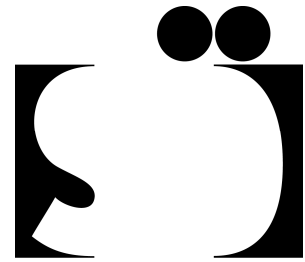


Institut für
sozial-ökologische
Forschung (ISOE)



Engelbert Schramm

**Düngerrückgewinnung  
aus Abwasser:  
Technologien für die Zukunft**

unter Mitarbeit von  
Jana von Horn



Engelbert Schramm (unter Mitarbeit von Jana von Horn)

**Düngerrückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft**

### **Zu diesem Text**

Aufbauend auf einer Literaturanalyse wird der derzeitige technische Entwicklungsstand im Bereich der Wiedergewinnung von Phosphat und Stickstoffverbindungen aus dem häuslichen Abwasser skizziert: Neben der (chemischen) Wiedergewinnung aus dem Abwasser und der Verwendung von Anaerobverfahren sowie die Wiedergewinnung aus Klärschlamm ist auch die Bewässerung mit Abwasser, die Kompostierung sowie die Fraktionierung von Abwasser („Gelbwasser“) eine Möglichkeit zur besseren Ausnutzung der Nährstoffgehalte des Abwassers. Der erzielte Überblick über den derzeitigen Stand der Nährstoffrückgewinnung diente dazu, mögliche Entwicklungsaufgaben zu identifizieren, die einerseits vordringlich (insbesondere zur Lösung globaler Probleme, z.B. zur Beendigung des Ressourcenmangels) erscheinen und deren Lösung andererseits besonders innovative Leistungen erfordern. Die Entwicklungsaufgaben wurden thesenhaft zugespitzt, um so anschließend in einer Delphi-Befragung überprüft werden zu können.

### **About this text**

Based on a literary analysis the current technical state of development concerning the recovery of phosphate and nitrogen compounds from sewage is being outlined. Besides the chemical recovery during secondary or tertiary treatment or the application of anaerobic sewage treatment as well as the recovery from sewage sludge, irrigation with treated water, composting and fractionation of sewage (yellowwater) also represent possibilities to better utilise the nutrient content of sewage. The obtained survey of the current state of nutrient recovery served to identify possible development tasks which on the one hand seem to be urgent (especially for the solution of global problems i.e. to end scarcity of resources) and the solving of which is on the other hand calling for particularly innovative efforts. The development tasks were subsumed thesis-like so that they can be assessed in a subsequent Delphi-survey.

**ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 32**  
**ISSN 1436-3534**

Engelbert Schramm (unter Mitarbeit von Jana von Horn)

**Düngerrückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft**

Herausgeber:  
Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH  
Hamburger Allee 45  
60486 Frankfurt am Main

Frankfurt am Main, 2008



## **Inhalt**

Abkürzungsverzeichnis .....	7
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>9</b>
<b>2 Problemlage .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>12</b>
3.1 Bewässerung mit behandeltem Abwasser .....	13
3.2 Kompostierung .....	14
3.3 Fällung von P-Dünger aus dem Abwasser .....	15
3.4 Wiedergewinnung von P aus Klärschlamm(-Asche) .....	16
3.5 Wiedergewinnung von N-Dünger aus dem Abwasser .....	20
3.6 Gewinnung von Nährstoffen aus dem Gelbwasser .....	20
3.7 Nutzung von Nährstoffen aus Anaerobkläranlagen .....	20
<b>4 Innovationspotentiale 2050 .....</b>	<b>21</b>
4.1 Kompostierung .....	21
4.2 Fällung von P-Dünger aus dem Abwasser .....	22
4.3 Wiedergewinnung von P aus Klärschlamm(-Asche) .....	23
4.4 Fällung von Nährstoffen aus dem Gelbwasser .....	25
<b>5 Zukunftsvisionen .....</b>	<b>25</b>
<b>6 Literatur und Nachweise .....</b>	<b>27</b>





## Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	- Abfallagerungsverordnung
AbfKlärV	- Klärschlammverordnung
ARA	- Abwasserbehandlungsanlage
BDZ	- Bildungs- und Demonstrationszentrum für dezentrale Abwasserbehandlung e.V.
BGR	- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BRICS	- Brasilien, Russland, Indien, V.R. China, Republik Südafrika
Braunwasser	- Fäkalien und Toilettenspülwasser
DWA	- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EAWAG	- Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
Ecosan	- Ecological Sanitation, Ökologische Sanitärsysteme
Edukt	- Ausgangsstoff einer chemischen Reaktion
Gelbwasser	- Urin mit reduzierter Spülwassermenge
GTZ	- Gesellschaft für technische Zusammenarbeit
ISI	- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
K	- Kalium
MAP	- Magnesiumammoniumphosphat
Mg	- Megagramm (Tonne)
N	- Stickstoff
P	- Phosphor
RWI	- Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
Schwarzwasser	- Fäkalien, Urin und Toilettenspülwasser
TASi	- Technische Anleitung Siedlungsabfall



## 1 Einleitung

Die Rahmenbedingungen der Siedlungswasserwirtschaft ändern sich. Wo früher Industrialisierung und Wirtschaftswachstum, Bevölkerungszuwachs sowie Vertrauen in scheinbar unbegrenzte Energieressourcen und in eine riesige Pufferkapazität des Naturhaushalts zum Aufbau der modernen Wasserinfrastruktur geführt haben, führen heute technische Neuerungen dazu, dass über einen Paradigmenwechsel nachgedacht wird. Wo früher die Städte als Durchflussreaktoren benutzt wurden, durch die große Wassermengen geleitet wurden, um Schmutz und störende Materialien aufzunehmen und abzutransportieren, wird heute über die Verwirklichung des Kreislaufprinzips nachgedacht.

Orientiert an Verfahrensalternativen, die in der Industrierwasserwirtschaft und an Sonderstandorten (z.B. der Passagierschifffahrt) Einzug gehalten haben, ist es möglich geworden, Abwasser als Sekundärrohstoff zu behandeln. In der hier veröffentlichten Untersuchung soll es nicht darum gehen, die Erfolgsbedingungen für einen derartigen Paradigmenwechsel zu untersuchen. Vielmehr war die Studie ein erster Schritt, um im Verbundvorhaben „Wasser 2050: Nachhaltige wasserwirtschaftliche Systemlösungen – künftige Chancen für die deutsche Wasserwirtschaft“ eine Delphi-Befragung durchzuführen, in der ab Dezember 2007 Fachleute aus Wirtschaft und Wissenschaft an einer Technologievorschau beteiligt wurden. Auf dieser Untersuchung werden weitere Ergebnisse des Projekts aufbauen, die im Laufe des Jahres 2009 vorgestellt werden und das Ziel haben, der Wirtschaft im Wassersektor größere Gewissheit über Innovationsrichtungen zu geben.

Das Verbundvorhaben „Wasser 2050“ wird vom Institut für sozial-ökologische Forschung gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung und dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert (Förderkennzeichen 02WT0820).

Der Autor bedankt sich für Anregungen und inhaltliche Unterstützung beim Forschungsteam, insbesondere bei Dr. Harald Hiebl, Dr. Dr. Christian Sartorius und Dr. Thomas Kluge sowie bei Frau Dr. Verena Höcke vom Projektträger Karlsruhe des BMBF. Die Verantwortung für den Inhalt dieses 2007 abgeschlossenen Diskussionspapiers liegt alleine beim Autor.

## 2 Problemlage

Phosphor (P) ist wie Stickstoff (N) und Kalium (K) von essentieller Bedeutung für alle Organismen und ein limitierender Faktor der Lebensprozesse. P, N und K sind daher Hauptbestandteile jedes Pflanzendüngers, die nicht ersetzbar sind. Bereits um 1840 wurde die Forderung erhoben, dass das Abwasser zurück auf die Felder transportiert werden sollte, um die Nährstoffkreisläufe zu schließen. Schon im Bericht der Kommission zur Armengesetzgebung in Großbritannien 1842 wurde postuliert, zu-

gleich mit der Verbesserung der hygienischen Bedingungen in den Städten auch eine Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität und damit eine Verbesserung der Ernährungssituation zu erzielen. Auch in der „Agrikulturchemie“ von Justus Liebig finden sich ähnliche Überlegungen. Eine solche doppelte Lösungsperspektive ließ für die Transformation von Rohmaterialien zu Gebrauchsgütern im Produktionsprozess eine großmaßstäbliche und so ökonomisch günstigere Lösung vermuten (vgl. Schramm 1997: 225ff.).

Bei der Realisierung der Schwemmkanalisation in den Städten wurde allerdings nach ersten Erprobungen regelmäßig auf die Rückführung der Abwässer auf die Felder verzichtet. Mit den damals versuchten Verfahren des Rieselfeldbaus traten nämlich sowohl hygienische Probleme (parasitische Würmer) als auch Akzeptanzprobleme auf. Außerdem standen praktische Schwierigkeiten (Betrieb im Winter) und Kostenprobleme (Konzentration auf wenige Flächen statt der von Liebig geforderten Rückbringung der Nährstoffe auf alle Felder; vgl. Kluge/Schramm 1986, Schramm 1997) im Wege. Auch alternative Technologien zur Fäkalienabfuhr thematisierten die Frage der Nährstoffrückgewinnung – scheiterten jedoch ebenfalls.

