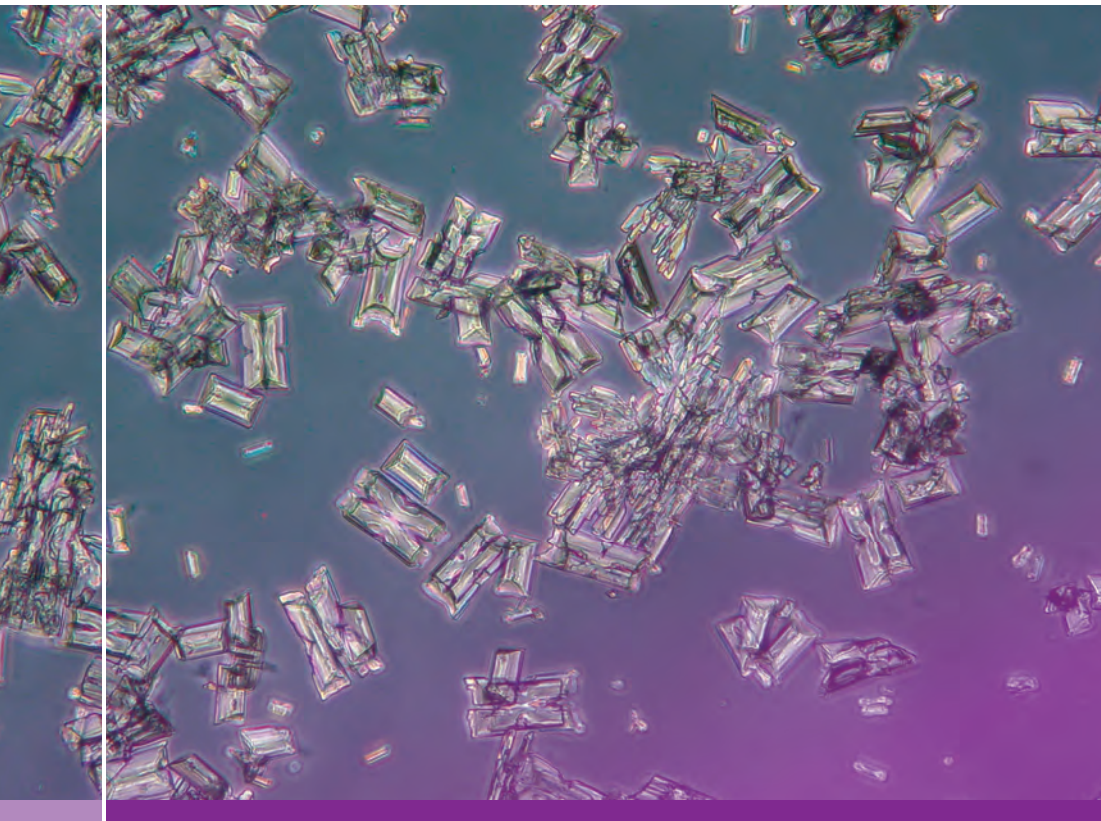


# Abwasser — Rohstoff statt Reststoff



Magnesium-Ammonium-Phosphat  
Kristalle (MAP).

Bis heute wird Abwasser meist noch als „Abfallprodukt“ gesehen, für dessen Entsorgung Energie und Hilfsstoffe eingesetzt werden müssen und bei dessen Abbau Reststoffe wie Klärschlamm entstehen. Erst langsam setzt sich, insbesondere aufgrund zunehmend globaler Anforderungen z.B. bezüglich Klimaschutz und nachhaltigem Umgang mit Ressourcen, die Erkenntnis durch, dass Abwasser als „Rohstoff“ einiges zu bieten hat. Das Bild zeigt aus Klärschlamm gewonnene Magnesium-Ammonium-Phosphat Kristalle (MAP).

## 1. Einführung

Leben ist ohne Wasser nicht denkbar. Flora und Fauna sind ebenso wie die Menschen auf Wasser in ausreichender Menge und

Qualität angewiesen. Da jedoch beim Gebrauch von Wasser auch Abwasser entsteht, ist die Geschichte der Abwasserentsorgung fast so alt wie die Geschichte der Menschheit selbst. So wurden mit dem

Zusammenschluss von Menschen zu größeren Wohnverbänden und Städten Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsanlagen zwingend erforderlich. Bereits mit der Entwicklung der ersten Dörfer wurden Erdgräben und gepflasterte Rinnen, später auch Versickerungsschächte angelegt, um das anfallende Abwasser schnell und fast vollständig abzuführen. Schon um ca. 960 v.Chr. wurden in Jerusalem Regen- und Schmutzwasser gemeinsam abgeleitet und in Teichanlagen behandelt; der Bodensatz der Teiche wurde als Dünger verwendet, was bereits ein Recycling von Nährstoffen darstellte.

Im Mittelalter ging das Wissen der Antike um Abwasserentsorgung weitgehend verloren, was zu katastrophalen hygienischen Verhältnissen führte und zur Ausbreitung verheerender Seuchen. Erst im 19. Jahrhundert wurde die Abwasserentsorgung wiederentdeckt. Seitdem haben sich unsere Systeme sukzessive bis zum heutigen Stand entwickelt. Zunächst stand die Anforderung im Vordergrund, das Abwasser einschließlich Niederschlagswasser möglichst schnell vom Verbraucher wegzutransportieren und zu entsorgen, um damit durch Abwasser verursachte Krankheiten und Überflutungen zu vermeiden. Später kam der Bedarf hinzu, die Kohlenstoffverbindungen sowie die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor durch biologische und physikalisch-chemische Reinigungsprozesse weitgehend von den Gewässern fernzuhalten. Heute, bei einer hohen Besiedlungsdichte und hoch entwickelter Industrie, ist die öffentliche Abwasserbehandlung ein wichtiger Baustein für ein geordnetes Zusammenleben und eine intakte Umwelt.

