion- und Buttersäure. Aus einem Vergleich von verschiedenen PHA-produzierenden Mikroorganismen zeigte sich das Bodenbakterium *Cupriavidus necator* als am besten geeignet. Es war möglich mit *C. necator* alle von uns nachgewiesenen Säuren sowohl zur Vermehrung der Bakterien als auch zur Herstellung von PHA zu verwenden.

Unsere Ergebnisse zeigten, dass sich Essigsäure ab  $11 \text{ g L}^{-1}$ , Propionsäure ab  $7$  und

Buttersäure sogar ab  $5 \text{ g L}^{-1}$  negativ auf das Wachstumsverhalten auf *C. necator* auswirkte.

Durch unser Perfusionsverfahren konnten wir die Wachstumshemmung der Bakterien verhindern und erfolgreich zeigen, dass  $97\%$  des Kohlenstoffs aus den organischen Säuren durch die Mikroorganismen aufgenommen wurden. Dabei wurden ca.  $20\%$  des Kohlenstoff in PHA fixiert. Aus ca.  $5 \text{ g L}^{-1}$  organischen Säuren konnte  $14 \text{ g L}^{-1}$  Biomasse mit  $5 \text{ g L}^{-1}$  PHA hergestellt werden.

Erfreulicherweise handelt es sich bei dem so erzeugten Produkt um ein Co-Polymer mit einem 3-Hydroxyvaleratanteil von ca.  $10\%$ , was verbesserte mechanische Eigenschaften zeigt, als Homo-Polymer PHB, welches aus Zucker hergestellt wird.

Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass die Zufütterungsrate während der Produktbildung und Produktivität sogar verdoppelt werden kann. Dies würde sich positiv auf den Anteil an fixiertem Kohlenstoff in der Gesamtbilanz auswirken.

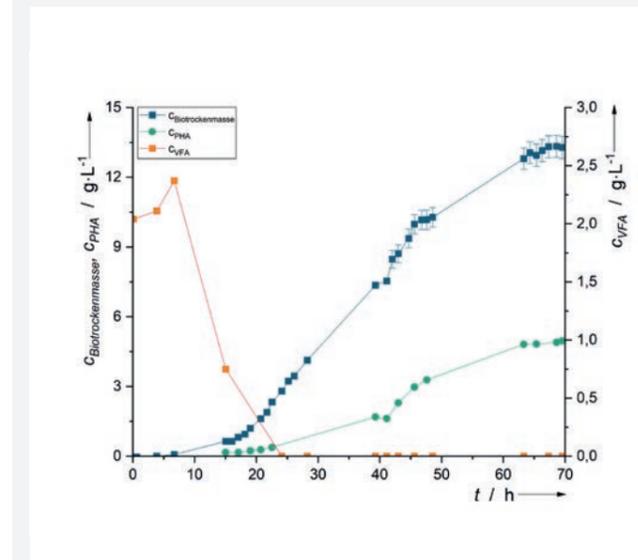


Abb.3: Zeitlicher Verlauf der organischen Säuren und Zunahme von Biomasse und PHA.



Abb. 4: Der Kunststoff Polyhydroxyalkanoat produziert aus organischen Säuren.

## // FAZIT

*Cupriavidus necator* erwies sich im Vergleich zu den anderen getesteten Bakterien als das tolerantere Bakterium für organische Säuren und ist ein geeignetes Bakterium zur Herstellung von PHA aus organischen Säuren der sauren Hydrolyse. Um die Wachstumshemmung der organischen Säuren auf die Mikroorganismen zu verhindern, wurde eine neue Prozessführungsstrategie entwickelt: Ein Perfusionsverfahren mit Zellrückhaltung. Mit dem von uns entwickelten Verfahren konnten  $97\%$  der Kohlenstoffs umgewandelt werden. Dieses neue Verfahren dient als Basis für Nutzbarmachung von verschiedenen Substraten mit niedrigen Konzentrationen zur Produktion von PHAs.

## // AUTOREN

M. Sc. Steven Leonhardt, steven.leonhardt@igb.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Pravesh Tamang, pravesh.tamang@igb.fraunhofer.de

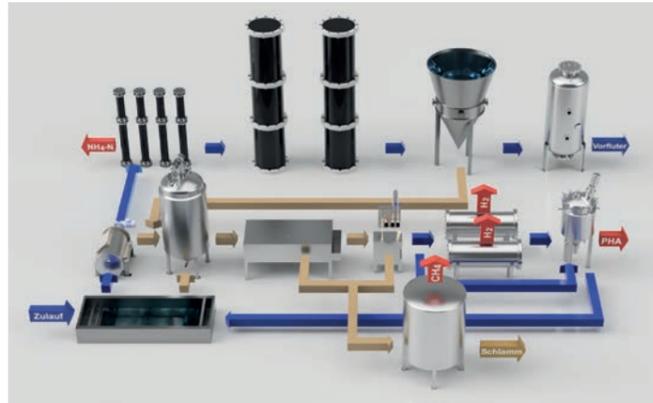
Dr.-Ing. Susanne Zibek, susanne.zibek@igb.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut

für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB)

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

# Kaskade vom Abwasserzulauf bis zur Gewinnung kurzkettiger Fettsäuren



Durch Vorklärbecken und Mikrosieb können insgesamt etwa  $18 \text{ g}_{\text{TOC}} \text{ EW}^{-1} \text{ d}^{-1}$  aus dem Hauptabwasserstrom gewonnen werden. Ein Teil dieser Fracht kann in der Dunkelfermentation zu kurzkettigen organischen Säuren umgewandelt und durch die nachgeschaltete Feststoffabtrennung extrahiert werden.

