

# Biopolymerproduktion aus Abwasserströmen für eine kreislauforientierte Siedlungswasserwirtschaft

In Laborversuchen wurden Primärschlamm, Braunwasser, Schwarzwasser, Brauerei- und Molkereiabwasser anaerob versäuert, um damit kurzkettige organische Säuren zu gewinnen, die als Substrat zur Biopolymerproduktion genutzt werden können. Ausgehend von den Versäuerungsergebnissen der jeweiligen Abwasserströme wurden Potenzialabschätzungen zur Biopolymerproduktionskapazität für Deutschland durchgeführt.

Thomas Uhrig, Julia Zimmer, Florian Rankenhohn und Heidrun Steinmetz

Ist eine kreislauforientierte Siedlungswasserwirtschaft umsetzbar? Was können wir aus anderen Bereichen wie der Abfallwirtschaft lernen? Wenn in der Abfallwirtschaft keine Vermeidung oder Wiederverwendung von Abfällen möglich ist, priorisiert die Abfallhierarchie aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz eine stoffliche Verwertung vor der energetischen Verwertung oder gar der Beseitigung [1]. Aus der Abfallwirtschaft sind viele positive und bereits seit Jahren etablierte Beispiele zum stofflichen Recycling bekannt. 2017 lagen die Recyclingquoten von Glas bei 100 %, von Papier bei 99 % und bei nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen bei 89 %, um nur wenige Beispiele zu nennen [2]. Zumindest bei kommunalen Abwässern sind eine Vermeidung und direkte Wiederverwendung nicht, beziehungsweise nur eingeschränkt möglich, allerdings stehen hier vielfältige Möglichkeiten zur stofflichen Verwertung offen. Im Fokus künftiger Entwicklungen sind hierbei vor allem Wasser, Phosphor, Stickstoff, Kalium und organischer Kohlenstoff zu nennen [3]. Abwasserbehandlungsanlagen haben zwar als zentrale Aufgabe die Reinigung von Abwässern und damit den Schutz von Gewässern, dennoch sollte angesichts steigender Bevölkerungszahlen und der Verknappung von Ressourcen die Entwicklung kreislauforientierter Verfahren nicht vernachlässigt werden. Die Siedlungswasserwirtschaft hat hierbei Nachholbedarf. Mit der Novellierung der Klärschlammverordnung

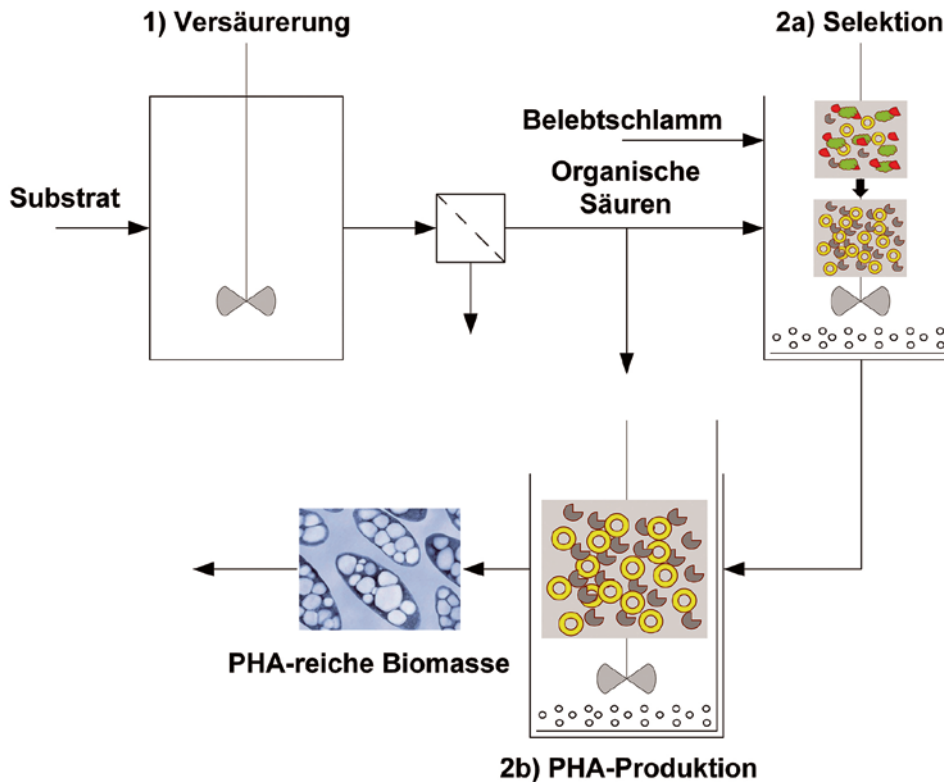
von 2017 gibt es zwar Bemühungen, die stoffliche Rückgewinnung von Phosphor voranzutreiben [4], allerdings gilt es auch, die weiteren Rohstoffe zu beachten.

