

ABWASSER ALS RESSOURCE

Christian Schaum und Peter Cornel, Darmstadt

1 EINFÜHRUNG

Kommunales Abwasser ist ein Vielstoffgemisch. Je besser die analytischen Möglichkeiten werden, umso mehr verschiedene Inhaltsstoffe in immer niedrigeren Konzentrationen lassen sich finden.

Dominant sind sicher die natürlichen Ausscheidungen der Menschen. Urin und Fäzes enthalten die nicht verwendeten Reste der aufgenommenen Nahrung sowie deren Abbauprodukte. Fette, Eiweiße, Kohlehydrate sowie andere organische Kohlenstoffverbindungen, Ammonium, Harnstoff und andere organische Stickstoffverbindungen, organisch gebundenes Phosphor und gelöstes ortho-Phosphat, organische Schwefelverbindungen, Kalium, etc. sind die Hauptkomponenten, deren Mengen sich einwohnerspezifisch abschätzen und bilanzieren lassen. Auch Metalle und Schwermetalle wie Eisen, Kupfer und Zink werden vom Menschen in Spuren benötigt, mit der Nahrung aufgenommen, auf natürlichem Wege wieder ausgeschieden und gelangen somit ebenso ins Abwasser wie Salze, insbesondere Natriumchlorid, und natürliche Hormone, wie z.B. Östrogene. [1]

Aus den menschlichen Ausscheidungen stammen auch der überwiegende Teil der Krankheitserreger, coliforme Keime, Legionellen, Viren, Protozoen oder Wurmeier.

Mit dem Trinkwasser werden Calcium- und Magnesiumsalze eingetragen, ebenso Nitrat, Sulfat, ggf. auch Eisen und Mangan aus geogenen Quellen, z.B. bei der Verwendung von Grundwasser als Trinkwasserressource. Die Salzkonzentration wird durch Waschmittel, Geschirrspülmittel, Reinigungsmittel, Desinfektionsmittel und Salze zur Wasserenthärtung und zur Regeneration von Ionenaustauschern in Haushaltsgeräten und Haushaltsinstallationen erhöht (Kalium, Natrium, Calcium, Magnesium). Je nach Zusammensetzung der Wasch- und Reinigungsmittel werden zudem auch Poly-Phosphate und Zeolith A und somit Aluminium ins Abwasser eingetragen. Werden Perborate als Bleichmittel verwendet, so wird Bor im Abwasser in Durchschnittskonzentrationen von ca. 1 mg/L gefunden. Bor wirkt bereits in niedrigen Konzentrationen als Pflanzengift und schränkt somit gegebenenfalls die Wiederverwendbarkeit ein [2].

Kupfer und Zink gelangen aus der Hausinstallation und von Dachabläufen ins Abwasser. Bei Verwendung von Bleirohren in der Hausinstallation trifft dies auch auf Blei zu.

Halogene liegen überwiegend als Chlorid vor. Organische Halogene werden hauptsächlich durch industrielle Tätigkeiten ins Wasser eingetragen. In Deutschland finden sich typischerweise bis 100 µg/L gemessen als AOX in kommunalen Abwässern [3].

In den letzten Jahren beschäftigt sich die Fachwelt zunehmend mit Stoffen, die unter dem Stichwort Spurenstoffe zusammengefasst werden, oder wegen ihrer ökotoxikologischen Relevanz häufig auch

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

als Mikroverunreinigungen bezeichnet werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer chemischen Beschaffenheit und ihres physikalischen Verhaltens erheblich. Es gibt saure, neutrale sowie basische Verbindungen mit hydrophilem wie auch hydrophobem Charakter. Sie sind tendenziell schlecht biologisch abbaubar. Unter dem Begriff Spurenstoffe oder Mikroverunreinigungen werden hier Arzneistoffe, Diagnostika, Haushalts- und Pflegemittel, Industriechemikalien sowie endokrin wirksame Stoffe zusammengefasst, die im Abwasser in geringen Konzentrationen, d.h. i.d.R. im ng/L- bis µg/L-Bereich vorkommen. Sie werden nicht allein durch Abwässer aus Krankenhäusern und Altenheimen oder durch Industrie und Gewerbe ins Abwasser eingetragen, sondern zu einem ganz erheblichen Teil mit den Haushaltsabwässern. Neue Stoffe, sogenannte Transformationsprodukte, entstehen unter anderem beim biologischen Abbau, oder beispielsweise bei der weitergehenden oxidativen Behandlung mit Ozon zur Spurstoffentfernung. Des Weiteren werden aktuell antibiotikaresistente Keime, Nanomaterialien und auch Mikroplastik diskutiert.

Abwasser besteht dementsprechend aus einer Vielzahl von Stoffen, die alle ganz unterschiedlich auf Mensch und Umwelt wirken und mit ganz verschiedenen Technologien vollständig oder auch nur teilweise aus dem Abwasser eliminiert werden können. Die Palette der unterschiedlichen Stoffe ist dem entsprechend kaum abzugrenzen und wie Kroiss anmerkt: „Die einzigen Stoffe, die zuverlässig aus dem Abwasser ferngehalten werden können, ... sind solche, die nicht produziert werden“ [4].

Und doch besteht Abwasser zu mehr als 99,5 % aus H₂O.

Sind alle Inhaltsstoffe auch eine Ressource oder gar ein Wertstoff?

Hat Kupfer im Abwasser/Klärschlamm einen Wert nur weil man hochrechnen kann, dass im gesamten Kommunalabwasser bzw. Klärschlamm in Deutschland einige Megagramm Kupfer enthalten sind (bei rd. 2,0 Mio. Mg TR/a Klärschlamm und rd. 300 mg Cu/kg TR resultieren rd. 600 Mg Cu/a), und der Kupferpreis (www.boerse-online.de/rohstoffe/kupferpreis/EURO) derzeit rd. 5,60 €/kg beträgt? Oder erhöht sich der Wert des Abwassers dadurch, dass der Wirkstoff Diclofenac enthalten ist, der in der Apotheke teuer verkauft wird? Offenbar nicht.