Obwohl die Aufgabe der Abwasserentsorgung somit in erster Linie die Ableitung und Reinigung von unerwünschten Reststoffen darstellt, gibt und gab es immer schon einzelne Ansätze, Abwasserinhaltsstoffe auch zu nutzen, z.B. durch die Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft oder etwa die in China praktizierte Bewässerung von Feldern mit Abwasser oder die Sammlung von Fäkalien und der Verkauf als Dünger.

Dennoch sind die heutigen technischen Verfahren nicht in erster Linie auf eine Nutzung der Inhaltsstoffe ausgerichtet, sondern auf die Entsorgung. Weiterhin ist die Nutzung von Abwasser bzw. Fäkalien und Klärschlamm aufgrund der hygienischen

## SUMMARY

*Water supply and urban drainage are basic duties of the services for the public. The challenge is to guarantee the security of supply (amount, quality), the security of disposal (hygiene and protection against flooding of urban areas), the security of water uses (for potable water, bathing water... ) and the water- and groundwater protection against the background of a rising world population with an increasing water demand.*

*Until today wastewater sewage is still often seen as a „waste-product“, which has to be disposed with energy and additives and by its degradation solid waste such as sewage sludge develops. Due to increasing global demands, such as climate protection and sustainable use of resources, the awareness, that wastewater sewage is a „resource“ which has much to offer, slowly achieves acceptance. The potential for substitution of potable water by wastewater recycling is evident. In addition, the energy content, for example in form of energy-rich organic compounds or thermal energy can be used well-directed and more efficiently than so far. The nutrients contained in the wastewater could replace mineral fertilizers to a substantial portion and provide a contribution to the closing of nutrient cycles.*

*For this however a reorientation is necessary. Appropriate technologies must be developed and successively integrated in existing plants, to tap the full resource potential of the wastewater optimally. Furthermore, it requires in addition to innovation for conventional systems the development of new resource oriented sanitation systems, which can complement the conventional systems in a meaningful way.*



Fäkaliensammlung in Shanghai, 2010.

Belastung und des Schadstoffgehaltes mit erheblichen Risiken verbunden.

Mit der Ableitung und Reinigung von Abwasser werden Ressourcen verbraucht, obwohl das Abwasser selbst eine Ressource darstellt. Zunächst ist, gerade vor dem Hintergrund eines weltweit steigenden

Wasserbedarfs und eines erheblichen Wassermangels in ariden und semiariden Gebieten die Ressource Wasser zu nennen, die durch Wiederverwertung genutzt werden kann.

Kommunales Abwasser enthält darüber hinaus hohe Frachten an Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor, sowie Energie in Form von energiereichen organischen Verbindungen, Wärme oder hydrostatischer Energie. Somit stellt Abwasser einen vielfältigen Rohstoff dar, dessen Potenzial es zu erschließen gilt.

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie die Potenziale im Abwasser besser als bisher und zielgerichtet genutzt werden können und welchen Beitrag die Forschung hierzu leisten kann.

## 2. Das bisherige System – Abwasser als Reststoff

Bisherige „konventionelle“ Systeme basieren auf End-of-Pipe Verfahren. Abwasserteilströme mit unterschiedlicher Abwassercharakteristik werden bereits auf Haushaltsebene vermischt und im Kanalnetz gemeinsam mit ggf. vorbehandeltem Abwasser aus Gewerbe und Industrie und oftmals dem Niederschlagswasser einer zentralen Kläranlage zugeführt. Im Zuge der Abwasserreinigung werden mittels verschiedener mechanischer, chemisch-physikalischer und vor allem biologischer Verfahren die im Abwasser enthaltenen Stoffe möglichst weitgehend entfernt und das so gereinigte Abwasser dem Gewässer zugeführt.

Das System erfüllt die Ziele, das Abwasser möglichst schnell vom Verbraucher wegzutransportieren und zu reinigen, in der Regel zufrieden stellend. Jedoch werden hierzu Ressourcen in Form von Energie und Hilfsstoffen in nicht unerheblichem Maß benötigt. Und trotz aller Reinigungsbemühungen gelangen noch so viele Nährstoffe in das Gewässer, dass dies in sensiblen und stehenden Gewässern zur Eutrophierung führen kann.

Betrachtet man das Gesamtsystem der Wasserver- und Abwasserentsorgung, so weist es vor dem Hintergrund der aktuellen und zukünftigen Herausforderungen systemimmanente Defizite auf, zu deren Behebung es der Entwicklung neuer Konzepte und Technologien bedarf.

Im Folgenden sind einige Probleme unserer bisher etablierten Entsorgungsstrategien aufgelistet:

- Vermischung und Verdünnung von (Ab-)Wässern unterschiedlicher Qualität;
- Verlust von hochwertigen Nährstoffen (Stickstoff, Phosphat, Kalium);
- Schaffung einer Reststoffproblematik: mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen belasteter Klärschlamm;
- hoher Verbrauch von hochwertigem Trinkwasser zu Transportzwecken;
- hohe Anfälligkeit der zentralen Systeme gegenüber Katastrophen (z.B. Erdbeben, Überschwemmungen);
- aufwändige Infrastruktur mit hoher Materialintensität (hoher Fixkostenanteil) und geringer Flexibilität;
- geringe Tauglichkeit in anderen Klimazonen, insbesondere ariden und semiariden Gebieten.

Dies ist Anlass genug, um zum Einen unsere bestehenden Systeme mit der Zielsetzung einer nachhaltigen Entwicklung weiter zu verbessern, zum Anderen aber auch neue Technologien und Konzepte insbesondere für Regionen, in denen noch keine über Jahrzehnte gewachsenen Abwasserinfrastrukturen bestehen, zu entwickeln.