Nach Wasser bietet der organische Kohlenstoff das zweithöchste massenbezogene Ressourcenpotential in kommunalem Abwasser und sollte daher stärker in den Fokus künftiger Betrachtungen rücken. In der konventionellen kommunalen Abwasserbehandlung mit getrennter aerober und anaerober Stabilisierung werden etwa 37 % des im Abwasser enthaltenen Kohlenstoffs (auf CSB-Basis) unter hohem Energieaufwand aerob zu Kohlendioxid und Wasser umgewandelt und damit beseitigt, weitere 6 % verbleiben im Ablauf [5]. Bei der anaeroben Behandlung werden etwa 30 % des CSBs zu Biogas umgewandelt und im Anschluss einer nach der Abfallhierarchie „minderwertigen“ energetischen Verwertung zugeführt. Im Faulschlamm bleiben noch ca. 27 % des Kohlenstoffs übrig [5]. Diese 27 % machten 2016 bezogen auf kommunale Kläranlagen in Deutschland 1,77 Mio. Mg Trockenmasse aus [6]. Davon wurden 2016 rund 65 % thermisch entsorgt und damit wieder einer nach der Abfallhierarchie „minderwertigen“ energetischen Verwertung zugeführt. 35 % des Schlammes wurden beispielsweise in der Landwirtschaft oder zu landschaftsbaulichen Maßnahmen stofflich verwertet [6]. Durch die vielfach enthaltenen Schadstoffe im Klärschlamm ist eine direkte stoffliche Nutzung des Klärschlammes auf landwirtschaftlichen Flächen problematisch [7]. Daher ist die bisherige stoffliche Verwertung durch die Novellierung der Klärschlammverordnung von 2017 ab 2032 für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von über 50.000 Einwohnerwerten nicht mehr möglich. Bei kleineren Anlagen wird der Anteil der stofflichen Verwertung aufgrund der Einschränkungen der bodenbezogenen Grenzwerte und der Düngemittelverordnung ebenfalls weiter abnehmen.

Insgesamt lässt sich damit erkennen, dass der organische Kohlenstoff im Rahmen der kommunalen Abwasser- und Schlammbehandlung nur sehr eingeschränkt im Sinne einer kreislauforientierten Siedlungswasserwirtschaft behandelt wird. In Anbetracht des großen Ressourcenpotenzials in kommunalen aber vor allem auch in industriellen Abwässern, sollte dem organischen Kohlenstoff mehr Beachtung geschenkt werden.

## / Kompakt /

- Die Rückgewinnung von organischem Kohlenstoff zur Herstellung von Biopolymeren aus Abwasserströmen stellt ein vielversprechendes und nachhaltiges Verfahren dar.
- Die untersuchten Abwasserströme zeigen gute Versäuerungseigenschaften und weisen ein hohes Potenzial auf, um als Substrate für die Biopolymerherstellung genutzt zu werden.
- Weitere Schritte umfassen die Steigerung der PHA-Ausbeute, die Steuerung der PHA-Zusammensetzung, das Einstellen eines stabilen Betriebs und das Schließen der Verfahrenskette.



**Bild 1:** Verfahrenskette zur Biopolymerherstellung bearbeitet nach [9] (Quelle der Mikroskopaufnahme [10])

## Biopolymerproduktion als Alternative

Eine vielversprechende Möglichkeit zur stofflichen Verwertung des Kohlenstoffs ist die Produktion von Polyhydroxyalkanoaten (PHA). PHA sind eine Gruppe von Biopolymeren, die vergleichbare Eigenschaften wie Polypropylen haben, mit dem Vorteil, dass sie biologisch abbaubar sind und aus nachwachsenden Rohstoffen oder organischen Abfällen produziert werden können. Viele Bakterienarten, die auch im Belebtschlamm auf Kläranlagen vorkommen, nutzen PHA als zellinternen Kohlenstoff- und Energiespeicher [8].

Die PHA-Produktion aus Abwasserströmen erfolgt über ein zweistufiges Verfahren (siehe **Bild 1**).