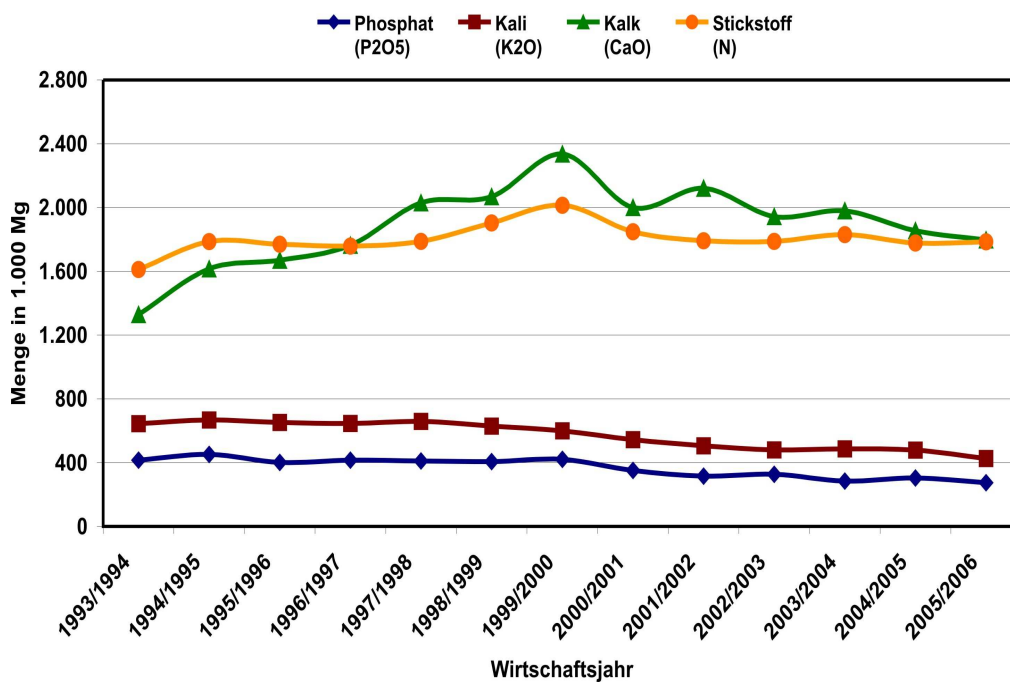
Durch die Verdünnung des Toilettenabwassers mit anderen Abwässern aus den Haushalten wird der Aufwand für ein Recycling der im Toilettenabwasser enthaltenen Nährsalze immer größer und tendenziell unwirtschaftlich. Seit Jahrzehnten wird der bei der Abwasserreinigung entstehende Klärschlamm, obwohl er die Schadstoffsenke bei der Abwasserreinigung ist, landwirtschaftlich verwertet, um die dort gebundenen Nährstoffe P und N in die Nährstoffkreisläufe zurückzuführen. Durch die Vermischung der Haushaltsabwässer mit Abwässern aus Gewerbe und Industrie wird der Klärschlamm tendenziell zum Abfallprodukt, dessen umweltgerechte Entsorgung immer teurer geworden ist. Die Probleme verschärfen sich, weil einerseits nutzbare Pflanzen-Nährstoffe (P, N, K) aus dem Toilettenabwasser in die Gewässer gelangen, die abbauwürdigen mineralischen Phosphatvorräte der Erde aber in einem wenige Jahrzehnte umfassenden Zeitraum verbraucht sein werden (vgl. Lange/Otterpohl 2000: 46).

Dabei sind die Daten über die zeitliche Reichweite der Ressourcen keineswegs eindeutig. Anders als für N-Düngemittel, die mit dem Haber/Bosch-Verfahren aus dem Luftstickstoff gewonnen werden können (wenn ausreichend Energie vorhanden ist), ist für K und P nicht klar, wann die Nährstoffvorkommen der Erde erschöpft sein werden. Einer Untersuchung von BGR, ISI und RWI zufolge reichen die Fördermengen noch deutlich über die nächsten 100 Jahre hinaus.

*Förderung, Reserven und Ressourcen von P und K 2004 (nach Angerer et al. 2005)*  
*Förderung Reserven/Ressourcen/Reichweite in Jahren*

	<i>Förderung in Mio. Mg</i>	<i>Min. Reserve in Mio. Mg</i>	<i>Max. Reserve in Mio. Mg</i>	<i>Min. Reichweite (in a)</i>	<i>Max. Reichweite (in a)</i>
<i>Kalisalze</i>	28,9	8.300	250.000	287	8.651
<i>Phosphate</i>	141	18.000	50.000	128	355

Allerdings zeigt die einschlägige Literatur auch, dass diese Daten keineswegs eindeutig sind. Die Nachfrage nach mineralischem Dünger ist in den letzten Jahren in Deutschland deutlich zurückgegangen: Bei der Betrachtung des Absatzes an mineralischen Düngemitteln ergibt sich für P und K in den letzten 13 Jahren (im Vergleich zu den anderen Düngern) ein erheblicher Absatzrückgang. Im Wirtschaftsjahr 1993/1994 betrug der P-Düngemittelabsatz 0,18 Mio. Mg P und reduzierte sich bis zum Wirtschaftsjahr 2005/2006 um 34% auf 0,12 Mio. Mg P. Somit verringerte sich der Aufwand je Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche (ohne Brache) von 11,4 kg P (Wirtschaftsjahr 1993/1994) auf 7,4 kg P (Wirtschaftsjahr 2005/2006) (vgl. BLE, 2006).



Insbesondere bezogen auf die P-Ressourcen ist es zudem kaum möglich, seriös abzuschätzen, welche der bekannten bzw. vermuteten Vorkommen abbauwürdig sind.<sup>1</sup> Schwankungen in der zeitlichen Reichweite der P-Lagerstätten zwischen max. 60 Jahren (Minimum bei Cornel 2002) und mehreren Jahrhunderten spiegeln dies wider. Für eine Studie des UBA ermittelten Pinnekamp et al. (2007: 37) eine statistische Lebensdauer der globalen Rohphosphatvorräte von 89 Jahren.

Bezogen auf die K-Lagerstätten ist das Bild noch weniger eindeutig. Vom größten deutschen Produzenten erhielten wir mit Hinweis auf die scharfe Wettbewerbssituation keinerlei Auskünfte über die zeitliche Reichweite der abbauwürdigen Weltvorräte an Kalisalzen. Fachleute aus der BGR schätzen die Lebensdauer auf 150 Jahre (Pape 2007).

<sup>1</sup> Dies hängt insbesondere von den Realisierungsbedingungen eines marinen Bergbaus ab.

Grundsätzlich ist sich die Forschung mit der deutschen Forschungsförderung darüber einig, dass bei der Schließung von Nährstoffkreisläufen insbesondere P als Nährstoff eine Herausforderung für die Forschung darstellt, da dieser nicht unbegrenzt verfügbar ist. In der Vergangenheit war das aus der Hochofenschlacke der Stahlproduktion gewonnene Thomasmehl ein zentraler P-Dünger. (In Westeuropa werden ca. 80% der Rohphosphate in der Düngemittelindustrie genutzt; vgl. Johnston/Steen 2000). Die bislang bekannten und erschlossenen Phosphaterzlagerstätten sind bereits zu einem erheblichen Teil erschöpft. Zudem steigen bei fortschreitendem Lagerstättenabbau die Schadstoffgehalte in den abgebauten Erzen sukzessive an. Daher ist P mittlerweile anders als K allgemein als Mangelressource eingestuft. Seine Wiedergewinnung aus dem Abwasser wird von den Umweltbehörden einiger europäischer Länder erörtert. In Schweden sollen bereits bis 2010 mindestens 75% des im Abwasser enthaltenen P zurückgewonnen werden (Cornel 2002); allerdings ist auch dort noch keine Vorgehensweise zur Umsetzung dieses Ziels festgelegt.

### **3 Stand der Technik**

Konventionelle Anlagen der Abwasserreinigung zielen alleine auf eine Rückhaltung von stofflichen Belastungen aus dem Ausfluss der ARA, um so den Zustand der Gewässer zu verbessern. In Mitteleuropa durchfließt der größte Teil der Abwassermenge mindestens eine mechanisch-biologische Reinigungsstufe. In den letzten 20 Jahren sind im Anschluss weitere Fällungsstufen errichtet worden: Eine Vollnitrifikation, also die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat, erfolgt bei etwa zwei Dritteln der Abwassermenge. Bei einem weiteren Teil der Kläranlagen wird das Abwasser einer Teildenitrifikation (Umwandlung von Nitrat zu elementarem N) unterzogen. Zusätzlich wird das Abwasser zumeist in einer dritten Reinigungsstufe von P gereinigt (chemische Phosphatfällung). Ein relevanter Teil des Abwassers durchläuft zusätzlich eine vierte Reinigungsstufe, eine Flockungsfiltration. Aufgrund der bisher im Regelbetrieb eingesetzten Fällungsmittel (Eisen- bzw. Aluminiumsalze) liegen die entstehenden Produkte in einer schwerlöslichen Form vor, die nur sehr bedingt pflanzenverfügbar und daher von den Landwirten als Düngemittel nur sehr eingeschränkt kontrolliert eingesetzt werden können. Außerdem sind die eingesetzten P-Fällungsmittel technisch verunreinigt, so dass die Schlämme dadurch weiter mit Schwermetallen oder organischen Abfällen belastet werden.

Eine Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, um diese in der Landwirtschaft einsetzen zu können, findet auch bei einer erweiterten Abwasserreinigung bisher nicht gezielt statt. Prinzipiell können die als Nebenprodukt der Abwasserreinigung anfallenden Schlämme auf landwirtschaftliche Flächen aufgetragen werden, um dort der Bodenverbesserung zu dienen. Die landwirtschaftliche Aufbringung von Klärschlämmen steht derzeit aufgrund der restriktiven Vorschriften der AbfKlärV nur in bescheidener Konkurrenz zur thermischen Verwertung (Verbrennung nach TASI bzw. AbfAbIV). Bei einem verstärkten Anbau von nachwachsenden Rohstoffen in der Landwirtschaft und entsprechender Spezialisierung von Betrieben und Nutzflä-

chen wird die Akzeptanz der Landwirte für die Klärschlammaufbringung wieder steigen. Alternativ dazu findet insbesondere unter (semi)ariden Bedingungen – teilweise auch illegal – eine Bewässerung mit un- oder teilbehandeltem Abwasser statt.

Die im Folgenden beschriebenen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung auf der ARA (unter 2.2. und 2.3.) sind bisher kaum über wenige Piloterprobungen hinausgekommen. Für nur vier der dargestellten Verfahren existieren großtechnische Umsetzungen, so dass sich hier der Stand der Technik nur andeutungsweise beschreiben lässt.