Als Ressource wird im allgemeinen Sprachgebrauch ein Mittel bezeichnet, das benötigt wird, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, vgl. [5]. Meist werden darunter Betriebsmittel, Geldmittel, Personen oder die natürlichen Ressourcen, Wasser, Luft, Boden/Fläche, biologische Vielfalt und Rohstoffe verstanden. In der Geologie unterscheidet man Ressourcen und Reserven. Reserven sind dabei die Mengen, die erfasst wurden und unter heutigen Gegebenheiten technisch und wirtschaftlich gewinnbar sind. Demgegenüber sind Ressourcen entweder (noch) nicht wirtschaftlich ausbringbar oder aufgrund geologischer Indikatoren zu erwartende, aber bisher nicht durch Exploration nachgewiesene Mengen eines Rohstoffs, vgl. [5].

Wertstoffe sind Stoffe, die nach ihrer Nutzung bzw. nach ihrem Gebrauch einen ökonomischen oder ökologischen Wert für eine direkte Wiederverwendung haben oder als Sekundärrohstoff für weitere Aufbereitungsprozesse eingesetzt werden können.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Die Frage wann ein Stoff ein Wertstoff ist, kann in Anlehnung an § 5 Abs. 1 des KrWG [6] beantwortet werden. Hiernach endet die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes, wenn dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- „er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
- seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.“

Zu beachten ist, dass sich die Kriterien für die Bewertung eines Wertstoffs im Laufe der Zeit ändern können, z.B. durch ein verändertes Nutzungsverhalten der Verbraucher, Weiterentwicklung von Technologien oder auch durch eine Verknappung von Rohstoffen.

Für die Abwasserbehandlung sind Wertstoffe/Sekundärrohstoffe dementsprechend Substanzen/Elemente, die unter ökonomischen, ökologischen und technischen Aspekten direkt oder durch eine Aufbereitung als Produkt, Rohstoff oder Energie wiederverwendet werden können

Welche Ressourcen / Wertstoffe im kommunalen Abwasser stehen heute im Fokus?

Wasser

Die mengenmäßig größte Ressource im Abwasser ist das Wasser. Die Frage des „Wertes“ ist dabei stark von den notwendigen Aufbereitungsverfahren sowie den lokalen Randbedingungen abhängig. Dementsprechend ist der „Wert“ für Wasser in Bezug auf eine Wasserwiederverwendung für aride Gebiete anders zu bewerten als für wasserreiche Länder. Neben der Verfügbarkeit sind auch die „eingebundene“ Energie [7] sowie die Wirtschaftlichkeit ausschlaggebend dafür, ob Wasser aus Abwasser eine wertvolle Ressource darstellt.

Energie

Abwasser enthält Energie in Form von Wärme, zugeführt bei der Wassernutzung (duschen, waschen etc.), sowie in Form von chemisch gebundener Energie, d.h. im Wesentlichen durch die organischen Inhaltsstoffe. Der CSB ist ein direktes Maß für die Menge der gebundenen Energie. Die kinetische oder Lageenergie kann im Einzelfall relevant sein; im Vergleich zur thermischen und chemisch gebundenen Energie ist sie in Deutschland vernachlässigbar.

Nährstoffe insbesondere Phosphor

Der aktuell mit Abstand am besten untersuchte Wertstoff im Abwasser ist der Nährstoff Phosphor, der anders als z.B. die Nährstoffe Stickstoff und Kalium aufgrund seiner beschränkten Reserven in den letzten Jahren in den Fokus gerückt ist. Auch wenn man heute von einer statischen Lebensdauer der Reserven von mehr als 300 Jahren und der Ressourcen von mehr als 1.400 Jahren ausgeht, vgl. [8], ist die P-Rückgewinnung geboten, um die mit dem Phosphorabbau und der Phosphatdüngernutzung

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

verbundenen Umweltprobleme zu minimieren, Preisschwankungen auszugleichen und die Abhängigkeit von Importen aus wenigen Ländern mit Phosphaterzreserven zu begrenzen.

2 WASSER

Abwasser besteht zu über 99 % aus Wasser, somit liegt hierin auch die mengenmäßig größte Ressource. Wenngleich in Deutschland Wasser statistisch in ausreichender Menge und Qualität verfügbar ist, so bleibt doch die Fragestellung einer Wasserwiederverwendung bestehen. Auch in Deutschland steht Wasser lokal und saisonal nur begrenzt zur Verfügung. Man kann durchaus fragen ob angesichts der Energie die für die Aufbereitung und den Transport des Stuttgarter Trinkwassers notwendig sind, die einmalige Nutzung z.B. zur Toilettenspülung nicht eher ein Relikt einer gewachsenen Infrastruktur darstellt. Würde man Stuttgart auf der „grünen Wiese“ neu planen und bauen, so würde man vermutlich allein aus energetischen Gründen über eine intra-urbane Mehrfachnutzung von Wasser nachdenken.

Und angesichts des prognostizierten Klimawandels, einhergehend mit einer potentiellen Verschiebung von Regenzeiten in den Winter, d.h. außerhalb der Vegetationsperioden, sowie durch den Anbau von Pflanzen zur Bioenergieerzeugung kann für die Zukunft der Einsatz einer Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft auch in Deutschland an Bedeutung gewinnen, vgl. auch [9]. Das Umweltbundesamt lässt vorsichtshalber in einer Studie bereits die Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von aufbereitetem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung prüfen, vgl. [10].

Neben Wasserknappheit und anderer ökologischen Gründen, können aber auch rein wirtschaftliche Erwägungen ausschlaggebend für die Kreislaufführung und Mehrfachnutzung sein. Die deutsche Industrie benutzt Wasser im Mittel 4,9 mal überwiegend weil die Wiederverwendung wirtschaftlicher ist als die Kosten für Frischwasser und Abwasserreinigung [11].

Und je weitergehend wir die Abwässer ohnehin reinigen umso geringer ist der Zusatzaufwand um eine sachgerechte Qualität zur Abwasserwiederverwendung zu erreichen („fit for purpose“).

3 ENERGIE

Für eine Wärmerückgewinnung aus Abwasser gibt es diverse verfahrenstechnische Ansätze, vgl. [12], wobei beim Einsatz von Wärmepumpen die Jahresarbeitszahl zu berücksichtigen ist (Berücksichtigung von Primärenergieverbrauch bzw. Betrieb ausschließlich mit erneuerbarer Energie), vgl. [13]. Aufgrund des höheren Wärmepotentials von Grauwasser sind besonders dezentrale/semizentrale Ansätze interessant.