## 3. Abwasser als Rohstoff

### 3.1 Wasser

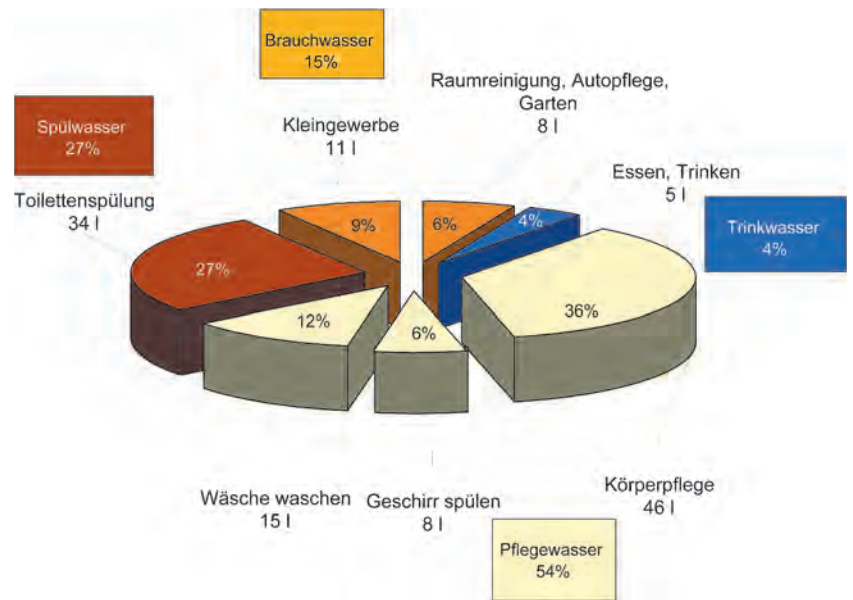
Bundesweit haben im Jahr 2004 über 5.000 Wasserversorgungsunternehmen mit eigenen Gewinnungsanlagen knapp 5,4 Milliarden Kubikmeter Wasser gefördert, davon wurden ca. 3,75 Milliarden Kubikmeter an Haushalte und Kleingewerbe abgegeben und knapp eine Milliarde Kubikmeter an gewerbliche und sonstige Abnehmer [1]. Das abgegebene Wasser weist als Trinkwasser eine sehr hohe Qualität auf. Im gleichen Zeitraum wurden der öffentlichen Kanalisation ca. 5,27 Milliarden Kubikmeter Schmutzwasser [1] zugeführt, d.h. dass nach Nutzung erheblich verschmutztes „Trinkwasser“ der Kanalisation zugeleitet wird.

Der Hauptanteil des über die öffentliche Wasserversorgung abgegebenen Trinkwassers gelangt in die Haushalte. (02) zeigt, dass dort jedoch nur ein extrem geringer Prozentsatz tatsächlich für Trinkwasserzwecke eingesetzt wird (ca. vier Prozent), während über ein Viertel des qualitativ hochwertigen Wassers lediglich zum Abtransport von Fäkalien genutzt wird. Der größte Anteil des Trinkwassers wird für Zwecke benötigt, die eine Qualität benöti-



gen würden, die zwischen den sehr hohen Ansprüchen an Trinkwasser und den relativ geringen an Toilettenspülwasser liegt. Allein aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass rein rechnerisch ein erheblicher Teil des Trinkwassers durch Wasser minderer Qualität substituiert werden könnte. Aufgrund der immer noch steigenden Weltbevölkerung wird auch der Bedarf an Wasser für Industrie und Haushalte ebenso steigen wie der für Bewässerungswasser. Gleichzeitig kann der Klimawandel in zahlreichen Regionen zu einer deutlichen Verringerung des Wasserangebotes führen. Dem Wasserrecycling wird damit zukünftig eine wesentliche Bedeutung zukommen. Eine grundlegende und in vielen Ländern übliche Form der Wasserwiederverwendung ist die Nutzung von Abwasser für Bewässerungszwecke. Häufig wird jedoch nahezu unbehandeltes Abwasser genutzt (Beispiel China), was zu hygienischen Belastungen des Ernteguts, zu einem hohen Infektionsrisiko für die Bevölkerung und zu einer erheblichen Belastung der Umwelt führt. Daher gilt es, das Abwasser soweit zu reinigen, dass es die Anforderungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) an Bewässerungswasser und ggf. vorhandene länderspezifische Grenzwerte einhält. Ein hoher Bedarf an Bewässerungswasser besteht auch in Tourismusgebieten, z.B. für die Bewässerung von Golfplätzen oder Grünanlagen. Dieser ist meistens während der Sommermonate mit minimaler Ressourcenerneuerung (wenig Niederschläge) am größten, wodurch die Auswirkungen auf die Umwelt erheblich sein können. Die Wiederverwendung des Abwassers für Bewässerung bietet eine Möglichkeit diese Auswirkungen zu mildern. Die großen Hotels bzw. Ferienanlagen liegen meistens weit entfernt von zentralen Infrastrukturen, so dass dezentrale Verfahren auch aus Kostengründen bedeutsam sind. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes wurde in einer türkischen Hotelanlage u.a. untersucht, welcher Anteil an Trinkwasser und Grundwasser durch gereinigtes Abwasser ersetzt werden kann. Neben den theoretischen Betrachtungen auf Basis der Wasserverbrauchszahlen wurde eine halbertechnische Versuchsanlage betrieben, um Abwasser so zu reinigen, dass es für die Bewässerung der Grünanlagen optimal geeignet ist.