## // METHODIK

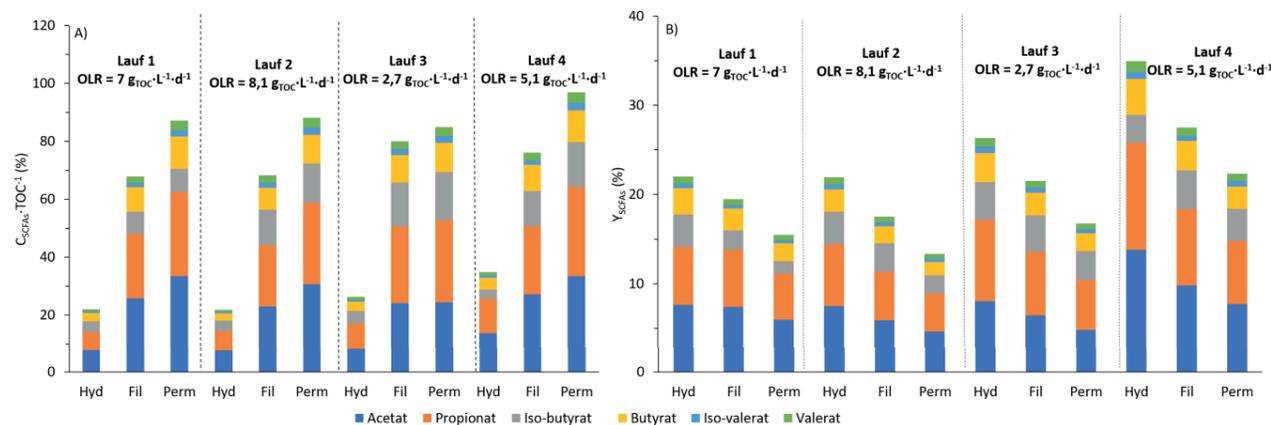
Mit den als optimal bestimmten Bedingungen wurde die Kaskade „Vorklärung, Dunkelfermentation, Kammerfilterpresse und Mikrofiltration“ getestet. Das Volumen des eingesetzten Dunkelfermentationsreaktors betrug 300 L. Die Dunkelfermentation wurde über 30 Tage betrieben, wobei willkürlich vier Tage (als Läufe bezeichnet) ausgewählt wurden, um die Feststoffabtrennung aus dem Hydrolysat durchzuführen. Diese musste durch den Einsatz der Kammerfilterpresse für die Entwässerung halbkontinuierlich gestaltet werden. Für die Flockung wurde erbsenbasierte Stärke verwendet. Die Volumentrückgewinnung ( $V_{\text{Rück}}$ ) für die beiden Membrantrennverfahren wurde mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$V_{\text{Rück}} [\%] = \frac{V_{\text{p,f}} [\text{L}]}{V_{\text{f}} [\text{L}]} \times 100$$

Wobei  $V_{\text{p,f}}$  das Endvolumen im Permeat/Filtrat nach der Filtration und  $V_{\text{f}}$  das Anfangsvolumen im Zulauf vor Beginn der Filtration ist. Um die Ausbeute an kurzkettigen Fettsäuren (SCFAs) nach der Filtration zu berechnen (vgl. Abb. 1B), wurde die Gleichung wie folgt modifiziert:

$$Y_{\text{SCFAs}} [\%] = \left\{ \frac{c_{\text{SCFAs,fp}} [\text{g} \cdot \text{L}^{-1}] \cdot V_{\text{p,f}} [\text{L}]}{\text{OLR} [\text{g}_{\text{TOC}} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}] \cdot \text{HRT} [\text{d}] \cdot V_{\text{z/a}} [\text{L}]} \right\} \times 100$$

Dabei beschreibt  $c_{\text{SCFAs,fp}}$  die Massenkonzentrationen von SCFAs (als Kohlenstoffäquivalente) im Filtrat oder Permeat (vgl. Abb. 1A). OLR ist die organische Beladungsrate, ausgedrückt als g gesamter organischer Kohlenstoff (TOC, total organic carbon) pro L und Tag, und  $V_{\text{z/a}}$  bezeichnet das zu- bzw. abgeführte Volumen des Hydrolysereaktors.