Einhergehend mit der Entwicklung der Klärschlammbehandlung erfolgte seit den 1920er Jahren die Umsetzung der Klärschlammfäulung. Wenngleich damals noch nicht das Hauptziel in der Faulgaserzeugung lag, so steht dieses heute im Fokus für eine energetische Nutzung der im Abwasser bzw. Klärschlamm enthaltenen chemisch gebundenen Energie. Abbildung 1 zeigt ein vereinfachtes Energie-Flussdiagramm einer Abwasserbehandlungsanlage basierend auf dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB). Es wird deutlich, dass allein rd. 50 % der im Rohabwasser enthaltenen chemisch-gebundenen Energie während der biologischen Abwasserbehandlung durch Oxidation zu Kohlendioxid und „Wärme“ umgewandelt wird bzw. über den Ablauf die Kläranlage verlassen. Die zweite Hälfte liegt im Klärschlamm vor. Rd. 17 kWh/(E-a) entsprechend rd. 11 % können als elektrischer Strom gewonnen werden. Dies entspricht rd. 50 bis 70 % des Stromverbrauchs. Die erzeugte Wärme wird vor allem zur Faulraumbeheizung benötigt. Ggf. fällt Überschusswärme an, insb. im Sommer, die weiter genutzt werden kann, derzeit aber überwiegend via Kühlaggregaten an die Umwelt abgegeben wird. Durch Optimierungsmaßnahmen in der Prozessführung, z.B. der Zugabe von Co-Substraten und auch in der Systembetrachtung aller Energieverbraucher und -erzeuger, zielt man auf einen energieautonomen Betrieb der gesamten Abwasser- und Klärschlammbehandlung; nicht nur im Jahresmittelwert sondern auch gezielt im Tagesgang zu Abdeckung von Lastspitzen, vgl. [14].

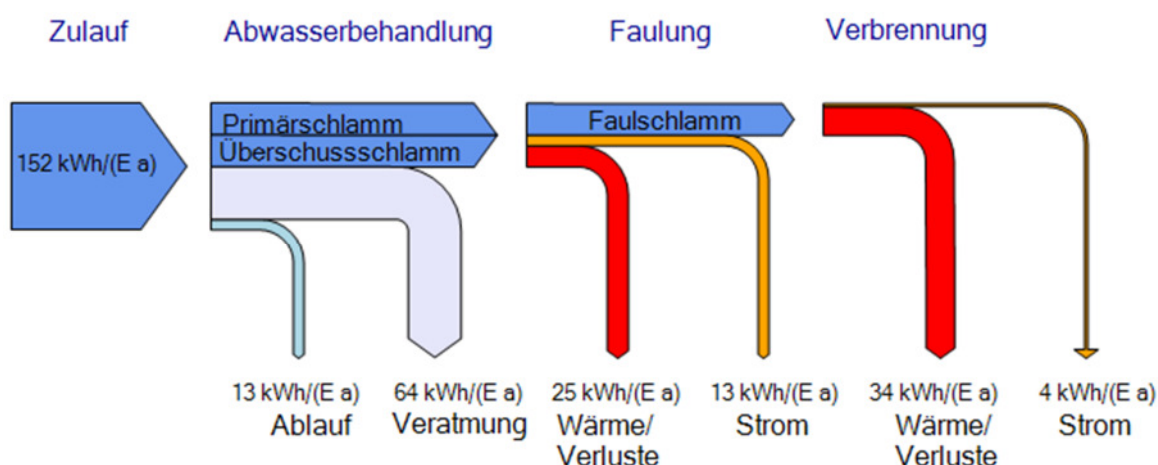


Abbildung 1: CSB-Bilanz einer Abwasser- und Klärschlammbehandlungsanlage,
Annahmen: 120 g CSB/(E d), 1 kg CSB \approx 0,35 m³ CH₄, 1 m³ CH₄ \approx 10 kWh

Das Energiepotential der im Klärschlamm chemisch gebundenen Energie kann dabei konventionell auf zwei verschiedene Wege genutzt werden, vgl. [15]:

- Biologische Umwandlung der organischen Substanz zu Faulgas und Nutzung des Faulgases z.B. mittels Blockheizkraftwerk als elektrische und thermische Energie. Diverse Verfahrenstechniken (Desintegrationsverfahren) wurden und werden entwickelt bzw. eingesetzt zur Erhöhung des Abbaugrades der organischen Substanz, jeweils mit unterschiedlichem Erfolg, vgl. [16].
- Physikalische Umwandlung der organischen Substanz durch Verbrennung und Nutzung der Wärme, z.B. zur Erzeugung von Dampf und Nutzung mittels Kondensationsturbine.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Energetische Vorteile bietet vor allem eine Kaskadennutzung, d.h. Erzeugung von Faulgas mit anschließender thermischer Entsorgung (Verbrennung), vgl. [15].

Allein durch die Faulgasnutzung im Blockheizkraftwerk (BHKW) kann der thermische Wärmebedarf einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage weitgehend gedeckt werden. Elektrisch können rd. 12 - 19 kWh/(E·a) mittels BHKW generiert werden. Demgegenüber steht ein spezifischer Stromverbrauch von im Mittel 34 kWh/(E·a) [17], d.h. durch die energetische Nutzung des Klärschlammes kann ein elektrischer Eigenversorgungsgrad von rd. 50 % bzw. bei einem optimierten Betrieb (minimierter Stromverbrauch auf der Abwasserbehandlungsanlage) auch bis zu 80 % erzielt werden.

Neben der konventionellen Faulung und Monoklärschlammverbrennung gibt es diverse Alternativen zur Nutzung der im Klärschlamm enthaltenen organischen Substanz, sowohl in Bezug auf eine energetische als auch stoffliche Nutzung, wobei die großtechnische Relevanz zzt. (noch) gering ist, vgl. auch Kapitel 5:

- Direkte Erzeugung von elektrischer Energie mittels biologischer Brennstoffzelle und simultaner Abbau der organischen Substanz, vgl. [18; 19].
- Physikalische Umwandlung durch Vergasung (z.B. [20]), Niedertemperaturkonvertierung (z.B. [21]) oder Pyrolyse (z.B. [22; 23]). Erzeugung eines Gases, Öls und Reststoffs (Pyrolysekohle) zur weiteren Verwertung. Die Qualität und Quantität des erzeugten Gases, Öls bzw. Reststoffs ist dabei abhängig von den Reaktionsbedingungen, insbesondere der Temperatur bzw. bei der Vergasung auch vom λ -Wert (Sauerstoffanteil bei der Vergasung).
- Einsatz einer hydrothermalen Carbonisierung (HTC) zur Erzeugung einer Kohle mit einer Nutzung zur Bodenverbesserung (stoffliche Nutzung) bzw. zur Verbrennung (energetische Nutzung), vgl. z.B. [24; 25].