Es hat sich gezeigt, dass insbesondere in Zeiten der Spitzenbelegung ca. 50 Prozent des eingesetzten Trinkwassers als Abwasser anfallen und so ein wesentlicher Anteil des erforderlichen Bewässerungswassers durch mittels Membrantechnologie gerei-

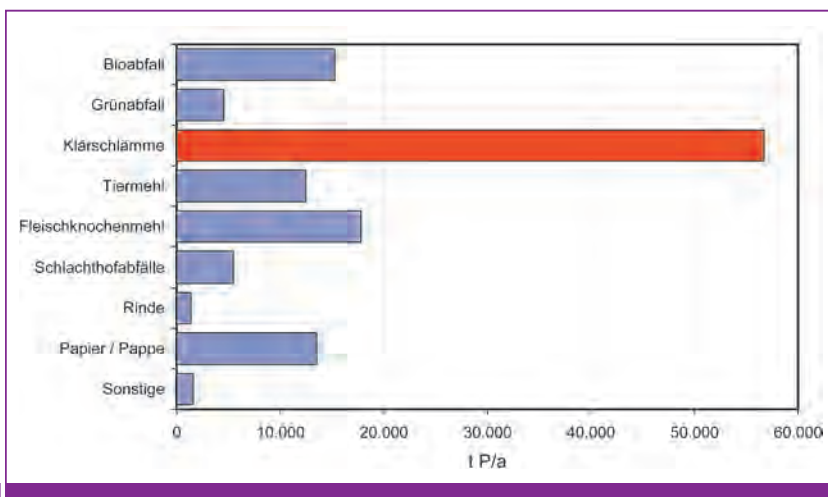


ntes Abwasser substituiert werden kann. Die WHO Standards bezüglich der hygienischen Qualität wurden sicher eingehalten. Verglichen mit der Frischwasserbewässerung (Trinkwasser, Grundwasser) sind die Pflanzenerträge bei Bewässerung mit behandeltem Abwasser höher, da auch Pflanzennährstoffe, im speziellen Stickstoff und Phosphor für die Grünanlagen genutzt werden konnten. Eine Umfrage unter den Hotelgästen ergab, dass eine hohe Akzeptanz für die Wiederverwendung des gereinigten Abwassers vorhanden ist [6].

Durchschnittlicher Wasserverbrauch pro Einwohner und Tag nach Qualitätsstufen.

### 3.2 Nährstoffe

Die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor werden derzeit aus Gewässerschutzgründen gezielt in Kläranlagen eliminiert; dies geschieht aber zum Teil, etwa bei der Nitrifikation, mit hohem Energieaufwand. Andererseits wird z.B. Luftstickstoff ebenfalls unter hohem Energieaufwand bei der Düngemittelherstellung in pflanzenverfügbare Form überführt. Der Bedarf an Phosphor, der vor allem in Dünge- (ca. 80 Prozent) und in Waschmitteln (ca. 12 Prozent) benötigt wird, stammt derzeit fast ausschließlich aus geo-



03

**(03)** Phosphorpotential der organischen Siedlungsabfälle in Deutschland [2].

**(04)** Halbtechnische Versuchsanlage zur Phosphorrückgewinnung; MAP-Fällungsreaktor (im Vordergrund) und Sedimentationsbehälter (im Hintergrund) [4].

genen Lagerstätten. Dies führt zu einer Reduzierung der abbauwürdigen Vorkommen und widerspricht auch aufgrund der großen anfallenden Abraumengen dem Gebot der Nachhaltigkeit.

In der Landwirtschaft wird seit langem neben Kunstdüngern auch Klärschlamm verwendet. Aufgrund der Diskussionen um die Schadstoffbelastung von kommunalen Klärschlämmen zeichnet sich ab, dass aus Vorsorgegründen Klärschlamm nach einer Übergangszeit nur noch in geringen Mengen landwirtschaftlich verwendet wird. In Baden-Württemberg werden bereits heute über 90 Prozent der Klärschlämme thermisch entsorgt und somit der Nährstoffkreislauf unterbrochen. Im Sinne einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung sollte daher der im Abwasser bzw. Klärschlamm enthaltene Phosphor gezielt wiedergewonnen und in eine pflanzenverfügbare, aber schadstoffarme Form überführt und in der Landwirtschaft genutzt werden. So können Nährstoffkreisläufe wieder geschlossen und von Schadstoffkreisläufen entkoppelt werden. Abwasser birgt ein erhebliches Rohstoffpotential für Phosphor. Berechnungen von Fricke und Bidlingmaier [2] zeigen, dass Klärschlämme das größte Phosphorpotential der betrachteten Reststoffe aufweisen **(03)**. Über ein Drittel der in Deutschland verwendeten Phosphatdünger könnten theoretisch durch Phosphor aus Klärschlamm ersetzt werden.

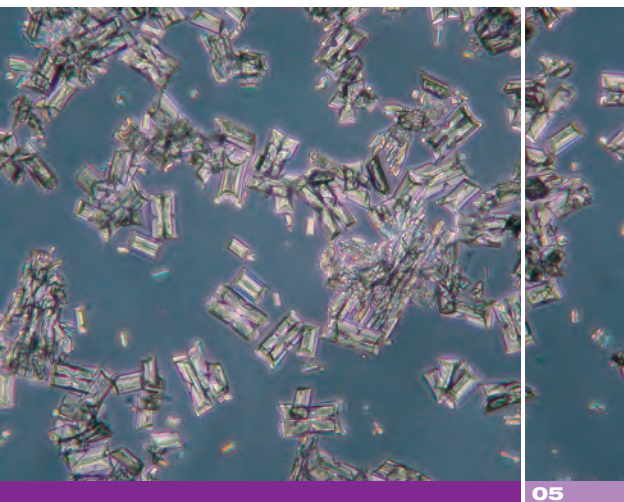
Am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart wird seit Jahren an Verfahren zur Phosphorrückgewinnung geforscht. Dazu wurde bereits in den Jahren 2003 und 2004 das sog. „Stuttgarter



