



Das Projekt Lambertsmühle:

Zukunftsfähiges Abwassermanagement  
im ländlichen Raum?



**Titelbild:** Die Lamberts­mühle in Burscheid, im Vordergrund die Pflanzenkläranlage

**Herausgeber:** Wupperverband, Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal,  
Tel.: 0202 / 583-0 , E-mail: [info@wupperverband.de](mailto:info@wupperverband.de)

**Redaktion:** WiW Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH,  
Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal  
Tel.: 0202 / 583-104, E-mail: [schi@wupperverband.de](mailto:schi@wupperverband.de)

**Druck:** BFC, 42899 Remscheid

Das Projekt Lambertsmühle:

Zukunftsfähiges Abwassermanagement  
im ländlichen Raum?

mit Förderung durch das  
Ministerium für Umwelt und Naturschutz,  
Landwirtschaft und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Burscheid, 2003



# Inhalt

Nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft?	Prof. Dr. J. Londong	6
Nachhaltige Wasserwirtschaft beim Wupperverband	B. Wille	8
Das teilstromorientierte Abwasserkonzept Lamberts­mühle - Konzept, Betrieb, Forschungsvorhaben -	Dr. M. Oldenburg, J. Zimmermann, A. Bastian, Prof.Dr. R. Otterpohl	10
Mikrobiologische Untersuchungsergebnisse und hygienische Bewertung	Dr. G.-J. Tuschewitzki	26
Analytik polarer Arzneimittelrückstände in Urinproben einschließlich der Entwicklung der hierzu notwendigen adäquaten Verfahren mittels GC-MS/MS	Dr. S. Strompen, Dr. F. Werres, Dr. P. Balsaa, Prof. Dr. H. Overath	32
Stoffbilanzen, Betriebsbeurteilungen, Akzeptanz	J. Niederste-Hollenberg, Dr. M. Oldenburg, Prof. Dr. R. Otterpohl	54
Verwertungsmöglichkeiten separierter Nährstoffe in der Landwirtschaft	J. Simons Prof. Dr. H. Goldbach, G. Schirmer, H. Thuir, Dr. J. Clemens	67
Das Abwasserkonzept der Lamberts­mühle aus Sicht des Fördervereins	A. Busch	72
Das alternative Abwasserkonzept der Lamberts­mühle - zukunftsfähig aus wasserrechtlicher Sicht?	W. Büttgens	75
Die internationale Entwicklung von "Ecological Sanitation"	Prof. Dr. R. Otterpohl	80
Zusammenfassung	Dr. M. Oldenburg	84

# Nachhaltige Siedlungswasserwirtschaft?

Prof. Dr. Jörg Londong

Bauhaus-Universität Weimar, Cuodraysraße 7, 99423 Weimar  
Tel.: 03643 / 584615, joerg.londong@bauing.uni-weimar.de

Blicken wir zurück auf die Leistungen der Siedlungswasserwirtschaft, die dazu geführt haben, dass wir heute in den industrialisierten Ländern frei von Seuchen und hygienischen Trinkwasserproblemen sein können. Wir finden ein System vor, das in seinen Grundzügen vor über hundert Jahren entwickelt wurde und seither in sich selbst verbessert wurde. Die Verbesserung zeichnete sich durch Symptombekämpfung und hintereinander geschaltete end-of-pipe Technik aus.

Heute wissen wir, dass auch, geprägt durch diese Entwicklung, Abwasserentsorgung und Trinkwasserversorgung kostenträchtige Dienstleistungen sind, die meist mit hohen langfristigen Investitionen verbunden sind (Kanäle, Kläranlagen, Rohrnetze, Wasserwerke, Talsperren, Wasserschutzzonen). Die damit unweigerlich verbundenen Kosten sind aber immer noch nicht (oder wieder nicht?) gesellschaftlich akzeptiert. Hier wird ein Werteproblem evident.

Unsere Siedlungsentwässerung basiert auf dem Prinzip von Vermischen, Abtransportieren mit Wasser und (Teil-)reinigen am Ende des Transportweges. Das System ist nicht geschlossen, nicht im Prinzip und nicht in der Praxis. Undichte Kanäle, Mischwasserentlastungen, Restfrachten im Ablauf der Kläranlagen und im Klärschlamm, nicht an das zentrale System angeschlossene Haushalte führen zu geöffneten Nährstoffkreisläufen und Emissionen von Stoffen, die sich nachteilig auf die Empfängersysteme Gewässer und Böden auswirken können. Dies deutet Nachhaltigkeitsdefizite an.

Besonders beunruhigend sind die in jüngster Zeit gewonnenen Erkenntnisse über die Durchlässigkeit der Kanalisationen und der Kläranlagen für endokrin wirksame Stoffe und Arzneimittelrückstände.

Erweitern wir den Blickwinkel über die Industrienationen hinaus, so sollte unser System der Siedlungsentwässerung nicht auf Schwellen- und Entwicklungsländer übertragen werden.

Dagegen sprechen:

- Hygienische Risiken in Gewässern:  
Der hygienische Erfolg des Systems schließt die aufnehmenden Gewässer in der Regel nicht ein. In den meisten Ländern der Welt gibt es zudem kaum funktionierende Kläranlagen, Spültoilette und Schwemmkanal tragen dort massiv zur Seuchenausbreitung bei. Menschliche Ausscheidungen werden in den Wasserkreislauf eingebracht, der oft wieder der Trinkwassergewinnung dient.
- Große Mengen wesentlicher Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kalium gehen durch unsere Art der Siedlungsentwässerung verloren.
- Hoher Energieaufwand zur Umwandlung organischer Stoffe zu CO<sub>2</sub> und zur Nitrifikation des Abwassers. Durch Nichtnutzung des Abwassers als Dünger wird an anderer Stelle weiterer Energieaufwand zur Düngerproduktion induziert.

- Hohe Verletzbarkeit bei Katastrophen (Erdbeben, Überschwemmungen u.a.).
- Aufwendige Infrastruktur mit hoher Materialintensität, hoher Kapitalbindung und geringer Flexibilität. Innovationen und Anpassungen der Abwassertechnik werden behindert oder unmöglich gemacht.
- In wasserarmen Ländern verschärft das System die Wasserknappheit, in Monsunregionen erhöht es die Hygienrisiken durch Überflutung der Kanäle.
- Ungünstig für weniger dicht besiedelte Gebiete, Fehlplanungen können zur dauerhaften Verarmung von Gemeinden führen.
- Geringes Verantwortungsbewusstsein beim Verbraucher, da zentrale Siedlungsentwässerungssysteme unsichtbar.

Wenn wir so weitermachen wie bisher, werden die globalen sozialen Probleme der Unterversorgung zunehmen. Konflikte und Kriege sind dann absehbar.

Was tun?

Um das hohe technische Niveau in Deutschland auch in Zukunft zu sichern, sollte die Förderung durch Bund und Länder gezielter die Entwicklung von nachhaltiger und exportorientierter Wassertechnologie berücksichtigen.

Dass gerade in Deutschland gute Erfolgsaussichten auf diesem Weg bestehen, liegt an dem traditionellen Praxisbezug deutscher Hochschulforschung.

Wesentlichen Nachteilen des heutigen end-of-pipe-Systems kann begegnet werden, wenn Maßnahmen an der Quelle ansetzen. Diese Philosophie ist bei industriellen Produktionen schon weit verbreitet. In der Siedlungsentwässerung kann die Versickerung von unverschmutztem Regenwasser vor Ort als Einstieg in die Trennung von Teilströmen und Maßnahmen an der Quelle gesehen werden. Konsequenterweisede kommt man zur Analyse der Teilströme auch im häuslichen Abwasser.

Die Erforschung und Erprobung innovativer Verfahren und Komponenten muss Priorität vor der Entwicklung weiterer end-of-pipe Techniken bekommen. Leichte Veränderbarkeit und Nachrüstbarkeit sind wichtige Anforderungen für Systeme, die sich im Aufbau befinden, und wenn wenig empirisches Wissen vorhanden ist.

Wir müssen uns darüber klar werden, welche Siedlungstechnik wir exportieren wollen. Vor dem Hintergrund der geschilderten Nachteile unserer Siedlungstechnik, muss über neue Konzepte nachgedacht werden. Die deutschen Anlagenkonzepte sind auf die heimischen Verhältnisse und historisch entstandene Ansprüche optimiert, wie sie weltweit nur in wenigen Ländern anzutreffen sind. In Entwicklungs- und Schwellenländern muss die Planung von grundsätzlich anderen Bedingungen und Prioritäten ausgehen. Insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern ist eine angepasste Technik gefragt, die auf die wirtschaftlichen, sozialen und technischen Bedingungen des Landes hin entwickelt wurde und ausreichende Qualität bei bezahlbarem Aufwand liefert. Forschung und Entwicklung darf in Deutschland daher nicht bei der Anpassung vorhandener Verfahren stehen bleiben.

Die Eignung neuartiger Konzepte sollte für den Einsatz im In- und Ausland zunächst in geeigneter Weise in Deutschland nachgewiesen werden. Hierzu ist Mut zu Experimenten erforderlich, und zwar nicht nur bei wissenschaftlichen Hochschulen, sondern auch bei Betreibern und Behörden.

Pilot- und Demonstrationsobjekte wie das an der Lambertsmühle in Burscheid helfen, nach erbrachtem Funktionsnachweis, die Position der deutschen Wasserindustrie im heimischen und auf dem Weltmarkt langfristig zu festigen.

# Nachhaltige Wasserwirtschaft beim Wupperverband

Bernd Wille, Vorstand des Wupperverbandes

Wupperverband, Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal  
Tel.: 0202 / 583-244, wi@wupperverband.de

Der Wupperverband hat als Interessensausgleichsverband die Aufgabe, eine integrale Bewirtschaftung des Wassers im Einzugsgebiet der Wupper sicherzustellen. Mit Blick in die Zukunft hat der Wupperverband auf der Grundlage jahrzehntelanger Erfahrungen Leitbilder für seine Arbeit aufgestellt. An oberster Stelle steht der Leitgedanke: "Nachhaltiger Umweltschutz im Einzugsgebiet der Wupper bei vertretbaren Kosten und Schonung der Ressourcen".

Als Grundlage und Zielsetzung für seine Aufgabenerfüllung hat der Wupperverband insgesamt sieben Leitbilder formuliert:

1. Nachhaltiger Umweltschutz im Einzugsgebiet der Wupper bei vertretbaren Kosten und Schonung der Ressourcen
2. Ausgleich zwischen den ökonomischen und ökologischen Anforderungen
3. Förderung des Umweltbewusstseins
4. Effiziente Erbringung der Leistungen
5. Schaffung der Akzeptanz des Wupperverbandes als kompetentes Unternehmen für seine Mitglieder und bei der Bevölkerung
6. Partnerschaftliche Zusammenarbeit und Sensibilität für die Belange der Mitglieder des Wupperverbandes
7. Wahrnehmung der sozialen Verantwortung

Nicht zufällig findet sich der Nachhaltigkeitsbegriff direkt im ersten Leitbild des Wupperverbandes. Der Begriff der "Nachhaltigen Entwicklung" hat seit der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro Eingang in unseren täglichen Sprachgebrauch gefunden, wird aber inzwischen sicher auch manchmal unreflektiert überstrapaziert. Der Begriff der Nachhaltigen Entwicklung umfasst die drei Bereiche Ökologie, Ökonomie und soziale Sicherheit. Kennzeichen einer nachhaltigen Entwicklung ist, dass sie "den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen" [Brundland 1987 und Rio 1992 - Agenda 21].

**Handlungsgrundsätze für eine Nachhaltige Entwicklung (Empfehlung einer Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages):**

1. *Die Nutzung einer Ressource darf auf keinen Fall größer sein als ihre Rate der Erneuerung oder die Rate des Ersatzes all ihrer Funktionen.*
2. *Die Freisetzung von Stoffen darf auf Dauer nicht größer sein als die Tragfähigkeit bzw. Aufnahmefähigkeit der Umwelt.*
3. *Gefahren und unvermeidbare Risiken für Menschen und Umwelt sind zu vermeiden.*
4. *Das Zeitmaß menschlicher Eingriffe in die Umwelt muss in einem ausgewogenen Verhältnis zu der Zeit stehen, die die Umwelt zur Selbststabilisierung benötigt.*



Nachstehend sind wichtige Aspekte für die tägliche Arbeit des Wupperverbandes in den vier Sektoren Umwelt, interne Sozialpolitik, externe Gesellschaftspolitik und ökonomische Politik genannt, die aus dem Nachhaltigkeitsgedanken abgeleitet werden können.

#### **A Umwelt**

- 1 Schonender Umgang mit Ressourcen, Reduzierung des In- und Output
- 2 Minimierung der Risiken für Mensch und Umwelt
- 3 Erhalt / Mehrung biologischer Vielfalt
- 4 Strategie
- 5 Verfahren

#### **B Interne Sozialpolitik**

- 1 Sicherung von Arbeits- und Ausbildungsplätzen
- 2 Förderung von Arbeitssicherheit und Gesundheit
- 3 Gleichberechtigung
- 4 Fortbildungsmöglichkeiten
- 5 Kommunikation
- 6 Unternehmensführungsstruktur
- 7 Informationspolitik

#### **C Externe Gesellschaftspolitik**

- 1 Gesellschaftliche Auswirkungen der Hauptprodukte
- 2 keine Beteiligung an in Frage stehenden Technologien / Handelspraktiken
- 3 Kommunikation mit den Akteuren
- 4 Gesellschaftliche Investitionen
- 5 externe soziale Aktivitäten

#### **D Ökonomische Politik**

- 1 Wirtschaftliches Potenzial
- 2 Wirtschaftliche Risiken
- 3 Kunden - Kommunikation
- 4 Kunden - Information
- 5 Zusammensetzung Führungsgremien
- 6 Jahresverbandsversammlung
- 7 Qualität finanzieller Berichterstattung
- 8 Behörden

\*) Hahn, H. H.: Ziele, Strategien und Handlungsempfehlungen - 50 Jahre ATV  
in: UTA Umwelt Technologie Aktuell, Jg. 9, Nr. 3, S. 188-195, Juli 1998

#### **Beispiel:**

Der Wupperverband wurde im Mai 1998 vom Verein zur Förderung der Lamberts-mühle zu Burscheid e.V. um Unterstützung beim Bau einer Kleinkläranlage/Pflanzenkläranlage gebeten. Da diese Anlage dem heutigen Stand der Technik entspricht, erschien sie als Modellanlage und mögliches Pilotprojekt nicht von Interesse. Der Wupperverband beauftragte daher im Juli 1998 das Ingenieurbüro OtterWasser in Lübeck mit der Erarbeitung eines neuen Abwasserkonzeptes unter Berücksichtigung des natürlichen Wasser- und Nährstoffkreislaufes. Das dabei erarbeitete Abwasserkonzept sieht eine Trennung des häuslichen Abwassers in Teilströme unterschiedlicher Qualitäten mit differenzierten Behandlungsstufen vor. Der Wupperverband ist sehr stark an neuen Systemen in der Wasserwirtschaft interessiert.

Die Trennung des häuslichen Abwassers in Teilströme mit anschließender adäquater Behandlung stellt einen Schritt zu einer nachhaltigen Wasserwirtschaft dar. Dieses wird inzwischen in immer weiterem Maße in der Fachwelt erkannt. Der Vorsitzende der ATV, Prof. Hahn, formulierte diese Entwicklung in einem Interview wie folgt: "Absolut richtig ist der Trend, einzelne Ströme, also z. B. schadstoffbelastete von weniger belasteten zu trennen, wie es in der Abfallwirtschaft praktiziert wird." \*)

Der Wupperverband ist für neue Ideen und Konzepte offen und bestrebt, diese mit zu entwickeln und in die Praxis umzusetzen. Bei der Projektsteuerung und Projektleitung von übergreifenden Projekten/Konzepten hat der Wupperverband einen reichhaltigen Erfahrungsschatz. Das Projekt bietet daher allen Beteiligten die Möglichkeit, neue Formen der Entwässerung für Außenbereiche anhand eines Pilotprojekts zu beurteilen und hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Standorte zu überprüfen.

# Das teilstromorientierte Abwasserkonzept der Lambertsmühle

## - Konzept, Betrieb, Forschungsvorhaben -

Dr. Martin Oldenburg<sup>1)</sup>, Jens Zimmermann<sup>1)</sup>, Andreas Bastian<sup>2)</sup>, Prof. Dr. Ralf Otterpohl<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> OtterWasser GmbH, Engelsgrube 81, 23552 Lübeck, oldenburg@otterwasser.de

<sup>2)</sup> Wupperverband, Untere Lichtenplatzer Str. 100, 42289 Wuppertal, bas@wupperverband.de

<sup>3)</sup> Technische Universität Hamburg-Harburg, Eißendorfer Str. 42, 21073 Hamburg, otterpohl@tuhh.de

### 1 Einleitung

Für die Lambertsmühle, eine historische Wassermühle im Bergischen Land in Burscheid, wurde ein neues Abwasserkonzept mit der getrennten Erfassung von Teilströmen erarbeitet. Im Zuge der Restaurierung der denkmalgeschützten Anlage und des Umbaus in ein Museum, das unter dem Motto "Vom Korn zum Brot" die Tradition der Bergischen Wassermühlen zeigen will, wurde auch eine Sanierung des Abwassersystems erforderlich. Da ein Anschluss an ein öffentliches Kanalnetz wegen der weiten Wegstrecke mit hohen Investitionskosten verbunden gewesen wäre, sollte eine eigenständige bzw. dezentrale Abwasserbehandlungsanlage errichtet werden. Der Ausbau des Museums wurde daher nach Abstimmung mit dem Rheinisch-Bergischen Kreis und dem Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen durch ein teilstromorientiertes Abwasserkonzept und dem Wahlspruch "Vom Brot zum Korn" mit dem Ziel der Rückführung von Nährstoffen in den Nährstoffkreislauf ergänzt.

Das unter Berücksichtigung des natürlichen Wasser- und Nährstoffkreislaufes erarbeitete Abwasserkonzept sieht eine Trennung des häuslichen Abwassers in Teilströme unterschiedlicher Qualitäten mit differenzierten Behandlungsstufen vor.

Die Realisierung des Abwasserkonzepts für die Lambertsmühle bietet aufgrund der einmaligen Konstellation der Beteiligten (verantwortlicher Förderverein, Wupperverband, Kreis etc.), deren Interessen und den örtlichen Randbedingungen eine Chance, in einem Pilotprojekt einen weiteren Schritt zu einer nachhaltigen Wasserwirtschaft für den ländlichen Raum zu tun.

Der Wupperverband ist sehr stark an neuen und zukunftsfähigen Wegen in der Wasserwirtschaft interessiert und möchte mit diesem Projekt in NRW bei der Anwendung neuer Verfahren und Techniken zur Behandlung häuslicher Schmutzwässer in Zusammenarbeit mit allen Projektbeteiligten vorangehen. Wasserwirtschaft heißt für den Wupperverband: Flussgebietsmanagement - alle Einflussfaktoren und Beteiligten im Gebiet der Wupper und ihrer Nebenflüsse werden einbezogen. Dabei stehen im Sinne der Agenda 21 neben Umweltschutz auch wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte im Vordergrund. Es liegt daher auch in der Verantwortung des Wupperverbandes, sein Handeln transparent zu machen und die Menschen im Gebiet der Wupper und darüber hinaus in die Diskussion um die Entwicklung der Wasserwirtschaft einzubeziehen.

Im Rahmen des vom MUNLV unterstützten Forschungsvorhabens wurde die Funktionsweise des Abwasserkonzepts detailliert untersucht. Da dieses Projekt eines der ersten Projekte in Deutschland mit Urinseparation und weitgehender Teilstromtrennung ist, sind die Ergebnisse wichtig für die weitere Entwicklung dieser Technik und sollten mit den aus den skandinavi-

schen Ländern schon über einen längeren Zeitraum gewonnenen Erfahrungen verglichen werden. Die Ergebnisse werden nachfolgend präsentiert.

## 2 Konzept

Das Abwasserkonzept für die Lambertsmühle, dessen Fließschema in Abb. 2 dargestellt ist, besteht im wesentlichen aus einer getrennten Ableitung und Behandlung folgender Teilströme:

Teilstrom	Beschreibung
Gelbwasser	Urin aus Urinseparationstoiletten und Urinalen, mit oder ohne Spülwasser
Braunwasser	Sanitärwasser der Toiletten ohne Urin bzw. Gelbwasser (Fäkalien + Spülwasser)
Grauwasser	häusliches Abwasser ohne Fäkalien und ohne Urin aus Küche, Bad, Dusche, Waschmaschine usw.

Abb. 1: Teilströme des Abwasserkonzepts Lambertsmühle

Das separat durch den Einsatz von Urinseparationstoiletten und wasserlosen Urinalen erfasste Gelbwasser wird über eine Gelbwasserleitung abgeleitet und anschließend in einem Gelbwasserspeicher bis zur Abfuhr und Nutzung in der Landwirtschaft gelagert. Neben der Nährstoffnutzung ergibt sich aus der Urinseparation ein weiterer Vorteil. Das Abwasserbehandlungssystem ist gegenüber den zu erwartenden "Urinstoßbelastungen" aufgrund des Publikumsverkehrs bei einem Besuch des Museums unempfindlich.

Das Braunwasser, als zweiter Teilstrom des Toilettenabwassers, wird ebenfalls separat in einer Braunwasserleitung abgeleitet und dem Rottebehälter mit Rottesäcken als Auffangsystem zugeführt. Unter Zugabe von Strukturmaterial (Rindenmulch, Hobelspäne etc.) findet hier eine Entwässerung und Vorkompostierung der Fäkalien statt. Nach einer einjährigen Aufenthaltszeit wird das Rottegut aus dem Rottebehälter entnommen und auf einem Kompostplatz zusammen mit dem Bioabfall aus der Küche und dem Garten nachkompostiert. Der reife Kompost wird zur Gartenpflege eingesetzt.

Das bei der Fäkalientwässerung im Rottebehälter anfallende Wasser (Filtrat) ist aufgrund der Urinseparation im Verhältnis zum herkömmlichen Toilettenabwasser nährstoffarm. Die Nährstoffe, insbesondere der Stickstoff, befinden sich größtenteils im Urin. Bei der Mitbehandlung dieses Filtrats in der Pflanzenkläranlage ist somit nur in geringem Umfang eine Nährstoffelimination erforderlich.

Das Grauwasser wird zur Vorklärung ebenfalls über den Rottebehälter bzw. über die

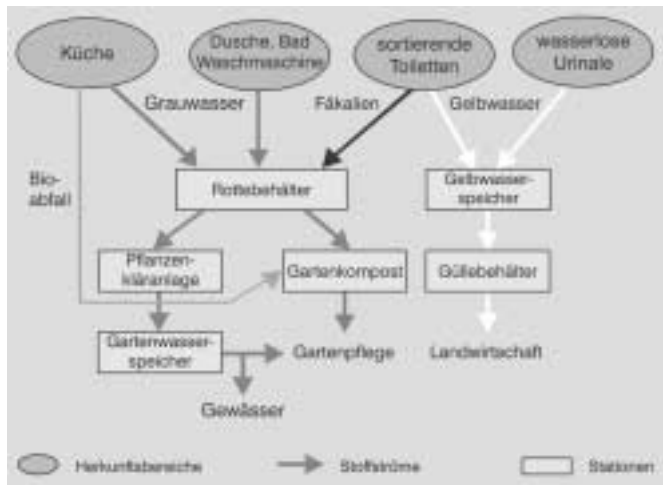


Abb. 2: Abwasserkonzept Lambertsmühle

Rottesäcke geleitet. Die Grobstoffe werden bei der Passage des Rottegutes ausgefiltert. Über den nachgeschalteten Pumpenschacht im Rottebehälter wird die vertikal durchströmte Pflanzenkläranlage intermittierend mit dem gesammelten Abwasser (Filtrat aus den Rottesäcken) beschickt.

Optional wird während eines Testbetriebes die direkte Einleitung des Grauwassers in den Absetzbereich unterhalb des Filtersackes des Rottebehälters durchgeführt. Dadurch kann beurteilt werden, wie der Rotteprozess ohne die Zugabe von Grauwasser verläuft und wie sich dieses auf die Qualität des Rottekompostes auswirkt.

Das gereinigte Abwasser wird in den vorhandenen Mühlengraben eingeleitet. Optional ist die Zwischenspeicherung in einem Gartenwasserspeicher möglich. Das Klarwasser kann dann zur Bewässerung im Garten eingesetzt werden.

Ein solches Sanitär- und Abwasserkonzept mit getrennter Urinsammlung ist in dieser Form bisher noch nicht realisiert worden. Das Konzept bietet die Flexibilität,

bei Bedarf modifiziert werden zu können. Im Rahmen des Forschungsprojekts soll es im praktischen Betrieb erprobt und ggf. verbessert werden.

Ein vereinfachtes Funktionsschema mit der Einordnung in den Wasser- und Nährstoffkreislauf zeigt Abb. 3, in dem die einzelnen Elemente und die Teilströme des Abwasserkonzepts dargestellt sind.

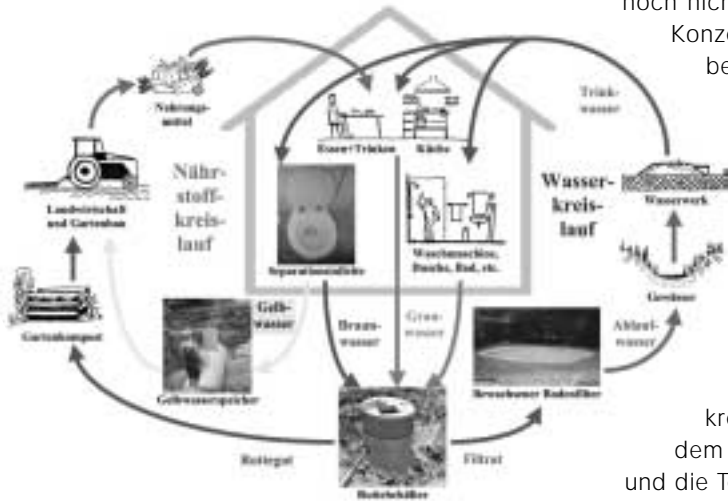


Abb. 3: Fließschema des Abwasserkonzepts Lambertsühle

### 3 Beschreibung der Einzelkomponenten des Abwasserkonzepts

#### 3.1 Installation im Haus

##### 3.1.1 Toiletteninstallation

In der Lambertsühle wurden drei verschiedene Separationstoiletten eingesetzt. In der Wohnung im 1. Geschoss des Hauptgebäudes der Mühle wurden zwei Separationstoiletten als Standtoiletten (Abb. 4) eingebaut. Sie sind jeweils an die Leitungen für Urin und Brauwasser angeschlossen. Die Urinseparationstoiletten haben im Toilettenbecken eine Trennwand, die das Becken in einen vorderen Bereich zur Urinabtrennung und einen hinteren für die Fäkalienaufnahme unterteilt.

Bei den Standtoiletten ist der Spülkasten hinter der Toilette angeordnet. Mit einem kurzen Drücken auf den Knopf der Spüleinrichtung wird die Spülung des Urinbeckens mit lediglich etwa 0,2 l Wasser ausgelöst. Bei Betätigung der großen Drucktaste erfolgt die Spülung des

gesamten Toilettenbeckens. Die Fäkalspülung kann durch Justieren des Spülknopfes auf die notwendige Menge (etwa 3 - 5 Liter) eingestellt werden.

Ein anderer Typ der Separationstoilette der Firma BB Innovation aus Schweden wurde in der Damentoilette im Erdgeschoss des Hauses installiert (s. Abb. 5).

Das Becken dieser wandhängenden Urinseparationstoilette (es wurden zwei als Damen-WC im Erdgeschoß eingebaut) ist ähnlich konstruiert wie das der Firma WostMan. Die Drucktasten zum Betätigen der Spülung sowie der Spülkasten sind hier in die Vorwandinstallation eingebaut. Bei Betätigung der oberen Spültaste wird das Urinbecken gespült. Das Drücken der unteren Taste bewirkt das Spülen des Toilettenbereiches für die Fäkalienaufnahme. Da bei letzterem der Urinbereich nicht gespült wird, ist bei Bedarf zusätzlich die Taste für die Urinspülung zu betätigen

Die geringen Spülwassermengen von ca. 0,2 l pro Spülung für das Spülen der Urinbecken verhindern eine zu hohe Verdünnung des Urins. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die in der Lamberts-mühle zu erwartende häufige Benutzung durch Besucher von Bedeutung. Das erforderliche Speichervolumen für das Gelbwasser kann so gegenüber der herkömmlichen Toiletten-spülmenge reduziert werden.

In der Herrentoilette im Erdgeschoss wurde ein ganz neu entwickelter Typ der Trenntoilette der Firma Roediger aus Deutschland eingebaut. Die Funktionsweise dieses Typs ist in der Abb. 6 dargestellt. Bei diesem Typ hat die Toilettenschüssel zwei Abflüsse. Den herkömmlichen hinteren Abfluss für die Fäkalien und im vorderen Bereich der Schüssel einen Abfluss für den getrennt erfassten Urin. Bei Belastung des Toilettensitzes öffnet sich das Ventil des Urinablaufs und der Urin kann ungehindert abfließen. Dieses Ventil schließt wieder bei Entlastung und verhindert den Eintritt von Spülwasser in die Urinableitung. Bei der Spülung der Toilette wird die gesamte Schüssel gespült und ggf. benutztes Papier mit in den Fäkalienauslass gespült.

Die Erfassung des Urins ohne Spülwasser wirkt sich auf die Konzentration und das Volumen des gesammelten Gelbwassers aus.

In der Lamberts-mühle wurde ein erster Prototyp dieser Toilette eingesetzt, der sich von der in Abb. 6 durch einen anderen Verschluss der Urinableitung unterscheidet. Die folgenden



Abb. 4: Separationstoilette Typ DS der Fa. WostMan, Schweden



Abb. 5: Separationstoilette der Fa. BB-Innovation, Schweden



Abb. 6: Separationstoilette der Fa. Roediger, Deutschland

Bilder in der Abb. 7 zeigen diesen Prototyp mit geöffnetem Urinablaufventil und bei der Spülung.

Im Gebrauch der Urinseparationstoiletten sind gegenüber konventionellen Toiletten keine Unterschiede bei der Benutzung und beim Komfort festzustellen. Dies trifft auch für ungeübte Benutzer, insbesondere für die Besucher der Lambertsmühle zu.

Eine bestehende Toilettenanlage im 2. Geschoss des Gebäudes konnte trotz intensiver Bemühungen nicht gegen eine Trenntoilette ausgewechselt werden, da hierfür umfangreiche bauliche Änderungen erforderlich gewesen wären. Es ist somit immer von einem nicht näher spezifizierbaren Anteil an Urin auszugehen, der in den Braunwasserablauf gelangen und hier zu erhöhten Stickstoffkonzentrationen führen kann. In den späteren Beiträgen wird deutlich, dass sich dies auch an den Messwerten der Messwochen nachweisen lässt.



Abb. 7: Separationstoilette der Fa. Roediger - Einsatz des Prototyp in der Lambertsmühle

### 3.1.2 Wasserfreie Urinale

In Ergänzung zu den Trenntoiletten sind in der Herrentoilette zwei wasserfreie Urinale der Fa. Ernst eingebaut (s. Abb. 8). Die Urinale sind aus Keramik und erhalten eine spezielle Oberflächenbeschichtung. Durch diese spezielle Oberflächenbeschichtung wird der Urin rückstandslos abgeleitet sowie eine Verkeimung verhindert. Als Geruchsverschluss dient ein Siphon mit einer Sperrflüssigkeit.

Urin hat zwar je nach Ernährungsgewohnheiten einen Eigengeruch, aber erst die Zersetzung durch Bakterien lässt den Urin unangenehm riechen. Diese Geruchsbildung wird verhindert, indem die fugenlosen Oberflächen der Anlagen eine Oberflächenbeschichtung erhalten. Diese Beschichtung (auf pflanzlicher Basis und biologisch abbaubar) wirkt gleichzeitig als Desinfektionsmittel und verhindert die Vermehrung der vorhandenen Bakterien und damit die Entstehung der "Düfte". Gleichzeitig bietet die Beschichtung die Gewähr für permanenten Bakterienabbau. Die regelmäßige Erneuerung der Beschichtung im Rahmen einer kontinuierlichen Wartung ist daher wichtig.

Die zweite Komponente des wasserlosen Urinals ist der Spezialsiphon. In diesen wird eine ebenfalls biologisch abbaubare Sperrflüssigkeit eingebracht, die spezifisch leichter ist als Urin. Die Sperrflüssigkeit im Siphon "schwimmt" gewissermaßen auf dem Urin. Im Gegensatz zu wassergespülten Urinalen haben wasserfreie Urinale den Vorteil, dass bei Ihrem Einsatz keine Inkrustation der Ableitungen mit Urinstein zu verzeichnen ist. Da kein Wasser zur Spülung eingesetzt wird, fehlen die Härtebildner, die mit dem Phosphat des Urins sonst den Urinstein bilden.



Abb. 8: Trockenurinal der Fa. Ernst

### 3.1.3 Hausinstallation

Die Bemessung und Verlegung der Grau-, Braun- und Gelbwasserleitungen im Mühleengebäude erfolgte nach DIN 1986. Alle Rohrleitungen wurden als PE- oder PP-Rohre ausgeführt. Für das Gelbwasser wurden Rohrleitungen mit einem Durchmesser bis DN 100 verlegt. Alle drei Rohrleitungssysteme haben zusätzlich eine Entlüftungsleitung. Zur besseren Unterscheidung wurden für die Verlegung unterschiedlich farbig gekennzeichnete Leitungssysteme eingesetzt.

Der Revisionsschacht im Mühleengebäude, in dem die drei Grundleitungen zusammengeführt werden, ist in Vorraum vor dem Toilettentrakt angeordnet. Durch den Einbau von drei Reinigungsöffnungen bleiben die Rohrleitungen für Wartungsarbeiten zugänglich.



### 3.2 Außenanlagen - Abwasserbehandlung

In den folgenden Abbildungen sind ein Lageplan und ein Grundriss mit Schnitt der Außenanlagen dargestellt, auf deren einzelnen Komponenten nachfolgend näher eingegangen wird.