4 NÄHRSTOFFE

4.1 Stickstoff

Stickstoff ist ein Nährstoff und wird als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt. Da die Atmosphäre/Luft zu fast 80 % aus Stickstoff (N_2) besteht, ist dieser quasi unbegrenzt verfügbar. Über das Haber-Bosch-Verfahren kann aus Stickstoff Ammoniak hergestellt werden. Bei den konventionellen Prozessen erfolgt ein Einsatz von rd. 22 GJ/(Mg NH_3) bzw. rd. 7,4 kWh/(kg N), in Form von Erdgas für die Erzeugung von den für den Prozess notwendigen Wasserstoff, sowie rd. 7,2 - 9,0 GJ/(Mg NH_3) bzw. rd. 2,7 kWh/(kg N) für die Energieerzeugung (insbesondere Dampferzeugung), vgl. [26; 27].

Das Potential für die Rückgewinnung von Stickstoff aus Abwasser kann als relativ gering eingestuft werden. Abhängig von der Ernährung werden in Bezug auf den eingesetzten Stickstoff für die Düngemittelproduktion lediglich 14 % bei einer pflanzlichen Ernährung bzw. 4 % bei einer Ernährung

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

mit Fleisch an Stickstoff mit der Nahrung aufgenommen, vgl. [28]. Der Hauptanteil des eingesetzten Stickstoffs mit rd. 86 - 96 % verbleiben in den Pflanzenresten bzw. in der Gülle, werden ausgeschwemmt (Erosion, Eintrag in die Gewässer/Grundwasser) oder werden im Boden zu Stickstoffgasen (NO_x , NH_3 etc.) umgewandelt. Unter Berücksichtigung, dass während der Abwasserbehandlung lediglich 35 % des Stickstoffs im Zulauf zur Abwasserbehandlungsanlage über den Überschuss- und Primärschlamm abgezogen werden [29], resultiert ein geringes Rückgewinnungspotential. Aber selbst bei einer Urin-Separation und 80 %iger Rückgewinnung des im Urin enthaltenen Stickstoffs ist der Beitrag am Stickstoffkreislauf gering, ganz unabhängig davon, dass die Energiebilanz für Rückgewinnung und Aufkonzentrierung mit dem Haber-Bosch-Verfahren inkl. Nitrifikation/Denitrifikation gegenübergestellt werden muss.

Abgesehen von der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung konzentriert sich die Rückgewinnung von Stickstoff im Bereich der Klärschlammbehandlung auf die Behandlung des Prozesswassers aus der Entwässerung von Faulschlamm. Die hohen Ammoniumkonzentrationen von bis zu 1.000 mg/L $\text{NH}_4\text{-N}$ führen zu einer signifikanten Rückbelastung der Abwasserbehandlungsanlage, so dass die Hauptzielstellung der Verfahrensentwicklungen im Bereich der Stickstoffrückgewinnung vor allem die Stickstoffelimination im Nebenstrom ist.

Für eine Stickstoffrückgewinnung sind folgende Verfahren denkbar:

- Ammoniak-Strippping und Ausfällung als Ammoniumsulfat: Das Verfahren ist großtechnisch auf diversen Kläranlagen realisiert, vgl. [29]. Der Energiebedarf auf der Abwasserbehandlungsanlage Straubing liegt bei 2,0 kWh/(kg N) elektrisch sowie zwischen 8,4 - 10,5 kWh/(kg N) thermisch, wobei die Wärme aus Abwärme zur Verfügung gestellt werden kann, vgl. [30]. Des Weiteren ist der Chemikalienbedarf (Natronlauge und Schwefelsäure) zu berücksichtigen.
- Stickstoffelimination mittels Ionenaustausch durch ein Zeolith und Elektrodialyse zur Regeneration: Die rückgetauschten Ammoniumionen werden dabei als Ammoniumsulfat in einer Konzentratlösung angereichert, vgl. [30]. Der elektrische Energiebedarf liegt zwischen 6,5 - 8,2 kWh/(kg N), vgl. [30]. Des Weiteren erfolgt der Einsatz von Natriumsulfat. Im Bereich der Stickstoffelimination mittels Ionenaustauschern existieren weitere Verfahrensentwicklungen, z.B. [31].
- Einsatz von Membranen: Nach einer pH-Wert-Erhöhung auf rd. 11 kann Ammoniak über eine hydrophobe Membran abgeleitet werden. Hierzu wird in der Hohlfaser der Membran Schwefelsäure zirkuliert, womit direkt eine Ammoniumsulfatlösung generiert werden kann, vgl. [32].
- Kristallisation/Fällung als Magnesium-Ammonium-Phosphat: Aufgrund der Stöchiometrie ist für eine Stickstoffelimination eine Dosierung von Phosphat und Magnesium erforderlich. Im Bereich der Phosphorrückgewinnung gibt es hierzu verschiedene Verfahrensentwicklungen.

Insgesamt ist zu beachten, dass der Hauptfokus der Prozesswasserbehandlung in der Elimination von Stickstoff liegt. Somit ist zwischen der Düngemittelproduktion und dem damit verbundenen Energie-

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

und Chemikalieneinsatz sowie einer möglichen energieoptimierten/energieminimierten Prozesswasserbehandlung, wie z.B. mittels Deammonifikation (elektrischer Energieverbrauch rd. 1,5 kWh/(kg N), vgl. [33]), abzuwägen - insbesondere auch vor dem Hintergrund des relativ geringen Rückgewinnungspotentials.

4.2 Phosphor

Phosphor wird im Rahmen der Phosphorelimination während der kommunalen Abwasserbehandlung zu mehr als 90 % in den Klärschlamm überführt. Abhängig von der Art der Phosphorelimination sowie dem eingesetzten Fällmittel liegt Phosphor sowohl biologisch als auch chemisch gebunden vor, vgl. [34].