**Abb. 1:** A) Verhältnis von SCFAs (als Kohlenstoffäquivalente) zum gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) im Ablauf jeder Verfahrensstufe. B) Ausbeute  $Y_{\text{SCFAs}}$  an SCFAs nach jedem Verfahrensschritt, bezogen auf den organischen Kohlenstoff im Primärschlamm.

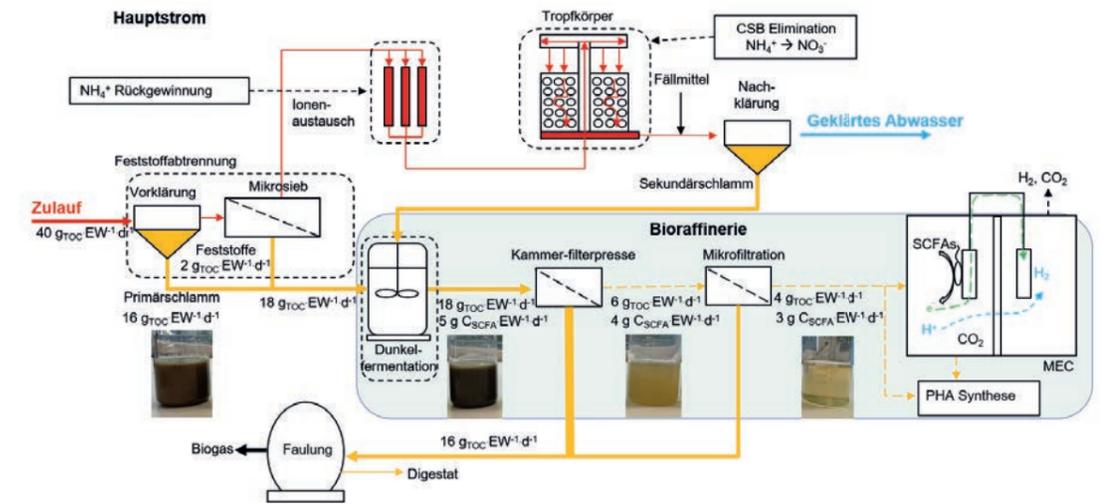
## // ERGEBNISSE

Während der Dunkelfermentation können etwa 20 bis 30 % des zugeführten gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) zu kurzkettigen Fettsäuren fermentiert werden (Abb. 1A). Während der Flockung wurde die Dosierung von HPAS von Lauf 1 bis 4 erhöht. Bei der Entwässerung in der Kammerfilterpresse konnten etwa 60 bis 70 % der Feststoffe des Hydrolyats entfernt und 85 % des eingesetzten Volumens als Filtrat zurückgewonnen werden ( $V_{\text{Rück}}$ ). Die erreichbare Konzentration an abfiltrierbaren Feststoffen (AFS) im Filtrat

war gering, jedoch kann eine Überdosierung des Flockungsmittels zu einem höheren Rückhalt der Fettsäuren führen. Das Filtrat der Kammerfilterpresse wurde der Mikrofiltration zugeführt.

Die Mikrofiltration wurde mit Rückspülzyklen (alle 600 s für 20 s) durchgeführt. Die Dauer betrug jeweils zwischen 3 und 4 h. In allen Fällen konnte eine Volumentrückgewinnung von 70 % erreicht werden. Während der vier Läufe konnte für die Filtration von  $900 \text{ L m}_{\text{eff}}^{-2}$

(effektive Membranfläche) ein stabiler Permeatflux von 50 bis 60 LMH aufrechterhalten werden. Danach muss eine chemische Reinigung erfolgen. Mit der Keramikmembran kann eine AFS-Entfernung von 99,9 % erzielt werden, bei einem durchschnittlichen Rückhalt der Fettsäuren von 5 %. Das Produkt ist ein partikelfreies Permeat mit einem hohen Anteil an kurzkettigen Fettsäuren im Vergleich zum enthaltenen gesamten gelösten organischen Kohlenstoff (zwischen 85 und 97 % als Verhältnis der Kohlenstoffäquivalente) (Abb. 1A,B).



**Abb. 2:** Flussdiagramm mit Kohlenstoffbilanz bezüglich des gesamten organischen Kohlenstoffs und in den Fettsäuren enthaltenem Kohlenstoff in der Kaskade. MEC: Mikrobielle Elektrolysezelle. \*Menge des Sekundärschlammes ist zu gering für die Berücksichtigung in der Bilanzierung.

## // FAZIT

Der Einsatz der Membrantechnologie ist eine praktikable Option zur Gewinnung kurzkettiger Fettsäuren aus dem Feststoffstrom kommunaler Abwässer. Ein beträchtlicher Anteil des organischen Kohlenstoffs im Primärschlamm kann in SCFAs umgewandelt werden. Abb. 2 zeigt die resultierende Kohlenstoffbilanz in der Kaskade. Etwa  $3 \text{ g C}_{\text{SCFA}} \text{ EW}^{-1} \text{ d}^{-1}$  können in Form kurzkettiger Fettsäuren durch Mikrofiltration extrahiert werden. Das partikelfreie Permeat weist einen hohen Reinheitsgrad mit einem bemerkenswerten Anteil an kurzkettigen Fettsäuren auf und kann damit als Substrat in biotechnologischen Produktionsprozessen eingesetzt werden.