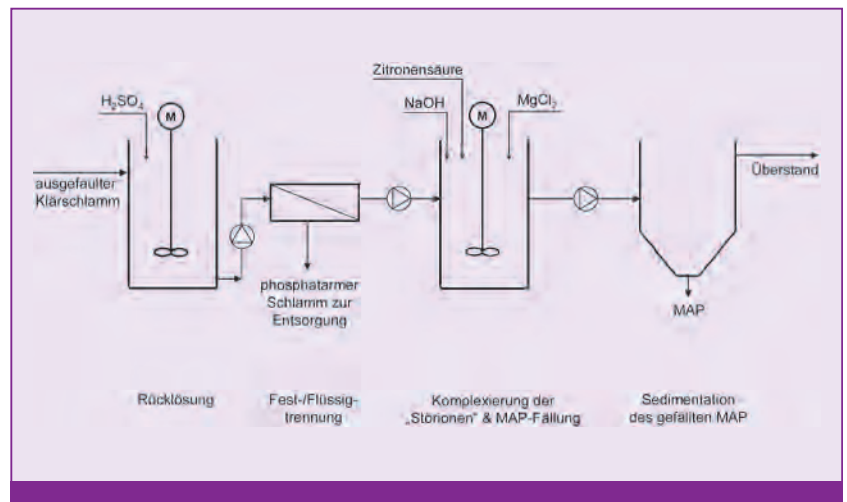
04

Verfahren“ zur Phosphorrückgewinnung aus ausgefallenen Schlämmen als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) entwickelt und im Labormaßstab erprobt [3]. Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde anschließend eine halbtechnische Versuchsanlage betrieben, um Abhängigkeiten der Prozesse vom Maßstab zu erfassen (upscaling), die Verfahrensschritte bezüglich Phosphorausbeute und Chemikalienverbrauch zu optimieren und Erkenntnisse über die Prozessstabilität und betriebliche Aspekte zu gewinnen. Weiterhin war die Produktion größerer MAP-Mengen zur Beurteilung des gewonnenen Endproduktes ein wesentlicher Aspekt der halbtechnischen Versuche.

Magnesium-Ammonium-Phosphat ist eine kristalline Substanz, die nach Trocknung gut zur Lagerung und einer Ausbringung auf Feldern geeignet ist. Versuche der Universitäten Göttingen und Bonn haben gezeigt, dass sich das aus dem Stuttgarter Verfahren produzierte MAP hinsichtlich seiner Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirkung wie wasserlösliches Triplesuperphosphat (Mineraldünger) verhält [4]. Das Stuttgarter Verfahren beruht darauf, den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor zunächst durch Zugabe von Schwefelsäure wieder in Lösung zu bringen und so von den Feststoffen abzutrennen. Um das Endprodukt MAP zu erhalten, muss anschließend der pH-Wert angehoben und Magnesium zudosiert werden; Stickstoff ist bereits in ausreichender Menge im Überstand des Klärschlammes vorhanden und kann so ebenfalls anteilig recycelt werden. Damit tatsächlich überwiegend MAP und nicht wieder schlecht pflanzenverfügbares Eisenphosphat ausfällt, wird



05



06

der Lösung vor Anhebung des pH-Wertes Zitronensäure zugegeben, welche die Eisenionen in Lösung hält. Dieser Prozessschritt stellt eine Besonderheit des Stuttgarter Verfahrens dar und ermöglicht eine vergleichsweise hohe Ausbeute an MAP. Umfassende Untersuchungen im halbtechnischen Maßstab [4] haben belegt, dass mit dem Stuttgarter Verfahren bislang im Mittel ca. 50 Prozent des im Klärschlamm gebundenen Phosphors in die Düngersubstanz MAP überführt werden können. Einzelversuche haben ein noch höheres Recyclingpotenzial ergeben, so dass von einem erheblichen Optimierungspotenzial ausgegangen werden kann. Dies wird derzeit in weiteren Versuchen näher untersucht. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Gehalte an Schadstoffen (Schwermetallen) weit unter den Werten im Klärschlamm liegen. Sie bleiben dabei unter den Werten der Düngemittelverordnung und entsprechen in der Größenordnung dem konventionellen Mineraldünger.

Nach Abschluss der erfolgreichen Versuche im halbtechnischen Maßstab wird das Stuttgarter Verfahren zur Phosphorrückgewinnung derzeit unter wissenschaftlicher Betreuung des Lehrstuhls und mit finanzieller Unterstützung des Umweltministeriums Baden-Württemberg in der Großtechnik auf der Kläranlage Offenburg umgesetzt. Hier gilt es neben einer weiteren verfahrenstechnischen Optimierung und einem upscaling weitere Fragen z.B. zur Einbindung des Schrittes Phosphorrückgewinnung in den gesamten Abwasserreinigungsprozess zu klären.

### 3.3 Energie

Die Forschungsarbeiten und praktischen Fragestellungen in der Siedlungswasserwirtschaft haben sich lange Zeit überwiegend auf die Verbesserung der Reinigungsleistung von Kläranlagen konzentriert, so dass heute in Deutschland diesbezüglich ein hoher Standard erreicht ist. Hierzu ist jedoch ein erheblicher Bedarf an Energie in Form von Strom und Wärme erforderlich.

Die Kläranlagen in Deutschland verbrauchen immerhin ca. 4.400 Gigawattstunden (GWh), was der Stromerzeugung eines modernen Kohlekraftwerkes entspricht. Auch wenn damit der Energieverbrauch kommunaler Kläranlagen nur bei weniger als einem Prozent des Stromverbrauchs in Deutschland liegt, gehören Kläranlagen mit zu den größten kommunalen Stromverbrauchern, so dass eine Reduzierung des Energieverbrauchs, aber auch eine ver-

**(05)** Mit dem „Stuttgarter Verfahren“ können aus Klärschlamm Magnesium-Ammonium-Phosphat Kristalle (MAP) gewonnen werden.

