

netWORKS - Papers

Technische Möglichkeiten der alternativen Gestaltung städtischer Wasser- und Abwasserinfrastruktur

Eine Technikrecherche im Rahmen des Projekts
„Transformationsmanagement für eine nachhaltige
Wasserwirtschaft“

Nadine Staben



netWORKS-Papers

**Heft 24 Technische Möglichkeiten der
alternativen Gestaltung städtischer
Wasser- und Abwasserinfrastruktur**

**Eine Technikrecherche im Rahmen des Projekts
„Transformationsmanagement für eine nachhaltige
Wasserwirtschaft“**

Nadine Staben

Impressum

Autor

Nadine Staben

Herausgeber

Forschungsverbund netWORKS
www.networks-group.de

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten im Verbundvorhaben „Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft“, das im Rahmen des Förderschwerpunkts „Sozial-ökologische Forschung“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird.

Textverarbeitung

Doris Becker

Verlag und Vertrieb

Deutsches Institut für Urbanistik
Straße des 17. Juni 110
10623 Berlin

Telefon: 030/39001-0
Telefax: 030/39001-100
E-Mail: difu@difu.de
Internet: www.difu.de

Alle Rechte vorbehalten

Berlin, Juni 2008-06-06

Gedruckt auf chlorfreiem Recyclingpapier

ISBN: 978-3-88118-457-1

Forschungsverbund netWORKS im Projekt „Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft“

Deutsches Institut für Urbanistik (Difu)
Jens Libbe (Koordination)
Straße des 17. Juni 112
10623 Berlin
Telefon: 030/39001-115
E-Mail: libbe@difu.de



Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE)
PD Dr. Thomas Kluge (Koordination)
Hamburger Allee 45
60486 Frankfurt
Telefon: 069/7076919-18
E-Mail: kluge@isoe.de



Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH (ARSU)
Apl. Prof. Dr. Ulrich Scheele
Escherweg 1
26121 Oldenburg
Telefon: 0441/97174-97
E-Mail: scheele@arsu.de



Brandenburgische technische Universität Cottbus (BTU)
Institut für Städtebau und Landschaftsplanung
Lehrstuhl für Stadttechnik
Prof. Dr. Matthias Koziol
Postfach 10 13 44
03013 Cottbus
Telefon: 0355/693627
E-Mail: koziol@tu-cottbus.de



COOPERATIVE Infrastruktur & Umwelt
Dr.-Ing. Bernhard Michel
Heidelberger Landstr. 31
64297 Darmstadt
Telefon: 06151/5390-0
E-Mail: bernhard.michel@cooperative.de



IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH
Dr.-Ing. Wolf Merkel
Moritzstr. 26
45476 Mülheim an der Ruhr
Tel.: 0049 208 40303-0
E-Mail: w.merkel@iww-online.de



Inhalt

Vorwort	7
1. Urbane Wasserströme.....	13
2. Alternative Formen der Ver- und Entsorgung.....	15
2.1 Abwasser	15
2.1.1 Abwasserherkunft.....	15
2.1.2 Abwassersammlung und -ableitung	16
2.1.3 Abwasserbehandlung	18
2.1.4 Klärschlammverwertung	26
2.1.5 Grauwasserrecycling	31
2.1.6 Schwarzwasserbehandlung.....	34
2.1.7 Gelbwasserkonzepte	38
2.2 Regenwasserbewirtschaftung und -nutzung	43
2.3 Trinkwasser	50
2.4 Energiepotenzial der Wasserwirtschaft	54
3. Nachhaltige Sanitärkonzepte – Praxisbeispiele	65
3.1 Beispiel 1: Getrennte Erfassung und dezentrale Behandlung von Schwarzwasser mit Energiegewinnung und Grauwasserbehandlung.....	67
3.2 Beispiel 2: Getrennte Erfassung und dezentrale Behandlung aller Abwasserteilströme ohne Energiegewinnung	70
3.3 Beispiel 3: Getrennte Erfassung und dezentrale Behandlung aller Abwasserteilströme mit Energiegewinnung.....	72
3.4 Beispiel 4: Dezentrale Behandlung von häuslichem Abwasser mit Energiegewinnung und Regenwasseraufbereitung zu Brauchwasser	75

4. Chancen und Risiken – eine vorläufige Bilanz	77
Literatur.....	81
Abkürzungen.....	89
Anhang	
Zusammenfassung der Stoffströme im urbanen Wasserkreislauf und mögliche technische Konzeptionen (nach Peter-Fröhlich u.a. 2006) erweitert	93
Veröffentlichungen des Forschungsverbunds netWORKS	95

Vorwort

Die Siedlungswasserwirtschaft beruht auf einem über lange Zeiträume gewachsenen zentralen Infrastruktursystem von Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsanlagen und -netzen. Ausgehend von den urbanen Zentren dehnte es sich räumlich kontinuierlich aus und ermöglichte so erst unsere heutige Siedlungsentwicklung. Das System passte sich dabei kontinuierlich steigenden Gesundheitsbedürfnissen und Umweltansprüchen an. Grundlage für die flächenmäßige Erschließung und die Gewährleistung einer qualitativ hochwertigen und sicheren Versorgung waren stabile ökonomische, rechtliche und institutionelle Rahmenbedingungen. Im Ergebnis dieses angebotsorientierten Infrastrukturmodells wurden hohe Investitionen in Systemkomponenten mit einer langen, über viele Jahrzehnte reichenden technischen und wirtschaftlichen Lebensdauer getätigt.

Bislang galt die Regel, dass die Zentralität und Einheitlichkeit der Systeme bei mittleren bis hohen Siedlungsdichten entscheidende technische und ökonomische Vorteile gegenüber de- oder semizentralen Systemen haben. Angesichts sich verändernder Rahmenbedingungen bedarf diese Grundannahme jedoch der Überprüfung.

So wird der demografische Wandel mehr und mehr zu einer zentralen Randbedingung der Stadtentwicklung, wobei hinsichtlich der damit verbundenen Entleerungstendenzen mit erheblichen regionalen Unterschieden zu rechnen ist. Jene Kommunen, die bereits heute unter Bevölkerungsverlusten leiden, werden auch in der Zukunft weiter schrumpfen, während derzeit noch wachsende Agglomerationsräume aller Voraussicht nach auch in der Zukunft die prosperierenden Zentren sein werden. In vielen Kommunen ist die Situation allerdings bereits heute wenig eindeutig und auch dort, wo von einer relativ stabilen Bevölkerungsentwicklung ausgegangen werden kann, muss teilträumlich mit erheblichen negativen Trends gerechnet werden. Wachsen und Schrumpfen treten gleichzeitig und räumlich benachbart auf. Vielerorts drohen abnehmende Bevölkerungszahlen in Verbindung mit sinkenden Haushaltsgrößen zu einer Unterauslastung und dem Erreichen von kritischen Funktionsschwellen von Netzen und technischen Anlagen zu führen (vgl. Koziol 2006).

Eine ganz andere Herausforderung bildet der Klimawandel, der in Deutschland aufgrund der geografischen Lage in den nächsten Jahren stärker voranschreiten wird als in anderen Breiten. Die Lufttemperatur wird sich bis 2040 voraussichtlich um bis zu 1,7°C gegenüber 1900 erhöhen. Bis zum Jahr 2100 wird ein weiterer Anstieg der Temperaturen prognostiziert; im Mittel werden die Zunahmen zwischen 2,5 und 3,5°C betragen, mit den stärksten Veränderungen in Norddeutschland und dem Voralpenland. In den Sommermonaten ist mit einem Rückgang der Niederschläge und steigender Häufigkeit von sommerlichen Hitzewellen und Hitzetagen zu rechnen, während die Herbst- und Wintermonate deutlich feuchter werden. Die Städte und Gemeinden haben angesichts dieser Entwicklungen bereits in der Vergangenheit erhebliche Anstrengungen auf dem Gebiet des Klimaschutzes unternommen. Hingegen liegen bisher wenige Erfahrungen auf dem Gebiet der Klimaanpassungsstrategien (Adaption) vor (Libbe und Tracht 2007). Eine gewisse Ausnahme bildet hier der Umgang mit zunehmendem Extremwetter, etwa in Form von Starkregenereignissen, dessen Bewältigung bereits heute erhebliche Investitionen in Net-

ze und Anlagen der Stadtentwässerung mit sich bringt. Zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Bewältigung von größer werdenden Auslastungsschwankungen dürften aber auch Anpassungen im vorhandenen System unumgänglich sein.

Veränderte Randbedingungen werfen die Frage nach neuen technischen Lösungen auf. In diesem Zusammenhang könnten kleinere Einheiten und autarke Systeme an Bedeutung gewinnen. Wohin sich allerdings die technischen Systeme der Wasserver- und -entsorgung letztlich entwickeln werden und wieweit eine Transformation hin zu ganz neuen technisch-ökonomischen Konfigurationen möglich sein wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur in Umrissen erkennbar. Für einen vermehrten Einsatz semizentraler Anlagen bedarf es der sukzessiven Ergänzung und Umgestaltung vorhandener Systeme unter Beachtung betriebswirtschaftlicher Notwendigkeiten und ohne letztere in ihrer Funktionalität zu gefährden. Zugleich gilt es, die Transformation ökologisch und sozial verträglich zu gestalten.

Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger vieler deutscher Städte stehen gegenwärtig vor der Herausforderung, Leitvorstellungen für die Entwicklung ihrer Kommunen unter veränderten Randbedingungen zu entwickeln. Defizite in der gegenwärtigen Stadtentwicklungsplanung sind dabei unübersehbar. Einerseits ist in mittel- bis langfristiger Perspektive vielerorts eine erhebliche Planungsunsicherheit zu konstatieren, andererseits bedarf es der verstärkten Einbindung der technischen Infrastruktur in Umbaustراتيجien. Restriktionen in der Förderprogrammatik und den Fördermodalitäten für die Umsetzung von Stadtrückbau und -umbaukonzepten haben die Situation in der Vergangenheit verschärft, sodass die notwendige Anpassung der technischen Infrastruktur nur unzureichend erfolgte, umso mehr, als die notwendige Abgrenzung der stadumbaubedingten Folgekosten ein schwieriges Unterfangen ist (Koziol/Veit/Walther 2006). Der Bedarf an Erfahrungsaustausch ist vor diesem Hintergrund groß. Ebenso bedeutsam dürfte es für die kommunalen Akteure jedoch auch sein, Vorstellungen über gangbare Alternativen vorhandener technischer Strukturen zu entwickeln, die damit verbundenen städtebaulichen und finanziellen Voraussetzungen abzuschätzen und das in der Verwaltung erforderliche Know-how zu entwickeln. Stadttechnik, Architektur und Planung bedürfen insofern einer engen Zusammenarbeit.

Die abnehmende Auslastung vorhandener Anlagen und Netze stellt auch die Ver- und Entsorgungsunternehmen vor vielschichtige Probleme. In einigen Städten und Regionen sind absehbar Rück- und Umbaumaßnahmen der Netze und Anlagen notwendig, deren Finanzierung durch die Ver- und Entsorgungsunternehmen schwierig bis teilweise wirtschaftlich unmöglich erscheint. Doch es gilt auch, über gänzliche neue Techniklinien nachzudenken und insofern bestehende Systemalternativen gegenüber dem Weiterbetrieb vorhandener Anlagen abzuwägen. Die aktuellen Debatten um eine Modernisierung der deutschen Wasserwirtschaft erfahren dadurch eine wichtige Ergänzung.

In Deutschland konnten in den letzten beiden Jahrzehnten beachtliche Innovationen im Bereich alternativer Wasserver- und -entsorgungstechnologien entwickelt werden. Sie wurden bisher allerdings ausschließlich auf der Ebene von wenigen, kleinskaligen Modellprojekten umgesetzt. Aus den punktuellen Erfahrungen dieser Projekte eines experimentellen Wohnungs- und Städtebaus heraus alleine können jedoch noch keine verallgemei-

nernden Schlüsse und Hinweise für eine Einführung in größerem Maßstab und die Kombination mit vorhandenen Anlagen und Netzen gezogen werden.

Pilotvorhaben haben deutlich gemacht, dass Stofftrennung und neuartige Kombinationen von Abwasser und Frischwasser prinzipiell möglich sind. Für die deutschen Kommunen kommt es nun darauf an, Referenzprojekte nutzen zu können, in denen – vor allem im Bestand – flexiblere Ver- und Entsorgungsstrukturen erprobt werden. Dies ist aus drei zentralen Erwägungen heraus von besonderer Bedeutung:

- Volkswirtschaftlich gesehen handelt es sich um flexiblere und nachhaltige Lösungen, mit denen die Schließung von Nährstoffkreisläufen sowie – insbesondere angesichts der steigenden Energiepreise – eine energetische Verwertung von Abwasser angestrebt wird. Bei Betrachtung der Stoffkreisläufe ist die Wiedergewinnung von Phosphor aus dem Abwasser von besonderer Relevanz, da die global bekannten Phosphorlagerstätten beim heutigen Verbrauch in 150 Jahren aufgebraucht sein werden (Larsen und Udert 1999). Phosphor kommt als Düngemittel in der Landwirtschaft eine bedeutende Rolle zu. Ob noch weitere fossile Phosphorvorkommen verfügbar gemacht werden können, und ob deren Qualität für eine Nutzung als Dünger ausreicht, ist unklar (Runge-Metzger 1995). Mit Blick auf die endlichen fossilen Ressourcen erscheint eine zukünftige Verwendung von Dünger anthropogenen Ursprungs unausweichlich.
- Abwasser ist technisch und ökonomisch als Ressource zu begreifen. Intelligente Systemlösungen zeichnen sich aus durch Stoffstromreduktion (Ökoeffizienz), höhere Flexibilität und teilweise kürzere Leitungswege und repräsentieren gegenüber konventionellen Systemlösungen (im Sinne der Regeln der Technik) langfristig eine ökonomische Effizienzanehebung (Energieverwertung). Qualitätsgesichertes Regenwasser als Trink- und Brauchwasserressource kann aus technologischer Sicht eine völlig neue Alternative zur klassischen Frischwasserbereitstellung darstellen.
- Hinzu kommt, dass sich durch die langfristige Transformation der vorhandenen Systeme Chancen bieten, die weit über die deutschen Kommunen und ihre Ver- und Entsorgungsunternehmen hinaus reichen. Integrierte Lösungen zur Wasserver- und -entsorgung dürften erhebliche Ausstrahlungskraft auch auf Länder in anderen Erdteilen zur Lösung der Weltwasserkrise besitzen. Die deutschen Städte und ihre Ver- und Entsorgungsunternehmen können hier eine bedeutsame Vorreiterrolle für die Zukunft übernehmen.

Der Forschungsverbund netWORKS hat es sich mit dem Projekt „Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft“ zum Ziel gesetzt, gemeinsam mit Ver- und Entsorgungsunternehmen aus sechs unterschiedlichen Untersuchungskommunen langfristig tragfähige Angebots- und Infrastrukturkonzepte zu entwickeln. Einen Untersuchungsschwerpunkt bildet die Frage, inwieweit semi- und dezentrale Lösungen ökonomisch und ökologisch effizienter sind und im existierenden betrieblichen Rahmen sukzessive angewandt werden können. Strukturanpassungen der Anlagen und Einrichtungen der technischen Infrastruktur sollen also nicht losgelöst von den unternehmerischen Erfordernissen erfolgen, sondern nur in Einklang mit diesen. Stadtkonkret gilt es zudem, den

Handlungs- und Anpassungsbedarf im Einklang mit entsprechenden Stadtentwicklungskonzepten auszuzeichnen und das auch in Politik und Verwaltung notwendige operative Wissen zu entwickeln. Die Bewertung unterschiedlicher Systemalternativen (Szenarien) zum Transformationsmanagement umfasst die betriebswirtschaftlichen Aspekte aus Sicht der Ver- und Entsorgung, volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen Bewertungen von Systemvarianten sowie die umweltökonomischen Kriterien der Ressourcennutzung. Ferner ist zu diskutieren, inwieweit die allgemein anerkannten Regeln der Technik bzw. Stand der Technik einer Anpassung bedürfen. Das Ergebnis ist ein Konzept der mehrdimensionalen Bewertung von Transformationsstrategien der Wasserwirtschaft zur Entwicklung eines nachhaltigen Ressourcenschutzes und einer effizienten Ressourcennutzung. Das methodische Konzept wird so gestaltet, dass es bei vergleichbaren Aufgaben verwendet werden kann.

Zu dieser Studie

Mit der vorliegenden Technikrecherche legt der Forschungsverbund netWORKS eine Bestandsaufnahme ausgewählter nationaler und internationaler Erfahrungen und Projekte zu technischen Möglichkeiten der alternativen Gestaltung städtischer Ver- und Entsorgungsinfrastruktur vor. Aufgezeigt werden die zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten und deren bereits realisierte Anwendungen. Berücksichtigt wurden Umsetzungen im Rahmen von Forschungs- und Pilotvorhaben sowie bereits realisierte Projekte im Großmaßstab zu alternativen Konzepten der Wasserver- und Abwasserentsorgung. Gewonnene Betriebserfahrungen wurden, soweit vorliegend, ausgewertet.

In Fachkreisen wird seit Jahren über Alternativen zu der herkömmlichen zentralen Ver- und Entsorgungsinfrastruktur diskutiert. Dabei fehlt bis heute eine eindeutige Definition und Verwendung der Begriffe „dezentral“ und „zentral“. Neben der Unterscheidung nach öffentlichen oder privaten Trägern bzw. Betreibern der Anlage und der räumlichen Abgrenzung zwischen kommunenübergreifenden oder kommunenweiten Ver- und Entsorgungssystemen besteht die Möglichkeit der Definition nach dem Ort der Reinigung des betrachteten Teilstroms (z.B. Abwasser) bezogen auf den Entstehungsort. Weiterhin gibt es Ansätze, die Begriffe quantitativ abzugrenzen. So definiert beispielsweise die DIN 4261 Abwasserbehandlungsanlagen, die ein maximales Abwasseraufkommen von acht m³ pro Tag aufbereiten als „dezentral“ (was bei einem durchschnittlichen Wasserverbrauch von 125 Liter pro Einwohner und Tag ca. 64 angeschlossenen Einwohnern entspricht).

Im Folgenden werden die Begriffe wie folgt verwendet:

- Zentral: Die Ver- und/oder Entsorgung erfolgt über ein zentrales System (Kanalnetz, Kläranlage/Wasserwerk, Leitungsnetz) für eine große Anzahl an angeschlossenen Einwohnern.
- Semizentral: Die Ver- und/oder Entsorgung erfolgt für mehrere Wohneinheiten bzw. kleinräumige Siedlungsgebiete durch kleinere Anlagen z.B. im Gemeinschaftseigentum. Hierbei ist immer noch ein, wenn auch kleinräumigeres, Netz für den Transport

der Medien vom Entstehungsort bis zur Behandlungsanlage bzw. von der Gemeinschaftsanlage zu den Nutzern erforderlich.

- Dezentral: Die Ver- und/oder Entsorgung erfolgt in Einzelanlagen für je ein Wohngebäude/einen Haushalt. Ein Transportnetz für das entsprechende Medium ist über die Hausgrenze hinaus nicht erforderlich.

Die hier vom IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH durchgeführte Technikrecherche ist eingebettet in einen umfangreichen Vergleich von internationalen Programm- und Projektaktivitäten zur Zukunft städtischer Infrastrukturen, insbesondere im Bereich der Wasserver- und Abwasserentsorgung, wie er gegenwärtig vom Forschungsverbund netWORKS vorgenommen wird. Der vorliegende Bericht bildet zudem eine Hintergrundinformation für das im Rahmen des Projekts „Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft“ vorgesehene szenariobasierte Planspiel. Aufgrund ihres Überblickcharakters dürfte die Studie auch für andere fachlich Interessierte aus Wissenschaft und kommunaler bzw. kommunalwirtschaftlicher Praxis von Interesse sein. Mit der Publikation erheben wir keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Hinweise auf weitere interessante Aktivitäten und Projekte nehmen wir gerne entgegen.

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Verbundvorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01UV0716A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den jeweiligen Autorinnen und Autoren eines Heftes. Wir danken den Kollegen aus dem Verbund für ihre Anmerkungen und weiterführenden Hinweise zu einer Vorfassung des Textes.

Berlin, im Juli 2008

Forschungsverbund NetWORKS
Verbundkoordination

1. Urbane Wasserströme

Der durchschnittliche tägliche Trinkwasserverbrauch liegt in Deutschland aktuell entsprechend dem Branchenbild der Wasserwirtschaft 2008 bei 125 Litern pro Person (Branchenbild 2008). Knapp ein Drittel dieses Tagesbedarfs wird für die Toilettenspülung gebraucht, nur circa vier Prozent zum Trinken und Kochen. Der tägliche Wasserverbrauch im privaten Bereich setzt sich wie folgt aus den einzelnen Nutzungsarten zusammen.

Tabelle 1: Aufteilung des täglichen Trinkwasserbedarfs im Haushalt (nach BGW 2008).

Verwendungszweck	Verbrauch l/(E*d)	Verbrauch (%)
Toilettenspülung	34	27
Baden/Duschen/Körperpflege	45	36
Wäschewaschen	15	12
Geschirrspülen	7	6
Raumreinigung/Autopflege/Garten	8	6
Trinken/Kochen	5	4
Kleingewerbeanteil	11	9
Gesamt	125	100

Ein Mensch produziert ca. 500 Liter Urin und 50 Liter Fäzes pro Jahr. Der Grauwasseranfall variiert gemäß Literaturangaben zwischen 25.000 und 100.000 Litern pro Einwohner und Jahr kann bei einem durchschnittlichen täglichen Wasserverbrauch von 125 Litern jedoch mit ca. 47.000 l/(E*a) angenommen werden. Die im häuslichen Abwasser enthaltenen Nährstoffe verteilen sich auf die einzelnen Teilströme wie Tabelle 2 darstellt. Aufgrund der stark unterschiedlichen Verteilung erscheint eine Trennung der Teilströme und eine gezielte Aufbereitung bzw. Wiederverwendung logisch konsequent.

Tabelle 2: Nährstoffgehalte der häuslichen Abwasserteilströme (nach Wilderer 2001)

	Haushaltsabwasser (Summe)		davon:		
	kg/(E*a)	%	Grauwasser %	Urin %	Fäzes %
N	4,0 - 5,0	100	3	87	10
P	0,75	100	10	50	40
K	1,8	100	34	54	12
CSB	30	100	41	12	47

2. Alternative Formen der Ver- und Entsorgung

Alternative Formen der Ver- und Entsorgung zeichnen sich dadurch aus, dass sie einzelne häusliche Stoffströme erfassen und die Möglichkeit der separaten Aufbereitung oder Verwendung bieten. Für die verschiedenen Teilströme des häuslichen Abwassers liegen bisher unterschiedlich weitreichende Erfahrungen in Fassung, Behandlung und Nutzung vor.

Die technischen Möglichkeiten für Sammlung, Transport und Aufbereitung der einzelnen Stoffströme werden im Folgenden erläutert und deren Anwendung an ausgewählten Praxisbeispielen exemplarisch dargestellt.

2.1 Abwasser

2.1.1 Abwasserherkunft

Im häuslichen Bereich fallen je nach Nutzungsart Abwässer mit unterschiedlicher Stoffkonzentration und Gefährdungspotenzial an.

Es kann unterschieden werden in:

- **Schwarzwasser:** Sanitärabwasser aus Toiletten und Urinalen, welches außer Spülwasser auch Fäkalien¹ und Urin² enthält. Es weist eine hohe Konzentration an organischen Kohlenstoffverbindungen sowie an Stickstoff- und Phosphorverbindungen auf und enthält Fäkalkeime (nährstoffreich, hohe Keimbelastung, eher schadstoffarm).
- **Gelbwasser:** Abwasser aus Urinalen und Urinseparationstoiletten. Dieses kann je nach Sammlungs- und Transportsystem unterschiedliche Mengen an Spülwasser enthalten (nährstoffreich, geringe Keimbelastung).
- **Braunwasser:** Fäkalien zzgl. Spülwasser ohne Urin (nährstoffreich, hohe Keimbelastung) Die Fäkalien können in z.B. Komposttoiletten auch ohne Spülwasser erfasst und gesammelt werden.
- **Grauwasser:** Häusliches Abwasser aus Spüle, Dusche/Bad, Waschmaschine etc., welches weder Urin noch Fäkalien enthält. Es handelt sich um leicht verschmutztes Abwasser mit einem zeitweise hohen Volumenstrom (z.B. bei Entleerung einer Badewanne). Im Grauwasser lässt sich die ganze Palette der in modernen Haushalten verwendeten chemischen Verbindungen wiederfinden (z.B. synthetische Detergentien), aber auch Fäkalkeime, die beispielsweise durch das Auswaschen von Baby-Wäsche in das Wasser gelangen (nährstoffarm, schadstoffreich) (Wilderer 2001).

1 Fäkalien (auch Kot oder Fäzes), hier: Ausscheidung (Exkrement) des menschlichen Darms (nährstoffreich, hohe Keimbelastung).

2 Urin (auch Harn), hier: flüssiges Ausscheidungsprodukt der menschlichen Nieren (nährstoffreich, geringe Keimbelastung).

2.1.2 Abwassersammlung und -ableitung

Der Abtransport von humanen Ausscheidungen mit Wasser im Rahmen der zentralen Schwemmkanalisation ist eine weltweit bekannte und verbreitete Technik. Dies begründet sich historisch aus den Vorteilen dieses Systems (Wilderer 2001):

- Vermeidung von fäkalienverursachten Krankheiten,
- Verhinderung von Überschwemmungen von Siedlungsgebieten bei Regenereignissen,
- kostengünstige Ver- und Entsorgungstechnik,
- effiziente Überwachung und klar geregelte Zuständigkeiten

Durch den systematischen Auf- und Ausbau der klassischen Schwemmkanalisation mit Ableitung und Behandlung des Abwassers in zentralen Kläranlagen wurde die Grundlage für die wirtschaftliche Entwicklung der Gemeinden, Städte und Regionen der Industrieländer gelegt.

Die klassische Schwemmkanalisation hat jedoch auch Nachteile wie Tabelle 3 zeigt.

Tabelle 3: Nachteile der Schwemmkanalisation und zentralen Abwasserbehandlung (erweitert nach Wilderer 2001)

Problematik	Erläuterung
Vermischung und Verdünnung aller Abwässer	Gemeinsame Ableitung der verschiedenen Abwässer in die Kanalisation und Behandlung in einer zentralen Kläranlage
Hoher Wasserverbrauch	Verwendung großer Mengen an Wasser als Transportmittel für Abfälle
Belastung der Oberflächengewässer mit problematischen Schadstoffen und Nährstoffen	Chemikalien, Arzneimittelrückstände und endokrin wirksame Stoffe Stickstoff, Phosphat, Kohlenstoff
Offenes Durchflusssystem	Keine direkte Wiederverwendung des gereinigten Abwassers möglich Beschränkte Möglichkeiten für eine Rückführung der im Abwasser enthaltenen Nährstoffe in den Stoffkreislauf (Stickstoff, Phosphat, Kalium)
Risiken bei der Nutzung des Klärschlammes	Belastung der Klärschlämme mit Schwermetallen und anthropogenen organischen Schadstoffen
Hohe Kosten für Transport und Behandlung	Unterhaltung/Sanierung der Kanalisation Erweiterung der Kläranlagen zur Nährstoffelimination Belüftung bei der aeroben Behandlung des Abwassers
Unflexibilität des Systems	Umplanungen und Umbauten nur begrenzt möglich

Druckentwässerung

Für die Abwasserentsorgung abgelegener Gehöfte, Betriebe und zersiedelter Gebiete kann die Druckentwässerung eine kostengünstige Problemlösung darstellen. Das Abwasser wird hierbei aus einem Pumpenschacht heraus über eine häufig bis zu mehreren 100 Meter lange, klein dimensionierte Druckrohrleitung dem Abwassersammler oder direkt der Kläranlage zugeführt.

Vorteile der Druckentwässerung:

- Kein Gefälle erforderlich, dadurch höhere Flexibilität in der Rohrleitungsführung,
- Einsatz auch bei geografisch ungünstigen Randbedingungen und weitläufiger Bebauung möglich,
- kostengünstig und schnell Verlegung sowie Instandhaltung,
- geringe Leitungsdurchmesser,
- verrottungsfeste Anlagenteile aus beispielsweise PE
- Wasserersparnis bei Toilettenspülung und Abwassertransport im Vergleich zur herkömmlichen Schwemmkanalisation.

Nachteile der Druckentwässerung:

- Begrenzte Anschlussdichte durch hydraulische Randbedingungen,
- begrenzte Kontroll- und Reinigungsmöglichkeiten,
- Be- und Entlüftungsarmaturen an Hochpunkten erforderlich
- H₂S-Bildung bei zu langen Standzeiten (Unterauslastung!), dadurch Geruchsemissionen und Korrosion an Ausmündungen und Entlüftungsventilen,
- gegenüber der Freispiegelentwässerung erhöhter Wartungsaufwand für die Pumpwerke,
- Einsatz von Fremdenergie

Vakuumentwässerung

Die Vakuumtechnik kann ebenfalls als alternatives Verfahren zur Sammlung und Ableitung von Schmutzwasser eingesetzt werden. In einer zentral angeordneten Station befinden sich eine oder mehrere Pumpen, die einen Unterdruck von 0,6 bis 0,7 bar gegenüber der Atmosphäre in einem oder mehreren Abwassertanks erzeugen. Über die an die Behälter angeschlossenen Rohrleitungen setzt sich der Unterdruck bis zu den Hausanschlüssen fort und liegt dort mit mindestens 0,3 bar unter dem atmosphärischen Druck an. Sobald in einem Haus Schmutzwasser anfällt, öffnet eine Steuerung ein Übergabeventil und das Schmutzwasser wird unter gleichzeitiger Hinzugabe von Luft in Richtung Pumpstation abgesaugt. Luft und Abwasser gelangen schubweise in die Abwassertanks. Sind die Abwasserbehälter gefüllt, wird mittels Abwasserpumpen das Schmutzwasser entnommen und zur Aufbereitung und Weiterbehandlung in die Kläranlage gefördert (Schluff 1996).

Die Vor- und Nachteile sind ähnlich denen der Druckentwässerung.

Ein Vorteil der Vakuumentwässerung besteht darin, dass aufgrund des Unterdruckes kein Abwasser in das Grundwasser sickern kann, was besonders in Wasserschutzgebieten Relevanz besitzt. Im Havariefall (Undichtheit) ist allerdings die Abwasserableitung nahezu unterbunden, andererseits ist die Leckagesuche relativ leicht durchzuführen.

Die Hausanschlussstationen sind im Falle der Vakuumentwässerung deutlich kostengünstiger als bei der Druckentwässerung, allerdings fallen die relativ aufwendigen Vakuumstationen bei Kostenvergleichen stark ins Gewicht. Im Ergebnis ist eine Vakuumentwässerung nur bei einer relativ großen Anzahl anzuschließender Grundstücke wirtschaftlicher als eine Druckentwässerung (Friedemann 2008).

2.1.3 Abwasserbehandlung

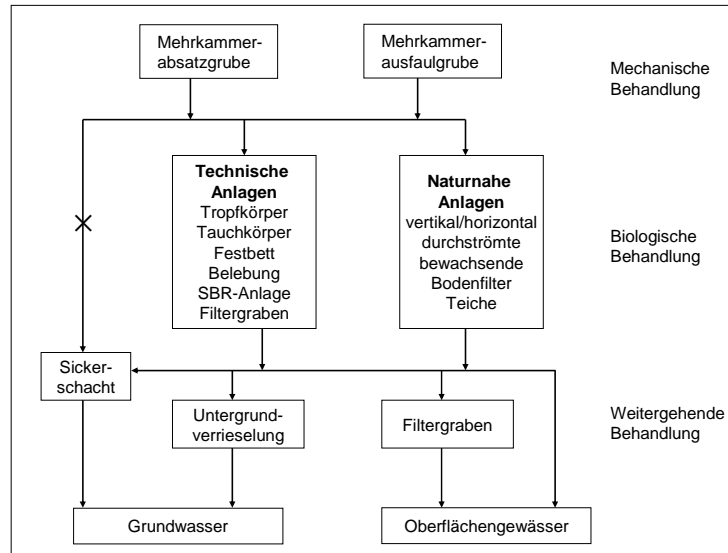
Die herkömmliche Methode der Abwasserentsorgung in Siedlungsgebieten in den west- und mitteleuropäischen Ländern sowie Amerika beruht auf dem Prinzip der Ableitung mithilfe der Schwemmkanalisation und der zentralen Behandlung in einer Kläranlage. Dem liegt die Idee zugrunde, in Haushalten anfallende menschliche Ausscheidungen sowie andere Abwässer aus Haushalt und Gewerbe möglichst schnell vom Verbraucher wegzutransportieren und damit abwasserbürtigen Krankheiten zu vermeiden sowie im Abwasser enthaltene Nähr- und Schadstoffe weitgehend von den Gewässern fernzuhalten. Diese Aufgaben erfüllt das System Schwemmkanalisation und Zentralkläranlage in der Regel zufriedenstellend. Besonders in dicht besiedelten Gebieten weist es häufig durch hohe Anschlussgrade und relativ kurze Rohrleitungsstrecken eine hohe Effizienz auf.