Teilstoffbehandlungen sind seit mehreren Jahren auf der Siedlungsebene in Erprobung – Solar City in Linz (Österreich) und Siedlung Flintenbreite (Lübeck); daneben werden diese Verfahren dezentral für einzelne Häuser in Freiburg-Vauban, bei der Fa. Hans Huber AG (Berching), in der Lambertsmühle (Burscheid), bei der GTZ (Eschborn), im Haus Griesbach der EAWAG (Schweiz) und auf der Demonstrationsanlage des Berliner Kompetenzzentrums in Stahnsdorf untersucht (vgl. Peter-Fröhlich 2007). Das DEUS 21-Verfahren wird derzeit in einer Siedlung (Knittlingen) erprobt. Die landwirtschaftliche Verwertung der anfallenden Düngemittel ist dabei generell noch deutlich im Experimentierstadium.

2005 hat die DWA einen Fachausschuss „Neuartige Sanitärsysteme“ gegründet, der das aktuelle Wissen zu dieser Thematik zusammenträgt und veröffentlicht.

### **3.1 Bewässerung mit behandeltem Abwasser**

In einigen ariden Gebieten wird eine Weiterverwendung von un- oder nur teilbehandeltem Abwasser praktiziert; dies geschieht häufig unkontrolliert, da Bewässerungswasser für die Landwirtschaft knapp ist (vgl. Pearce 2007).

Daneben wird auch behandeltes Abwasser weiterverwendet. Hierzu sind verschiedene Verfahren etabliert. Beispielsweise wird in verschiedenen Hotelanlagen in Tunesien und Kenya das Abwasser mechanisch-biologisch gereinigt und anschließend zur Bewässerung der Grünanlagen verwendet. Grundsätzlich ist vorstellbar, parallel aufgebaute ARA-Strecken, die nach dem Belebtschlammverfahren arbeiten, in der Vegetationszeit auf einen anderen Ablaufwert hin zu steuern als im Winter und nährstoffhaltige Abwässer an die Landwirtschaft zu liefern (Cornel/Weber 2003). Unter humiden klimatischen Verhältnissen können Abwässer (teilweise mit Schlämmen versetzt) auf Rieselfeldern verregnet werden<sup>2</sup>; diese direkte Verwertung der im Abwasser enthaltenen Pflanzen-Nährstoffe kann insbesondere für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden (vgl. Lühring/Walter 2007).

---

<sup>2</sup> Grundsätzlich ist eine Tropfbewässerung oder eine unterirdische Bewässerung den konventionellen Beregnungsverfahren vorzuziehen. Vgl. hierzu auch die Ausarbeitungen zur Bewässerung.

Auf der Kläranlage in Manama, Bahrain, wird das Abwasser mittels Ultrafiltration weiter gereinigt und anschließend zur Bewässerung in der Landwirtschaft genutzt. Problematisch ist, dass Hormone, Pharmazeutika und Antibiotika-Rückstände im Wasser verbleiben, da sie durch die klassischen Reinigungsschritte der ARA und auch in der anschließenden Ultrafiltration nicht abgetrennt werden können. Die Wirkstoffe werden entweder von Pflanzen oder Vieh aus dem Bewässerungswasser aufgenommen, gelangen als Nahrungsmittel oder direkt über das Grundwasser in den menschlichen Organismus und stellen dort ein unerwünschtes Risiko dar. Um es zu vermeiden, müssten die Wirkstoffe im behandelten Abwasser vor der Weiterverwendung in einem weiteren Verfahren abgebaut oder vollständig herausgefiltert werden. Mit Ozon ist für die meisten dieser Substanzen ein vollständiger Abbau erreichbar; der Energieaufwand ist aber angesichts der großen Massenströme unverhältnismäßig hoch. Alternativ wäre eine Nanofiltration möglich, was zu noch höherem Energieaufwand bzw. -kosten führt.

### **3.2 Kompostierung**

Reifer Kompost stellt einen Humusdünger mit langzeitiger Düngewirkung dar. Er lässt sich am einfachsten gewinnen, wenn die Faeces gar nicht mit Wasser in Berührung kommen; es sind jedoch auch andere Wege zur Kompostierung der Faeces entwickelt worden.

Bei Trockentoiletten werden die Fäkalien beispielsweise in luftdichten Plastiktüten oder kompostierbaren Beuteln gesammelt und so trocken wie möglich gehalten, um dann der Abfallbeseitigung oder einer Kompostierung zugeführt zu werden (der Urin wird möglichst getrennt aufgefangen). Bei Komposttoiletten werden die anfallenden Fäkalien und der Urin einer aeroben Kompostierung zugeführt, die entweder dezentral mit Groß- oder Kleinkompostern direkt unter den Toiletten oder zentral realisiert werden kann. Bei den Toiletten der Bauart „Clivus Multrum“ ist eine regelmäßige Zugabe von Rindenmulch, Gartenabfällen oder Strohhäckseln notwendig, um den Kompost zu lockern, die Feuchte aufzunehmen und ein Trockensubstanzgehalt von 50–60% zu erzeugen. Anfallendes Sickerwasser wird abgezogen. Für hygienisch unbedenklichen Kompost (nach etwa zwei bis drei Jahren Betrieb) sollte die Toilette planmäßig genutzt und für eine ausreichende Belüftung, eine konstante Feuchte und eine Temperatur oberhalb von 15°C gesorgt werden.

Bei Separation von Gelb- und Braunwasser kann das Braunwasser einem Rottebehälter (Kompostfilter) zugeführt werden, wo eine Vorkompostierung der Fäkalien stattfindet. Nach einer einjährigen Aufenthaltszeit wird das Rottegut aus dem Rottebehälter entnommen und auf einem Kompostplatz zusammen mit den Bioabfällen aus der Küche und dem Garten nachkompostiert.

Alternativ ist es möglich, aus dem Braunwasser die eingedickten Fäkalien chargenweise zu kompostieren. Sie werden aus dem Braunwasser in Filtersäcken aufgefan-



gen. Für die Erzeugung von Kompost werden Kompostwürmer (*Eisenia fetida*) zu den eingedickten Fäkalien in den Filtersäcken zugegeben; die Vermikompostierung verläuft bei Zimmertemperatur in einem Raum über mehrere Monate (4–6) mit einem sehr zufriedenstellendem Ergebnis (Peter-Fröhlich et al. 2006).

### **3.3 Fällung von P-Dünger aus dem Abwasser**

Je nach den örtlichen Vorbedingungen (eingeschlagenes P-Eliminationsverfahren und vorhandene Abwasserzusammensetzung) sind unterschiedliche Prozessschritte bei einer Gewinnung von P-Dünger erforderlich. In Abhängigkeit vom gewählten Verfahren der Phosphorelimination stehen im Abwasser ca. 15–50% der Phosphorfracht für ein Recycling zur Verfügung. Chemische Verfahren zur Phosphorelimination stellen das Fällungsverfahren und die Flockungsfiltration dar.

Bei der Fällung besteht eine Folge von fünf Verfahrensschritten (Dosierung des Fällmittels, Fällungsreaktion, Koagulation, Flockenwachstum und Feststoffabscheidung). Damit der P-Dünger sortenrein erzeugt wird und sich nicht mit anderen Schlämmen der Abwasseraufbereitung vermischt, darf das Fällungsmittel weder in den Bio-Reaktor gegeben noch in eine spätere ARA-Stufe (Nachklärbecken, Rücklaufschlammleitung) zudosiert werden. Vielmehr ist eine Nachfällung in einer separaten nachgeschalteten Stufe durchzuführen.

Die Flockungsfiltration baut auf der gleichen chemischen Reaktion wie die Fällung auf. Hier wird im Anschluss an die Nachklärung im Zulauf eines Filters das Fällungsmittel in das Abwasser eingemischt. Auf dem Filter geschieht das Ausflocken und die Abschneidung der Flocken. Diese Flockungsfiltration kann damit als vierte Stufe der ARA genutzt werden (wobei P in zwei Stufen aus dem Abwasser eliminiert wird).

Als Fällungsmittel kommen vorrangig (Natrium)Aluminate oder Magnesium-Verbindungen in Frage, da die dann entstehenden Verbindungen pflanzenverfügbar sind. Die Fällung mit Magnesium-Kationen hat den Vorteil, dass hier Struvit (MAP) entsteht. Dabei wird also nicht nur P aus dem Abwasser gefällt (und in der Folge entfernt), sondern zugleich auch Ammonium gebunden und aus dem Abwasser eliminiert. (Für den Fall, dass mit der Fällung das gesamte Ammonium aus dem Abwasser entfernt werden soll, wird es erforderlich, dass P zudosiert wird.) Die anfallenden MAP-Kristalle sind auch im technischen Maßstab leicht zu entwässern. In ihnen liegt der Nährstoff pflanzenverfügbar vor, so dass das Produkt gut in der Landwirtschaft sowohl als P- als auch als N-haltiger Dünger eingesetzt werden kann.

Allerdings liegen bisher nur sehr wenige Untersuchungen über die Wirkungsgrade unterschiedlicher Fällungsmittel und die Qualität des entstehenden Düngemittels auch hinsichtlich von Belastungen mit Schwermetallen und organischen Spurenstoffen vor (vgl. Pinnekamp et al. 2007: 222ff.), so dass auch daraus deutlich wird, dass die so mögliche Nährstoffrückführung keineswegs Stand der Technik ist.

Die impfkristallinduzierte Phosphatabscheidung beruht darauf, dass der Ablauf biologischer Kläranlagen in Bezug auf die meisten Kalziumphosphatverbindungen stark übersättigt sind. Kristallisationsverfahren (unter Zugabe von Kalziumhydroxid) können der Theorie nach nicht nur zur P-Wiedergewinnung aus dem Abwasser eingesetzt werden, sondern auch zur Rückgewinnung aus dem Klärschlamm bzw. Schlammwasser. Aufgrund praktischer Probleme haben sie bisher jedoch keine Relevanz; gute Ergebnisse wurden erzielt in Pilotanlagen (vgl. Berg/Donnert 2005 und von Horn 2007).