## // AUTOREN

**M. Sc. Nikhil Shylaja Prakash**, nikhil.prakash@partner.kit.edu

**Dipl.-Ing. Peter Maurer**, peter.maurer@iswa.uni-stuttgart.de

**Prof. Dr. Harald Horn**, harald.horn@kit.edu

**Dr. Andrea Hille-Reichel**, andrea.hille-reichel@kit.edu

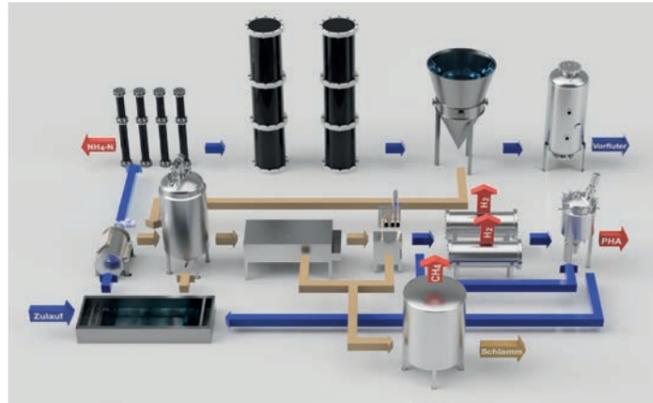
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des

KIT und Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

Wasserchemie und Wassertechnologie

Engler-Bunte-Ring 9a, 76131 Karlsruhe

# Bilanzierung des Stickstoff- und Phosphatstroms in der Bioraffinerie



Neben der Rückgewinnung des in der partikulären Fracht des Abwassers enthaltenen Kohlenstoffs, sind auch die Ströme von Stickstoff und Phosphor in der Bioraffinerie zu betrachten.

Als Makronährstoffe dienen sie dem Biomasseaufbau in den nachgeschalteten biotechnologischen Verwertungsstufen.

## // METHODIK

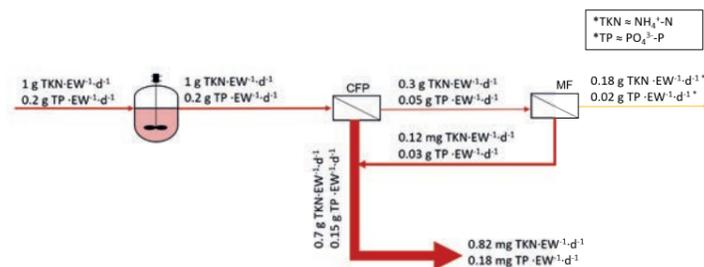
Die Konzentrationen von Stickstoff und Phosphor wurden vor und nach jeder Behandlungsstufe in der Bioraffinerie bestimmt. Der Stickstoff wurde als gesamter Kjeldahl-Stickstoff (TKN) erfasst, der sowohl den organisch gebundenen Stickstoff als auch den Ammoniumstickstoff

( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) umfasst. Der Phosphor wurde als gesamter Phosphor (TP) bestimmt, der den organisch gebundenen Phosphor sowie den Phosphor im gelösten Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) beinhaltet.

## // ERGEBNISSE

Abbildung 1 zeigt die Bilanz von Stickstoff und Phosphor auf ihrem Weg durch die Bioraffinerie. Beide Makronährstoffe werden für den Aufbau von Biomasse benötigt. Dies umfasst sowohl die säurebildenden Mikroorganismen in der Dunkelfermentation als auch die elektroaktiven Mikroorganismen in den anodischen Biofilmen der mikrobiellen Elektrolysezelle oder die Polyhydroxyalkanoat (PHA) produzierenden

Bakterien im Fermenter. Die Restkonzentrationen am Ende der Kaskade können in das Hauptstromverfahren eingespeist werden. Hier tragen sie aufgrund ihres geringen Anteils am Gesamtvolumen des Abwasserstroms kaum zu Änderungen der Stoff- oder Volumenströme bei. Die in den Filtrationsverfahren zurückgehaltenen Anteile werden mit den Feststoffen der Faulung zugeführt.



**Abb. 1, links:** Bilanz von Stickstoff (als TKN, gesamter Kjeldahl-Stickstoff) und Phosphor (als TP, Gesamtphosphor) in der Bioraffinerie. Nach der Mikrofiltration(\*) entspricht  $\text{TKN} \approx \text{NH}_4^+\text{-N}$  und  $\text{TP} \approx \text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ .

## // AUTOREN

**M. Sc. Nikhil Shylaja Prakash**, nikhil.prakash@partner.kit.edu

**Dipl.-Ing. Peter Maurer**, peter.maurer@isw.uni-stuttgart.de

**Prof. Dr. Harald Horn**, harald.horn@kit.edu

**Dr. Andrea Hille-Reichel**, andrea.hille-reichel@kit.edu

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des

KIT und Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

Wasserchemie und Wassertechnologie

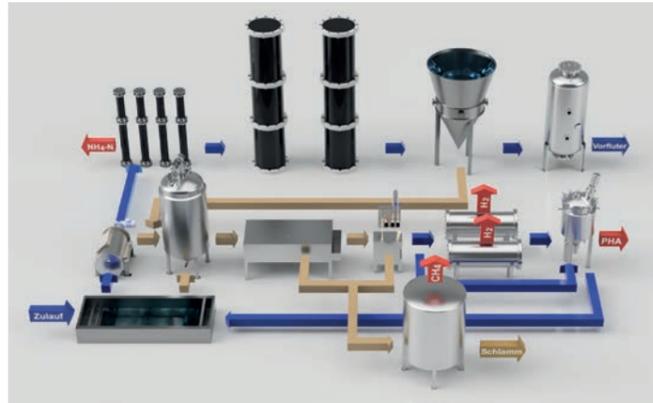
Engler-Bunte-Ring 9a, 76131 Karlsruhe



**Abb. 2, oben:** Mikrosieb. **Abb. 3, links unten:** Hydrolysereaktor. **Abb. 4, rechts unten:** Mikrofiltration. Fotos: Jan Pontente



# Ökologische Bewertung von KoalAplan im Vergleich zur aktuellen Praxis



Die ökologische Bewertung basiert auf der Kombination unterschiedlicher Umweltbelastungen, wie z. B. gasförmiger Emissionen oder dem Energieverbrauch in einem Indikator, den äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Bewertung soll zeigen, dass mit KoalAplan die Rohstoffgewinnung trotz erhöhtem Energieaufwand ökologisch sinnvoller ist.

## // METHODIK

Auf Basis der von den Partnern zur Verfügung gestellten Stoffstrom- und Energiebilanzen wurde für das KoalAplan-Konzept eine Ökobilanz erstellt. Grundlage dieser Bilanz ist die Quantifizierung des Ressourcenverbrauches („Inputs“ wie z. B. Energie, Rohstoffe oder Wasser) und der Umweltauswirkungen/Emissionen („Outputs“ an Luft, Wasser und Boden). Als funktionelle Einheit, auf die alle Input-/Output-Ströme bezogen werden, wurde die „Behandlung von Abwasser pro Einwohner und Jahr“ festgelegt. Für die Ökobilanz wurde die detaillierte Ecoinvent Datenbank v. 3.9.1 genutzt. Die internationale Ecoinvent Datenbank ist ein Informationssystem für die zentrale Zusammenstellung, Berechnung, Verwaltung und Bereitstellung von Ökobilanzdaten.

Die Berechnung der Verbräuche und Gutschriften für die ökologische Bewertung der Abwasserbehandlung beinhaltet quantitative Angaben zu Chemikalien und Rohstoffen, Energie, Transport sowie direkten Emissionen. Für KoalAplan wurden die Untersuchungsergebnisse und Daten der Einzelprozesse der verschiedenen Partner zugrunde gelegt. Diese Daten wurden mit gemittelten Literaturdaten aus der Praxis kommunaler Kläranlagen in Deutschland („Modellanlage“) verglichen. Der Unterschied zwischen KoalAplan und der kommunalen Praxisanlage in Bezug auf wegfallende und neu hinzugekommene Prozesse ist anhand von Blockfließbildern in Abb. 1 veranschaulicht.