In ländlich geprägten Gebieten stellt sich besonders aufgrund der gestreuten Siedlungsstruktur und der damit verbundenen Kosten für ein zentrales Entsorgungssystem (große Rohrleitungslängen bei nur geringem Anschlussgrad) die Frage nach einer gangbaren, wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Alternative. Als Alternative zur zentralen Abwasserbehandlung wird das entstehende Abwasser in einigen ländlichen Gegenden dezentral entsorgt. Hierbei wird das häusliche Abwasser in Einzelanlagen (dezentral) oder in kleinen Kläranlagen als Gemeinschaftseinrichtung für z.B. Ortsteile (semizentral) gereinigt. Regenwasser wird separat gespeichert und genutzt oder versickert (dezentral), wodurch keine Regenwasser-Kanalisation erforderlich ist.

Dezentrale Abwasserreinigung mit Kleinkläranlagen

Für die Abwasserreinigung mit Kleinkläranlagen stehen verschiedene Anlagentypen zur Verfügung. Die wichtigsten Vertreter der Kleinkläranlagen können der Abbildung 1 entnommen werden. Neben den aufgeführten, heute gebräuchlichsten Systemen gibt es weitere Verfahren. Ständige Weiterentwicklung und Neuerungen bringen immer neue Varianten hervor. Die zugrunde liegenden Normen für Kleinkläranlagen sind die DIN EN 12566 (Anonymus 2004) sowie die DIN 4261 (Anonymus 1984 und 2002). Dabei definiert die DIN 4261 Kleinkläranlagen als Aufbereitungsanlagen für einen maximalen täglichen Schmutzwasserzufluss von acht m³.

Abbildung 1: Verfahren zur Abwasserreinigung in Kleinkläranlagen*

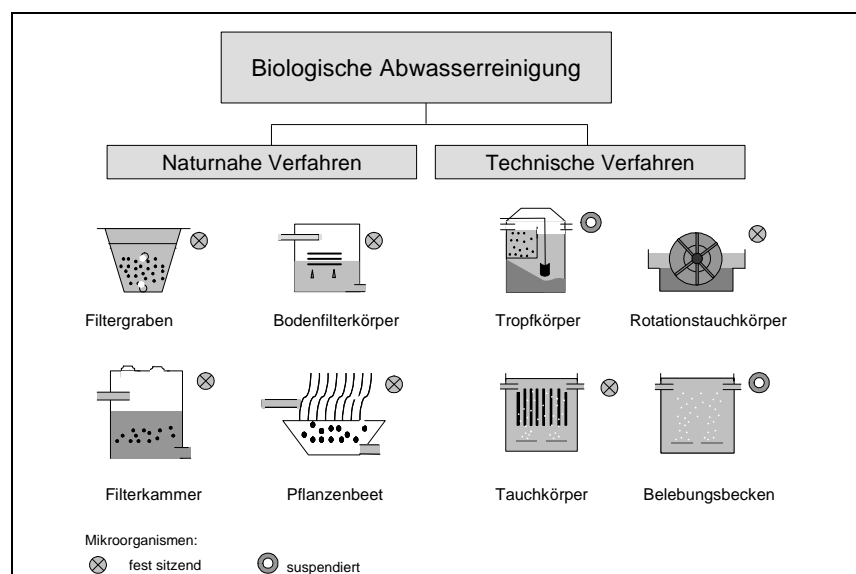


*Quelle: Darstellung nach Oldenburg und Otterpohl 1997.

Bei den dargestellten Konzepten wird der gesamte anfallende Abwasserstrom behandelt. Eine Separation von Grau- oder Gelbwasser und damit eine teilstromspezifische Aufbereitung finden nicht statt.

Die biologische Abwasserreinigung in Kleinkläranlagen lässt sich sowohl mit technischen als auch mit naturnahen Verfahren realisieren, wie Abbildung 2 zeigt.

Abbildung 2: Biologische Verfahren der Abwasserreinigung*

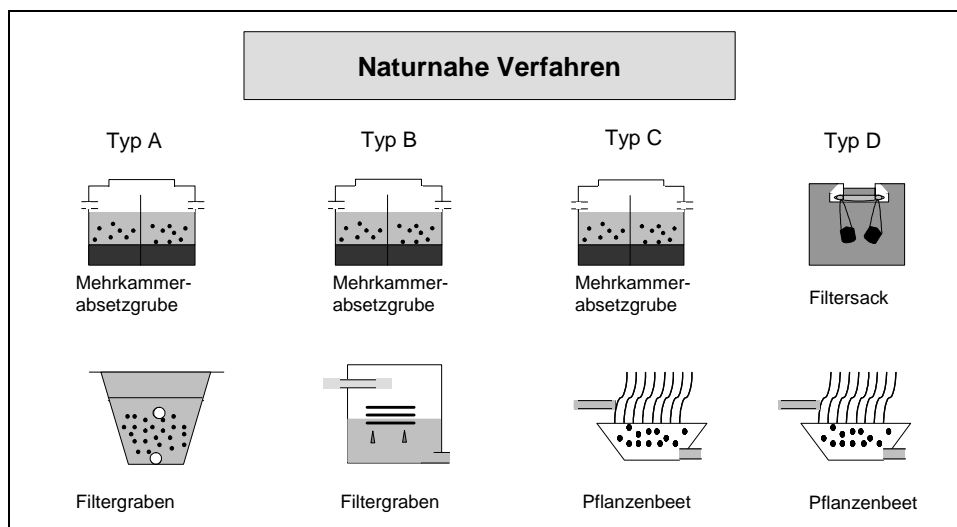


*Quelle: Darstellung nach Bauhaus Universität Weimar 2000.

Die Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen aufgezeigten Komponenten sind vielfältig, und entsprechend groß ist auch die Zahl der möglichen Kleinkläranlagentypen. Die folgende Zusammenstellung enthält daher nicht alle denkbaren Kombinationstypen, sondern nur solche, die bereits mehrfach verwirklicht worden sind. Alle Anlagentypen können mit zusätzlichen Bauteilen wie Klärschlammvererdungsbecken sowie Schönungsteichen oder Nachreinigungssandfiltern ausgestattet werden.

Untergrundverrieselung, Sickermulde oder Sickerschacht können erforderlich werden, wenn kein Vorfluter für die Aufnahme des gereinigten Abwassers zur Verfügung steht (Bauhaus Universität Weimar, 2000).

Abbildung 3: Kombinationsmöglichkeiten Aufbereitungsstufen bei Kleinkläranlagen – Natürliche Verfahren*

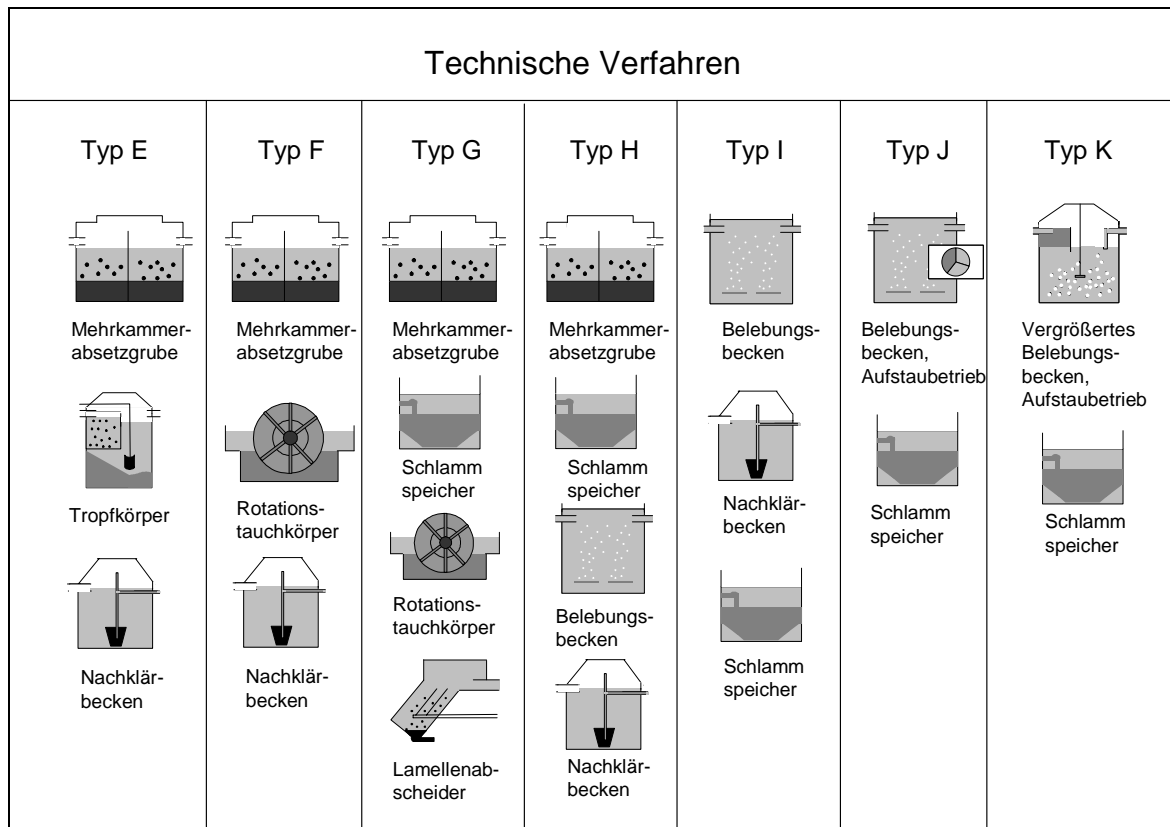


*Quelle: Darstellung nach Bauhaus Universität Weimar 2000.

Prinzipiell sind alle angeführten Verfahrensarten für den gesamten Größenbereich bis 50 EW einsetzbar, die Typen A, D und K sind jedoch besonders für Hauskläranlagen bis zu einer Anschlussgröße bis ca. zehn EW geeignet.

Eine dezentrale Abwasserentsorgung mit Kleinkläranlagen scheint zukünftig vor allem in ländlich geprägten Gebieten aufgrund der gestreuten Siedlungsstruktur und der damit verbundenen hohen Kosten für ein zentrales Entsorgungssystem eine attraktive, wenn nicht sogar zwingende Alternative darzustellen. Dabei ist besonders auf die Optimierung der Reinigungsleistung Wert zu legen, da Kleinkläranlagen nach Barjenbruch und Al Jiroudi (2006) bereits heute regional mit mehr als 70 Prozent zu der Gewässerbelastung mit CSB beitragen.

Abbildung 4: Kombinationsmöglichkeiten Aufbereitungsstufen bei Kleinkläranlagen – Technische Verfahren*



*Quelle: Darstellung nach Bauhaus Universität Weimar 2000.

Bei richtiger Auslegung, Ausführung und Betrieb lieferten die von Barjenbruch und Al Jiroudi untersuchten technischen sowie natürlichen Verfahren (Festbett, SBR³, Tropfkörper, Tauchkörper, Pflanzenkläranlage – horizontal/vertikal) vergleichbare Ergebnisse mit größeren technischen Anlagen, wenn auch in Großkläranlagen erheblich bessere Ablaufwerte erzielt werden können. Bei der Reduzierung der fäkalcoliformen Bakterien wurde von keiner der getesteten Anlagen Beregnungswasserqualität oder gar Badegewässergüte erreicht. Soll das in konventionellen Kleinkläranlagen gereinigte Abwasser einer weiteren häuslichen Nutzung beispielsweise als Brauchwasser zur Toilettenspülung zugeführt werden, ist eine weitergehende (hygienische) Aufbereitung der Abläufe unerlässlich.

Der erforderliche Energieverbrauch hängt wesentlich von dem gewählten System ab (Pflanzenkläranlage: 4-14 kWh/(E*a), Tropfkörper: 142-232 kWh/(E*a)), war bei den zitier-

3 Das Sequencing Batch Reactor-Verfahren (kurz SBR-Verfahren) ist eine Variante des konventionellen Belebtschlammverfahrens. Der SBR besteht aus einem Reaktionsraum, der zuerst die Funktion eines biologischen Reaktors und danach die eines Sedimentationsbeckens übernimmt. Im Gegensatz zu kontinuierlich durchflossenen Reaktoren wird der SBR diskontinuierlich befüllt und geleert. Die herkömmliche räumliche Trennung der biologischen Prozesse und der Sedimentation wird durch eine zeitliche ersetzt. (Wikipedia 2008).

ten Untersuchungen jedoch in allen Fällen relativ gering und ließ sich durch Betriebsoptimierungen in der Regel weiter reduzieren (Barjenbruch und Al Jiroudi 2006).

Besonders die Membrantechnik bietet durch ihre gute technische Skalierbarkeit neue Möglichkeiten im Bereich der dezentralen Abwasserbehandlung, besonders vor dem Hintergrund, die Qualität der Abwasserreinigung durch Kleinkläranlagen auf ein neues technisches Niveau zu heben (Freund u.a. 2007). Das behandelte Wasser kann als Brauchwasser (z.B. für Gartenbewässerung und Toilettenspülung) wiederverwendet werden, wodurch die Wassergewinnung entlastet wird. Die Infektionsgefahr durch Kontakt mit Abwasser wird extrem vermindert und die Gefahr von Infektionen durch Kurzschlussströmungen zum Grundwasser bei ortsnahe Versickerung vermieden. Die eingesetzten Prozesse sind auch bei wechselnden Zulaufbedingungen stabil und die Ablaufqualitäten sind in der Regel deutlich höher als bei konventionellen, auch großtechnischen Kläranlagen (Richter und Brüß 2007). Eine Nachrüstung bestehender Mehrkammergruben mit getauchten Membraneinheiten kann sie zu leistungsfähigen Kläranlagen mit einer mechanischen sowie biologischen Stufe (Membranbelebungsverfahren) ausbauen.

Der Betrieb und die Wartung von Kleinkläranlagen sollte zur Vermeidung von Betriebsproblemen und der Sicherstellung der erforderlichen Ablaufqualitäten durch fachkundiges Personal (z.B. im Rahmen von Wartungsverträgen) erfolgen, was in der Praxis derzeit nach Aussagen der Universität Darmstadt (2007) häufig nicht sichergestellt wird. Eine mangelnde Wartung bzw. ein fehlerhafter Betrieb durch nicht fachkompetente Betreiber in Verbindung mit der Erstellung von nicht den Regeln der Technik entsprechenden Anlagen können zu einer unzureichenden Reinigungsleistung der Kleinkläranlagen führen. Eine Umsetzung im Rahmen eines Betreibermodells, bei dem z.B. der örtliche Entsorger (Verband, Stadtwerke) die Errichtung und den Betrieb der Kleinkläranlagen für die Grundstückseigentümer übernimmt, hat sich im Rahmen des Pilotprojektes „AKWA-Dahler Feld“ des Lippeverbandes als sinnvolle Lösung herausgestellt (Fraunhofer-Gesellschaft 2008).

Die Wirtschaftlichkeit dezentraler Systeme zur Wasserwiederverwendung ist nicht grundsätzlich gegeben, da die spezifischen Investitionskosten in der Regel deutlich höher liegen als bei zentralen Systemen und eine ordnungsgemäße Überwachung der Wasserqualität und insbesondere der Hygieneparameter hohe spezifische Kosten verursacht (Cornel u.a. 2004).

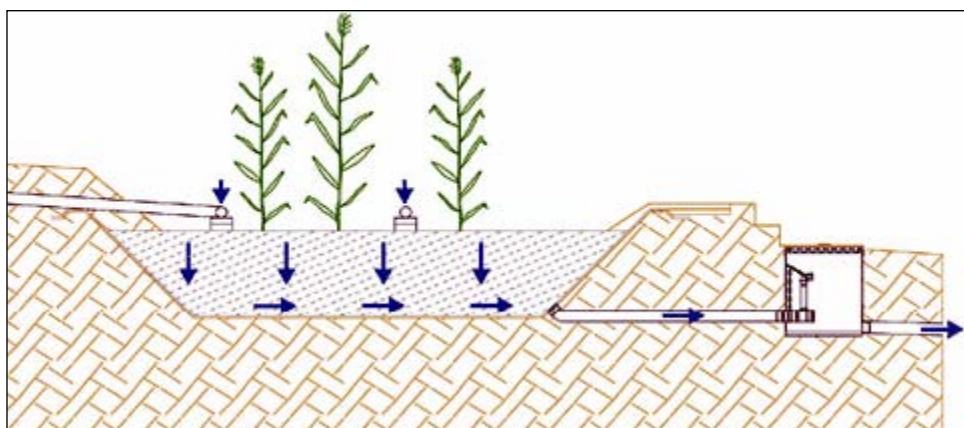
Tabelle 4 bietet einen Vergleich der derzeit zur Verfügung stehenden Kleinkläranlagentypen.

Tabelle 4: Gegenüberstellung Kleinkläranlagen (nach Koch und Schlesinger 2003)

Anlage	CSB- Abbau	Nitrifi- kation	Betriebs- stabilität	Wartungs- und Kontrollaufwand	Kosten	Platz- bedarf
Abwasserteiche	+	+	hoch	gering	gering	hoch
Belebungsanlagen	-	o	gering	hoch	mittel	gering
SBR-Anlagen	-	o	gering	hoch	gering	gering
Tropfkörperanlagen	+	o	mittel	hoch	mittel	gering
Tauchkörperanlagen	+	o	mittel	hoch	mittel	gering
Festbetтанlagen	-	-	gering	hoch	mittel	gering
Pflanzenkläranlagen (PKA), vertikal	+	+	hoch	gering	gering	mittel
PKA, horizontal	o	o	mittel	gering	gering	mittel
Membranfiltration	+	+	hoch	hoch	hoch	gering

Es zeigt sich, dass eine Entscheidung allein aus finanziellen Aspekten zu kurz greift, da nicht alle verfügbaren Systeme in gleichem Maße gut für die Reinigung des häuslichen Abwassers geeignet sind. Weiterhin ist zu beachten, dass bei allen Anlagen der Bemessung und Bauausführung besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist und eine regelmäßige Kontrolle und Wartung sichergestellt werden muss. Auf der Grundlage heutiger Anforderungen können vor allem vertikal durchströmte Pflanzenkläranlagen (Abbildung 5), Abwasserteiche, Tropf- und Tauchkörper empfohlen werden. Bei einer zu erwartenden Verschärfung der gesetzlichen Grenzwerte für das Einleiten des gereinigten Abwassers in einen Vorfluter werden nur wenige Anlagentypen in der Lage sein, diese zu erfüllen. Unter diesem Gesichtspunkt könnten Membrananlagen zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Abbildung 5: Schematische Darstellung eines vertikal durchströmten Bodenfilters*



*Quelle: www.pure-umwelttechnik.de (Funktion, Hauptstufe: Vertikalfilter).

Neue Sanitärkonzepte wie Trenntoiletten und Vakuumsysteme sowie Anlagen zur Weiterbehandlung einzelner Teilströme wie Vererdungsanlagen, Biogasanlagen und Membranverfahren ermöglichen mittlerweile, dass Rohstoffkreisläufe vollständig geschlossen werden können. Eine Schonung der „Ressource Trinkwasser“ wird durch Stoffstromtrennung und Nutzung von Brauchwasser erzielt. Kleinkläranlagen haben das Potenzial, ein wesentlicher Bestandteil einer neuen Abwasserwirtschaft mittels dezentraler Kreislaufsysteme zu werden. Neben der Entsorgung des gereinigten Wassers können selbst für den Klärschlamm zukunftsfähige Entsorgungswege außerhalb der Verbrennungsanlagen erschlossen werden (siehe Kapitel 2.1.4).

Semizentrale Behandlung

Im Vergleich zu ländlichen Gegenden kann in dicht besiedelten Räumen oder in einer bereits existierenden städtischen Bebauungsstruktur der Einsatz von semizentralen Lösungen zur Abwasserbehandlung eine sinnvolle Lösung darstellen. Das Abwasser mehrerer Wohneinheiten oder kleinräumiger Siedlungsgebiete wird in eine semizentrale Anlage abgeleitet, wo es gemeinsam behandelt wird. Cornel u.a. (2004) empfehlen semizentrale Lösungen zur innerstädtischen Wasserwiederverwendung, da diese die Vorteile zentraler und dezentraler Systeme vereinigen sowie deren Nachteile vermeiden. Es wird empfohlen diese „so klein wie möglich und gleichzeitig so groß wie nötig“ zu konzipieren.

Semizentrale Lösungen setzen ein kompaktes, in entsprechende Einheiten unterteilbares Einzugsgebiet voraus, weshalb sich der Einsatz dieser Systeme im innerstädtischen Bereich anbietet. Die vor Ort möglichen bzw. üblichen Baustrukturen und -typologien müssen bei der Ermittlung einer „idealen“ semizentralen Größenordnung ebenso berücksichtigt werden wie kulturelle, ökologische, ökonomische, politische, räumliche, soziale und technische Faktoren.

Gegenüber dezentralen Technologien haben semizentrale Systeme wesentliche Vorteile, da sie professionellen Betrieb/Wartung, Qualitätssicherung und Einhaltung von Qualitätsstandards sicherstellen. Weiterhin können innovative und energieeffiziente Technologien angewendet werden. Im Vergleich zu zentralen Systemen bieten semizentrale Ansätze eine deutlich höhere Flexibilität, was besondere Vorteile z.B. in vom demografischen Wandel stark beeinflussten Schrumpfungsregionen bietet. Eine getrennte Ableitung und Behandlung von industriellem und kommunalem Abwasser ermöglicht eine gute Kreislauf-führung und damit eine hohe Umweltverträglichkeit. Aus wirtschaftlicher Sicht bieten semizentrale Systeme klare Kostenvorteile im Vergleich zu zentralen und dezentralen Systemen, was in der Tatsache begründet ist, dass sie ökonomische Vorteile zentraler sowie dezentraler Systeme verbinden (nach Cornel u.a. 2004; Weber u.a. 2005):

- Spezifische Investitionskosten nehmen mit steigender Größe der Anlagen degressiv ab, was generell in Kostenvorteilen größerer gegenüber kleinerer dezentraler Anlagen resultiert.
- Die Länge des Leitungsnetzes bestimmt wesentlich die Wirtschaftlichkeit des Systems, weshalb zentrale Anlagen einen hohen Anteil an gebundenem Kapital aufwei-

sen. Ist das System nicht voll ausgelastet, stellt das Rohrleitungssystem ungenutztes Kapitel dar. In Bezug auf das Rohrnetz bieten kleinere Systeme Vorteile gegenüber größeren Anlagen.

- Gray und Booker (2002) ermittelten, dass die spezifischen Investitionskosten von Systemen für 1.000 bis 10.000 Haushalte am geringsten sind. Eine Übertragung dieser Ergebnisse ist allerdings nicht uneingeschränkt möglich, da die wesentlichen bei der Kostenermittlung herangezogenen Randbedingungen (Einwohnerdichte, Wasserverbrauch etc.) nicht vollständig angegeben sind.
- Die spezifischen Betriebskosten nehmen mit steigender Anlagengröße ab. Es ist allerdings festzustellen, dass diese Verringerung der Betriebskosten bei größeren Anlagen nur noch gering ist (starke Degression bei kleinen Ausbaugrößen, weniger starke bei Ausbaugrößen ab ca. 10.000 Einwohner). Damit resultiert ökonomisch kein Vorteil aus einer Vergrößerung der Anlagen über ein gewisses, semizentrales Maß hinaus. Ein Kostenvorteil zentraler gegenüber semizentraler Anlagen ist in Bezug auf die spezifischen Betriebskosten nicht auszumachen.

Eine eindeutige Wertung der Kostenvorteile gewisser Systemlösungen ist pauschal nicht möglich, da die jeweiligen Randbedingungen eine wesentliche Rolle spielen und in einem Kostenvergleich berücksichtigt werden müssen. Im Zuge der demografischen Entwicklungen können sich die Rahmenbedingungen zugunsten semi- oder auch dezentraler Systeme verändern (Geyler und Thomas 2003).

Eine Kombination zentraler und semizentraler/dezentraler Systemkomponenten ist ebenfalls in Abhängigkeit von den Randbedingungen denkbar. So existieren Siedlungen, in denen beispielsweise eine Trennung von Grau- und Schwarzwasser erfolgt. Das wenig belastete Grauwasser kann am Ort der Entstehung gesammelt, dezentral aufbereitet (siehe Kapitel 2.1.5) und in einen Vorfluter eingeleitet werden. Das stark belastete Schwarzwasser wird gesammelt und einer (semi-)zentralen Kläranlage zugeleitet (Rudolph und Schäfer 2001).

⇒ **Beispiel für ein Projekt naturnaher Abwasserbehandlung: Gemeinde Lahstedt**

Die in der Gemeinde Lahstedt (2.400 Einwohner: Stand 2003) realisierte naturnahe Abwasserbehandlungsanlage wurde in drei Entwicklungsstufen von Einzelanlagen (Kleinkläranlagen) über Anlagen für 500 bis 800 Einwohnerequivalente (EGW)⁴ bis hin zur derzeitigen Ausbaustufe für 3.000 EGW ausgebaut.

Die Anlage besteht aus einer Klärschlammveredelung in *schilfbepflanzten Trockenbeeten*, einer *Schilfkläranlage* sowie der *Mischwasserbehandlung* durch unbelüftete Teiche und schilfbepflanzte Bodenfilter (Absetz- und Speicherteich).

4 Der sogenannte Einwohnerequivalent ergibt sich aus dem Vergleich von gewerblichem Schmutzwasser mit häuslichem Schmutzwasser und ergibt die tägliche, auf einen Einwohner bezogene Schmutzmenge.

Im ersten Schritt wird das zu reinigende Abwasser zur *Klärschlammveredelung* geleitet (Abbildung 6). Hier wird das Abwasser von Feststoffen befreit und vorgereinigt. Pro Jahr werden ungefähr zwei Meter Klärschlamm aufgebracht, von denen nach der Schlammentwässerung und -mineralisierung ca. zehn cm übrig bleiben. Der Klärschlamm kann anschließend als organisches Substrat genutzt werden. Im nächsten Schritt wird das Abwasser dann in die *Schilfkläranlage* geleitet. Den Abschluss bildet das *Absetzbecken*. Der sich anschließende Speicherteich ist ein zusätzliches Biotopgewässer für den Überlauf bei starken Regenfällen und schützt das angrenzende Fließgewässer vor Spitzenabflüssen. Durch die hohe Reinigungsleistung der Kläranlage (ca. 95 Prozent Wirkungsgrad bezogen auf den CSB und 90 Prozent Abbau des BSB) hat das gereinigte Abwasser der Pflanzenkläranlage eine höhere Qualität als das Wasser des Vorfluters (VDI 2003).

Abbildung 6: Abwasserzulauf in schilfbepflanzte Trockenbeete, Lahstedt*



*Quelle: VDI-AK Umwelttechnik, Braunschweig 2003; Foto: Dr. F. Schröter.

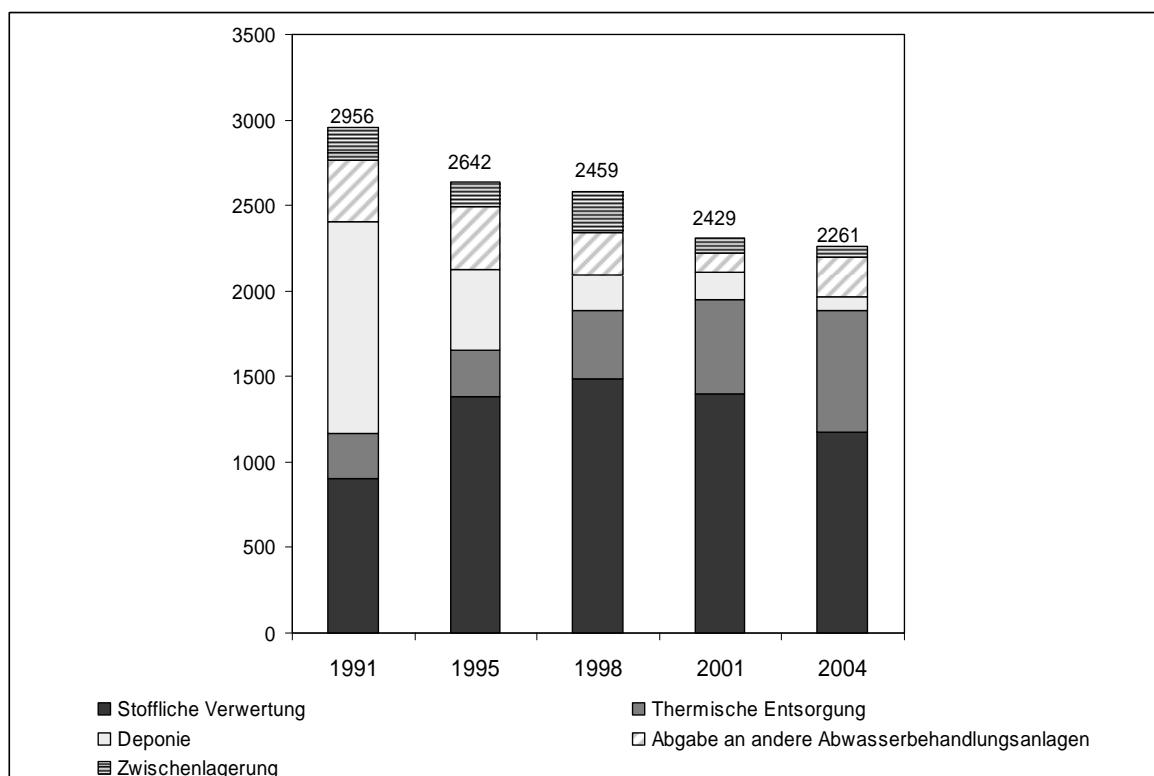
2.1.4 Klärschlammverwertung

2006 fielen in Deutschland jährlich etwa zwei Mio. Tonnen Klärschlamm an (Statistisches Bundesamt 2006).

Die Klärschlämme verteilten sich gemäß Abbildung 7 im Jahr 2004 auf die unterschiedlichen Entsorgungswege wie folgt:

- Stoffliche Verwertung: 52,0 %
- Thermische Behandlung: 31,5 %
- Abgabe an andere Abwasserbehandlungsanlagen: 10,2 %
- Deponie: 3,5 %
- Zwischenlagerung > 1 Jahr: 2,8 %

Abbildung 7: Klärschlammverbleib aus der biologischen Abwasserbehandlung in öffentlichen Kläranlagen*



*Quelle: Darstellung nach UBA 2008.

Der größte Teil wurde stofflich verwertet. Diese Verwertung erfolgte vorwiegend in der Landwirtschaft und bei landschaftsbaulichen Maßnahmen. Die thermische Entsorgung von Klärschlamm ist neben der stofflichen Verwertung der bedeutendste Verwertungsweg. Dabei sind unter thermischer Behandlung Verfahren der Monoverbrennung, der Mitverbrennung in z.B. Kraftwerken und Zementwerken sowie Sonderverfahren (z.B. Klärschlammvergasung) summiert.

Seit 2005 gilt das Deponierungsverbot für Klärschlämme aufgrund der höheren organischen Anteile, infolgedessen die thermischen Behandlungsverfahren weiter an Bedeutung gewonnen haben. Die stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau ist seit Ende der 90er-Jahre deutlich zurückgegangen, liegt seit 2003 jedoch stabil bei et-

wa 55 Prozent. Zukünftig ist mit stagnierenden oder leicht rückläufigen Mengen zu rechnen (Branchenbild 2008).

Klärschlamm besitzt eine Senkenfunktion für Schadstoffe, welche im Vergleich zu anderen Düngemitteln wie Bioabfallkompost oder Wirtschaftsdünger bei landwirtschaftlicher Nutzung ein Risikopotenzial für Böden und Umwelt darstellt. Untersuchungen des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen (MUNLV 2005) belegen, dass es gegenwärtig durch die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung zu Anreicherung verschiedener organischer Schadstoffe in Böden kommen kann. Beeinträchtigungen von Nahrungsmitteln bzw. Futtermitteln und auch des Grundwassers sind bei den derzeit angewendeten Klärschlämmen in Nordrhein-Westfalen nicht auszuschließen (Fragemann u.a. 2006). Andere Studien sehen keinen Beleg für eine eindeutige Ursache-Wirkung-Beziehung zwischen auf landwirtschaftliche Flächen aufgebrachten Klärschlämmen und Gehalten von z.B. Xenobiotika⁵ in den Böden (ifw 2006). Um die Auswirkungen genauer definieren zu können, ist ein weiteres Erfassen und Beobachten von Stoffströmen für Klärschlamm und auch für Kompost, Gärückständen, Gülle und Mineraldünger evtl. auf Bodendauerbeobachtungsflächen sinnvoll.