Abb. 9: Beispiele der Leitungsverlegung

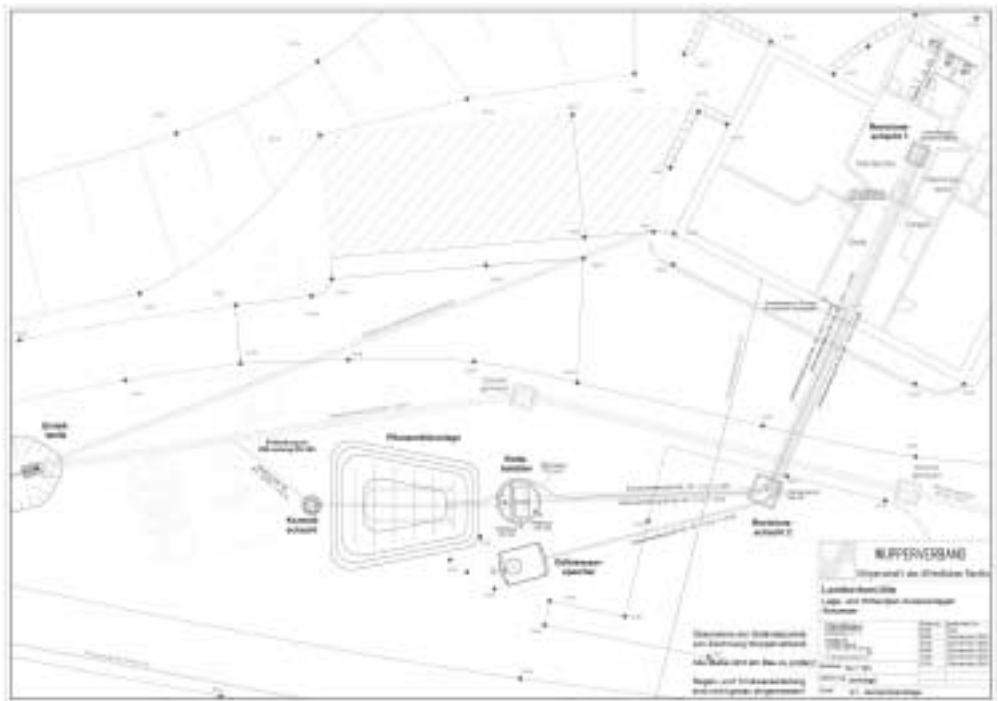


Abb. 10: Lageplan der Außenanlagen der Abwasserbehandlung

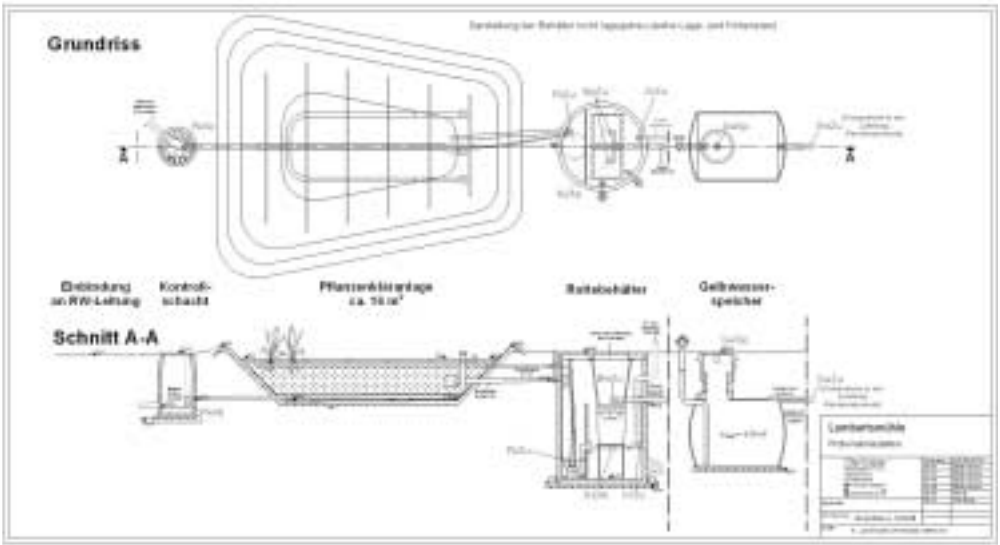


Abb. 11: Grundriss und Schnitt durch die Abwasseranlagen

### 3.2.1 Gelbwasserspeicher

Für den Gelbwasserspeicher wurde ein handelsüblicher Behälter aus GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) ausgewählt. Der Gelbwasserspeicher ist so dimensioniert, dass er bei einer zweimaligen Entleerung pro Jahr das in ca. 200 Tagen anfallende Urin-Wasser-Gemisch fassen kann.

Bei der in der Lambertsmühle zu erwartenden Benutzung der Toiletten und Urinale ist mit einem mittleren Gelbwasseranfall von ca. 20 Litern pro Tag zu rechnen.

Somit steht bei einem vorhandenen Nutzvolumen von 4,0 m<sup>3</sup> ausreichend Speichervolumen zur Verfügung, um eine Speicherung über den Winter zu ermöglichen, da in dieser Jahreszeit keine landwirtschaftliche Verwertung möglich ist.

Aufgrund der möglichen Ammonifikation des im Gelbwasser enthaltenen organischen Stickstoffs soll in einer Messphase Säure in den Speicherbehälter gegeben werden.

Im Gelbwasserspeicher ist eine Saugleitung DN 100 mit einem standardmäßigen Anschlussstutzen für Saugfahrzeuge installiert. Die Landwirte, die das Gelbwasser zur Verwendung als Dünger erhalten, müssen darauf hingewiesen werden, dass dieser hochkonzentrierte Dünger vor der Ausbringung zu verdünnen ist. Nähere Informationen wird der Beitrag des Institutes für Pflanzenernährung (Universität Bonn) enthalten.



Abb. 12: Einbau des Gelbwasserspeichers aus GFK

### 3.2.2 Rottebehälter

Als Rottebehälter wurde ein in Serie gefertigter Behälter mit zwei Kammern aus Stahlbeton für 6 bis 10 Einwohnerwerte (entspricht 8 Einwohnern) gewählt. Der Rottebehälter ist mit zwei Rottesäcken ausgestattet, die jeweils aufeinanderfolgend ca. 6 bis 12 Monate beschickt wer-



den. Eine Umstellung kann einfach durch das Drehen des Zuflussformstücks erfolgen. Anschließend erfolgt zur Entwässerung und zur Unterstützung des Rotteprozesses eine 6 bis 12 monatige Ruhephase bis zur Entleerung des Rottesackes. Das Volumen eines Rottesackes reicht aus, um die in Abhängigkeit von der tatsächlichen Abwasserbeaufschlagung in ca. 6 bis 12 Monaten anfallenden Feststoffanteile des Braunwassers und das zugefügte Strukturmaterial aufzunehmen.

Die Aufgaben des Rottebehälters lassen sich folgendermaßen klassifizieren:

- Rückhalt der Feststoffe
- Entwässerung der Feststoffe
- Eindickung der Feststoffe.

Diese Prozesse sollen durch die Zugabe von Strukturmaterial unterstützt werden. Entsprechend des nutzbaren Volumens der Rottesäcke von ca. 0,4 m<sup>3</sup> und einer zu erwartenden 50%igen Volumenreduktion des Rottegutes innerhalb der Ruhephase, ist mit einem Gewicht des Rottesacks von ca. 200 kg zu rechnen. Um den Rottesack durch die jeweilige Öffnung zu heben, ist ein Hebegerät notwendig.

Im Rottebehälter ist eine Trennwand zwischen Hauptkammer und Pumpenvorlagekammer eingebaut. Durch einen höhenverstellbaren Ablaufstutzen wird ein Einstau des gefilterten Braunwassers unterhalb der Rottesäcke von ca. 0,65 m erreicht. Durch diese Konstruktion wird ein Retentionsraum (Sedimentationsraum) zum Rückhalt von "Reststoffen bzw. Feinstpartikeln" geschaffen. Die Trennwand ist außerdem so hoch gezogen, dass versehentlich verschüttetes Strukturmaterial nicht in den Pumpenvorlagebereich gelangen kann.

Das bis zum Rottebehälter getrennt abgeleitete Grau- und Braunwasser wird im Normalbetrieb im Rottebehälter zusammengeführt und gemeinsam auf die Rottesäcke gegeben. Dadurch findet eine Filtration und ausreichende Vorklärung des Abwassers vor der Ableitung in die Pflanzenkläranlage statt. Nach der Passage des Sedimentationsraumes fließt das Grau- und Braunwasserfiltrat zur Pumpenvorlagekammer des Rottebehälters. Das bemessene Vorlagevolumen zur Beschickung der Pflanzenkläranlage beträgt unter Berücksichtigung des Rücklaufs aus dem Verteilungsgerinne etwa 0,26 m<sup>3</sup>. Über eine Schwimmerschaltung wird das Aus- und Einschalten der Pumpe gesteuert. Steigt der Wasserspiegel etwa um 0,15 m über den Einschaltwasserspiegel, so wird über eine Schwimmerschaltung ein optischer Alarm ausgelöst. Der Schaltkasten mit dem optischen Signalgeber ist im Vorraum der Toilettenanlage installiert. Zur besseren Wartung wird über dem Pumpenbereich eine zusätzliche Einstiegsöffnung eingebaut.

Für die Phase der wissenschaftlichen Begleitung kann das Grauwasser zeitweise an den Rottesäcken vorbei direkt in den Sedimentationsraum eingeleitet werden. Der Sedimentationsbereich ist mit ca. 1,70 m<sup>3</sup> Einstauvolumen groß genug, um eine ausreichende Vorklärung des Grauwassers zu ge-



Abb. 13: Rottesack vor und nach dem Einbau

währleisten. Bei 8 EW beträgt das spezifische Vorklärvolumen ca. 200 l/EW. Durch eine beruhigte Ein- und Auslaufgestaltung und den zusätzlichen Einbau einer Zwischenwand in die Absetzkammer wird eine Aufwirbelung der abgesetzten Stoffe vermieden. Dies ist erforderlich, um die Funktionstüchtigkeit der Pflanzenkläranlage nicht durch den Eintrag von Grobstoffen, die u. a. zu Ablagerungen und Verstopfungen im Abwasserverteilungssystem führen können, zu gefährden.

### 3.2.3 Pflanzenkläranlage

Die Pflanzenkläranlage ist als vertikal durchströmter Bodenkörper zur Reinigung von Grauwasser und mit einer Bepflanzung aus Schilf (*Phragmites australis*) ausgeführt. Pflanzenklärsysteme sind die älteste und natürlichste Form der Abwasserbehandlung. So wie das Wasser in freier Natur im Boden versickert, an den Wurzeln entlang fließt, durch verschiedene Sand- und Gesteinsschichten gefiltert und von Mikroorganismen gereinigt wird, arbeiten auch heutige Pflanzenkläranlagen mit einer Kombination aus physikalischer, chemischer und biologischer Wasseraufbereitung. Die eigentliche Reinigung des Abwassers übernehmen nicht die Pflanzen, sondern dies leisten vor allem die im Boden lebenden Mikroorganismen. Sie bauen die im Wasser vorhandenen organischen Substanzen zu Kohlendioxid und Wasser ab, gebundener Stickstoff wird in mehreren Stufen oxidiert und als gasförmiger Stickstoff freigesetzt. Die Pflanzen bieten dabei sowohl aeroben als auch anaeroben Mikroorganismen an ihrer Wurzeloberfläche ideale Lebensbedingungen. Die hier konzipierte Anlage ist aufgrund der Abtrennung der nährstoffhaltigen Fraktion Gelbwasser mit 2 m<sup>2</sup>/E kleiner ausgeführt worden als für die Behandlung von normalem Schmutzwasser.

Das Verteilungsgerinne der Pflanzenkläranlage besteht aus gelochten Verteilungsrohren, die in ein grobes Kiesbett gebettet sind. Es wird über die Tauchmotorpumpe aus dem Pumpenschacht beschickt. Das Speichervolumen des Pumpensumpfes ist groß genug, um zusätzlich zur Beschickungsabwassermenge eine Vollenfüllung des Verteilungsgerinnes bei der Beschickung zu gewährleisten.

Das Hauptverteilungsgerinne wird mit Gefälle verlegt. Nach jedem Pumpenintervall läuft damit die Zulaufleitung leer. Die Pumpe ist aus diesem Grund nicht mit einem Rückflussverhinderer ausgestattet. Dies ist insbesondere im Winter wichtig, um ein Zufrieren des Zulaufgerinnes sicher zu verhindern.



Abb. 14: Verteilungsgerinne des bewachsenen Bodenfilters (in Bau)



Abb. 15: Fertiggestellter bewachsener Bodenfilter in Betrieb

Die Ablaufleitung der Pflanzenkläranlage ist ebenfalls in einer Schicht aus Kies gebettet und wird an einem Ende an die Filteroberfläche geführt. Hier ist sie über eine Reinigungs- und Belüftungsöffnung zugänglich. Der Ablauf der Pflanzenkläranlage fließt in einen Kontrollschacht. Hier kann über einen höhenverstellbaren Ablauf (Aufstecken eines Rohrstücks) die Einstauhöhe der Anlage geregelt werden. Ein Einstau der Anlage ist dann notwendig, wenn die Anlage nicht oder nur mit sehr wenig Grauwasser beschickt wird und dadurch eine Verkrautung der Pflanzenkläranlage möglich wird.

Die Pflanzenkläranlage ist für ganzjährigen Betrieb ausgelegt. Um die Oberfläche möglichst lange frostfrei zu halten, ist das im Herbst absterbende Schilf erst im darauffolgenden Frühjahr zu schneiden und dem Gartenkompost oder als Strukturmaterial dem Rottebehälter zuzugeben.

#### 4 Forschungsvorhaben

Für das Forschungsprojekt wurden die folgenden Arbeitsschwerpunkte formuliert:

- Erfahrungen mit sortierenden Toiletten unter Praxisbedingungen
- Grad der Trennung des Nährstoff- und Wasserkreislaufs
- Teilstrombehandlung (Reinigungsleistungen, Betriebsbeurteilungen etc.) unter Praxisbedingungen
- Untersuchungen der Teilströme hinsichtlich hygienischer Beschaffenheit, des Nährstoffgehalts und ausgewählter Inhaltsstoffe (Arzneimittelrückstände etc.)
- Stoffbilanzierung unter Praxisbedingungen
- Entwicklung und Darstellung eines Verwertungskonzepts im Rahmen der Museumskonzeption und für landwirtschaftliche Betriebe.

Projektpartner	Aufgabe im Projekt
Wupperverband	Betreuung der Anlage, Probenahme, Überwachung
Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft	Koordination und Bewertung, landwirtschaftliche Verwertung
OtterWasser GmbH	Konzeptverbesserung
TU Hamburg-Harburg	Wissenschaftliche Begleitung
Institut für Pflanzenernährung, Universität Bonn	Sekundärrohstoffdünger, Betreuung der Anlage, Probenahme, Überwachung
Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung, Universität Duisburg	Untersuchung und Bewertung Urin (endokrin wirksame Stoffe, Arzneimittel)
Hygiene-Institut des Ruhrgebietes	Beurteilung der Hygiene
Verein Lambertsmühle e.V.	Betrieb der Anlage
Bauhaus-Universität Weimar	Projektsteuerung
Untere Wasserbehörde Rheinisch-Bergischer Kreis	Projektbegleitung
Landwirtschaftskammer Rheinland	Projektbegleitung

Abb. 16: Projektpartner und deren Aufgaben im Forschungsprojekt Lambertsmühle

Zur Bearbeitung der Fragestellungen wurde ein Projektteam aus allen beteiligten Partner gebildet: Dieses Projektteam nimmt folgende Aufgabenbereiche wahr:

- Projektleitung: Verantwortung und Außenkontakte
- Koordination: Budget, Zeit, Inhalte, Dokumentation, Öffentlichkeitsarbeit
- Anlagenkonzept: Analyse und Verbesserung des Anlagenkonzeptes
- Nährstoffkreislauf: Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung der Ergebnisse
- Hygiene: Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung der Ergebnisse
- Anlagenbetrieb: Einrichtung, Betreuung, Nutzerinformation
- Düngernutzung: Landwirtschaftliche Begleitung und Auswertung der Ergebnisse

## 5 Ergebnisse aus dem Betrieb während des Forschungsvorhabens

Die Erkenntnisse, die zu einer Veränderung oder Weiterentwicklung des Abwasserkonzepts führen, werden für die einzelnen Komponenten des Konzepts nachfolgend erörtert. Es wird in dem anschließenden Beitrag auch nur auf die Aspekte eingegangen, die eine Beeinflussung des Konzepts bewirken.

### 5.1 Toiletteninstallation

Es traten während des Untersuchungszeitraums keine wesentlichen Störungen an den Toilettenanlagen auf, die eine Modifikation nötig gemacht hätten. Da die Toiletten im öffentlichen Bereich durch den Publikumsverkehr der Mühle genutzt wurden, ergibt sich ein breites Nutzerspektrum.

Lediglich die Trenntoilette in der Wohnung des ersten Stockwerks unterlag einer ständigen und dauernden Nutzung durch gleiche Nutzer. Hier traten, insbesondere bei der Nutzung durch kleine Kinder, Probleme auf. Da Kinder aufgrund der geringen Körpergröße eine andere Sitzposition als Erwachsene aufweisen, fielen die Fäkalien der Kinder mehrfach in den vorderen Toilettenbereich und mussten mühsam aus dem Urteilstil entfernt werden.

Der Versuch, für diese Toilette einen Kindersitz zu beschaffen, scheiterte an den nicht kompatiblen Abmessungen. Während die Fa. BB Innovations ihre Separationstoiletten mit zwei ineinanderliegenden Toilettensitzen ausliefert, bei dem Kinder automatisch weiter hinten sitzen, war dies für die andere schwedische Toilette nicht realisierbar. Diese Toilette kann für die allgemeine Verwendung - insbesondere bei Nutzung durch Kinder oder Personen mit kleiner Körpergröße - nur als eingeschränkt einsatzfähig angesehen werden.

Verbesserungsbedürftig ist weiterhin die Funktionsweise der Auslöseknöpfe für die getrennte Spülung, insbesondere für Benutzer, die mit dem System noch nicht so vertraut sind. Diese Nachteile sind aus dem Betrieb der anderen Toiletten nicht ersichtlich geworden.

### 5.2 Gelbwassersammlung und -speicherung

Anfängliche Befürchtungen einer Geruchsentwicklung im und am Gelbwasserspeicher konnten recht schnell entkräftet werden. Bei der regelmäßigen Öffnung des Speichers kam es nicht zu einer Geruchsbelästigung. Auch in der Phase, in der das Gelbwasser nicht mit Säure konditioniert wurde und aufgrund des höheren pH-Werts ein Ausstripfen von  $\text{NH}_3$  befürchtet wurde, traten keine Geruchsbelästigungen auf.

In Abb. 17 ist neben der Füllstandsanzeige (im Bild rechts) auch ein Eimer zur direkten Probenahme des zufließenden Urins zu erkennen. Zur Abschätzung von Verlusten wurde in einem vom Wupperverband durchgeführten Batch-Versuch eine Urinprobe mit Schwefelsäure auf pH 3 gebracht, parallel dazu wurde unbehandelter Urin, der einen pH-Wert von 9 aufwies,

untersucht. In beiden Fällen konnte über eine Untersuchungszeit von 4 Monate nur eine geringfügige Veränderung der pH-Werte (von 3 auf 3,1 bzw. von 9 auf 8,6) festgestellt werden. Die Stickstoffverluste lagen in einer Größenordnung, die als der Bereich der Meßgenauigkeit angesehen werden kann. Abb. 18 zeigt die Stickstoffverluste in den beiden Batch-Ansätzen.

Die Erfahrungen aus Schweden haben zwischenzeitlich bestätigt, dass bei einer Lagerung ohne zusätzliche Konditionierung kein signifikanter Stickstoffverlust zu verzeichnen ist und es auch nicht zu Geruchsbelästigungen kommt. Daher erfolgte in einer zweiten Phase eine Sammlung des Urins ohne Säurezugabe.

Während der Lagerzeit setzt sich im Behälter ein zähflüssiger Bodenbelag ab, der bei der Entleerung mit entfernt werden muss. Es ist daher empfehlenswert, den Inhalt des Gelbwasserspeichers unmittelbar vor der Entleerung umzupumpen, so dass eine Homogenisierung des Inhalts stattfindet. Diese Erfahrungen decken sich mit den in Skandinavien vorliegenden Ergebnissen. Die Homogenisierung wurde sowohl vor der Entleerung, aber auch im Rahmen des Forschungsvorhabens vor der Probenahme, durchgeführt.

Da sowohl im Rahmen des Forschungsvorhabens, als auch aus den skandinavischen Erfahrungen eine Konzentrationsabnahme einzelner Stoffe und auch der fäkalen Belastung zu verzeichnen war, ist die Einhaltung einer Mindestlagerzeit zu beachten. Diese Lagerzeit kann entweder nach der Entleerung bei dem verwertenden Landwirt erfolgen, oder durch den Einbau zweier gleich großer Behälter gewährleistet werden.

### 5.3 Feststoffrückhalt im Rottebehälter

Der Rottebehälter zum Feststoffrückhalt erwies sich als das Bauteil, an dem konstruktive Änderungen erforderlich wurden.

Die Bilanzierung der gemessenen Wassermengen ging zu Anfang des Messzeitraums nicht auf, da dem bewachsenen Bodenfilter mehr Wasser zuffloss, als laut Wasserzähler verbraucht wurde. Eine umfangreiche Ursachenforschung ließ den Fehler an dem Rottebehälter erkennen: über die nicht abgedichtete Fuge zwischen Behälterseitenwand und Deckel trat Oberflächenwasser in den Behäl-



Abb. 17: Blick in den Gelbwasserspeicher

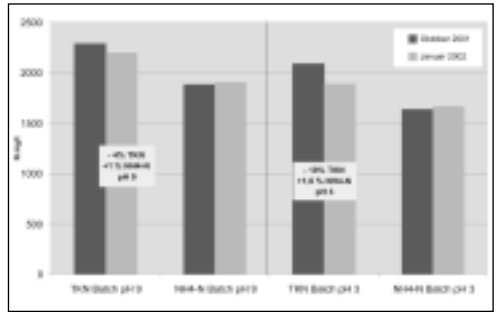


Abb. 18: Ergebnisse von Urinlagerungsversuchen



Abb. 19: Blick in den Rottebehälter

ter ein. Daraufhin wurde eine Abdichtung dieser offenen Fuge vorgenommen.

In einer ersten Betriebsphase wurde Rindschrot als Strukturmaterial zugegeben, der Feuchtigkeitsgehalt der Feststoffe blieb hierbei sehr hoch und wies eine pastöse Struktur auf. Die Zugabe von Hobelspänen in einer zweiten Betriebsphase war wesentlich besser und ließ die Feststoffe besser entwässern. Trotzdem war die Entwässerung nicht zufriedenstellend, da die Dränagefähigkeit des Feststoffmaterials nicht ausreichend war.

Nach der Entnahme konnte eine Strukturveränderung nur in den äußeren Bereichen festgestellt werden, ein Hinweis darauf, dass der Rottesack zu große Abmessungen aufweist, so dass Flüssigkeit nicht in ausreichender Menge und Geschwindigkeit entweichen kann.

Da der Rottesack an vier Aufhängungen an der Behälterdecke fixiert war, mussten diese vor dem Lösen entlastet werden. Es muss somit in den Behälter eingestiegen werden, was für das Personal eine nicht zumutbare Tätigkeit darstellt. Eine Entnahme des Sackes war aufgrund des hohen Gewichts nur mit Hebezeug möglich.

Zur Verbesserung der Eindickungs- und Entwässerungsprozesse und des Umgangs mit den Rottesäcken wurden neue Lösungen erarbeitet. Die Rottesäcke wurden erheblich kleiner dimensioniert, um eine Verbesserung der Entwässerungsfähigkeit zu erreichen und ggf. auf die Zugabe von Strukturmaterial ganz verzichten zu können.

Ferner wurden die Rottesäcke in einen Stützkorb eingebaut, so dass eine Formgebung gegeben war und die Entnahme vereinfacht wird. Die Stützkörbe stehen auf dem Zwischenboden und können herausgehoben werden. Die Körbe können dann an den Ketten bzw. Seilen, an denen sie heruntergelassen werden auch wieder entnommen werden, ohne dass jemand in den Behälter einsteigen muss. Diese Säcke können so nach der Entnahme mit dem Stützkorb transportiert werden und an einem anderen Ort zur weiteren Trocknung gelagert werden, ohne dass zwangsläufig ein Kontakt mit den darin gesammelten Feststoffen besteht.

Da der Umbau erst zu Ende der Projektlaufzeit erfolgte, liegen noch keine näheren Erkenntnisse über die Auswirkungen auf die Feststoffeindickung vor. Da sich voraussichtlich ein Folgeprojekt zu Untersuchungen bei der Verwertung der Reststoffe anschließt, können in diesem Rahmen nähere Erkenntnisse gewonnen werden.



Abb. 20: Entnahme des Rottesacks



Abb. 21: Rottesäcke mit Behälter vor und nach dem Einbau

## 5.4 Bewachsener Bodenfilter

Die Bilanzierung der Wassermengen über den Messzeitraum zeigt, dass nach Beseitigung der Undichtigkeit am Rottebehälter die Mengenbilanzierungen über Wasserzähler und Pumpenlaufzeit der Beschickungspumpe des bewachsenen Bodenfilters eine geringe Abweichung von 7 % als Mittelwert aufweisen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Ermittlung des Wasservolumens über die Pumpenlaufzeit und das Pumpenvolumen ausreichend genau für die Volumenbestimmung ist.

Die Verteilung der Wassermengen auf die beiden Teilströme und den Wasserverbrauch zeigt Abb. 22. Deutlich sind die starken Schwankungen erkennbar. Die Verbrauchspitzen, die einen maximalen Wert von bis zu 1,44 m<sup>3</sup>/d (Juni 2002) erreichen, sind auf Veranstaltungen im Museumsbereich zurückzuführen (Hinweis: dargestellt in Abb. 22 nur bis max. 0,70 m<sup>3</sup>/d). Die im Rahmen der Selbstüberwachung durchgeführten Messungen im Zu- und Ablauf des bewachsenen Bodenfilters belegen auch über einen langen Zeitraum, dass die zulässigen Ablaufwerte (CSB < 150 mg/l, BSB5 < 40 mg/l) eingehalten werden können.

Der bewachsene Bodenfilter wurde mit einer Kiesfüllung von 2 bis 8 mm erstellt. Dieses recht grobe Korn wurde gewählt, um die Gefahr der Kolmation zu vermeiden und einen besseren Sauerstoffeintrag in den Boden zu ermöglichen.

Die geringen Rückhalteraten, die anhand des Parameters der fäkalcoliformen Keime festgestellt wurden, sind auf das reduzierte Feststoffrückhaltevermögen der groben Körnung zurückzuführen. Da der Feststoffrückhalt im Rottebehälter wesentlich besser als erwartet erfolgte, und die Gefahr der Kolmation somit deutlich reduziert ist, sollte die Körnung des bewachsenen Bodenfilters an diese Randbedingungen angepasst werden. Als Körnung für die Filterbettfüllung ist ein Kornspektrum von 0 bis 4 mm ausreichend.

## 6 Kosten

Die Kosten für den Umbau im Haus und die Baumaßnahme der Abwasseranlage sind auf der Basis der Abrechnungen mit den ausführenden Unternehmen ermittelt worden und nachfolgend aufgelistet.

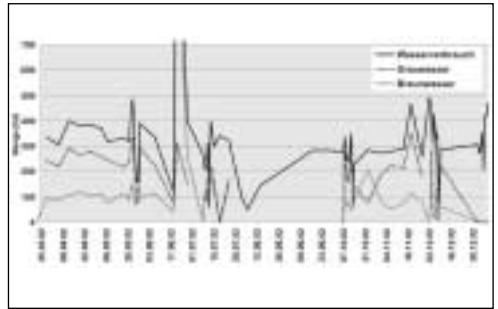


Abb. 22: Wassermengen

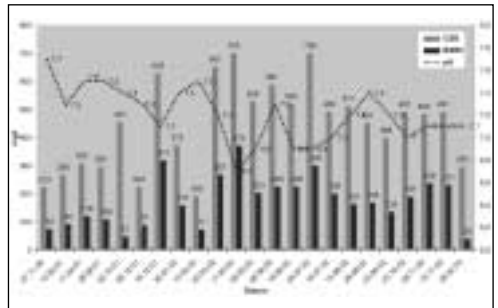


Abb. 23: Zulaufwerte bewachsener Bodenfilter

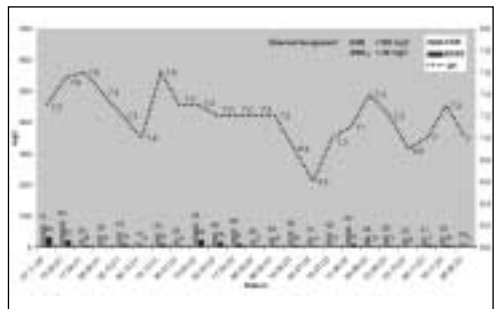


Abb. 24: Ablaufwerte bewachsener Bodenfilter

Investitionskosten	EURO	EURO / E <sup>1)</sup>
Installationen im Haus (incl. Sanitäreinrichtungen)	13.972	1.747
<b>Außenanlagen</b>		
• Rohrleitungen u. Gräben	6.936	867
• Gelbwasserspeicher (incl. Tiefbau)	5.766	721
• Rottebehälter (incl. Tiefbau)	9.305	1.163
• Bewachsener Bodenfilter (incl. Kontrollschacht u. Ableitung)	10.661	1.333
<b>Summe:</b>	<b>46.640</b>	<b>5.830</b>

<sup>1)</sup> für 8 EW

Die Gesamtkosten für die gesamte Baumaßnahme sind sehr hoch ausgefallen. Bei der Bewertung müssen die folgenden Faktoren berücksichtigt werden, die eine Verallgemeinerung der Kosten und Übertragbarkeit auf andere Orte erschweren:

- Die vorhandene Altbausubstanz führte, insbesondere bei den Baumaßnahmen im Haus, zu erhöhten Aufwendungen.
- Die Aufwendungen für die getrennte Leitungsführung von Grau-, Braun- und Gelbwasser wurden vor dem Hintergrund der wissenschaftlichen Begleitung und der Flexibilität in dieser Zeit gewählt. Hier lassen sich bei gemeinsamer Ableitung von Grau- und Braunwasser ein Einsparpotenzial von ca. 5 % der Gesamtkosten erreichen.
- Die erforderliche Wasserhaltung während der Baumaßnahmen war wegen sehr hoher Grundwasserstände kostspielig und aufwendig.
- Der Rottebehälter (Stahlbetonbehälter und Einbauten) wurde von einem Anbieter als standardisiertes Bauteil geliefert. Die Erfahrungen aus dem Projekt zeigen, dass Änderungen im Bereich des Auffangsystems für die Feststoffe aus dem Braunwasser erforderlich sind. Eine Modifikation erfolgt zur Zeit, so dass weiterhin auf Standard-Stahlbetonbehälter zurückgegriffen werden kann.
- Die Verwendung von PVC-freien Rohren und der Einsatz von Schraubverbindungen im Verteilungsgerinne der Gerinne anstelle geklebter PVC-Rohre führen zu höheren Kosten.

Als eindeutig identifizierbare Ursache für höhere Kosten sind die aufwendigeren Leistungen für die Umrüstung im Haus (Rohrleitungssysteme für Grau-, Braun- und Gelbwasser sowie die Separationstoiletten, die aufgrund der geringen Stückzahlproduktion derzeit noch recht teuer sind) und die Anlagen der Gelbwasserspeicherung zu nennen. Alle anderen Komponenten wären auch bei einer Anlage zur Behandlung von herkömmlichem Schmutzwasser (mit Ausnahme der Rottesäcke) erforderlich gewesen, wobei der bewachsene Bodenfilter bei einer konventionellen Anlage wiederum größer dimensioniert werden müsste.



## 7 Schlussfolgerungen

Das teilstromorientierte Abwasserkonzept der Lambertsmühle beinhaltet die Abtrennung von Urin und Nutzung als nährstoffhaltigen Dünger und die Behandlung der beiden anderen Teilströme Braunwasser (Fäkalien) und Grauwasser (Abwasser aus Küche, Bad, etc.) nach einer Feststoffabtrennung in einem bewachsenen Bodenfilter.

Die wissenschaftliche Begleitung des Projektes hat einige Hinweise zur Weiterentwicklung bestimmter Bausteine und zur Übertragbarkeit auf andere Projekte erbracht.

Die Separation von Urin als Gelbwasser ist technisch möglich, auch wenn nicht alle Toiletten uneingeschränkt einsetzbar sind.

An den Anlagen der Abwasserbehandlung ist nach Angaben des Vereins als Betreiber der Anlagen keine Geruchsbelästigung festzustellen, auch wenn das Gelbwasser ohne Konditionierung gesammelt wird. Der bewachsene Bodenfilter funktionierte problemlos und konnte die erforderlichen Ablaufwerte auch im Winter einhalten.

Die Feststoffabtrennung in dem Rottebehälter war verbesserungsbedürftig. Die notwendigen konstruktiven Änderungen sind erst in der letzten Projektphase durchgeführt worden, daher stehen Erfahrungen über einen längeren Zeitraum noch aus. Eine Verbesserung der Entwässerung der Feststoffe wird erwartet, die sich auch auf die Weiterbehandlung der fäkalen Feststoffe durch die Lagerung ergeben.

Die Einführung eines teilstromorientierten Konzepts erfolgte im Projekt in denkmalgeschützten Gebäuden und Außenanlagen. Dies führt zwangsläufig gegenüber einem Neubau zu einem höheren technischen und finanziellen Aufwand.

Die positive Entlastung des Abwassers durch Abtrennung der Nährstoffe, hier im wesentlichen Stickstoff und Phosphor, kann anhand der Messwerte nachgewiesen werden. Die Nährstoffe können bei landwirtschaftlicher Verwertung als Düngerersatz genutzt werden. Die Konzentrierung von pharmazeutischen Rückständen und Hormonen in dem Teilstrom Gelbwasser wird in dem Beitrag des Rheinisch-Westfälischen Institutes für Wasserforschung ausführlich beschrieben.

Die Abtrennung des Urins vom restlichen Abwasser reduziert die Nährstofffrachten des Abwassers und hält in signifikanter Weise durch den Menschen ausgeschiedene Pharmazeutika und Hormone dem Abwasser und letztendlich auch der aquatischen Umwelt fern. Ob ein Abbau dieser Substanzen bei der Verwertung als Dünger durch die im Boden vorhandenen Bakterien, die hier in wesentlich höherer Konzentration und Vielfalt als in dem aquatischen Milieu vorliegen, schneller und einfacher verläuft, ist derzeit eine Arbeitshypothese und muss in weiteren Untersuchungen eingehender betrachtet werden.

# Mikrobiologische Untersuchungsergebnisse und hygienische Bewertung

Dr. Georg-Joachim Tuschewitzki

Hygiene-Institut des Ruhrgebiets, Rotthauer Str. 19, 45880 Gelsenkirchen  
Tel.: 0209 / 9242-200, tuschewitzki@hyg.de

Häusliches Abwasser enthält zahlreiche Mikroorganismen, die zum überwiegenden Teil aus den menschlichen Feces und zu geringeren Teilen aus der Körperreinigung, dem Wäschewaschen oder aus Küchenarbeiten usw. stammen. Im Fall einer übertragbaren Erkrankung werden mit den menschlichen Ausscheidungen regelmäßig zahlreiche Krankheitserreger abgegeben, die in das Abwasser gelangen, in dem die Erreger unterschiedlich lange überleben. Aus hygienischer Sicht ist häusliches Abwasser daher grundsätzlich als infektiös anzusehen. Jeder Umgang mit Abwasser (wozu auch das Sammeln, Ableiten, Behandeln usw. zählen) bedarf einer hygienischen Bewertung, um eventuelle Gefahren der Ansteckung zu erkennen und die Übertragung von Krankheitserregern auf einem unbedeutenden Niveau zu halten. Die herkömmliche geordnete Abwasserableitung und -aufbereitung führt fäkalienhaltiges Abwasser direkt aus dem näheren Umfeld des Menschen und hat im Zusammenhang mit einer hygienisch sicheren Trinkwasserversorgung wesentlich dazu beigetragen, die Ausbreitung bestimmter Erkrankungen (vorzugsweise gastrointestinaler Erkrankungen) einzudämmen. In der Lambertsmühle erfolgen die Abwasserabführung und -behandlung nach einem neuen Konzept. Daher ist es notwendig, den Verbleib der Mikroorganismen aus dem menschlichen Umfeld zu verfolgen. Hierzu wurden die verschiedenen Stoffströme mikrobiologisch untersucht und eine hygienische Bewertung vorgenommen.

**Probenarten:** Grauwasser, Gelbwasserzulauf, Gelbwasserspeicherinhalt, Braunwasser (Ablauf Rottesack), Zulauf und Ablauf der Pflanzenkläranlage, Bachwasser, Kompost

**Probenahmen** erfolgten im Untersuchungszeitraum von Oktober 2001 bis Januar 2003 durch Mitarbeiter des Wupperverbandes. Die Proben wurden von einem Mitarbeiter des Hygiene-Instituts beim Wupperverband abgeholt, zum Hygiene-Institut des Ruhrgebiets transportiert und am gleichen, bzw. am Folgetag (nach kühler Lagerung) untersucht.

Probenahme	1	2	3	4	5
Entnahmetag	7.9.01	22.10.01	18.12.01	16.01.02	20.03.02
Probenahme	6	7	8	9	10
Entnahmetag	20.05.02	09.07.02	08.10.02	02.12.02	07.01.03

## Probenbearbeitung

Aufgrund der erwarteten hohen Keimdichten wurden die Proben mit steriler physiologischer NaCl-Lösung 1:10 (1+9 ml) bis  $10^{-6}$  verdünnt und anschließend weiter verarbeitet.

- Koloniezahl (Koloniebildende Einheiten, Keimzahl) Gussverfahren

Zur Bestimmung der Keimzahl (heterotrophe aerobe mesophile Bakterien) wurden je 1 ml der Probe bzw. der jeweiligen Verdünnungsstufe in sterile Petrischalen pipettiert und mit 9 ml Gelatineagar vermischt. Bebrütung: 44 Stunden, 20 °C und 36 °C (analog zur Methode der Trinkwasserverordnung 1990)

- Escherichia coli

Die Proben bzw. Aliquots der jeweiligen Verdünnungsstufe wurden membranfiltriert und auf Endo-Agar (10, 1, 0,1, 0,01, 0,001 bis  $10^{-6}$  ml) 24 Stunden bei 42 °C bebrütet. Alle metallischgrünen Kolonien wurden als verdächtige E. coli gezählt und mittels der kleinen bunten Reihe bestätigt (analog zur Methode der Trinkwasserverordnung, 1990).