Beim alternativ bzw. in Kombination mit chemischen Verfahren möglichen biologischen Verfahren der P-Elimination nehmen die Mikroorganismen der Belebtschlammflocken den P auf und bauen ihn mit ihrem Stoffwechsel in den eigenen Zellen als Polyphosphat ein. Durch eine gezielte Betriebsführung der ARA lässt sich die biologische Anreicherung von P erreichen, indem der Schlamm abwechselnd anaeroben und aeroben Bedingungen ausgesetzt wird. Auf diese Weise lässt sich zwar P im Schlamm anreichern, jedoch P keinesfalls vollständig aus dem Abwasser entfernen. Insbesondere das Bardenpho-Verfahren erreicht bereits eine im Vergleich zu weiteren Verfahren gute P-Elimination (vgl. Pinnekamp 2007: 51ff.).

Der Überschussschlamm aus der biologischen Phosphorbehandlung besitzt gegenüber den anderen Schlämmen den Vorteil, dass sich dort etwa ein Drittel des im Schlamm enthaltenen P unter anaeroben Bedingungen und bei Vorhandensein leicht abbaubarer C-Verbindungen von selbst zurücklöst. Von Horn (2007: 165f.) hat einen auf diesen Beobachtungen beruhenden Verfahrensvorschlag entwickelt, der die spontane Ausfällung von Kalziumphosphat in gesäuertem Milieu (pH 6 bis pH 4) benutzt.

Dort, wo ein gesonderter Reaktionsraum für die Ausfällung bzw. Ausflockung zur Verfügung steht, kann P direkt aus dem Abwasser gewonnen werden. Hierzu stehen bereits verschiedene Kristallisatoren, Ionenaustauscher und ähnliche Umsetzungen zur Verfügung, so dass auch Verfahrensalternativen jenseits einer Nachfällung möglich sind; entsprechende Anlagen existieren vereinzelt auch als großtechnische Pilotanlagen. Ähnlich kann auch aus den Prozessabwässern der Schlammbehandlung MAP ausgefällt werden, beispielsweise nach dem PRISA-Verfahren (vgl. Pinnekamp 2007: 85ff.) Außerdem können weitere Verfahren zusätzlich herangezogen und mit den beschriebenen Verfahren kombiniert werden.

### **3.4 Wiedergewinnung von P aus Klärschlamm(-Asche)**

Wird direkt vom Klärschlamm ausgegangen, sind ebenfalls verschiedene Ansatzpunkte wählbar: Neben den Faulschlämmen ist insbesondere die Wiedergewinnung aus Klärschlamm-Asche erfolgversprechend. Bei der P-Rückgewinnung aus der Klärschlamm-Asche sind die größten Potentiale dann vorhanden, wenn der Klärschlamm sortenrein verbrannt wird (sog. Mono-Verbrennung). Bei dieser Mono-

Verbrennung des Klärschlammes und anschließender Nutzung der Asche lässt sich in der Theorie der gesamte gebundene Phosphor zurückgewinnen (Pinnekamp et al. 2007: 41, Cornel 2002).

Bei der Mono-Verbrennung von Klärschlamm liegt P als Rückstand in der Asche vor. Je nach Betriebsweise der Kläranlage beträgt bisher die Konzentration zwischen 4 bis 8% P (bzw. 10 bis ca. 22% Phosphorpentoxid). Weitere Hauptkomponenten der Klärschlamm-Asche sind Siliziumoxid (30–50%), Kalziumoxid (ca. 10–20%) sowie Aluminium- und Eisenoxid. Das Siliziumoxid stammt aus eingetragenen Feststoffen (Sand, Split usw.). Kalzium wird überwiegend mit der Wasserhärte und die Aluminiumverbindungen werden zum Teil über die Zeolithe der Waschmittel eingetragen. Zum größten Teil stammen die Aluminiumverbindungen ebenso wie die Eisenverbindungen jedoch aus den (konventionellen) Fällungsmitteln in der ARA. (Bei gezielter Anwendung einer biologischen P-Fällung könnte sowohl der Einsatz der Fällungsmittel reduziert und zudem der P-Gehalt um einige Prozentpunkte angehoben werden, da die Anwesenheit von Eisen die Ausbeute an P verringert.) Die Asche kann zudem gut gelagert und transportiert werden. Allerdings werden die meisten Schwermetalle bei der Verbrennung ebenfalls aufkonzentriert.

Grundsätzlich könnte P aus der Asche von mono-verbranntem Klärschlamm über die folgenden Pfade in die landwirtschaftliche Anwendung gebracht werden:

- Eine direkte Aufbringung der Asche auf landwirtschaftliche Flächen (wenn die Schwermetallgehalte sehr niedrig sind und nachgewiesen ist, dass P in pflanzenverfügbarer Form vorliegt);<sup>3</sup>
- die direkte Aufarbeitung der Asche in der Düngemittelindustrie: auch hier sind geringe Schwermetallverunreinigungen und niedrige Eisengehalte Voraussetzung, da die meisten Schwermetalle ebenso wie Eisenverbindungen bei den Verfahren zur P-Aufbereitung stören;
- Auswaschen der Phosphate mit heißem Wasser und anschließende Fällung oder Kristallisation: Die P-Rückgewinnung auf diesem Weg ist nur bei unmittelbarer Veraschung von Überschussschlamm aus der vermehrten biologischen P-Elimination möglich und erfordert sehr lange Verweilzeiten; die Ergebnisse konnten bei pragmatischer Verkürzung der Auslaugungszeit nicht ansatzweise reproduziert werden (vgl. Cornel 2002)
- Eluierung von P (BioCon- bzw. SEPHOS-Verfahren): Beim BioCon-Verfahren werden die Phosphate aus der Asche mit Schwefelsäure aufgeschlossen und eluiert. Neben den Phosphaten werden auch Eisen-, Aluminiumverbindungen sowie Kalium extrahiert. „Nichtflüchtige Schwermetalle“ bleiben hingegen im Aschereststoff. Mithilfe einer Batterie von verschiedenen Ionenaustauschern wird Phosphor als Phosphorsäure zurückgewonnen. Das Verfahren wurde im Technikums-

---

<sup>3</sup> Wenn hier vom Beitrag zur energetischen Verwertung und den Problemen abgesehen wird, die das Gemisch Klärschlamm aufgrund der enthaltenen Schadstoffe für den Anbau von Kulturpflanzen bedeuten kann, wäre es in diesen Fällen sinnvoller, den Schlamm direkt aufzubringen, in dem P in der Regel besser pflanzenverfügbar sein wird.

maßstab bei Aalborg erprobt und soll erstmals in Falun im technischen Maßstab eingesetzt werden. Die gleichzeitig eluierten Schwermetalle fallen als eigene Fraktion in konzentrierter Form an. Die Schwefelsäure kann über Kaliumhydrogensulfat zurückgewonnen werden. Beim SEPHOS-Verfahren werden die Phosphate nacheinander in unterschiedlich sauren Milieus aus der Asche gelöst und dann als Aluminiumphosphat ausgefällt. Das Verfahren wird bisher nur im Labormaßstab betrieben.

- Die thermochemische Behandlung von Klärschlamm-Aschen zielt darauf ab, durch Verdampfung im Thermoreaktor die Schwermetalle abzutrennen. Beim Verfahren der Firma ASH DEC Umwelt werden sie bei mehr als 950°C verdampft und in der Rauchgasreinigung abgeschieden. Die Nährstoffe lassen sich in unterschiedliche, über 90% pflanzenverfügbare Verbindungen überführen und anschließend pelletieren. Das Verfahren ist großtechnisch erprobt worden. 2007 wird eine Produktionsstätte für jährlich 18.000 Mg Düngemittel eingerichtet. In einem alternativen Verfahren werden die Substanzen bei etwas niedrigeren Temperaturen in einem Drehrohrofen behandelt, wobei die Schwermetalle und weitere Störstoffe in Chloride überführt werden. Dabei entstehen Kalium- oder Magnesiumphosphate; allerdings sind in Gegenwart von Eisenoxiden jedoch die abzutrennenden. Arsen-, Chrom- und Nickelchloride nicht beständig, so dass es zu Verunreinigungen kommt.

Wird als Ausgangspunkt für die Phosphorrückgewinnung der Klärschlamm gewählt, so kann in einem Teil der Verfahren der erste Schritt, die Elimination von P aus dem Abwasser, mit konventionellen Fällungsmitteln auf Eisen- oder Aluminiumbasis durchgeführt werden. In Abhängigkeit vom Rückgewinnungsverfahren sind aus dem Schlamm bzw. der Asche grundsätzlich zwischen 30 und 90% der Phosphorfracht des der ARA zulaufenden Abwassers recycelbar (Pinnekamp et al 2007: 40).

Aus dem ausgefaulten Schlamm könnte P gewonnen werden, in dem dieser chemisch sauer aufgeschlossen wird. Im Anschluss an eine Komplexreaktion und eine Eisensulfidfällung kann eine MAP-Kristallisation erfolgen. Bisher erscheint dieses Verfahren jedoch aufgrund der Abfolge dieser komplexen Verfahrensschritte nicht geeignet (Pinnekamp et al. 2007: 87). Hingegen ist das von den Berliner Wasserbetrieben in Waßmannsdorf im Versuchsbetrieb erprobte Verfahren zur P-Rückgewinnung prinzipiell realisierbar.<sup>4</sup>

Auch das Phostrip-Verfahren, bei dem P aus dem Rücklaufschlamm ausgestrippt und ausgefiltert wird, ist sehr interessant, weil in ihm P nicht nur als Düngemittel auskristallisiert bzw. -filtriert werden kann, sondern auch in einer den Rohphosphaten ähnlichen Form anfällt, so dass die P-Industrie großes Interesse am Prozess hat. Als Kristallisationskeime eignen sich neben Kalzit hauptsächlich tobermoritreicher

---

<sup>4</sup> Bei diesem Verfahren wird keine chemische Rücklösung vorgenommen, so dass es nicht direkt vergleichbar ist.

Porenbetonbruch, ein Abfallprodukt der Bauindustrie. Einstellungen des pH-Wertes, Vorabentfernung von Karbonat und Aufsalzung des Wassers entfallen bei Wahl dieser Edukte. Allerdings sind hier einige Verfahrensschritte noch nicht ausgereift.