Der derzeitige Routinekontrollumfang von zehn Parametern gemäß EU-Klärschlammrichtlinie und der deutschen Klärschlammverordnung erfasst nur einen kleinen Ausschnitt der tatsächlich in Klärschlamm enthaltenen Schadstoffe. Eine umfassende Qualitätssicherung wird im Rahmen der Routinekontrollen hiermit nicht durchgeführt. Aus diesen Gründen haben sich verschiedene Bundesländer für eine kompromisslose Beendigung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung zugunsten der thermischen Entsorgung ausgesprochen (Baden-Württemberg, Bayern) (Fuhrmann und Kohl 2006). Die klare Position Baden-Württembergs zeigt sich in dem Verhältnis der unterschiedlichen Wege der Klärschlamm-entsorgung/-verwertung: Im Jahr 2006 wurden 68 Prozent aller anfallenden Klärschlämme verbrannt (Kaimer 2006), damit nahezu doppelt so viel wie im Bundesvergleich.

Im Rahmen von neuartigen Sanitärkonzepten wird der entstehende Klärschlamm in sehr kleinen Einheiten meist biologisch (Vergärung o.ä.) behandelt und als Dünger oder Kompost wiederverwendet. Die potenzielle Gefährdung von Boden und Grundwasser durch im Klärschlamm enthaltene Schadstoffe ist auch bei dieser Lösung noch gegeben.

Die derzeit relevanteste technische Alternative zur landwirtschaftlichen Klärschlamm-entsorgung besteht in der thermischen Verwertung (Mono- oder Mitverbrennung). Bei der Mitverbrennung spielen vor allem Hausmüllverbrennungsanlagen, Kohlekraftwerke sowie Anlagen zur Zementherstellung eine wesentliche Rolle.

Die thermische Verwertung lässt sich nicht nur als Großanlage, sondern auch für kleinere Städte (ca. 17.000 bis 170.000 Einwohner) realisieren, wie das österreichische Umwelt-

5 Xenobiotika (griech.: dem Leben fremde Stoffe) sind chemische Stoffe, die dem biologischen Stoffkreislauf eines Organismus fremd sind. Dazu gehören zum Beispiel synthetisch hergestellte Farbstoffe, Pestizide und chlorierte Lösungsmittel. Xenobiotika sind teilweise biologisch nur schwer abbaubar und haben unter Umständen eine toxische Wirkung. Teilweise reichern sie sich in bestimmten Organismen oder Teilen von Organismen an, Wikipedia 2008.

bundesamt am Beispiel von vier ausgewählten, am Markt befindlichen Verfahren (Verbrennung⁶, Pyrolyse⁷/Vergasung⁸) darstellt (UBA 2004).

Den dargestellten Technologien/Verfahren sind folgende Randbedingungen gemeinsam:

- Dezentrale Kleinanlagen (Einsatz bereits bei geringen Klärschlammengen möglich),
- Trocknung des Klärschlammes erfolgt durch z.B. Abwärme, Solarenergie usw.,
- Reduktion der Klärschlammengen durch thermische Behandlung,
- keine oder nur kurze Transportwege,
- Energiegewinnung (elektrische Energie, Wärme) durch verschiedene thermische Behandlungsmethoden,
- Reduktion der Geruchsemissionen,
- eventuelle Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm (Rohstoffgewinnung).

Besonders der Einsatz von dezentralen Kleinverbrennungsanlagen zur Klärschlamm-entsorgung stellt eine interessante Alternative gerade für den ländlich geprägten, schwach strukturierten Raum dar. So werden lange Transportwege, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch nachteilig sind, vermieden. Die dezentrale Entsorgung erfolgt direkt am Ort des Anfalls, die Energie für die Trocknung wird durch die anschließende Verbrennung erzeugt und fossile Brennstoffe werden zur Trocknung nicht mehr benötigt (Bogner u.a. 2008). Den Kläranlagenbetreibern bieten dezentrale Lösungen in eigener Obhut weiterhin langfristige Entsorgungs- und Kostensicherheit.

⇒ **Beispiel: Verfahren zur dezentralen Klärschlammverwertung**

Ein neues Verfahren zur dezentralen Klärschlammverwertung wird von dem ATZ Entwicklungszentrum und der Hans Huber AG entwickelt und zur Marktreife gebracht).

Durch die Kombination hocheffizienter Wärmetauscher (sogenannte Pebble-Heater) mit einer Mikrogasturbine wird neben der thermischen Verwertung des Klärschlammes gleichzeitig noch elektrische Energie gewonnen. Die Erstanlage (Demonstrationsanlage) ist für eine elektrische Leistung von 100 kW mit einer Behandlungskapazität von ca. 2.500 Mg TR/a (200.000 EW) konzipiert. Durch dieses neue Verfahren kann auch in kleinen Leistungsgrößen, mit elektrischen Wirkungsgraden bis 30 Prozent, Strom aus Feststoffen erzeugt werden (Bogner u.a. 2008).

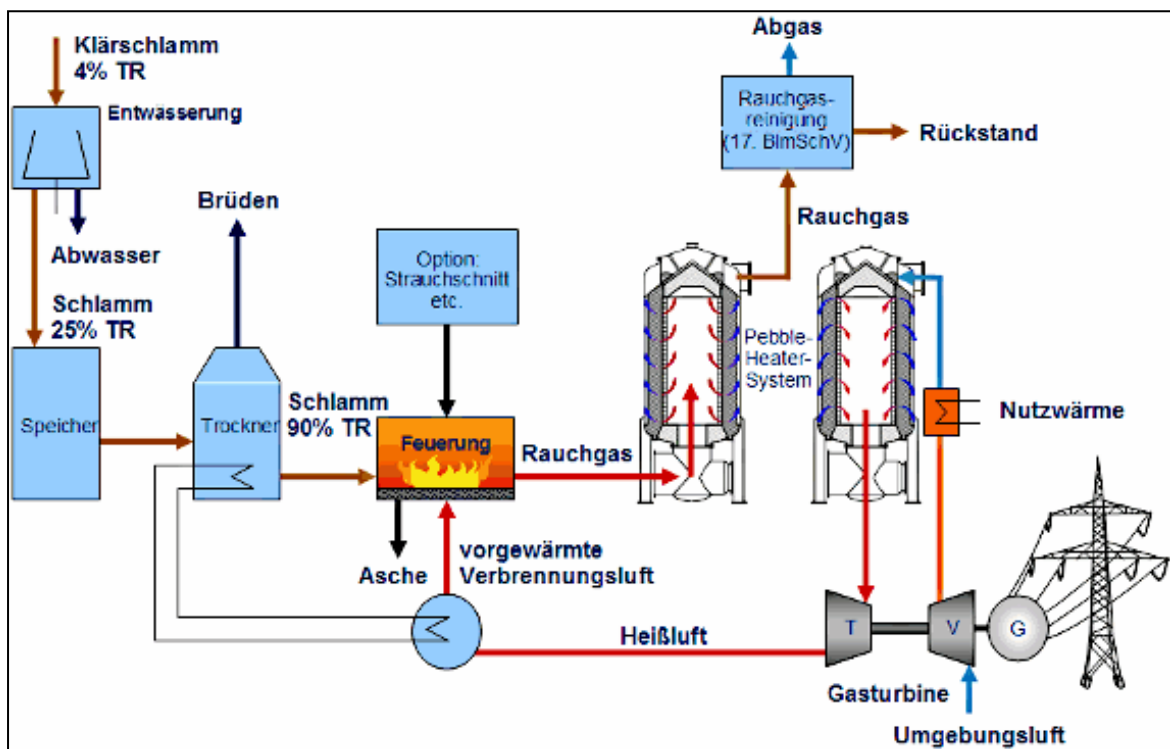
6 Eine Verbrennung ist eine Redoxreaktion des Materials mit Luftsauerstoff unter Abgabe von Wärme.

7 Pyrolyse (von griechisch: pyr = Feuer, lysis = Auflösung) ist die Bezeichnung für die thermische Spaltung chemischer Verbindungen, wobei durch hohe Temperaturen ein Bindungsbruch innerhalb von großen Molekülen erzwungen wird. Meistens geschieht dieses unter Sauerstoffausschluss (anaerob). Pyrolyse ist eine Form der Vergasung (siehe Fußnote 6).

8 Vergasen beschreibt einen chemisch-physikalischen Vorgang, bei dem ein Teil eines Feststoffs oder einer Flüssigkeit in ein gasförmiges Endprodukt überführt wird. Dies geschieht durch Erhitzung, gegebenenfalls unter einer speziellen, sauerstoffarmen Atmosphäre. Im Gegensatz zum Verdampfen erfolgt beim Vergasen eine Aufspaltung und Neuordnung bestehender chemischer Verbindungen durch Cracken bzw. Pyrolyse und/oder Reduktion bzw. partielle Oxidation. Vergasen ist also als Oberbegriff einer Reihe von chemischen Vorgängen zu betrachten, die als Gemeinsamkeit die Erzeugung eines chemisch veränderten gasförmigen Endproduktes haben.

Die Ziele dieses Verfahrens sind unter anderem die anfallende Menge an Klärschlamm auf ca. ein Achtel zu reduzieren, Transportemissionen zu verringern und einen langfristig gesicherten, umweltverträglichen und wirtschaftlichen Entsorgungsweg bereitzustellen, bei dem die Entsorgungskosten für die Abfallwirtschaft bzw. die Kommunen, kalkulierbar sind. Gleichzeitig wird ein hochwertiger Rohstoff zur Phosphorrückgewinnung erzeugt (Homepage: www.sludge2energy.eu).

Abbildung 8: Verfahrensablauf einer dezentralen Klärschlammverwertung mit dem sludge2energy®-Verfahren*



*Quelle: Hans Huber AG 2008.

Phosphorrückgewinnung

Das Element Phosphor ist einerseits lebensnotwendig für alle Organismen auf der Erde, andererseits kann es zu erheblichen Umweltbelastungen kommen, wenn Phosphor in zu großen Mengen in die Gewässer gelangt (Eutrophierung). Phosphor ist eine nicht substituierbare knappe Rohstoffressource, die in ausreichender Qualität nur noch für wenige Jahrzehnte zur Verfügung steht. Der weltweite Verbrauch an Phosphor liegt pro Jahr bei über 17 Mio. Tonnen Phosphor in Form von Mineraldüngern (Phosphaten). Gegenwärtig besteht für Deutschland und die Europäische Union eine vollständige Importabhängigkeit bei mineralischen Phosphat-Düngemitteln, während gleichzeitig phosphatreiche Abfälle und Abwässer entsorgt werden. Die in Abwasser und Klärschlamm enthaltene Phosphor-

menge entspricht in Deutschland etwa einem Viertel der jährlichen Phosphormineralimporte (UBA 2008).

Bei der Abwasserreinigung wird der Phosphor durch eine Simultanfällung mit Eisen- oder Aluminiumsalzen, häufig in Kombination mit einer erweiterten biologischen Phosphorelimination, bis zu 90 Prozent in den Klärschlamm überführt.

Eine Phosphorrückgewinnung kann entweder aus dem Klärschlamm selbst oder aus der Asche einer nachgeschalteten Klärschlammverbrennung erfolgen. Um das Phosphorpotenzial aus Aschen der Klärschlammverbrennung nutzen zu können, ist eine Monoverbrennung nötig, da nur so relevante Phosphorkonzentrationen zu erhalten sind. Im Bereich der Phosphorrückgewinnung aus Aschen besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf. Die Kosten für die Phosphatrückgewinnung mit den zuvor genannten Verfahrenstechnologien betragen zurzeit noch ein Vielfaches der derzeitigen Rohstoffkosten. Um Phosphate aus Klärschlamm oder -asche zurückzugewinnen, sind Verfahrensumstellungen und/oder Ergänzungen notwendig, die mit Investitionen und einem betrieblichen Mehraufwand verbunden sind. Außerdem hängen die Kosten für die Rückgewinnung von Phosphor sehr von den örtlichen Rahmenbedingungen ab (UBA 2004).

2.1.5 Grauwasserrecycling

Neben der Aufbereitung und ggf. Wiederverwendung des Gesamtabwasserstroms besteht die Möglichkeit, einzelne Abwasserteilströme gezielt abzutrennen bzw. zu fassen und einer Aufbereitung z.B. zur Wiedernutzung zuzuführen. Ein bekanntes Beispiel stellt in diesem Zusammenhang das Grauwasserrecycling dar, welches neben der Substitution von Trinkwasser durch Regenwasser zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Besonders interessant für das Grauwasserrecycling ist das leicht belastete Abwasser aus Badewannen und Duschen, Handwaschbecken und evtl. Waschmaschinen. In einem Wasser sparenden Haushalt entstehen in diesem Bereich täglich ca. 55 Liter Grauwasser pro Person (fbr 2007a), welcher natürlich erheblich von der Sanitärinstallation und den Nutzergewohnheiten abhängt. Dabei handelt es sich um in der Regel nur wenig mit organischen Substanzen und Nährstoffen belastetes Wasser mit einer vergleichsweise geringen mikrobiologischen Belastung. Das bei der Aufbereitung dieser Teilströme entstehende Brauchwasser ist hygienisch unbedenklich und für den Einsatz in Gewerbe und Haushalt für Nutzungen geeignet, die nicht zwingend Trinkwasserqualität erfordern. Das können z.B. Toilettenspülungen, Bewässerung oder Reinigungszwecke sein (vgl. Regenwassernutzung). Die Nutzung zum Waschen von Wäsche wird derzeit erprobt. Alternativ kann das aufbereitete Grauwasser im Untergrund versickert oder in Oberflächengewässer eingeleitet werden. Das Abwasser aus Küchen wird aufgrund des hohen Verschmutzungsgrades durch Fette und Speisereste selten im Rahmen des Grauwasserrecyclings aufbereitet sondern meist dem Schwarzwasser zugerechnet.

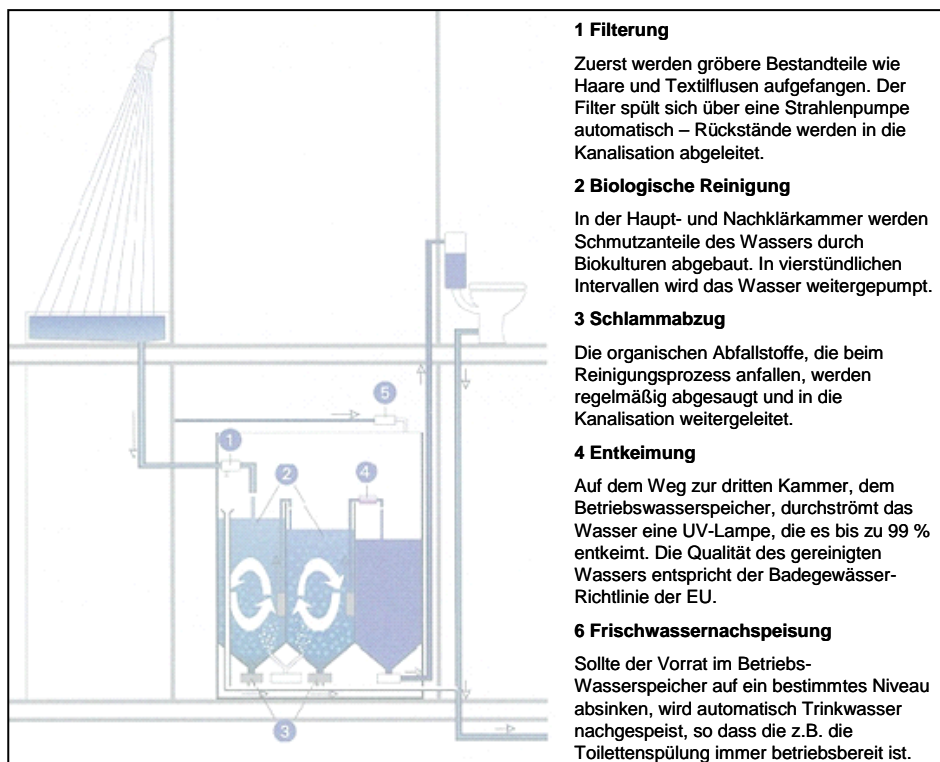
Die Aufbereitung von Grauwasser erfolgt in Deutschland ebenfalls mit den oben angeführten, im Rahmen der Abwasserbehandlung erfolgreich eingesetzten naturnahen sowie

technischen Verfahren. Kerpen und Zapf (2005) nennen für das Grauwasserrecycling besonders folgende Reinigungsverfahren:

- Pflanzenbeete,
- Belebungsanlagen,
- SBR-Anlagen,
- Rotationstauch-/tropfkörper-Anlagen,
- Membranfiltration.

Dabei stellt der Betrieb von Pflanzenbeeten die kostengünstigste Lösung zur Grauwasseraufbereitung dar. Zur Abtrennung von ungelösten Stoffen bieten sich Verfahren der Vorklärung wie z. B. Sedimentation oder Filtration an. Die Verfahrensauswahl richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten und den Qualitätsanforderungen, die abhängig von dem Verwendungszweck des aufbereiteten Wassers sind. Ein Beispiel einer häuslichen Grauwasserreinigungsanlage zur Wiederverwendung ist in Abbildung 9 dargestellt. Grauwasseranlagen werden in unterschiedlichen Größenordnungen angeboten und betrieben. Von kleinen dezentralen Anlagen für einzelne Haushalte bis hin zu semizentralen Anlagen für mehr als 200 EW existieren Beispiele (Rudolph und Schäfer 2001).

Abbildung 9: Funktionsschema einer häuslichen Grauwasseraufbereitungsanlage*



*Quelle: Karl-Ulrich Rudolph/Thomas Block. Der Wassersektor in Deutschland. Methoden und Erfahrungen. Berlin 2002, S. 55; www.umweltbundesamt.de/wasser/wsektor/wasserdoku/german/doku.pdf.

In Anbetracht der Tatsache, dass Spülmittel für Geschirrspülmaschinen einen hohen Phosphoranteil von meist mehr als 30 Prozent haben, könnte unter der Annahme, dass immer mehr Haushalte Geschirrspülmaschinen einsetzen, eine Phosphatfällung bei der Grauwasserreinigung notwendig werden (Peter-Fröhlich u.a. 2003).

In Deutschland bestehen keine gesetzlichen Qualitätsanforderungen an Betriebswasser aus Grauwasserrecyclinganlagen, lediglich die Erstellung und die In- bzw. Außerbetriebnahme ist dem örtlichen Gesundheitsamt anzuzeigen. Gemäß Trinkwasserverordnung ist eine strenge Trennung von Trink- und Betriebswassernetzen einzuhalten, weshalb Grauwasseranlagen ein separates Grauwasser- sowie Betriebswassernetz benötigen (Kerpen und Zapf 2005). Verfahrenstechnisch ist die jeweils gültige Landesbauordnung einzuhalten. In der Regel ist der Bau einer Grauwasserrecyclinganlage jedoch genehmigungsfrei. Die gültigen technischen Regeln und Normen sind bei der Erstellung zu berücksichtigen (z.B. DIN 1986, DIN 1988, DIN 2403) (Rudolph und Schäfer 2001).

Der besondere Vorteil des Grauwasserrecyclings ist, dass der Grauwasseranfall im durchschnittlichen Haushalt dauerhaft dem Betriebswasserbedarf entspricht oder sogar darüber liegt. Die Zweifachnutzung reduziert damit den häuslichen Trinkwasserverbrauch und den Abwasseranfall um ca. 30 Prozent. Sofern überschüssiges Betriebswasser direkt vor Ort versickert wird, reduziert sich der restliche Abwasseranfall auf ca. 40 Liter Küchen- und Fäkalabwasser pro Person und Tag. Das Recycling von Grauwasser bietet sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht wesentliche Vorteile: Es schont die Grundwasserressourcen, verringert den Chemikalien- und Energieeinsatz bei der Gewinnung und Bereitstellung von Trinkwasser und entlastet nachhaltig Klärwerke und Gewässer (fbr 2007a).

Einsatzgebiete für Grauwasseranlagen sind gemäß Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V. (fbr 2007a) im Besonderen:

- Ein- und Mehrfamilienhäuser,
- Hoteleinrichtungen,
- Wohn- und Altenheime,
- Schwimmbad- und Saunabetriebe.

Nach einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Fachhochschule Wiesbaden (Kerpen und Zapf 2005) lassen sich in Mitteleuropa bereits heute semizentrale Grauwasseranlagen ab einer angeschlossenen Nutzerzahl von etwa 150 bis 200 Personen (z.B. in Hotels) wirtschaftlich betreiben. Zu dem gleichen Ergebnis kommt eine Studie der Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V. (Rudolph und Schäfer 2001). Aufgrund des zu erwartenden Anstiegs der Kosten für Wasser und Abwasser wird es als ratsam erachtet, bei einem Neubau oder der Grundsanierung der Installation eines Wohnhauses in ein separates Rohrleitungsnetz für die Grau- oder evtl. auch Regenwassernutzung zu investieren. In Gebieten mit größerer Wasserknappheit (z.B. Südeuropa) erscheint das Grauwasserrecycling fast durchweg sinnvoll.

In Hotels und öffentlichen Einrichtungen (Sportanlagen, Schwimmbadanlagen, Wohn- und Altenheime) fallen relativ große Grauwassermengen mit hoher Regelmäßigkeit an. Praktische Beispiele gibt es in vielen Hotels, Verwaltungsgebäuden, Universitätseinrichtungen

usw. So war eine Amortisation der Kosten für die 1996 in dem 4-Sterne-Hotel Arabella-Sheraton (400 Betten) in Offenbach installierte semizentrale Grauwasseraufbereitungsanlage nach sieben Jahren geplant (UBA 2007).

Die Wirtschaftlichkeit von Grauwasserrecyclinganlagen hängt von folgenden Faktoren ab (Kerpen und Zapf 2005).

- Trink- und Abwassergebühren (variieren in Deutschland stark),
- Grauwassermengen (Duschgewohnheiten variieren stark),
- Investitionskosten (Anlagen, separates Rohrleitungsnetz),
- Betriebskosten (Wartung, Energie, Ersatzteile),
- Fördermöglichkeiten (Wassersparmaßnahmen werden nicht überall gefördert).

⇒ **Beispiel für ein Projekt semizentralen Grauwasserrecyclings:
Hotel Arabella, Offenbach**

Die 1996 in Betrieb genommene Grauwasseranlage des Arabella Hotels in Offenbach bereitet das Dusch- und Badewasser von 211 Zimmern auf. Die Anlage besteht aus einem Speicher (14 m³ Volumen), einem Rotationstauchtropfkörper, einem Sedimentationstank, einer mehrstufigen Biologie sowie einer nach geschalteten UV-Bestrahlung zur Desinfektion. Es werden ca. 5.470 m³ Trinkwasser pro Jahr eingespart. Die Grauwasserrecyclinganlage läuft seit Inbetriebnahme zur vollsten Zufriedenheit des Betreibers. Der Wartungs- und Kontrollaufwand liegt bei etwa einer h/Woche und der Gesamtenergiebedarf bei 1,5 kWh pro Kubikmeter verbrauchtes Betriebswasser. Die Investitionskosten beliefen sich auf 85.000 Euro netto, die Betriebskosten liegen bei 1.000 Euro pro Jahr. Die Amortisationszeit beträgt ca. 6,5 Jahre (fbr, 2007b; Nolde 2008).

2.1.6 Schwarzwasserbehandlung

Nach Abtrennung des Grauwassers aus dem häuslichen Abwasserstrom verbleibt das Schwarzwasser, welches neben Urin und Fäkalien in unterschiedlicher Menge, je nach Fassungssystem, Spülwasser enthält. Herkömmliche Schwemm- oder Vakuumtoiletten verwenden verschiedene Spülwassermengen zum gemeinsamen Abtransport von Urin und Fäkalien. Bei Trockentoiletten, welche durch technische Fortentwicklungen auch heutigen Komfort- und Hygienebedingungen entsprechen, werden die Fäkalien und der Urin gemeinsam ohne Spülwasser gesammelt.

Herkömmlich wird das Schwarzwasser in konventionellen Schwemmtiletten erfasst und mithilfe von Spülwasser über das zentrale Kanalsystem einer zentralen Kläranlage zugeführt, wobei es mit Grauwasser, Industrieabwasser und bei Mischsystemen mit Regenwasser verdünnt und behandelt wird. Diese Form der Verdünnung und Volumenvergrößerung verhindert eine gezielte Rückgewinnung und Nutzung der im Abwasser enthaltenen wertvollen Inhaltsstoffe (wie z.B. Stickstoff und Phosphor). Im Klärschlamm einer konven-

tionellen Kläranlage findet sich nur ein Bruchteil der im Abwasser enthaltenen Nährstoffe, der genutzt werden kann.

Eine Alternative zu dieser zentralen Form der Schwarzwasserbehandlung besteht in einer dezentralen, getrennten Schwarzwassererfassung und semi- bzw. dezentralen Behandlung, welche eine Nährstoffrückgewinnung bzw. -nutzung ermöglicht. Das Schwarzwasser kann z.B. mithilfe eines Vakuumsystems konzentriert, d.h. mit wenig Spülwasser verdünnt, oder direkt über Trockentoiletten gesammelt und einer Behandlung zugeführt werden.

Je nach Flüssigkeitsanteil und Verwertungsziel bieten sich vor allem die folgenden Formen der Schwarzwasserbehandlung an:

- Anaerobe Behandlung (Biogasanlage),
- Kompostierung (auch aerob thermophil – Nasskompostierung).

Anaerobe Behandlung in einer Biogasanlage

Bei der Vergärung von Fäkalien bzw. Schwarzwasser kann in einer Biogasanlage unter Luftabschluss (anaerob) erfolgen. In dem Fermenter entsteht bei den Gär- und Fäulnisprozessen Biogas, das je nach Ausgangsstoff aus 40-75 Prozent Methan, 25-55 Prozent Kohlendioxid, bis zu zehn Prozent Wasserdampf sowie darüber hinaus aus geringen Anteilen Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff besteht. Dieses lässt sich zur Stromerzeugung verwenden. Die vergorenen Rohstoffe (Gärrückstand) können als landwirtschaftliches Düngemittel verwendet werden. Auch eine Rückgewinnung von Stickstoff und Phosphor ist möglich. Ein Beispiel für die Nutzung der Biogastechnologie zur Behandlung von Schwarzwasser im Rahmen eines innovativen Sanitärkonzeptes stellt das in der Wohnsiedlung Flintenbreite umgesetzte „Vakuum-Biogas-konzept“ dar. (siehe Kapitel 3.1) Der Behandlung in der Biogasanlage gehen dort eine Vermischung von Schwarzwasser und zerkleinerten Bioabfällen sowie eine Hygienisierung (zehn Stunden, bei 55°C) voraus. Durch die gemeinsame Vergärung von Schwarzwasser und häuslichen Bioabfällen in der Biogasanlage (350 Einwohner) wird der Energieinhalt der beiden Teilströme nutzbar gemacht. Das bei der Vergärung entstehende Biogas wird in einem BHKW zur Energieerzeugung genutzt. Die dabei entstehende Abwärme versorgt sowohl die Biogasanlage mit der erforderlichen Prozesswärme als auch das angeschlossene Wärmeversorgungsnetz der Wohnsiedlung.

Kompostierung von Fäkalien

Bei der Kompostierung (auch Rotte) von Fäkalien werden die organischen Bestandteile unter Sauerstoffzufuhr (aerob) durch Mikroorganismen und Kleinlebewesen zersetzt. Dabei wird die Biomasse wieder in ihre Einzelbestandteile zurückgeführt und steht damit einer erneuten Nutzung durch höhere Pflanzen als Nährstoff wieder zur Verfügung. Durch die Kompostierung ist ein weitgehendes Recycling der im Abwasser enthaltenen Nährstoffe möglich.

Abhängig vom Wassergehalt der behandelten Fraktionen können folgende Verfahrensmöglichkeiten unterschieden werden (nach Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2005):

- Kompostierung von Fäkalien ohne (oder mit wenig) Spülwasser in einer Komposttoilette im Haus mit anschließender Nachkompostierung der Fäkalien gemeinsam mit biogenen Abfällen im Garten (ländliche Gebiete);
- Entwässerung des Schwarz- oder Braunwassers in einem „Rottebehälter/Filterbehälter“ im Haus oder außerhalb des Hauses mit anschließender Kompostierung der Fäkalien gemeinsam mit biogenen Abfällen im Garten (besonders bei größeren Wassergehalten des Schwarzwassers);
- Kompostierung der entwässerten Fäkalien gemeinsam mit Grünschnitt und eventuell auch Biotonnenmaterial in einer bestehenden lokalen oder zentralen Kompostierungsanlage (zentrale Anlagen sind nur bis zu einer gewissen Transportentfernung wirtschaftlich von Interesse).

Neben der in Deutschland überwiegend angewendeten Trockenkompostierung besteht die Möglichkeit der sogenannten *Nasskompostierung*, die z.B. in Schweden Anwendung findet (siehe auch Skjelhaugen 1998). In einem Projekt, über das Malmen und Palm (2003) berichten, wurde Schwarzwasser gemeinsam mit aerob thermophil behandelt. Hierbei wurde Schwarzwasser von Campingplätzen gemeinsam mit Bioabfällen bei einem Wassergehalt von 90 bis 97 Prozent Feuchtmasse und einer Temperatur von mindestens 55°C feucht kompostiert. Die Rottedauer betrug ca. 30 Tage bei intensiver Belüftung. Der Vorteil dieses Verfahrens lag in dem nur unerheblichen Nährstoffverlust. Nachteilig stellen sich der zu erwartende hohe Energiebedarf für Belüftung und Heizung des Reaktors sowie der hohe Wassergehalt im Endprodukt dar. Letzterer führt zu einem erschwerten Handling bzw. Schwierigkeiten bei der Lagerung des Endproduktes. Dieses muss entwässert werden, wobei Abwasser entsteht, welches gesammelt und entsorgt werden muss.

Das Schwarzwasser wird für ca. acht bis zwölf Monate behandelt. Hierbei können bspw. Würmer als Rottebeschleuniger zugegeben werden (siehe Kapitel 3.3 Kläranlage Stahnsdorf). Die entwässerten Feststoffe können z.B. auf Kompostmieten gemeinsam mit Bioabfällen weiter kompostiert (mindestens ein Jahr) und anschließend landwirtschaftlich verwendet werden (Gajurel u.a. 2003).

Problematisch stellt sich je nach Behandlungsverfahren der hohe Wasseranteil des Schwarzwassers (Urin und Spülwasser) dar, der unter Umständen eine vorgeschaltete Entwässerungsstufe oder Phasentrennung erfordert. Rottebehälter eignen sich zur Entwässerung und Vorkompostierung von Schwarzwasser.

Die flüssige Phase kann z.B. als Flüssigdünger verwendet, weiter aufkonzentriert oder behandelt und erneut als Toilettenspülwasser verwendet werden. Als Behandlungsverfahren kommen z.B. die Membranbelebung für eine Wiederverwendung des Wassers oder

die MAP-Fällung⁹ zur Gewinnung von Mineraldünger in Frage. Im Anschluss an die Membranbehandlung kann das Wasser mithilfe der UV-Bestrahlung¹⁰ entfärbt sowie desinfiziert und damit einer weiteren Nutzung im Haushalt zugänglich gemacht werden.

Bei großen Wasseranteilen im Schwarzwasser, wie sie z.B. bei der Verwendung herkömmlicher Schwemmtolietten entstehen, kann sich auch der von U. Braun entwickelte „Schwarzwasserkreislauf“ (Dücker 2004) als Behandlungsverfahren anbieten. Hierbei werden die im Schwarzwasser enthaltenen Fäkalien mithilfe von z.B. Siebverfahren abgetrennt und zur Herstellung von Kompost verwendet. Aus der verbleibenden flüssigen Phase kann Mineraldünger oder auch Brauchwasser zur erneuten Verwendung z.B. als Toilettenspülwasser gewonnen werden. (Der Einsatz einer Biogasanlage in Kombination mit einem Schwarzwasserkreislauf zur Behandlung der festen Phase lohnt sich gemäß Dücker 2004 erst ab einer Einwohnerzahl von 5.000 bis 6.000 EW.)