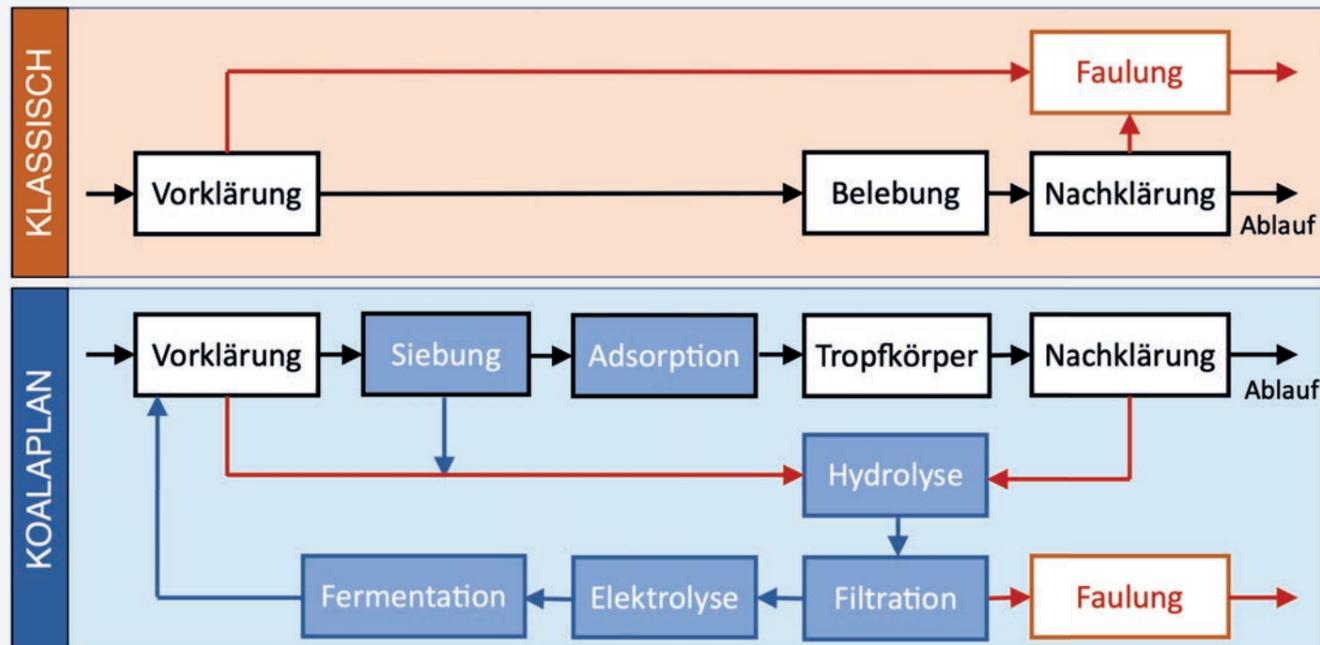


Abb. 1.: Gegenüberstellung der Prozessbausteine von KoalAplan und Abwasserpraxis.

## // ERGEBNISSE

Für KoalAplan wurden Szenarienberechnungen für zwei verschiedene Entnahmemengen (60 % und 90 %) für den chemischen Sauerstoffbedarf CSB aus dem Abwasser gewählt. Der CSB ist ein Maß für den chemisch gebundenen Energieinhalt des Abwassers. Die Entnahmemenge beeinflusst sowohl die In- und Outputs bei der Abwasserbehandlung als auch die In- und Outputs bei der Schlammbehandlung. Letzteres beinhaltet auch die Rohstoffproduktion. Diese beiden

Szenarien wurden mit dem „Praxis“-Szenario verglichen.

Abb. 2 fasst die Ergebnisse der drei Szenarien zusammen. Es ist zu erkennen, dass die GWP-Emissionen durch KoalAplan deutlich gesenkt werden können, obwohl erhebliche Zusatzemissionen durch einen erhöhten Chemikalien- und Stromverbrauch vorhanden sind. Eine höhere CSB-Entnahme ist dabei für KoalAplan etwas vorteilhafter. Allerdings sind

die Zusatzemissionen durch den Stromverbrauch bei der in Deutschland voranschreitenden Umstellung der Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen in Zukunft anders zu bewerten.

Abb. 2 veranschaulicht anhand der CO<sub>2,eq</sub> Emissionen für Strom, dass eine CO<sub>2</sub>-Senke vorliegen dürfte, während bei Beibehaltung der aktuellen Praxis weiterhin Emissionen vorliegen.

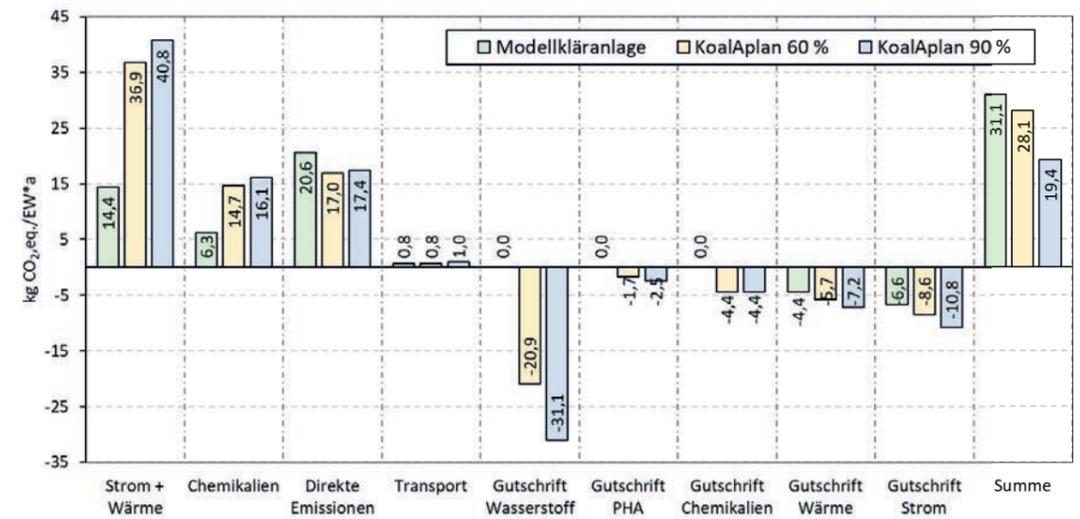


Abb. 2.: Ressourcenverbrauch und -gutschrift für KoalAplan im Vergleich zur Kläranlage in der Praxis („Modellkläranlage“).