Im ersten Prozessschritt werden unter anaeroben Bedingungen die im Abwasser und Klärschlamm enthaltene Proteine, Fette und Kohlenhydrate zu großen Teilen in kurzkettige Fettsäuren (engl. „volatile fatty acids“, kurz VFA) umgesetzt [9]. Durch die Anteile der VFA (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure und Valeriansäure) kann die spätere PHA-Zusammensetzung beeinflusst werden. Essigsäure und Buttersäure führen dabei zu Polyhydroxybutyrat (PHB). Aus Propionsäuren und Valeriansäure wird tendenziell Polyhydroxyvalerat (PHV) produziert. Mischungen der VFA führen zu Mischformen von PHB und PHV. PHB und PHV besitzen etwas unterschiedliche mechanische Eigenschaften, woraus sich verschiedene Anwendungsmöglichkeiten ergeben [8].

In einem aeroben zweiten Schritt werden die VFA von PHA-produzierenden Bakterien als Substrat genutzt und in Form von PHA in den Zellen gespeichert. Dabei wird zunächst eine Selektion und Anreicherung PHA-produzierender Bakterien durch einen feast-famine-Prozess durchgeführt. Hierzu erfolgt eine zyklische Zugabe von VFA und Nährstoffen, die von den Bakterien zum

Wachstum, zur Zellatmung und teilweise zur Energiespeicherung verwendet werden (feast). Danach folgen lange Phasen mit Substratmangel (famine), in denen PHA produzierende Bakterien auf ihre Kohlenstoff- und Energiespeicher zurückgreifen können. Sie haben somit einen Vorteil gegenüber anderen Bakterien, die während dieser Phase absterben. Nach mehrfacher Wiederholung der Zyklen ist eine Anreicherung der PHA-Produzenten erreicht. Daraufhin wird die selektierte Biomasse zur Akkumulierung von PHA genutzt. Hierzu erfolgen unter ständiger Belüftung und unter Ausschluss von Nährstoffen kurze Substratzugaben, was zur vermehrten Speicherung von PHA führt. Das Zellwachstum und der damit verbundene PHA-Abbau werden durch den Nährstoffmangel unterdrückt. Im Anschluss kann die Biomasse geerntet, entwässert und das PHA extrahiert werden [8, 9, 11].

## Fragestellung und Methoden

Zur Abschätzung, ob Abwasserströme zur PHA-Produktion geeignet sind, muss nicht immer die gesamte Verfahrenskette untersucht werden. Viele Erkenntnisse und Folgerungen können durch gezielte Untersuchungen der ersten Prozessstufe, der Versäuerung abgeleitet werden. Anhand von vorhandenen Erfahrungswerten aus der Literatur können bereits mögliche Zusammenhänge abgeleitet werden.

Daher wurden in Laboruntersuchungen Versäuerungsversuche durchgeführt, um die PHA-Produktionspotenziale verschiedener Abwasserströme beurteilen zu können. Dazu wurden Stoffströme mit hohem Gehalt an organischen Verbindungen aus dem kommunalen und industriellen Bereich ausgewählt: Aus dem kommunalen

len Bereich wurde ausgehend von den Ergebnissen bisheriger Studien [8, 12], Primärschlamm gewählt. Bei konsequenter Weiterführung der Idee einer kreislauforientierten Siedlungswasserwirtschaft, könnten künftig auch abgekoppelte Stoffströme aus neuartigen Sanitärssystemen als potenzielle Quellen zur PHA-Produktion in Frage kommen. Braun- und Schwarzwasser weisen hierbei die höchsten organischen Frachten bei gleichzeitig hoher Konzentration auf und wurden daher ausgewählt. Um zusätzlich Potenziale industrieller Abwasserströme zu ermitteln, wurden Brauerei- und Molkereiabwasser untersucht.

Folgende Fragen sollen dabei mit Hilfe der jeweils genannten Methoden beantwortet werden:

1. Wie viel VFA können aus den Abwasserströmen als Substrat für die PHA-Produktion gewonnen werden und welche VFA-Zusammensetzung ist in Abhängigkeit der Ausgangssubstanz zu erwarten? Hierzu wurden Versuche zum Versäuerungspotenzial im batch-Test durchgeführt. Die verschiedenen Stoffströme wurden dazu unter mesophilen Bedingungen ( $34 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) für mindestens 7 Tage in Laborreaktoren (8 – 50 L) versäuert. Für Primärschlamm, Braun- und Schwarzwasser war kein Inokulum nötig, da davon ausgegangen werden kann, dass bereits ausreichend Bakterien zur Versäuerung enthalten sind [8, 12]. Um den Start der Versäuerung bei Molkerei- und Brauereiabwasser zu beschleunigen, wurde ausgefaulter Faulschlamm einer kommunalen Kläranlage als Inokulum verwendet. Zur Verhinderung einer Methanbildung, wurde der pH-Wert zu Beginn mit Salzsäure ( $w = 35 \%$ ) auf unter 6 eingestellt.
2. Bleibt die VFA Zusammensetzung bei schwankenden Substratzusammensetzungen im Zulauf stabil? Mit diesen Versuchen sollte die Stabilität der VFA-Produktion im kontinuierlichen Betrieb ermittelt werden. Für die Aufbereitung der produzierten PHA und die gewählte Anwendung des Endprodukts ist eine möglichst konstante Produktzusammensetzung von Bedeutung. Da die PHA-Zusammensetzung maßgeblich von der VFA Zusammensetzung abhängt [13], ist bereits in diesem Schritt darauf zu achten, dass trotz schwankender Zusammensetzung des Abwasserstroms eine konstante VFA-Zusammensetzung erzielt wird. Dazu wurde zunächst mit Primärschlamm über 30 Tage ein Versäuerungsreaktor betrieben, bei dem nach einer Einfahrphase von 7 Tagen, alle drei Tage die Hälfte des Reaktorvolumens mit frischem Primärschlamm ausgetauscht wurde.
3. Wie viel PHA kann theoretisch produziert werden und wie hoch ist der PHA-Marktanteil, der damit erreicht werden könnte?

Für erste Einschätzungen, ob mit in der Entwicklung befindliche Verfahren lohnenswerte Mengen an Biokunststoffen produziert werden können, sind Potenzialabschätzungen von besonderer Bedeutung. Daher wurden die PHA-Produktionspotentiale für die untersuchten Abwasserströme berechnet. Ausgehend von den Versäuerungsgraden aus den batch-Tests und Literaturwerten lassen sich erste Potenzialabschätzungen zum PHA-Produktionspotenzial für Deutschland hochrechnen.

## Versäuerungspotenzial im batch-Test

Als Bewertungsparameter der Versäuerung wird der Versäuerungsgrad herangezogen, der den Anteil der produzierten VFA (umgerechnet in CSB) an der CSB-Fracht des homogenisierten Abwasserstroms zum Startzeitpunkt angibt.

Bereits mit einfachen batch-Ansätzen konnten Versäuerungsgrade von 11 – 60 % erreicht werden (siehe **Tabelle 1**). Tendenziell weisen die kommunalen Substrate niedrigere Versäuerungsgrade auf als die beiden untersuchten industriellen Abwässer, was an dem hohen Anteil partikulärer Bestandteile liegen könnte. So werden unverdaute Ballaststoffe oder Cellulose aus dem Toilettenpapier unter den gewählten Prozessbedingungen vermutlich nur unvollständig und langsam hydrolysiert. Für eine Steigerung der Versäuerungsgrade könnten Vorbehandlungsstufen wie die Desintegration (thermisch, chemisch oder mechanisch) für einen Aufschluss komplexer Abwasserbestandteile sorgen und damit den Versäuerungsgrad erhöhen.

Beim Blick auf die VFA-Zusammensetzung ist vor allem die Summe von Essig- mit Buttersäure und von Propion- mit Valeriansäure wichtig, um Voraussagen für die erwartete PHA-Zusammensetzung zu treffen. Braunwasser, Brauerei- und Molkereiabwasser enthielten jeweils in Summe 72 – 92 % Essig- und Buttersäure (siehe **Bild 2**). Die Ergebnisse von Primärschlamm und Schwarzwasser wiesen hingegen eine ausgeglichene VFA-Zusammensetzung auf. Hier lag die Summe bei 52 und 63 %. Je höher der Essig- und Buttersäureanteil ist, desto höher ist der zu erwartende PHB-Anteil. Mit zunehmendem Anteil von Propion- mit Valeriansäure wird vermehrt PHV produziert [13].