Eine gemeinsame Behandlung des Schwarzwassers mit *Bioabfällen* kann je nach Situation eine interessante Option zur gleichzeitigen Verwertung der in den Bioabfällen enthaltenen organischen Bestandteile darstellen, wie das Beispiel der Wohnsiedlung Flintenbreite zeigt. Voraussetzung für die gemeinsame Behandlung stellt in vielen Fällen eine vorherige Zerkleinerung (Schreddern) der Bioabfälle dar, welche z.B. durch Untertischgeräte in den Küchen der angeschlossenen Haushalte zu realisieren ist. Eine Störung der mikrobiologischen Prozesse, wie dies zum Beispiel bei der Kompostierung durch den hohen Wassergehalt bzw. ein geringes Luftporenvolumen der Bioabfälle der Fall sein kann, ist vor einer gemeinsamen Nutzung zu überprüfen. Bei direkter Zugabe der Bioabfälle über die Toilette kann es durch den hohen Anteil an leicht abbaubarer organischer Substanz im Bioabfall im Zwischenspeicher (im Fußbereich von Kleinkammertoiletten bzw. im Kompostbehälter von Großkammertoiletten) zur Entstehung geruchsintensiver Stoffwechselprodukte kommen. Dies kann durch eine spätere Zumischung beispielsweise erst in einer externen Nachkompostierung unterbunden und eine Hygienisierung des Rottegutes durch eine intensive Selbsterhitzung aufgrund der leicht abbaubaren organischen Substanzen erzielt werden (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2005).

Ein geringer (Fremd-)Wasseranteil wirkt sich in der Regel positiv auf die weiteren Behandlungsschritte des Schwarzwassers aus, weshalb eine Urinseparation und damit Stoffstromtrennung in Gelb- und Braunwasser vorteilhaft ist. Diese weitergehende Teilstromerfassung ermöglicht zudem eine gezielte und effektivere Nährstoffrückgewinnung bzw. -nutzung, was besonders im Hinblick auf eine nachhaltige Umgestaltung der Abwasserwirtschaft einen wesentlichen Ansatzpunkt darstellt. Mit dieser Thematik beschäftigt sich das folgende Kapitel.

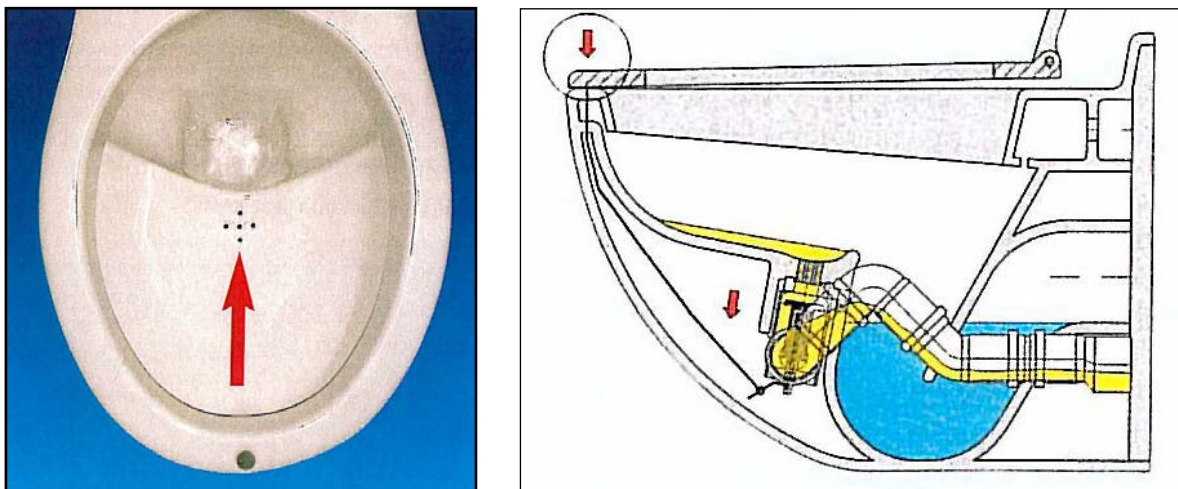
9 Fällung von Phosphor und Nitrat aus Urin durch Zugabe von Magnesium Oxid zur Produktion von Magnesium-Ammonium-Phosphat.

10 Hygienisierungsverfahren für Abwässer mit UV-Strahlen und Desinfektionsverfahren u.a. für Trinkwasser.

2.1.7 Gelbwasserkonzepte

Eine getrennte Erfassung des Urins kann mithilfe von wasserlosen Urinalen (überwiegend in öffentlichen Toiletten) sowie mit Trenntoiletten (auch „No-Mix-Toiletten“ oder „Urin-Separationstoiletten“ genannt, siehe Abbildung 10) erfolgen. Diese Technologien ermöglichen eine einfache Sammlung und/oder Behandlung des Gelbwassers.

Abbildung 10: Aufsicht und Mechanismus einer Urin-Separationstoilette*



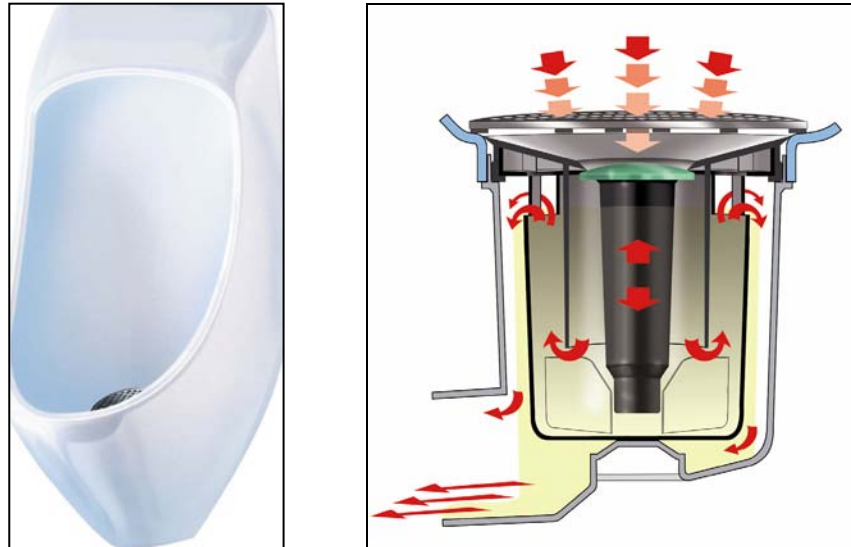
*Quelle: Roediger Vakuum + Haustechnik GmbH 2007.

Das beispielhaft in Abbildung 10 dargestellte Toilettenmodell der Firma Roediger sammelt den Urin unverdünnt. Die vordere Erhebung leitet den Urin in die dafür vorgesehene Öffnung ab. Das darunter befindliche Ventil des Urin-Ablaufs ist im Ruhezustand geschlossen. Durch eine mechanische Belastung des Toilettensitzes beim Setzen des Benutzers wird eine Mechanik betätigt, die den Ablauf öffnet und somit den Urin getrennt ableitet. Durch Erheben vom Toilettensitz wird das Ventil wieder geschlossen. Das Spülwasser (ca. vier Liter) spült den vorderen Bereich und wird über den hinteren Bereich zusammen mit den Feststoffen (Fäkalien, Toilettenpapier) entsorgt. Der Urin wird wasserfrei abgeleitet.

Weitere Modelle befinden sich am Markt und werden in den skandinavischen Ländern seit Jahren verwendet.

Zur wasserfreien Urinableitung dienen auch wasserlose Urinale wie z.B. das Modell „Urimat“, dargestellt in Abbildung 11. Dabei müssen Männer ihre Gewohnheiten nicht ändern, wie dies bei Urin-Separationstoiletten, die nur im Sitzen funktionieren, erforderlich ist.

Abbildung 11: Ansicht und Mechanismus eines wasserlosen Urinals, System „Urimat“*



*Quelle: Urimat AG 2008.

Die Becken sind laut Herstellerangaben aus einem Spezialkunststoff (Polykarbonatblend) gefertigt, welcher eine weitestgehend glatte und porenfreie Oberfläche aufweist, in welche Bakterien und Urin nicht eindringen können. Die isolierende Oberfläche hat einen hohen Wasserabweisungsgrad und lässt den Urin weitgehend rückstandsfrei abfließen. Der Urinablauf ist geruchsdicht verschlossen und wird mithilfe eines Sensors aktiviert. Im Inneren des Urinals befindet sich ein Siphon (Geruchsverschluss) aus Kunststoff mit einem hydrostatischen Auftriebskörper als Dichtungseinsatz (siehe Abbildung 11). Der hydrostatische Auftriebskörper ist so eingestellt, dass er während der Benutzung des Urinals nach unten gedrückt wird. Läuft kein Urin mehr in den Siphon, steigt der Auftriebskörper wieder nach oben gegen die Gummilippe und dichtet so die Einlassöffnung geruchsfrei ab. Über die Überlauföffnungen des Siphons wird der Urin in die Kanalisation geleitet.

Der Urin hat bei weniger als ein Prozent des Volumens am häuslichen Abwasser den größten Teil an Stickstoff (80 Prozent) und Phosphor (55 Prozent). Damit enthält er in hochkonzentrierter Form die höchste Menge an Nährstoffen aus dem Haushaltsabwasser bei vergleichsweise geringer Keimbelastung. Das bietet ideale Voraussetzungen, diesen separat zu erfassen, zu sammeln und anschließend die enthaltenen Nährstoffe als Dünger wiederzuverwenden. Dabei ist die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe aus Urin vergleichbar der aus synthetisch hergestelltem Mineraldünger und wesentlich höher als die von Kompost (Jönsson u.a. 1999).

In Schweden liegen aufgrund der in großen Landstrichen sehr dünnen Siedlungsdichte seit mehr als 15 Jahren Erfahrungen im Einsatz dezentraler Sanitärtechnologien mit getrennter Urinerfassung und landwirtschaftlicher Verwertung vor (Niederste-Hollenberg u.a. 2002). 1999 waren in Schweden etwa 3.000 urinseparierende Wassertoiletten installiert (Hellström und Johansson 1999). Nach einer ausreichend langen Lagerzeit, die die Hy-

gienisierung des Gelbwassers sicherstellen soll, kann dieses als Flüssigdünger, der überwiegend aus Ammonium besteht, auf landwirtschaftliche Felder aufgebracht werden. Um Geruchsbelästigungen und Ammoniakverluste zu vermeiden, erfolgt die Aufbringung mithilfe einer bestimmten Technik, bei der der Dünger direkt in die Bodenkrume eingearbeitet wird. Ist diese Aufbringungstechnik optimiert, liegen die Verluste zwischen einem und drei Prozent, sodass die Effizienz der Düngung mit Urin als sehr gut bezeichnet werden kann (Niederste-Hollenberg u.a. 2002). Eine Aufbringung auf Grasland ist in verdünnter Form möglich.

Erste Untersuchungen zu hygienischen und pharmazeutischen Parametern lassen vermuten, dass menschlicher Urin unbedenklich als Dünger landwirtschaftlich genutzt werden kann, wenn entsprechende Randbedingungen bei Speicherung und Aufbringung berücksichtigt werden. Eine Mindestspeicherzeit von sechs Monaten wird von verschiedenen Stellen empfohlen (Höglund u.a. 1998). Kontakt des gespeicherten Urins mit Luft sollte verhindert werden. Bisher fehlen jedoch detaillierte Erkenntnisse darüber, ob eventuell im Urin enthaltene Pharmazeutika, endokrin wirksame Substanzen oder Keime die Lagerungszeit überdauern, und welche Auswirkungen das bei der landwirtschaftlichen Verwertung haben könnte. Diese Problematik wird in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht (Niederste-Hollenberg u.a. 2002, Paris und Wilderer 2002). Das hygienische Risiko wird aus Erfahrungen in Schweden als vernachlässigbar gering eingeschätzt, ausgenommen eine Kreuzkontamination des Urins aus dem fäkalen Material, was besonders bei Durchfallerkrankungen oder einer nicht bestimmungsgemäßen Nutzung der Toilette gegeben sein kann. Je nach Toilettentyp kann das Risiko einer solchen Kontamination unterschiedlich hoch sein.

Generell ist bei der Gelbwassernutzung durch landwirtschaftliche Verbringung nicht auszuschließen, dass durch das Gelbwasser Stoffe in den Boden gelangen, die eine schädigende Wirkung auf Bodenorganismen haben. Aus diesem Grund besteht weiterer Forschungsbedarf bzgl. der zu großen Teilen mit dem menschlichen Urin ausgeschiedenen Pharmakarückstände und endokrin wirksamer Substanzen, deren Vorkommen und Wirkung erst ansatzweise erforscht sind. Bei einer Urinwiedernutzung muss ausgeschlossen werden, dass Arzneimittelrückstände und endokrin wirksame Verbindungen in den Boden oder die Gewässer gelangen. Einer möglichen Resistenzentwicklung gegenüber Antibiotika in Biofilmen und in Belebtschlamm kann durch eine Teilstrombehandlung und insbesondere die getrennte Schwarzwasserbehandlung, z.B. durch anaerobe Behandlung und Hygienisierung reduziert werden.

Verschiedene Verfahren für eine Gelbwasserbehandlung (Vakuumverdampfung¹¹, Dampfstrippung¹², Fällung¹³, Ozonierung¹⁴, UV-Bestrahlung und Verfahrenskombinatio-

-
- 11 Thermische Reaktion, bei der eine Flüssigkeit bei einem geringeren Druck als Umgebungsdruck verdampft wird. Gelbwasser kann in Klarwasser und ein die Nährstoffe, aber auch z.B. Arzneimittelrückstände enthaltene Konzentrat mit geringem Volumen separiert werden.
 - 12 Chemisch-physikalisches Verfahren zum Austreiben flüchtiger Stoffe aus einer wässrigen Lösung, z.B. Urin, und Überführung in die Gasphase mithilfe von Dampf (oder auch Luft).
 - 13 Ein chemisches Verfahren zur Überführung gelöster Verbindungen in einen ungelösten Zusatz durch Zugabe geeigneter Chemikalien.
 - 14 Verfahren der Entkeimung und Desinfektion durch Zugabe von Ozon als Oxidationsmittel.

nen) mit dem Ziel der Wasserwiedernutzung oder der gezielten Nährstoffrückgewinnung (Phosphate, Nitrate etc.) für industrielle Zwecke werden derzeit im Rahmen von Forschungsvorhaben untersucht (Peter-Fröhlich u.a. 2006). Ein interessanter Ansatz um die erforderlichen Speichervolumina zu reduzieren und eine Nährstoffaufkonzentration zu ermöglichen bestehen in der Nutzung von Trocknungsverfahren (z.B. Umkehrosmose, Eindampfung, Gefrierkonzentration, Strippung oder Struvit-Produktion: MAP-Fällung). Nach Untersuchungen an der Lulea University of Technology lassen sich mit einer Kombination aus Nitrifikation und Trocknung das Urinvolumen auf zehn Prozent der ursprünglichen Menge reduzieren. Diese konzentrierte Lösung enthält 70 Prozent der im Urin ursprünglich enthaltenen Nitratmenge. Andere Experimente erzielten ähnliche Ergebnisse und zeigten, dass eine Trocknung des Urins sogar ohne Nitratverluste möglich ist (Hellströmu.a. 1998).

Eine gezielte Nährstoffextraktion bzw. eine Behandlung des Urins erscheint vor allem in semi- oder zentralen Anlagen wirtschaftlich und technisch sinnvoll. Nach den Untersuchungen der EAWAG (Larsen und Lienert 2007) liegt das Problem in diesem Zusammenhang vor allem in der Frage des Transports.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Urin vom Speicher wegzuführen, wenn dieser nicht dezentral vor Ort aufbereitet werden soll:

- Tankwagen,
- separate Leitungen oder
- die bestehende Kanalisation.

Der Abtransport mithilfe von *Tankwagen* stellt eine relativ aufwendige und kostenintensive Lösung dar. Ein *separates Leitungsnetz* ist in den meisten Fällen ebenfalls eine sehr teure Variante. Die technische Umsetzung könnte aber auch auf dem einfachen Prinzip der zeitlichen Trennung von Urin- und Abwassertransport basieren, um den Bau eines zusätzlichen Kanalnetzes zu umgehen. Eine zeitliche Trennung nutzt den Vorteil, dass die Kanalisation in der Nacht nur wenig Wasser führt. Der Urin kann in Trenntoiletten separat gesammelt und anschließend in kleinen Haustanks zwischengelagert werden. Bei Trockenwetter werden die Tanks nachts ferngesteuert geöffnet (z.B. durch Modulation im Elektrizitätsnetz) und der Urin fließt durch die *bestehende Kanalisation* der zentralen Kläranlage zu. Hier kann der Urinstrom einer besonderen Behandlungsanlage zur Verarbeitung zu Dünger zugeführt werden.

Vorteile einer konzentrierten Ableitung des Urins durch die bestehende Kanalisation und einer separaten Behandlung im Rahmen der Abwasserreinigung sind:

- Weiternutzung der bestehenden Infrastruktur,
- Ausgleich der Stickstoffbelastung der Kläranlagen, dadurch Steigerung der Denitrifikationsleistung ohne Ausbau; bei vollständiger Urinabkopplung theoretisch Rückbau zur Kläranlage ohne Nährstoffelimination möglich: Vereinfachung Betrieb, Verzicht auf teure und ressourcenintensive Steuerung, Reduzierung Energieverbrauch für Sauerstoffeintrag, erhöhte Biogasproduktion (Larsen und Udert 1999).

Problematisch bei der beschriebenen Lösungsmöglichkeit ist die fehlende chemische Stabilität des Urins. Durch die enzymatische Spaltung von Harnstoff wird Ammoniak produziert, was zu einem Anstieg des pH-Wertes und Korrosionsproblemen durch Ammoniakausgasungen führen kann. Soll die Stabilisierungstechnologie ressourceneffizient sein, minimieren sich die Möglichkeiten. Ein weiteres Problem kann die mikrobiologische Kontamination des Urins in der Kanalisation oder bereits in den Trenntoiletten darstellen (Larsen und Udert 1999). Zu bedenken ist weiterhin, dass bei unvorhersehbaren, übermäßigen Regenfällen eine große Menge an Urin aus der Kanalisation ungereinigt in die Gewässer gelangen kann. Zudem könnten Geruchsprobleme auftreten. Die EAWAG sieht eine gute Zwischenlösung für den Urintransport in einer Verteilung der Einleitung über 24 Stunden, um so die Urinspitzen (z.B. am Morgen) zu mildern.

Eine Alternative zu den teuren Möglichkeiten des Urintransports könnte eine dezentrale Behandlung darstellen, die jedoch wie oben bereits beschrieben derzeit in der Forschung und damit noch nicht ausgereift, deren Wirtschaftlichkeit nicht unbedingt gegeben und aufgrund der technischen Anforderungen dezentral vermutlich nicht zufriedenstellend zu lösen ist (Larsen und Lienert 2007).

Untersuchungen von Fröhlich u.a. (2006) bei Nutzern von neuartigen Schwerkrafttrenntoiletten sowie Vakuumseparationstoiletten zeigen, dass beide Toilettentypen grundsätzlich akzeptiert werden, jedoch bei beiden Formen Mängel bei der Spülung bestehen. Für eine Einführung in größerem Maßstab erscheinen weitere Entwicklungsschritte auf dem Bereich der Sanitärtechnik erforderlich. Typische Fehlerquellen der ersten Toiletten waren zu dünne Leitungen und die Verwendung von Metallleitungen. Viele Quellen betonen die Relevanz der Information der Nutzer über Funktionsweise und erforderliche Nutzungsarten, um die gewünschten Ziele zu erreichen. Die Einschätzungen von Fröhlich u.a. (2006) werden durch umfangreiche Studien im Rahmen des Forschungsprojektes „Novaquatis“ der EAWAG (Larsen und Lienert 2007) mit 1.750 Nutzern bestätigt. Demnach stehen die Nutzer der Urinseparationstechnologie mithilfe von NoMix-Toiletten sehr positiv gegenüber, besonders in öffentlichen Gebäuden. Die Weiterentwicklung durch die Sanitärindustrie ist jedoch erforderlich, um eine breite Anwendung wirtschaftlich interessant zu machen und die Akzeptanz durch Komfortverbesserung und technologische Optimierung weiter zu erhöhen. Besonders wichtig ist eine Optimierung der Effizienz der Urintrennung: Die heutigen NoMix-Toiletten fangen erst 60–75 Prozent des Urins auf. Aber auch die heute erhältlichen Modelle lassen sich bei sorgfältiger Begleitung einsetzen, um zu weiteren Verbesserungen der Urinseparierung beizutragen. Für die Urinspülung werden bei den heute erhältlichen Toilettenmodellen zwischen ca. 0,2 und sechs Liter Wasser benötigt. Die Weiterentwicklung strebt eine wasserfreie Sammlung an, die für geringe Speicher- und Behandlungsvolumina besonders wichtig ist (Otterpohl u.a. 1999). Diese wird durch das oben dargestellte Toilettenmodell (Abbildung 10) realisiert. Hierbei ist der Urinablauf nur bei Belastung des Toilettensitzes geöffnet und schließt sich sofort bei Entlastung. Durch diesen Mechanismus wird der Urin ohne Verdünnung durch das Spülwasser gesammelt und fällt in konzentrierter Form zur Verwertung der Nährstoffe an.

Die bisher gesammelten Erfahrungen mit Gelbwasserkonzepten lassen den Schluss zu, dass es sich um eine auch für den urbanen Bereich sinnvoll einsetzbare Technik handelt,

die jedoch entwicklungsbedürftig ist. Mit den heute verfügbaren Separationstoiletten kann mit gewissen Einschränkungen der Einstieg in die Gelbwassertechnik erreicht werden. Unter Nutzung der bestehenden Abwasserinfrastruktur kann die Technologie der Urinseparation einen Transformationsprozess in Richtung eines dezentralen Abwassermanagements unterstützen (siehe Kapitel 3). Eine mögliche Kombination der Urinseparation mit der bestehenden zentralen Abwasserentsorgungsinfrastruktur kann z.B. die Verwendung traditioneller Schwemmtoiletten mit einer Urinseparation darstellen. Das gesammelte Gelbwasser kann dezentral gespeichert und stabilisiert werden. Das konzentrierte Brauwasser kann über die existierenden Strukturen einer Behandlung in zentralen oder semi-zentralen Kläranlagen zugeführt werden (Otterpohl u.a. 1997).

⇒ **Beispiel: Urinseparation und -nutzung GTZ-Hauptgebäude, Eschborn**

Die Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) verfolgt seit 2006 in ihrem sanierten Hauptgebäude in Eschborn unter anderem ein Urinnutzungskonzept. Zu diesem Zweck werden 56 Urinseparationstoiletten (Roediger) und 25 wasserlose Urinale (Fabrikat: Keramag Centaurus) betrieben. Der Urin wird über separate Freispiegelleitungen (Nennweiten: DN 50, 80 bis 100, Material: Gusseisen mit Email-Beschichtung) den Tank im Keller des Gebäudes zugeführt. Diese bestehen aus Polyethylen (PE) und haben ein Gesamtvolumen von zehn m³. Hier wird der Urin gesammelt und von dort einer Behandlung zugeführt (MAP-Fällung und Ammonium-Strippung). Für die Hygienisierung sorgt eine zusätzliche Lagerzeit. Der so hygienisierte Urin wird landwirtschaftlich als Dünger verwendet.

*Quelle: GTZ, 2006.

2.2 Regenwasserbewirtschaftung und -nutzung

Die Nutzung von Regenwasser hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Dies gilt sowohl für private und öffentliche Gebäude wie für eine Vielzahl von gewerblichen Bereichen. Dabei kann die Regenwasserbewirtschaftung nach Ansicht einiger Autoren wesentliche Vorteile bieten, die über die rein ökonomischen Vorteile privaten Wassersparens hinausgehen.

- Eine dezentrale Versickerung von Niederschlagswasser unterstützt die Grundwasserneubildung.
- Durch den Rückhalt in Speichern und die Nutzung/Versickerung von Regenwasser werden die Wasserabflüsse aus Siedlungsgebieten reduziert und verzögert. Dadurch werden Mischwasserstoßbelastungen der Kläranlagen gemildert bzw. vermieden.
- Die Nutzung von Wärme aus dem Abwasser im Schmutzwasserkanal wird durch die fehlende Verdünnung und Abkühlung durch Regenwasser sowie die verringerten Wassermengen erleichtert bzw. effizienter.

- Aufgrund von Retention und zeitlich verzögerter Ableitung bietet die Regenwasserabkopplung wesentliche Vorteile auch für den Hochwasserschutz.
- Gewässerbelastungen durch mikrobiologische Organismen und Schwermetalle, wie diese im Fall von Regenwasserabschlägen aus einem Mischsystem entstehen können, werden vermieden. Die bei Mischwasserabschlägen entstehenden Belastungen stellen die größten Schwermetallquellen in den Gewässern dar (ATV-DVWK 2002).
- Bei der Mulden- und Flächenversiegelung auf begrünemtem Untergrund findet eine intensive Reinigung des Wassers statt.
- Das Regenwasser kann zur Gestaltung und Verbesserung von Wohnarealen eingesetzt werden. Es ist gut integrierbar in Grünbereiche und ermöglicht vielfältige Bepflanzungen.
- Die Regenwasserversickerung bedingt nur einen geringen technischen Aufwand. Die entstehenden Kosten sind „dezentralisiert“ und die Investitionen können in Teilen auf die Zukunft verlagert werden.

Mit der Abkopplung befestigter Flächen von der Kanalisation können aufgrund einer signifikanten Abflussreduzierung in Spitze und Volumen:

- Überlastungen im Netz behoben,
- Überflutungen reduziert und
- natürliche Wasserkreisläufe gestärkt werden.

Das Ableitungssystem gewinnt, auch vor dem Hintergrund des Klimawandels, durch Nutzung von Abkopplungspotenzialen an Sicherheit (Becker 2007), da für die Ableitung zunehmend zu erwartende Extremregenereignisse eine größere Kanalkapazität zur Verfügung steht. Die Abkopplung des Regenwassers von der Kanalisation stellt damit eine weitere Möglichkeit der nachhaltigen Umgestaltung von Infrastruktursystemen dar. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Lenkung dieses Wasserteilstroms.

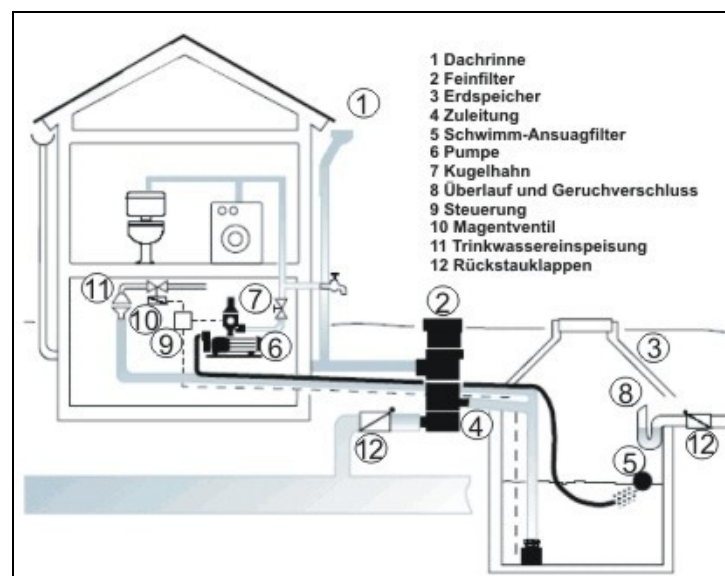
Eine Möglichkeit ist die *dezentrale Regenwasserversickerung*. Hier wird das abfließende Regenwasser möglichst nah am Entstehungsort dem Boden zugeführt; das Wasser versickert und dient somit der Grundwasserneubildung. Mögliche Handlungsansätze zu einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung durch Versickerung sind nach Jurrak und Schauber (2002):

- Rückhaltung des Regenwassers aller Bau- und Verkehrsflächen im Niederschlagsgebiet und verzögerte Ableitung in die Gewässer mithilfe von:
 - ▲ Regenwasserversickerung (Flächen-, Mulden-, Becken-, Schacht-, Rohr-, Rigolenversickerung) oder
 - ▲ Regenwasserretention (naturnah ausgebaute Regenwasserrückhaltebecken, -mulden, -flächen);
- durchlässige Oberflächengestaltung von Stellplätzen, Innenhöfen, öffentlichen Plätzen, Wegen usw. zur Versickerung des Regenwassers;

- Abbau der ungebremsten Regenwasserableitung (Regenwasserretention in Teichen, Zisternen, Becken, Retentionsdächer, Gründächer...).

Eine weitere Möglichkeit der Nutzung und eine Alternative zu Versickerung bzw. Ableitung des gesammelten Regenwassers stellt die *Wiederverwendung als Brauchwasser* dar. Das Regenwasser von Dachflächen kann gesammelt, unterirdisch gespeichert, je nach Bedarf gemäß den Bestimmungen der Trinkwasserverordnung aufbereitet (z.B. mithilfe der Membrantechnologie) und als Brauchwasser mittels einer separaten Versorgungsringleitung zur Verfügung gestellt werden.

Abbildung 12: Schematische Darstellung einer häuslichen Regenwassernutzung*



*Quelle: <http://www.ruhe-haustechnik.de/sanitaer/regenwassernutzung.htm>.

Als Auffangflächen für Regenwasser sollten bevorzugt gering belastete Flächen und geneigte Dächer verwendet werden. Die Dachflächen sollten eine möglichst glatte Oberfläche aufweisen (Materialien: Schiefer, Tonziegel, glasierte Betonsteine usw.). Werden Verkehrsflächen als Auffangflächen mit ausgewiesen, muss wegen möglicher massiver Verschmutzung geprüft werden, ob eine weitergehende Aufbereitung des Betriebswassers erforderlich ist (Mayer 2007).

Problematische Dachflächen sind nach Mayer (2007):

- Bitumdächer: Betriebswasser oft gelblich verfärbt in den ersten Jahren, daher für Wäschewaschen ungeeignet.
- Asbestzementdächer: mit Verwitterungserscheinungen, sind wegen Asbestfaserfreisetzung für Regenwassernutzung ungeeignet.

- Gras- und Sedumdächer: vermindern den Regenwasserertrag sehr stark und man erhält häufig ein gefärbtes Wasser.
- Kupfer-, Zinkdächer: neu erstellte großflächige unbeschichtete Dächer können zu stark erhöhten Metallkonzentrationen im Ablaufwasser führen.
- Ablaufwasser: von besonders stark verschmutzten Dachflächen (Taubenschlag, starke Staubbelastung) sollten für die Regenwassernutzung nicht verwendet werden.

Die Qualität des aufgefangenen Regenwassers hängt maßgeblich von der Auffangfläche ab. Je nach Wasserqualität ist dieses für verschiedene häusliche Nutzungen geeignet oder ungeeignet (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Eignung von Dachmaterialien für die Regenwassernutzung*

	Waschen	WC	Garten	Wasserverlust, Verdunstung
Schiefer	++	++	++	++
Tonziegel	++	++	++	++
Glatte Betonsteine	++	++	++	++
Rauhe Betonsteine	++	++	++	+
Kupfer	0	+	-	++
Bitumdach	-	0	0	+
Asbestzementdach	-	-	-	-
Gras-, Sedumdach	-	0	++	-

*Quelle: Mayer 2007.

++ = gut, + = geeignet, 0 = bedingt geeignet, - = nicht geeignet

Die Speicherung des aufgefangenen Regenwasser sollte nach Möglichkeit in dunklen, kühlen Speichern (hier haben sich Erdbehälter bewährt) erfolgen. Bei Speicherung innerhalb von Gebäuden ist darauf zu achten, dass der Tank lichtundurchlässig bzw. der Raum dunkel ist. Die Aufstelltemperatur sollte 18°C nicht überschreiten. Dabei kommen Beton- oder Kunststoffspeicher in Betracht, die unterschiedliche Vor- und Nachteile haben wie Tabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Vergleich Beton- und Kunststoffspeicher*

	Betonspeicher	Kunststoffspeicher
Wirtschaftlichkeit	+	+
Umweltverträglichkeit	+	+
Überfahrbarkeit	++	-
Sicherheit gegen Auftrieb	++	-
Gewicht	0	++
Neutralisation des sauren Regens	+	-

*Quelle: Mayer 2007

++ = gut, + = geeignet, 0 = bedingt geeignet, - = nicht geeignet

Eine dem Speicher vorgeschaltete Filtration macht in Kombination mit einer intelligenten Wasserführung innerhalb des Behälters einen Feinfilter im Auslauf des Speichers oft überflüssig. Dafür kommen z. B. die in Tabelle 7 dargestellten Filtersysteme in Betracht.

Tabelle 7: Vergleich von Filtersystemen für Regenwasser*

Filtersammler	Feststoffentfernung	Filtergutentsorgung	Geringe Wasserverluste	Einfache Reinigungsmöglichkeit	Inspektionsintervall (x pro Jahr)
Filtersammler	++	++	++	++	1 x
Wirbel-Feinfilter	++	++	++	++	1 x
Schräge Siebfläche	+	0	+	+	1-2 x
Retentionsfilter	0	-	0	-	12 x
Dachrinne	0	0	0	0	2 x

*Quelle: Mayer 2007.