## // FAZIT

Die Umstellung von kommunalen Kläranlagen zur ressourcenproduzierenden Abwasserreinigung bietet ein erhebliches Potenzial der GWP-Emissionsminderung bis hin zur Umstellung zu einem CO<sub>2,eq</sub> senkenden Betrieb. Dieser Bewertung liegen die ersten Ergebnisse aus der Entwicklung verschiedener neuer Prozesse zugrunde. Das bedeutet, dass Optimierungspotenziale, die bei der Weiterentwicklung neuer Prozesse üblicherweise vorhanden sind, hier nicht berücksichtigt sind. Es werden also jahrzehntelang optimierte Kläranlagenprozesse mit neu entwickelten, nicht optimierten Verfahren verglichen. Insofern kann die KoalAplan-Strategie als überaus vielversprechend eingestuft werden.

## // AUTOREN

Dipl.-Umweltwiss. Jan Schlecht, jan.schlecht@cutec.de  
 Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers, michael.sievers@cutec.de

TU Clausthal  
 Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC)  
 Leibnizstraße 23, 38678 Clausthal-Zellerfeld

# Die Kommunikation rund um die Bioraffinerie KoalAplan

**KoalAplan** wurde von Anfang an von einer umfassenden Kommunikationsstrategie begleitet, da es sich um ein Projekt von „strategischer Bedeutung“ handelt. Ziel war es, Transparenz und Vertrauen in bioökonomische Innovationen im Abwassersektor zu schaffen. Für die zukünftige Umsetzung der Projektideen ist die Unterstützung durch Politik und Öffentlichkeit von zentraler Bedeutung.

Grundlage der Öffentlichkeitsarbeit war eine frühzeitige, umfassende und vielfältige Kommunikation. Ein umfangreicher Internetauftritt machte das Vorhaben einer großen Zielgruppe zugänglich. Beiträge von Projektpartnern und -mitarbeitenden wurden während der gesamten Laufzeit über soziale Medien und Websites veröffentlicht. Ein Projektfilm trug zum Innovationstransfer bei. Darüber hinaus berichteten alle Projektpartner auf verschiedenen Kongressen und Veranstaltungen über KoalAplan: Auf dem Bioökonomiekongress, der DWA-Landesverbandstagung, dem Bioraffinerietag und vielen mehr. Gezielt wurden wissenschaftliche und allgemeine Fachartikel veröffentlicht. Mit einem „Tag der offenen Tür“ auf dem Lehr- und Forschungskläranlage in Bünau wurde das Projekt der Bevölkerung, der Fachöffentlichkeit und der Politik wie beispielsweise Herrn Bernd Mettenleitner MdL sowie Herrn Miguel Avila Albez (Referent der EU-Kommission) vorgestellt.

Höhepunkt war der Besuch des Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann, der sich persönlich ein Bild von den Potenzialen einer Bioraffinerie sowie den direkten Treibhausgasemissionen wie Lachgas und deren Minderungsmöglichkeiten auf Kläranlagen machte.



Abb. 1: Tag der offenen Tür, Lehr- und Forschungskläranlage Bünau, 2023. Foto: Jan Potente

## // FAZIT

Eine erste Abschätzung der Betriebskosten deutet auf relevante Mehraufwendungen im Vergleich zu einer Standardkläranlage hin. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Optimierung der eingesetzten Technologien und die zu erwartenden Skaleneffekte zu Einsparungen führen werden.

Mit der Auszeichnung als Projekt von „strategischer Bedeutung“ ist es KoalAplan gelungen, die Aufmerksamkeit der Politik zu gewinnen. Wichtig ist nun die Umsetzung der Projektideen in größerem Maßstab, um die Nachhaltigkeits-, Wirtschaftlichkeits- und Klimawirkungen eines solchen innovativen bioökonomischen Ansatzes genauer abschätzen zu können.

**Interessiert am Projekt?** Alle Informationen finden Sie auf [www.umwelttechnik-bw.de/de/koalaplan](http://www.umwelttechnik-bw.de/de/koalaplan)

**Den kompletten Projektfilm finden Sie hier:**



Abb. 2–4: Tag der offenen Tür, Lehr- und Forschungskläranlage Bünau, 2023. Fotos: Jan Potente

## // AUTOREN

**Dipl.-Ing. Jürgen Schmidtke**  
juergen.schmidtke@umwelttechnik-bw.de  
**Dr. Manuel Bauer**  
manuel.bauer@umwelttechnik-bw.de

Umwelttechnik BW GmbH  
Landesagentur für Umwelttechnik und Ressourceneffizienz  
Baden-Württemberg  
Kleiner Schlossplatz 13, 70173 Stuttgart