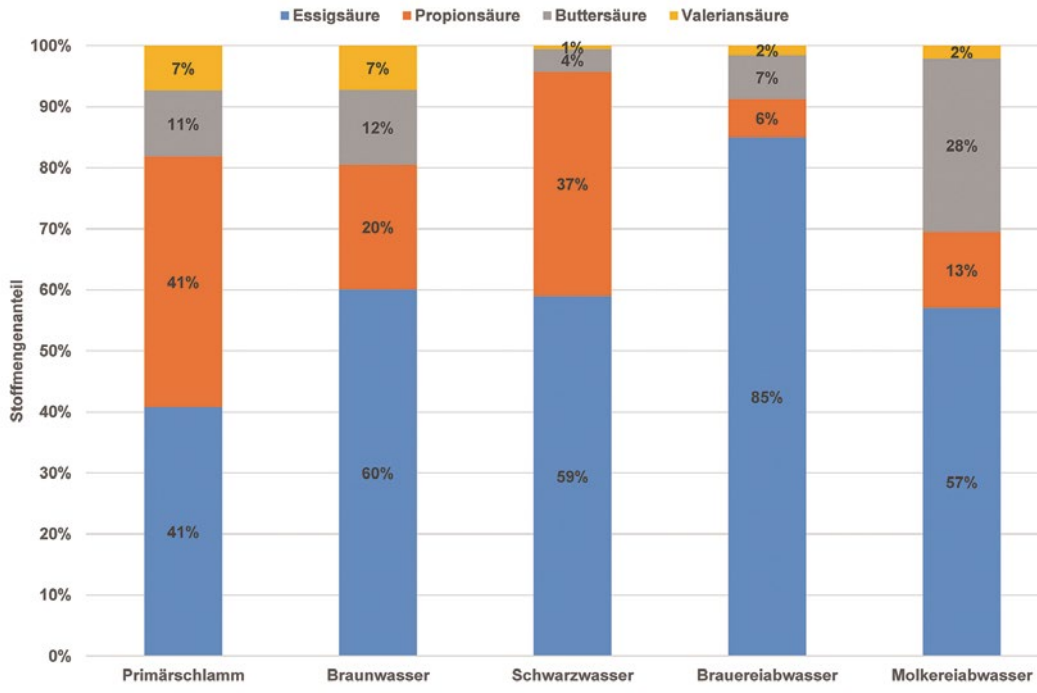
Demnach ist zu erwarten, dass bei einer späteren PHA-Akkumulation aus Braunwasser, Brauerei- und Molkereiabwasser das Polymer PHB dominant ist. Die Ergebnisse bei Primärschlamm und Schwarzwasser deuten darauf hin, dass das produzierte Polymer aus einer Mischung von PHB und PHV bestehen wird. Somit

**Tabelle 1:** Erreichte Versäuerungsgrade ausgehend von den CSB-Konzentrationen

Substrat	$C_{\text{CSB, Start}}$ in mg/L	$C_{\text{CSB, VFA, Ende}}$ in mg/L	Versäuerungsgrad in %
Primärschlamm	58.338	10.088	17
Braunwasser	40.759	4.330	11
Schwarzwasser	12.994	1.379	11
Brauereiabwasser	2.887	1.736	60
Molkereiabwasser*	9.999	1.993	20

\*Wurde vor Versuchsbeginn auf einen Wert von  $C_{\text{CSB}} \approx 10.000 \text{ mg/L}$  verdünnt.

© Thomas Uhrig et al.



**Bild 2:** VFA-Zusammensetzung der untersuchten Abwasserströme

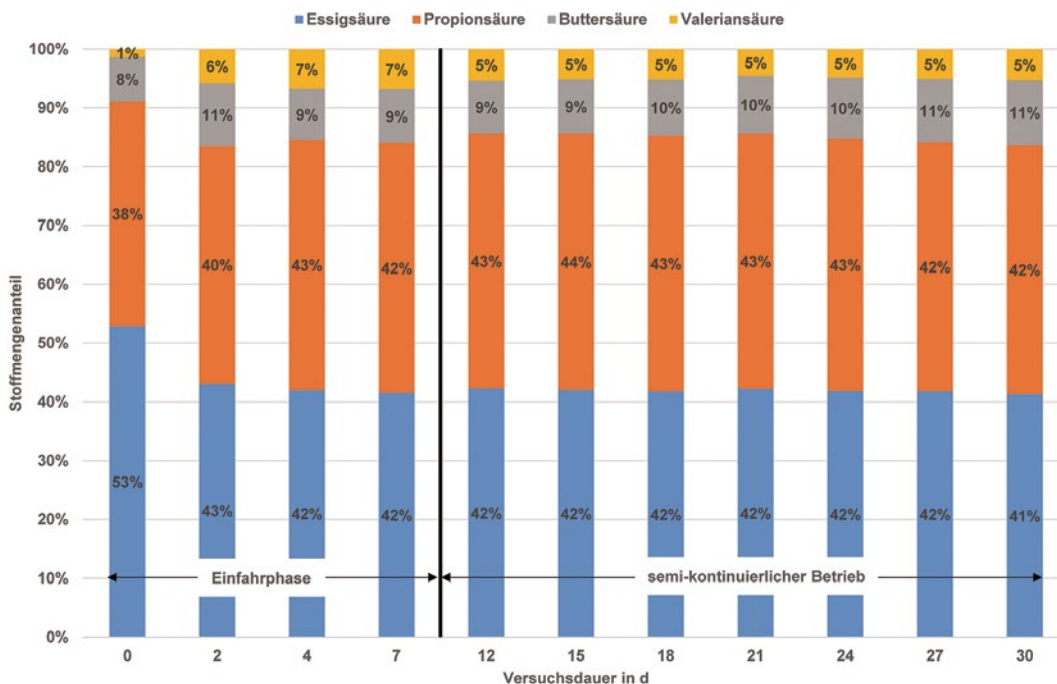
können diese Ergebnisse in Abhängigkeit möglicher Verwendungsmöglichkeiten der Polymere als Grundlage zur Auswahl in Frage kommender Abwasserströme dienen.