++ = gut, + = geeignet, 0 = bedingt geeignet, - = nicht geeignet

- *Filtersammler*: Wirkungsgrad ca. 90 Prozent, für etwa 150 m² Dachfläche, sehr wartungsarm.
- *Wirbel-Feinfilter*: Einbau im Erdreich, für mehrere Falleleitungen bis 450 m² Dachfläche, sehr wartungsarm.
- *Schräge Siebfläche*: Schmutzteile bleiben auf dem Filtersieb liegen und werden bei starken Regen abgespült, Verstopfungen und Verkeimungen bei längerer Trockenzeit.
- *Retentionsfilter*: wirkt wie ein Kaffeefilter, Filterschicht z.B. Schaumstoff, Kiesschicht, sehr wartungsintensiv.

Mögliche Einsatzzwecke des sehr salzarmen Regenwassers sind Körperpflege, Toiletten-spülung, Gartenbewässerung und Betrieb von Wasch- und Spülmaschinen. Die Nutzung des sehr weichen Regenwassers führt im Haushalt zu erheblichen wirtschaftlichen Vorteilen, wenn man die Verkalkungsschäden in allen Warmwassersystemen im Haushalt betrachtet. Die Nutzung von Entkalkungsmitteln, Weichspüler und ähnlichen Produkten wäre bei der Verwendung von Regenwasser nicht erforderlich und würde maßgeblich zur Entlastung der Kläranlagen und der Umwelt beitragen.

Werden Aufbereitungsanlagen für die Regenwasseraufbereitung zu Brauchwasser dezentral eingesetzt, ist wie bei allen dezentralen Anlagen eine ausreichende Qualitätssicherung des Wassers und Wartung der Anlagen sicherzustellen. Dies geschieht zweckmäßig über Wartungsverträge mit Herstellerfirmen oder über eine von den Kommunen/Wasserversorgern organisierte Wartung und Überprüfung.

Die strikte Einhaltung der Rechtsvorschriften und Normen seitens der Planer, Installationsbetriebe und Betreiber ist für den Schutz der öffentlichen Trinkwasserversorgung unabdingbar. In den wichtigsten rechtlichen und technischen Vorschriften (Trinkwasserverordnung, DIN EN 12056 (früher: DIN 1986), DIN 1988, DIN 1989-1) ist die Beachtung unter anderem folgender Aspekte zwingend vorgeschrieben (fbr 2004):

- Strikte Trennung zwischen Trinkwasser- und Regenwassernetz,
- Nachspeisung von Trinkwasser in den Regenwasserspeicher oder in den Nachspeisebehälter nur im freien Auslauf oberhalb des höchstmöglichen Wasserstandes (Rückstauenebene) zum Schutz des öffentlichen Netzes vor Rücksaugeffekten,
- Dauerhafte und eindeutige Kennzeichnung aller Regenwasserleitungen (unter Putz mit Trassenbändern, auf Putz mit Klebefahnen) sowie aller Zapfstellen,
- Sicherung der Zapfstellen für Regenwasser gegen unbefugte oder unbeabsichtigte Entnahme – vor allem durch Kinder (z.B. mittels abnehmbarer Steckschlüssel oder abschließbarer Ventiloberteile),
- Sicherung gegen das Eindringen von Schmutzwasser (Rückstau) aus der Abwasserkanalisation.

Werden große Mengen Regenwasser zur Substitution von Trinkwasser z.B. in ganzen Siedlungen oder einem Gewerbebetrieb genutzt, kann das negative Auswirkungen auf die Trinkwasserverteilung haben. Besonders wenn diese bereits im unteren Lastbereich betrieben wird, erhöht sich die Gefahr der Wiederverkeimung durch lange Fließzeiten. Aus diesem Grund sollten die Wasserversorgungsunternehmen rechtzeitig in entsprechende Planungen einbezogen werden, sodass Gesamtkonzepte entwickelt werden können. Bei stark unterausgelasteten Trinkwasserverteilungssystemen eröffnet die verstärkte Nutzung von Regenwasser für z.B. Brauchwasserzwecke in Kombination mit einer dezentralen Trinkwasseraufbereitung theoretisch die Möglichkeit der Abkopplung der unterausgelasteten Teilgebiete von der zentralen Trinkwasserversorgung. Einer solchen Entscheidung muss jedoch die sorgfältige Prüfung aller Randbedingungen und möglicher Risiken vorausgehen (siehe Kapitel 2.3 Trinkwasser).

Durch Abkopplungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten lassen sich positive Auswirkungen auf die Kanalnetzhydraulik, auf Mischwasserentlastungen und auf das Abflussregime von Fließgewässern in Siedlungsbereichen erzielen. Ist die Kanalisation hingegen bereits unterausgelastet, sind ebenso negative Effekte zu erwarten. Auch hier kann die Einrichtung einer semi- oder dezentralen Entwässerung solcher Gebiete unter Umständen einen Ausweg aus den Problemen der unterausgelasteten Entwässerungsnetze darstellen. Nach aktuellen Angaben der Fachverbände der Wasserwirtschaft sind ca. 20 Prozent der Kanalnetzstrecken in Deutschland kurz- bis mittelfristig sanierungsbedürftig. Weitere 21,5 Prozent werden dies langfristig sein (Branchenbild 2008). Dieser Sanierungsbedarf resultiert einerseits aus baulichen Schäden und zum anderen durch den Anschluss neuer Baugebiete und Verdichtungen innerhalb der bestehenden Siedlungsgebiete. Eine hydraulische Leistungssteigerung z.B. bei dem Anschluss von Neubaugebieten erfolgt konventionell vorwiegend durch eine Vergrößerung der Kanalnetzquerschnitte, den Bau von Regenrückhalteräumen und vereinzelt durch eine gezielte Abflusssteuerung. Abkopplungsmaßnahmen stellen dieser herkömmlichen Vorgehensweise bei der hydraulischen Sanierungsplanung eine interessante Alternative entgegen. Statt die Querschnitte an die vorhandenen Abflüsse anzupassen, werden die niederschlagsbedingten Zuflüsse zum Kanalnetz an die hydraulische Leistungsfähigkeit der vorhandenen Kanalkapazität angepasst. Dieser Ansatz führt nach Untersuchungen des ATV-DVWK (2002) in den Fällen zu einem wirtschaftlichen Erfolg, in denen die Überstauhäufigkeit im Ist-Zustand nicht größer als $n = 1,5/a$ ist. Bei Ergänzung der Abkopplungsmaßnahmen durch herkömmliche Sanierungsverfahren im Entwässerungssystem lässt sich der wirtschaftlich interessante Anwendungsbereich erweitern.

In vielen Fällen sind die Investitionskosten für entsprechende Abkopplungsmaßnahmen geringer als die Kosten einer herkömmlichen Sanierung bei der Realisierung desselben hydraulischen Ziels. Als weitere Aspekte sind bei der Bewertung und der Auswahl der geeigneten Vorgehensweise Auswirkungen auf Mischwasserentlastung, Gewässerschutz und Grundwasserneubildung zu berücksichtigen (ATV-DVWK 2002).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch den Betrieb dezentraler Regenwasserversickerungs- bzw. -nutzungsanlagen die erforderliche hydraulische Kapazität des angrenzenden Kanalsystems geringer wird. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Abkopplung des Regenwassers nur bei einem anstehenden Neubau bzw. einer anstehenden Sanierung durch Nennweitenreduzierung wirtschaftlich positiv auswirkt. Wird Regenwasser abgekoppelt und verbleibt der Kanal in seiner ursprünglichen Dimension, können in Folge einer evtl. Unterauslastung Funktionsprobleme und Ablagerungen im Netz entstehen. Sind aus diesem Grund z.B. Spülungen der Kanalisation erforderlich, um diese von Ablagerungen etc. zu befreien, ist die positive Ökobilanz der Regenwasserabkopplung zu hinterfragen. All diese Aspekte sprechen dafür, im Rahmen der städtischen Planungsprozesse den Aspekt der Regenwasserabkopplung besonders zu berücksichtigen und bei anstehenden Sanierungs- oder Neubaumaßnahmen an der Kanalisation gezielt in die Planungen zu integrieren.

⇒ **Beispiel: Regenwasserbewirtschaftung Potsdamer-Platz, Berlin**

Das am Potsdamer Platz in Berlin anfallende Regenwasser wird im Rahmen eines integrativen Konzeptes bewirtschaftet. Ein Rückhalt des Regenwassers wird durch die Begrünung von Dächern erreicht. Von den insgesamt ca. 50.000 m² Dachflächen wurden ca. 17.000 m² begrünt. Bei den nicht begrüntem Dächern werden Materialien verwendet, die das Dachabflusswasser nicht negativ beeinflussen (kein Kupfer und Zink). Das von den Dächern nicht zurück gehaltene Regenwasser wird in fünf semizentralen Speichern (2.600 m³ Gesamtvolumen) dunkel und kühl gespeichert. Dieses Wasser wird für den Betrieb des urbanen Gewässers Potsdamer Platz, für Bewässerungszwecke und Toilettenspülungen verwendet. Im Jahresdurchschnitt werden ca. 7.700 m³ Regenwasser genutzt und die gleiche Menge Trinkwasser eingespart. Ein Teil des Zisternenvolumens dient auch der Retention bei Starkregenereignissen. Ein künstlich angelegtes Gewässer (3.100 m³) dient der weiteren Rückhaltung des Regenwassers und wirkt sich positiv auf das Stadtklima und Naherholung aus (fbr 2007b; Kintat 2002).

2.3 Trinkwasser

Trinkwassernutzung

Im kommunalen Bereich wird Wasser in der Regel als Trinkwasser, Brauchwasser sowie zur Bewässerung eingesetzt. Der industrielle Sektor kennt vielfältige anderweitige Formen der Wassernutzung wie z.B. zu Kühlzwecken oder als vollentsalztes Reinstwasser.

In Deutschland wird das den Haushalten zur Verfügung gestellte Trinkwasser für alle erforderlichen Anwendungen verwendet, da lediglich ein Anschluss der entsprechenden Qualität zur Verfügung steht. Dieser Umstand bedingt, dass das qualitativ hochwertige Trinkwasser auch für Zwecke verwendet wird, in denen Wasser geringerer Qualität den Anforderungen genügen würde wie z.B. für die Toilettenspülung oder die Gartenbewässerung. Die Verwendung als Trinkwasser (Trinken, Kochen) macht gemäß BGW (2008) lediglich vier Prozent des privaten Wasserbedarfs aus. In der Regel allgemein anerkannt ist die Forderung der Trinkwasserqualität bei Anwendungen, in denen Kinder mit dem Wasser in Berührung kommen. Der Bereich der Körperpflege ist bezüglich der erforderlichen Wasserqualität umstritten.

Private Haushalte haben demnach ein theoretisch sehr hohes Potenzial (ca. 96 Prozent) für die Nutzung alternativer Wasserressourcen wie z.B. Regenwasser oder Grauwasser. Diese Wässer minderer Qualität können bedarfsgerecht z.B. zur Toilettenspülung oder für Reinigungs- und Bewässerungszwecke eingesetzt werden.

Eine (zentrale) Versorgung der privaten Haushalte mit Brauchwasser als Alternative zu dem bereitgestellten Trinkwasser wäre denkbar, ist jedoch aufgrund der Erfordernis eines zweiten Versorgungsnetzes ökonomisch in bestehenden Systemen aufwändig. Nichtsdes-

totrotz kann besonders in wasserarmen Gebieten bei Neubaugebieten diese Lösung attraktiv sein.

Trinkwasserversorgung

Durch den demografischen Wandel und einen in den letzten Jahren stetig sinkenden Wasserverbrauch zeigen sich zunehmend die Nachteile der zentral organisierten Trinkwasserversorgung, besonders im ländlichen Raum (Hoffmeister u.a. 2008). Lange Fließstrecken und reduzierte Fließgeschwindigkeiten bis hin zu Stagnation des Wassers verursachen beispielsweise hygienische Probleme und Korrosion. Kostenintensive Spülungen der Leitungen sind eine häufig praktizierte Maßnahme, um die Funktionsfähigkeit des Leitungsnetzes und die Qualität des Trinkwassers auf dem gewohnten Niveau aufrecht zu erhalten. Die vor allem durch Fixkosten gekennzeichneten Aufwendungen für die zentrale Trinkwasserversorgung müssen auf immer weniger Einwohner bzw. geringere Abnahmemengen verteilt werden. Das führt bei dem derzeitigen Gebührensystem in vielen Fällen zu einer Erhöhung der spezifischen Gebühren.

Eine theoretische Möglichkeit, diesen Schwierigkeiten in der Trinkwasserversorgung zu begegnen, besteht in der Ergänzung des zentralen Systems durch dezentrale Lösungen in spezifischen Einzelfällen (beispielsweise im ländlichen Raum) durch häusliche Trinkwasseraufbereitungsanlagen mithilfe von z.B. Membran- oder Aktivkohlefilter (WWI 2008). Bei der Nutzung dezentraler Trinkwasseraufbereitungsanlagen stellt sich die Qualitätssicherung ähnlich der von dezentralen Abwasserreinigungsanlagen als problematisch dar. Nur wenn sichergestellt ist, dass dezentrale Trinkwasseraufbereitungsanlagen jederzeit einwandfrei funktionieren, korrekt betrieben und gewartet werden und die Trinkwasserqualität überprüft wird, kann von einer Gesundheitsvorsorge der betroffenen Nutzer die Rede sein. In diesem Zusammenhang könnten die Kommunen/Wasserversorgungsunternehmen bei Wartung und Betrieb der dezentralen Anlagen sowie der Wasserqualität eine wichtige Rolle spielen (Cotruvo 2003).

Für die dezentrale Trinkwasseraufbereitung besteht technisch die Möglichkeit der Nutzung von point-of-use (POU) und point-of-entry (POE) Technologien. POU-Anwendungen zielen auf die Aufbereitung nur des Wasserteilstroms, der als Trinkwasser und für die Lebensmittelzubereitung verwendet wird. Dahingegen bereiten POE-Technologien den gesamten in einem Haushalt bzw. einer Gebäudeeinheit genutzten Wasserstrom auf. Aus diesem Grund sind POE-Anlagen teurer als POU-Geräte und unter Umständen sogar teurer als zentrale Aufbereitungsanlagen. Sie bieten hingegen den Vorteil, dass den Kunden keine Nutzungsbeschränkungen durch variierende Wasserqualitäten und getrennte Versorgungssysteme auferlegt werden müssen. POE-Anlagen finden z.B. Anwendung als semizentrale Wasseraufbereitung von Mehrfamilienhäusern oder anderen größeren Gebäudeeinheiten.

In Deutschland werden die genannten dezentralen Trinkwasserbehandlungstechnologien nur relativ selten eingesetzt, da das durch den Versorger zur Verfügung gestellte Trinkwasser gemäß den Vorgaben der Trinkwasserverordnung eine sehr hohe Qualität besitzt und in der Regel kein zweites Verteilungsnetz für Brauchwasser existiert. Hier beschränkt

sich die dezentrale Behandlung des Trinkwassers in der Regel auf die in Einzelfällen angewendete gezielte Nachbehandlung für technische Zwecke (z.B. bei Trinkwassererwärmung). Es gibt daher seit langer Zeit Geräte, die der Kalkentfernung, dem Korrosionsschutz und der Hygiene in der Hausinstallation dienen (siehe Abbildung 13). Für diese Geräte und Apparate existieren nationale Regeln in Form von DIN-Normen und DVGW-Arbeitsblättern. Durch diese technischen Standards sollen die Interessen der Wasserversorgungsunternehmen sowie die der Kunden gewahrt und geeignete von ungeeigneten Produkten unterschieden werden (Söcknick 2008). Die Einhaltung dieser Standards kann z.B. durch eine DVGW-Zertifizierung nachgewiesen werden, ist jedoch nicht verpflichtend. Das führt dazu, dass sich eine Reihe von Komfortgeräten für die individuelle Anwendung in der Hausinstallation angeboten wird, deren technische Wirksamkeit nicht bewiesen ist. Diese Form der Nachbehandlung findet im privaten Bereich statt und stellt keinen festen Bestandteil der öffentlichen Versorgungsinfrastruktur dar, weshalb in der vorliegenden Studie nicht weiter auf diesen Aspekt eingegangen wird.

Abbildung 13: Dezentrale/Semizentrale Trinkwassernachbehandlungsanlagen*



Enthärtung Einzelabnehmer



Enthärtung Wohnanlage mit ca. 100 Wohneinheiten



Prinzipskizze Siebfilter

*Quelle: Judo Wasseraufbereitung GmbH; www.judo-online.de/judo/PROSPEKTE/DE/Art-Nr_1930648_JUDOMAT_JM_2-6.pdf; www.judo-online.de/judo/PROSPEKTE/DE/Art-Nr_1930996_CONTISOFT.pdf; www.judo-online.de/judo/DE/Themen/Filtration/Siebfiltration/Schutzfilter_JRSF-Der_Klassiker.php.

In den USA haben dezentrale Technologien der Trinkwasseraufbereitung einen weitaus höheren Stellenwert als in Deutschland. Dies ist unter anderem in geographischen und auch klimatischen Unterschieden begründet. In einigen Regionen der USA besteht klimatisch bedingt ein geringeres Wasserdargebot als in den meisten Gegenden Deutschlands. Dazu kommt ein aufgrund der teilweise sehr ländlich geprägten Siedlungsstruktur in vielen Gegenden hohe Stellenwert von Eigenwasserversorgungen, die bei fehlender Alternative auch bei Qualitätsproblemen zur Trinkwasserversorgung verwendet werden müssen.

Anlagen der dezentralen Trinkwasseraufbereitung sind in den USA in abgelegenen Ortschaften flächendeckend für die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser anstelle einer zentralen Trinkwasserversorgung eingesetzt. Die US Environmental Protection Agency (EPA) berichtet über zahlreiche Fallbeispiele in den USA, in denen dezentrale Trinkwasseraufbereitungstechnologien eingesetzt werden (EPA 2006a: z.B. San Ysidro/New Mexico: PUO Umkehrosiose für die Entfernung von Arsen, Fluorid und anderer anorga-

nischer Chemikalien). Die Nutzung von POE- und POU-Geräten bei der Trinkwasseraufbereitung ist in den USA seit Ende der 90er-Jahre gesetzlich erlaubt und durch den Safe Drinking Water Act (SDWA) geregelt. Dieser stellt als Bundesgesetz die Trinkwasserversorgung sicher und schreibt Design, Management und Betrieb von dezentralen Trinkwasseraufbereitungsanlagen vor. Damit besteht in den USA die rechtliche Grundlage für die dezentrale Aufbereitung von über das Netz verteilten Trinkwassers durch kleine Systeme mithilfe von POU- und POE-Technologien. POU-Anwendungen werden in den USA ausschließlich für die Entfernung solcher Wasserinhaltsstoffe zugelassen, die weder eine akute Toxizität aufweisen noch bei Inhalation oder dermalen Exposition signifikante Risiken bergen; darunter fallen auch mikrobiologische Verunreinigungen. POE-Geräte können im Gegensatz dazu auch zur Entfernung mikrobiologischer Kontamination sowie bei der Entfernung flüchtiger organischer Stoffe und Radon eingesetzt werden.

Die technologischen Möglichkeiten zur Entfernung verschiedener Wasserinhaltsstoffe mithilfe von POU-Geräten sind gemäß EPA 2006b in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Technologien der Trinkwasseraufbereitung POU-Geräten*

Technologie	Entfernung von				Bemerkungen
	Viren	Bakterien	Cysten	organische Inhaltsstoffen	
Aktivkohle (Festbett)	nein	teilweise	ja	überwiegend	Begrenzte Wirksamkeit bei einigen Pestiziden; kann Methylterbutylether und ausgewählte Desinfektions-Nebenprodukte entfernen; entfernt Chlor und kann durch Modifikation für die Entfernung von Metallen eingesetzt werden.
Pulveraktivkohle (PAK)	nein	nein	nein	überwiegend	Begrenzte Wirksamkeit für Atrazin, Aldicarb und Alachlor; evtl. zur Entfernung von Biotoxinen geeignet; eingeschränkte Effektivität bei der Entfernung einiger Metalle.
Umkehrosmose (RO)	ja	ja	ja	überwiegend	Nicht effektiv bei der Entfernung sehr niedermolekularer organischer Inhaltsstoffe; entfernt die meisten Metalle und Radionuklide.
Ultraviolette Strahlung (UV)	überwiegend	ja	ja	nein	Benötigt Vorfiltration; wird alleine oder in Kombination mit anderen Technologien verwendet.
Mikrofiltration (MF)	nein	ja	ja	nein	Benutzt als Vorfilter in Kombination mit RO.
Ultrafiltration (UF)	teilweise	ja	ja	teilweise	Kann keine niedermolekularen organischen Substanzen (weniger als 100.000 Dalton) entfernen.
Nanofiltration (NF)	ja	ja	ja	teilweise	Kann für die Entfernung von Arsen konfiguriert werden.

*Quelle: EPA 2006b.

2.4 Energiepotenzial der Wasserwirtschaft

Energiebedarf der konventionellen Abwasserentsorgung

Der Energieverbrauch der kommunalen Kläranlagen macht fast 20 Prozent des Stromverbrauchs aller kommunalen Einrichtungen aus und wird in der Literatur mit 30 bis 60 kWh pro Einwohner und Jahr angegeben. Bundesweit ergibt sich gemäß DWA daraus ein Gesamtverbrauch an elektrischer Energie von 4,2 bis 4,4 TWh/a. Der Wärmebedarf liegt zusätzlich bei etwa 3,2 TWh/a (euwid 2008). Die biologische Reinigungsstufe der Kläranlage (Gebläse, Umwälzung der Denitrifikationszone, Rezirkulation, Rücklaufschlamm) verursacht dabei 50 bis 80 Prozent des gesamten Stromverbrauchs. Der Bedarf an thermischer Energie wird im Wesentlichen durch Raumwärme, Faulbehälterheizung (bei anaerober Stabilisierung) und Schlammaufheizung bestimmt.

Die Abwasserreinigung hat großes Potenzial sowohl in der Energiegewinnung (im Wesentlichen Klärgasnutzung, Klärschlammverbrennung) als auch in der Energieverbrauchsminimierung. Bei optimaler Energieeffizienz ist eine Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs auf 18 bis 25 kWh pro Einwohner und Jahr möglich (euwid 2007).

Wesentliche Ansätze zur Energieoptimierung liegen in energiesparenden Belüftungssystemen für die Belebungsbecken, einer optimierten Verfahrensstrategie und dem Ersatz alter Systeme mit hohem Energieverbrauch durch moderne Systeme. Durch eine Ausfaltung der gesamten zur Verfügung stehenden Klärschlammmenge sowie der Verstromung des entstehenden Faulgases ließe sich die Energieausbeute um rund 30 Prozent erhöhen (euwid 2007).

Auch eine autarke Energieversorgung von Kläranlagen ist bei konsequenter Nutzung des energetischen Potenzials und den Möglichkeiten der Energieeinsparung theoretisch möglich und zukünftig zumindest bei größeren Anlagen von über 10.000 EW denkbar. Bereits realisierte Beispiele sind die Kläranlage Grevesmühlen (Zweckverband Grevesmühlen, 2008: siehe Praxisbeispiel Co-Vergärung) sowie ein Klärwerk im Landkreis Goslar (TU Clausthal 2008).

Energetische Nutzung von Klärgas

Von den etwa 10.000 kommunalen Kläranlagen in Deutschland waren nach Angaben des Statistischen Bundesamtes im Jahr 2005 bei 1.190 Anlagen Faulungsanlagen installiert, die etwa 710 Mio. m³ Klärgas¹⁵ (4.757 GWh) produzierten. Dieses Nebenprodukt der Abwasserreinigung kann zur Produktion von Strom und Wärme genutzt werden, womit der elektrische Energiebedarf von Kläranlagen zumindest teilweise und der Wärmebedarf zu großen Anteilen bis vollständig gedeckt werden kann.

15 Der Energieinhalt eines Kubikmeters Klärgas entspricht mit rund 6,7 kWh/Nm³ etwa 0,7 Litern Heizöl und liegt auch nur ein Drittel tiefer als der von Erdgas. Klärgas verbrennt weitgehend CO₂-neutral, weil der Großteil des freigesetzten Kohlendioxids zuvor durch Pflanzenwachstum gebunden wurde. (Financial Times Deutschland 2008; Ronchetti u.a. 2002).

Wie eine DWA-Studie (euwid 2008) zeigt, erfolgt jedoch nur auf ca. 65 Prozent der Anlagen mit einer Klärschlammfäulung eine Verstromung des gewonnenen Gases (507 Mio. m³) mithilfe eines BHKW. Weitere 122 Mio. m³ Klärgas werden lediglich zur Wärmeengewinnung genutzt.

Eine Verstromung des Klärgases erfolgt in der Regel mithilfe von Blockheizkraftwerken (BHKW). Konventionelle *Gasmotor-BHKW's* werden im Leistungsbereich von 3.000 bis 2000 kW_{el} eingesetzt. Die Verstromung erfolgt in drei Stufen:

1. Umsetzung der im Klärgas enthaltenen Energie in thermische Energie durch Verbrennung,
2. Umsetzung der Wärme in mechanische Energie in einer Wärme-Kraft-Maschine,
3. Erzeugung von elektrischer Energie aus der mechanischen Energie mithilfe eines Generators.

Bei der Verwendung von Klärgas wird zur Erhöhung der technischen Lebensdauer des BHKW und zur Senkung der Instandhaltungskosten ein Gasreinigungsmodul vorgeschaltet, welches die im Klärgas enthaltenen Siloxanverbindungen und Teile der Schwefelverbindungen entfernen soll. Der elektrische Wirkungsgrad eines BHKW liegt über das gesamte Leistungsspektrum je nach Datenquelle bei Werten zwischen 35 und 45 Prozent, der thermische Wirkungsgrad bei 53 Prozent (Blesl u.a. 2004; Schmid-Schmieder 2008).

Eine Möglichkeit der Effizienzsteigerung der Klärgasverstromung liegt in der Nutzung der *Brennstoffzellen-Technologie*¹⁶. In Brennstoffzellen wird die Energie des Klärgases unmittelbar in elektrische Energie umgewandelt, ohne den Umweg über die thermische Energie zu nehmen. Dadurch ist keine Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie nötig, die nur einen begrenzten Wirkungsgrad hat. Aus diesem Grund lassen sich mit Brennstoffzellen höhere Wirkungsgrade als in BHKW erreichen.

Für die Nutzung von Klärgas sind allerdings nicht alle Brennstoffzellen gleichermaßen geeignet. Aufgrund des hohen Kohlendioxid-Anteils des Klärgases bieten sich Hochtemperaturbrennstoffzellen (MCFC¹⁷, SOFC¹⁸) an, die unempfindlich gegen den hohen CO₂-Anteil im Klärgas sind. Zur Entschwefelung des Klärgases, welches die Lebensdauer von Brennstoffzellen verkürzen kann, muss wie bei einem BHKW eine Gasreinigungseinheit vorgeschaltet werden, die neben Schwefelverbindungen auch Restfeuchte, Staub und Halogen- und Siloxanverbindungen entfernen kann. Der erzielbare elektrische Wirkungsgrad liegt im Erdgasbetrieb bei 50 bis 60 Prozent und bei Nutzung von Klärgas bei 48 bis

16 Eine Brennstoffzelle ist eine elektrochemische Vorrichtung zur direkten Umwandlung der chemischen Energie eines Brennstoffs in Elektrizität. Ähnlich wie Batterien produzieren Brennstoffzellen Gleichstrom von niedriger Spannung. Dem Zellblock der Brennstoffzelle werden die Brennstoffe kontinuierlich zugeführt, ähnlich wie einem Verbrennungsmotor.

17 Schmelzcarbonatbrennstoffzelle (engl. Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC): Hochtemperatur-Brennstoffzelle, die bei einer Betriebstemperatur von etwa 650°C arbeitet. Als Elektrolyt verwendet dieser Zellentyp eine Alkalicarbonat-Mischschmelze aus Lithium- und Kaliumcarbonat (Wikipedia April 2008).

18 Festoxidbrennstoffzelle (engl. Solid Oxide Fuel Cell, SOFC): Hochtemperatur-Brennstoffzelle, die bei einer Betriebstemperatur von 650-1000°C betrieben wird. Der Elektrolyt dieses Zelltyps besteht aus einem festen keramischen Werkstoff (Wikipedia April 2008).

50 Prozent. Die Abwärme der Stromproduktion von Hochtemperaturbrennstoffzellen kann auf hohem Niveau, z.B. für die Bereitstellung von Prozessdampf, ausgekoppelt werden.

Ein Nachteil der zur Klärgasverstromung geeigneten Brennstoffzellen liegt jedoch in den derzeit noch hohen Gesamtkosten. Um eine ausreichende Wirtschaftlichkeit zu erzielen, bedarf es erheblicher Kostensenkungen. Diese können im Bereich der Investitionskosten unter anderem durch Einführung von Serienfertigung und Systemvereinfachungen erzielt werden. Ein Vergleich der Betriebskosten mit einem konventionellen Verbrennungs-BHKW zeigt, dass die unmittelbaren Aufwendungen für Wartung und Betrieb in einem vergleichbaren Rahmen liegen. Bei einem längerfristigen Betrachtungshorizont, der das Wechseln der Zellstapel (Lebensdauer ca. vier bis fünf Jahre) berücksichtigt, erhöhen sich die Betriebskosten für die Brennstoffzelle jedoch erheblich. Eine Erhöhung der derzeit noch relativ kurzen Lebensdauern der eigentlichen Zellen (ca. 30.000 h) durch technische Verbesserungen würde sich ebenfalls positiv auf die Kostensituation auswirken (Blesl u.a. 2004).

Vergleich aerober und anaerober Verfahren der Schlammstabilisierung

Zur weiteren Nutzung des bei der Abwassereinigung entstehenden Schlammes muss dieser in einen stabilen Zustand gebracht werden, in dem keine weiteren Um- und Abbaureaktionen mehr stattfinden und die geruchsbildenden Inhaltsstoffe verringert werden. Diese Umwandlung ist mithilfe von aeroben sowie anaeroben Verfahren möglich.

Bei der aeroben Stabilisierung erfolgt dies durch die energieintensive Zuführung von Sauerstoff in das Stabilisierungsbecken. Bei der anaeroben-mesophilen Stabilisierung (Faulung) erfolgt der Umwandlungsprozess bei Temperaturen von 33-38°C unter Ausschluss von Sauerstoff im Faulturm. Das lediglich bei der anaeroben Stabilisierung entstehende Klärgas stellt die derzeit hauptsächlich genutzte Energiequelle der Abwasserbehandlung dar.

Die folgende Tabelle stellt anhand der von Ronchetti u.a. (2002) erhobenen Daten eine Energiebilanz für die beiden Formen der Stabilisierung von Klärschlamm auf. Dabei ergeben sich eindeutige energetische Vorteile für die anaerobe Stabilisierung in Faulbehältern.

Tabelle 9: Energiebilanz aerobe und anaerobe Stabilisierung (Energie in der Einheit: MWh/[1000 EW*a])

	Aerobe Stabilisierung¹	Anaerobe Stabilisierung²
Strombedarf	8,9	2,3
Stromproduktion	0	17,6
Bilanz	- 8,9	+ 15,3
Wärmebedarf	0	10,2
Wärmeproduktion	0	31,3
Bilanz	0	+ 21,1

1 Angaben beziehen sich auf den Betrieb des Stabilisierungsbeckens.

2 Angaben beziehen sich auf den Energiebedarf von Faulturm und Gasspeicher. Die Produktion von elektrischer Energie und Wärme erfolgt in einem BHKW.

Die vergleichende Ökostudie von Ronchetti u.a. (2002) zu aeroben und anaeroben Verfahren der Klärschlammstabilisierung kommt zu dem Ergebnis, dass trotz des höheren Infrastrukturaufwandes und der benötigten Wärme für die Aufrechterhaltung des Faulprozesses, Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung ökologisch vorteilhafter sind. Hauptgrund ist die Verstromung des Klärgases in möglichst großen, auf die anfallende Klärgasmenge optimierten BHKWs. Diese Stromproduktion deckt bei gut konzipierten Anlagen 50 bis 60 Prozent des elektrischen Energieverbrauches der KA. Die Abwärme des BHKW reicht in der Regel zur Versorgung der gesamten Kläranlage aus. Die in den letzten Jahren auf vielen Kläranlagen vorgenommenen Senkungen des Energiebedarfs erhöhen den durch eine Klärgasverstromung erreichbaren Energiedeckungsgrad der Kläranlage.

In der genannten Studie wurden ebenfalls alternative Klärgasnutzungen untersucht: Klärgaseinspeisung ins Erdgasnetz und direkter Verkauf an Dritte vor allem als Treibstoff für Fahrzeuge. Auch bei diesem Vergleich hat sich die Verstromung in BHKW als vorteilhaft erwiesen.