- Clostridium perfringens - Sporen

50 ml Probe wurden 10 Minuten bei 70 °C erhitzt und anschließend sofort abgekühlt. Danach erfolgten die Anlage einer Verdünnungsreihe (s.o.) und die Filtration auf mCP- Agar (10, 1, 0,1, 0,01, 0,001 bis  $10^{-6}$  ml) und die anaerobe Inkubation für 24 Stunden bei 44 °C. Alle gelben Kolonien, die sich über Ammoniumhydroxid Dampf rosa färbten, wurden als bestätigte Clostridium perfringens (- Sporen) gezählt.

- Salmonellen (qualitativer Nachweis in 100 ml)

100 ml Probe wurden zu 100 ml Tetra-Anreicherungsbouillon 2fach geben und über 24 Stunden bei 36 °C bebrütet. Davon wurden 1 ml zu Tetra-Anreicherungsbouillon 1fach gegeben, erneut für 24 Stunden bei 36 °C bebrütet und davon Ausstriche auf BPLS- und XLD-Agarplatten angelegt. Positive Kolonien wurden mit Api-Teststreifen überprüft und anschließend serologisch bestätigt.

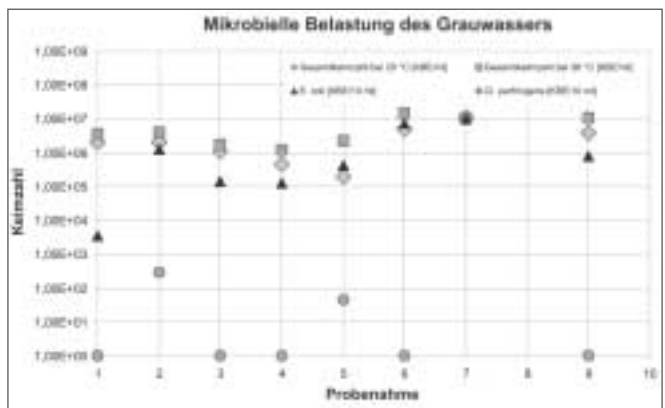
## Ergebnisse

- Grauwasser

Die allgemeine bakterielle Kontamination des Grauwassers mit heterotrophen mesophilen Mikroorganismen lag über den gesamten Beprobungszeitraum von Oktober 2001 bis Januar 2003 zwischen  $10^5$  und  $10^7$ /ml. Dabei lag die Koloniezahl bei 36 °C Bebrütungstemperatur bei jeder Beprobung etwas oberhalb der Koloniezahl bei 20 °C

Bebrütungstemperatur. Darüber hinaus war die Schwankung zwischen zwei Beprobungstagen recht gering.

Hinsichtlich des Nachweises von Fäkalbakterien ist E.coli nur bei der ersten Beprobung mit einem Wert von  $3,6 \times 10^3$ /10 ml auf einem relativ geringen Niveau. Bei den nachfolgenden Probenahmen waren deutlich höhere Werte festzustellen, die schließlich bei 7 und 10  $\times 10^6$ /10 ml lagen und deutlich auf einen Eintrag von Fäkalbakterien in das Grauwasser hindeuten. Dem-



gegenüber ließen sich Bakterien der Spezies *Clostridium perfringens* nur bei zwei Probenahmen 2 und 5 in nennenswerten Gehalten feststellen (290 und 45/10 ml). An den anderen Probenahmetagen waren nur einzelne Clostridien nachweisbar.

- **Gelbwasserzulauf**

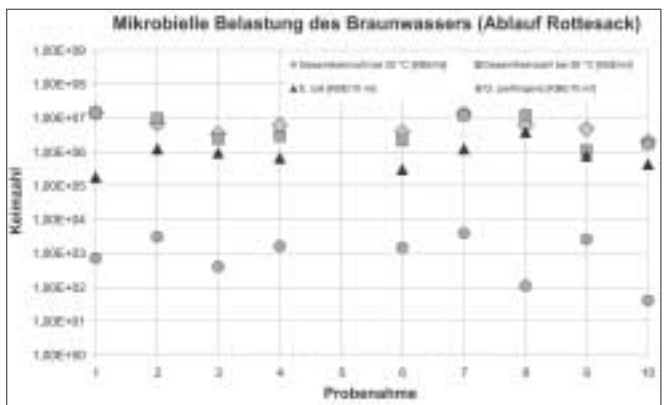
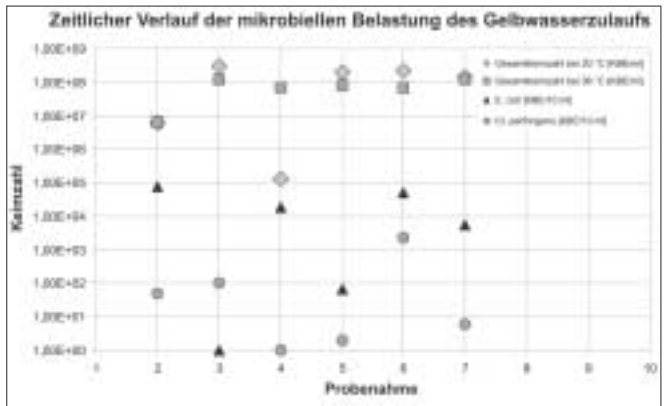
Der Gelbwasserzulauf wies an 5 von 6 Probenahmetagen eine allgemeine bakteriologische Kontamination in Höhe von ca.  $10^8$  KBE/ml auf, wobei bei drei Messungen die Koloniezahl bei 20 °C Bebrütung etwas höher lag als bei 36°C Bebrütung. Die Gehalte an *E. coli* wiesen deutliche Schwankungen auf und lagen allesamt unter  $10^5/10$  ml, im Mittel etwa bei  $10^3/10$  ml. Ähnliches galt für den Nachweis von *Clostridium perfringens*: neben einem Höchstwert von  $2,3 \times 10^3/10$  ml lagen die übrigen Messwerte zwischen 1 und  $100/10$  ml.

- **Gelbwasserspeicher**

Die dem Gelbwasserspeicher entnommenen Proben wiesen bei allen Parametern extreme Schwankungen der Gehalte auf, die bei den Koloniezahlen (20 °C und 36 °C) zwischen 0 und  $10^8/ml$ , bei *E. coli* zwischen 0 und  $10^5/10$  ml und bei *Clostridium perfringens* zwischen 0 und  $10^2/10$  ml schwankten.

- **Braunwasser**

Die Gehalte der verschiedenen bakteriologischen Parameter im Ablauf des Rotte-sackes wiesen nur geringe Schwankungen auf und lagen jeweils auf einem mehr oder weniger durchgehenden

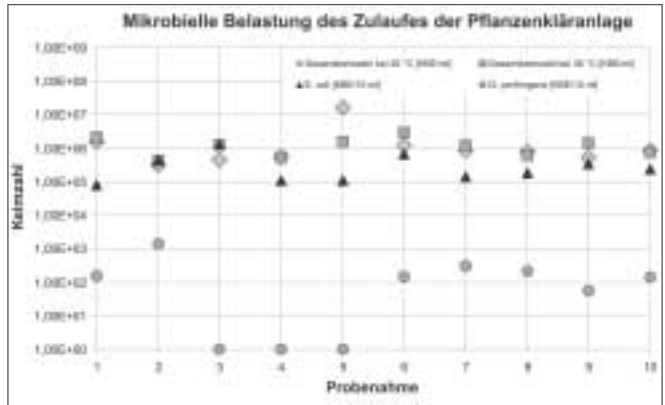


Niveau: Koloniezahl 20 und 36 °C zwischen  $10^6$  und  $10^7$  KBE/ml, E. coli zwischen  $1,8 \times 10^5$  und  $3,9 \times 10^6/10$  ml und C. perfringens zwischen  $4 \times 10^1$  bis  $3,9 \times 10^3/10$  ml. Mit diesen Gehalten lag C. perfringens im Braunwasser im Vergleich zu den übrigen Medien auf deutlich erhöhtem Niveau.

• **Zulauf Pflanzenkläranlage**

Die Gehalte an allgemeinen Bakterien wie auch an E. coli wiesen nur geringe Schwankungen auf und lagen zwischen  $10^5$  und  $10^6$ /ml, wobei E. coli zumeist unter den Gehalten der allgemeinen Koloniezahlen lagen.

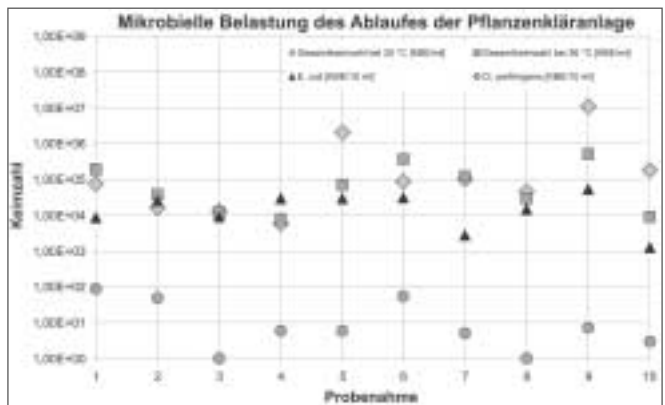
Demgegenüber war Clostridium perfringens bei drei Messungen nicht nachweisbar und an den übrigen Probenahmetagen zwischen  $10^2$  und  $10^3/10$  ml.



• **Ablauf Pflanzenkläranlage**

Die Gehalte aller gemessenen bakteriologischen Parameter lagen im Ablauf der Pflanzenkläranlage i.d.R. um ca. eine Zehnerpotenz unter denen des Zulaufes.

Die Koloniezahlen und E. coli lagen überwiegend im Bereich von  $10^4$  und nur selten über  $10^5/10$  ml. Clostridium perfringens lag bei 8 Messungen im einstelligen Bereich und nur an drei Tagen eine Zehnerpotenz darüber.



Alle Proben wurden auf Salmonellen untersucht. Salmonellen waren in keiner Probe nachweisbar.

Zur Beantwortung der Frage nach der Ursache für die teils geringen Gehalte an Mikroorganismen im Gelbwasserspeicher wurden Sonderuntersuchungen durchgeführt.

**Probe 1:** über einen Zeitraum von 3 Wochen im Oktober gesammelter Urin aus dem Urinzulauf in der Lamberts-mühle, Lagerung bis zur Probenahme unter semianaeroben Bedingungen ohne weitere Einstellung des pH-Wertes (pH 9)

**Probe 2:** über einen Zeitraum von 3 Wochen im Oktober gesammelter Urin aus Urinzulauf in der Lamberts-mühle, Lagerung bis zur Probenahme unter semianaeroben Bedingungen nach Einstellung des pH-Wertes auf 3 durch Zugabe von Schwefelsäure. Datum der Probenahme: 12.02.2002

Bei der Säurebehandlung des Urins wurden deutlich geringere Koloniezahlen festgestellt. Hinsichtlich der weiteren mikrobiologischen Parameter war keine deutliche Abnahme zu erkennen, da bereits in der Probe mit hohem pH-Wert nur geringe Werte nachweisbar waren.

Zum Vergleich der an der Anlage Lambertsmühle erhaltenen Werte wurden aus dem vor der Lambertsmühle verlaufenden Wiembach sowie aus herkömmlichen Kläranlagen (Ablauf Nachklärung) Proben gezogen, deren Ergebnisse in der nebenstehenden Tabelle zusammengestellt sind.

Probenbezeichnung	Art der Probe	Keimzahl (in 1 ml)		E. coli (in 10 ml)	C. perfringens (Sporien) (in 10 ml)	Salmonellen (in 100 ml)
		20 °C	36 °C			
Probe 1: Urin ohne Einstellung des pH-Wertes (pH 9)	Schöpfprobe 12.02.2002 10:20 Uhr	$5,3 \times 10^7$	$1,2 \times 10^7$	$+ 1,0 \times 10^5$	$5,0 \times 10^7$	negativ
Probe 2: Urin nach Einstellung des pH-Wertes durch die Zugabe von Schwefelsäure (pH 3)	Schöpfprobe 12.02.2002 10:15 Uhr	$9,9 \times 10^7$	$3,3 \times 10^7$	$+ 1,0 \times 10^5$	$3,0 \times 10^7$	negativ

Probenbezeichnung	Art der Probe	Keimzahl (in 1 ml)		E. coli (in 10 ml)	C. perfringens (Sporien) (in 10 ml)	Salmonellen (in 100 ml)
		20 °C	36 °C			
Wiembach oberhalb der Lambertsmühle	Schöpfprobe 24.11.2003	$7,9 \times 10^7$	$4,7 \times 10^6$	$9,9 \times 10^1$	$8,9 \times 10^5$	nicht best. / nicht best. / nicht best. / nicht best.
Kläranl. Otzenhof: Ablauf Nachklärung	Schöpfprobe 04.12.2003	$2,8 \times 10^7$	$1,8 \times 10^6$	$1,0 \times 10^5$	$1,1 \times 10^5$	nicht best. / nicht best. / nicht best. / nicht best.
Kläranl. Schwelm: Ablauf Nachklärung	Schöpfprobe 04.12.2003	$1,2 \times 10^7$	$2,1 \times 10^6$	$8,0 \times 10^5$	$2,8 \times 10^5$	nicht best. / nicht best. / nicht best. / nicht best.

Probenbezeichnung	Art der Probe	Keimzahl (in 1 g)		E. coli (in 1 g)	C. perfringens (in 1 g)	Salmonellen (in 50 g)
		20 °C	36 °C			
Kompost	22.10.02	$4,2 \times 10^7$	$5,7 \times 10^7$	$2,3 \times 10^6$	$0,0 \times 10^7$	negativ

## Diskussion

Der quantitative und qualitative Bakteriengehalt der Proben aus den verschiedenen Stoffströmen spiegelt deren Herkunft, Nährstoffgehalt und eventuelle Kontamination wieder. Während die hohen Koloniezahlen gerade bei 36°C Bebrütung im Grauwasser erwartungsgemäß Einflüsse aus dem menschlichen Bereich anzeigen, kann der regelmäßig nachgewiesene, relativ hohe Gehalt an E. coli nur über eine Kontamination des Grauwassers mit fäkalen Anteilen erklärt werden. Inwieweit dies bereits bei der Entstehung des Grauwassers, z.B. bei der Körperreinigung oder im Bereich der sanitären Installation (Rohrleitungen und Speicherung) stattfand, konnte nicht geklärt werden.

Der hohe Bakteriengehalt der Gelbwasserproben aus dem Zulauf spiegelt das hohe Nährstoff- und Vermehrungspotenzial des Urins wieder. Urin selbst ist zunächst im allgemeinen (mit Ausnahme des Vorliegens von Blasenentzündungen) bakterienarm, wird aber nach Verlassen des menschlichen Körpers im Urinal und in der Toilette mit Bakterien kontaminiert, die sich dann schnell vermehren können. Aufgrund einer unscharfen Trennung von Urin und Fäkalmaterial in der Toilettenschüssel kommt es zu einer Kontamination des Gelbwassers mit E. coli und Clostridium perfringens.

Im Gelbwasserspeicher liegen grundsätzliche vergleichbare Bakteriengehalte wie im Zulauf vor, allerdings ergeben sich erhebliche Schwankungen bis hin zu nahezu bakterienfreiem Gelbwasser, was durch die Säurebehandlung des Urins im Speicher zu erklären ist. Die durchgeführte Sonderuntersuchung zeigt bereits bei einer Absenkung des pH-Wertes auf 3 eine Verminderung der Bakteriengehalte um zwei bis drei Zehnerpotenzen. Bei geringeren pH-Werten, wie sie im Gelbwasserspeicher zeitweise aufgrund der Ansäuerung nachzuweisen waren, ist eine weitere Bakterienabnahme zu erwarten. Demgegenüber konnte, wie im Laborexperiment nachgewiesen, eine bakterizide Wirkung basischer pH-Werte (überprüft wurde bis

pH 9 bei gleichzeitig hohen Ammoniumgehalten) nicht festgestellt werden. Im Braunwasser waren erwartungsgemäß regelmäßig die höchsten Gehalte an *Escherichia coli* und *Clostridium perfringens* festzustellen.

Insgesamt lässt sich aus den der Pflanzenkläranlage zugeführten flüssigen Anteilen von Grauwasser und Braunwasser aufgrund der unterschiedlichen mengenmäßigen Anteile eine stets deutliche fäkale Kontamination in Höhe von  $10^5$  *E. coli* nachweisen. Demgegenüber war *Clostridium perfringens* an drei Untersuchungstagen nicht nachweisbar. Dies kann nur über einen zum Zeitpunkt der Probenahme geringen Anteil an Braunwasser und einen hohen Anteil an Grauwasser erklärt werden. Aufgrund der Umweltresistenz der Sporen von *Clostridium perfringens* kann ein Absterben für die zeitweise geringen Gehalte nicht verantwortlich gemacht werden. Die Gehalte der verschiedenen Bakteriengruppe im Ablauf der Pflanzenkläranlage liegen durchweg unter denen vom Zulauf. Dies ist sicherlich auf die Adsorption- und sonstigen Vorgänge der Abwasserklärung im Bereich des Wurzelraumes der Pflanzenkläranlage zurückzuführen, auch wenn der Pflanzenbewuchs auf der Anlage noch recht gering war.

Im Vergleich zu zwei Proben aus konventionellen Kläranlagen liegt die Anzahl mesophiler aerober Bakterien (20 °C und 36 °C) im Ablauf der Pflanzenkläranlage durchweg um ca. eine Zehnerpotenz höher. Das gleiche gilt für den Nachweis von *E. coli*. Demgegenüber ist der Gehalt an *Clostridium perfringens* im Ablauf der Pflanzenkläranlage im Vergleich zu den herkömmlichen Kläranlagenabläufen nicht erhöht. Bei den Proben aus der Nachklärung der herkömmlichen Kläranlagen handelt es sich zwar um einzelne Stichproben, dennoch weisen Messungen an größeren Anlagen in der Regel aufgrund des größeren Volumens der Anlagen und der größeren Prozessstabilität weniger Schwankungen auf als kleine Anlagen.

Der Ablauf der Pflanzenkläranlage wird in die Vorflut, den Wiembach abgeleitet. Dieses Oberflächengewässer wies bei einer Untersuchung am 24.01.2003 durchaus geringe allgemeine Bakterienzahlen und auch geringe Gehalte an *E. coli* und *Clostridium perfringens* auf. Dies spiegelt sein Einzugsgebiet (Wiesen und Wald) und die offensichtlich geringe Kontamination wieder. Die Gehalte dieser bakteriellen Parameter im Ablauf der Pflanzenkläranlage liegen deutlich über den Gehalten des Wiembaches. Insgesamt ist bezüglich der Auswirkungen auf den Wiembach auch dessen deutlich höherer Volumenstrom und damit das Verdünnungspotenzial zu berücksichtigen.

Schließlich wurde am 22.10.2002 eine Kompostprobe untersucht. Diese Probe wies durchweg hohe Gehalte der allgemeinen Koloniezahl, aber auch der Fäkalindikatoren *E. coli* und *Clostridium perfringens* auf. Diese hohen Gehalte lassen sich durch den Verlauf der Kompostierung erklären, wie aus den Untersuchungen des Instituts für Pflanzenernährung der Universität Bonn hervorgeht, hat keine Heißrotte stattgefunden und offensichtlich hat auch die Lagerzeit nicht ausgereicht hat, eine weitgehende Abtötung von z.B. *Escherichia coli* zu erreichen. Somit hat auch keine nennenswerte Hygienisierung des Kompostes stattgefunden.

## Hygienische Bewertung

Die verschiedenen Abwasserteilströme einschließlich des Pflanzenkläranlagenablaufes sind mit Bakterien allgemeiner Art, wie auch mit *Escherichia coli* und *Clostridium perfringens* kontaminiert und können daher aus hygienischer Sicht wie übliches häusliches Abwasser bzw. Kläranlagenablauf angesehen werden. D.h., diese Teilströme sind als infektiös anzusehen.

# Analytik polarer Arzneimittelrückstände in Urinproben

## einschließlich der Entwicklung der hierzu notwendigen adäquaten Verfahren mittels GC-MS/MS

Dr. Sabine Stropfen, Dr. Friedrich Werres, Dr. Peter Balsaa, Prof. Dr. Horst Overath

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH  
Institut an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg  
Moritzstraße 26, 45476 Mülheim an der Ruhr  
Tel.: 0208 - 40303-0, f.werres@iww-online.de

### 1 Einleitung

Das Auftreten verschiedener Arzneimittel und Steroide in der aquatischen Umwelt wird seit einigen Jahren zunehmend diskutiert. Einige Arzneimittel und Steroide - zum Teil auch polare Abbauprodukte einzelner Wirkstoffe - können inzwischen als umweltrelevante Stoffe mit einem hohem Verbreitungsgrad angesehen werden [1, 2].

Die Wirkstoffe gelangen nach ihrer therapeutischen Anwendung über menschliche Ausscheidungen unzersetzt bzw. metabolisiert in das häusliche Abwasser. Umfangreiche Untersuchungen, die in den letzten Jahren durchgeführt wurden, konnten zeigen, dass diese Wirkstoffe regelmäßig in Kläranlagenabläufen und Fließgewässern nachgewiesen werden konnten [3, 4, 5]. Da sie zum Teil in kommunalen Kläranlagen nicht vollständig abbaubar sind, können sie somit Wasserversorgern, die ihr Trinkwasser direkt oder indirekt aus Oberflächenwasser gewinnen, Probleme bereiten, da einige Stoffe bei der Trinkwasseraufarbeitung gegebenenfalls nicht vollständig eliminiert werden können.

Es ist somit naheliegend, dass in einem alternativen Abwasserkonzept nach effektiveren Möglichkeiten der Abwasserversorgung und problemorientierten Abwasserreinigung gesucht wird. Dieser Grundgedanke wird mit dem Projekt Lambertsmühle - Zukunftsfähiges Abwassermanagement im ländlichen Raum - verfolgt. Das anfallende Abwasser wird hierbei entsprechend seiner Belastung mit Schadstoffen bzw. seiner Nährstofffracht zunächst in unterschiedliche Teilströme aufgegliedert. Auf diese Weise kann jeder Abwasserteilstrom einer adäquaten und Ressourcen schonenden Abwasserbehandlung zugeführt werden. Durch den Einsatz besonderer Trenntoiletten wird zum Beispiel der Teilstrom "Gelbwasser" (Urin mit ggf. geringem Spülwasseranteil) vom "Braunwasser" (Fäkalien mit Spülwasser) getrennt abgeleitet. Der Urin wird in einem unterirdischen Tank gesammelt und zwischengelagert, bevor er einer Verwertung als Düngemittel zugeführt wird. Fäkalien aus dem Braunwasser werden in einem speziellen Rottesack kompostiert. Das vergleichsweise nährstoffarme Filtrat aus der Entwässerung des Rottesacks wird mit dem sogenannten Grauwasser (fäkalienfreies Abwasser aus Handwaschbecken, Dusche, Küche etc.) gemeinsam in einem durchströmten bewachsenen Bodenfilter (Pflanzenkläranlage) behandelt.



Bei der im Projekt angedachten Rückführung einzelner Abwasserteilströme in den Ökokreislauf - insbesondere vor dem Hintergrund einer landwirtschaftlichen Verwertung des Gelbwassers - ist vorgesehen, den Verbleib und die Konzentration bestimmter anthropogener organischer Stoffe zu überwachen, die typischerweise in der Matrix Urin anzutreffen sind. Das Spektrum der Untersuchungen berücksichtigt bekanntermaßen im Abwasser in messbaren Konzentrationen vorkommende Stoffe wie pharmazeutische Wirkstoffe, aber auch verschiedene natürliche und synthetische Steroide. Dies setzt eine empfindliche und präzise Spurenstoffanalytik voraus, die auch unter schwierigen Matrixbedingungen - wie sie in Gelbwasser und anderen Abwasserteilströmen vorliegen - angewandt werden kann.

## 2 Zielsetzung

Im Rahmen dieses Projektes sollten durch den Einsatz von leistungsstarken chromatographischen und spektroskopischen Systemen Analysemethoden für die Bestimmung ausgewählter Arzneimittel und Steroide in Gelbwasser und in bestimmten Abwasserteilströmen entwickelt werden. Durch eine Weiterentwicklung bekannter Verfahren der Probenvorbereitung in Kombination mit neuen analytischen Techniken sollte ein rascher und präziser Nachweis dieser Stoffe in schwieriger Matrix ermöglicht werden. Die neu entwickelten analytischen Verfahren sollten nach ihrer Validierung in den projektbezogenen Routinebetrieb übertragen werden. Im nachfolgenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über den allgemeinen Stand der Technik zur Probenaufarbeitung und instrumentellen Analytik gegeben.

## 3 Allgemeines zur Analytik und Stand der Technik

Die Spurenanalyse anthropogener organischer Stoffe in wässrigen Proben macht Verfahren mit zum Teil erheblichem instrumentellen Aufwand notwendig. Gaschromatographische Methoden mit unterschiedlichen Detektionsarten (GC-FID, GC-NPD, GC-ECD) und die Hochleistungsflüssigchromatographie mit Einwellenlängen-, Mehrwellenlängen- bzw. Diodenarray-Detektion (HPLC-DAD) sind inzwischen weit verbreitet. Aber auch Kopplungstechniken der Gaschromatographie und der Flüssigkeitschromatographie mit der Massenspektrometrie (GC-MS und LC-MS) werden inzwischen routinemäßig eingesetzt, um die verschiedenartigen Kontaminanten sicher - und nicht selten in sehr niedrigen Konzentrationen - nachweisen zu können. Eine hinreichende Analysenempfindlichkeit wird trotz chromatographischer Verfahren mit hochsensiblen Detektoren nur durch eine Extraktion der Analyten aus der Originalprobe, verbunden mit einer Aufkonzentrierung, erreicht. Untersuchungen von wässrigen Proben komplexer Matrix erfordern meist umfangreiche Reinigungsschritte. Die Extraktion der Analyten aus der wässrigen Phase kann entweder mit einem organischen Lösungsmittel (Flüssig-Flüssig-Extraktion) oder aber mit der sogenannten Festphasenextraktion (SPE) erreicht werden.

### 3.1 Probenvorbereitungstechniken

Die Flüssig-Flüssig-Extraktion ist die ältere der beiden genannten Methoden [6]. Sie wird heute in vielen typischen Anwendungsbereichen bereits durch die Festphasenextraktion ersetzt. Ihr größter Nachteil ist der Verbrauch großer Volumina hochreiner, teurer und teilweise auch toxischer organischer Lösungsmittel, die anschließend einer sachgerechten Entsorgung zugeführt werden müssen. Darüber hinaus sind hohe Extraktionsausbeuten - insbesondere bei zunehmender Polarität der zu extrahierenden Stoffe - meist nur durch eine zeitraubende Mehrfachextraktion zu erreichen, die sich jedoch für die Routine nicht eignet und zudem mit einem noch höheren Lösungsmittelverbrauch verbunden ist. Die beachtliche Wasserlöslichkeit eini-

ger häufig verwendeter Extraktionsmittel (z.B. Dichlormethan oder Diethylether) macht zusätzlich eine kostspielige und ggf. umweltbelastende Entsorgung der gesamten - nach der Extraktion mit organischem Lösungsmittel gesättigten - Originalprobe notwendig. Gleichzeitig ist die Auswahl geeigneter Lösungsmittel begrenzt, da es ggf. zu Störungen der jeweils geplanten Detektionsart sowohl bei der GC als auch HPLC kommen kann.

Die Festphasenextraktion (SPE) ist heute im Bereich der Umweltanalytik weitverbreitet. Aufgrund verschiedener Vorteile, die sie im Vergleich zur Flüssig-Flüssig-Extraktion besitzt, wird sie seit langem im Rahmen der Probenaufbereitung zur Anreicherung einer Vielzahl unterschiedlicher organischer Stoffe aus wässrigen Proben [7], aber auch aus der Matrix Urin eingesetzt [8]. Kommerziell sind Adsorbentien erhältlich, die sich in ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften - insbesondere in ihrer Polarität - unterscheiden. Häufig werden modifizierte Kieselgele, wie das bekannte RP-C18 - Material bzw. Materialien auf der Basis von quervernetztem Polystyroldivinylbenzol verwendet, mit denen organische Verbindungen unterschiedlicher Polarität mit hoher Effizienz aus der Wasserprobe extrahiert werden können. Die unterschiedlichen Phasenmaterialien sind in Polypropylen- oder Glaskartuschen fertig abgefüllt erhältlich. In der Praxis wird die Probe mittels Über- oder Unterdruck durch die mit Adsorbens gefüllte Kartusche gedrückt bzw. gesaugt. Meist ist eine Trocknung der Phase (z.B. mit Stickstoff) notwendig. Es folgt ein Elutionsschritt mit organischem Lösungsmittel sowie in der Regel ein Aufkonzentrieren des Eluates am Rotationsverdampfer oder durch Abblasen des Lösungsmittels mit Stickstoff. Die SPE besitzt den Vorteil eines erheblich geringeren Lösungsmittelverbrauchs und die Möglichkeit einer Automatisierung.

Viele Analyten mit stark polaren funktionellen Gruppen (Carbonsäuren, phenolische Verbindungen bzw. Amine) erfordern eine chemische Derivatisierung, um ihre Polarität so weit herabzusetzen, dass sie einer gaschromatographischen Analyse zugänglich werden. Dies macht zusätzliche manuelle Probenvorbereitungstechniken (z.B. Veresterungen mit Methanol / Schwefelsäure, etherischer Diazomethanlösung [9], Trimethylsulfoniumhydroxid (TMSH) [10] und andere Derivatisierungsverfahren auf der Basis von Silylierungsreaktionen [11]) notwendig, die einer Automation entgegenstehen oder diese nur eingeschränkt zulassen.

### 3.2 Instrumentelle Analytik (Chromatographie und Spektrometrie)

Sowohl die Gaschromatographie (GC) als auch die Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC) sind heute in allen Umweltlaboratorien die Basis für jede Art von Spurenstoffanalytik im Bereich anthropogener organischer Kontaminanten. Nach wie vor besitzt die GC gegenüber der HPLC den Vorteil einer höheren Trennschärfe, die insbesondere bei komplexen Stoffgemischen bzw. schwierigen Matrices - wie im Bereich der Analytik von Urin - aufgrund einer genaueren Signalzuordnung in der Targetanalyse (Untersuchung auf bekannte Zielsubstanzen) eine höhere Sicherheit bietet. Ein weiterer Vorteil der GC ist zweifellos die mögliche Kombination mit einer Reihe unterschiedlicher Detektoren (z.B. ECD, NPD, FID, MS), die eine selektive bzw. universelle Bestimmung mit hoher Empfindlichkeit ermöglichen. Die Absicherung des Befundes kann darüber hinaus entweder im Rahmen der Targetanalyse mittels einer zweiten Säule anderer Polarität (Doppelsäulentchnik) erfolgen oder im Falle der GC-MS über vollständige Massenspektren oder charakteristische Ionen der nachzuweisenden Stoffe. Insbesondere massenspektrometrische Verfahren bieten im Rahmen der Gaschromatographie derzeit die besten Voraussetzungen hinsichtlich Spezifität und Empfindlichkeit. Im Bereich der Umweltanalytik werden vor allem Quadrupol- bzw. Ion-Trap-Massenspektrometer eingesetzt. Mit letzteren können im sogenannten MS/MS-Betrieb einzelne, mittels Elektronenstoßionisie-

rung (EI) oder chemischer Ionisierung (CI) erzeugte Ionen erneut in der Trap gesammelt werden und in einem zweiten Schritt einer kollisionsinduzierten Fragmentierung unterzogen werden [12]. Man erhält auf diese Weise ein sekundäres Fragmentspektrum (Tochterionenspektrum). Die Vorteile dieser Technik liegen in einer besseren Absicherung des Befundes, einer weitestgehenden Ausblendung aller störenden Matrixeinflüsse sowie einer damit einhergehenden zusätzlichen Empfindlichkeitssteigerung.

Im Gegensatz zur GC lässt sich die HPLC meist nur mit Detektoren koppeln, die nach dem Prinzip der Absorption von UV-Licht arbeiten. Die Empfindlichkeit der UV-Detektion ist zwar vielfach ausreichend hoch, jedoch ist für eine erfolgreiche Detektion erforderlich, dass der Analyt wenigstens ein Chromophor besitzt, um die Absorption ultravioletten Lichts überhaupt zu ermöglichen. Dies ist jedoch leider häufig nicht gegeben. Daher kann dieser für die HPLC wichtige Detektortyp nicht als universell bezeichnet werden. Hinzu kommt, dass aufgrund der meist eingeschränkten Aussagekraft von UV-Spektren diesem Verfahren hinsichtlich Nachweissicherheit selbst bei Verwendung von UV-Diodenarray-Detektoren (UV-DAD) Grenzen gesetzt sind.

Seit einigen Jahren gewinnt die Kopplung zwischen HPLC und einem Massenspektrometer an Bedeutung, da die inzwischen verfügbaren Interfaces einen schonenderen - auch für thermolabile Stoffe geeigneten - Übergang der Analyten aus dem HPLC-Laufmittel in den Ionisierungsbereich des Massenspektrometers ermöglichen. Insbesondere durch die Entwicklung von Ionenquellen, die bei Atmosphärendruck arbeiten (API) - der "atmospheric pressure chemical ionisation" (APCI) und der "electrospray ionisation" (ESI) - wurden erstmals robuste HPLC-MS-Systeme verfügbar, die darüber hinaus den Vorteil bieten, dass Proben zum Teil ohne aufwendige Probenaufarbeitung und Derivatisierung gemessen werden können und dass eine Absicherung der Analytik selbst bei koeluiierenden Stoffen möglich ist. Die Vorteile der Massenspektrometrie lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Massenspektrometrie als Detektionsverfahren ist universell, sicher und empfindlich. Eine Absicherung der Analytik ist in einem gewissen Umfang auch bei koeluiierenden Stoffen möglich.
- Ion-Trap-Massenspektrometer in Verbindung mit der MS/MS-Technik erhöhen die Nachweissicherheit und Analysenempfindlichkeit in der Targetanalyse. Der störende Matrixeinfluss, sowohl bei der GC-MS als auch bei der LC-MS kann besser ausgeblendet werden.

## 4 Methodenentwicklung

### 4.1 Allgemeines und Stoffauswahl

Verabreichte Arzneimittel einschließlich endokriner Wirkstoffe und deren Metaboliten lassen sich naturgemäß im menschlichen Urin nachweisen. Die "Rote Liste", die über 90 % der deutschen Arzneimittel aufführt, enthält allein mehr als 8000 Präparateeintragungen [13].

Die allein in Deutschland verordneten Jahresmengen vieler dieser Wirkstoffe betragen häufig zwischen 10 und mehr als 100 Tonnen. Einige Wirkstoffe werden jedoch zur Therapie in der Humanmedizin besonders häufig und meist über längere Zeiträume hinweg eingesetzt. Dies betrifft insbesondere gängige Lipidsenker, Schmerz- und Rheumamittel, sowie Mittel zur Verbesserung der Durchblutung. Aber auch bestimmte synthetische Steroide, die z.B. als Kontrazeptiva Verwendung finden, besitzen einen hohen Verbreitungsgrad. Diese Wirkstoffe und deren Metaboliten werden daher in kommunalen Abwässern regelmäßig in erhöhten Konzentrationen nachgewiesen [1, 3]. Die Tabellen 1 und 2 geben eine aktuelle Übersicht über typische Vertreter der oben genannten Wirkstoffgruppen.

Im Rahmen des Projektes wurden Analysenverfahren zunächst für diese Stoffe erarbeitet. In Abhängigkeit von der Beschaffenheit der im Projekt zu untersuchenden Gelbwasser- und Abwasserproben wurde die endgültige Stoffauswahl für die geplanten projektbegleitenden Routineuntersuchungen den Anforderungen entsprechend angepasst.