Das Seaborne-Verfahren ist als Kombinationstechnik (anaerobe Schlammvergärung, Schwermetallabtrennung und anschließende Nährstoffabtrennung mit Magnesium) auf einer Pilotanlage erprobt; es wird zur Zeit in einer „abgespeckten“ Anlage in Gifhorn großtechnisch realisiert.<sup>5</sup> Hierbei wird der Primärschlamm nicht durch mechanisches Absetzen, sondern durch eine Flotation erzeugt. Der an der Wasseroberfläche aufschwimmende Flotationsschlamm reichert Stickstoff- und Phosphorverbindungen aus dem Abwasser in einer für die spätere Aufarbeitung und Nährstoff-/Schadstofftrennung geeigneten Form an. Im Nitrogen-Recycling-System des Seaborne-Verfahrens werden die Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium aus der Flüssigkeit ausgefällt. Dazu wird das bei der Reinigung des im anaeroben Prozess anfallenden Methans erzeugte Natriumhydrogenkarbonat verwendet. Anschließend wird MAP erzeugt. Die Schwermetallgehalte der erzeugten Düngemittel liegen nach Untersuchungen der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein deutlich unter denen üblicher Düngemittel (Klärschlamm, Gülle, industrielle Düngemittel).

Eine überkritische Wasseroxidation (bei Überdruck und einer Temperatur von mehr als 375 °C) bildet das Kernstück des AquaReci-Prozesses, der autotherm verläuft. Erprobt wurde das Verfahren in einer schwedischen Pilotanlage.

Eine thermische Hydrolyse von Klärschlamm ist nach verschiedenen Verfahren möglich. Beim Krepro-Verfahren wird der Schlamm sauer aufgeschlossen und bei 4 bar und 140°C behandelt, bevor die fest und die flüssige Phase getrennt werden. Dabei wird nur der Teil des Phosphors zurückgewonnen, der im hydrolysierten Schlamm gebunden war, maximal 60% der im Schlamm gebundenen Menge. Bisher wird P aus der flüssigen Phase mit für die spätere Nutzung wenig adäquaten Eisen-salzen gefällt. Eine seit längerem geplante großtechnische Anlage in Malmö wurde bisher nicht realisiert.

Das nassoxidative Kemicond-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des Kepro-Prozesses, bei der auf die thermische Hydrolyse verzichtet wird. Auch hier sind die Möglichkeiten der Integration einer P-Rückgewinnung noch nicht geklärt. Die Verfahren sind mit erheblichem Chemikalien- und Energieeinsatz verbunden.

---

<sup>5</sup> Das Seaborne-Verfahren sah zunächst nur eine Mitbehandlung von Klärschlamm in Biogasanlagen zur Gülleverarbeitung vor.

### **3.5 Wiedergewinnung von N-Dünger aus dem Abwasser**

In der Regel wird in der Literatur vorgeschlagen, N-Dünger in Kombination mit P als MAP zu gewinnen.

### **3.6 Gewinnung von Nährstoffen aus dem Gelbwasser**

Gelbwasser fällt in sehr geringen Mengen an (ohne Spülwasser etwa 1,5 l/(E/d)), ist aber besonders reich an Nährstoffen (N, P, K).

Um in Toiletten die feste Phase (das Braunwasser) von der flüssigen Phase (dem Gelbwasser) trennen zu können, wurden die so genannten Separationstoiletten entwickelt. In Schweden waren im Jahr 2000 bereits 3000 Trenntoiletten installiert. Die unmittelbare Verwendung von Gelbwasser als Dünger ist problematisch, da es aufgrund einer Ureolyse durch heterotrophe Mikroorganismen sehr rasch zur Jauchebildung (Ammoniakemission und damit Abnahme des Nährstoffgehalts) kommt. In den letzten Jahren ist daher (insbesondere an der EAWAG) versucht worden, das Gelbwasser zu stabilisieren. Düngeversuche deuten jedoch an, dass der landwirtschaftliche Auftrag von Urin bezogen auf die Bodenfruchtbarkeit nicht nur positive Auswirkungen hat (bspw. geht die Regenwurmaktivität im Boden stark zurück, vgl. Muskulus/Ellmer 2007).

Ebenso kommen Fällungs-, Trocknungs- oder Eindampfungsverfahren zum Einsatz, die das Gelbwasser in Düngegranulat und Wasser auftrennen. Derartige Behandlungsmethoden sind für Gelbwasser aber noch in der Entwicklung.

Die Weiterverarbeitung des Urins zum Fest- oder Flüssigdünger beruht mittlerweile im Wesentlichen auf der Struvitfällung. Das Gelbwasser wird in zwei Stufen behandelt. Im Fällungsreaktor wird zunächst Phosphor durch die Zugabe einer Magnesiumverbindung entzogen. Im zweiten Schritt, der »Strippung«, wird das flüssige Ammonium gebunden. So entsteht aus Urin Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP), das sich getrocknet zu einem hygienisch unbedenklichen Mineraldünger aus kleinen weißen Flocken formt.

### **3.7 Nutzung von Nährstoffen aus Anaerobkläranlagen**

Bei den Anaerobverfahren unterliegen die anorganischen Nährstoffe P und N nicht dem biologischen Abbau. Dadurch können in der Flüssigphase vorliegende anorganische Nährstoffe landwirtschaftlich verwertet werden, z.B. einer landwirtschaftlichen Bewässerung zugeführt werden.

In Lübeck-Fintenbreite wird ein Gemisch aus konzentriertem Schwarzwasser (Vakuumtoiletten) und zerkleinertem Bioabfall durch Erhitzen hygienisiert und in eine im mesophilen Temperaturbereich arbeitende Biogasanlage geleitet. Nach der Stabilisierung durch die anaerobe Behandlung bleibt ein nährstoffhaltiges flüssiges Pro-

dukt, das vor Ort gespeichert wird und von einem landwirtschaftlichen Maschinenring abgeholt wird. Dieser übernimmt die Verteilung unter seinen Mitgliedern und die Saisonspeicherung zu Zeiten, in denen keine Nährstoffe auf die Felder gebracht werden dürfen.

#### **4 Innovationspotentiale 2050**

Im Folgenden werden einige Entwicklungsaufgaben angesprochen, die vordringlich erscheinen und deren Lösung besonders innovative Leistungen erfordern. Das zuletzt genannte Auswahlkriterium wurde deshalb herangezogen, weil sich Exportchancen für die deutsche und vermutlich ebenso für einen Teil der europäischen Wasserindustrie sich vorrangig im Bereich der Hoch- und Spitzentechnologie eröffnen. Aufgrund der globalen Arbeitsteilung lässt sich einfache Technik in China und anderen BRICS-Ländern vermutlich wettbewerbsfähiger herstellen. Einige einfache Verfahren der Kompostierung verlangen nur sehr geringen technischen Einsatz, bedingen aber zum unkomplizierten Betrieb ein (sub)tropisches Klima und sind hinsichtlich der Arbeitsbedingungen (Hygieneproblem) als nicht optimal einzuschätzen.

Ein Großteil der bisher bekannten Verfahren zum Nährstoffrecycling zeichnet sich durch eine komplexe und damit zugleich aufwendige Verfahrenstechnik auf. Fast alle weiter unten aufgeführten Verfahren sind derzeit nicht wirtschaftlich. Dies gilt insbesondere für die N-Dünger, da hier eine Wettbewerbsfähigkeit mit dem Haber/Bosch-Verfahren erst bei extrem steigenden Energiepreisen gegeben ist. Bislang sind nur sehr geringe Erlöse beim Verkauf des MAP-Düngers erzielbar (Größenordnung 100 €/Mg). Aufgrund der langen Investitionszeiträume in der Siedlungswasserwirtschaft wird damit ein kostendeckendes Recycling ein zu spätes Signal zur Investition geben. Erst mit einer staatlichen Lenkung, z.B. durch die vollständige Verrechnung der Mehraufwendungen für die P-Rückgewinnung mit der Abwasserabgabe wird ein entsprechender Anreiz zur Um- bzw. Nachrüstung der Kläranlage gegeben.

##### **4.1 Kompostierung**

Lüftungssysteme in Dehydrierungs- und Kompost-Toiletten gelten als noch weiter verbesserbar. Hier kommen sowohl konstruktive Veränderungen als auch die Implementierungen verschiedener Elemente und Geräte (z.B. Wind oder elektrisch betriebene Ventilatoren) in Frage. Eine verbesserte Be- bzw. Entlüftung dieser Toilettensysteme wird zu ihrer höheren Qualität und infolge auch besserer Akzeptanz führen.

Der Platz-, Aufwands- und Wartungsbedarf eines Kompost-Toilettensystems ist bisher sehr groß. Geht ein Kompost-Toilettensystem über mehrere Etagen eines Gebäudes, ist zusätzlich mit einer komplizierten Installation zu rechnen.

Bezüglich des Betriebs und der Handhabung des Fäkalienseparators ist festzuhalten, dass die in einigen Modellprojekten erprobte sackweise Fäkalienentwässerung nur für niedrige Anschlussgrößen geeignet ist. Für größere Siedlungen ist eine kontinuierlich laufende Einrichtung erforderlich, um die Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe im Fäkalienkonzentrat noch weiter zu verringern (Peter-Fröhlich et al. 2006). Beim Übergang auf eine größer-maßstäbliche Kompostierungsanlage ist möglicherweise mit weiteren Problemen zu rechnen.

#### **4.2 Fällung von P-Dünger aus dem Abwasser**

Die Abschätzung des Recyclingpotentials durch Pinnekamp et al. (2007) hat ergeben, dass für die verschiedenen dort diskutierten Verfahren ein Substitutionspotential von 17% bis 40% des bundesweiten P-Einsatzes in der Düngung besteht. In der Betrachtung ist zwar die Nachrüstbarkeit der bestehenden Anlagen berücksichtigt. Allerdings ist es in einem großen Teil der bisher bekannten Verfahren jedoch nur möglich, einen deutlich unter 50% liegenden Teil der P-Fracht zur Kläranlage in landwirtschaftlich verwertbarer Form zurückzugewinnen. An der Erhöhung des Wirkungsgrades der Verfahren muss weiter gearbeitet werden, wenn tatsächlich die aufwendigeren technischen Lösungen einen relevanten Beitrag zur Versorgung mit P leisten sollen.