Einbindung weiterer Biomasse in die anaerobe Abwasserbehandlung und Biogasnutzung

Durch eine Einbindung weiterer Biomasse (z.B. häusliche Bio- und Gartenabfälle, organische Abfälle der Lebensmittelindustrie) in die anaerobe Abwasserbehandlung lässt sich die Energieausbeute deutlich steigern, was das Beispiel der Kläranlage Grevesmühlen deutlich zeigt.

⇒ Praxisbeispiel: Co-Vergärung in der Kläranlage Grevesmühlen

In der für 100.000 EW ausgelegten zentralen Klärschlammbehandlungsanlage wird seit 1999 fetthaltiger Schlamm aus der Gastronomie und Lebensmittelerzeugung angenommen und in den Faulbehältern mitverarbeitet (Co-Fermentation). Durch Mitnutzung des Fettschlammes stieg die elektrische Leistung der Energieproduktion von ca. 30 Kilowatt auf 220 Kilowatt. Die durch die Klärgasverwertung erzeugte elektrische Energie versorgt die Kläranlage Grevesmühlen mit über 100 Prozent Strom, der restliche Teil (14 bis 16 Prozent) wird in das örtliche Energienetz eingespeist, ca. 200.000 kWh/a. Die anfallende Wärme wird für den Faulprozess und die Versorgung aller anderen Anlagen und Betriebsgebäude genutzt. Überschüssige Wärme soll künftig zur Trocknung des Klärschlammes genutzt oder an andere Betriebe verkauft werden (Zweckverband Grevesmühlen 2008).

Durch die bundesweite Zugabe von Fettfanginhalten in Faulbehältern ließe sich nach Angaben der Financial Times Deutschland (2008) der Stromertrag um gut 20 Prozent steigern. Eine Studie der DWA (euwid 2008) quantifiziert das gesamte bundesweite Energiepotenzial der Co-Vergärung mit den vorhandenen freien Faulturnkapazitäten auf rund 2,63 TWh Primärenergie. In BHKWs ließen sich hieraus 1,18 TWh/a thermische sowie

1,05 TWh/a elektrische Energie gewinnen. Bei der Verwendung von Brennstoffzellen steigt die Gesamtausbeute von 2,23 TWh/a auf 2,37 TWh/a (1,05 TWh/a thermische und 1,32 TWh/a elektrische Energie).

Energiebilanz unter Berücksichtigung sekundärer Effekte

Neben der Energiebilanz für die eigentliche Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung können der Bilanzrahmen weiter gespannt und auch sekundäre Effekte berücksichtigt werden. Dies kann z.B. die Berücksichtigung der Energieersparnis für die Herstellung von synthetischem Wirtschaftsdünger sein, der durch aus Abwasser gewonnen Dünger substituiert werden kann. Hierbei spielt vor allem die Verwendung des Urins, der ca. 87 Prozent des Stickstoffs und etwa 50 Prozent des Phosphors aus dem Abwasser enthält, eine wesentliche Rolle.

Dabei stehen auf der einen Seite der Energieaufwand für die Sammlung und Wiederverwendung des Urins und auf der anderen Seite die Kosten bzw. der Energiebedarf für die Nährstoffelimination im Rahmen der konventionellen Abwasserbehandlung sowie für die Düngemittelproduktion.

Die Produktion von Stickstoffdünger benötigt nach Maurer u.a. (2003) 45 MJ Energie pro kg Stickstoff, die Phosphordüngerproduktion etwa weitere 29 MJ/kg P.

Der Investitionsaufwand für die Eliminierung des Stickstoffs in Kläranlagen wird von Lange und Otterpohl (2000) mit 12,8 Mrd. Euro quantifiziert. Der spezifische Energiebedarf beträgt etwa 45 MJ pro kg entferntem Stickstoff bei der konventionellen Nitr- und Denitrifikation. Der gesamte Energiebedarf für die chemische Phosphoreliminierung beträgt nach Maurer u.a. (2003) 49 MJ pro kg Phosphor (inkl. Produktion Fällmittel: Eisen(II)Sulfat, Transport des Schlammes zur Behandlung, energetische Verluste bei Verbrennung anorganischer Bestandteile).

Es bestehen verschiedene technische Möglichkeiten, die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe zu eliminieren bzw. wiederzuverwenden und Düngemittel herzustellen. Diese werden im Folgenden in zwei Szenarien dargestellt, welche entweder nur Stickstoff oder auch Phosphor berücksichtigen. Die jeweiligen „Unterszenarien“ stellen beispielhaft jeweils einen konventionellen (konv.) sowie einen alternativen (altern.) Umgang mit den Nährstoffen dar.

- Szenario 1: Stickstoff (N)
 - ▲ 1a: N-Elimination Kläranlage + N-Düngerherstellung (konv.)
 - ▲ 1b: N-Elimination separat aus Urin + N-Düngerherstellung (altern.)
- Szenario 2: Stickstoff und Phosphor (N+P)
 - ▲ 2a: N+P-Elimination Kläranlage + N/P-Düngerherstellung (konv.)
 - ▲ 2b: N/P-Gewinnung aus Urin und Nutzung als N/P-Dünger (altern.)

Der Primärenergiebedarf dieser genannten Szenarien ist in Tabelle 10 vergleichend dargestellt (Datengrundlage: Maurer u.a. 2003).

Tabelle 10: Primärenergiebedarf verschiedener Möglichkeiten der Nährstoff-Eliminierung aus Abwasser und der Düngemittelproduktion

	Primärenergiebedarf
Szenario 1a (konv.)	
N-Elimination aus Abwasser (<i>Nitrifikation/Denitrifikation</i>)	45 MJ/kg N
Synthetische N-Düngerproduktion (<i>Haber-Bosch-Verfahren</i> ¹⁹)	45 MJ/kg N
	= 90 MJ/kg N
Szenario 1b (altern.)	
N-Elimination aus Urin (<i>Sharon-Anammox-Prozess</i> ²⁰)	19 MJ/kg N
Synthetische N-Düngerproduktion (<i>Haber-Bosch-Verfahren</i>)	45 MJ/kg N
	= 64 MJ/kg N
Szenario 2a (konv.)	
N-Elimination aus Abwasser (<i>Nitrifikation/Denitrifikation</i>)	45 MJ/kg N
P-Elimination aus Abwasser (<i>chemische P-Fällung</i>)	49 MJ/kg N
Synthetische N-Düngerproduktion (<i>Haber-Bosch-Verfahren</i>)	45 MJ/kg N
Synthetische P-Düngerproduktion	29 MJ/kg P * 2,2 = 64 MJ/kg P
	= 203 MJ/kg N
Szenario 2b (altern.)	
Struvit-Produktion ²¹ aus Urin (N/P-Dünger)	102 MJ/kg N (inkl. 2,2 kg P pro kg N!) = 102 MJ/kg N

Wie die dargestellten Primärenergiebedarfe zeigen, sind aufgrund der herkömmlichen, energieaufwendigen Herstellung von Stickstoffdünger (Haber-Bosch-Verfahren zur Gewinnung von N aus der Luft) viele alternative Techniken zur Rückgewinnung und Wiederverwendung von Urin wirtschaftlich interessant. In Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen ergeben sich sogar deutliche Vorteile für die separate Urinsammlung und –nutzung.

Berücksichtigt man neben dem direkten Energiebedarf im Sinne einer *Lebenszyklusanalyse* (life cycle assessment) auch die erforderliche Infrastruktur, die Transportwege sowie die Umweltauswirkungen ergibt sich ein ähnlich positives Bild zugunsten der alternativen Verfahren unter Nutzung des Urins. Maurer u.a. (2003) vergleichen eine konventionelle

-
- 19 Das Haber-Bosch-Verfahren ist ein Verfahren zur synthetischen Herstellung von Ammoniak aus den Elementen Stickstoff und Wasserstoff.
- 20 Der Sharon-Anammox-Prozess erzielt Stickstoffentfernung durch die Kombination von zwei separaten Aufbereitungsverfahren: eine partieller Nitrifikationsprozess (Sharon) gefolgt von einem anaeroben Ammonium-Oxidations-Prozess (anammox). Dieser Prozess benötigt als Ausgangsstoff konzentrierte Stickstoff-Lösungen wie Urin und ermöglicht die Entfernung großer Mengen an Stickstoff.
- 21 Struvit (MgNH₄PO₄, Magnesium-Ammonium-Phosphat, MAP) ist ein attraktives Produkt, denn es kann zwei abwasserrelevante Nährstoffe (P und N) in einen einzigen Feststoff überführen. Zudem ist es ein bewährter Mehrkomponentendünger, der langsam wirkt (Novaquatis 2008).

Stickstoffelimination in einer Kläranlage zuzüglich einer synthetischen N-Düngerherstellung aus elementarem Stickstoff (Szenario 1a) mit der dezentralen Urinsammlung, einer zentralen Volumenreduzierung und einer Nutzung als Multi-Nährstoffdünger. Berücksichtigt werden auch die für die Infrastruktur der Urinsammlung und des Transports erforderlichen Materialien sowie die Umweltauswirkungen. Die Lebenszyklusanalyse unterstützt die in Tabelle 10 dargestellte Energieanalyse:

Das alternative Verfahren unter Nutzung der im Urin enthaltenen Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor und Kalium) benötigt weniger als die Hälfte der für die konventionelle Nährstoffelimination in der Kläranlage und die synthetische N-Düngemittelproduktion erforderlichen Primärenergie.

Die dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen das energetische Potenzial einer Nährstoffrückgewinnung aus Urin. Besonders im Hinblick auf den weltweit steigenden Düngemittelbedarf, die steigenden Energiepreise sowie begrenzte Rohstoffressourcen (besonders Phosphor) ist begründet zu vermuten, dass der Nährstoffrückgewinnung aus Abwasser zukünftig eine höhere Bedeutung zukommen wird.

Wärmenutzung aus Abwasser

Abwasser stellt in vielerlei Hinsicht eine Energieressource dar. Bereits seit vielen Jahren wird Klärgas zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme genutzt. Bereits seit Jahrzehnten wird Klärschlamm als Düngemittel in der Landwirtschaft stofflich wieder verwertet. Heute wird der Klärschlamm vielfach verbrannt und damit zur Erzeugung von Strom oder Fernwärme genutzt.

Die Energie im Abwasser liegt aber nicht nur in Form der enthaltenen organischen Substanz und Nährstoffe vor, sondern auch in Form von thermischer Energie. In dem bisher in Deutschland thermisch weitgehend ungenutzten kommunalen Abwasser besteht allein bei einer Abkühlung von ca. zwei Grad Celsius ein Wärmepotenzial von 110 kWh pro Einwohner und Jahr (Rosenwinkel und Hinkel 2006). Mithilfe von Wärmetauschern kann diese Energie für die Beheizung von Gebäuden oder zur Warmwasserbereitung genutzt werden. Praxiserfahrungen liegen vor, in der Schweiz bereits seit mehr als 20 Jahren.

Das in der Wärmenutzung des Abwassers enthaltene energetische Potenzial ist groß. Kühlt man ein m³ Abwasser um ein Grad Celsius ab (um die Funktion der Kläranlage nicht negativ zu beeinflussen), gewinnt man eine Wärmemenge von 1,5 kWh. Aus dem gleichen Kubikmeter Abwasser kann in einer Kläranlage etwa 0,05 m³ Klärgas erzeugt werden. Dies entspricht einem Energieinhalt von rund 0,3 Kilowattstunden. Daraus ist ersichtlich, dass das Potenzial an Abwärme im Abwasser um ein vielfaches größer ist als das des Klärgases auf den Kläranlagen (Buri und Kobel 2004). Nach einer aktuellen Studie im Auftrag der DWA (euwid 2008) können bei einem energetischen Aufwand von 2,5 TWh/a für den bundesweiten Betrieb von Wärmepumpen im Kanal bis zu zehn TWh/a thermische Energie gewonnen werden. Dazu kommt die Nutzung von Wärmeenergie auf den Kläranlagen, deren Potenzial die Studie mit weiteren 1,68 TWh/a bei einem elektrischen Energiebedarf von 0,42 TWh/a beziffert.

Um die Wärme des Abwassers nutzen zu können, ist ein Wärmetauscher erforderlich, der dem Abwasser die Wärme entzieht. Als Wärmetauschersysteme stehen dabei zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen sind dies im Kanalrohr verlegte Rinnenwärmetauscher und zum anderen externe Doppelrohr- oder Plattenwärmetauscher, die im Bypass zum Kanal angeordnet sind. Die innerhalb der Rohrleitung verlegten Rinnenwärmetauscher können jedoch nur in neu verlegten Kanalstrecken oder in begehbaren (also großen) Kanälen eingesetzt werden.

Abbildung 14: Rinnenwärmetauscher für Kanäle mit Kreisprofil*



*Quelle: Buri, R., und Kobel B. (2005): Energie aus Kanalabwasser – Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen. Osnabrück und Bern, S. 16.

Der Einbau eines Wärmetauschers lässt sich in der Regel gut mit der Sanierung des betreffenden Kanalabschnitts kombinieren, wodurch der Wärmetauschereinbau kostengünstig geplant und realisiert werden kann. Mit dem Einbau des Wärmetauschers geht die Ausbesserung der Kanalsole einher, weshalb auch unter diesem Gesichtspunkt von einem Werterhalt der Kanalisation gesprochen werden kann.

Eine nachgeschaltete Wärmepumpe bringt die dem Abwasser entzogene Wärme auf ein höheres für z.B. Heizzwecke nutzbares Temperaturniveau. Liegen die Wärmeabnehmer nicht unmittelbar in der Nähe der Stelle der Wärmeabgewinnung, kann die Wärme auch auf dem ursprünglichen niedrigen Niveau (zehn bis 20°C) in unisolierten Leitungen als sogenannte „kalte Fernwärme“ transportiert und erst am Ort der Nutzung mithilfe der Wärmepumpe auftemperiert werden. Mithilfe der kalten Fernwärme lässt sich die Abwärme relativ kostengünstig bis zu einem Kilometer weit transportieren. Von dort aus kann die Wärme in isolierten Leitungen zu mehreren Abnehmern oder Gebäuden auf diesem höheren Temperaturniveau (40 bis 60°C) transportiert werden („warme Fernwärme“).

Voraussetzungen für die Wärmenutzung aus Abwasser mithilfe von Wärmetauschern sind, dass in dem gewählten Kanalisationsabschnitt ein ausreichendes Wärmeangebot vorhanden und der Einbau von Wärmetauschern möglich ist. Diese Randbedingungen sind in der Regel bei einem Kanalinnendurchmesser von DN 800 oder größer sowie einer angeschlossenen Einwohneranzahl von mindestens 3.000 bis 5.000 gegeben. Interessante Abnehmer der so gewonnenen Wärme sind z.B. Wohnkomplexe, Krankenhäuser, Schu-

len, öffentliche Gebäude oder Sportstätten in der Nähe des betreffenden Kanals. Für einzelne Einfamilienhäuser und die Bereitstellung von Prozesswärme (meist hohe Vorlauftemperaturen nötig) sind Abwasser-Wärmepumpen hingegen in der Regel nicht geeignet.

Generell sollten die Verbrauchsstellen in der Nähe der Wärmequelle liegen, und die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke (z.B. Gebäudeheizung) sollte aus wirtschaftlichen Erwägungen so gering wie möglich sein. Die Nutzung von (vor)behandeltem Abwasser statt Rohabwasser stellt sich in Bezug auf den Wärmeübergang günstiger dar, da Ablagerungen von Stoffen aus dem Rohabwasser auf den Wärmetauschern den Wärmedurchgangskoeffizienten²² mindern. Kann eine Verschmutzung nicht ausgeschlossen werden, kann die Leistungsfähigkeit des Wärmetauschers durch regelmäßige Spülungen erhalten werden. Fließende und stark bewegte Abwasserströme sind zur Wärmenutzung vorzuziehen, obwohl sich nach Meyer zur Heide (2005) auch Pumpwerke ausdrücklich für eine Nutzung eignen. In diesem Zusammenhang können beispielsweise Pumpwerke mithilfe der Wärmepumpentechnologie beheizt und damit wärmeautark betrieben werden. Meyer zur Heide (2005) kommt bei einem rechnerischen Vergleich zwischen Ölheizung und Wärmepumpe für die Beheizung eines Pumpwerks (Wärmebedarf 15 kW) unter Berücksichtigung von Kapital- sowie Betriebskosten zu einer Gesamtkostenersparnis durch die Wärmepumpe von ca. 830 Euro pro Jahr. Bei zu erwartenden Preissteigerungen der fossilen Energieträger können die Kostenvorteile zukünftig höher sein.

Saisonal überschüssige Wärme kann mithilfe von Adsorptionskältemaschinen für die Erzeugung von Fernkälte zur Klimatisierung von Gebäuden, wie sie gerade in den Sommermonaten nachgefragt wird, genutzt werden. In der Stadt Chemnitz nutzen Adsorptionskältemaschinen in Kombination mit einem 3.500 m³ Wasser fassenden Kältespeicher die Abwärme eines Heizkraftwerkes zur Erzeugung von Fernkälte und Spitzenlastdeckung an Hochsommertagen. Damit ist es möglich, auf die früher verwendeten, mit Elektroenergie angetriebenen Kältemaschinen weitgehend zu verzichten. Die Abwärme des Heizkraftwerkes würde sonst ungenutzt über Kühltürme an die Umwelt abgegeben.

⇒ Praxisbeispiel: Wärmeentnahme aus Rohabwasser in der Kanalisation

Seit Ende 2001 versorgt die Wärmeversorgung Binningen AG (Schweiz) in der Gemeinde Binningen (14.000 Einwohner) 68 Gebäude mit verschiedener Nutzung (Schulhäuser, private und kommunale Bauten) in einem Wärmeverbund mit Wärme aus dem Abwasser der nahe gelegenen Kanalisation. Die Abwasserwärme wird mit einer zuverlässig arbeitenden zentralen Wärmepumpe in Heizwärme für Raumheizung und Warmwasser umgewandelt. Bisher konnte keine Leistungsverminderung des Rinnen-Wärmetauschers durch Verschmutzung festgestellt werden. Bis Ende 2004 war noch keine Reinigung des Wärmetauschers erforderlich. Für den Kanalisations-Betreiber er-

22 Der Wärmedurchgangskoeffizient U (auch Wärmedämmwert, U-Wert, früher k-Wert) ist ein Maß für den Wärmestromdurchgang durch eine ein- oder mehrlagige Materialschiicht, wenn auf beiden Seiten verschiedene Temperaturen anliegen (Wikipedia, Stand: April 2008).

gibt sich durch den Wärmetauscher kein zusätzlicher Betriebsaufwand. Die Funktion der Kanalisation wird nicht beeinträchtigt (Buri und Kobel 2004).

Kennzahlen Binningen

- Wärmeproduktion Wärmepumpe: 2.400 MWh/a
- thermische Leistung Wärmepumpe: 380 kW
- Anzahl Wohnungen: 300
- Länge Wärmetauscher: 140 m
- spezifische Leistung Wärmetauscher: 1,8 kW/m

3. Nachhaltige Sanitärkonzepte – Praxisbeispiele

In Westeuropa existierten bereits zahlreiche Projekte zur Umsetzung nachhaltiger, innovativer Sanitärkonzepte, welche exemplarisch in Tabelle 11 dargestellt sind. Diese basieren auf einer Teilstromerfassung und der adäquaten Behandlung einzelner Teilströme. Angestrebt wird eine ganzheitliche Betrachtung der Abwassersysteme vom Trinkwasserverbrauch über dessen Aufbereitung zur Wiederverwendung einzelner Teilströme und zur Nährstoffrückgewinnung aus dem Abwasserstrom.

Eine nachhaltige Veränderung der Wasserwirtschaft kann z.B. durch folgende Maßnahmen erfolgen (nach Wilderer 2000):

- Senkung des Trinkwasserverbrauchs,
- Teilung der Stoffströme im Haushalt („source separation“),
- Schließung von Kreisläufen,
- Vermeidung von Nährstoffeinträgen in Oberflächengewässer,
- Verminderung des bei der konventionellen Abwasserbehandlung entstandenen Energieaufwands,
- ökonomische Regenwasserbewirtschaftung,
- Sensibilisierung der Bevölkerung.

Dabei kann die Teilstromerfassung unterschiedlich weit gehen, wie die im Folgenden exemplarisch dargestellten Praxisbeispiele verdeutlichen:

- Erfassung von Regenwasser
 - ▲ mit dezentraler Versickerung
 - ▲ mit dezentraler Aufbereitung und Nutzung als Brauchwasser
- Getrennte Erfassung von Grauwasser
 - ▲ mit dezentraler Behandlung und Nutzung
 - ▲ und Ableitung zu zentraler Kläranlage
- Getrennte Erfassung von Schwarzwasser
 - ▲ mit dezentraler Behandlung (mit/ohne Energienutzung; ggf. unter Einbeziehung von Bioabfällen) und
 - ▲ Ableitung zu zentraler Kläranlage
- Getrennte Erfassung von Gelb- und Braunwasser
 - ▲ mit dezentraler Behandlung (mit/ohne Energienutzung; mit/ohne Nährstoffrückgewinnung bzw. -nutzung; ggf. unter Einbeziehung von Bioabfällen)
 - ▲ mit Zwischenspeicherung und gezielter Ableitung des Urins zu zentraler Kläranlage (durch das bestehende zentrale Kanalsystem, durch ein separates Kanalsystem)

Zusammenfassend können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Aktivitäten zu neuen Sanitärkonzepten nehmen weltweit zu.
- Die Trennung von Urin und Fäkalien mit neu entwickelten Trenntoiletten ist durchführbar und wird von den Benutzern akzeptiert (Johansson 2001; Hellström und Thurdin, 1998; Swedenviro 2001).

- Nach der Trennung von Urin und Fäkalien sind unterschiedliche Systemkonfigurationen möglich. Diese unterscheiden sich im ausgewählten Transport- und Sammelsystem sowie in den Behandlungsverfahren der drei Ströme (Urin, Fäkalien, Grauwasser) (Otterpohl u.a. 1999).

Tabelle 11: Ausgewählte existierende Projekte zu innovativen Sanitärkonzepten in Europa (nach Fröhlich 2003, erweitert)

Nr.	Projektname	Land	Stadt	Projektbeginn	Art der Toiletteninstallation	Verantwortliche/Organisation	Internetadresse
1	Hamburg-Allermöhe	Deutschland	Hamburg	1990	Komposttoilette		
2	Hamburg-Braamwisch	Deutschland	Hamburg	1992	Komposttoilette	Ökologische Siedlung Braamwisch e.V.	www.oekologisch.esiedlungbraamwisch.de
3	Kiel-Hassee	Deutschland	Kiel	1992	Komposttoilette	Ökologische Siedlung Hassee	
4	Öko-Technik-Park Hägewiesen	Deutschland	Hannover	1992	Vakuumtoilette	BauBeCon AG mit Stadtwerke Hannover AG	www.oeko-technik-park.de
5	As	Norwegen	As	1992	Trockentoilette		
6	Ecological Village Björnsbyn	Schweden	Björnsby (Lulea)	1994	Separations-toilette	NLH (Norrbottns Läns Hushållningssällskap – the Agricultural Society of Norrbotten County)	
7	Bielefeld Waldquelle	Deutschland	Bielefeld	1995	Komposttoilette		
8	Palsternackan	Schweden	Stockholm	1995	Separations-toilette	kommunale Wohnungsbaugesellschaft „Stockholshem“	
9	Ökosiedlung Understenshöjden	Schweden	Stockholm	1995	Separations-toilette	privat organisiertes Wohnprojekt	
10	Freiburg Vauban	Deutschland	Freiburg	1998	Vakuumtoilette		www.passivhaus-vauban.de
11	Gebers	Schweden	Skarpnäck	1998	Separations-toilette (Trockentoilette)	Fastighetsägare, BRF Konditorn, Gebersvägen 24, 28 65 Sköndal	www.iees.ch/cs/cs_4.html
12	Kiel-Vieburg	Deutschland	Kiel	1998	Komposttoilette		
13	Hylspäldet	Dänemark	Kopenhagen	1999	Separations-toilette		

Nr.	Projektname	Land	Stadt	Projektbeginn	Art der Toiletteninstallation	Verantwortliche/Organisation	Internetadresse
14	Mön Museum	Dänemark	Mön	1999	Separationstoilette		
15	Wohnsiedlung Flintenbreite	Deutschland	Lübeck	1999	Vakuumtoilette	infranova GmbH & Co. KG, Flintenbreite 4, 23554 Lübeck	www.flintenbreite.de
16	Lamberts-mühle	Deutschland	Burscheid	2000	Separationstoilette	Wupperverband	www.wupperverband.de/forschung/lambert/deutsch/abwasserkonzept.htm
17	SolarCity Linz-Pichling	Österreich	Linz	2001	Separationstoilette	SBL Stadtbetriebe Linz SBL Stadtbetriebe Linz	http://www.solarcity-linz.at/
18	Neubaugebiet „Am Römerberg“	Deutschland	Knittlingen	2004	Vakuum- und Schwerkraft-trenntoilette		www.igb.fraunhofer.de/www/GF/Umwelt/wassermanagement/dt/DEUS_Knittl.dt.html
19	Klärwerk Stahnsdorf	Deutschland	Berlin	2003	Schwerkraft-trenn-/Vakuum-separations-toiletten	Berliner Wasserbetriebe	

3.1 Beispiel 1: Getrennte Erfassung und dezentrale Behandlung von Schwarzwasser mit Energiegewinnung und Grauwasserbehandlung

Das sogenannte „Vakuum-Biogas-Konzept“, hier dargestellt am Beispiel der Wohnsiedlung Flintenbreite (Lübeck), ist besonders für dicht besiedelte Gebiete und sanierungsbedürftige Bestandsgebiete (also z.B. innerstädtische Quartiere/Häuserblocks) geeignet.

Kurze Systembeschreibung:

- Vakuumtoiletten ohne Urinseparation,
- anaerobe Behandlung in einer Biogasanlage,
- Mitbehandlung von häuslichem Bioabfall,
- Verwendung der flüssigen Nährstoffe als Dünger,
- Grauwasserbehandlung,
- Regenwasserversickerung

Die Siedlung Flintenbreite (Lübeck) ist nicht an das zentrale städtische Abwassersystem angeschlossen, sondern besitzt ein Sanitärkonzept zur Schwarz- und Grauwassertrennung.

nung für 300 bis 350 Personen (im Endausbauzustand). Eine Urinseparation findet nicht statt, weshalb dieser gemeinsam mit den Fäkalien und dem Spülwasser behandelt wird. Das Schwarzwasser (ca. fünf l/(E*d)) wird mit Hilfe von sehr wassersparenden Vakuumtoiletten (0,7-1,0 l/Spülung) über ein Vakuumsystem gesammelt, mit zerkleinerten Bioabfällen gemischt, thermisch hygienisiert und in einer Biogasanlage anaerob vergärt. Die entstehende nährstoffhaltige Flüssigkeit wird als Dünger einer landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt. Der Faulschlamm wird ebenfalls in nahe gelegenen landwirtschaftlichen Betrieben als Dünger genutzt. Das in der Biogasanlage erzeugte Biogas wird in einem BHKW direkt zur Strom- und Wärmeversorgung genutzt. Die Energieversorgung der Siedlung wird durch das BHKW sowie installierte Photovoltaik-Anlagen gedeckt.

Das verwendete Vakuumsystem erfordert kein Gefälle, weshalb die Transportleitungen gemeinsam mit den anderen Versorgungsleitungen (Wasser, Nahwärme, Strom, Kommunikation) in einer Leitungstrasse verlegt werden können. Das Vakuum wird über die zentrale Vakuumstation erzeugt, die in dem Gemeinschaftshaus der Siedlung untergebracht ist.

Das in der Siedlung entstehende Grauwasser (ca. 56 l/(E*d)) wird mit Hilfe einer Schwerkraftkanalisation entwässert und in bewachsenen Bodenfiltern gereinigt und in einen nahe gelegenen Vorfluter eingeleitet bzw. auf dem Weg dorthin versickert.

Das Regenwasser wird oberflächennah in Rinnen, die in die befestigte Oberfläche (Wege, Straßen) integriert sind, abgeleitet und in dezentral angeordneten Mulden versickert. Alternativ ist eine Einleitung in einen nahe gelegenen Bachlauf möglich. Der Wasserverbrauch in der Siedlung liegt bei dem hohen Komfort im Sanitärbereich mit ca. 70 l/(E*d) sehr niedrig, liegt aber in anderen ökologisch aufgebauten Siedlungen in der gleichen Größenordnung.

Die Erfahrungen aus dem Projekt Flintenbreite legen die Errichtung einer Betreibergesellschaft nahe, um ein Funktionieren der technischen Anlagen in diesem Maßstab bei enger Verzahnung zwischen den verschiedenen Ver- und Entsorgungsbereichen sicherzustellen. Für die Wohnsiedlung Flintenbreite wurde eine Betreibergesellschaft (infranova Bauentwicklung GmbH) gegründet, der alle Eigentümer und Bewohner der Siedlung angehören. Diese Gesellschaft finanziert die Infrastruktur vor, errichtet und betreibt die Anlagen. Eine Refinanzierung erfolgt durch eine Umlage bei Immobilienerwerb in der Siedlung und durch eine verbrauchsabhängige Kostenumlage (Otterpohl und Oldenburg 2002; Oldenburg 2004)²³.

23 Es wird im Rahmen dieser Technikrecherche keine Analyse und Bewertung von geeigneten Betriebs- oder Betreibergesellschaften vorgenommen und wie die Rechtsbeziehungen zwischen Kommune und Betreiber auszugestalten sind. Das Beispiel „Flintenbreite“ dient lediglich der Illustration des gewählten Sanitärkonzepts.

Trägerstruktur des Projektes „Flintenbreite“

Die eigens gegründete Betriebsgesellschaft (infranova GmbH & Co KG) ist der Grundstückseigentümer und Eigentümer aller technischen Erschließungsanlagen, Gemeinschaftsflächen und des Gemeinschaftshauses. Sie ist zuständig für die Ver- bzw. Entsorgung der Häuser mit Energie, Strom, Wärme, Wasser, Kabel-TV, Abwasser, Müll, Bioabfall sowie die Instandhaltung und den Betrieb der technischen Anlagen.

Die Bewohner der Siedlung erwerben die Grundstücke und damit verbundene Erbbaurechte von der Betriebsgesellschaft. Sie stellen die Kommanditisten der Betriebsgesellschaft dar. Der Hausbau oder -verkauf ist hingegen unabhängig von der Betriebsgesellschaft.

Die Refinanzierung der Leistungen der Betriebsgesellschaft erfolgt über Umlagebeiträge für alle Bewohner sowie Erbbauzinsen. Gegenüber herkömmlichen Formen der Infrastruktur werden deutlich niedrigere Betriebskosten erwartet.

Die Planungskosten des Projektes sowie die Betriebsbegleitung der abwassertechnischen Systeme wurden durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Für innovative Elemente der Erschließung konnten zinsgünstige Kredite in Anspruch genommen werden (Kreditvolumen ca. 0,85 Mio. Euro von 3,85 Mio. Euro). Zehn der Hauserwerber erhielten Zuschüsse von der Landesregierung in Höhe von je ca. 10.000 Euro (nach Otterpohl 2006).

Der Einsatz der Vakuumtechnik zur Erfassung und Ableitung des aufkonzentrierten Schwarzwassers kann ebenso als funktionsfähig bezeichnet werden wie die Technologien zur Behandlung des Schwarzwassers. Wie bei anderen de- und semizentralen Anlagen ist die Einweisung und Betreuung des Bedienpersonals wesentlich für einen ordnungsgemäßen Betrieb. Das Ergebnis eines Szenarienvergleichs unter Berücksichtigung des Vakuum-Biogas-Konzeptes mit zusätzlicher Urinseparation im Rahmen des Projektes AKWA 2100 zeigt, dass bei Betrachtung eines urbanen Systems trotz weitgehender Dezentralisierung die Mehrkosten vernachlässigbar gering sind (Otterpohl und Oldenburg 2002).

Vorteile des dargestellten Sanitärkonzeptes (nach Wilderer und Paris 2001):

- Trinkwasserersparnis von bis zu 90 Prozent durch Vakuumtoiletten;
- Reduzierung der erforderlichen Rohrleitungsquerschnitte für die Vakuumleitungen durch verringerte Abwassermengen, dadurch Investitionsvorteil, ggf. Einzug in bestehende Leitungen möglich;
- Verlegung von Leitungen in gemeinsamen Trassen möglich, da bei Entwässerungssystem mit Vakuumtechnologie nicht auf ein erforderliches Gefälle geachtet werden muss;
- Gewinnung von Energie bei Vergärung der Fäkalien und Bioabfälle. Aufgrund des hohen Feststoffgehaltes des relevanten Teilstroms kann eine anaerobe Stabilisierung wirtschaftlich sein;

- Faulschlamm stellt wertvollen Dünger dar, der teuren synthetischen Dünger ersetzen kann;
- Einsatz praxiserprobter Komponenten (Vakuumtoiletten, anaerobe Behandlung).