### Stabilität der VFA-Produktion im kontinuierlichen Betrieb

**Bild 3** zeigt, dass sich bereits in der Einfahrphase (Tag 0 – 7) eine gleichbleibende Zusammensetzung der VFA eingestellt hat und die

Schwankungen im semi-kontinuierlichen Betrieb (Tag 7 – 30) über etwa 4 Schlammalter mit maximal 2 % bezogen auf die einzelne Säure niedrig waren. Es konnte ebenfalls beobachtet werden, dass die Zusammensetzung aus dem batch-Test mit der Zusammensetzung im semi-kontinuierlichen Betrieb Wesentlichen übereinstimmen.

In diesem Versuch konnte über den Untersuchungszeitraum eine stabile VFA-Zusammensetzung erreicht werden. Darauf aufbauend wird angestrebt, die Versäuerung über ca. ein Jahr zu betreiben, um einen möglichen Einfluss jahreszeitlicher Schwankungen



**Bild 3:** VFA-Zusammensetzung bei einer semi-kontinuierlich betriebenen Versäuerung von Primärschlamm

der Primärschlammigenschaften auf die VFA-Zusammensetzung untersuchen zu können.

## PHA-Produktionspotenzial

Zur Berechnung der Potenziale wurden für jeden Abwasserstrom die jährlichen CSB-Frachten aus der Literatur für Deutschland ermittelt. Mit den Versäuerungsgraden aus den jeweiligen batch-Tests können daraus ungefähre VFA-Frachten berechnet werden, die bei weiterer Prozessoptimierung noch gesteigert werden können. Unter der Annahme, dass 50 % der VFA in der Selektionsstufe verbraucht werden, stehen die restlichen 50 % zur PHA-Akkumulation zur Verfügung. Nach Bengtsson et al. können bei geschickter Prozessführung nahezu 100 % der in der PHA-Akkumulation eingesetzten VFA zu PHA umgewandelt werden [12]. Bei einem mittleren Umrechnungsfaktor von 0,63 g PHA/g CSB [12] lässt sich ein theoretisches PHA-Produktionspotential berechnen (siehe **Tabelle 2**). Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wurde ausgehend von der im Jahr 2019 weltweit produzierten Menge an PHA von 25.200 Mg [14] ein theoretischer Marktanteil berechnet.

Bei den Potenzialabschätzungen geht es vor allem darum, ungefähre Größenordnungen aufzuzeigen. Eine Studie von 2017 zeigte mit einem anderen Berechnungsansatz für Primärschlamm zwar ein wesentlich höheres Produktionspotenzial von 166.518 Mg PHA/a auf [23], aber trotz unterschiedlicher Ansätze ist deutlich zu erkennen, dass Primärschlamm hohe Potenziale im Vergleich zur aktuellen PHA-Produktion bietet. Gleiches gilt für die Teilströme Braun- und Schwarzwasser, wobei zu beachten ist, dass die genannten Produktionspotenziale von Primärschlamm, Braun- und Schwarzwasser nicht additiv zu verstehen sind, da sich die Ursprünge der Stoffströme größtenteils überschneiden.