#### 4.2 Geräte und Chemikalien

Die verwendeten Lösungsmittel Aceton, Acetonitril, Methanol, Diethylether (Promochem, Wesel), Diethylglycolmonoethylether und Essigsäure (Merck, Darmstadt) besaßen die Qualität "zur Rückstandsanalytik". Das HPLC-Wasser stammt ebenfalls von Promochem (Wesel). N-Methyl-N-nitroso-4-toluolsulfonamid "zur Herstellung von Diazomethan", Kaliumhydroxid und Salzsäure (25 %ig) wurden von Merck (Darmstadt) bezogen. Die als Referenzsubstanz eingesetzten Arzneimittel und Steroide (Sigma-Aldrich, Seelze) besaßen eine Reinheit von > 98 % und wurden zur Herstellung der Stammlösungen und Verdünnungen verwendet. Als Modellwasser wurde Mülheimer Trinkwasser (aufbereitet aus Uferfiltrat der Ruhr) eingesetzt. Zur Festphasenextraktion wurden SPE-Kartuschen des Typs LiChrolut DYE (3 mL, gefüllt mit 0,2 g Polystyroldivinylbenzol) von Merck (Darmstadt) sowie SDB 1 (3 mL, gefüllt mit 0,2 g Polystyroldivinylbenzol) und Polar-Plus (6 mL, gefüllt mit 1 g RP-C18 Material) von J.T. Baker (Deventer, Niederlande) eingesetzt.

Die gaschromatographischen Messungen wurden mit einem GC-MS-System der Firma Agilent (Waldbronn) (Typ Agilent 6890 GC, 5973 MSD) durchgeführt, das mit einem Kaltaufgabesystem (KAS 3) und dem Auto-Injektor (MPS 2) von Gerstel (Mülheim an der Ruhr) ausgerüstet war. Zur chromatographischen Trennung wurden GC-Säulen des Typs ZB 5 und ZB 50 von Phenomenex (Aschaffenburg) eingesetzt. Die flüssigchromatographischen Untersuchungen wurden mit einem HPLC-MS-System der Firma Thermo-Finnigan (Egelsbach) durchgeführt. Dieses bestand aus der HPLC-Pumpe (P 4000) mit vorgeschaltetem Degaser (SCM 1000), Autosampler (AS 3000), UV-Diodenarray Detektor (UV 6000 LP) und nachgeschaltetem Ion-Trap Massenspektrometer (LCQ Duo). Zur chromatographischen Trennung wurde eine HPLC-Säule des Typs Discovery HS C18 (150 x 2,1 mm; 3 µm) der Firma Supelco (Taufkirchen) eingesetzt. Probengefäße mit einem Volumen von 2 mL, entsprechende Inlets und passende Bördelkappen wurden von Escape (Freigericht) bezogen.

Bezeichnung	humantherapeutischer Einsatz	Summenformel	Molmasse [g/mol]
Acetylsalicylsäure*	Analgikum	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	180,2
Bezafibrat *	Lipidsenker	C <sub>21</sub> H <sub>27</sub> ClNO <sub>4</sub>	361,8
Carbamazepin	Antiepileptikum	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O	236,3
Clofibrinsäure *	Metabolit der Lipidsenker Clofibrat, Etofibrat und Etofibrinibrat	C <sub>17</sub> H <sub>13</sub> ClO <sub>3</sub>	214,6
Diclofenac *	nichtsteroidales Antirheumatikum	C <sub>16</sub> H <sub>13</sub> Cl <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> Na	318,1
Fenofibrat	Lipidsenker	C <sub>20</sub> H <sub>27</sub> ClO <sub>4</sub>	360,8
Fenoprofen *	nichtsteroidales Antirheumatikum	C <sub>18</sub> H <sub>19</sub> O <sub>3</sub> Ca	522,6
Gemfibrozil *	Lipidsenker	C <sub>27</sub> H <sub>38</sub> O <sub>3</sub>	250,3
Ibuprofen *	nichtsteroidales Antirheumatikum	C <sub>19</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	206,3
Indometacin *	nichtsteroidales Antirheumatikum	C <sub>19</sub> H <sub>17</sub> ClNO <sub>4</sub>	357,8
Ketoprofen *	nichtsteroidales Antirheumatikum	C <sub>18</sub> H <sub>17</sub> O <sub>3</sub>	254,3
Pentoxifylin	Vasodilator	C <sub>17</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	278,3
Phenacetin	Analgikum	C <sub>12</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>	179,2
Phenazon	Analgikum	C <sub>11</sub> H <sub>11</sub> N <sub>3</sub> O	188,2

\* Diese Stoffe besitzen eine polare funktionelle Carboxylgruppe. Zur Herabsetzung ihrer Polarität war vor der gaschromatographischen Analyse eine chemische Derivatisierung mit Diäthylether (Methylierung) notwendig.

Tab. 1: Arzneimittel und Metaboliten, für deren Bestimmung in Urin und Abwässern Analysenverfahren erarbeitet wurden.

Bezeichnung	Vorkommen	Summenformel	Molmasse [g/mol]
Estradiol	natürliches Östrogen	C <sub>18</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	272,4
Estron	natürliches Östrogen	C <sub>18</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	286,4
Estron	natürliches Östrogen	C <sub>18</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	270,4
17α-Ethinylestradiol	synthetisches Steroid (Kontrazeptivum)	C <sub>20</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	296,4
16α-Hydroxyestron	Metabolit	C <sub>18</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	286,4
Mestranol	synthetisches Steroid (Kontrazeptivum)	C <sub>20</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	310,4
β-Sitosterol	Phytöstrogen	C <sub>27</sub> H <sub>48</sub> O	414,7

Tab. 2: Steroide und Metaboliten, für deren Bestimmung in Urin und Abwässern Analysenverfahren erarbeitet wurden.

### 4.3 Erarbeitung von Analysenverfahren für ausgewählte Arzneimittel und Steroide

Für die in Tabelle 1 und 2 genannten Stoffe wurden zunächst geeignete Analysenverfahren erarbeitet, die eine Bestimmung sowohl in der komplexen Matrix Urin als auch in Abwässern bzw. abwasserwandten Wässern (z.B. Kläranlagenabläufen) erlaubten. Letzteres war notwendig, um ein Monitoring des Zu- und Ablaufs der Pflanzenkläranlage zu untersuchen.

Neben der vollständigen Neuentwicklung einzelner Methoden wurde zum Teil auch auf in der Literatur beschriebene Verfahren zurückgegriffen und ggf. eine notwendige Modifikation vorgenommen. Einige dieser Verfahren beschreiben die Chromatographie (GC-MS) einschließlich der Probenaufarbeitung von Arzneimitteln und Steroiden in Fließgewässern und Kläranlagenabläufen.

Verfahren zur Bestimmung von Arzneimitteln erfordern meist zunächst eine Probenfiltration nach Ansäuern auf pH 2 sowie eine Anreicherung mittels Festphasenextraktion. Nach Trocknung der Phase und Elution mit einem organischen Lösungsmittel müssen die polaren Stoffe meist einer chemischen Derivatisierung unterzogen werden, um ihre Polarität soweit herabzusetzen, dass sie gaschromatographisch (in der Regel mittels GC-MS) vermessen werden können [2]. Die meisten der beschriebenen Verfahren zur Bestimmung von Steroiden schließen einen GC-MS-Bestimmungsschritt nach Festphasenanreicherung, clean-up und Derivatisierungsverfahren ein. Die Probe wird zunächst filtriert, auf einen pH-Wert von 3 eingestellt und anschließend an einer Festphase angereichert. Nach der Trocknung wird der Probenextrakt z.B. mittels Säulenchromatographie an Kieselgel/Florisil gereinigt (clean-up). Anschließend wird mit Stickstoff zur Trockene eingeeengt und eine chemische Derivatisierung mit einem geeigneten Silylierungsreagenz durchgeführt [3].

- **Analytik von Arzneimittelrückständen und Metaboliten in Abwasser und Urin**

Für die Analyse der in Frage kommenden Arzneimittelrückstände und Metaboliten mussten aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften zunächst zwei unterschiedliche Analysenverfahren erarbeitet werden. Dies schloss sowohl die Probenvorbereitung als auch den gaschromatographischen Bestimmungsschritt ein. Ferner mussten beide Methoden auf die unterschiedlichen Matrices Urin und Abwasser abgestimmt werden, so dass schließlich vier Verfahren erarbeitet wurden.

In den Abbildungen 1, 2 und 3 werden neben den gaschromatographischen und spektroskopischen Bedingungen auch die unterschiedlichen Arbeitsschritte für die Probenvorbereitung von Abwasser und Urin dargestellt.

Die besten chromatographischen Ergebnisse hinsichtlich Signalsymmetrie, Trennleistung und Unterdrückung von Störungen durch Matrixbelastungen der zu vermessenden Probenextrakte konnte mit einer mittelpolaren Kapillarsäule des Typs ZB 50 erreicht werden. Neben den gaschromatographischen Bedingungen sind in Abbildung 1 die Retentionszeiten der untersuchten Stoffe und die zur Identifizierung und Quantifizierung verwendeten Fragmentmassen (Qualifier-Ionen) dargestellt. Auf der Basis der Festphasenextraktion (SPE) wurden für die ausgewählten Stoffe geeignete Anreicherungsverfahren erarbeitet. Alle Versuche zur Optimierung der Anreicherungsbedingungen (z.B. das Testen von unterschiedlichen SPE-Materialien, unterschiedlichen Lösungsmitteln zur Konditionierung und Elution sowie Trocknung der Phasen), wurden mit dotierten Modellwasserproben durchgeführt. Als Modellwasser wurden Wasser, Abwasser und Urinproben verwendet. Die Stoffe Bezafibrat, Clofibrinsäure, Diclofenac, Fenoprofen, Gemfibrozil, Ibuprofen, Indometacin und Ketoprofen besitzen eine polare Carboxylgruppe ("acide Stoffe") und ließen sich daher effektiv bei einem pH-Wert von 2 anreichern.

Gaschromatograph: Agilent 8890  
 Säule: DB 50; 30 m ID: 0,25 mm; Filmdicke: 0,25 µm  
 Injektionsvolumen: 1 µL  
 Injektor: Gemül KAS; 80 °C bis 200 °C  
 Trägergasfluss: 1,0 mL/min

für Acetylsalicylsäure (ASS), Benzofibrat, Clofibronsäure, Diclofenac, Fenoprofen, Gemfibrozil, Ibuprofen, Indometacin und Ketoprofen		für Carbamazepin, Fenofibrat, Pantothylin, Phenacetin und Phenazon	
<b>Temperaturprogramm</b>		<b>Temperaturprogramm</b>	
Start: 80 °C		Start: 80 °C	
Heizrste: 8 °C/min bis 300 °C		Heizrste: 10 °C/min bis 210 °C, 20 °C/min bis 280 °C	
Haltezeit: 10 min		Haltezeit: 4 min	
Laufzeit: 65,30 min		Laufzeit: 30,90 min	

MS: Agilent 6873 MSD  
 Ionisierungsenergie: 70 eV  
 Betriebsart: SIM

	RT -zeit	Qualifizierung	RT -zeit	Qualifizierung	
ASS	14,85	92123152	Carbamazepin	20,39	166193
Benzofibrat	42,24	120220	Fenofibrat	24,77	197232273
Clofibronsäure	18,85	128228	Pantothylin	25,41	193221278
Diclofenac	52,70	214242339	Phenacetin	18,21	106137179
Fenoprofen	27,28	197239	Phenazon	20,12	96198
Gemfibrozil	24,25	83143			
Ibuprofen	18,88	1611771220			
Indometacin	42,79	312371			
Ketoprofen	31,49	239288			

RT -zeit: Referenzzeit

Abb. 1:  
 GC-MS Bedingungen für die Be-  
 stimmung von Arzneimittelwirk-  
 stoffen in Wasser und Urin



Abb. 2:  
 Schema zur Analytik von  
 Arzneimittelwirkstoffen  
 (Matrix Abwasser)



Abb. 3:  
 Schema zur Analytik von  
 Arzneimittelwirkstoffen  
 (Matrix Urin)

Carbamazepin, Fenofibrat, Pentoxifyllin, Phenacetin und Phenazon besitzen keine Carboxylgruppe und sind vergleichsweise weniger polar (sogenannte "neutrale Stoffe"). Ihre Anreicherung gelang am besten bei einem pH-Wert von 9.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Wiederfindungsraten sind in Tabelle 3 dargestellt.

Man erkennt, dass die höchsten Wiederfindungsraten mit der Styroldivinylbenzol-Phase LiChrolut DYE erreicht werden. Die Probenaufarbeitung von Urin zur Untersuchung auf Arzneimittel erforderte aufgrund einer deutlich höheren Matrixbelastung eine besondere Vorgehensweise. Die zu erwartende höhere Konzentration einzelner Stoffe im Urin ließ kleine Probenvolumen zu. In systematisch angelegten Versuchsreihen mit dotierten Urinproben wurde die Probenvorbereitung mit verschiedenen Ausgangsvolumina zwischen 1 mL und 10 mL durchgeführt. Die besten Ergebnisse für die Anreicherung und den clean-up-Schritt wurden mit einem Probenvolumen von 3 mL erreicht. Bei Erhöhung des Probenvolumens auf 5 bzw. 10 mL ließ sich eine Probenreinigung (clean-up) nur noch erschwert durchführen.

Bezeichnung	LiChrolut DYE	LiChrolut DYE	SDB 1
	Aceton WFR in %	Ethylacetat WFR in %	Aceton WFR in %
Acetylsalicylsäure	90	85	22
Bezafibrat	92	186	0
Carbamazepin	105	124	99
Clofibrinsäure	46	45	5
Diclofenac	61	59	15
Fenofibrat	79	53	44
Fenoprofen	51	48	21
Gemfibrozil	53	34	30
Ibuprofen	45	47	23
Indometacin	70	110	6
Ketoprofen	55	53	13
Pentoxifyllin	100	88	57
Phenacetin	100	91	84
Phenazon	107	104	87

Tab. 3: Wiederfindungsraten (WFR) pharmazeutischer Wirkstoffe und Metaboliten in Abhängigkeit des verwendeten Adsorbens in der Matrix Wasser (Elutionsmittel: Aceton und Ethylacetat)

• **Analytik von natürlichen und synthetischen Steroiden in Abwasser und Urin**

Die Steroide (Tabelle 2) wurden zunächst mit dem in der Literatur beschriebenen Verfahren [3] in der Matrix Wasser bestimmt. Eine Übertragung des Verfahrens auf Abwasser war mit Einschränkungen möglich. Die beschriebene Silylierung führte jedoch in der Matrix Urin zu gravierenden Störungen der Chromatographie. Insbesondere war keine Langzeitstabilität der eingesetzten Trennsäulen und des Injektionssystems zu erreichen, so dass eine Auswertung der Analysenergebnisse nur schwer möglich war. Aus diesem Grund wurde dieses Verfahren für die im Projekt benötigte Routineanalytik nicht verwendet.

Alternativ wurden geeignete Verfahren auf der Basis der HPLC-MS entwickelt, die sowohl in der Matrix Abwasser als auch Urin eingesetzt werden konnten. Im Gegensatz zu den GC-Verfahren war eine Silylierung bzw. eine andere chemische Derivatisierung nicht notwendig, da polare Stoffe mittels HPLC direkt gemessen werden können.

Zunächst wurden für den Anreicherungsschritt unterschiedliche Phasenmaterialien getestet. Die mit Steroiden dotierten Modellwasserproben (jeweils 1 L) wurden durch Zugabe von Mineralsäure auf unterschiedliche pH-Werten eingestellt und der Festphasenextraktion unterzogen. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst.

Die besten Ergebnisse konnten bei einem pH-Wert von 2 erhalten werden. Das Phytoöstrogen  $\beta$ -Sitosterol wurde jedoch irreversibel auf den verwendeten Adsorbentien gebunden und





konnte daher im Elutionsschritt mit organischem Lösungsmittel (z.B. Methanol) nicht von der Phase abgelöst werden.

Die Empfindlichkeit der verwendeten Messeinrichtung ließ jedoch für  $\beta$ -Sitosterol eine direkte Injektion der wässrigen Probe (Abwasserprobe, Kläranlagenablauf) nach Filtration zu. In Abbildung 4 werden alle chromatographischen und spektroskopischen Bedingungen beschrieben, während die Abbildungen 5 und 6 einen Überblick über die Verfahrensschritte der Probenvorbereitung von Urin- und Abwasserproben geben.

Die entwickelten Verfahren ermöglichten die Analytik aller Steroide in der wässrigen Matrix. In weiteren Versuchsreihen sollten die entwickelten Methoden zur Steroidanalytik auf die Matrix Urin übertragen werden. Hierbei stellte sich heraus, dass auf den Probenvorbereitungsschritt einschließlich eines clean-up nahezu vollständig verzichtet werden konnte (Abbildung 6). Die Urinproben können sogar ohne Verlust der geforderten Analysenempfindlichkeit vor der Injektion mit Wasser verdünnt werden.

#### 4.4 Validierung der Analysenverfahren und Bewertung

In diesem Kapitel werden die Verfahrenskenndaten der entwickelten Analyseverfahren für die Bestimmung von Arzneimitteln und Steroiden in Abwasser und Urin dargestellt. Die Tabellen 5 und 6 zeigen zunächst die Ergebnisse für die Arzneimittel.

Die Bestimmungsgrenzen (BG) wurden jeweils auf der Basis eines Signal-zu-Rausch-Verhältnisses von 3/1 ermittelt. Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass die Linearität und die Wiederholpräzision des Verfahrens zur Abwasseruntersuchung gegeben ist. Die Korrelationskoeffizienten (r) aus einer 6-Punkt-Kalibrierung im Konzentrationsbereich von 0,02 bis 0,2  $\mu\text{g/L}$  nehmen Werte von  $r > 0,98$  an. Die relativen Standardabweichungen von je 5 Wiederholmessungen liegen für die einzelnen Arzneimittel in Wasser zwischen 0,4 und 7,2 % und zeigen damit die gute Reproduzierbarkeit des Verfahrens.

Auch das Verfahren zur Urinanalytik (Tabelle 6) zeigt eine vergleichbar gute Linearität und Wiederholstandardabweichung. Die Korrelationskoeffizienten im Konzen-

Bezeichnung	Bestimmungsgrenze (S/N = 3) BG in $\mu\text{g/L}$	Reproduzierbarkeit (n = 5; c = 0,1 $\mu\text{g/L}$ ) SA in %	Linearität (0,02 bis 0,2 $\mu\text{g/L}$ ) r
Acetylsalicylsäure	0,02	3,9	0,9921
Bezafibrat	0,02	2,3	0,9733
Carbamazepin	0,02	6,5	0,9949
Clofibrinsäure	0,02	0,4	0,9873
Diclofenac	0,02	3,5	0,9934
Fenclofibrat	0,02	6,4	0,9897
Fenoprofen	0,02	2,4	0,9878
Gemfibrozil	0,02	5,4	0,9978
Ibuprofen	0,02	5,3	0,9923
Indometacin	0,02	4,4	0,9910
Ketoprofen	0,02	3,7	0,9893
Pericosylin	0,02	3,1	0,9932
Phenacetin	0,02	5,1	0,9943
Phenazon	0,02	7,2	0,9920

Tab. 5: Verfahrenskenndaten zur Analytik von Arzneimittelrückständen (Matrix Wasser)

Bezeichnung	Bestimmungsgrenze (S/N = 3) BG in $\mu\text{g/L}$	Reproduzierbarkeit (n = 5; c = 5,0 $\mu\text{g/L}$ ) SA in %	Linearität (0,5 bis 5,0 $\mu\text{g/L}$ ) r
Acetylsalicylsäure	0,5	7,9	0,9823
Bezafibrat	0,5	11,6	0,9622
Carbamazepin	0,5	2,3	0,9971
Clofibrinsäure	0,5	13,6	0,9701
Diclofenac	0,5	1,7	0,9396
Fenclofibrat	0,5	5,0	0,9977
Fenoprofen	0,5	8,6	0,9761
Gemfibrozil	0,5	9,3	0,9742
Ibuprofen	0,5	4,1	0,9845
Indometacin	0,5	5,6	0,9885
Ketoprofen	0,5	8,7	0,9821
Pericosylin	0,5	8,9	0,9923
Phenacetin	0,5	8,5	0,9829
Phenazon	3,0	7,2	0,9884

Tab. 6: Verfahrenskenndaten zur Analytik von Arzneimittelrückständen (Matrix Urin)

Bezeichnung	Bestimmungsgrenze (S/N = 3) BG in µg/L	Reproduzierbarkeit (n = 3; c = 0,1 µg/L) SA in %	Linearität (0,02 bis 0,2 µg/L) r
Estradiol	0,01	7,2	0,9980
Estriol	0,02	16,4	0,9977
Estron	0,01	11,8	0,9973
17 $\alpha$ -Ethinylestradiol	0,02	32,5	0,9894
16 $\alpha$ -Hydroxyestron	0,02	15,6	0,9977
Mestranol	0,01	3,2	0,9982
$\beta$ -Sitosterol	0,01	2,1*	0,9971**

\*) c = 1 µg/L

\*\*) Konzentrationsbereich der Mehrpunkt-Kalibrierung: 0,01 bis 1,0 µg/L

Tab. 7: Verfahrenskenn Daten zur Analytik von Steroiden (Matrix Wasser)

Bezeichnung	Bestimmungsgrenze (S/N = 3) BG in µg/L	Reproduzierbarkeit (n = 3; c = 100 µg/L) SA in %	Linearität (5 bis 200 µg/L) r
Estradiol	10	7,1	0,9972
Estriol	100	16,3	0,9768
Estron	10	11,2	0,9974
17 $\alpha$ -Ethinylestradiol	50	32,0	0,8898
16 $\alpha$ -Hydroxyestron	10	9,8	0,9878
Mestranol	5	3,4	0,9957
$\beta$ -Sitosterol	2	13,1	0,9793

Tab. 8: Verfahrenskenn Daten zur Analytik von Steroiden (Matrix Urin)

Korrelationskoeffizienten aus einer 6-Punkt-Kalibrierung im Konzentrationsbereich von 0,02 bis 0,2 µg/L in der Matrix Abwasser nehmen Werte von  $r > 0,996$  an. Eine Ausnahme bildet das 17 $\alpha$ -Ethinylestradiol mit einem geringfügig niedrigeren Wert von 0,9894.

In der Matrix Urin werden für den Konzentrationsbereich von 5 bis 200 µg/L Korrelationskoeffizienten von  $r > 0,977$  erreicht (17 $\alpha$ -Ethinylestradiol:  $r = 0,8898$ ).

Die relativen Standardabweichungen von je fünf Wiederholungsmessungen liegen meist zwischen 2 und 16 %. Die Bestimmungsgrenzen für Estradiol, Estriol, Estron, 17 $\alpha$ -Ethinylestradiol, 16 $\alpha$ -Hydroxyestron und Mestranol betragen im Abwasser 0,02 µg/L oder darunter. In der Matrix Urin werden verschiedene Bestimmungsgrenzen ermittelt:  $\beta$ -Sitosterol 2 µg/L, Mestranol 5 µg/L, Estradiol, Estron und 16 $\alpha$ -Hydroxyestron 10 µg/L, 17 $\alpha$ -Ethinylestradiol 50 µg/L und Estriol 100 µg/L.

Die ermittelten Verfahrenskenn Daten zeigen, dass die entwickelten Analysenmethoden eine hinreichend empfindliche Bestimmung der ausgewählten Arzneimittelwirkstoffe, Steroide und Metaboliten sowohl in Abwässern als auch in der schwierigen Matrix Urin zulassen. Die Methoden zeichnen sich durch eine hohe Verfahrensreproduzierbarkeit in unterschiedlichen Konzentrationsbereichen aus und eignen sich somit für den projektbezogenen Routinebetrieb.

## 5 Ergebnisse der projektbegleitenden Analytik

### 5.1 Allgemeine Forderungen

Mit dem Projekt Lambertsmühle - Zukunftsfähiges Abwassermanagement im ländlichen Raum - wird ein alternatives Abwasserkonzept verfolgt. Das anfallende Abwasser wird zunächst in unterschiedliche Teilströme getrennt. Eine Rückführung einzelner Abwasserteilströme - vor allem des nährstoffreichen Gelbwassers - in den Ökokreislauf wird angestrebt. Aus diesem Grund war es notwendig, die Konzentration und auch den Verbleib der in der Matrix Urin vorhandenen Arzneimittelwirkstoffe und Steroide zu überwachen. Der Gelbwasserspei-

trationsbereich von 0,5 bis 5,0 µg/L zeigen mit  $r > 0,96$  ebenfalls vergleichbare Werte (Ausnahme: Diclofenac  $r = 0,9395$ ).

Die ermittelten Bestimmungsgrenzen betragen im Abwasser 0,02 µg/L und im Urin - bedingt durch die schwierige Matrix - meist 0,5 µg/L (Phenazon: 3,0 µg/L). Die Ergebnisse der entsprechenden Validierungsexperimente zu den Analysenmethoden für eine Bestimmung von Steroiden in Abwasser und Urin werden in Tabelle 7 und 8 dargestellt.

Man erkennt, dass auch hier die Linearität und Verfahrenspräzision gegeben sind. Die

cher wurde deshalb in 14-tägigem Abstand über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr untersucht. Parallel dazu wurde der Zulauf des Gelbwasserspeichers beprobt, um Aussagen über momentane Einträge und deren Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Urins im Speicher zu erhalten.

Im Rahmen des Projektes sollte zudem auch der Einfluss des pH-Wertes auf das chemische Verhalten der im Gelbwasser nachgewiesenen Arzneimittelwirkstoffe und Steroide untersucht werden. Aus der Literatur war bekannt, dass durch eine Absenkung des pH-Wertes auf 2 die mikrobiologische Aktivität im Gelbwasser verringert werden kann. Zur Stabilisierung wurde der Urin im Gelbwasserspeicher deshalb zuerst mit Essigsäure und später mit Schwefelsäure angesäuert. Die Ansäuerung mit Schwefelsäure war notwendig, um die gewünschte Absenkung des pH-Wertes zu erreichen. Nach der ersten vollständigen Entleerung des Gelbwasserspeichers Anfang August 2002 wurde die Ansäuerung eingestellt, um auch unter den dann vorliegenden Bedingungen (pH-Wert 8-9) Informationen zum chemischen Verhalten der Arzneimittelwirkstoffe und Steroide zu erhalten. Auf die Beprobung und Analytik des Zulaufs wurde verzichtet. Neben der projektbegleitenden Analytik wurden im IWW Batchversuche mit dotierten Urinproben durchgeführt, die Aussagen zum Abbauverhalten von Arzneimittelwirkstoffen bei unterschiedlichen pH-Werten liefern sollten.

Zwischen März 2002 und Januar 2003 wurden zusätzlich sechs Mal der Zulauf (Filtrat aus der Entwässerung des Rottesacks einschließlich Grauwasser) und Ablauf der Pflanzenkläranlage beprobt. Die Ergebnisse sollten zeigen, in wie weit auch das Grauwasser durch Arzneimittelwirkstoffe und Steroide belastet ist. Ferner sollte eine unzureichende Separierung des Urins in den Trenntoiletten erkennbar werden.

### 5.2 Ergebnisse der Untersuchungen des Gelbwassers

Im Turnus von ca. zwei Wochen wurden von Mitarbeitern des Wupperverbandes Gelbwasserproben sowohl aus dem Gelbwasserspeicher als auch aus dem Zulauf genommen und zum IWW geschickt. Sofort nach der Probenanlieferung wurde der pH-Wert gemessen. Anschließend wurden die Proben eingefroren und bei -18 °C im Gefrierschrank gelagert, um einen Abbau der Inhaltsstoffe zu vermeiden.

In den Tabellen 9 und 10 sind die gemessenen pH-Werte aller entnommenen Urinproben neben weiteren Informationen zur Probenbeschaffenheit (Aussehen, Bodensatz etc.) zusammengefasst.

Der pH-Wert des Gelbwassers im Zulauf lag im gesamten Messzeitraum naturgemäß zwischen 8,6 und 9,2. Ab Februar 2002 wurde das Gelbwasser im Speicher mit Schwefelsäure angesäuert, um eine Absenkung des pH-Wertes auf 2 zu erreichen. Zur Stabilisierung des pH-Wertes, musste mehrfach mit konzentrierter Schwefelsäure

PN-Datum	pH-Wert	Beschaffenheit	Bemerkung
07.11.2001	9,0	bräunlich-gelb, trüb	
18.12.2001	8,8	obere Phase: grün, untere Phase: bräunlich-gelb	Ende Nov. Feier mit 50 Personen, WC-Reiniger
07.01.2002	8,7	gelb, klar	
16.01.2002	8,6	gelb, klar	
30.01.2002	8,6	bräunlich, trüb	
13.02.2002	8,8	bräunlich, trüb	
26.02.2002	8,7	bräunlich, trüb	
20.03.2002	8,7	gelb, klar	
11.04.2002	8,8	gelb, klar	
06.05.2002	8,8	bräunlich-gelb, Bodensatz	
22.05.2002	8,8	bräunlich-gelb, Bodensatz	
06.06.2002	8,8	bräunlich-gelb, trüb	
19.06.2002	9,2	bräunlich-gelb, Bodensatz	
04.07.2002	8,7	gelb, klar	
09.07.2002	8,7	gelb, klar	
19.07.2002	8,8	gelb, klar	
30.07.2002	8,8	gelb, klar	

Tab. 9: Beschaffenheit / pH-Wert der Gelbwasserproben aus dem Zulauf des Gelbwasserspeichers.

PN-Datum	pH-Wert	Beschaffenheit	Bemerkung
07.09.2001	5,2	gelb, brauner Bodensatz	
11.09.2001	7,0	bräunlich-gelb, trüb	
07.11.2001	3,3	bräunlich-gelb, trüb	
18.12.2001	4,8	obere Phase: grün, untere Phase: bräunlich-gelb	Ende Nov. Feier mit 50 Personen, WC-Reiniger
07.01.2002	6,1	gelb, klar	
16.01.2002	6,3	gelb, klar	
30.01.2002	6,8	gelb, klar	
13.02.2002	6,8	gelb, klar	
26.02.2002	2,8	gelb, klar	GwSp angesäuert
20.03.2002	1,7	gelb, klar	Teilentleerung
11.04.2002	1,7	gelb, klar	
06.05.2002	1,8	bräunlich-gelb, trüb	
22.05.2002	1,8	bräunlich-gelb, trüb	Teilentleerung
06.06.2002	2,0	bräunlich-gelb, trüb	
19.06.2002	3,8	bräunlich-gelb, trüb	
04.07.2002	1,8	gelb, klar	GwSp angesäuert
09.07.2002	1,8	gelb, klar	
19.07.2002	2,0	gelb, klar	
30.07.2002	2,1	gelb, klar	
06.08.2002	4,1	bräunlich-gelb, trüb	Entleerung des GwSp
14.08.2002	7,3	bräunlich-gelb, trüb	
29.08.2002	8,5	bräunlich-gelb, trüb	
23.09.2002	8,6	gelb, trüb	
09.10.2002	9,1	gelb, trüb	ab August keine weitere Ansäuerung des Gelbwasserspeichers
23.10.2002	9,2	gelb, trüb	
06.11.2002	9,3	gelb, trüb	
19.11.2002	9,1	gelb, trüb	
03.12.2002	9,0	gelb, trüb	
07.01.2003	9,0	gelb, trüb	

Tab. 10: Beschaffenheit / pH-Wert der Gelbwasserproben aus dem Gelbwasserspeicher (GwSp)

PN-Datum	Bisulfital	Carbamazepin	Clofibrinsäure	Diclofenac	Fenofibrat	Fenoprofen	Ibuprofen	Indometacin	Paracetamol	Phenacetin	Phenazon
07.11.2001	-	-	2,9	3,4	-	-	1,2	-	-	-	-
18.12.2001	-	-	5,1	6,7	-	-	53	-	-	-	-
07.01.2002	-	1,6	9,1	5,9	-	-	5,2	-	-	-	-
16.01.2002	-	-	-	0,9	-	0,4	5,0	-	-	-	-
30.01.2002	-	-	4,4	0,6	-	-	18	-	-	-	-
13.02.2002	-	-	4,9	53	-	-	15	-	-	-	-
26.02.2002	-	-	-	28	-	-	21	-	-	-	-
20.03.2002	-	-	-	0,6	-	3,8	6,0	-	-	-	-
11.04.2002	-	3,1	-	-	-	-	2,5	-	-	-	-
06.05.2002	-	-	-	43	-	-	1,3	-	-	-	-
22.05.2002	-	-	-	7,5	-	-	195	-	-	-	-
06.06.2002	-	-	-	-	-	-	381	-	-	-	-
19.06.2002	-	-	-	-	-	1,8	5,9	-	-	-	-
04.07.2002	-	4,2	-	-	-	1,8	41	-	-	-	-
09.07.2002	-	4,8	-	-	-	-	1,7	-	-	-	-
19.07.2002	-	-	-	67	-	1,7	2,7	-	-	-	-
30.07.2002	-	-	-	1,2	-	-	720	-	-	-	-

Tab. 11: Ergebnisse der Untersuchungen auf Arzneimittelwirkstoffe im Zulauf des Gelbwasserspeichers (Konzentrationsangaben in µg/L; "-" bedeutet < BG)

angesäuert werden, da sich der pH-Wert durch den Zulauf bzw. durch Bakteriengärung und den dadurch gebildeten Ammoniak ständig erhöhte [15]. Nach der Entleerung des Gelbwasserspeichers Anfang August 2002 fand aus den bereits oben genannten Gründen keine weitere Ansäuerung mehr statt. Die Gelbwasserproben wurden mit dem in Kapitel 4 beschriebenen Analyseverfahren auf Arzneimittelwirkstoffe und Steroide untersucht. Die Stoffe Acetylsalicylsäure, Gemfibrozil und Ketoprofen wurden im Laufe der Untersuchungskampagne aus dem Messprogramm herausgenommen, da sie einerseits nicht gefunden wurden und andererseits auch in den publizierten Abwasseruntersuchungen in der Regel nicht nachgewiesen wurden. Die Ergebnisse zu den Arzneimittelwirkstoffen sind in den Tabellen 11 und 12 dargestellt. Im Zulauf des Gelbwasserspeichers wurden Carbamazepin, Clofibrinsäure und Fenoprofen nur in einigen Proben nachgewiesen, während Diclofenac und Ibuprofen fast während des gesamten Messzeitraumes in höheren Konzentrationen auftraten. Die Ibuprofen-Konzentrationen unterlagen zudem starken Schwankungen. Ende Mai, Anfang Juni und Ende Juni 2002 wurden für Ibuprofen Spitzenwerte von

186 µg/L, 381 µg/L bzw. 720 µg/L gemessen. Diclofenac erreicht im Februar 2002 mit 28 µg/L und 53 µg/L sowie im Juli 2002 mit 67 µg/L seine höchsten Konzentrationen. Bezafibrat, Indometacin, Pentoxifyllin, Phenacetin und Phenazon wurden während des gesamten Untersuchungszeitraumes nicht im Zulauf nachgewiesen.

Im Gelbwasserspeicher traten - wie im Zulauf - Carbamazepin, Clofibrinsäure, Diclofenac, Fenoprofen und Ibuprofen auf. Clofibrinsäure wurde im Gelbwasserspeicher nur bis Dezember 2001 nachgewiesen, während Fenoprofen nur für einen relativ kurzen Zeitraum von ca. 3 Monaten (Januar bis März 2002) gefunden wurde.

Carbamazepin war von September 2001 bis Mitte August 2002 nachzuweisen, die Konzentrationen lagen im Bereich von 0,8 µg/L bis 6,5 µg/L. Nach der Entleerung des Gelbwasserspeichers im August 2002 konnte Carbamazepin nur noch einmal (in der Probe vom 14.08.2002) nachgewiesen werden. Ibuprofen und Diclofenac wurden in nahezu allen Proben des Gelbwasserspeichers gefunden. Die Diclofenac-Konzentrationen waren in der Zeit von Januar bis Juli 2002, mit Ausnahme des Wertes von 34 µg/l am 13.02.2002, relativ konstant. Ab August 2002 bis Januar 2003 stieg die durchschnittliche Konzentration an Diclofenac hingegen erkennbar über den Wert aus der ersten Hälfte des Messzeitraums an. Dies kann auf den erhöhten pH-Wert im Gelbwasserspeicher zurückgeführt werden, der einem Abbau von Diclofenac offensichtlich entgegensteht, wie entsprechende Untersuchungen (siehe Kapitel 5.4) zeigen konnten.