Für eine Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm wurden und werden diverse Verfahrenstechniken entwickelt. Grundsätzlich können in Abhängigkeit vom Einsatzort die folgenden drei Stoffströme unterschieden werden:

- Faulschlamm
- Schlammwasser aus der (Faulschlamm-)entwässerung
- Rückstände (Asche) nach einer thermischen Monoklärschlammbehandlung (insbesondere Verbrennung)

Tabelle 1: Vergleich von Schlammwasser, Faulschlamm und Asche

	Schlammwasser	Faulschlamm	Asche
Volumen-/ Massenstrom	1 - 10 L/(E·d)	0,2 - 0,8 L/(E·d)	rd. 0,03 kg/(E·d)
Feststoff-konzentration (TR)	< 1 %	rd. 3 %	100 %
Glührückstand (GR)	-	40 - 50 %	100 %
Phosphor (P _{ges})	20 - 100 mg/L	2 - 5 % bez. auf TR	5 - 10 % bez. auf TR
Rückgewinnungspotential*	rd. 10 - 20 %	rd. 90 %	rd. 90 %

* bezogen auf die Zulaufkraft zur Abwasserbehandlungsanlage; theoretisches Rückgewinnungspotential, durch den Wirkungsgrad der Verfahren kann das tatsächliche Potential deutlich darunter liegen

Tabelle 1 stellt die drei Stoffströme gegenüber. Sehr deutlich ist dabei der Unterschied zwischen den „nassen“ Strömen, Schlammwasser und Faulschlamm, sowie der Asche zu erkennen. Im Vergleich ist die Asche trocken, frei von organischer Substanz und ist der konzentrierteste Phosphormassenstrom. Im Gegensatz zum Schlammwasser liegt das theoretische Rückgewinnungspotential aus Faulschlamm bei 90 %. Beim Schlammwasser ist das Rückgewinnungspotential von der Phosphorrücklösung bei der Faulung abhängig, wobei höhere Konzentrationen bei Kläranlagen mit erhöhter biologischer Phosphorelimination erzielt werden können.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass das Rückgewinnungspotential nicht der tatsächlichen Rückgewinnung entspricht. Hierfür wäre der Wirkungsgrad des eingesetzten Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung zu berücksichtigen.

Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung während der Klärschlammbehandlung. Die Verfahrensbeschreibungen sind der Literatur zu entnehmen, z.B. [35], [36], [34], [37].

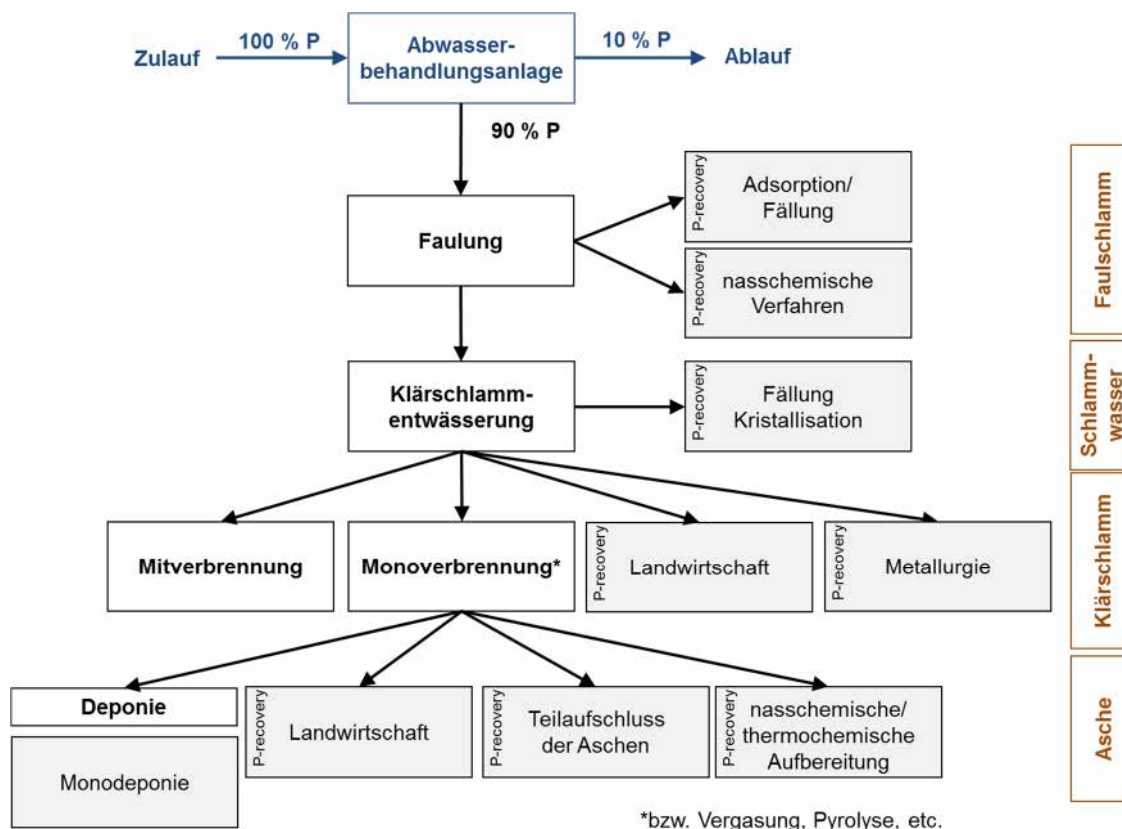


Abbildung 2: Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, vgl. [38].

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Abwasser ist ein Vielstoffgemisch, geprägt durch die Ausscheidungen des Menschen, die verwendeten Wasch- und Reinigungsmittel, Arzneimittel sowie durch den Stoffeintrag aus Gewerbe- und Industriebetrieben. Mit der Zunahme der Kenntnisse bezüglich der Zusammensetzung und Wirkweise von Abwasserinhaltsstoffen auf Mensch und Umwelt ging und geht die Installation und Erweiterung von Abwasserbehandlungsverfahren einher.

Weltweit steht die Fragestellung des Ressourcenschutzes im Fokus; angefangen von fossilen Energieträgern, über verschiedenste Metalle/Düngemittel bis eben hin zu Wasser. ProgRes [39] identifiziert daher den „ (...) schonenden und gleichzeitig effizienten Umgang mit natürlichen Ressourcen zu einer Schlüsselkompetenz zukunftsfähiger Gesellschaften.“ Dies betrifft in besonderer

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Weise auch die (Ab-)Wasserbehandlung. Neben Wasser geht es dabei um die Verknüpfung mit der Fragestellung der Energie aber auch um die im Abwasser enthaltenen Ressourcen.