Neben den kommunalen Strömen können auch die exemplarisch gewählten Industrieabwässer nicht zu vernachlässigende Beiträge

zur weltweiten PHA-Produktion liefern, vor allem, wenn die Vielzahl, der hier nicht betrachteten weiteren industrieller Quellen, zusätzlich berücksichtigt werden.

## Weiteres Vorgehen

Neben der Untersuchung weiterer Abwasserströme auf ihre Versäuerungseigenschaften, wird in weiteren Schritten angestrebt, die gesamte PHA-Prozesskette über ca. ein Jahr in einem halbtechnischen Pilotbetrieb auf einer Kläranlage zu schließen. Dabei soll unter realen und damit schwankenden Rahmenbedingungen eine stabile und kontinuierliche PHA-Produktion gewährleistet werden. Durch angepasste Betriebsbedingungen soll eine hohe PHA-Ausbeute und eine Steuerung der Produkteigenschaften erzielt werden. Dazu ist es wichtig, den Prozess der Biomassenanreicherung und der PHA-Akkumulation besser zu verstehen und Erkenntnisse über die zugrundeliegende Biozönose zu erlangen. Bisher ist wenig über die dominanten PHA produzierenden Bakterienarten in realen Abwassersystemen und den Einfluss der Bakterienzusammensetzung auf die PHA-Zusammensetzung und -ausbeute bekannt. Als Ansatz hierzu sollen in weitergehenden Versuchen die bakterielle Zusammensetzung und Abundanz der PHA-Produzenten bei verschiedenen Betriebsbedingungen und zu verschiedenen Zeitpunkten und damit zusammenhängend die PHA-Ausbeute und -zusammensetzung untersucht werden. Die Charakterisierung von Kernorganismen und das Einstellen der optimalen Bedingungen für diese stehen dabei im Fokus der Untersuchungen. Die Ergebnisse sollen dazu dienen, nötige Vorgaben und Rahmenbedingungen für ein späteres Up-Scaling des PHA-Prozesses zu erarbeiten. Durch eine konsequente Übertragung der Erkenntnisse und der Überprüfung im realen Betrieb einer Kläranlage kann ein Beitrag geleistet werden, mit dem ein weiterer Schritt hin zu einer kreislauforientierten Siedlungswasserwirtschaft möglich wird.

**Tabelle 2:** Berechnete PHA-Produktionspotenziale für Deutschland ausgehend von den Ergebnissen der Voruntersuchungen zum Versäuerungspotenzial (\*Die Werte für Brauerei- und Molkereiabwasser beziehen sich auf die CSB-Fracht im Abwasser pro produzierter Einheit des Produkts)

Substrat	Theoretisches PHA-Produktionspotenzial pro Jahr für Deutschland in Mg/a	Theoretischer weltweiter PHA-Marktanteil 2019 in %	Annahmen
Primärschlamm	63.142	251	30 g CSB/(E*d) [15], 107,1 Mio. E [16], VG = 17 %
Braunwasser	40.276	160	50 g CSB/(E*d) [17], 83,1 Mio E [18], VG = 11 %
Schwarzwasser	50.313	200	40 g CSB/(E*d) [17], 83,1 Mio E [18], VG = 11 %
Brauereiabwasser	7.796 – 18.711	31 – 74	0,45-1,08 kg CSB/hL Bier* [19], 92,2 Mio. hL Bier/a [20], VG = 60 %
Molkereiabwasser	1.619 – 8.095	6 – 32	0,8-4 kg CSB/Mg Milch* [21], 32,5 Mio. Mg Milch/a [22], VG = 20 %

©Thomas Uhrig et al.



## Danksagung

Die vorliegenden Ergebnisse stammen aus den Projekten „WOW! Wider business opportunities for raw materials from waste water“ gefördert durch Interreg NWE, „Biopolymerproduktion aus industriellen Abwasserströmen“ gefördert durch die Willy-Hager-Stiftung und „RUN – Rural Urban Nutrient Partnership“ gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Die Autoren danken den Projektträgern für die Finanzierung der Projekte.