Im Gegensatz zu den konventionellen Fällungsmitteln können bei Einsatz alternativer Fällungsmittel, mit denen sich ein pflanzenverfügbare Dünger herstellen lässt, die Grenzwertkonzentrationen für P nach der EU-Richtlinie 91/271/EWG bzw. der AbwV nicht sicher eingehalten werden (Pinnekamp et al. 2007). Insofern sind die Verfahren für die anderen Fällungsmittel noch weiter zu optimieren. Bei Wahl von Aluminat muss eine überstöchiometrische Menge des Fällungsmittels zugegeben werden, da damit auch weitere im Wasser enthaltene Stoffe reagieren.

Obwohl das MAP-Verfahren schon seit etwa 20 Jahren im Grundsatz erforscht ist, existiert in Deutschland bis heute keine großtechnische Anlage zur Nährstoffrückgewinnung. Dies ist neben den bislang (auch wegen des relativ günstigen P-Düngerpreises) hohen Behandlungskosten auf Schwierigkeiten bei der Prozesssteuerung zurückzuführen. Die Reaktionszeit beträgt einschließlich des Absetzens des gefällten Produkts und seines Abziehens aus der Flüssigkeit etwa eine Stunde.

Betriebstechnische Probleme der Flockungsfiltration können durch die Verstopfung des Filtermediums oder die unzureichende Reinigung größerer Filterflächen auftreten. Insbesondere ist darauf zu achten, dass das Filtermaterial nicht verklumpt oder verblockt.

Beim Einsatz von Ionenaustauschern werden auch organische Reststoffe aus dem Abwasser absorbiert. Dies verursacht Fäulnisprozesse in den Aggregaten und erfordert, wenn eine Regeneration des Trägermaterials nicht möglich ist, dessen vollstän-



digen Austausch. Der Einsatz von bioziden Materialien könnte hier Abhilfe schaffen. Nach den bisherigen Erfahrungen hat sich aber beispielsweise die Verwendung von Kupfer zu diesem Zweck als problematisch erwiesen. Denn das Kupfer wird mit dem abfließendem Wasser ausgewaschen und kann sich über das Regenerat auch in der zu recycelnden Substanz anreichern.

Bei der Adsorption an Schlacken, Aktivtonerde oder anderen als Adsorbens geeigneten Körpern hat sich die Regeneration dieser Adsorptionskörper als schwierig herausgestellt. Sie macht sehr aufwendige Apparaturen, aber auch geeignete Mess- und Regeltechnik erforderlich.

Werden die Prozessabwässer aufbereitet, so empfiehlt sich vor der MAP-Kristallisation deren Filtration, um Schlammpartikel (und damit adsorbierte Schwermetalle) zurückzuhalten. Würde an diese Stelle eine Mikro- oder Ultrafiltrationsmembran eingesetzt, so könnte sich die Verunreinigung der entstehenden Düngemittel mit Schwermetallen weiter senken lassen (vgl. Pinnekamp 2007: 185). Ein bedeutender Nachteil der Kristallisationsverfahren ist bisher die Krustenbildung in Rohren und Aggregaten (tendenziell bis zur völligen Verblockung), so dass der Betriebsablauf der ARA nachhaltig gestört werden und im Extrem zum Erliegen kommen kann. Neuartige Oberflächen, an denen die Kristalle nicht anhaften können, könnten Kristallisationsverfahren begünstigen. Die Nanotechnologie kann insoweit die Wettbewerbsfähigkeit der MAP-Kristallisation vergrößern.

#### **4.3 Wiedergewinnung von P aus Klärschlamm(-Asche)**

Die Vorgänge bei der Verbrennung des Klärschlammes sind derzeit noch unzureichend aufgeklärt. Aktuell findet ein Projekt statt, mit dem das Verhalten der Schlämme bei der Verbrennung und die Aschebildung genauer untersucht wird. Insbesondere die Umwandlungsvorgänge von P werden dabei in Abhängigkeit von der Qualität unterschiedlicher Schlämme betrachtet (Kuhl et al. 2006).

Bezogen auf die Weiterentwicklung der verschiedenen in der Diskussion befindlichen technologischen Aufbereitungsverfahren besteht z.T. Innovationsbedarf.

Der Chemikalienbedarf steigt beim BioCon-Verfahren mit dem Fällmittelgehalt linear an, weshalb der Einsatz von (konventionellen) Fällungsmitteln auf das notwendige Minimum reduziert werden soll. Weitergehende Erkenntnisse hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen Phosphoreliminationsverfahren und Eluierbarkeit, aber auch bezüglich Reinheit bzw. Nutzbarkeit des Produkts und Angaben zur Wirtschaftlichkeit liegen publiziert nicht vor (Cornel 2002). Beim SEPHOS-Verfahren enthält das Fällprodukt Verunreinigungen von Schwefel und Natrium, die durch eine Verfahrensoptimierung reduziert werden können. Bisher entsteht beim SEPHOS-Verfahren Aluminiumphosphat; eine Weiterentwicklung zur Gewinnung von Kalziumphosphat ist möglich. Allerdings gilt konventionell gefälltes Kalziumphos-

phat als nicht gut pflanzenverfügbar, so dass hier evtl. verfahrenstechnisch während des Ausfällens eine andere Kristallstruktur erzeugt werden sollte. (vgl. von Horn 2007: 32)

Von weltweit 20 installierten Anlagen nach dem Phostrip-Verfahren sind derzeit weit weniger als die Hälfte in Betrieb; die anderen Anlagen wurden wegen betriebs-technischer Schwierigkeiten stillgelegt: Insbesondere stellt die Steuerung des Prozesses ein erhebliches Problem dar, wie auch Pinnekamp et al (2007: 192ff.) bei einer eigenen Erprobung feststellten. Bei unzureichender Verweilzeit des Schlammes im Stripper war die P-Rücklösung ungenügend, bei ausreichend langer Verweilzeit zur Bildung der organischen Säuren und ausreichender P-Rücklösung kann es einerseits zu starker Schwefelwasserstoffbildung und andererseits zur Schädigung des Schlammes kommen. Zudem scheint ein Zusammenhang zwischen dem Anteil an fädigen Mikroorganismen im Belebtschlamm und dem Betrieb der Phostrip-Anlage zu bestehen (vgl. Cornel 2002, von Horn 2007, Pinnekamp et al. 2007).

In einem Forschungsvorhabens der TU Karlsruhe werden Möglichkeiten des Phostrip-Verfahrens sowohl bei der P-Rückgewinnung aus der Wasserphase (Hauptstrom, Nebenstromverfahren) und aus Zentraten der Schlammdeintegration unter realen Bedingungen im Pilotmaßstab aufgezeigt, um das jeweilige Potential der Phosphatrückgewinnung zu bestimmen. Weitgehend ungeklärt ist die Bindungsform von Ca-P in Abhängigkeit der Parameter Sättigungsindex, pH-Wert, P-Konzentration und vor allem vom Gehalt des Wassers an organischem Kohlenstoff. Weitere Untersuchungen betreffen die Materialauswahl im Hinblick auf die Wirksamkeit bezüglich des P-Recyclings. Die Ergebnisse dieses Vorhabens sollen in die Entwicklung einer anwendungsreifen, großtechnischen Anlage einfließen.

Im Schlammbehandlungsprozess nach dem Verfahren der Berliner Wasserbetriebe sind bezogen auf die Rückgewinnung (Ausfällung als MAP) noch einige Prozessoptimierungen zu erproben. Diese Innovationen betreffen einerseits die Auslegung des Stripp- bzw. Vorlagebehälters. Andererseits muss das ausgefällt MAP möglichst vollständig vom Faulschlamm abgetrennt werden; dazu wird ein speziell ausgelegtes Hydrozyklon verwendet. Das Zentrifugieren verlangt insbesondere vom Handling her noch Innovationen (Mess- und Regeltechnik).

Beim AquaReci-Prozess sind aufgrund der Besonderheiten (Überdruck und Temperatur) anlagentechnische Probleme zu lösen. Insbesondere im Bereich der Wärmetauscher bilden sich Ablagerungen; zudem besteht erhöhte Korrosionsgefahr. Bei der thermochemischen Behandlung sind zahlreiche Detailfragen noch zu erforschen: Zunächst stellt sich die Frage der Korrosionsbeständigkeit der Anlagen, da das entstehende Chlorgas bei 850°C sehr reaktiv ist. Es sind auch Fragen nach der Aufarbeitung der entstehenden Reaktionsgase und der schadstoffhaltigen Waschwässer zu klären. Die Weiterentwicklung des Verfahrens wird derzeit im EU-Projekt SUSAN betrieben.

#### 4.4 Fällung von Nährstoffen aus dem Gelbwasser

Die Separations-Toiletten funktionieren bisher noch nicht zufriedenstellend: Die Steuerungen der Toiletten sind noch weiter zu optimieren. Verstopfungen am Gelbwasserauslass infolge von Ausfällungen ergaben sich im Berliner Demonstrationsprojekt an sechs von zehn Toiletten des Wohngebäudes. Diese Verstopfung führt zwar nicht zu einem Ausfall der Toilette, aber es findet dann keine getrennte Ableitung von Gelb- und Braunwasser mehr statt.<sup>6</sup> In Berlin war die Urinkonzentration im Gelbwasser vergleichsweise niedrig; das ist teilweise auch auf Mehrfachspülungen durch die Nutzer aufgrund des schlechten Toilettenpapiertransports in der Toilettenschüssel zurückzuführen.

Bei den bisher verwendeten Vakuum-Trenntoiletten handelt es sich um modifizierte Schwerkraft-Trenntoiletten, die mit einem Vakuumventil am reduzierten Abfluss ausgestattet sind. Es handelt sich dabei um Einzelfertigungen, die noch als Prototyp zu bezeichnen sind (Peter-Fröhlich et al. 2007). Für eine weitere Verbreitung der Schwerkraft-Trenntoiletten als Alternative zu konventionellen Spültoiletten sind Optimierungsarbeiten hinsichtlich Geometrie und Spülung erforderlich.