# Impressionen Filmdreh KoalAplan

„Die Kläranlage der Zukunft – Pilotprojekt KoalAplan“  
Lehr- und Forschungsklärwerk, Büsnau

12. April 2024



# Ergebnisse Workshop: Politische Handlungsempfehlungen

**KoalAplan** – Neue und innovative Verfahren stehen bei der Verbreitung und Markteinführung vor vielfältigen Herausforderungen. Ein Bioraffineriekonzept für Kläranlagen ist ein völlig neuer Ansatz in der Abwasserwirtschaft. Nachhaltigkeit, Gewässer- und Klimaschutz stehen dabei im Mittelpunkt. Um die Chancen, aber auch die aktuellen Barrieren für solche Bioraffinerieprojekte aufzuzeigen, haben die Projekte RoKka und KoalAplan eine gemeinsame Workshop-Reihe zu den Projektergebnissen veranstaltet.

## A. ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

/// Kläranlagen müssen neu gedacht werden. Neben der wichtigen Aufgabe des Gewässerschutzes sind sie Energie- und Rohstofflieferanten. Eine Sensibilisierungskampagne ist notwendig, um diesen Ansatz in der Bevölkerung, der Politik und in den Kommunen zu etablieren.

/// Wichtig bei allen ressourcenbezogenen Konzepten rund um die Kläranlage ist die Produktsicherheit und das Produktvertrauen. Transparenz sorgt für Marktsicherheit.

/// Der nationale und internationale Austausch sollte durch geeignete Formate gestärkt werden. EU-Projekte mit BW-Beteiligung müssen initiiert werden.

## B. JURISTISCHER RAHMEN

/// Umweltfolgekosten für die Gesellschaft sollten in die Entscheidungen eingepreist werden. Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch und sozial) muss als öffentlich finanzierbares Ziel etabliert werden, damit Kommunen umweltverträgliche Wege gehen. Die Abwasserabgabe könnte ein passendes Instrument dafür sein.

/// Das Land muss den rechtlichen Rahmen für die Umsetzung der Rückgewinnung von Produkten aus Abwasser setzen. Es müssen Fragen geklärt werden, wie z. B. zur Gebührenfähigkeit von Rückgewinnungstechnologien und zur „End-of-Waste“-Eigenschaft von Produkten aus Abwasser.

/// Regulatorische Innovationszonen ermöglichen: Die verkürzte und unbürokratische Einholung einer Betriebserlaubnis kann dabei helfen, die großtechnische Umsetzung von innovativen Ansätzen zu erproben und Betriebserfahrungen zu sammeln.



Foto: Jan Potente



Foto: Jan Potente

## C. TECHNISCHE REALISIERBARKEIT

/// Neue technologische Ansätze zur Rückgewinnung von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor aus dem Haupt- oder Nebenstrom fördern und mit bestehenden Entsorgungssystemen vergleichen.

/// Verstärkte Förderung von Großanlagen und Anlagen mit hohem Risiko.

/// Stufenkonzepte zur schrittweisen Umsetzung an bestehenden Anlagen müssen stärker gefördert werden.

## D. WIRTSCHAFTLICHKEIT

/// Stärkung des Verbunds von Kläranlagen zur Ressourcenrückgewinnung und Bereitstellung von Rechtsberatung für Kommunen, z. B. im Bereich Private-Partnership-Modelle und Produktverkauf.

/// Stärkung der Unabhängigkeit und Resilienz von Regionen durch Anreize zur besseren lokalen Versorgung mit Strom, Düngemitteln und sonstigen Produkten.

/// CO<sub>2</sub>-Bepreisung ausweiten und stärken, damit Klimaschutz finanziell honoriert wird.

## E. FORSCHUNGSauftrag

/// Ein „Kompetenzzentrum Ressourcenrückgewinnung“ würde als Enabler und Katalysator fungieren! Dieses müsste entsprechend aufgebaut sein, um u. a. folgende Aufgaben erfüllen zu können:

1. Zentrale Informationsplattform für Kläranlagenbetreiber:innen, wie z. B. die Bereitstellung von Bewertungstools zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb
2. Sensibilisierung und Herausgabe von Leitfäden über Rückgewinnungspotenziale für Anlagenbetreibende
3. Forschung und Entwicklung (Vorbild einer großen Lösung: siehe Holland: <https://www.wetsus.nl/>)

/// First-Mover im Bereich der Ressourcenrückgewinnung durch geförderte wissenschaftliche Begleitung unterstützen.

/// Verstärkte Nutzung von Lebenszyklusanalysen (LCA) für alle Innovationen und Prozesse, um Stärken, Schwächen und Entwicklungsbedarfe zu identifizieren.

**Projektpartner**



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



Baden-Württemberg

Das Projekt wird durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gemeinsam mit der EU-Kommission im Rahmen des EFRE-Förderprogramms „Bioökonomie – Bioraffinerien zur Gewinnung von Rohstoffen aus Abfall und Abwasser – Bio-Ab-Cycling“ gefördert.