Die Fragestellungen welche Ressourcen im Abwasser genutzt werden können und sollen wird verstärkt diskutiert. Im Vordergrund stehen die Nutzung der enthaltenen (Wärme)-Energie und der Nährstoffe, insbesondere des Phosphors, aber auch die Wiederverwendung des Wassers selbst. Die Sinnhaftigkeit der Rückgewinnung von Wärmeenergie und der Wasserwiederverwendung ist standortabhängig und in jedem Einzelfall zu bewerten.

Eine zukunftsfähige Abwasserbehandlung vereint damit die Aspekte des Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutzes. Die Abwasserbehandlungsanlage, entwickelt als technische Anlage zum „Klären“ („von Schmutz befreien, reinigen; klar werden“) von Abwasser, wandelt sich dementsprechend zu einer Abwasserbehandlungsanlage als Dienstleister für die Bereiche Wasser, Energie und Ressourcen (Düngemittel) [1].

Neben den diskutierten Ressourcen Wasser, Energie und Nährstoffe können dabei zukünftig noch weitere „Wertstoffe“ im Fokus stehen:

Stoffliche Nutzung organischer Inhaltsstoffe:

- Nutzung von Klärschlamm als Ausgangssubstrat für die Erzeugung von organischen Säuren [40] als Rohstoff für die Industrie oder auch als Kohlenstoffquelle für die Abwasserbehandlung (Denitrifikation, erhöhte biologische Phosphorelimination), vgl. [41].
- Erzeugung von Kunststoffen aus Klärschlamm, vgl. [42].
- Aufbereitung der bei der Pyrolyse entstandenen Kohle zu Aktivkohle [43]. Wobei die Qualität der Aktivkohle aufgrund des hohen Aschegehalts gering ist [43], vgl. auch [41].
- Rückgewinnung von Bio-Pestiziden aus Klärschlamm [40]: Hierbei werden aktive Komponenten (Proteine, Sporen etc.) von *Bacillus Thuringiensis*, ein Bakterium, das zur biologischen Schädlingsbekämpfung eingesetzt wird, aus Überschussschlamm mittels Ultrafiltration separiert, vgl. auch [44].

Stoffliche Nutzung anorganischer Inhaltsstoffe

Der Glührückstand einer Klärschlammprobe ist mit der Asche nach einer Monoklärschlammverbrennung vergleichbar. Mit rd. 30 - 40 % ist Sand (SiO_2) der Hauptbestandteil der Aschen, eingetragen durch die Kanalisation sowie bei den Aschen auch beeinflusst durch die Wirbelschichtverbrennung. Vor allem durch die Wasserhärte wird Calcium eingetragen mit einer Konzentration von rd. 15 - 35 % CaO. Neben einer Grundkonzentration wird Eisen und Aluminium durch den Einsatz von Fällmitteln beeinflusst. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden 24 von 26 deutschen Monoklärschlammverbrennungsanlagen bezüglich der Aschenzusammensetzung analysiert, vgl. [45]. Tabelle 2 zeigt die Hauptelementgehalte der untersuchten Aschen, bestehend vor allem aus Silizium, Calcium, Eisen, Phosphor und Aluminium.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Hauptelementgehalte von Aschen, Daten: [45]

Element	Min.	Max.	Mittelwert	Median	Messwerte
	[Gewichts-%]				-
Al	0,7	20,2	5,2	4,8	252
Ca	6,1	37,8	13,8	10,5	252
Fe	1,8	20,3	9,9	9,5	252
K	<0,006	1,7	0,9	0,9	227
Mg	0,3	3,9	1,4	1,3	252
Na	0,2	2,6	0,7	0,6	252
P	1,5	13,1	7,3	7,9	252
S	0,3	6,9	1,5	1,0	252
Si	2,4	23,7	12,1	12,1	252
Ti	0,1	1,5	0,4	0,4	252

Bereits Schimmel [46] identifizierte Phosphor als wichtigsten Sekundärrohstoff in der Klärschlammasche, vgl. Kapitel 4.2. Aufgrund der hohen Konzentrationen in den Aschen existieren für die für die Phosphorelimination eingesetzten Fällmittel Aluminium und Eisen ebenfalls verschiedene Verfahrensansätze für eine Rückgewinnung, wobei die entwickelten Technologien oft auch für weitere Metalle einsetzbar sind. Besondere Bedeutung gewinnen die Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen insbesondere in Kombination mit den Verfahren zur Phosphorrückgewinnung.

– Nasschemisch

Die Löslichkeit der Metalle im Klärschlamm bzw. in der Asche ist insbesondere abhängig vom pH-Wert, vgl. [47]. Durch eine pH-Wert-Absenkung im Klärschlamm bzw. in der Asche kann nach einer Fest-Flüssig-Trennung eine Separation der Metalle bzw. auch von Phosphor erfolgen, vgl. Kapitel 3.3.3. Eine nasschemische Aufbereitung ist letztendlich bis zu einer Cyanidlaugung mittels NaCN zur Rücklösung der Edelmetalle möglich [48].

– Bio-Leaching

Hierbei erfolgt durch eisen- oder schwefeloxidierende Mikroorganismen die Oxidation von Metallsulfiden im Faulschlamm zu löslichen Metallsulfatverbindungen, vgl. [49], [50]. Bereits bei höheren pH-Werten zwischen 4 und 3 erfolgt eine Rücklösung der Metalle (Zn, Cd, Pb, Cu), vgl. [51].

Für die seltenen Erden finden sich rd. 116 mg/kg in der Klärschlammasche. Damit sind die Gehalte im Vergleich zu den derzeit abgebauten Erzen („economic cut-off 1 %“) zu niedrig, um eine wirtschaftliche Rückgewinnung zu erlauben [52]. In ähnlicher Weise gilt dies auch für die übrigen kritischen Metalle. Allerdings kann sich dies durch die Nutzung von Synergien z.B. bei einer Phosphorrückgewinnung verändern.