Die Konzentration des Ibuprofens im Gelbwasserspeicher unterlag dagegen starken Schwankungen. Die Auswirkungen durch den Eintrag aus dem Zulauf waren deutlich erkennbar. Es wurden immer dann Höchstkonzentrationen von Ibuprofen im Gelbwasserspeicher gemessen, wenn auch die Konzentrationen im Zulauf Spitzenwerte erreichten. Die im Vergleich zu den anderen vorkommenden Arzneimittelwirkstoffen durchschnittlich um den Faktor 10 höheren Konzentrationen an Ibuprofen waren auf die hohen Einträge aus dem Zulauf und sicherlich auch auf einen nicht stattfindenden Abbau des Ibuprofens zurückzuführen. Bezafibrat, Fenofibrat, Indometacin, Pentoxifyllin, Phenacetin und Phenazon konnten in keiner Probe des Gelbwasserspeichers nachgewiesen werden.

PN-Datum	Bezafibrat	Carbamazepin	Clofibrinsäure	Diclofenac	Fenofibrat	Fenoprofen	Ibuprofen	Indometacin	Pentoxifyllin	Phenacetin	Phenazon
07.09.2001	-	1,6	5,6	6,8	-	-	1,9	-	-	-	-
11.09.2001	-	5,4	6,8	7,1	-	-	3,6	-	-	-	-
07.11.2001	-	-	5,3	2,5	-	-	1,6	-	-	-	-
18.12.2001	-	-	21	6,8	-	-	31	-	-	-	-
07.01.2002	-	6,5	-	4,2	-	0,9	30	-	-	-	-
16.01.2002	-	2,6	-	1,2	-	0,5	26	-	-	-	-
30.01.2002	-	2,2	-	0,8	-	0,4	37	-	-	-	-
13.02.2002	-	1,3	-	34	-	4,8	32	-	-	-	-
26.02.2002	-	1,1	-	1,3	-	4,3	12	-	-	-	-
20.03.2002	-	-	-	0,6	-	2,5	14	-	-	-	-
11.04.2002	-	0,8	-	-	-	-	3,1	-	-	-	-
06.05.2002	-	1,5	-	1,0	-	-	19	-	-	-	-
22.05.2002	-	1,1	-	9,7	-	-	25	-	-	-	-
06.06.2002	-	1,1	-	0,8	-	-	161	-	-	-	-
19.06.2002	-	1,7	-	3,6	-	-	21	-	-	-	-
04.07.2002	-	3,6	-	2,8	-	-	24	-	-	-	-
09.07.2002	-	3,7	-	1,9	-	-	19	-	-	-	-
19.07.2002	-	3,1	-	3,4	-	-	22	-	-	-	-
30.07.2002	-	2,7	-	0,4	-	-	51	-	-	-	-
06.08.2002	-	3,5	-	1,6	-	-	61	-	-	-	-
14.08.2002	-	2,3	-	7,0	-	-	144	-	-	-	-
28.08.2002	-	-	-	2,2	-	-	88	-	-	-	-
23.09.2002	-	-	-	13	-	-	36	-	-	-	-
09.10.2002	-	-	-	3,3	-	-	55	-	-	-	-
23.10.2002	-	-	-	2,3	-	-	24	-	-	-	-
06.11.2002	-	-	-	3,8	-	-	57	-	-	-	-
19.11.2002	-	-	-	3,1	-	-	35	-	-	-	-
03.12.2002	-	-	-	3,6	-	-	47	-	-	-	-
07.01.2003	-	-	-	2,9	-	-	25	-	-	-	-

Tab. 12: Ergebnisse der Untersuchungen auf Arzneimittelwirkstoffe im Gelbwasser aus dem Gelbwasserspeicher. (Konzentrationsangaben in µg/L; "-" bedeutet < BG)

Die Gruppe der untersuchten Steroide umfasste natürliche Östrogene (Estradiol, Estriol, Estron), synthetische Steroide (z.B. die als Kontrazeptiva eingesetzten Stoffe  $17\alpha$ -Ethinylestradiol und Mestranol) sowie das Phytoöstrogen  $\beta$ -Sitosterol. Die aufgeführten natürlichen Östrogene werden in den weiblichen Ovarien und der Plazenta, sowie in geringen Mengen in den Nebennieren gebildet. Sie werden zum Teil unverändert, aber auch metabolisiert vom Körper ausgeschieden.

Die von Pflanzen gebildeten Phytoöstrogene gehören ebenfalls zu den natürlichen Steroiden. Ein typischer Vertreter ist das  $\beta$ -Sitosterol, das z.B. in Hopfen und Mais vorkommt. In der Medizin wird es mitunter auch als Arzneimittelwirkstoff zur Senkung des Lipidspiegels verordnet. Zu den synthetischen Steroiden gehören die im medizinischen Bereich eingesetzten Kontrazeptiva wie  $17\alpha$ -Ethinylestradiol und Mestranol [5, 14]. Die endokrine Wirksamkeit synthetischer Steroide ist erheblich größer als die der natürlichen Östrogene. Bereits eine Konzentration von 0,3 ng/L an  $17\alpha$ -Ethinylestradiol löst bei Regenbogenforellen eine endokrine Wirkung aus [14].

In den Tabellen 13 und 14 sind die Ergebnisse der Untersuchungen des Gelbwasserspeichers und dessen Zulauf auf Steroide zusammengestellt.

Die Untersuchungen zeigten, dass die natürlichen Steroide Estron und  $\beta$ -Sitosterol sowohl im Zulauf des Gelbwasserspeichers als auch im Gelbwasserspeicher nachgewiesen wurden. Weil der Gehalt des Estrons im weiblichen Urin stark vom Zyklus und Alter der Frau abhängt, werden auch recht unterschiedliche Mengen vom Körper ausgeschieden. Die starken Konzentrationsschwankungen an Estron im Zulauf des Gelbwasserspeichers sind somit erklärbar. Ähnlich verhält es sich auch mit  $\beta$ -Sitosterol. Es ist ein in Pflanzen vorkommendes Steroid, das

PN-Datum	Estradiol	Estriol	Estron	$17\alpha$ -Ethinylestradiol	Mestranol	$\beta$ -Sitosterol
07.11.2001	-	-	-	-	-	-
18.12.2001	-	-	-	-	-	358
07.01.2002	-	-	-	-	-	107
16.01.2002	-	-	32	-	-	87
30.01.2002	-	-	-	-	-	410
13.02.2002	-	-	11	-	-	345
26.02.2002	-	-	-	-	-	310
20.03.2002	-	-	-	-	-	100
11.04.2002	-	-	-	-	-	82
08.05.2002	-	-	259	-	-	19
22.05.2002	-	-	-	-	-	24
06.06.2002	-	-	-	-	-	5
19.06.2002	-	-	-	-	-	17
04.07.2002	-	-	-	-	-	57
09.07.2002	-	-	-	-	-	32
19.07.2002	-	-	94	-	-	15
30.07.2002	-	-	10	-	-	26

Tab. 13: Ergebnisse der Untersuchungen auf Steroide im Zulauf des Gelbwasserspeichers.

(Konzentrationsangaben in  $\mu\text{g/L}$ ; "-" bedeutet < BG)

in unterschiedlichen Mengen mit der Nahrung vom Menschen aufgenommen wird, so dass auch die Konzentration des  $\beta$ -Sitosterols im Urin jeweils sehr unterschiedlich sein kann und die stark schwankenden Konzentrationen im Zulauf erklären.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Gelbwasserspeichers unterlagen naturgemäß nicht diesen Schwankungen. Estron wurde während des gesamten Untersuchungszeitraumes im Mittel mit etwa 50  $\mu\text{g/L}$  nachgewiesen, wenngleich auch hier einzelne Konzentrationen vom Mittelwert deutlich abwichen. Hohe Einträge aus dem Zulauf und eine nicht optimale Durchmischung des Gelbwasserspeichers

sind hierfür - wie auch bei  $\beta$ -Sitosterol und einigen Arzneimittelwirkstoffen zu beobachten ist - vermutlich verantwortlich. Nach der Entleerung des Gelbwasserspeichers wurde kein  $\beta$ -Sitosterol mehr gemessen. Da zeitgleich die Ansäuerung eingestellt wurde, kann vermutet werden, dass der ansteigende pH-Wert auf Werte von 8 bis 9 den ohnehin zu beobachtenden Abbau beschleunigt.

### 5.3 Ergebnisse der Untersuchungen des Zu- und Ablaufs der Pflanzenkläranlage

Der Zu- und Ablauf der Pflanzenkläranlage wurde ebenfalls auf Arzneimittelwirkstoffe und Steroide untersucht. Die Beprobung erfolgte durch Mitarbeiter des Wupperverbandes. Im März 2002 wurde eine Stichprobe gezogen, während in den Monaten Mai, Juli, Oktober und Dezember 2002 sowie im Januar 2003 jeweils eine wöchentliche Mischprobe untersucht wurde. Die Proben wurden unmittelbar nach Ankunft im Labor aufgearbeitet bzw. bis zum nächsten Tag bei 4 - 8 °C im Kühlschrank gelagert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Tabellen 15 und 16 dargestellt.

Von den Arzneimittelwirkstoffen wurden die Stoffe Carbamazepin, Diclofenac und Ibuprofen nachgewiesen, die auch im Gelbwasserspeicher gefunden wurden. Phenazon trat lediglich einmal (Juli 2002) im Zu- und Ablauf der Kläranlage auf. Das Auftreten der Arzneimittelwirkstoffe kann mehrere Gründe haben. Einerseits werden diese Stoffe nicht allein über den Urin ausgeschieden, sondern auch über die Fäkalien, andererseits können die Einträge auch durch eine nicht vollständige Abtrennung in den Separationstoiletten erklärt werden.

Hinzu kommt, dass sich innerhalb der Lambertsmühle noch eine konventionelle Toilette im Betrieb befindet. Über das Abbauverhalten der untersuchten Stoffe in der Pflanzenkläranlage kann auf der Basis der vorliegenden Ergebnisse keine abschließende Bewertung abgegeben werden, wengleich ein

PN-Datum	Estradiol	Estriol	Estron	17 $\alpha$ -Ethinylestradiol	Mestranol	$\beta$ -Sitosterol
07.09.2001	-	-	48	-	-	-
11.09.2001	-	-	106	-	-	66
07.11.2001	-	-	-	-	-	-
18.12.2001	-	-	15	-	-	50
07.01.2002	-	-	22	-	-	89
16.01.2002	-	-	93	-	-	40
30.01.2002	-	-	91	-	-	92
13.02.2002	-	-	47	-	-	63
26.02.2002	-	-	56	-	-	27
20.03.2002	-	-	47	-	-	26
11.04.2002	-	-	31	-	-	29
06.05.2002	-	-	71	-	-	23
22.05.2002	-	-	59	-	-	8
08.06.2002	-	-	75	-	-	8
19.06.2002	-	-	45	-	-	13
04.07.2002	-	-	43	-	-	-
09.07.2002	-	-	48	-	-	-
19.07.2002	-	-	68	-	-	-
30.07.2002	-	-	19	-	-	-
08.08.2002	-	-	40	-	-	-
14.08.2002	-	-	88	-	-	-
29.08.2002	-	-	56	-	-	-
23.09.2002	-	-	-	-	-	-
09.10.2002	-	-	64	-	-	-
23.10.2002	-	-	29	-	-	-
08.11.2002	-	-	43	-	-	-
19.11.2002	-	-	58	-	-	-
03.12.2002	-	-	60	-	-	-
07.01.2003	-	-	23	-	-	-

Tab. 14: Ergebnisse der Untersuchungen auf Steroide im Gelbwasser aus dem Gelbwasserspeicher.

(Konzentrationsangaben in  $\mu\text{g/L}$ ; "-" bedeutet < BG

PN-Datum	PN-Stelle	Benzoflural	Carbamazepin	Clonidine	Diclofenac	Fenoflural	Fenpropfen	Ibuprofen	Indometacin	Paracetamol	Phenacetin	Phenazon
März 2002 (Stichprobe)	Zulauf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ablauf	-	0,06	-	-	-	-	0,03	-	-	-	-
Mai 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	-	-	-	-	0,90	-	-	-	-
	Ablauf	-	0,03	0,06	-	-	-	0,09	-	-	-	-
Juli 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	3,50	-	-	-	-	0,15	-	-	-	0,20
	Ablauf	-	2,00	-	-	-	-	0,04	-	-	-	0,20
Oktober 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ablauf	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dezember 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	-	0,24	-	-	-	-	-	-	-
	Ablauf	-	-	-	0,80	-	-	-	-	-	-	-
Januar 2003 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	-	-	-	-	0,15	-	-	-	-
	Ablauf	-	-	-	-	-	-	0,08	-	-	-	-

Tab. 15: Ergebnisse der Untersuchungen des Zu- und Ablaufs der Pflanzenkläranlage auf Arzneimittelwirkstoffe. Die Bestimmungsgrenze (BG) beträgt im Zulauf 0,1 µg/L und im Ablauf 0,02 µg/L. (Konzentrationsangaben in µg/L; "-" bedeutet < BG)

PN-Datum	PN-Stelle	Estradiol	Estrin	Estron	17 $\alpha$ -Ethinylestradiol	Mestranol	$\beta$ -Sitosterol
März 2002 (Stichprobe)	Zulauf	-	-	2,90	-	-	5,7
	Ablauf	-	-	-	-	-	3,4
Mai 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	9,60	-	-	4,9
	Ablauf	-	-	-	-	-	1,0
Juli 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	1,60	-	-	4,2
	Ablauf	-	-	0,07	-	-	1,4
Oktober 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	0,50	-	-	48
	Ablauf	-	-	-	-	-	10
Dezember 2002 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	2,60	-	-	91
	Ablauf	-	-	-	-	-	74
Januar 2003 (Mischprobe)	Zulauf	-	-	3,00	-	-	33
	Ablauf	-	-	-	-	-	6,1

Tab. 16: Ergebnisse der Untersuchungen des Zu- und Ablaufs der Pflanzenkläranlage auf Steroide. Die Bestimmungsgrenze (BG) beträgt im Zulauf 0,1 µg/L und im Ablauf 0,02 µg/L. (Konzentrationsangaben in µg/L; "-" bedeutet < BG)

Trend zu niedrigeren Konzentrationen im Ablauf zu erkennen ist. Von den untersuchten Steroiden ließen sich im Zulauf der Kläranlage Estron und  $\beta$ -Sitosterol nachweisen. Die Estron-Konzentrationen lagen mit Werten zwischen 1,6 und etwa 10 µg/L deutlich unter denen des Gelbwasserspeichers.

Im Ablauf konnte Estron jedoch nur einmal in niedriger Konzentration (0,07 µg/L) nachgewiesen werden. Estron wird also nahezu vollständig in der Pflanzenkläranlage eliminiert.

Ein Vergleich der gemessenen Konzentrationen an  $\beta$ -Sitosterol des Zu- und Ablaufs lässt erwartungsgemäß auch hier eine hohe Eliminationsrate (zum Teil 80 %) erkennen. Diese Ergebnisse stimmen mit Beobachtungen überein, die in kommunalen Kläranlagen gemacht wurden [3]. Auffällig ist ein Anstieg der Konzentration von  $\beta$ -Sitosterol ab Oktober 2002 im Zulauf der Pflanzenkläranlage.

Eine Erklärung hierfür könnte in dem zeitgleich (Ende September) durchgeführten Austausch des alten mit Stützmaterial beschickten Rottesacks gegen einen neuen Rottesack ohne Stützmaterial liegen. Da  $\beta$ -Sitosterol zur Adsorption neigt, konnte es vermutlich durch das organische Stützmaterial zurückgehalten werden.



### 5.4 Batchversuche zum Abbau von pharmazeutischen Wirkstoffen

Im IWW wurden zusätzlich Untersuchungen zum Abbauverhalten von Arzneimittelwirkstoffen in Abhängigkeit vom pH-Wert durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden Urinproben mit Arzneimittelwirkstoffen dotiert und anschließend auf unterschiedliche pH-Werte (2, 7 und 9) eingestellt.

Die erste Probenserie wurde unmittelbar nach dem Ansetzen aufgearbeitet und vermessen, während die übrigen Proben bei 4 - 8 °C im Kühlschrank gelagert wurden. Nach einer Lagerdauer von 3 bzw. 6 Monaten wurde die zweite bzw. die dritte Probenserie aufgearbeitet und analysiert.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Abbildungen 7, 8 und 9 dargestellt. In den Abbildungen sind nur die Abbaukurven der Arzneimittelwirkstoffe eingezeichnet, bei denen ein Abbau stattfand.

In den Urinproben, die auf pH 2 eingestellt waren, konnte bei 9 der untersuchten Arzneimittelwirkstoffe ein Abbau festgestellt werden. Indometacin wurde zu 30 % abgebaut, während Carbamazepin, Pentoxifyllin, Phenazon, Fenofibrat und Phenacetin zwischen 45 und 70 % abgebaut wurden. Die Abbauraten für Diclofenac und Ketoprofen lag sogar bei bis zu 90 %.

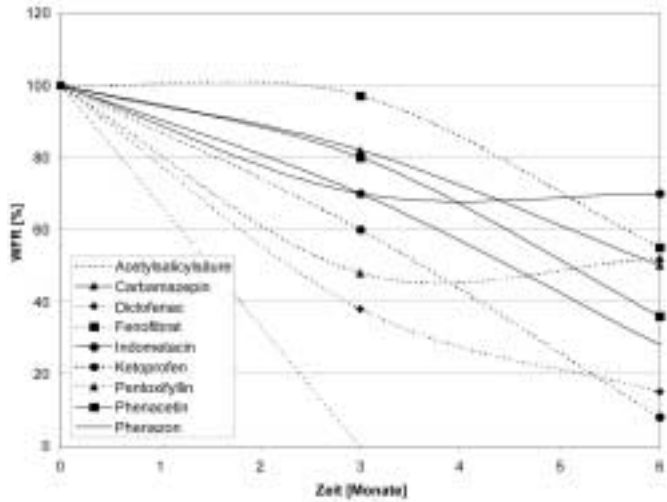


Abb. 7: Abbauverhalten ausgewählter Arzneimittelwirkstoffe im Urin bei pH 2

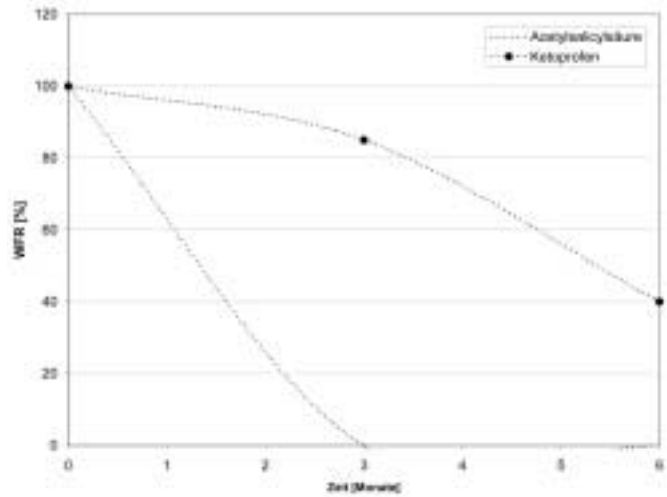


Abb. 8: Abbauverhalten ausgewählter Arzneimittel im Urin bei pH 7

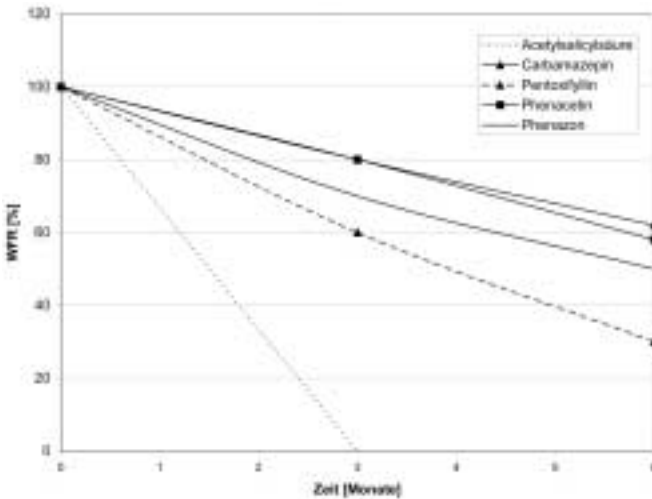


Abb. 9: Abbauverhalten ausgewählter Arzneimittel im Urin bei pH 9

Acetylsalicylsäure war erwartungsgemäß bereits bei der ersten Messung vollständig eliminiert.

Ein neutraler pH-Wert (pH 7) führte hingegen nur zu einem Abbau von Ketoprofen (60 %) und Acetylsalicylsäure. Auch hier war die Acetylsalicylsäure bereits nach drei Monaten vollständig eliminiert. Bei einem pH-Wert von 9 wurden fünf der untersuchten Arzneimittelwirkstoffe abgebaut. Pentoxifyllin und Phenazon wurden bis zu 70 % eliminiert. Ein Abbauverhalten ließ sich jedoch auch bei Carbamazepin (40 %) sowie Phenacetin (60 %) beobachten. Die Acetylsalicylsäure wurde auch hier rasch abgebaut.

## 5.5 Zusammenfassende Bewertung

Im Rahmen des Projekts wurden für 14 Arzneimittelwirkstoffe und Metaboliten sowie für 7 Steroide mehrere Analysenverfahren auf der Basis der GC/MS und HPLC/MS entwickelt, die eine empfindliche Bestimmung dieser Stoffe in der schwierigen Matrix Urin bzw. Abwasser ermöglichten. Die Ergebnisse der regelmäßig an verschiedenen Entnahmestellen durchgeführten Abwasseruntersuchungen zeigten, dass sowohl Antirheumatika wie Ibuprofen, Diclofenac und Fenoprofen als auch das Antiepileptikum Carbamazepin relativ häufig nachgewiesen werden konnten. Die gefundenen Konzentrationen im Gelbwasserspeicher lagen aber deutlich unter den in einer repräsentativen Urin-Mischprobe zu erwartenden Werten.

Mit der geplanten Inbetriebnahme der Lambertsmühle als Museum können mit ansteigenden Besucherzahlen repräsentativere Ergebnisse erwartet werden. Aus der Gruppe der Steroide wurden lediglich Estron und  $\beta$ -Sitosterol gefunden. In beiden Fällen handelt es sich um Stoffe natürlichen Ursprungs. Wie aus den Ergebnissen der Untersuchungen des Zu- und Ablaufs der Pflanzenkläranlage ersehen werden kann, lassen sich diese Stoffe jedoch relativ gut biologisch abbauen.

Die endokrin wirksamen synthetischen Steroide  $17\alpha$ -Ethinylestradiol und Mestranol konnten in keiner der untersuchten Proben nachgewiesen werden.

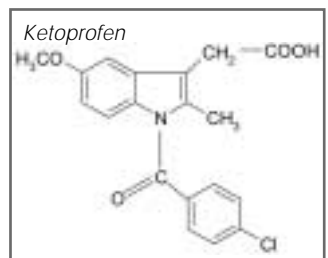
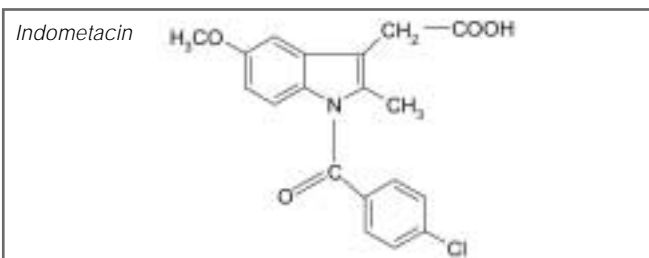
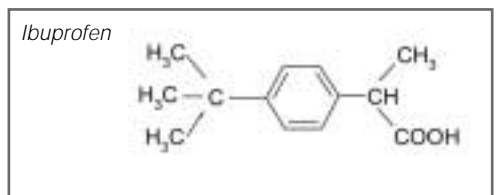
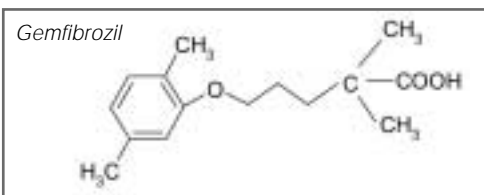
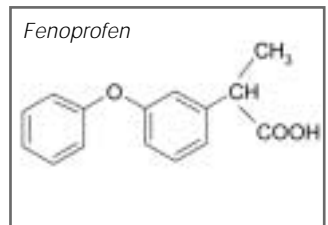
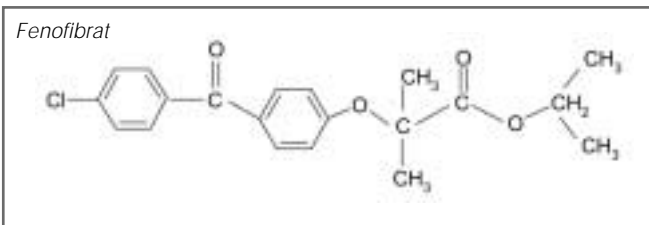
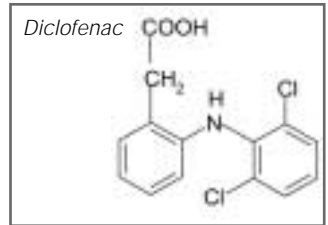
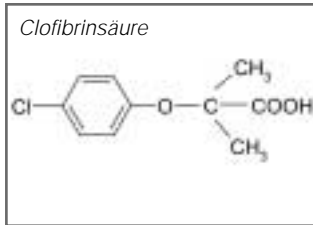
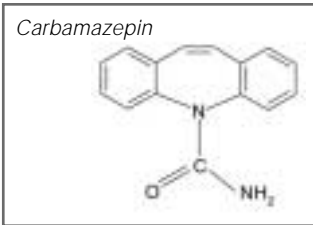
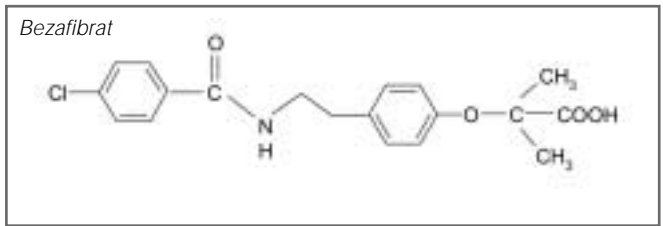
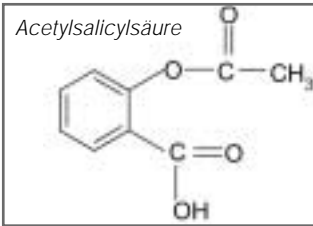
Batch-Lagerversuche mit Urin haben ein unterschiedliches Abbauverhalten einzelner Arzneimittelwirkstoffe in Abhängigkeit vom pH-Wert gezeigt. Tendenziell zeigen einige der Stoffe im sauren Milieu ein besseres Abbauverhalten als bei neutralen oder basischen pH-Werten, so dass sich ggf. eine Zwischenlagerung des Gelbwassers bei niedrigem pH-Wert empfiehlt.

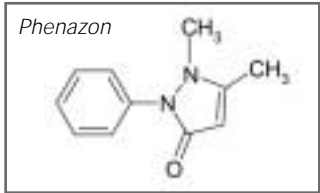
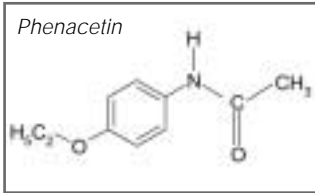
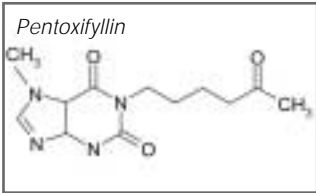
## 6 Literatur

- [1] Heberer, T. u. Stan, H.-J.: Arzneimittel im aquatischen System. Wasser & Boden 50 (4), 20-25 (1998).
- [2] Stumpf, M., Ternes, Th. A., Haberer, K., Seel, P. u. Baumann, W.: Nachweis von Arzneimitteln in Kläranlagen und Fließgewässern. Vom Wasser 86, 291-303 (1996).
- [3] Stumpf, M., Ternes, Th. A., Haberer, K. u. Baumann, W.: Nachweis von natürlichen und synthetischen Östrogenen in Kläranlagen und Fließgewässern. Vom Wasser 87, 251-261 (1996).
- [4] Adler, P., Steger-Hartmann, T. u. Kalbfus, W.: Vorkommen natürlicher und synthetischer Steroide in Wässern des süd- und mitteldeutschen Raumes. Acta hydrochim. Hydrobiol. 29 (4), 227-241 (2001).
- [5] Spengler, P., Körner, W. u. Metzger, J. W.: Schwer abbaubare Substanzen mit östrogenhaltiger Wirkung im Abwasser von kommunalen und industriellen Kläranlagenabläufen. Vom Wasser, 93, 141-157 (1999).
- [6] Reupert, R. u. Plöger, E.: Bestimmung von stickstoffhaltigen Pestiziden durch Hochleistungsflüssigkeits-Chromatographie mit Diodenarray-Detektion. Fresenius J. Anal. Chem. 331, 503-509 (1988).
- [7] Janssen, A., Keuter, M., Treder, W., Ritzkopf, A. u. Meyer zu alten Schildesche, D.: Chromatographische Pestizidbestimmung entsprechend der Trinkwasserverordnung / Teil I: Anreicherung mittels Festphasenextraktion. GIT Fachz. Lab. 5, 417-424 (1995).
- [8] Bartels, P., Eberling, E., Krämer, B., Kruse, H., Osius, N., Vowinkel, K., Wassermann, O., Witten, J. u. Zorn, C.: Determination of chlorophenols in urine of children and suggestion of reference values. Fresenius J. Anal. Chem. 365, 458-464 (1999).
- [9] Howard, S. F. u. Yip, G.: Diazomethane Methylation of a Mixture of Chlorophenoxy Acids and Dinitrophenols. J. Assoc. Off. Anal. Chem 54, 970-974 (1971).
- [10] Färber, H., Peldszus, S. u. Schöler, H. F.: Gaschromatographische Bestimmung von aciden Pestiziden in Wasser nach Methylierung mit Trimethylsulfoniumhydroxid. Vom Wasser 76, 13-20 (1991).
- [11] Cardenas, S., Gallego, M. u. Valcarcel, M.: Rapid solid-phase extraction/derivatization system for sample preparation and gas chromatographic mass spectrometric determination of drugs in human urine. Rapid Commun. Mass Spectrom. 11, 298-306 (1997).
- [12] Stan, H.-J.: Analysis of Pesticides in Ground and Surface Water II. Chemistry of Plant Protection, Band 12, Springer Verlag (1995).
- [13] Rote Liste 2002. Arzneimittelverzeichnis des BPI, VFA, BAH u. VAP. Editio Cantor Verlag für Medizin und Naturwissenschaften GmbH, Aulendorf (2002).
- [14] Helmreich, B.: Endokrin wirksame Stoffe in aquatischen Systemen. Wasser und Boden, 53 (1), 4-9 (2001).
- [15] Pschyrembel, W.: Klinisches Wörterbuch. Walter de Gruyter, Berlin, New York. 257. Auflage (1994).

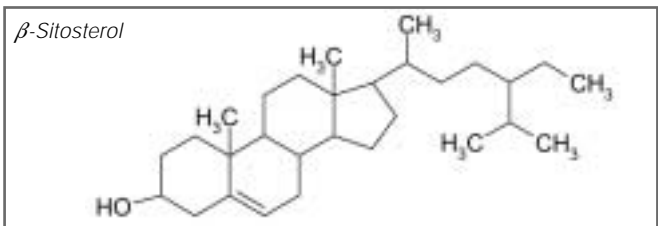
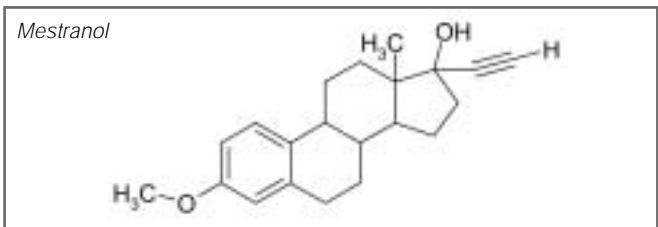
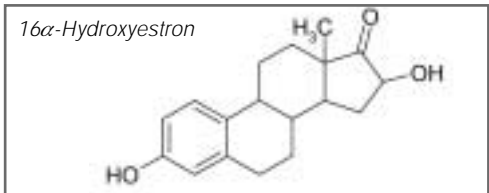
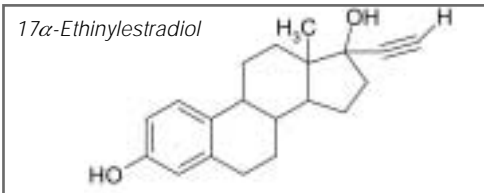
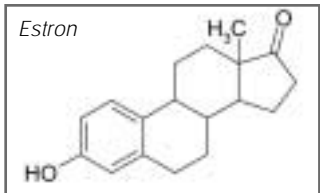
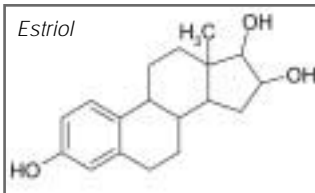
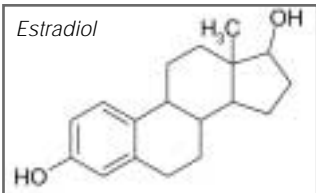
# 7 Anhang

## 7.1 Strukturformeln der Arzneimittel





## 7.2 Strukturformeln der Steroide



# Stoffbilanzen, Betriebsbeurteilungen, Akzeptanz

Jutta Niederste-Hollenberg<sup>1)</sup>, Dr. Martin Oldenburg<sup>2)</sup>, Prof. Dr. Ralf Otterpohl<sup>1)</sup>,

<sup>1)</sup> TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich für kommunale und industrielle Abwasserwirtschaft  
Eißendorfer Straße 42, 21073 Hamburg, Tel 040/42878-2416, hollenberg@tuhh.de

<sup>2)</sup> OtterWasser GmbH, Lübeck

## 1 Einleitung

Die Entwicklung von Abwasserkonzepten in Richtung einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft beruht auf der getrennten Erfassung und Nutzung der qualitativ und quantitativ unterschiedlichen Abwasserteilströme. Eine separate Erfassung des Grauwassers aus Küche, Bad und Waschmaschine und dessen getrennte Behandlung und Aufbereitung zur Nutzung als Brauchwasser, ist inzwischen durchaus verbreitet. Eine Trennung des nährstoffhaltigen Urins von den Fäkalien mit einer getrennten Behandlung vor dem Hintergrund einer Nutzung der im Urin enthaltenen Nährstoffe befindet sich erst seit einigen Jahren in praktischer Anwendung. Insbesondere in Skandinavien gibt es schon einige Erfahrungen mit der getrennten Erfassung und Nutzung von Urin. Im deutschsprachigen Raum gibt es erste Erfahrungen mit der getrennten Erfassung von Abwasserteilströmen und der Nährstoffnutzung aus Urin, wobei einige Projekte in einem größeren Maßstab in Planung sind. Das Abwasserprojekt der Lambertsmühle wurde durch ein umfangreiches Forschungsprojekt begleitet.

Das Prinzip der Abwasseranlage der Lambertsmühle besteht in der Erfassung der einzelnen Teilströme Gelbwasser (Urin), Braunwasser (Fäzes) und Grauwasser aus Küche und Bad. Dabei ist ein wesentlicher Punkt, dass das Gelbwasser mit seinem Hauptteil an Nährstoffen separat gesammelt und damit dem Wasserteil entzogen wird. Auf diese Weise ist die biologische Reinigung des restlichen Abwassers einfacher und der Austrag an Nährstofffrachten in das Gewässer erheblich verringert. Wertvolle Nährstoffe werden aus dem Abwasser zurückgewonnen und dem Nährstoffkreislauf zugeführt.