Nachteile des dargestellten Sanitärkonzeptes (nach Wilderer und Paris 2001):

- Drei getrennte Rohrleitungssysteme für Schwarzwasser, Grauwasser und Regenwasser erforderlich;
- Unterdruckanlagen für Vakuumtechnologie relativ kostenintensiv,
- Lagerung und Transport des nassen Gärschlammes aus der Biogasanlage (ca. 2,3 m³[E*a]).

3.2 Beispiel 2: Getrennte Erfassung und dezentrale Behandlung aller Abwasser-teilstrome ohne Energiegewinnung

Im Gegensatz zu oben dargestelltem Vakuum-Biogas-Konzept kann ein Abwassersystem mit NoMix-Toiletten und Kompostierung der Fäkalien für kleinere Dörfer und einzelne Häuser eine kostengünstige und wartungsarme Lösung darstellen. Die Anwendung wird im Folgenden exemplarisch an dem Projekt „Lambertsmühle“ vorgestellt.

Kurze Systembeschreibung:

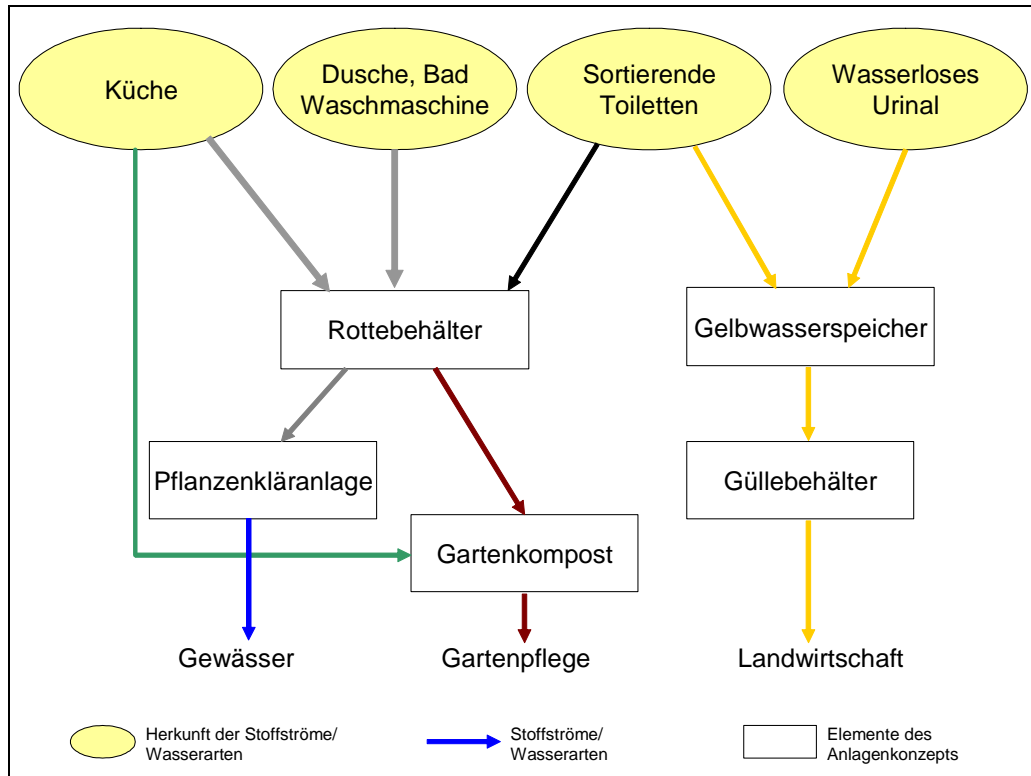
- Urinseparationstoiletten und wasserlose Urinale,
- Vorreinigung des Braunwassers in Rottebehältern,
- Behandlung des Grauwassers in einer Pflanzenkläranlage,
- Verwendung des Gelbwassers als Dünger,
- Verwendung des Faulschlammes als Dünger.

Bei der Restaurierung der Mühle im Wiembachtal wurde eine Sanierung des Abwassersystems erforderlich. Durch eine getrennte Erfassung der einzelnen Teilströme des häuslichen Abwassers und eine Wiederverwendung von Nährstoffen als Dünger wird der Nährstoffkreislauf geschlossen. Das Konzept ist generell für den ländlichen Raum geeignet.

Die einzelnen Elemente des Anlagenkonzeptes der Lambertsmühle zeigt die Prinzipskizze in Abbildung 15.

Tabelle 12 stellt die Einzelelemente mit ihrer Anlagenfunktion in einer Übersicht dar.

Abbildung 15: Prinzipskizze Sanitär- und Abwasserkonzept Lambertsühle*



*Quelle: Darstellung nach Otterwasser 2007.

Vorteile (nach Wilderer und Paris, 2001):

- Kostengünstig und wartungsarm, deshalb auch für kleinere Einheiten geeignet;
- reduzierter Abwasseranfall durch wassersparende NoMix-Toiletten (ca. 0,2 l Wasser je Urinspülung und ca. 4-6 l Wasser pro Fäkalspülung);
- landwirtschaftliche Nutzung des entstehenden Kompostes reduziert den erforderlichen Bedarf an synthetischen Düngemitteln;
- Nutzung des Gelbwassers als Dünger kann theoretisch Kunstdünger substituieren.

Nachteile (nach Wilderer und Paris, 2001):

- Ablagerungen/Verstopfungen in der Urinableitung aufgrund kleiner Querschnitte möglich;
- Sitzposition beim Urinieren ist erforderlich (unter Umständen Akzeptanzproblem bei Männern);
- durch die Benutzung falscher Reinigungsmittel und anfänglicher Konstruktionsfehler traten Schwierigkeiten auf;
- separate Beseitigung des nach dem Urinieren benutzten Toilettenpapiers erforderlich (separater Behälter oder über Fäkalienbecken).

Tabelle 12: Schematische Darstellung der Elemente des Abwasserkonzepts der Lamberts-mühle*

Element	Funktion
Wasserfreie Urinale	Erfassung des unverdünnten Urins
Separierende Toilette	Erfassung des gering verdünnten Urins
Gelbwasserspeicher	Sammlung und Lagerung des Gelbwassers
Rottebehälter	Sammlung und Kompostierung des Dickstoffanteils aus den verdünnten Fäkalien, Abtrennung der Feststoffe aus Braun- und Grauwasser
Gartenkompost	Nachkompostierung des vorkompostierten Dickstoffanteils aus dem Rottebehälter gemeinsam mit Küchenabfällen und Gartenschnitt
Pflanzenkläranlage	Reinigung des vorgeklärten Grauwassers

*Quelle: Otterwasser 2007.

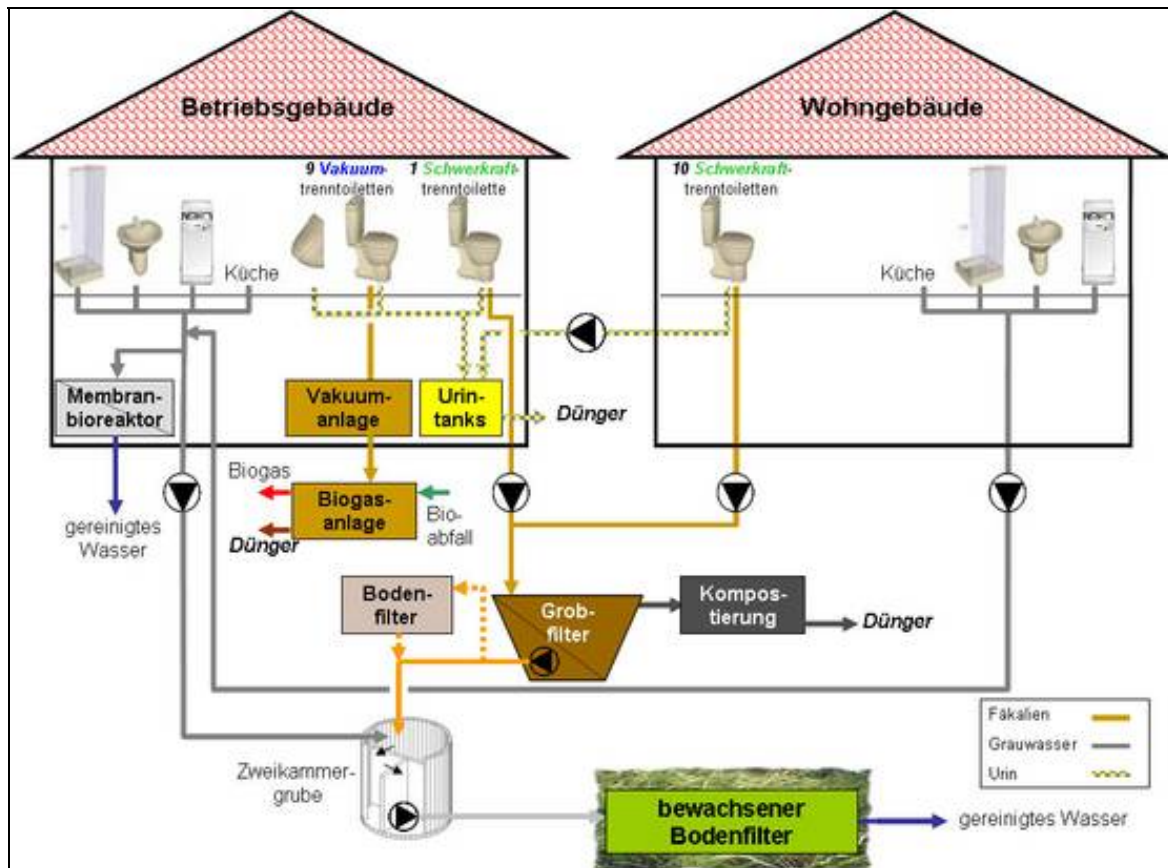
3.3 Beispiel 3: Getrennte Erfassung und dezentrale Behandlung aller Abwasser-teilstrome mit Energiegewinnung

Die beiden obig dargestellten Sanitärkonzepte wurden in ähnlicher Form im Rahmen eines EU-Demonstrationsvorhabens auf dem Gelände der Kläranlage Stahnsdorf erprobt (Fröhlich u.a. 2006). In einem Fall werden Schwerkrafttrenntoiletten eingesetzt und die Fäkalien werden unter Wurmzugabe kompostiert (Konzept 1) und im anderen Fall kommen Vakuumtrenntoiletten zum Einsatz und die Fäkalien werden anaerob behandelt (Konzept 2). Die beiden realisierten Sanitärkonzepte für die Betriebs- und Wohngebäude stellt Abbildung 16 schematisch dar.

Kurze Systembeschreibung:

- Urinseparationstoiletten (Vakuumtrenntoiletten/Schwerkrafttrenntoiletten) und wasserlose Urinale,
- anaerobe Behandlung des Braunwassers aus Vakuumtrenntoiletten in Biogasanlage gemeinsam mit Bioabfall
- Kompostierung des Braunwassers aus Schwerkrafttrenntoiletten
- Verwendung des Kompostes als Dünger
- Behandlung des Grauwassers in Zweikammergrube und Bodenfilter
- Verwendung des Gelbwassers als Dünger

Abbildung 16: In Erprobung befindliche Sanitärkonzepte auf dem Gelände der Kläranlage Stahnsdorf*



*Quelle: Anton Peter-Fröhlich u.a. 2006; www.kompetenz-wasser.de/SCST.22.0.htm.

Die Erfassung des Gelbwassers innerhalb des Betriebsgebäudes erfolgt mithilfe von Vakuumentrenntoiletten (neun Stück) Schwerkrafttrenntoiletten (ein Stück) sowie wasserlosen Urinalen (fünf Stück). Die Ableitung der Fäkalien erfolgt mittels Schwerkraft, die Entwässerung und Eindickung in einem Grobfilter (hängende PE-Säcke). Die eingedickten Feststoffe werden kompostiert (mithilfe von Eisenia-fetida-Würmern, 20°C, vier bis sechs Monate) und das Filtrat in die Vorklärung (Zweikammergrube), in der auch das Grauwasser mechanisch behandelt wird, geleitet. Das Gemisch aus mechanisch gereinigtem Grauwasser und Fäkalifiltrat wird mit einem bepflanzt Bodenfilter weitergehend gereinigt.

Das gereinigte Grauwasser kann z.B. für Entwässerungszwecke verwendet werden. Der entstehende Kompost soll landwirtschaftlich als Dünger verwertet werden. Eine Grauwasseraufbereitung mit Hilfe einer Membranbiologie wird parallel untersucht.

Das in einem Tank gesammelte Gelbwasser wird testweise mit verschiedenen Verfahren (Vakuumverdampfung, Dampfstrippung, Fällung, Ozonierung, UV-Bestrahlung und Verfahrenskombinationen ...) behandelt mit dem Ziel, dieses als Dünger zu verwenden.

Für das Wohngebäude mit zehn Wohnungen sind Vakuumseparationstoiletten geplant. Urin und Grauwasser werden mittels Schwerkraft und die Fäkalien gemeinsam mit dem Spülwasser in einem Vakuumsystem transportiert. Die Fäkalien werden gemeinsam mit zerkleinerten Bioabfällen in einer Biogasanlage anaerob stabilisiert. Der entstehende Schlamm soll als landwirtschaftlicher Dünger, das Biogas in Gasherden oder in einem Blockheizkraftwerk zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Die Behandlung des Gelb- sowie Grauwassers erfolgt auf die gleiche Art wie innerhalb des Betriebsgebäudes. Ist keine Biogaserzeugung gewünscht oder möglich, kann der stabilisierte Schlamm z.B. kompostiert werden.

Das vorgestellte Konzept vereint die Vorteile der beiden vorher beschriebenen Systeme. Die Erfahrungen aus der Umsetzung zeigen jedoch zusätzliche Vor- und Nachteile auf.

Vorteile:

- Reduzierter Abwasseranfall durch wassersparende Vakuumtrenntoiletten (Spülwasserverbrauch von 1,0 – 2,0 Liter je Spülung; bei Serienfertigung der Toilette sollte die Spülwassermenge unter einem Liter liegen).
- Gute Stickstoffoxidation in dem vertikal beschickten bepflanzten Bodenfilter.
- Konzentrationen coliformer und fäkalcoliformer Keime des Ablaufs der Grauwasserbehandlung (Bodenfilter) deutlich unterhalb des sehr guten Qualitätsstandards der EU-Badewässerrichtlinie (< 100 MPN/100 ml). Nach Anschluss des Wohngebäudes stiegen diese jedoch deutlich an.
- Gute Ablaufqualitäten des Membranbioreaktors (25 g/m³ CSB und acht g/m³ ges. N) konnten mit einem niedrigen Schlammalter von sechs Tagen und einer Aufenthaltszeit des Grauwassers von zwei Stunden erreicht werden. Bei den geringen Stickstoffkonzentrationen ist allerdings davon auszugehen, dass der größte Anteil der Stickstoffelimination durch Assimilation in die Biomasse erreicht wird.
- Landwirtschaftliche Verwertung des Gelbwassers sowie des Kompostes mit sehr zufriedenstellender Qualität möglich.

Nachteile:

- Optimierung der Schwerkrafttrenntoiletten hinsichtlich Geometrie und Spülung erforderlich.
- Vakuumtrenntoiletten erst als Prototyp (Einzelanfertigung) verfügbar, da es sich um modifizierte Schwerkrafttrenntoiletten handelt, die mit einem Vakuumventil am reduzierten Abfluss ausgestattet sind.
- Hohe Stickstoffkonzentrationen im Grauwasser, evtl. ausgelöst durch nicht korrekt arbeitende Verschlussventile in den Schwerkrafttrenntoiletten.
- Art der Fäkalientwässerung (PE-Filtersäcke als Grobfilter, mechanische Klärung des Fäkalfiltrates in Zweikammersystem) nur für niedrige Anschlussgrößen geeignet ist. Für größere Siedlungen ist eine kontinuierlich laufende Einrichtung erforderlich, mit der die Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe im Fäkalienkonzentrat möglichst noch weiter verringert werden kann.

- Alternative Konzepte für sonnenreiche ländliche und periurbane Regionen können dezentrale Dehydrierungssysteme wie z.B. die Erhitzung und Trocknung von Fäzes (mit Solarheizung und Doppelkammersystem) oder die Kompostierung und Verwertung in der Landwirtschaft (Betrieb Komposter häufig problematisch: Entwicklungsbedarf) sein.

3.4 Beispiel 4: Dezentrale Behandlung von häuslichem Abwasser mit Energiegewinnung und Regenwasseraufbereitung zu Brauchwasser

In einem Neubaugebiet in Knittlingen wurde das sogenannte DEUS21-Konzept in einem Demonstrationsvorhaben umgesetzt.

Kurze Systembeschreibung:

- Vakuumtoiletten ohne Urinseparation,
- anaerobe Behandlung des Abwassers in Membranbiologie,
- Co-Vergärung häuslicher Bioabfälle,
- Verstromung des entstehenden Biogases,
- Verwendung der aus dem Abwasser rückgewonnen Nährstoffe in der Landwirtschaft,
- Regenwasseraufbereitung mit Hilfe einer Membrananlage und Nutzung als Brauchwasser (Duschen, Baden,...)

Abbildung 17: Schematische Darstellung der Stoffströme in dem Projekt DEUS21*



*Quelle: Fraunhofer IGB; www.deus21.de.

Die Teilströme Abwasser und Regenwasser werden getrennt gesammelt und dezentral aufbereitet. Dabei wird das Regenwasser mit Hilfe einer Membrananlage auf Trinkwasserqualität aufbereitet und als Brauchwasser wiederverwendet.

Das häusliche Abwasser inklusive Grauwasser wird gemeinsam mit den in den Haushalten entstehenden Bioabfällen in einem Membran-Bioreaktor anaerob behandelt. Das entstehende Biogas versorgt die Anlage mit Strom und Wärme. Überschüssiger Strom wird in das Versorgungsnetz eingespeist. Die Abwasserreinigung ist verfahrenstechnisch so ausgelegt, dass praktisch kein Klärschlamm entsteht. Die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe (besonders Stickstoff und Phosphor) stehen nach der Abwasserbehandlung in Form von Düngesalz für die landwirtschaftliche Verwendung zur Verfügung.

Die Anlagen zur Regenwasseraufbereitung sowie die Vakuumstation befinden sich in einem zentralen Betriebsgebäude und werden von der Stadt Knittlingen betreut, wodurch ein professioneller Betrieb und ausreichende Wartung sichergestellt wird.

Vorteile:

- Reduzierung der Abwassermenge durch Vakuumtechnologie: eingesetzte Vakuumtoiletten verbrauchen ca. 0,5 bis ein Liter Wasser pro Spülgang;
- Reduzierung der erforderlichen Rohrleitungsquerschnitte für die Vakuumleitungen durch verringerte Abwassermengen, dadurch Investitionsvorteil;
- Verlegung von Leitungen in gemeinsamen Trassen möglich, da bei Entwässerungssystem mit Vakuumtechnologie nicht auf ein erforderliches Gefälle geachtet werden muss;
- Gewinnung von Wärme und elektrischer Energie aus Abwasser und Bioabfällen;
- Co-Vergärung der häuslichen Bioabfälle, die direkt über das Vakuum-Abwassersystem entsorgt werden können (Zerkleinerer unter der Spüle);
- Keine Geruchsbelästigungen aufgrund anaerober Abwasserbehandlung;
- Landwirtschaftliche Verwertung der aus dem Abwasser rückgewonnenen Nährstoffe möglich;
- Einsatz praxiserprobter Komponenten (Vakuumtoiletten, anaerobe Behandlung);
- Trinkwassereinsparungen.

Nachteile:

- Unterdruckanlagen für Vakuumtechnologie relativ kostenintensiv;
- Zu Trinkwasserleitungen paralleles Leitungsnetz für Brauchwasser erforderlich, relativ kostenintensiv (besonders für Neubaugebiete interessant, im Bestand aufwändiger);
- Behandlung allen häuslichen Abwassers, statt gezielter Teilstrombehandlung.

4. Chancen und Risiken – eine vorläufige Bilanz

Die vorliegende Technikrecherche zeigt generelle Möglichkeiten des vermehrten Einsatzes semi- und dezentraler Anlagen auf. Die untersuchten Studien und die recherchierten Modellprojekte machen deutlich, dass zahlreiche Fragen hinsichtlich der mit diesen Systemen verbundenen Chancen und Risiken derzeit noch offen sind. An dieser Stelle soll daher auch keine abschließende Bewertung vorgenommen werden.

Maßgebliche Indikatoren aus den Bereichen Gesundheitsvorsorge, Ökologie und Ökonomie (Rakelmann 2002) sprechen für eine Transformation der heutigen Abwassersysteme in Richtung geschlossener Stoffkreisläufe, Energienutzung und Nährstoffrecycling. Um dieses Ziel effizient zu erreichen, ist eine Trennung bzw. getrennte Haltung der verschiedenen Teilströme wesentlich. Dies ist in unserem derzeitigen Abwassersystem jedoch nicht vorgesehen und durch die installierten Komponenten nicht möglich. Da ein Systemwechsel nicht abrupt (abgesehen von Neubaugebieten), sondern allenfalls sukzessive stattfinden kann, stellt sich die Frage nach dem sinnvollen und gangbaren Einstieg in die Umgestaltung des Systems.

Möglichkeiten der Umgestaltung

Bisher ist der größte Teil der kommunalen Abwasserableitung in Deutschland im Mischsystem ausgeführt (2001: 63,2 Prozent). Da bei diesem System jedoch eine Stoffstromtrennung und damit eine gezielte Wiederverwendung oder Nährstoffnutzung nicht möglich ist, ist aus Sicht einer nachhaltigen, innovativen Abwasserentsorgung dem Trennsystem der Vorzug zu geben, zumal letzteres den Vorteil hat, dass weniger Schadstoffe durch z.B. Abschlagswassermengen in die Gewässer eingetragen werden. Eine Umgestaltung der zentralen Mischsysteme auf zentral aufgebaute Trennsysteme kann damit den ersten Schritt in Richtung einer nachhaltigen Abwasserentsorgung darstellen, ermöglicht es doch eine Entlastung der Kläranlagen sowie der Gewässer und lässt Optionen für weitere Stoffstromabtrennungen oder Nährstoffnutzung zu. Bei der Erwägung der Einrichtung eines zentralen Trennsystems in Bestands- oder auch Neubaugebieten sollte jedoch auch der unmittelbare Einsatz semi- oder dezentraler Lösungen untersucht werden, da diese technischen Optionen im Vergleich zu der Einrichtung eines zweiten zentralen Abwassernetzes unter Umständen wesentliche wirtschaftliche Vorteile bieten.

Betrachtet man die Stoffströme der heutigen Abwasserbeseitigung in einem Ballungsraum erscheint im Hinblick auf eine Minderung der Umweltbelastung, dem hierfür notwendigen Aufwand, den noch verbliebenen Restbelastungen und Entsorgungswegen sowie der Nährstoffrückgewinnung die Abtrennung des hochkonzentrierten Urins als besonders interessanter Ansatzpunkt.

Eine Option hierfür besteht in der nachträglich sukzessiven Einführung von urinseparierenden Toiletten mit entsprechenden Urinspeichern. Die Urinspeicher können zunächst an das herkömmliche Kanalnetz angeschlossen werden, sodass die Vorteile zu Beginn lediglich in der Wasserersparnis und je nach Ableitungsstrategie in das bestehende Kanalnetz in der Vergleichmäßigung der Stickstoffzulaufganglinie und damit in einer Steigerung der

Nitrifikationsleistung der Kläranlage liegen. Bei Erreichen einer ausreichenden Anschlussdichte kann eine Abkopplung des Urinstroms zum Zwecke einer getrennten Nutzung der hochkonzentrierten Nährstofflösung z.B. als Dünger durchgeführt werden. Bei weitgehender Urinseparation aus dem abgeleiteten Abwasserstrom kann die konventionelle Kläranlage eine gute Ressourceneffizienz für Nährsalze erzielen, da keine Stickstoffelimination mehr erforderlich ist, deren limitierender Faktor die Nährstoffversorgung mit Phosphor und Kohlenstoff bzw. das richtige C:N:P-Verhältnis darstellt. Bei eingeschränkter oder gar entbehrlicher Stickstoffelimination kann ein Nährstoffmangel den Klärprozess nicht mehr limitieren. Die Verfahrensstufen der Nitri- und Denitrifikation als großer Kostenfaktor im Rahmen der Abwasserbehandlung können je nach spezifischer Situation reduziert werden oder sogar entfallen. Auch die Ausschleusung des im Gelbwasser enthaltenen Phosphors würde die erforderliche Phosphorfällung aus dem Abwasser reduzieren oder je nach individueller Abwasserzusammensetzung entbehrlich machen, was neben der Kostenersparnis zugleich die zusätzliche Umweltbelastung durch Fällmitteleinsatz reduzieren bzw. entfallen ließe (Rakelmann 2002).

Eine weitere Stufe der Anpassung der zentralen Abwassersysteme könnte die sukzessive Abkopplung der vorhandenen Toiletten von dem zentralen Kanalsystem und deren Ersatz durch geeignete Schwarzwassersysteme mit separater Behandlung darstellen. Auf Dauer würden die Kläranlagen dadurch entlastet und bei der Existenz eines Trennsystems theoretisch zu Anlagen für die Aufbereitung von Grauwasser zuzüglich Industrieabwasser (Otterpohl und Oldenburg 2002). Durch Abtrennung des Teilstroms Schwarzwasser können die Inhaltsstoffe des Abwassers stofflich sowie energetisch nahezu vollständig genutzt werden.

Chancen und Risiken

Die Akzeptanz der Nutzer ist ein zentraler Aspekt bei der Umgestaltung städtischer Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen. Kulturelle Barrieren und Gewohnheiten müssen durch Information und Sensibilisierung der Bevölkerung überwunden werden. Gleiches gilt für generelle Bedenken in Bezug auf *Hygiene* und *Betriebstechnik* bei der Aufbereitung von Abwasserströmen zu Trinkwasser (Novaquatis 2008).

Weiterhin werden immer wieder die schwierige *Überwachung und Qualitätskontrolle* und die damit einhergehenden hygienischen Risiken bei kleinräumigen Lösungen als Argument gegen alternative Konzepte ins Feld geführt. Hier sind innovative Technologien im Bereich Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik gefragt, die auch semi- und dezentrale Anlagen aus der Entfernung überwachbar machen.

Zum Teil sprechen auch *wirtschaftliche Erwägungen* und *technische Bedenken* z.B. in Bezug auf Fehlanschlüsse oder Betrieb gegen innovative technische Recyclingkonzepte (Rudolph und Schäfer 2001). Diesen Bedenken kann durch eine technische Verbesserung der verwendeten Komponenten und Verfahren sowie kostengünstige Produktionsmethoden begegnet werden. Hier besteht wesentlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um ausgefeilte Techniken konkurrenzfähig zu produzieren. Besonders im Hinblick auf die Exportfähigkeit der deutschen Wasserwirtschaft kommt diesen innovativen Kon-

zepten und Technologien ein wesentlicher Stellenwert zu. Besonders in Ländern mit Wasserknappheit oder anderen Formen der Ressourcenlimitierung besteht großer Bedarf an praxiserprobten innovativen Ver- und Entsorgungskonzepten.

Nicht umgehen lässt sich bei der Transformation von Infrastruktur in urbanen Bestandsgebieten eine Übergangsphase, in der zwei Systeme parallel betrieben und unterhalten werden müssen. Die bestehende Infrastruktur mit ihrem hohen Fixkostenanteil muss unterhalten und gleichzeitig in das neue System investiert werden. An diesem Punkt stellt sich die Frage der Finanzierung, die vor den aktuellen Diskussionen im Hinblick auf Preiserhöhungen und neue Tarif- und Gebührenmodelle zur Deckung der hohen Fixkosten bei abnehmendem Bedarf besonderer Berücksichtigung bedarf. Die Alternative zu einer Investition in einen nachhaltigen Wandel der Wasserwirtschaft ist allerdings der kostenintensive Erhalt des existierenden, nicht den Fragen der Zeit und den Entwicklungen angepassten und inflexiblen Systems.

Den entstehenden Kosten durch die Einrichtung der neuen Systeme und Komponenten und ggf. erforderliche Übergangslösungen können auch Kostenvorteile z.B. durch Rückbau/Verkleinerung, durch hydraulische und stoffliche Entlastung²⁴ der Kanalisation, nicht mehr benötigten Regenrückhaltebecken oder durch Reduzierung der Kanal- und Trinkwassernetzdimensionen gegenüber stehen.

Die dargestellten alternativen Formen der Abwasserentsorgung haben wesentliche Vorteile hinsichtlich Wasserverbrauch und Emissionen der ausgewählten Abwasserinhaltsstoffe. Durch die Auswahl geeigneter Verfahren der Teilstrombehandlung lassen sich große Reduktionspotenziale im Wasserverbrauch und in Wasseremissionen realisieren. Das Schließen von Stoffkreisläufen unterstützt die Forderung nach Ressourceneffizienz und nach einer Verringerung der Gewässerverunreinigung. Dezentrale Infrastruktursysteme gewinnen nicht zuletzt deshalb immer mehr Bedeutung, da die Rückgewinnung von Energie und Nährstoffen innerhalb von kleinräumigen Systemen besser umgesetzt werden kann (Zimbelmann 2007).

Weiterhin bestehen in der verstärkten Anwendung von semi- und dezentralen Systemen der Ver- und Entsorgung für Ver- und Entsorgungsunternehmen Möglichkeiten, kundenorientierte Dienstleistungen für den zuverlässigen Betrieb dieser Anlagen zu schaffen. In Kooperation mit Energie- oder Gasversorgungsunternehmen könnten z.B. Kommunikationsinfrastrukturen für Fernablesung von Verbrauchsdaten, Fernüberwachung und -diagnose aufgebaut werden. So könnten Wasserversorgungsunternehmen ihr Geschäftsfeld erweitern, indem sie privaten Haushalten im Rahmen von Contracting-Angeboten dezentrale Technologien wie Regenwassernutzung und Grauwasseraufbereitung, aber auch andere wassersparende Armaturen und Sanitärsysteme samt der zugehörigen Dienstleistungen einschließlich Wartung und Instandhaltung anbieten. (Rudolph und Block 2002). Erfolgreiche Beispiele für solche innovativen Dienstleistungen durch Versorgungsunternehmen gibt es bereits, besonders im Energiesektor, wo Energieversorgungsunterneh-

24 Bei einer Abtrennung von Schwarzwasser ist eine hydraulische Entlastung des im System verbleibenden Grauwassers aus ökologischen Gründen weitaus weniger kritisch, da die Nährstoffe und die Oberflächengewässer verunreinigenden Substanzen zu großen Teilen nicht mehr im Abwasser enthalten sind.

men ihren Kunden Beratung, Dienstleistung und Finanzierung für innovative dezentrale Energietechnologien (wie Solarthermie, Wärmepumpen etc.) anbieten.

Durch solche nachfrageseitigen Maßnahmen kann die Flexibilität des starren, zentralen Konzeptes der Wasserver- wie auch der Abwasserentsorgung sowohl gegenüber veränderten Kundenanforderungen als auch gegenüber der Integration innovativer Technologien deutlich erhöht werden. In einer integrierten Betrachtung der Wasserwirtschaft liegt zudem ein Potenzial zur Erschließung von Synergien zwischen den Sektoren der Wasserversorgung und der Abwasserentsorgung (z.B. im Bereich des Netzmanagements, der Konzeption von umfassenden Wasserdienstleistungsangeboten), was die Effizienz der Wassernutzung in Siedlungsgebieten erhöhen kann.

Abschließend noch eine Bemerkung: In jüngster Zeit wird generell Kritik an der Installation von Systemen laut, die zu einer weiteren Absenkung der ohnehin aufgrund von Verbrauchsänderungen und abnehmenden Bevölkerungszahlen sich reduzierenden Frischwasser- und Abwasserströme führen könnte (Leist 2007). Die Argumentation der Kritiker verweist insbesondere auf die gegenwärtig steigenden Betriebskosten, die beispielsweise durch vermehrtes Spülen der vorhandenen Netze zur Vermeidung von Verkeimung, Korrosion usw. verursacht werden und letztlich die Preise und Gebühren weiter ansteigen lassen. Die Argumentation bewegt sich – kurzfristig durchaus schlüssig – in der Logik der vorhandenen stadttechnischen Infrastruktur. Sie verkennt jedoch, dass die Betriebskosten nur begrenzte Aussagekraft besitzen – zumal bei sich dauerhaft verändernden Randbedingungen –, sie vernachlässigt die Frage, inwieweit das vorhandene System langfristig tragfähig ist und differenziert zu wenig zwischen teilräumlichen Kontexten, in denen nachhaltige Sanitärsysteme vorhandene Probleme entschärfen helfen können. Zudem berücksichtigt eine solche Argumentation nicht entstehende volkswirtschaftliche Kosten bei fehlender Innovation in das System. Diese Probleme wurden durch den Forschungsverbund netWORKS bereits frühzeitig erkannt und problematisiert (z.B. Koziol 2006). Die Schlussfolgerung eines „weiter so“ im bestehenden System erscheint auf Dauer wenig überzeugend und der dynamischen Praxis vor Ort wenig angemessen. Gerade weil sich zentrale Randbedingungen grundlegend ändern und technische Alternativen prinzipiell zur Verfügung stehen, bedarf es einer systematischen Überprüfung der Voraussetzungen und Ansätze zur Transformation der vorhandenen Netze und Anlagen; dies ohne leichtfertig die Funktionalität zu gefährden (Kluge/Libbe 2006), aber auch ohne Vorbehalte gegenüber gangbaren Alternativen. Die vorliegende Technikrecherche soll hierzu einen Beitrag leisten.