Grundsätzlich kann es durch industrielle Betriebe immer wieder zu einer Verschiebung der Zusammensetzung der Metalle kommen. So zeigt ein Beispiel aus Japan, dass dort eine Rückgewinnung von Gold aus Klärschlammasche möglich ist. Nach Reuters [53] liegt dort die Konzentration an Gold bei 1.890 mg/kg Asche. Westerhoff et al. [54] gehen davon aus, dass zukünftig die Rückgewinnung von Metallen aus Klärschlamm an Bedeutung gewinnen wird, wobei Silber, Kupfer

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

und Gold als die drei lukrativsten Elemente identifiziert wurden. Unter Berücksichtigung von 13 verschiedenen Elementen ermittelten Westerhoff et al. [54] einen theoretischen ökonomischen Wert von Klärschlamm von 280 US \$/Mg TR Klärschlamm (rd. 255 €/Mg TR).

6 LITERATUR

- [1] Schaum, C. (2015): Abwasserbehandlung der Zukunft: Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutz, Habilitationsschrift, TU Darmstadt, Institut IWAR, in Vorbereitung
- [2] Lazarova, V. und Bahri, A. (2005): Water reuse for irrigation – Agriculture, Landscapes and Turf Grass. Boca Raton (FL): CRC Press
- [3] Imhoff, K. und Imhoff, K. R. (2007): Taschenbuch der Stadtentwässerung (30., verb. Aufl.), Oldenbourg, München
- [4] Kroiss, H. (2004): What is the potential for utilizing the resources in sludge?, Water Science and Technology, 49(10)
- [5] Faulstich, M.; Mocker, M.; Pfeiffer, S.; Köglmeier, M.; Egener, S. (2010): r³-Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien
- [6] KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)
- [7] Schaum, C.; Lensch, D.; Cornel, P. (2014): Water reuse and reclamation: a contribution to energy efficiency in the water cycle, Journal of Water Reuse and Desalination, doi:10.2166/wrd.2014.159
- [8] Udent, K. (2014): Peak „Phosphor“ – Parallelen zu Peak Oil?, Fachtagung VSA/SVUT, 07. November 2014, Luzern, Schweiz
- [9] Fuhrmann, T.; Scheer, H.; Cornel, P. (2012): Hinweise zur Wasserwiederverwendung - Vielschichtige Fragestellungen angesichts international zunehmender Relevanz, KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall, 59(1), 52-56
- [10] UFOPLAN (2015): Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von aufbereitetem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung, Forschungskennzahl 371321232, in Vorbereitung
- [11] Meda, A.; Müller, K.; Cornel, P. (2010): Untersuchung der Randbedingungen für die Wasserwiederverwendung und Kernprojektkoordinierung, Verbundprojekt: Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Kernprojekt B Hygienisierung und Wasserwiederverwendung, Förderkennzeichen: 02WA0735, Darmstadt
- [12] DWA (2009): Merkblatt DWA-M 114, Energie aus Abwasser - Wärme- und Lageenergie
- [13] Cornel, P.; Meda, A.; Bieker, S. (2011): Wastewater as a Source of Energy, Nutrients, and Service Water, Treatise on Water Science, Elsevier, Oxford
- [14] Schaum, C.; Lensch, D.; Lutze, R.; Cornel, P. (2014): Klärschlammbehandlung der Zukunft, wwt - wasserwirtschaft-wassertechnik, Nr. 10/2014, Berlin
- [15] Schaum, C.; Schröder, L.; Lux, J.; Fehrenbach, H.; Reinhardt, J.; Cornel, P.; Kristeller, W.; Schmid, S.; Götz, R.; Himmelein, D.; Scholl, B.; Stegmayer, K.; Wagner, G.; Maurer, M.; Mauritz, A.; Hein, A.; Berchtenbreiter, C.; Blotenberg, U.; Haslwimmer, T.; Wiederkehr, P.; Wehrli, M. (2010): Klärschlammfäulung und -verbrennung: Das Behandlungskonzept der Zukunft?, - Ergebnisse einer Grundsatzstudie zum Stand der Klärschlammbehandlung, Korrespondenz Abwasser - Abfall, 57(3), 252-258
- [16] DWA (2015): Merkblatt DWA-M 302 (Entwurf) - Klärschlammintegration, Hennef
- [17] DWA (2013): Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen 2011, Stromverbrauch: 4.300 Kläranlagen unter der Lupe, Hennef
- [18] Kletke, T.; Lübken, M.; Wichern, M. (2013): Die Entwicklung der mikrobiellen Brennstoffzelle auf der Kläranlage, 31. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft: Klimaschutz und Energiewende - Welchen Beitrag liefert der Abwassersektor?, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft SIWAWI - Ruhr-Universität Bochum, 65
- [19] Dentel, S. K.; Strogon, B.; Chiu, P. (2004): Direct generation of electricity from sludges and other liquid wastes, Water Science and Technology, 50(9), 161-168
- [20] Gaiffi, M. (2013): Erfahrungen aus dem Betrieb der SynGas-Anlagen, Tagungsunterlagen, 8. DWA-Klärschlammstage, 04.-06.06.2013, Fulda