## 2 Fragestellungen und Ziele der Untersuchungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden im Hinblick auf die Reinigung der Ströme Grau- und Braunwasser die folgenden Aspekte untersucht:

- Erfahrungen mit sortierenden Toiletten unter Praxisbedingungen
- Grad der Trennung von Nährstoff- und Wasserkreislauf
- Nährstoffgehalt / -aufteilung auf die Teilströme
- Stoffbilanzierung unter Praxisbedingungen
- Teilstrombehandlung (Reinigungsleistungen, Betriebsbeurteilungen etc.) unter Praxisbedingungen

An der gesamten Abwasseranlage wurden 7 Intensivmessphasen von jeweils einer Woche durchgeführt, in denen täglich eine 24-Std.-Mischprobe gezogen wurde. Auf diese Weise wurden von September 2001 bis Januar 2003, in verschiedenen Jahreszeiten und unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen, Messphasen an den Teilströmen Grauwasser und Braunwasser vorgenommen. Weiterhin wurde der sich daraus ergebende Zufluss zum bewachsenen Bodenfilter sowie der Ablauf des Bodenfilters beprobt und untersucht.

Parallel zu allen Untersuchungen wurden die Mengen der einzelnen Teilströme erfasst. Diese vier unterschiedlichen Probenahmestellen sowie die Wassermengenerfassung der Teilströme ermöglichen sowohl eine qualitative Beurteilung der Ströme als auch eine Frachtenbilanzierung der verschiedenen untersuchten Stoffe in den Teilströmen. Hier sind vor allen Dingen verschiedene Nährstoffparameter, organische Stoffe und Schwermetallgehalte zu nennen. Insgesamt wurden an jeder Probe jeweils 16 Parameter untersucht, die Aufschluss über die Zusammensetzung der Teilströme und Umsetzungs- und Reinigungsprozesse in den verschiedenen Anlageteilen (Rotte, bewachsener Bodenfilter) geben.

Neben den genannten Untersuchungen an der Abwasseranlage wurde der Gelbwasserspeicher stichprobenartig über die gesamte Projektlaufzeit beprobt. Dabei ging es in erster Linie darum, die Gehalte an Nährstoffen, Schwermetallen und Spurenelementen festzustellen, sowie die Frachtbilanzierungen zu komplettieren.

Zur Ermittlung der Akzeptanz der Separationstoiletten wurde bei den Nutzern eine Fragebogenaktion durchgeführt, die auch nach Abschluss des Projektes weitergeführt werden sollte, um gegebenenfalls zu repräsentativen Aussagen zu kommen. Während der Projektlaufzeit war die Teilnahme an der Fragebogenaktion eher gering.

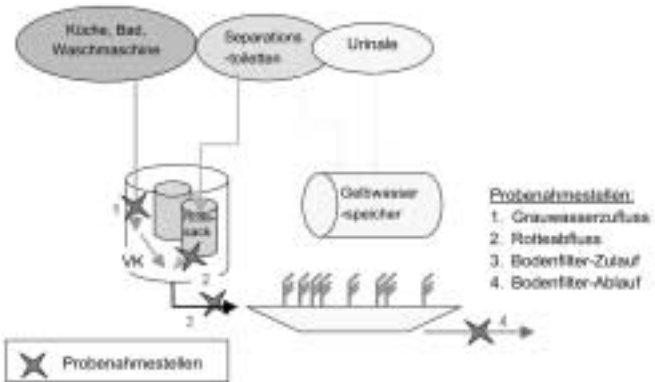
### 3 Das System

Die Lamberts-mühle ist Museum, Veranstaltungsort für Seminare und Feiern, aber auch Wohngebäude. Die Einliegerwohnung wird von einer Familie mit zwei Kindern bewohnt. Beim Umbau und der Installation des neuen Abwassersystems stellte sich heraus, dass eine der beiden Toiletten in dieser Wohnung aus baulichen Gründen nicht gegen eine Separationstoilette ausgetauscht werden konnte. Die Toilette ist wie das Braunwasser aus den drei Separationstoiletten an den Rottebehälter angeschlossen. Damit ist eine vollständige Abtrennung des Gelbwassers vom restlichen Abwasser nicht gewährleistet. Ein nicht genau zu quantifizierender Anteil an Urin aus der konventionellen Toilette durchläuft den Rottebehälter, trägt hier zu eine Erhöhung der Nährstoffkonzentrationen bei und fehlt auf der anderen Seite im Gelbwasserspeicher. Die Ermittlung der Nährstoffgehalte und ihrer Aufteilung auf die Teilströme, die Ermittlung des möglichen Grades der Trennung von Nährstoff- und Wasserkreislauf unter Praxisbedingungen ist somit nicht übertragbar, sondern sehr spezifisch für die Lamberts-mühle.

Das Gelbwasser wird mittels Separationstoiletten und Urinalen erfasst und als Dünger in der Landwirtschaft verwendet. Das restliche Toilettenabwasser (Braunwasser), bestehend aus Fäkalien und Spülwasser, wird über eine Feststoffabtrennung in einem Rottesack geleitet und

gemeinsam mit dem Grauwasser (Abwasser aus Küche, Bad, etc.) in einem bewachsenen Bodenfilter gereinigt. Im Verlauf des Projektes wurden sieben Intensivmesswochen an der Anlage durchgeführt.

In diesen Messwochen wurden an vier Stellen automatische Probennehmer zur Entnahme von 24h-Mischproben aufgestellt.



Für eine Abschätzung der Frachten und der Aufteilung der Nährstoffe auf die Teilströme war außerdem eine Volumenmessung erforderlich. Dazu wurden die folgenden Volumenströme gemessen:

- Zulauf Grauwasser über einen Kippzähler
- Zulauf zum bewachsenen Bodenfilter über die Betriebsstunden der Pumpe
- Trinkwasserverbrauch im Haus über die Wasserzähler
- Gelbwasserzulauf über die Füllstandsänderungen im Gelbwasserspeicher

Das Volumen des Braunwasserfiltrats als Rottesackablauf wurde rechnerisch aus der Differenz von Bodenfilter-Zulauf und Grauwasser-Zulauf ermittelt.

## 4 Material und Methoden

Die verschiedenen Proben wurden abhängig von ihrem Standort auf unterschiedliche Parameter hin untersucht. Die Analysegeräte und -methoden sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

## 5 Reinigungsleistung des bewachsenen Bodenfilters

Die derzeitige Bemessungsgrundlage für bewachsene Bodenfilter ist das Arbeitsblatt der ATV A 262. Für einen Vertikalfilter sind hier 2,5 m<sup>2</sup>/EW vorgesehen, unter der Prämisse, dass das gesamte Abwasser über den Filter perkoliert und gereinigt wird.

Im Fall der Lambertsmühle wird durch die Gelbwasserseparation ein erheblicher Teil der Nährstoffe (für den Bodenfilter sind hier vor allem Stickstoff und Phosphor zu nennen) vom Abwasser getrennt und gelangt so erst gar nicht zum Bodenfilter. Damit ist eine geringere spezifische Fläche zu rechtfertigen.

Der bewachsene Bodenfilter der Lambertsmühle hat eine Fläche von 16 m<sup>2</sup>, wobei zugrundegelegt wurde, dass im Mittel täglich 8 Einwohner die Kapazität der Anlage nutzen. Damit sind pro Einwohner 2 m<sup>2</sup> vorgesehen, eine Fläche, die sich bei einer stärkeren Nutzung der Mühle als Museum spezifisch verringert. Bei der Bemessung musste berücksichtigt werden, dass es große Schwankungen in der Benutzung der Abwasseranlage gibt, so dass eine wesentlich größere Bemessung zu Lasten der Reinigungsleistung ginge.

Für die Bewertung der Reinigungsleistung des Bodenfilters werden hier die Messergebnisse aus den 7 Messwochen am Zu- und Ablauf Bodenfilter herangezogen.

### 5.1 Organische Schutzstoffe

Als Überwachungswerte gelten für den Bodenfilter der Lambertsmühle lediglich organische Parameter, die für CSB bei einer maximal zulässigen Konzentration von 150 mg/l und für BSB5 bei 40 mg/l im Ablauf liegen.

Parameter	Gerät/Methode
LF	Luftfähigkeit
CSB <sub>5</sub>	chemischer Sauerstoffbedarf (homogenisierte Probe)
TOC	Total Organic Carbon
TN	Gesamt-Stickstoff
NH <sub>4</sub> -N	Ammonium-Stickstoff
NO <sub>3</sub> -N	Nitrat-Stickstoff
NO <sub>2</sub> -N	Nitrit-Stickstoff
P <sub>ges</sub>	Gesamt-Phosphor
PO <sub>4</sub> -P	Ortho-Phosphat
K	
Mg	
Cu	
Zn	
Pb	
Ca	
Si	

LF-Messgerät WTW  
LCK 114 Klärschlamm-Test von Dr. Lange, angelehnt an die DIN-Methode; Photometer ISIS 9000  
TOC/TN Autoanalyser Analytik Jena AG  
Gerätetyp: multi N/C 3000  
Differenzmethode → TOC=TC-TIC  
TOC/TN Autoanalyser Analytik Jena AG  
Gerätetyp: multi N/C 3000  
Autoanalyser von Technicon:  
Kontinuierliche Durchflussanalyse (CFA)  
angelehnt an die DIN-Methode, Reaktion wie bei Dr. Lange (Phosphor molybdätsäure)  
LCK 350 Klärschlamm-Test von Dr. Lange; Photometer ISIS 9000  
Die Proben wurden homogenisiert und mit HNO<sub>3</sub> versetzt. In einem offenen System nach Knapp aufgeschlossen. Es wurden jeweils 2 Teilproben angefertigt und die Ergebnisse gemittelt  
Instrumentation: PE-Elan 6000 ICP-MS  
PE-Optima 2000 DV CE5 mit ICP

Tab. 4-1: Geräte und Methoden der durchgeführten Analysen



In Abbildung 5-1 sind die Zu- und Ablaufkonzentrationen für den CSB im Bodenfilter dargestellt. Gemessen wurde der homogenisierte CSB.

Die mittlere Ablaufkonzentration über die gesamten Messwochen liegt bei 40,14 mg/l, der maximale Wochenmittelwert der Ablaufkonzentration wurde mit 51,64 mg/l im Januar 2002 gemessen.

Der Überwachungswert für den CSB wird in jedem Fall deutlich unterschritten.

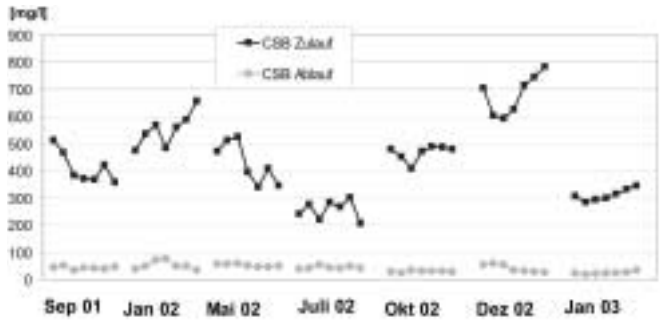


Abb. 5-1: Zu- und Ablaufkonzentrationen für den CSB<sub>hom</sub> im Bewachsenen Bodenfilter der Lambertsmühle über die Messwochen im Untersuchungszeitraum

## 5.2 Stickstoff und Phosphat

Bei dem bewachsenen Bodenfilter handelt sich um einen schwallbeschiekten Vertikalfilter, in dem es aufgrund der aeroben Verhältnisse nicht zu einer kontrollierten Denitrifikation kommt. Der Abbau von Stickstoff erfolgt über die Hydrolyse des eingetragenen organischen Stickstoffs zu Ammonium und eine Nitrifikation zu Nitrat. Für die Beurteilung der Stickstoffabbauleistung wurden die Parameter TN (Gesamtstickstoff) und NH<sub>4</sub>-N (Ammoniumstickstoff) herangezogen.

Phosphatelimination in einem bewachsenen Bodenfilter ist in erster Linie ein physikalischer Prozess und abhängig vom Rückhalt im Filter und z.B. von der zur Verfügung stehenden Zahl von Kationen-Austauscherplätzen im Filtermaterial. Das Filtermaterial wurde nicht unter diesem Gesichtspunkt ausgewählt, auch weil durch die vorangehende Urinseparation bereits ein erheblicher Teil des Phosphats entfernt wird.

Die Ablaufkonzentration für Gesamtstickstoff liegt im Mittel über die gesamten Messwochen bei 5,3 mg/l, dabei wird im September 2001 der maximale Wochenmittelwert von 8,8 mg/l gemessen.

Die Ablaufkonzentration für den Gesamtphosphor liegt im Mittel über die gesamten Messwochen bei 3,2 mg/l, der maximale Wochenmittelwert von 4,9 mg/l wird im Dezember 2002 gemessen.

Die mittlere Ablaufkonzentration für Stickstoff liegt damit deutlich unter dem für kleine Kläranlagen vorgeschriebenen Wert von 10 mg/l. Für Kleinkläranlagen werden keine Ablaufwerte für Nährstoffe vorgegeben.

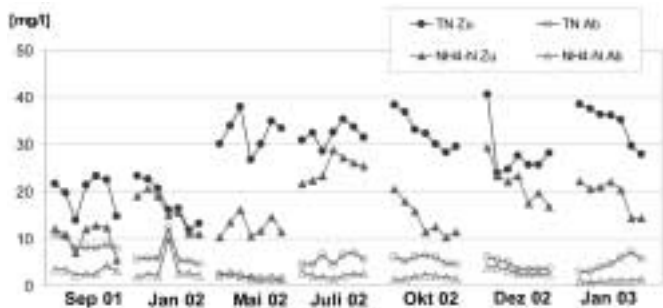


Abb. 5-2: Zu- und Ablaufkonzentrationen für den TN und NH<sub>4</sub>-N im bewachsenen Bodenfilter der Lambertsmühle über die Messwochen im Untersuchungszeitraum

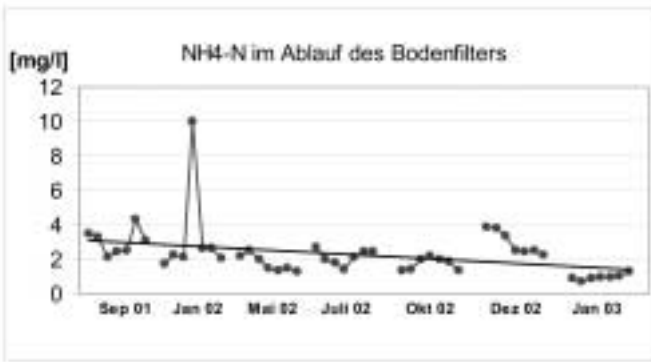


Abb. 5-3: Ablaufkonzentration von  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Bodenfilter der Lamberts-mühle

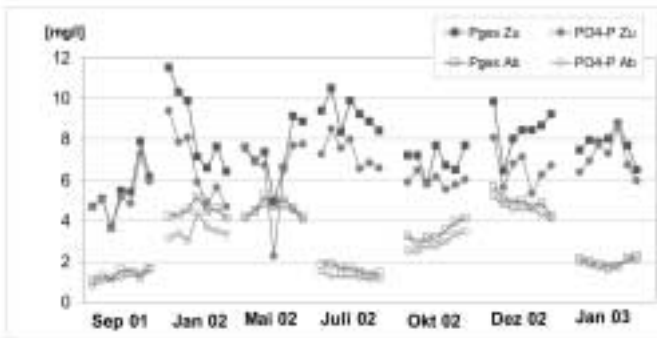


Abb. 5-4: Zu- und Ablaufkonzentrationen für den Pges und  $\text{PO}_4\text{-P}$  im Bewachsenen Bodenfilter der Lamberts-mühle über die Messwochen im Untersuchungszeitraum

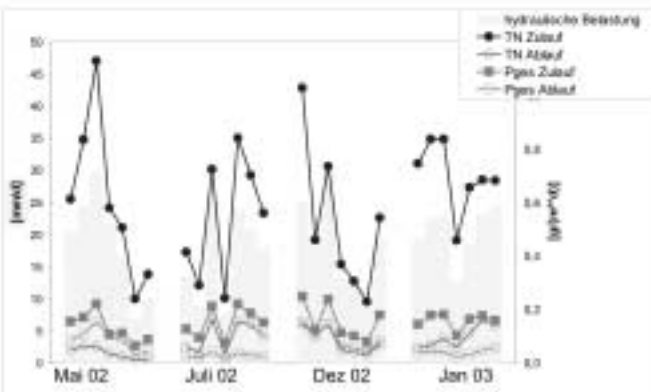


Abb. 5-5: Hydraulische Belastung des Bodenfilters sowie Zu- und Abflurrachten für N und P

In der untersuchten Anlage sind die Konzentrationen trotz des geringen Wasserverbrauchs von etwa 65 l/EW relativ gering. Hier wirkt sich die Entnahme von Stickstoff durch die Separation des Gelbwasser deutlich aus.

Mit mittleren 2,3 mg/l über sämtliche Messwochen ist die Konzentration für Ammoniumstickstoff im Ablauf des Bodenfilters auffallend hoch. Die Abbildung 5-3 zeigt allerdings einen deutlich abnehmenden Trend im Verlauf des Untersuchungszeitraumes, so dass hier davon ausgegangen werden kann, dass die Nitrifikationsleistung mit dem voranschreitenden Einfahren des Bodenfilters weiter zunimmt.

Die Phosphatkonzentrationen im Ablauf des Bodenfilters liegen mit einem Mittelwert über sämtliche Messwochen von 3,2 mg/l in einem akzeptablen Bereich. Hier muss berücksichtigt werden, dass der für die Konzentrationen maßgebliche Wasserverbrauch und damit der Verdünnungseffekt relativ gering ist. Die Konzentrationen sind nicht mit den Konzentrationen großer Kläranlagen mit einer wesentlich höheren Verdünnung vergleichbar. Allein Fremdwasser führt in zentralen Kläranlagen häufig zu einer Verdopplung des Kläranlagenzulaufs. Hinzu kommt die Verdünnung durch mitgereinigtes Regenwasser und einen höheren spezifischen Wasserverbrauch.

Die mittlere P-Fracht, die sich aus der gemessenen mittleren Konzentration und dem Abwasservolumenstrom, der durch den Bodenfilter fließt, ergibt, liegt bei 1,17 g/d. Von 4 ständigen Bewohnern in der Mühle ausgehend, liegt damit die einwohnerspezifische Fracht bei knapp 0,3 g/(E\*d) P. Legt man 6 EW zugrunde, reduziert sich diese spezifische Fracht auf nicht ganz 0,2 g/(E\*d)

Eine kommunale Kläranlage, die einen P-Ablaufwert von 2 mg/l sicher einhält, liefert im Vergleich folgende Frachten im Ablauf: 180 l/(E\*d) = 0,36 g/(E\*d)

$$120 \text{ l/(E*d)} = 0,24 \text{ g/(E*d)}$$

Bei einem P-Ablaufwert von 3 mg/l stellen sich folgende Frachten im Ablauf ein:

$$180 \text{ l/(E*d)} = 0,54 \text{ g/(E*d)}$$

$$120 \text{ l/(E*d)} = 0,36 \text{ g/(E*d)}$$

Im Frachtenvergleich wird deutlich, dass der P-Austrag aus der Abwasserreinigungsanlage der Lambertsmühle gering ist.

• Korrelationen

Der Wirkungsgrad des Bodenfilters stellt sich für die Parameter TN und Pges in Abhängigkeit von der jeweiligen Flächenbelastung wie in Abbildung 5-6 dargestellt dar. Dabei ergibt sich unter Berücksichtigung sämtlicher Messwerte über den Zeitraum September 2001 bis Januar 2003 eine durchschnittliche Eliminationsleistung für den gesamten Stickstoff von knapp 89%. Phosphat wird zu etwa 50% im Bodenfilter zurückgehalten.

Über den Untersuchungszeitraum eines Jahres kann eine erwartete Abhängigkeit der Stickstoffeliminationsleistung von der Jahreszeit und damit von der Abwassertemperatur nicht festgestellt werden.

Die Steigung der Trendgeraden gibt die Eliminationsleistung an.

In den Messwochen wird im Januar 2003 mit 99% die beste mit Stickstoffeliminationsleistung erreicht, obwohl während der gesamten Mess-

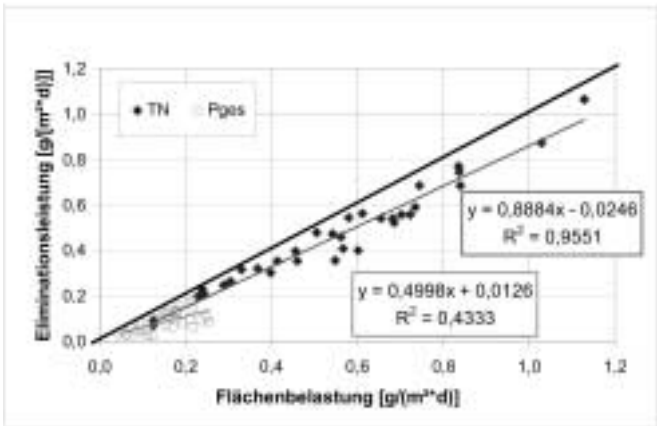


Abb. 5-6: Eliminationsleistung für TN und Pges im bewachsenen Bodenfilter der Lambertsmühle

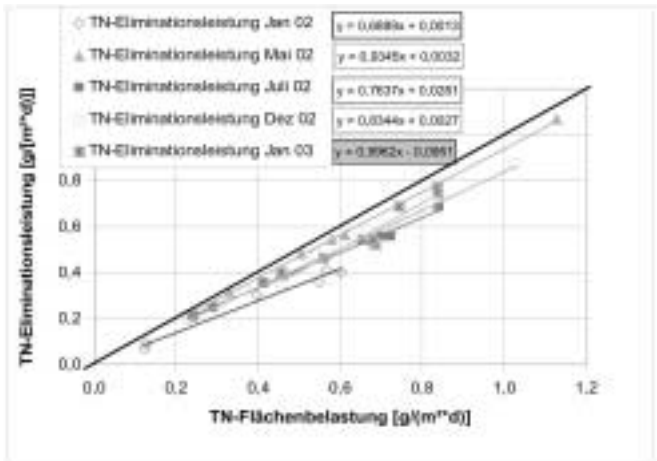


Abb. 5-7: Eliminationsleistung für TN in Abhängigkeit von der TN-Flächenbelastung und der Abwassertemperatur

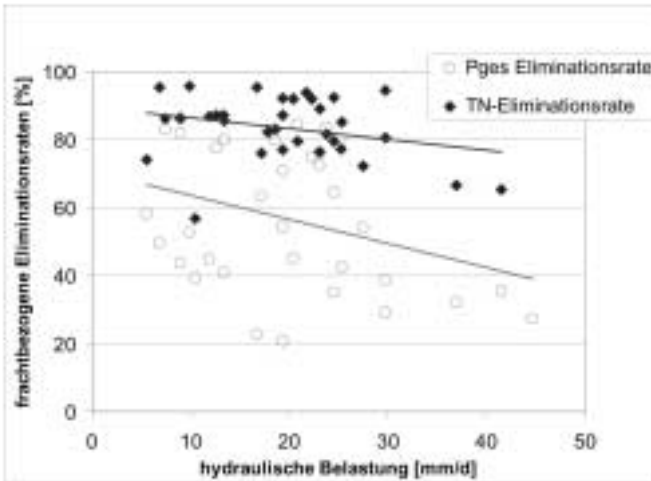


Abb. 5-8: Eliminationsleistung für TN und Pges in Abhängigkeit von der hydraulischen Belastung des Bodenfilters

woche die Temperaturen unter 0°C lagen. In der Julimesswoche dagegen beträgt die Reinigungsleistung für Stickstoff nur 76%.

Eine Erklärung dafür ist, dass neben der Temperatur der Effekt des Einfahrens der Anlage und damit der Steigerung der Leistungsfähigkeit über die Zeit, die Wirkung der Temperatur auf die Abbauleistung, überlagert. Betrachtet man die Eliminationsleistung in Abhängigkeit von der hydraulischen Beschickung, lässt sich mit zunehmender hydraulischer Belastung ein leichter Abwärtstrend erkennen.

Eine signifikante Abhängigkeit der Eliminationsleistung von der hydraulischen Belastung der Anlage kann für Stickstoff aber nicht festgestellt werden. Dazu wären eine größere Anzahl Proben und eine größere Bandbreite der hydraulischen Belastung wünschenswert.

Die hydraulische Belastung der Anlage hat aufgrund der Bemessung des Bodenfilters bislang noch nicht den Wert von 45 mm/d überschritten. Sie liegt z.Zt. im Mittel über die Messwochen bei 15 mm/d. Untersuchungen an bewachsenen Bodenfiltern zufolge ist eine hydraulische Beschickung mit Abwasser, ohne vorherige Separation größerer Nährstofffrachten, von 50 mm/d für die Nitrifikationsleistung und das Kolmationsrisiko des Filters unkritisch.

### 5.3 Stoffbilanzen

Für eine Beurteilung der gesamten Anlage hinsichtlich des Grades der Nährstofftrennung und der Aufteilung der Stoffströme wurde eine Frachtenbilanzierung vorgenommen. Die Volumenströme des Grauwasserzulaufs und des Zulaufs zum bewachsenen Bodenfilter wurden gemessen. Der Ablauf aus dem Rottesack und damit die entsprechenden Frachten ergeben sich als Differenz daraus.

Diese stoffstromspezifischen Betrachtungen in Abbildung 5-9 zeigen, dass das Grauwasser 40-60 % des gesamten Zulaufs zum Bodenfilter ausmacht. Aus dem Braunwasser stammt der größte Teil der Stickstofffracht. Das ist neben dem fäkalbürtigen Stickstoff u.a. auf den über die konventionelle Toilette fehlgeleiteten Urin zurückzuführen.

Beim Phosphat hängt die Verteilung auf die beiden Teilströme sehr stark von der jeweiligen Nutzung im Haus ab. Hohe P-Konzentrationen im Grauwasser korrelierten stark mit z.T. rosa-farbenen Verfärbungen der jeweiligen Probe, die auf die Benutzung der Waschmaschine zurückzuführen waren.

Mit dem Gebrauch phosphathaltiger Wasch- und Reinigungsmittel (hier vor allem Geschirrspülmittel für automatische Spülmaschinen) ist der höhere Anteil des Phosphats im Grauwasser zu erklären.



Abb. 5-9: Aufteilung der Wassermengen, Stickstoff- und Phosphorfrachten auf die beiden Teilströme Grauwasserzulauf und Rottesack-Ablauf

#### 5.4 Schwermetalle

Als Schwermetalle wurden an allen Probenahmestellen Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Blei (Pb) gemessen. Sowohl im Grau- als auch im Braunwasser sind die Konzentrationen der drei Parameter sehr gering. Die Richtwerte für z.B. Trinkwasser (TrinkwV 2001) liegen für Kupfer bei 2000 µg/l und für Blei bei 10 µg/l.

Die Konzentrationen an Blei waren sehr gering und gerade beim Ablauf aus dem Rottesack häufig unterhalb der Nachweisgrenze (Tab. 5-1). Ein Grund dafür liegt sicher darin, dass die an Feststoffen angelagerten Schwermetalle durch die Filterwirkung des Rottesacks zurückgehalten werden. Es ist aber insgesamt davon auszugehen, dass der Schwermetallgehalt auch im Zulauf zum Rottesack nicht sehr viel höher ist.

Pb [µg/l]	Grauwasser	Ablauf Rotte
Anz. Proben	26	27
Messwerte	25	6
Mittel	6	
Max	12	10
Min	3	
Median	4	

Tab. 5-1: Bleikonzentrationen in Grauwasser und Rottesackablauf (Grenzwert = 10 mg/L)

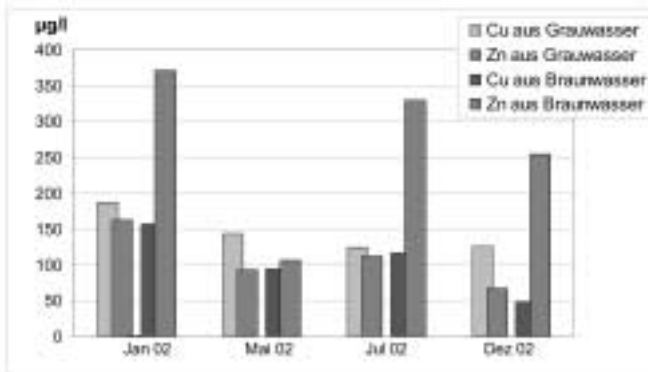


Abb. 5-10: Schwermetallkonzentrationen im Grau- und Braunwasser, Messwochenmittelwerte

Im bewachsenen Bodenfilter werden ebenfalls Schwermetalle zurückgehalten, wie Abbildung 5-11 belegt.

Blei konnte im Ablauf des Bodenfilters nicht mehr nachgewiesen werden, im Zulauf waren von 42 Proben nur 27 Proben oberhalb der Nachweisgrenze.

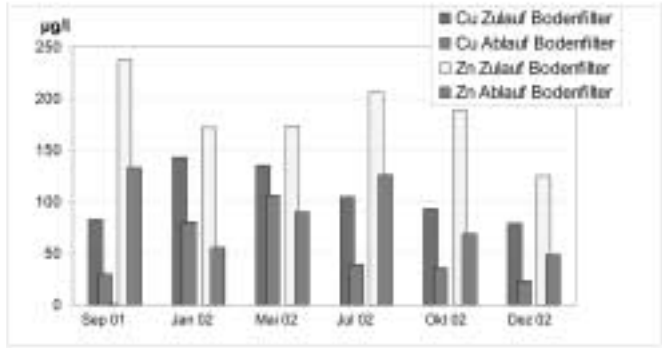


Abb. 5-11: Schwermetallkonzentrationen Zu- und Ablauf Bodenfilter, Messwochenmittelwerte

Pb [ $\mu\text{g/l}$ ]	Bodenfilter Zulauf
Proben	42
Messwerte	27
Max. Wert	12

Tab. 5-2: Bleikonzentrationen Zulauf zum Bodenfilter

Die Schwermetallgehalte stellen insgesamt kein Problem dar. Sie liegen in allen Systemkomponenten sogar deutlich unterhalb der Richtwerte, die in der Trinkwasserverordnung vorgegeben werden.

## 6 Gelbwasser

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden Stichproben im Gelbwasserspeicher genommen und auf organische Stoffe, Nährstoffparameter, Schwermetalle und Spurenelemente untersucht.

Pb [ $\mu\text{g/l}$ ]	Gelbwasserspeicher
Anz. Proben	15,0
Messwerte	5,0
Mittel	34,4
Max	98,0
Min	13,0
Median	19,0

Tab. 6-1: Bleikonzentrationen im Gelbwasser

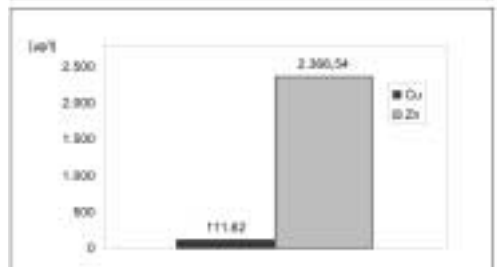
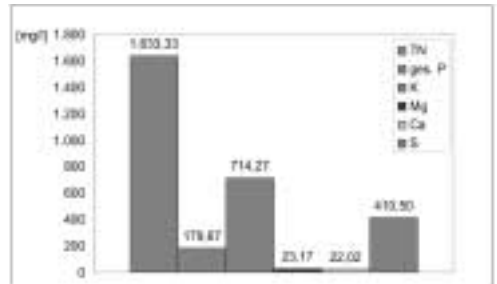


Abb. 6-1: Konzentrationen verschiedener Parameter im Gelbwasserspeicher

Die Proben wurden nach einer Durchmischung aus dem Gelbwasserspeicher entnommen. Nach allen Erfahrungen mit gespeichertem Urin ist davon auszugehen, dass sich im Laufe der Zeit Ausfallprodukte am Boden absetzen, welche sowohl einen Teil der Nährstoffe als auch Schwermetalle enthalten. Das Bodensediment wurde nicht beprobt. In jedem Fall sind die Schwermetallgehalte auch im Gelbwasser sehr gering.

## 7 Grad der Trennung von Nährstoffen und Wasserkreislauf

Die derzeitige Bemessungsgrundlage für bewachsene Bodenfilter ist das Arbeitsblatt der ATV A 262. Für einen Vertikalfilter sind hier 2,5 m<sup>2</sup>/EW vorgesehen, unter der Prämisse, dass das gesamte Abwasser über den Filter perkoliert wird und gereinigt werden muss.

Der bewachsene Bodenfilter der Lambertsmühle hat einen Fläche von 16 m<sup>2</sup>, wobei zugrundegelegt wurde, das täglich im Mittel 8 Einwohner die Kapazität der Anlage nutzen. Damit sind pro Einwohner 2 m<sup>2</sup> vorgesehen, eine Fläche, die sich bei eine stärkeren Nutzung der Mühle als Museum spezifisch verringert. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Belastung der Anlage sich wesentlich von der einer konventionellen Kleinkläranlage unterscheidet.

So ist die Pufferfähigkeit bei erhöhten Belastungen durch hohe Besucherzahlen in der Lambertsmühle sehr viel höher als bei einer üblichen Kleinkläranlage, denn durch die Abtrennung des Urins und damit der Hauptnährstofffrachten ist die Zulaufbelastung des Bodenfilters nicht wesentlich erhöht. Nur Grauwasser, das durch Waschen, Duschen und in der Küche anfällt, belastet den Bodenfilter und hat damit Auswirkungen auf den Ablauf der Anlage. Im folgenden soll das Potential dieser Trennung abgeschätzt werden.

Bei allen Messungen, die in der Lambertsmühle vorgenommen wurden, sind die gemessenen Werte sehr spezifisch und aufgrund des kleinen Bilanzraumes starken Schwankungen unterworfen. Besonders deutlich wird das an den P-Konzentrationen im Grauwasser. Exemplarisch ist hier die Messwoche Mai 2002 dargestellt. Die Proben mit den hohen P-Gehalten wiesen deutliche, z.T. rosafarbene Verfärbungen auf, die direkt auf die Benutzung der Waschmaschine zurückgeführt werden konnten.

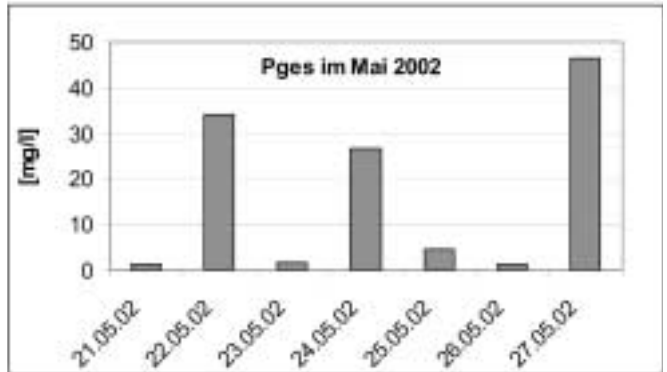


Abb. 7-1: Darstellung der P-Konzentrationen im Grauwasser Messwoche Mai 2002

Die täglich anfallende Gelbwassermenge, verdünnt durch geringe Mengen an Toilettenspülwasser, wurde anhand der Veränderung des Füllstandes im Gelbwasserspeicher über die Zeit abgeschätzt: aus den Füllstandsänderungen ergibt sich ein mittlerer täglicher Gelbwasseranfall von 9 Litern.



Abb. 7-2: Füllstandänderungen im Gelbwasserspeicher (inkl. Entnahmen)

Die wöchentliche Ablesung des Hauptwasserzählers im Gebäude vom 22.3.02 bis zum 9.1.03 ergibt einen mittleren Gesamtwasserverbrauch von 309 l/d.

Dabei liegt das Entnahmemaximum bei 494 l/d und das Minimum bei 50 l/d.

Die Verteilung der Hauptnährstoffe auf die drei Teilströme gestaltet sich als Mittelwert über sämtliche Messwochen so, wie in Abbildung 7-3 dargestellt. Trotz der falsch angeschlossenen Toilette wird noch etwa die Hälfte des gesamten Stickstoffs über die Gelbwassersammlung erfasst.

Geht man davon aus, dass insgesamt etwa 85 % des Stickstoffs im Abwasser urinbütig sind, stellt sich der Anteil des gesammelten Stickstoffs von dem überhaupt über das Gelbwasser erfassbaren Stickstoff mit knapp 50 % dar.

Schwedische Untersuchungen haben ergeben, dass bei 100 %iger Ausstattung mit Separationstoiletten etwa 75 % des urinbütigen Stickstoffs erfasst werden können. Die Differenz geht zu Lasten der konventionellen Toilette, so dass sich unter optimalen Bedingungen das Verhältnis zwischen Gelbwasser und Braunwasser zugunsten des Gelbwasseranteils verschieben würde. Das gleiche gilt für Kalium und Phosphor.