**(06)** Verfahrensschema des Stuttgarter Verfahrens [4].

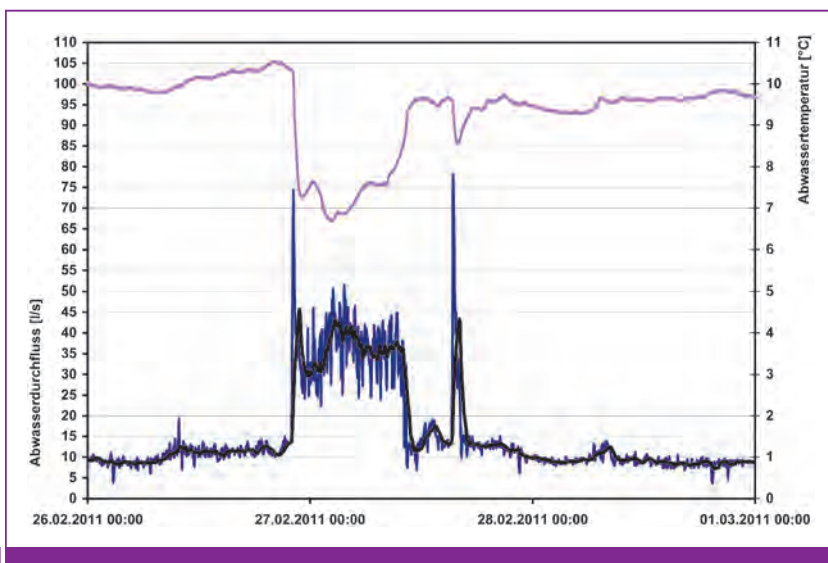
**(T.01)** Vergleich der Schwermetallgehalte im MAP [4] mit mineralischen Düngern [5] und Düngemittelverordnung.

	Pb	Cd	Cr <sub>ges</sub>	Cu	Ni	Hg	Zn
	mg/kg TS						
MAP aus P-Rückgewinnung	12	0,8	15	68	2,2	0,05	260
Grenzwerte DüMV	150	- <sup>1</sup>	- <sup>2</sup>	70	80	1,0	1000
Durchschn. N/P-Dünger 20/20/0 [5]	5,5	9,2	91,4	21,5	18	0,02	151

<sup>1</sup> 50 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>  
<sup>2</sup> kein Grenzwert, Kennzeichnung ab 300 mg/kg TS

T.01





07

*Einfluss eines Regenereignisses auf die Abwassertemperatur im Kanalnetz.*

besserte Nutzung der im Abwassersystem vorhandenen Energiepotenziale bei der Abwasserentsorgung den kommunalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß wirksam verringern kann.

Die Wärme des Abwasser wird jedoch bislang noch kaum genutzt. Um Abwärme kosteneffizient nutzen zu können, muss ein ausreichender Trockenwetterabfluss, also an Abwässern ohne Regenwasser, gegeben sein und ein Abnehmer mit hohem Leistungsbedarf für statische Wärmeabgabe (z.B. Heizungen) nahe des Abwasserkanals liegen. Da Kläranlagen oft außerhalb dicht bebauter Bereiche liegen, ist eine Abwärmenutzung bereits im Kanalnetz mit Nähe zum Wärmeverbraucher meist vorteilhaft.

Inzwischen gibt es insbesondere in der Schweiz einige realisierte Projekte zur Nutzung der Abwärme aus dem Abwasser. Auch existiert hierzu eine von der ETH Zürich entwickelte Software (TEMPEST), für die bislang jedoch keine ausreichende Datenbasis zur Kalibrierung vorliegt. Offene Fragen bestehen insbesondere bezüglich des Temperaturverhaltens im Kanalnetz auf dem Fließweg zur Kläranlage. So ist bislang kaum bekannt, ob der regelmäßig erfasste jährliche Temperaturverlauf im Zulauf der Kläranlage auf das gesamte Kanalnetz übertragbar ist. Messungen im Kanalnetz sind sehr aufwändig und können daher nicht in jedem einzelnen Planungsfall durchgeführt werden. Andererseits ist die Kenntnis über Temperaturentwicklung und Schwankungen im Kanalnetz bedeutsam, um Anlagen wirtschaftlich auszulegen. Daher wird derzeit am Lehrstuhl im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg ein Forschungsprojekt durchgeführt, um über Messungen an ausgewählten und möglichst repräsentativen Kanalabschnitten die räumliche und zeitliche Varianz der Temperatur zu ermitteln und hieraus grundlegende Zusammenhänge zwischen der Temperatur und verschiedenen Einflussfaktoren abzuleiten. Insbesondere gilt es, den Einfluss von Siedlungsdichte- und Struktur, der Außenlufttemperatur, der Bodentemperatur, langer Fließstrecken durch freies Gelände und den Einfluss von industriellen Einleitungen, Fremdwasser und Niederschlagsereignissen auf die Abwassertemperatur zu erfassen.

(07) zeigt exemplarisch die Bedeutung von Niederschlagsereignissen in der Mischkanalisation. Insbesondere im Winter kann die Temperatur auch in größeren Sammlersystemen innerhalb sehr kurzer Zeit um mehrere Grad Celsius absinken. Da nach einem starken Regenereignis die Re-



08

*Brennstoffzelle auf der Kläranlage Stuttgart-Möhringen.*

Kläranlagen sind nicht nur Energieverbraucher, sondern können, insbesondere durch die Nutzung des Energiegehaltes aus den organischen Abwasserinhaltsstoffen, auch Energie liefern. Betrachtet man das gesamte System der Abwasserentsorgung, so kommen die Potenziale der Abwasserwärme und der hydrostatischen Energie hinzu. Je nach Randbedingungen kann durch Nutzung dieser Energien ein erheblicher Teil des Energiebedarfs in einer Kläranlage, bis hin zur Energieautarkie, abdeckt werden.

genüberlaufbecken über ein bis zwei Tage entleert werden, kann das niedrige Temperaturniveau entsprechend lange anhalten. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Effizienz des Wärmetauschers und damit auf die erzielbare Energieausbeute und sollte bereits im Planungsprozess berücksichtigt werden.