- [21] DBU (2005): Thermokatalytische Niedertemperaturkonvertierung (NTK) von tierischer und mikrobieller Biomasse unter Gewinnung von Wertstoffen und Energieträgern im Pilotmaßstab, Abschlussbericht, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
- [22] Kaminsky, W.; Bellmann, U.; Kummer, A. B.; Ying, Y. (1989): Pyrolyse von Klärschlamm In K. J. Thomé-Kozmiensky und U. Loll (Eds.), Recycling von Klärschlamm (406 S.), EF-Verl. für Energie u. Umwelttechnik, Berlin
- [23] Bridle, T. R. und Pritchard, D. (2004): Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis, *Water Science and Technology*, 50(9), 169-175
- [24] Buttman, M. (2011): Klimafreundliche Kohle durch Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse, *Chemie Ingenieur Technik*, 83(11), 1860-1896
- [25] Remy, C.; Warneke, J.; Lesjean, B. (2015): Hydrothermale Carbonisierung: Eine neue Option der Klärschlammbehandlung? Theoretische Energie/CO₂-Bilanz, *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 62(4), 354-362
- [26] EFMA (2000): Production of Ammonia, Booklet No. 1 of 8, Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry, European fertilizer Manufactureres' Association
- [27] Patyk, A. und Reinhardt, G. A. (1997): Düngemittel - Energie- und Stoffstrombilanzen, Vieweg, Braunschweig
- [28] Galloway, J. N.; Aber, J. D.; Erisman, J. W.; Seitzinger, S. P.; Howarth, R. W.; Cowling, E. B.; Cosby, B. J. (2003): The Nitrogen Cascade, *BioScience*, 53(4), 341-356
- [29] DWA (2005): Rückbelastung aus der Schlammbehandlung - Verfahren zur Schlammwasserbehandlung, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 „Rückbelastung aus der Schlammbehandlung“, Hennef
- [30] Morck, T. und Hoffmann, E. (2012): Separate Schlammwasserbehandlung und Stickstoffrückgewinnung mit Hilfe eines Kombinationsverfahrens aus Ionenaustausch und Elektrodialyse, 26. Karlsruher Flockungstage 2012, Schriftenreihe SWW - KIT, 143
- [31] Liberti, L.; Petruzzelli, D.; De Florio, L. (2001): REM NUT Ion Exchange Plus Struvite Precipitation Process, *Environmental Technology*, 22(11), 1313-1324
- [32] Liqui-Cel (2010): Anwendung der "TransMembraneChemiSorption" (TMCS) zur Ammoniakentfernung aus industriellen Abwässern, Membrane GmbH, Wuppertal
- [33] Beier, M.; Sander, M.; Schneider, Y.; Rosenwinkel, K.-H. (2008): Energieeffiziente Stickstoffelimination, *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 55(6)
- [34] Petzet, S. (2013): Phosphorrückgewinnung in der Abwassertechnik: Neue Verfahren für Klärschlamm und Klärschlammaschen, Dissertation, Schriftenreihe IWAR, 220
- [35] ATV-DVWK (2003): Phosphorrückgewinnung, Arbeitsbericht der ATV-DVWK Arbeitsgruppe Ak-1.1, *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 50(6)
- [36] Schaum, C. (2007): Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung – Klärschlammkonditionierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche, Schriftenreihe IWAR, 185
- [37] Pinnekamp, J.; Baumann, P.; Cornel, P.; Everding, W.; Göttlicher-Schmidle, U.; Heinzmann, B.; Jardin, N.; Londong, J.; Meyer, C.; Mocker, M.; Montag, D.; Müller-Schaper, J.; Petzet, S.; Schaum, C. (2013): Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Teil 1 und Teil 2, 2. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 „Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm“, *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 60(10) und 60(11)
- [38] Schaum, C. (2014): P-Rückgewinnung in der Abwasserreinigung: Überblick Europa und Deutschland, Gemeinschaftstagung „Phosphor-Recycling in der Abwasserreinigung - Hintergründe. Entwicklung, Perspektiven" der SVUT und VSA, 07. November 2014, Solothurn, Schweiz
- [39] ProgRess (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess), Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.02.2012, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin
- [40] Kalogo, Y. und Monteith, H. (2013): Energy and Ressource Recovery from Sludge, GWRC Report Series, IWA Publishing, London
- [41] Hansen, B. (2001): Other energy and resource recovery In L. Spinoso und P. A. Vesilind (Eds.), *Sludge into Biosolids: Processing, Disposal and Utilization*, IWA Publishing
- [42] Pittmann, T. und Steinmetz, H. (2013): Produktion von Bioplastik auf kommunalen Kläranlagen, *Wasser und Abfall*, 5

- [43] Buekens, A. und Schoeters, J. (1987): Konvertierung von Klärschlämmen zu Dieselöl und Aktivkohle, Entfernung von Phosphaten aus Abwässern und Nutzbarmachung von Klärschlämmen, Hoechst AG, Frankfurt am Main
- [44] Tyagi, R. D.; Sikati Foko, V.; Barnabe, S.; Vidyarthi, A. S.; Valéro, J. R.; Surampalli, R. Y. (2002): Simultaneous production of biopesticide and alkaline proteases by *Bacillus thuringiensis* using sewage sludge as a raw material, *Water Science and Technology*, 46(10), 247-254
- [45] UBA (2014): Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsgaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik, TEXTE 49/2014, FKZ 37 11 33 321, UBA-FB 001951, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau
- [46] Schimmel, G. (1987): Verwertung von Klärschlammaschen, Entfernung von Phosphaten aus Abwässern und Nutzbarmachung von Klärschlämmen, Hoechst AG
- [47] Oliver, B. G. und Carey, J. H. (1976): Acid solubilization of sewage sludge and ash constituents for possible recovery, *Water Research*, 10(10)
- [48] Krofchak, D. (1983): Process for the treatment of incinerated sewage sludge ash, European Patent 0 004 778
- [49] Pathak, A.; Dastidar, M. G.; Sreekrishnan, T. R. (2009): Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review, *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2343-2353
- [50] Dott, W.; Dossin, M.; Schacht, P. (2011): Bioleaching von Schwermetallen und selektive Biorückgewinnung von Phosphat aus Klärschlammasche, *Recycling und Rohstoffe* (TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky), 4
- [51] Tyagi, R. D.; Couillard, D.; Tran, F. (1988): Heavy metals removal from anaerobically digested sludge by chemical and microbiological methods, *Environmental Pollution*, 50(4), 295-316
- [52] Krüger, O. und Adam, C. (2013): Potenzialermittlung der in Deutschland anfallenden Klärschlammaschen - Mögliche Phosphor- und Metallrückgewinnung, 8. DWA Klärschlammstage, 04.-06.06.2013, Fulda
- [53] Reuters (2009): Japan sewage yields more gold than top mines, abgerufen am 24.07.2013, <http://www.reuters.com/article/2009/01/30/gold-sewage-idUST8310320090130>
- [54] Westerhoff, P.; Lee, S.; Yang, Y.; Gordon, G. W.; Hristovski, K.; Halden, R. U.; Herckes, P. (2015): Characterization, Recovery Opportunities, and Valuation of Metals in Municipal Sludges from U.S. Wastewater Treatment Plants Nationwide, *Environmental Science & Technology*

Kontakt:

Dr.-Ing. Christian Schaum
Prof. Dr.-Ing. Peter Cornel

Technische Universität Darmstadt
Institut IWAR - Fachgebiet Abwassertechnik
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt

E-Mail: c.schaum@iwar.tu-darmstadt.de
p.cornel@iwar.tu-darmstadt.de