Beim Entleeren der Rottesäcke wurde festgestellt, dass sich unterhalb der Säcke schon über längere Zeit Schlamm abgelagert hatte. Diese Fraktion wurde während der gesamten Projektlaufzeit nicht berücksichtigt und erklärt zu einem Teil die Verluste in den Bilanzen. Es ist davon auszugehen, dass dieser Schlamm sowohl aus dem Grauwasserstrom als auch aus dem Rottesack stammt, so dass die anteilige Frachtverteilung, wie sie in diesem Kapitel dargestellt wurde von diesem Fehler unbeeinflusst bleibt.

## 8 Akzeptanz

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde eine Fragebogenaktion zur Einschätzung der separierenden Toilettentechniken durchgeführt. Die Teilnahme war gering, u.a. weil sich das Museum noch im Aufbau befindet und der Publikumsverkehr noch nicht sehr hoch ist. Die Ergebnisse werden hier vorgestellt, es ist allerdings zu berücksichtigen, dass sie in keiner Weise repräsentativ sein können.

Der Fragebogen und die Anzahl der Antworten ist in Abbildung 8-1 dargestellt.

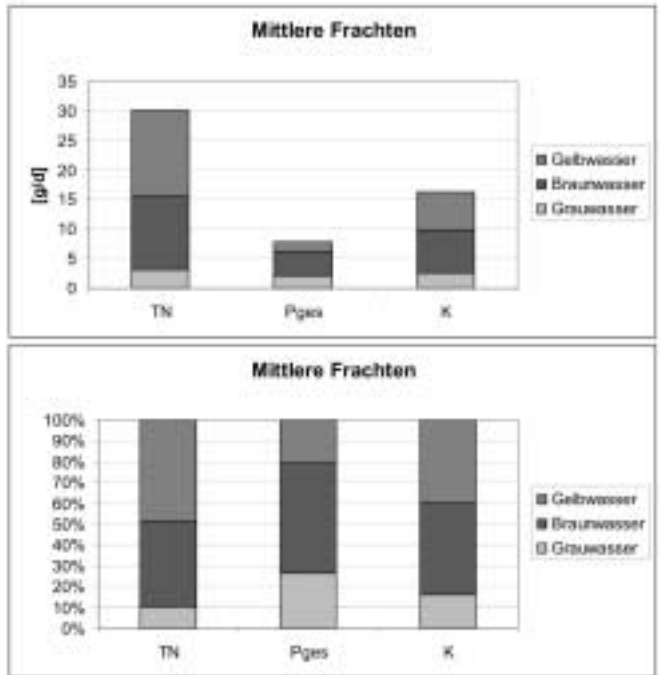


Abb. 7-3: Frachtverteilung von N, P und K auf die Teilströme in der Lambertsmühle



Vom Korn zum Brot – Vom Brot zum Korn			
Hier ist doch etwas anders?!			
Wasser sparen – Gewässerbelastung reduzieren – Nährstoffe und Energie zurückgewinnen			
Sie haben soeben eine neu entwickelte sogenannte Separationstoilette oder ein wasserloses Urinal besucht. Haben Sie sie/ies auch benutzt? Uns interessiert Ihre Meinung...			
1.	Haben Sie eine solche Toilette/Urinal schon vorher gesehen?	Ja 4	nein 14
2.	Hatten Sie Berührungspunkte / „Waren Sie erschrocken“?	Ja 4	nein 14
3.	Bitte geben Sie Ihre persönliche Einschätzung im Vergleich zu einer herkömmlichen Toilette an:	besser	kein Unterschied schlechter
	Design	3	10 4
	Spülung	8	8 2
	Sitzkomfort	2	12 2
	Papiertrennung	8	2 2
	Hygiene-Empfinden	4	10 4
3a	Einschätzung zum Urinal (nur für die Herren)		
	Wie empfanden Sie die fehlende Spülung	1	1 3
	Hygiene-Empfinden	2	3 0
4.	Ist die Bedienungsanleitung verständlich?	Ja 15	nein 2
4.	Können Sie sich eine solche Toilette/Urinal für den alltäglichen Gebrauch zuhause vorstellen?	Ja 13	nein 4
Anzahl zur Person:		Alter < 20 20 – 35 35 – 50 50 – 65 > 65	
	weibl. 11 männl. 7	3m 1m 1m 2m 0	2m 0
		2w 1w 4w 4w 0	
Kommentare: „verblüfft“			
„zu hohe Geruchbelästigung“ (Urinal)			
„1. Papier sollte immer mit dem Spülwasser weggespült werden			
2. ein Teil des Urins gelangt immer in die hintere Schüssel und wird nicht weggespült → unhygienisch“			
„interessant“			
„die Toilette ist doof und ungemüht“			

Abb. 8-1: Der Fragebogen

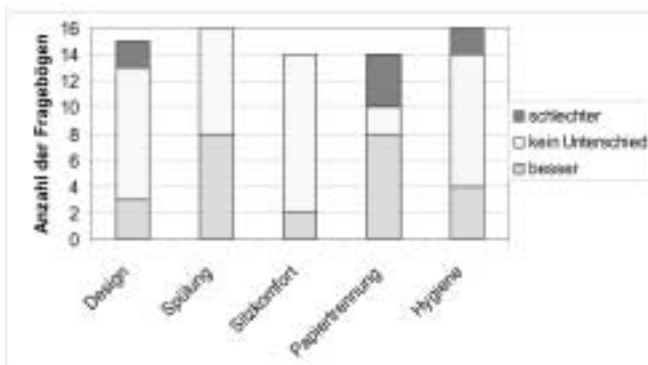


Abb. 8-2: Ergebnisse der Fragebogenaktion

Auf den ausgelegten Fragebogen kamen 18 Rückläufe, die ganz oder nur teilweise ausgefüllt waren.

Die Ergebnisse der Fragen unter Punkt 3, hinsichtlich der Einschätzung der Separationstoiletten im Vergleich mit herkömmlichen Toiletten sind in Abbildung 8-2 dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Spülung aufgrund ihrer wassersparenden Funktion positiv bewertet wird.

Die Papiertrennung ruft die deutlichste Polarisierung hervor. 50% der Befragten empfindet sie als positiv, immerhin 25% findet sie schlechter als das herkömmliche System. Bei diesem Punkt sind die wenigsten der Meinung, dass kein Unterschied festzustellen sei.

Bei allen anderen Punkten stellt die Mehrheit der Befragten keinen Unterschied zum herkömmlichen System fest. Das Empfinden der schlechteren Hygiene wurde damit begründet, dass ein Teil des Urins immer in die hintere Schüssel gelangt und dort mit der installierten Spültechnik nicht weggespült wird. Diese Problem taucht allerdings nur bei der Toilette auf, bei der beide Schüsseln separat gespült werden. Bei der Toilette der Firma Roediger wurde das Problem bereits konstruktiv gelöst.

Insgesamt kann man bei 18 ausgefüllten Fragebögen kein repräsentatives Meinungsbild erstellen.

Tendenziell wird deutlich, dass ein Komfortverlust z.B. durch die getrennte Papiersammlung zu einer schlechteren Bewertung führt. Immerhin haben 13 von 18 Befragten (72%) angegeben, sie könnten sich die urinseparierende Technik auch in ihrem Haushalt vorstellen.

## 9 Zusammenfassung

Das teilstromorientierte Abwasserkonzept der Lambertsmühle beinhaltet die Abtrennung von Urin und seine Nutzung als nährstoffhaltiger Dünger und die Behandlung der beiden anderen Teilströme Braunwasser (Fäkalien) und Grauwasser (Abwasser aus Küche, Bad, etc.) nach einer Feststoffabtrennung in einem bewachsenen Bodenfilter

Das Prinzip des Abwasserkonzepts der Lambertsmühle ist die separate Erfassung von Gelbwasser (Urin), Braunwasser (Fäzes und Spülwasser) und Grauwasser (Bad, Wäsche, Küche...) und damit eine Rückführung der Nährstoffe aus dem Urin in den Nährstoffkreislauf und eine vereinfachte Reinigung des Restabwassers. Im Fall der Lambertsmühle wird das Braunwasser über einen Rottesack geführt. Das Filtrat wird gemeinsam mit dem Grauwasser in einem bewachsenen Bodenfilter gereinigt.

Die Reinigungsleistung des Bodenfilters, die Aufteilung der Nährstoffe auf die Teilströme und der Grad der Trennung von Nährstoff- und Wasserkreislauf wurden untersucht.

Die gesetzliche einzuhaltenden Ablaufwerte für organische Stoffe werden vom Bodenfilter mit einem CSB-Wert von im Mittel 40 mg/l deutlich unterschritten. Dass auch die Ablaufwerte für Stickstoff und Phosphor in einem guten Bereich liegen wird deutlich, wenn man über eine Frachtenberechnung eine Vergleichbarkeit zu großen Kläranlagen herstellt. Gleichwohl ist noch relativ viel Ammonium im Ablauf festzustellen, wobei hier über die Zeit ein Trend zu erkennen ist, der auf eine Steigerung der Nitrifikationsleistung des Bodenfilters und damit eine Abnahme des Ammoniums im Ablauf hindeutet.

Der Phosphatgehalt im Zulauf des Bodenfilters wird deutlich über das Grauwasser beeinflusst. Der Umgang mit Wasch- und Reinigungsmitteln ist hier von entscheidender Bedeutung.

Mit einer konventionellen Toilette im Gesamtsystem kann hier keine optimale Trennung erreicht werden. Der Grad der Trennung von Nährstoff- und Wasserkreislauf liegt unter dem möglichen. Dennoch werden in der Lambertsmühle über 50 % des Stickstoffs und etwa 20 % des Phosphors aus dem Wasserkreislauf herausgehalten. Außerdem werden 40 % des Kaliums erfasst. Damit ist zum einen eine effizientere Reinigung des Restabwasser möglich, zum anderen wird ein großer Anteil der Gesamtnährstofffracht in den Nährstoffkreislauf zurückgeführt.

Der Weg der Nährstoffsammlung und -nutzung ist besonders für dezentrale Anlage im ländlichen Raum ein gangbarer Weg zu einer deutlich verringerten Gewässerbelastung. Die Befragungen der Nutzer(innen) zeigen, dass mit der Erläuterung des Hintergrundes eine gute Akzeptanz erreicht werden kann.

# Verwertungsmöglichkeiten separierter Nährstoffe

## in der Landwirtschaft

Jürgen Simons<sup>1)</sup>, Prof. Dr. Heiner Goldbach<sup>1)</sup>, Gitta Schirmer<sup>2)</sup>, Helmut Thuir<sup>3)</sup>,  
Dr. Joachim Clemens<sup>1)</sup>

1) Universität Bonn, Institut für Pflanzenernährung, Karlrobert-Kreiten-Strasse 13,  
D-53115 Bonn, Tel: 0228 / 732851, ipe@uni-bonn.de

2) WiW - Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH, Untere Lichtenplatzer Str. 100,  
D-42289 Wuppertal, Tel: 0202 / 583-104, schi@wuppverband.de

3) Landwirtschaftskammer Rheinland, Endenicher Allee 60, D-53115 Bonn,  
Tel: 0228 / 7031516, helmut.thuir@lwk-rheinland.nrw.de

### 1 Einleitung

Urin enthält in einem geringen Volumen den Großteil der Nährstoffe, die ein Mensch ausscheidet (ca. 87 % des Stickstoffes, 50 % des Phosphors und 54 % des Kaliums). Zur Entlastung von Kläranlagen werden Überlegungen angestellt, diesen Teilstrom der bisherigen Abwasserreinigung zu entziehen. Auch aus Überlegungen zur Wiederverwertung von Nährstoffen ist dieser Teilstrom aus Sicht der Pflanzenernährung interessant, denn hiermit könnten Mineraldünger eingespart werden. Daher wurden in der vorliegenden Arbeit in Freiland- und Gewächshausversuchen der Einsatz von separiertem Urin der Lamberts-mühle auf dessen N-Wirksamkeit untersucht und mit der einer üblichen Mineraldüngung verglichen.

### 2 Material und Methoden

#### 2.1 Urin

Der für die Düngungsversuche verwendete Urin stammte aus dem Urin-Lagerbehälter der Lamberts-mühle (Tabelle 1). Die Stickstoffgehalte lagen unter denen von Gülle, die ca. 4-6 g N/l aufweisen.

	N <sub>tot</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P <sub>tot</sub>	K <sup>+</sup>	pH
Urin "Lamberts-mühle"	1,4	1,2	0,15	0,5	1,8
Unverdünnter Urin	6,7	0,4	0,5	1,8	8,1

Tab. 1: Parameter des eingesetzten Urins im Vergleich zu unbehandeltem Urin [g/l]

#### 2.2 Freiland

In unmittelbarer Umgebung der Lamberts-mühle wurden auf einem Grünland- und Ackerstandort vergleichende Untersuchungen durchgeführt.

Auf einem Dauergrünland (auf Parabraunerde) wurde die Ertragswirkung von Urin mit der von Gülle verglichen. Der Versuch wurde als randomisierter Block mit vier Varianten (Kontrolle, Urin, Gülle und Urin/Gülle Gemisch mit je vier Wiederholungen) angelegt. Die Versuchsfläche wurde zwei mal gedüngt (60+50 kg NH<sub>4</sub>-N/ha). Im Versuchsjahr erfolgten drei Schnitte, die auf Ertrag und N-Entzug untersucht wurden.

Der Ackerstandort eines Praxisbetriebes (ebenso auf Parabraunerde) diente zum Vergleich

der Ertragswirkung von Urin und betriebsüblicher Mineraldüngung zu Wintergerste. Der Versuch wurde als randomisierter Block mit vier Varianten (Kontrolle, Mineraldünger, Urin und Urin/Gülle Gemisch mit je vier Wiederholungen) angelegt. Die Versuchsfläche wurde praxisüblich drei mal gedüngt (60+60+50 kg NH<sub>4</sub>-N/ha) und nach der Abreife beerntet. Ertrag und Stickstoffentzug wurden berechnet.

### 2.3 Gewächshaus

Im Gewächshausversuch wurde ein Stickstoffsteigerungsversuch mit zwei N-Gaben mit Welchem Weidelgras {Sorte Turilo (*Lolium multiflorum/italicum*)} durchgeführt und die N-Wirkung von Urin und Mineraldünger verglichen.

In vierfacher Wiederholung wurden die Varianten

- Kontrolle (kein Mineraldünger),
- Mineraldünger (KAS),
- Urin pH 4 und
- Urin pH 8 in Kick-Braukmann-Gefäßen angelegt.

Auf je 9 kg Boden (Meckenheimer Krume) wurden 1 bzw. 2 g N appliziert. Es erfolgte ein P und K Ausgleichsdüngung. Es wurden Ertrag und N-Entzug über 5 Schnitte weg untersucht.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Grünland

Auf dem Grünlandstandort waren die Erträge der verschiedenen Düngervarianten gleich hoch (Abbildung 1). Allerdings zeigte sich, dass der N-Entzug und damit die Wirkung der Dünger unterschiedlich waren. Die Entzüge auf den mit Urin gedüngten Parzellen waren signifikant höher als die der reinen Güllevariante (Abbildung 2). Diese könnte durch den niedrigen pH-Wert des Urins und die im Vergleich zur Güllevariante größeren Wassermenge hervorgerufen worden sein. Ein niedriger pH-Wert reduziert NH<sub>3</sub>-Emissionen und erhöht damit den N-Eintrag in den Boden. Und eine höhere Wassermenge erleichtert die Infiltration des NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in den Boden, so dass auch dadurch die NH<sub>3</sub>-Emission minimiert wird. Aus Gülle mit einem pH üblicherweise von über 7 kann ein Teil des NH<sub>3</sub> ausgasen und steht nicht mehr als Nährstoff zur Verfügung. Von der applizierten N-Menge wurden zwischen 40 und 62,9 % durch die Pflanzen entzogen.

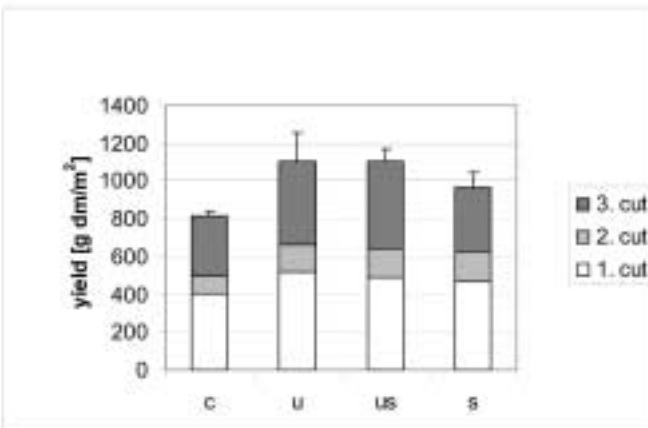


Abb. 1: Grünlanderträge  
1., 2. und 3. Schnitt [g/m<sup>2</sup>]  
c: Kontrolle; u: Urin, s: Gülle;  
u/s: Urin/Gülle-Mischung  
(dm = dry matter)

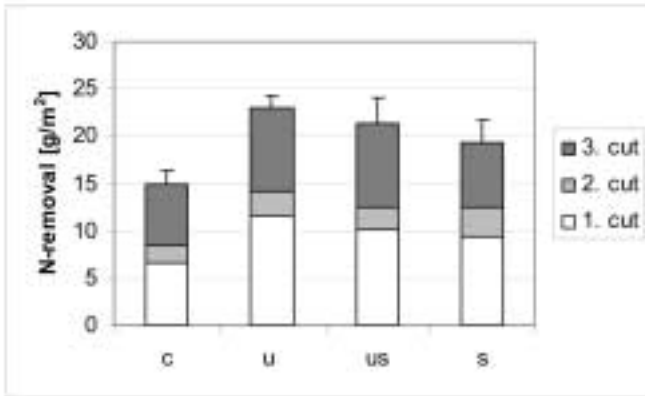


Abb. 2: N-Entzug [g/m<sup>2</sup>]  
 c: Kontrolle; u: Urin  
 u/s: Urin/Gülle-Mischung  
 s: Gülle

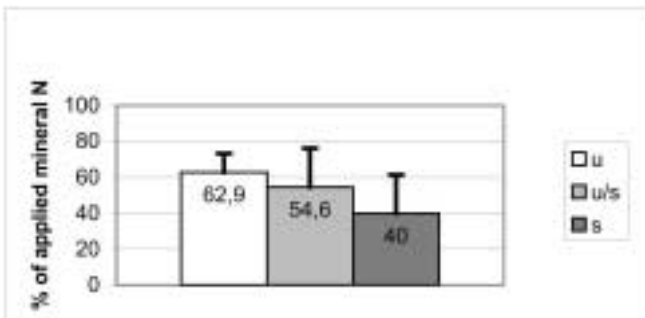


Abb. 3: N-Ausnutzung des Dünger-N (% of applied mineral N)  
 u: Urin  
 u/s: Urin/Gülle Mischung  
 s: Gülle

### 3.2 Acker

Auf dem Ackerstandort waren die Erträge der Urin- und Urin/Güllevarianten höher als die der Mineraldüngervarianten (Abbildung 4).

Die N-Effizienz von Urin war signifikant höher als die des Urin/Güllegemischs (Abbildung 5). Die hohen Erträge der Urinvariante sowie die gute N-Ausnutzung des Düngers kann analog zum Grünlandversuch z.T. auf den niedrigen pH-Wertes des Substrates sowie auf dessen hohen Wassergehalt zurückgeführt werden.

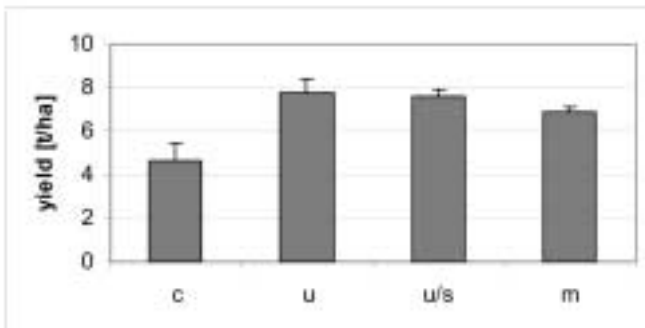
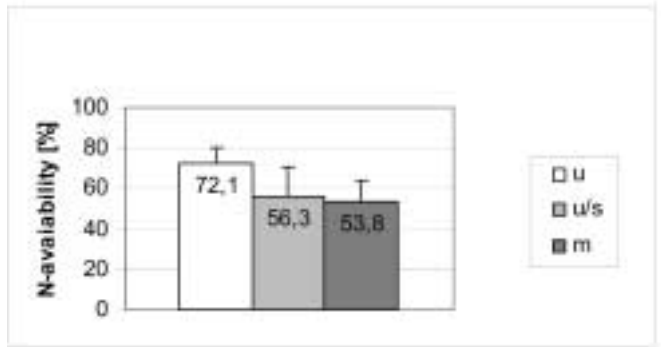


Abb. 4: Gerste-Erträge [t/ha]  
 c: Kontrolle, u: Urin  
 u/s: Urin/Gülle-Mischung  
 m: Mineraldünger

Abb. 5: N-Verfügbarkeit des Düngers (% des ausgebrachten mineralischen N)  
 u: Urin  
 u/s: Urin/Gülle-Mischung  
 m: Mineraldünger



### 3.3 Gewächshausversuch

Nach dem ersten Schnitt waren die Erträge der Varianten mit hoher Urinmenge (und damit höherer Nährstoffgabe) kleiner als die der niedrigen Uringabe. Und die Erträge der hohen Uringabe waren in der pH8-Variante niedriger als in der pH4-Variante. Dies könnte auf zwei Effekte zurückzuführen sein:

Zum einen kann die mit der hohen Uringabe einhergehende höhere Salzmenge den Ertrag verringert haben. Dieser Effekt ist pH-unabhängig.

Zum anderen können auf den Varianten mit pH8  $\text{NH}_3$ -Emissionen auftreten. Dadurch wird die für die Pflanzen verfügbare Menge an  $\text{NH}_4^+$  reduziert, was mit einer Ertragserniedrigung einhergehen kann.

Am Ende des Experiments konnten keine signifikanten Unterschiede im Ertrag zwischen Urin- und Mineraldüngervarianten eines Stickstoffniveaus festgestellt werden (Abbildung 6). Bei einer N-Gabe von 1g/Gefäß war die N-Ausnutzung aus Urin im Vergleich zur Mineraldünger leicht erhöht (Abbildung 7). Bei einer N-Gabe von 2 g/Gefäß waren keine Unterschiede feststellbar.

## 4 Schlussfolgerungen

Die N-Wirkung von Urin ist der von Gülle ( $\text{NH}_4^+$ -N) und Mineraldünger gleichwertig.

Eine alleinige Ausbringung von behandeltem (d.h. angesäuertem) Urin ist nicht zu empfehlen, da es an den Applikationsgeräten zu Korrosionsschäden kommen kann. Durch eine Vermischung mit Gülle, die eine hohe Pufferkapazität aufweist, können Korrosionsschäden vermieden werden.

Auch aufgrund der relativ geringen Nährstoffkonzentration im Urin empfiehlt sich eine Vermischung mit Gülle, falls keine Bedenken aus hygienischer Sicht oder aufgrund organischer Verunreinigungen (z.B. Antibiotika) bestehen.

Eine Urinapplikation zu salzempfindlichen Arten wie z.B. Kartoffeln sollte vermieden werden. Die Applikation zu Gemüse und Obst sollte aus diesem Grunde ebenfalls unterlassen werden. Dagegen ist die Urindüngung zu Getreide (insbesondere der besonders salzverträglichen Gerste) sowie den chlorophilen Zuckerrüben aus Sicht der Nährstoffversorgung ohne weiteres möglich. Zu beachten ist, dass auch Güllen zwischen 0,4 und 1 kg Cl/m<sup>3</sup> enthalten können.

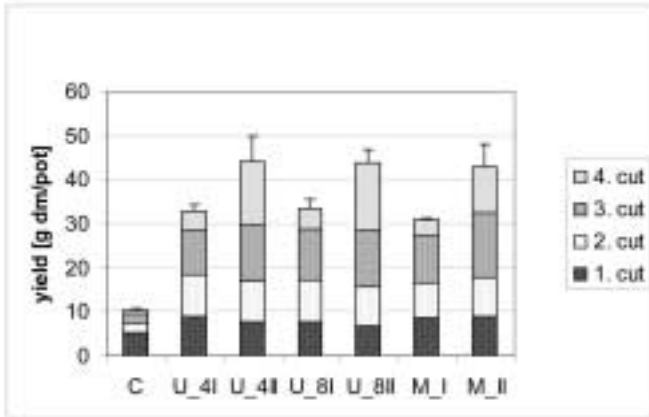


Abb. 6: Erträge (g TS/Gefäß)  
 u: Urin, m: Mineraldünger,  
 4/8: pH-Wert des Urins,  
 I/II: 1 bzw. 2 g N

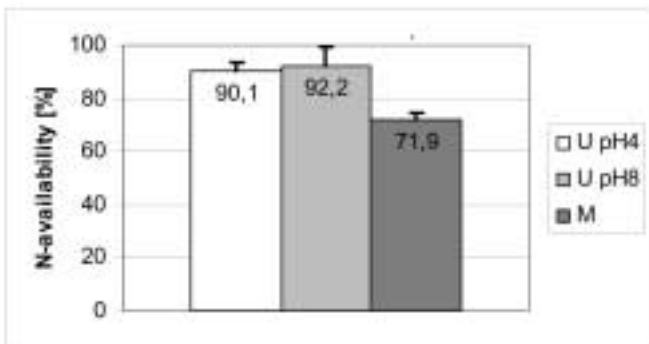


Abb. 7: N-Verfügbarkeit des Düngers bei 1g N/Gefäß (% des ausgebrachten mineralischen N)  
 u: Urin, m: Mineraldünger,  
 4/8: pH-Wert des Urins

# Das Abwasserkonzept der Lambertsmühle

## aus Sicht des Fördervereins

Armin Busch

Vorsitzender des Fördervereins Lambertsmühle zu Burscheid e.V., Dierath 27, 51399 Burscheid

Der Förderverein Lambertsmühle gründete sich 1995 vor dem Hintergrund einer leeren Stadtkasse und den damit verbundenen Haushaltsauflagen - ohne den Verein, der dann vom Rat der Stadt den Auftrag erhielt, das Museum Lambertsmühle zu realisieren, hätte die Stadt das Vermächtnis nicht annehmen dürfen. Eines unserer Hauptanliegen war, die Gebäude, die in der heutigen Form aus dem Jahre 1766 stammen, unter ökologischen Gesichtspunkten zu restaurieren und zu erhalten, damit die Lambertsmühle wieder das sein kann, was sie über Jahrhunderte gewesen ist: eine echte Wassermühle mit Bäckerei, aber auch ein besonderer Ort, an dem jeder Besucher den Weg vom "Korn zum Brot" hautnah erleben kann.

Durch eine solche Vorgehensweise versprechen wir uns einen über die üblicherweise inhaltlich ausgerichteten Museumsprojekte der Region hinausgehenden besonderen Publikumszuspruch. Dieser wird schon heute bestätigt durch die Nachfragen aus Burscheid und der Region, obschon die Bau- und Restaurationsmaßnahmen noch nicht abgeschlossen sind. Rund um Burscheid ist die Lambertsmühle ein Begriff - schließlich liegt sie mitten in einem der beliebtesten Ausflugsgebiete der Region.

Die ökologischen Baumaßnahmen umfassen die Verwendung herkömmlicher regenerativer Baumaterialien wie Lehm, Lehmbausteine und Holz sowie Feldbrandsteine aus Altgebäudeabrissen für Wand- und Deckenbereiche und Tonziegel und Strohdocken für die umfangreichen Dachsanierungen. Zur diffusionsfähigen Isolation und Wärmedämmung und zur Reduzierung der Heizkosten wurden Holzfilzplatten und Isofloc eingesetzt. Die ursprüngliche Ölheizung wurde durch eine umweltfreundliche Erdgasheizung ersetzt. Dies geschah mit Unterstützung der Ruhrgas AG aus Essen, die uns die Zuleitung aus der 800 m entfernten Ortschaft Repinghofen sponserte und der Firma Vaillant aus Remscheid, die zwei Niederbrennwertgeräte neuesten Entwicklungsstandes beisteuerte.

Ein notwendiger Neubau als Verbindungstrakt zwischen dem Hauptgebäude und dem sogenannten Stall wurde mit einer Dachbegrünung versehen. Dieser Stall beherbergt einen Raum für Ausstellungen, Versammlungen und Feiern und wird den didaktischen Teil des Museums aufnehmen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil unseres ökologisch geprägten Museumskonzeptes ist die Anlage und Bewirtschaftung eines Bauerngartens, der seit mehreren Jahren unter fachkundiger Anleitung einer Landschaftsarchitektin und Einbeziehung der Volkshochschule alternative Gartengestaltung und Pflege erfährt.

Nun komme ich zum Hauptpunkt, dessen Verwirklichung uns heute hier zusammengeführt hat, nämlich dem neuartigen Abwassermanagement in der Lambertsmühle. Die Abwässer der Lambertsmühle, die sich aufgrund der nur wenigen Bewohner mengenmäßig in Grenzen hielten, wurden früher in einer etwa 10 m<sup>3</sup> fassenden Grube gesammelt und nach meiner Kenntnis mehr oder weniger "regelmäßig" mittels entsprechender Fahrzeuge entsorgt.



Diese Anlage konnte natürlich den heutigen abwasserrechtlichen Anforderungen und insbesondere der beabsichtigten erheblichen Nutzungsausweitung durch das geplante Museum in keiner Weise genügen.

Hinzu kam, dass die Abwassergrube räumlich dort untergebracht war, wo bis zum Jahre 1956 das Mühlrad lief und auch jetzt wieder installiert ist.

Weil im Bereich der Lambertsmühle kein Abwasserkanal vorhanden ist, sah unsere erste Lösung des Problems die Errichtung einer herkömmlichen Pflanzenkläranlage vor, deren Verwirklichung jedoch an die Grenzen unserer finanziellen Möglichkeiten stieß. Vor diesem Hintergrund suchten wir den Kontakt mit dem Wupperverband, der uns durch verschiedene bemerkenswerte gewässerregulierende und Renaturierungsmaßnahmen aufgefallen war. So kam es mit Hilfe des Wupperverbandes und dem Ingenieurbüro Otter-Wasser zur Konzipierung einer Anlage, deren Funktion und Messergebnisse unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten hier und heute erörtert werden. Im Zusammenhang mit der Errichtung dieser innovativen Anlage hat der Verein viele praktisch zu leistende Arbeiten übernommen.

Da, wie Sie wissen, die Hausabwässer in 3 Teilströmen getrennt aus dem Gebäude geleitet werden, und zwar in Rohren von DN 100, musste das gesamte vorhandene Rohrleitungssystem des Hauptgebäudes über drei Stockwerke ausgetauscht bzw. erweitert werden. Das Erdgeschoss musste in weiten Bereichen förmlich umgegraben werden. Um die umfangreiche Verrohrung aufzunehmen und ästhetisch zu verstecken, mussten teilweise Deckenverkleidungen eingezogen werden.



*Einbau des neuen Mühlrades*



*Besichtigung der Pflanzenkläranlage*

Diese Arbeiten wären nach der ersten Planung nicht angefallen und bedeuteten deshalb einen erheblichen Mehraufwand an Zeit und Geld. In einem Neubau würde dies allerdings wesentlich weniger zeitaufwendig und kostengünstiger zu realisieren sein.

Nun steht die Anlage, und die Toilettentöpfe aus Schweden und China und die sonstigen Einrichtungen zeigen in den hellen und sauberen Räumen ein angenehmes Äußeres. Die Benutzerfreundlichkeit steht bei entsprechender Unterweisung nach den bisher gewonnenen Erfahrungen außer Zweifel.

Einige technische Verbesserungen lassen sich sicherlich noch erzielen. Sinnvoll erscheint uns aus Gründen der Handhabung der geruchsunterbindenden Maßnahmen und des Betriebes der wasserlosen Urinale eine weitere helfende Betreuung durch den Wupperverband. Dies trifft in besonderem Maße auf die technische Handhabung des Rottebehälters sowie die Stabilisierung des Urintankinhalts und die hygienischen Sicherungsvorkehrungen in den Außentankanlagen zu. Wir freuen uns über die bereits zugesagte Unterstützung.

Wir bedanken uns an dieser Stelle für die ausgezeichnete Zusammenarbeit mit dem Wupperverband, den Firmen und Instituten, die an der Entwicklung und Realisierung beteiligt waren und natürlich auch bei Ihnen, den Entscheidungsträgern des Umweltministeriums, die Sie das Projekt nicht nur finanziell möglich gemacht haben.

Wir wünschen uns, dass diese innovative Anlage die erhoffte zukunftsweisende Wirkung erzielen wird und versprechen unsererseits, im Rahmen unserer Möglichkeiten hierzu beitragen zu wollen.

# Das alternative Abwasserkonzept der Lambertsmühle

## - zukunftsfähig aus wasserrechtlicher Sicht?

Walter Büttgens

Untere Wasserbehörde, Rheinisch-Bergischer Kreis, Am Rubezahlwald 7, 51469 Bergisch-Gladbach  
Tel.: 02202 / 132-570, walter.buettgens@rbk-online.de

Mit der wasserrechtlichen Bewertung des Lambertsmühlenkonzeptes muss, dem Titel der Veran-staltung folgend, eine Beurteilung der Zukunftsfähigkeit und damit der Nachhaltigkeit ver-bunden sein.

Die wasserrechtliche Einschätzung orientiert sich am Wasserhaushaltsgesetz (WHG) des Bundes bzw. am Landeswassergesetz (LWG) für das Land Nordrhein-Westfalen. Die zukünf-tige Rechtsentwicklung zu betrachten ist schwierig, da sie von vielen Faktoren beeinflusst wird. Eines dürfte jedoch klar sein; die Umweltgesetzgebung folgt zunehmenderweise dem Tenor des Nachhaltigkeitsgebotes und der Ressourcenschonung.

Da das Lambertsmühlenkonzept sich der gleichen Zielsetzung unterwirft, könnte man bei oberflächlicher Betrachtungsweise zu dem Ergebnis kommen, dass dann auch die wasser-rechtliche Zukunftsfähigkeit gegeben sein müsste.

Zielsetzung dieser kurzen Abhandlung, die einige Themenfelder nur streifen kann, ist es, die-se Annahme zu überprüfen.

### Was bedeutet wasserrechtliche Zukunftsfähigkeit eines Abwasserkonzeptes?

- Das Anlagenkonzept muss mindestens dem "Stand der Technik" entsprechen.
- Die festgesetzten Einleitungsparameter müssen dauerhaft sicher eingehalten werden.
- Die Reststoffbeseitigung / -verwertung hat gemeinwohlverträglich zu erfolgen, ein Verlagern von Schadstoffen in andere Umweltmedien, wie z.B. Luft und Boden muss vermieden werden.
- Die Zielsetzung des Anlagenkonzeptes muss die Schonung der natürlichen Ressourcen beinhalten. Dazu gehören u.a. der sparsame Umgang mit Wasser und Energie, sowie der Erhalt der natürlichen Bodenfunktionen.

In den folgenden Abschnitten wird das Abwasserkonzept der Lambertsmühle mit den hier for-mulierten Leitsätzen abgeglichen.

### Entspricht das Lambertsmühlenkonzept dem Stand der Technik?

Eine Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser in ein Gewässer darf gem. § 7a WHG nur dann erteilt werden, wenn die Schadstofffracht des Abwassers so gering gehalten wird, wie dies bei Einhaltung der jeweils in Betracht kommenden Verfahren nach dem Stand der Technik mög-lich ist. Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emis-sionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährlei-stung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminde-rung von Auswirkungen auf die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt.

Beim Bau und Betrieb von Abwasseranlagen sind gem. § 18b WHG in Verbindung mit § 57 LWG die jeweils in Betracht kommenden Regeln der Technik einzuhalten. Dazu zählen im besonderen die technischen Bestimmungen, die von der zuständigen Landesbehörde durch Bekanntmachung eingeführt wurden. Darüber hinaus können aber auch die Ausarbeitungen technisch-wissenschaftlicher Organisationen den Wissensstand zu den Regeln der Technik darstellen.