Während die Abwärmenutzung im Kanalnetz eine recht neue Entwicklung ist, wird das Energiepotenzial aus Klärschlamm bereits seit Jahrzehnten auf größeren Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung genutzt. Das energiereiche Faulgas liefert einen wesentlichen Beitrag sowohl zur Deckung des Wärmebedarfs als auch des Strombedarfs einer Kläranlage. Dennoch gibt es hier wesentliche Ansatzpunkte zur Erhöhung der Eigenproduktion durch die Steigerung der Faulgasproduktion mittels betrieblicher Optimierungsmaßnahmen und einer Verbesserung der Energieeffizienz bei der Verwertung des Faulgases.

Neben der Erhöhung der Faulgasmenge kann die Faulgasverwertung durch Kraft/Wärmekopplungsanlagen noch erheblich gesteigert werden. Ein weiterer Ansatzpunkt zur Energieoptimierung ist die Erhöhung des Wirkungsgrades bei der Verstromung von Faulgas. Neben einer Verbesserung der Blockheizkraftwerkstechnik (BHKW) bietet sich hierbei der Einsatz von neuen Techniken der Energieumwandlung an, z.B. mittels Brennstoffzellen. Brennstoffzellen wandeln die im Gas enthaltene chemische Energie direkt in Strom und Wärme um und können z.T. deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade erreichen als BHKWs. Potenzialabschätzungen von Keicher et al. [6] für Baden-Württemberg zeigen, dass durch den Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen theoretisch ein Gesamtpotenzial von ca. 250 Gigawattstunden elektrischer Energie (GWhel) erzielbar ist, was einer Verdoppelung der derzeitig produzierten ca. 127 GWhel bedeutet. Um dies in der Praxis zu überprüfen wurde auf der Kläranlage Stuttgart-Möhringen eine Hochtemperaturbrennstoffzelle implementiert.

Betriebsergebnisse zeigen, dass ein elektrischer Wirkungsgrad von deutlich über 40 Prozent selbst im Teillastbereich erreicht werden kann.

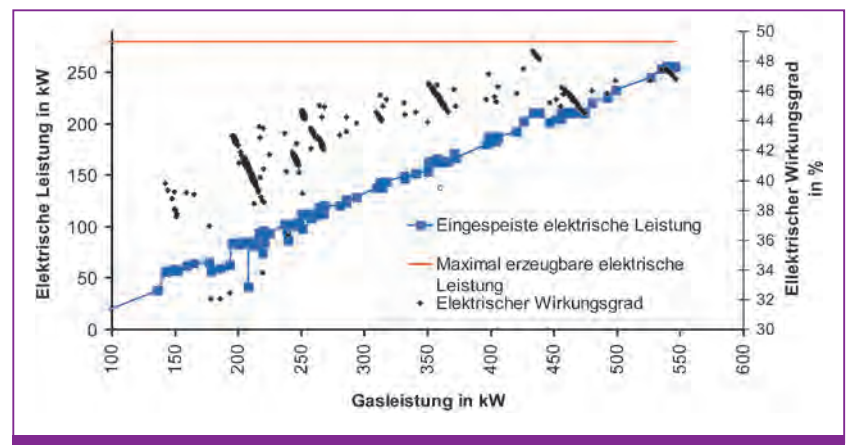
Zu berücksichtigen ist jedoch, dass Strom für den Betrieb der Brennstoffzelle, der Lüftung und der Gasaufbereitung erforder-

## ZUSAMMENFASSUNG

*Wasserversorgung und Siedlungsentwässerung sind wesentliche Aufgaben der Daseinsvorsorge. Dabei gilt es vor dem Hintergrund einer steigenden Weltbevölkerung mit zunehmendem Wasserbedarf die Versorgungssicherheit (Menge, Qualität), die Entsorgungssicherheit (Hygiene und Überflutungsschutz in Siedlungen) und die Nutzungssicherung der Gewässer (Trinkwasser, Baden ...) sowie den Schutz der Gewässer und des Grundwassers zu gewährleisten.*

*Das Potenzial zur Substitution von Trinkwasser durch Abwasserrecycling ist offensichtlich. Aber auch der Energiegehalt, z.B. in Form energiereicher organischer Verbindungen oder Wärme kann gezielt und effizienter als bisher genutzt werden. Die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe könnten Mineraldünger zu einem wesentlichen Anteil ersetzen und damit einen Beitrag zur Schließung von Nährstoffkreisläufen liefern.*

*Hierzu ist jedoch ein Umdenken erforderlich. Entsprechende Technologien müssen entwickelt und sukzessive in bestehende Anlagen integriert werden, um das Rohstoffpotenzial des Abwassers optimal zu nutzen. Darüber hinaus bedarf es neben den Innovationen für konventionelle Systeme auch der Entwicklung neuartiger Sanitärsysteme, die die bestehenden Systeme in sinnvoller Weise ergänzen können.*



*Elektrische Leistung und Wirkungsgrad der Brennstoffzelle auf der Kläranlage Stuttgart-Möhringen.*

lich ist (interner Verbrauch), so dass der Netto-Energiegewinn geringer ist. Hier bedarf es weiterer Ansätze um diesen internen Verbrauch zu minimieren.

Die Betriebserfahrungen mit der Brennstoffzelle in Möhringen haben aber auch gezeigt, dass die derzeitigen Hochtemperaturbrennstoffzellensysteme noch nicht in der Lage sind, mit Biogas dauerhaft sicher betrieben zu werden. Eine entsprechende Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie oder der Einsatz anderer Brennstoffzellentypen, z.B. mit Wasserstoff als Inputgas, ist notwendig.

Daher werden derzeit am Lehrstuhl grundlagenorientierte Untersuchungen durchgeführt, welche Abwasserströme unter welchen Randbedingungen für eine Produktion von Biowasserstoff geeignet sind, um auch hier die im Abwasser enthaltenen Ressourcen zielgerichtet zu nutzen. Kläranlagen stellen für die anaerobe Fermentation von Wasserstoff aus Biomasse



einen idealen Standort hierfür dar, da sie zum Großteil schon über die erforderliche Anlagentechnik verfügen und die für den Prozess erforderliche Biomasse (Klärschlamm) das ganze Jahr über in relativ konstanten Mengen anfällt. Durch Veränderung der Prozessbedingungen gegenüber einer Faulung mit dem Endprodukt Methan kann Wasserstoff produziert werden, um diesen in Brennstoffzellen, zum Betanken von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen etc. zu nutzen. Damit könnte Energie aus Eigenproduktion auch für den Fuhrpark eines Abwasserentorgers zur Verfügung gestellt werden und somit einen Beitrag zur Eigenversorgung der erforderlichen „Mobilitätsenergie“ liefern, der in den meisten energetischen Betrachtungen unserer heutigen Systeme bislang nicht berücksichtigt wird.