## 5 Zukunftsvisionen

Im vorausgehenden Kapitel wurden Entwicklungsaufgaben formuliert, die als vordringlich für die Lösung globaler Wasserproblemlagen eingeschätzt werden und von denen vermutet wird, dass sie ein hohes Innovationspotential besitzen. Diese Einschätzung soll mit einer Delphi-Befragung überprüft werden. Die schriftlich befragten Experten werden dabei gebeten, die Bedeutung der Technologien, ihre Realisierungschancen im genannten Anwendungsgebiet und ihren Realisierungszeitraum ebenso einzuschätzen wie den Entwicklungsaufwand und das globale Marktpotential. Der Methode der Delphi-Befragungen folgend, werden die beschriebenen Entwicklungsziele in Thesen über die Zukunftsgestaltung formuliert.

Es wird vorgeschlagen, den Experten die folgenden Thesen über Zukunftsvisionen der Dünger(rück)gewinnung aus Abwasser vorzulegen:

- Trotz erheblicher Verbesserungen werden sich aufgrund des weiter bestehenden Platzproblems Kompost-Toiletten nicht als Standardtechnologie für Agglomerationsräume entwickeln lassen.
- Aufgrund der Konkurrenzstellung mit dem Haber/Bosch-Verfahren (Stickstofffixierung aus der Luft) ist es wenig wahrscheinlich, dass Verfahren zur systematischen Stickstoffrückgewinnung aus dem Abwasser von Großkläranlagen entwickelt werden. Stickstoff aus zentralen Kläranlagen wird daher zunächst vorrangig

---

<sup>6</sup> Verstopfungen treten auch in den Rohren auf, besonders im Bereich von Krümmungen und Verengungen, was bei der Installation berücksichtigt werden muss (gerade, glatte Rohrleitungen). Weiterhin sind möglichst Rohrwandungen zu entwickeln, die eine Bildung von Urinstein nicht fördern.

als Kombinationsdünger (MAP) in eine landwirtschaftlich verwertbare Form gebracht werden.

- Je nach Geschichte und Ausbaugrad der zentralen aeroben ARAs wird es sich anbieten, P-Dünger aus dem Nebenstrom als Kalziumphosphat oder als MAP-Kombinationsdünger zu gewinnen. Die Verwertung der Phosphate aus den Klärschlämmen (z.B. aus den Aschen der Monoverbrennung) wird nur episodenhaft realisiert werden (und ist eher mittelfristig interessant).
- Die Nährstoffe aus der de- und semi-zentralen Anaerob-Abwasseraufbereitung werden, insbesondere wenn die Grauwasserfraktion separat behandelt wird, einer (noch zu entwickelnden) kontinuierlich beschickbaren und gut steuerbaren Kompostierung zugeführt. Allerdings wird für viele landwirtschaftliche Nutzflächen die Nachfrage nach Kompostdüngern – auch aufgrund der Konkurrenz zu den Kompostfraktionen, die aus Biofraktionen gewonnen werden – bescheiden bleiben, wenn es nicht gelingt, hier überzeugende und übersichtliche Klassifikationssysteme (Bewertung hinsichtlich der Begleitstoffe) aufzubauen. Insbesondere Komposte aus Braunwasser könnten so privilegiert werden. Auf leichten Böden und in Hanglagen mit Erosionsneigung wird vermutlich vermehrt auf Kompostdünger zurückgegriffen, da dort die Wirkung einer Bodenverbesserung bzw. der Eintrag von zur Regeneration geeignetem Substrat erwünscht ist.
- Alternativ bietet sich die Abgabe von flüssigen Konzentraten an, insbesondere aus zentralen Anaerobanlagen. Die Verwertung von Flüssigdünger aus einer de-/semi-zentralen Anaerobtechnologie wird jedoch an der landwirtschaftlichen Akzeptanz scheitern, solange dieser Dünger nicht auch hinsichtlich seiner Effekte für das Pflanzenwachstum einfach handhabbar sein wird (und keine standardisierten Nährstoffkombinationen und Konzentrationsverhältnisse in diesen Düngern einstellbar sind), was wenig wahrscheinlich sein wird.

## 6 Literatur und Nachweise

- Angerer, G. et al. (2005): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.  
[http://www.isi.fraunhofer.de/pr/2007de/pri01/Endbericht\\_18Jan07.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/pr/2007de/pri01/Endbericht_18Jan07.pdf) (17.7.07)
- Behrendt, J. et al. (2002): Production of value added products from separately collected urine. *Water Science & Technology*, 46, (6-7): 341-346
- Behrendt, J. et al. (2006): Appropriate Decentral Wastewater Technologies for Low Income Regions. Proceeding of the Dry Toilet 2006 2nd International Dry Toilet Conference, 16.-19. August, Tampere, Finland. Session 4
- Berg, U./D. Donnert (2005): Phosphorrückgewinnung durch Kristallisation im Nebenstrom. 80. Siedlungswasserwirtschaftliches Symposium, Stuttgart, 13.10.2005, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 184: 93-123
- BLE (2006): Statistischer Monatsbericht 10/2006 des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Herausgegeben durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn
- Boller, M. (2007): Dünger aus der Bibliothek. *EAWAG-News* 63d: 17-19
- Bahr, C. et al. (2007): Ozonung von gereinigtem Abwasser zur Spurenstoffentfernung und Desinfektion. *KA – Abwasser, Abfall* 54: 902-908
- Cornel, P. (2002): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammaschen. *Geo- und Wassertechnologie* 1 (3): 102-114. [http://www.fzk.de/fzk/groups/itc-wgt/documents/internetdokument/id\\_036507.pdf](http://www.fzk.de/fzk/groups/itc-wgt/documents/internetdokument/id_036507.pdf) (31.7.2007)
- Cornel, P./B. Weber (2003): Wastewater Treatment for Irrigation. Conference Proceedings Water & Wastewater Europe, Nice, France, 4-6 March 2003.  
[http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/abw/Deutsch/veroeffentlichungen/03-Nizza-treatment\\_for\\_irrigation.pdf](http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/abw/Deutsch/veroeffentlichungen/03-Nizza-treatment_for_irrigation.pdf) (17.8.2004)
- Horn, Jana von (2007): Untersuchungen zur Rückgewinnung von Phosphat aus Überschussschlamm von Kläranlagen mit vermehrt biologischer Phosphatelimination. Diss. Weimar 2006 (erscheint als: Schriftenreihe des Lehrstuhls Abfallwirtschaft und des Lehrstuhls Siedlungswasserwirtschaft Bd. 18.)
- Johnston, A.E./I. Steen (2000): Understanding Phosphorus and its Use in Agriculture. EFMA – European Fertilizer Manufacturers Association, Brüssel
- Kluge, Th./E. Schramm (1986): Wassernöte. Umwelt- und Sozialgeschichte des Trinkwassers. Aachen
- Kuhl, R./J.Maier/G. Scheffknecht (2006): Systematische Untersuchungen zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen unter besonderer Berücksichtigung von Feuerungsparametern.  
<http://bwplus.fzk.de/berichte/ZBer/2005/ZBerbwt24004.pdf> (7.8.2007)
- Lange, J./ R. Otterpohl (2000): Abwasser – Handbuch zu einer zukunftsfähigen Wasserwirtschaft. Donaueschingen-Pföhren (2. Aufl.)
- Lange, J./R. Otterpohl (1998): Handbuch zu einer zukunftsfähigen Abwasserwirtschaft. Donaueschingen-Pföhren
- Larsen, T. A./ J. Lienert et al. (2006): Ökologische Infrastrukturinnovationen in der Siedlungswasserwirtschaft : Ansätze und Perspektiven. In: R. Loske/R. Schaeffer

- (Hg.): Die Zukunft der Infrastrukturen. Intelligente Netzwerke für eine nachhaltige Entwicklung. Marburg, 347–367
- Londong, J./ R. Otterpohl (2001): Alternative Abwasserentsorgung am Beispiel Lamberts-mühle im Bereich des Wupperverbandes. Gewässerschutz, Wasser, Abwasser 184
- Lühring, A./U. Walter (2007) Zentrale Biogas-Verstromung nach Durchleitung durch ein separates Gasnetz. [http://www.freesen.de/wte/2007/com/ab\\_e/luehring\\_m.pdf](http://www.freesen.de/wte/2007/com/ab_e/luehring_m.pdf) (14.8.2007)
- Malisie, A./M. Prihandrijanti/R. Otterpohl (2007): The potential of nutrient reuse from a source-separated domestic wastewater system in Indonesia – Case study: Ecological sanitation pilot plant in Surabaya. In: Proceedings of IWA Conference Advanced Sanitation, 12.–13. März 2007 in Aachen
- Maurer, M. (2007): Aufbereitung von Urin – Flexibilität pur. EAWAG-News 63d: 14–16
- Mohr, M./W. Trösch (2005): Nachhaltiger Umgang mit Wasser – Forschungsprojekt DEUS 21: Dezentrales Wassermanagement für eine Neubausiedlung. Wasser, Luft, Boden 5/2005, 17–21
- Muskolus, A./F. Ellmer (2007): Fertilizer usage. Final report for task 8 of the demonstration project „Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater“ (SCST). [http://www.kompetenz-wasser.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/forschung/scst/SCST\\_Report\\_Task8.pdf](http://www.kompetenz-wasser.de/fileadmin/user_upload/pdf/forschung/scst/SCST_Report_Task8.pdf) (13.8.2007)
- Otterpohl, R. (2001): Perspektiven für neue Abwasserkonzepte mit Blick auf den Weltmarkt. Norddeutsche Tagung für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz. Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Bd. 33. [http://www.tu-harburg.de/susan/downloads/desar\\_de.pdf](http://www.tu-harburg.de/susan/downloads/desar_de.pdf)
- Otterpohl, R. (2006): Internationaler Stand neuartiger Sanitärkonzepte – Bedarfsanalyse, Entwicklungspfade und sozioökonomische Randbedingungen. 1. Aachener Kongress Dezentrale Infrastruktur, 17./18.10.2006, Gewässerschutz, Wasser Abwasser 204, S. 18/1–18/10
- Otterpohl, R./M. Oldenburg (2002): Innovative Technologien zur dezentralen Abwasserbehandlung in urbanen Gebieten. Korrespondenz Abwasser, 49 (10)
- Pape (2007): telefonische Mitteilung 7.8.2007.
- Pearce, F. (2007): Wenn die Flüsse versiegen. München.
- Peter-Fröhlich, A. et al. (2006): EU-Demonstrationsprojekt „Sanitärkonzepte für die separate Erfassung und Behandlung von Urin, Fäkalien und Grauwasser“ – Erste Ergebnisse. In: 39. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 29.–31.03.2006. Gewässerschutz – Wasser – Abwasser Bd. 202, 27–1; 27–17
- Peter-Fröhlich, A. et al. (2007): Layman Report: EU-Demonstrationsprojekt „Sanitärkonzepte zur separaten Behandlung von Urin, Fäkalien und Grauwasser“. [http://www.kompetenz-wasser.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/forschung/scst/SCST\\_Kurzbericht\\_DE.pdf](http://www.kompetenz-wasser.de/fileadmin/user_upload/pdf/forschung/scst/SCST_Kurzbericht_DE.pdf) (13.8.2007)
- Piekema, P./A. Giesen (o. J.): Phosphate recovery by the cocrystallisation process: Experience and developments.