Die Abwasserbehandlungsanlage der Lambertsmühle besteht nach der im Konzept dargestellten Separation von Gelbwasser aus einem Rottesack als Vorklärung und einem nachgeschalteten Pflanzbeet. Die Regeln der Technik für diese Anlage sind im Arbeitsblatt ATV - A 262 der abwassertechnischen Vereinigung e.V., bzw. darauf aufbauend im Merkblatt Nr. 23, Abwasserbehandlung in Pflanzenanlagen, des Landesumweltamtes NRW definiert. Die Regeln der Technik beschränken sich allerdings nur auf das Pflanzbeet, für die Vorklärung des Braunwassers in einem Rottesack und die Urinseparation sind Regeln der Technik bisher nicht beschrieben.

Festzustellen ist, dass das Pflanzbeet der Anlage Lambertsmühle entsprechend den Regeln der Technik geplant, bemessen und ausgeführt wurde. Differenziert ist die Vorklärung zu beurteilen. Die technischen Regeln schreiben eine Vorklärung zur Abtrennung der schlammigen Abwasserinhaltsstoffe zwingend vor. Die Ausgestaltung bleibt im Ermessen des Planers bzw. der Genehmigungsbehörde. Empfohlen wird die Vorklärung als Mehrkammerabsetzgrube, die im vorliegenden Falle gewählte Rottesacklösung erfüllt nur die Forderung nach Zurückhaltung der schlammigen Inhaltsstoffe. Nicht erfüllt werden jedoch die Forderungen nach einer technisch einwandfreien und hygienisch unbedenklichen Funktionalität. So ist die Handhabung des Rottesackes sehr umständlich und schwierig, dabei besteht immer die Gefahr, dass das Wartungspersonal mit hygienisch bedenklichem Material in Berührung kommt. Die Versuche, die im Rottesack angesammelten Fäkalien einer Kompostierung mit dem Ziel einer Hygienisierung zuzuführen, waren bisher nicht erfolgreich. Die dazu notwendige Temperatur von mindestens 65 °C kam während der Versuche nie zustande. Die Versuche sollen weitergeführt werden, mit dem Ziel, über eine Langzeitrotte (4 Jahre) eine Hygienisierung herbeizuführen. Insofern ist festzustellen, dass das Abwasserkonzept der Lambertsmühle derzeit nur in Teilen den Regeln der Technik entspricht.

### **Erfüllt die Abwassereinleitung aus der Abwasserbehandlungsanlage Lambertsmühle die einschlägigen Emissionsnormen?**

Die Beurteilungsgrundlage liefert die Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV). Die im Anhang 1, häusliches und kommunales Abwasser, definierten Anforderungen stellen den Stand der Technik dar. Mit der jetzt gültigen Fassung der Verordnung ist diese auch auf Kleineinleitungen anwendbar.

Für Kläranlagen der Größenklasse 1 (kleiner als 60 kg/d BSB 5) werden folgende Anforderungen gestellt :

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	150 mg/l
Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen (BSB5)	40 mg/l

Diese Werte wurden so in den wasserrechtlichen Erlaubnisbescheid des Rheinisch-Bergischen Kreises vom 15.07.1999 aufgenommen. Nach Sichtung der vorgelegten Analyseergebnisse ist festzuhalten, dass bei allen Untersuchungen die festgesetzten Überwachungswerte sicher eingehalten wurden. Der Abbaugrad im Pflanzbeet beträgt beim CSB im Mittel 90 %.

## Entspricht die Reststoffbeseitigung/-verwertung den Anforderungen der Gemeinwohlverträglichkeit?

- Verwertung Gelbwasser

Innerhalb des Sanitärkonzeptes der Lambertsmühle erfolgt eine konsequente Separierung des anfallenden Urins. Dieser wird in dem sogenannten Gelbwasserspeicher gelagert. Die Lagerung erfolgte zeitweise ohne Zusätze, zeitweise wurde der gelagerte Urin angesäuert. Die Ansäuerung sollte eine mögliche Ammoniak-Strippung verhindern.

Ein Versuch zur Urinlagerung hat jedoch gezeigt, dass unabhängig vom pH-Wert nahezu keine Stickstoffverluste auftreten. Insofern wurde während der späteren Betriebsphasen auf eine Ansäuerung verzichtet. Aus Gründen der Hygienisierung könnte jedoch eine dauerhafte Ansäuerung notwendig werden.

Der gelagerte Urin wird aus dem Gelbwasserspeicher durch einen ortsansässigen Landwirt abgefahren, im Bereich des landwirtschaftlichen Betriebs in den dortigen Güllebehälter gefüllt und letztendlich als Gülle-Uringemisch auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht. Die begleitenden Düngeversuche ergaben für diese Mischung die optimale Düngewirkung. Würde auf Dauer angesäuertes Urin ausgebracht, wäre eine mögliche Versauerung des Bodens zu berücksichtigen, die eine Kalkausgleichsdüngung notwendig werden lässt.

Weitere Untersuchungen haben dokumentiert, dass der auszubringende Urin Arzneimittelrückstände beinhaltet.

Nach einer vorzunehmenden Bewertung ist zumindest vorläufig festzustellen, dass die hier praktizierte Verwertung des Urins nicht gemeinwohlverträglich erfolgt. Dies zunächst auch aus formellen Gründen, da nach Düngemittelrecht Urin kein Düngemittel ist und insofern als solches auch nicht Verwendung finden darf.

Auch materielle Gründe sprechen gegen eine Fortführung dieser Art der Urinverwertung. Der Gehalt an Arzneimittelrückständen lässt eine Verlagerung der Belastung in Richtung Schutzgut Boden befürchten. Auch hygienische Bedenken sind vorzutragen. Diese haben dazu geführt, dass das MUNLV des Landes Nordrhein-Westfalen die Praxis des Vermischens von Gülle mit häuslichen Abwässern verboten hat. Das Ministerium bezieht sich dabei u.a. auf einen Beschluss des VGH Baden-Württemberg, dort heißt es : "Da es auch nicht auszuschließen ist, dass diese schädlichen Substanzen, wie sie regelmäßig in häuslichen Abwässern enthalten sind, nach ihrem Aufbringen auf landwirtschaftliche Flächen versickern und so in das Grundwasser gelangen, stehen einer Beseitigung ungeklärter häuslicher Abwässer durch Aufbringen auf landwirtschaftlich genutzte Böden regelmäßig Gründe des Wohls der Allgemeinheit entgegen." Das es sich bei dem im Speicherbehälter der Anlage Lambertsmühle gesammelten Gelbwasser um Abwasser im Sinne der wassergesetzlichen Regelungen handelt, steht aufgrund der Vermischung mit Reinigungs- und Spülwässern zweifelsfrei fest.

Zu dem gleichen Themenkomplex stellt das Bundesverwaltungsgericht in einem Beschluss aus dem Jahre 1990 fest, dass die Aufbringung von mit Gülle vermischten, ungeklärten häuslichen Abwässern aufgrund der damit verbundenen Gefahren für die menschliche Gesundheit keine ordnungsgemäße landwirtschaftliche Bodennutzung darstellt.

- Fäkalienkompostierung

Die mittels Rottesack aus dem Abwasserkreislauf separierten Fäkalien sollten nach einer gewissen Verweildauer einer Kompostierung zugeführt werden, der gewonnene Kompost anschließend zur Bodenverbesserung gärtnerisch oder landwirtschaftlich genutzter Flächen Verwendung finden.

Wie bereits ausgeführt sind die Kompostierungsversuche noch nicht erfolgreich abgeschlossen. Die zur Hygienisierung notwendigen Temperaturen wurden nicht erreicht. Darüber hinaus stellt sich die Handhabung der Rottesäcke beim Umfüllen der Inhalte in die Komposter aus der Sicht des Arbeitsschutzes als sehr problematisch dar, dies vor allem vor dem Hintergrund, dass bei Betreibern von Kleinkläranlagen Fachpersonal mit entsprechender Sicherheitsunterweisung nicht zur Verfügung steht.

Auch unter der Voraussetzung, dass eine funktionierende Kompostierung zustande kommt, bestehen zum Einsatz von Fäkalkomposten erhebliche Bedenken. Formell unterfallen die Fäkalkomposte nicht den Regelungen der Bioabfallverordnung, sondern sind vielmehr nach der Klärschlammverordnung zu beurteilen. Die Verwendung von Klärschlamm ist nach der Klärschlammverordnung auf bestimmte Kulturen beschränkt und nur unter Berücksichtigung seuchenhygienischer Auflagen möglich.

Bezüglich der Rechtsprechung wird auf die Ausführungen zum Aufbringen des Gelbwassers verwiesen, im übertragenen Sinne gelten diese Entscheidungen auch für die Fäkalkomposte.

### **Erfüllt das Lambertsmühlenkonzept das Nachhaltigkeitsgebot der Ressourcenschonung ?**

- **Wasserkreislauf**

Die sparsame Verwendung der Ressource Wasser ist als Zielsetzung bereits seit langer Zeit im Wasserhaushaltsgesetz festgeschrieben. Die Schwemmkanalisation, innerhalb derer wir Trinkwasser eigentlich nur als Transportmittel einsetzen, wird dem Nachhaltigkeitsgedanken insofern nicht gerecht. Das Lambertsmühlenkonzept stellt zumindest bei der Gelbwasserseparation eine Alternative dar. Für den Transport der Fäkalien muss jedoch nach wie vor Wasser als Transportmittel erhalten. Insofern findet zwar eine gewisse Wassereinsparung statt, insgesamt gesehen muss diese für die hiesige mitteleuropäische Region eher als wenig bedeutend dargestellt werden.

- **Energiebedarf**

Der Energiebedarf der Anlage resultiert aus der Notwendigkeit zwischen Vorklärung und Pflanzbeet eine Hebeanlage zu installieren. Ein weiterer Energieeinsatz wird ausgelöst durch die Transportleistung für das Abfahren, Mischen und Aufbringen des Gelbwassers, sowie die gegebenenfalls notwendige Kalkung der Böden. Insofern unterscheidet sich der Energieverbrauch der Anlage Lambertsmühle nicht wesentlich von dem einer herkömmlichen Anlage. Zum Vergleich ist darauf hinzuweisen, dass Pflanzbeetanlagen mit einer Absetzgrube als Vorklärung bezüglich des Anlagenbetriebes ohne jeglichen Energieeinsatz, mit Ausnahme der Schlammabfuhr alle 2 Jahre, auskommen.

- **Natürliche Bodenfunktionen**

Eine der Zielsetzungen des Lambertsmühlenkonzeptes ist es, den Nährstoffkreislauf zu schließen und somit den Eintrag von Nährstoffen in den Wasserkreislauf zu vermeiden.

Abgesehen von der Tatsache, dass das Schließen des Nährstoffkreislaufes nur eingeschränkt funktioniert, stellt sich die Frage, ob nicht die negativen Folgen aufgrund der Verlagerung von Schadstoffen in das Medium Boden, den positiven Nutzen der Nährstoffsubstitution bei weitem überwiegen. Näheres dazu wurde bereits ausgeführt. Zur Begrenzung des Eintrages von Schadstoffen bei der Düngung landwirtschaftlicher Flächen wird aus einer gemeinsamen Verlautbarung der Bundesministerien für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft sowie Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit wie folgt zitiert :

"Ökologisch sinnvolle und nachhaltige Kreislaufwirtschaft wird auf Dauer unmöglich, wenn von außen Schadstoffe in die Kreisläufe eingeschleust werden. Eine angemessene Begrenzung des Schadstoffeintrages über Düngemittel ist Teil einer Lebensmittelsicherheit "vom Acker bis zum Tisch" und Voraussetzung dafür, dass wir unsere landwirtschaftlichen Böden dauerhaft nutzen können."

Beobachtet man die derzeitige Situation, so ist festzustellen, dass landwirtschaftliche Flächen heute zur Entledigung aller nur möglichen Substanzen dienen, die Liste der Materialien ist endlos lang, sie erstreckt sich von Jauche, Gülle, Festmist über Bioabfälle bis hin zu Reststoffen aus der Abwasserbeseitigung und anderen Reststoffen aus der industriellen Produktion. Die Stickstoffüberschüsse aus der Düngung liegen im Mittel für NRW noch immer bei über 100 kg/ha. Ist es insofern vernünftig, dieser langen Liste das separierte Gelbwasser und die Fäkalkomposte noch hinzuzufügen? Die Antwort muss hier zunächst offen bleiben, die Diskussion wird hier möglicherweise erst in Gang kommen.

### Zusammenfassung

Aus den Inhalten dieser kurzen Abhandlung wird deutlich, dass das Prädikat "wasserrechtlich uneingeschränkt zukunftsfähig" derzeit nicht verliehen werden kann. Insofern besteht auch nicht die Möglichkeit, Anlagen mit gleichem Konzept wasserrechtlich zuzulassen.

Die Probleme des Umgangs und der Verwertung der Reststoffe sind nicht gelöst.

Die Behandlung der abgetrennten Fäkalien muss bezüglich Handling und Funktionsfähigkeit der Anlagenkomponenten deutlich verbessert werden.

Lösungsmöglichkeiten wie eine zentrale Aufbereitung des Gelbwassers, sowie Verwertung der Fäkalien in Biogasanlagen sind denkbar, dazu wären Organisationsmodelle zu entwickeln.

Die hier vorgenommene Betrachtung bezieht sich im wesentlichen auf die rechtlichen Komponenten, wobei sehr schnell klar wurde, dass hier nicht nur das Wasserrecht zu betrachten war, andere Rechtsbereiche wie das Bodenschutzrecht, das Abfallrecht und das Düngemittelrecht spielten eine ebenso große Rolle.

Ausgenommen aus der Betrachtung der Nachhaltigkeit wurden die Fragen der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Denn über den Sachverhalt, dass sich diese Technologie nur dann durchsetzen kann, wenn sie auch wirtschaftliche Vorteile bietet und gleichzeitig einfach und sicher zu handhaben ist, müssen wir uns alle im Klaren sein.

# Die internationale Entwicklung von "Ecological Sanitation"

Prof. Dr. Ralf Otterpohl

TUHH, Technische Universität Hamburg-Harburg, Eißendorfer Straße 42, 21073 Hamburg,  
Tel 040/42878-3207, otterpohl@tuhh.de

Weltweit ist im Bereich der Abwasserentsorgung eine katastrophale Situation zu beklagen. Etwa 2,4 Milliarden Menschen haben keinerlei Abwassersystem, 2,8 Milliarden Menschen benutzen einfachste Gruben und in den allermeisten Teilen der Welt funktionieren die konventionellen Abwassersysteme schlecht, die Abwasserreinigung ist im weltweiten Maßstab eher eine Ausnahme, Nährstoffelimination fast nicht vorhanden. Es werden viele Gewässer mit Rohabwasser und damit mit Fäkalien belastet, die ein hohes Gefährdungspotenzial für die anliegende Bevölkerung haben. Diese Situation trägt im erheblichen Maße zu den etwa 5 Millionen Toten (WHO) bei, die jedes Jahr an Wasserverschmutzung sterben. Zusätzlich wird die Wasserknappheit in vielen Teilen der Welt immer dramatischer und die Abspülung von Dünger und organischen Stoffen in die Gewässer führt zu einer Verschärfung der Situation der Bodenerosion. Alternativen sind dringend erforderlich und in einem kleineren Maßstab in ländlichen und peri-urbanen Gebieten auch bereits entwickelt, Lücken gibt es allerdings für angepasste Lösungen in dicht besiedelten urbanen Gebieten.

"Ecological Sanitation" ist keine spezielle Technik, sondern eine Reihe von Prinzipien. Es geht darum, Fäkalien abgeschlossen von der Umwelt zu hygienisieren. Die anschließende Düngernutzung auf einer ausreichend großen Fläche ist ein weiteres wichtiges Grundprinzip. Die entsprechenden Systeme haben eine hohe Wassereffizienz und können durch Rückführung der organischen Stoffe und des Düngers die Bodenfruchtbarkeit in der Landwirtschaft erhalten helfen. Es gibt einige Möglichkeiten, auf vorhandene Abwassersysteme umzustellen. So ist es möglich, von den soweit verbreiteten Grubensystemen (pit latrines) in eine Richtung zu gehen, dass diese wesentlich flacher gebaut werden, wenig oder kein Wasser mit eingeleitet wird und dann auch zwei Gruben alternierend benutzt werden. Damit ist vor der Entnahme eine Phase mit einer zumindest teilweisen Hygienisierung sicherzustellen. Der wesentliche weitere Schritt wäre dann die Abtrennung des Urins. Auch für konventionelle Schwemmkanalsysteme ist eine Umwandlung in "Ecological Sanitation" möglich. Dieses geht ganz wesentlich mit der Abtrennung von Urin am Anfallort, also mit der Implementierung von Sortiertoiletten. Ein konventionelles Abwassersystem, bei dem der größte Teil des Urins an der Quelle erfasst und verwertet wird, kann in Kombination mit einer gut arbeitenden Abwasseranlage auch als "Ecosan" bezeichnet werden. Die Abwasseranlage braucht dann keine Nährstoffelimination mehr, da die verbleibenden Nährstoffe nach der Urinseparation durch Inkorporation in die Biomasse aufgenommen werden können. Bei Vorhandensein von Industrieabwasser sind hier natürlich auch andere Situationen möglich.

Die Entwicklung von Systemen nach den Prinzipien der "Ecological Sanitation" hat in den letzten zwei bis drei Jahren eine stürmische Entwicklung erfahren. Besonders aufgrund der Arbeiten in Schweden und Deutschland sind jetzt weit mehr Fachleute an dieser Thematik interessiert. Auch die einfachen Systeme, die in den ländlichen Regionen in Asien, Afrika und Mittel- und Südamerika eingesetzt werden, haben damit mehr Unterstützung gefunden.



Auf dem gerade zu Ende gegangenen 3. Weltwasserforum in Kyoto, Japan, war "Ecological Sanitation" ein großes Thema. Es gab eine Vielzahl Veranstaltungen zu diesem Thema und in Gesprächen mit hochrangigen Vertretern des UN Environmental Programme, UN Development Programme und Weltbank Water and Sanitation Program (um nur einige zu nennen) wurden konkrete Absprachen getroffen, um derartige Systeme weiter zu verbreiten und die Ansätze für urbane Regionen weiterzuentwickeln. Auch die IWA (International Water Association) hat sich dieses Themas angenommen, in Kyoto wurde von der IWA eine eigene Veranstaltung zum Thema "Ecological Sanitation" angeboten. Es gibt inzwischen eine Arbeitsgruppe zum Thema "Sustainable Sanitation", die ein großes internationales Symposium für den April 2003 in Lübeck mit der GTZ zusammen organisiert. Es werden 350 bis 400 Fachleute aus aller Welt erwartet, was auch ein weiteres Zeichen für das rapide wachsende Interesse ist.

Die Projekte, die die Kriterien des "Ecological Sanitation" erfüllen, waren bisher hauptsächlich in ländlichen und peri-urbanen Regionen zu finden. Besondere Schwerpunktländer sind China, Vietnam, Mexiko, Südindien, einige afrikanische Länder, darunter Südafrika und Mosambik und neuerdings besonders stark auch Uganda und Kenia. Aber auch in vielen anderen Ländern sind Projekte durchgeführt worden. Besonders in China gibt es jetzt eine Weiterentwicklung in Richtung von dichter besiedelten urbanen Räumen, hier wird auch in einem Maßstab von etlichen tausend Personen vorgestoßen. Eine annähernd vollständige Übersicht über Projekte mit den "Ecological Sanitation" Prinzipien in der Welt würde inzwischen eher ein Buch als nur wenige Seiten füllen. Daher werden hier die technologischen Prinzipien angesprochen, die sich bisher durchgesetzt und bewährt haben.

In den ländlichen Bereichen von heißen Ländern ist die Entwicklung sehr eindeutig in Richtung von Trocknungstoiletten gegangen. Diese haben den Vorteil, dass die Toiletten so erstellt werden, dass eine weitgehende Trocknung und Erhitzung von Fäkalien erreicht wird und damit eine hervorragende Hygienisierung zustande kommt. Diese Systeme werden in der Regel oberhalb der Erde gebaut, um einen Kontakt von Fäkalien und Grundwasser bzw. Regenabfluss in den Regenzeiten zu vermeiden. Dabei ist grundsätzlich eine getrennte Erfassung des Urins erforderlich, da ansonsten keine Trocknung erfolgen kann. Durch die Anordnung von zwei Kammern wird es möglich, jeweils eine Kammer für ein Jahr zu benutzen, dann den Toilettensitz umzustellen und während die zweite Kammer benutzt wird, eine weitere Trocknung und Hygienisierung des Inhaltes der ersten Kammer zu erlauben. Bei der Entnahme sind seit einem Jahr keine weiteren frischen Fäkalien in diesen Behälter gelangt, und es hat zumindest eine heiße und trockene Saison gegeben. Die Menge des verbleibenden Substrates, die sich bei der Trocknung der Fäkalien gebildet hat, ist sehr gering, es entstehen lediglich etwa zwanzig bis dreißig Kilo Trockenmasse pro Person und Jahr. Trocknungssysteme werden in weniger heißen Ländern oft mit Mischungen aus Erde, Kalk und Asche oder auch nur Erde und Kalk versorgt, nachdem defäkiert wurde, damit ist auch ohne starke Sonneneinstrahlung eine Trocknung, Hygienisierung bzw. teilweise auch eine Kompostierung zu erreichen.

Eine besondere Problematik mit Trockensystemen ist in den Ländern gegeben, wo Menschen für die Analreinigung Wasser verwenden. Dieses betrifft etwa die Hälfte der Weltbevölkerung, vorwiegend moslemische Bevölkerungen, aber auch den größten Teil von Indien. Hier ist die Trocknung schwieriger und es ist dafür Sorge zu tragen, dass das Waschwasser nicht in die Fäkalkammern gerät. In einem GTZ-Projekt, in dem das Ingenieurbüro OtterWasser gemeinsam mit der GTZ ein Trocknungstoilettensystem für Mali in Westafrika entwickelt hat, wurde von den Menschen dort abgelehnt, sich zum Waschen an einen anderen Platz zu begeben. Daher wurde hier eine Filterschicht eingebaut, so dass das Waschwasser ablaufen kann. Da-

mit hat auch hier die Trocknung gut funktioniert. Bei vielen der Projekt klappt die Trocknung und Wiederverwendung der Fäkalien sehr gut, da es eine geringe Menge ist und auch nur einmal jährlich eine Entnahme erforderlich ist. Problematischer ist der Umgang mit dem gesammelten Urin, da die Mengen naturgemäß wesentlich größer sind. Leider werden in vielen Projekten einfach Versickerungsanlagen für Urin gebaut, was natürlich dann zu einer drastischen Grundwasserbelastung führt. Es muss versucht werden, einfachere Wege zur Urinverwendung zu finden. In ländlichen Bereichen wird mit der Trocknung von Urin experimentiert, um die Speicherbarkeit und Transportfähigkeit zu erhöhen. Diese Arbeiten sind schwierig, da auch im Urinbereich erhebliche Mengen von Waschwasser anfallen. Die Nutzung von Urin ist bei größeren Projekten naturgemäß einfacher, da dann eine professionelle Wartung des Systems möglich wird, und durch die größeren Mengen auch ein Transport und eine gezielte Verwendung in der Landwirtschaft zu erzielen ist. Grundsätzlich wird die Nutzung von Urin als Dünger in den ärmeren Ländern der Welt immer interessanter, da die Preise für Handelsdünger zum Teil drastisch gestiegen sind. Die bisher gewährten Zuschüsse zu Dünger werden immer häufiger vom internationalen Währungsfonds (IWF) verboten, was dazu führt, dass die Bauern keinen Dünger mehr kaufen können, dann noch weniger Ertrag haben und nach einigen Jahren ihr Land nicht mehr halten können. Diese Situation ist dramatisch und von daher ist die Implementierung von Abwassersystemen mit einer sicheren Düngerrückgewinnung ganz wesentlich für die Entwicklung dieser landwirtschaftlich geprägten Länder. Im Falle des Baues von Schwimmkanalsystemen wird diese Möglichkeit der Düngernutzung in den meisten Fällen unmöglich gemacht. Gleichzeitig werden die Gewässer verschmutzt.

Abwasserreinigungsanlagen werden in Entwicklungsländern meist gar nicht gebaut, und wenn sie gebaut werden, fallen sie sehr häufig nach wenigen Jahren aus. Der Vorteil bei Systemen nach den Prinzipien des "Ecological Sanitations" ist die Möglichkeit, eine Nutzung der in der Siedlung entstehenden Stoffe zu erreichen und damit einen weitgehenden Gewässerschutz bei gleichzeitiger finanzieller Entlastung der Landwirtschaft zu erreichen. Bei der Nutzung von Urin muss beachtet werden, dass bei Anwendung von Pharmaka die Reste dieser Stoffe im Urin wiederzufinden sind, auch natürliche und synthetische Hormone sind darin zu finden. Es wird daher geraten, Urin für ein halbes Jahr zu speichern, und ihn vor der Saat in den Oberboden einzuarbeiten, wo dann ein weiterer Abbau der Mikroschadstoffe erfolgen kann.

Für die dichterbesiedelten Gebiete, besonders in Südost- und Ostasien, gibt es viele Projekte, die eine getrennte Erfassung von geringverdünntem Toilettenabwasser und ihre Behandlung in Biogasanlagen durchführen. Auch diese Technik ist erfolgreich, als schwierig stellt sich oft die Nutzung des Biogases heraus. Die Behandlung in Biogasanlagen bietet sich auch in dichter bebauten urbanen Gebieten an. Weitere Entwicklungen gehen in die Richtung, dass bestehende Grubentoiletten sukzessive verbessert werden. Da immerhin etwa 2,8 Milliarden Menschen derartige Toiletten haben, ist hier ein großes Potenzial für die Verbesserung der Umweltsituation in der Welt mit sehr geringem finanziellen Einsatz zu finden. Die bisherigen Arbeiten gehen eher in die Richtung, die Gruben flacher zu machen, zwei Gruben alternierend zu nutzen, und damit die Entnahme zu erleichtern. Zusätzlich wurde eine Ventilierung eingeführt. Damit konnten diese Toiletten erheblich verbessert werden, allerdings wird durch die Versickerung des Urins ein großer Teil der Nährstoffe ausgetragen. Auch die aus traditionellen Anwendungen stammende Idee, auf der gefüllten Grube nach Entfernung der Toilette einen Baum zu pflanzen, um die Nährstoffe aufzunehmen, funktioniert dann besser, wenn Urin getrennt gesammelt und genutzt wird. Da eine Person Dünger für ca. 50 bis 400 qm erzeugt (je

nach Pflanze, Klima und Zahl der Ernten), ist die Einbringung in eine Grube von den Massenbilanzen her sicher in den meisten Fällen mit einer starken Belastung des Grundwassers verbunden. In einer sehr dichten und großen Vorortsiedlung von Dakar wurden Nitratkonzentrationen von 100 bis 600 mg/l gemessen. Die Quelle kann in diesem Fall fast ausschließlich beim Urin liegen. Von daher wäre als nächster Schritt bei der Verbesserung von Grubensystemen eine getrennte Sammlung des Urins einzuführen. Der Effekt dieser Maßnahme hätte erhebliche Auswirkungen, wenn er für einen großen Teil der vorhandenen Systeme realisiert werden könnte.

Bei der Entwicklung von Systemen für mehrstöckige Wohnhäuser in China wurde von der Forschungsgruppe EcoSanRes (Sida/SEI) aus Schweden eine Idee präsentiert, wo die Fäkalien in Trockentoiletten gesammelt und dann in einen Fallschacht geschoben werden und damit ohne Verdünnung gesammelt und hygienisiert werden können. Ohne Wasser- und Urinbeimischungen bleibt die Menge klein genug, um einen Transport auch in urbanen Bereichen zu ermöglichen. Zugleich wird der Urin getrennt gesammelt und soll einer Nutzung zugeführt werden. Dieses System wird derzeit geplant für eine Siedlung in China mit ca. 15.000 Einwohnern. Dieses Prinzip ist sicherlich ausbaufähig, gleichzeitig müssen allerdings besonders für den urbanen Raum platzsparende Möglichkeiten einer Grauwasserbehandlung gefunden werden. Damit lässt sich dann lokal das Grundwasser wieder auffrischen, was zu einer Entspannung der dramatischen Wasserknappheit in großen Teilen Chinas beitragen kann. Neben diesen genannten Entwicklungen gibt es eine Vielzahl von Projekten, die eine Kompostierung von Fäkalien durchführen bzw. anstreben. Es ist allerdings anzumerken, dass der sehr enge Bereich eines Feuchtigkeitsgehaltes von zwischen 50 und 70% nur schwer einzuhalten ist. Daher sind diese Systeme je nach klimatischen Bedingungen eher als Trocknungssysteme anzusehen. Die Gefahr einer zu starken Vernässung kann durch getrennte Erfassung des Urins ausgeräumt werden. Besonders erfolgversprechend sind Projekte in Australien, bei denen in Kompostierungsanlagen mit und ohne Wasserspülung Würmer eingesetzt werden, die die Fäkalien hygienisieren und eine Entwässerung des Materials erlauben.

Es hat sich gezeigt, dass bei Projekten in Mittel- und Südamerika, Afrika und Asien die Präsentation von Projekten in Europa und besonders in Deutschland eine wesentliche Rolle bei der Vermittlung der Grundideen spielt. Es ist sehr schwer vermittelbar, in anderen Teilen der Welt "Ecological Sanitation" zu propagieren, dann aber keine Projekte aus dem eigenen Land zeigen zu können. Die in Europa, besonders in Schweden und Deutschland entwickelten Technologien haben damit eine sehr grosse Bedeutung, auch wenn in anderen Teilen der Welt die Technologien zunächst etwas anders aussehen. Allerdings sind die Urintrennsysteme sowie die Vakuum-Biogassysteme besonders für den urbanen Bereich in den etwas höher entwickelten Entwicklungsländern besonders aussichtsreich, da sie ein gutes Potenzial auch in dicht besiedelten Regionen haben. Es ist abzusehen, dass auch im urbanen Maßstab jetzt größere Projekte angefangen werden, wobei auch diese Technologien eine große Rolle spielen werden. Bei allen Projekten ist es einfacher, in Neubaubereichen "Ecological Sanitation" zu implementieren, da naturgemäß die Umrüstung vorhandener Systeme wesentlich schwieriger und kostenaufwendiger ist. Es ist allerdings auch zu sehen, dass allein in Südostasien jährlich für viele Millionen Menschen Neubauten erstellt werden, oft in großen zusammenhängenden Siedlungen. In diesen Bereichen ist der Einsatz der sich jetzt abzeichnenden Entwicklungen von "Ecological Sanitation" relativ einfach zu bewerkstelligen, allerdings ist besonders für diesen urbanen Bereich noch einiges an Entwicklungsarbeit nötig. Ein wesentlicher Teil dieser Entwicklungen wird in Europa zu leisten sein.

# Zusammenfassung

Dr. Martin Oldenburg

Für die Lambertsmühle, eine historische Wassermühle im Bergischen Land bei Burscheid, wurde ein neues Abwasserkonzept mit der getrennten Erfassung von Teilströmen erarbeitet. Die Philosophie der Teilstromkonzeption ist bei der industriellen Produktion bereits weit verbreitet und wird als konsequente Weiterentwicklung auch für die Behandlung häuslichen Abwassers weitergedacht.

Es wird erwartet, dem bisherigen end-of-pipe-System mit seinen bekannten Nachteilen alternative Verfahrensmöglichkeiten entgegenzusetzen, so dass eine Erweiterung der Palette der möglichen Verfahren in der Siedlungswasserwirtschaft ermöglicht wird.

Aufbauend auf den in den skandinavischen Ländern vorliegenden Erfahrungen mit der Urinseparation wurde ein teilstromorientiertes Entwässerungsprojekt für die Lambertsmühle entwickelt. Es handelt sich um eines der ersten Projekte mit der getrennten Erfassung von Urin in Deutschland. Es sollten anhand dieses Pilotprojekts Erfahrungen mit einem solchen Konzept gesammelt werden und Hinweise für die Weiterentwicklung solcher Verfahren gewonnen werden. Es war von vornherein absehbar, dass nicht alle mit einem solchen Konzept verbundenen Fragen in diesem Projekt abschließend gelöst werden können, vielmehr sollten erste Ansätze gefunden werden, die eine weitere Verbreitung von Konzepten auf der Basis von Teilstromtrennung und -behandlung ermöglichen.

Wesentliche Fragestellungen in dem durchgeführten Projekt waren somit die Akzeptanz der neuen Installationen durch die Benutzer und den Verein, die Wirkungsweise der Abwasserreinigungsanlagen und die Auswirkungen auf die Emissionen in die Umwelt.

Anhand der intensiven wissenschaftlichen Begleitung des Betriebs der Abwasseranlagen in der Lambertsmühle können nach 1,5 Jahren die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die separate Erfassung des nährstoffhaltigen Teilstroms Urin ist durch veränderte Sanitärinstallationen möglich und größtenteils auch praktikabel. Nicht alle Installationen sind benutzerfreundlich, hier sind an einigen Toilettenmodellen Modifikationen erforderlich.
- Die Akzeptanz dieser neuen Installationen war mehrheitlich sehr gut, die Idee der Nutzung von Abwasserinhaltsstoffen wurde von den Benutzern begrüßt.
- Die Lagerung des gesammelten Gelbwassers führt auch ohne Konditionierung nicht zu einem Verlust von Stickstoff als Ammoniak, die anfangs befürchteten Geruchsbelästigungen blieben vollständig aus.
- Die Abtrennung und getrennte Sammlung des Urins führt zu erheblich niedrigeren Stickstoffemissionen in das Gewässer, die Behandlungsanlage für das restliche Abwasser kann somit kleiner dimensioniert werden.
- Die Feststoffabtrennung durch einen Rottesack ist effektiv, das Handling mit den Säcken allerdings problematisch. Eine Nachbehandlung der gesammelten Feststoffe zur Hygienisierung z. B. durch Lagerung ist zwingend erforderlich. Langzeitergebnisse hierzu stehen noch aus.
- Pharmazeutische Rückstände ließen sich hauptsächlich im Gelbwasser nachweisen und lagen deutlich unter den in einer repräsentativen Urin-Mischprobe zu erwartenden Werten. Für einzelne Stoffe konnte ein Abbau während der Lagerung festgestellt werden, der tendenziell im sauren Milieu größer war. Aus diesen Erkenntnissen wird eine Zwischenlagerung des Gelbwassers bei niedrigen pH-Werten empfohlen.

- Die im Grauwasser nachgewiesenen pharmazeutischen Substanzen gehörten zur Gruppe der Steroide, die sich aufgrund ihrer guten biologischen Abbaubarkeit nicht mehr im Abfluss des bewachsenen Bodenfilters nachweisen ließen.
- Bei der Verwendung von Gelbwasser als Dünger ist die Stickstoffwirkung gleichwertig zu der von Gülle oder Mineraldünger. Eine Verdünnung des Gelbwassers mit Gülle wird empfohlen. Hierdurch lassen sich Korrosionsschäden und eine zu hohe Salzkonzentration vermeiden. Die Applikation auf Feldfrüchte, Obst und Gemüse sollte unterlassen werden.

Die Abtrennung des Urins vom restlichen Abwasser reduziert die Nährstofffrachten des Abwassers und hält in signifikanter Weise durch den Menschen ausgeschiedene Pharmazeutika und Hormone dem Abwasser und letztendlich auch der aquatischen Umwelt fern. Hier sind weitere Untersuchungen über den Abbau dieser Substanzen bei der Aufbringung als Dünger erforderlich.

Es wird deutlich, dass die Trennung von Abwasserströmen Voraussetzung für die Nutzung von Inhaltsstoffen und die Realisierung eines Kreislaufgedankens in der kommunalen Abwasserwirtschaft ist. Deutlich wird allerdings auch, dass weitere Entwicklungen erforderlich sind, um mit diesem System eine allgemein akzeptierte Alternative zu dem herkömmlichen Entwässerungssystem zu schaffen. Vor dem Hintergrund der derzeitigen Rechtslage werden die Sicherstellung des Betriebes und die Verwendung der Reststoffe Kompost und Urin als problematisch eingestuft.

Die Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Teilströme des kommunalen Abwassers und deren Auswirkung lässt sich erst seit der Realisierung von teilstromorientierten Abwasserkonzepten gewinnen. Diese Projekte sind daher sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene wichtig, um hieraus Weiterentwicklungen zu ermöglichen, die sowohl in Europa als auch weltweit Anwendung finden können und zu einer Stärkung der deutschen Wasserwirtschaft im internationalen Markt führen.