Literatur

- Anonymus (1984): DIN 4261 Kleinkläranlagen – Teil 2: Anlagen mit Abwasserbelüftung; Anwendung, Bemessung und Prüfung. Berlin.
- Anonymus (2002): DIN 4261 Kleinkläranlagen – Teil 1: Anlagen zur Abwasservorbehandlung. Berlin.
- Anonymus (2004): DIN EN 12566: Kleinkläranlagen für bis zu 50 EW – Teil 1: Werkmäßig hergestellte Faulgruben (enthält Änderung A1:2003). Deutsche Fassung EN 12566-1:2000 + A1:2003. Ausgabe 05/2004. Köln.
- ATV-DVWK (2002): Auswirkungen von Abkopplungsmaßnahmen auf die Kanalnetzhydraulik. In: KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Nr. 49/4, S. 508-513.
- ATZ (2007): Vorstellung des Verfahrens sludge2energy®. Auf: Woche der Umwelt, 5.-6. Juni 2007. Berlin.
- Barjenbruch, M./Al Jiroudi, D. (2006): Kleinkläranlagen im Vergleich. In: Gewässerschutz Wasser Abwasser – GWA, Nr. 202 39. Beitrag 29 (Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft).
- Bauhaus Universität Weimar (2000): Dezentrale Abwasserbehandlung – Aufgaben, Funktion und Auswahl von Kleinkläranlagen. Präsentationsfolien.
- Becker M./Mang, J./Pfister, A. (2007): Klimawandel und Siedlungswasserwirtschaft im Emscherraum. Vortrag im Rahmen des 20. Mülheimer Wassertechnischen Seminars „Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft – Herausforderungen und Lösungen“, 22.12.2007. Mülheim an der Ruhr (IWW).
- Becker R. (2006): Optimierung thermischer Systeme in dezentralen Energieversorgungsanlagen. Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Dortmund.
- BGW (2008): „Trinkwasserverwendung im Haushalt 2006“. Grafik des bdew. <http://bgw-archiv.bdew.de/files/trinkwasserverwendung-im-haushalt-preview.jpg> (Stand: 10.4.2008).
- Blesl, M./Ohl, M./Keicher, K./Fahl, U./Krampe, J./Pinnekamp, J. (2004): Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen Potentialabschätzung für Baden-Württemberg. Zwischenbericht anlässlich des Statusseminars des BWPLUS am 2. und 3. März 2004 im Forschungszentrum Karlsruhe. Förderkennzeichen: BWI 22 006.
- Bogner, R./Faulstich, M./Mocker, M./Quicker, P. (2008): sludge2energy – dezentrale Klärschlammverwertungsanlage zur Erzeugung von thermischer und elektrischer Energie; http://www.sludge2energy.eu/de/s2e_downloads.htm (Stand: April 2008).
- Branchenbild (2008): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2008. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V. (ATT), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW), Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft e.V. (DBVW), Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Technisch-

wissenschaftlicher Verein (DVGW), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU), wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Bonn.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.) (2005): Nachhaltige Strategien der Abwasserentsorgung im ländlichen Raum – SUSAN, Forschungsprojekt, Modul 1 Endbericht. Wien 2005.

Buri, R., und Kobel B. (2005): Energie aus Kanalabwasser – Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen. Osnabrück und Bern (<http://www.dbu.de/phpTemplates/publikationen/pdf/10110609025715.pdf>).

Cornel, P./Weber, B./Böhm, H. R./Bieker, S./Selz, A. (2004): Semizentrale Wasserver- und Entsorgungssysteme – eine Voraussetzung zur innerstädtischen Wasserwiederverwendung? In: 73. Darmstädter Seminar „Wasserwiederverwendung – Eine ökologische und ökonomische Notwendigkeit wasserwirtschaftlicher Planung weltweit?“ (Schriftenreihe WAR der TU Darmstadt, Bd. 159).

Cotruvo, J. A. (2003): Two-tier systems: Part 2 – Nontraditional compliance strategies and preliminary cost estimates for small water systems. In: Journal AWWA, Nr. 95, 4, S. 116-129.

Drücker, N. (2004): Modellhafte Auslegung einer auf Stoffstromtrennung basierenden Abwasserverwertung für eine Hochhausapartmentsiedlung in Seoul, Südkorea. Diplomarbeit an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (Fachbereich Bauingenieurwesen).

DWA (2004): Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004. Hennef.

EPA (2006a): Point-of-Use or Point-of-Entry Treatment Options for Small Drinking Water Systems. EPA 815-R-06/010, April 2006.

EPA (2006b): Research Report on: Investigation of the Capability of Point-of-Use/Point-of-Entry Treatment Devices as a Means of Providing Water Security. EPA/600/R-06/012, Februar 2006.

Euwid (2007): Autarke Energieversorgung von Kläranlagen technisch möglich – Dezentraler Klärschlammverbrennung kommt große Bedeutung zu. In: euwid, Jg. 10, H. 40, S. 7.

Euwid (2008): Stromerzeugung auf Kläranlagen kann langfristig verdreifacht werden – DWA legt Studie „Energiepotenziale der deutschen Wasserwirtschaft“ vor. In: euwid, Jg. 11, H. 14, S. 1-3.

fbr (2007a) – Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V.: www.fbr.de/grauwasser.html (Stand: Dezember 2007).

fbr (2007b) – Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V, Projektbeispiele zur Betriebs- und Regenwassernutzung – Öffentliche und gewerbliche Anlagen. Darmstadt (Schriftenreihe fbr, Bd. 6).

- fbr (2004): Regenwassernutzung im häuslichen Bereich – kein Gesundheitsrisiko! http://www.fbr.de/publikation/fbr_tops/top2.pdf (Stand: Dezember 2007).
- Financial Times Deutschland (2008): Sauberer Strom aus schmutzigem Wasser. 9.3.2008. Artikel von Nicole Weinhold.
- Fragemann, H.-J./Friedrich, H./Barkowski, D./Raecke, F. (2006): Organische Schadstoffe in Klärschlämmen – Konsequenzen für die landwirtschaftliche Verwertung. In: Gewässerschutz Wasser Abwasser – GWA 202, 39. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft, 20.4.2006, Beitrag 65.
- Fraunhofer-Gesellschaft (2008): Projektbeschreibung „AKWA Dahler Feld“, http://www.isi.fhg.de/n/Projekte/akwa_dahler_feld.htm (Stand: April 2008).
- Freund, M./Oberkönig, B./Illigen-Geldmacher, C./Kraft, A. (2007): Betrieb von 21 Kleinkläranlagen in Selm. In: 7. Aachener Tagung Wasser und Membranen, 30.-31.10.2007, Aachen (Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Institut für Verfahrenstechnik, RWTH Aachen, Beitrag A25).
- Friedemann, J. (2008): Einführung in die Siedlungswasserwirtschaft, Institut für Abwasserwirtschaft Halbach; <http://www.institut-halbach.de/index.php?m=3&did=45> (Stand: April 2008).
- Fuhrmann, P./Kohl, R. (2006): Zukunft der Klärschlamm Entsorgung Baden-Württemberg. In: Gewässerschutz Wasser Abwasser – GWA 202, 39. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft, 20.4.2006, Beitrag 62.
- Gajurel, D.R./Li, Z./Otterpohl, R. (2003): Investigation of the effectiveness of source control sanitation concepts including pre-treatment with Rottebehälter. Water Science and Technology, Vol. 48, No. 1, 111-118, IWA Publishing.
- Geyler, S., und Thomas, P. (2003): Zentral oder Semizentral? Eine Modellbetrachtung zur Abwasserentsorgung kleiner und mittelgroßer Orte. Leipzig 2003 (Annual Civil Engineering Report (LACER), Nr. 8).
- Gray, S., und Booker, N. (2002): Wastewater Services for Small Communities. Proceedings, IWA World Water Congress. Melbourne.
- GTZ (2006): Datenblatt für ecosan Projekte: 016 Urine and brownwater re-use at the main office building of GTZ GmbH, Eschborn, Germany. <http://www.gtz.de/de/dokumente/en-ecosan-pds-016-germany-gtz-eschborn-2005.pdf> (Stand: 2.6.2008).
- Hans Huber AG (2008): Verfahrensschema der dezentralen Klärschlammverwertung mit Hilfe des sludge2energy®-Verfahrens. <http://www.sludge2energy.eu/de/verfahren-ueberblick.htm> (Stand: April 2008).
- Hellström, D./Johansson, E. (1999): Swedish experiences with urine separating systems. In: Wasser & Boden, 51/11, S. 26-29.

- Hoffmeister, J./Staben, N./Bolle, F.-J. (2008): Demografische und wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland – Konsequenzen für die wasserwirtschaftliche Infrastruktur. Wasser und Abfall, H: 6.
- Höglund, C./Stenström, T.-A./Jönsson, H./Sundin, A. (1998): Evaluation of faecal contamination and microbial die-off in urine separating systems. In: Wat. Sci. Tech. 38/5, S. 17-25.
- Jönsson, H./Vinneras, B./Höglund, C./Stenström, T.-A. (1999): Source separation of urine. In: Wasser & Boden, 51/11, S. 21-25.
- Jurrak, U., und Schaubert, U. (2002): Planungshilfe für zukunftsfähige Stadtteilentwicklungskonzepte – Leitziele, Zielgrößen, Indikatoren und Handlungsansätze. Vorlesungsskript Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundlagen des Ökologischen Bauens.
- Kaimer, M. (2006): Novellierung der Klärschlammverordnung – Regelungsbedarf aus Sicht von Baden-Württemberg. Vortrag bei der BMU-Expertentagung „Perspektiven der Klärschlammverwertung“, 6. bis 7. Dezember 2006, Bonn.
- Kerpen, J., und Zapf, D. (2005): Grauwasserrecycling wirtschaftlich schon rentabel? In: FACH.JOURNAL, H. 6, S. 88-92.
- Kintat, S. (2002): Potsdamer Platz – Wasserkonzept. Bauhaus Universität Weimar, http://www.uniweimar.de/architektur/oekologisches_bauen/11_projekte/2002_berlinexkurs/Exkursion2002_10_PotsdamerPlatz-wasser.pdf (Stand: 8.4.2008).
- Kluge, Thomas/Libbe, Jens/Scheele, Ulrich/Schramm, Engelbert/Trapp, Jan Hendrik (2006): Der netWORKS-Ansatz zur integrierten Strategiebildung. In: Thomas Kluge und Jens Libbe. Transformation netzgebundener Infrastruktur – Strategien für Kommunen am Beispiel Wasser. Berlin 2006 (Difu-Beiträge zur Stadtforschung, Bd. 45), S. 33-56.
- Koch, M., und Schlesinger, R. (2003): Dezentrale Abwasserentsorgung – neue Erkenntnisse, hygienische Aspekte. In: Tagungsband „Wasser, Abwasser – Wertstoffe für die Lausitz?“. Laut 5. Dezember 2003.
- Koziol, M. (2006): Transformationsmanagement unter den besonderen Bedingungen der Schrumpfung. In: Thomas Kluge und Jens Libbe: Transformation netzgebundener Infrastruktur. Strategien für Kommunen am Beispiel Wasser. Berlin (Difu-Beiträge zur Stadtforschung, Bd. 35), S. 355-400.
- Koziol, Matthias, Antje Veit und Jörg Walther (2006): Stadtumbau Ost. Anpassung der technischen Infrastruktur – Erkenntnisstand, Bewertung und offene Fragen. Werkstatt: Praxis, H. 41, hrsg. vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn.
- Lange, J., und Otterpohl, R. (2000): Abwasser – Handbuch zu einer zukunftsfähigen Wasserwirtschaft. 2. Aufl. Donaueschingen.
- Larsen, T.A., und Udert, K.M. (1999): Urinseparation – ein Konzept zur Schließung der Nährstoffkreisläufe. In: Wasser & Boden, 51/11, S. 6-9.

- Larsen, T. A., und Lienert, J. (2007): Novaquatis Abschlussbericht. NoMix – Neue Wege in der Siedlungswasserwirtschaft. Hrsg. von Eawag. Dübendorf, Schweiz.
- Leist, Hans-Jürgen (2007): Wasserversorgung in Deutschland. Kritik und Lösungsansätze. München.
- Libbe, J., und Tracht C. (2007): Literaturrecherche zu den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Städte und potenzielle Anpassungsstrategien, Deutsches Institut für Urbanistik. Berlin (Difu-interner Bericht).
- Malmén, L., Palm O. (2003): Sanitation of and Nutrient Recovery from Blackwater and Organic Material. In: ECOSAN – Closing the Loop“, Proceedings of the 2nd International Symposium on Ecological Sanitation. Lübeck.
- Maurer, M./Schwegler, P./Larsen, T.A. (2003): Nutrients in urine: energetic aspects of removal and recovery. Water Science and Technology, Vol 48, No. 1, S. 37-46 (IWA Publishing).
- Mayer, U. (2007): Regenwassernutzungsanlagen. In: Vorlesungsskript Fachhochschule OOW (Oldenburg), Fachbereich Architektur, Energie- und Gebäudetechnik, Kapitel VIII, WS07/08.
- Meyer zur Heide, F. (2005): Wärmerückgewinnung aus Abwasser – Potenzial der Zukunft. GWF, Jg. 146, Nr. 5, S. 434-436.
- MUNLV (2005) – Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Teil E; Organische Schadstoffe in Klärschlämmen – Bewertung und Ableitung von Anforderungen an die landwirtschaftliche Verwertung. Düsseldorf.
- Novaquatis (2008): Abschlussbericht des Projektes. Arbeitspaket: Nova4 „Verfahrenstechnik“, http://www.novaquatis.eawag.ch/arbeitspakete/nova4/text_D_nova4 (Stand: April 2008).
- Niederste-Hollenberg, J./Oldenburg, M./Otterpohl, R. (2002): Einsatz dezentraler Sanitärtechnologien mit getrennter Urin-Erfassung in Schweden. In: Wasser & Boden, 54/5, S. 20-24.
- Nolde, E. (2008): Grauwasserrecycling Ökologische, technische und wirtschaftliche Aspekte mit Beispielen aus der Praxis. <http://www.nolde-partner.de/pdf/grauwasserrecycling.pdf> (Stand: 8.4.2008).
- Oldenburg, M., und Otterpohl, R. (1997): Möglichkeiten der dezentralen und semizentralen Abwasserbehandlung. In: B. Weigert: Dezentrale Abwasserbehandlung in ländlich strukturierten Regionen. Berlin (Schriftenreihe Wasserforschung, Bd. 2).
- Oldenburg, M. (2004): EcoSan Konzepte in Siedlungen: Planung und Umsetzung in Deutschland. In: „EcoSan Meeting – Kreislauforientierte Abwassersysteme“, Wien (http://www.ecosan.at/download/ecosan_tagung0904_Oldenburg-Beitrag.pdf; Stand: Dezember 2007).

- Otterpohl, R./Grottker, M./Lange, J. (1997): Sustainable Water and waste management in urban areas. In: *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 9, pp. 121-133.
- Otterpohl, R. (1999): Zum Schwerpunkt „Moderne Sanitärkonzepte“. In: *Wasser & Boden*, 51/11, S. 5.
- Otterpohl, R./Oldenburg, M./Zimmermann, J. (1999): Integrierte Konzepte für die Abwasserentsorgung ländlicher Siedlungen. In: *Wasser & Boden*, 51/11, S. 10-13.
- Otterpohl, R., und Oldenburg, M. (2002): Innovative Technologien zur Abwasserbehandlung in urbanen Gebieten. In: *Korrespondenz Abwasser*, Jg. 49, H. 10.
- Otterpohl, R. (2006): Die ökologische Wohnsiedlung Flintenbreite. Lübeck (Deutsche Bundesstiftung Umwelt; <http://www.dbu.de/media/31050611220875b1.pdf>; Stand: April 2008).
- Otterwasser (2007): <http://www.otterwasser.de/german/konzepte/land.htm>; Stand: Dezember 2007.
- Paris, S., und Wilderer, P.A. (2002): Integrierte Ver- und Entsorgungskonzepte im internationalen Vergleich. In: M. Dohmann (Hrsg.): 35. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Gewässerschutz, Wasser, Abwasser. 20.-22. März 2002, Aachen (Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, Bd. 188), S. 45/1-45/15.
- Peter-Fröhlich, A./Kraume, I./Lesouëf/A., Phan, L./Oldenburg, M. (2003): Neue Sanitärkonzepte für die separate Erfassung und Behandlung der Teilströme Urin, Fäkalien und Grauwasser – Pilotprojekt. In: *Conference Wasser Berlin 2003*.
- Peter-Fröhlich, A./Pawlowski, L./Bonhomme, A./Oldenburg, M. (2006): EU-Demonstrationsprojekt Sanitärkonzepte für die separate Behandlung von Urin, Fäkalien und Grauwasser – erste Ergebnisse. Eschborn.
- Rakelmann, U. V. (2002): Alternative Sanitärkonzepte in Ballungsräumen. Vortrag auf der IFAT 2002, 12. Europäisches Wasser-, Abwasser- und Abfall-Symposium ATV-DVWK/GTZ-BMZ-Entwicklungsländer-Workshop, 14. Mai 2002. Thema: „Globale Zukunft: Kreislaufwirtschaftskonzepte im kommunalen Abwasser- und Fäkalienmanagement“.
- Richter, S., und Brüß, U. (2007): Abwasserreinigung mit containerisierten MBR-Systemen Aufgabenstellung und Betriebsergebnisse. In: 7. Aachener Tagung Wasser und Membranen. 30.-31.10.2007. Aachen (Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Institut für Verfahrenstechnik, RWTH Aachen, Beitrag A10).
- Roediger (2007): Roediger No Mix-Toilette. Vakuumsanitärtechnik, Separationstoiletten Ecosan. Datenblätter; www.roevac.com.
- Ronchetti, C./Bienz, P./Pridal, R. (2002): Ökobilanz Klärgasverstromung. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Schweiz).

- Rosenwinkel, K.-H., und Hinken, L. (2006): Energieverbrauch und -erzeugung in der Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft – Nutzung erneuerbarer Energien. In: Wasserwirtschaft im Wandel. Berlin.
- Rudolph, K.-U., und Block, T. (2002): Der Wassersektor in Deutschland. Methoden und Erfahrungen. Im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie des Umweltbundesamtes (Hrsg.).
- Rudolph, K.-U., und Schäfer, D. (2001): Untersuchung zum internationalen Stand und der Entwicklung Alternativer Wassersysteme (BMBF-Forschungsvorhaben 02WA0074).
- Runge-Metzger, A. (1995): Closing the Cycle: Obstacles to Efficient P Management for Improved Global Food Security. In: H. Tiessen: Phosphorous in the Global Environment. Scope 54, John Wiley & Sons Ltd.
- Schluff, R. (1996): Entwässerungstechnik im Umbruch. 71. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium am 26.9.1996 (Universität Stuttgart. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 140).
- Schmid-Schmieder, V. (2008): Brennstoffzellen auf Kläranlagen. Wwt-Special, Nr. 4, 2008, S. 23-28.
- Schneidlmadl, J./Hillenbrand, T./Böhm, E./Lange, J. (1999): Vergleich der Stoffflüsse von Abwasserkonzepten mit und ohne Teilstrombehandlung. In: Wasser & Boden, 51/11, S. 14-20.
- Skark, C. (2006): Organische Schadstoffe, Pharmaka und endokrin wirksame Substanzen. Vortrag bei der Veranstaltung „Perspektiven der Klärschlammverwertung“ vom 6.-7. Dezember 2006. Bonn (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit).
- Skjelhaugen, O.J. (1998): System for local reuse of blackwater and food waste, integrated with agriculture. Technik anaerober Prozesse (Technische Universität Hamburg-Harburg TUHH, DECHEMA-Fachgespräch Umweltschutz.
- Söcknick, R. (2008): Wasserbehandlung: Geräteentwicklung und Europäische Normung – eine Zwischenbilanz. GWF Wasser Abwasser, 149, Nr.3, S. 207-214.
- Trinkwasserverordnung (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV) vom 28.5.2001 (BGBl. I Nr. 24 S. 959).
- TU Clausthal (2008): EFZN erhält Auftrag, energieautarke Kläranlage zu planen. Pressemitteilung vom 19.3.2008; <http://www.tu-clausthal.de/presse/nachrichten/details.php?id=534> (Stand: April 2008).
- UBA (2008): Umweltdaten Deutschland Online. In öffentlichen Kläranlagen behandelte Abwassermenge; <http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2298>.
- UBA (2007): Alternative Wassersysteme. Umweltbundesamt; www.umweltbundesamt.de/wasser/wsektor/wasserdoku/german/s11.html (Stand: Dezember 2007).

- UBA (2004): Dezentrale Klärschlammverbrennung, Bericht aus dem Umweltbundesamt Österreich. Wien.
- Universität Darmstadt (2007): Persönliches Gespräch mit Prof. Cornel, IWW, Mülheim an der Ruhr.
- Urimat. http://urimat.de/cms/cms/upload/dok/urimat_profiline.pdf.
- VDE (2007): VDE-Studie: Dezentrale Energieversorgung 2020. Pressemitteilung vom 10.5.2007 (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, www.vde.com).
- VDI (2003): Naturnahe Abwasserbehandlung in Lahstedt. Exkursionsbericht des VDI AK Umwelttechnik des VDI-Bezirksvereins Braunschweig. Dr.-Ing. Frank Schröter, VDI, 12.12.2003; <http://ut.vdi-bs.de/Lahstedt.html> (Stand: April 2008).
- Weber, B./Cornel, P./Wagner, M. (2005): Semi-centralized Supply and Treatment Systems for (fast growing) Urban Areas. Jijo (KR).
- Wolffersdorff, S. (2004): Untersuchungen zu Sortiertoiletten unter besonderer Berücksichtigung der Urinverwertung (Diplomarbeit an der Universität Rostock).
- Wolkerstorfer, G. (2002): Dezentrale Energienutzung mit Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen. 7. Symposium Energieinnovation – Energieinnovation in Europa am 31. Januar und 1. Februar 2002, Technische Universität Graz.
- WWI: Wasserwirtschaftsinitiative NRW (2008): http://wasser.nrw.de/Dezentrale_Systeme_zur_weitergehenden_Tr.1013.0.html (Stand: Januar 2008).
- Zimbelmann, M. (2007): Tagungsbericht zum 1. Aachener Kongress Dezentrale Infrastruktur. 17.-18. Oktober 2006, In: Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis, Nr. 1, 16. Jg., S. 107-109.
- Zweckverband Grevesmühlen (2008): Homepage: <http://cgi.zweckverband-gvm.de/cgi-bin/index.php?id=286&m=0&um=361&uum=286&lid=326> (Stand: April 2008).

Abkürzungen

a	Jahr
AG	Arbeitsgemeinschaft
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Diameter Nominal (englisch für die Nennweite von Rohren, Armaturen und Bauteilen)
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
eawag	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Schweiz)
e.V.	eingetragener Verein
EW	Einwohner
EWG	Einwohnergleichwerte
fbr	Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung
g	Gramm
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GWh	Gigawattstunde
KA	Kläranlage
KW	Kilowatt
kW _{el}	Kilowatt elektrisch
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
MCFC	engl.: Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonatbrennstoffzelle)
MJ	Megajoule

MPN	Most Probable Number = wahrscheinlichste Keimzahl
MWh	Megawattstunde
N	Stickstoff
P	Phosphor
PE	Polyethylen
PKA	Pflanzenkläranlage
POE	point-of-entry
POU	point-of-use
SBR	Sequencing Batch Reactor
SDWA	Safe Drinking Water Act
SOFC	engl. Solid Oxide Fuel Cell (Festoxidbrennstoffzelle)
TWh	Terrawattstunde
UBA	Umweltbundesamt

Anhang

Veröffentlichungen des Forschungsverbunds netWORKS

netWORKS-Papers

Die Ergebnisse des Forschungsverbundes netWORKS erscheinen in der Reihe netWORKS-Papers. Kommunen haben die Möglichkeit, diese Veröffentlichungen kostenlos über das Deutsche Institut für Urbanistik zu beziehen. Interessenten aus Wissenschaft und Forschung sowie der übrigen Fachöffentlichkeit können sich die Texte kostenlos von der Projektplattform www.networks-group.de herunterladen. Bisher sind folgende Papers erschienen:

- Scheele, Ulrich
Versorgungssicherheit und Qualitätsstandards in der Wasserversorgung – Neue Herausforderungen unter veränderten Rahmenbedingungen. Diskussionspapier
Berlin 2006 (netWORKS-Papers, Nr. 23, nur Internetfassung: www.networks-group.de)
- Koziol, Matthias/Veit, Antje/Walther, Jörg
Stehen wir vor einem Systemwechsel in der Wasserver- und Abwasserentsorgung?
Sektorale Randbedingungen und Optionen im stadttechnischen Transformationsprozess. Gesamtbericht des Analysemoduls „Stadttechnik“ im Forschungsverbund netWORKS
Berlin 2006 (netWORKS-Papers, Nr. 22)
- Naumann, Matthias/Wissen, Markus
Neue Räume der Wasserwirtschaft. Untersuchungen zur Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung in den Regionen München, Hannover und Frankfurt (Oder)
Berlin 2006 (netWORKS-Papers, Nr. 21)
- Monstadt, Jochen/v. Schlippenbach, Ulrike
Privatisierung und Kommerzialisierung als Herausforderung regionaler Infrastrukturpolitik – Eine Untersuchung der Berliner Strom-, Gas- und Wasserversorgung sowie Abwasserversorgung
Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 20)
- Lux, Alexandra
Handelbare Wasserentnahmerechte als Ergänzung der ordnungsrechtlichen Vergabepolitik? Mit einem juristischen Gutachten von Eckard Rehbinder
Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 19)
- Braunmühl, Claudia von
Water Governance – Partizipation in der Wasserversorgung
Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 18)
- Lux, Alexandra/Scheele, Ulrich/Schramm, Engelbert
Benchmarking in der Wasserwirtschaft – Möglichkeiten und Grenzen einer Erweiterung des Benchmarking um ökologische und soziale Aspekte
Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 17)
- Malz, Simone/Scheele, Ulrich
Handelbare Wasserrechte – Stand der internationalen Debatte
Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 16)
- Kluge, Thomas
Ansätze zur sozial-ökologischen Regulation der Ressource Wasser – neue Anforderungen an die Bewirtschaftung durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie und Privatisierungstendenzen
Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 15)

- Schramm, Engelbert
Naturale Aspekte sozial-ökologischer Regulation. Bericht aus dem Analysemodul „Ressourcenregulation“ im Verbundvorhaben netWORKS
 Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 14)
- Spitzner, Meike
Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck – Gender-Analyse am Beispiel ÖPNV
 Berlin 2004 (netWORKS-Papers, Nr. 13)
- Döring, Patrick
Sicherung kommunaler Gestaltungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Privatisierungsformen – Beispiel Wasserversorgung
 Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 12)
- Reh binder, Eckard
Privatisierung und Vergaberecht in der Wasserwirtschaft
 Berlin 2005 (netWORKS-Papers, Nr. 11)
- Monstadt, Jochen/Naumann. Matthias
Neue Räume technischer Infrastruktursysteme. Forschungsstand und -perspektiven zu räumlichen Aspekten des Wandels der Strom- und Wasserversorgung in Deutschland
 Berlin 2004 (netWORKS-Papers, Nr. 10)
- Monstadt, Jochen/Naumann. Matthias
New Geographics of Infrastructure Systems. Spatial Science Perspectives and the Socio-Technical Change of Energy and Water Supply Systems in Germany
 Berlin 2005 (netWORKS-Papers, No. 10)
- Hummel, Diana/Kluge, Thomas
Sozial-ökologische Regulationen
 Berlin 2004 (netWORKS-Papers, Nr. 9)
- Libbe, Jens/Trapp, Jan Hendrik/To merius, Stephan
Gemeinwohlsicherung als Herausforderung – umweltpolitisches Handeln in der Gewährleistungskommune. Theoretische Verortung der Druckpunkte und Veränderungen in Kommunen
 Berlin 2004 (netWORKS-Papers, Nr. 8)
- Libbe, Jens/Trapp, Jan Hendrik/To merius, Stephan
The Challenge of Securing the Public Interest – Environmental Policy Action in the Ensuring Local Authority in Germany. Theoretical identification of current pressure points and changes in municipalities
 Berlin 2005 (netWORKS-Papers, No. 8)
- Kluge, Thomas/Scheele, Ulrich
Benchmarking – Konzepte in der Wasserwirtschaft: Zwischen betrieblicher Effizienzsteigerung und Regulierungsinstrument. Dokumentation des Symposiums am 28.4.2004 in Frankfurt am Main
 Berlin 2004 (netWORKS-Papers, Nr. 7)
- To merius, Stephan
Örtliche und überörtliche wirtschaftliche Betätigung kommunaler Unternehmen. Zum aktuellen Diskussionsstand über die rechtlichen Möglichkeiten und Grenzen in Literatur und Rechtsprechung
 Berlin 2004 (netWORKS-Papers, Nr. 6)

- Monstadt, Jochen/Naumann, Matthias
Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck – Sektoranalyse Stromversorgung
Berlin 2003 (netWORKS-Papers, Nr. 5)
- Scheele, Ulrich/Kühl, Timo
Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck – Sektoranalyse Telekommunikation
Berlin 2003 (netWORKS-Papers, Nr. 4)
- Bracher, Tilman/Trapp, Jan Hendrik
Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck – Sektoranalyse ÖPNV
Berlin 2003 (netWORKS-Papers, Nr. 3)
- Bracher, Tilman/Trapp, Jan Hendrik
Network-Related Infrastructures under Pressure for Change – Sectoral Analysis Public Transport
Berlin 2003 (netWORKS-Papers, No. 3)
- Kluge, Thomas/Koziol, Matthias/Lux, Alexandra/Schramm Engelbert/Veit, Antje
Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck – Sektoranalyse Wasser
Berlin 2003 (netWORKS-Papers, Nr. 2)
- Kluge, Thomas/Scheele, Ulrich
Transformationsprozesse in netzgebundenen Infrastrukturektoren. Neue Problemlagen und Regulationserfordernisse
Berlin 2003 (netWORKS-Papers, Nr. 1)
- Kluge, Thomas/Scheele, Ulrich
Transformation Processes in Network Industries. Regulatory Requirements
Berlin 2003 (netWORKS-Papers, No. 1)

Weitere Veröffentlichungen des Forschungsverbundes netWORKS:

- Kluge, Thomas/Libbe, Jens (Hrsg.)
Transformation netzgebundener Infrastruktur – Strategien für Kommunen am Beispiel Wasser
Berlin 2006, Schutzgebühr Euro 19,- (Difu-Beiträge zur Stadtforschung, Bd. 45)
- Libbe, Jens/Trapp, Jan Hendrik
Gemeinwohlsicherung als Herausforderung – kommunale Steuerungspotenziale in differenzierten Formen der Aufgabenwahrnehmung. Eine Positionsbestimmung
Berlin 2005 (Download unter www.networks-group.de/ergebnisse/05gemeinwohlsicherung.phtml)
Tomerius, Stephan
Gestaltungsoptionen öffentlicher Auftraggeber unter dem Blickwinkel des Vergaberechts
Berlin 2005, Schutzgebühr Euro 15,- (Difu-Materialien 1/2005)
- Trapp, Jan Hendrik/Bolay, Sebastian
Privatisierung in Kommunen – eine Auswertung kommunaler Beteiligungsberichte
Berlin 2003, Schutzgebühr Euro 15,- (Difu-Materialien 10/2003)

- Trapp, Jan Hendrik/Bolay, Sebastian
Privatisation in Local Authorities – An Analysis of Reports on Municipal Holdings
Berlin 2003 (Translated from Difu-Materialien 10/2003)

Eine Gesamtübersicht aller Veröffentlichungen des Forschungsverbunds networks ist unter www.networks-group.de/veroeffentlichungen abrufbar.