- Pinnekamp, J. et al. (2007): Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers „Magnesiumammoniumphosphat –MAP“ aus Abwasser und Klärschlamm. Umweltbundesamt Text 25/07.
- Pronk, W. (2007): Urinaufbereitung: vom Labor zur Praxis. EAWAG-News 63d: 20–22
- Robisch, H. (2003): Alternative Sanitärkonzepte und Nährstoffrecycling aus Abwasser. Kommunale Umwelt-AktioN UAN. Hannover
- Schön, M./J. Hafkesbrink et al. (2003): CuRa – Cooperation für umweltschonenden Ressourcenaustausch zur Nutzung von Kostenreduktionspotenzialen. Endbericht des BMBF-Vorhabens [http://www.nachhaltig.org/ftp/cura/CuRa\\_Endbericht.pdf](http://www.nachhaltig.org/ftp/cura/CuRa_Endbericht.pdf) (17.6.2003)
- Schramm, E. (1997): Im Namen des Kreislaufs. Frankfurt am Main
- Udert, K. (2007): NoMix beginnt im Badezimmer. EAWAG-News 63d: 11–13
- Wendland, C./St. Deegener/J. Behrendt/P. Toshev/R. Otterpohl (2006): Anaerobic digestion of blackwater from vacuum toilets and kitchen refuse in a continuous stirred tank reactor (CSTR). Proceedings of the 7th Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems in Mexico, March 7–10, 2006 [http://www.tu-harburg.de/aww/publikationen/pdf/2006\\_Mexico\\_paper\\_203\\_revised.pdf](http://www.tu-harburg.de/aww/publikationen/pdf/2006_Mexico_paper_203_revised.pdf) (15.5.2007)
- Werner, Ch. et al. (2005): Verbesserte Exportchancen durch Ecosan. <http://www.gtz.de/dokumente/de-verbesserte-exportchancen-durch-ecosan-2005.pdf>
- Zech, T./W. Sternad/W. Trösch (2006): Membrane filtration based wastewater treatment. Proceedings Industrial Water 2006. DECHEMA e.V. Frankfurt am Main





## **In unserer Veröffentlichungsreihe ISOE-Diskussionspapiere bisher erschienen:**

**Schramm, Engelbert (2008):** Düngerrückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft. Unter Mitarbeit von Jana von Horn. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 32

**Schramm, Engelbert (2008):** Grauwasserrecycling – Abwasser als Sekundärrohstoffquelle: Technologien für die Zukunft. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 31

**Schramm, Engelbert (2008):** Energierückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 30

**Schultz, Irmgard/Immanuel Stieß (2006):** Emissionshandel und Gender. Ergebnisse einer transdisziplinären Genderanalyse. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 29

**Becker, Egon (2006):** Gegen das Verwischen der Differenz von Gesellschaft und Natur. Kommentar zum Potsdamer Manifest 2005 „We have to learn to think in a new way“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 28

**Kluge, Thomas/Stefan Liehr/Engelbert Schramm (2007):** Strukturveränderungen und neue Verfahren in der Ressourcenregulation. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 27

**Liehr, Stefan (2006):** Decision Support-Systeme in sozial-ökologischen Regulationsprozessen. Eine Betrachtung aus kybernetischer Perspektive. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 26

**Keil, Florian/Thomas Kluge/Stefan Liehr/Alexandra Lux/Petra Moser/Engelbert Schramm (2007):** Integrierte Perspektiven in der Wasserforschung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 25

**Stieß, Immanuel/Doris Hayn (2005):** Ernährungsstile im Alltag. Ergebnisse einer repräsentativen Untersuchung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 24

**Schramm, Engelbert (2005):** Genese und „Verschwinden“ der Kybernetik. Ein Literaturbericht. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 23

**Schramm, Engelbert (2004):** Monitoringbasierte Vernetzung und partizipative Synthese. Eine Auswertung integrierter Begleitaktivitäten zu einer BMBF-Förderinitiative. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 22

**Röhr, Ulrike/Irmgard Schultz/Gudrun Seltsmann/Immanuel Stieß (2004):** Klimapolitik und Gender. Eine Sondierung möglicher Gender Impacts des europäischen Emissionshandelssystems. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 21

**Franz-Balsen, Angela/Matthias Stadler (2003):** Erwachsenenbildung als Multiplikator für die Kommunikation sozial-ökologischer Forschung in die Gesellschaft. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 20

**Kluge, Thomas/Engelbert Schramm (2001):** Regionalisierung als Perspektive nachhaltigen Wirtschaftens. Konzeptionelle Betrachtungen. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 19

**Zahl, Bente (2001):** Zielgruppenspezifische Freizeitmobilität. Bestandsaufnahme der sozialwissenschaftlichen Forschung. Unter Mitarbeit von Konrad Götz. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 18

**Kluge, Thomas/Alexandra Lux (2001):** Privatisierung in der Wasserwirtschaft. Sozial-ökologische Forschungsperspektiven. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 17

**Sons, Eric (2001):** Innovative Forschungsaspekte „Nachhaltigen Wirtschaftens“. Identifikation der inhaltlichen Kernelemente einer BMBF-Förderinitiative. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 16

**Weller, Ines (2000):** Stand und Perspektiven ökologischer Innovationen im Textilbereich. Ergebnisse der ExpertInnenbefragung und -diskussion. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 15

**Jahn, Thomas/Egon Becker/Immanuel Stieß (2000):** Workshop: „Sozial-ökologische Forschung“. Protokoll des Workshops zur Einrichtung eines neuen Förderschwerpunkts „Sozial-ökologische Forschung“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vom 30.6. bis 1.7.1999 in Bonn. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 14

**Empacher, Claudia/Peter Wehling (1999):** Indikatoren sozialer Nachhaltigkeit. Grundlagen und Konkretisierungen. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 13

**Kluge, Thomas/Engelbert Schramm (1999):** Sicherung der Innovationslinie Bio-Puten: Lösungsperspektiven für vermutete Akzeptanzprobleme. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 12

**Götz, Konrad (1999):** Ansprüche an ökologische Innovationen im Textilbereich. Zwischenergebnisse des BMBF-Projektes „Wissenstransfer“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 11

**Empacher, Claudia/Konrad Götz (1999):** Ansprüche an ökologische Innovationen im Lebensmittelbereich. Ergebnisse einer Verbraucherbefragung im BMBF-Projekt „Wissenstransfer“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 10

**Empacher, Claudia (1998):** Die Umweltrelevanz der Lebensmittelherstellung: Das Beispiel Joghurt und Geflügel. Zwischenergebnisse des BMBF-Projektes „Wissenstransfer“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 9

**Jahn, Thomas (2000):** Social-Ecological Research – Conceptual Framework for a New Funding Policy. Synopsis of the Report for the German Federal Ministry of Education and Research. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 8

**Götz, Konrad/Willi Loose/Steffi Schubert (2001):** Forschungsergebnisse zur Freizeitmobilität. Zwischenergebnisse aus dem UBA-Projekt „Minderung der Umweltbelastungen des Freizeit- und Tourismusverkehrs“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 7

**Empacher, Claudia/Engelbert Schramm (1998):** Ökologische Innovation und Konsumentenbeteiligung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 4

**Kluge, Thomas (1998):** Das ökologische, ökonomische und soziale Potential von Umweltabgaben am Beispiel der Grundwasserabgabe. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 3

**Schultz, Irmgard (1998):** Umwelt- und Geschlechterforschung – eine notwendige Allianz. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 2

**Schramm, Engelbert (1998):** Soziale Dimensionen nachhaltiger Wassernutzung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 1

Informationen zu unserer Veröffentlichungsreihe ISOE-Diskussionspapiere, zu unseren weiteren Veröffentlichungsreihen und zu Bestellmöglichkeiten unter:

<http://www.isoe.de/literat/matlit.htm> sowie in unserem Literatur-Flyer, der über das Institut angefordert werden kann:

Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH

Hamburger Allee 45

60486 Frankfurt am Main

Tel.: +49 (69) 707 69 19 0

Fax: +49 (69) 707 69 19 11

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

### **Das Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE)**

1988 in Frankfurt am Main als gemeinnütziges Forschungsinstitut gegründet, hat das ISOE Pionierarbeit zur Begründung der sozial-ökologischen Forschung in Deutschland geleistet. Das besondere Profil des Instituts besteht darin, sozialwissenschaftliche und naturwissenschaftlich-technische Umweltforschung fachübergreifend zu betreiben und mit dem Wissen verschiedener sozialer Akteure und Akteursgruppen zu verknüpfen. Das Institut gehört damit zu den wenigen Forschungseinrichtungen zur theoriegeleiteten, aber zugleich umsetzungsorientierten Erzeugung transdisziplinären Wissens im Spannungsfeld von Natur und Gesellschaft.

#### **Unsere Informationsangebote:**

Webpräsenz: <http://www.isoe.de>

ISOE-Newsletter Soziale Ökologie (vierteljährlich):

<http://www.isoe.de/service/newsjbf.htm>

ISOE-Newsletter Social Ecology (zweimal jährlich):

<http://www.isoe.de/english/nlorderf.htm>