#### 4. Was sind neuartige Sanitärsysteme?

Die bisher genannten Ansätze für eine ressourceneffiziente Abwasserwirtschaft basieren auf der Integration energetischer Aspekte und weiterer Aufbereitungsschritte zur Wasserwiederverwendung bzw.

Nährstoffrückgewinnung in konventionelle bestehende Abwasserentsorgungsinfrastrukturen. In vielen Ländern existieren diese Infrastrukturen jedoch nicht, so dass über völlig neue Ansätze zur Nutzung von Abwasser als Rohstoff nachgedacht werden kann.

Fast alle im kommunalen Abwasser enthaltenen Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor) sind im so genannten Schwarzwasser (Sanitärabwasser aus Toiletten und Urinalen) zu finden, Stickstoff zu fast 90 Prozent im Urin. Im Schwarzwasser ist auch über die Hälfte der organischen Kohlenstoffverbindungen enthalten; das Konzentrationsniveau ist dabei im Vergleich zum Schmutzwasser hoch.

Eine Trennung der Stoffströme z.B. Urin, Fäkalien, Grauwasser (z.B. aus Duschen, Waschmaschinenabläufen) würde es ermöglichen, die hochkonzentrierten Teilströme zur Energiegewinnung und für ein Nährstoffrecycling deutlich effizienter als bisher zu nutzen und das stofflich deutlich geringer belastete Grauwasser zur Wasserwiederverwendung aufzubereiten. Eine solchermaßen enge Verzahnung von Wasserversorgung und Abwasserentsorgung auf Haushaltsebene kann den kommunalen

len Wasserbedarf erheblich senken und ist besonders in sehr trockenen, ariden Gebieten von großer Bedeutung.

Es ist daher zu überlegen, an welchen Stellen eine frühzeitige Trennung und ggf. getrennte Behandlung bzw. Nutzung von Abwasserteilströmen sinnvoll ist und wie diese ggf. in bestehende Infrastrukturen integriert werden kann.

## 5. Fazit und Ausblick

Unter Beachtung der weltweiten Situation müssen verstärkt die Ressourcen im Abwasser genutzt und nachhaltige Systeme zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen entwickelt und erprobt werden. Bei bestehenden Infrastrukturen ist eine schrittweise Entwicklung und Integration neuer Technologien sinnvoll, wobei frühzeitig die Auswirkungen auf die bestehenden Systeme der Ver- und Entsorgung beachtet und untersucht werden sollten.

Um die globalen Herausforderungen anzugehen, sollten die Erfahrungen und das bestehende Know-how in Deutschland genutzt werden, um interdisziplinär und über Fachbereichsgrenzen hinweg die Entwicklung neuartiger Sanitärsysteme entscheidend mit voran zu treiben.

Um nachhaltige und ressourcenorientierte Ansätze zur Bewältigung der Herausforderungen deutschland- und weltweit zu entwickeln, ist neben entsprechenden interdisziplinären Forschungsaktivitäten insbesondere der Wille, über die bestehenden Systeme hinaus zu denken, erforderlich, sowie die Vermittlung der komplexen Zusammenhänge in Lehre und Weiterbildung.

• Heidrun Steinmetz

## Literatur

- 1 Statistisches Bundesamt (2006): *Fachserie 19 Reihe 2.1*
- 2 Fricke und Bidlingmaier (2003): *Phosphorpotentiale qualitativ hochwertiger organischer Siedlungsabfälle und deren Nutzung, Tagungsband zur Phosphortagung des UBA und des ISA am 06./07.02.2003 in Berlin, S. 9/1–9/15, Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft Aachen, 2003*
- 3 Weideler, A., Maier, W., Krampe, J. (2007): *Phosphorrückgewinnung als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) mittels saurer Rücklösung aus Faulschlamm, GWF Wasser/Abwasser 148 (2007) Nr. 4, S. 269–272*
- 4 (Weideler, A. 2010): *Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-*

## DIE AUTORIN

### PROF. DR.-ING. HEIDRUN STEINMETZ

hat nach dem Studium der Biologie an der Universität Kaiserslautern sechs Jahre als Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Kaiserslautern gearbeitet und dort 1996 zum Dr.-Ing. promoviert. Nach sechsjähriger Berufspraxis in leitenden Positionen im Anlagenbau (Frankenthal) und in einem Ingenieurbüro (Saarbrücken) kehrte sie als Geschäftsführerin des Zentrums für Innovative Abwassertechnologien an die Universität Kaiserslautern zurück. Seit 2007 leitet Sie den Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling an der Universität Stuttgart.



## Kontakt

Universität Stuttgart,  
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft  
Lehrstuhl Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling  
Bandtäle 2  
70569 Stuttgart  
Tel. 0711/685-63723  
Fax 0711/685-63729  
E-Mail: heidrun.steinmetz@iswa.uni-stuttgart.de  
Internet: www.iswa.uni-stuttgart.de

*Ammonium-Phosphat (MAP). Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Band 202, Kommissionsverlag Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München. ISBN 978-3-8356-3206-6*

- 5 UBA (2001): *Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden, UBA-Texte 59/01, ISSN 0722-186X, Berlin*
- 6 Keicher, K., Krampe, J., Rott, U., Ohl, M., Blesl, M., Fahl, U. (2004): *Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen – Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg. <http://www.bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BW122006SBer.pdf>*