## Literatur

- [1] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [2] Abfallbilanz 2017 (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen): Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019.
- [3] Steinmetz, H. (2017) Perspektiven der kommunalen Abwasserbehandlung. In: Wasser, Energie und Umwelt. Aktuelle Beiträge aus der Zeitschrift Wasser und Abfall I. S. 2 – 9. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [4] Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- [5] Gottardo Morandi, C.; Wasielewski, S.; Mouarkech, K.; Minke, R.; Steinmetz, H. (2018) Impact of new sanitation technologies upon conventional wastewater infrastructures, *Urban Water Journal*, 15:6, 526-533, doi: 10.1080/1573062X.2017.1301502.
- [6] Abwasserbehandlung – Klärschlamm Tabellenband 2015/2016: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018.
- [7] Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland: Umweltbundesamt, 2018.
- [8] Montano-Herrera, L.; Laycock, B.; Werker, A.; Pratt, S. (2017) The Evolution of Polymer Composition during PHA Accumulation: The Significance of Reducing Equivalents. *Bioengineering*, 4, 20; doi: 10.3390/bioengineering4010020.
- [9] Pittmann, T.; Steinmetz, H. (2013) Influence of operating conditions for volatile fatty acids enrichment as a first step for polyhydroxyalkanoate production on a municipal waste water treatment plant, *Bioresource Technology*, Volume 148, Pages 270 – 276, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.148>.
- [10] Polymedia Publisher GmbH (2020) Hydal earns Frost & Sullivan Award for its PHA technology using waste cooking oil. Online verfügbar unter <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20150408-Hydal-wins-award.php>, zuletzt geprüft am 14.04.2020
- [11] Pittmann, T.; Steinmetz, H. (2014) Polyhydroxyalkanoate production as a side stream process on a municipal waste water treatment plant, *Bioresource Technology*, Volume 167, Pages 297-302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.037>.
- [12] Bengtsson, S.; Werker, A.; Visser, C.; Korving, L. (2017) PHARIO: Stepping stone to a sustainable value chain for PHA bioplastic using municipal activated sludge, STOWA.
- [13] Montano-Herrera, L. (2015) Composition of Mixed Culture PHA Biopolymers and Implications for Downstream Processing, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Queensland, School of Chemical Engineering.
- [14] European bioplastics e.V. (2020) Photos, graphics & videos. Online verfügbar unter <https://www.european-bioplastics.org/news/multimedia-pictures-videos/>, zuletzt geprüft am 14.04.2020.
- [15] ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- [16] 31. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen (2019) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

- [17] DWA Arbeitsblatt A 272: Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS) (2014) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- [18] Statistisches Bundesamt (2020) Bevölkerungsstand. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft/Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft/Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/_inhalt.html), zuletzt geprüft am 14.04.2020.
- [19] DWA Merkblatt M 732: Abwasser aus Brauereien (2010) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- [20] Statistisches Bundesamt (2020) Bierabsatz im Jahr 2019. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/01/PD20\\_032\\_799.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/01/PD20_032_799.html), zuletzt geprüft am 14.04.2020.
- [21] DWA Merkblatt M 708: Abwasser aus der Milchverarbeitung (2011) Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- [22] Statistisches Amt der Europäischen Union (2020) Milchaufnahme (alle Milcharten) und Gewinnung von Milcherzeugnissen - jährliche Daten. Online verfügbar unter [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?query=BOOKMARK\\_DS\\_052400\\_QID\\_BD5474\\_UID\\_3F171EB0&layout=TIME,C,X,0;GEO,L,Y,0;DAIRYPROD,L,Z,0;](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?query=BOOKMARK_DS_052400_QID_BD5474_UID_3F171EB0&layout=TIME,C,X,0;GEO,L,Y,0;DAIRYPROD,L,Z,0;) zuletzt geprüft am 14.04.2020.
- [23] Pittmann, T.; Steinmetz, H. (2017) Polyhydroxyalkanoate Production on Waste Water Treatment Plants: Process Scheme, Operating Conditions and Potential Analysis for German and European Municipal Waste Water Treatment Plants. *Bioengineering*, Volume 4, Article number 54, doi: 10.3390/bioengineering4020054.

## Autoren

**Thomas Uhrig M.Sc.**

**Julia Zimmer M.Sc.**

**Florian Rankenhohn M.Sc.**

**Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz**

Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung

Technische Universität Kaiserslautern

Paul-Ehrlich-Straße 14

67663 Kaiserslautern

E-Mail: [thomas.uhrig@bauing.uni-kl.de](mailto:thomas.uhrig@bauing.uni-kl.de)



SpringerProfessional.de

Biopolymere



Böker, A.: Biopolymere – Funktionsträger in der Materialforschung. In: Biologische Transformation. Berlin Heidelberg: Springer, 2019. [www.springerprofessional.de/link/16544798](http://www.springerprofessional.de/link/16544798)

Türk, O.: Biopolymere mit Netzwerkstruktur. In: Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. [www.springerprofessional.de/link/4459534](http://www.springerprofessional.de/link/4459534)